Concreto e seus Materiais

Propriedades e Ensaios

Luercio Scandiuzzi
Francisco Rodrigues Andriolo



PINI

Concreto e seus Materiais:
propriedades e ensaios

©COPYRIGHT EDITORA PINI LTDA.

Todos os direitos de reprodução ou tradução
reservados pela Editora Pini Ltda.

**Dados de Catalogação na Publicação (CIP) Internacional
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

S294c

Scandiuzzi, Luércio, 1946 —
Concreto e seus materiais : propriedades e ensaios / Luércio Scandiuzzi, Francisco Rodrigues Andriolo. — São Paulo : Pini, 1986.
Bibliografia.
1. Concreto 2. Concreto — Ensaios I. Andriolo, Francisco Rodrigues, 1946 — II Título.

CDD-620.136
-620.1360287
-691.3

86-1432

Índices para catálogo sistemático:

1. Concreto : Ensaios : Engenharia 620.1360287
2. Concreto : Propriedades : Materiais : Engenharia 620.136
3. Concretos : Materiais de construção 691.3
4. Propriedades do concreto : Materiais : Engenharia 620.136
5. Testes de materiais : Concreto : Engenharia 620.1360287

Revisão: Alzira Hisgail e Mara Gama
Produção gráfica: Carlos A. Mazetti
Arte/past-up: Eder A. de Figueiredo
Indústria gráfica: José Pereira da Silva, Wilson Tavares Pinto, Oswaldo Trindade Mello e Francisco Sapienza
Capa: foto (F. R. Andriolo), arte (Eder A. Figueiredo) e fotomecânica (J. P. Silva)

Composto e impresso nas oficinas gráficas da Editora Pini Ltda.
Rua Anhaia, 964 — Bom Retiro
01130 São Paulo, SP — Brasil
telex (011) 37803 PINI

Índice geral

1. Apresentação 1
2. Glossário/Índice Remissivo/Unidades e Conversões 3
3. Materiais 67
4. Proporcionamento e Dosagem do Concreto 251
5. Amostragem 315
6. Propriedades da Mistura de Concreto Fresco 323
7. Propriedades do Concreto Endurecido 351

Agradecimentos especiais

Os autores agradecem às entidades e pessoas que, de maneira direta ou indireta, tenham colaborado para esta edição, em especial a:

- Hector Romilic Pena Muñoz
- José dos Santos Romualdo
- Vera Lucia Quiesi Pinto
- Maria Eliza Cazol Rodrigues
- Carlos Alberto Laureno

Prefácio

Os autores de "Concreto e seus Materiais: Propriedades e Ensaios", com quem eu tive o prazer de conviver profissionalmente durante quase toda a construção da Usina de Itaipu, são dedicados e competentes engenheiros civis, que se especializaram na tecnologia do concreto.

Com a publicação deste livro, os engenheiros Luércio Scandiuzzi e Francisco Rodrigues Andriolo transferem aos seus colegas, que se dedicam ao projeto e construção de estruturas de concreto e, principalmente aos tecnologistas de concreto, uma vasta, variada e preciosa gama de informações sobre os procedimentos para os diversos ensaios sobre concreto e seus constituintes, que hoje não são encontradas em nenhuma literatura, quer seja nacional ou estrangeira.

Os autores, baseados na experiência própria de terem controlado a execução de mais de 15 milhões de metros cúbicos de concreto, apresentam rotinas para o proporcionamento e dosagem dos concretos e transmitem informações sobre as características dos materiais componentes do concreto: agregados, cimentos, materiais pozolânicos, aditivos e água. Descrevem em detalhes as propriedades dos concretos, quer seja mistura fresca ou concreto endurecido, apresentando os resultados e as correlações entre as suas diversas propriedades.

Ao longo deste precioso livro, ilustrado por vasta documentação fotográfica e gráfica, são também encontradas informações sobre procedimento de ensaios executados em laboratórios nacionais, durante os estudos e controle de aproximadamente 30 milhões de metros cúbicos de diferentes tipos de concreto com comparações entre os resultados de várias procedências e referências bibliográficas.

Na certeza de que este livro, de extrema utilidade aos estudiosos do concreto, vai ser muito bem recebido pelos engenheiros em geral, cumprimento efusivamente os meus amigos e ilustres autores pela excelência do trabalho apresentado.

Rubens Vianna de Andrade
Engenheiro Civil

apoio
AECESP - Associação dos Engenheiros da
CESP - Companhia Energética de São Paulo

patrocínio
CIA. CIMENTO PORTLAND ITAÚ

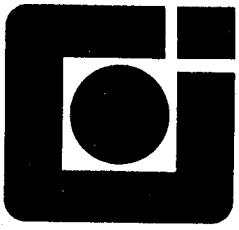
ITAÚ

A grande força do concreto

A tecnologia do concreto começa na pesquisa e desenvolvimento de produtos da Cia. Cimento Itaú. Aperfeiçoar ainda mais os nossos produtos é um objetivo constante. Afinal, os produtos Itaú há muitos anos são a grande força do concreto, firmes aliados da Engenharia brasileira.

Nossos produtos:

- Cimento Portland Comum CP-320
- Cimento classe G-MSR (moderada resistência à ação dos sulfatos)
- Cal Hidratada para Construção Civil
- Cal Industrial - Virgem e Hidratada



COMPANHIA CIMENTO PORTLAND ITAÚ

Alameda Santos, 1357 - São Paulo, SP
Telefones 284-7122 e 284-4811

EMPRESAS ITAÚ - - COMPANHIA CIMENTO PORTLAND ITAÚ
- CIMENTO ITAÚ DE CORUMBÁ S.A.
- CIMENTO IRAJÁ S.A.
- COMPANHIA DE CIMENTO SALVADOR
- CIMENTO ARATU S.A.
- CIMENTO TOCANTINS S.A.

1 Apresentação

Da abertura do XV Seminário Nacional de Grandes Barragens, em Novembro de 1983, no Rio de Janeiro, constou uma homenagem ao Prof. Roy Washington Carlson, pelos relevantes serviços prestados ao desenvolvimento da Tecnologia do Concreto no País.

Das palavras de agradecimento, proferidas pelo Prof. Carlson, chamou-nos a atenção: (De 1-1).

"First let me pay tribute to the concrete technologists of Brazil. I think they are the best in the world. Of course I haven't been in all countries in the world but in the several countries where I have been the Brazilian Concrete Technologists came out on top".

A comunidade dos tecnologistas de concreto da Nação é muito grata ao Prof. Carlson, não só pelos elogios, mas muito mais pelos ensinamentos recebidos.

Mesmo se tendo observado uma grande evolução nas obras de concreto, nas duas últimas décadas e decorrente disso uma evolução do conhecimento dos materiais e do concreto, paradoxalmente pouco se tem informado sobre essa tecnologia.

Pretendemos, mesmo que de maneira incipiente, fazer divulgar uma parte dessas informações através deste texto, dirigido aos ensaios e propriedades do concreto e de seus materiais constituintes.

Procuramos enfocar a parte correspondente à metodologia de ensaios, sem entrarmos em detalhamentos teóricos, e sim chamar a atenção sobre os cuidados que devem ser tomados na execução de cada ensaio, bem como os fatores de influência nos resultados.

Para o desenvolvimento desse trabalho nos baseamos na metodologia existente, mesmo as adotadas de outros países, visto que, até a época presente, infelizmente, não as possuímos, na totalidade, adotadas oficialmente no País.

(1-1) - XV Seminário Nacional de Grandes Barragens - 1983 - Rio de Janeiro

2 Glossário/Índice remissivo Unidades e Conversões

2.1 — Glossário/Índice remissivo

Ábaco — O instrumento para efetuar operações algébricas, elementares; nomograma. 160

Abatimento (slump) — A medida de consistência de uma mistura fresca de concreto, argamassa, igual ao abaixamento (assentamento) de um corpo de prova moldado, medido com precisão de 5mm, imediatamente após a retirada do molde tronco cônico. 236, 239, 257

Abertura — Tamanho nominal da distância entre os fios da malha de uma peneira. 75

Abissal — Denominação biográfica dada à zona profunda dos oceanos, com profundidades superiores a 5000m e com declividade média de cerca de 1m/km. Rocha magmática consolidada em regiões profundas da crosta, maiores que 2000 m de profundidade. Seus componentes mineralógicos são todos cristalizados e de tamanho aproximadamente igual, milimétricos ou maiores, podendo atingir dimensões decimétricas ou métricas, como nos pegmatitos, em decorrência das condições físico-químicas e tectônicas dos locais onde elas se formaram. Ex.: granito, diorito, gabro, sienito etc. 3

Abóboda — Cobertura encurvada. 3

Abrasão — Processo mecânico de desgaste das superfícies das rochas causado pelo material sólido transportado pelas correntes marítimas e ondas (abrasão marinha), pelos rios (abrasão fluvial), pelas geleiras (abrasão glacial) e pelo vento (abrasão eólica). 536

Abrasão Los Angeles — Ver ensaio de Abrasão Los Angeles. 547

Abrasivo — Material que produz desgaste por choque ou atrito. Os mais utilizados na indústria são: diamante, quartzo, silex, granada. 93, 536

Abscissa — Em um sistema cartesiano a coordenada referente ao eixo dos "XX". 73

Absorção — O processo através do qual um líquido penetra e tende a preencher os poros permeáveis de um corpo sólido poroso; o aumento de peso de um corpo sólido poroso, decorrente da penetração de um líquido em seus poros permeáveis. 80, 81, 86, 268, 462

Acabamento — A última ação que se aplica em uma concretagem após a compactação; textura da superfície; tratamento aplicado a uma superfície da argamassa ou do concreto fresco, recém-colocado, para dar o aspecto desejado. 252

Acabamento com agregado exposto — O acabamento decorativo de concretos arquitetônicos, obtido pela remoção, normalmente após o endurecimento do concreto, de camada superficial de argamassa, expondo o agregado graúdo. 3

Acabamento com colher — Acabamento liso, dado pela colher. 3

Acabamento com desempenadeira — O acabamento da superfície de concreto caracterizado pela textura obtida com desempenadeira. 3

Acabamento com escova — A textura da superfície obtida pela passagem de escova (ou vassoura) sobre o concreto fresco. 3

Acamamento — Plano que separa as camadas contíguas das rochas sedimentares estratificadas. 68

Aceleração — O aumento na velocidade ou na razão de variação, especialmente no apressamento de endurecimento, pega, ou evolução da resistência do concreto. 398

Acelerador — A substância que, adicionada ao concreto, argamassa ou calda, acelera a velocidade de hidratação de cimentos hidráulicos, diminuindo o tempo de pega, ou aumentando a velocidade de endurecimento da evolução de resistência, ou ambos (ver aceleração). 236

Acepilhar — Brunimento; polir com limas finas. 4

Acessórios — Aqueles itens usados para auxiliar na construção de fôrmas, cimbramentos e escoramentos. 4

Acetato — O sal ou ester do ácido acético. 4

Acetato de polivinila — Resina termoplástica, normalmente usada para emulsões ou agentes dispersores, caracterizando-se pela flexibilidade, estabilidade à ação da luz, a transparência aos raios ultravioleta, alta resistência dielétrica, dureza, tenacidade, alto grau de polimerização, podendo ser usada para pintura no concreto. 4

Acetileno — O hidrocarboneto não saturado gasoso, incolor — C_2H_2. 4

Ácida (rocha) — Rocha ígnea que contém teor de sílica superior a 65%. A sílica pode estar livre ou combinada sob a forma de silicatos. Tem como característica cor clara e presença de quartzo. Ex.: Granito. 4

Acidez — A propriedade que tem certas substâncias de liberar íons hidrogênio, quando em solução. 4

Ácido — Substância que em solução aquosa é capaz de liberar íons hidrogênio; substância capaz de ceder prótons. 98, 100, 121

Aço de alta resistência — Aço com elevada resistência ao escoamento (fy). No caso de aço para armadura, fy $>$ 300 MPa, e baixo teor de carbono ($<$ 0,25%). 4

Acomodação — Fenômeno que se verifica com a plastificação de elementos de uma estrutura sob a ação sucessiva de solicitações diversas e que faz com que a estrutura passe, sob a ação dessas mesmas solicitações, a deformar-se elasticamente. 4

Acrílico — Designação genérica de polímeros dreivados do aldeído acrílico. 4

Acuracidade — Exatidão de uma operação, propriedade de uma medida de uma grandeza física que foi obtida por instrumentos e processos isentos de erros sistemáticos. 75, 163

Adamelito — Rocha plutônica, ácida, que difere dos granodioritos por conter mais feldspato alcalino. 4

Adensamento — Ver compactação. 77, 326

Aderência — A ligação ou fixação do concreto ou argamassa à armadura ou a outra superfície contra a qual é colocado; inclui o atrito devido à retração e o cisalhamento longitudinal no concreto causado pelas saliências da armadura; a ligação da pasta de cimento com o agregado. 92, 478

Aderência à flexão — Em concreto protendido, a tensão entre o concreto e os cabos resultante da aplicação da carga externa. 4

Adesão química — Ligação, ou aderência, entre materiais, resultante da coesão ou adesão desenvolvida por reação química. 4

Adesivo — O grupo de substâncias usadas para unir materiais similares ou não, como, por exemplo, nos serviços de concreto, o uso de resinas epoxídicas. 4

Adiabática — A condição na qual o calor não entra e não sai do sistema. 487

Adição — O material que é moído ou misturado, em quantidade limitada, ao cimento hidráulico durante sua fabricação, como mistura durante o processamento para auxiliar o beneficiamento ou manuseio, ou como uma mistura para modificar propriedades do produto. 133

Aditivo — O termo freqüentemente usado como sinônimo para materiais outros, que não água, agregados ou cimento hidráulico, usados como um componente do concreto ou argamassa e adicionados ao mesmo, durante ou imediatamente antes da mistura. 231

Adobe — Bloco semelhante ao tijolo, preparado com argila crua, secada ao sol, à qual é também adicionada palha, para se tornar mais resistente. 5

Adsorção — A fixação das moléculas de uma substância na superfície de outra substância. 113

Afanito — Rocha de granulação muito fina, na qual os constituintes individuais não são distinguíveis à vista desarmada. 5

Aferir — Conferir medidas com os respectivos padrões. 5

Afloramento — Qualquer exposição de rochas ou solos na superfície da terra. Podem ser naturais (escarpas, lajeados) ou artificiais (em superfícies de escavação). 5

Afwillite — Um mineral com composição 3 CaO. 2 SiO_2. 3H_2O que ocorre de modo natural na África do Sul, Irlanda do Norte e Califórnia, e artificialmente em algumas misturas de cimento Portland hidratado. 5

Agente(aditivo)de cura — Endurecedor catalisador, protetor contra perda de umidade. 232

Agente(aditivo)incorporador de ar — O adtivo para argamassa ou concreto que possibilita a incorporação de ar durante a mistura e normalmente aumenta a trabalhabilidade e a resistência ao gelo-degelo. 5

Agitação — O processo de manter o concreto misturado em movimento suave, suficiente para evitar a segregação ou a perda de plasticidade; a mistura mecânica ou homogeneização de caldas ou argamassa fluidas. 5

Agitador — O dispositivo de agitação usado para manter a plasticidade ou evitar a segregação do concreto recém-misturado. Peça do equipamento de injeção acoplado entre o misturador e a bomba injetora, que impede a sedimentação dos produtos sólidos das caldas de cimento. 5

Aglomeração — Formação de uma bola ou massa. 5

Aglutinante — Materiais ligantes, como cimentos, produtos de cimento ou cal, ou materiais silicosos reativos; os tipos de cimentos e condições de cura comandam os vários tipos de ligantes; materiais tais como asfalto, resinas e outros que se constituam na matriz de concretos, argamassas e caldas. 135

Agregado — Material granular, tal como areia, cascalho, pedra britada e escória de alto-forno, usado com um meio aglomerante para constituir o concreto ou argamassa. 67

Agregado descontínuo — Agregado com granulometria descontínua, onde ocorre a falta de uma ou mais frações intermediárias. 5

Agregado graúdo — Agregado retido na peneira de n.º 4 (abertura 4,8 mm). 262, 287

Agregado leve — O agregado de baixa massa específica como por exemplo, a argila expandida, a perlita, a vermiculita ou a escória, usado para produzir o concreto leve. 68

Agregado miúdo — Agregado passante pela peneira n.º 4 (4,8 mm) e predominantemente retido na peneira n.º 200 (0,075 mm). 82, 261

Agregado pesado — O agregado de elevada massa específica como, por exemplo, a barita, a magnetita, a limonita, o ferro ou aço, usado para produzir o concreto pesado. 68

Agregado reativo — Agregado contendo substâncias capazes de reagir quimicamente com os produtos de solução ou hidratação do cimento Portland no concreto ou argamassa, sob condições normais de exposição, resultando em alguns casos em expansões nocivas ou fissuras. 212

Agregado refratário — Materiais que possuem propriedades refratárias e que aglutinados, formando uma massa conglomerada, constituem um corpo refratário. 6

Água adsorvida — A água mantida na superfície de um material por meio de forças eletroquímicas e com propriedades, nas mesmas condições de pressão e temperatura, substancialmente diferentes daquelas da água absorvida ou quimicamente combinada (ver adsorção). 414

Água agressiva — Água que contém determinados íons capazes de provocar a corrosão do concreto. Os principais íons são: do oxigênio, do hidrogênio, sulfatos, cloretos, gás carbônico, de magnésio e amônia. 6

Água capilar — Água retida por tensão superficial nos poros capilares, formando uma película contínua em torno das partículas. 6

Água de mistura — A água na mistura fresca de concreto, argamassa, excluindo-se a água de absorção dos agregados. 134, 228, 240, 353

Água salobra — Água suavemente salinizada com teor de sais maior que da água doce e menor que da água do mar. 6

Agulha de Vicat — A agulha padronizada para determinar a pega de cimentos hidráulicos. 156

Agulha de Gillmore — O dispositivo usado para determinar o tempo de pega de cimentos hidráulicos. 6

Álcali-cálcica — Rocha ígnea onde os plagioclásios são predominantes em relação aos feldspatos alcalinos. 6

Alcalina (rocha) — Rocha ígnea onde os feldspatos alcalinos são predominantes em relação aos plagioclásios, constituindo uma fração superior a 2/3 do feldspato total. Quimicamente o conteúdo em $K_2O + Na_2O$ excede ao da sílica ou da alumina e tem como característica a presença de feldspatóides. Ex.: Nefelina-sienito. 6

Álcalis — Sais de metais alcalinos, principalmente sódio e potássio, sendo normalmente expressos na análise química através dos óxidos de Na_2O e K_2O. 100, 131, 230

Álcool — O composto orgânico que contém pelo menos uma hidroxila ligada diretamente a um átomo de carbono. 6

Alíquota — Parte de uma amostra utilizada para ensaio. 167

Alita — O nome usado por Tornebohm (1897) para identificar o silicato tricálcico, incluindo pequenas quantidades de MgO, Al_2O_3 Fe_2O_3 e outros óxidos; um dos principais constituintes do cimento Portland. A fórmula de constituição é $3CaO.SiO_2$, ou, abreviadamente, C_3S. 6

Aloctone — Rochas que foram transportadas a grandes distâncias do seu local original de deposição por algum processo tectônico, geralmente relacionado a grandes falhas de empurrão ou a dobramentos recumbentes. 6

Alongâmetro — O alongâmetro é um extensômetro mecânico que não possui dispositivo fixo de ligação à estrutura cuja deformação se pretende medir. A ligação é efetuada pelo operador quando executa a leitura, apoiando-o em bases especiais chumbadas à estrutura. É geralmente usado para medir deslocamento de juntas de contração em barragens de concreto, onde suas bases são instaladas em pontos acessíveis da intersecção das juntas com as superfícies das galerias. 6

Alongada (forma do agregado) — Partículas do agregado que possuem a relação do comprimento para a largura, de um prisma retangular circunscrito, maior que um valor especificado. 89, 91

Alteração de rocha — Nome genérico dado à rocha com seus constituintes minerais modificados e transformados pela ação de agentes externos. De acordo com o grau de intensidade dessa modificação tem-se: rocha sã ou pouco alterada, rocha medianamente alterada, rocha muito alterada, rocha extremamente alterada ou decomposta. 70

Alterabilidade — Facilidade relativa que uma rocha possui em decompor ou alterar seus constituintes. Depende das características internas (microfissuras, porosidade, planos de fraqueza intrínseca etc.), da sua composição mineralógica e da intensidade e tempo de duração dos agentes externos naturais e artificiais. 6

Alto-forno — Instalação destin[illegible] a reduzir o minério de ferro, transformando-o em ferro-gusa. 134

Alumina — Óxido de alumínio (A[illegible] 184, 195, 196

Aluminato tricálcico — Composto p[illegible]ndo a formulação $3CaO.Al_2O_3$, abreviadamente C_3A. 131

Aluvião — Designação genérica que engloba os depósitos de cascalhos, areias, siltes e argilas de deposição atual, de origem fluvial, lacustre, fluvio-lacustre, marinha, fluvio-marinha, podendo ser formados nas planícies de inundação, nos leques aluviais de sopé de montanhas e de escarpas, bem como nas planícies costeiras. O termo não é aplicado a sedimentos subaquosos depositados em fundo de mar ou lagos, ou depósitos mal selecionados transportados ou depositados por glaciares. 7

Alvenaria — Construção composta por blocos unitários de pequenas dimensões de modo a serem manuseados por uma só pessoa e constituída por pedras, blocos cerâmicos, blocos de concreto, tijolos, vidros, adobe e normalmente executada *in situ*, ligados ou não por argamassa. 7

Amálgama — Mistura de elementos formando um todo; liga de mercúrio. 7

Ambiente úmido (de cura) — O ambiente de cura existente em uma câmara úmida, caracterizado pela elevada umidade que é obtida pela nebulização (atomização) de água fresca. A aplicação de névoa úmida sobre o concreto, argamassa, pasta. 361

Amigdalas — Vesículas que foram preenchidas posteriormente com minerais formados a partir de soluções aquosas ou gasosas. Constituem-se de agregados minerais de forma arredondada com estrutura concêntrica. 7

Amigdaloidal — Massa rochosa que contém vesículas disseminadas e preenchidas com materiais de composição diferente à da matriz. Ex.: Basalto amigdaloidal. 7

Amoníaco — O gás incolor, solúvel em água, sintetizado a partir do nitrogênio e do hidrogênio (NH_3). 7

Amorfo — Mineral que não apresenta estrutura cristalina, ou cujo arranjo interno é tão irregular que não apresenta forma externa característica. 106, 195

Amostra — Porção, fragmento ou unidade de um produto natural ou fabricado, utilizado para determinar sua natureza, qualidade ou tipo. 144, 315

Amostra composta (amostra média) — Amostra obtida pela mistura de duas ou mais amostras individuais do material. 315

[illegible]re — A unidade de medida de intensidade de corrente elétrica no sistema internacional. 7

[illegible]e — A máxima diferença entre a média e um valor individual. 7

[illegible] — A decomposição de um todo em suas partes constituintes. 183

[illegible]e granulométrica — Determinação das proporções de quantidade de partículas existentes em um material granular, pela separação por peneiras de diferentes aberturas. 73

Análise Térmica Diferencial (ATD) — Indicação da reação térmica pelo registro, através de termopares, das variações de temperatura da amostra em ensaio comparada com uma amostra conhecida, de controle, que é aquecida uniforme e simultaneamente. 198

Ancoragem — No concreto protendido é o sistema que fixa o elemento tensor (fio, cordoalha ou cabo) em certa posição de modo a manter sob tensão. No concreto pré-moldado é o sistema de fixação das peças à estrutura. Na armadura é a região que transfere as tensões de aderência que se desenvolvem. 7

Ancoragem da fôrma — Dispositivo usado para manter a estrutura da fôrma até que o concreto alcance resistência adequada; o dispositivo normalmente é ancorado (embutido) no concreto durante o lançamento da camada subjacente. 7

Ancoragem extrema — O comprimento de armadura, ou ancoragem mecânica, ou gancho, ou combinação destes, além do ponto de tensão nominal zero, na armadura do concreto moldado **in situ**. O dispositivo mecânico para transferir forças de protenção ao concreto de uma peça protendida. 8

Ancoragem mecânica — Qualquer dispositivo mecânico capaz de transmitir os esforços da armadura sem danificar o concreto. 8

Ancoragem tratada — O dispositivo de ancoragem que sofreu tratamento para garantir o efeito de ancoragem. 8

Andaime — A estrutura temporária usada para suportar formas, passarelas, ou a combinações destes; utilizada em construções. 8

Andesita — Mineral triclínico do grupo dos feldspatos; rocha efusívica, porfírica ou felsítica. 70

Andesito — Rocha ígnea extrusiva, de composição mineralógica equivalente ao diorito, possuindo, no entanto, granulação fina. 195

Anédrico (Mineral) — Mineral de contornos irregulares, estranho ao hábito característico de sua espécie mineral. Sin: Anedral, Xenomórfico, Alotrimórfico. 8

Anfibólio — Grupo de minerais de silicatos ferromagnesianos abundante em rochas ígneas e metamórficas. São minerais análogos em composição química aos piroxênios. Dentre eles citam-se: hornblenda, antofilita, cumingtonita, tremolita, actinolita, riebeckita, glaucofana e arfvedsonita. 8

Anfibolito — Rocha metamórfica, xistosa, de granulação média a grossa, composta principalmente de hornblenda e plagioclásio. Produto de metamorfismo regional de grau médio a alto. 71

Anidrita — O mineral sulfato de cálcio anidro ($CaSO_4$); gesso no qual a água de cristalização é retirada por aquecimento ao redor de 160°C; a anidrita natural é menos reativa que a obtida pela calcinação do gesso. 8

Anisotropia — Propriedade de um corpo não possuir isotropia. 122

Ânodo — O eletrodo positivo. 8

Anticlinal — Forma adquirida pela dobra quando as camadas mais jovens estão mais afastadas do centro de encurvamento. Em anticlinais simples as camadas mergulham em direção oposta, enquanto que em anticlinais mais complexos podem mergulhar na mesma direção. 8

Antimônio — Elemento atômico com aspecto metálico branco azulado. 8

Aparelho de Blaine — Permeabilímetro de ar para a medida da área superficial de materiais finos, tais como cimento ou outros. 142

Aparelho de Vicat — O dispositivo de penetração usado para ensaiar cimentos hidráulicos e materiais similares. 130

Apatita — Mineral acessório de quase todas as rochas ígneas; ocorre também em rochas metamórficas, veios e outros depósitos minerais. 8

Apiloamento — A operação de compactar o concreto fresco recém-lançado, pelo uso de um soquete. 8

Aplito — Rocha de composição granítica e de textura fina, ocorrendo sempre em forma de dique. 8

Ar aprisionado — Os vazios de ar no concreto, que não foram incorporados propositalmente e que são significativamente maiores (diâmetro maior de 1mm), e menos úteis do que aqueles decorrentes pela incorporação de ar. 335

Ar incorporado — Bolhas microscópicas de ar, aproximadamente esféricas, intencionalmente incorporadas, normalmente pelo uso de um aditivo, ao concreto ou à argamassa durante a mistura; com diâmetros entre 10 e 1000μm (micrômetros). 326, 335, 377, 411

Aranha — Peça metálica utilizada para a fixação e orientação dos extensômetros para concreto, na instalação de rosetas de extensômetros. É constituída por uma peça central, da qual partem hastes metálicas às quais são rosqueados os extensômetros, os quais são assim impedidos de se movimentar durante a concretagem da camada que os envolve. 9

Aranha (Shebolt) — Acessório utilizado para fixação de fôrmas e esticadores. 9

Arcózio — Rocha sedimentar detrítica constituída por fragmentos arenosos, com predominância de quartzo, rica em feldspato (mais de 25%) e pequena fração argilosa. 9

Ardósia — Rocha metamórfica de baixo grau de metamorfismo. Possui granulação fina, xistosidade tabular perfeita, mas sem segregação de faixas mineralógicas. Produto de metamorfismo regional de argilitos, siltitos e outros sedimentos clássicos de granulação fina. É uma rocha fortemente laminada. 9

Área de aderência — A área da interface entre dois elementos, através da qual a ligação se desenvolve ou pode se desenvolver, como ocorre entre o concreto e as barras da armadura. 9

Área específica — Também designada, inadequadamente, superfície específica. A área superficial de partículas, ou de vazios de ar, contidas em uma massa ou volume unitários de um material. 141, 262

Areia — Sedimento clástico inconsolidado, composto essencialmente de grãos de dimensões entre 0,06 e 2,00mm (Wentworth). Os grãos freqüentemente são de quartzo, podendo também ser de outros minerais. 69, 70, 371

Areia angulosa — Areia grossa que contém partículas angulosas. 371

Areia de Ottawa — Areia de sílica produzida pelo processamento de material obtido por dragagem de depósitos próximos a Ottawa, Illinois, E.U.A., e composta quase que totalmente por grãos arredondados de quartzo quase puro; usada nos ensaios padronizados pelo A.S.T.M. (ver também areia padrão). 203

Areia do IPT — Ver areia normal. 9

Areia fina — Areia cujas dimensões dos grãos estão compreendidas entre 0,05 e 0,42 mm pela classificação da ABNT e entre 0,06 e 0,20 mm pela classificação do MIT-Massachussets Institute of Technology. 75

Areia grossa — Areia cujas dimensões dos grãos estão compreendidas entre 2,00 e 4,80 mm, pela classificação da ABNT e entre 0,60 e 2,00 mm pela classificação do MIT-Massachussets Institute of Technology. 75

Areia média — Areia cujas dimensões dos grãos estão compreendidas entre 0,42 e 2,00 mm pela classificação da ABNT e entre 0,2 e 0,6 mm pela classificação do MIT-Massachussets Institute of Technology. 9

Areia normal — É o material quartzoso extraído do rio Tietê, na região do Município de São Paulo, em direção à nascente, produzido e fornecido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo e que satisfaz a determinadas condições. 178

Areia padrão — No Brasil a ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas, classifica como areia normal (ver também areia normal). No padrão do A.S.T.M.-American Society for Testing and Materials é a areia do Ottawa graduada acuradamente entre as peneiras de n.° 30 (600 μm) e n.° 100 (150 μm). 9

Arenito — Rocha sedimentar detrítica, composta essencialmente por grãos de areia com diâmetro entre 0,60 a 2·00 mm ligados entre si por um cimento. O tipo de cimento é que dá as propriedades de resistência, podendo ser argiloso, calcífero, silicoso, ferruginoso etc. 70, 99, 108, 483

Arenoso — Composto principalmente por areia. 9

Argamassa — A mistura de pasta de cimento e agregado miúdo; no concreto fresco, é o material que ocupa os vazios entre as partículas do agregado graúdo; nas edificações a argamassa pode ser constituída por cimento, cal (e possivelmente outros aditivos), água, para dar plasticidade e trabalhabilidade desejada. 258, 485

Argamassa Armada — Ver ferrocimento. 9

Argamassa de epoxi — A mistura de resina de epoxi, catalizador e agregado miúdo. 10

Argamassa para injeção — A argamassa utilizada para injeção. 310

Argamassa seca — Argamassa contendo baixo teor de água, aplicada e compactada por apiloamento. 10

Argamassada — Mistura que contém mais areia que o necessário para dar a adequada trabalhabilidade e satisfazer as condições de acabamento. 10

Argila — Material mineral natural contendo propriedades plásticas e composto por partículas muito finas, normalmente considerado como a fração de solo com dimensões menores de 2 mm, e essencialmente constituído por silicatos de alumínio hidratados ou ocasionalmente silicatos de magnésio hidratados. 69, 97, 130

Argilito — Rocha sedimentar detrítica constituída essencialmente por partículas argilosas. Distingue-se de folhelhos e ardósias por não se partir paralelamente à estratificação e não possuir clivagem ardosiana. 108

Argiloso — Composto principalmente por argila. 10

Armadura — Barras, fios, cordoalhas, chapas, que ficam embutidas no concreto de tal modo que a armadura e o concreto trabalhem conjuntamente para resistir a esforços. 10

Armadura auxiliar — Nas peças protendidas, a armadura suplementar àquela destinada aos esforços da protensão. 10

Armadura para controle de fissuração — A armadura, nas construções em concreto armado, projetada para limitar a abertura das fissuras a certo valor e redistribuí-las uniformemente em fissuras de menor abertura. 10

Armadura de pele — Armadura constituída geralmente de barras de pequeno diâmetro, cuja finalidade é evitar o aparecimento de fissuras superficiais em faces laterais de peças de grande altura 10

Armadura para temperatura — Armadura projetada para atender às tensões decorrentes das variações de temperaturas. 10

Armadura principal — Armadura de aço projetada para resistir às tensões decorrentes das cargas e momentos de projeto, ao contrário da armadura destinada a suportar tensões secundárias. 10

Armadura transversal — Armadura colocada em plano normal ao principal eixo da peça. 10

Articulação (perfeita) — Sistema que realiza uma ligação exterior ou interior de uma barra e que permite, sem esforços, o deslocamento angular relativo dos elementos. 10

Aspergir — Borrifar ou respingar líquidos sobre materiais. 10

Assentamento — O abaixamento, ou penetração de partículas sólidas em argamassas e concretos frescos, logo após o lançamento e antes da pega. 10

Ataque por sulfato — Reação química ou física (ou ambas) entre os sulfatos, normalmente encontrados em solos ou águas de infiltração, e o concreto ou argamassa, principalmente com hidratos de cálcio-aluminatos, da pasta de cimento, causando deterioração. 133

Augen — Mineral lenticular ou arredondado maior que os minerais da massa da rocha, comumente presente em gnaisses, podendo ser porfiroblástico ou porfiroclástico. 10

Auscultação — Auscultação é o conjunto de métodos de observação do comportamento de uma determinada obra de engenharia, com o objetivo de controlar as suas condições de segurança, comprovar a validade das hipóteses e dos métodos de cálculo. 10

Autoclave — O recipiente pressurizado, onde pode se estabelecer um ambiente de vapor e pressão elevada; usado na cura de produtos de concreto e ensaios de cimentos hidráulicos. 163

Autógeno — Que se gera a si mesmo. 416, 531

— B —

Bacalhau — Tipo de emenda de barras de aço em armadura constituída pela deposição de material de eletrodo em talas metálicas (tarugos de barras de aço) ou outros pedaços de chapas de aço utilizados como cobre-juntas. 11

Bacia sedimentar — Um segmento da crosta terrestre que sofreu subsidência, geralmente durante o decurso de um longo período de tempo, porém com soerguimento e abatimento intermitentes. Os sedimentos em bacias sedimentares aumentam em espessura da borda em direção ao centro da bacia. 11

Balde corretor — O mesmo que câmara atensorial (vide). 11

Ball-test — O ensaio para determinar a consistência do concreto fresco, pela medida da profundidade de penetração de uma peça metálica cilíndrica com ponta hemisférica. 332

Barita — O mineral sulfato de Bário (B_aSO_4) usado, puro ou não, como agregado para concreto de elevada massa específica. 68, 232

Barras com alta aderência — Ver barras com rugosidades. 11

Barras com rugosidades — Barras de armadura, com superfícies com mossas ou saliências, produzidas durante a fabricação, com a finalidade de propiciar a melhor aderência ao concreto que envolve a armadura. 11

Basalto — Rocha vulcânica, básica, composta principalmente de plagioclásio cálcico e clonopiroxênio numa massa fundamental vítrea ou finamente granulada. A textura pode ser maciça, vesicular ou amigdalóide. 68, 410, 483

Básica — Rocha ígnea, cujo teor em sílica varia de 45 a 52%. Os minerais máficos são predominantes na matriz. 68

Bassanita — O sulfato de cálcio hemihidratado ($2\ CaSO_4\ H_2O$). 11

Bauxita — A rocha composta principalmente por óxidos hidratados de alumínio; é a matéria-prima para a produção do cimento aluminoso (cimento cálcio-aluminato). 135

Belita — A designação usada por Tornebohm (1897) para identificar uma forma dos constituintes do clínker de cimento Portland, atualmente conhecido por silicato dicálcico ($2\ CaO.\ SiO_2$ — C_2S). 186

Bentonita — A argila composta fundamentalmente por minerais do grupo das montmorilonitas e que se caracteriza por elevada absorção e grande variação de volume quando da secagem ou molhagem. 11

Betonada — A quantidade de argamassa ou concreto misturado a cada vez. (ver mistura). 82, 253

Betoneira — Ver misturador. 253

Betume — Mistura asfáltica constituída de hidrocarbonetos naturais utilizada em impermeabilizações de superfícies. A mistura líquida, sólida ou semi-sólida de hidrocarbonetos, solúvel em solventes orgânicos, natural ou obtida em processo de destilação. 11

Biotita — Mineral máfico, do grupo das micas, que ocorre em rochas ígneas (especialmente ácidas) e metamórficas (gnaisses e xistos). 11

Blindagem biológica — Blindagem usada para reduzir ou absorver as radiações nucleares, tais como as de partículas de Nêutron, Próton, Alfa, Raios Beta e Gama; a blindagem é formada fundamentalmente pela densidade do concreto, exceto no caso das radiações de Nêutron quando se empregam componentes de alguns elementos leves (hidrogênio e boro, por exemplo). 11

Bloco — O espaço entre fôrmas, preenchido por concreto. 11

Bloco de ensaio (corpo de prova) — Amostra de material para ser submetida a ensaios mecânicos destinados a medição das suas propriedades e possuindo geometria adequada ao tipo de ensaio a realizar. 98

Bola de Kelly (Kelly-Ball) — O aparelho usado para indicar a consistência do concreto fresco, consistindo de um cilindro de 150 mm de diâmetro com uma ponta hemisférica e um pegador, pesando 14 kg e uma guia que serve para orientar o movimento e como referência para a medida da profundidade de penetração. 332

Bolsão de areia — Região do concreto ou argamassa contendo areia sem cimento. 12

Bomba de ar comprimido (Air-Lift) — Equipamento para bombeamento de lama ou pó, através do uso de ar comprimido. 12

Bomba de concreto — O equipamento que pressiona o concreto, em direção ao local de lançamento, através de uma tubulação. 12

Bomba de injeção (bomba injetora) — Equipamento de injeção destinado a impelir a calda através de tubulações até os vazios do maciço. 12

Borboleta — Figura, utilizada em grandes construções para indicar ponto de referência de nivelamento. 12

Borda — A extremidade de uma superfície. 12

Borrachudo — Designação usada para referir-se a um material que, por não apresentar um proporcionamento adequado, não permite atingir uma compactação desejada, apresentando-se como massa deformável. 12

Breccia (brecha) — Rocha formada pela cimentação de fragmentos angulosos de rochas antigas. 114

Brecha — Rocha clástica de granulação grosseira constituída de fragmentos angulares de rocha (maiores que 2,0 mm) cimentados por matriz de granulação mais fina de natureza igual ou diversa dos fragmentos maiores. Pode ser formada por sedimentação (brecha sedimentar), atividade ígnea (brecha ígnea, brecha eruptiva, brecha vulcânica) ou diastrofismo (brecha tectônia). **Geol.** Rocha formada pela consolidação de materiais piroclásticos grosseiros como: fragmentos de lava, lapilli etc. **Sin:** Brecha vulcânica, brecha eruptiva. **Estrat.** Rocha sedimentar formada por fragmentos angulosos de outras rochas, aglutinadas ou não por cimento. **Sin:** Brecha sedimentar **Estru:** Rocha originada por processos tectônicos ao longo de falhas. A matriz e os fragmentos maiores são constituídos de rocha triturada pela ação do falhamento. **Sin:** brecha cataclástica, cataclásito, brecha tectônica. 114

Bredigita — O mineral α_1C_2S ($2CaOSiO_2$) silicato dicálcico, que ocorre de forma natural nas montanhas Scawt — Irlanda do Norte e ilhas Muck, na Escócia; e também no cimento Portland. 12

Briquete — O corpo de prova moldado com argamassa, tendo extremidades alargadas e a parte central reduzida, com uma seção transversal com área conhecida, usado para determinação da resistência à tração. 12

Brita — Material resultante do britamento (fragmentação) de pedras. 89, 371

Brita corrida — Agregado britado artificialmente e que não tenha sido classificado por qualquer sistema de peneiramento. 12

Britamento (britagem) — Fragmentação mecânica de uma rocha, industrialmente realizada em britadores, com o objetivo de reduzir as dimensões até tamanhos não inferiores a 1cm (abaixo desse tamanho, a fragmentação denomina-se moagem). 89, 117

Brownmilerita — O composto ternário originalmente conhecido como o que ocorre no cimento Portland e no cimento aluminoso; atualmente usado para referir-se a uma série de soluções sólidas entre $2CaO.Fe_2O_3$ (C_2F) e $2CaO.Al_2O_3$ (C_2A). 12

Brucita — O mineral tendo o composto hidróxido de magnésio e uma determinada estrutura cristalina. 121

Brunidores — Materiais usados para agilizar o processo de polimentos de uma superfície. 12

Bujão — A bucha com que se tapa buracos. 12

— C —

Cabeça — A região frontal de um avanço de concretagem; cabeça de concretagem. 13

Cabine de instrumentação — Pequena construção de concreto ou alvenaria, utilizada para centralizar a leitura da instrumentação de auscultação em barragens de concreto, terra ou de enrocamento. 13

Cabo (condutor) — Denominação genérica dos elementos de ligação entre os instrumentos e os aparelhos de medida ou leitura. Os cabos podem ser elétricos, hidráulicos, pneumáticos etc. 13

Cabo (tensor) — Elemento tensor, tal como fio, barra, haste ou cordoalha, usado para produzir tensões, no concreto protendido. 13

Caçamba — Recipiente, possuindo comporta e sistema de carga e descarga, utilizado para transporte e colocação de concreto. 13

Cadeia clinométrica — É constituída pela associação em série de várias bases de clinômetro ao longo de galerias transversais de barragem de concreto. 13

Cadeia defletométrica — Dispositivo constituído pela associação de vários defletômetros em série ao longo de um furo de sondagem. É utilizado quando se pretende observar movimentos transversais ao furo de sondagem, a várias profundidades. 13

Cadeia extensométrica — Designação que recebe a associação de vários extensômetros em série ao longo da superfície de uma estrutura cujas deformações se pretende medir. 13

Calado — Revestido com cal. 13

Caixa seletora — Aparelho que reúne os cabos elétricos de vários instrumentos em uma central de leitura e que ao ser conectado ao aparelho de leitura permite, através da simples operação de girar um botão, a leitura rápida dos vários instrumentos. 502

Cal — Especificamente o óxido de cálcio (CaO), branco, cristalino e também a designação geral das várias formas químicas e físicas da cal virgem, cal hidratada e cal hidráulica hidratada. 130

Cal hidráulica hidratada — O aglomerante hidratado, seco, obtido pela calcinação de calcário contendo sílica e alumínio, a temperatura da fusão incipiente, de modo a formar óxido de cálcio disponível somente para permitir a hidratação e ao mesmo tempo liberar silicatos de cálcio suficientes para dar ao material, em pó, propriedades hidráulicas. 13

Cal hidratada — Hidróxido de cálcio; um pó seco obtido pelo tratamento da cal-viva (cal virgem) com água. 13

Cal livre — Óxido de cálcio (CaO), do clínquer ou do cimento, que ainda não se combinou com SiO_2, Al_2O_3 ou Fe_2O_3 durante o processo de cozimento, devido, geralmente, à queima insuficiente, ou moagem insuficiente dos materiais crus, ou pela presença de inibidores. 132

Cal virgem (cal viva) — Óxido de cálcio (CaO). 70, 108, 121, 130

Calcário — Rocha de origem basicamente sedimentar. Quanto ao processo de formação pode ser classificado em: a) calcário de origem química: precipitação inorgânica de carbonato de cálcio ou solubilizações posteriores (ex.: caliche, estalactites etc.); b) calcário organogênico: proveniente de organismos animais ou vegetais cujos esqueletos foram acumulados e parcialmente sedimentados (ex.: chalk, calcário coraligeno etc.); c) calcário clástico: originado a partir de detritos de rochas calcárias ressedimentadas (ex.: margas, calcários brechados etc.); d) calcário cristalino: massa calcária de qualquer origem, que por processos diagenéticos ou por reprecipitação sofreram recristalização, gerando cristais visíveis de calcita; e) calcário metamórfico: as estruturas originais da rocha foram deformadas. **Petr.** — Rocha sedimentar de origem química, orgânica ou clástica, constituída predominantemente de carbonato de cálcio, em especial, calcita. Estando associadas à calcita outras substâncias em porcentagens mais ou menos elevadas, a rocha denomina-se: calcário dolomítico, calcário magnesiano, calcário betuminoso, calcário silicoso etc. 70, 108, 121, 30

Calcedonia — Variedade de sílica microcristalina transparente ou translúcida. 94, 106

Calcinar — Alterar a composição de um estado físico, pelo aquecimento, abaixo da temperatura de fusão; transformar o carbonato de cálcio, a uma temperatura elevada, em óxido de cálcio para obter a cal. 171

Cálcio — O elemento metálico branco-prateado, do grupo dos minerais alcalino terrosos e que ocorre somente combinado com outros elementos. 14

Calcita — O mineral contendo carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e uma estrutura cristalina específica; o principal constituinte dos calcários e mármores; usado como principal constituinte na produção de cimento Portland. 121

Calda — A mistura de material aglutinante e água, dosada para produzir uma consistência compatível com o sistema de aplicação, sem segregação dos constituintes; mistura de outros constituintes, mas de consistência semelhante. 14

Calda Binghamiana — Calda cujo comportamento é comparável a um fluído de Bingham, ou seja, fluído cujo escoamento só pode ser iniciado a partir de um certo valor de esforço atuante, denominado limite de escoamento, que representa uma certa coesão do fluído. Tal valor é expresso pela fórmula de Bingham:

$$F = fo + U\,(dv/dz)$$

F: força aplicada; fo: limite de escoamento; U: viscosidade plástica; dv/dz: gradiente de velocidade. As caldas de cimento recém-preparadas são caldas Binghamianas. 14

Calda coloidal — A calda que possui uma coesão, ou habilidade induzida artificialmente, de modo a manter partículas sólidas dispersas em suspensão.

Calda de epóxi — A mistura de resina de epóxi e catalisador. 14

Calda estável — Calda cujo fator de sedimentação é muito baixo ou nulo. As caldas de cimento são normalmente consideradas estáveis. 14 14

Calda instável — Calda com alto fator de sedimentação. Caldas de cimento com alta relação água/cimento são normalmente consideradas instáveis. 14

Calda Newtoniana — Calda que se comporta com um fluído Newtoniano, ou seja, em regime laminar apresenta um gradiente de velocidade proporcional ao esforço atuante. A água é um fluído Newtoniano. Certas caldas preparadas com monômeros orgânicos (acrilamidas, fenoplastos etc.) são caldas Newtonianas. 14

Calibração — A calibração consiste geralmente em uma operação de aferição do instrumento, realizada em laboratório, onde submete-se o aparelho a variações conhecidas da grandeza medida, associando-se em uma curva de calibração os valores reais com os valores indicados pelo instrumento. 141, 394

Calibrar — Aferir. 141

Calibre — Instrumento usado para calibrar. 89, 91, 141

Caliche — Cascalho, areia e resíduos desérticos cimentados por carbonato de cálcio, nitrato de sódio ou outros sais. 14

Calor de dissolução — O calor desenvolvido pela solução de material por um solvente. 167

Calor de hidratação — O calor desenvolvido por reações químicas com água, como aquelas que ocorrem durante a pega e o endurecimento de cimento Portland. É a diferença entre o calor de dissolução do cimento seco e aquele do cimento parcialmente hidratado. 167, 219, 507, 516

Calor específico — A quantidade de calor necessária a cada unidade de massa para elevar unitariamente a temperatura, em uma certa variação de temperatura. 122, 487

Caloria — Quantidade de calor necessária para elevar de 14,5°C a 15,5°C a temperatura de um grama de água e que é igual a 4,18 joules. 14

Calorímetro — Aparelho para medir a liberação de calor durante uma reação química como, por exemplo, a hidratação do cimento. 127, 167

Camada — O concreto colocado entre duas sucessivas juntas horizontais de construção; normalmente constituída de várias subcamadas. 328

Câmara atensorial — Recipiente utilizado para isolar, no interior de uma estrutura de concreto, um cilindro de concreto do estado de tensões circunjacentes. É constituído por um recipiente metálico com a forma de um vaso cilíndrico, no qual o fundo e as paredes são formados por duas chapas metálicas delgadas entre as quais é deixado um vazio. Dessa forma o extensômetro corretor, que é instalado em seu interior, fica sujeito apenas às deformações provocadas por variações de temperatura, de umidade ou pelas variações volumétricas autógenas. 15

Câmara de cura a vapor — A câmara ou recipiente para efetuar a cura a vapor. 15

Câmara úmida — O compartimento onde a atmosfera é mantida a uma temperatura padrão (normalmente 23,0 ± 1,7°C) e a uma umidade relativa de no mínimo 98%, com a intenção de sazonamento de corpos de prova de argamassa, pasta ou concreto; o ambiente deve ser mantido nas condições padronizadas. 113, 361

Caminhão betoneira — Caminhão possuindo uma betoneira (misturador) montada sobre o chassis, capaz de misturar e transportar adequadamente o concreto. 15

Campo de leitura — Campo de leitura de um instrumento vem a ser o intervalo compreendido entre as leituras mínima e máxima desse instrumento, sem que o mesmo seja submetido a nenhuma alteração. 15

Capacidade de exsudação — A relação do volume de água liberada pela exsudação e o volume de pasta ou argamassa. 15

Capeamento — A superfície plana e lisa obtida pela aplicação de material adequado sobre as superfícies de apoio dos corpos de prova, de modo a assegurar a distribuição uniforme de carga durante o ensaio. 178, 363

Capilaridade — O movimento de um líquido nos interstícios de um material, pela ação da tensão superficial. 141, 462

Carbonatação — A reação entre o dióxido de carbono e um hidróxido ou um óxido para formar um carbonato; nos concretos, argamassas e pasta de cimento, é a reação com os compostos de cálcio, produzindo o carbonato de cálcio. 132

Carbonato — Diz-se dos minérios secundários caracterizados pela estrutura aniônica fundamental: CO_3. Exemplo: calcita ($CaCO_3$), dolomita CaMg (CO_3), aragonita ($CaCO_3$), siderita (Fe_3CO_3), magnesita ($MgCO_3$). 121, 539

Carboneto de silício — Produto artificial (SiC), que sob forma granular pode ser adicionado na superfície de concreto para aumentar a resistência ao desgaste, ou como meio para reduzir o deslizamento em degraus de escada; usado também em discos de corte (ver também corte com disco). 15

Carga — Esforço externo devido à ação da gravidade. 95

Carga acidental — Carga que se considera não atuando permanentemente. 15

Carga de fissuração — A carga que dá origem a uma tensão de tração, superior à resistência à tração do concreto em uma peça. 15

Carga de flambagem — Carga sob a qual flamba a estrutura ou uma de suas peças. 15

Carga de ruptura — Carga sob a qual se rompe a estrutura ou uma de suas peças. 402

Carga limite de deformação — Carga sob a qual a estrutura ou uma de suas peças atinge o limite de deformação que lhe é prescrito. 15

Carga limite de deformação — Carga sob a qual a estrutura ou uma de suas peças atinge o limite de fissuração que lhe é prescrito. 15

Carga móvel — Carga acidental que se desloca relativamente à estrutura em que atua, conservando a posição relativa dos esforços que a compõem. 15

Carga permanente — Carga que se considera aplicada permanentemente. 15

Carote — Ver testemunho. 15

Cascalho — Depósito natural de fragmentos de rochas arredondados e inconsolidados. Consiste predominantemente de partículas maiores que areia. Material granular, predominantemente retido na peneira de malha n.º 4 (4,8 mm), resultante de um processo de desintegração e/ou abrasão. 69, 70, 130, 371

Cascalho britado — O produto resultante da britagem artificial de cascalho com um número mínimo especificado de fragmentos, tendo uma ou mais faces resultantes da britagem. 16

Cataclástica (textura) — Textura de rochas caracterizada pela aparência fendida dos constituintes, onde o esmagamento e fragmentação dos cristais resultaram de movimentos pós-consolidação. Se a granulação e o cisalhamento dos cristais são extremos, denomina-se milonítica. 16

Catalisador — A substância que inicia uma reação química e dá condições para que a mesma prossiga dentro de certas condições, o que não ocorreria na sua ausência. 16

Caulinita — A rocha, normalmente branca, constituída fundamentalmente de argilas do grupo da caulinita, compostas por silicatos de alumínio hidratado, de baixo teor de ferro, usado como matéria-prima na produção de cimento branco. 16

Célita — Designação usada por Tornebohm para identificar o cálcio alumino-ferrita (C_4AF) que compõe o cimento Portland. 16

Célula de carga — Instrumento empregado para verificar o comportamento da carga atuante. É constituído geralmente por um cilindro metálico de alta resistência, em cujo interior se aloja um transdutor que transforma a deformação em impulso elétrico. 16

Célula de carga para tirante — Instrumento empregado para o controle da carga de protensão em tirantes e chumbadores. 16

Célula pneumática de recalque — Instrumento destinado à medição de recalques, constituído por uma célula dotada de um transdutor pneumático, que transforma a grandeza do recalque em pressão pneumática. Aplica-se a medição de recalque em aterro e fundações. 16

Célula de pressão — Instrumento utilizado para observação de pressões em estruturas de concreto, solo ou enrocamento. Consiste geralmente em uma almofada plana metálica, que fica alojada no interior do concreto, solo ou enrocamento, cujo princípio de fundamento pode ser elétrico (resistência variável ou corda vibrante), pneumático ou hidráulico. 16

Célula de pressão hidráulico-pneumática — Esta célula apresenta os mesmos dispositivos constituintes da célula de pressão total hidráulica (vide), sendo que a pressão atuante sobre o diafragma da válvula é transmitida hidraulicamente, enquanto a pressão aplicada do outro lado para equilibrá-la, o é pneumaticamente. 16

Célula de pressão total de corda vibrante — Instrumento utilizado para medição de pressão em maciços. A pressão ao atuar sobre uma almofada plana provoca, através de um sistema hidráulico, a deflexão de um diafragma. Esta deflexão é medida por um transdutor de corda vibrante que permite, através de uma calibração prévia do instrumento, determinar a pressão que está atuando sobre a almofada. 16

Célula de pressão total hidráulica — Instrumento utilizado para medição de pressão em maciços. A pressão, ao atuar sobre a almofada plana, provoca o fechamento de uma válvula que interrompe o fluxo de óleo entre os tubos de entrada ou saída. Eleva-se, então, lentamente a pressão na tubulação de entrada, até que esta, ao igualar a pressão que atua sobre a almofada plana, abre a válvula que provoca o fluxo pela tubulação de saída. A leitura da pressão é fornecida por manômetro conectado à tubulação de entrada. 16

Central de concreto — A instalação com equipamentos, incluindo dosadores, misturadores, para produzir argamassas ou concretos. 16

Central de leitura — Local onde são reunidos os cabos de vários instrumentos (instalados nas proximidades), para facilitar a sua leitura. Na central de leitura localizam-se geralmente as caixas seletoras e os equipamentos de leitura. Estas localizam-se, por sua vez, em recessos ou nichos situados nas galerias de acesso ou de drenagem. 16

Central misturadora de concreto — O misturador estacionário, de onde o concreto fresco, misturado, é transportado para a obra. 17

Chata — (Forma do agregado). Partícula do agregado que possui a relação da largura para a espessura de um prisma retangular circunscrito, maior que um valor especificado. 91

Chata e alongada — Ver **chata** e ver **alongada.** 91

Chaveta — O recesso ou ranhura em uma camada ou lançamento de concreto que, preenchido por concreto na próxima camada, proporciona resistência ao cisalhamento na junta formada. 17

Chert — Rocha silicosa de granulação muito fina, caracterizada pela dureza e fratura concholdal; é composta por sílica na forma de calcedônia, quartzo microcristalino ou opala, ou combinações destes. 70

Chert opalino — Chert composto integral ou principalmente por opala. 17

Chicana — Sistema de degraus, colocados na vertical, porém não em um mesmo plano, para dificultar a queda livre de materiais, de modo a minimizar a segregação e a quebra de partes do material. 17

Choque térmico — A exposição do material ou corpo, como o concreto parcialmente endurecido, à variação rápida de temperatura, que pode ter um efeito danoso. 17

Chumbador — Em construção diz-se do dispositivo de fixação de peças no concreto, argamassa ou alvenaria; antigamente o chumbamento se executava pela aplicação de chumbo derretido (chumbado) em orifícios previamente abertos. 17

Chute — Rampa, tubo ou calha, para conduzir concreto, argamassa, calda, agregado, e outro material possível de fluir livremente, desde um ponto mais alto até um ponto inferior. 99

Ciclo — Série de fenômenos que se sucedem em uma ordem preestabelecida. 17

Ciclo de cura a vapor — O período de tempo entre o início do período de elevação da temperatura e o término do período de resfriamento (abaixamento da temperatura); e também a seqüência de períodos de exposição estabelecida em um ciclo. 17

Ciclo de mistura — O tempo gasto para completar um ciclo de mistura, ou seja, o intervalo de tempo entre duas repetições sucessivas de uma mesma operação (como sucessivas descargas do misturador). 17 17

Ciclo em autoclave — O intervalo de tempo entre o início do período da elevação de temperatura e o fim do alívio da pressão; e também o programa de condições de tempo e temperatura, pressão, no período que constitui o ciclo. 17

Cilindro sensível — Aparelho utilizado para determinação do estado de tensão natural de maciços, a partir de furos de sondagem. É constituído basicamente por um cilindro de resina, no interior do qual se alojam três rosetas de extensômetros elétricos de resistência, um cabo elétrico e um aparelho de leitura. 17

Cilindros curados "in situ" — Corpos de provas cilíndricos curados em condições mais próximas possíveis das do concreto da estrutura, com a finalidade de indicar a época da retirada de fôrmas; ou de carregamentos adicionais; ou para liberar o uso da estrutura. 17

Cimbramento — A estrutura temporária usada para suportar fôrmas. 17

Cimento — Substância em pó utilizada como aglomerante para ligar certos materiais e que umedecida se usa em estado plástico. 130

Cimento a granel — O cimento que é transportado e armazenado solto; em lugar de sacos, normalmente são usados recipientes especiais. 194

Cimento aluminoso — Cimento de alto teor de alumina (ver cimento cálcio-aluminato), que se obtém pelo aquecimento até a fusão completa de uma mistura íntima de bauxita e carbonato de cálcio. 136

Câmara atensorial — Recipiente utilizado para isolar, no interior de uma estrutura de concreto, um cilindro de concreto do estado de tensões circunjacentes. É constituído por um recipiente metálico com a forma de um vaso cilíndrico, no qual o fundo e as paredes são formados por duas chapas metálicas delgadas entre as quais é deixado um vazio. Dessa forma o extensômetro corretor, que é instalado em seu interior, fica sujeito apenas às deformações provocadas por variações de temperatura, de umidade ou pelas variações volumétricas autógenas. 15

Câmara de cura a vapor — A câmara ou recipiente para efetuar a cura a vapor. 15

Câmara úmida — O compartimento onde a atmosfera é mantida a uma temperatura padrão (normalmente 23,0 ± 1,7°C) e a uma umidade relativa de no mínimo 98%, com a intenção de sazonamento de corpos de prova de argamassa, pasta ou concreto; o ambiente deve ser mantido nas condições padronizadas. 113, 361

Caminhão betoneira — Caminhão possuindo uma betoneira (misturador) montada sobre o chassis, capaz de misturar e transportar adequadamente o concreto. 15

Campo de leitura — Campo de leitura de um instrumento vem a ser o intervalo compreendido entre as leituras mínima e máxima desse instrumento, sem que o mesmo seja submetido a nenhuma alteração. 15

Capacidade de exsudação — A relação do volume de água liberada pela exsudação e o volume de pasta ou argamassa. 15

Capeamento — A superfície plana e lisa obtida pela aplicação de material adequado sobre as superfícies de apoio dos corpos de prova, de modo a assegurar a distribuição uniforme de carga durante o ensaio. 178, 363

Capilaridade — O movimento de um líquido nos interstícios de um material, pela ação da tensão superficial. 141, 462

Carbonatação — A reação entre o dióxido de carbono e um hidróxido ou um óxido para formar um carbonato; nos concretos, argamassas e pasta de cimento, é a reação com os compostos de cálcio, produzindo o carbonato de cálcio. 132

Carbonato — Diz-se dos minérios secundários caracterizados pela estrutura aniônica fundamental: CO_3. Exemplo: calcita ($CaCO_3$), dolomita CaMg (CO_3), aragonita ($CaCO_3$), siderita ($FeCO_3$), magnesita ($MgCO_3$). 121, 539

Carboneto de silício — Produto artificial (SiC), que sob forma granular pode ser adicionado na superfície de concreto para aumentar a resistência ao desgaste, ou como meio para reduzir o deslizamento em degraus de escada; usado também em discos de corte (ver também corte com disco). 15

Carga — Esforço externo devido à ação da gravidade. 95

Carga acidental — Carga que se considera não atuando permanentemente. 15

Carga de fissuração — A carga que dá origem a uma tensão de tração, superior à resistência à tração do concreto em uma peça. 15

Carga de flambagem — Carga sob a qual flamba a estrutura ou uma de suas peças. 15

Carga de ruptura — Carga sob a qual se rompe a estrutura ou uma de suas peças. 402

Carga limite de deformação — Carga sob a qual a estrutura ou uma de suas peças atinge o limite de deformação que lhe é prescrito. 15

Carga limite de deformação — Carga sob a qual a estrutura ou uma de suas peças atinge o limite de fissuração que lhe é prescrito. 15

Carga móvel — Carga acidental que se desloca relativamente à estrutura em que atua, conservando a posição relativa dos esforços que a compõem. 15

Carga permanente — Carga que se considera aplicada permanentemente. 15

Carote — Ver testemunho. 15

Cimento Portland de escória de alto forno — Cimento hidráulico constituído essencialmente de uma moagem íntima de clínquer de cimento Portland e escória granulada de alto-forno ou uma mistura uniforme de cimento Portland e escória de alto-forno moída, dentro de proporções determinadas. 135

Cimento Portland pozolânico — Cimento hidráulico constituído essencialmente de uma mistura íntima e uniforme de cimento Portland ou cimento Portland de escória de alto-forno e material pozolânico, produzido pela moagem conjunta de clínquer de cimento Portland e material pozolânico; ou pela mistura de cimento Portland ou cimento Portland de escória de alto forno e material pozolânico fino; ou a combinaçã desses produtos na moagem, ou misturados dentro de proporções determinadas. 133, 183, 194

Cimento resistente aos sulfatos — Cimento Portland com baixo teor de (C_3A), de modo a reduzir a susceptibilidade do concreto ao ataque de sulfatos dissolvidos em água ou solos. 133

Cimento supersulfatado — Cimento hidráulico produzido pela moagem conjunta de uma mistura granulada de alto-forno, sulfato de cálcio e pequenas quantidades de cal, cimento, clínquer de cimento; designado desta forma por possuir um teor equivalente de sulfato, acima do teor de cimento Portland de escória de alto-forno. 133, 135

Cinza volante — O resíduo, muito fino, da combustão do carvão pulverizado. 196

Círculo de Mohr — Representação gráfica das tensões atuando em todos os planos passando por um ponto de uma massa, num sistema de coordenadas em que as abscissas são as tensões normais e as ordenadas são as tensões de cisalhamento. 19

Cisalhamento — Força interna tangencial ao plano de atuação. 388

Clástica — Textura de rochas sedimentares compostas por fragmentos quebrados de rochas ou minerais preexistentes, isolados ou ligados entre si por cimento. 19

Clástico — Sedimento formado de fragmento de rochas preexistentes. Distinguem-se: macroclásticos (psefitos e psamitos) e microclásticos (pelitos). Os psefitos constituem-se de grãos maiores que os de areia, os psamitos de grãos de tamanho dos de areia e os pelitos de grãos de tamanho dos de silte e argila. 19

Clinômetro — Aparelho destinado à observação de deslocamentos angulares (rotações) em estruturas de concreto e maciços rochosos. 19

Clinômetro magnético — Instrumento utilizado em prospecção magnetométrica para medir a inclinação do campo magnético total e, assim, fornecer dados sobre anomalias magnetométricas. 19

Clínquer — Produto parcialmente fundido em forno e que é moído para produzir o cimento. 131

Cloreto — Qualquer sal derivado do ácido clorídrico. 230

Cloreto de cálcio — O sólido cristalino $CaCl_2$; usado como um agente para secagem, como um acelerador no concreto, como descongelante químico. 19

Cloreto de polivinila (PVC) — Resina sintética preparada pela polimerização de cloretos vinílicos, usada para fabricação de veda-juntas não metálicos para concreto. 19

Clorídrico — Ácido (HCl). 19

Clorita — Mineral secundário formado às expensas de silicatos de alumínio, ferro e magnésio. Pode-se encontrar em qualquer rocha constituída por minerais ferromagnesianos primários em vias de alteração (principalmente do tipo hidrotermal). 19

Cloro — Elemento químico do grupo nos halogênios, utilizado no tratamento de água. 19

Cobrimento — Em concreto armado, a mínima distância entre a superfície da armadura e a superfície do concreto. 537

Coeficiente de Darcy — Valor numérico que expressa o coeficiente de permeabilidade. 462

Coeficiente de dilatação térmica linear — Alongamento correspondente a um aumento unitário de temperatura. (ver também coeficiente de expansão térmica). 480

Coeficiente de expansão térmica — Variação do volume unitário por volume unitário por grau (centígrado) de variação de temperatura; para um material isotrópico o coeficiente de expansão térmica é o coeficiente linear de expansão térmica (variação do comprimento unitário pelo comprimento unitário por grau de variação de temperatura). 122

Coeficiente de permeabilidade — A velocidade ou razão de passagem de água, em fluxo laminar, através de uma seção unitária, de um meio poroso, sob um gradiente hidráulico unitário dentro de condições padronizadas de temperatura, normalmente 20°C. 462

Coeficiente de Poisson — Constante de Lamé que, no elemento de um corpo em estado simples de tensão, é definida pelo quociente, com o sinal trocado, do alongamento principal mínimo pelo alongamento principal máximo. É a relação da deformação transversal para a correspondente deformação longitudinal axial resultante da ação de uma tensão axial uniformemente distribuída, atuando abaixo do limite de proporcionalidade do material; os valores comumente obtidos estão próximos de 0,2 para o concreto e de 0,25 para vários metais. 402

Coeficiente de segurança — Coeficiente pelo qual ou se multiplicam as solicitações a fim de efetuar-se o cálculo da estrutura em regime de ruína, ou se dividem as tensões de ruptura ou escoamento do material a fim de fazer-se o cálculo da estrutura em regime elástico. 20

Coeficiente de variação — É o desvio padrão expresso como porcentagem da média. (ver também desvio padrão). 316

Coeficiente de viscosidade — Quociente da tensão tangencial pela derivada da distorção correspondente, em relação ao tempo. 20

Coesão — Resistência de um material aos esforços de cisalhamento verificados ao longo de uma superfície interior que não esteja submetida a pressões normais, mobilizando as forças de tração entre as partículas que o constituem. 325, 388

Colemanita — O mineral borato de cálcio hidratado ($Ca_2B_6O_{11} . 5H_2O$), utilizado como agregado de elevada massa específica. 20

Colher — Ferramenta plana de aço, com cabo, usada em determinado estágio das operações de acabamento da superfície do concreto, ou para executar alvenarias. 333

Colimação — Processo geodésico utilizado para a determinação dos deslocamentos horizontais de uma barragem. Consiste no estabelecimento de uma linha de visada fixa, a partir de estações de observação estabelecidas sobre as ombreiras, a partir da qual são determinados os deslocamentos de pontos da estrutura localizados ao longo da crista, das bermas ou de galerias interiores (barragem de concreto). 20

Colocação — (ver lançamento). 20

Colóide — Substância que em condições de divisão impede a passagem por uma membrana semipermeável, constituída por partículas entre 10^{-5} e 10^{-7} cm de diâmetro. 20

Colorimétrico — Relativo à colorimetria; análise feita por comparação de cores. 98

Compactação — Processo pelo qual o volume de argamassa ou concreto fresco é reduzido ao menor espaço praticamente disponível, normalmente por vibração, centrifugação, apiloamento ou combinações destes procedimentos. 141, 326

Combinação de agregados — O processo de misturar dois ou mais agregados para obtenção de determinadas características. 262

Composto de cura — O líquido que pode ser aplicado como proteção da superfície de concreto lançado de modo a retardar a perda de água ou no caso de compostos pigmentados, também refletir o calor, dando condição de o concreto desenvolver suas propriedades em ambiente favorável de temperatura e umidade. 238

Composto expansivo — O componente de um cimento expansivo responsável pela expansão; normalmente um dos vários compostos aluminatos de cálcio, anidros ou sulfoaluminatos e um sulfato, com ou sem cal livre (CaO). O agente composto expansivo pode ser produzido separadamente e depois misturado (ou moído) junto com cimento Portland normal e em outras ocasiões aquecido junto dos constituintes do cimento Portland. 238

Compressão excêntrica — Estado de uma barra em que os esforços solicitantes são só momentos fletores e forças normais de compressão. Na prática é considerada como caso particular da flexão composta, com força cortante nula. 21

Compressão simples — Estado de uma barra em que os esforços solicitantes são só forças normais de compressão. 21

Comprimento de ancoragem — O comprimento embutido da armadura além da seção crítica. 21

Concretagem — Conjunto de operações que englobam o transporte, a colocação e a compactação. (ver também lançamento). 21

Concreto — Mistura em proporções fixadas de um aglutinante com água e agregados miúdo e graúdo, e eventualmente aditivos de modo a vir formar uma massa compacta, de consistência desejada e que endureça com o transcorrer do tempo. 67

Concreto aerado — (ver concreto celular). 21

Concreto aluminoso — Concreto produzido com cimento aluminoso; usado quando se requer elevada resistência inicial ou resistência à corrosão, ou propriedades refratárias. 21

Concreto armado — Concreto possuindo uma armadura (protendida ou "frouxa") e projetado de modo que os dois materiais atuem conjuntamente para resistir a esforços externos. 134

Concreto aparente — (ver concreto exposto). 21

Concreto asfáltico — Mistura de ligante asfáltico e agregados. 21

Concreto áspero — Concreto com falta de finos, de difícil condição de acabamento. 89, 283, 325

Concreto autotensionado — O concreto, argamassa ou calda, com cimento expansivo, no qual a expansão quando contida provoca tensões de compressão do material. 21

Concreto bombeado — Concreto que é transportado através de tubulações rígidas ou flexíveis por meio de bombeamento. 309

Concreto celular — Um produto leve constituído de cimento Portland, cimento pozolânico, cal-pozolana ou pasta de sílica-cal, pasta contendo misturas destes ingredientes ou pela adição de agente formador de espuma, ou pela formação de gás antes do endurecimento da massa, tendo uma distribuição uniforme de vazios, ou uma estrutura celular semelhante à obtida por agentes químicos gasosos. 21

Concreto ciclópico — Concreto massa sendo que partículas de agregados graúdos de grandes dimensões (50 kg ou mais) são lançadas junto ao concreto recém-lançado. 21

Concreto coloidal — Mistura de agregados aglutinados por uma calda ou argamassa coloidal. 21

Concreto com agregado pré-colocado — Concreto produzido pela injeção de argamassa de cimento Portland e, eventualmente, aditivos, por entre os vazios de agregado graúdo previamente colocado entre as fôrmas. 310

Concreto com cimento e polímero — A mistura fresca de água, cimento hidráulico agregado e um monômero ou polímero, que se polimeriza no local. 21

Concreto de alta resistência inicial — Concreto capaz de atingir resistência específica a uma baixa idade, mais rapidamente que um concreto normal, pelo uso de cimento de alta resistência inicial ou de aditivos. 21

Concreto de baixa densidade (concreto leve) — (concreto de baixa massa específica) — Concreto com massa específica (densidade — peso ou massa unitária) inferior a 800 kg/m³. 299

Concreto de epóxi — A mistura de resina de epóxi, catalisador e agregados miúdos e graúdos. 21

Concreto a vácuo — Concreto do qual se retira antes da pega, água e ar aprisionado, pela ação de um sistema de vácuo. 547

Concreto de vermiculita — Concreto produzido com agregados de vermiculita. 22

Concreto denso — Concreto com um mínimo de vazios. 22

Concreto dental — Mistura de cimento, areia e agregado graúdo (concreto magro) utilizado no preenchimento de pequenos bolsões e fendas e na regularização de taludes de rocha, no sentido de uniformizar a superfície de fundação de aterros ou outras estruturas. 22

Concreto descontínuo — Concreto produzido com agregado descontínuo. 22

Concreto estrutural — Concreto usado para suportar esforços ou fazer parte integrante da estrutura; concreto de determinada qualidade designada para fins estruturais; concreto usado somente como camada de projeção ou isolamento, não é considerado estrutural. 299

Concreto exposto — (aparente) — Concreto para fins arquitetônicos cujas faces são moldadas de modo a ter certa textura e acabamento, para permanecer à vista. 22

Concreto fibroso — Concreto contendo fibras distribuídas ao acaso. 547

Concreto gordo — Concreto muito argamassado e consistente. 22

Concreto in situ — Concreto aplicado no local desejado, fazendo parte de uma estrutura. 22

Concreto leve — (concreto de baixa densidade). 299, 354

Concreto magro (concreto pobre) — Concreto de baixo teor de aglomerante. 325

Concreto monolítico — Concreto moldado sem juntas, a não ser as de construção. 22

Concreto massa — Qualquer volume de concreto com dimensões o suficientemente grandes para exigir precauções, para reduzir a geração de calor devido à hidratação, reduzindo as variações de volume e minimizando a ocorrência de fissuras. 257, 287

Concreto normal (de densidade normal) — Concreto possuindo massa específica em torno de 2.400 kg/m³, produzido com agregados de massa específica normal. 22

Concreto pesado — (concreto de elevada densidade — massa específica) — Concreto de elevada massa específica, normalmente obtido pelo emprego de agregado de elevada massa específica, usado especialmente para blindagem contra radiações. 309, 354

Concreto pobre — Ver concreto magro. 325

Concreto polímero — Concreto no qual um polímero orgânico é usado como ligante, também conhecido como concreto de resina. Expressão algumas vezes empregada incorretamente para designar concretos ou argamassas de cimento hidráulico, onde parte ou toda água de mistura foi substituída por um agente dispersor ou um termoplástico copolímero. 547

Concreto pouco argamassado — Concreto com proporção insuficiente de agregado miúdo para dar as adequadas propriedades da mistura fresca, principalmente trabalhabilidade e características de acabamento (ver também concreto áspero). 263

Concreto pré-moldado — Concreto moldado em qualquer outro lugar que não o definitivo; contrário de concreto **in situ**. 22

Concreto projetado — Concreto transportado e lançado pneumaticamente, sendo que a maior parte da água de mistura é adicionada no bico de projeção. 311

Concreto protendido — O concreto no qual tensões internas de magnitude e distribuição desejadas são aplicadas de modo a contrabalançar de modo planejado, as tensões de tração decorrentes das solicitações de serviço. 134, 436

Concreto refratário — Concreto possuindo propriedades refratárias, e adequado para uso em temperaturas elevadas (geralmente entre 315°C e 1.315°C), sendo que o agente aglutinante é o cimento hidráulico. 23

Concreto resistente ao calor — Qualquer concreto que não se deteriora quando exposto ao calor, de forma constante ou cíclica, a uma temperatura abaixo da qual se forma uma ligação cerâmica. 22

Concreto rico — Concreto com elevado teor de aglomerante. 409

Concreto rolado — (concreto adensado com rolo vibratório) — Concreto de cimento hidráulico, dosado de tal forma a não apresentar trabalhabilidade, medida pelo tronco de cone e que pode ser transportado, colocado e compactado por meio de equipamentos de construção de maciços de terra e rocha. 326

Concreto sem finos — Concreto contendo pouco ou nenhum agregado miúdo. 23

Concreto simples — Concreto não armado. 23

Concreto tremie — Concreto para ser aplicado debaixo d'água, pelo uso do "tremie". 23

Concreto verde — Concreto que já atingiu a pega, mas ainda não endureceu de maneira apreciável. 23

Concreto vibrado — Concreto compactado pela ação da vibração, durante o lançamento. 23

Condutividade — Capacidade de um material conduzir a corrente elétrica. Nos materiais isotrópicos, a condutividade é o inverso da resistividade. 122, 495

Condutividade térmica — A propriedade de um corpo homogêneo, medida pela relação do fluxo de calor (velocidade de passagem de calor por área unitária) em regime, para um gradiente de temperatura (diferença de temperatura por comprimento unitário de passagem de calor), na direção normal à área. 122, 495

Cone de abatimento — (cone de Slump) — O molde tronco-cônico com base de diâmetro 200 mm, topo com diâmetro 100 mm e altura de 300 mm, usado para moldar um corpo de prova de concreto fresco para o ensaio do abatimento. 326

Cone de escoamento — (cone de Flow) — O dispositivo usado para a medida da consistência de caldas, onde um determinado volume de calda é escoado por um bico de dimensões padronizadas, sendo o tempo de escoamento o indicador da consistência. No ensaio de pasta ou de argamassa é o molde usado para moldagem do corpo de prova para o ensaio de escoamento (mesa de Flow). 311

Confiabilidade (de leituras) — Confiabilidade compreende a precisão das leituras sob condições normais de operação, junto com a habilidade de confirmar leituras erradas pela comparação com um outro instrumento instalado em posição similar ou a habilidade de recalibrar ou confirmar a leitura zero **in situ**. 394

Conglomerado — Rocha sedimentar clástica, formada de fragmentos arredondados de diâmetro superior a 2 mm e interligados por um aglutinante qualquer. 70

Consistência — A relativa facilidade, mobilidade ou habilidade de uma mistura de argamassa ou concreto fresco em fluir; a medida usual da consistência do concreto, é o abatimento pelo tronco de cone (Slump); da argamassa ou calda é o escoamento e da pasta de cimento é a resistência à penetração. 326

Consistência normal — A condição física da pasta de cimento determinada pela agulha de Vicat de acordo com ensaio padronizado; o grau de umidade (ou aspecto) apresentado pelo concreto argamassa ou calda quando a trabalhabilidade da mistura é considerada aceitável para os fins que se propõe. 156

Consistência plástica — Condição de uma mistura fresca de pasta argamassa ou concreto tal que as deformações são mantidas continuamente em todas as direções sem se desagregar; concreto com coesão, normalmente com abatimento entre 60 mm e 100 mm. 325

Consolidação — (concreto) — Ver compactação. 23

Consolidação — (injeção) — O processo de injeção de calda de cimento, sob pressão em certos maciços (cascalho, rocha fraturada) para solidificação. 23

Constantes elásticas — Coeficientes da expressão analítica da lei de Hooke generalizada, ou quaisquer das suas combinações. 24

Contração — Deformação em que há diminuição de volume. 163

Contraforte — A estrutura projetada para suportar um muro ou edifício. 24

Coordinômetro — É o aparelho com o qual se determina a posição do fio do pêndulo, direto ou invertido, em relação à estrutura cujo deslocamento se está medindo. 24

Cordoalha — Elemento tensor, para protensão, constituído por fios de aço torcidos em torno de um fio central. 24

Correia transportadora — O equipamento para transporte de materiais; geralmente denominado esteira transportadora. 24

Corrida — Conjunto de operações no processo de fabricação de aços correspondente ao carregamento, fusão, refino e vazamento; fornada. 24

Corrosão — Desgaste desintegração ou modificação química ou estrutural de um material, provocado pela ação química ou eletroquímica e espontânea de agentes do meio ambiente. 132

Corrosão por bactérias — A destruição de um material por processo químico pela ação de certas bactérias que podem produzir substâncias, tais como ácido hidrosulfúrico e sulfeto de amônia. 24

Corrosão sob tensão — A corrosão de um metal causada ou acelerada pela tensão. 24

Corte — (estruturas) — Estado de um trecho de barra em que são desprezíveis os esforços solicitantes que não sejam forças cortantes. 24

Corte — (concreto) — Tratamento das juntas horizontais de construção, para a remoção de todo o material superficial e as contaminações até a condição de limpeza e textura correspondente a da superfície de concreto recém-partido (rompido), fraturado. 478

Corte com disco — Operação de cortar o concreto endurecido usando disco de diamante ou de carboneto de silício. 24

Costura — Em serviços de concretagem, a operação de interligar subcamadas e/ou a "cabeça" (frente) de concreto, através do uso de vibradores de imersão. 24

Creep — Ver fluência. 412

Cura — Ver sazonamento. 361

Cura a vapor — A cura do concreto ou argamassa, sob vapor de água a determinada pressão e temperatura (normalmente entre 40°C e 215°C). 361

Cura adiabática — A manutenção das condições adiabáticas durante o período da cura do concreto ou da argamassa, evitando a troca de calor com o meio ambiente. 24

Cura em autoclave — A cura de produtos de concreto, ou cimento, em autoclave com temperatura geralmente entre 170°C e 215°C. 24

Curva de Fuller — A curva empírica para a graduação de um agregado; também conhecida por curva granulométrica ideal de Fuller-Thompson; a curva obtida pelo ajuste de uma parábola ou elipse à tangente em um ponto no qual a dimensão do agregado é um décimo da dimensão máxima. 251

Curva granulométrica — A representação gráfica das diversas porções de diferentes dimensões das partículas de um material, obtida pela locação das porcentagens individuais ou acumuladas, do material que passa em cada peneira de uma série, em um gráfico. 75-251

D

Dacito — Rocha magmática extrusiva equivalente ao granodiorito. Contém plagioclásio, quartzo, ortoclásio ou sanidina e, em menor quantidade, piroxênio, antibólio ou biotita, podendo ocorrer sob a forma de fenocristais. A massa fundamental pode conter algum vidro. 24

Danos por cavitação — Ca... ocorrem no concreto pela implosão (colapso) de bolhas de vapor no fluxo ...ta, que se formam em áreas de baixa pressão e implodem quando entram ...giões de alta pressão. 539

Defletômetro — Instrumento utilizado para a observação de deslocamentos. 25

Deflexão — A variação na posição ou forma de uma estrutura ou parte, devido ao efeito de cargas ou variações de volume, normalmente medida como variação linear de um plano estabelecido, em lugar da variação angular. 25

Deformação — Mudança de forma ou dimensões de um corpo por efeito de solicitações exteriores ou por ação do seu peso próprio. 25

Deformação contínua — Deformação devida à fluência, geralmente lenta. 25

Deformação elástica — Deformação proporcional à tensão e reversível. O corpo readquire as dimensões originais após a retirada dos esforços. Parcela da deformação que desaparece após a retirada da solicitação que a causou. 25

Deformação função do tempo — Efeitos combinados de variação autógena de volume, contração, fluência, expansão, retração e escoamento que ocorrem durante um período de tempo apreciável. 25

Deformação higrométrica — Deformação devida à variação de umidade. 25

Deformação lenta — Deformação que se processa no tempo, sem alteração da solicitação atuante. 412, 429

Deformação linear — Variação de comprimento. Geralmente considera-se positiva quando há aumento de comprimento e negativa no caso contrário. 124

Deformação linear específica (alongamento) — Quociente da deformação linear de um segmento elementar pelo comprimento inicial desse segmento. O alongamento é positivo se houver aumento do segmento e negativo caso contrário. 124

Deformação permanente — Deformação residual que se mantém no tempo. 25

Deformação plástica — Parcela da deformação que permanece sem alteração de volume, depois de retirada a solicitação que a causou. 25

Deformação residual — Deformação existente num dado instante, depois de retirada a solicitação. 25

Deformação superficial — Variação da área de uma superfície. Geralmente considera-se positiva quando há aumento de área e negativa caso contrário. 25

Deformação térmica — Deformação devida à variação de temperatura. 25

Deformímetro — O mesmo que extensômetro para concreto (vide). 481

Deletério — Que danifica, destrói. 100

Densidade (massa específica) — Relação entre massa e volume de um corpo. 73, 80, 86

Densidade absoluta (massa específica absoluta) — A relação entre a massa de um dado volume de material e a massa de água destilada correspondente ao mesmo volume e à mesma temperatura. 80, 86, 201, 239

Densidade aparente (massa específica aparente) — A relação da massa, ao ar, de um dado volume a certa temperatura, para a massa também ao ar, de um igual volume de água destilada à mesma temperatura. Se o material for sólido, o volume corresponde ao da parte impermeável. 80, 86, 201, 239

Densímetro — Instrumento que fornece a densidade de um líquido. 25

Desempenadeira — Ferramenta plana, de aço ou madeira, com cabo, usada em determinado estágio das operações de acabamento da superfície do concreto. 332

Desempenamento — A operação para retirar o concreto em excesso, durante o acabamento do concreto, ou para nivelar a superfície; normalmente executado por desempenadeira (metálica ou de madeira) ou por máquina acabadora (ver também sarrafear). 83, 332

Desfôrma — Ver desmoldagem. 26

Desintegração — Deterioração em pequenos fragmentos ou partículas, devida a alguma causa. 536

Deslocamento (escorregamento da ancoragem) — A perda de alongamento ou tensão do elemento tensor devida ao deslocamento da ancoragem ou escorregamento do elemento tensor. 26

Desmoldagem — Retirada da fôrma de corpos de prova de concreto ou de peças previamente moldadas. 83

Desvio padrão — Medida de dispersão de um conjunto de valores expresso pela raiz quadrada da variância. É a raiz quadrada da média quadrática das diferenças entre valor médio e os valores individuais. 316

Diagrama tensão-deformação — Diagrama de coordenadas cartesianas ortogonais que representa, nas ordenadas, a tensão principal não nula e, nas abscissas, o alongamento principal correspondente, observados num corpo homogêneo e isotrópico, cujos pontos se acham todos no mesmo estado simples de tensão. 96, 400

Diâmetro máximo do agregado (Ø máx) — Ver tamanho máximo do agregado. 26

Diatomito — Rocha sedimentar silicosa de origem orgânica (acaustobiólito), formada pelo acúmulo de carapaças ou algas diatomáceas. Apresenta, geralmente, cerca de 50% de porosidade. 195

Dicálcio-silicato — Ver silicato dicálcico. 26

Difração por raio "X" — A difração de raios "X", pela passagem através de substâncias; o fenômeno usado para identificar substâncias pelo arranjo atômico. 135

Dilatação — Deformação de um corpo, ou de um elemento seu, cuja forma geométrica se mantém semelhante à forma primitiva. A dilatação é positiva se houver aumento de dimensões e negativa (contração) no caso contrário. 26

Dilatação térmica — Dilatação devida à variação de temperatura. 26

Dilatômero — Aparelho utilizado para determinação da deformabilidade de maciços a partir de furos de sondagem rotativa. O dilatômero é geralmente empregado para o zoneamento, em termos de deformabilidade, de maciços de fundações de barragens. 26

Diluente — A substância líquida ou sólida que se mistura a constituintes ativos de uma formulação, para aumentar ou diminuir a concentração. 26

Dimensão máxima do agregado — Ver tamanho máximo do agregado. 26

Dinamômetro — Aparelho destinado à medição de forças por meio da deformação causada por estas sobre um sistema elástico. É constituído geralmente por mola ou por anel metálico, cuja deformação (diametral no caso do anel) é diretamente proporcional ao esforço que se deseja medir. 26

Diodo — Válvula eletrônica que contém somente dois eletrodos, o cátodo e a placa. Elemento semicondutor bipolar que permite a passagem de corrente somente em um sentido. 26

Diorito — Rocha plutônica, granular, praticamente sem quartzo, com plagioclásio intermediário e minerais ferromagnesianos, em especial hornblenda. 70

Dique — Construção sólida para represar águas correntes; em geologia é a massa rochosa de forma tabular discordante, que preenche uma fenda aberta que seccionou outra rocha preexistente. 26

Dispersão — Em estatística é a flutuação de uma variável aleatória de um conjunto de observações; variação do resultado de uma experiência que visa medir uma variável aleatória no decorrer de uma sequência de observações.
Em ótica é a diferença entre os índices de refração de meios distintos. 27

Dispersante — O material que atua como defloculante ou dispersor sobre materiais muito finos, impedindo a aglutinação de partículas. 27

Distanciômetro eletro-ótico — Instrumento destinado à medição precisa de distâncias em geodésia. A determinação da distância é geralmente processada por um computador incorporado ao aparelho, que calcula a distância horizontal e a diferença de nível entre o distanciômetro e o ponto de medição. Utiliza, normalmente, um feixe de luz infravermelha, que é projetado sobre uma mira refletora especial fixada sobre a estrutura cujo deslocamento se pretende medir. A distância é calculada computando-se o tempo gasto entre a emissão e a recepção do feixe de luz pelo instrumento. Tem sido grande a aplicação na medição dos deslocamentos horizontais de barragens de concreto, nos processos de trilateração e de triangulateração. 27

Difusividade térmica — É a condutividade térmica dividida pelo produto do calor específico e a densidade (massa específica); é um índice que representa a facilidade com que o material troca calor. 122

Dolomita — Mineral que possui uma estrutura cristalina específica, constituído por carbonatos de cálcio e magnésio em quantidades (equivalente químico) de 54,27% e 45,73% em massa respectivamente; a rocha que contém dolomita como principal constituinte. 108, 121

Dolomito — Rocha sedimentar constituída predominantemente de dolomita (carbonato de cálcio e magnésio). 70

Dosador — O recipiente usado para medir a massa ou volume dos constituintes da argamassa ou concreto. 27

Dosador automático — O dosador equipado com comportas e válvulas, que são operadas automaticamente ao se dar início ao ciclo de dosagem, para a dosagem e descarga de cada material. O sistema possui travas que impedem a recarga antes dos dosadores serem descarregados, das comportas serem fechadas e que as comportas não sejam abertas antes de se atingir o valor da dosagem. 27

Dosador manual — O dosador equipado com comportas e válvulas, operadas manualmente, com ou sem auxílio de sistema pneumático, hidráulico ou elétrico. A acuracidade da pesagem depende das condições de observação do operador. 27

Dosador semi-automático — O dosador equipado com comportas e válvulas que são operadas manualmente para a dosagem do material e que automaticamente se fecham ao atingir o valor indicado. 251

Dosar — Ver proporcionar. 27

Drenagem — A coleta e retirada de água de uma área. 27

Dúctil — Que possui ductilidade (ver ductilidade). 27

Ductilidade — Propriedade dos materiais que apresentam grandes deformações antes de romperem. 27

Dunito — Rocha ígnea ultramáfica composta quase que exclusivamente de olivina. 27

Durabilidade — A capacidade do material de resistir às intempéries, ataque, abrasão, e outras condições durante a vida útil. 97, 122, 235, 536

Dureza — Resistência que o material oferece ao esforço exercido na sua superfície sob determinadas condições padronizadas; propriedade característica de águas naturais, relativas ao seu maior ou menor teor em sais carbonatados. 394, 547

Dureza da água — Propriedade da água devida à presença de bicarbonatos, cloretos e sulfatos de cálcio e magnésio. Águas de elevada dureza podem produzir incrustações pela precipitação de crostas de $CaCO_3$ em condutos e impedir a formação da espuma de sabões. É usualmente expressa em mg/l de $CaCO_3$ equivalente. 27

E

Ebonite — Substância dura e negra obtida pela vulcanização de borracha, com excesso de enxofre. 28

Ebulição — Vaporização de um líquido sob pressão igual a sua pressão vapor. 28

Eficiência — Ver rendimento. 28

Eficiência do misturador — A capacidade do misturador em produzir uma mistura homogênea dentro de certo período; a homogeneidade é determinada pelo ensaio para avaliar a diferença relativa das propriedades de amostras coletadas de diferentes porções da mistura recém-produzida. 28

Eflorescência — O depósito de sais, normalmente branco, formado na superfície, sendo que a substância emergiu em solução do concreto ou argamassa e depositou-se por evaporação. (Nata) — A camada de material fraco pouco resistente às intempéries contendo cimento e finos do agregado, carreado pela água de exsudação até a superfície do concreto fresco, cuja quantidade geralmente aumenta pelo excesso de acabamento, vibração ou manuseio do concreto. 237

Eixos principais de inércia — Duas retas ortogonais, passantes por um ponto dado, em relação as quais é nulo o momento centrífugo da seção. Os momentos de inércia a elas referentes são o maior e o menor de todos os relativos a retas passantes pelo mesmo ponto. 28

Elastômero — Polímero com propriedades físicas semelhantes às da borracha. 28

Elasticidade — Propriedade de um corpo recuperar a sua forma primitiva quando deixa de atuar a solicitação que produziu a sua deformação. 28

Elasticidade instantânea — Elasticidade em que a recuperação da forma inicial do corpo se faz logo que cessa de atuar a solicitação. 28

Elasticidade perfeita — Elasticidade que se caracteriza pela existência de uma relação linear e homogênea entre as componentes do estado de tensão e as componentes da deformação. 28

Elasticidade retardada — Elasticidade em que a recuperação da forma inicial do corpo não se faz logo que cessa de atuar a solicitação. 28

Eletrólise — A produção de variações químicas pela passagem da corrente de uma fonte. 28

Elevação de temperatura — O aumento da temperatura causada pelo calor ou pela geração interna de calor, tal como a decorrente da hidratação do cimento no concreto. 502

Emenda — A união, ou ligação, de uma barra de armadura a outra através de transpasse, solda, dispositivos mecânicos ou outro sistema. 28

Emenda por solda de topo — A emenda de barras através da soldagem dos topos. 28

Emenda por transpasse — A união da armadura feita pela sobreposição das extremidades das barras. 28

Emulsão — Sistema físico-químico que contém duas fases, uma das quais, a fase dispersa, está extremamente subdividida e imersa na outra, a fase dispersora. 28

Enchimento de junta — Material compressível usado para preencher uma junta, de modo a impedir a infiltração de detritos e dar suporte para o selante. 28

Encruamento — Fenômeno de aumento da tensão limite de elasticidade de um material, como efeito de aplicação de uma deformação plástica a frio. 28

Endotérmico — Reação em que há ganho de calor. 196

Energia de distorção — Energia despendida para efetivar a distorção pura dos elementos de um corpo. 28

Energia de dilatação — Energia despendida para efetivar a dilatação dos elementos de um corpo. 28

Engenharia — Arte de aplicar conhecimentos científicos e empíricos e certas habilitações específicas à criação de estruturas; dispositivos e processos que se utilizam para converter recursos naturais em formas adequadas ao atendimento das necessidades humanas.

Ensaio — A tentativa, exame, observação ou avaliação usada como meio para medir a característica física ou química do material ou de uma estrutura ou peça. 29

Ensaio brasileiro — Ver ensaio de tração por compressão diametral. 29

Ensaio de abrasão Los Angeles — Ensaio para avaliar a resistência à abrasão de agregados para concretos. 92

Ensaio de Blaine — O método para determinação da finura do cimento ou outro material fino através do permeabilímetro de ar. 140

Ensaio de compressão — Ensaio executado em corpo de prova de argamassa ou concreto para determinar a resistência à compressão. 363

Ensaio de remoldagem — O ensaio para avaliar o trabalho necessário para a remoldagem do concreto fresco. 330

Ensaio diametral — Ver ensaio de tração por compressão diametral. 29

Ensaio Lobo Carneiro — Ver ensaio de tração por compressão diametral. 445

Ensaio de tração por compressão diametral — O ensaio para determinar a resistência à tração onde um corpo de prova cilíndrico é carregado por compressão diametral ao longo de uma geratriz toda, até a ruptura. 445

Ensaio triaxial — Ensaio através do qual um corpo de prova é submetido a carga transversal e axial simultaneamente. 389

Ensilar — Armazenar. 29

Entalpia — Função termodinâmica de estado, igual à soma da energia interna com o produto da pressão pelo volume do sistema; calor de fusão. 29

Enxofre — Elemento químico não metálico, cristalino, amarelo, com odor característico. 363

Epóxi — Material caracterizado, quimicamente, por possuir oxigênio ligado externamente à estrutura molecular dos compostos. 547

Equação — Qualquer igualdade entre entidades matemáticas que só é satisfeita para alguns valores dos respectivos domínios. 29

Erosão — Trabalho mecânico de desgaste realizado pelas águas correntes ou pelo vento. A desintegração progressiva de um sólido pela ação, abrasiva ou de cavitação, de gases, fluidos ou sólidos em movimento. 536

Erro — Em física, corresponde a qualquer medida de flutuação ou da incerteza associada a uma medição. 317

Esclerômetro — Aparelho utilizado para avaliar superficialmente a propriedade do concreto ou de maciços rochosos. A leitura no esclerômetro apresenta geralmente uma correlação com a resistência à compressão simples do material. 395

Escoamento — Maneira de fluir um material; deformação rápida e irreversível de um corpo sem aumento apreciável da tensão que a causa. 98

Escoar — Fazer correr (fluir) lentamente um líquido. 29

Escoramento — Disposição de conjunto de escoras para arrimar (suportar) fôrmas a receber concreto. Ver também cimbramento. 29

Escória — Resíduo silicoso que se forma na redução de minerais metálicos. 68, 133, 287

Escória de alto forno — O produto não metálico, constituído essencialmente de silicatos e aluminosilicatos de cálcio ou outros materiais básicos, que se desenvolvem em condições de fusão, simultaneamente com o ferro no alto forno. 133

Esforço — Designação genérica que abrange as noções de força (força concentrada, força distribuída sobre linha, força de superfície, força de massa), momento e tensão. 29

Esforço externo — Esforço proveniente do meio exterior, que atua sobre uma estrutura. 29

Esforço externo ativo — Esforço externo que é aplicado à estrutura, inclusive o que provém de aceleração de sua massa. 30

Esforço externo reativo — Esforço externo com que reagem os apoios da estrutura. São as reações de apoio. 30

Esforço interno — Esforço que se manifesta entre os elementos adjacentes de um corpo. São as tensões e suas resultantes. 30

Esforço intrínseco — Esforço interno em um corpo não sujeito à solicitação. 30

Espalhador de concreto — O equipamento utilizado para espalhar o concreto em camadas uniformes. 30

Espectrofotometria — Conjunto de métodos e técnicas de medidas da intensidade de radiação luminosa em função do comprimento de onda, num espectro de emissão ou de absorção. 117, 187

Espectroscopia a infravermelho — O uso de espectrosfotômetro para determinar a absorção do espectro infravermelho (comprimento de onda de 2,5 a 28 μm) de materiais; usado para determinação e identificação de materiais orgânicos. 30

Estabilidade — Estabilidade caracteriza a variação com o tempo, da tolerância dentro da qual qualquer medida da variável, dada por um determinado instrumento, se correlaciona com o valor atual da variação. Permanência de valores de uma variável dentro de determinados limites. 163

Estaca de concreto — Elemento de fundação em concreto armado e/ou protendido que pode ser moldada **in situ** ou, quando pré-moldada, cravada no solo, com auxílio de equipamento adequado. 30

Estação de observação — Tipo de marco utilizado para a instalação do teodolito, taquiômetro ou nível de precisão, nos processos geodésicos de instrumentação. 30

Estado de cisalhamento simples — Estado duplo de tensão em que as tensões principais têm soma nula. 30

Estado de compressão simples — Estado simples de tensão em que a tensão principal não nula é de compressão. 30

Estado de tração simples — Estado simples de tensão em que a tensão principal não nula é de tração. 30

Estado duplo de tensão — Estado de tensão, num ponto, de um corpo que se supõe só poder ser solicitado segundo direções jazentes em um mesmo plano. 473

Estado nulo de tensão — Estado de tensão em que são nulas todas as tensões. 30

Estado simples de tensão — Estado triplo ou duplo de tensão em que só uma das tensões principais não é nula. 30

Estado de tensão — Estado de tensão num ponto de um corpo capaz de ser solicitado em todas as direções. 30

Estado uniforme de compressão — Estado uniforme de tensão em que as tensões são de compressão. 30

Estado uniforme de tensão — Estado duplo de tensão cujas tensões principais são iguais. 30

Estado uniforme de tração — Estado uniforme de tensão em que as tensões são de tração. 30

Estalactite — Precipitado, mineral, alongado que se forma pela deposição de cima para baixo e evaporação de água, em uma superfície de rocha ou concreto. 30

Estalagmite — Precipitado, mineral, alongado que se forma pela deposição de baixo para cima e evaporação de água, em uma superfície de rocha ou concreto e normalmente de forma cônica. 30

Estanqueidade — Condição requerida para que uma estrutura seja impermeável. 252

Estatística — Parte da matemática em que se investigam os processos de obtenção, organização e análise de dados sobre um conjunto de informações e os métodos de tirar conclusões e fazer previsões com base nesses dados. 31

Estático — Relativo ao equilíbrio dos corpos sob a ação de forças. 31

Estearato de cálcio — O produto da reação da cal e ácido esteárico, usado como um agente para repelir a água no concreto. 234

Estratificação — Disposição em camadas. 31

Estratificada — Rocha cujos componentes se dispõem em estratos ou camadas devido a diferenças de textura, cor, resistência, composição etc.; é uma característica das rochas sedimentares e também de algumas metamórficas. 31

Estrato — Cada uma das camadas das rochas estratificadas. 31

Estribo — A armadura usada para resistir tensões diagonais e/ou cisalhantes em um elemento estrutural. Barra de aço dobrada em ângulo reto usada para manter a armação em sua posição. 31

Estrutura — O conjunto das partes de uma construção que se destina a resistir a cargas. 31

Estufa — Ver forno. 99

Estuque — Pasta de cimento usada para revestimentos e ornamentos. 31

Etanol — Álcool. 31

Éter — Classe de composto orgânico cuja molécula é constituída por dois radicais hidrocarbonetos ligados a um mesmo átomo de oxigênio. 31

Etringita — O mineral sulfato de cálcio, sulfato aluminato 3 $Ca.O.\ Al_2O_3.\ 3\ CaSO_4.\ 30\text{-}32\ H_2O$ ou $Ca_6\ [Al(OH)_6]_2.24H_2O[(SO_4)_3.\ 1{,}5H_2O]$ que ocorre na natureza ou que se forma pelo ataque de sulfatos a argamassas em concretos; o produto da reação principal de expansão nos cimentos expansivos; designado antigamente como "Bacilo de Cimento". 132, 135

Evolução unitária de temperatura — É o quociente da evolução adiabática da temperatura do concreto, pelo consumo de aglomerante (cimento mais material pozolânico, quando usado) do referido concreto; geralmente pode ser calculado em várias idades. 516

Exotérmico — Reação em que há desprendimento de calor. 131, 167

Expandir — Dilatar. 31

Expansão — Deformação em que há aumento de volume. 132, 480

Experiência — Ato ou efeito de experimentar; habilidade, perícia. 31

Exsudação — O fluxo próprio da água, dentro da mistura, ou sua emergência para uma argamassa ou concreto recém-lançado; é causado pela acomodação dos materiais sólidos na massa do concreto. 154, 197, 236, 337

Extensômetro corretor — Denominação dada ao extensômetro para concreto, instalado no interior da câmara atensorial, com o objetivo de possibilitar a correção das deformações do concreto provocadas por efeitos térmicos, por variações de umidade e pelas variações volumétricas autógenas do concreto. 31

Extensômetro de grande base — Instrumento utilizado para a medição da deformação de maciços. 31

Extensômetro elétrico de resistência — Instrumento empregado para medição de deformação superficial em peças e modelos, utilizando como princípio de funcionamento o fato da resistência elétrica de um filamento metálico variar com a tensão aplicada. 96, 123, 381

Extensômetro linear — Instrumento utilizado para a detecção de deslocamentos superficiais. 31

Extensômetro múltiplo — Baseado no mesmo princípio de extensômetro simples, o extensômetro múltiplo apresenta a vantagem de possibilitar a determinação de várias deformações axiais. 32

Extensômetro para concreto — Instrumento instalado no interior do concreto de uma estrutura e que mede a deformação do concreto na direção do seu eixo. 32

— F —

Faceta — Face de um elemento de superfície considerado num ponto de um corpo, e que pertence à porção do corpo cujo equilíbrio se pretende estudar. A cada elemento de superfície estão associadas duas facetas. 32

Falsa pega — O desenvolvimento rápido da rigidez de uma pasta, argamassa, ou concreto fresco, sem o desprendimento de muito calor sendo que essa rigidez pode ser anulada e a mistura novamente tornada plástica pela remistura enérgica, sem adição de água; o enrijecimento prematuro; pega prematura. 160

Fanerito — Designação genérica para todas as rochas em que os componentes individuais são reconhecíveis a olho nu (normalmente superiores a 0,2 mm). 32

Fator água/cimento (relação água/cimento) — A relação entre a quantidade de água, excluindo a absorvida pelo agregado, e a quantidade de cimento na mistura de argamassa ou concreto; preferivelmente expressa em massa. 177

Fator AF (módulo alumina-ferro) — A relação molar ou de massas entre o óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), no cimento Portland. 133

Fator de agregado graúdo — A relação, expressa como decimal, da quantidade (em massa ou volume) de agregado graúdo, de um volume unitário de um concreto bem dosado, para a quantidade de agregado graúdo compactado no mesmo (b/bo). 32

Fator de compactação (empolamento) — A relação entre a massa de concreto necessária para ocupar um recipiente com forma e volume padrões, quando lançado sob determinadas condições de ensaio, e a massa de concreto compactado no mesmo recipiente. 332

Fator de consistência — A medida da fluidez, aproximadamente análoga à viscosidade, que traduz a facilidade com que uma calda pode ser injetada em poros ou fissuras; normalmente é a medida da consistência pelo ângulo de rotação do torque no viscosímetro. 32

Feldspato — Grupo de importantes minerais formadores de rochas de fórmula geral: MA $(Al, Si)_3O_8$ onde M = K, Na, Ca, Ba, Rb, Sr e Fe. Pode-se considerar dois subgrupos: o dos feldspatos alcalinos ou potássicos (ortoclasio, microclínio, sanidina) e o dos plagioclásios ou álcali-cálcicos (série albita-anortita). Os plagioclásios ou intermediários, de acordo com a maior riqueza em moléculas albita, anordita ou equivalência entre elas respectivamente. 70

Felita — Nome usado por Tornebohm (1897) para identificar uma forma de silicato dicálcio ($2CaO.SiO_2$), um dos componentes cristalinos do clínquer de cimento Portland (ver também Alita, Belita e Celita). 32

Fenolftaleína — Substância cristalina, incolor, solúvel em álcool, usado como indicador ($C_{20}H_{14}O_4$). 121

Ferro — Elemento químico, metálico, branco-acinzentado, duro, tenaz, reativo, que forma ligas que têm aplicações importantes; metal maleável e tenaz. 68

Ferro aluminato tetracálcico — O composto da série cálcio, alumínio, ferrita, tendo a composição ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) abreviadamente (C_4AF), que normalmente se considera ser o alumínio ferrita presente quando se calculam os compostos a partir da análise química (ver também a Browmilerita). 131

Ferro fundido — Liga de ferro e carbono, com teor deste último superior ao que se encontra no aço. 32

Ferro galvanizado — Ferro recoberto por uma película de zinco. 32

Ferro gusa — Material que se obtém diretamente do alto-forno. Em geral com elevada proporção de carbono e diversas impurezas. 133

Ferrocimento — O material estrutural de seção delgada constituído de argamassa armada por um certo número de malhas de aço de pequena abertura. 33

Ferromagnesiano — Diz-se dos minerais de cor escura, constituintes de rochas, que contém ferro e magnésio em suas moléculas. Máfico. 70

Fibrocimento — Material de construção, resultante de uma mistura íntima de cimento Portland e asbestos (variedade de anfibólio composta de silicato de cálcio e magnésio, que se apresenta em massas fibrosas) e que apresenta boas propriedades de resistência às intempéries e propriedades isolantes do calor e da umidade. 33

Filito — Rocha metamórfica de granulação fina, intermediária entre o micaxisto e a ardósia, constituída de minerais micáceos, clorita e quartzo, apresentando forte foliação. Tem comumente aspecto sedoso, devido à sericita. Origina-se, em geral, de material argiloso por dinamometamorfismo e recristalização. 108

Filler — Material constituído de fragmentos, inertes de rochas de tamanhos máximos inferiores a 0,075 mm, usado para suprir deficiência granulométrica, melhorar a trabalhabilidade, reduzir a retração. 310, 363, 470

Filonito — Rocha metamórfica de granulação muito fina, resultante de trituração de rochas, inicialmente de granulação mais grossa. Macroscopicamente assemelha-se aos filitos, com reconstituição química pronunciada, originando películas de mica ao longo dos planos de xistosidade. 33

Fim de pega — O grau de rigidez de uma pasta de cimento e água, após o início de pega normalmente estabelecido como um valor empírico representado pelo intervalo de tempo (horas e minutos) necessário para que a pasta resista à penetração de uma agulha padronizada. Também aplicável a misturas de argamassa e concretos em ensaios padronizados (ver também início de pega). 160

Finura — A medida do tamanho de uma partícula. 134, 138, 201, 220

Finura Blaine — A finura de materiais em pó, tais como cimento e pozolanas, expressa como área superficial, em centímetros quadrados por grama, determinada pelo aparelho de Blaine. 138, 201

Finura pelo turbidímetro — A finura de um material, tal como cimento Portland, normalmente expresso como a área da superfície total, em metros quadrados, por quilograma, determinada por um turbidímetro (ver também finura pelo Wagner). 33

Finura Wagner — A finura do cimento Portland expressa como a área total da superfície, em metros quadrados por quilograma, determinada pelo turbidímetro de Wagner de acordo com procedimentos padronizados. 138

Fissuração por retração — Fissuração de uma estrutura, ou elemento estrutural, devida à ruptura por tração causada pela restrição interna ou externa, tal como a redução do teor de água, ou pela carbonatação, ou por ambos. 33

Fissura térmica — A fissuração devida à ruptura, por tração, causada, pela queda de temperatura em elementos submetidos a restrições externas, ou por gradientes diferenciais em elementos submetidos a restrições internas. 33

Fissuras superficiais — O desenvolvimento aleatório de fissuras de pequena abertura na superfície do concreto. 33

Fissuras transversais — Fissuras que se desenvolvem normais a maior dimensão da peça. 33

Flexão pura — Estado de uma barra, em que os esforços solicitantes são só momentos fletores. Na prática é considerada como caso particular de flexão simples, com força cortante nula. 33

Flexão simples — Estado de uma barra em que são nulos os momentos de torção total e as forças normais. 33

Fluência — Fenômeno de deformação, com o tempo, de um corpo sob tensão constante. Deformação sob carga constante, dependente do tempo, revelando propriedades viscoelásticas de um material. (Ver também deformação lenta). 400

Fluência crescente — Fluência em que a velocidade de deformação é crescente. 34

Fluência decrescente — Fluência em que a velocidade de deformação é decrescente. 34

Fluência estacionária — Fluência em que a velocidade de deformação é constante. 34

Fluidez — O inverso da viscosidade de um fluido; a medida da consistência de uma mistura fresca de concreto, argamassa, pasta, calda. 325

Fluidificante (Fluidificador) — O aditivo usado, em calda, para reduzir o tempo de escoamento, sem alterar o teor de água. 34

Flúor — Elemento químico pertencente aos halogênios, gasoso, amarelado e muito reativo. 34

Fluorescência por raio "X" — Características de uma radiação secundária emitida por um elemento resultante da excitação pelo uso de raios X, usada na análise química. 34

Fluossilicato — Fluoreto silícico de magnésio ou zinco, usado para preparar soluções aquosas, algumas vezes aplicadas como agentes endurecedores da superfície do concreto. 34

Folhelho — Rocha sedimentar laminada de aspecto foliado, de granulação fina, na qual as superfícies de acabamento são de fácil separação. Distinguem-se dois tipos de folhelhos: síltico e argiloso. Nos folhelhos síltico predomina o silte, enquanto que nos folhelhos argilosos, a argila predomina sobre outros minerais. Os minerais argilosos dos folhelhos incluem-se em três grupos — o da caulinita, o da ilita e o da montmorilonita. 99

Folhelho expandido (Argiloso ou xistoso) — Agregado vesicular leve obtido pela queima adequada em forno de materiais crus ou pela sinterização controlada. 34

Força concentrada — Força que, por agir sobre área muito pequena da superfície do corpo e para efeito de cálculo, é considerada aplicada em um ponto. 34

Força cortante — Resultante das tensões tangenciais na seção transversal de uma barra. 34

Força de massa — Força proveniente de aceleração aplicada aos elementos do corpo. 34

Força de superfície — Força que se distribui sobre a superfície de um corpo. Se for normal a esta e medida por unidade de área, corresponde a uma pressão. 34

Força distribuída sobre linha — Força que, por agir sobre faixa muito estreita da superfície do corpo, para efeito de cálculo, é suposta distribuída sobre uma linha. 34

Força normal — Resultante das tensões normais na seção transversal de uma barra. 34

Força normal de compressão — Força normal que tende a aproximar as porções da barra limitada pela seção transversal considerada. 34

Força normal de tração — Força normal que tende a afastar as porções da barra limitadas pela seção transversal considerada. 34

Fôrma — A estrutura ou molde, temporário para suportar o concreto enquanto está em condições de pega e de desenvolvimento de resistência, até poder se auto-suportar. 87

Fôrma deslizante — A forma que é içada, ou se eleva, à medida que o concreto é lançado; pode se mover horizontalmente como no caso dos pavimentos; ou inclinada como em rampas de canais e soleiras vertentes; ou verticalmente como em muros; paredes, pilares, dutos etc. 344

Forno — O sistema para secagem, carbonização, aquecimento, calcinação, cozimento, sinterização ou queima de vários materiais. 168, 223

Forno de cimento — O forno onde as matérias-primas, adequadamente dosadas é secada, calcinada e transformada em clínquer, às temperaturas entre 1.420°C e 1.650°C; podendo ser rotatório, em forma de chaminé ou outro. 34

Forno rotatório — O cilindro comprido, de aço, revestido internamente com material refratário, suportado por mancais de modo que possa girar, com uma pequena inclinação em relação à horizontal, onde matérias-primas são introduzidas para cozimento. 35

Fotoelasticidade — Processo de análise das deformações de um corpo sujeito a tensões, baseado na anisotropia ótica que elas provocam. Campo da física que estuda as propriedades e o comportamento dos materiais fotoelásticos. Entende-se por material fotoelástico, certos materiais transparentes, em particular, certos plásticos, que quando submetidos a esforços mecânicos, provocam a decomposição de um raio luminoso, que incide ao longo de um dos eixos principais de tensão, em duas ondas componentes, cada uma com seu plano de vibração (plano de polarização) paralelo a um dos planos principais. Além desse fato, a luz percorre as trajetórias com velocidades diferentes, que dependem das magnitudes das tensões principais no material. Este fenômeno permite a visualização de franjas de interferência fotoelástica, cujo número e geometria é uma função direta do estado de tensões a que está submetida a peça. 35

Fotômetro de chamas — O instrumento usado para determinar elementos (especialmente sódio e potássio do cimento Portland) pela intensidade de cor de um espectro resultante da introdução da solução dos compostos em uma chama. 117

Fragilidade — Propriedade dos corpos que rompem sem que haja grandes deformações. 35

Friável — Que pode reduzir-se a fragmentos ou pó, com certa facilidade, quando submetido a um processo mecânico de degradação. 97

Frequência — Repetição periódica de eventos ou fenômenos. Na estatística é o número de vezes que um valor ou um subconjunto de valores, do domínio de uma variável aleatória, aparece numa experiência ou numa observação de caráter estatístico. 35

Função — Qualquer correspondência entre dois ou mais conjuntos. 35

Fundação — Parte de uma construção destinada a distribuir as cargas sobre o solo, ou rocha. O material ou os materiais que recebem as cargas da estrutura e as transmitem para o maciço de solo ou rocha. 35

Fundete — Substância que auxilia a fusão dos metais. 134

Fuste — Parte principal de uma coluna ou pilar, entre o capitel e a base. 35

— G —

Gabarito — Instrumento com que se verifica certas medidas. 35

Gamagrafia — Radiografia que utiliza raios gama de um nuclídeo radioativo. 35

Gambiarra — Diz-se, na linguagem comum nas obras, a solução improvisada e/ou provisória para problemas e imprevistos. 35

Gancho da fôrma — Dispositivo usado para içar a fôrma. 35

Garantia de qualidade — O sistema ou rotina, de procedimentos para selecionar níveis de qualidade exigidos para um projeto, ou parte dele, a fim de avaliar as funções estabelecidas e assegurar que esses níveis sejam atendidos. 35

Gaxeta — Peça (de amianto, linho, algodão, metal, borracha ou outro material) com que se completa a vedação em juntas. 35

Gel — Sistema coloidal constituído por uma fase dispersora líquida e uma fase dispersa sólida e que apresenta propriedades macroscópicas (elasticidade, manutenção de forma etc) semelhante as dos sólidos. Matéria em estado coloidal que não se dissolve, mas mantém em suspensão, em solventes, sem se precipitar, exceto sob ação de calor ou de eletrolito. 100, 106

Gel de cimento — O material coloidal que corresponde à maior parte da massa porosa, que faz parte da pasta de cimento hidratada. 35

Gel de Tobermorita — O ligante do concreto curado úmido ou em ambiente de autoclave, possuindo de 1,5 a 2,0 moles de cal por mol de sílica. 35

Gesso — Gipsita cozida a baixa temperatura, que faz pega com água, e que por isso é empregada nas moldagens e para controle da pega do cimento, usado na moagem. 130, 135, 160

Gesso para reboco — Gesso ($CaSO_4.1/2H_2O$) no qual 3/4 da água de ligação química foi eliminada por aquecimento; quando umedecido recombina com água e endurece rapidamente. 35

Gipsita — Mineral monoclínico, sulfato de cálcio hidratado ($CaSO_4.2H_2O$). 99

Gnaisse — Rocha metamórfica de granulação grossa, bandada irregularmente. A xistosidade é pouco evidente devido a predominância de quartzo e feldspato sobre os minerais micáceos. Produto de metamorfismo regional, especialmente de alto grau. Rocha de composição mineralógica semelhante ao do granito, sienito ou diorito. 71

Graduação (Granulometria) — A distribuição de partículas de um material granular em vários tamanhos, normalmente expressa em termos de porcentagens acumuladas retidas ou passantes a cada uma das aberturas das peneiras ou, ainda, expressa por porcentagens entre determinadas aberturas de peneiras (Ver análise granulométrica). 272

Granito — Rocha plutônica, magmática, ácida, granular, essencialmente constituída por quartzo e feldspatos alcalinos e acessoriamente por biotita, muscovita, piroxênios e anfibólios. Possui coloração clara. 70, 483

Granodiorito — Rocha plutônica, ácida, granular, de composição intermediária entre o adamelito e o quartzo diorito, constituída por plagioclásio, quartzo e feldspato potássico; com biotita, hornblenda e, mais raramente, piroxênio. 36

Granulito — Rocha metamórfica equigranular, sem minerais micáceos ou anfibólios e, portanto, sem xistosidade nítida. Produto de metamorfismo regional do mais alto grau. 36

Granulometria — Ver análise granulométrica. 73

Grauvaca — Rocha sedimentar constituída de fragmentos arenosos, geralmente quartzo, e quantidade significativa de material argiloso. 108

Gravata — O elemento tensor colocado na fôrma, de modo a impedir a sua abertura sob ação da pressão decorrente do comportamento líquido que o concreto ainda plástico possui. 36

Gravimetria — Conjunto de métodos e técnicas de medidas com base na aceleração da gravidade; sedimentação. 184

Grelha — A peneira simples (não dupla ou tripla) estacionária; ou o conjunto de barras dispostas paralelamente e em ângulo, de modo a retirar as partículas maiores que uma certa dimensão no beneficiamento de agregados ou outros materiais. 36

Gres — Termo não usual no Brasil, mas muito utilizado em Portugal para designar arenito. 36

Groove (Ver Ranhura) — Sulco formado na superfície do concreto, ou argamassa, moldado ou acabado, para controlar e orientar o aparecimento de fissuras, ou para produzir efeitos arquitetônicos. 36

— H —

Hematita — O mineral óxido de ferro (Fe_2O_3) usado como agregado em concreto (pesado) de elevada massa específica; em pó é usado como pigmento vermelho para concreto aparente. 68

Heterogêneo — Característica de um meio, cujas propriedades variam de ponto para ponto. 92, 351

Heterogeneidade — Propriedade do que é heterogêneo. 92, 351

Hidratação — Formação de compostos pela combinação de água com outra substância; em concreto é a reação entre o cimento hidráulico e a água. Associação de uma ou mais moléculas de água a uma espécie química. 81

Hidrato (Hidróxido) — Produto resultante da combinação química da água com outro componente ou elemento. Composto químico que possui uma ou mais moléculas de água. 98

Hidráulico — Referente a qualquer líquido, especialmente a água. 95

Hidrófugo — Diz-se do material compacto que não se impregna de umidade. 36

Higroscópico — Material ou substância que tem grande afinidade pelo vapor de água, sendo capaz de retirá-lo de uma atmosfera ou eliminá-lo de uma mistura gasosa. 433

Histograma — Representação gráfica de uma distribuição de freqüências em que as freqüências de classes são representadas pelas áreas de retângulos contíguos e verticais, com as bases colineares e proporcionais aos intervalos das classes. 37

Holohialina — Textura das rochas ígneas compostas inteiramente por vidro. Textura vítrea. 37

Homogeneidade — Propriedade de um corpo possuir as mesmas características em todos os seus pontos. 269, 325

— I —

Içamento — A seqüência de operações, pela qual as peças pré-moldadas são colocadas nos locais adequados da estrutura. 37

Ígnea — Rochas originais formadas inicialmente e a grandes profundidades da terra. 69, 70

Ilmenita — O mineral titanato de ferro ($FeTiO_3$) que na forma pura, ou impura, é comumente usado como agregado em concreto pesado (elevada massa específica). Mineral opaco acessório de rochas ígneas (principalmente melanocráticas) e metamórficas. Entre os sedimentos ocorre mais freqüentemente que a magnetita, dada a sua maior resistência aos agentes de intemperismo. 37

Imbricamento (Travamento de agregados) — Intertravamento. A projeção das partículas de agregados através de uma junta ou fissura, de modo que as cargas são transferidas por cisalhamento ou compressão e o alinhamento fica mantido. 69, 70

Impermeabilização — Conjunto de processos destinados a reduzir ou impedir a passagem da água, diminuindo o coeficiente de permeabilidade de uma superfície ou de uma zona onde ocorre percolação d'água. Tratamento do concreto ou argamassa de modo a retardar a passagem ou absorção de água, ou vapor, pela aplicação de um revestimento das superfícies expostas, ou pelo uso adequado de aditivos ou de mantas pré-fabricadas. 37

Impermeável — Que não se deixa atravessar por fluídos, especialmente a água. 335

Inclinômetro — Instrumento destinado à observação da inclinação de um furo de sondagem em relação a vertical. 37

Incorporação de ar — A capacidade de um material, ou processo, em criar um sistema de pequenas bolhas (menores que 1 mm) de ar durante a mistura da pasta, argamassa ou concreto. 232

Incrustrações — Flocos localizados ou esfoliações que ocorrem junto à superfície do concreto endurecido. 37

Início de pega — O grau de rigidez de uma pasta de cimento e água menor que o fim de pega, normalmente estabelecido como um valor empírico representado pelo intervalo de tempo (horas e minutos) necessário para que a pasta resista à penetração de agulha padronizada. Também aplicável a misturas de argamassa e concretos, em ensaios padronizados (ver também fim de pega). 160

Injeção em circuito aberto — O sistema de injeção sem condições de recirculação da calda, para o bombeamento. 37

Injeção em circuito fechado (com recirculação) — Injeção de calda em um furo interceptando fissuras ou vazios, a serem preenchidos sob uma certa pressão, sendo que a calda atinge o furo com uma pressão maior que aquela que chega aos vazios e o excesso de calda retorna para o sistema de injeção, para recirculação. 37

Inócuo — Inofensivo, que não causa danos. 100

Intemperismo — Alterações na cor, textura, resistência, composição química ou outras propriedades de material artificial ou natural devido à ação das intempéries. 37

Conjunto de processos que ocasionam a alteração e a decomposição química das rochas e dos minerais graças à ação de agentes atmosféricos e biológicos. 101

Intergranular — Textura de rochas ígneas caracterizada principalmente por ripas de plagioclásio, dispostas caoticamente, sendo seus interstícios angulares preenchidos por grânulos ferromagnesianos (olivina, piroxênio, minério de ferro). 37

Intrusiva — Nome dado a rochas geralmente de origem ígnea, cujo corpo está incrustrado em outras rochas. As plutônicas e hipoabissais são rochas intrusivas. Cf.: Plutônica (rocha). 69

Invar — Aço constituído por uma liga de Ferro (64%) e níquel (36%), que apresenta a mais tênue dilatância no domínio da temperatura ambiente até 230°C. Seu coeficiente linear de dilatação térmica é da ordem de 5×10^{-7}/°C. É muito empregado na confecção de instrumentos de precisão, tais como extensômetros, coordinômetros, alongametros, etc., visando atenuar os efeitos das variações de temperatura. 38

Invariantes da deformação — Somas dos menores principais de 1.ª, de 2.ª e de 3.ª ordem, do determinante cujas componentes são as componentes da deformação num ponto. Designam-se, respectivamente, por primeiro, segundo e terceiro invariantes da deformação num ponto. 38

Isoieta — Linha que une os pontos de mesmo valor de precipitação atmosférica, em um determinado período de tempo. É representada em altura de coluna d'água. 38

Isotropia — Propriedade de um corpo possuir as mesmas características em todas as direções. Tratando-se de folha, só se consideram as direções jazentes no plano que é tangente ao seu folheto médio no ponto considerado. 398

Itabirito — Rocha metamórfica de minério de ferro, xistosa e com lamelas de hematita micácea. 38

— J —

Jacaré — Espécie de colher de pedreiro com que se introduz argamassa nas juntas das alvenarias. 38

Jatear — Processo de limpeza de superfícies. Consiste em lançar junto com ar comprimido sob pressão, água e materiais abrasivos a fim de remover impurezas. 478

Jato de ar e água — Jato de água e ar, de alta velocidade, misturados no bico, usado para a limpeza de superfícies de rocha ou concreto como as juntas de construção. 478

Jato de areia — O sistema de tratamento (corte) da superfície do concreto, utilizando um jato de areia, expelido por um bico, em alta velocidade sob ação de ar comprimido. Usado também para expor o agregado em concretos arquitetônicos. 478

Junta de contração — A superfície regularmente espaçada, criada na estrutura de concreto, para propiciar um plano de descontinuidade, de modo a controlar o aparecimento de fissuras. 38

Junta de construção — A superfície de união entre duas camadas de concreto, lançadas em sequência, através da qual é desejável que exista uma ligação entre os dois concretos, e através da qual a armadura, quando existir, não possui descontinuidade. 478

Junta de contração injetada — A junta de contração preenchida por calda. 38

Junta de expansão (dilatação) — A separação, entre partes adjacentes de uma estrutura de concreto, projetada para permitir pequenos movimentos relativos e independentes, semelhantes aos causados pelas variações térmicas. 520

Junta de isolamento — Ver junta de contração. 38

Junta fria — A junta ou descontinuidade resultante do atraso de lançamento do concreto, de tal forma a impedir ou prejudicar a união dos materiais (concretos) em subcamadas sucessivas. 38

Junta semiflexível — A união, onde a armadura é disposta, de modo a permitir certa rotação da junta. 38

Junta transversal — A junta paralela a uma dimensão intermediária da peça. 38

— L —

Laje — Peça em concreto (armado) que faz parte de uma estrutura, na forma de teto ou piso. 344

Lama — A mistura de água e qualquer material fino e insolúvel, tal como cimento Portland, escória ou argila em suspensão. 38

Lama de proteção (Slush Grouting) — A calda usada para cobrer a rocha de fundação, que posteriormente é coberta por concreto; usualmente espalhada com vassourões pelas reentrâncias ou fissuras da rocha. 39

Lamela — Placa ou lâmina muito delgada. 71, 89

Lançamento — O processo de colocação e adensamento do concreto; a quantidade de concreto colocada e acabada durante uma operação contínua. 323

Lance – (Ver camada). 39

Larnita — O mineral beta silicato dicálcico $\beta(Ca_2SiO_4)$ que ocorre na natureza, na Irlanda do Norte, e artificialmente nas escórias, é como um dos maiores constituintes do cimento Portland. 39

Látex — A emulsão aquosa de borracha sintética ou plástico obtida por polimerização e usado especialmente como revestimento ou adesivo. 39

Lava — Material fundido expelido por vulcões; sua solidificação origina rochas efusivas ou vulcânicas, de estrutura porosa, vítrea e textura porfirítica ou afanítica. 71

Lei de Abrams — A regra que estabelece que, com certos materiais e condições de ensaio, a relação (fator) entre a quantidade de água e a quantidade de cimento, determina a resistência de uma mistura de concreto de consistência trabalhável. 251

Lei de Darcy — Lei que rege a proporcionalidade entre a vazão específica de um líquido que flui através de um meio poroso e o gradiente hidráulico, em regime de fluxo laminar. 462

Lei de Hooke — Lei que rege o comportamento dos corpos elásticos isótropos cujas deformações são proporcionais às tensões que as produzem. Válida para deformações dentro do limite elástico (região de proporcionalidade). 39

Lei de Hooke generalizada — Lei segundo a qual, nas deformações elásticas muito pequenas, as componentes do estado de tensão num ponto são funções lineares das componentes das deformações nesse ponto; estas funções são também homogêneas no caso de o estado inicial de referência do corpo ser o estado neutro. 39

Leucita — Mineral do grupo dos feldspatóides, característico de rochas ígneas alcalinas, especialmente lavas básicas ricas em potássio; $K(AlSi_2O_6)$. 39

Leucocrática — Relativo a rochas ígneas constituintes. 39

Ligação mecânica (Aderência) — Nas construções de concreto, em geral, o intertravamento físico entre a pasta de cimento e agregados, ou entre o concreto e armadura (principalmente a resistência ao deslizamento de uma barra ancorada, e não a ligação por adesão). 39

Limite de proporcionalidade — A maior tensão que um material é capaz de suportar sem se desviar da proporcionalidade tensão-deformação (lei de Hooke). 39

Limite de vibração — O tempo ao fim do qual o concreto fresco endurece o suficiente para não se movimentar sob ação de vibração. 39

Limite elástico — A tensão limite, além da qual a deformação não é totalmente recuperada. 39

Limonita — Mineral composto de óxidos de ferro hidratados; ocasionalmente usado em concreto pesado (elevada massa específica), devido a elevada massa específica e teor de água que contribuem para eficiência em blindagem contra radiações. 39

Linha neutra — Lugar geométrico dos pontos da seção transversal em que são nulas as tensões normais. 39

Linhas de junta fria — Linhas visíveis, nas superfícies do concreto moldado, indicando a ocorrência de juntas onde uma camada (ou subcamada) de concreto tenha endurecido antes do lançamento do concreto subseqüente. 39

Liquefazer — Tornar líquido; fundir; derreter. 39

Lixiviação — Operação de separar, de certas substâncias, por meio de lavagem, os sais nelas contidos. 40

Luva de expansão — O revestimento metálico tubular para barras passantes, para possibilitar o movimento livre através de uma junta. 40

Luz — Espaço entre colunas, vigas ou paredes; vão livre. 40

— M —

Macaco — Dispositivo mecânico usado para levantar cargas, para aplicar força em cabos de protensão, ajustar o posicionamento de fôrmas etc. 416

Macaco plano — Macaco hidráulico constituído por uma chapa metálica delgada, dobrada e soldada em forma toroidal, que expande quando por ação de uma pressão interna. 40

Macaco tórico — Ver macaco plano. 40

Magma — Massa natural fluida, ígnea, de origem profunda e que, ao resfriar-se, se solidifica, originando a rocha magmática. 69

Magmática — Nome dado a qualquer tipo de rocha que provém da solidificação de massas líticas em fusão denominadas "magmas"; ígnea. 40

Magnetita — Mineral opaco acessório de rochas ígneas (principalmente melanocráticas) e metamórficas. Menos comuns nas rochas sedimentares; (Fe_3O_4). O principal constituinte do óxido negro de ferro magnético; com massa específica ao redor de 5.200 kg/m³ e dureza de aproximadamente 6 na escala de Mohs; usado como agregado em concreto pesado (concreto de elevada massa específica). 68

Malha soldada — Malha constituída por fios longitudinais e transversais, dispostos ortogonalmente e soldados entre si nos pontos de intersecção. 40

Manômetro — Instrumento utilizado para a medição de pressão de líquidos e gases. 140

Máquina acabadora — Equipamento motorizado usado para dar o acabamento e textura desejados à superfície do concreto. 40

Marco de visada — Dispositivo instalado em vários pontos ao longo do coroamento de uma barragem ou em vários níveis do paramento de jusante e utilizado para fornecer um ponto de visada aos instrumentos utilizados nos processos geodésicos. 40

Marco superficial de deslocamento — Dispositivo utilizado para materializar, sobre a crista e sobre as bermas de uma barragem, pontos para o controle geodésico dos deslocamentos horizontais e verticais da barragem. 40

Marga — Calcário, argiloso, normalmente contendo de 35% a 65% de carbonato de cálcio ($Ca\ CO_3$), encontrado no fundo de lagos e lagoas ou pântanos. 40

Mármore — Calcário metamorfoseado e recristalizado, duro e compacto. Rocha metamórfica constituída predominantemente de calcita e/ou dolomita recristalizadas, de granulação fina a grossa, em geral com textura granoblástica. 70, 121

Massa compactada seca — A massa por volume unitário de agregado seco compactado por apiloamento sob condições padrões; usada para determinação da massa específica aparente. 80, 86

Massa específica — (Na condição saturada superfície seca) é a massa específica absoluta, incluindo-se na massa a água dos poros permeáveis. 80, 86, 201, 239, 337

Massa específica absoluta — A relação entre massa e volume de um sólido ou líquido, tendo como referência o vácuo, sob uma temperatura estabelecida. 80, 136, 201

Massa específica aparente solta — A relação entre massa e volume de um material permeável (incluindo-se no volume os vazios permeáveis ou não) a uma certa temperatura. 80, 86, 201

Massa específica solta — (Na condição saturada superfície seca) é a massa específica aparente solta, exceto a massa que inclui a água dos poros permeáveis. 80, 86, 201

Matação — Fragmento de rocha destacado, transportado ou não, com dimensões superiores a 25 cm, comumente arredondado. 40

Maturidade — Envelhecimento; em concreto corresponde ao ciclo de cura e é expresso pelo produto do tempo de duração do ciclo pela temperatura correspondente do ciclo. 41

Medidor de ar — Aparelho para a determinação do teor de ar de argamassa ou concreto. 337

Medidor de convergência — Aparelho usado em obras subterrâneas, sendo também utilizado no controle dos deslocamentos superficiais em taludes rochosos e em valas a céu aberto. 41

Medidor de pressão intersticial — Instrumento que tem por objetivo a medição da pressão intersticial da água no interior de estruturas de concreto. 41

Medidor de recalque — Instrumento utilizado para a medição de recalque de maciços. 41

Medidor de vazão — Instrumento normalmente utilizado para medir vazão em galerias ou túneis de barragens. 41

Medidor elétrico de junta — Instrumento que é instalado através de juntas de contração de barragens de concreto, para medição dos deslocamentos de abertura ou fechamento. 41

Medidor triortogonal de juntas — Instrumento que possibilita a medição dos deslocamentos de uma junta segundo um sistema de três eixos ortogonais entre si, onde um deles coincide com a direção normal ao plano da junta. 41

Melilita — Mineral tetragonal de composição química complexa, mistura isomorfa de alumínio, cálcio e silicato de magnésio e cálcio, que ocorre na forma de cristais nas escórias de alto-forno (ver também Mervinita). 41

Mervinita — Uma das principais fases cristalinas encontrada nas escórias de alto-forno, de formulação química ($3CaO.MgO.2SiO_2$) de sistema monoclínico e massa específica de 3.150 kg/m³. 41

Mesa de escoamento (Mesa de Flow) — O dispositivo em forma de mesa, de características padronizadas, usada para executar o ensaio de escoamento de pasta, argamassa ou concreto de cimento. 114

Mescla — Mistura de elementos diversos. 41

Metamórfica — Rocha proveniente de transformações sofridas por qualquer tipo de natureza de rochas preexistentes, que foram submetidas à ação de processos termodinâmicos de origem endógena, os quais produziram novas texturas e novos minerais que geralmente se apresentam orientados. 70

Metamorfismo — Transformação que sofre uma rocha sob a ação de temperatura, pressão, gases e vapor de água, que produzem isolada ou conjuntamente uma recristalização parcial ou total, formando novos minerais e novas texturas sem ocorrer a fusão da rocha. 70

Método — Programa que estabelece previamente uma série de operações que devem ser realizadas, apontando erros evitáveis, em vista de um resultado determinado. 41

Método do avanço em rampa — O método de lançamento do concreto como em túneis, pelo qual a cabeça (frente) do concreto fresco não é vertical e se desloca para frente à medida que o concreto é lançado. 41

Metro — Unidade fundamental da medida de comprimento no sistema internacional. 41

Mica — Grupo de minerais de fórmula geral: $(K, Na, Ca)(Mg, Fe, Li, Al)_{2-3}(Al, Si)_4O_{10}(OH, F_2)$, abundantes em muitas rochas ígneas e metamórficas. Dentre elas citam-se muscovita, sericita e biotita. 41

Micrômetro — Unidade de medida equivalente à milésima parte do milímetro. (Sistema Internacional), símbolo μm. Antes denominado micron (μ), plural micra. Pequeno extensômetro mecânico utilizado geralmente em ensaios laboratoriais. 41

Migmático — Rocha mista (geralmente gnáissica) composta de um material hospedeiro metamórfico, com faixas de veios de material ígneo quartzo fedspático (pegmatito ou granito). Tipo de gnaisse que sofreu injeções de magma, sendo, pois, uma mistura de material sedimentar metamorfizado e material magmático. 42

Mistura — A mescla, combinação de ingredientes de argamassa ou concreto, ou calda. 42

Mistura áspera — A mistura de concreto que mostra trabalhabilidade e consistência indesejáveis, devido a deficiência de argamassa ou de finos. 283

Mistura seca — O concreto, argamassa ou pasta, contendo todos ingredientes exceto a água; concreto com zero (ou próximo de zero) de abatimento; concreto rolado. 283

Misturador (Betoneira) — O equipamento que mistura o concreto, a argamassa, ou a calda. 112

Misturador basculante — O misturador constituído por um tambor contendo lâminas e pás que efetuam a mistura e que descarrega por basculamento, girando em um eixo normal ao eixo da mistura. O eixo do tambor pode ficar horizontal ou inclinado durante a mistura. 42

Misturador cilíndrico vertical (Misturador forçado vertical) — o misturador possuindo um compartimento cilíndrico com eixo vertical (rotatório ou estacionário), e constituído essencialmente de um piso e um ou mais eixos de árvore verticais, onde se prendem lâminas ou pás para a mistura. 42

Misturador com abertura superior — Misturador montado sobre veículo, constituído por uma geometria específica com um compartimento possuindo lâminas e pás que giram efetuando a mistura e em sentido contrário descarregam. 42

Misturador contínuo — Misturador cilíndrico, em posição pouco inclinada com relação a horizontal, possuindo lâminas e pás internas para efetuar a mistura, sendo que a carga é feita por uma extremidade e a descarga por outra extremidade. 42

Misturador horizontal não basculante — Um misturador constituído por um tambor rotatório horizontal que é carregado, mistura e descarga sem basculamento. 42

Moagem final — A moagem final do clínquer, dando o cimento, com adição de sulfato de cálcio na fôrma de gesso ou anidrita. 42

Módulo de deformação (elasticidade) (E) — A relação da tensão normal para a correspondente deformação, para tensões de tração ou de compressão, abaixo do limite de proporcionalidade do materail; refere-se à parte elástica do módulo de elasticidade, módulo de Young. Constante de Lamé que, no elemento de um corpo em estado simples de tensão, é dada pelo quociente da tensão principal não nula pelo alongamento principal correspondente. Nos corpos que obedecem a lei de Hooke, é o coeficiente angular da reta que constitui o diagrama tensão-deformação. 95, 400

Módulo de deformação (elasticidade) dinâmico — Módulo de deformação calculado a partir das dimensões, massa, forma e a frequência fundamental de vibração do corpo de prova de concreto (ou da velocidade de pulsação). 398

Módulo de deformação (elasticidade) secante — Quociente da diferença das tensões pela diferença dos alongamentos correspondentes a dois pontos do diagrama tensão-deformação. 400

Módulo de deformação (elasticidade) sob carga constante — O termo que designa os efeitos elásticos e não elásticos em uma expressão, de modo a se visualizar os efeitos de tensão-deformação até uma certa data; calculado pela divisão da tensão (decorrente da carga constante) pela soma das deformações elásticas e não elásticas na mesma data. 42

Módulo de deformação (elasticidade) tangente — Limite a que tende o módulo de elasticidade secante quando, fixado um dos pontos que o definem, faz-se o outro tender para ele. É o coeficiente angular da tangente ao diagrama tensão-deformação no ponto considerado. 400

Módulo de deformação (elasticidade) transversal — Constante de Lamé que, no elemento de um corpo em estado de cisalhamento simples, é definida pelo quociente da tensão tangencial máxima pela distorção correspondente. 42

Módulo de finura — É obtido pela soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal dividido por cem. 75, 78, 252, 271

Módulo de ruptura — A medida da carga limite durante o carregamento à flexão de uma viga. É calculada pela tensão de tração aparente na fibra mais externa da seção transversal, de um corpo sob ensaio de flexão até a ruptura. 442

Módulo de Young — Ver módulo de deformação. 43

Moinho de bolas — Moinho horizontal, cilíndrico, carregado de bolas para moagem. 135

Moldado "in loco" — Argamassa ou concreto que é colocado no local onde se deseja que ocorra endurecimento e que faça parte da estrutura. 43

Momento de inércia — Momento de segunda ordem em que as distâncias mencionadas em sua definição são iguais e se referem a uma reta dada. 43

Momento fletor — Momento das tensões normais na seção transversal de uma barra, em relação ao centro de gravidade dessa seção. 43

Monomolecular — Composto de uma molécula. 43

Montmorilonita — O grupo de argilas minerais incluindo a montmorilonita que se caracteriza por uma estrutura molecular folhada e constituída por finos silicatos hidratados de alumínio ou magnésio, que se hidratam ou secam e estão sujeitos à troca iônica. 99, 196

Muro — Elemento vertical usado principalmente para fechar espaços. 43

— N —

Nata — Ver eflorescência. 43

Nebulizador — Pulverizador que produz gotículas líquidas muito finas; vaporizador. 43

Nefelometria — Técnica de análise quantitativa de soluções coloidais ou de suspensões, baseada na medida da luz ao atravessá-las. 184

Nicho (de instrumentação) — Pequena galeria, em geral com comprimento de poucos metros, localizada transversalmente à uma galeria (em barragem de concreto) e que se destina à instalação ou leitura de instrumentos. 43

Nível de precisão — Instrumento topográfico de alta precisão utilizado para o controle de deslocamentos verticais de pontos de uma estrutura. 43

Nó — Diz-se de dificuldade criada ou ocorrida durante uma sequência de trabalho, processo ou operações. 43

Nomografia — Parte da matemática aplicada, que se dedica aos processos de resolução de equações por meio de monogramas (ábacos). 43

Nônio — Escala auxiliar para leitura de frações da menor divisão de uma escala. 43

Número da peneira — O número usado para designar o tamanho da peneira; normalmente é o número aproximado de aberturas por polegada linear e usualmente aplicável a aberturas menores que 6,3 mm. 43

— O —

Oitão — Cada um dos espaços laterais de um edifício. 43

Olivina — Grupo de silicatos ferromagnesianos que constituem minerais formadores de rocha. Encontram-se principalmente em rochas básicas e ultrabásicas. Constituem uma série completa de solução sólida cujos membros extremos são a falalita e a forsterita. 43

Ombreira — Cada uma das laterais de apoio de uma peça ou estrutura. Em barragens, as laterais de um vale onde se confinam as extremidades de uma barragem. 43

Opaco — Mineral que não permite a passagem de luz, mesmo em espessuras da ordem de micrômetros. São geralmente de óxidos e sulfetos metálicos. 43

Opala — Mineral tipicamente coloidal, produto da dissecação do hidrogel de sílica que apresenta uma coloração leitosa azulada, emitindo, quando exposto à luz, cores vivas e reflexos matizados. O material composto por sílica hidratada amorfa (SiO_2H_2O). 100, 106

Ortotrópico — A contração dos termos "ortogonal" e "anisotrópico", para designar a diferença de rigidez à flexão nas direções longitudinais e transversais do comportamento de uma laje e vigas, grelhas ou tabuleiro de uma ponte. 44

Ortotropia — Propriedade de um corpo possuir simetria de características relativamente a três planos ortogonais. Tratando-se de folha só se consideram dois planos ortogonais perpendiculares ao plano tangente ao folheto médio no ponto considerado. 44

Osmose — Passagem do solvente de uma solução através de membrana impermeável ao soluto. 197

Óxido marrom (Hematita parda) — O mineral pigmentado de coloração marrom, com um teor de óxido de ferro entre 28% e 95%. 44

Ozônio — Gás azul pálido, muito oxidante e reativo, que é uma variedade alotrópica do oxigênio. 44

— P —

Padrão — Modelo oficial de pesos de medidas e que serve de base ou norma para avaliação de qualidade ou quantidade. 44

Painel sanduíche — Painel pré-fabricado, constituído por lâminas finas envolvendo um corpo delgado. 44

Palmeta — Calço de madeira colocada em escoras, contra os painéis de fôrma. 44

Papagaio — Gancho, de içamento, dos guindastes ou equipamentos de carga. 44

Par termoelétrico — Baseado na diferença de potencial elétrico que aparece entre duas soldas de metais diferentes mantidas em temperaturas diferentes. A diferença potencial é proporcional à diferença entre as temperaturas e permite calcular essa diferença. 44

Parafina — Mistura incolor de hidrocarbonetos saturados sólidos, extraída do petróleo. 167

Partícula coloidal — A partícula carregada eletricamente, geralmente menor que 200 μm, dispersa em um outro meio. 44

Partículas moles — Partículas de agregado com um menor grau de dureza, ou resistência, que o especificado, e determinado por ensaio padronizado. 44

Pascal — Unidade de medida de pressão no sistema internacional, igual a pressão resultante da ação de uma força igual a um Newton, distribuída uniformemente sobre uma superfície plana de área igual a um metro quadrado, normal a essa superfície. 44

Patamar de escoamento — O ponto caracterizado pelo aumento da tensão, quando a proporção da tensão para a deformação torna-se substancialmente menor do que ocorre para menores tensões. Região do gráfico tensão-deformação, em que a relação entre a tensão e a deformação é intensamente decrescente, tendendo para zero. 44

Pavimentadora de concreto — Misturadora de concreto, normalmente montada sobre um sistema de tração (autopropelido ou não), e que mistura e lança o concreto de pavimento, sobre a sub-base. 44

Pavimento — Estrutura aplicada à superfície de ruas; rodovias, aeroportos etc., e constituída de uma ou várias camadas de material capaz de transmitir ao solo de fundação tensões compatíveis com a sua capacidade de suporte. 44

Pavimento flexível — A estrutura de pavimento que mantém um íntimo contato, distribuindo as cargas com o "subgrade", e que depende para sua estabilidade e coesão do imbricamento dos agregados e atrito entre as partículas; normalmente o aglutinante é um cimento asfáltico. 44

Pedra pome — Lava muito porosa e vesicular, normalmente de alto teor de sílica, composta de fibras de vidro dispostas quase que paralelamente, ou algumas fibras entrelaçadas, que por si formam as vesículas. 68

Pedra ferro — Denominação dada no interior de São Paulo às rochas basálticas. 44

Pedrisco — Agregado peneirado, sendo que a maior parte das partículas passa pela malha de abertura 9,5 mm e fica retida na de 4,75 mm. 44

Pega — A condição atingida pela pasta, argamassa ou concreto, quando da perda da plasticidade até um valor arbitrado, normalmente medido pela resistência à penetração ou deformação. 135, 344

Pegmatito — Rocha ígnea de granulação extremamente grosseira, encontrada geralmente na forma de diques irregulares, lentes ou veios; originada nos estágios finais da consolidação de magmas, quando os líquidos residuais se enriquecem consideravelmente em gases, alcançando uma fluidez tal que permite o desenvolvimento de cristais enormes. Caracteriza-se pela ocorrência frequente de minerais raros ricos em elementos como lítio, boro, flúor, nióbio, tântalo, urânio e terras raras. Geralmente finolar, de composição idêntica a do granito e na qual os componentes mineralógicos, quartzo e feldspato, muito desenvolvidos se acham interpenetrados. 45

Pendente — Inclinado. 45

Pêndulo ótico — Instrumento utilizado para a medição dos deslocamentos horizontais de pontos de barragens de concreto em relação a outros pontos da estrutura ou da fundação. 45

Pêndulo direto — Instrumento destinado a medir deslocamentos horizontais de pontos de barragens de concreto em várias cotas, em relação a outros pontos da estrutura. Consta essencialmente de um fio de prumo de aço inox, suspenso de um ponto da cota elevada da barragem e mantido tensionado por um peso. 45

Pêndulo invertido — Instrumento destinado a medir os deslocamentos de uma barragem em relação a pontos de fundação suficientemente profundos, para poderem ser considerados fixos. O fio de prumo invertido é fixado na parte inferior de um poço ou furo de sondagem, é mantido sempre na vertical por meio de um flutuador na extremidade superior e no interior de um reservatório com água ou óleo. 45

Peneira — A peça metálica, de malha trançada, ou de outra forma semelhante, com aberturas espaçadas regularmente, de dimensão uniforme, montada rigidamente em um suporte ou aro e usada para separar materiais particulados em diversos tamanhos. 75

Peneiramento úmido — O peneiramento efetuado com o concreto fresco, para retirar partículas de agregados maiores que certo tamanho. Normalmente se usa a peneira com abertura 38 mm. 326, 380

Penetrômetro — Aparelho utilizado para medir, por penetração, a consistência, a dureza, a pega de certos materiais de construção para a medida dos tempos (início e fim) de pega do concreto. 345

Percolação — Líquido ou material gelatinoso, que sai através de poros, fissuras ou aberturas na superfície do concreto (ver também exsudação). 45

Perda ao fogo — A porcentagem de perda de peso (massa) de uma amostra exposta até a constância de massa, a uma temperatura especificada, normalmente entre 900°C e 1000°C. 183

Perda de abatimento — (Perda de Slump) — A variação da trabalhabilidade observada no concreto fresco durante um período de tempo após a medida inicial. 325

Perda de protensão — A redução da força de protensão resultante do efeito combinado das deformações do concreto e do aço, incluindo escorregamento (deslizamento) na ancoragem, relaxação de tensões no aço, atritos devidos às curvaturas dos cabos e os efeitos das deformações elásticas, fluência e retração do concreto. 412

Perda de trabalhabilidade — Ver perda de abatimento. 45

Perereca — Compactador pneumático, de pequenas dimensões, operado por uma pessoa para adensamento em regiões confinadas de difícil acesso. 45

Periclásio — O mineral cristalino de magnésio (MgO), equivalente àquele que pode estar presente no clínquer de cimento Portland e outros materiais como escórias ou refratários alcalinos. 132, 163, 531

Período de elevação da temperatura — O período de tempo durante o qual a temperatura do concreto se eleva de modo controlado até um valor máximo desejado, em um sistema de autoclave ou de cura a vapor. 45

Período de máxima temperatura — O intervalo de tempo, no qual a máxima temperatura é mantida constante no aparelho de autoclave. 46

Perlita — Vidro vulcânico tendo uma estrutura perlítica, normalmente, tendo maior teor de água do que a lava; quando expande por aquecimento pode ser usado como material isolante e como agregado para concreto leve (concreto de baixa massa específica). 46

Permeabilidade — Propriedade de um meio, que indica a maior ou menor facilidade à passagem da água através de seus vazios. É expressa através do coeficiente de permeabilidade (K), normalmente cm/s. 132, 462

Permeabilímetro de ar — Aparelho para determinação da finura de materiais em pó, como o cimento. 140

Permeâmetro — Instrumento com que se mede a permeabilidade de um material. 140

Permeável — Diz-se do material que se deixa atravessar por um fluído. 46

Pesagem cumulativa — Medida de mais de um componente de uma betonada, em um mesmo recipiente, de modo a atingir os valores totais sucessivos para cada um dos componentes. 46

Peso próprio — Parte da carga permanente devida exclusivamente ao peso da estrutura. 46

Pesquisar — Buscar com diligência, com minúcias, a realidade. 46

Petrologia — Ciência das rochas, que trata da sua origem, estrutura, composição etc., com respeito a todos aspectos ou relações. 46

Petrografia — O ramo da petrologia que cuida da descrição e classificação das rochas bem como das suas relações geológicas, fundamentalmente através de métodos de laboratório, por escala química ou microscópica e, também, por litologia, petrologia ou decomposição. 68, 98, 105

Picnômetro — Frasco, aferido, destinado à medição da massa específica de sólidos ou líquidos. 82

Piezômetro — Instrumento utilizado para a medição da pressão da água intersticial em maciços. 46

Piezômetro de corda vibrante — Piezômetro elétrico no qual a pressão da água intersticial, transmitida através da pedra porosa do instrumento, provoca a deflexão de uma membrana, cuja deformabilidade é medida por um transdutor de corda vibrante. 46

Piezômetro de resistência elétrica — Piezômetro elétrico no qual a pressão da água intersticial, transmitida através da pedra porosa do instrumento, provoca a deflexão de uma membrana cuja deformabilidade é medida por extensômetros de resistência elétrica. 46

Piezômetro eletro-pneumático — Piezômetro no qual a pressão da água intersticial, transmitida através da pedra porosa do instrumento, provoca a deflexão de um diafragma flexível. Essa pressão hidráulica é equilibrada pela aplicação de pressão pneumática no outro lado do diafragma. A posição de equilíbrio do diafragma é indicada através de um circuito elétrico, que se fecha quando a pressão pneumática contrabalança a pressão hidráulica da água. 46

Piezômetro hidráulico — Piezômetro com princípio de funcionamento idêntico ao do piezômetro pneumático, sendo que o fluído de leitura utilizado é um líquido e não um gás. 46

Piezômetro pneumático — Piezômetro no qual a pressão da água intersticial, transmitida através da pedra porosa do instrumento, provoca a deflexão de um diafragma flexível, abrindo uma válvula. Aplica-se, então, com um gás, pressão através da tubulação de entrada, provocando um fluxo de ar através da válvula e da tubulação de saída, que é conectada até igualar a da água intersticial, quando então ocorre o fechamento da válvula. A pressão pode ser aumentada na tubulação de entrada que não mais ocorre fluxo através da válvula, permanecendo a pressão na tubulação de saída igual a da água intersticial. Em outros tipos de piezômetros pneumáticos, a deflexão do diafragma flexível provoca o fechamento de uma válvula. A pressão é então aplicada na tubulação de entrada, até que, ao igualar a da água intersticial, causa a abertura da válvula. O fluxo de ar através da tubulação de saída permite a determinação da pressão da água intersticial. 46

Piezômetro tipo Casagrande — Este piezômetro é uma variação do piezômetro tipo tubo aberto, onde o trecho de medida, ao invés de utilizar uma tubulação perfurada, utiliza uma pedra porosa. 47

Piezômetro tipo tubo aberto — Tipo de piezômetro empregado na observação de subpressão em maciços. É basicamente constituído por uma tubulação metálica ou de PVC, instalada no interior de um furo de sondagem até o local onde se deseja medir a subpressão. Nesse local a tubulação é perfurada e envolta por um filtro de areia e/ou pedrisco, sendo o restante do furo preenchido com calda de cimento, bentonita ou argila plástica. A subpressão é fornecida pela elevação da coluna d'água no interior do tubo piezométrico. 47

Piezometria — Ramo da física que estuda a compressibilidade dos líquidos. 47

Pintura de cimento — A pintura constituída, geralmente, de cimento Portland branco e água, pigmentos, cal hidratada, agentes repelentes ou sais higroscópicos. 47

Pipeta — Tubo de vidro com as extremidades afiladas, em que se recolhe, por aspiração, um líquido, para efetuar medições. 47

Piroclástica — Rocha ígnea extrusiva resultante do extravasamento explosivo de lava, devido a ação de gases que a ejetam em fragmentos, cinzas ou poeiras. 47

Pirômetro — Instrumento para medição da temperatura mediante a radiação emitida por um sistema aquecido. 47

Piroxênio — Grupo de silicatos ferromagnesianos que constituem minerais formadores de rochas e ocorrem como fase estável em quase todos os tipos de rochas ígneas. São também encontrados em muitas rochas de composições variadas formadas sob condições de metaformismo regional e termal. Dentre os piroxênios citam-se: enstatita, hiperstênio, diopsídio, hedenbergita, acmita, jadeita, pigeonita e augita. 105

Piroxenito — Rocha ultramáfica, de granulação grossa, alotriomórfica, constituída principalmente por piroxênio. 47

Planos principais da deformação num ponto — Planos definidos pelas direções principais consideradas duas a duas. 47

Plasticidade — A propriedade complexa do material envolvendo a combinação de qualidade, de mobilidade e condições de estabilidade e escoamento; a propriedade da mistura fresca de pasta, argamassa ou concreto que determina sua resistência à deformação e/ou facilidade de moldagem. 325

Plástico — Que tem propriedade de adquirir determinadas formas sensíveis por efeito de uma ação exterior. 47

Pó de sílica — Sílica em pó, muito fino, usado como ligante silicoso, que reage com cal em condições de cura em autoclave; preparado pela moagem de sílica tal como quartzo. 47

Poliéster — Um dos maiores grupos de resinas sintéticas basicamente produzidas pela reação de ácidos dibásicos com alcoóis dihidroxilas; comumente preparados para a aplicação pela mistura com grupos de monômeros vinílicos e catalisadores com radicais livres, à temperatura ambiente. Usado como ligante para concreto ou argamassa de resinas; fibras laminadas (normalmente fibra de vidro). Qualquer substância macromolecular resultante da condensação de polihidroxilados com ácidos polibásicos. 47

Polietileno — O termo-plástico orgânico de elevada massa molecular usado na formulação de revestimentos ou na forma de lençóis, como cobertura para a cura de superfície de concreto. 47

Polimento — (Acabamento por polimento — Polido) — Acabamento final da superfície do concreto obtido pela passagem de rebolos. 363

Polimerização — Processo em que duas ou mais moléculas de uma mesma substância, ou dois ou mais grupamentos atômicos idênticos, se reúnem para formar uma estrutura de massa molecular múltipla daquelas unidades iniciais, geralmente elevadas. 47

Polímero — O produto da polimerização, composto formado por sucessivas aglomerações de grande número de moléculas fundamentais, mais comumente a borracha ou a resina constituída por grandes moléculas formadas por polimerização. 547

Poliuretano — Produto de reação de um isocianato com uma variedade de outros compostos contendo hidrogênio ativo; usado para formulação de revestimentos resistentes à abrasão. 48

Pontalete — Barrote ou escora (de madeira ou metálica) com que se apóiam fôrmas de lajes, vigas etc. 48

Porosidade — A relação, normalmente expressa como porcentagem, do volume de vazios em um material, para o volume total do material incluindo os próprios vazios. 48

Portlandita — O mineral hidróxido de cálcio ($CA(OH)_2$), que ocorre na forma natural na Irlanda e é equivalente a um produto comum na hidratação do cimento Portland. 80, 81, 96, 142, 429

Pós-tensão — Método de protensão, sendo que os cabos são tensionados após o concreto ter endurecido. 48

Potenciômetro — Instrumento para medir diferenças de potencial elétrico, resistor com um cursor central, que pode servir como divisor de tensão. 48

Potência — A energia produzida ou consumida por unidade de tempo. 48

Pozolana — O material silicoso ou sílico-aluminoso, que por si só tem pouco ou nenhum poder aglutinante, mas quando na forma de pó, finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio a temperaturas normais para formar composto com propriedades aglutinantes. 194

Pozolânico — De, ou que pertence, ou se refere a pozolana. 133, 194

Prática — Saber provindo da experiência. 48

Pré-tensão — Método de protensão, sendo que os cabos são tensionados antes da concretagem. 48

Precisão — A precisão de um instrumento é obtida através da comparação das leituras realizadas pelo mesmo, sobre uma unidade padrão. A tolerância dentro da qual qualquer medida da variável dada pelo instrumento varia em relação à medida idealmente correta ou, preferencialmente, duas vezes o erro padrão das medidas, caracteriza a precisão do instrumento. Exatidão. 316

Pressão de vapor — Componente da pressão atmosférica causada pela presença de vapor; expressa em centímetros ou milímetros de altura de uma coluna de mercúrio. 48

Pressão efetiva — Relação entre esforço normal a área transmitida entre os grãos de um meio poroso, pressão que mobiliza efetivamente o atrito interno. É a componente da pressão normal que controla as variações de volume e as características de resistência ao cisalhamento do meio. Tensão efetiva. 48

Pressão hidrostática — Pressão isotrópica exercida por líquidos em repouso. 48

Pressão na fôrma — Pressão lateral que atua na superfície vertical ou inclinada das fôrmas e é resultante do comportamento líquido que o concreto não endurecido possui. 48

Pressão neutra — Pressão transmitida a um meio sólido pela água que preenche os seus vazios. 48

Produtos de cimento amianto — Produtos rígidos constituídos essencialmente por fibras de amianto e cimento Portland usados em larga escala nas edificações. 48

Proporcionar — Diz-se, em tecnologia do concreto, da rotina para estabelecer quantidades ótimas dos componentes de um concreto ou argamassa para atender determinadas propriedades; dosar. 251

Protensão — Solicitação que se aplica a uma estrutura com o fim de melhorar a sua capacidade de resistência. Processo pelo qual se aplicam, ao concreto, tensões antes de submetê-lo à ação das cargas de serviço. 48

Protensão parcial — Protensão a uma tensão, tal que induza tensões, na estrutura, inferiores às de projeto, para as cargas de trabalho que atuam durante a construção. 49

Protensão química do concreto — Concreto produzido com cimento expansivo e armadura, de tal modo que a expansão do cimento induz tensões de tração na armadura dando origem à protensão do concreto. 49

Protensão transversal — Protensão aplicada, normal ao principal eixo longitudinal da peça. 49

Prumo — Dispositivo constituído de uma peça de metal ou de pedra suspensa por um fio flexível, utilizado para determinar a direção vertical. 49

Pulmão — Estoque intermediário, utilizado estrategicamente em uma linha de produção para garantir suprimento de materiais, em períodos de interrupções do abastecimento do sistema. 49

Pulverulentos — Finos presentes nos agregados, menores que a peneira n.° 200. 97

Pumito — Rocha vítrea com vesículas, semelhantes à esponja. 49

Punção — Instrumento pontiagudo para furar ou romper. 49

Puxar — Tornar tenso; diz-se nas construções, do período de enrijecimento do concreto, ou argamassa, correspondente ao tempo de fim de pega. 49

— Q —

Quadrante — Instrumento para medir ângulos, semelhante ao sextante, cujo limbo abrange um quarto de circunferência. 49

Qualidade — Numa escala de valores, é a característica que permite avaliar e, consequentemente, aprovar, aceitar ou recusar qualquer coisa ou material. 49

Quantil — Qualquer dos valores de uma variável aleatória para os quais a respectiva função de distribuição assume valores múltiplos de uma fração dada. 49

Quartzito — Rocha metamórfica composta essencialmente de quartzo. Produto de metamorfismo intenso de arenito. 70, 410, 483

Quartzo — Sílica cristalina (SiO_2). Importante mineral formador de rochas. 70, 99, 483

Quartzo-diorito — Rocha ígnea plutônica granular, com composição do granodiorito, diferindo deste por uma menor quantidade de quartzo. 49

Quilograma — Unidade fundamental de medida de massa, no sistema internacional (kg). 49

Quilograma-força — Força devida ao peso de uma massa igual a um quilograma, com aceleração de gravidade igual a 9,80665 m/s² (kgf), (1 kgf = 9.80665N = 9.81N). 49

Quilowatt — Unidade de potência ativa em circuitos elétricos de corrente alternada, igual a mil watts. 49

— R —

Raio de giração — Raiz quadrada do quociente do momento de inércia, pela área da seção. 49

Raio de giração principal — Raio de giração correspondente a um momento de inércia principal. 49

Rampa (Talude) de avanço da injeção — O método de injeção, pelo qual a frente da massa de uma calda é obrigada a movimentar-se horizontalmente através do agregado pré-colocado e do uso de uma sequência adequada de injeção. 49

Ranhura — Sulco formado. 49

Rarefazer — Diminuir a densidade; tornar menos denso, menos espesso. 49

Reação álcalis-agregado — A reação química, na argamassa ou concreto, entre os álcalis (sódio e potássio) do cimento Portland ou outras origens e certos constituintes dos agregados. Sob certas condições pode ocorrer expansão danosa. — Ver reação álcalis-sílica. 101, 197, 212, 526

Reação álcalis-carbonato — A reação química entre os álcalis (sódio e potássio) do cimento Portland e certas rochas e carbonatos, particularmente calcários e carbonatos dolomíticos, presentes em alguns agregados; o produto da reação pode propiciar expansões exageradas e o fraturamento do concreto. 108

Reação álcalis-sílica — A reação entre os álcalis (sódio e potássio) do cimento Portland e certas rochas ou minerais silicosos, tais como opala, chert e rochas vulcânicas vítreas, presentes em certos agregados; o produto da reação pode causar expansões exageradas e o fraturamento do concreto. 106, 197, 212

Reação endotérmica — Reação química que ocorre com absorção de calor. 196

Reação exotérmica — Reação química que ocorre com desprendimento de calor. 131, 167

Reagente — Qualquer substância que participa de uma reação. 50

Reatividade — Qualidade ou estado do que é capaz de reagir. 134, 197

Reatividade do agregado com álcalis — Suscetibilidade do agregado à reação álcalis-agregado. (Ver reação álcalis-agregado). 134, 197

Reboco — Argamassa de cal ou cimento e areia que se aplica a uma parede, depois de emboçada, para lhe proporcionar uma superfície lisa e uniforme, apta a receber o revestimento. 50

Recalque — Deslocamento vertical, para baixo de parte, ou do todo, de uma construção. 50

Reflexão — Ver ricochete. 50

Refratário — Que pode permanecer em contato com calor elevado, sem se alterar. 50

Rejeitar — Não aceitar, recusar. 50

Relação água/cimento — Ver fator água/cimento. 177

Relação areia-agregado graúdo — A relação entre o teor de areia e o do agregado graúdo na mistura de concreto. 50

Relaxação — Fenômeno de diminuição, com o tempo, da tensão sob deformação constante. A perda de tensão ocorrida quando um comprimento constante é mantido sob tensão à temperatura constante. 412, 436

Relaxação do aço — A diminuição da tensão no aço, como consequência da fluência do aço sob uma deformação profunda; a diminuição da tensão no aço como consequência da diminuição da deformação do aço como a que resulta da retração e fluência do concreto em elementos de concreto protendido. 50

Relaxação total — Relaxação que conduz à anulação da tensão. 50

Relógio comparador — Pequeno extensômetro mecânico utilizado para a observação de deformações e deslocamentos lineares em ensaios de laboratório e *in situ*. 50

Remoldagem (Remoldabilidade) — A rapidez com a qual a mistura de concreto fresco responde ao esforço de remoldagem, como aquele causado pela vibração para o concreto envolver totalmente a armadura ou fique junto às fôrmas. 330

Rendimento (Eficiência) — É o quociente da resistência do concreto, pelo consumo de aglomerante (cimento mais material pozolânico, quando usado). 366

Reologia — Parte da física que investiga as propriedades e o comportamento mecânico dos corpos deformáveis que não são nem sólidos nem líquidos. 50

Reparar — Fazer conserto; restaurar. 50

Repetibilidade — A variação dos resultados obtidos pela repetição dos ensaios sobre o mesmo material, em um mesmo laboratório por um único operador; a quantidade que pode exceder (ultrapassar) em somente 5% das repetições pela diferença, tomada pelo valor absoluto, de dois resultados escolhidos ao acaso entre aqueles obtidos em um mesmo laboratório, sobre um mesmo material. 136

Reprodutibilidade — Ver repetibilidade. A característica de um determinado instrumento, que traduz a capacidade com que o mesmo reproduz o mesmo valor da grandeza medida, em uma sucessão de leituras realizadas em curto intervalo de tempo. 136

Resíduo insolúvel (cimentos) — A porção de um cimento ou agregado que não é solúvel em ácido clorídrico diluído a uma certa concentração. 183

Resiliência — Propriedade dos corpos que armazenam grande energia de deformação sem se deformarem permanentemente. 51

Resina — O material natural ou sintético, sólido ou semi-sólido orgânico, de massa molecular indefinida e elevada, que possui a tendência de escoar sob tensão, tendo um comportamento suave e com fraturas do tipo concholdal. 51

Resina acrílica — Um dos grupos das resinas termoplásticas formadas pela polimerização de ésteres ou aminoácidos acrílicos; usados nas construções de concreto como materiais para colagem ou selantes superficiais. 51

Resina de poliestireno — Resinas sintéticas de cor variável de branco ao amarelo, formada pela polimerização do estireno por aquecimento com ou sem catalisadores, que podem ser usadas para revestimento e pintura do concreto ou para fabricar moldes, ou isolamentos. 51

Resina fenólica — Classe de resinas sintéticas (plásticas), solúveis em óleo, produzidas pela condensação de produtos fenólicos e formaldeidos ou outro aldeido similar, que podem ser usadas para a pintura de concreto. 51

Resinas de epóxi (ver epóxi) — A classe de sistemas de ligantes químico-orgânicos utilizada na preparação de revestimentos especiais ou adesivos para concreto ou como ligantes em argamassas e concretos de epóxi. 51

Resistência — Ver resistência à compressão, resistência à flexão, resistência ao cisalhamento, resistência à tração. Propriedade dos materiais de suportarem esforços mecânicos. O valor da tensão que provoca a ruptura. 95, 177

Resistência à abrasão — A capacidade de uma superfície resistir quando submetida a atrito com materiais sólidos ou líquidos. 92

Resistência a baixas idades — Resistência do concreto ou argamassa, desenvolvida durante as primeiras 72 horas após o lançamento. 442

Resistência à compressão (concreto) — Tensão a que o concreto se rompe por compressão. 354

Resistência à flexão — A propriedade de um material ou peça estrutural que indica a sua capacidade de resistir à ruptura por flexão (ver também módulo de ruptura). 436

Resistência média à compressão (f_{cj}) — Termo usado para designar a média das resistências à compressão de uma dada classe ou nível de resistência do concreto, a idade "j" dias. 51

Resistência à penetração — A resistência da argamassa ou pasta à penetração de uma agulha em condições padronizadas e normalmente expressa em kgf/cm² ou MPa. 344

Resistência à tração por compressão diametral — A tensão de tração do concreto, determinada pelo ensaio de ruptura diametral. 445

Resistência ao cisalhamento — A máxima tensão de cisalhamento que o material ou elemento estrutural é capaz de suportar. 470

Resistência ao fogo — Propriedade de um material ou sistema suportar o fogo ou proteger contra o fogo; caracteriza-se pela capacidade de reduzir o efeito da ação do fogo e/ou de manter o desempenho do elemento estrutural. 51

Resistência aos sulfatos — Capacidade da argamassa ou concreto de suportar o ataque por sulfatos. 51

Resistência característica à compressão (fck) — Termo usado para designar a resistência mínima, apresentando certa probabilidade prefixada de não apresentar valores inferiores. 51

Resistência cúbica — Resistência à compressão determinada em ensaio por rompimento de corpo de prova cúbico com lado especificado. 354

Resistência de aderência — Resistência à separação entre argamassa ou concreto e armadura ou outro material com o qual esteja em contato. 52

Resistividade — Resistência elétrica de um corpo de seção reta uniforme com área unitária e cujo comprimento é igual à unidade. 71, 532

Retardador — Um aditivo que prolonga o período de pega da pasta de cimento e por consequência as misturas de argamassa ou concreto, preparadas com cimento. 231

Retardador de superfície — O agente retardador aplicado à forma ou à superfície do concreto fresco para retardar a pega do cimento e facilitar o tratamento de junta ou a remoção de argamassa para exposição do agregado no acabamento do concreto. 231

Retentividade — Em tecnologia de concreto é a propriedade de reter a água do concreto, argamassa ou calda. 240

Retração — Contração parcialmente irreversível de uma calda, argamassa ou concreto, que se verifica durante o endurecimento; a redução de volume causada pela secagem ou por ação química em função do tempo, mas não da temperatura ou das tensões devido ao carregamento. (Ver retração por secagem). 154

Retração hidráulica (Retração por secagem) — A contração causada pela perda de umidade. 154, 219, 429, 524

Retração plástica — A contração que ocorre, podendo levar à fissuração, na superfície do concreto fresco logo após o lançamento, enquanto está plástico. 52

Revestimento — Material aplicado à superfície, através de pincel, aspersão, broche, espátula etc.; para preservar, proteger, decorar, selar ou regularizar o substrato. 52

Revestimento da fôrma — O líquido aplicado na parte interna (parte em contato com o concreto) do painel da fôrma com finalidade de proteger o painel (no caso de se desejar acabamento com agregado exposto). 52

Revestimento de polissulfetos — O revestimento, de proteção, preparado pela polimerização de poliésteres alquil-clorados com polissulfetos inorgânicos; que apresenta resistência aos ozônios, raios solares, oxidação e intempéries. 52

Revibração — Uma ou mais aplicações de vibração ao concreto após terminada a operação de lançamento e a fase de adensamento, antes do início da pega do concreto. 52

Ricochete (Reflexão) — Agregado ou cimento ou concreto projetado, que ricocheteia na superfície, contra a qual o concreto projetado está sendo aplicado. 52

Riolito — Rocha ígnea vulcânica, geralmente porfirítica, exibindo textura fluidal, constituída de fenocristais de quartzo e feldspato alcalino numa massa fundamental vítrea ou criptocristalina. É a equivalente extrusiva do granito. A composição mineralógica é idêntica a do granito. 70, 483

Robustez — Robustez traduz a habilidade intrínseca de um instrumento de se manter inalterável quado submetido às condições ambientais reinantes nas obras de engenharia, suportando variações de temperatura, umidade, submersões prolongadas, substâncias agressivas etc. 52

Rocha — Agregado natural formado de um ou mais minerais (inclusive vidro e matéria orgânica), que constitui parte essencial da crosta terrestre e é claramente individualizado. O material pode não ser consolidado como, por exemplo, areias, argilas etc., desde que representem corpos independentes. 68

Rocha britada — (Pedra britada, Brita) — O produto resultante do britamento artificial de rochas, tendo substancialmente todas as faces com bordas definidas resultantes da operação de britamento. 52

Rocha de cimento — Calcário natural impuro que contém ingredientes para produção de cimento Portland, em proporções aproximadas às necessárias para esse fim. 52

Rocha matriz — Rocha que, pela ação dos agentes erosivos e intemperismo, fornece partículas e elementos químicos para a formação de depósitos sedimentares nas bacias de sedimentação. Rocha cuja meteorização forma solos do tipo coluvião e residual. Rocha mãe. 52

Rocha sã ou pouco alterada — Rocha de natureza geológica bem definida, com componentes mineralógicos originais intactos. O termo é utilizado predominantemente para as rochas ígneas e metamórficas. Para as rochas sedimentares deve-se acrescer dados complementares como a dureza, friabilidade, tipo de cimento e consistência. 53

Roseta extensométrica — Conjunto de três ou mais extensômetros independentes, destinado a medir as tensões principais e a sua direção em uma estrutura de concreto. 437

Rudito — Rocha sedimentar consolidada, formada por clastos grosseiros, cuja granulometria é superior a da areia (acima de 2,00 mm). Incluem conglomerados e brechas. Os conglomerados têm fragmentos de formas arredondadas e as brechas, fragmentos de formas angulosas. 53

Ruína — Restos de construções desmoronadas; perda das finalidades precípuas de parte ou de todo de uma estrutura. 53

Ruptura — Processos pelo qual um sólido perde a capacidade de transmitir qualquer carga, por se dividir em parte através de planos de fratura que resultam da aplicação de estados de tensão exteriores, que vencem a resistência do sólido ao tipo de solicitação em causa. 402

— S —

Saco (de cimento) — A quantidade de cimento Portland. No Brasil — 50 kg, nos Estados Unidos — Bag (ou **sack**) 94 libras = 42,64 kg. 53

Saibro — Mistura de argila e areia grossa; produto da decomposição de rochas feldspáticas, principalmente granitos ou gnaisses, no qual ainda se pode ver a textura primitiva da rocha. 53

Sanidade — A condição de um corpo sólido ser isento de fissuras, esfoliações ou de comportamento em desacordo com o especificado. No caso de cimento é a não ocorrência de excessiva variação volumétrica, após a pega; no caso de agregados é a capacidade de suportar as ações agressivas às que o concreto pode se expor particularmente quanto às intempéries. 99, 163

Sarrafear — Acabar o concreto, através da remoção de excessos de material com sarrafo ou régua. 53

Saturação — Estado de um vapor em equilíbrio com o seu líquido; estado de uma solução em que a concentração do soluto é a máxima compatível com as condições de temperatura e pressão da solução. Ação ou processo de saturação, ou estado de estar saturado. 523

Saturação a vácuo — Processo para aumentar o preenchimento dos poros de um material poroso, por um fluido, através da redução da pressão do ar na presença desse fluido. 53

Sazonamento — Tratamento que se dá ao concreto durante alguns dias depois de lançado, com o fim de evitar a evaporação de água de amassamento. 113, 361

Secante — Reta que intercepta uma curva. 53

Seção delgada — Seção formada de elementos de pequena espessura em relação às dimensões do conjunto da seção. 53

Seco em estufa — Secagem em estufa à temperatura normalmente entre 105°C e 115°C até que a massa total do corpo de prova torne-se constante. 81

Sedimentar (Rocha) — Rocha originada pela consolidação de: a) detritos de outras rochas que foram transportados, depositados e acumulados, ou de b) produtos de atividade orgânica, precipitados químicos por evaporação e atividade bioquímica. Em ambos os casos têm-se geralmente a formação de estratos ou camadas. As detríticas são classificadas de acordo com a granulometria. Ex.: arenito, siltito. As segundas, de acordo com sua composição química. Ex.: calcário, dolomito, halita. 69

Segregação — A concentração heterogênea dos componentes da mistura de concreto, agregado ou outro material, resultando uma massa não uniforme. 197, 325

Seixo rolado — Fragmentos de rocha de dimensão entre 4,8 mm e 250 mm; para uso como agregado para concreto. Cascalho. 366

Selante de junta — Material compressível usado para impedir a entrada de água e materiais estranhos nas juntas. 54

Sensibilidade — A sensibilidade de um instrumento é definida como sendo o menor incremento de grandeza medida, que pode ser lido, na escala de leitura, de modo consistente. Medição da capacidade de resposta de um instrumento de medida, usualmente expressa pelo quociente da intensidade do sinal de saída pela intensidade do sinal de entrada. 124

Separação — Ver segregação e exsudação. 54

Silex — Mistura irregular de calcedônia com certa proporção de sílica hidratada (opala). 54

Sílica — Dióxido de silício cristalino (SiO_2). 114, 195

Sílicas reativas — Vários tipos de materiais que reagem a elevadas temperaturas, com o cimento Portland ou cal durante o processo de autoclave; inclui a sílica pulverizada, pozolanas naturais e cinzas volantes. 526

Silicato — Sais de ácido silícico. Numeroso grupo de substâncias minerais constituídas pela combinação da sílica com um ou mais óxidos metálicos e água. 131

Silicato dicálcico — O composto tendo a composição ($2CaO.SiO_2$) abreviadamente C_2S, que ocorre no clínquer de cimento Portland. 131

Silicato tricálcico — Composto possuindo a formulação $3CaOSiO_2$, abreviadamente C_3S, uma forma impura de um dos principais constituintes do cimento Portland. 131

Silicone — A resina cujo principal polímero é constituído de silício hidrogênio e oxigênio, alternadamente, com grupos de carbono, que se caracteriza por ser repelente à água; podendo ser usado como revestimento ou como aditivo para concreto. 54

Silte — Material sedimentar; pequenas partículas de minerais diversos; de tamanho compreendido entre a areia e a argila, normalmente com dimensão entre 0,05mm e 0,005mm. 69

Siltito — Rocha sedimentar detrítica proveniente da litificação de sedimentos com granulometria de silte. 108

Singenita — Sulfato de cálcio e potássio hidratado, que se compõe, algumas vezes, durante a hidratação do cimento Portland e encontrado em concreto deteriorado ou que se forma durante a estocagem do cimento, pela reação do sulfato de potássio com o gesso. 54

Sismógrafo — Aparelho que registra os sismos (movimento da crosta terrestre). 54

Solicitação — Ação de causa externa capaz de produzir ou alterar a deformação de um corpo ou o estado de tensão de seus elementos (esforços externos; variações de temperatura ou ações equivalentes; recalque de apoios). 54

Solicitação brusca — Solicitação cuja intensidade varia rapidamente no tempo. 54

Solicitação constante — Solicitação que não varia em dado intervalo de tempo. 54

Solicitação contínua — Solicitação cuja identidade é função contínua do tempo. 54

Solicitação dinâmica — Solicitação cuja aplicação é feita de tal modo que não se devem desprezar os seus efeitos dinâmicos. 54

Solicitação estática — Solicitação cuja aplicação é feita de tal modo que se podem desprezar os seus efeitos dinâmicos. 54

Solicitação instantânea — Solicitação que atua durante um intervalo de tempo muito pequeno. 54

Solicitação não uniforme — Solicitação cuja intensidade varia com as coordenadas dos pontos da região em que atua. 54

Solicitação uniforme — Solicitação cuja intensidade não varia com as coordenadas dos pontos da região em que atua. 54

Solicitação periódica — Solicitação cuja intensidade é função periódica do tempo. 55

Solicitação variável — Solicitação que varia com o tempo. 55

Solubilidade — Propriedade de substância que se dissolve em outra; medida da capacidade que tem uma substância de se dissolver em outra, expressa pela concentração da solução saturada da primeira na segunda. 184

Solvente — Substância (líquido ou sólido) em que outra substância é dissolvida. 55

Sonda — Instrumento destinado a medir em profundidade certas características de materiais. 55

Soquete — O instrumento para adensar argamassa ou concreto através do apiloamento. 55

Subjacente — Camada inferior. 55

Superfície saturada seca (S.S.S. — Saturado, Seco, Superficialmente) — Condição das partículas de agregados, ou outro sólido poroso, onde os vazios permeáveis encontram-se preenchidos com água e não ocorre água nas superfícies expostas. 55

Surkhi — Tipo de pozolona, a partir de argila cozida, produzida na Índia. 55

Suspensão — Sistema constituído por uma fase líquida ou gasosa, na qual está dispersa uma fase sólida com partículas de dimensões superiores às de um colóide, e que sedimentam, com maior ou menor rapidez, sob a ação da gravidade. 55

— T —

Talco — Mineral muito mole e macio, tendo a composição $[Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2]$. 55

Talude — Superfície inclinada de uma escavação, ou de um aterro, ou uma construção. 55

Talvegue — Linha sinuosa no fundo de um vale, pela qual as águas correm e que divide os planos de duas encostas; canal mais profundo do leito de um rio. 55

Tamanho máximo do agregado — Nas especificações para os agregados é a menor abertura de peneira, através da qual a todo agregado é especificado (requerido) passar (ver também tamanho máximo nominal do agregado). 79, 89, 254, 371

Tamanho máximo nominal do agregado — Nas descrições sobre agregados é a menor abertura da peneira através da qual se permite que passe todo o agregado. 55

Tangente — Em um ponto de uma curva ou de uma superfície é o limite da secante que passa por esse ponto e por outro, quando este tende para aquele; quociente entre o seno e o co-seno de um arco. 55

Tapume — Vedação provisória feita de tábuas. 55

Taxa de exsudação — A razão na qual a água emerge da pasta ou argamassa, pela exsudação. 55

Tecnologia — Conjunto de conhecimento, especialmente princípios, que se aplicam a um determinado ramo de atividade; ciência que trata da técnica. 55

Tela de metal expandido — Peça metálica, usada como armadura e/ou como fôrma, obtida pela adequada estampagem e corte de folha (chapa) metálica e posterior alongamento para formar um reticulado de forma aproximadamente hexagonal. 55

Telecoordinômetro — Aparelho eletrônico com objetivo idêntico ao do coordinômetro ótico, isto é, determinar os deslocamentos do fio do pêndulo direto ou invertido. É fundamentalmente constituído por um coletor, solidário ao fio do pêndulo e pelo receptor, que permite através de um circuito magnético determinar a posição do fio em um painel de leitura localizado a algumas centenas de metros do local da medição. 55

Telha — Peça, em geral de barro cozido, usada na cobertura de edifícios. 55

Telhado — Parte exterior da cobertura de um edifício. 56

Temperatura — Nível da quantidade de calor existente em um sistema. 127

Tempo de fim de pega — O tempo necessário para que uma pasta argamassa ou concreto atinja uma resistência à penetração especificada (ver também fim de pega). 231, 239, 344

Tempo de início de pega — O tempo necessário para que uma pasta, argamassa ou concreto, atinja uma resistência à penetração especificada, menor do que a do fim de pega (ver também início de pega). 231, 239, 344

Tempo de mistura — O período durante o qual os constituintes do concreto são misturados, sob determinada velocidade. 56

Tempo de resposta — O tempo que o sistema de medida do instrumento leva para completar uma leitura simples da variável medida. 56

Tenacidade — Propriedade dos corpos que consomem grande energia de deformação antes de romperem. 95

Tensão convencional de escoamento a n% — Tensão para a qual, num ensaio de tração, o alongamento permanente é de n%. 56

Tensão média de aderência — O quociente da força exercida ou suportada pelo elemento tensor, pelo produto do seu perímetro e o comprimento de aderência ou ancoragem. 56

Tensão de aderência na ancoragem — Ver tensão média de aderência. 56

Tensão de cisalhamento — Tensão tangencial. 56

Tensão de compressão — Tensão normal orientada para o interior da porção do corpo; geralmente atribui-se o sinal negativo. 56

Tensão de escoamento — Tensão sob a qual se dá o escoamento (quando ligeiramente variável, usa-se o menor valor observado durante o escoamento). A tensão, menor que a tensão máxima, na qual a relação da tensão para a deformação é menor que os valores observados inicialmente. 56

Tensão de tração — Tensão normal orientada para o exterior da porção do corpo, cujo equilíbrio se pretende estudar; geralmente atribui-se o sinal positivo. 56

Tensão limite de elasticidade — Tensão até a qual o material se comporta elasticamente. 56

Tensão limite de proporcionalidade — Tensão até a qual o material se comporta em regime de elasticidade perfeita. 56

Tensão de aderência (τ_a) — A força de ligação por área unitária de contato entre duas superfícies em contato, tal como a que ocorre entre o concreto e o aço da armadura ou entre outros materiais, tais como rocha de fundação; tensão de cisalhamento na superfície das barras de armadura. 56

Tensão normal — Componente, segundo a normal a uma faceta, da tensão nessa faceta. 56

Tensão numa faceta — Quociente da força atuante numa faceta pela área dessa faceta. 56

Tensão tangencial — Componente, segundo o plano de uma faceta, da tensão nessa faceta. 56

Tensão térmica — A tensão na estrutura ou peça, decorrente de variações ou gradientes de temperatura na estrutura ou na peça. 56

Tensômetro — Termo utilizado para designar os vários tipos de instrumentos que têm por objetivo a determinação do estado de tensão natural de maciços. 56

Tensômetro para armadura — Instrumento que permite a medição de tensões em barras de armadura no interior de estruturas de concreto. 56

Tensômetro para concreto — Ver célula de pressão. 57

Tentativas (método das) — A seqüência de betonadas ou misturas para acertos de um proporcionamento e dosagem. 254

Teodolito — Instrumento ótico de precisão utilizado para a observação dos deslocamentos de estruturas através do processo de triangulações geodésicas. 57

Teor de ar — O volume de vazios de ar na pasta de cimento, argamassa ou concreto, excluindo os poros dos agregados e normalmente expresso como porcentagem do volume total de pasta, argamassa ou concreto. 239, 335

Teor de argila — Porcentagem de argila em termos de massa de um material heterogêneo, tal como solo ou agregados. 57

Termoplástico — Plástico que sofre amolecimento, podendo ser moldado ou remoldado, com elevação de temperatura. 57

Termômetro de resistência — Instrumento utilizado para a medição de temperaturas em estruturas de concreto. Empregam como princípio de funcionamento a propriedade dos metais de alterar a resistência elétrica com a mudança de temperatura. 325

Termopar — Ver par termoelétrico. 57

Terraço — Superfície plana ou levemente inclinada, em geral com frente escarpada que margeia um rio, um lago ou mar, e atesta por meio de testemunhos geológicos e geomorfológicos as variações dos materiais sob ação do tempo. 57

Terras de Santorim — Tufa vulcânica originária das ilhas Gregas de Santorim e usada como pozolana. 57

Terras diatomáceas — Material friável, composto quase que totalmente por sílica pura amorfa hidratada (opala) e constituída essencialmente por carapaças de microorganismos chamadas diatomitomáceas. 57

Testemunhos — Em concreto, a amostra cilíndrica de concreto endurecido, obtida através de extração com sonda. 95, 380

Textura — Aspecto, em geral, macroscópico da rocha ou da superfície de concreto ou argamassa. 87, 92

Tijolo — Produto cerâmico avermelhado, geralmente em forma de paralelepípedo, usado para construções. 57

Tixotropia — Fenômeno que apresentam certos líquidos cuja viscosidade diminui quando são agitados. Propriedade de um material que o torna capaz de enrijecer num tempo relativamente curto, quando deixado em repouso e de perder essa consistência até se tornar um líquido de alta viscosidade, quando submetido a agitação ou manipulação, sendo o processo completamente reversível. Propriedade que os gels apresentam de poderem ter sua elevada viscosidade eliminada, ou sensivelmente diminuída por agitação. 57

Tobermorita — O mineral encontrado na Irlanda do Norte e em outros lugares, tendo uma formulação aproximada $Ca_4(Si_6 . O_{18} . H_{12})Ca . 4H_2O$, que se assemelha com a tobermorita artificial "G", de Brunauer, um silicato de cálcio hidratado com um fator de $(CaO.SiO_2)$ entre 1,39 e 1,75 e formando pequenos cristais acamados que constituem o principal meio aglutinante de cimento Portland. 523

Tolerância — Diferença máxima admitida entre um valor especificado e o obtido; margem especificada como admissível para o erro em uma medida ou para discrepância em relação a um padrão. A variação permitida para uma dada dimensão ou quantidade; a amplitudde da variação permitida para manter uma dimensão especificada; a variação permitida para posicionamento ou alinhamento. 77

Topografia — Descrição minuciosa de uma localidade; arte de representar no papel a configuração de uma parte do terreno com todos os acidentes e objetos que se achem à sua superfície. 58

Torção — Deformação de um sólido em que ocorrem deslocamentos circulares das camadas vizinhas, uma em relação às outras. 58

Torção composta — Estado de uma barra em que há momentos de torção, totais, além de outros esforços solicitantes. 58

Torção não uniforme — Torção simples ou composta em que há momentos de flexo-torção. 58

Torção simples — Estado de uma barra em que os esforços solicitantes são só momentos de torção totais. 58

Torção uniforme — Torção simples ou composta em que são nulos os momentos de flexo-torção. 58

Torniquete — Cruz móvel, colocada horizontalmente, que se movimenta sobre um apoio, sob ação de líquidos. 58

Trabalhabilidade — A propriedade da mistura fresca de argamassa ou concreto que caracteriza a facilidade e condições de homogeneidade com que a mistura pode ser transportada, lançada, compactada e acabada. 92, 253, 325

Transdutor — Qualquer dispositivo capaz de transformar um tipo de sinal em outro tipo, com objetivo de transformar uma forma de energia em outra ou possibilitar o controle de um processo ou fenômeno. Designação genérica atribuída ao elemento sensível de um instrumento. 58

Transdutor de corda vibrante — Transdutor de deformação que utiliza o princípio de funcionamento de frequência de vibração de um fio metálico tensionado e proporcional à tensão de tração que o solicita. A determinação da frequência de vibração do transdutor é realizada, comparando-se com o de uma corda vibrante padrão, tensionada sob tensão conhecida. 58

Transdutor de resistência elétrica — Transdutor de deformação que utiliza o princípio de funcionamento de que a resistência elétrica de um fio varia com a deformação. 58

Transdutor fotoelástico — Dispositivo constituído por um cilindro de material fotoelástico inserido no interior de um cilindro de aço. A compressão do cilindro de aço provoca a compressão diametral do cilindro fotoelástico, compressão essa que pode ser visualizada através de franjas de interferência fotoelástica, quando iluminado com luz polarizada. 58

Transdutor piezoelétrico — Transdutor constituído por certos tipos de cristais que geram um potencial elétrico ao serem elasticamente deformados ao longo de planos específicos de tensão. Convertem, geralmente, pressões ou deslocamentos em sinais elétricos. 58

Traquito — Rocha vulcânica, geralmente porfirítica, constituída por feldspato alcalino, minerais máficos e pequena quantidade de plagioclásio sódico. Equivalente extrusivo do sienito. 58

Transpassar — Passar além de uma superfície, ponto ou região. 58

Transpasse — O comprimento pelo qual uma barra ou malha da armadura sobrepõe outra. 58

Treliça — Sistema estrutural composto por peças cruzadas e com fixação ou articulação definida. 58

Tremie — O tubo através do qual o concreto é depositado sob água, tendo na parte superior um alimentador para garantir a continuidade de concretagem. 59

Triangulação — Processo geodésico utilizado para levantamento e para a determinação dos deslocamentos horizontais de uma estrutura. Consiste no estabelecimento de uma rede de estações de observação, a partir das quais são determinados os deslocamentos de marcos de visada estabelecidos sobre a estrutura. 59

Tromba — Tubo articulado, ou flexível, usado para lançamento de concretos ou argamassas. 59

Turbidímetro — O dispositivo para medir a distribuição granulométrica de materiais finos, através da turbidez da suspensão em um fluido. 152

— U —

Ultrabásica — Rocha ígnea que contém menos de 45% de sílica, caracterizando-se pela pobreza ou ausência de feldspato e pela predominância de minerais escuros. 59

Ultra-som — Oscilação de natureza acústica, com freqüência superior a 20.000 Hertz. 395

Umidade — Qualidade ou estado de impregnação de água. 81, 86

Umidade absorvida — A umidade que tenha penetrado no material sólido por absorção e que mantenha as propriedades físicas não muito diferentes da água às mesmas condições de temperatura e pressão (ver absorção). 81

Umidade relativa — A relação da quantidade de vapor de água existente, para a quantidade que ocorre em uma atmosfera saturada, a uma determinada temperatura; é expressa em porcentagem. 429

Umidade superficial — Água livre retida nas superfícies das partículas dos agregados. É considerada como água de mistura do concreto (ver também absorção). 87

— V —

Vácuo — Pressão inferior a uma atmosfera. 127

Valor colorimétrico — Uma indicação, da quantidade de impurezas orgânicas presentes no agregado miúdo, pela coloração. 98

Vapor — Gás em temperatura inferior à crítica. 59

Variação de volume — O aumento ou diminuição de volume. 518

Variação de volume em autoclave — Variação volumétrica produzida pela hidratação contínua do cimento, excetuando-se os efeitos de forças externas, ou do teor de água ou da temperatura. 59

Vazio de ar — O espaço na pasta de cimento, argamassa ou concreto preenchido com ar. O vazio de ar aprisionado tem dimensões superiores a 1 mm, e forma irregular, e o vazio de ar incorporado tem dimensões entre 10 e 1000 μm e é de forma esférica. 59

Veda-junta — Peça de seção delgada, de metal, plástico, borracha ou outro material colocado (embutido) através de uma junta, de modo a impedir a passagem de líquidos. 59

Veículo agitador — O veículo contendo um tambor para o transporte do concreto fresco, desde o ponto de mistura até o ponto de lançamento, sendo o tambor mantido em rotação. 59

Velocidade — Relação entre um espaço percorrido e o tempo de percurso, no movimento uniforme; num sistema referencial determinado, o vetor igual a derivada do vetor posição de um ponto em relação ao tempo. 381

Velocidade de aquecimento — A velocidade, expressa em graus centígrados por hora, na qual a temperatura de um forno ou autoclave se eleva até um valor desejado. 60

Velocidade de mistura — A velocidade de rotação de um misturador (ou das pás de um eixo árvore de mistura), ao efetuar a mistura; expressa em rotações por minuto. 60

Vergalhão — Barra de metal cuja seção reta tem forma definida, que se emprega nas armaduras para concreto. 60

Vermiculita — Grupo de minerais micáceos, silicatos hidratados de composição variada, originados da alteração de micas (tem a propriedade de, ao serem aquecidos, perderem água e intumescerem e adquirirem o aspecto de um verme). 490

Verniz — Solução de goma ou resina natural ou sintética, em álcool. 60

Vesícula — Cavidade vazia encontrada em rochas efusivas, de forma variável: esférica, elíptica, cilíndrica ou irregular. Originada, geralmente, pela expansão de gases na massa fundida. 60

Vesicular — Propriedade do mineral que possui vesículas disseminadas em sua massa. 69

Vertedouro — Espécie de soleira com a finalidade de verter água. 60

Vibração — Agitação energética aplicada ao concreto fresco, durante o lançamento, através de dispositivos mecânicos, movidos elétrica ou pneumaticamente, e que cria impulsos vibratórios de frequência moderadamente elevada, consolidando o concreto no molde. 340

Vibração externa — A vibração por meio de elementos vibratórios colocados nas fôrmas ou moldes. 60

Vibração interna — A vibração por meio de elementos vibratórios imersos no concreto. 60

Vibração na superfície — A vibração por meio de elementos vibratórios colocados em réguas ou sistemas deslizantes. 60

Vibrador — O equipamento que adensa (compacta) o concreto fresco recém-lançado, por meio de vibração. 358

Vibrador de superfície — O vibrador usado para adensamento do concreto, pela aplicação na superfície da massa do concreto fresco. 60

Vidro — Substância amorfa (não cristalina) resultante de resfriamento rápido. 69

Viscoelasticidade — Propriedade que apresentam certos materiais de se deformarem com uma velocidade proporcional à grandeza da tensão aplicada. 60

Viscosidade — Característica física dos fluidos em geral. Representa o coeficiente de proporcionalidade entre o esforço aplicado e o gradiente da velocidade em regime laminar. Resistência que todo fluido real oferece ao movimento relativo de qualquer de suas partes; atrito interno de um fluido. 104, 142

Viscosímetro de torque — O aparelho usado para medir a consistência de caldas ou lamas, no qual a energia necessária para girar um dispositivo, acoplado a uma mola, é proporcional à viscosidade. 60

Volume — Medida do espaço ocupado por um sólido. 60

Volume absoluto — (dos ingredientes da argamassa ou concreto) o volume ocupado na massa do concreto por um componente do concreto ou argamassa. 253

Volume compactado seco — O volume, aparente, ocupado por agregado seco compactado por apiloamento sob condições padrões, usado para determinação da massa unitária (massa específica aparente) do agregado. 61

Vulcânica — Rocha ígnea originada pelo extravasamento do magma na superfície terrestre, formando cones, derrames e piroclastos. As extrusivas, por isso, possuem grande variação de textura que se reflete em suas propriedades. Os vidros naturais pertencem a esse grupo. 69

Vulcanização — Processo em que se torna elástica, resistente e insolúvel a borracha natural e que se baseia na introdução de átomos de enxofre na cadeia do polímero natural. 61

— X —

Xenolito — Fragmentos de rochas alóctonas, estranhas à massa da rocha ígnea na qual estão englobadas. Tipo de inclusão geralmente formada pelo englobamento, de pedaços de rochas das paredes ou teto da câmara magmática, pelo magma. Fragmento não dirigido de uma rocha preexistente que se encontra no seio de uma rocha ígnea ou metamórfica. 61

Xisto — Rocha metamórfica cristalina, acentuadamente foliada, em cuja composição são abundantes os minerais de hábito micáceo orientados. Os grânulos são suficientemente grandes para permitir a identificação dos principais minerais componentes. Produto de metamorfismo dinâmico. 71, 196

Z —

Zona de ancoragem — A região onde ocorre a transferência da tensão de aderência que se desenvolve. 61

2.2 Unidades e Conversões

2.2.1 Unidades

Aceleração	m/s^2 (sistema internacional)
Aceleração angular	rad/s^2
Velocidade angular	rad/s
Área	m^2
Concentração (substância)	mol/m^2
Densidade de corrente	A/m^2
Densidade (massa)	kg/m^3
Entropia	J/°K (Joule por Kelvin)
Capacidade calorífica	J/°K
Momento de força	N . m
Permeabilidade	H/m (Henry/m)
Calor específico	J/kg °K
Condutividade térmica	W/(M . °K)
Velocidade	m/s
Viscosidade dinâmica	Pa . s
Viscosidade cinemática	m^2/s

2.2.2 Conversões

De	Para	Multiplicar por
Comprimento		
pé	metro (m)	0,3048
polegada	centímetro (cm)	2,54
jarda	metro (m)	0,9144
milha	quilômetro (km)	1,609
Área		
pé quadrado	m^2	0,0929
polegada quadrada	cm^2	6,4516
jarda quadrada	m^2	0,8361
Volume		
pé cúbico	m^3	0,02832
galão (americano)	m^3	0,003785
galão (imperial)	m^3	0,004546
onça líquida (americana)	cm^3	29,57
polegada cúbica	m^3	$1,638706 \times 10^{-5}$
jarda cúbica	m^3	0,7646
Força		
kilograma força	N (Newton)	9,807
kip (1.000 libras força)	kgf	453,6
kip	N	444 8
libra força	kgf	0,4536
libra força	N	4·448

De	Para	Multiplicar por
Pressão ou tensão (força por área)		
kgf/m²	N/m²	9,807
ksi (kip/polegada²)	kgf/cm²	70,31
libra força/pe²	kgf/m²	4,883
libra força/pe²	N/m²	47,88
psi (libra/polegada²)	kgf/cm²	0,07031
psi (libra/polegada²)	N/m²	6895
kgf/cm²	Pascal-Pa	$9{,}807 \times 10^{4}$
ksi	Pa	$6{,}895 \times 10^{6}$
psi	Pa	$6{,}895 \times 10^{3}$
Massa		
onça (avdp)	g	28,35
libra (massa)	kg	0,4536
t (tonelada métrica)	kg	1000
t (curta = 2.000 libras)	kg	907,2
Massa por volume		
libra/pé³	kg/m³	16,02
libra/jd³	kg/m³	0,5933
libra/galão (americano)	kg/m³	119,8
libra/galão (canadense)	kg/m³	99,78
libra/polegada³	kg/m³	$27{,}68 \times 10^{3}$
Temperatura		
°C (Centígrado)	°K (Kelvin)	$\theta k = \theta c + 273{,}15$
°F (Farenheit)	°K	$\theta k = (\theta F + 459{,}67)/1{,}8$
°F	°C	$\theta c = (\theta F - 32)/1{,}8$
Outras		
ATM (atmosfera-760 mmHg)	Pa	$1{,}013 \times 10^{5}$
BTU	J (Joule)	$1{,}053 \times 10^{3}$
BTU/H (condutividade térmica)	W (Watt)	$2{,}926 \times 10^{-1}$
caloria	J	4,18
centipoise	Pa . S	$1{,}000 \times 10^{-3}$
centistokes	m²/s	$1{,}000 \times 10^{-6}$
HP	W	$7{,}46 \times 10^{2}$
Polegada de Hg	Pa	$3{,}386 \times 10^{3}$
Polegada de água	Pa	$2{,}491 \times 10^{2}$

2.3 Referências Bibliográficas

[2.1] Vocabulário de Teoria das Estruturas — BT — n.º 02 — ABCP
[2.2] Novo Dicionário da Língua Portuguesa — Aurélio Buarque de Holanda Ferreira
[2.3] Cement and Concrete Terminology — ACI — Committee 116
[2.4] Glossário de Instrumentação — J.F.A. Silveira e outros
[2.5] Glossário de Termos Técnicos de Geologia de Engenharia — A. A. Tognon/85
[2.6] ASTM-C-E-380 — Excerts from Standard for Metric Practice

Índice

3.	Materiais	67
3.1	Agregados	67
3.1.1	Classificações	68
3.1.1.1	Classificação pela Massa Específica	68
3.1.1.2	Classificação Geológica	68
3.1.2	Prospecção	71
3.1.3	Características e Propriedades	73
3.1.3.1	Granulometria	73
3.1.3.2	Módulo de Finura	78
3.1.3.3	Tamanho Máximo do Agregado	79
3.1.3.4	Massa Específica — Absorção — Porosidade — Índice de Vazios	80
3.1.3.5	Umidade do Agregado	86
3.1.3.6	Forma e Textura das Partículas do Agregado	87
3.1.3.7	Resistência dos Agregados à Abrasão	92
3.1.3.8	Resistência dos Agregados à Compressão	95
3.1.3.9	Módulo de Elasticidade (de Deformação) do Agregado	95
3.1.3.10	Materiais Pulverulentos	97
3.1.3.11	Teor de Argila e Partículas Friáveis nos Agregados	97
3.1.3.12	Avaliação de Impurezas Orgânicas e da Qualidade do Agregado Miúdo	98
3.1.3.13	Avaliação Petrográfica	98
3.1.3.14	Sanidade	99
3.1.3.15	Propriedades Térmicas	122
3.2	Cimentos	130
3.2.1	Generalidades	130
3.2.2	Tipos de Cimentos	131
3.2.2.1	Cimento Portland Comum	131
3.2.2.2	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	133
3.2.2.3	Cimento Portland de Moderado Calor de Hidratação	133
3.2.2.4	Cimento Portland Resistente aos Sulfatos	133
3.2.2.5	Cimentos Aditivados (Escoriados ou Compostos)	133
3.2.2.6	Outros Cimentos	135
3.2.3	Características e Propriedades	136
3.2.3.1	Massa Específica	136
3.2.3.2	Finura	138
3.2.3.3	Consistência Normal da Pasta	156
3.2.3.4	Tempos de Início e Fim de Pega	160
3.2.3.5	Sanidade — Estabilidade Volumétrica	163
3.2.3.6	Calor de Hidratação	167
3.2.3.7	Resistência à Compressão	177
3.2.3.8	Análise Química	183
3.2.4	Situação Geral dos Cimentos no Brasil	189
3.2.4.1	Produção de Cimentos	189
3.3	Materiais Pozolânicos	194

3.3.1	Generalidades	194
3.3.2	Classificação	195
3.3.3	Características e Propriedades	196
3.3.3.1	Informações Gerais sobre Efeitos do Material Pozolânico nos Concretos	196
3.3.3.2	Rotina para Avaliação de um Material Pozolânico	198
3.3.3.3	Massa Específica	201
3.3.3.4	Finura	201
3.3.3.5	Índices de Atividade Pozolânica	203
3.3.3.6	Eficiência no Combate à Reação Álcalis-Agregado	212
3.3.3.7	Retração por Secagem	219
3.3.3.8	Calor de Hidratação	219
3.3.3.9	Análise Química	223
3.3.4	Valores de Materiais Pozolânicos	226
3.4	Água	227
3.4.1	Generalidades	227
3.4.2	Caracterização	228
3.4.2.1	Concentração Hidrogeniônica (pH)	228
3.4.2.2	Sólidos Totais	230
3.4.2.3	Alcalinidade — Carbonatos e Bicarbonatos	230
3.4.2.4	Cloretos	230
3.4.2.5	Sulfatos	230
3.4.2.6	Ferro	230
3.4.2.7	Álcalis	230
3.4.2.8	Avaliação da Qualidade da Água pela Resistência à Compressão Axial Simples de Argamassa	230
3.4.2.9	Avaliação da Qualidade da Água pelos Tempos de Pega	231
3.4.2.10	Avaliação da Água de Cura	231
3.5	Aditivos	231
3.5.1	Generalidades	231
3.5.2	Tipos	232
3.5.2.1	Incorporadores de Ar	234
3.5.2.2	Plastificantes — Redutores de Água	235
3.5.2.3	Modificadores da Pega	236
3.5.2.4	Outros Aditivos	238
3.5.3	Caracterização	238
3.5.3.1	Concentração Hidrogeniônica (pH)	239
3.5.3.2	Resíduo Sólido	239
3.5.3.3	Massa Específica	239
3.5.3.4	Abatimento do Tronco de Cone	239
3.5.3.5	Teor de Ar Incorporado	239
3.5.3.6	Tempos de Pega	239
3.5.3.7	Teor de Água	240
3.5.3.8	Exsudação	240
3.5.3.9	Resistência à Compressão	240
3.5.3.10	Resistência à Tração	240
3.5.3.11	Outras Caracterizações	240
3.6	Referências Bibliográficas	240

3 Materiais

A consideração básica que se faz para uso de qualquer material em concreto é com relação ao conhecimento que se tem sobre o mesmo. É importante que ao usar um agregado, cimento, material pozolânico, água e aditivos, se tenha um histórico, ou algum conhecimento, sobre o desempenho de cada um deles, bem como do comportamento conjunto.

3.1 Agregados

Sabe-se que aproximadamente 75% do volume de um concreto convencional é ocupado por agregados constituídos por areia, seixos ou britas, pedra ou escória de alto-forno. É inevitável que um material que ocupe uma porcentagem elevada na massa do concreto deva contribuir nas propriedades do concreto fresco e endurecido.

É importante que esse material seja estudado, caracterizado e controlado, a fim de que se possa correlacionar as suas características com as dos concretos. É conveniente que os materiais menos conhecidos, ou de menor intensidade de uso, sejam estudados mais acuradamente. Tendo o agregado menor custo do que o cimento é importante que se procure aumentar a sua quantidade na massa de concreto. Mas a economia não é a única razão para incrementar sua utilização, pois o agregado oferece consideráveis vantagens técnicas ao concreto.

Quando o concreto ainda está fresco, os agregados graúdos estão mantidos imersos em uma massa fluida, como que em suspensão na argamassa. O comportamento dessa suspensão como, por exemplo, a facilidade de lançamento sem segregação, ou a condição de moldagem, é bastante influenciado pela escolha do teor, tipo e graduação do agregado. Dependendo de o agregado ser natural ou britado, lamelar ou arredondado, o comportamento do concreto fresco pode ser distinto.

De outra forma, o agregado pode alterar as propriedades do concreto endurecido.

Com a generalização do emprego do concreto, no início do século XX, sentiu-se a necessidade de melhor estudar os materiais componentes após a constatação da ocorrência de alguns problemas.

A natureza física dos agregados, sua durabilidade, forma e resistência passaram a ser estudadas para complementar as já conhecidas determinações de granulometria e presença de impurezas.

Os estudos desenvolvidos mostraram que a denominação de inerte não é de todo correta pois suas propriedades físicas, térmicas e mesmo químicas afetam as propriedades do concreto.

As reações químicas observadas mais recentemente, envolvendo os álcalis do cimento com a sílica, silicatos ou carbonatos componentes dos agregados, têm provocado surpresas desagradáveis, exigindo trabalhos corretivos de custos elevados.

É válida a afirmativa de que agregados de boa qualidade dão origem a bons concretos desde que obedecidos procedimentos corretos de dosagem e execução.

Por outro lado, agregados que não podem ser classificados como de boa qualidade, como certos tipos que não se comportam bem, sofrendo deterioração relativamente rápida

quando expostos a ciclos alternados de molhagem e secagem, podem produzir concretos de boa qualidade desde que envolvidos por pasta de baixa permeabilidade.

3.1.1 Classificações:

Os agregados para concreto podem ser classificados de acordo com as características petrográficas, com o processo de obtenção — natural ou britado — com a massa específica — leve ou pesado. Podem ainda ser classificados pela forma e textura.

Dessa forma os principais materiais usados como agregado para concreto podem ser classificados como segue.

3.1.1.1 Classificação pela massa específica

— Agregados Leves

Naturais	**Artificiais**
Pedra Pome	Escórias Expandidas
Escória Vulcânica	Argila, Perlita Expandida
Amianto	Vermiculita

— Agregados Normais

Rochas Naturais	**Artificiais**
Areias e Cascalhos	Escórias
Rochas Britadas (Basalto, Granito, Calcário etc.)	

— Agregados Pesados

Magnetita
Barita
Ferro Pelotizado
Ilmenita
Hematita
Bolas de Aço

3.1.1.2 Classificação geológica

Uma identificação precisa das rochas e minerais, em vários casos, deve ser feita por geológo, mineralogista ou petrologista qualificado, usando equipamentos e procedimentos especiais. Entretanto, alguns dados básicos podem servir para se fazer uma identificação rápida, grosseira. As rochas podem ser classificadas genericamente de acordo com a figura 3.1 [3.1]).

A rocha pode ser definida como um dos materiais que constituem a Terra. Isto inclui massas heterogêneas, tais como alguns acamamentos de areia, cascalho, argila, cinzas vulcânicas e maciços compactos, sólidos tais como granitos, calcários, basaltos etc.

De acordo com essa definição, podem ser incluídos, para finalidades de uso para agregados de concreto, alguns óxidos metálicos ou não metálicos e alguns minerais.

Há três classes de rocha, contendo ou não óxidos e minerais:

— Rochas Ígneas

São as rochas originais, formadas inicialmente e a grandes profundidades da Terra.

- Intrusivas (também chamadas de plutônicas): originadas como magma em fusão e que se resfriaram lentamente, a grandes profundidades, resultando grandes cristais e uma granulação grosseira.
- Extrusivas (também chamadas de vulcânicas): formadas mais próximas à superfície da Terra, com resfriamento rápido e consequentemente possuindo cristais pequenos e uma granulação mais fina, possuindo vidro natural.

Possuem, em alguns casos, uma estrutura vesicular, decorrente da incorporação de ar durante o resfriamento. Dependendo do grau de decomposição requerem maior empenho para escavação.

— Rochas Sedimentares

São rochas estratificadas e normalmente formadas pela ação das águas, podendo ser formadas também pela ação eólica ou glacial. Os sedimentos podem ser compostos por partículas de rochas anteriores, derivadas de uma ação mecânica ou podem ter origem devida à ação química ou orgânica. Os sedimentos podem se apresentar cimentados ou compactados, embora o grau de compactação dependa da idade geológica. Cascalho, areia, silte e argila são sedimentos não consolidados.

CLASSE	TIPO	FAMÍLIAS MAIS COMUNS
IGNEAS	intrusivas granulação grossa	granito diorito pegmatito
	extrusivas granulação fina	basalto andesita riolito
SEDIMENTARES	carbonatosas	calcário dolomita
	silicosas	arenito chert conglomerado
METAMÓRFICAS	folhadas	gnaisse xisto anfibolito
	não folhadas	quartzito

Figura 3.1 — Classificação de rochas

— Rochas Metamórficas

São aquelas que se alteraram devido a um processo físico e/ou químico com relação aos seus estados anteriores de textura, estrutura e composição mineral.

Essas rochas são formadas a partir das rochas ígneas, das sedimentares e das metamórficas. Neste último caso sofrendo metamorfismos delas próprias. Todas são formadas pela ação do calor, pressão e pela ação de gases e líquidos sob a superfície da Terra.

Algumas vezes o limite entre as rochas ígneas e metamórficas provoca alguma discordância.

As rochas mais observadas e encontradas para materiais de construção são listadas a seguir:

— Ígneas Intrusivas

- **Granito:** Rocha de granulação visível a olho nu, sendo constituída predominantemente de quartzo, feldspato alcalino (Potássio).
- **Diorito:** Rocha de granulação média, entre grossa e fina, sendo constituída por feldspato e minerais ferromagnesianos, tendo coloração mais escura que o granito.
- **Diabásio:** Rocha composta pelos mesmos materiais do basalto, porém de granulação mais grossa.

— Ígneas Extrusivas

- **Basalto:** Rocha de granulação fina, densa e escura.
- **Andesita:** Rocha de granulação fina, com finos acamamentos.
- **Riolito:** Rocha de granulação bastante fina, às vezes colorida, podendo possuir materiais reativos com os álcalis do cimento.

— Sedimentares não Consolidadas

- **Areias:** de coloração clara a escura, e grãos na maior parte entre 0,06 mm e 2,00 mm.
- **Cascalhos:** De coloração clara a escura, e grãos na grande maioria entre 2,00 mm e 20 cm.

— Sedimentares Consolidadas

- **Conglomerados:** Partículas arredondadas cimentadas e acamamentos de pequena altura.
- **Dolomito:** Rocha possuindo carbonato de cálcio e magnésio, de cor clara.
- **Calcário:** Rocha possuindo carbonato de cálcio diferindo do dolomito pela pouca presença de magnésio.
- **Arenito:** Conglomerado silicoso onde o diâmetro das partículas de areia está entre 0,06 e 2,00 mm, de cor clara.
- **Chert:** Rocha silicosa, de granulação bastante fina, caracterizada pela sua dureza (risca o vidro e não é riscada por lâminas de aço) e pelo seu tipo de fratura.

— Metamórficas não Folhadas

- **Quartzito:** Arenito metamorfoseado, extremamente duro.
- **Mármore:** Rocha carbonácea recristalizada.

— Metamórficas Folhadas

- **Gnaisse:** Rocha metamórfica muito comum, normalmente formada a partir de rochas ígneas ou sedimentares por elevado grau de metamorfismo.
- **Xisto:** Pode ser formado a partir de rochas ígneas ou sedimentares por um metamorfismo inferior ao dos gnaisses.
- **Anfibólito:** Rocha de graduação média contendo magnésio, ferro, cálcio (e algumas vezes sódio e alumínio).

Quanto à classificação geológica, as rochas ígneas dão origem a agregados de excelente qualidade com resistência, dureza e densidade adequadas para uso em concreto, com exceção de certos tufos e lavas que, devida ao resfriamento rápido, apresentam estrutura extremamente porosa e/ou reativa.

As rochas sedimentares apresentam características muito variadas, desde densas e duras até leves e moles. É comum a ocorrência de partículas frágeis devida à deficiente cimentação entre os grãos constituintes. Podem conter inclusões que conferem à rocha características indesejáveis como elevada absorção ou baixa resistência mecânica.

Arenitos e calcários, densos e duros, são rochas sedimentares adequadas para uso como agregados para concreto.

Conglomerados, em geral, são pouco usados, pela tendência de romperem dando origem a partículas menores durante as operações de manuseio e classificação.

As características das rochas metamórficas, como as sedimentares, variam amplamente. Quartzitos e mármores são, normalmente, densos, maciços e apresentam boa resistência mecânica. Gnaisses, em geral, também possuem boas características quando não apresentam estrutura bandeada que tem o inconveniente de produzir agregados lamelares.

3.1.2 Prospecção

Um dos primeiros passos ao se planejar o início de uma obra é o de obter informações sobre os materiais a serem usados. O agregado, por ser usado em quantidades relativamente grandes e ter um custo apreciável, deve ser analisado adequadamente.

A prospecção de um material para uso como agregado para concreto pode ser feita de diversas maneiras dependendo, sobretudo, da quantidade de material necessário, localização e informações anteriores.

O conhecimento da região pode ser feito por meio de mapas geológicos e/ou levantamentos aéreos ou por sensores adequados, via satélite.

Algumas vezes é comum se recorrer à avaliação geofísica empregando instrumentos portáteis.

Esses instrumentos operam basicamente através de dois princípios:

— Resistividade elétrica dos diferentes extratos existentes, podendo se proceder a diferenciação entre os vários materiais.

— Exploração sísmica, através da velocidade ou do choque de ondas através dos materiais.

Os materiais mais densos, geralmente, oferecem maior resistência à passagem da corrente elétrica empregada no processo da resistividade elétrica. Por outro lado, as ondas se propagam mais rapidamente através de rochas mais densas.

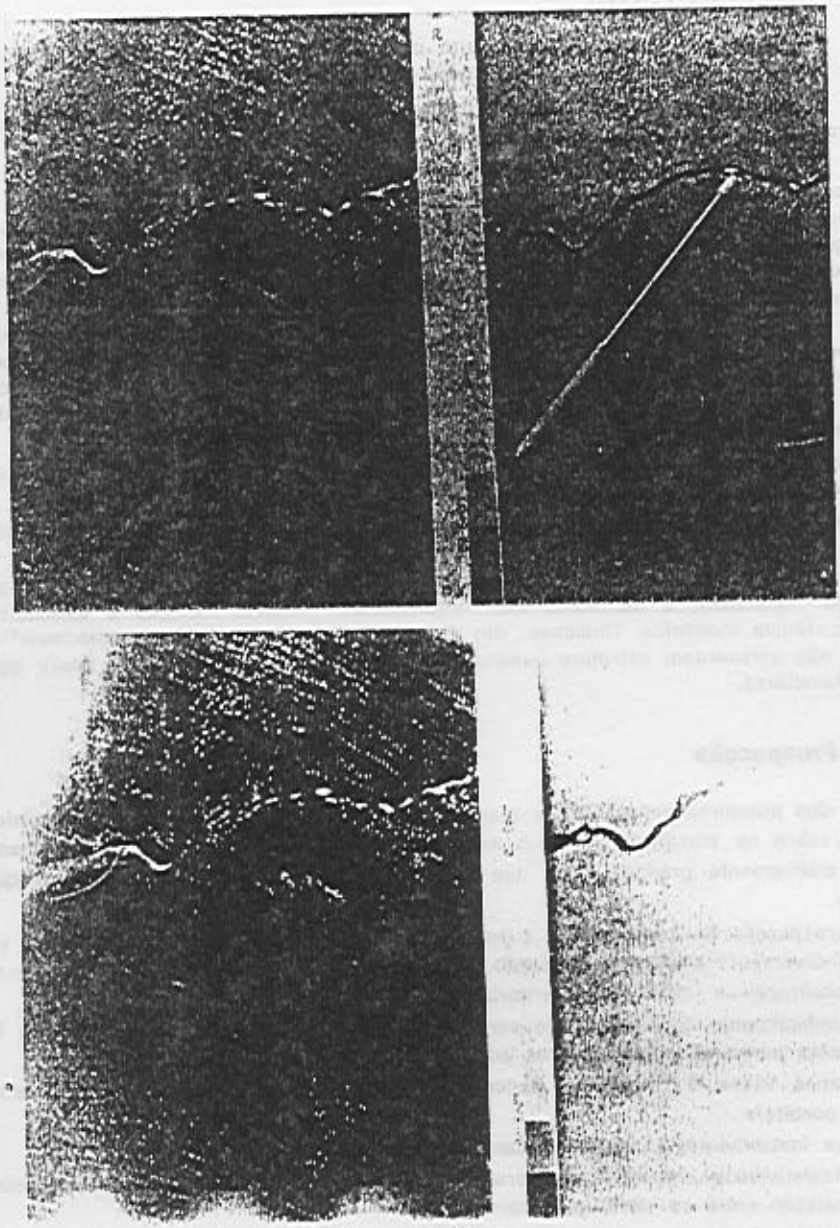


Figura 3.2 — Vista por satélite de uma jazida de agregado

Após as avaliações de caráter mais genérico, é comum se usar das sondagens e de trincheiras com perfilagem, para um maior detalhamento das áreas potencialmente favoráveis. Em decorrência dessas avaliações são então feitas as quantificações ou "cubagens" (ou cubicagens) dos volumes disponíveis.

Em casos de jazidas de leito de rio é comum se avaliar, também, a condição de reposição de material na jazida.

Os tipos de sondagens e de amostradores variam com o tipo de material a ser prospectado.

No caso de trabalhar com agregados procedentes de jazidas já em exploração, o procedimento que se pode adotar é o de conhecer o material a partir de amostras coletadas adequadamente durante a produção e beneficiamento.

3.1.3 Características e propriedades

A caracterização consiste no exame e ensaios para conhecimento, aceitação ou rejeição do material para agregados e do próprio agregado nos ensaios de controle, nos vários pontos de beneficiamento e na verificação das condições de estocagem e manuseio dos agregados.

As amostras de um agregado devem ser as mais representativas possíveis. Devem ser esperadas variações e fenômenos isolados não devem ser motivo para rejeição do material todo. As amostram devem, sempre que possível, ser coletadas nos pontos finais de utilização, porém, amostragens e verificações em pontos intermediários podem ser de grande auxílio para controle e compreensão das situações. Deve-se evitar amostrar agregados nas saias dos estoques, onde normalmente pode ocorrer segregação.

Para um adequado controle dos agregados podem ser aplicados ensaios físicos e/ou químicos que fornecem informações importantes no comportamento dos agregados para concreto.

3.1.3.1 Granulometria

A análise granulométrica é o nome dado a uma operação simples de dividir a amostra do agregado em frações, cada uma constituída por partículas de mesma dimensão. Na prática, cada fração contém partículas entre limites definidos que são as aberturas das peneiras padronizadas. Os resultados da análise granulométrica podem ser facilmente compreendidos através da representação gráfica. Nas curvas granulométricas, comumente usadas, as ordenadas são as porcentagens retidas ou acumuladas e as abscissas são as aberturas das malhas. Como a abertura da série padrão de peneiras está na razão "2" crescente (ou 1/2 decrescente), a escala logarítmica é a mais adequada, representando as aberturas com espaçamentos iguais.

A análise granulométrica é uma confirmação de que uma certa quantidade de material, de determinada dimensão, está presente no produto resultante de um beneficiamento, estocagem ou manuseio. A granulometria auxilia sobremaneira o controle do agregado para o concreto. O objetivo primordial da análise granulométrica é o de avaliar a constância das dimensões das partículas.

As granulometrias são normalmente comparadas aos limites especificados, que regem as subdivisões dos estoques em determinadas frações.

A distribuição dos tamanhos das partículas tem sensível efeito na demanda de água de um concreto, bem como em todas as propriedades influenciadas pelo teor de água.

A trabalhabilidade, a densidade, a segregação e as características de acabamento de um concreto são grandemente influenciadas pela granulometria dos agregados.

Agregados bem graduados possibilitam o emprego de maior quantidade desse material em um determinado volume de concreto, dando origem a uma mistura mais densa, com maior estabilidade de volume, mais resistente e mais econômica.

DENOMINAÇÃO DA MALHA PADRÃO	ALTERNATIVA	VARIAÇÃO PERMISSÍVEL DA ABERTURA MÉDIA (ASTM) (ABNT)	ABERTURA MÁXIMA DE MENOS QUE 5% DAS ABERTURAS.	ABERTURA INDIVIDUAL MÁXIMA (ASTM) (ABNT) mm %	Ø NOMINAL DO FIO (mm). (ASTM) (ABNT)
125 mm	5 in.	±3,7 mm	130,0 mm	130,9 mm	8,0
106 mm	4,24 in.	±3,2 mm	110,2 mm	111, 1 mm	6,40
100 mm	4 in.	±3,0 mm	104,0 mm	104,8 mm	6,30
90 mm	3 1/2 in.	± 2,7 mm	93,6 mm	94,4 mm	6,08
75 mm SN	3 in.	± 2,2 mm (± 2%)	78,1 mm	78,7 mm (+ 3%)	5,80 (6)
63 mm	2 1/2 in.	± 1,9 mm	65,6 mm	66,2 mm	5,50
53 mm	2,12 in.	± 1,6 mm	55,2 mm	55,7 mm	5,15
50 mm	2 in.	± 1,5 mm (± 2%)	52,1 mm	52,6 mm	5,05 (5)
46 mm	1 3/4 in.	± 1,4 mm	46,9 mm	47,4 mm	4,85
37,5 mm SN	1 1/2 in.	± 1,1 mm (± 2%)	39,1 mm	39,5 mm (+3%)	4,59 (5)
31,5 mm	1 1/4 in.	± 1,0 mm	32,9 mm	33, 2 mm	4,23
26,5 mm	1,06 in.	± 0,8 mm	27,7 mm	28,0 mm	3,90
25,0 mm	1 in.	± 0,8 mm (± 3%)	26,1 mm	26,4 mm (+ 5%)	3,80 (4)
22,4 mm	7/8 in.	± 0,7 mm	23,4 mm	23,7 mm	3,50
19,0 mm SN	3/4 in.	± 0,6 mm (± 3%)	19,9 mm	20,1 mm (+5%)	3,30 (3)
16,0 mm	5/8 in.	± 0,5 mm	16,7 mm	17,0 mm	3,00
13,2 mm	0,530 in.	± 0,41 mm	13,83 mm	14,05 mm	2,75
12,5 mm	1/2 in.	± 0,39 mm	13,10 mm	13,31 mm	2,67
11,2 mm	7/16 in.	± 0,35 mm	11,75 mm	11,94 mm	2,45
9,5 mm SN	3/8 in.	± 0,30 mm (±3%)	9,97 mm	10,16 mm (+5%)	2,27 (2)
8,0 mm	5/16 in	± 0,25 mm	8,41 mm	8,58 mm	2,07
6,7 mm	0,265 in.	± 0,21 mm	7,05 mm	7,20 mm	1,87
6,3 mm	1/4 in.	± 0,20 mm	6,64 mm	6,78 mm	1,82
5,6 mm	Nº. 3 1/2	± 0,18 mm	5,90 mm	6,04 mm	1,68
4,75 mm SM	Nº. 4	± 0,15 mm (±3%)	5,02 mm	5,14 mm (+ 10 %)	1,54 (1)
4,00 mm	Nº. 5	± 0,13 mm	4,23 mm	4,35 mm	1,37
3,35 mm	Nº. 6	± 0,11 mm	3,55 mm	3,66 mm	1, 23
2,80 mm	Nº. 7	± 0,095 mm	2,975 mm	3,070 mm	1,10
2,36 mm SN	Nº. 8	± 0,080 mm (±3%)	2,515 mm	2,600 mm (+10%)	1, 00 (0,8)
2,00 mm	Nº. 10	± 0,070 mm	2,135 mm	2,215 mm	0,900
1,70 mm	Nº. 12	± 0,060 mm	1,820 mm	1,890 mm	0,810
1,40 mm	Nº. 14	± 0,050 mm	1,505 mm	1,565 mm	0,725
1,18 mm SN	Nº. 16	± 0,045 mm (±3%)	1,270 mm	1,330 mm (+10%)	0,650 (0,5)
1,00 mm	Nº 18	± 0,040 mm	1,080 mm	1,135 mm	0,580
850 μm	Nº. 20	± 35 μm	925 μm	970 μm	0,510
710 μm	Nº. 25	± 30 μm	775 μm	815 μm	0, 450
600 μm SN	Nº. 30	± 25 μm (±5%)	660 μm	695 μm (+10%)	0, 390 (0,3)
500 μm	Nº. 35	± 20 μm	550 μm	585 μm	0,340
425 μm	Nº. 40	± 19 μm	471 μm	502 μm	0,290
355 μm	Nº. 45	± 16 μm	396 μm	425 μm	0,247
300 μm SN	Nº. 50	± 14 μm	337 μm	363 μm (+25%)	0, 215 (0,2)
250 μm	Nº. 60	± 12 μm	283 μm	306 μm	0, 180
212 μm	Nº. 70	± 10 μm	242 μm	263 μm	0, 152
180 μm	Nº. 80	± 9 μm	207 μm	227 μm	0, 131
150 μm SN	Nº. 100	± 8 μm (±6%)	174 μm	192 μm (+40%)	0, 110 (0,1)
125 μm	Nº. 120	± 7 μm	147 μm	163 μm	0,091
106 μm	Nº. 140	± 6 μm	126 μm	141 μm	0,076
90 μm	Nº. 170	± 5 μm	108 μm	122 μm	0,064
75 μm	Nº. 200	± 5 μm	91 μm	103 μm	0,053
63 μm	Nº. 230	± 4 μm	77 μm	89 μm	0,044
53 μm	Nº. 270	± 4 μm	66 μm	76 μm	0,037
45 μm	Nº. 325	± 3 μm	57 μm	66 μm	0,030
38 μm	Nº. 400	± 3 μm	48 μm	57 μm	0,025

O diametro médio dos Fios, tomados separadamente, não deve variar em relação ao nominal por mais de:

SN = SÉRIE NORMAL

Malhas maiores que 600 μm — 5%

Malhas entre 600 e 125 μm — 7,5%

Malhas menores que 125 μm — 10%

Figura 3.3 — Aberturas das peneiras

Um parâmetro de referência, muito empregado, é o módulo de finura que é obtido pela soma das percentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal (padrão). Embora não sirva para representar a distribuição granulométrica, permite detectar variações na graduação de agregados de mesma fonte.

Outro parâmetro, estabelecido especialmente em função das dimensões da estrutura a concretar ou do espaçamento entre as barras de armadura, é o tamanho máximo que corresponde à abertura da peneira na qual fica retida, acumulada, uma percentagem igual ou imediatamente inferior a 5% do material.

Do ponto de vista teórico, quanto maior o tamanho máximo do agregado empregado, menor quantidade de cimento será necessária para alcançar uma determinada característica. Isto baseia-se no fato de que, com agregados bem graduados, há diminuição dos espaços vazios com o aumento de tamanho.

Um agregado bem graduado possui de 1/3 a 1/2 do material retido em uma peneira intermediária.

As peneiras de série normal (padrão) são as indicadas pela NBR 5734. — ABNT e ASTM E-11, como mostra a figura 3.3 [3.2] [3.3]

As areias naturais são, comumente, encontradas nas margens ou leitos de rios, isoladamente ou misturadas com agregados graúdos.

Em regiões onde não haja a ocorrência de areias naturais adequadas, para uso em concreto, podem ser produzidas areias artificiais pela trituração de rochas disponíveis no local.

As areias artificiais diferem significativamente das naturais por apresentarem grãos angulosos e serem produzidas juntamente com consideráveis quantidades de pó. Caracterizam-se por produzirem concretos menos trabalháveis quando comparados com outros produzidos com areia natural.

Em regiões onde há abundância de areia natural fina, o emprego de areia artificial mais grossa pode ter a finalidade de corrigir a faixa granulométrica do agregado miúdo.

Em regiões onde a distância de transporte faz com que a areia natural tenha custo elevado é comum ser adotada a mistura com a artificial nas menores percentagens possíveis, de modo a compensar a eventual deficiência de finos desta.

A necessidade de mistura de areia natural com artificial é mais sensível em concretos bombeados, por diminuir o atrito interno melhorando as condições de lançamento.

Agregados possuindo uma curva granulométrica suave sem deficiências ou excessos de qualquer fração, geralmente produzem misturas com poucos vazios entre as partículas. Sendo o cimento a fração de custo mais elevado, nota-se que o concreto com poucos vazios necessita de menor teor de argamassa e, por conseguinte, de pasta e de cimento, resultando um concreto de menor custo.

Para análise granulométrica, deve ser usado um conjunto de peneiras, de acordo com dimensões e tolerâncias da figura 3.3, uma balança com acuracidade de 0,1% do peso da amostra, e estufa para secagem da amostra à temperatura uniforme de 110 ± 5°C [3.4] [3.5] [3.6].

As amostras a serem ensaiadas devem ter dimensão adequada para que apresentem resultados significativos. Podem ser adotadas as dimensões indicadas na figura 3.4.

TAMANHO NOMINAL MAXIMO (mm)		≤9.5	12.5	19.0	25.0	38	50	63	76	100	150
PESO MINIMO DA AMOSTRA (kg)	ASTM	1	2	5	10	15	20	35	60	150	500
	ABNT	1	—	—	10	15	20	—	—	—	—

Figura 3.4 — Dimensões recomendáveis da amostra de agregados para análise granulométrica

Caso as amostras sejam maiores que as recomendadas pode ser usada a técnica do quarteamento, no depósito ou pelo quarteador ilustrado na figura 3.5.

Para o ensaio, a amostra deve ser seca até uma constância de peso à temperatura de 110°C.

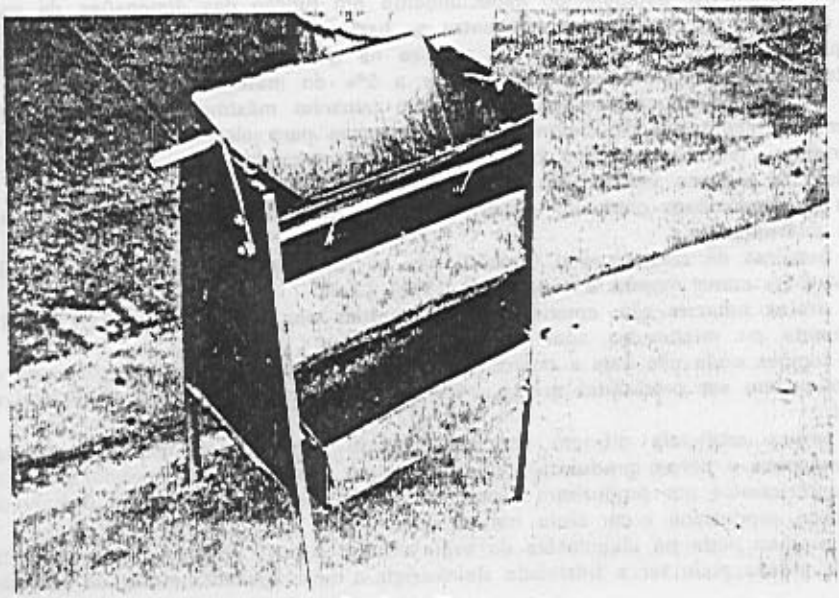


Figura 3.5 — Quarteador de amostras, para ∅ máx < 38 mm

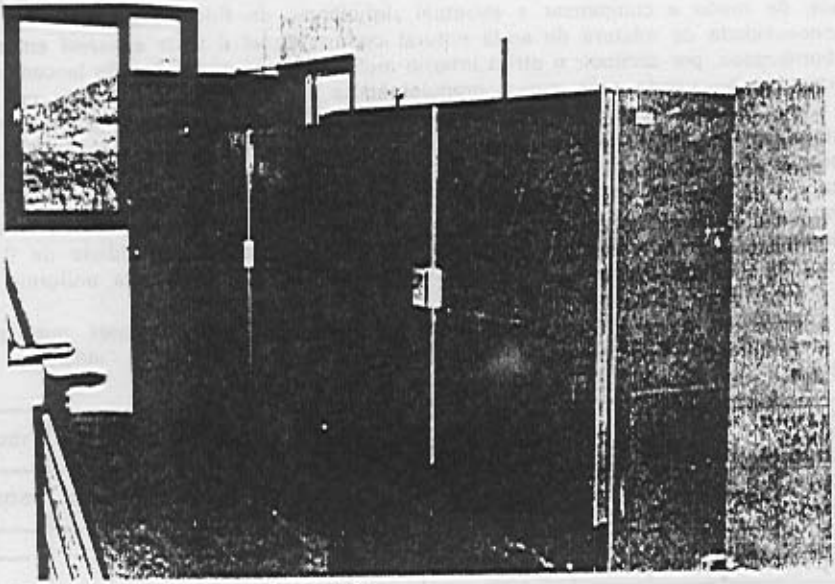


Figura 3.6 — Estufas para secagem de agregados

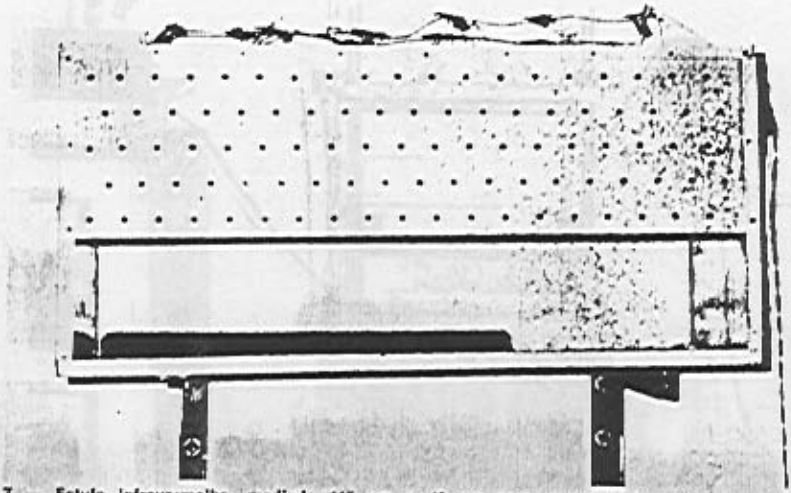


Figura 3.7 — Estufa infravermelha, medindo 115 cm x 40 cm para secagem de materiais através de 12 lâmpadas de 250 W

O peneiramento pode ser feito manualmente ou através de peneiradores mecânicos como ilustram as figuras 3.8 e 3.9.

Após o peneiramento as frações retidas em cada peneira são pesadas e determina-se a porcentagem retida e/ou retida acumulada em cada peneira.

As peneiras, usadas rotineiramente, devem ser verificadas quanto às suas dimensões e tolerâncias.

Deve ser dada atenção especial a granulometrias que possuam frações em excesso, o que pode causar acúmulo na respectiva peneira e desta forma falsear a análise. Esse fato é comum em certos tipos de areia.

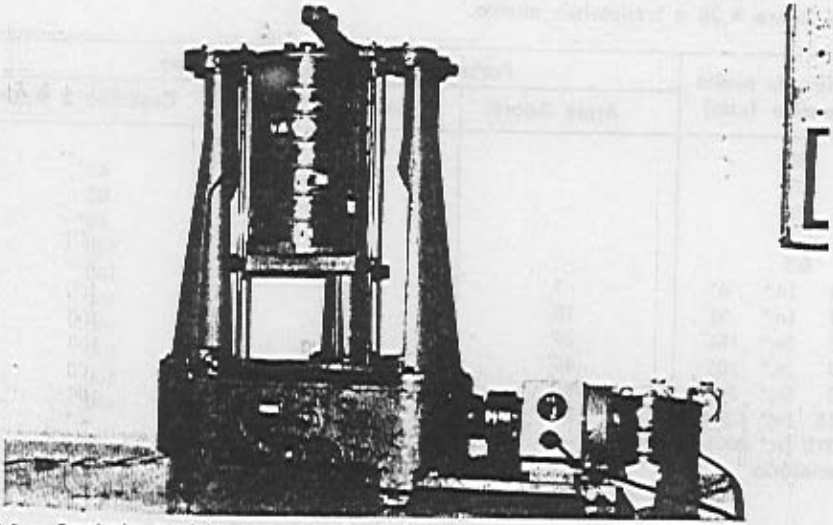


Figura 3.8 — Peneirador mecânico para agregado miúdo

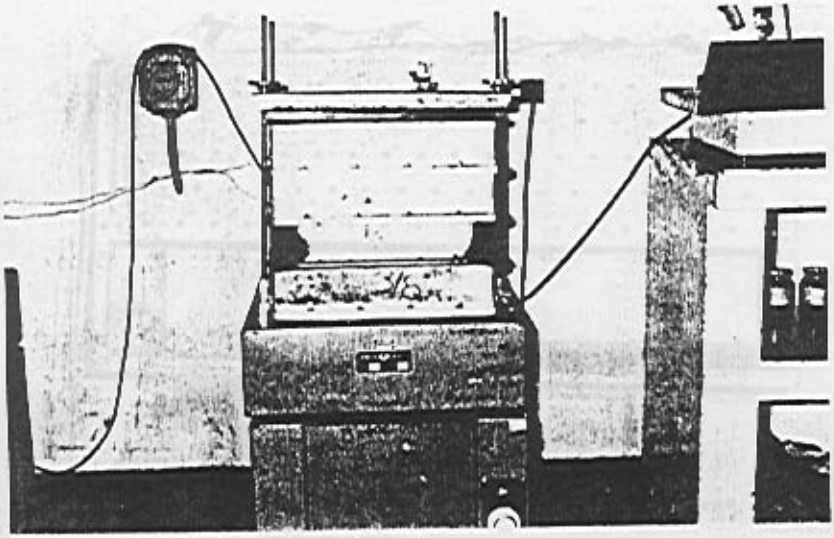


Figura 3.9 — Peneirador mecânico para agregado graúdo

3.1.3.2 Módulo de finura

Com base nos valores e quantidades obtidos na análise granulométrica pode ser calculado o módulo de finura do agregado ou da gama granulométrica estudada. O módulo de finura é a soma das porcentagens retidas acumuladas na série padrão (normal) de peneira (n.º 100, 50, 30, 16, 8, 4 e 9,5 mm, 19 mm, 38 mm e demais aberturas que crescem na razão 2), dividida por 100.

Como exemplo podem ser tomados os valores das análises granulométricas contidas na figura 4.26 e transcritas abaixo.

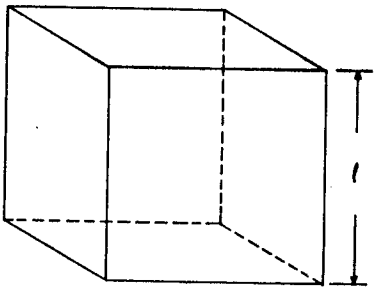
Abertura da malha da peneira (mm)	Porcentagens Retidas Acumuladas		
	Areia Aporé	Cascalho 1 Aporé	Cascalho 2 Aporé
38			45*
25			85
19			99*
12,7		44*	100
9,5		71	100
4,8 (n.º 4)	1	99	100
2,4 (n.º 8)	16	100	100
1,2 (n.º 16)	29	100	100
0,6 (n.º 30)	46	100	100
0,3 (n.º 50)	80	100	100
0,15 (n.º 100)	96	100	100
0,075 (n.º 200)	—*	—*	—*
Somatório	268	670	785
	MF = 268/100 = 2,68	MF = 670/ 100 = 6,70	MF = 785/ 100 = 7,85

* valores que não entram no somatório, pois não fazem parte da série normal.

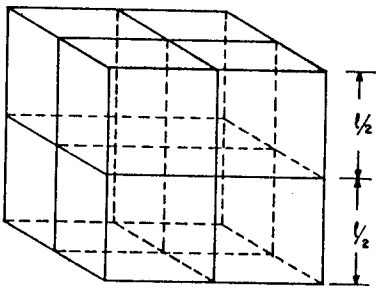
O módulo de finura é bastante usado para avaliação da variação granulométrica e para proporcionamento e dosagem (ver item 4).

3.1.3.3 Tamanho máximo do agregado (dimensão máxima, diâmetro máximo — Ø máx)

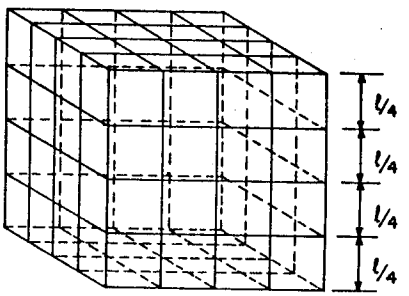
Agregados com excessiva quantidade de finos requerem maior quantidade de cimento, visto que há necessidade de envolver uma superfície maior, o que é ilustrado pela figura 3.10. Observa-se então que numa partícula cúbica tem-se:



CUBO DE ARESTA = ℓ
AREA SUPERFICIAL TOTAL = $6 \times \ell^2$
VOLUME TOTAL = ℓ^3



CUBOS DE ARESTA = $\ell/2$
AREA SUPERFICIAL TOTAL = $\left[6 \times (\ell/2)^2\right] 8$
$= 48 \times \frac{\ell^2}{4} = 12\ \ell^2$
VOLUME TOTAL = ℓ^3



CUBOS DE ARESTA = $\ell/4$
AREA SUPERFICIAL TOTAL =
$= \left[6 \times (\ell/4)^2\right] 64 = \frac{6\ell^2}{16} \times 64 = 24\ \ell^2$
VOLUME TOTAL = ℓ^3

Figura 3.10 — Ilustração da influência do tamanho da partícula na área superficial total

Aresta	Volume Total	Área Superficial Total
l	l^3	$6\ l^2$
2 × l/2	l^3	$12\ l^2$
4 × l/4	l^3	$24\ l^2$

É facilmente notado que ao reduzir o Ø máx. do agregado, para preencher um mesmo volume aumenta-se a área superficial. Quando a área superficial aumenta, se requer mais pasta de cimento para envolvimento do agregado ou, caso contrário, o concreto fica mais seco.

Isto assemelha-se à situação comparativa [de 3.7]: **"o pintor que esqueceu-se de pintar uma das fachadas de uma casa e tem apenas uma lata de tinta. Tem então três chances: diluir a tinta com solvente, esticar a demão, ou comprar mais tinta. Cada uma das alternativas tem pelo menos uma desvantagem: diluindo a tinta, reduz-se a qualidade; afinando a demão, requer-se maior esforço para a pintura; comprando mais tinta, torna-se mais oneroso".**

Dessa forma, para o concreto poder-se-ia: aumentar o teor de água, o que reduz a qualidade; aumentar os esforços para lançamento, compactação e acabamento, o que significa gastos suplementares e condições duvidosas de aplicabilidade do concreto; aumentar o teor de argamassa e de pasta, e conseqüentemente o cimento, o que se traduz em ônus adicional.

As indicações sobre o tamanho máximo dos agregados são citadas no item 4.

3.1.3.4 Massa específica — absorção — porosidade — índice de vazios

Desde que os agregados possuem poros permeáveis e impermeáveis, o significado do termo massa específica deve ser cuidadosamente definido.

A massa específica absoluta, referente ao volume do material sólido excluindo todos os poros, pode ser definida como a relação da massa do material por um igual volume de água destilada, ambos à mesma temperatura. Para eliminar o efeito dos poros, o material deve ser moído e pulverizado antes da imersão em água. Esse valor não é normalmente utilizado na tecnologia de concreto.

A massa unitária de um agregado para concreto pode ser definida como a massa da unidade de volume de partículas representativas de um estoque de materiais. Como amostra representativa deve ser entendida uma amostra de tamanho suficiente que corresponda fielmente à quantidade estocada.

A massa unitária é determinada com o material solto ou compactado. A primeira é utilizada para transformação de dosagens de concreto, de massa para volume; a segunda tem aplicação em determinações de misturas de agregados. O valor da massa unitária está, geralmente, em torno de 55% do valor da massa específica absoluta.

A massa unitária varia na razão inversa dos vazios de um determinado volume de materiais. Os vazios são afetados pela forma, distribuição de tamanhos e arranjo ou compactação das partículas.

Assim, agregados arredondados têm vazios menores entre as partículas que os agregados angulosos; agregados graduados em diversos tamanhos têm menos vazios que aqueles de tamanho único de partículas; agregados compactados têm melhor arranjo entre as partículas e, consequentemente, um menor volume de vazios.

Na determinação da massa específica dos agregados deve ser levada em consideração a porosidade interna e a rugosidade dos agregados, bem como a variação da densidade da água com a temperatura.

Por este motivo, são conhecidas três massas específicas para os agregados:

— Massa específica seca
— Massa específica saturada superfície seca (SSS)
— Massa específica aparente

A massa específica seca considera que os poros permeáveis estejam secos; a massa específica saturada superfície seca os considera cheios de água e a massa específica aparente exclui os poros permeáveis.

Para um mesmo agregado, as massas específicas assim definidas apresentam valores decrescentes na seqüência indicada acima.

A presença de poros internos em suas partículas tem grande influência nas propriedades dos agregados e, conseqüentemente, nas propriedades dos concretos. Assim, se o agregado estiver completamente seco no momento de ser misturado (be-

tonado), o concreto, como possui poros, absorve uma parte da água de mistura o que acarreta, entre outros efeitos, a sua perda da trabalhabilidade. Tendo em vista essa situação, é comum, na tecnologia de concreto, trabalhar com a massa específica na condição saturada com superfície seca. Para melhor compreensão dessa condição é interessante observar a figura 4.12.

Outro motivo para se considerar o agregado na condição de saturado superfície seca, nos cálculos de dosagem (ver item 4), é o fato de que a água contida nos poros não toma parte nas reações de hidratação do cimento, devendo, portanto, ser considerada como parte integrante do agregado.

Massas unitárias e massas específicas podem ser correlacionadas para o cálculo da porcentagem de vazios (na condição seca), de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{Teor de vazios (\%)} = \frac{\text{(Massa específica Seca)} - \text{(Massa unitária Seca)}}{\text{(Massa específica Seca)}} \quad \text{III-1}$$

Porosidade é definida como sendo a relação entre o volume de vazios e o volume sólido de um determinado material.

O conhecimento da porosidade é importante porque o volume e as dimensões do sistema interno dos poros afeta as mais significativas propriedades dos agregados para concreto, como a absorção, a massa específica e a resistência.

Com relação ao agregado para concreto, tem maior interesse a porosidade efetiva, que trata dos poros interligados ou ligados às superfícies externas, que são os mais suscetíveis de serem preenchidos pela água ou por soluções agressivas.

A absorção do agregado pode ser definida como sendo a quantidade de água necessária para preencher todos os seus poros e colocá-lo na condição saturada superfície seca. É expressa, em porcentagem, em relação à massa da amostra seca em estufa.

A condição saturada superfície seca é obtida quando todos os poros do agregado estão preenchidos com água. Caso o agregado, nessas condições, seja exposto ao ar, uma certa quantidade de água pode evaporar e o agregado passa então para a condição de seco ao ar. Colocando-o em estufa, o agregado passa para a condição de completamente seco. Caso o agregado, já na condição saturada superfície seca, seja imerso em água, apresentará, ao ser retirado, água em excesso na superfície. Esta água em excesso é denominada umidade livre. A umidade total do agregado é a soma da umidade livre mais a absorção. Para melhor compreensão dessas condições é interessante observar a figura 4.12.

A água absorvida pelo agregado fica contida nos seus poros permeáveis e, ao contrário da água quimicamente combinada, pode ser eliminada pela secagem das partículas do agregado em estufa (temperatura em torno de 110°C). Além dessas, o agregado pode carregar ainda outra forma de água: a água livre, que fica aderida à superfície das partículas e cujo teor varia em função da superfície específica e da rugosidade do agregado.

Para agregados de mesma natureza, os valores de absorção são, em geral, mais altos para as partículas de menores dimensões, devido a maior superfície específica dessas. Os agregados britados angulosos apresentam, em geral, valores de absorção mais elevados que os agregados constituídos de partículas arredondadas e superfícies lisas.

O conhecimento da absorção é de fundamental importância em dosagens de concreto, pois, como visto anteriormente, a água contida nos poros do agregado não toma parte nas reações de hidratação do cimento.

Sabe-se que, aproximadamente no instante da pega do concreto, o agregado esteja na condição de saturado superfície seca, qualquer que seja sua condição no

momento da betonada. Então, caso o agregado seja betonado na condição seca, assume-se que uma certa quantidade de água seja absorvida da mistura, para colocar o agregado na condição "SSS". Essa água, portanto, não deve ser considerada como água efetiva de mistura. Entretanto, devido ao fato das partículas do agregado serem rapidamente cobertas pela pasta de cimento, é possível que a penetração da água de absorção do agregado não seja total. Como a quantidade de água absorvida após certo período sofre poucas alterações, é comum se determinar, em lugar da absorção total, somente a quantidade de água absorvida durante aproximadamente duas ou três horas, uma vez que, na prática, dificilmente ocorrerá a absorção total do agregado envolvido pela pasta.

Portanto, quando os agregados se encontram na condição seca, e isto não é levado em consideração, ocorrerá a perda da trabalhabilidade da mistura, provocada pela absorção, por parte do agregado, de certa quantidade de água da mistura.

Por outro lado, quando o agregado se encontra na condição "SSS", com água livre na superfície, deve ser feita a correção da água de mistura a ser adicionada diminuindo-a na mesma quantidade equivalente.

Tendo em vista que as condições de umidade e absorção dos agregados podem alterar as propriedades do concreto, um rígido controle deve ser exercido sobre a condição de saturação dos agregados, a fim de que as correções necessárias para produção do concreto possam ser efetuadas.

Para se determinar a absorção e as massas específicas dos agregados há necessidade de alguns equipamentos: balança, balança hidrostática, bandejas metálicas, cestos de arame para pesagens por imersão, estufa, picnômetros, molde tronco-cônico e soquete.

O picnômetro para ensaio do agregado miúdo pode ser um frasco volumétrico de 500 ml e para ensaio do agregado graúdo, o recipiente do medidor de ar incorporado do concreto. As medidas do molde tronco-cônico e do soquete são mostradas na figura 3.17.

Para esses ensaios, a quantidade mínima de amostra varia em função do tamanho das partículas do agregado. As quantidades mínimas recomendadas são indicadas na figura 3.11.

TAMANHO NOMINAL MAXIMO (mm)	≤ 9 5	12 5	19 0	25 0	38	50	63	76	100	150
PESO MINIMO DA AMOSTRA (kg)	1	2	3	4	5	8	12	18	25	50

Figura 3 11 — Dimensões recomendadas para amostra de agregados para determinação da massa específica

Para a determinação das várias massas específicas há a necessidade de balanças com acuracidade de 0,1%, recipientes metálicos, cestos de arame e um picnômetro (ou um outro frasco volumétrico — ver figura 3.16), para o ensaio sobre a areia. [3.8] [3.9] [3.10] [3.11] [3.12].

O ensaio do agregado miúdo é realizado com uma amostra previamente seca em estufa (110 ± 5°C) até peso constante. Depois de seca e esfriada, a amostra é colocada em uma bandeja metálica, imersa em água e deixada em repouso por cerca de 24 horas. Após este período, a água é cuidadosamente escorrida, para não haver perda de finos. Em seguida, a amostra é esparramada sobre uma superfície não absorvente (de preferência uma chapa metálica) e exposta a uma leve corrente de ar quente (normalmente se usa um secador de cabelos); nestas condições é revolvida até se obter uma secagem uniforme. Essa operação deve prosseguir até que não haja mais escorrimento de água da amostra. Quando esta condição é alcançada, uma

porção da amostra é retirada, colocada no molde tronco-cônico e compactada com auxílio do soquete (25 golpes). Então a superfície é desempenada e o molde retirado verticalmente. Se o agregado miúdo alcançou a condição desejada, ou seja, a condição saturada superfície seca, ocorrerá um leve desmoronamento da amostra após a retirada do molde. Caso o agregado ainda esteja úmido, a amostra manterá a forma do molde. Neste caso, o processo de secagem, moldagem e desmoldagem deve continuar até se obter a condição "SSS". Por outro lado, caso o agregado estiver mais seco que na condição "SSS" ocorrerá, após a retirada do molde, um desmoronamento instantâneo da amostra. Neste caso, o ensaio deverá ser refeito, adicionando-se à amostra uma pequena quantidade de água e deixando-a em repouso por cerca de 30 minutos. Então, repete-se o processo até que a condição "SSS" seja obtida.

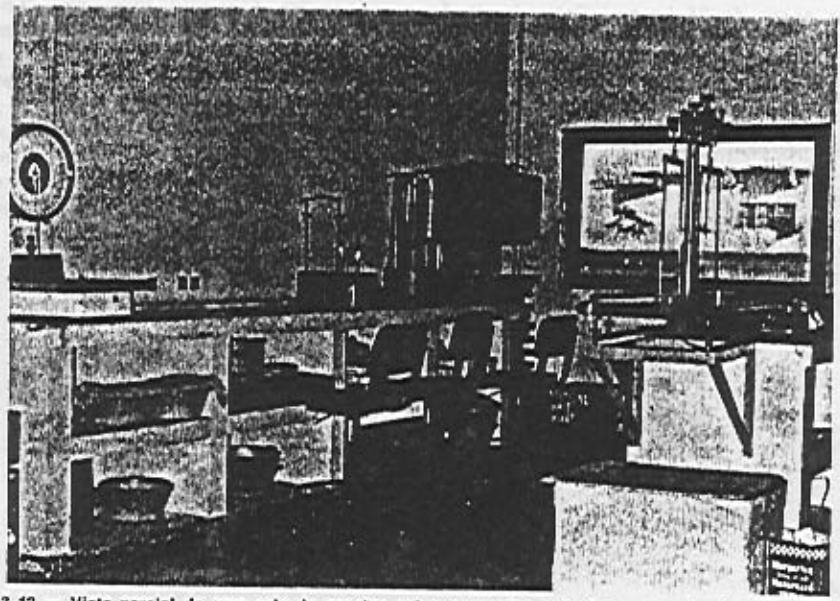


Figura 3.12 — Vista parcial de uma sala de ensaios sobre agregados notando-se em primeiro plano, à direita, balança tipo hidrostática

Assim que a condição "SSS" é obtida, uma determinada quantidade (500 g) da amostra é introduzida em um picnômetro previamente calibrado (B). Em seguida, coloca-se água no picnômetro (até que 90% de sua capacidade seja preenchida) e homogeneiza-se a mistura, procurando eliminar todas as bolhas de ar. Completa-se então o volume do picnômetro e se determina a massa (C) do conjunto (frasco + água + amostra). Retira-se a amostra do picnômetro e coloca-se para secar em estufa 110 ± 5°C) até peso constante (A).

A massa específica do agregado miúdo na condição "SSS" é dada pela equação III-II.

$$\gamma\ SSS = \frac{500}{(B + 500 - C)} \qquad \text{(III-II)}$$

Sendo:

B = Massa do picnômetro com água (g)

C = Massa do picnômetro com água e amostra (g)

γ SSS = Massa específica na condição "SSS" (g/cm³).

A massa específica aparente do agregado miúdo é dada pela equação III-III.

$$\gamma \text{ Aparente} = \frac{A}{B + A - C} \qquad \text{(III-III)}$$

Sendo:

A = Massa da amostra seca (g)

γ Aparente = Massa específica aparente (g/cm³)

Para ensaio do agregado graúdo, a amostra deve ser totalmente lavada, para retirar o pó e/ou algum material que possa estar cobrindo as partículas do agregado, e então colocada para secar (estufa a 110 ± 5°C) até peso constante. Depois de completamente seca e esfriada à temperatura normal, a amostra é deixada imersa em água por cerca de 24 horas. Retirada da água, a amostra é enxuta com pano úmido até que toda água livre seja removida, embora as superfícies dos fragmentos pareçam estar úmidas. Deve-se tomar cuidado para evitar a evaporação da água dos poros do agregado durante a operação de secagem superficial. Nesta condição "SSS" a amostra é então pesada (B). Imediatamente após a pesagem ao ar, a amostra é colocada no cesto de imersão da balança hidrostática e pesada na água (C). O cesto deverá ser imerso a uma profundidade suficiente para cobri-lo, bem como a amostra, durante a pesagem. O fio de sustentação do cesto deverá ser o mais fino possível, de modo a minimizar o efeito de imersão. Retirada do cesto, a amostra é colocada para secar em estufa até peso constante (A).

É importante lembrar ainda o cuidado que se deve tomar quanto ao tempo de imersão em água para absorção, como evidencia a figura 3.13.

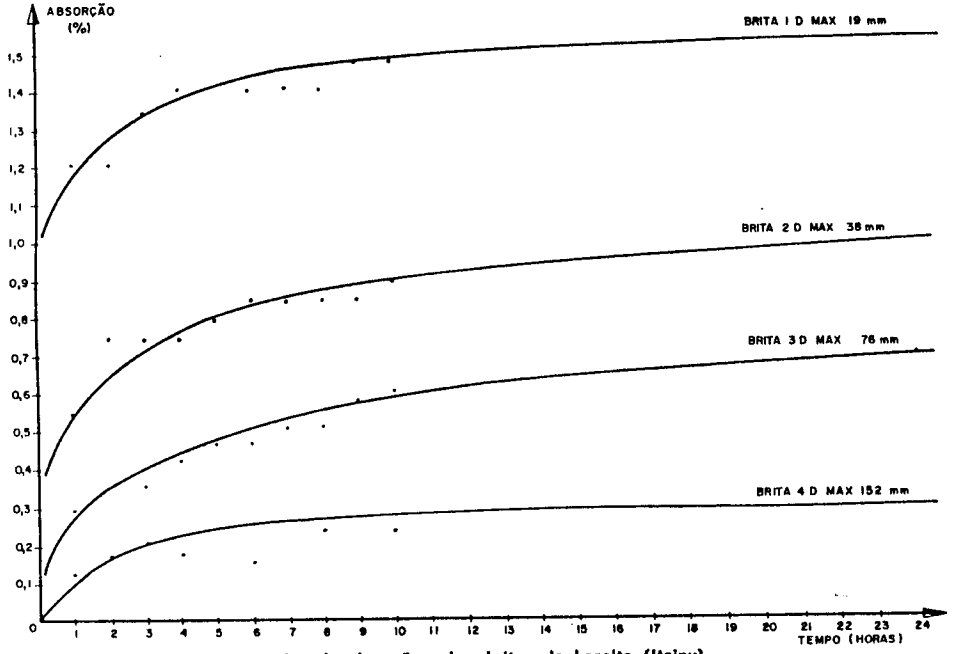


Figura 3.13 — Valores de ensaios de absorção sobre britas de basalto (Itaipu)

MATERIAL	REGIÃO DO BRASIL	TAMANHO MÁXIMO (mm)	CARACTERÍSTICAS		
			DENSIDADES		ABSORÇÃO
			MASSA UNITARIA kg/m³	MASSA ESPECÍFICA kg/m³	%
AREIA QUARTZOSA	PONTAL SUCURIU	4,8	1660	2660	0,40
CASCALHO (1)	"	19,0	1640	2630	0,40
" (2)	"	38,0	1600	2620	0,36
" (3)	"	76,0	1580	2590	0,38
AREIA QUARTZOSA	FÓZ DO RIO APORÉ	4,8	1610	2650	0,30
CASCALHO 1	" " "	19,0	1620	2630	0,54
" 2	" " "	38,0	1630	2620	0,40
" 3		76,0	1580	2590	0,37
BASALTO 1	JUPIA	19,0	1440	2780	1,10
" 2	"	38,0	1430	2840	0,84
" 3	"	76,0	1440	2870	0,51
" 4	"	152,0	1450	2900	0,43
" 1	ILHA SOLTEIRA	19,0	1430	2930	1,10
" 2	"	38,0	1490	2950	0,82
" 3	"	76,0	1580	2970	0,50
" 4	"	152,0	1620	2980	0,40
" 1	AGUA VERMELHA	19,0	1440	2870	1,70
" 2	"	38,0	1500	2900	0,86
" 3	"	76,0	1520	2910	0,51
" 4	"	152,0	1560	2930	0,36
AREIA QUARTZOSA	ILHA ACARAY - FOZ IGUAÇU	0,6	1500	2630	0,20
AREIA DE BASALTO	ITAIPU - FOZ DO IGUAÇU	4,8	1550	2900	1,70
BASALTO 1	" "	19,0	1350	2890	1,70
" 2	" "	38,0	1440	2920	0,64
" 3	" "	76,0	1390	2910	0,48
" 4	" "	152,0	1430	2910	0,56
BASALTO	RANCHARIA - SP	25,0	1380	2870	2,00
"	PORTO FERREIRA - SP	19,0	1460	2930	1,40
GRANITO	SOROCABA - SP	25,0	1600	2630	0,44
"	SÃO SEBASTIÃO - SP	38,0	1380	2690	0,70
DOLOMITA	ITAPEVA - SP	38,0	1450	2840	0,28
AREIA QUARTZOSA	PORTO PRIMAVERA	4,8	1600	2650	0,48
"	ILHA TRISTEZA-CAPIVARI	4,8	1660	2670	0,44
CASCALHO 1	PORTO PRIMAVERA	19,0	1590	2590	0,53
" 2	" "	38,0	1590	2590	0,53
" 3	" "	76,0	1570	2590	0,53
BASALTO 1	CAPIVARA	19,0	1530	2920	1,30
" 2	"	38,0	1440	2940	1,00
" 3	"	76,0	1500	2960	0,60
" 4	"	152,0	1390	2960	0,40
GABRO	SÃO FELIX	——	——	3080	0,16
GNAISSE	XINGÓ	——	——	2710	0,39
XISTO GRAFITOSO	SÃO FELIX	——	——	2670	1,33
METAGRAUVAQUE	TUCURUI	——	——	2720	0,42
ARGILA EXPANDIDA	——	——	——	1390	25,50

Figura 3.14 — Valores de massas específicas e absorção de alguns tipos de agregados

A massa específica seca (γ S), massa específica saturada superfície seca (γ SSS), massa específica aparente (γ Aparente) e a absorção, são obtidas pelas equações abaixo:

$$\gamma\ S = \frac{A}{B - C} \qquad \text{(III-IV)}$$

$$\gamma\ SSS = \frac{B}{B - C} \qquad \text{(III-V)}$$

$$\gamma\ \text{Aparente} = \frac{A}{A - C} \qquad \text{(III-VI)}$$

$$\text{Absorção (\%)} = \frac{B - A}{A} \times 100 \qquad \text{(III-VII)}$$

Onde:

A = Massa da amostra seca (g)

B = Massa da amostra na condição "SSS" (g)

C = Massa da amostra na condição "SSS", imersa em água (g)

A determinação da massa unitária do agregado (graúdo e/ou miúdo) exige, além de uma balança e estufa, um recipiente cilíndrico metálico, com as dimensões internas precisas e suficientemente rígido para manter sua forma durante o uso.

A amostra, depois de seca até peso constante, é colocada no recipiente metálico, cujo volume é previamente determinado. O agregado é colocado em três camadas e compactado com uma haste de 16 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento. Depois de completado o enchimento e a compactação, a superfície é nivelada e o conjunto (amostra e recipiente) é então pesado. A massa unitária é a relação entre a massa obtida e o volume do recipiente metálico.

É importante lembrar o cuidado que se deve tomar quanto ao tempo de imersão em água para absorção como evidencia a figura 3.13 [de 3.1].

Na tabela da figura 3.14 são fornecidos alguns dados de massas específicas e absorção de alguns materiais.

3.1.3.5 Umidade do agregado

Com intuito de calcular o teor de água livre na mistura (ver item 4) é importante que seja determinada a umidade dos agregados.

A umidade dos agregados pode ser determinada pela simples secagem do material, obtendo-se por diferença de pesagem o teor de umidade.

Dessa forma há necessidade de balança com acuracidade de 0,1% e uma fonte de calor, que pode ser estufa (ver figura 3.6) ou estufa com lâmpadas de infravermelho (ver figura 3.7) ou até um simples fogão, fogareiro ou bico a gás [3.13].

As amostras devem ser representativas dos agregados de interesse e em dimensões de acordo com a figura 3.15.

TAMANHO NOMINAL MÁXIMO (mm)	≤ 9.5	12.5	19.0	25.0	38	50	63	76	100	150
PESO MÍNIMO DA AMOSTRA (kg)	1 5	2	3	4	6	8	10	13	25	50

Figura 3.15 — Dimensões recomendáveis da amostra de agregados para determinação da umidade

Após a coleta e evitando a perda de umidade a amostra deve ser pesada ao ar. Expõe-se a amostra à fonte de calor até a secagem (obtida pela constância de peso através de pesagens sucessivas), e obtém-se a massa ao ar da amostra seca.

A umidade é então obtida por (III-VIII) onde:

$$U\% = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100\% \qquad \text{(III-VIII)}$$

U% = Teor de umidade (%)

P_u = massa ao ar da amostra úmida (g)

P_s = massa ao ar da amostra seca (g)

O teor de umidade assim obtido é chamado de umidade total, pois engloba, além da umidade superficial, a absorção.

O teor de umidade superficial do agregado miúdo pode também ser determinado pelo frasco de Chapman (ver figura 3.16) [3.14].

Para tanto é necessária balança com acuracidade de 0,1% e o frasco de Chapman.

A determinação do teor de umidade superficial é feita pesando-se 500g da amostra úmida e colocando-a no frasco tendo, este, sido preenchido anteriormente com água, até o menisco correspondente a 200 cm³. Faz-se a leitura no gargalo graduado e a umidade superficial é obtida por (III-IX) sendo:

$$U_s\% = \frac{500 - (L - 200) \times \gamma\,SSS}{(L - 700) \times \gamma\,SSS} \times 100\% \qquad \text{(III-IX)}$$

$U_s\%$ = umidade superficial da areia (%)

L = leitura do gargalo (cm³)

γ SSS = massa específica do agregado miúdo na condição "SSS" (ver item 3.1.3.4)

O frasco de Chapman pode também ser usado para determinação da densidade seca (U_s = 0%), por (III-X):

$$\gamma\,seca = \frac{500}{L - 200}\ g/cm^3 \qquad \text{(III-X)}$$

3.1.3.6 Forma e textura das partículas do agregado graúdo

A característica geométrica do agregado também apresenta peculiaridades no comportamento do concreto. Pelos valores da figura 3.14 pode-se observar que a forma do agregado altera a porcentagem de vazios como, por exemplo, tomando-se

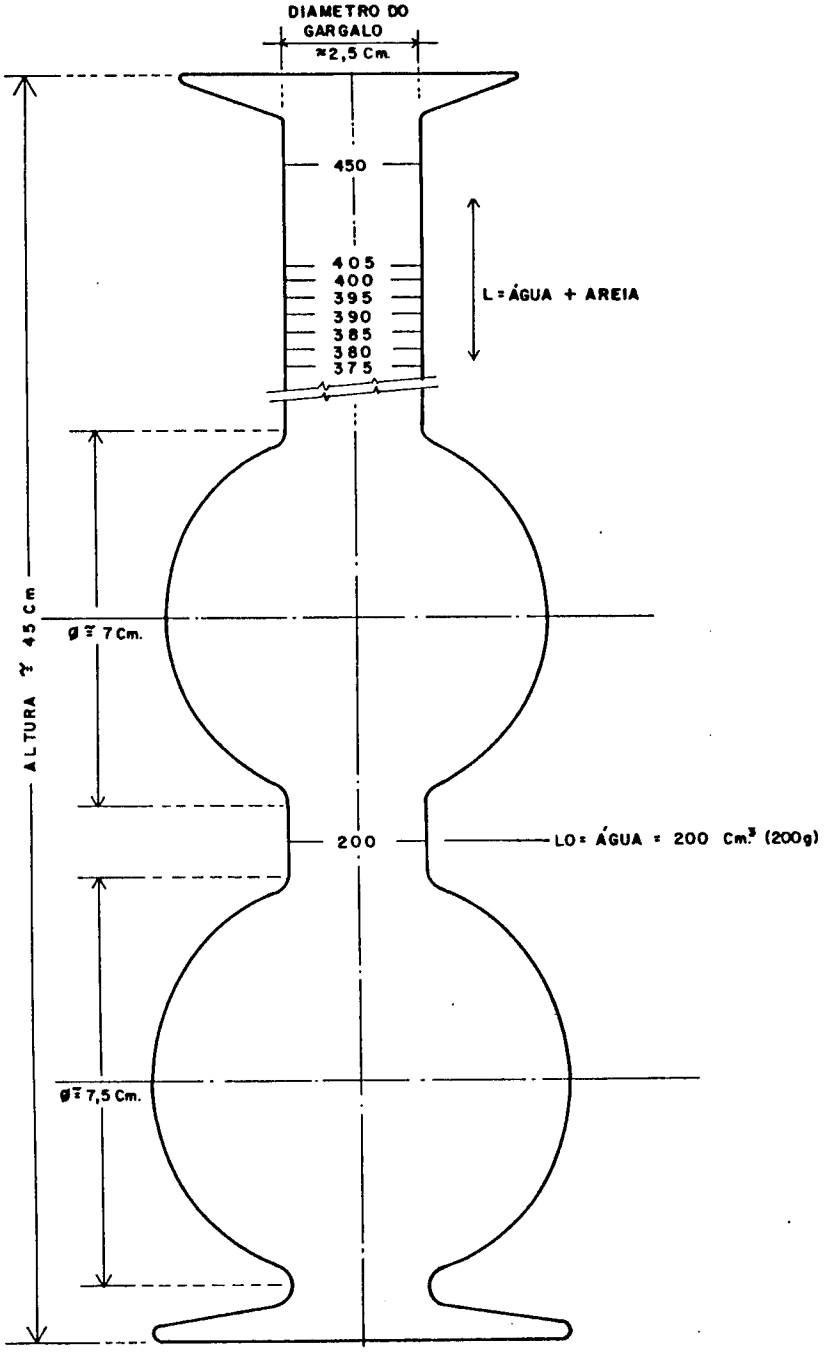


Figura 3.16 — Frasco de Chapman para a determinação da umidade da areia

agregados de mesmo Ø máx. (tamanho máximo), sendo um de cascalho e outro de britas de basalto. Nota-se que o agregado britado possui maior porcentagem de vazios.

Outro aspecto da forma do agregado é a sua esfericidade, definida como a relação entre a ára superficial da partícula e o seu volume. A esfericidade e, logicamente, a forma são influenciadas pelo equipamento de britagem e pelas características estruturais da rocha.

A presença de partículas lamelares e alongadas no agregado, em quantidades superiores a 15%, já tornam o concreto bastante áspero. O consumo de água do concreto nessas situações se eleva e, conseqüentemente, também o teor de aglomerante.

As britas de basalto normalmente apresentam uma quantidade (em massa) de partículas não lamelares — não alongadas, superior a 80%, sendo que essa porcentagem aumenta com o aumento do tamanho máximo do agregado.

É comum admitir-se que partícula lamelar é aquela onde a relação entre a largura/espessura excede a um valor "K". Partícula alongada é aquela onde a relação comprimento/largura excede a "K"; normalmente é adotado um calibre de comparações onde o valor usual de "K" é 3. É lamelar e alongada quando largura/espessura e comprimento/largura excedem a "K".

Embora os agregados para concreto, de diferentes origens, possam ter graduações semelhantes, muitas vezes comportam-se de maneira bastante diversa, devido à forma e textura das partículas.

Quanto à forma, os agregados podem também ser classificados como:

— Arredondados
— Subangulosos
— Angulosos

Um exemplo típico de agregados arredondados são os cascalhos e areias de rios, apresentando as faces lisas e sem arestas, devida ao atrito das partículas durante o transporte.

São subangulosos os agregados que apresentam algum desgaste, especialmente nas bordas e arestas, mantendo, porém, as faces na condição original.

Os agregados angulosos não apresentam evidências de desgaste como, por exemplo, os constituintes dos estoques de britagem.

Para verificação da forma das partículas pode ser usado um cálibre como mostrado na figura 3.18 [3.15] [3.16].

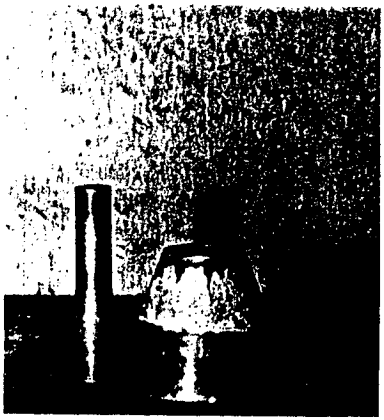


Figura 3.17 — Molde tronco-cônico para ensaio de absorção de agregado miúdo

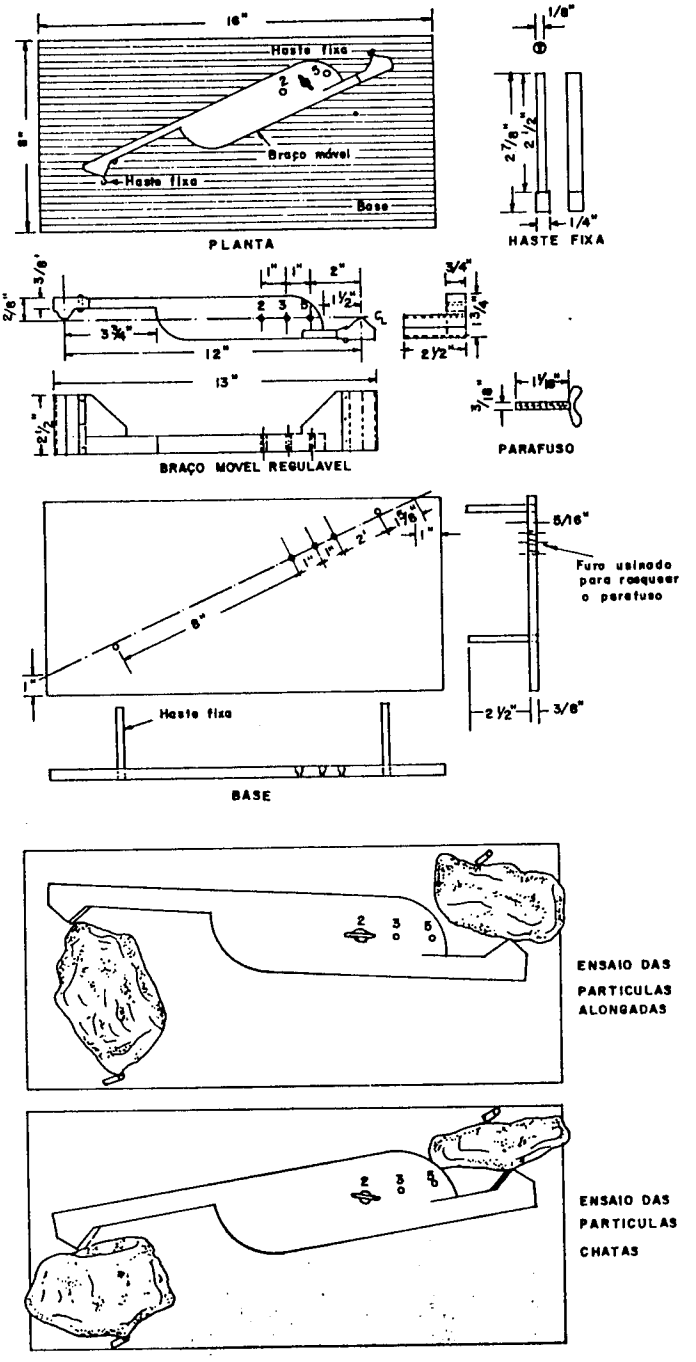


Figura 3.18 — Comparador para ensaio de forma das partículas

O cálibre consiste de uma base com dois pinos e um braço móvel entre eles, sendo que o eixo do braço móvel é posicionado de modo que a abertura entre as extremidades dos braços e os pinos fixos mantenha relação constante (valor "K").

A amostra representativa de cada gama granulométrica é quarteada até se obter entre 100 e 300 partículas de cada gama. Cada partícula é passada no cálibre com relação (K) como mostra a figura 3.18 e classificada em 3 ou 4 grupos disponíveis

3 grupos	4 grupos
chata	chata
alongada	alongada
não chata ou alongada	não chata ou alongada
	chata e alongada

A avaliação pode ser expressa em porcentuais da massa ou do número de partículas a cada grupo.

A figura 3.19 apresenta alguns exemplos de formas de agregados, citando a denominação de não chatas e não alongadas.

MATERIAL	REGIÃO DO BRASIL	TAMANHO MAXIMO (mm)	PORCENTAGEM DE PARTICULAS NÃO CHATAS E NÃO ALONGADAS %	
			EM PESO	EM NUMERO
CASCALHO 3	FOZ DO RIO APORÉ	76	92	89
BASALTO 1	AGUA VERMELHA	19	81	85
" 2	" "	38	82	83
" 3	" "	76	80	82
" 4	" "	152	90	86
CASCALHO 1	SUCURIU - JUPIA	19	93	94
" 2	" "	38	96	94
" 3	" "	76	94	87
" 1	PORTO PRIMAVERA	19	97	95
" 2	" "	38	96	95
" 3	" "	76	95	96
" 1	ROSANA	19	98	96
" 2	"	38	98	98
" 3	"	76	98	97
BASALTO 1	ILHA SOLTEIRA	19	70	63
" 2	" "	38	84	75
" 3	" "	76	89	86
" 4	" "	152	96	92
" 1	CAPIVARA	19	76	73
" 2	"	38	72	70
" 3	"	76	80	72
" 4	"	152	76	73
" 1	ITAIPU - FOZ DO IGUAÇU	19	81	72
" 2	" " "	38	88	79
" 3	" " "	76	88	83
" 4	" " "	152	99	99

Figura 3.19 — Teores de partículas não chatas e não alongadas de alguns agregados

Com relação à textura, as superfícies dos agregados variam desde lisa ou vítrea até rugosa ou áspera, dependendo da origem, porosidade e composição mineralógica.

Assim, agregados transportados pela água, de granulação fina e baixa porosidade tendem a produzir superfícies mais lisas do que agregados britados, de granulação grossa.

Tanto a forma como a textura afetam a mobilidade do agregado que entende-se pela facilidade com que as partículas se movem umas sobre as outras quando manipuladas.

A mobilidade do agregado afeta a trabalhabilidade do concreto fresco, observando-se que, quando são empregados agregados de baixa mobilidade, é exigida maior energia para alcançar o mesmo grau de compactação ou há necessidade de aumentar a porcentagem do agregado miúdo na mistura para garantir adequada trabalhabilidade.

Isto pode ser observado por meio de um ensaio simples que consiste em encher uma fôrma tronco-cônica com agregado de características bem distintas. A remoção da fôrma permite observar que aquele agregado de forma mais arredondada e superfície mais lisa se espalha sobre uma área maior; aquele de forma mais angulosa e textura mais rugosa se espalha sobre uma área menor com predominância de partículas sobrepostas umas sobre as outras.

A aderência do agregado com a pasta de cimento é um fator importante da resistência do concreto, em especial, da resistência à tração.

Depende da resistência da pasta e das características das superfícies dos agregados. Mantém relação direta com a aspereza (textura) da superfície do agregado, apresentando melhores resultados com agregados britados, desde que de boa qualidade, em comparação com agregados naturais de superfícies lisas.

Normalmente agregados com partículas mineralogicamente heterogêneas, mais moles e porosas, apresentam melhor aderência.

O rompimento do concreto através das partículas é um indicativo de boa aderência quando o agregado for de boa qualidade.

3.1.3.7 Resistência dos agregados à abrasão

Para a medida da resistência de rocha à abrasão usualmente são adotados um dos dois métodos — Los Angeles e o Deval (desenvolvido em 1878), sendo que o mais comum e o mais valioso é o Los Angeles (desenvolvido em 1932) [3.7].

A resistência à abrasão diminui com o aumento da porosidade.

A resistência à abrasão de um agregado é a capacidade de resistir ao desgaste por fricção. É uma avaliação da qualidade do agregado em resistir à degradação devido ao manuseio, estocagem e mistura.

Para a determinação da resistência à abrasão é usada a máquina de Los Angeles, mostrada na figura 3.20 [3.17] [3.18] [3.19].

As amostras para esse ensaio devem ter as dimensões de acordo com a figura 3.21.

As amostras após secagem até constância de peso com a sua granulometria já avaliada, são introduzidas no tambor da máquina de Los Angeles, juntamente com a carga abrasiva constituída por esferas de aço com diâmetro aproximado de 4,68 mm, pesando de 390 a 445g cada.

O tambor é posto a girar a uma velocidade entre 30 e 33 R.P.M. até o número de rotações definido na figura 3.21.

Podem ser obtidas informações a um total de rotações de valor intermediário e nessas oportunidades o material retido na peneira de malha n.º 12 (1,68 mm) não é lavado.

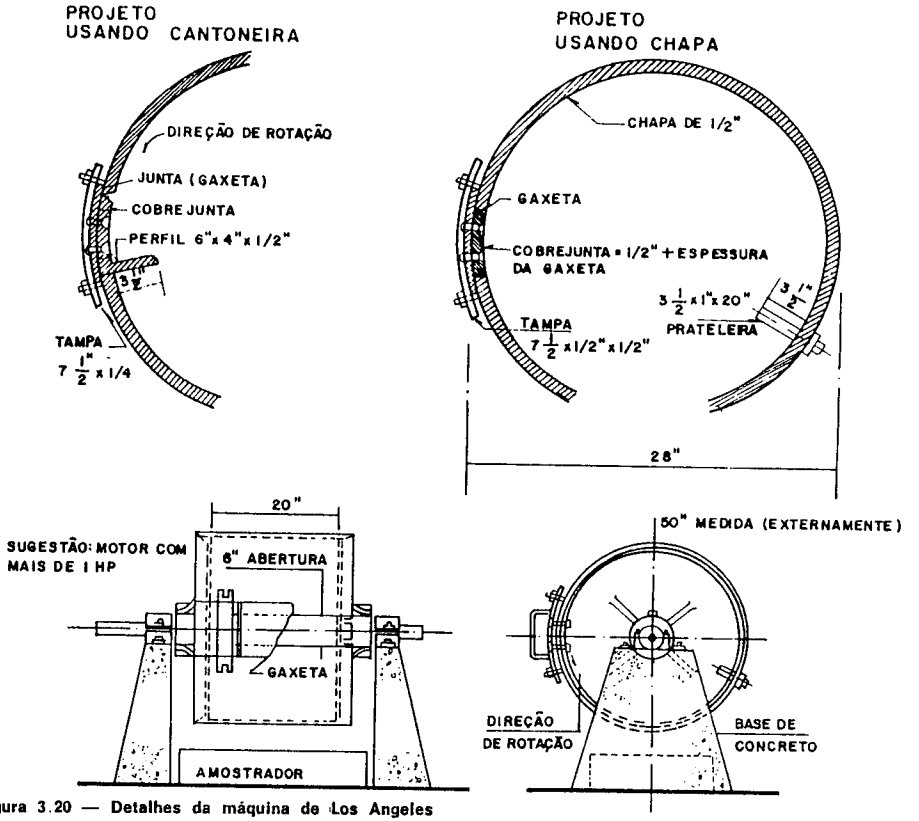


Figura 3.20 — Detalhes da máquina de Los Angeles

PENEIRAS (mm)		MASSAS INDICADAS POR GAMA GRANULOMÉTRICA						
PASSA NA	RETEM NA	A (g)	B (g)	C (g)	D (g)	E (g)	F (g)	G (g)
75,0	63,0					2500±50		
63,0	50,0					2500±50		
50,0	38,0					5500±50	5000±50	
38,0	25,0	1250±25					5000±25	5000±25
25,0	19,0	1250±25						5000±25
19,0	12,5	1250±10	2500±10					
12,5	9,5	1250±10	2500±10					
9,5	6,3			2500±10				
6,3	4,8			2500±10				
4,8	2,4				5000±10			
TOTAL (g)		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10	10000±100	10000±75	10000±50
CARGA ABRASIVA		12 BOLAS	11 BOLAS	8 BOLAS	6 BOLAS	12 BOLAS	12 BOLAS	12 BOLAS
		5000±25g	4584±25g	3330±20g	2500±15g	5000±25g	5000±25g	5000±25g

Figura 3.21 — Dimensões das amostras e cargas abrasivas para determinação da resistência à abrasão Los Angeles

MATERIAL	REGIÃO DO BRASIL	TAMANHO MAXIMO (mm)	RESISTÊNCIA A ABRASÃO, POR PERDA PERCENTUAL EM PESO %
CASCALHO 1	FOZ DO RIO APORÉ	19	28,6
" 2	" "	38	28,6
" 3	" "	76	13,1
BASALTO 1	AGUA VERMELHA	19	13,0
" 2	" "	38	12,0
" 3	" "	76	14,0
" 4	" "	152	14,0
CASCALHO 1	SUCURIU - JUPIA	19	29,0
" 2	" "	38	22,0
" 3	" "	76	13,0
" 1	PORTO PRIMAVERA	19	26,0
" 2	" "	38	20,0
" 3	" "	76	14,0
" 1	ROSANA	19	20,0
" 2	"	38	19,5
" 3	"	76	17,0
BASALTO 1	ILHA SOLTEIRA	19	17,0
" 2	" "	38	17,0
" 3	" "	76	14,0
" 4	" "	152	14,0
" 1	CAPIVARA	19	18,0
" 2	"	38	22,0
" 3	"	76	15,0
" 4	"	152	15,0
" 1	ITAIPU - FOZ DO IGUAÇU	19	11,3
" 2	" "	38	19,0
" 3	" "	76	12,7
" 4	" "	152	10,7

Figura 3.22 — Valores de desgaste por abrasão Los Angeles

Ao se alcançar o número estabelecido de rotações, o material é retirado da máquina e o material retido na peneira de malha n.° 12 (1,68 mm) é lavado e pesado, determinando-se pela diferença com relação ao peso inicial o teor percentual de perda em peso (desgaste).

A figura 3.22 apresenta resultados de desgaste por abrasão Los Angeles de alguns agregados.

O agregado proveniente da britagem de basaltos normalmente apresenta um desgaste por abrasão ao redor de 10% a 25%. O agregado de cascalho de calcedônia (tipo usado em Ilha Solteira, Água Vermelha) chega a apresentar de 13% a 28% de desgaste.

3.1.3.8 Resistência dos agregados à compressão

Agregados para emprego em concreto devem possuir um grau de resistência, tenacidade e estabilidade suficientes para resistir, sem sensível degradação, às cargas estáticas e dinâmicas, impactos e cargas abrasivas que comumente agem sobre as estruturas hidráulicas.

Muitas vezes, as cargas citadas acima, ocorrem com maior intensidade, por ocasião das atividades de preparo e mistura do concreto.

Certamente a resistência à compressão do concreto não ultrapassa a resistência da maior parte do agregado constituinte. Entretanto, a resistência à compressão do agregado não é uma propriedade tão importante quanto o módulo de deformação e as propriedades térmicas.

A determinação da resistência à compressão do agregado pode ser fixada sobre testemunhos extraídos da rocha que, após beneficiamento fornece o agregado ou de testemunhos extraídos do próprio agregado.

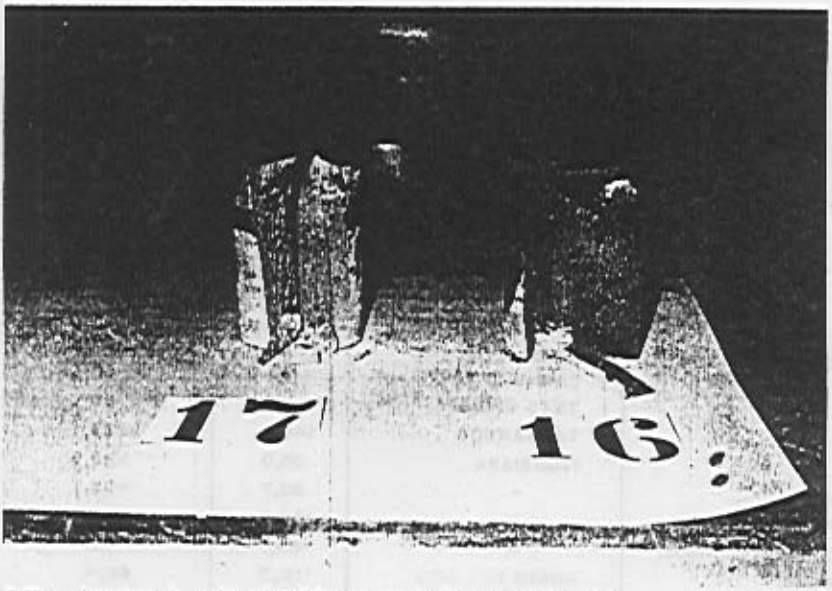


Figura 3.23 — Amostras de rocha submetidas ao ensaio de compressão axial

O agregado de basalto britado pode apresentar resistência à compressão variando aproximadamente de 80 MPa até 200 MPa. O quartzito (seixo rolado) pode apresentar de 120 MPa a 300 MPa [3.1].

3.1.3.9 Módulo de deformação (elasticidade) do agregado

O módulo de deformação do agregado deve ser conhecido tendo-se em vista a influência que o mesmo exerce nas propriedades elásticas do concreto. Em geral, o módulo de deformação do concreto e coeficiente de Poison são diretamente influenciados pelo módulo de deformação do agregado, o que acarreta uma automática influência nas características de fluência e de retração do concreto.

O módulo de deformação do agregado pode ser determinado de forma análoga ao descrito em 3.1.3.8, incluindo-se as medidas das deformações, durante o carregamento, que podem ser feitas através de extensômetros elétricos de resistência (**wire strain gages**) colados na superfície do corpo de prova ou por outro sistema equivalente. Após a tomada das leituras traça-se a curva tensão-deformação, obtendo-se o módulo de elasticidade.

A figura 3.24 ilustra alguns valores obtidos sobre agregados.

A porosidade do agregado pode alterar o módulo de deformação do agregado.

MATERIAL	REGIÃO DO BRASIL	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO MPa (VALOR MÉDIO)	MODULO DE ELASTICIDADE (DEFORMAÇÃO) - MÉDIO DO AGREGADO - GPa
BASALTO	AGUA VERMELHA	170,0	65,0
"	CAPIVARA	180,0	67,5
"	TRES IRMÃOS	130,0	60,0
"	TAQUARUÇU	140,0	80,0
"	ITUMBIARA	95,0	33,1
GNAISSE	"	92,7	45,6
ANFIBOLIO-GNAISSE	"	100,0	89,1
MUSCOVITA GNAISSE	"	84,7	9,9
GNAISSE	ANGRA DOS REIS	110,0	66,4
BASALTO	ITAIPU-FOZ DO IGUAÇU	175,0	80,0
BASALTO AMIGDALOIDE	MARIMBONDO	24,1	16,3
GABRO	SÃO FELIX	142,9	161,7
GRANITO	"	94,7	41,2
XISTO GRAFITOSO	"	36,1	12,9
MICAXISTO	"	13,1	2,3
QUARTZO MICAXISTO	"	54,1	12,0
BASALTO	BOA ESPERANÇA	181,7	33,6
CASCALHO	SOBRADINHO		111,0

MPa = 0,098 Kg f/cm^2 ≅ 0,1 Kg f/cm^2 — GPa ≅ 10^4 Kg f/cm^2

Figura 3.24 — Resultados médios de resistência à compressão axial simples e módulos de elasticidade (deformação) de alguns tipos de rocha do Brasil

3.1.3.10 Materiais pulverulentos (materiais mais finos que a peneira da malha n.° 200 — 75 μm)

Através desta verificação é determinado o teor de materiais pulverulentos existentes nos agregados.

Para essa avaliação são utilizadas estufa para manter temperatura de 110°C ± 5°C, balança com acuracidade de 0,1% e peneiras de malhas n.° 16 (1,2 mm) e n.° 200 (75 μm) [3.20] [3.21].

A dimensão das amostras para esta avaliação consta da figura 3.25.

TAMANHO MÁXIMO NOMINAL (mm)	≤ 4,8	9,5	19	38
PESO MÍNIMO DA AMOSTRA Kg	0,5	2,0	2,5	5,0

Figura 3.25 — Dimensão das amostras de agregados para determinação do teor de material pulverulento

A amostra é seca e pesada ao ar e posteriormente colocada em um recipiente, coberta com água. A amostra com água é agitada vigorosamente com intuito de separar todas as partículas menores que a peneira n.° 200. A água de lavagem contendo os sólidos suspensos e dissolvidos é lançada sobre as peneiras superpostas.

Lança-se mais água, repetindo-se a operação até que a água de lavagem torne-se limpa. Os resíduos são secos e pesados ao ar e, pela diferença, expressa em percentual do peso inicial, determina-se o teor de material passante pela malha de n.° 200.

3.1.3.11 Teor de argila e particulas friáveis nos agregados

Essa avaliação auxilia na verificação da durabilidade do agregado, visto que indica a relativa resistência de um agregado a produzir finos argilosos, quando submetido a um processo mecânico de degradação.

Para essa avaliação as amostras devem ter as dimensões recomendadas na figura 3.26.

TAMANHO MÁXIMO NOMINAL (mm)	≤ 9,5	19	38	> 38
PESO MÍNIMO DA AMOSTRA Kg	1	2	3	5

Figura 3.26 — Dimensões das amostras de agregados para determinação do teor de argila e partículas friáveis

No ensaio são utilizadas balança com acuracidade de 0,1%, bandejas, estufa para manter temperatura de 110 ± 5°C e peneiras de acordo com a figura 3.3, até a n.° 8 [3.22] [3.23] [3.24].

A amostra é seca e pesada ao ar, após o que é esparramada na bandeja e coberta com água destilada, ficando em absorção por um período de 24 ± 4 horas. As partículas são roladas e espremidas manualmente (entre o indicador e o polegar), tentando-se quebrá-las.

Os detritos são separados, por lavagem, sobre peneiras (n.° 8, para fração de Ø máx ≤ 9,5 mm e n.° 4 para frações Ø máx ≥ 9,5 mm). Os resíduos são secos e pesados ao ar, após o que determina-se o teor de material argiloso e friável, pela diferença percentual expressa com base no peso inicial.

3.1.3.12 Avaliação de impurezas orgânicas e da qualidade do agregado miúdo

Essas avaliações determinam a presença de materiais orgânicos indesejáveis no agregado miúdo, bem como o comportamento relativo dessa areia em argamassa.

A impureza orgânica é caracterizada por processo colorimétrico, enquanto a qualidade do agregado miúdo é obtida por meio de ensaios sobre argamassa [3.25] [3.26].

Para a verificação colorimétrica é necessária solução de hidróxido de sódio [NaOH (a 3%)] — e a solução colorimétrica padrão, obtida pela dissolução de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$), em ácido sulfúrico concentrado (densidade 1,84) na relação de 0,250 g/100 ml de ácido. É importante que a solução seja recente para a comparação.

A amostra de agregado miúdo deve ser obtida por quarteamento e ter uma dimensão mínima de 400 g.

O agregado miúdo é colocado em frasco, dando aproximadamente 130 ml, após o que adiciona-se a solução de hidróxido de sódio (a 3%) misturando-a com a areia, até ser atingido o nível 200 ml, aproximadamente. Tampa-se o frasco e agita-se vigorosamente após o que deixa-se em repouso por 24 horas.

Ao fim do período de 24 horas, compara-se a cor da solução obtida, com a cor da solução padrão. Se a cor produzida pela amostra for mais escura que a solução padrão a areia contém material orgânico de forma indesejável.

Alguns produtos voláteis provenientes da decomposição da matéria orgânica, em meio à deficiência de oxigênio, produzem incorporação de ar à mistura de concreto e sua presença no agregado não é detectada pelo ensaio colorimétrico.

Quando houver suspeita de presença de óxido de ferro no agregado, a fim de evitar que o ensaio colorimétrico leve a conclusões errôneas a respeito da ocorrência de matéria orgânica em quantidades superiores às permitidas, deve ser feito o estudo comparativo em argamassa com o agregado suspeito e com agregado reconhecidamente sem impurezas orgânicas.

O ensaio de qualidade é feito sobre argamassa. Para tanto a amostra de agregado miúdo é seca à sombra (e não em estufa ou ao sol). Utiliza-se para comparação um agregado miúdo de graduação igual, da amostra a ser verificada, e de qualidade reconhecida [3.27] [3.28].

Com o agregado miúdo de comparação prepara-se uma argamassa com relação cimento: agregado miúdo, igual a 1:3, com teor de água para um escoamento (flow) 170 ± 5 mm de acordo com o procedimento para determinar a resistência do cimento (ver item 3.2). Com essa mesma consistência são moldados corpos de prova cilíndricos Ø 5 x 10 cm (ver item 3.2), para ensaios de ruptura por compressão axial a idades de 3, 7, 28 dias.

Nas mesmas condições acima (teor de água e consistência) são moldados corpos cilíndricos com argamassa contendo o agregado miúdo em questão.

Após o período de cura padronizado, os corpos de prova, de ambas argamassas, são rompidos nas idades consideradas e comparados os valores.

3.1.3.13 Avaliação petrográfica

A avaliação petrográfica segue uma rotina recomendada [3.29] [3.30], sendo que os métodos específicos empregados dependem do objetivo estipulado.

As análises petrográficas, além de requererem um técnico especializado, podem necessitar de processos especiais de análise, tal como a análise de difração por raio X, análise térmica diferencial, espectrógrafo infravermelho e outros. Através desses métodos pode-se determinar as propriedades físicas e químicas dos materiais que podem ser observadas pelos métodos petrográficos e, também, determinar as quantidades relativas dos constituintes da amostra.

A análise petrográfica requer também o manuseio e conhecimento de índices de refração como, por exemplo, para diferenciar o quartzo da calcedônia. Em outras oportunidades há a necessidade de se usar microscópio esteroscópico para identificar rochas de granulação fina, como no caso das ígneas extrusivas.

Essa avaliação permite verificar a ocorrência de compostos ou elementos que podem causar danos ao concreto.

3.1.3.14 **Sanidade**

É a propriedade que caracteriza a capacidade do agregado em resistir às variações excessivas de volume quando submetido aos agentes destrutivos, tais como molhagem e secagem, congelamento e degelo, aquecimento e resfriamento.

O agregado é dito insano quando as variações de volume, devidas às causas citadas, levam à deterioração do concreto. Esta pode ocorrer sob a forma de fissuração generalizada, escamação ou desintegração.

São partículas estruturalmente fracas friáveis, moles ou leves que não mantêm a integridade como ocorre com certas rochas de baixa densidade (arenitos, folhelhos e calcários moles) ou inclusões de argila, madeira e carvão.

Torrões de argila que mantêm a integridade durante a mistura e lançamento, quando localizados na superfície do concreto, são responsáveis pela ocorrência de falhas sob a forma de bolhas, muitas vezes de dimensões bastante avantajadas.

O carvão além de ser um material mole pode se expandir provocando a desintegração do concreto. Quando finamente dividido perturba o processo de endurecimento do concreto.

As partículas friáveis caracterizam-se pela fraca ligação entre os grãos que são facilmente arrancados, enquanto que as moles são constituídas de minerais estruturalmente fracos, de baixa resistência à tração e compressão.

Minerais micáceos são exemplos de partículas friáveis enquanto a gipsita o é de partículas moles.

Partículas leves são características de rochas de elevada porosidade e de minerais que flutuam em um líquido com densidade 2,00 (ver item 3.13.11).

As argilas do grupo das montmorilonitas e ilitas presentes na matriz da rocha, devido à elevada capacidade de absorção de água, produzem forças expansivas capazes de causar a desintegração do concreto.

A insanidade dos agregados expansivos pode ser detectada através dos ensaios de ciclagem pelo sulfato de sódio ou magnésio, etileno glicol, acelerada água-estufa e natural.

Na ciclagem pelo sulfato de sódio ou magnésio a amostra é submetida a ciclos de imersão e secagem em estufa.

Os cristais de sal formados nos poros do agregado tendem a provocar a desintegração das partículas de forma semelhante à causada pela ação do gelo.

O ensaio permite predizer o comportamento do agregado, tendo utilidade na seleção de qual deve ser empregado quando mais de uma fonte é disponível. Embora algumas especificações estabeleceçam limites, não deve ser usado para aceitação ou rejeição de um agregado, principalmente para uso em regiões onde não ocorrem condições de gelo-degelo.

Alguns materiais apresentam perdas consideráveis quando submetidos à imersão em água destilada e secagem em estufa.

A ciclagem natural ao tempo expõe os materiais em ensaio às condições ambientais não abrigadas, durante um período mínimo de um ano.

A imersão do material em etileno glicol permite detectar, em certo espaço de tempo, a presença de argilas expansivas na matriz da rocha. São formados compostos organo-minerais de volume maior, provocando a desintegração expansiva das partículas.

É aceita a afirmativa de que a durabilidade de um agregado só pode ser determinada pela avaliação do desempenho do concreto que contém esse agregado.

A denominação das impurezas que acompanham ou não partes constituintes dos agregados diverge bastante.

Alguns técnicos empregam o termo sanidade para definir um agregado como um todo e substâncias deletérias como os contaminantes, presentes nas partículas, que são nocivos ao concreto.

O termo deletério refere-se principalmente às características indesejáveis sob o ponto de vista físico.

Os petrologistas preferem os termos deletério e inócuo para se referirem às propriedades químicas das partículas individuais.

De modo geral como substâncias deletérias podem ser consideradas as substâncias que acompanham ou são parte constituinte dos agregados e que agem de forma prejudicial à boa qualidade do concreto, tais como:

— Impurezas que interferem com o processo de hidratação do cimento;
— Coberturas que comprometem a aderência do agregado com a pasta de cimento;
— Substâncias que provocam a ocorrência de reações químicas diversas.

As impurezas que interferem com o processo de hidratação do cimento são de origem orgânica, provenientes de decomposição de vegetais, especialmente ácido tânico e seus derivados, e se apresentam na forma de húmus e lodo (ver item 3.1.3.12).

O grau de aderência do agregado, dependendo dos materiais aderidos à superfície, pode variar de fraco a forte, desde pó de britagem até certas coberturas comuns em cascalhos, como óxidos de ferro, sulfatos alcalinos, opala e fosfatos.

Sob esta denominação são incluídas argilas, siltes, poeiras de britagem, materiais estáveis firmemente aderidos e certos sais.

De uma maneira geral podem ser classificados em:

— Substâncias solúveis que se dissolvem por ocasião da mistura do concreto; Quando deletérias são indesejáveis acima de limites especificados;
— Substâncias inócuas ou toleráveis, insolúveis, fracamente aderidas que se desprendem durante a mistura.
Tendem a produzir excessivas quantidades de finos, alterando a curva granulométrica e podem aumentar a demanda de água, a retração por secagem e diminuem a resistência do concreto, especialmente argilas expansivas do grupo das montmorilonitas e ilitas.
— Substâncias inócuas que aderem mais firmemente à pasta do que às partículas do agregado.
A ligação com o agregado é mais suscetível ao colapso sob tensão, sendo, por isso, indesejável.
— Substâncias inócuas firmemente ligadas às partículas. Neste caso não apresentam qualquer inconveniente.

Reações químicas com conseqüências danosas ao concreto ocorrem entre alguns componentes dos agregados e os álcalis do cimento, podendo afetar seriamente a durabilidade das estruturas de concreto.

Essas reações se processam lentamente e se desenvolvem com maior facilidade quando encontram condições de temperatura e umidade favoráveis.

A reação iniciada com o ataque dos minerais silicosos do agregado pelos hidróxidos originados dos álcalis do cimento resulta em um gel do tipo expansão ilimitada, com tendência a aumentar de volume pela absorção de água.

Como o gel se acha confinado pela pasta que o envolve, aparecem pressões internas que podem provocar a desagregação da pasta de cimento.

Os cimentos que contêm teores de álcalis mais elevados devem ser evitados quando tais rochas ou minerais se encontram presentes nos agregados utilizados para concreto, por serem os principais contribuintes, embora os álcalis possam provir também de outros componentes e de fontes externas.

A reatividade é afetada pelos seguintes fatores:

— Tamanho das partículas e porosidade do agregado;
— Teor de álcalis do cimento;
— Disponibilidade de água não evaporável na pasta;
— Finura do cimento;
— Permeabilidade da pasta;
— Consumo de cimento do concreto;
— Alternância de molhagem e secagem;
— Aumento de temperatura.

As reações são aceleradas em presença de cimentos de finura mais elevada, de maior permeabilidade de pasta, de alternância de molhagem e secagem, de disponibilidade de água não evaporável na pasta e de elevações de temperatura.

Agregados mais porosos e partículas de maior superfície específica favorecem o desenvolvimento destas reações.

As reações são afetadas principalmente pelo estado mineralógico e físico do agregado, pelo teor de álcalis do cimento e pela disponibilidade de umidade.

Outros fatores que podem contribuir para agravar a severidade do ataque, agindo em concordância com a causa inicial, são as ciclagens de temperatura, de molhagem e secagem e ataques de água do mar e sulfatos.

As observações de desempenho mostram que uma pequena percentagem de agregado reativo é suficiente para causar danos ao concreto.

O colapso do concreto devido às reações álcali-agregados pode ser prevenido se antes de seu emprego no concreto for detectado que o agregado é reativo.

A análise petrográfica é um indicativo para verificar o risco de ocorrência destas reações, embora não forneça elementos para determinar o grau de reatividade.

Para avaliação da durabilidade do agregado, um dos métodos é o da ciclagem natural do material ao intemperismo. A execução desse ensaio [3.31] requer balança com acuracidade de 0,1%, estufa, peneiras de malhas 19 mm e 25 mm (ou 76 mm) e bandejas metálicas para exposição do material às intempéries.

A amostra consta de aproximadamente 50 fragmentos passantes pela malha de abertura 25 mm (ou 76 mm) e retidos na de 19 mm. Os fragmentos são secos e pesados ao ar, após o que são expostos ao clima da região de interesse. Periodicamente (mensalmente é o usual) faz-se uma avaliação do estado do material, de maneira comparativa com amostras não submetidas à exposição, como ilustra a figura 3.27 [de 3.32].

O processo de intemperismo pode ser acelerado pela exposição a ciclos de molhagem-secagem (em estufa). Esse método requer [3.33] os mesmos equipamentos citados para a ciclagem natural.

A amostra, também com aproximadamente 50 fragmentos passantes pela malha de 25 mm (ou 76 mm) e retida na de 19 mm, é seca e pesada ao ar. Submete-se a amostra a ciclos alternados (de aproximadamente 12 hs) de molhagem e secagem, fazendo a cada intervalo de ciclo a avaliação do estado do material, de maneira comparativa, com amostras não submetidas à exposição como ilustrado na figura 3.28 [de 3.32].

A ocorrência de minerais expansivos em uma rocha ou agregado pode ser caracterizada pela exposição do material a uma ciclagem acelerada, por exposição ao etileno glicol, que reage com as argilas expansivas do grupo montmorilonita, formando um complexo organo-argiloso com um volume maior que o próprio mineral argiloso. Isto pode provocar desagregações.

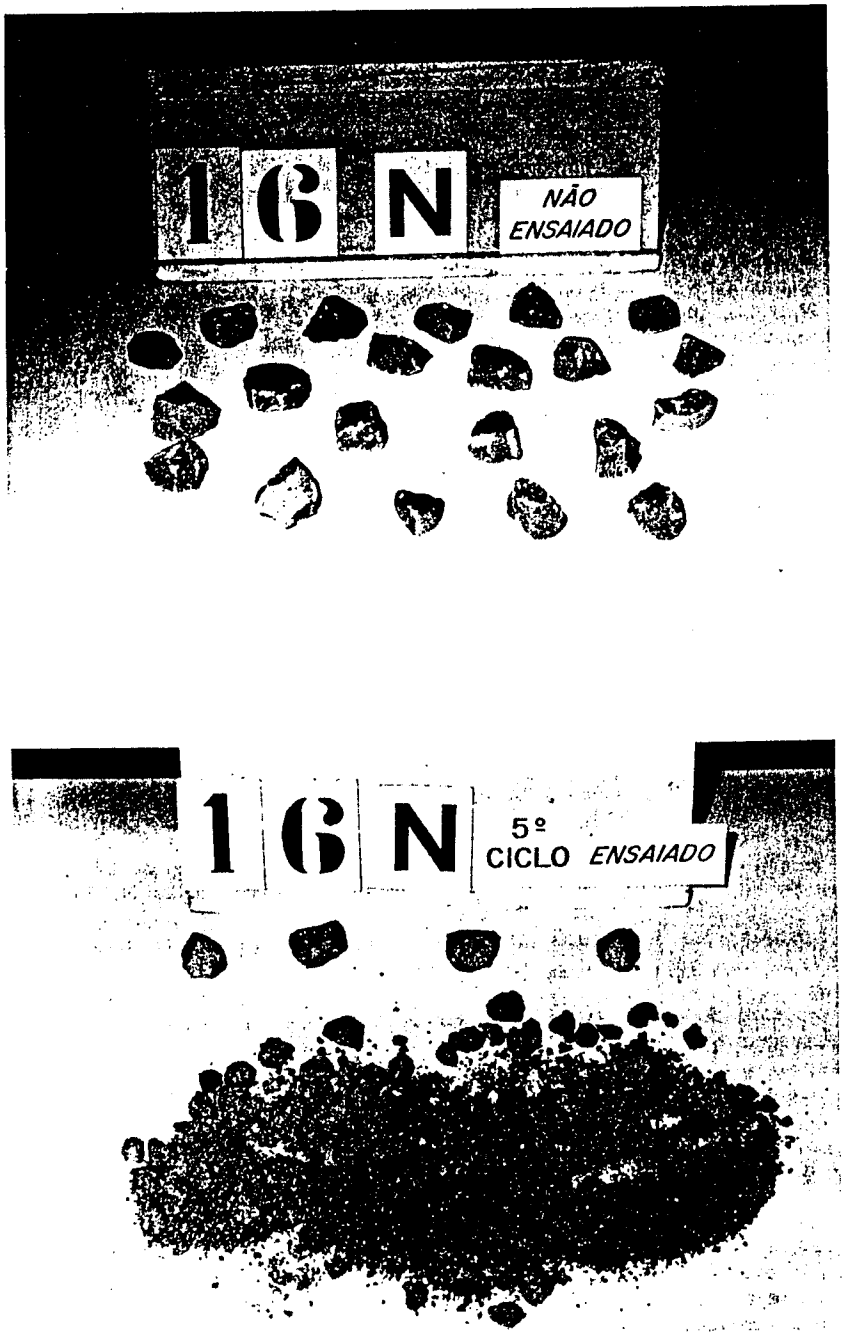


Figura 3 27 — Parte de amostras de basalto compacto cinza exposta pela ciclagem natural (após 5 ciclos) em comparação com o mesmo material sem ser ensaiado

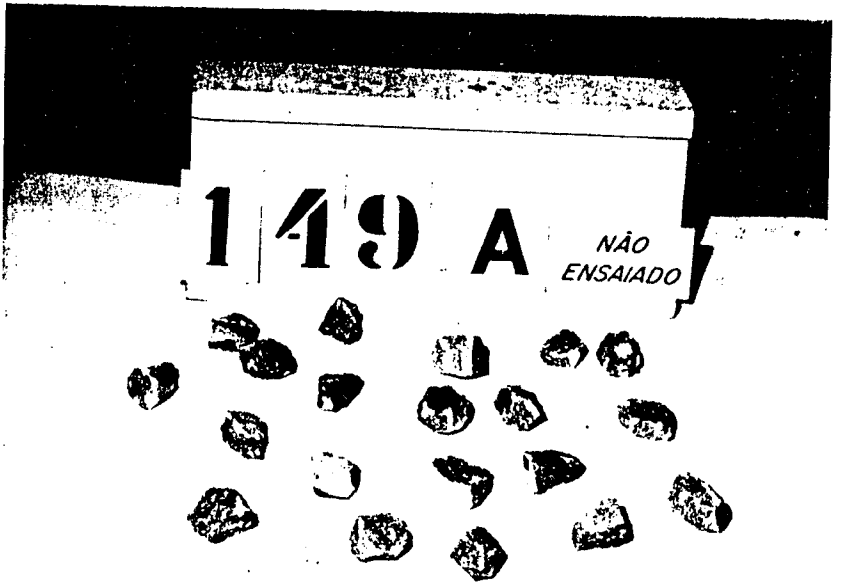


Figura 3.36 — Comparador de comprimento de corpos de prova ⌀ 25 x 25 x 250 mm

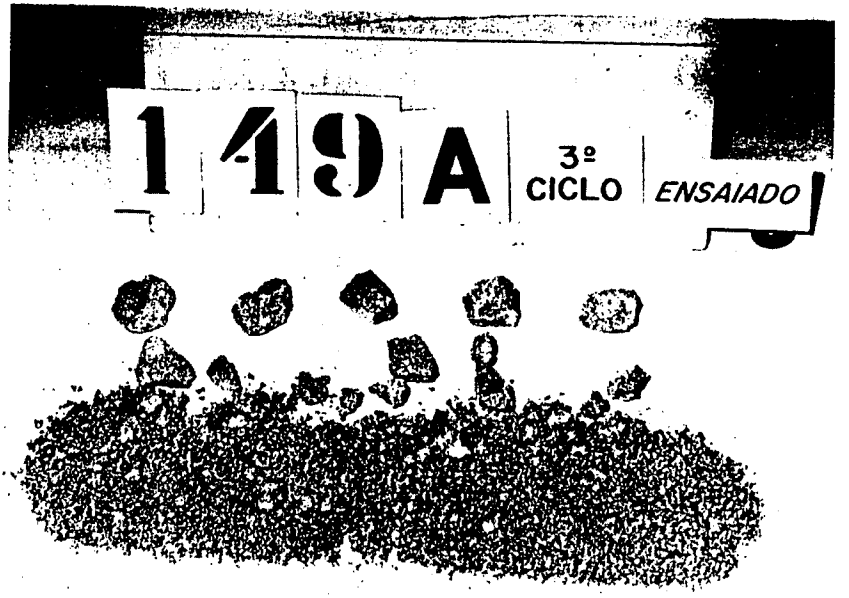


Figura 3.28 — Parte de amostra de basalto compacto cinza exposta pela ciclagem água-estufa (após 3 ciclos = 31 dias) em comparação com o mesmo material sem ser ensaiado

O glicerol também provoca reações de expansão, porém tem elevada viscosidade o que demandaria um longo tempo de exposição da amostra.

Para execução desse ensaio há necessidade [3.34] [3.35] [3.36] de balança com acuracidade de 0,1%, estufa, peneiras de acordo com a citação anterior, de frascos para exposição da amostra e de etileno glicol. [3.37].

A amostra preparada, como anteriormente citado, deve ser seca e pesada ao ar, após o que é colocada no frasco com etileno glicol. Após intervalos (menores que três dias) de imersão, a amostra é avaliada comparativamente com a amostra não ensaiada como ilustra a figura 3.29 [de 3.32]. A duração normal do ensaio é de 15 dias.

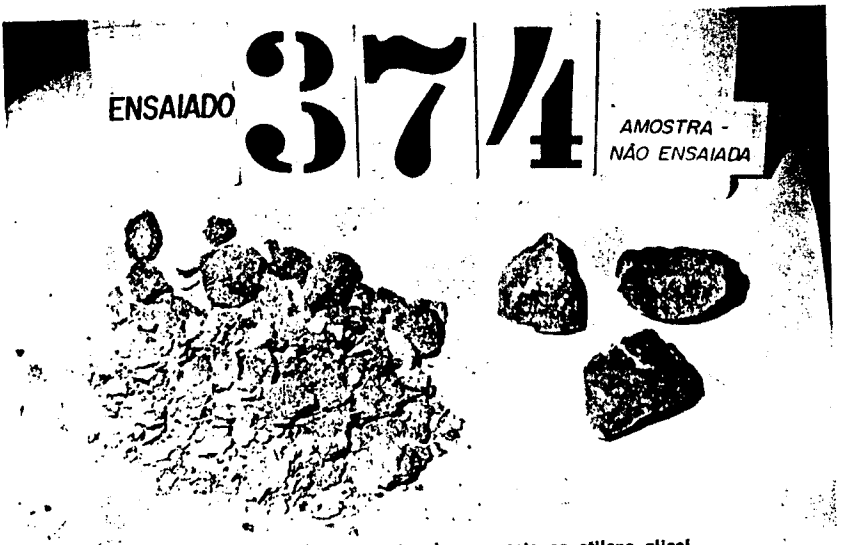


Figura 3.29 — Parte de amostra de basalto compacto cinza exposta ao etileno glicol



Figura 3.30 — Exposição ao tempo de testemunhos de sondagem — obra de Rosana — SP — Cesp.

Com base na análise petrográfica e ensaios de desagregabilidade pode-se ter uma idéia da durabilidade do material.

Normalmente material desagregável não é utilizado como agregado para concreto massa ou estrutural. Entretanto, tem-se observado [3.38] que basaltos altamente desagregáveis quando protegidos das intempéries (cobertos com lona, por exemplo) não apresentam alterações. Estudos realizados nos Laboratórios da Cesp-Companhia Energética de São Paulo [3.39], com basaltos altamente desagregáveis mostraram que este tipo de material, quando protegido pela argamassa de cimento, pode permanecer estável (ver figura 3.31) o que indica um possível aproveitamento em concreto massa. Estas conclusões devem, entretanto, ser acatadas com certo resguardo, pois deve haver uma comprovação prática da aplicação desse tipo de material, devendo sua utilização ser precedida de estudos do comportamento do próprio concreto.

Outro aspecto que deve ser levado em consideração na definição do aproveitamento desse tipo de material como agregado para concreto é que ele deve ser protegido das intempéries, durante a fase de beneficiamento e estocagem até sua aplicação no concreto.

Basaltos com certas composições podem também apresentar-se quimicamente reativos com os álcalis (em Na_2O), existentes no cimento, como certo tipo de basalto encontrado na fundação da obra Taquaraçu-Cesp, que apresentou a seguinte composição mineralógica:

Plagioclásio (Labradorita) 40 a 50%; Piroxênia (augita e pigeonita) 40%; Opaco 5 a 10% e argila mineral verde + vidro divitrificado 5 a 15% [3.40].

Em conseqüência dessa reação podem ser observadas expansões e fissuramento do concreto fabricado com este tipo de material. Esta reação é lenta, podendo demorar vários anos [3.41], o que torna difícil sua simulação para avaliar a qualidade do material.

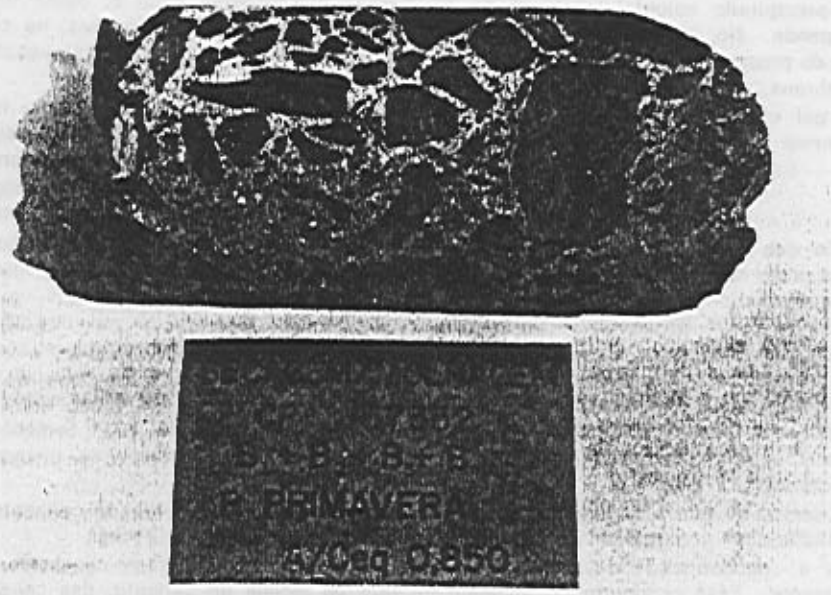


Figura 3.31 — Testemunho extraído de bloco submetido à variação do nível d'água, após um ano de exposição

Na reação álcali-sílica interferem álcalis (sódio e potássio) presentes nas soluções contidas nos poros do concreto e a sílica ativa de certos agregados. O processo reativo é relativamente lento, sendo que em alguns casos os primeiros sinais de deterioração têm aparecido dentro de um ano após a concretagem mas, em outros, os sinais só aparecem muitos anos depois. Nos Estados Unidos esse assunto, bem como outros, tem sido objeto de acompanhamento detalhado podendo-se citar a Barragem de Matilija, perto de Ventura, na Califórnia, construída em 1948, sendo que havia sido especificado um cimento de baixo álcali e que apresentou expansões e fissuração em várias regiões. A deterioração da barragem de Drum Afterbay, na Califórnia [3.42] foi de tal ordem que a solução técnico-econômica adotada foi a de reconstrução.

Thomas E. Stanton, em 1940 [3.43] [3.44] [3.45], foi o primeiro pesquisador a descrever o processo de reação álcali-sílica.

Durante o período de 1940 a 1975 vários autores [3.42] procuraram descrever o funcionamento da reação álcali-sílica, de diversas formas, evidenciando entretanto que o mecanismo dessa reação é controvertido e ocorre com as formas de sílica ativa, hidratadas, amorfas ou vítreas microcristalinas, criptocristalinas constituintes das opalas, calcedônias ou tridimitas.

Por ocasião da ocorrência da reação, além dos silicatos alcalinos puros, são formados outros mais complexos, com a intervenção de hidróxido cálcio como base adicional.

Esses silicatos cálcio-alcalinos (precipitado coloidal insolúvel de cor branca) tem o caráter de membranas semipermeáveis que permitem a passagem da água através delas, por osmose.

Membranas muito silícicas, formadas com abundância de sílica reativa, ou muito cálcicas, quando há escassez de álcalis, são impermeáveis.

Para a ocorrência do gel semipermeável, com caráter expansivo, há necessidade de uma determinada proporção de elementos reativos.

O precipitado coloidal insolúvel de cor branca não absorve água e, desta forma, não expande. No início então o processo pode ser considerado inofensivo, na continuação do processo há necessidade dos íons de sódio (equivalente) e cálcio atravessarem a membrana, para que a reação prossiga.

O gel que forma a membrana tem superfície interna muito grande, sendo capaz de absorver quantidades apreciáveis de cálcio e, predominantemente, sódio (equivalente 0,658 potássio) quando a concentração de álcalis for alta e inversamente concentração de álcalis for baixa, sendo que os íons de sódio (equivalente) mobilidade que os de cálcio, visto que sua velocidade de difusão é maior.

Pelo que se expôs, durante o início do processo, há a formação do gel não expansivo, mas no seu prosseguimento, se o consumo de álcalis na reação for grande, a concentração de álcalis na pasta não chega a predominar sobre a de cal e os íons de cal agem simultaneamente assegurando a formação contínua do gel de cal-álcali-sílica, não expansivo. Entretanto, se o consumo de álcali não for grande, a concentração de álcalis permanece alta, predominando sobre a de cal, e os íons de sódio que atravessam a película de gel não expansivo atacam o grão de sílica solúvel, na falta de cal, dando origem ao gel de álcali-sílica, que absorve água, aumenta de volume e exerce forças de expansão capazes de fissurar o concreto ao ultrapassar a resistência à tração.

Observa-se que o andamento da reação depende fundamentalmente da concentração dos álcalis, da quantidade e granulometria dos grãos reativos [3.42].

Se a concentração de álcalis for elevada, a reação atinge a fase expansiva mais rapidamente. Essa concentração depende do teor de álcalis do cimento, das condições de exposição, do consumo de aglomerante e do teor de água no concreto.

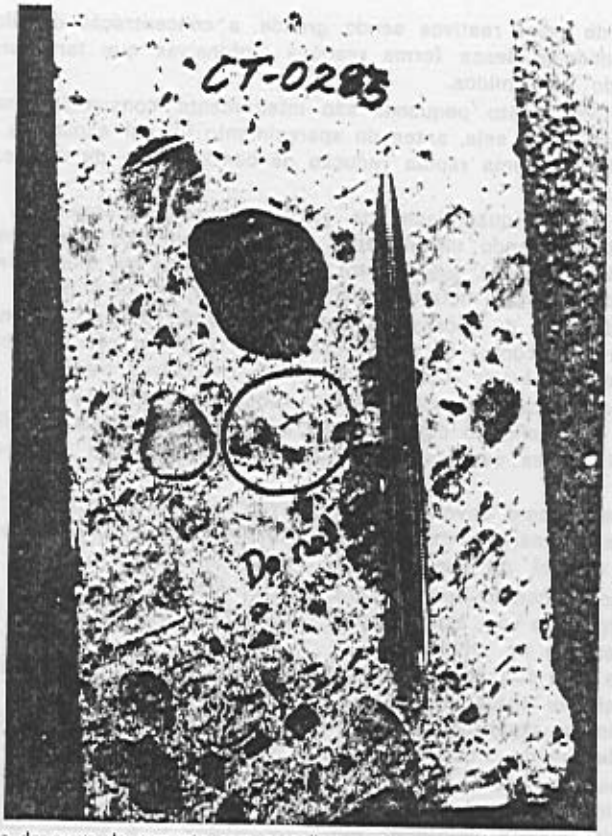


Figura 3.32 — Corpo de prova de concreto com cascalhos reativos com álcalis do cimento mostrando gel expansivo — laboratório da Portland Cement Association — Illinóis

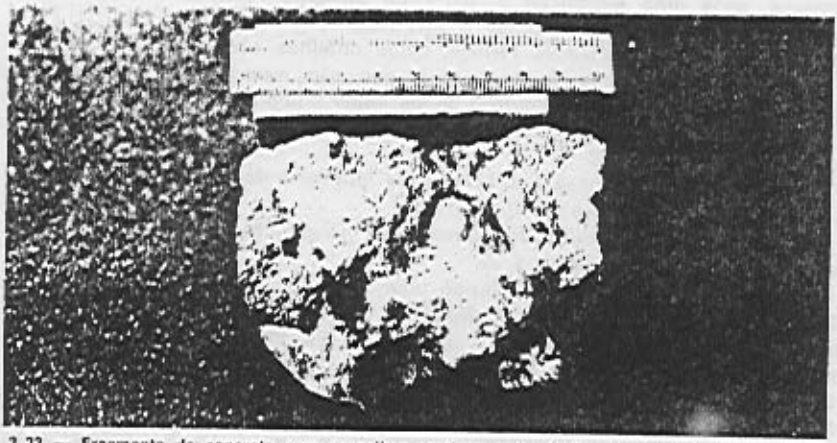


Figura 3.33 — Fragmento de concreto com cascalhos reativos com álcalis do cimento, mostrando membrana expansiva junto aos agregados

A quantidade de grãos reativos sendo grande, a concentração de álcali é rapidamente reduzida, tendo-se dessa forma reações inofensivas que terminam quando os álcalis tenham sido consumidos.

Partículas reativas muito pequenas são inteiramente consumidas na fase inicial e inofensiva da reação, ou seja, antes do aparecimento de gel expansivo, com elevada superfície específica, há uma rápida redução da concentração de álcalis, reduzindo o perigo da reação.

Inibidores da reação (quantidades de grãos reativos), determinados materiais pozolânicos, agem incorporando um material altamente silícico, finamente moído (granulometria dos grãos reativos), que produza membranas ricas em sílica, afastando, dessa maneira, as proporções dos materiais reativos de seu ponto ótimo.

A limitação do teor de álcalis (concentração de álcalis) do cimento em 0,60% por si só, não previne contra os riscos de reação deletéria por não levar em conta a possibilidade de introdução adicional de álcalis de outras fontes.

Além disso, os processos modernos de produção do cimento têm provocado um aumento no teor de álcalis do cimento, pois a eliminação destes do clínquer implica em desperdício de gases quentes, o que contraria os objetivos de economizar combustíveis.

A reação álcali-silicato envolve os álcalis com tipos complexos de rochas como grauvaques, filitos siltitos, argilitos, arenitos etc. Ocorre de modo mais lento e com menor formação de gel do que a reação álcali-sílica.

A reação álcali-carbonato ocorre entre alguns calcários delomíticos de granulação fina contendo argilas e os álcalis do cimento, manifestando-se por expansões no concreto, em presença de umidade.

Caracteriza-se pela formação de trincas em torno das partículas reativas do agregado com conseqüente perda de aderência com a pasta de cimento.

Para avaliação de expansão decorrente da reação álcali-sílica pode-se lançar mão do método das barras de argamassa [3.42], [3.46], [3.47].

Os resultados de ensaios realizados por esse método proporcionam informações sobre a possibilidade de que uma combinação cimento-agregado seja potencialmente capaz de produzir reações deletérias entre os álcalis e a sílica, com conseqüente expansão prejudicial ao concreto.

A reatividade é avaliada em termos de grau de expansão, de prismas padrões de argamassa, após uma exposição a 100% de umidade relativa, a 37,8°C, por um período de um ano (avaliação preliminar a seis meses).

Para esse ensaio são utilizadas fôrmas, cujos detalhes são vistos na figura 3.34, para a moldagem dos prismas de argamassa, que são armazenados, para exposição, em [illegible] semelhantes ao da figura 3.38, de modo a impedir a fuga de vapor d'água. As variações de comprimento dos corpos de prova são medidas por comparador como mostrado na figura 3.36

Para o preparo da argamassa é utilizada uma batedeira de argamassa de acordo com [3.48], a figura 3.37 e detalhes da figura 3.38.

Os materiais a serem verificados devem ser fragmentados e colocados nas dimensões recomendadas pela figura 3.39.

No caso de agregados "grossos", faz-se uma fragmentação (britagem) até se obter as frações desejadas. No caso de insuficiência, pelo fato do material ser mais fino, acumulam-se as frações superiores nas inferiores. Os materiais devem ser lavados e secos.

O aglomerante a ser usado deve ser o de alto teor de álcalis (acima de 0,6% em sódio equivalente). Normalmente são usados cimentos com equivalente alcalino, entre 0,80% e 1,20%. Pode ser, também, usado o cimento que se pretende empregar na obra, entretanto essa situação leva a resultados restritos a esse uso.

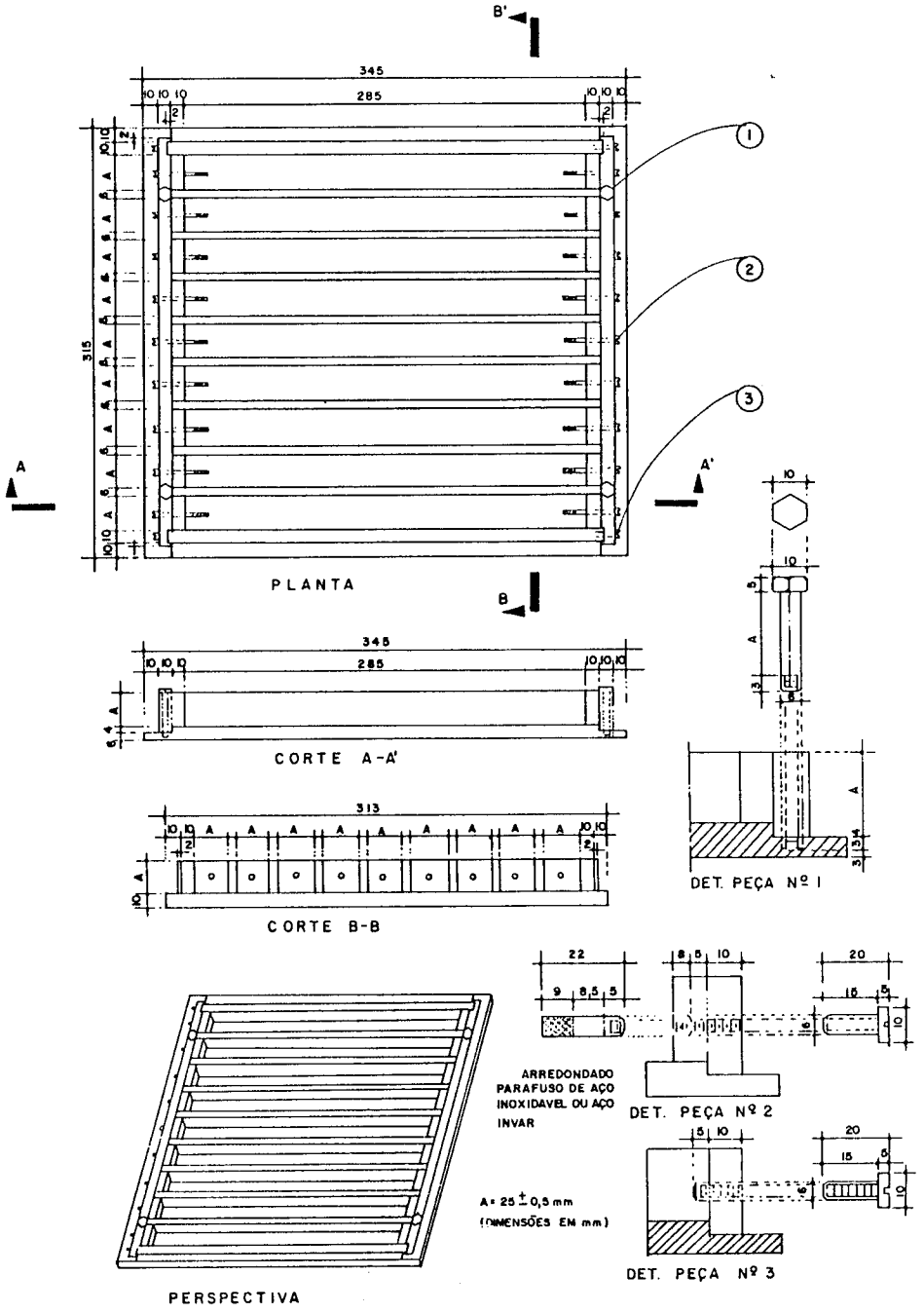


Figura 3.34 — Detalhes do molde das barras para ensaio de expansão da argamassa

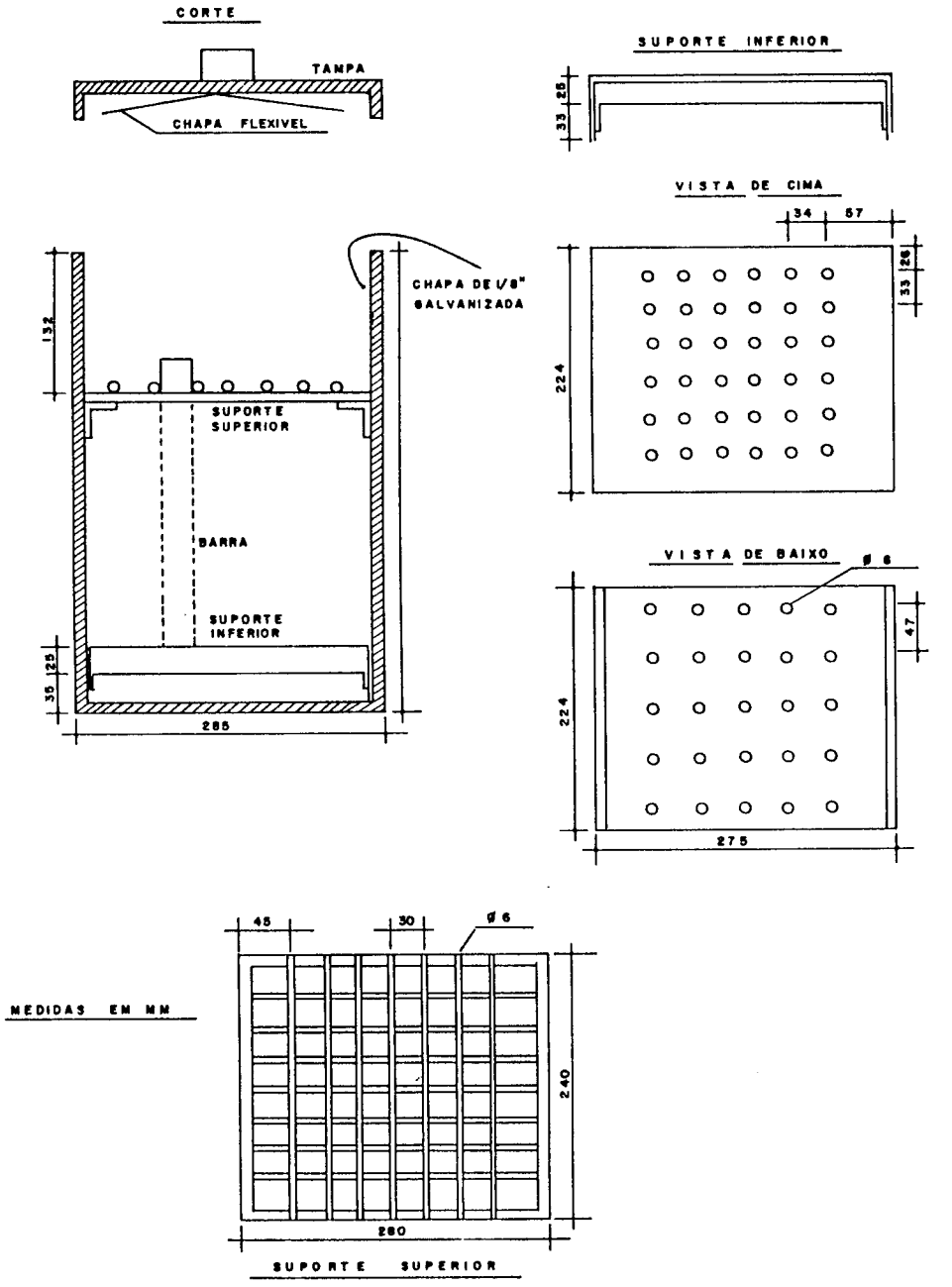


Figura 3.35 — Recipiente para armazenamento das barras de argamassa

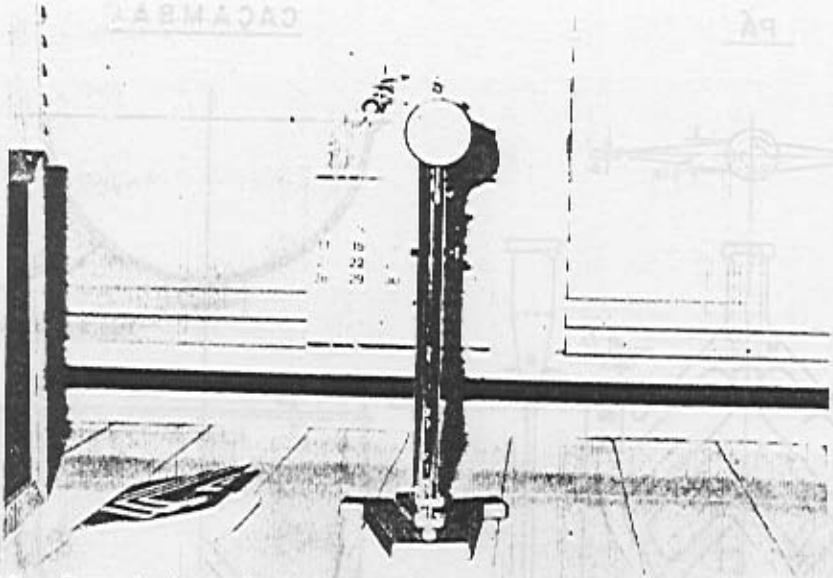


Figura 3.36 — Comparador de comprimento de corpos de prova □ 25 x 25 x 250 mm

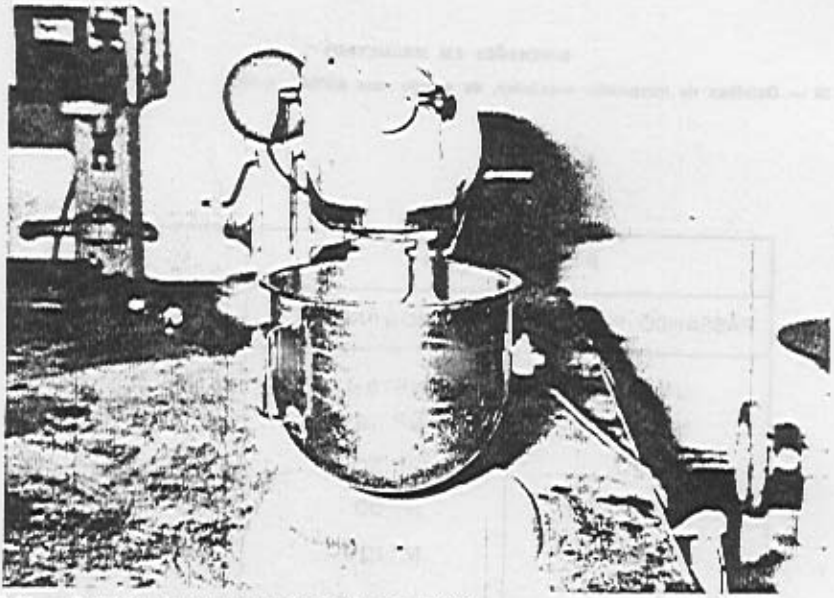
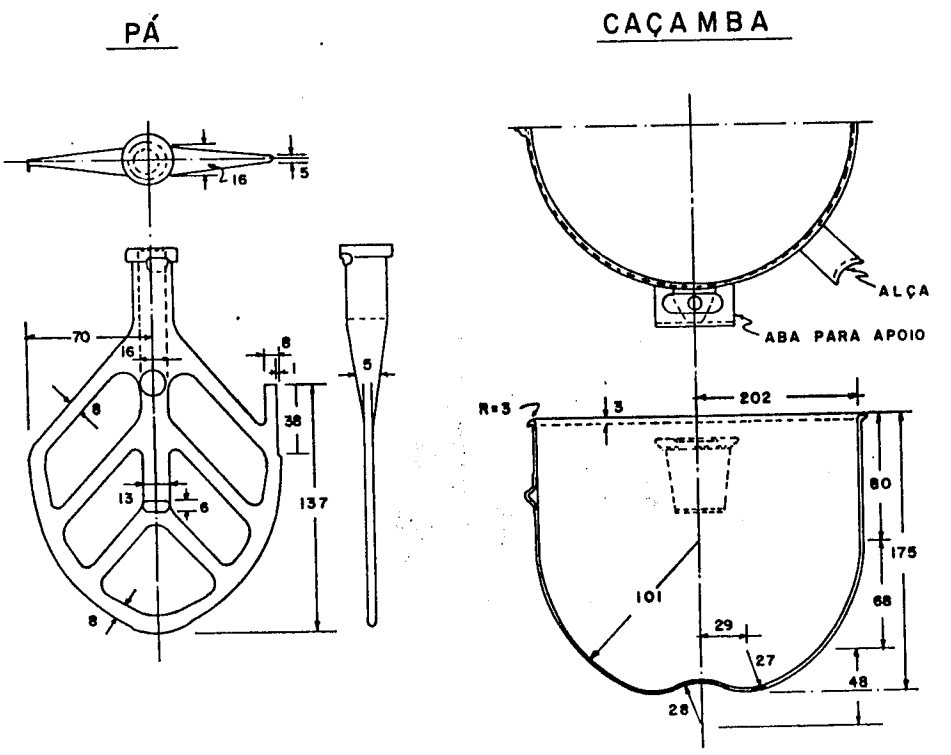


Figura 3.37 — Batedeira de argamassa de acordo com [3.48]



DIMENSÕES EM MILÍMETROS

Figura 3.38 — Detalhes do misturador mecânico, de acordo com ASTM - C-305

PENEIRAS		%
PASSANDO PELA	RETIDA NA	
Nº 4	Nº 8	10
Nº 8	Nº 16	25
Nº 16	Nº 30	25
Nº 30	Nº 50	25
Nº 50	Nº 100	15

Figura 3.39 — Dimensões para o agregado a ser usado no preparo da argamassa no ensaio das barras

A argamassa é preparada com traço de cimento: agregado, igual a 1:2,25 em peso; o teor de água é aquele que proporciona um escoamento **(flow)** de 105% a 120%, determinado através de dez golpes de 12,5 cm de altura, em aproximadamente seis segundos pela mesa de escoamento [3.47] [3.49] mostrada na figura 3.40 e detalhada na figura 3.41.

Após a determinação do teor de água prepara-se a argamassa na batedeira, para a moldagem dos prismas.

Após os moldes terem sido preenchidos, faz-se a identificação dos prismas, colocando-se o conjunto moldado em câmara úmida por um período de 44 ± 4 horas. Após esse sazonamento os prismas são desmoldados, medidos pelo comparador (figura 3.36) a temperatura de 23 ± 1,7°C, colocados no recipiente de armazenamento (figura 3.35) com água no fundo (entretanto não em contato), sendo que o conjunto é colocado em uma câmara quente a 37,8 ± 1,7°C.

Medidas complementares são feitas ao oitavo dia e vigésimo oitavo dia e a cada 28 dias subseqüentes, sendo que nessas oportunidades o recipiente é tirado da câmara quente e deixado estabilizar a 23 ± 1,7°C por um período não inferior a 16 horas.

Após as leituras calcula-se a variação (em porcentagem) com relação ao comprimento inicial.

O ensaio pode acusar expansões insignificantes, quando se encontram presentes rochas silicosas potencialmente capazes de reações deletérias, em proporções comparativamente elevadas, mesmo quando se emprega cimento de alto teor de álcalis, provavelmente porque os produtos da reação álcali-sílica se caracterizam, nesse caso, por uma relação entre álcali e sílica suficientemente baixa para reduzir a um mínimo a adsorção de água e a expansão. Esse ensaio pode, também, acusar expansões insignificantes no caso de agregados dolomíticos que são afetados de forma prejudicial pela reação álcali-carbonato, quando empregados como agregados graúdos em concretos nas obras.

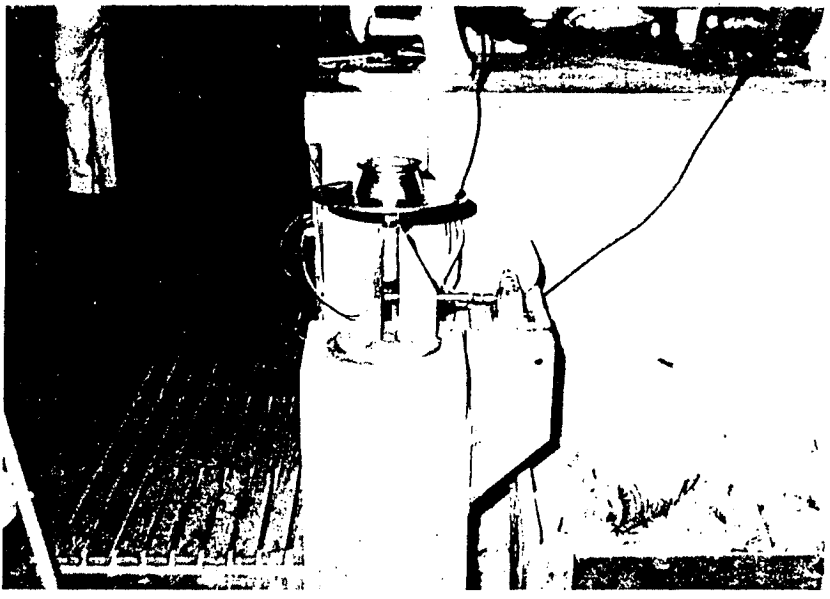


Figura 3.40 — Mesa de escoamento e molde do tronco de cone para determinar o teor de água da mistura de argamassa no ensaio das barras

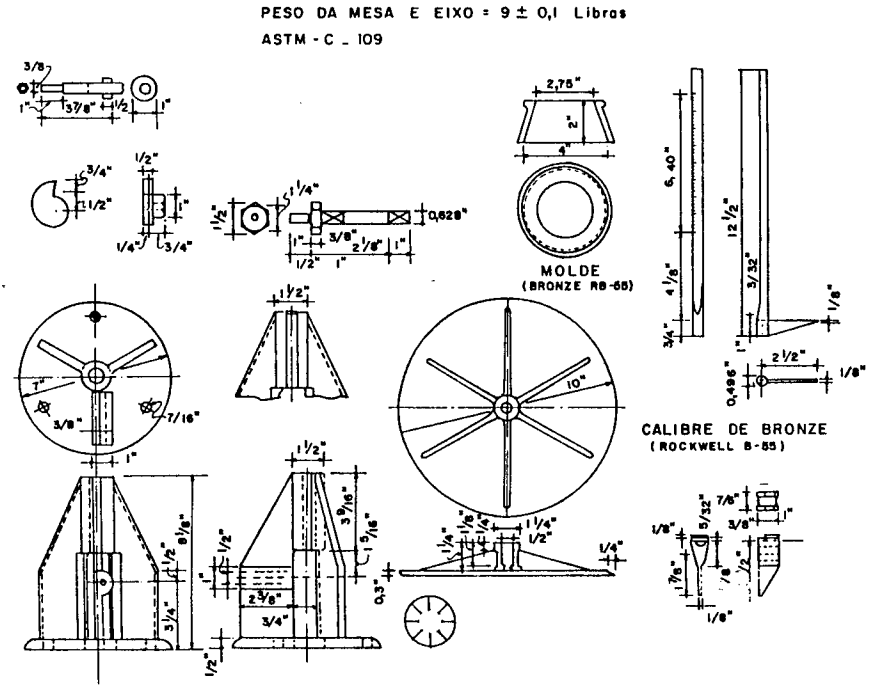


Figura 3.41 — Detalhes da mesa de escoamento e do anel cônico para determinação do teor de água da argamassa no ensaio das barras

Expansões apreciáveis podem ser observadas em certas ocasiões, por causas alheias à reação álcali-sílica, particularmente pela presença no agregado, de sulfetos ferrosos (pirita, marcassita ou pirrotita) que se oxidam e hidratam com liberação de sulfeto, e pela presença, no cimento ou no agregado, de materiais tais como cal livre (CaO) ou magnésia livre (MgO), que se hidratam e carbonatam progressivamente.

O primeiro caso de reatividade potencial álcali-sílica estudado no Brasil (entre 1961 e 1963) foi o da cascalheira Miguel Amado — durante a construção da hidroelétrica de Jupiá (Eng. Francisco L. Souza Dias) — Cesp e, posteriormente, a brecha do Rio da Casca, próximo a Cuiabá — MT [3.42].

Para o diagnóstico da reatividade potencial dos agregados na cascalheira Miguel Amado, as amostras foram submetidas a análises mineralógicas, ensaios químicos e ensaios de barras, chegando-se à conclusão de que o material era potencialmente reativo.

A figura 3.42 fornece valores [3.51], [3.52] desse tipo de ensaio.

A reatividade álcali-sílica pode, também, ser avaliada através da medida da quantidade de sílica dissolvida de amostras representativas do agregado, por solução normal de hidróxido de sódio e da concomitante redução da alcalinidade da solução.

O método [3.53] [3.54] [3.55] [3.56] mede a redução de alcalinidade de uma solução normal de hidróxido de sódio e a quantidade de sílica dissolvida quando colocada em presença do agregado finamente pulverizado, a 80°C. Os resultados obtidos são lançados em gráfico proposto por Mielens e Witt [3.57] onde são caracterizados como inócuos ou deletérios, como mostra a figura 3.43.

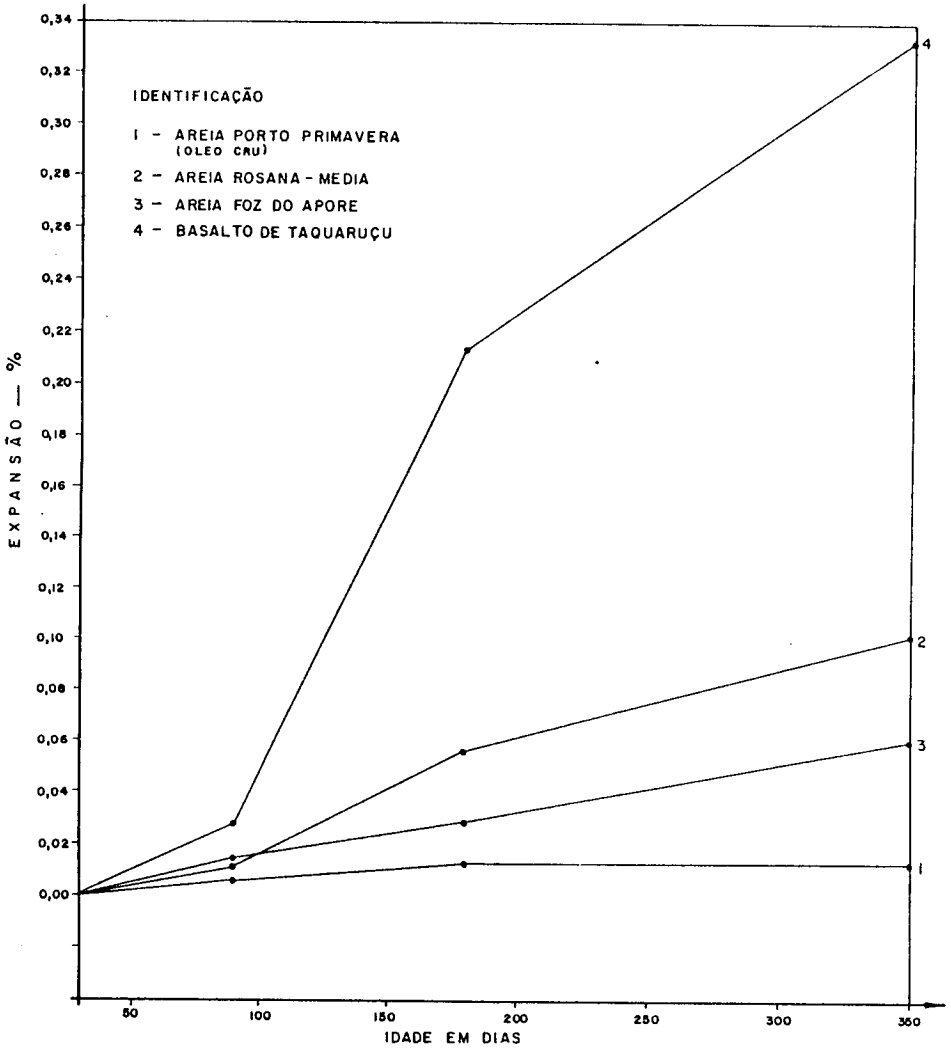


Figura 3.42 — Valores de ensaio de expansão de barras de argamassa decorrente da reação álcali-sílica

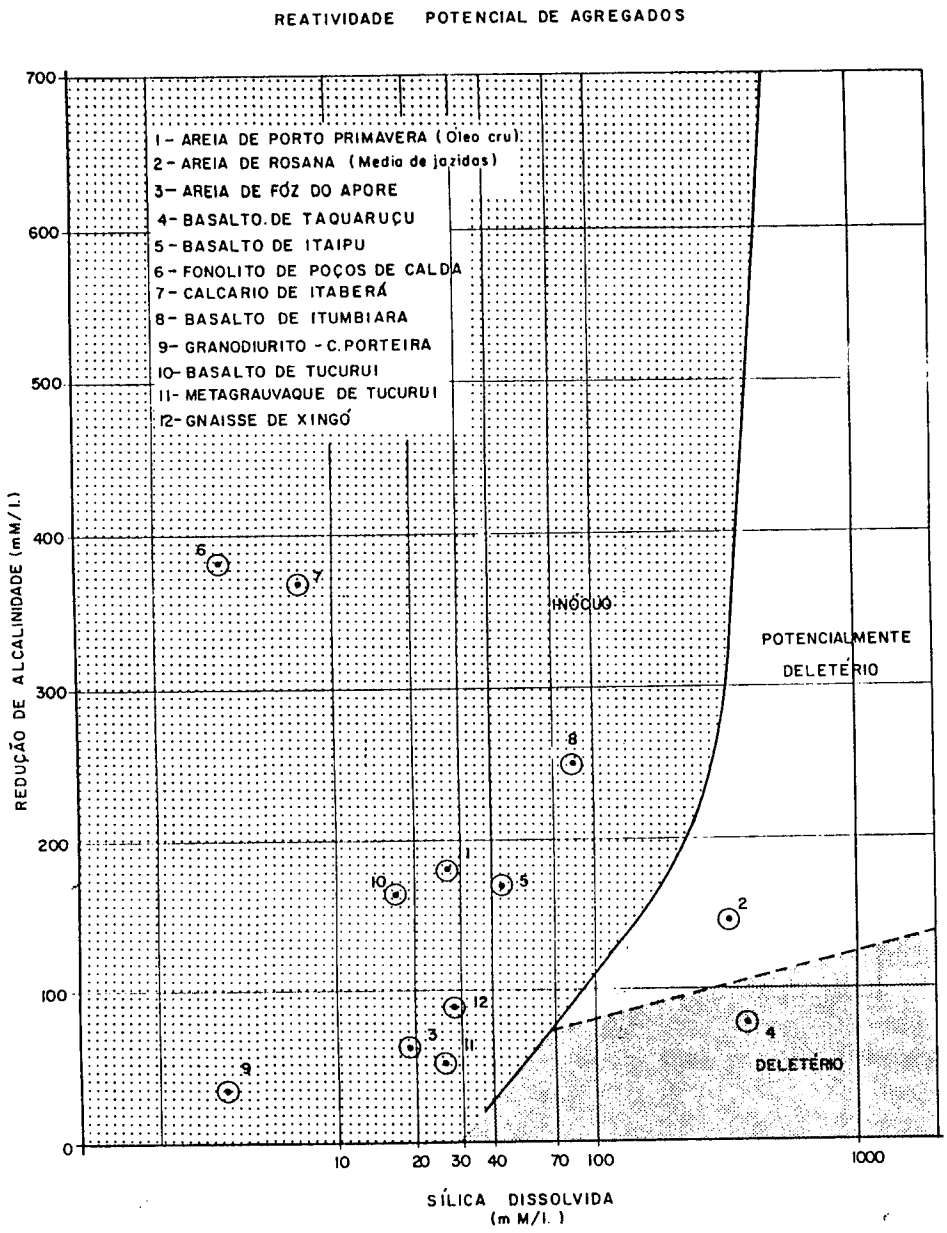


Figura 3.43 — Diagrama de valores da reatividade potencial de agregados pelo método químico

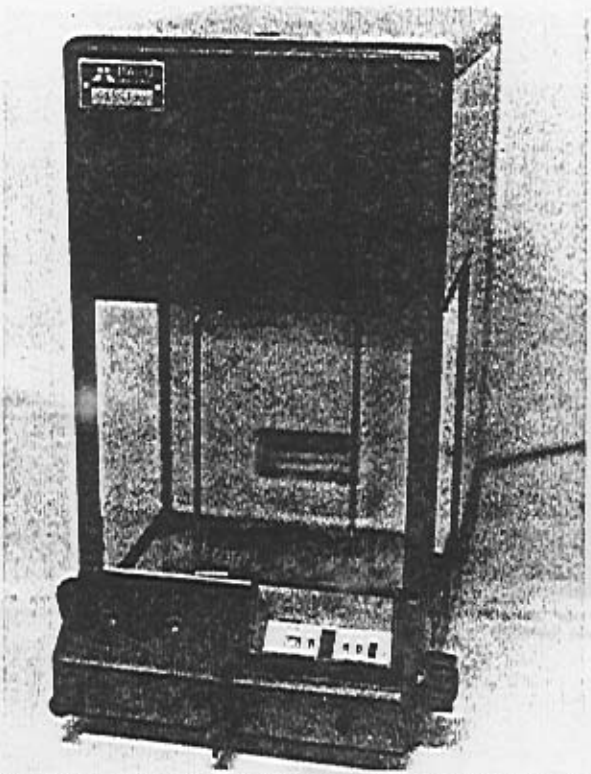


Figura 3.44 — Balança analítica com capacidade de 160 mg e sensibilidade de 0,1 mg, para determinação de teores, nas análises químicas

O método de ensaio químico é um ensaio acelerado que visa medir a quantidade de sílica do agregado, que é dissolvida por uma solução fortemente alcalina à temperatura de 80°C.

Para a execução dos ensaios é necessária uma balança analítica (ver. figura 3.44), equipamento de britagem e moagem (ver figura 3.45), para produzir aproximadamente 4 kg de material passante pela peneira de malha nº 50 (0,3 mm), recipientes de reação (ver figuras 3.46 e 3.47) com capacidade de 50 a 75 ml, de aço inoxidável (ou material resistente à corrosão), banho a temperatura constante ("banho-maria"), capaz de manter a temperatura a 80 ± 1.°C (ver figura 3.48), vasilhame de platina (ver figura 3.49) para evaporação da solução contendo sílica, fotômetro, ou espectrofotômetro (ver figura 3.50), capaz de medir a transmissão de luz com comprimento de onda de aproximadamente 410 mm.

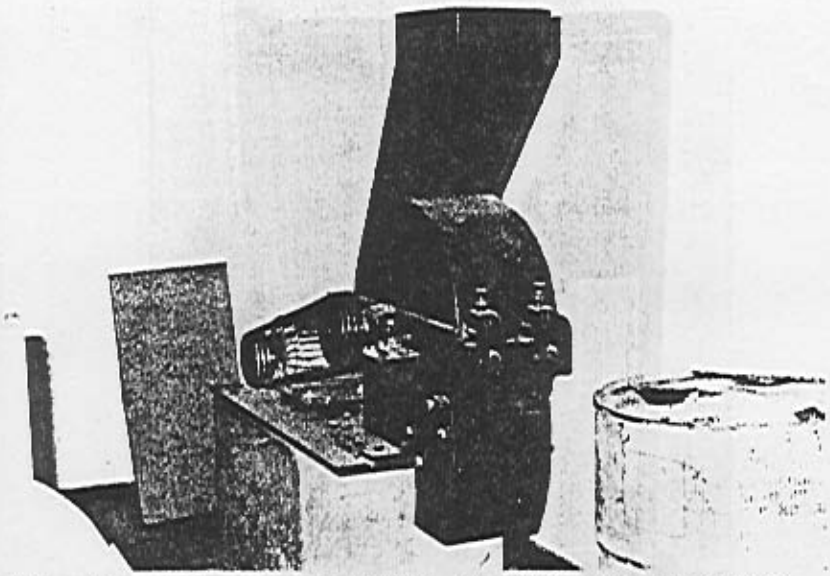


Figura 3.45 — Britador de facas, de uso em laboratório, para produzir material para ensaio de reatividade, pelo método químico



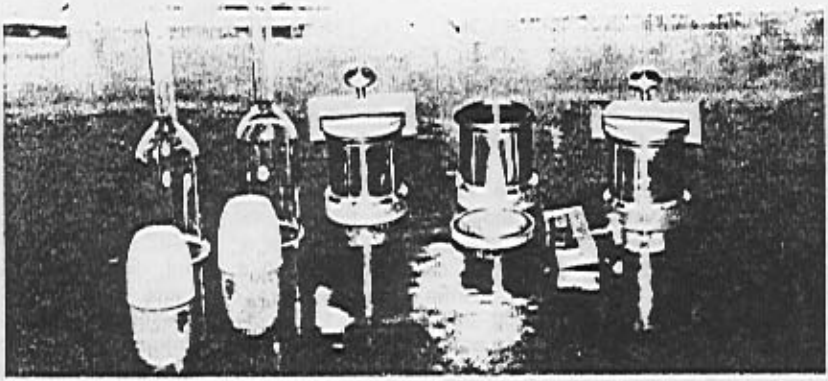


Figura 3.46 — Recipientes de inox, (capacidade de 50 ml), cadinhos de porcelana tipo gooch e funis para ensaio de reatividade

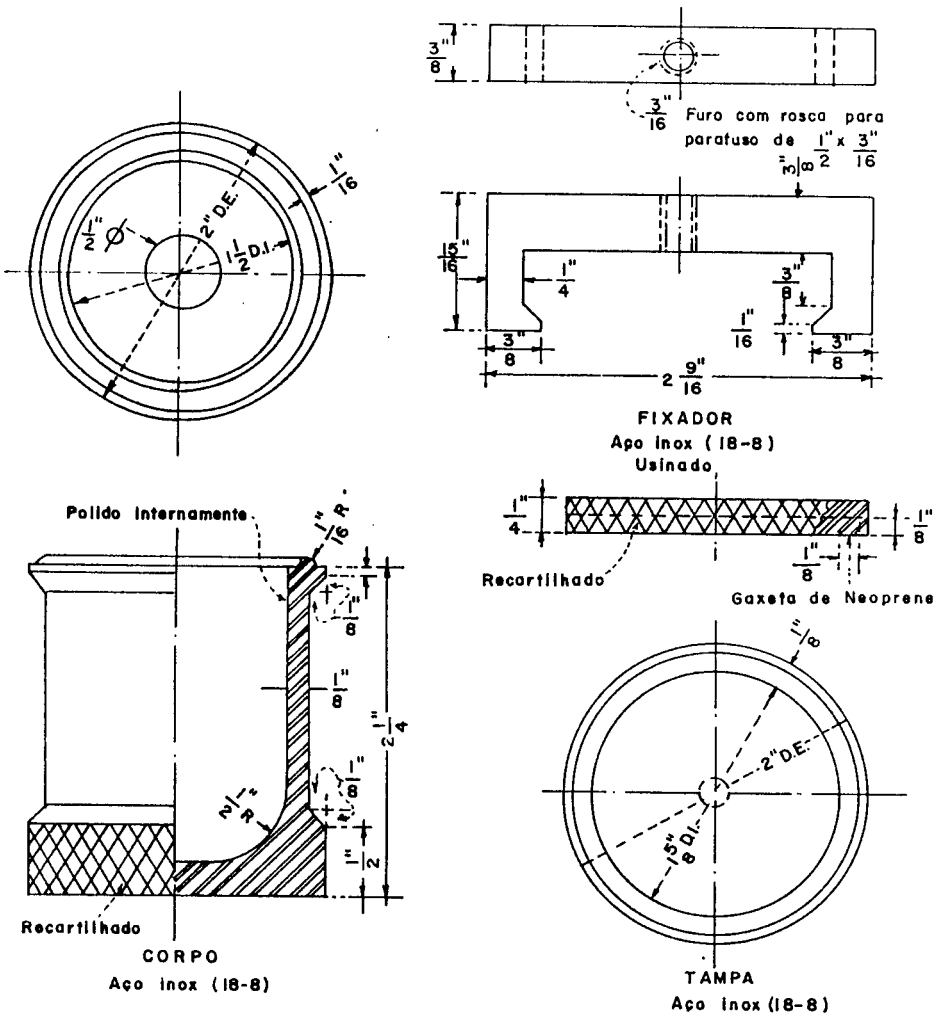


Figura 3.47 — Detalhes do cadinho de inox para a reação no ensaio de reatividade pelo método químico

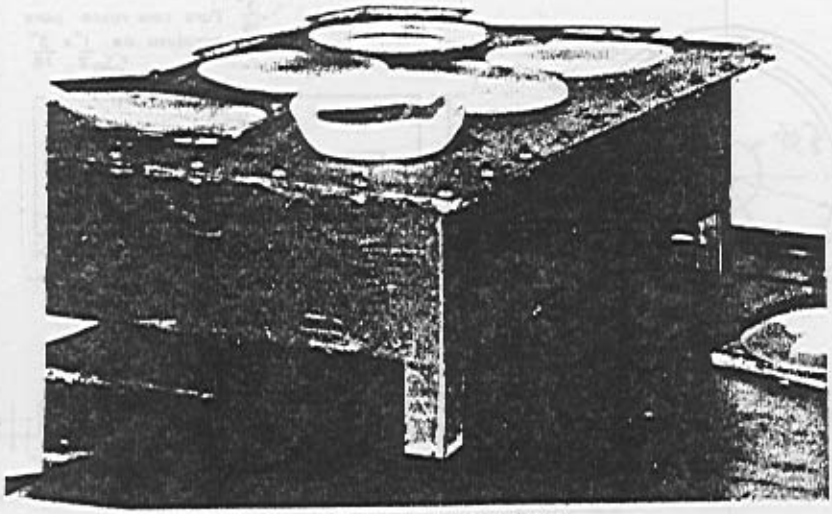


Figura 3.48 — Aquecedor tipo "banho-maria" para manter temperatura

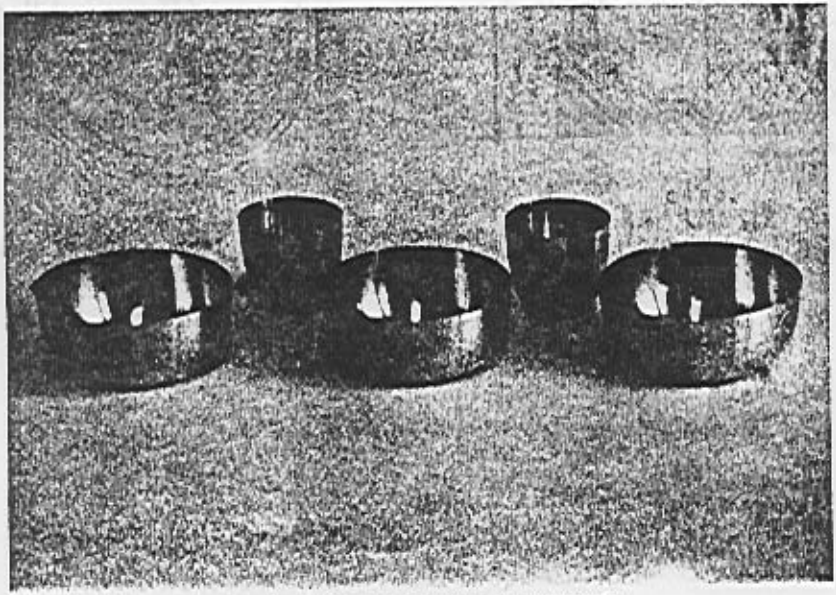


Figura 3.49 — Cadinhos e cápsulas de platina para secagem por evaporação

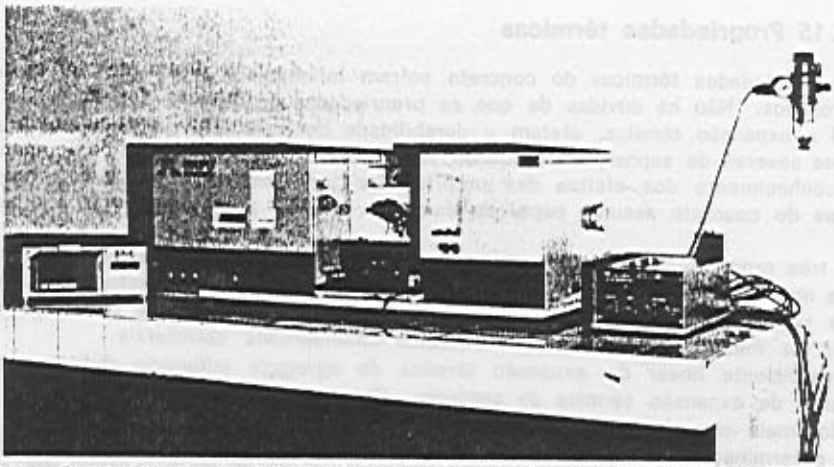


Figura 3.50 — Espectrofotômetro de absorção atômica para determinações nas análises químicas (SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, CaO, MgO, Na_2O, K_2O, TiO_2, Mn_3O_3)

É necessária, também, uma série de reagentes, tais como molibdato de amônia $(NH_4)_6\ Mo_7O_{24}\ 4H_2O$ dissolvido em água, ácido hidroclorídrico concentrado (γ = 1,19 g/cm³), ácido hidroclorídrico padronizado (0,05N) ácido hidroclorídrico (1:1), ácido hidrofluorídrico a aproximadamente 50%HF, solução de ácido oxálico (bihidratado), solução indicadora de fenolftaleína, solução padrão de sílica, solução padrão de hidróxido de sódio (1,000 ± 0,010N), ácido sulfúrico H_2SO_4 (γ=1,84 g/cm³).

A amostra para ensaio deve ser preparada a partir de uma porção representativa do agregado, através da britagem até que o material passe pela peneira n.° 50 e fique retido na n.° 100. Lava-se e faz-se a secagem, após o que tomam-se três alíquotas de 25 ± 0,05g, da amostra seca.

Esse material é mantido em contato com a solução de hidróxido de sódio (1N), à temperatura de 80°C, durante 24 horas, no recipiente de inox. Em seguida determina-se a quantidade de álcali que reagiu com o agregado (Rs = redução da alcalinidade) e a quantidade de sílica do agregado que foi dissolvida pela solução alcalina (Sd = sílica dissolvida). Isso é feito por filtragem do material da solução, do recipiente de reação e determinação do teor de sílica (SiO_2) que pode ser feita gravimetricamente ou pelo processo fotométrico (que determina a sílica cristaloidal).

O processo fotométrico é particularmente aplicável para análise rápida de sílica cristaloidal abaixo de 10ppm.

Os valores da Rs e Sd são lançados no gráfico da figura 3.43 onde se encontram alguns pontos de materiais brasileiros [3.58] [3.59] [3.60].

Observa-se que o material da jazida n.° 4, que se apresentou como deletério no ensaio químico, acusou elevada expansão no ensaio de barras de argamassa.

Ensaios interlaboratoriais executados [3.56] mostraram que o preparo da amostra é de muita importância nesse tipo de ensaio.

A reatividade de rochas de carbonatos com álcalis pode ser avaliada [3.61] pela imersão do testemunho de rocha de carbonato (dolomita calcário, mármore) em solução de hidróxido de sódio, observando-se a variação do comprimento durante o período de exposição. Dessa exposição resulta [3.62] uma reação do tipo (válida também para o hidróxido de potássio):

$$Ca\ Mg\ (CO_3)_2 + 2Na\ OH \longrightarrow Mg\ (OH)_2 + CaCO_3 + Na_2CO_3$$

Dolomita (Rocha)	Álcali (do cimento)	Brucita	Calcita	Carbonato de Sódio

3.1.3.15 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas do concreto sofrem influência direta das propriedades dos agregados. Não há dúvidas de que as propriedades térmicas dos agregados, em especial a expansão térmica, afetam a durabilidade do concreto, particularmente sob condições severas de exposição ou quando sujeito a variações bruscas de temperatura.

O conhecimento dos efeitos das propriedades térmicas dos agregados nas propriedades do concreto assume papel de destaque, quando pode melhorar a qualidade deste.

As três propriedades térmicas dos agregados, que podem ter interferências significativas no desempenho do concreto, são: coeficiente linear de expansão, calor específico e condutividade térmica. Tais propriedades são relevantes nos concretos tipo massa e de menor importância nos concretos considerados estruturais.

O coeficiente linear de expansão térmica do agregado influencia diretamente o coeficiente de expansão térmica do concreto. Quanto mais elevado o coeficiente do agregado, mais elevado o do concreto.

Na determinação do coeficiente de expansão térmica devem ser tomados cuidados com certos minerais de características anisotrópicas, que apresentam valores bem distintos quando determinados segundo um eixo cristalográfico ou outro.

O coeficiente linear de expansão térmica é expresso em termos de deformação específica por °C.

O calor específico é de importância considerável nos cálculos que envolvem temperaturas de colocação do concreto e limitação de variações de volume.

O calor específico (C) é a quantidade de calor necessária para elevar de uma unidade de temperatura uma massa unitária de material. É expresso normalmente em J/g × °C ou em cal/g × °C.

A condutividade térmica (K) é a razão na qual o calor passa por um material de dimensões unitárias quando há uma variação da temperatura entre duas faces do material. No sistema métrico é expresso em J/cm.s. °C ou em Kcal/cm.s. °C.

A condutividade térmica tem maior importância em concretos leves. Como varia em proporção direta com a densidade, os agregados leves possuem baixa condutividade sendo adequados para concretos, com finalidades de conferir bom isolamento térmico.

Através dos valores de "C" e "K", da densidade do material, pode-se determinar a difusividade térmica (h^2), definida como sendo a facilidade que um material possui n trocar calor. É caracterizada pela expressão: (III-XI)

$$h^2 = \frac{K}{\gamma . C} \quad \text{(III-XI) onde:}$$

K = condutividade térmica;

γ = massa específica;

C = calor específico.

A difusibilidade térmica do agregado é considerada como tendo efeito importante na durabilidade do concreto.

Variações bruscas da temperatura, em concretos onde as difusibilidades da argamassa e do agregado apresentam diferenças acentuadas, resultam em mudanças diferenciais de volume, responsáveis por tensões superficiais entre argamassa e agregado que podem provocar o colapso de ligação argamassa-agregado.

O coeficiente linear de expansão térmica de agregados é determinado pela medida da variação do comprimento de amostras submetidas a variações de temperatura [3.64] [3.65].

Para isso podem ser utilizados extensômetros elétricos de resistência (**Wire-strain gages**) com precisão de 5 μ**strain** colados à superfície de partículas de agregados, preparados como ilustra a figura 3.51. Tendo em vista a anisotropia possível de ser observada em rochas, é conveniente que os corpos de prova sejam preparados a partir das três direções ortogonais.

Para a leitura das variações de comprimento pode ser usado o esquema de ligação mostrado na figura 3.51. Há a necessidade de uso de um padrão de coeficiente linear de expansão térmica conhecido, tal como o cristal de quartzo puro (com coeficiente paralelo ao eixo C igual a 7,74 $\times$ 10^{-6}/°C).

A leitura das deformações pode ser feita por um equipamento semelhante ao da figura 3.52.

A leitura das temperaturas é feita por meio de sensores com precisão de 0,5°C.

Podem ser usados conjuntos para medida de temperatura e deformação, de modo automático, como ilustra a figura 3.53.

Os corpos de prova preparados são colocados em uma caixa de manuseio, como ilustra a figura 3.54, que é colocada na câmara térmica.

A câmara térmica é ajustada para temperatura ao redor de 40°C (pode ser usada a mesma câmara descrita para o ensaio de barras de argamassa), aguardando-se que o ambiente se equilibre, quando então os extensômetros e temperatura são lidos.

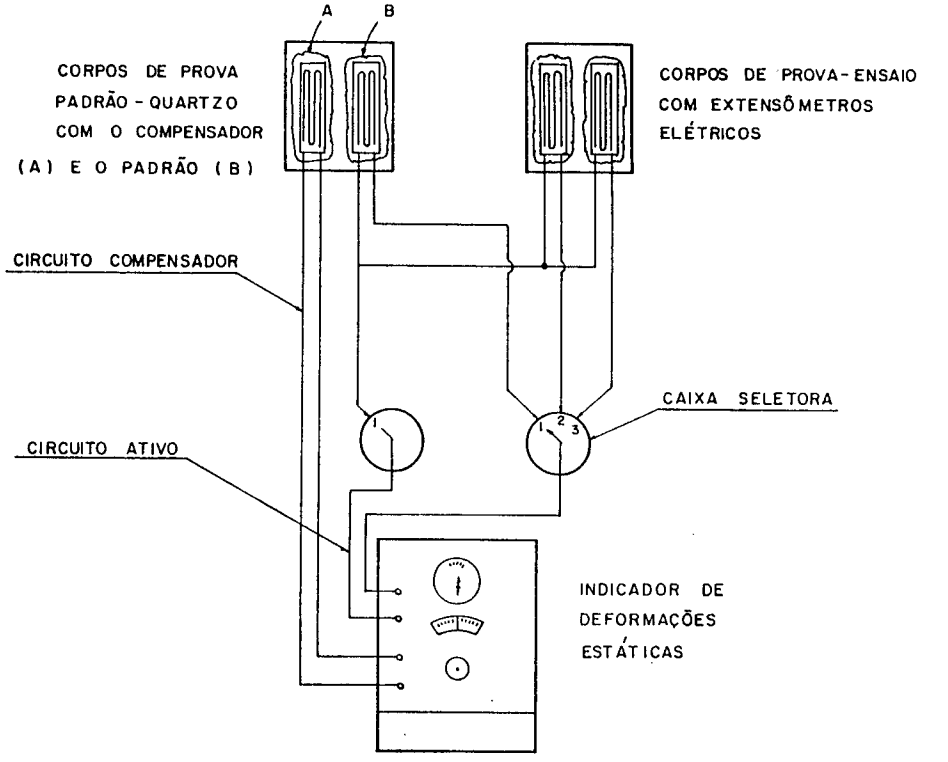


Figura 3.51 — Esquema de conexão dos extensômetros para medidas das deformações

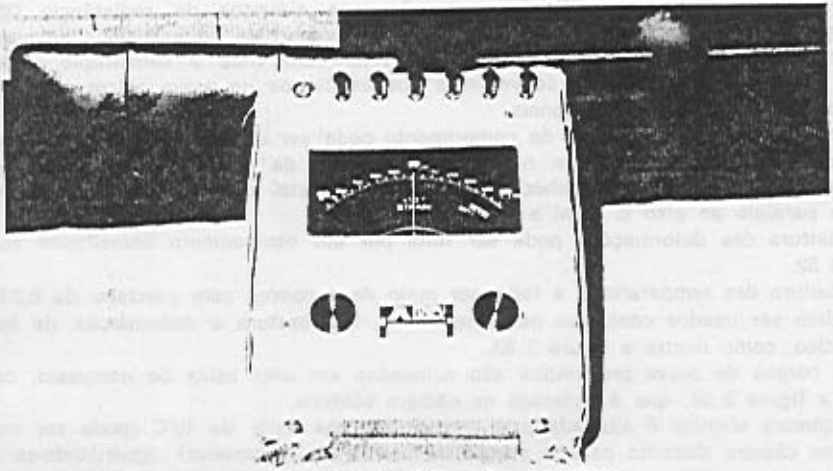


Figura 3.52 — Caixa de leitura para medições das deformações específicas

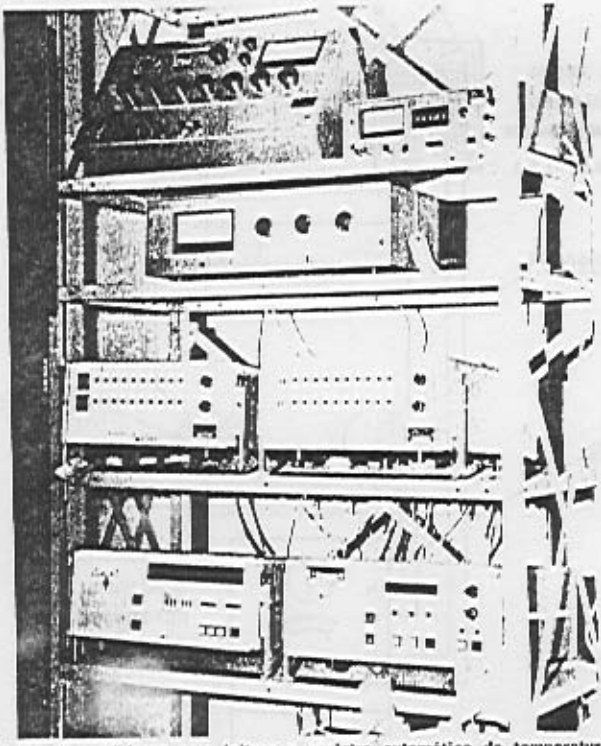


Figura 3.53 — Conjunto de medidores para leitura e registro automático de temperatura e de deformações. À esquerda acima ponte de leituras para termômetros, à direita ponte com sensibilidade de 0,01 °C. No meio, detetor de nulos, e caixas de varredura para sensores de deformação, e embaixo indicador e automatizador de leituras para sensores de deformações

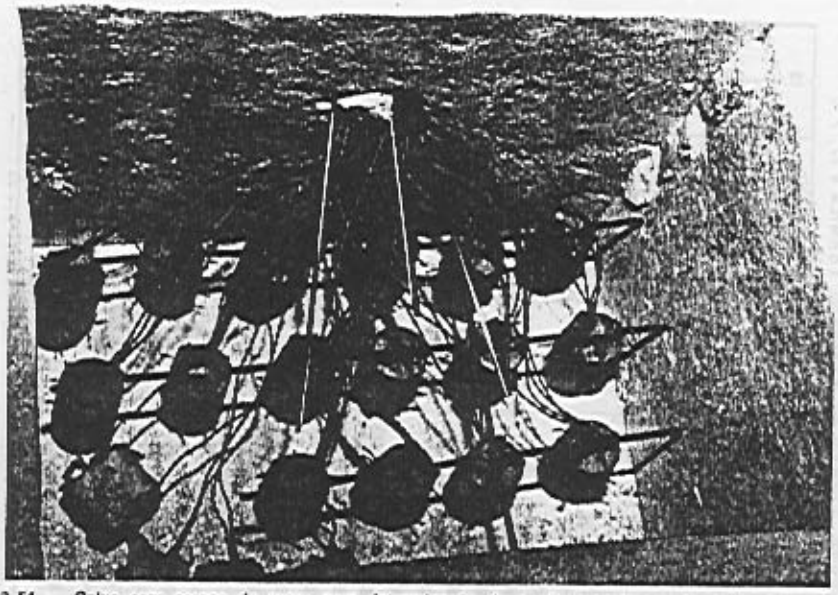


Figura 3.54 — Caixa com corpos de prova para determinação do coeficiente linear de expansão térmica de agregados

Em seguida a caixa de manuseio é colocada em uma câmara fria (com temperatura ao redor de 0°C). Esse ciclo é repetido por, no mínimo, sete vezes, sendo que podem ser feitas leituras a uma temperatura intermediária, por exemplo, ao redor de 20°C. As primeiras leituras devem ser desprezadas, devido à possível acomodação da cola usada para fixação do extensômetro ao corpo de prova.

O indicador de deformação fornece deformações específicas. A diferença entre leituras sucessivas, de um extensômetro do corpo de prova/ensaio, dividido pela diferença de temperatura, não fornece um resultado correto para o coeficiente de expansão térmica, mesmo quando se utiliza como compensador um corpo de prova com coeficiente de expansão térmica desprezível. Isto ocorre devido a influências de variação na resistência dos fios (com a variação de temperatura), diferenças nos contatos, variação da umidade.

O procedimento adotado para correção dessas imprecisões é o uso do corpo de prova padrão, sendo que a determinação é feita por (III-XII)

$$\alpha AG = \frac{(\alpha \text{ Padrão}) \cdot \Delta\theta - \Delta P + \Delta E}{\Delta\theta} = \quad \text{(III-XII) onde:}$$

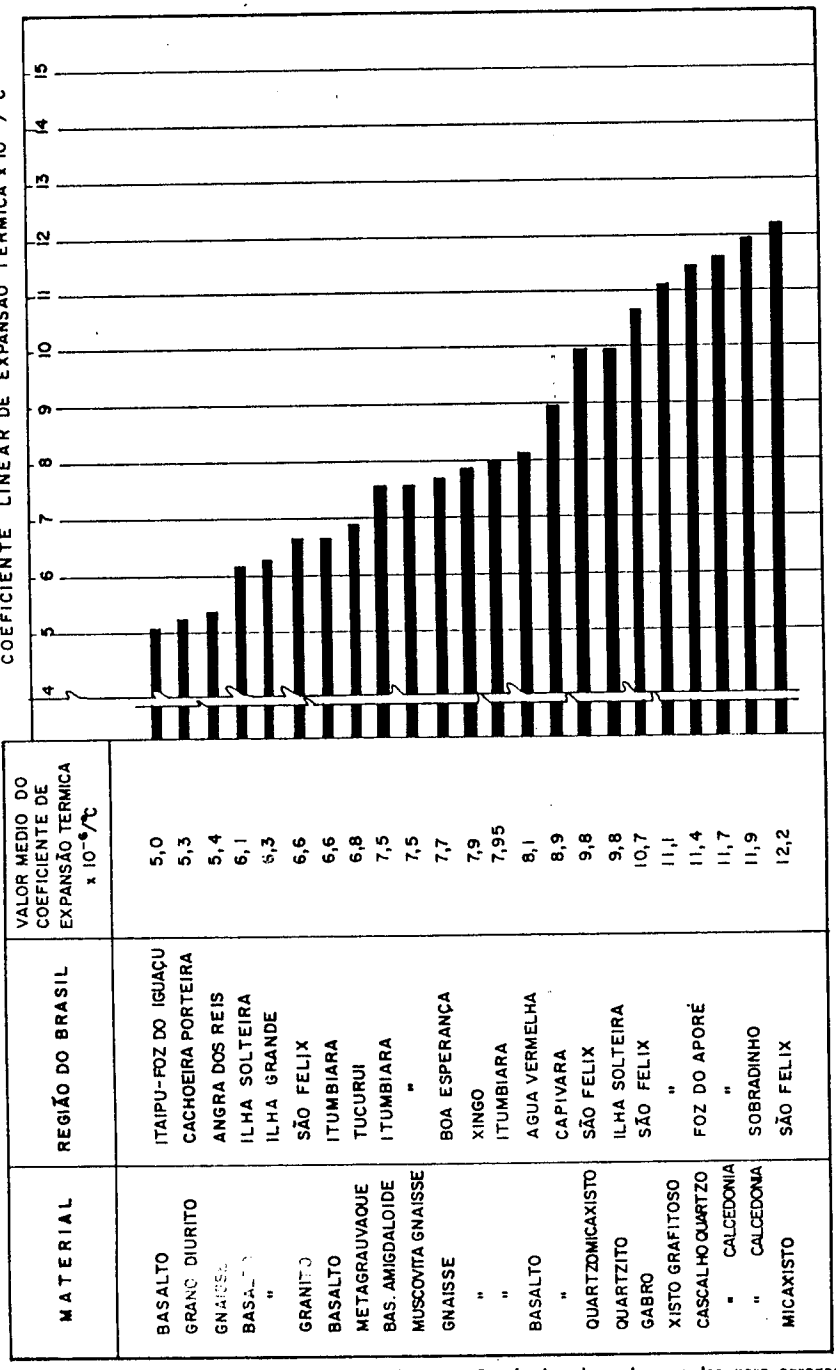
αAG = coeficiente linear de expansão térmica do agregado ($\times 10^{-6}$/°C)

α Padrão = coeficiente linear de expansão térmica do padrão (Quartzo = 7,74 $\times$ 10^{-6}/°C -eixo C)

$\Delta\theta$ = diferença de temperatura, nas leituras sucessivas (°C)

ΔP = diferença de deformações específicas, entre leituras sucessivas pelo extensômetro do padrão

ΔE = diferença de deformações específicas, entre leituras sucessivas pelo extensômetro do corpo de prova ensaio



MATERIAL	REGIÃO DO BRASIL	VALOR MEDIO DO COEFICIENTE DE EXPANSÃO TERMICA x 10^{-6}/°C
BASALTO	ITAIPU-FOZ DO IGUAÇU	5,0
GRANO DIURITO	CACHOEIRA PORTEIRA	5,3
GNAISSE	ANGRA DOS REIS	5,4
BASALTO	ILHA SOLTEIRA	6,1
"	ILHA GRANDE	6,3
GRANITO	SÃO FELIX	6,6
BASALTO	ITUMBIARA	6,6
METAGRAUVAQUE	TUCURUI	6,8
BAS. AMIGDALOIDE	ITUMBIARA	7,5
MUSCOVITA GNAISSE	"	7,5
GNAISSE	BOA ESPERANÇA	7,7
"	XINGO	7,9
"	ITUMBIARA	7,95
BASALTO	AGUA VERMELHA	8,1
"	CAPIVARA	8,9
QUARTZOMICAXISTO	SÃO FELIX	9,8
QUARTZITO	ILHA SOLTEIRA	9,8
GABRO	SÃO FELIX	10,7
XISTO GRAFITOSO	"	11,1
CASCALHO QUARTZO	FOZ DO APORÉ	11,4
" CALCEDONIA	"	11,7
" CALCEDONIA	SOBRADINHO	11,9
MICAXISTO	SÃO FELIX	12,2

Figura 3 55 — Conjunto de valores de coeficientes de expansão térmica de rochas usadas para agregados

Pode ser considerado o exemplo abaixo:

	Leitura N	Leitura N + 1	Diferença
Temperatura $\Delta\theta$	50°C	0°C	$\Delta\theta = -50°C$
Extensômetro Padrão ΔP	31475×10^{-6}	31435×10^{-6}	$\Delta P = -40 \times 10^{-6}$
Extensômetro Ensaio ΔE	20965×10^{-6}	21060×10^{-6}	$\Delta E = +95 \times 10^{-6}$

$$\alpha AG = \frac{[7{,}74 \times (-50) - (-40) + (95)] \times 10^{-6}}{-50} = \frac{(-387 + 135) \times 10^{-6}}{-50} =$$

$$= \frac{-252}{-50} \times 10^{-6} = 5{,}04 \times 10^{-6}$$

$$\alpha = 5{,}04 \times 10^{-6}/°C$$

Nota: a deformação específica é designada em inglês **strain**, assim uma deformação específica igual a 10^{-6} é designada **microstrain**, símbolo **μstrain**.

A figura 3.55 fornece um conjunto de valores [3.60] [3.66] [3.67] [3.68] [3.69] de coeficiente de expansão térmica de alguns materiais, mostrando que são encontrados valores entre $3 \times 10^{-6}/°C$ e $16 \times 10^{-6}/°C$.

O calor específico do agregado é determinado pelo método das misturas [3.70] [3.71].

Para execução do ensaio há necessidade de um calorímetro para acomodar a amostra (termômetro com sensibilidade de 0,03°C e faixa de leitura entre 0°C e 70°C), sistema para banhos quente (60 ± 0,5°C) e frio (2 ± 0,5°C), cesto de imersão, balança com acuracidade de 0,1%, cronômetro com sensibilidade de 1 segundo e corpo padrão.

As dimensões da amostra e do vaso calorimétrico devem ser compatíveis, podendo ser usado um vaso de vácuo (garrafa térmica) semelhante ao do calorímetro usado para concreto e citado no item 7.9.2.

O calorímetro deve ser colocado em sala à temperatura constante, até se obter o equilíbrio, sendo que se deve determinar o equivalente em água do calorímetro, obtendo-se uma curva do tipo mostrado na figura 3.56.

O calor específico do agregado é determinado colocando-se a amostra (pesada na condição S.S.S.) em um dos banhos, sendo que a temperatura é registrada minuto a minuto. Corpos de prova quentes e frios devem ser ensaiados alternadamente, evitando que a temperatura da água do calorímetro se torne muito diferente da sala, de modo que as perdas sejam mínimas.

O calor específico é calculado por (III-XIII)

$$CAG = \frac{(M_1 + Me)\ C_1\ \theta_1 - (M_1C_1 + MbC_1)\theta}{Mb\theta} \quad \text{(III-XIII)}$$

sendo que o equivalente em água do calorímetro é determinado por (III-XIV)

$$Me = \frac{[C_p M_p \theta_p - C_1 M_1\theta + C_p M_p\theta]}{C_1\ \theta_1} M_1 \quad \text{(III-XIV) onde}$$

Me = equivalente em água do calorímetro (g)
C_p = calor específico do padrão (cal/g°C)

M_1 = massa da água colocada no calorímetro (g)
C_1 = calor específico da água = 1,000 cal/g°C
θ_1 = variação da temperatura (°C) da água, corrigida pelo gráfico da figura 3.56.
M_p = massa do padrão (g)
θ = variação da temperatura (°C) do padrão corrigido pela figura 3.56.
C_h = calor específico do cesto de imersão (cal/g°C)
M_h = massa do cesto de imersão (g)
CAG = calor específico do agregado (cal/g°C)

A figura 3.57 fornece um conjunto de valores de calor específico de alguns agregados brasileiros.

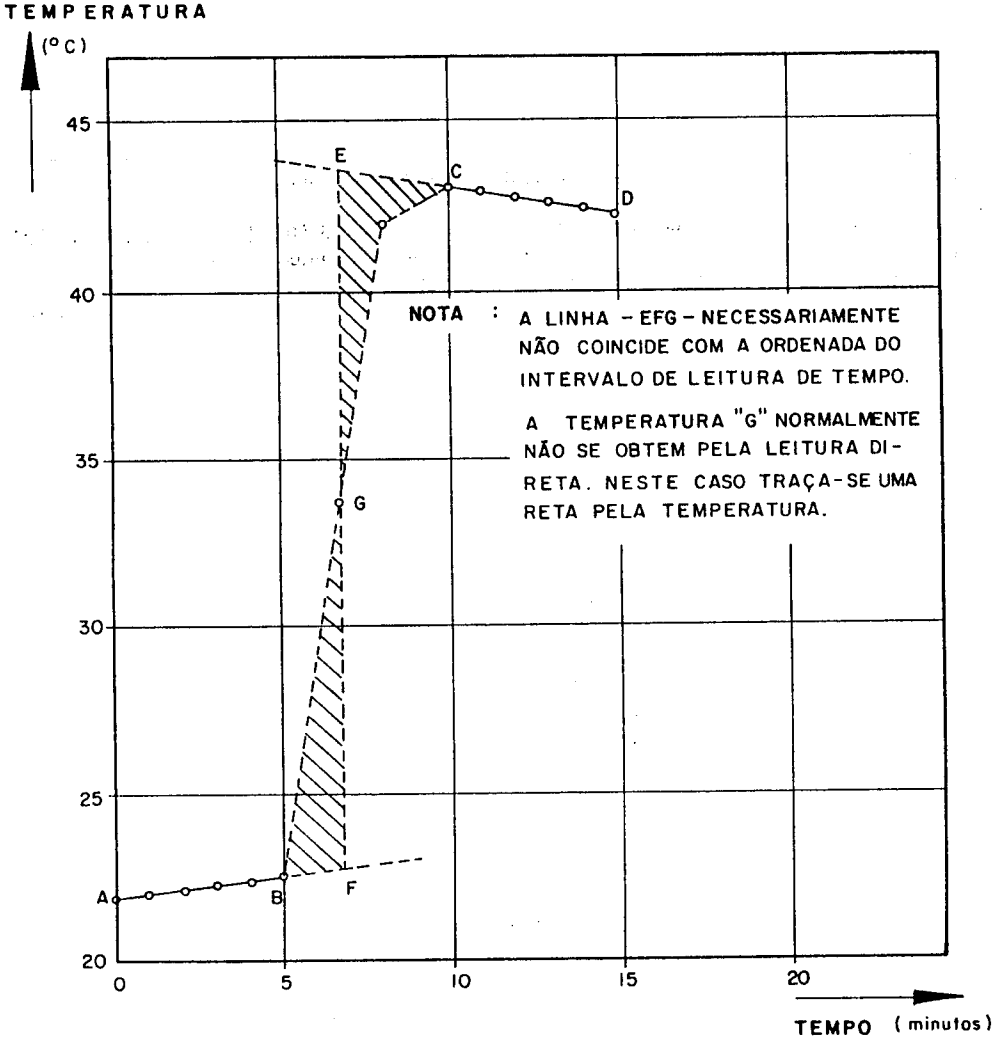
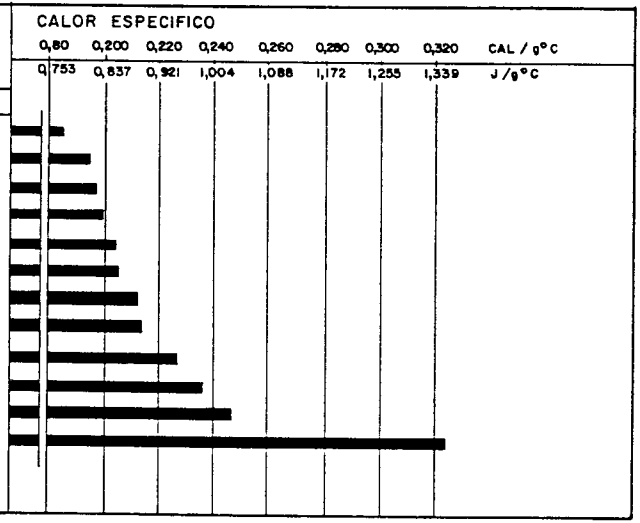


Figura 3.56 — Registro tempo — temperatura, para determinação do calor específico

Figura 3.57 — Conjunto de valores de calor específico de agregados

MATERIAL	REGIÃO DO BRASIL	VALOR MÉDIO DO CALOR ESPECIFICO	
		CAL/g°C	J/g°C
GNAISSE	ANGRA DOS REIS	0,185	0,753
BASALTO	TUCURUI	0,195	0,774
HEMATITA	ANGRA DOS REIS	0,197	0,824
METAGRAUVAQUE	TUCURUI	0,200	0,837
GNAISSE	BOA ESPERANÇA	0,204	0,854
BASALTO	ITAIPU	0,205	0,858
GNAISSE	EMBORCAÇÃO	0,213	0,891
BASALTO	ILHA GRANDE	0,214	0,895
CASCALHO DE CALCEDONIA	B. MINEIRO	0,227	0,950
CALCARIO	ITABERA	0,236	0,987
CASCALHO DE CALCEDONIA	ILHA GRANDE	0,247	1,033
ARGILA EXPANDIDA	——	0,326	1,364



Os agregados basálticos apresentam "K_t" (ver expressão III-XI) ao redor de 0,0188 J/cm.s °C (0.00450 cal/cm × s × °C e os seixos rolados de calcedônia ao redor de 0,0305 a 0,046 J/cm.s °C (0,00730 a 0,01100 cal/cm × s × °C). Observa-se que a condutividade térmica das calcedônias é fator preponderante no dimensionamento das instalações industriais para refrigeração do agregado ou do concreto.

Como citado anteriormente, sendo a condutividade térmica dos basaltos praticamente a metade da condutividade térmica das calcedônias nota-se que os agregados de calcedônia trocam calor mais facilmente. Isso é relevante no comportamento do concreto.

3.2 Cimentos

3.2.1 Generalidades

A utilização de materiais aglomerantes não é recente. As ruínas egípcias mostram que já há alguns séculos A.C. esse povo empregava cimento como aglomerante entre os blocos de pedra de seus monumentos. As análises mostraram que o cimento usado era um gesso impuro cozido e calcário calcinado. A cal viva assim formada misturava-se com água, areia e pedra partida, dando origem a um tipo de concreto.

Os gregos e romanos usavam calcário calcinado e posteriormente adicionavam cal, água e pedras. Esses foram os primeiros concretos da história.

O primeiro [3.72] cimento natural de que se tem notícia foi aquele beneficiado na Inglaterra por James Parker, que o patenteou em 1796 como "cimento natural", e que posteriormente foi também chamado de "cimento romano". Esse cimento era preparado pela calcinação de nódulos obtidos em depósitos de cascalhos. Esses nódulos davam um cimento com propriedades hidráulicas. Devido ao elevado teor de argila esse material era calcinado a uma temperatura mais alta do que a que se usava para o cozimento da cal, porém, sem causar a vitrificação.

Simultaneamente, na mesma época (1796), um engenheiro militar — Lesage — produziu um cimento, semelhante ao obtido por Parker, com material encontrado em Boulogne Sur-Mer, na França.

Em 1822, James Frost obteve, na Inglaterra, a patente para um cimento artificial denominado "cimento britânico".

Em 15 de dezembro de 1824, Joseph Aspdin, obteve a patente de fabricação de um novo tipo de cimento, que se denominou cimento Portland, devido à semelhança de cor com uma rocha proveniente da Ilha de Portland. William Aspdin, filho de Joseph, associado a outros, levou adiante a fabricação desse cimento, às margens do Tâmisa, sendo que, pela primeira vez, em 1828, esse cimento foi usado na construção de um túnel.

Em 1845, Isaac Charles Johnson deu um avanço maior à fabricação do cimento Portland, no que se refere à clinquerização.

O cimento Portland de alta resistência inicial [3.73] desenvolvido inicialmente na Áustria entre 1912-1913, foi usado em 1918, durante a 1.ª Guerra Mundial.

Os estudos para a produção de cimento de baixo calor de hidratação foram desenvolvidos na década de 20 para a construção da barragem de Boulder (Hoover) nos Estados Unidos. Provavelmente a primeira utilização [3.72] tenha ocorrido durante a construção da barragem de Morris (anteriormente Pine Canyon) Passadena, na Califórnia.

Com o intuito de determinar o tempo despendido para que uma pasta começasse a enrijecer-se, o engenheiro francês, de Ponts e Chausses — J. L. Vicat, em 1812, começou a pesquisar os ensaios, dando origem ao aparelho de Vicat [3.74] e, por conseguinte, o primeiro dos ensaios sobre cimento.

No Brasil, vários e detalhados estudos sobre cimento têm sido executados, principalmente a partir do início dos anos 60 [3.42], sendo que mais recentemente um impulso maior foi dado para a elaboração dos métodos de ensaios procurando abranger todas as propriedades dos cimentos.

Por cimento pode ser entendido um material com propriedades aglutinantes e, portanto, com capacidade de unir fragmentos minerais formando uma massa compacta.

O cimento, portanto, tem a propriedade de reagir quimicamente com a água dando, em princípio, uma massa plástica, perfeitamente moldável, que endurece com o tempo, adquirindo altas resistências.

O cimento Portland é produzido pela pulverização de clínquer, constituído essencialmente de silicatos de cálcio hidráulicos e, normalmente, contendo uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

3.2.2 Tipos de Cimentos

A Associação Brasileira de Normas Técnicas estabelece características exigíveis aos vários tipos de cimentos utilizados correntemente no país, destacando-se:

3.2.2.1 Cimento Portland comum [3.75]

Cimento portland comum é um aglomerante hidráulico, resultante da moagem do clínquer com pequena quantidade de sulfato de cálcio dihitratado, $SO_4Ca.2\,H_2O$.

O clínquer portland é obtido pelo aquecimento até 1.450°C de uma mistura definida e homogênea de substância, contendo óxidos ácidos como SiO_2, Al_2O_3 e Fe_2O_3 e óxido básico como CaO, que reagem quimicamente, resultando nos seus principais constituintes:

Silicato Tricálcico:	$3CaO.SiO_2$	abreviadamente C_3S
Silicato Bicálcico:	$2CaO.SiO_2$	abreviadamente C_2S
Aluminato Tricálcico:	$3CaO.Al_2O_3$	abreviadamente C_3A
Tetracálcio Aluminoferrita:	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	abreviadamente C_4AF

Na realidade, os constituintes mineralógicos do clínquer não são tão simples, pois não aparecem puros, sua rede cristalina contém outros elementos como álcalis, magnésio, fósforo, titânio etc.

Do ponto de vista de resistência, o C_3S é o constituinte mais importante do cimento, pois reage rapidamente com a água, atingindo grande resistência em pouca idade, crescendo lentamente após o primeiro mês.

A reação do C_2S é mais lenta, apresentando pequena resistência até sete dias e aumentando rapidamente depois de um mês.

Além de um ano, os dois silicatos revelam resistência da mesma ordem de grandeza.

Este fato deve-se à estrutura muito mais compacta do C_2S, pois a do C_3S é menos perfeita e menos densa com bastante vazios. O C_3A e o C_4AF são de pouco interesse no desenvolvimento das resistências, pois contribuem fracamente para a resistência do cimento em qualquer idade.

Todos os compostos presentes no clínquer são anidros, porém, quando postos em contato com a água eles reagem, dando origem a um novo sistema de compostos hidratados estáveis.

Estas reações são exotérmicas, dependendo dos constituintes mineralógicos presentes a quantidade de calor que é liberada.

Lerch e Bogue [3.76] determinaram experimentalmente as quantidades de calor liberados durante a hidratação completa dos constituintes puros, que se seguem:

C_3S	502,08	J/g	120	cal/g
C_2S	259,41	J/g	62	cal/g
C_3A	866,09	J/g	207	cal/g
C_4AF	418,4	J/g	100	cal/g

Logo, a contribuição devida a cada um dos quatro componentes é maior para o C_3A seguindo-se sucessivamente C_3S, C_4AF e C_2S.

Quanto à resistência química ao ataque corrosivo, o hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$ é o elemento mais sensível, pois é dissolvido pela água e arrastado através dos poros. Este processo de dissolução aumenta a porosidade da pasta endurecida e com ela sua permeabilidade, com o que acelera a corrosão de embutidos metálicos e diminui a resistência mecânica.

O C_2S e o C_4AF conferem maior resistência química do que o C_3S e o C_3A, pois na reação de hidratação do C_3S surge 49% de $Ca(OH)_2$ enquanto do C_2S a quantidade de $Ca(OH)_2$ é de 21% e o C_3A reage rapidamente com a água aparentemente só em presença de solução saturada de cal, sem formação de hidróxido de cálcio.

Durante a hidratação do C_4AF não é precipitado o $Ca(OH)_2$.

Portanto, verifica-se que na hidratação a quantidade de $Ca(OH)_2$ liberada cresce na ordem C_3S e C_2S, na proporção de 1,5 para 0,5.

Outro ponto importante é o papel dos aluminatos na corrosão.

O C_3A em contato com a água reage rapidamente e solidifica em minutos. Este fenômeno é evitado com adição de gesso, com o que se evita as variações de volume originadas por um aquecimento e resfriamento rápidos.

Há, entretanto, sobra de aluminato anidro ou aluminato de cálcio hidratado que só reage com sulfato de cálcio depois de endurecido ou com a água contendo sulfato, que se põe em contato posteriormente dando origem à formação da etringita que se dá com grande aumento de volume.

O volume total dos compostos hidratados é menor que a soma dos volumes de cimento anidro e água, sendo uma causa de aparecerem poros nos cimentos hidratados.

Durante a hidratação, a pasta de cimento absorve água para encher esses poros.

Outra variação de volume inevitável é a originada pela absorção de CO_2 do ar, dando-se a carbonatação que é acompanhada do que se chama contração por carbonatação, que pode provocar fissuras capilares.

Além das variações de volume devidas à secagem e umedecimentos alternados e devidas às variações de temperatura, as variações de volume podem ser causadas por cimento com componentes expansivos. A expansão pode ser originada por um teor excessivo em magnésio ou cal livre.

A origem de expansão, devida à magnésia, é baseada na Periclase (cristais relativamente grandes) que cristaliza quando o clínquer é esfriado lentamente.

O cimento Portland comum é, segundo a ABNT, subdividido em três classes, caracterizadas pelos níveis de resistência aos 28 dias, a saber:

— CP-250 (ABNT) — Resistência aos 28 dias, igual ou superior a 25 MPa
— CP-320 (ABNT) — Resistência aos 28 dias, igual ou superior a 32 MPa
— CP-400 (ABNT) — Resistência aos 28 dias, igual ou superior a 40 MPa

O cimento Portland comum equivale ao cimento tipo I (ASTM) [3.77] e é um cimento para uso comum, quando não se requer propriedades específicas.

3.2.2.2 Cimento Portland de alta resistência inicial (ARI) [3.78]

É o cimento Portland que permite obter resistência elevada, em curto período de tempo, geralmente uma semana ou menos. A velocidade de endurecimento não deve ser confundida com a velocidade pega, pois na realidade os tempos de pega não diferem muito.

A velocidade de endurecimento mais elevada, nos cimentos de alta resistência inicial (ARI), é conseguida por um teor mais elevado de C_3S e pela moagem do clínquer a finuras mais altas.

3.2.2.3 Cimento Portland de moderado calor de hidratação [3.79]

A elevação da temperatura no interior de uma massa de concreto, devida ao calor desprendido pela hidratação do cimento, pode resultar em séria fissuração. Por esse motivo, é conveniente limitar a velocidade da hidratação do cimento usado.

Quanto menores os teores dos compostos C_3S e C_3A, que se hidratam mais rapidamente (ver item 3.2.2.1 e [3.76]), menor e mais lento o desprendimento de calor desses cimentos em relação ao cimento Portland comum sem, entretanto, causar influência sobre a resistência final.

3.2.2.4 Cimentos Portland resistentes aos sulfatos [3.79]

Neste item estão englobados os cimentos Portland de moderada resistência aos sulfatos (MRS) e de alta resistência aos sulfatos (ARS).

Nas reações de hidratação do cimento, particularmente no processo de pega [3.1] [3.80] [3.81], é importante a reação entre o C_3A e o gesso ($CaSO_4\ 2H_2O$) devido a conseqüente formação do sulfo-aluminato de cálcio.

No cimento endurecido o aluminato tricálcio hidratado pode reagir com algum sulfato procedente do exterior do concreto, de forma semelhante a anterior. O resultado dessa reação é o sulfo-aluminato tricálcico que se forma no interior da estrutura da pasta hidratada. Essa reação pode provocar expansões. Um outro tipo de reação é a da troca de base entre o hidróxido de cálcio e os sulfatos, resultando na formação do gesso, também com expansão.

Essas reações são conhecidas como ataque por sulfatos, sendo que os sais mais ativos são os de sódio e magnésio. O ataque por sulfatos é acelerado pela ciclagem alternada de molhagem-secagem, o que pode ocorrer em estruturas marítimas sujeitas a flutuações da maré.

Para inibir esse ataque, uma das soluções é utilizar cimentos Portland resistentes aos sulfatos, que possuem baixo teor de C_3A. Aparentemente, o efeito do sulfato de cálcio sobre o cimento hidratado é menor à medida que se reduz o módulo de alumina/ferro (Relação Alumínio/Ferro) [3.1].

O baixo teor de C_3A e relativamente o de C_4AF, dos cimentos resistentes aos sulfatos, significa um alto teor de silicatos.

3.2.2.5 Cimentos aditivados (escoriados ou compostos)

Cimento Portland aditivado é uma mistura de cimento Portland comum com certos produtos, como materiais pozolânicos e escórias de alto-forno. Essas misturas são efetuadas após o cozimento do aglomerante simples, apresentando algumas propriedades interessantes.

As informações sobre os materiais pozolânicos são abordados no item [3.3].

A escória é um resíduo de fabricação de ferro gusa obtido em quantidade aproximadamente igual àquela do ferro gusa produzido.

O minério de ferro é constituído por uma mistura de óxido de ferro com outras substâncias ricas em cálcio, sílica e alumínio que constituem a ganga. O minério, o carvão e o fundente (geralmente calcário) são lançados na parte superior do alto-forno e esta mistura, descendo lentamente, atinge a temperatura da ordem de 1500°C. Na parte inferior do alto-forno são coletadas duas substâncias diferentes, com densidades distintas: o ferro fundido (7 t/m³) e um material mais leve chamado escória (2,7 t/m³).

A escória é, então, o material obtido pela combinação da ganga com fundentes apropriados e cinzas do carvão, sendo sempre um subproduto industrial.

A escória é separada do gusa quando líquida e resfriada. Quando o resfriamento é feito lentamente, como por exemplo ao ar, os óxidos componentes da escória se cristalizam e perdem as características hidráulicas, não sendo, portanto, usados na indústria cimenteira.

Quando o resfriamento se dá de maneira rápida, pela imersão ou aspersão de água ou vapor, a escória se vitrifica e seus componentes não perdem as características hidráulicas. Este produto não cristalizado é moído à finura adequada e usado como adição ao cimento Portland.

As escórias granuladas diferem das pozolanas, pois têm atividade hidráulica latente (potencial, isto é, quando moídas e misturadas com água, são capazes de dar pega e endurecer por si só, dado que no seu estado anidro contém compostos análogos ao do clínquer de cimento Portland, os quais, por mecanismos de hidratação também análogos, dão lugar a compostos hidratados aglutinantes.

São cimentos, mas, que reagem com extrema lentidão quando aplicados isoladamente.

A sua inércia natural pode cessar sob a influência catalítica de um meio com pH da ordem de 12. Para iniciar a reação basta, portanto, adicionar à água de amassamento uma pequena quantidade de soda, cal ou cimento Portland.

A composição química média das escórias granuladas de alto-forno, empregadas pela indústria cimenteira, é variável, mas está compreendida entre os seguintes valores [3.82]:

SiO_2	25 a 35%
Al_2O_3	12 a 20%
CaO	35 a 50%
MgO	1 a 10%

Vários métodos têm sido usados para prever a reatividade ou hidraulicidade de escórias granuladas para utilização como um componente do cimento, sendo que vários índices calculados a partir dos resultados de análise química são propostos para indicar a qualidade da escória.

As escórias de alto-forno, devido a sua composição química, podem ter caráter tanto ácido como básico.

As escórias granuladas de caráter básico se comportam como cimentos de endurecimento muito lento, enquanto as de caráter ácido são análogas a um material pozolânico.

A escória possui alguns sulfetos sob a forma de sulfeto de cálcio, ferro e manganês.

O sulfeto, em presença de umidade e certas condições de pH, pode dar origem ao ácido sulfídrico que, por sua vez, em contato com o ferro libera hidrogênio que penetra na estrutura do aço, provocando a fragilização do mesmo.

A escória, quando usada em concreto armado ,deve ter um teor máximo de enxofre limitado, sendo que no concreto protendido em contato com armadura sob tensão elevada, esse teor deve ser minorado.

Os cloretos, que podem aparecer na escória em virtude de esfriamento ou granulação com água do mar, devem também ser limitados.

A microscopia fornece informações a cerca da natureza das escórias, seu grau de vitrificação e cristalização, a natureza mineralógica das inclusões cristalinas, a morfologia dos grãos. a compacidade etc.

A técnica de difratometria de raios X dá também indicação do grau de vitrificação de uma escória e a sua natureza mineralógica.

Em geral, os ensaios de resistências mecânicas são os mais seguros e definitivos para a verificação das propriedades hidráulicas das escórias [3.83].

O cimento Portland de alto-forno [3.84] é obtido pela moagem de clínquer de cimento Portland e escória de alto-forno com adição eventual de sulfato de cálcio.

Dependendo da proporção de escória que pode variar desde 10 até 90%, o cimento com escória recebe nomes diversos — cimento Portland de escória (teor aproximado de escória $\leqslant$ 20%), cimento de ferro Portland (20% a 35%), cimento Portland de alto-forno (25% a 65%.) [3.84]; cimento metalúrgico (teor $\leqslant$ 85%) cimento super-sulfatado (teor $\leqslant$ 90%).

Os cimentos de alto-forno, dependendo ainda da resistência obtida, podem ser classificados de acordo com a ABNT [3.84] em:

- AF-250 — Resistência aos 28 dias igual ou superior a 25MPa
- AF-320 — Resistência aos 28 dias igual ou superior a 32MPa

Os cimentos de alto-forno variam muito em composição e estrutura física, dependendo dos processos usados e do resfriamento da escória.

A escória pode produzir um material aglutinante de diversas maneiras. Pode ser usada juntamente com calcário, como matéria-prima, para a fabricação convencional de cimento Portland. ou através da colocação da escória granulada seca, juntamente com o clínquer de cimento Portland, em um moinho, adicionando-se gesso para controle de pega. É importante salientar que a escória tem dureza maior do que o clínquer, o que provoca algumas dificuldades na moagem conjunta.

Os cimentos Portland-pozolânico [3.85], ou cimentos pozolânicos, são aglomerantes silícicos constituídos por cimento Portland e adição de material pozolânico. Eles podem ser obtidos pela moagem íntima de uma mistura de clínquer de cimento Portland e material pozolânico ou pela mistura íntima e uniforme de cimento Portland e material pozolânico moídos separadamente.

A proporção de material pozolânico usado depende das características do clínquer e da atividade da pozolana.

3.2.2.6 Outros cimentos

Outros cimentos de uso em menor escala podem ser citados.

É o caso de cimento para alvenaria [3.86] de razoável uso em alguns países e que pode conter um ou mais dos seguintes materiais: cimento Portland, cimento Portland pozolânico, cimento de escória, cal e outras adições.

Cimento Portland branco, fabricado a partir de matérias primas, com baixos teores de óxido de ferro e óxido de manganês. Geralmente é usada a argila caulinítica juntamente com gesso ou calcário isento de impurezas. Tem também uma massa específica um pouco menor que o cimento Portland comum.

Em certa oportunidade, pode ser interessante contar com certa expansão durante o endurecimento do concreto. Nessas oportunidades pode-se usar um cimento expansivo.

O cimento expansivo é um cimento Portland que expande durante o endurecimento inicial, após a pega [3.87], pode ser obtido pela mistura de cimento Portland, com um agente expansor e um estabilizador. O agente expansor é obtido pela calcinação de uma mistura de gesso, bauxita e giz, com a formação de sulfato de cálcio e aluminato de cálcio, principalmente C_5A_3. Na presença da água esses compostos formam o sulfo-aluminato tricálcio hidratado, a etringita, que resulta em uma expansão

da pasta. O estabilizador pode ser a escória de alto-forno que reage lentamente com o excesso de sulfato de cálcio, controlando a expansão.

Outro processo consiste na moagem conjunta de clínquer de cimento Portland, clínquer de cimento aluminoso e gesso, que produz expansão decorrente da formação e sulfo-aluminato tricálcio.

Recentemente, foi desenvolvida na Califórnia outra maneira para obtenção do cimento expansivo, através da seleção e condições de clinquerização do agente expansor, resultando na formação de um sulfo-aluminato tricálcico anidro ($C_4A_3SO_3$). A expansão decorre também da formação da etringita.

O cimento aluminoso (ou de alto teor de alumina) é um outro tipo de cimento, para uso específico. É caracterizado por sua coloração escura, alta resistência inicial, elevado calor de hidratação e resistente ao ataque químico.

Contém elevado teor de alumina, e menores teores de cal e sílica que o cimento Portland.

3.2.3 Características e propriedades

As especificações para cimentos, normalmente, estabelecem limitações nas composições químicas e em certas propriedades. A compreensão e conhecimento do significado dessas propriedades é muito valiosa para interpretação dos resultados dos ensaios sobre cimentos. De uma forma geral as propriedades físicas dos cimentos devem ser usadas para avaliar as propriedades do cimento antes do concreto.

3.2.3.1 Massa específica

A massa específica do cimento, geralmente, não é um indicador da qualidade do cimento, a menos que este se encontre misturado ou contaminado por outro material. É, entretanto, usada para efeitos de proporcionamento e dosagem e se faz necessária para a execução da medida da superfície específica.

A massa específica é determinada [3.88] [3.89] [3.90] pelo deslocamento de um líquido (no qual o cimento não se dissolve) em um frasco volumétrico padrão.

O frasco volumétrico é o de Le Chatelier, mostrado na figura 3.58. A balança usada deve ter a acuracidade de 0,1% como mostrado na figura 3.44.

O líquido usado deve ser livre de água ou elementos voláteis. Normalmente é usado o querosene [3.89], [3.90], sendo que a ABNT [3.88] indica o xilol (xileno). Entretanto, o uso indiscriminado de um ou outro pode levar a resultados ligeiramente distintos, como verificado por estudos interlaboratoriais, programados pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) e citados nas referências [3.91] a [3.95] e que se resume na figura 3.59.

Observa-se que a massa específica, determinada com querosene apresenta resultados inferiores à obtida pelo uso do xilol e uma reprodutibilidade pior.

A determinação da massa específica é feita pela colocação de uma certa massa dentro do frasco de Le Chatelier, preenchido com o líquido até a leitura inicial. Após a colocação do cimento o frasco é movimentado de modo a liberar todo ar. Faz-se a leitura final e a massa específica é calculada por (III-XV):

$$\gamma = \frac{\text{Massa de cimento (g)}}{\text{Volume deslocado (cm}^3\text{)}} \quad \text{(III-XV)}$$

sendo que o volume deslocado é a diferença das leituras final e inicial no frasco.

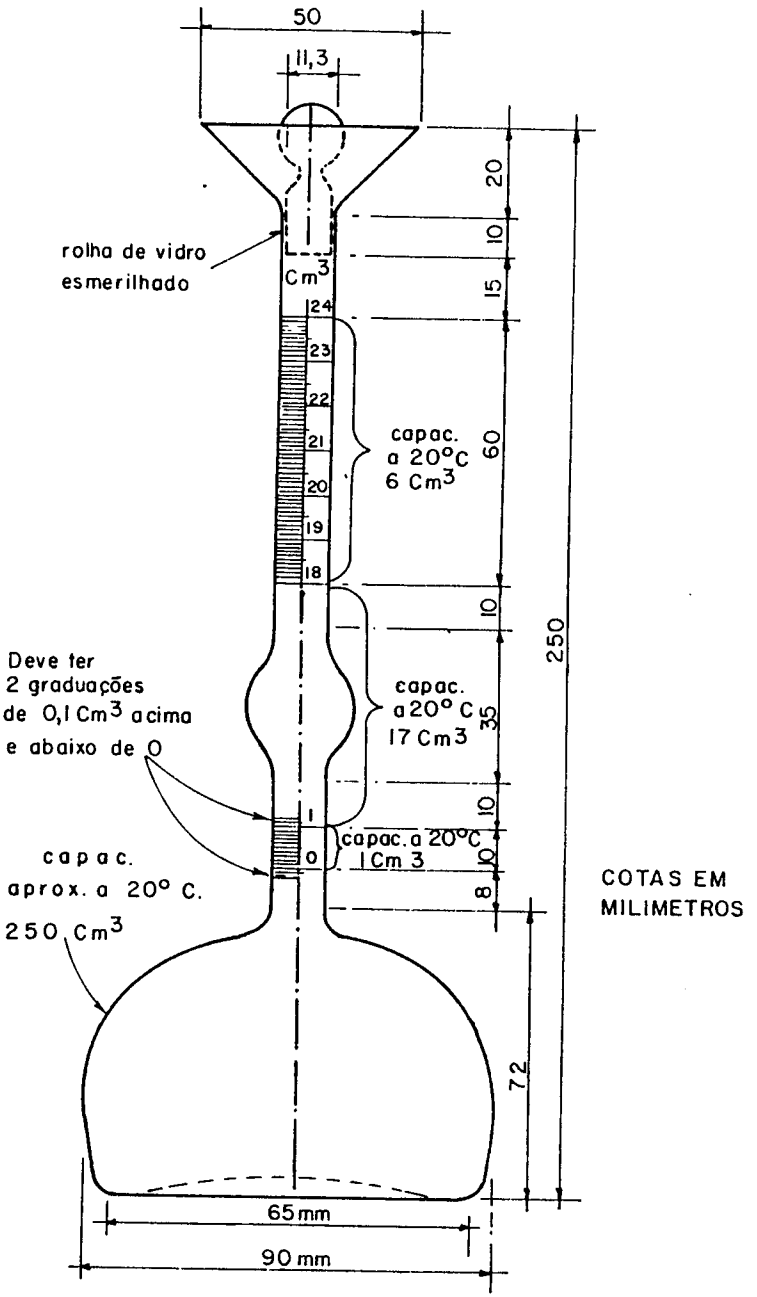


Figura 3.58 — Frasco volumétrico de Le Chatelier

PARAMETRO	UNIDADE	MASSA ESPECIFICA			
LIQUIDO USADO		XILOL (XILENO)		QUEROSENE	
AMOSTRA		A	B	A	B
Nº DE LABORATORIOS		35	35	32	32
VALOR MEDIO ($\bar{X}$)	g/cm3	3,08	3,06	3,07	3,05
DESVIO PADRÃO (S)	g/cm3	0,03	0,04	0,05	0,06
COEF. DE VARIAÇÃO (V)	%	1,04	1,17	1,51	1,92
COMPOSIÇÃO DA AMOSTRA (% EM PESO)					
CLINQUER	%	88,4	47,1	88,4	47,1
ESCORIA	%	11,3	52,2	11,3	52,2
CALCARIO	%	0,1	0,4	0,1	0,4
GESSO	%	0,2	0,3	0,2	0,3

Figura 3.59 — Resultados de ensaios interlaboratoriais, influência do líquido na determinação da massa específica de cimentos

3.2.3.2 Finura

A pulverização do clínquer até uma granulometria desejada, através da moagem, permite aumentar a característica aglutinante do material, de duas maneiras. Uma é de que um material mais fino tem maior condições de envolver a superfície de grãos de areia ou outro inerte que um material mais grosso, desta forma ocorre um contato mais íntimo entre componentes da argamassa. De outra forma, a reação entre o cimento e água, com cimento mais fino, ocorre mais rapidamente.

Por outro lado, para aumentar a finura do cimento há necessidade de um tempo maior na moagem, o que em outras palavras pode encarecer o produto, mas o cimento torna-se potencialmente mais resistente podendo haver compensação unitariamente. Pode-se notar que a finura tem vital importância nas propriedades do cimento, devendo então ser cuidadosamente controlada.

A finura poderia ser determinada, para efeitos de especificações, somente por peneiramento através de malhas de certas dimensões. Entretanto, esse tipo de determinação não abrange a larga faixa de valores de finura dos cimentos atuais. Desta forma, a finura pode ser obtida pela determinação da área da superfície específica.

A finura do cimento é feita, então, através de peneiramento (resíduos nas peneiras n.° 200 — 0,075 mm e n.° 325 — 0,044 mm) e da área específica, usualmente pelo permeabilímetro de Blaine ou pelo turbidímetro de Wagner.

A determinação da finura através da peneira de malha n.° 200 (0,075 mm) é feita por via seca [3.96] [3.97]. Para tanto são utilizados: balança (ver item 3.2.3.1) e peneira, de acordo com o estabelecido na figura 3.3, sendo que é de muita importância que esteja aferida.

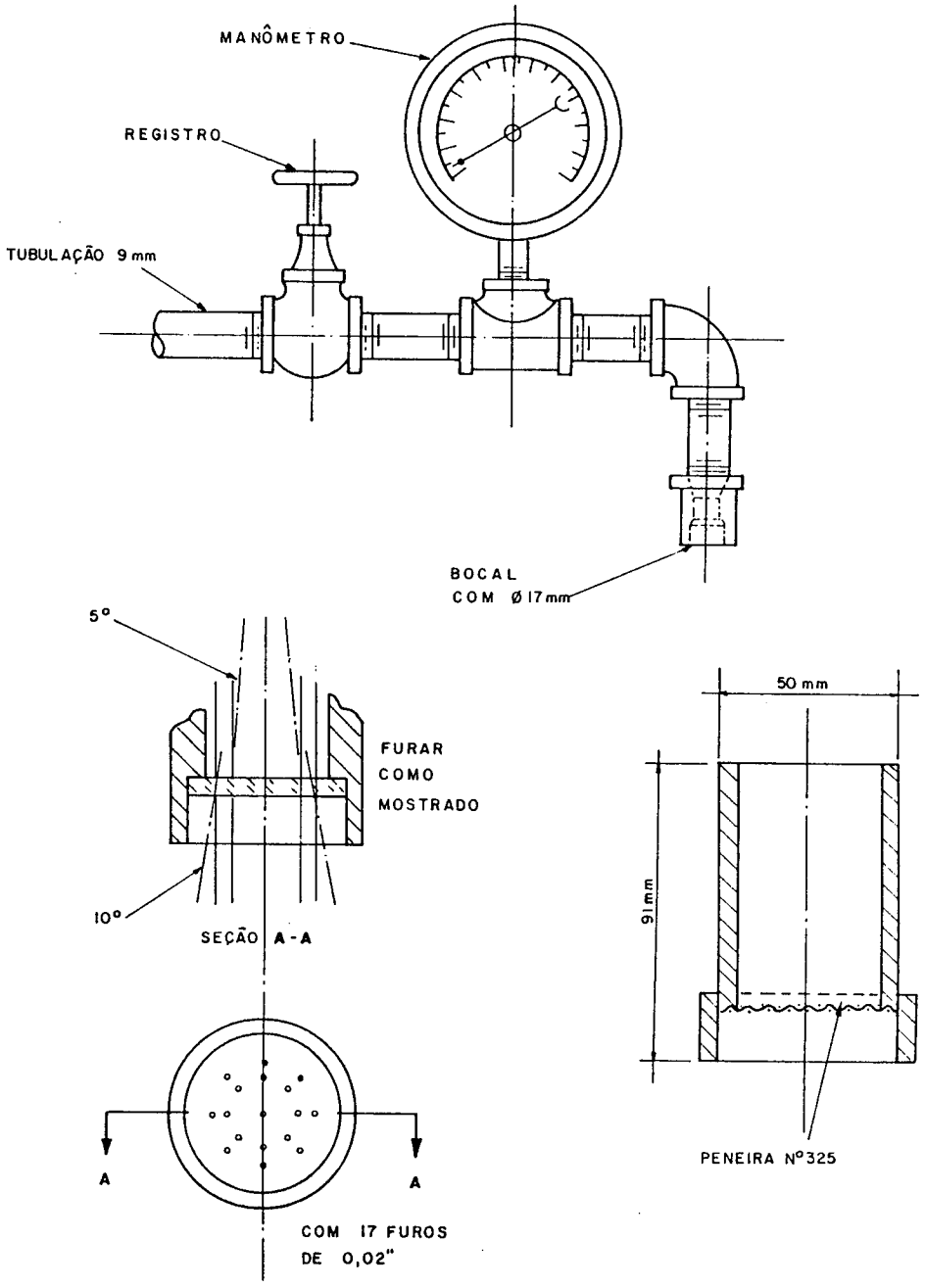


Figura 3.60 — Detalhes para peneiramento na malha de n.º 325

É comum ser efetuada uma correção devido a um fator de aferição com relação ao padrão. Uma certa massa de cimento é colocada sobre a peneira e o peneiramento é efetuado até a constância de massa da fração retida. Isto pode ser avaliado, colocando-se entre a peneira e o "fundo" um papel branco e, dando continuidade ao peneiramento, verifica-se a passagem ou não de material.

A determinação da finura é dada por (III-XVI)

$$F_{200} = 100 - \left[\frac{R_{200} \times 100}{MI} \right] \quad \text{(III-XVI) onde:}$$

F_{200} = Finura do material, expressa em porcentagem passante pela peneira n.° 200.
R_{200} = Resíduo da amostra na peneira n.° 200 (g)
MI = Massa da amostra (g)
Caso exista uma correção, o cálculo passa a ser efetuado por (III-XVII)

$$F_{200} = 100 - Rc_{200} \quad \text{(III-XVII) e}$$

$$R_{c200} = \left[\frac{R_{200} \times 100}{MI} \right] + f \quad \text{(III-XVIII) onde:}$$

f = Correção da peneira (%)

Rc = Rc_{200} = Resíduo corrigido (%)

A determinação da finura através da peneira de malha n.° 325 (0,045mm) é feita por via úmida [3.97] e [3.98]. Para tanto, é utilizada uma balança analítica, citada em 3.2.3.1, estufa, e peneira com malha n.° 325 de acordo com características na figura 3.3 e bocal aspergidor. Esta peneira é de metal não sujeito à corrosão por água e é montada em um anel como mostrado na figura 3.60. O bocal aspergidor é mostrado, também, na figura 3.61.

Da mesma forma que a citada anteriormente, a peneira deve estar calibrada.

Uma massa do material é colocada sobre a peneira n.° 325, limpa e seca, sendo que esse conjunto é posto sob o jato d'água de uma torneira ajustada para uma pressão de 10 ± 0,6 Psi (69KPa ± 1,7 KPa) através de um manômetro, como mostrado na figura 3.61. O peneiramento deve ser efetuado até se obter a constância do resíduo, após o que o material retido é seco em estufa e a finura calculada por (III-XIX) e (III-XX) analogamente à (III-XVII) e (III-XVIII)

$$Rc_{325} = \left[\frac{R_{325} \times 100}{MI} \right] + f \quad \text{e} \quad \text{(III-XIX)}$$

$$F_{325} = 100 - Rc_{325} \quad \text{III-XX}$$

A finura de material em pó, como no caso dos cimentos, é comumente determinada através do permeabilímetro ao ar, rotineiramente chamada finura Blaine.

O princípio de funcionamento do permeabilímetro baseia-se na resistência de uma camada de material com porosidade e altura conhecida, à passagem de um fluxo de gás (ou ar simplesmente), em correspondência com a superfície específica desse material.

Esse método foi inicialmente desenvolvido por Lea e Nurse [3.99] [3.100], em 1939, em continuação e adaptação ao trabalho de Carman [3.101] [3.102] [3.103] sobre o fluxo de líquidos através de um pó mais grosso que o cimento.

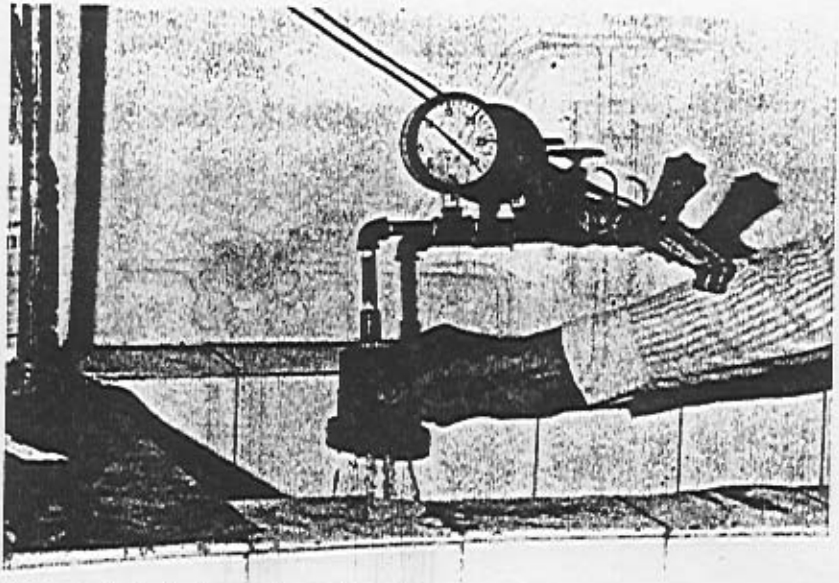


Figura 3.61 — Bocal pulverizador, manômetro (ajustado para 10 psi) e peneira n.º 325, durante a execução do ensaio de finura (pela n.º 325)

No aparelho desenvolvido por Lea e Nurse o fluxo de ar é observado por um medidor de fluxo, constituído por um capilar colocado em circuito com um manômetro. Desde que o capilar esteja calibrado, o fluxo de ar pode ser mantido através da queda de pressão, observada pelo capilar e medida no manômetro. A figura 3.62 de [3.104] ilustra o equipamento.

A camada de cimento compactado proporciona uma resistência ao fluxo de ar, o que provoca uma queda da pressão através da câmara compactada, e isso é medido pelo manômetro conectado às extremidades da célula que contém a câmara compactada. A resistência, oferecida ao fluxo de ar, varia com a geometria da camada de material compactado, com a sua porosidade (que é decorrente da densidade da massa e da compacidade).

A determinação da superfície específica pelo método do permeabilímetro do ar depende da validade da equação desenvolvida por Carman-Kozeny [3.99] (III-XXI).

$$A_e = \frac{14}{\gamma(1-e)} \times \sqrt{\frac{3}{e} \times \frac{Acc}{\eta \times Q} \times GH} \quad \text{(III-XXI) onde:}$$

A_e = Área (superfície) específica
γ = Massa específica do material
e = Porosidade da camada
Acc = Área da seção transversal, da camada compactada
GH = Gradiente hidráulico
η = Velocidade cinemática (com base na lei de Stokes)
Q = Vazão de ar

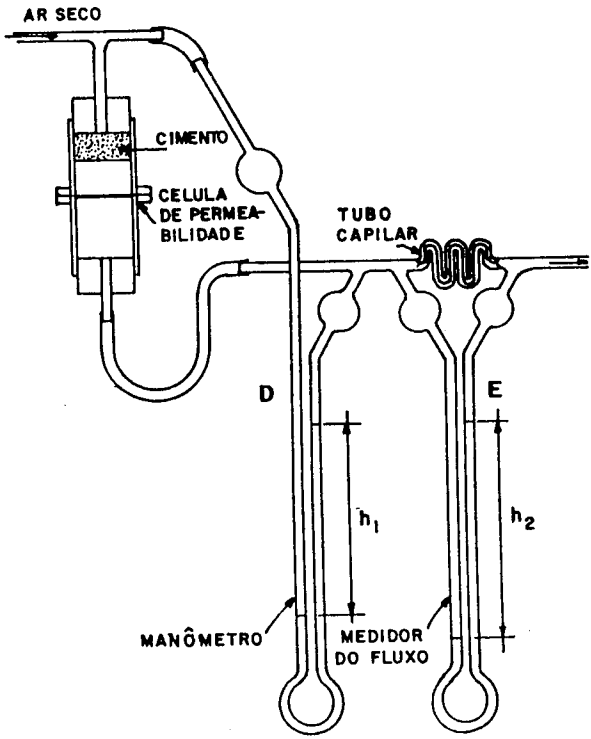


Figura 3.62 — Permeabilímetro de ar, com manômetro e medidor de fluxo. Versão original [3.104]

Blaine [3.99] [3.105] e Ridgem [3.99] [3.106], em 1943 e, independentemente, propuseram uma simplificação ao processo original, usando um volume constante, e diminuindo a altura manométrica (gradiente) de ar e a equação (III-XXI) decorrente dessas modificações passou a ser (III-XXII)

$$A_e = \frac{K\ e^{3/2}\ T^{1/2}}{\gamma\ \eta^{1/2}\ (1-e)} \quad \text{(III-XXII) sendo:}$$

T = Tempo para que um certo volume de gás, ou ar, passe pela camada de material compactado (s).

Após essas modificações a ASTM [3.107] adotou o método, empregando uma equação genérica (III-XXIII):

$$A_e = \frac{A_p \times \gamma_p \times (1-e_p) \times \sqrt{e^3} \times \sqrt{T} \times \sqrt{\eta_i}}{\gamma \times (1-e) \sqrt{e^3_p} \times \sqrt{T_p} \times \sqrt{\eta}} \quad \text{(III-XXIII) sendo:}$$

A_e = Área (superfície) específica da amostra em ensaio
A_p = Área (superfície) específica do padrão
γ = Massa específica da amostra em ensaio
γ_p = Massa específica do padrão

T = Intervalo de tempo medido devido a queda do manômetro na amostra ensaio
T_p = Intervalo de tempo medido devido a queda do manômetro no padrão
η = Viscosidade do ar na temperatura de determinação na amostra ensaio
η_p = Viscosidade do ar na temperatura de determinação no padrão
e = Porosidade da camada preparada com a amostra em ensaio
e_p = Porosidade da camada preparada com o padrão

Para a determinação da superfície específica, usando permeabilímetro de ar e as modificações e evolução do processo original, são utilizados os procedimentos citados a seguir [3.107] [3.108] [3.109]. Para a aplicação do método é necessário o permeabilímetro ao ar (de Blaine), como mostra a figura 3.63, balança analítica, estufa, amostra padrão (obtida a partir de organismo autorizado e credenciado).

No permeabilímetro Blaine há uma câmara, que é a câmara de permeabilidade, constituída de um cilindro rígido, de vidro ou metal não corrosivo, cujos detalhes são vistos na figura 3.63, juntamente com o disco, o êmbolo e o manômetro em "U".

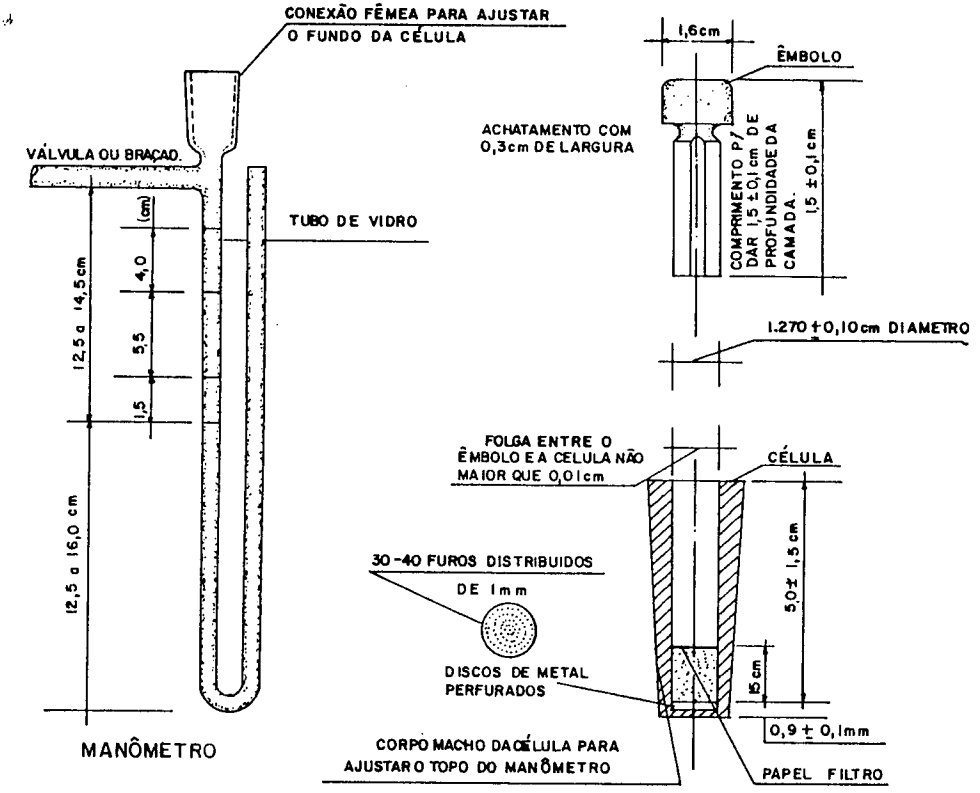


Figura 3.63 — Detalhes da célula de permeabilidade

O aparelho deve ser calibrado através de uma amostra padrão. O volume da câmara é calibrado por meio da pesagem de mercúrio, através da massa específica do mercúrio.

É necessário corrigir a massa específica do mercúrio com base na temperatura ambiente do local da sala. Para essa finalidade é comum se usar dos valores da figura 3.64.

TEMPERATURA DE SALA (ºC)	MASSA ESPECÍFICA DO MERCÚRIO (g/cm3)	VISCOSIDADE DO AR, n (POISES)	$\sqrt{n}$
16	13,56	0,0001788	0,01337
18	13,55	0,0001798	0,01341
20	13,55	0,0001808	0,01344
22	13,54	0,0001818	0,01348
24	13,54	0,0001828	0,01352
26	13,53	0,0001837	0,01355
28	13,53	0,0001847	0,01359
30	13,52	0,0001857	0,01362
32	13,52	0,0001867	0,01366
34	13,51	0,0001876	0,01369

Figura 3.64 — Valores de massa específica do mercúrio, viscosidade do ar (n) e $\sqrt{n}$ para dadas temperaturas

A amostra (padrão ou ensaio) é colocada na câmara de permeabilidade sobre um papel filtro adequado e compactada pelo êmbolo (ver figura 3.69), para se obter uma camada compactada com porosidade e = 0,500 ± 0,005.

A câmara de permeabilidade é assentada na extremidade do manômetro. O ar em um dos braços do tubo capilar manométrico é evacuado de modo a propiciar um gradiente, instante em que se fecha a válvula. O cronômetro é disparado quando o fundo do menisco (no capilar) alcançar uma certa marca e travado ao se atingir uma segunda marca no capilar.

O cálculo da área (superfície) específica é, então, feito através da expressão (III-XXIII), anteriormente citada.

Tendo em vista que vários parâmetros atuam na determinação da finura, através do permeabilímetro Blaine, é importante ter conhecimento dessas interferências.

Essas interferências têm sido avaliadas por vários pesquisadores e entidades de pesquisa, assim é que [3.93] a massa específica influencia na determinação da superfície específica, como evidencia a figura 3.65.

A influência da porosidade é mostrada na figura 3.66 a partir de [3.93].

A influência da temperatura pode ser observada pelos valores da figura 3.67, obtidos de [3.110], através dos quais nota-se que a temperatura não acarreta distorções apreciáveis nos resultados.

A figura 3.68 apresenta algumas correlações entre os valores obtidos [3.111] pelos vários métodos de determinação da finura.

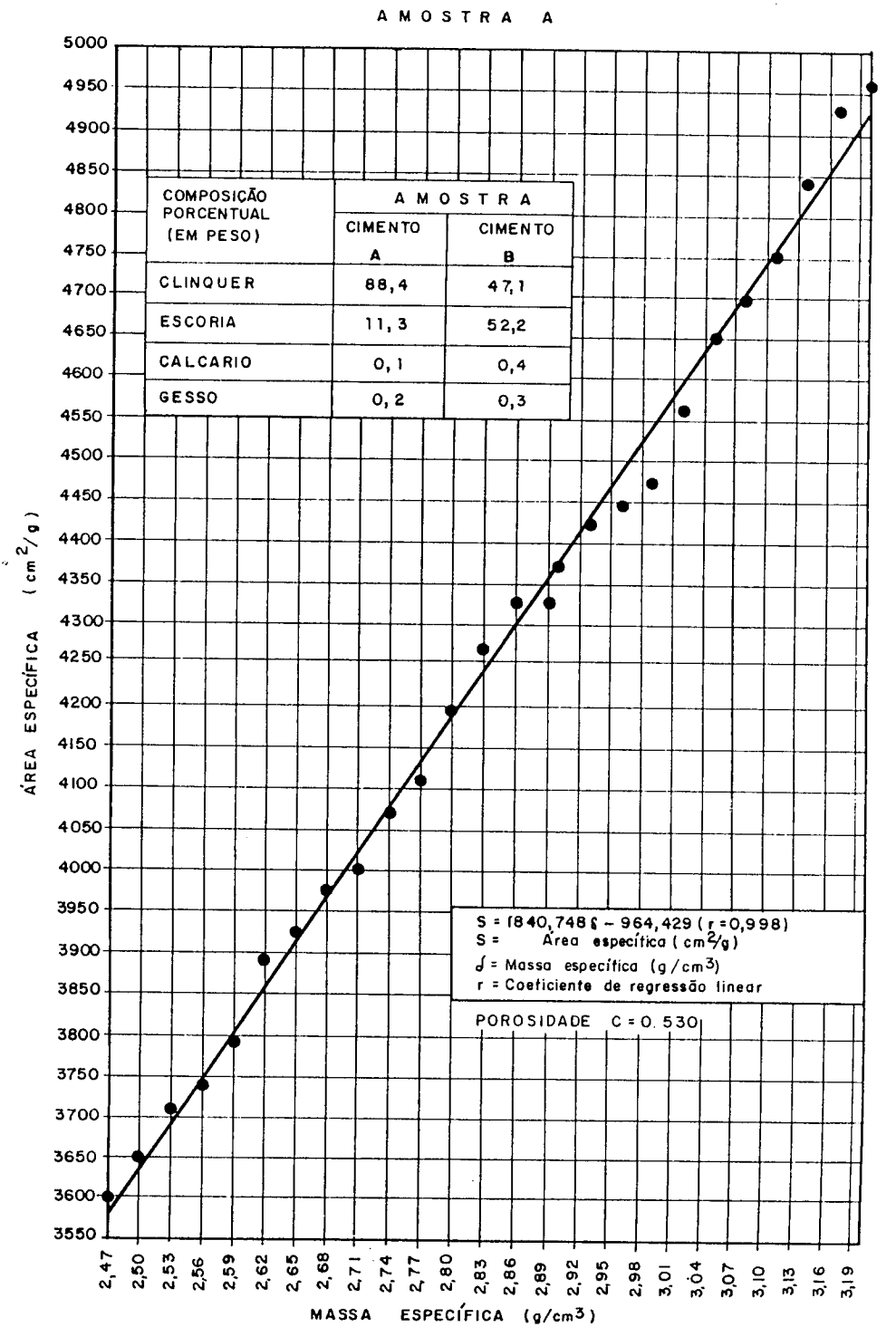


Figura 3.65 — Variação da finura Blaine, em função da massa específica de [3.93], a uma mesma porosidade

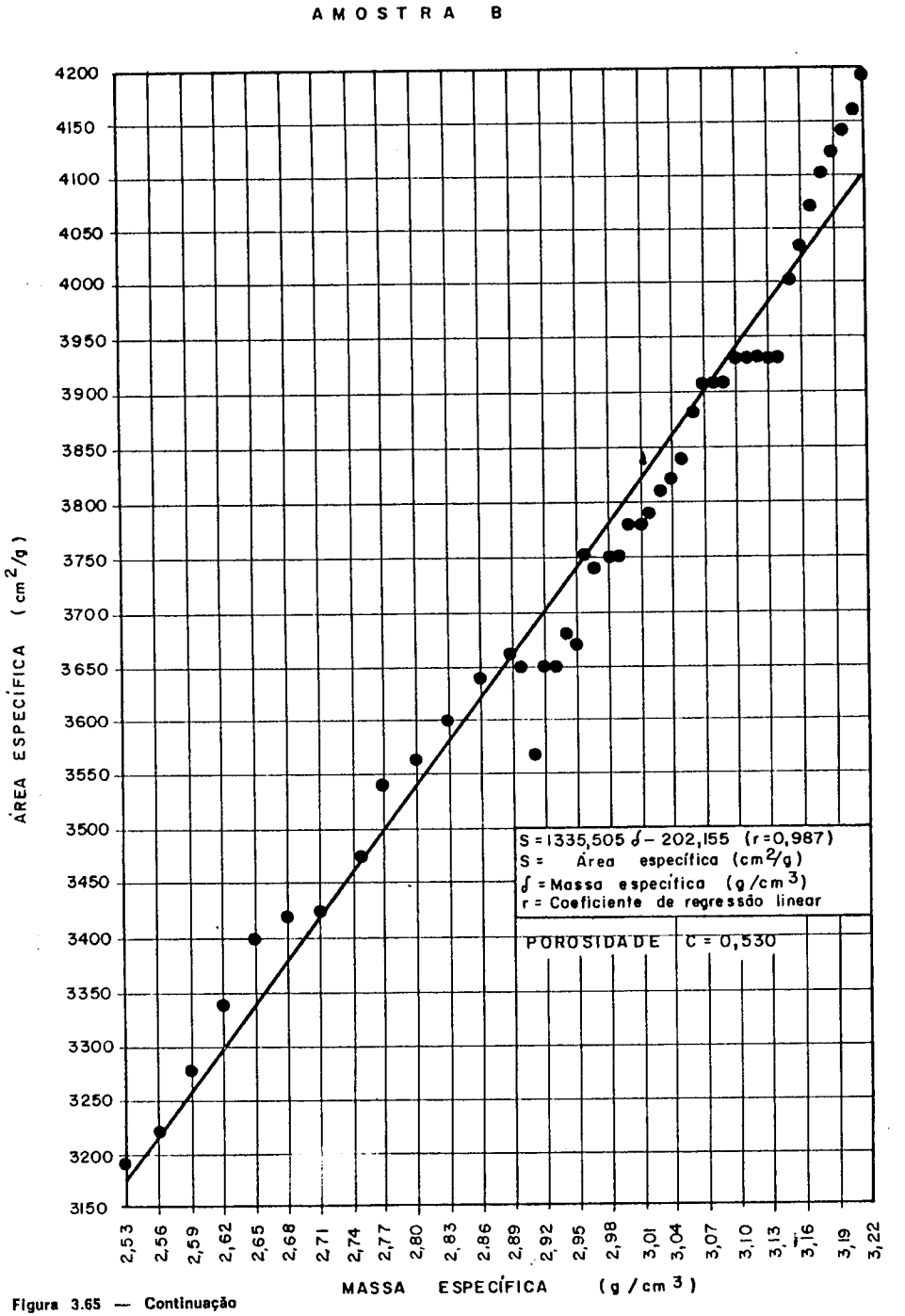


Figura 3.65 — Continuação

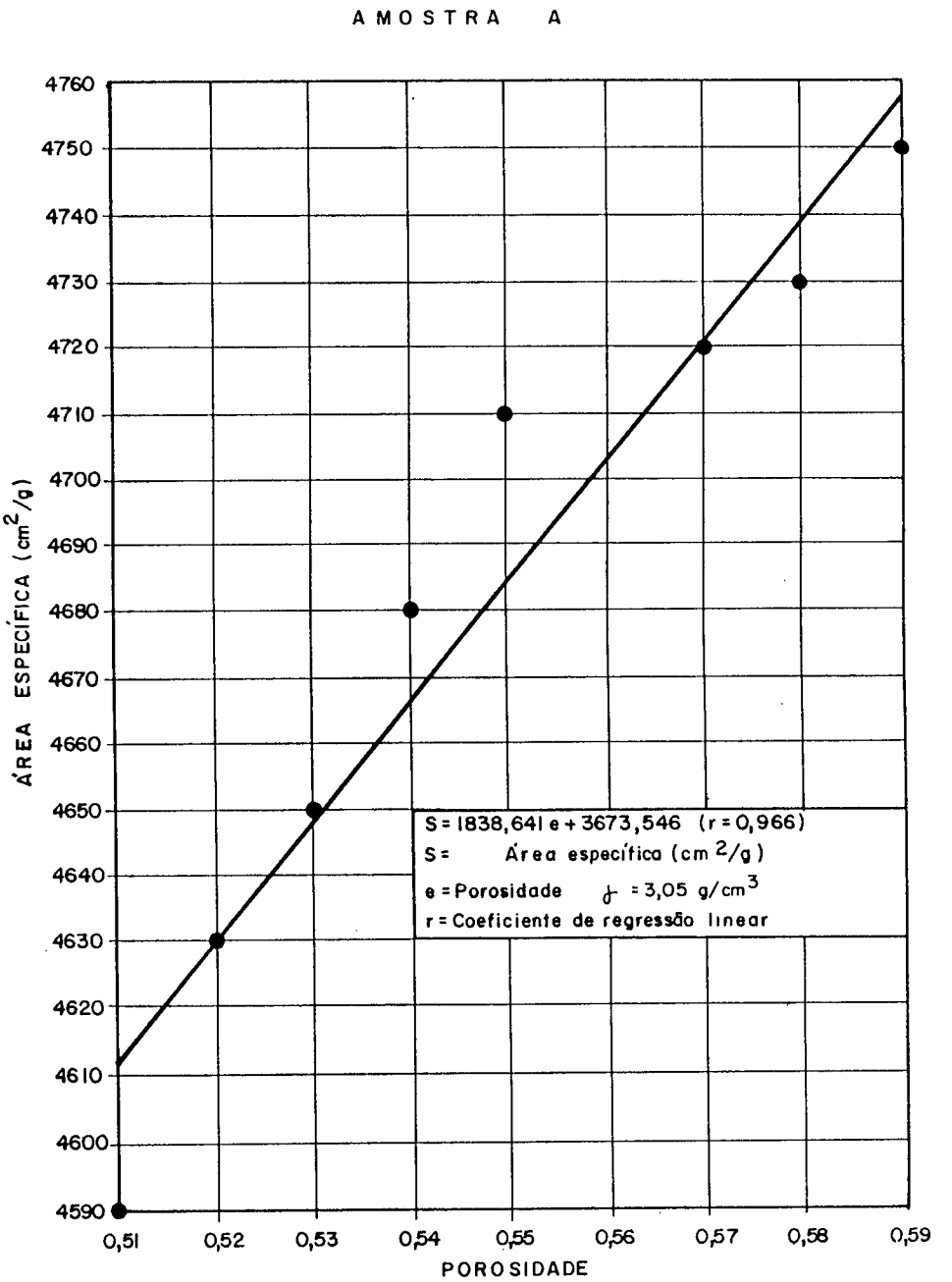


Figura 3.66 — Variação da finura Blaine em função da porosidade da câmara, com uma certa massa específica, de [3.93]

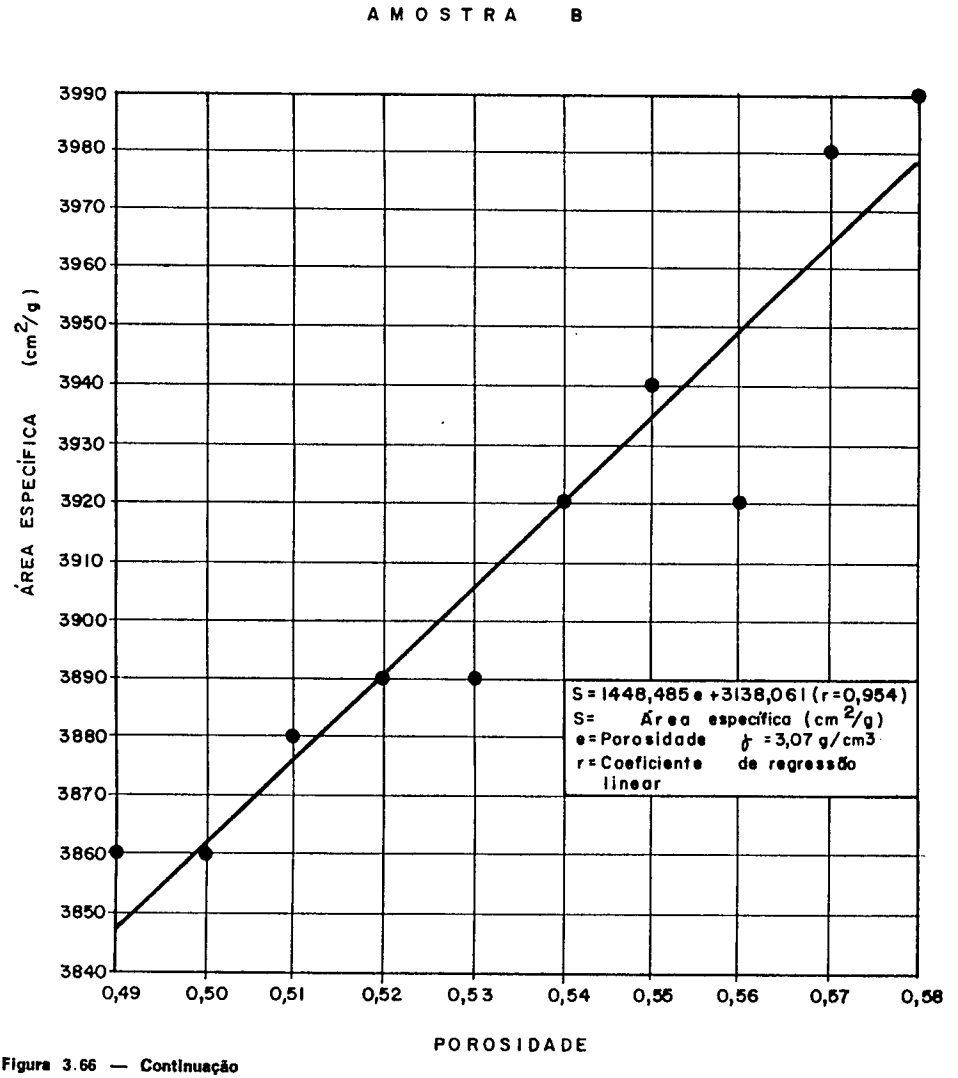


Figura 3.66 — Continuação

TABELA I — CIMENTO PORTLAND (γ = 3,15 g/cm^3, ε = 0,500)

DET.	TEMPERATURA DO MATERIAL (°C)	TEMPERATURA DO AMBIENTE (°C)	Δt (°C)	ÁREA ESPECÍFICA cm^2/g
1	100	24,3	75,7	3630
2	92	24,5	67,5	3610
3	85	24,5	60,5	3600
4	80	24,6	55,4	3650
5	71	24,5	46,5	3620
6	65	24,8	40,2	3610
7	61	24,7	36,3	3600
8	50	24,5	25,5	3640
9	42	24,6	17,4	3620
10	40	24,6	15,4	3610
11	36	24,6	11,4	3580
12	34	24,6	9,4	3600
13	30	24,6	5,4	3630
14	27	24,6	2,4	3630
15	25	24,6	0,4	3620

Figura 3.67 — Variação da finura Blaine devido à temperatura de [3.110]

TABELA 2

MATERIAL	TEMP. DO MATERIAL (°C)	TEMP. DO AMBIENTE (°C)	Δ t (°C)	ÁREA ESPECÍFICA (cm^2/g)	OBSERVAÇÃO
CIMENTO PORTLAND DE ALTO FORNO	85,0	23,0	62,0	4020	γ = 3,00 g/cm^3
	75,0	23,0	52,0	3990	
	66,0	23,0	43,0	4020	ε = 0,530
	55,0	23,0	32,0	4030	
	47,0	23,0	24,0	4040	S = 22 cm^2/g
	35,0	23,0	12,0	4070	
	30,0	23,0	07,0	4030	
	24,5	23,0	01,5	4030	
CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO	95,0	23,0	72,0	4870	γ = 3,00 g/cm^3
	88,0	23,0	65,0	4860	
	78,0	23,0	55,0	4860	ε = 0,500
	69,0	23,0	46,0	4880	
	60,0	23,0	37,0	4910	S = 46 cm^2/g
	50,0	23,0	27,0	4940	
	40,0	23,0	17,0	4980	
	32,0	23,0	09,0	4940	
	27,0	23,0	04,0	4960	
CINZA VOLANTE	100,0	23,5	76,5	7430	γ = 2,39 g/cm^3
	85,0	23,5	61,5	7410	
	72,0	23,5	48,5	7480	ε = 0,570
	65,0	23,5	41,7	7420	
	55,0	23,5	31,5	7430	S = 24 cm^2/g
	45,0	23,5	21,5	7430	
	35,0	23,5	11,5	7460	
	27,0	23,5	03,5	7460	
ESCÓRIA	100,0	23,5	76,5	3460	γ = 2,83 g/cm^3
	85,0	23,5	61,5	3480	
	75,0	23,5	51,5	3480	ε = 0,530
	65,0	23,5	41,5	3540	
	56,0	23,5	32,5	3540	S = 32 cm^2/g
	45,0	23,5	21,5	3540	
	34,0	23,5	10,5	353,0	
	27,0	23,5	03,5	3530	

Figura 3.67 — Continuação

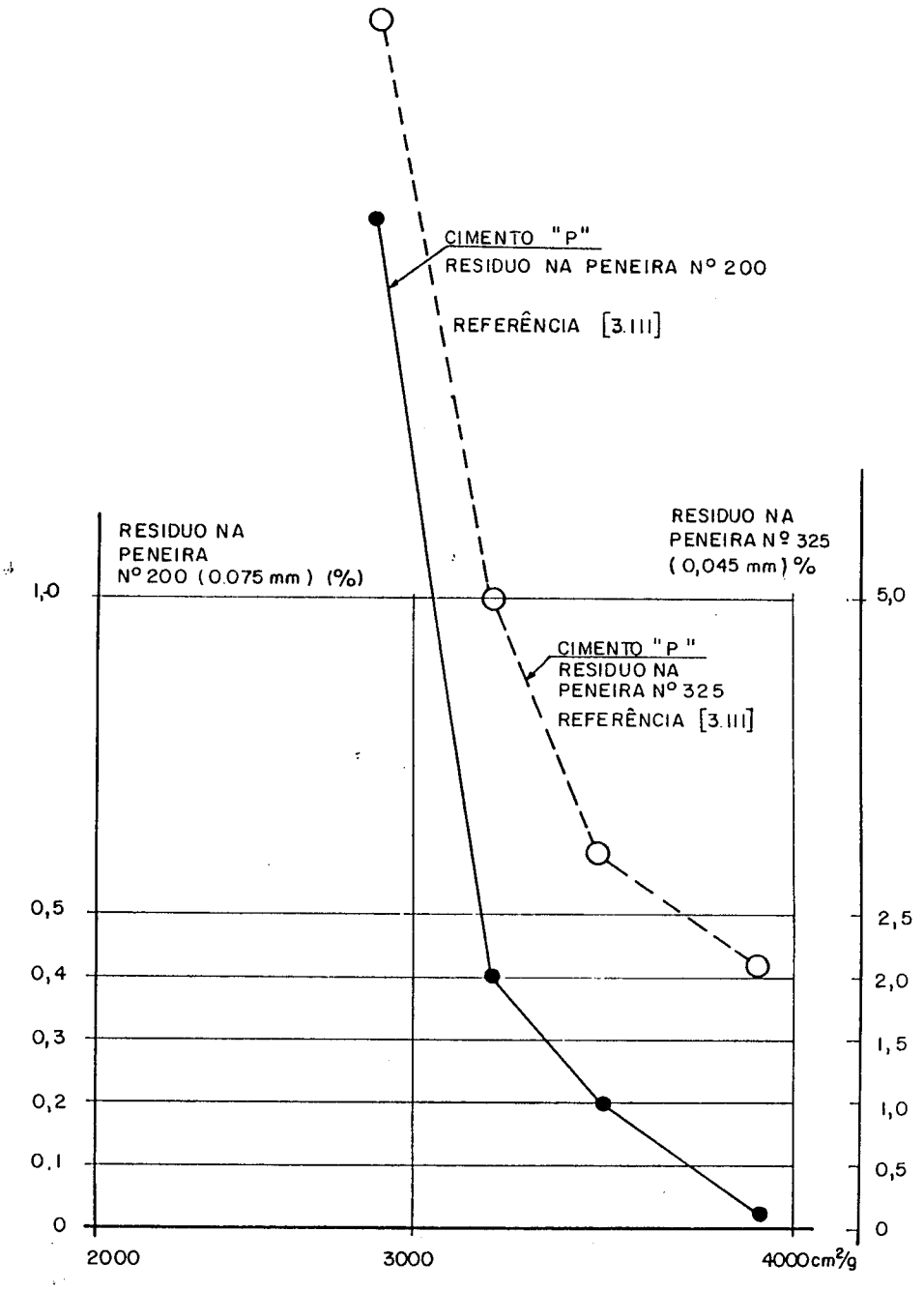


Figura 3.68 — Exemplo de correlações das várias finuras — referência [3.111]

Outro processo para determinação da finura é o turbidimétrico, através da análise da sedimentação, sendo que um facho paralelo de luz de intensidade constante, passe através de uma suspensão com a amostra em ensaio e impressione uma célula fotoelétrica. A corrente gerada pela foto-célula é medida e indica a turbidez da solução que, através de uma calibração, fornece a área (superfície) específica.

O turbidímetro usado para ensaios de cimento foi desenvolvido por L. A. Wagner [3.99] em 1933, é adotado pela ASTM [3.112] e pode ser visto na figura 3.69, detalhado na figura 3.70.

O turbidímetro de Wagner permite uma rápida determinação da área específica e da distribuição granulométrica do material (cimentos ou materiais com sílica).

Tem-se tentado estabelecer [3.104] a correlação entre valores de finura pelo Blaine e pelo Wagner. Os valores de finura Blaine se situam entre 1.6 e 2.2 vezes os valores respectivos de finura Wagner, e o valor 1.8 é o mais comum.

No Brasil, entretanto, até a presente época, o turbidímetro tem sido pouco usado.

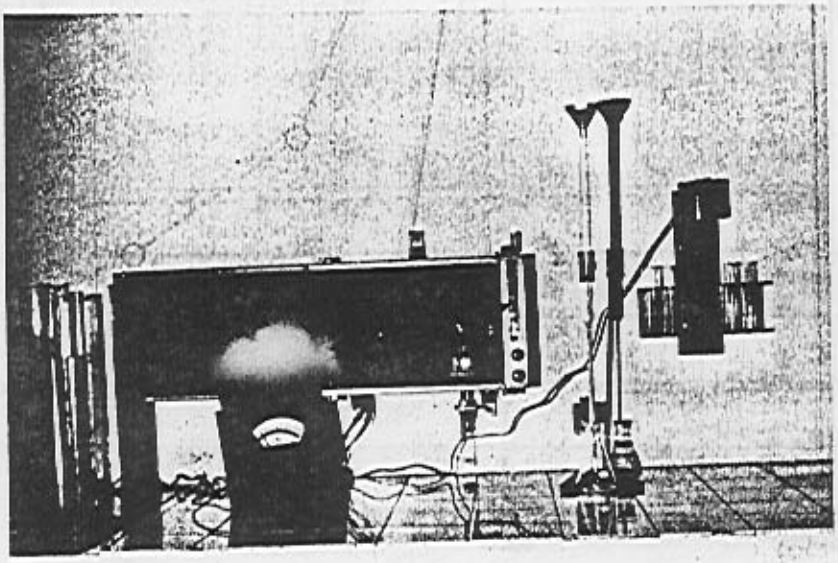
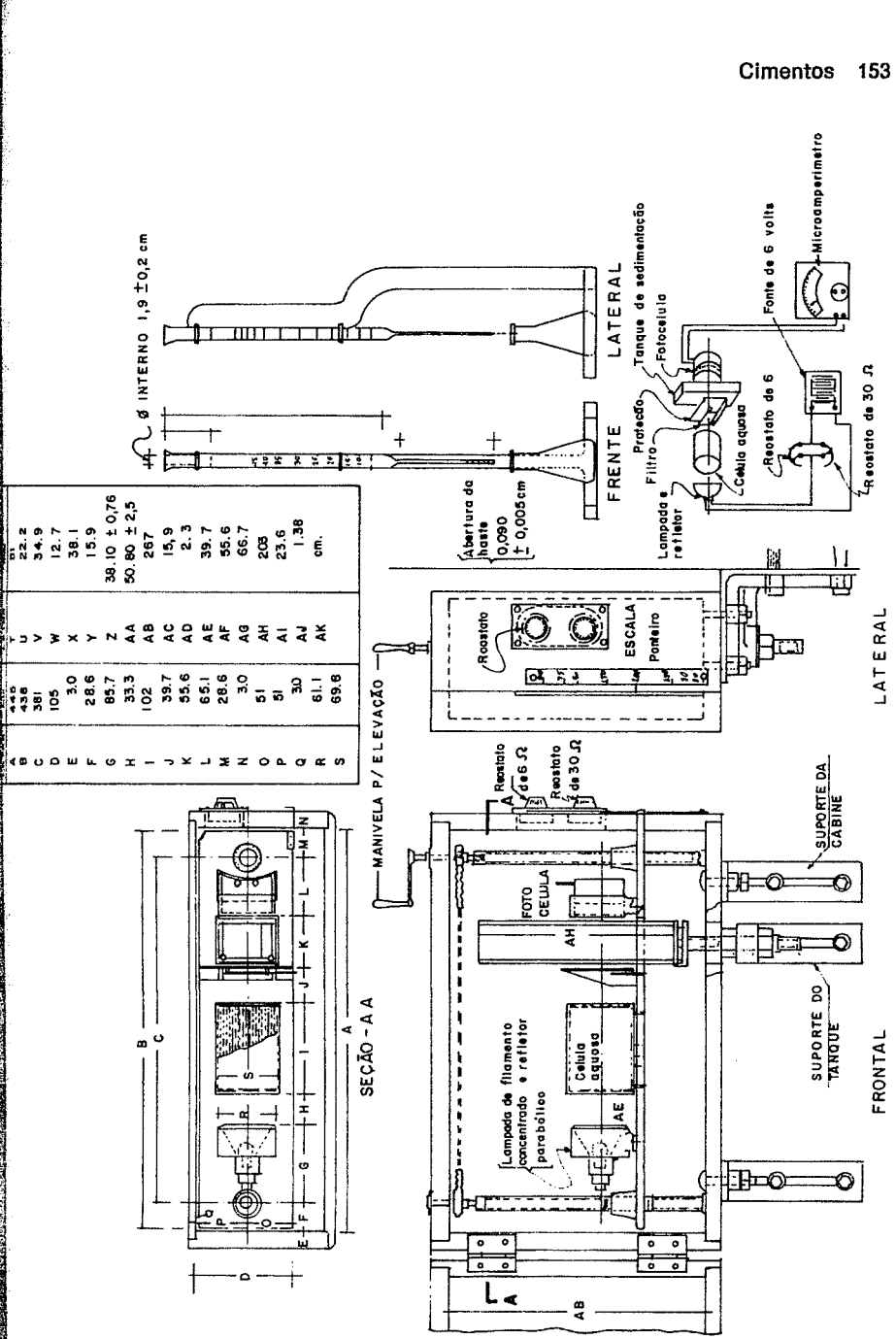


Figura 3.69 — Turbidímetro Wagner, de acordo com ASTM-C-115, para determinação da finura de cimentos, constituído de câmara para célula e microamperímetro



A	438	U	22.2
B	438	V	34.9
C	381	W	12.7
D	105	X	38.1
E	3.0	Y	15.9
F	28.6	Z	38.10 ± 0,76
G	85.7	AA	50.80 ± 2,5
H	33.3	AB	267
I	102	AC	15,9
J	39.7	AD	2.3
K	55.6	AE	39.7
L	65.1	AF	55.6
M	28.6	AG	66.7
N	3.0	AH	203
O	51	AI	23.6
P	51	AJ	1.38
Q	30	AK	cm.
R	61.1		
S	69.8		

3.70 — Detalhes do turbidímetro de Wagner para ensaios de finura

Desde há muito se sabe que quanto mais fino o cimento i ará a resistência. Entretanto é sabido, também, que para aumentar a finura há um aumento do custo operacional de fabricação. É prudente que se determine um ponto, ou faixa de equilíbrio envolvendo a finura e as diversas propriedades que possam ser afetadas.

A finura pode afetar a resistência como exemplifica a figura 3.71 [3.111].

Aumentando a finura do cimento reduz-se a exsudação, sendo que esse efeito é mais evidente nos concretos sem ar incorporado.

O aumento da finura provoca uma melhoria na trabalhabilidade da mistura, sendo que na mistura com ar incorporado esse fenômeno é menos evidente.

A variação da finura, entretanto, provoca uma variação da retração por secagem, em correlação com a água requerida.

A figura 3.72 ilustra algumas dessas variações.

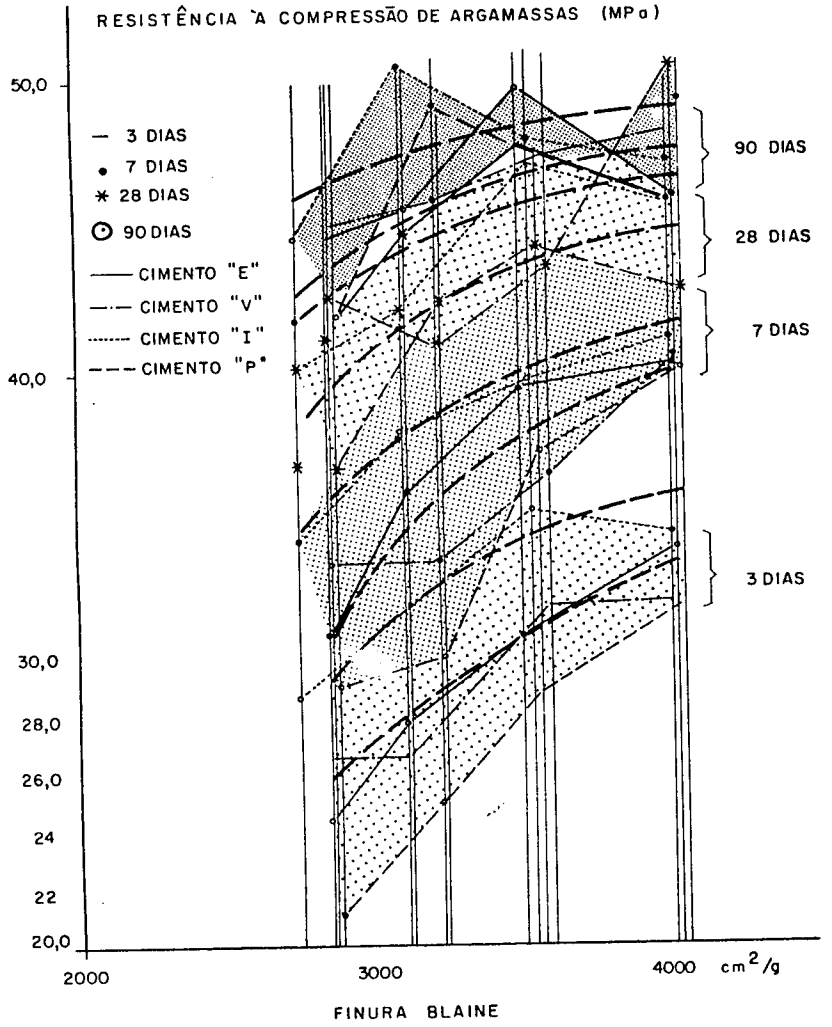


Figura 3.71 — Influência da finura (Blaine) nas resistências das argamassas

REFERÊNCIA																					
TIPO DE CIMENTO																					
PERÍODO (DIAS)																					
DATA DA COLETA																					
FINURA	PENEIRA 200 (% RETIDA)	0,4	0,2	0,2	0,4		0,2	0,3	0,2	0,2		0,2	0,2	0,2	0,0		1,6	0,4	0,2	0,0	
	PENEIRA 325 (% RETIDA)	2,3	0,9	1,0	0,7		3,3	5,8	0,9	0,7		2,4	1,0	1,3	0,4		9,2	5,0	3,0	2,1	
	AREA ESPECÍFICA (BLAINE) cm2/G	2850	3137	3510	4047		2877	3247	3620	4047		2760	3224	3560	4032		2877	3247	3582	4085	
	AREA ESPECÍFICA (WAGNER) cm2/G																				
DENSIDADE g/cm3	APARENTE																				
	ABSOLUTA	3,16	3,16	3,16	3,14		3,16	3,14	3,14	3,11		3,14	3,13	3,16	3,16		3,09	3,09	3,08	3,06	
AGUA DE CONSISTÊNCIA PASTA	GRAMAS	122	120	118	116		124	123	125	125		126	124	124	123		126	127	129	129	
	%	24,4	24,0	23,6	23,2		24,8	24,6	25,0	25,0		25,2	24,8	24,8	24,6		25,2	25,4	25,8	25,8	
INÍCIO DE PEGA (h = min)		3:09	3:00	2:47	2:29		2:25	2:28	2:21	2:10		2:42	2:32	2:36	2:05		2:52	2:44	2:36	2:04	
EXPANSÃO EM AUTO CLAVE (%)		0,031	0,030	0,033	0,037		0,172	0,167	0,167	0,171		0,139	0,133	0,149	0,151		0,164	0,146	0,133	0,142	
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	CONSISTÊNCIA DE ARGAMASSA — GRAMAS	152	151	152	151		154	156	155	153		154	153	152	152		157	156	155	155	
	CONSISTÊNCIA DE ARGAMASSA — A/C	0,487	0,484	0,487	0,484		0,493	0,500	0,497	0,490		0,493	0,490	0,487	0,487		0,503	0,500	0,497	0,497	
	FLOW (mm)	167	165	167	165		166	168	167	168		168	168	168	168		167	167	167	166	
	DATA DA MOLDAGEM	04-01	04-01	04-01	04-01		10-01	10-01	10-01	10-01		11-01	11-01	11-01	11-01		17-01	17-01	17-01	17-01	
	TENSÃO 3 DIAS (KG/cm2)	243	279	308	339		265	265	319	320		286	317	351	344		210	251	288	318	
	TENSÃO 7 DIAS (KG/cm2)	308	357	394	402		333	334	364	405		340	379	397	411		292	301	372	400	
	TENSÃO 28 DIAS (KG/cm2)	411	448	479	457		425	408	436	507		401	422	474	457		367	424	464	429	
	TENSÃO 90 DIAS (KG/cm2)	446	455	498	459		450	460	475	483		447	507	481	477		419	493	472	494	
CALOR DE HIDRATAÇÃO	7 DIAS (CAL/G)	81	82	83	84		73	70	83	87		84	86	87	88		81	82	84	82	
	28 DIAS (CAL/G)	97	95	99	94		90	86	93	97		94	96	96	99		91	100	98	98	
ANÁLISE QUÍMICA %	PERDA AO FOGO	-	1,00	-	-		-	1,34	-	-		-	1,25	-	-		-	1,99	-	-	
	INSOLUVEIS	-	0,00	-	-		-	0,00	-	-		-	0,00	-	-		-	0,09	-	-	
	SiO_2	-	19,76	-	-		-	20,10	-	-		-	18,90	-	-		-	20,31	-	-	
	Fe_2O_3	-	4,04	-	-		-	3,15	-	-		-	4,59	-	-		-	2,65	-	-	
	AL_2O_3	-	5,44	-	-		-	4,95	-	-		-	5,19	-	-		-	5,15	-	-	
	CaO	-	64,61	-	-		-	63,37	-	-		-	62,66	-	-		-	64,96	-	-	
	MgO	-	2,13	-	-		-	3,37	-	-		-	3,40	-	-		-	2,30	-	-	
	SO_3	-	2,20	-	-		-	2,97	-	-		-	3,05	-	-		-	1,67	-	-	
	Na_2O	-	0,18	-	-		-	0,15	-	-		-	0,09	-	-		-	0,17	-	-	
	K_2O	-	0,73	-	-		-	0,72	-	-		-	0,86	-	-		-	0,88	-	-	
	EQUIV. ALCALINO EM Na_2O	-	0,66	-	-		-	0,62	-	-		-	0,66	-	-		-	0,75	-	-	
	CAL LIVRE EM CaO	-	0,48	-	-		-	0,66	-	-		-	0,66	-	-		-	1,60	-	-	
COMPOSTOS METODO DE BOGUE (%)	C_3S	-	62,29	-	-		-	56,31	-	-		-	58,63	-	-		-	60,43	-	-	
	C_2S	-	9,66	-	-		-	15,15	-	-		-	9,96	-	-		-	12,64	-	-	
	C_3A	-	7,58	-	-		-	7,75	-	-		-	5,28	-	-		-	9,17	-	-	
	C_4AF	-	12,29	-	-		-	9,59	-	-		-	13,97	-	-		-	8,06	-	-	

3.2.3.3. Consistência normal da pasta

A consistência normal da pasta é traduzida pelo teor (expresso em porcentagem em peso de água em relação ao cimento) de água em uma pasta compactada em um molde e submetida a uma certa penetração de um êmbolo padronizado.

Esse teor de água é posteriormente usado para preparação de pasta de cimento para determinações dos tempos de pega (ver item 3.2.3.4) e expansão em autoclave (ver item 3.2.3.5).

A pasta de cimento moldada em um anel cônico é submetida a uma penetração de um êmbolo-sonda, denominada sonda de Tetmajer, como ilustra a figura 3.73 e detalhada na figura 3.74.

Para a determinação da água para consistência normal da pasta [3.113] [3.114] [3.115], além do aparelho de Vicat, há necessidade de balança com acuracidade de 0,1%.

Uma certa quantidade de cimento é misturada (manual ou mecanicamente) com água, após o que a pasta misturada é colocada no molde tronco cônico, com auxílio de uma espátula. A pasta assim moldada é submetida à penetração da sonda Tetmajer, sendo que terá a consistência normal a pasta que permitir uma penetração de 10 ± 1mm.

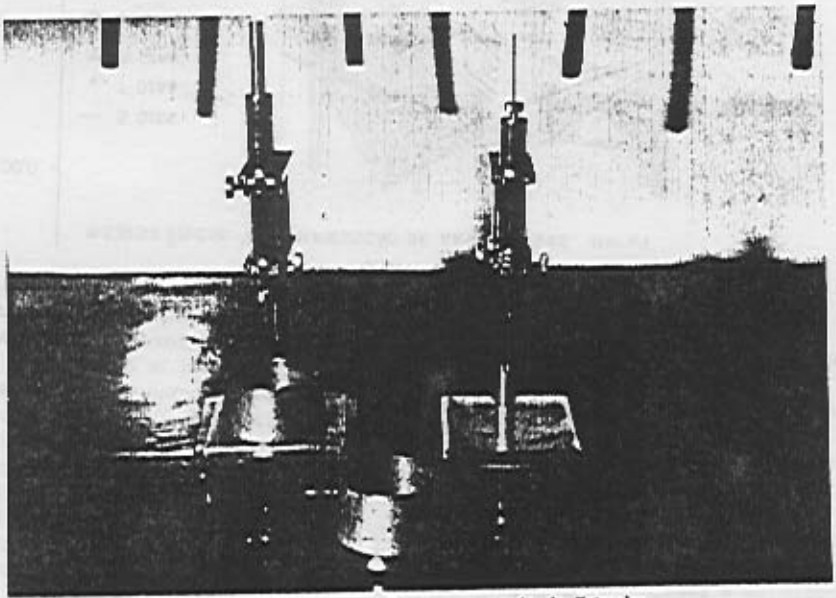


Figura 3.73 — Aparelho de Vicat, com agulha e com sonda de Tetmajer

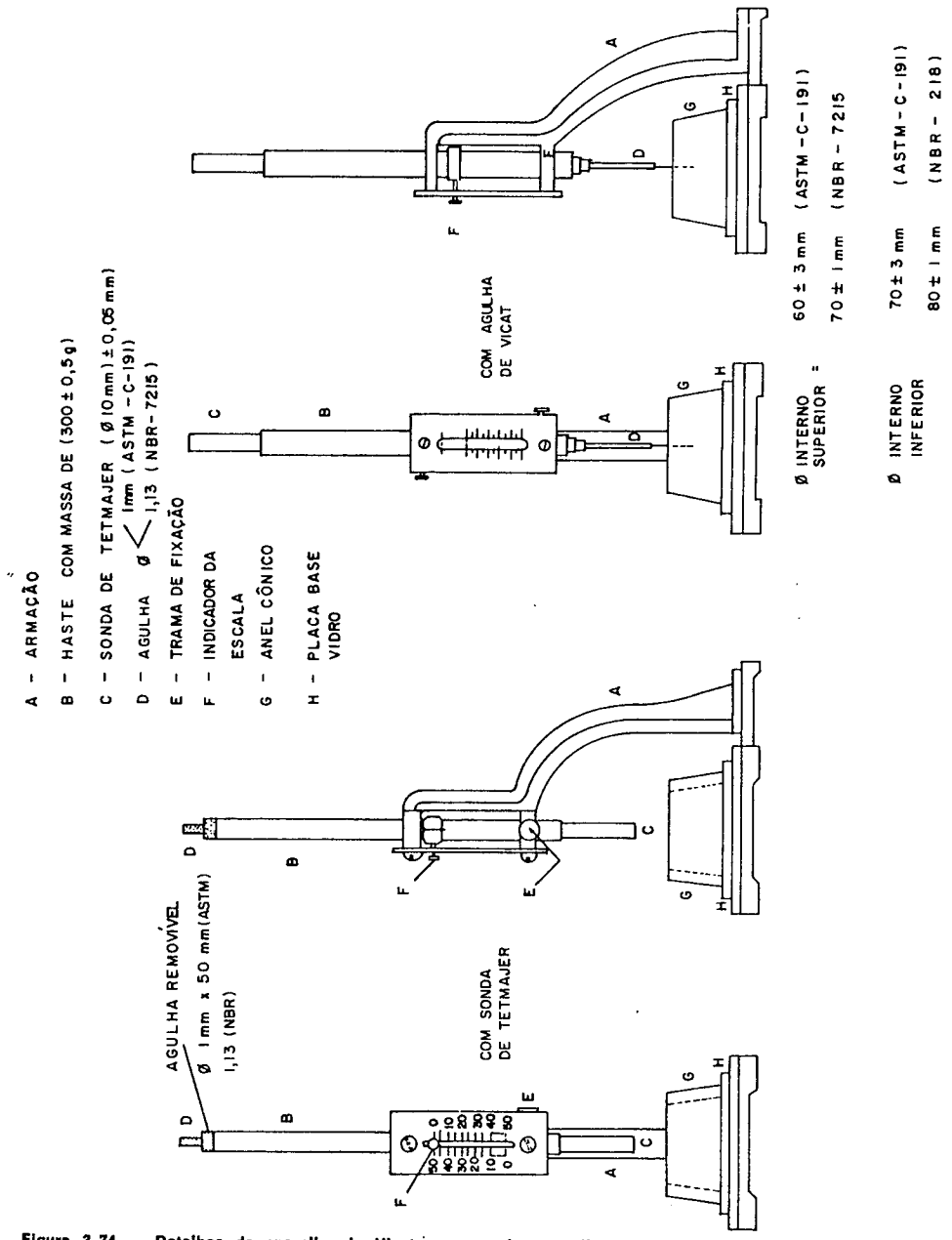


Figura 3.74 — Detalhes do aparelho de Vicat, com sonda e agulha

Observando que o amassamento da pasta pode ser manual ou mecânico, é importante saber das respectivas influências. Pelos valores da figura 3.75 de [3.93] nota-se que a mistura manual requereu um teor de água diferente do teor de água da mistura mecânica.

A temperatura da água de mistura também influencia na determinação do teor de água para a consistência normal da pasta, como exemplifica a figura 3.76 de [3.93].

TIPO DE AMASSAMENTO	TEOR (%) DE ÁGUA PARA OBTENÇÃO DA CONSISTENCIA NORMAL	
	AMOSTRA A *	AMOSTRA B *
MANUAL	25,0	24,4
MECÂNICO * *	26,0	26,0

* VER FIGURA (3.59)

* * DE ACORDO COM [3.113]

Figura 3.75 — Influência do tipo de amassamento no teor de água para a consistência normal [3.93]

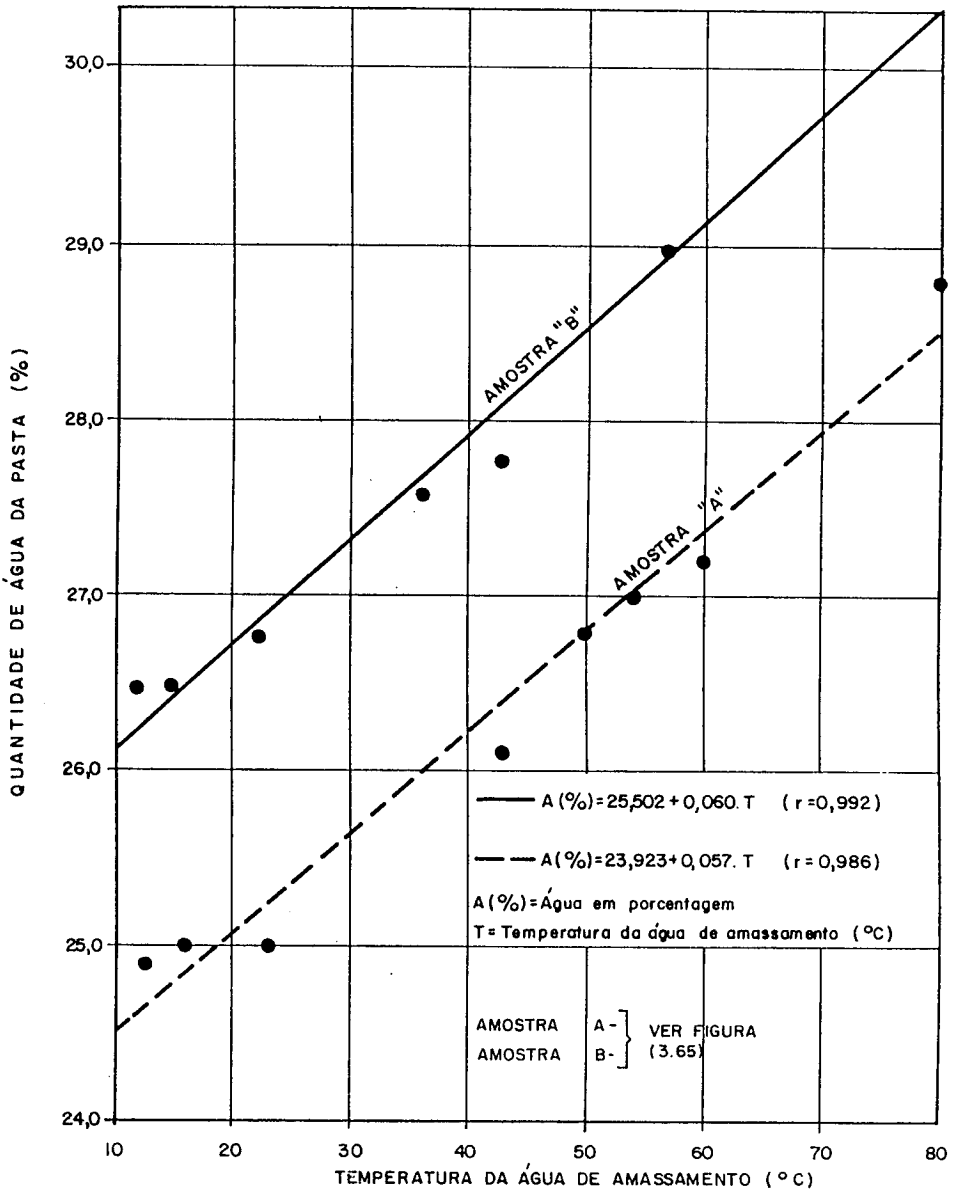


Figura 3.76 — Influência da temperatura da água de amassamento na quantidade de água de pasta de consistência normal

3.2.3.4. Tempos de início e fim de pega

Pega é o termo usado para descrever o enrijecimento da pasta. O tempo de pega é um período arbitrário do tempo decorrido desde o instante do contato água-cimento até o instante que essa pasta suporte a penetração de uma determinada agulha.

Na prática é muito importante conhecer o tempo de que se dispõe para misturar, transportar, lançar e adensar as argamassas e concretos feitos com cimento Portland. Esta propriedade do cimento e do concreto, de manter uma consistência, quase sem variação por um certo tempo, pode ser determinada pelo ensaio de tempo de pega. Como em outras propriedades o tempo de pega é afetado pelas características físico-químicas do cimento, as condições climáticas, qualidade, quantidade e temperatura da água de amassamento.

A velocidade do processo da pega não é necessariamente um sinônimo da velocidade de endurecimento da pasta ou do concreto. Uma pega rápida poderá ser produzida pela variação da composição do cimento, como, por exemplo, a falta de gesso durante a moagem e pode também ser compensada pela utilização de certos aditivos como o carbonato de sódio. O tempo de pega do cimento é afetado pela temperatura, sendo que à baixa temperatura a pega é retardada.

A influência do gesso sobre o tempo de pega é explicada pelo fato dos sulfatos se combinarem com o C_3A, após a adição da água, para formar uma espécie de capa protetora sobre as partículas, retardando a hidratação. A quantidade de gesso que pode ser adicionada, durante a moagem, depende do teor de C_3A, da finura e o tempo de pega que se deseja.

A finura também influi sobre o tempo de pega, que diminui com o aumento da finura.

Algumas vezes o cimento pode apresentar o fenômeno de falsa pega que se caracteriza por um brusco aumento no enrijecimento da pasta, sem apresentar grande desprendimento de calor. A falsa pega pode ser distinguida da pega rápida, pois se a pasta, argamassa ou concreto forem energicamente remisturados, a plasticidade inicial é recuperada. A falsa pega é provocada pela desidratação do gesso. A desidratação pode ocorrer durante a moagem, quando a temperatura no interior do moinho é elevada, ou quando os cimentos são armazenados com temperatura elevada. Apesar de certa inocuidade, pode causar transtornos e dificuldades no emprego do concreto, durante o lançamento.

Para a determinação dos tempos de início e fim de pega são utilizadas as balanças [3.114] [3.116][3.117] e aparelho de Vicat, como descrito no item 3.2.3.3 (ver figuras 3.73 e 3.74).

A determinação dos tempos de pega é feita através de um corpo de prova, moldado em uma fôrma tronco-cônica, com uma pasta com consistência normal (ver item 3.2.3.3), que é submetido à penetração da agulha de Vicat. O tempo de início de pega é definido pelo tempo decorrido desde a mistura até o instante em que a pasta permita uma penetração de 25 mm. Como as medidas de penetração da agulha são feitas em intervalos de 15 minutos, pode-se usar um ábaco, semelhante ao mostrado na figura 3.77, para determinar o tempo de início de pega.

O tempo de fim de pega é definido pelo período decorrido desde a mistura até o instante em que a agulha de Vicat aplicada suavemente sobre a superfície da pasta, não deixa marcas apreciáveis.

O teor de água de consistência pode afetar os tempos de pega como mostra a figura 3.78 de [3.93].

A diferença entre os diâmetros das agulhas padronizadas pela ASTM e ABNT deve ser verificada para não incorrer em erros de interpretação.

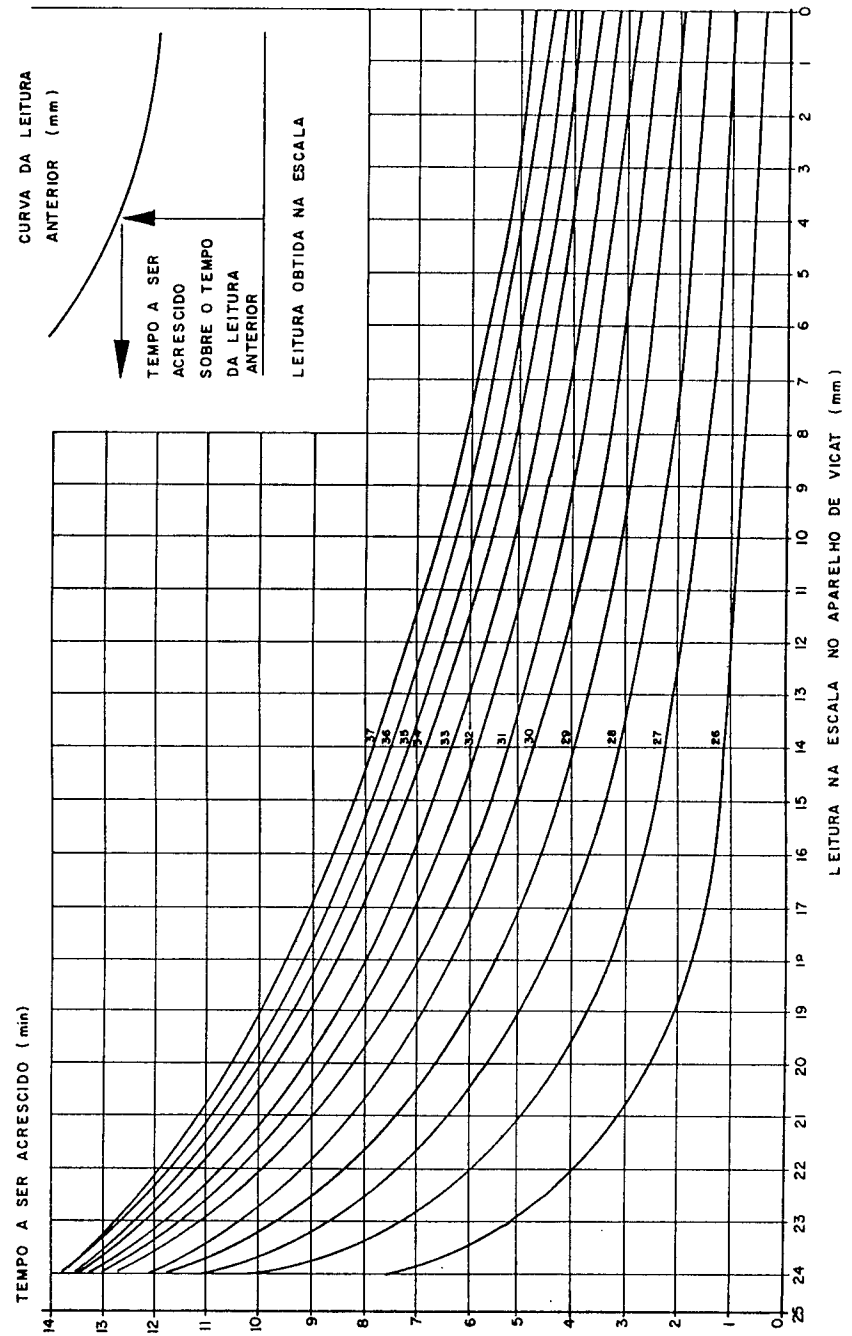


Figura 3.77 — Ábaco para interpolação do tempo no ensaio de início de pega

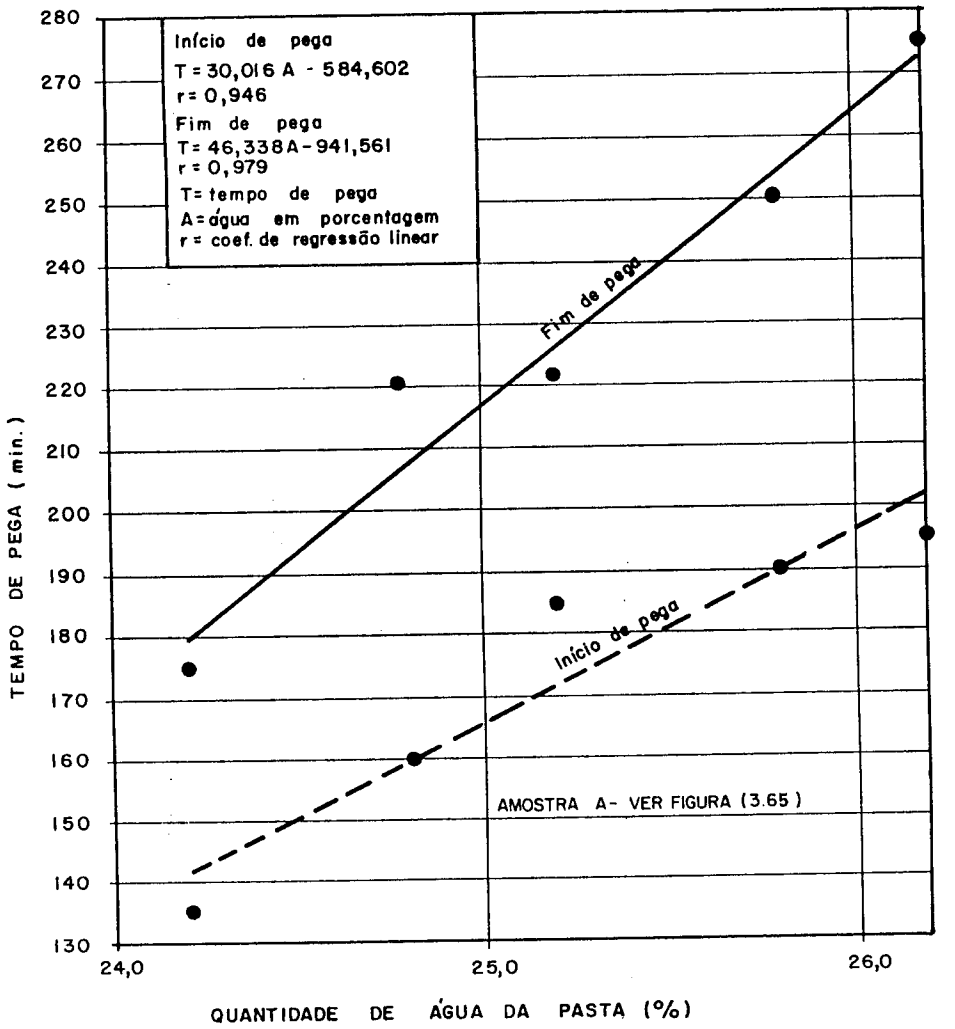


Figura 3.78 — Influência da quantidade de água de consistência nos tempos de pega [3.93]

3.2.3.5 Sanidade — estabilidade volumétrica

É fundamental que a pasta de cimento não apresente grandes variações volumétricas após a pega. Tal variação pode ocorrer devido a uma hidratação lenta ou outra reação de algum composto presente no cimento endurecido, principalmente a cal livre, magnésia e sulfato de cálcio.

Havendo mais cal do que o necessário para combinar com os óxidos ácidos, o excesso pode permanecer livre na forma de CaO. Esse material se hidrata lentamente formando $Ca(OH)_2$ e como esse composto ocupa um volume maior que o óxido de cálcio, inicialmente livre, ocorre uma expansão. Por outro lado, quando se adiciona cal ao cimento (como, por exemplo, em cimento para alvenaria) não ocorre expansão, pois a hidratação ocorre imediatamente antes da pega.

Um cimento pode também ser expansivo devido à presença de MgO, que reage com a água de maneira semelhante ao CaO. Entretanto, somente o periclásio (MgO cristalino) é nocivo, enquanto que o MgO presente, como na forma vítrea, é inofensivo.

O terceiro elemento associado à expansão é o sulfato de cálcio. Deve-se lembrar que o sulfato de cálcio hidratado (gesso) é adicionado ao clínquer para regular a pega do cimento, mas se for colocado em excesso, além do necessário para reagir com o C_3A, durante a pega poderá ocorrer uma expansão lenta devido à formação do sulfoaluminato de cálcio.

A expansão por magnésia se manifesta lentamente, podendo aparecer após vários anos.

A cal livre, outro elemento que pode causar expansão, pode ocorrer no cimento se a dosagem das matérias-primas não for adequada (excesso de cal em relação à sílica, alumínio e ferro), se a temperatura de clinquerização for insuficiente, se a moagem for insuficiente durante a preparação das matérias-primas ou se o resfriamento do clínquer for lento.

Os álcalis, presentes no cimento sob forma de Na_2O e K_2O, podem reagir com certos tipos de agregados (ver item 3.1.3.14), provocando expansões.

A estabilidade volumétrica do cimento pode ser avaliada pelos ensaios em autoclave, e pelas agulhas de Le Chatelier.

Pelo ensaio de exposição em autoclave [3.118] [3.119] obtém-se um índice da expansão que pode ser causada pela hidratação do CaO, ou MgO, ou ambos.

Para ensaio em autoclave são usados balança com acuracidade de 0,1%, moldes primáticos, como o da figura 3.34, um comparador de acordo com a figura 3.36 (ver item 3.1.3.14) e o aparelho de autoclave como ilustra a figura 3.79, para trabalhar à pressão de 2,4 MPa ± 5% e temperatura de 216 ± 2°C.

Com a pasta com teor de água para a consistência normal são moldados corpos de prova prismáticos, após o que são colocados em câmara úmida, devendo permanecer nos moldes pelo menos por 24 horas.

Decorridas 24 horas da moldagem, os corpos de prova prismáticos são desmoldados e através de medidas com o comparador determinam-se os comprimentos iniciais. Imediatamente após as leituras, os corpos de prova são expostos ao ciclo de cura em autoclave, sendo que a pressão é mantida a 2MPa ± 0,07 MPa, por um período de 3 horas.

Após o período de resfriamento controlado, os corpos de prova são novamente medidos e a diferença de comprimento expressa em porcentual do comprimento é calculada (expansão — aumento; contração — diminuição do comprimento do corpo de prova).

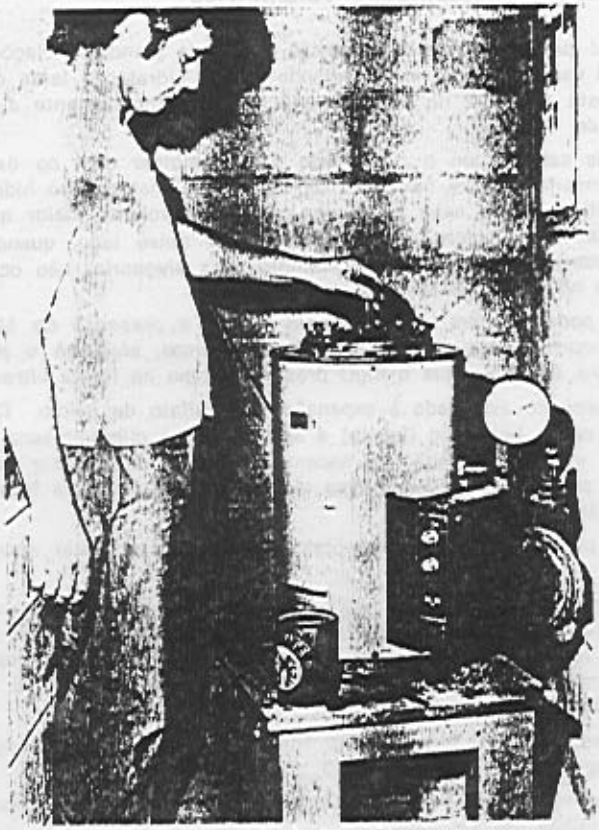


Figura 3.79 — Aparelho de autoclave, para ensaio de expansão

As figuras 3.80 e 3.81 ilustram algumas variações volumétricas decorrentes da exposição em autoclave.

A expansibilidade dos cimentos pode, também, ser avaliada pela agulha de Le Chatelier [3.114], mostrada na figura 3.82.

A parte cilíndrica da agulha é preenchida com a pasta de cimento, após o que é coberta e curada por 24 horas em água sob certa temperatura.

Após resfriamento a abertura das agulhas é medida, obtendo-se a diferença com relação à abertura inicial.

Nº DA AMOSTRA		3.519	3.533	3.259	3.328
DATA DA COLETA		20/09 70	18/06 70	19/06 70	21/07 70
FINURA	# 200 % RETIDA	10,0	10,0	11,8	8,2
	# 325 % RETIDA	13,7	13,8	13,5	10,7
	SUPERFÍCIE ESPECÍFICA BLAINE cm^2/g	2.911	2.809	2.820	2.982
	SUPERFÍCIE ESPECÍFICA WAGNER cm^2/g	—	—	—	—
ÁGUA DE CONSISTÊNCIA DA PASTA (%)		24,7	26,0	25,7	24,8
INÍCIO DE PEGA (h : min)		2:32	3:21	3:39	2:48
EXPANSÃO EM AUTOCLAVE (%)		*2,306*	*9,264*	*5,331*	*4,596*
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	A/C	0,497	0,497	0,500	0,490
	FLOW (MESA) (mm)	163	164	166	163
	IDADES — 3 DIAS (MPa)	17,0	17,2	18,1	20,2
	IDADES — 7 DIAS (MPa)	26,3	23,8	26,0	29,0
	IDADES — 28 DIAS (MPa)	37,3	34,6	36,6	40,3
CALOR DE HIDRATAÇÃO	7 DIAS (CAL/g)	74,0	75,0	75,0	79,0
	28 DIAS (CAL/g)	92,0	86,0	83,0	91,0
ANÁLISE QUÍMICA (%)	PERDA AO FOGO	0,90	1,30	1,10	0,75
	INSOLÚVEIS	0,20	0,25	0,10	0,15
	SiO_2	21,20	20,75	21,00	20,45
	Fe_2O_3	2,21	2,21	2,13	2,28
	Al_2O_3	4,79	4,59	4,67	3,82
	CaO	62,6	62,1	62,1	63,5
	MgO	*5,90*	*6,52*	*6,15*	*6,19*
	SO_3	1,54	1,85	2,09	2,40
	Na_2O	0,21	0,22	0,22	0,26
	K_2O	0,47	0,45	0,52	0,54
	EQUIVALENTE ALCALINO (EM Na_2O)	0,52	0,52	0,56	0,62
	CAL LIVRE EM CaO	0,94	0,69	0,75	1,10
COMPOSTOS PELO METODO DE BOGUE	C_3S %	53,99	55,83	52,83	67,33
	C_2S %	20,05	17,37	20,36	7,84
	C_3A %	8,95	8,42	8,78	6,26
	C_4AF %	6,73	6,73	6,48	6,94

Figura 3.80 — Amostras de cimentos com elevados teores de magnésia, acarretando alta expansão em autoclave, como evidenciado na figura 3.81

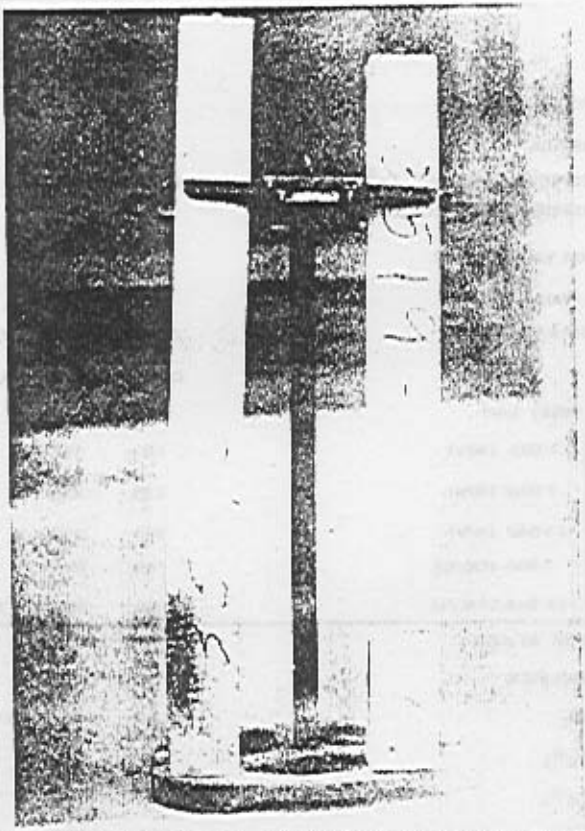


Figura 3.81 — Elevada expansão em autoclave, acarretando o empenamento do corpo de prova e do suporte metálico

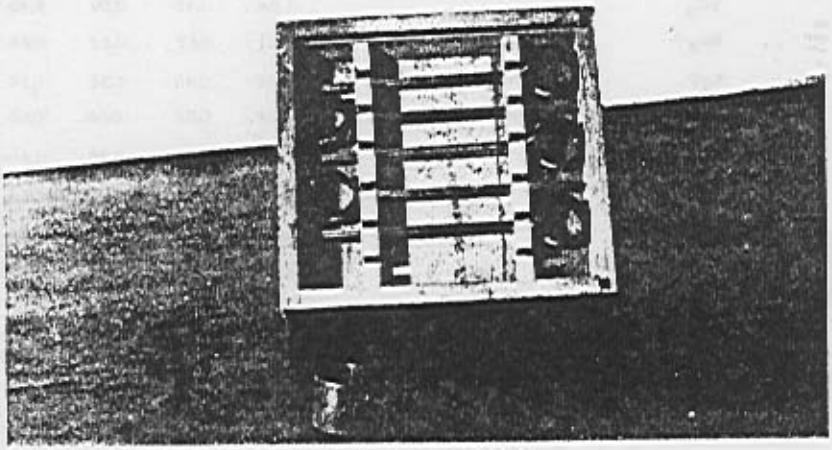


Figura 3.82 — Agulhas Le Chatelier para ensaio de expansividade

3.2.3.6 Calor de hidratação

A reação do cimento e água é exotérmica e o calor liberado nessa reação é denominado calor de hidratação do cimento. Esse calor liberado torna-se bastante prejudicial à medida que o volume de concreto aumenta, como é o caso de barragens ou outras estruturas massivas.

As características físico-químicas do cimento influenciam sobre o calor de hidratação e podem ser controladas.

Entre os compostos do cimento que mais contribuem para o calor de hidratação estão (ver item 3.2.2.1) o C_3A e C_3S. Ambos reagem energicamente com a água liberando grandes quantidades de calor.

O aumento de finura do cimento provoca um aumento na velocidade de hidratação, o que de certa forma contribui para aumentar o calor desprendido em um tempo considerado.

É de grande interesse se conhecer o calor de hidratação do cimento, para a tomada de posição quanto ao desempenho que pode se esperar do concreto.

Para a determinação do calor de hidratação, basicamente, podem ser utilizados dois métodos. Um é através da determinação [3.120] [3.121] do calor de dissolução do cimento; e o outro é pela determinação do calor liberado durante a hidratação, medido pela garrafa de Langavant [3.122].

A determinação do calor de hidratação pelo método do calor de dissolução é feita de maneira semelhante ao citado em 3.1.3.15, sendo que se determina o calor de dissolução do cimento seco e o calor de dissolução de uma alíquota do mesmo cimento e que tenha se hidratado parcialmente (até idades padronizadas). A diferença entre os dois valores é o calor de hidratação do respectivo período de hidratação.

Para a determinação do calor de hidratação por esse método são necessários: peneiras de malhas n.º 100 (150 μm) e n.º 20 (850 μm), balança analítica (ver item 3.1.3.14), estufa, como mostra a figura 3.83, tubos de vidro (tipo tubo de ensaio), pesa-filtros, cronômetros, cadinhos de platina (ver figura 3.49), forno mufla, de acordo com a figura 3.84 e aparelho calorimétrico, como mostra a figura 3.85, detalhado na figura 3.86.

São empregados, ainda, certos reagentes, como o óxido de zinco (ZnO), usado para determinar a capacidade calorífica do calorímetro, ácido fluorídrico (HFl), ácido nítrico (HNO_3) e cera parafínica.

O primeiro passo é determinar a capacidade calorífica do aparelho, que é a quantidade de calorias necessárias para elevar a temperatura do calorímetro e dos seus componentes de 1°C, sendo que isso é feito ao se dissolver o ZnO em uma mistura ácida de HFl e HNO_3 lendo-se a temperatura em certos períodos, com precisão de 0,001°C. O primeiro período de leitura é o da elevação de temperatura e o segundo período é o de confirmação, sendo que a diferença entre ambos serve para correção, e o cálculo da diferença da temperatura corrigida é feito por (III-XXIV) e (III-XXV)

$\Delta\theta_o = \theta_{20} - \theta_o$ ——————— (III-XXIV)

$\Delta\theta = \Delta\theta_o - (\theta_{40} - \theta_{20})$ ——— (III-XXV) onde

$\Delta\theta_o$ = Elevação de temperatura observada (°C)

θ_{20} = Temperatura do calorímetro no fim do período de dissolução (após 20 minutos) (°C)

θ_o = Temperatura do calorímetro quando a amostra é introduzida (°C)

$\Delta\theta$ = Elevação corrigida da temperatura (°C)

θ_{40} = Temperatura do calorímetro no final do período de ratificação (°C)

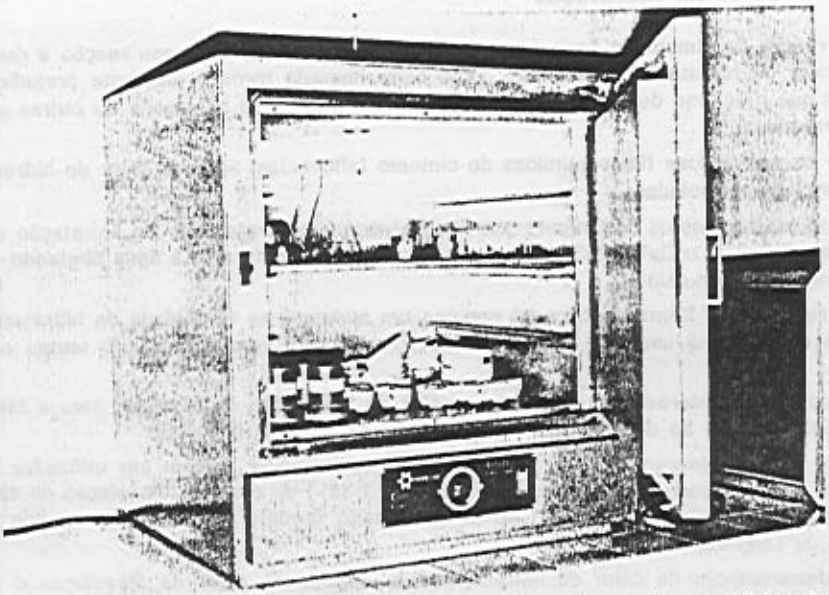


Figura 3.83 — Estufa com termostato regulável, para até 200 °C, vendo-se acima os cadinhos de platina e abaixo peneira n.º 325 e cadinho de porcelana

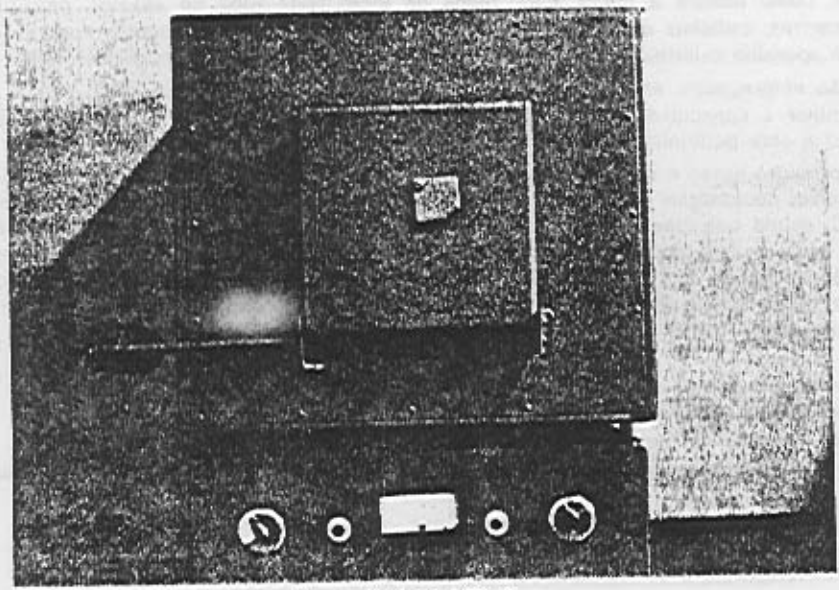


Figura 3.84 — Forno mufla com termostato regulável até 1.200 °C

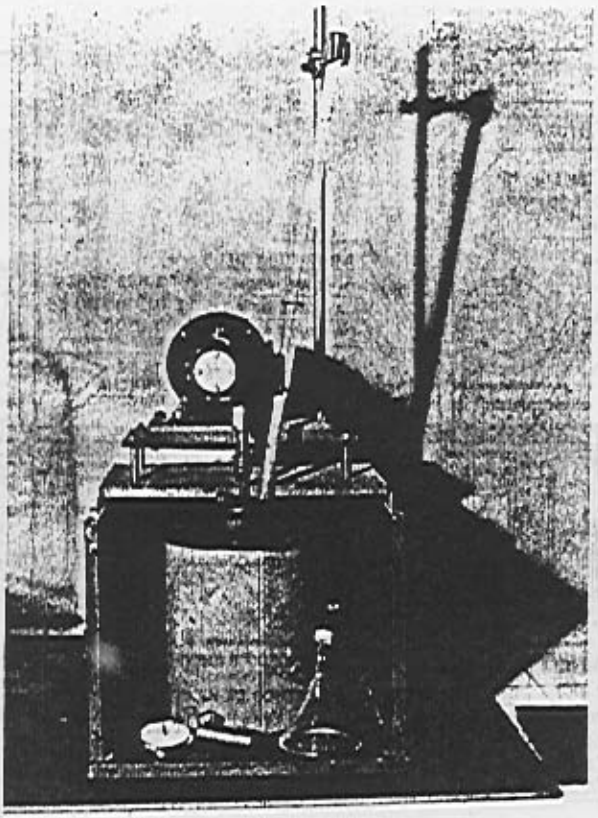


Figura 3.85 — Aparelho calorimétrico contendo frasco de Dewar, termômetro de Beckman, agitador e lupa de leitura

A capacidade calorífica é determinada por (III-XXVI):

$$C_c = MZn0 \left[\frac{256.1 + 0,1\,(30 - \theta\ ) + 0,12\,(\theta\, Z_{n0} - \theta\ )}{\Delta\theta} \right] \quad \text{(III-XXVI) sendo:}$$

$MZn0_{40}$ = massa do Zn0 (g)
C_c = Capacidade calorífica (cal/g°C)
θ = Temperatura final do calorímetro (°C) (igual a soma de θ_{20} e a temperatura em que o termômetro de Beckman é zerado)
$\theta\, Z_{n0}$ = Temperatura do Zn0, ao ser introduzido no calorímetro (°C)
$\Delta\theta$ = Ver (III-XXV)

Para determinar o calor de hidratação, prepara-se uma pasta com A/C = 0,4, colocando-a em tubos de ensaio, que são fechados e selados com cera parafínica e estocados em temperatura padrão.

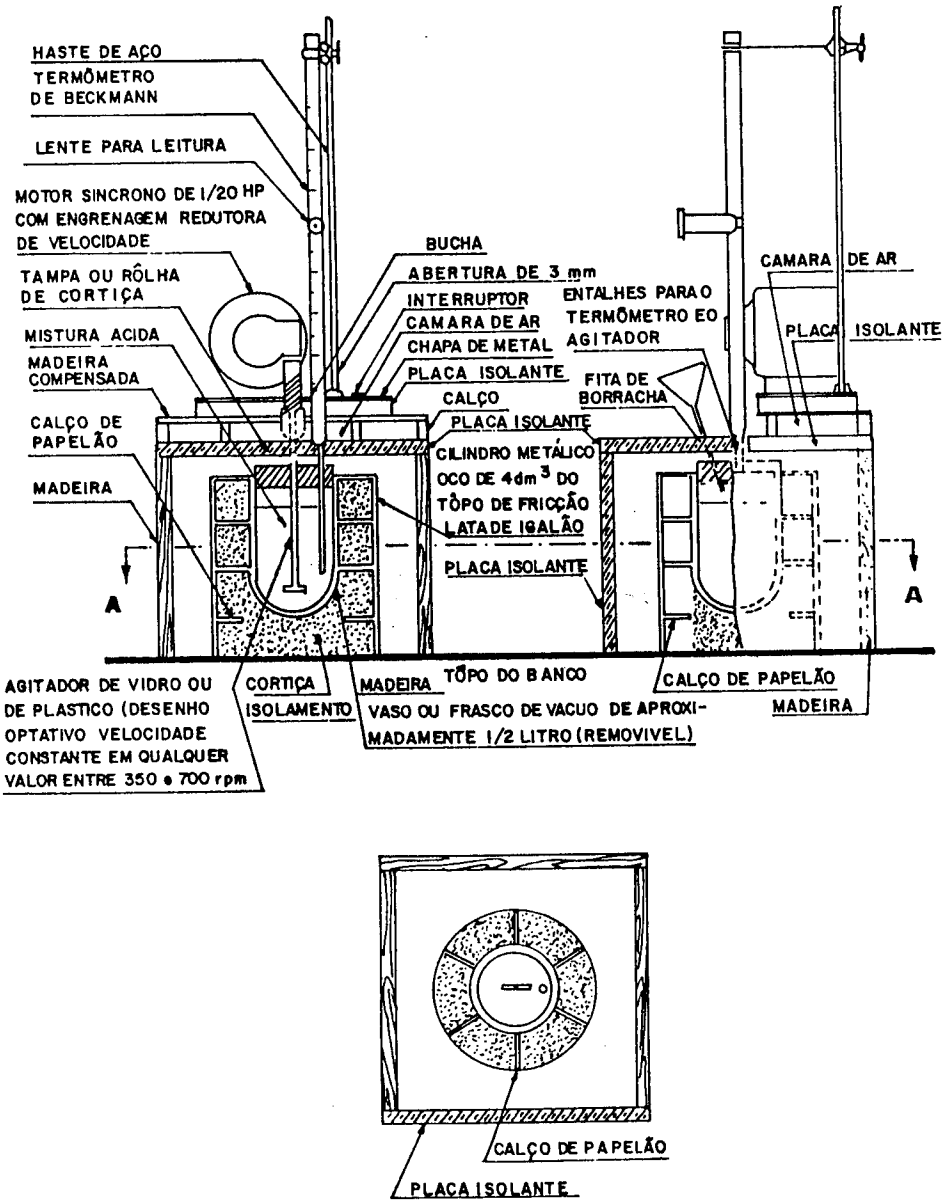


Figura 3.86 — Detalhes do aparelho calorimétrico, para ensaio pelo calor de dissolução

Na idade considerada, o tubo de ensaio é retirado do local de estocagem e a amostra é pulverizada, de modo que todo o material passe pela malha n.° 20. Logo após é colocado em pesa-filtro estanque, minimizando o tempo de exposição ao ar (principalmente ao CO_2) e à perda de umidade.

De forma semelhante ao que se fez para determinar a capacidade calorífica determina-se o calor de dissolução de uma certa massa de cimento seco (não hidratado), usando-se alíquota da amostra original em lugar de ZnO.

Posteriormente determina-se, de modo semelhante, o calor de dissolução da amostra parcialmente hidratada. Paralelamente determina-se a perda ao fogo (perda por ignição — ver item 3.2.3.8) de uma alíquota do cimento seco, tendo-se então a massa calorimétrica corrigida por (III-XXVII)

$$M_{cor} = \frac{M_2}{M_1} \times M_{calori} \quad \text{(III-XXVII) sendo:}$$

M_{cor} = Massa da amostra calorimétrica, após calcinação (g)
M_2 = Massa da amostra calcinada (g)
M_1 = Massa da amostra antes da calcinação (g)
M_{calori} = Massa da amostra calorimétrica (g)

Determina-se então o calor de dissolução do cimento seco por (III-XXVIII)

$$H_1 = \frac{\Delta\theta \cdot C_c}{M_{cor}} - 0{,}2\ (\theta AMB - \theta FCS) \quad \text{(III-XXVIII) onde}$$

θ AMB = Temperatura ambiente e da amostra ao ser introduzida (°C)
θ FCS = Temperatura final do calorímetro ao término da determinação do cimento seco (°C)
H_1 = Calor de dissolução do cimento seco (cal/g)
0,2 = Calor específico do cimento (cal/g °C)

Calcula-se também o calor de dissolução da amostra parcialmente hidratada por (III-XXIX):

$$H_2 = \frac{\Delta\theta \cdot C_c}{M_{cor}} - 0{,}4\ (\theta\ AMB - \theta\ FCH) - 0{,}3\ (\theta\ FCS - \theta\ FCH)$$

(III-XXIX) onde:

θ FCH = Temperatura final do calorímetro ao término da determinação do cimento parcialmente hidratado (°C)
H_2 = Calor de dissolução do cimento parcialmente hidratado (cal/g)
0,4 = Calor específico do cimento hidratado (cal/g °C)
0,3 = Valor intermediário entre o cimento seco e o cimento hidratado

O calor de hidratação é então obtido por (III-XXX)

$H_{idade} = H_1 - H_2 - 0{,}1\ (\theta FCH - 25)$ —— (III-XXX) onde:
H_{idade} = Calor de hidratação do cimento na idade considerada (cal/g)
25°C = Temperatura do calorímetro, considerada como base (°C)

Esse método deve ser adaptado, adequadamente, ao ser usado para determinações de cimentos aditivados (compostos), devido às condições de dissolução.

O outro processo de determinação do calor de hidratação é pela garrafa térmica de Langavant. Nesse método, o calor de hidratação do cimento é a quantidade de calor liberado pela unidade de massa de cimento durante a reação com a água de amassamento, sob as condições e requisitos experimentais, no decorrer de intervalos de tempos estabelecidos.

Para aplicação desse método são necessários balança, tubo de ensaio, termômetro de precisão com divisões de 0,1°C, termômetro de máxima, garrafa de Langavant, como mostrado na figura 3.87, com detalhes na figura 3.88.

A determinação do calor de hidratação é feita a partir da obtenção da curva de geração de calor, ao longo de um certo período (três ou sete dias) e, posteriormente, o cálculo (integral) da área dessa curva.

Para tanto determina-se a curva de calor gerado por uma argamassa composta de 175 g de água, 350 g de cimento e 1050 g de areia, normal para ensaio, segundo padronização ABNT [3.27]. Essa argamassa é colocada em um recipiente metálico e no seu centro um tubo de ensaio com óleo (ver figura 3.88), onde se posiciona o termômetro. O mesmo procedimento é repetido com a argamassa de referência.

Os recipientes são postos nos frascos de Dewar, é colocado o isolamento e o frasco térmico de Langavant é fechado.

O tempo e as temperaturas desde o instante da mistura são anotados, sendo usado o termômetro de máxima para se obter a temperatura máxima atingida.

Após a obtenção dos valores, e de posse da calibração do frasco, traçam-se as curvas como mostra a figura 3.89.

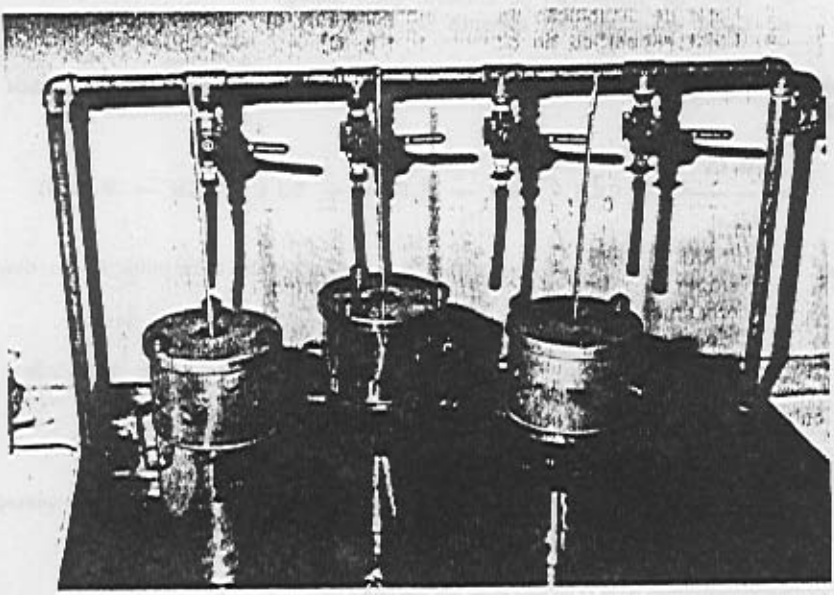


Figura 3.87 — Garrafas de Langavant para determinação do calor de hidratação

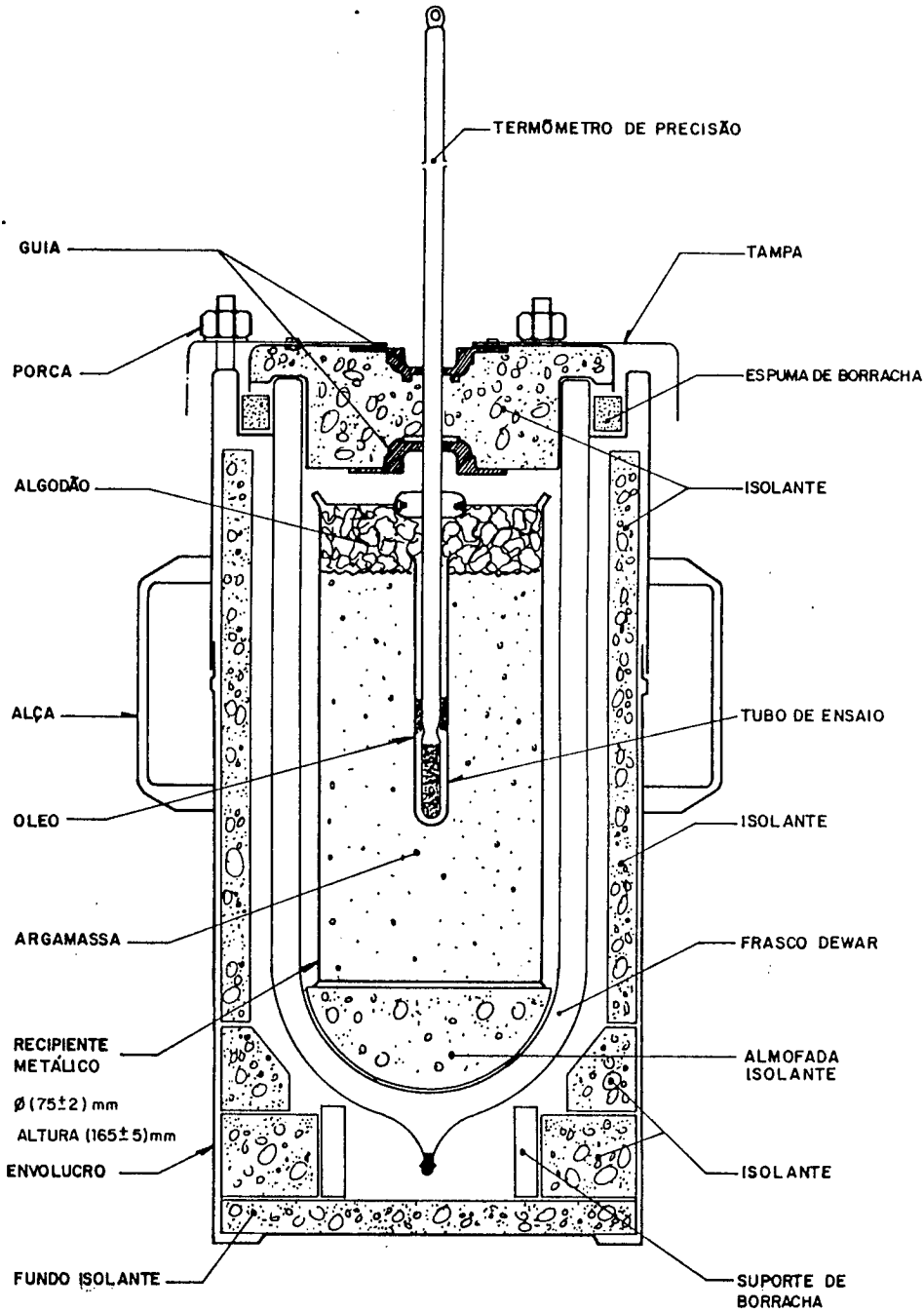


Figura 3.88 — Detalhes do frasco térmico de Langavant e recipiente da amostra para a determinação do calor de hidratação do cimento

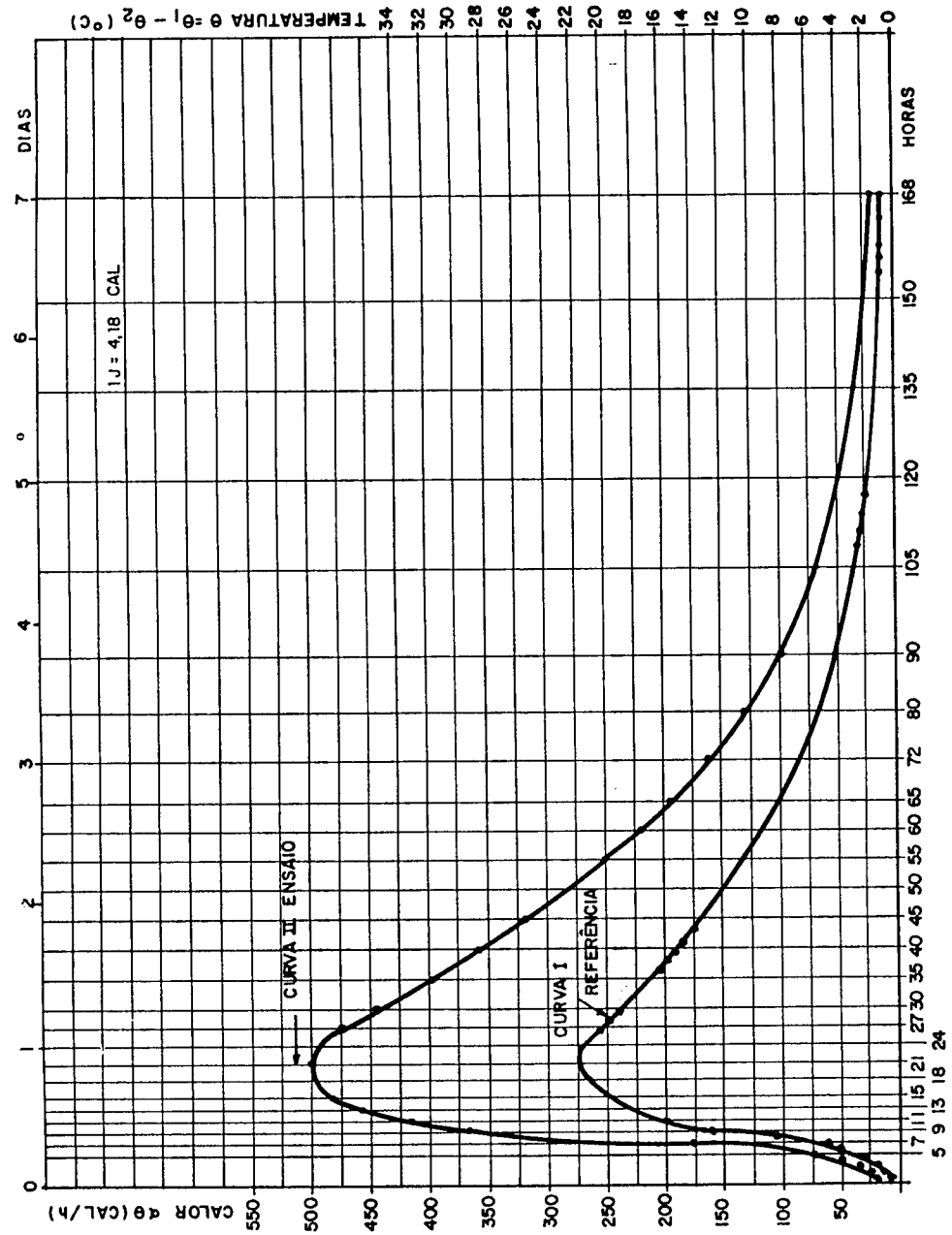


Figura 3.89 — Curvas de temperatura ao longo do tempo, no ensaio pela garrafa de Langavant

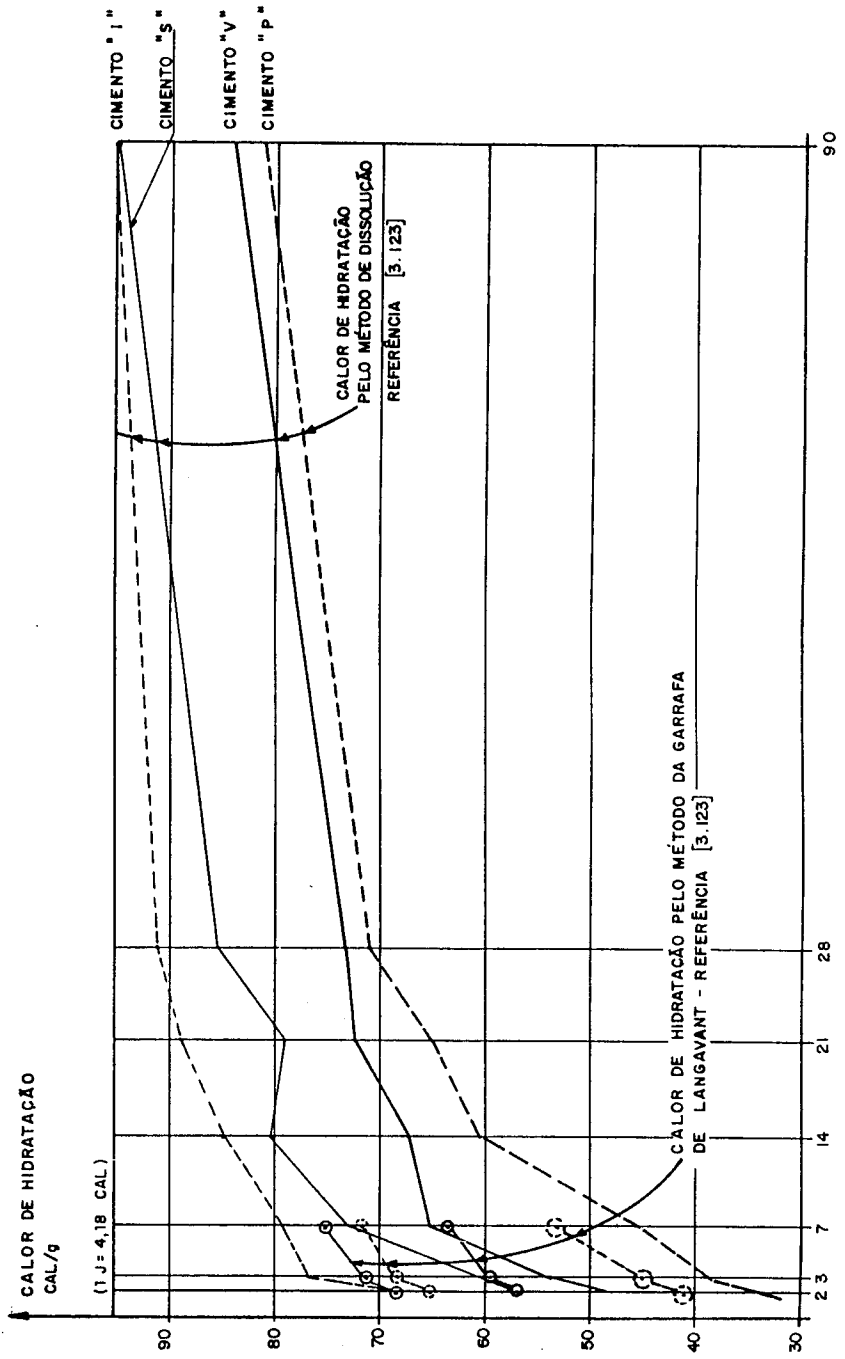


Figura 3.90 — Valores de calor de hidratação pelo métodos de dissolução e da garrafa de Langavant

O calor de hidratação é obtido por (III-XXXI)

$$H_{idade}^{G} = \frac{C_{cal}}{M} \cdot \theta_t + \frac{1}{M} \int_0^t C\theta \, dt \quad \text{(III-XXXI) onde:}$$

H_{idade}^{G} = Calor de hidratação pela garrafa de Langavant
C_{cal} = Capacidade calorífica da garrafa, é uma constante do instrumento
M = Massa de cimento
θ_t = Temperatura de aquecimento da argamassa ensaio θ_1, sobre a argamassa de referência θ_2 no tempo t
$C\theta$ = Coeficiente de perda calorífica, constante do aparelho

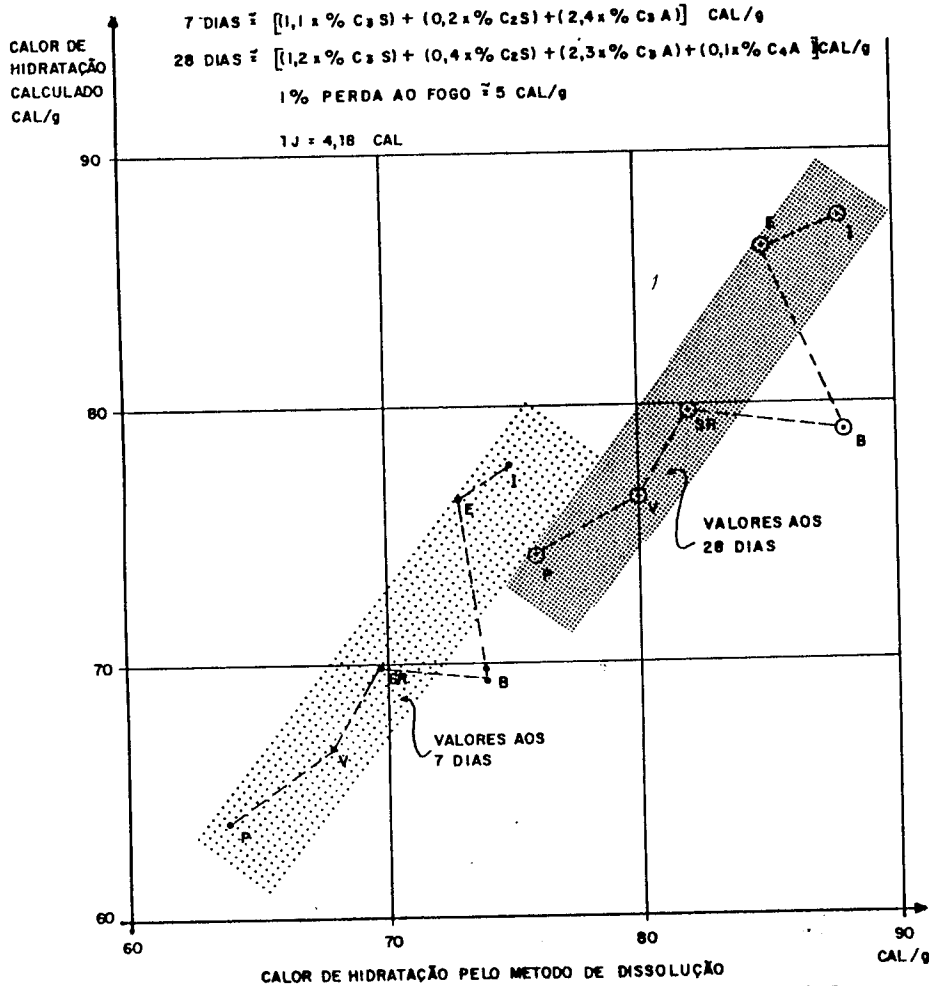


Figura 3.91 — Correlações entre os valores de calor de hidratação pelo método de dissolução e os obtidos pelo cálculo (referência) [3.124]

A figura 3.90 apresenta algumas correlações entre valores obtidos [3.123] pelos métodos de dissolução e da garrafa de Langavant.

O calor de hidratação pode também ser estimado através de cálculos com base nos resultados na análise química, a partir dos compostos do método de Bogue, através de (III-XXXII) e (III-XXXIII)

$$H_7 = (1{,}1 \times \%C_3S) + (0{,}2 \times \%C_2S) + (2{,}4 \times \%C_3A) \text{ (em cal/g)} \quad \text{(III-XXXII)}$$

$$H_{28} = (1{,}2 \times \%C_3S) + (0{,}4 \times \%C_2S) + (2{,}3 \times \%C_3A) + (0{,}1 \times \%C_4AF) \text{ em (cal/g)} \quad \text{(III-XXXIII)}.$$

Durante o período entre 1977 e 1979, na construção da hidroelétrica de Itaipu, através de ensaios em mais de três mil amostras, correspondentes a mais de um milhão de toneladas de cimentos de seis diferentes procedências, os valores de calor de hidratação obtidos pelo calorímetro e calculados pelas expressões acima [3.124] foram correlacionados como mostra a figura 3.91.

Nota-se, então, uma boa correlação entre os dois conjuntos de valores, para seis cimentos de diferentes procedências.

3.2.3.7 Resistência à compressão

A resistência mecânica do cimento é a propriedade mais indicada para os objetivos estruturais. A resistência é solicitada em todas as especificações.

A resistência depende, além da composição química do cimento, do grau de adensamento e coesão dos materiais.

No Brasil, a resistência mecânica dos cimentos é determinada por meio de corpos de prova cilíndricos padronizados pela ABNT [3.114], ensaiados a várias idades, por compressão axial simples.

É importante ressaltar que, ao se comparar resultados de resistência de cimentos de várias procedências, deve ser levado em consideração o método de ensaio utilizado, visto que poderá haver diferença nos procedimentos, forma dos corpos de prova e nos resultados.

Os silicatos e aluminatos de cálcio têm uma notável influência sobre a velocidade de hidratação do cimento e, consequentemente, sobre a velocidade de endurecimento. Os silicatos de cálcio são os principais responsáveis pela resistência mecânica, sendo que a velocidade de endurecimento do C_3S é maior que a do C_2S. Apesar de ter grande influência na velocidade de endurecimento, a composição química do cimento influi pouco sobre o valor da resistência final. Em geral, os cimentos com maior teor de C_2S apresentam uma resistência final um pouco mais elevada, pelo fato do C_2S produzir mais tobermorita e menos $Ca(OH)_2$ que o C_3S.

Como já citado no item 3.2.3.2 e mostrado na figura 3.71, a velocidade de endurecimento do cimento é enormemente afetada pelo grau de finura do cimento.

Para a determinação da resistência à compressão dos cimentos são usados corpos de prova moldados com argamassa, dosada e proporcionada sob certas condições padrões.

No Brasil é usado o procedimento padronizado ABNT [3.114] alterado a partir de 1978, quando adotou uma argamassa com relação A/C fixa e igual a 0,48 (anteriormente determinava-se o teor de água para uma consistência estabelecida e medida pela mesa de escoamento), e também o procedimento de mistura passou a permitir o processo mecânico. Dispensou-se a obrigatoriedade de se obter a consistência normal da argamassa.

Para a determinação da resistência à compressão axial simples de argamassa de cimento são utilizados: balanças com acuracidade de 0,1%, misturador mecânico (ver item 3.1.3.14 e figura 3.37), fôrmas cilíndricas, como mostra a figura 3.92

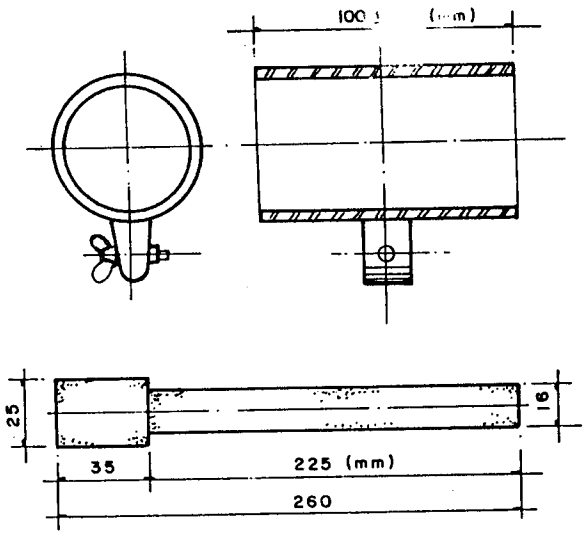


Figura 3.92 — Molde e soquete para ensaio de resistência

Para o ensaio de rupt... compressão deve ser usada uma máquina de ensaio adequada, como mostrada na figura 3.93.

A argamassa para ensaio é dosada com a areia normal de granulometria mostrada na figura 3.94 e preparada manual ou mecanicamente, sendo que após a mistura moldam-se os corpos de prova com adensamento padronizado. Posteriormente, os corpos moldados são colocados em câmara úmida. Após 22 ou 24 horas os corpos de prova são desmoldados e colocados em tanque para uma cura adequada, até a idade dos ensaios.

À idade do ensaio, os corpos de prova são capeados e é medido o diâmetro, após o que são submetidos à compressão axial simples determinando-se a tensão de ruptura.

O capeamento dos corpos de prova tem influência significativa no valor da resistência, como mostra a figura 3.95 [3.93], evidenciando que o capeamento com mistura de enxofre é o mais adequado, pois permite melhores resultados, com menor variação.

A temperatura da água de cura também provoca variações na resistência da argamassa, como mostrado na figura 3.96, sendo que a referência [3.93] mostra que a influência pode se fazer sentir mesmo à idade de 28 dias, no caso de cimento com adições ativas (amostra B).

A velocidade de carregamento também influencia os valores da resistência à compressão, como ilustra a figura 3.97, da referência [3.93].

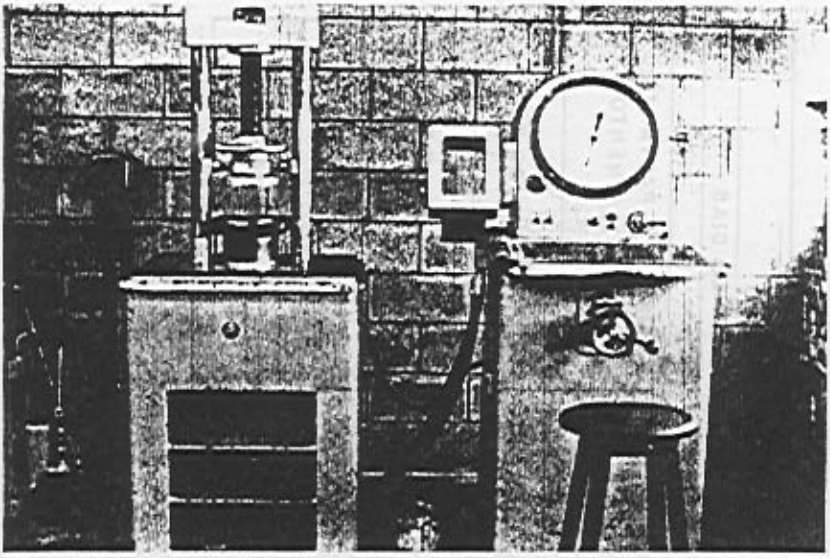


Figura 3.93 — Máquina de ensaio (prensa) para ensaios de compressão — capacidade 20 t

MATERIAL RETIDO ENTRE AS MALHAS (mm)	PORCENTAGEM EM PESO
2,4 a 1,2	25
1,2 a 0,6	25
0,6 a 0,3	25
0,3 a 0,15	25

AREIA NORMAL PADRÃO ABNT – NBR – 7214
NBR – 7215

MATERIAL	MASSA (g) PARA MISTURA	
	MANUAL	MECÂNICO
CIMENTO	312	624
ÁGUA	150	300
AREIA NORMAL (2,4 a 1,2 mm)	234	468
AREIA NORMAL (1,2 a 0,6 mm)	234	468
AREIA NORMAL (0,6 a 0,3 mm)	234	468
AREIA NORMAL (0,3 a 0,15 mm)	234	468

COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA PARA MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA

Figura 3.94 — Areia normal e composição da argamassa para ensaio de compressão (NBR-7215)

Figura 3.95 — Influência do capeamento na resistência de argamassas

VALORES	CIMENTO	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO					
		3 DIAS		7 DIAS		28 DIAS	
		TIPO DE CAPEAMENTO					
		MISTURA ENXOFRE	PASTA DE CIMENTO	MISTURA ENXOFRE	PASTA DE CIMENTO	MISTURA ENXOFRE	PASTA DE CIMENTO
MEDIA (MPa)	A *	20,8	18,7	25,7	22,9	34,1	29,2
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO %		1,2	6,8	2,0	4,3	1,6	9,8
MEDIA (MPa)	B *	12,4	11,7	20,4	18,7	37,3	35,8
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO %		2,0	4,3	2,1	5,5	2,2	4,4

* REFERENTE ÀS AMOSTRAS DA FIGURA (3.59)

* * ENXOFRE 67,5 % E 32,5 % DE AREIA QUARTZOSA COM FINURA BLAINE 2000 cm^2/g

* * * PASTA DE CONSISTÊNCIA NORMAL

Figura 3.96 — Influência da temperatura da água de cura na resistência da argamassa

CIMENTO	TEMPERATURA DA ÁGUA DE CURA °C	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa) IDADE								
		1	2	3	5	7	14	21	28	35
A *	13	3,4	10,2	13,9	18,3	21,0	25,3	28,0	29,7	—
	23	10,1	17,0	20,3	24,4	25,9	30,2	31,5	33,7	—
	33	13,7	20,4	22,1	26,1	27,0	30,3	31,0	32,6	—
B *	13	1,4	4,2	6,1	9,6	13,7	18,3	22,4	24,9	26,8
	23	3,3	7,9	11,4	17,6	21,2	28,1	34,1	37,4	39,4
	33	6,1	14,3	19,1	25,8	30,0	36,5	39,5	42,0	44,5

* REFERENTES AS AMOSTRAS DA FIGURA (3.59)

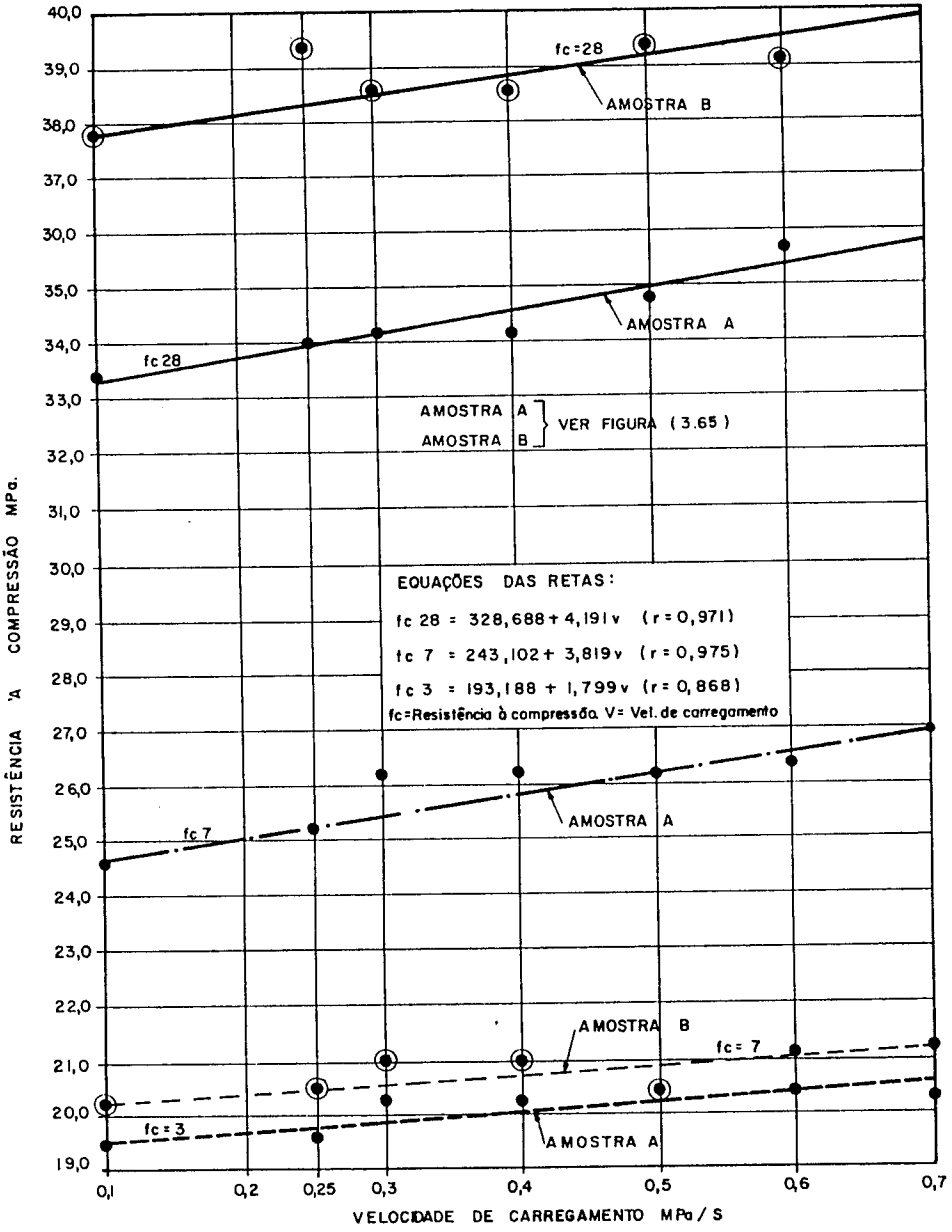


Figura 3.97 — Influência da velocidade de carregamento na resistência de argamassas

3.2.3.8 Análise química

A análise química tem a finalidade de determinar os componentes considerados primordiais e de interesse para conhecimento e compreensão do desempenho do material.

A análise química permite obter informações dos vários constituintes que são úteis nas interpretações de diversas propriedades do cimento, argamassa ou concreto.

Para a obtenção dos valores dos constituintes são seguidas rotinas estabelecidas em várias normas [3.125] a [3.132] [3.133] e [3.134], que são adotadas no Brasil. Normalmente prevêem dois processos — os de "arbitragem" e os "optativos".

Os processos de "arbitragem" são usados para análises com intuito de confronto com uma especificação.

Os processos "optativos" são rotinas mais rápidas ou convenientes que os de "arbitragem" e normalmente usados nos ensaios de rotina. Além disso, dependendo da finalidade, a análise pode abranger a determinação dos componentes considerados primordiais ou secundários.

As características e componentes primordiais são: perda ao fogo, resíduo insolúvel, sílica, óxido de ferro, alumina, óxido de cálcio, óxido de magnésio e anidrido sulfúrico. São considerados componentes secundários: o óxido férrico, óxido ferroso, óxido de manganês, óxido de titânio, óxidos de cromo, de vanadio, de zircônio, os sulfetos, os álcalis e óxido de hidróxido de cálcio livres.

A perda ao fogo exprime os constituintes acidentalmente presentes no cimento e eliminados pela calcinação a 1000°C. Representa normalmente a água higroscópica, a de cristalização, a de hidratação e o anidrido carbônico. A água pode advir, em pequena escala, da umidade do ar absorvida durante o processo de fabricação, estocagem e manuseio do produto e da umidade e água combinada do gesso, adicionado durante a moagem. O alto teor de perda ao fogo pode ser, também, indício de uma estocagem prolongada, em condições desfavoráveis, baixa temperatura de clinquerização ou aditivação do produto.

Para sua determinação, uma alíquota da amostra é calcinada em forno mufla (ver figura 3.84), à 1000°C, e expresso em termos percentuais da massa da amostra original.

O resíduo insolúvel representa, no cimento, um material inerte sem propriedades hidráulicas. Normalmente é decorrente da argila que não reagiu com a cal durante a clinquerização para formar os minerais. É um indício muito importante quanto à perfeição obtida nas reações de clinquerização. O resíduo insolúvel pode incluir, também, impurezas provenientes do gesso adicionado na moagem do clínquer ou, ainda, adições que adulterem o produto. É um índice satisfatório para avaliar o teor de material pozolânico dos cimentos Portland pozolânicos, desde que se estabeleça correlação e conheça a origem do produto.

O resíduo insolúvel é determinado por tratamento com ácido clorídrico — HCl —, de modo a não se ter nenhum precipitado de ácido silícico. O resíduo é lavado com carbonato de sódio para eliminar possíveis traços de H_4SiO_4. O resíduo é queimado em forno mufla, calcinando-se até a constância de peso. O resíduo insolúvel é calculado a partir da massa do resíduo obtido, como porcentagem da alíquota inicial.

A sílica (SiO_2) expressa o SiO_2, combinado principalmente ao cálcio e ao alumínio, formando os silicatos ativos do cimento e facilmente solúveis em ácidos diluídos. É determinada pela decomposição dos silicatos solúveis do cimento, pelo HCl, e secagem da solução obtida para insolubilizar a sílica. O resíduo obtido, após um segundo tratamento com HCl, é calcinado a 1000°C e pesado como sílica e resíduo insolúvel. Pela diferença do resíduo insolúvel obtém-se a sílica.

O grupo do hidróxido de amônia (R_2O_3) corresponde à precipitação do alumínio, ferro, titânio e fósforo, por meio do NH_4OH, após a retirada do SiO_2. A precipitação é feita em presença de sais de amônia, para evitar o precipitado de cálcio e magnésio.

A adição de água de bromo é feita para oxidar os íons ferroso e férrico. O precipitado obtido é calcinado e pesado como óxido.

O óxido de ferro (Fe_2O_3) é o valor correspondente a todo ferro presente no cimento sob a forma metálica ou de combinações férricas.

O Fe_2O_3 é determinado em uma porção separada do cimento pela redução do ferro ao estado ferroso, com cloreto estanoso ($Sn\ Cl_2$) e titulado com uma solução padrão de bicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$). O cálculo do teor do óxido de ferro é feito pela multiplicação do volume de ($K_2Cr_2O_7$) gasto na titulação e o fator de equivalência da solução de $K_2Cr_2O_7$.

A alumina é obtida pela diferença do valor do hidróxido de amônia e o Fe_2O_3, acima citado. Havendo presença de anidrido fosfórico (P_2O_5) ou óxido de titânio (TiO_2). estes são computados como Al_2O_3. Para finalidades de pesquisa, ou específicas, as correções devem ser feitas.

O óxido de cálcio (total) — CaO, corresponde a todo cálcio presente no cimento sob forma de silicatos, de aluminatos, de sulfato, de óxido ou hidróxidos livres e, ainda ocasionalmente, sob a forma de carbonato. O CaO é obtido pela precipitação do oxalato de cálcio, sendo que o precipitado é dissolvido em ácido sulfúrico para se obter $H_2\ C_2\ O_4$, que é dissolvido e titulado com permanganato de potássio ($KMn\ O_4$). O estrôncio, eventualmente presente no cimento, é precipitado e calculado como CaO.

O óxido de cálcio (CaO) é obtido pela multiplicação do volume de $KMnO_4$ gasto na titulação pelo fator de equivalência do $KMnO_4$, com relação à alíquota.

O óxido de magnésio — magnésia — MgO —, quando puro, possui propriedades hidráulicas distintas, em função da temperatura a que é submetido. O MgO levemente calcinado combina com a água para formar o $Mg\ (OH)_2$, mas a massa não apresenta pega, enquanto o MgO, calcinado a altas temperaturas, combina-se com água produzindo uma massa consistente e de baixa resistência mecânica [3.104]. O MgO pode apresentar-se incorporado nos outros compostos do clínquer ou na forma de MgO livre, formando cristais de periclásio.

O magnésio, no ensaio, é precipitado em meio amoniacal sob forma de fosfato amoníaco magnesiano, e por calcinação o precipitado é transformado em pirofosfato de magnésio ($Mg_2\ P_2O_7$), obtendo-se o MgO equivalente, por meio das massas e da relação molecular de MgO para o $Mg_2P_2O_7$.

O anidrido sulfúrico SO_3 corresponde a todo enxofre sob a forma de sulfatos.

O SO_3 pode ser determinado, basicamente, através de dois métodos — gravimétrico e por nefelometria.

Pelo método gravimétrico o sulfato é precipitado de uma solução ácida de cimento pelo cloreto de bário ($BaCl_2$), sendo o precipitado calcinado e pesado como sulfato de bário ($BaSO_4$), após o que calcula-se o SO_3 equivalente, pela relação molecular de SO_3 para $BaSO_4$.

Pelo método volumétrico, ou instrumental, ou nefelometria, determina-se a concentração de suspensões extremamente diluídas. É usado o nefelômetro, mostrado na figura 3.98, que possui funcionamento semelhante ao turbidímetro de Wagner.

A obtenção do teor de SO_3 é feita pela comparação com suspensões de calibração.

O clínquer industrial pode apresentar teor de CaO livre, variável, em função de impurezas contidas nas matérias-primas. No clínquer são encontrados [3.135], primordialmente, dois tipos de CaO livre — o primário, formado por falhas de processamento, tais como mal proporcionamento das matérias-primas, ou seja, elevado grau de saturação, moagem e homogeneização deficientes, cozimento e resfriamento deficientes; e o secundário procedente da decomposição do C_3S durante o resfriamento.

A determinação do CaO livre pode ser feita basicamente por dois caminhos. Um é baseado na solubilidade do CaO livre em uma solução quente de álcool-glicerina e sub-

sequente titulação da cal dissolvida na solução alcoólica do acetato de amônia, sendo a cal livre calculada pelo volume de acetato de amônia e o equivalente de CaO da solução. Para essa análise é usado o condensador de refluxo mostrado na figura 3.99.

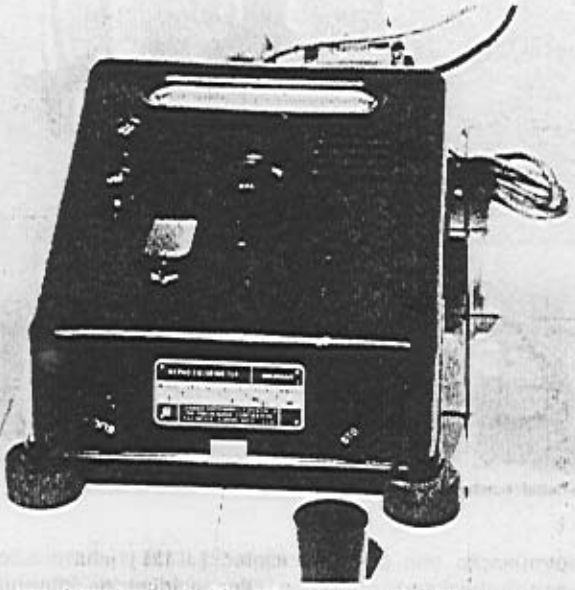


Figura 3.98 — Nefelômetro para determinação do SO_3, pelo processo volumétrico

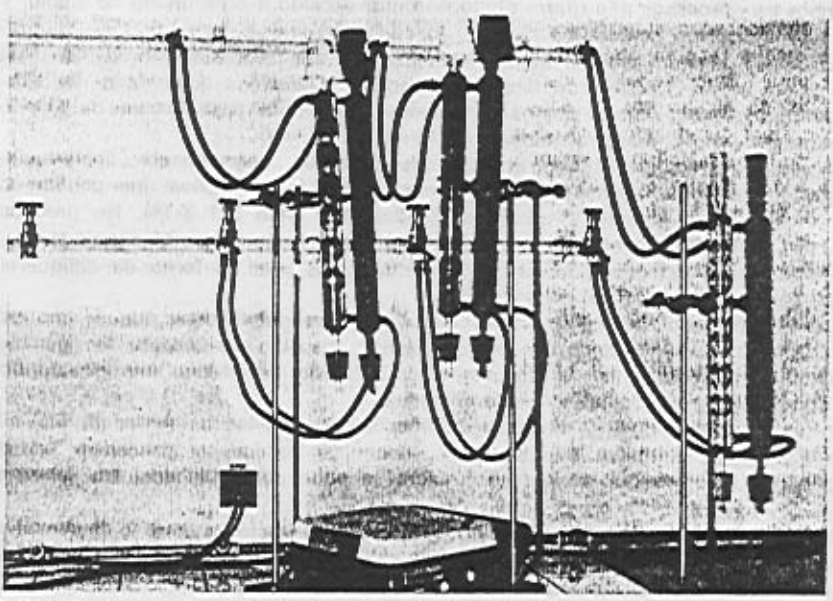


Figura 3.99 — Condensador de refluxo tipo Allihn, para determinação da cal livre

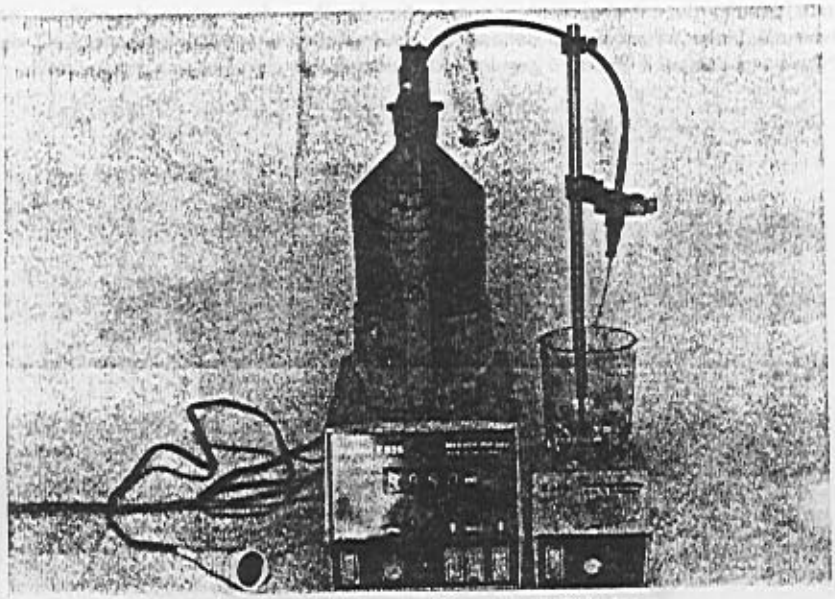


Figura 3.100 — Titulador automático com agitador magnético, para as titulações

A outra determinação tem como princípio [3.135] a dissolução do CaO no etileno glicol, obtendo-se o glicolato de cálcio. Por acidimetria determina-se o equivalente em CaO.

Ambos os processos não fazem distinção entre o óxido e o hidróxido de cálcio, sendo ambos considerados como CaO.

Os álcalis reagem preferencialmente com o SO_3 dos combustíveis ou das matérias-primas para formar sulfatos que ficam no clínquer. Quando a quantidade de SO_3 é insuficiente, os álcalis em excesso são tomados pela belita para formar o $KC_{23}S_{12}$ ou se incorporam como aluminato alcalino na forma de NC_8A_3.

Os sulfatos alcalinos afetam a pega dos cimentos, normalmente, acelerando-a. A presença dos álcalis é indesejável nos cimentos devido a reações que podem ocorrer entre os álcalis do cimento e certos agregados (ver item 3.1.3.14). No processo de fabricação, os álcalis beneficiam o rebaixamento da temperatura de formação da fase líquida e são responsáveis, também, pela formação de anel no forno de clinquerização, quando o SO_3 está presente em excesso.

A determinação dos álcalis é feita pelo fotômetro de chamas, que é mostrado na figura 3.101 e é constituído por um queimador de alta intensidade de gás-oxigênio, diretamente atomizante, por um fotômetro de fototubo de vácuo, um pré-amplificador, fonte de energia e o receptáculo para amostra.

Através de calibragem e soluções padrões determinam-se os teores de K_2O e Na_2O.

Para a análise química, eventualmente, podem ser usados os processos "optativos", que são mais rápidos que os de "arbitragem" e podem ser aplicados aos controles de rotina.

Nos últimos anos, um considerável esforço tem sido feito para o desenvolvimento de melhores e mais rápidos procedimentos analíticos. Assim é que os métodos complexométricos, baseados no uso do "EDTA", têm sido amplamente estudados e usados para análises químicas de cimento.

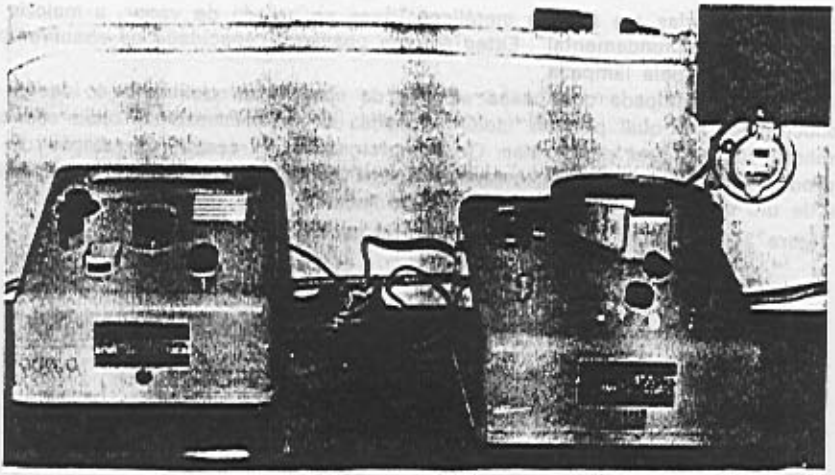


Figura 3.101 — Fotômetro de chamas

O uso de métodos espectrofotométricos é hoje difundido, principalmente, para determinações de constituntes em menores porcentagens no cimento. A espectrofotometria por fluorescência de raio X é uma técnica atual amplamente empregada, principalmente em fábricas de cimento, onde um grande número de análises é exigido para controle de qualidade de produção.

Porém, uma das mais recentes e importantes técnicas analíticas é a espectrofotometria de absorção atômica. Esta técnica instrumental mostrou, em estudos realizados por vários pesquisadores, ser rápida e precisa na determinação da maioria dos elementos presentes no cimento e de outros materiais.

A absorção atômica se baseia nos seguintes fatos:

— todo átomo absorve radiações;
— os átomos de um certo elemento podem absorver energia somente de um certo comprimento de onda, específico desse elemento;
— a quantidade de radiação absorvida é proporcional à concentração dos átomos absorventes.

A espectrofotometria consiste, então, em medir a absorvência, a um comprimento de onda previamente selecionado, de soluções com concentrações conhecidas (soluções padrões) e comparar estes resultados com a absorvência obtida para uma solução de concentração a ser conhecida (solução ensaio).

O espectrofotômetro de absorção atômica consiste (ver figura 3.50), basicamente, de uma fonte de emissão de luz, um sistema de nebulização e queima, um sistema ótico, compreendendo um monocromador, um detector de radiação e um sistema de medida.

O aparelho funciona, resumidamente, da seguinte maneira: a solução de leitura é aspirada por um capilar de sucção e transformada, no nebulizador, em pequenas gotículas que se misturam aos gases combustíveis e oxidantes e vão ao queimador. As partículas dos elementos presentes na solução são então decompostas pelo calor da

chama e transformadas em átomos metálicos livres no estado de vapor, a maioria dos quais no seu "estado fundamental". Estes átomos possuem capacidade de absorver parte da radiação emitida pela lâmpada.

A radiação da lâmpada que passa através da chama do queimador é focada para um monocromador, o qual permite isolar a banda de comprimento de onda específica do elemento que se quer determinar. O monocromador, ao receber a radiação da lâmpada, produz um sinal que é detectado por uma válvula fotomultiplicadora e enviado, através de um amplificador, para o sistema de medida.

A figura 3.102 ilustra o esquema de funcionamento do aparelho.

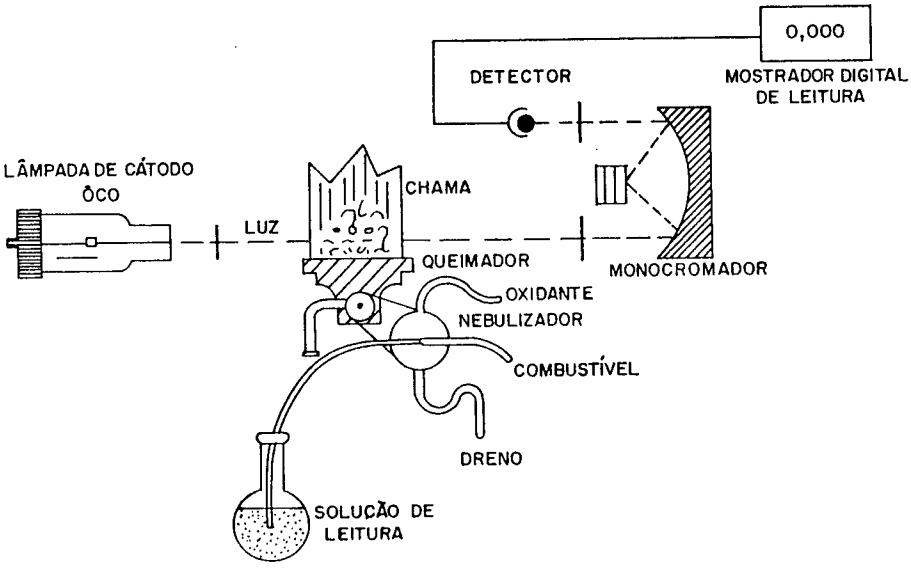


Figura 3.102 — Esquema simplificado de funcionamento do espectrofotômetro de absorção atômica

Durante a construção da obra de Itaipu, a equipe de controle de qualidade de concreto adotou (a partir de 1977) o espectrofotômetro para ensaios de rotina [3.136] e para verificar a precisão e exatidão da análise química de cimento por espectrofotometria de absorção atômica foi analisada uma amostra de cimento padrão do "National Bureau of Standards (NBS)". A análise desse cimento foi feita em triplicata.

Os resultados obtidos são mostrados na figura 3.103. Observa-se ainda nessa figura a diferença entre a média das três determinações e o valor indicado no certificado de análise do NBS, mostra também a amplitude obtida nos três ensaios, para cada componente do cimento, bem como as variações máximas permitidas entre valores extremos de três resultados, segundo o método ASTM-C-114 [Ref. 3.133], nota-se que, na época, somente as determinações da CaO não satisfizeram totalmente os limites permitidos para as variações.

Após a análise química, e a consequente determinação dos componentes do cimento, é comum expressar os resultados através da composição potencial pelo método de Bogue.

COMPONENTES		Al_2O_3 %	Fe_2O_3 %	CaO %	MgO %	Na_2O %	K_2O %	Mn_2O_3 %
DETERMINAÇÃO	1	6,25	2,68	61,0	1,25	0,07	0,46	0,08
	2	6,30	2,69	61,0	1,24	0,06	0,47	0,09
	3	6,11	2,64	58,8	1,28	0,06	0,47	0,09
MÉDIA		6,25	2,67	60,3	1,26	0,06	0,47	0,09
CERTIFICADO DE ANÁLISE "NBS"		6,22	2,62	59,8	1,25	0,07	0,45	0,09
DIFERENÇA (ANÁLISE-CERTIFICADO)		+0,03	+0,05	+0,50	+0,01	-0,01	+0,02	0,00
VARIAÇÃO MÁXIMA ENTRE AS 3 DETERMINAÇÕES		0,19	0,05	2,20	0,04	0,01	0,01	0,01
VARIAÇÃO MÁXIMA PERMITIDA ENTRE OS VALORES EXTREMOS DE 3 RESULTADOS ASTM-C-114		0,30	0,15	0,30	0,24	0,05	0,05	0,05

Figura 3.103 — Resultados da análise do cimento padrão "NBS" feito por espectrofotometria por absorção atômica

Antes de iniciar o cálculo da composição potencial torna-se necessário considerar a quantidade de CaO que está presente na forma de CaO livre e, no caso de cimento, na forma de sulfato de cálcio adicionado na moagem.

Dessa forma, sabe-se que:

$$C_3S = 4.071\ CaO - 7,600\ SiO_2 - 6,718\ Al_2O_3 - 1,430\ Fe_2O_3 - 2,852SO_3 \quad \text{(III-XXXIV)}$$

$$C_2S = 2,867\ SiO_2 - 0,754\ C_3S \quad \text{(III-XXXV)}$$

$$C_3A = 2,650\ Al_2O_3 - 1,692\ Fe_2O_3 \quad \text{(III-XXXVI)}$$

$$C_4AF = 3,043\ Fe_2O_3 \quad \text{(III-XXXVII)}$$

As expressões III-XXXIV a III-XXXVII são aplicáveis a cimentos Portland não aditivados.

3.2.4 Situação geral dos cimentos no Brasil

3.2.4.1 Produção de cimentos

A figura 3.104 ilustra a situação de produção, importação e despacho de cimento no país [3.137], no período 1953 a 1984.

A figura 3.105 ilustra os percentuais dos vários tipos de cimentos mais produzidos no país.

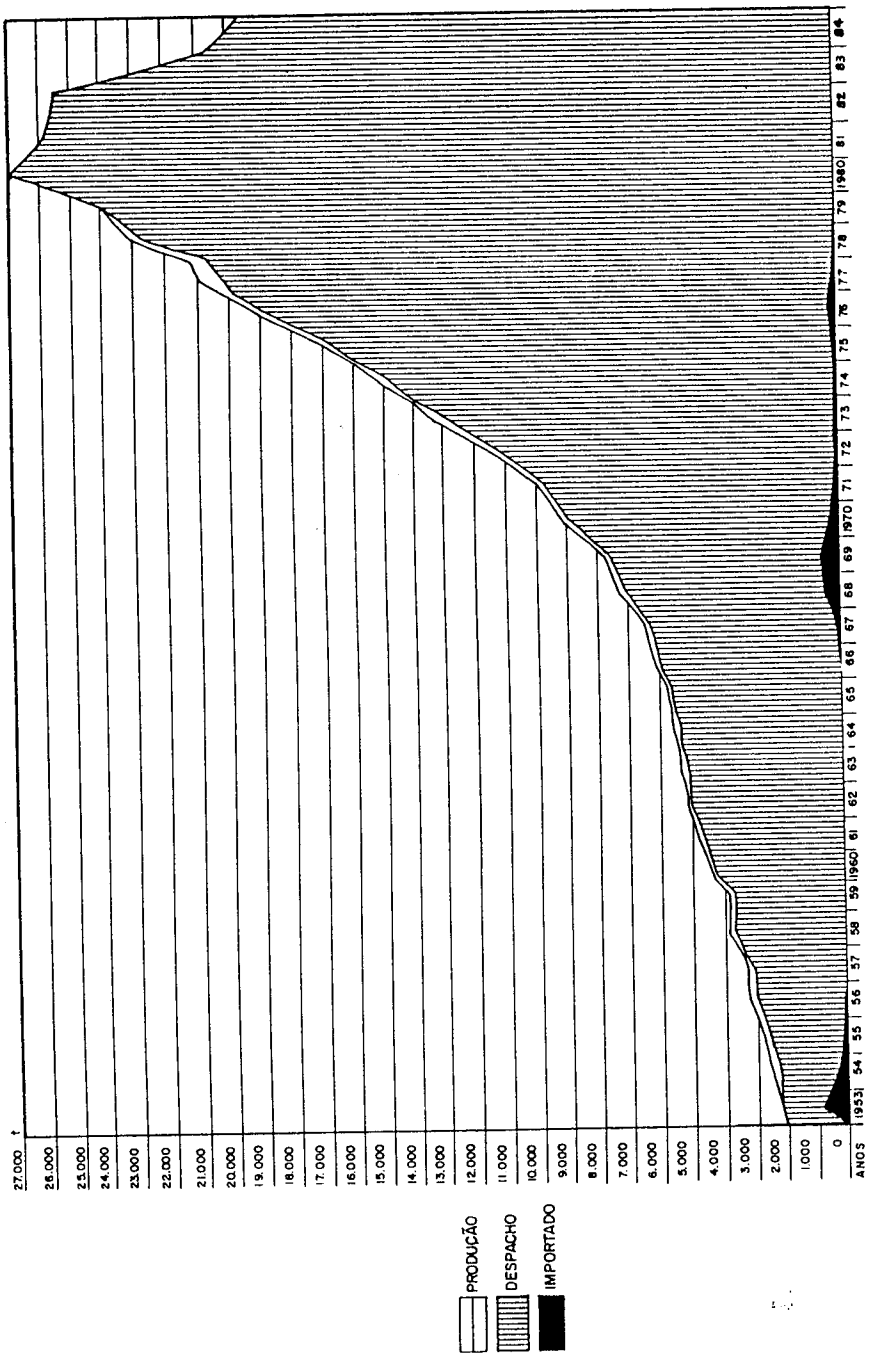
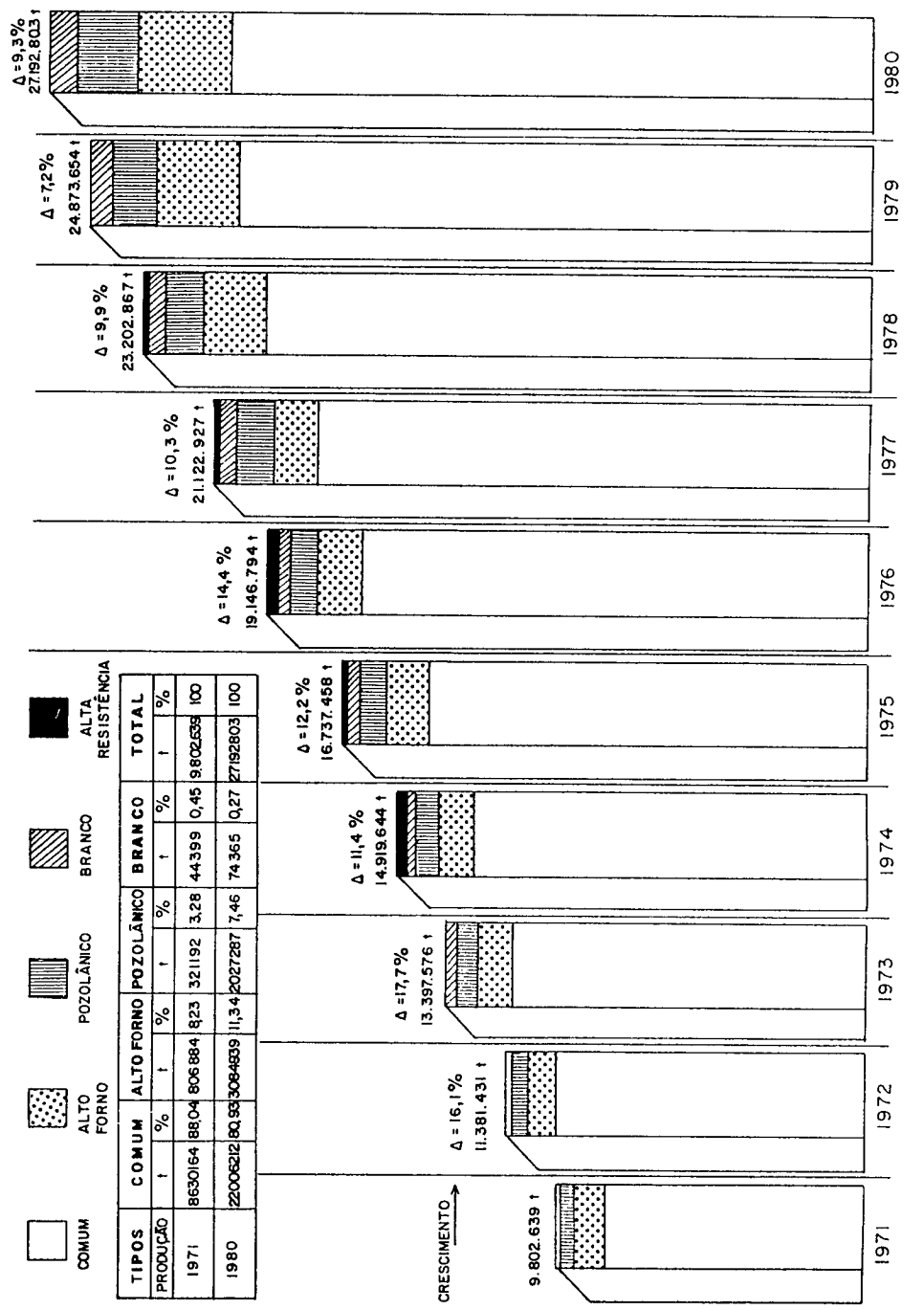


Figura 3.104 — Evolução da produção e consumo de cimento no Brasil [3.137]



TIPOS	COMUM		ALTO FORNO		POZOLÂNICO		BRANCO		TOTAL	
PRODUÇÃO	t	%	t	%	t	%	t	%	t	%
1971	8630164	88,04	806884	8,23	321192	3,28	44399	0,45	9802639	100
1980	22006212	80,93	3084939	11,34	2027287	7,46	74365	0,27	27192803	100

Figura 3.105 — Evolução da produção brasileira por tipos de cimento Portland [3.137]

REFERÊNCIA			NVC	NVC	SOBR	SOBR	SSA	SSA	SSA	SSA	PAF	PAF	PAF	PAF	PAF
TIPO DE CIMENTO			ITAÚ - PR	SERRANA	ARATU	SALV	ITAO	ITAMBÉ	VOTOR	ELDOR.	POTY	NASSAU	ZEBU	ATOL	ITAU
PERÍODO (DIAS)			POZ	POZ	-	-	320	320	320	320	320	320	320	320	POZ
DATA DA COLETA															
FINURA	PENEIRA 200 (% RETIDA)		5,1	3,5	3,8	4,0	2,30	3,50	4,49	4,00	6,13	8,42	5,65	3,89	2,47
	PENEIRA 325 (% RETIDA)		20,7	17,4	11,8	13,7	10,50	11,58	12,59	12,68	-	-	-	-	-
	SUP. ESPECÍFICA (BLAINE) cm²/g		4179	4112	3274	2975	3302	2905	3283	3000	3107	3186	3060	3033	4443
	SUP. ESPECÍFICA (WAGNER) cm²/g														
DENSIDADE g/cm³		APARENTE			1,36	1,42					3,17	3,16	3,18	3,16	3,01
		ABSOLUTA			3,14	3,18		3,10	83,14	3,16	30,4	28,9	28,7	29,8	
ÁGUA DE CONSISTÊNCIA PASTA		GRAMAS			12,4	22,2									
		%	24,4	24,12											
INÍCIO DE PEGA (h: min.)			2:15	2:20	1:47	2:04	3:13	3:06	3:13	3:59	2:23	2:50	2:36	2:38	2:01
EXPANSÃO EM AUTO CLAVE (%)			0,031	0,344	0,021	0,066									0,4
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	CONSISTÊNCIA DE ARGAMASSA	GRAMAS			0,478										
		A/C	0,48	0,48	0,048	0,469					0,48	0,48	0,48	0,48	0,488
	FLOW (mm)														
TENSÃO	DATA DA MOLDAGEM														
	3 DIAS (kg/cm²)		223	136	194	160	176	171	173	145	225	234	221	232	176
	7 DIAS (kg/cm²)		285	238	262	264	227	228	225	226	269	282	278	282	227
	28 DIAS (kg/cm²)		378	397	391	369	303	318	318	360	341	386	361	376	324
	90 DIAS (kg/cm²)				478	393	349	375	373	387					
CALOR DE HIDRATAÇÃO	7 DIAS (CAL/g)		68	67	71	75					48,7	62,2	55,6	61,0	71,8
	28 DIAS (CAL/g)		78	67	82	83					70,4	78,5	69,5	72,6	82,9
ANALISE QUÍMICA (%)	PERDA AO FOGO		3,58	3,60	1,30	1,05	1,23	1,34	1,01	0,97	2,58	2,85	2,43	1,79	1,33
	INSOLÚVEIS		6,62	7,39	0,15	0,05	0,36	0,43	0,31	0,18	0,62	0,70	0,81	0,57	17,89
	SiO_2		21,19	22,84	22,15	21,75	19,69	20,31	20,32	20,55	19,86	20,03	20,26	19,41	18,22
	Fe_2O_3		3,00	2,96	3,32	2,47	2,99	3,49	3,37	3,51	2,62	2,54	2,59	2,93	2,65
	Al_2O_3		7,42	9,08	5,98	6,03	5,57	5,27	5,39	6,08	5,75	5,60	5,72	5,34	6,02
	CaO		56,52	53,74	62,93	64,47	61,35	64,47	61,90	63,35	62,56	62,42	62,68	62,42	49,44
	MgO		4,49	3,07	1,27	2,13	3,71	1,81	4,56	3,12	2,84	2,59	2,59	3,84	4,58
	SO_3		2,69	1,67	1,81	1,13	2,26	2,06	2,14	1,30	2,03	2,17	2,10	1,97	2,58
	Na_2O		0,21	0,86	0,65	0,70									
	K_2O		0,86	0,61	0,32	0,03									
	EQUIV. ALCALINO EM Na_2O		0,76	1,26	0,86	0,75	1,25	0,36	0,21	0,30					
	CAL LIVRE EM CaO		1,84	1,04	0,69	0,24	1,97	0,72	1,41	0,53	1,80	1,42	0,87	2,20	
COMPOSTOS MÉTODO DE BOGUE (%)	C_3S		-	-	37,97	49,84					53,32	52,65	54,03	54,60	
	C_2S		-	-	34,86	24,76					14,71	15,65	15,63	14,59	
	C_3A		-	-	10,23	11,80					8,39	8,32	8,73	7,95	
	C_4AF		-	-	10,10	7,32					7,70	7,87	7,93	8,93	
	CaSO4		-	-			3,85	3,51	3,69						

Figura 3 106 — Resultados médios de cimentos usados em barragens brasileiras [3.138]

REFERÊNCIA													
TIPO DE CIMENTO			AVC	CPC	ISC	ITB	JPC	NVC	NVC	NVC	NVC	NVC	NVC	NBV	NVC
PERÍODO (DIAS)			CORUMBÁ	CORUMBÁ	CORUMBÁ	VÁRIOS	CORUMBÁ	ITAÚ - MG	ICOR	BARR	STA. R	ELDO	GOIÁS	CAMPEÃO	M.CLARO
DATA DA COLETA			I-II	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320
FINURA	PENEIRA 200 (% RETIDA)		4,0	6,2	6,2	5,8	6,6	5,2	4,9	7,3	7,2	8,1	8,6	8,8	7,8
	PENEIRA 325 (% RETIDA)		12,5	10,4	11,2		11,3	12,2	15,1	29,6	25,2	22,1	29,5	22,1	24,7
	SUP. ESPECÍFICA (BLAINE) cm^2/g		3462	3757	3499	3579	3236	3356	3432	3484	3753	3504	3209	3862	3255
	SUP. ESPECÍFICA (WAGNER) cm^2/g														
DENSIDADE g/cm^3		APARENTE													
		ABSOLUTA													
ÁGUA DE CONSISTÊNCIA PASTA		GRAMAS													
		%	22,3	22,6	22,8		22,4	23,3	23,0	22,9	21,7	22,2	22,6	23,6	22,1
INÍCIO DE PEGA (h:min.)			1:38	1:44	2:09	2:56	2:56	2:52	2:33	1:45	5:06	3:49	1:39	2:33	2:07
EXPANSÃO EM AUTO CLAVE (%)			0,102	0,135	0,113	0,11	0,045	0,623	0,092	0,227	0,021	0,083	0,028	0,095	0,075
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	CONSISTÊNCIA DE ARGAMASSA	GRAMAS													
		A/C	0,478	0,458	0,468	0,490	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
	FLOW (mm)		165	164	165		165	188	184	180	189	175	172	171	179
	DATA DA MOLDAGEM														
	TENSÃO 3 DIAS (kg/cm²)		198	233	226	187	172	230	185	203	200	215	143	211	153
	TENSÃO 7 DIAS (kg/cm²)		292	328	315	264	246	300	286	263	258	283	208	267	215
	TENSÃO 28 DIAS (kg/cm²)		388	425	413	382	388	367	412	334	343	399	327	375	319
	TENSÃO 90 DIAS (kg/cm²)														
CALOR DE HIDRATAÇÃO	7 DIAS (CAL/g)		75,7	84	82	69	69	72	73	72	72	73	66	71	66
	28 DIAS (CAL/g)		87,8	95	95	82	82	85	85	82	81	83	75	83	77
ANALISE QUÍMICA (%)	PERDA AO FOGO		1,30	1,00	1,30	0,92	0,95	1,43	1,24	3,67	3,09	1,74	2,01	3,67	2,67
	INSOLÚVEIS		0,23	0,20	0,10	0,21	0,09	0,16	0,11	1,00	1,74	0,54	0,37	0,92	0,49
	SiO_2		20,59	21,22	21,22	21,42	21,67	20,26	21,03	18,86	21,35	21,49	21,02	20,08	21,86
	Fe_2O_3		3,40	3,09	3,04	3,66	3,80	2,75	3,20	3,47	2,45	3,08	3,34	2,71	3,31
	AL_2O_3		5,30	5,44	5,44	4,73	5,10	5,29	5,47	5,66	5,64	5,69	5,70	6,84	5,23
	CaO		64,07	64,40	64,27	63,58	63,49	63,52	64,12	63,04	61,03	62,62	63,44	61,11	62,68
	MgO		2,44	2,53	2,46	3,07	2,55	3,74	2,53	1,37	3,12	2,43	1,77	1,09	1,39
	SO_3		1,48	1,45	1,47	1,68	1,65	1,83	1,59	2,49	2,28	2,00	2,47	2,82	2,15
	Na_2O		0,04	0,91	0,08	0,109	0,10	0,09	0,05	0,16	0,09	0,11	0,14	0,07	0,12
	K_2O		0,70	0,71	0,71	0,602	0,65	0,95	0,66	0,54	0,75	0,70	0,33	0,67	0,51
	EQUIV. ALCALINO EM Na_2O		0,50	0,56	0,55	0,50	0,52	0,71	0,49	0,51	0,58	0,57	0,36	0,51	0,45
	CAL LIVRE EM CaO		1,60	1,15	1,05	1,166	0,57	1,33	1,09	1,59	0,26	0,28	1,91	2,15	0,57
COMPOSTOS MÉTODO DE BOGUE (%)	C_3S		56,77	55,58	55,39	49,7	49,04	54,55	50,92	58,51	36,27	44,12	40,70	34,88	40,72
	C_2S		16,32	18,87	19,03	23,45	25,39	16,97	21,90	19,76	33,86	28,16	29,57	27,00	31,98
	C_3A		8,29	9,20	9,26	6,5	6,82	9,39	9,08	8,91	10,79	9,73	9,44	12,57	8,25
	C_4AF		10,34	9,39	9,25	11,08	11,75	8,35	9,74	10,56	7,46	9,23	0,17	8,24	10,0
$CaSO_4$			—	—	—	2,88	—	—	—	—	—		—	—	—

Sabe-se também que dos cimentos produzidos, de 75% a 80%, foi transportado em sacos e o restante a granel.

A figura 3.106 fornece um resumo de vários cimentos mais usados em diversas grandes obras do país (barragens), totalizando um volume de concreto [3.138] de aproximadamente 38.000.000 m³.

Dos resultados obtidos pode-se observar que os principais componentes se mantiveram nos seguintes intervalos:

C_3S	— 35	a	59%
C_2S	— 14	a	35%
C_3A	— 6	a	12%
C_4AF	— 7	a	12%
CaO	— 50	a	65%
SiO_2	— 15	a	23%
Al_2O_3	— 5	a	10%
Fe_2O_3	— 2,5	a	3,8%
MgO	— 1,0	a	6,0%
Na_2O	— 0,04	a	0,91%
K_2O	— 0,03	a	0,86%
SO_3	— 1,15	a	2,82%

3.3. Materiais pozolânicos

3.3.1 Generalidades

É provável que os romanos tenham adquirido dos gregos parte dos conhecimentos sobre argamassas, devido à grande semelhança de suas construções [3.72].

As denominadas argamassas romanas mantiveram a reputação através dos tempos modernos devido ao desempenho das suas construções até os dias atuais, como os Aquedutos, o Coliseu e as Termas.

A melhor argamassa, elaborada pelos romanos, parece ter sido composta com cal misturada com uma rocha ou pó vulcânico, denominado "pozolana", e deve ter sido encontrado em Pozzuoli nas proximidades do Vesúvio (Vesuvius).

Embora a utilização da pozolana seja anterior à era cristã, o emprego de material pozolânico com fins inibidores da reação álcalis-agregado foi objeto de atenção, pela primeira vez, como uma tentativa, na barragem de Big Dalton, construída antes de 1930, nos Estados Unidos [3.139]. Nessa oportunidade usou-se a pumicita. Durante a construção da barragem de Bonneville, construída pelo Corps of Engineers, e completada em 1938, foi usado um cimento Portland Pozolânico. Esse cimento foi produzido pela moagem conjunta de clínquer com uma pozolana processada por calcinação (a 815°C) de um material vulcânico alterado.

Embora no início pozolana se referisse apenas ao material encontrado perto de Pozzuoli, o termo passou a ser aplicado a outros depósitos de cinza vulcânica. Mais tarde, pozolana ou material pozolânico foi usado para designar qualquer material que possui propriedades similares às das cinzas de Pozzuoli, indiferente da sua origem geológica.

Atualmente, define-se material pozolânico como um material silicoso ou sílico-aluminoso que, apesar de não ter por si só propriedades de aglomerante hidráulico, na forma finamente moída e em presença de umidade e à temperatura normal, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio originando compostos insolúveis estáveis e com propriedades aglomerantes.

Estes materiais diferem grandemente quanto à origem, composição e constituição mineralógica.

Para se ter atividade pozolânica, o material deve apresentar uma instabilidade ou alteração na sua estrutura cristalina.

Assim, a sílica e a alumina são reativas quando suas ligações estruturais são fracas ou destruídas por calcinação ou que se apresentem como materiais amorfos como o vidro, opala etc.

Entretanto, para assegurar a reatividade, esta instabilidade, embora necessária, não é suficiente.

Desde que a ação pozolânica tem várias origens e o estado atual do nosso conhecimento da reação do material pozolânico com a cal bem como com o cimento é limitado, dados da sua composição química, estrutura ou instabilidade, embora úteis, a avaliação final da sua pozolanicidade só pode ser feita através de ensaios físicos e mecânicos.

A propriedade fundamental de um material pozolânico é sua capacidade de combinar com a cal. Quando misturada com cimento, a sílica do material combina com a cal, liberada durante a hidratação do cimento. Sílicas amorfas reagem com a cal mais rapidamente do que as sílicas sob forma cristalina e isto constitui, em muitos casos, a diferença entre materiais pozolânicos ativos e materiais de composição química semelhante, porém, com pouca atividade pozolânica.

É de conhecimento geral que a reação cal-sílica é a principal, porém informações recentes indicam que o alumínio e o ferro presentes tomam parte nas reações que atualmente são consideradas razoavelmente complexas.

3.3.2 Classificação

Os materiais pozolânicos podem ser classificados em naturais e artificiais. São naturais aqueles que foram formados por algum processo da natureza e que, em geral, necessitam apenas de uma moagem para seu uso. Os artificiais são aqueles obtidos por um processo industrial ou como um subproduto.

Os materiais pozolânicos naturais são constituídos de rochas que por si só têm propriedades pozolânicas, não tendo necessidade de qualquer tratamento, a não ser uma eventual moagem.

São constituídos de rochas vulcânicas que se solidificaram rapidamente durante uma erupção e ficaram no estado amorfo ou cripto-cristalino como a cinza vulcânica, tufos vulcânicos, riolitos, andesitos.

— Tufos e cinzas vulcânicas — são talvez as primeiras pozolanas de que se têm notícias, usadas na antiguidade pelos romanos e que são ainda hoje exploradas. No Brasil a probabilidade de ocorrência desses materiais recai sobre o Triângulo Mineiro.

— Terras diatomáceas — são os materiais pozolânicos mais ativos na reação com cal. O diatomito é formado por sedimentação de carapaças de microorganismos. A ocorrência de diatomito é bastante grande no Estado de Mato Grosso do Sul e no Nordeste Brasileiro. O seu uso no estado natural, em concretos, é bastante limitado devido ao aumento da água necessária para manter a trabalhabilidade. Isto ocorre devido à forma alongada de suas partículas.

Os materiais pozolânicos artificiais são derivados de certas rochas que submetidas a um tratamento térmico adquirem propriedade pozolânica. Esta propriedade é obtida pela criação duma instabilidade da estrutura interna à custa da saída de íons OH^- da rede cristalina de certas rochas argilosas, aluminosas ou silicosas.

Certos subprodutos industriais como as cinzas volantes, cinzas de destilação de xistos betuminosos, têm propriedades pozolânicas.

São considerados materiais pozolânicos artificiais, os seguintes:

— Rochas contendo minerais de opala — em geral são encontradas na forma de xistos contendo outras formas de sílica, que não amorfa, necessitando de uma calcinação para a ativação completa.
— Xistos e argilas calcinados — as argilas e xistos calcinados são mais comumente usados que as pozolanas naturais, devido à facilidade em se obter matéria-prima adequada à sua fabricação. Em contraposição às jazidas de pozolanas naturais, as de xistos e argilas próprias à fabricação de pozolana são mais uniformes.

A matéria-prima deve ser altamente argilosa sendo que a atividade deve aumentar com o conteúdo de argila. As argilas que mais se prestam como matéria-prima são as cauliníticas e as montmoriloníticas. As propriedades pozolânicas são induzidas ao redor de 500°C, sendo que a temperatura ótima de calcinação está na faixa de 700°C a 850°C. O superaquecimento das argilas a temperaturas superiores provoca uma recristalização com formação de compostos estáveis, diminuindo muito a atividade química. O controle de temperatura tem, portanto, um papel importante na fabricação das pozolanas.

Durante a calcinação, a argila caulinítica desidrata-se completamente do redor de 600°C e o arranjo atômico é destruído formando-se uma substância sílico-aluminosa amorfa. Neste estado a argila adquire suas propriedades pozolânicas.

À temperatura de 950 C há a formação de alumina (Al_2O_3), produto de difícil moagem e baixa atividade. A partir desse fato é conveniente, como método de controle de fabricação, a análise térmica diferencial da argila calcinada. Uma argila bem calcinada, quando submetida à análise térmica diferencial, não deve apresentar o pico endotérmico de 500°C a 560°C, devendo, porém, revelar o pico exotérmico a 950°C.

As argilas montmoriloníticas reagem diferentemente à calcinação. A desidratação ocorre na faixa de 450°C a 750°C, sendo que se verifica na argila a diminuição da distância dos planos interatômicos dos cristais. A quebra da estrutura cristalina só ocorre de 750°C a 1.000°C.

Cinzas volantes (fly-ashes) — são cinzas ricas em sílicas, obtidas em usinas termo-elétricas em que o carvão é pulverizado e usado como combustível.

Um material que pode ser considerado como pozolânico, artificial é a micro-sílica, que é um subproduto da indústria de obtenção ferrosilício ou silício metálico. Consiste de partículas extremamente pequenas de sílica amorfa.

Até recentemente a micro-sílica era considerada um material de rejeito. Atualmente, esse material, proveniente da redução de quartzo com carvão, em forno elétrico de arco-voltáico, que é formado por partículas silicosas vítreas, tem mostrado que exerce influência sobre propriedades do concreto, como um microfiler e/ou com efeito pozolânico.

As partículas sendo constituídas de fase vítrea silicosa (mais de 86% de SiO_2), com elevada área específica [3-140] apresentam alta reatividade com o $Ca(HO)_2$.

3.3.3 Características e propriedades

3.3.3.1 Informações gerais sobre efeitos do material pozolânico nos concretos

Um material pozolânico de boa qualidade apresenta melhor fixação de hidróxido de cálcio com uma maior velocidade de reação.

A capacidade de fixação de cal não depende só da parte solúvel dos silicatos, mas também dos aluminatos e, em geral, da afinidade química total da pozolana.

Como a afinidade química da pozolana depende diretamente do grau de finura, poder-se-á aumentar a quantidade de cal, se a finura for suficientemente grande.

O uso de um bom material pozolânico em quantidade adequada e com condições ideais de cura, melhora a maioria das propriedades importantes de um concreto. É bom lembrar que os concretos contendo pozolanas necessitam de uma cura mais prolongada, tendo em vista as suas características de hidratação.

As pozolanas têm sido usadas em substituição ao cimento na proporção de 15% a 40%, nos concretos. Essa porcentagem de substituição refere-se ao volume sólido do cimento, para facilidade dos trabalhos de dosagem.

As pozolanas podem ser usadas como material a ser misturado no concreto durante a betonagem, ou ser moídas juntamente com clínquer e gesso dando os cimentos pozolânicos.

As pozolanas, quando usadas em substituição parcial do cimento, aumentam a plasticidade do concreto e diminuem a segregação. Essa melhoria é mais pronunciada nos concretos "pobres" (altas relações água/cimento) do que nos "ricos" (baixas relações água/cimento), e depende diretamente da finura do produto e da porcentagem substituída.

Como citado acima, as pozolanas vêm contribuir para evitar a segregação. Essa melhoria faz-se também sentir em um tipo específico de segregação, que é a exsudação (bleeding).

Concretos contendo pozolanas apresentam menores resistências até, aproximadamente, 28 dias de idade. Às idades mais avançadas (geralmente superiores aos 28 dias) é normal que os concretos com pozolanas tenham resistências mais altas que concretos equivalentes, sem pozolana. Uma limitação, portanto, da pozolana é o seu uso em obras onde se requeira altas resistências do concreto a baixas idades, como ocorre em peças pré-moldadas. Nessa situação deve-se fazer uma análise cuidadosa tendo em vista o mínimo teor de pozolana para combater a reatividade dos agregados com os álcalis do cimento.

As pozolanas agem positivamente, tornando os concretos mais impermeáveis. Também essa propriedade é mais afetada em concretos pobres do que nos de alto teor de aglomerante.

As pozolanas naturais, em geral, aumentam a água requerida para obter uma dada trabalhabilidade e, portanto, produzem concretos sujeitos a uma maior retração hidráulica.

Os concretos com cimento e pozolana desprendem menos calor durante a hidratação do que os concretos sem pozolana. Saliente-se também que esse calor é melhor distribuído. Esse fato contribui, com certa parcela, para evitar as fissuras em concretos de grande massa.

Estudos efetuados [3.141] mostram que concretos produzidos com material pozolânico resistem de maneira surpreendente ao ataque dos sulfatos, superando inclusive o desempenho dos concretos produzidos com cimentos resistentes aos sulfatos.

Stanton [3.139] descobriu que a adição de certos materiais silicosos, finalmente moídos, reduziam a expansão de argamassas contendo agregado reativo e cimento de alto teor de álcalis. Posteriormente, o uso de pozolana foi reconhecido como um método eficiente no controle da reação álcalis-agregado. Tendo uma superfície específica alta, a pozolana reage prontamente com os álcalis impedindo que os mesmos se concentrem na superfície dos agregados. Assim, o produto formado fica distribuído por toda a massa de concreto, não apresentando a tumefação osmótica.

3.3.3.2 Rotina para avaliação de material pozolânico

No Brasil, a Cesp ao longo de vários anos [3.142] [3.143] utilizou grande quantidade de material pozolânico, como se ilustra na figura 3.107.

A maior parte desse material pozolânico constitui-se de pozolanas obtidas pela calcinação de argilas.

BARRAGEM	PERÍODO DE CONSTRUÇÃO	VOLUME TOTAL DE CONCRETO (m^3)	QUANTIDADE TOTAL DE POZOLANA DE ARGILA CALCINADA (t)	QUANTIDADE TOTAL DE POZOLANA POR m^3 DE CONCRETO
JUPIÁ	1962 - 1969	1.600.000	44.000	27 kg
ILHA SOLTEIRA	1968 - 1978	3.750.000	148.000	40 kg
CAPIVARA	1970 - 1975	680.000	12.000	17 kg
ÁGUA VERMELHA	1973 - 1979	1.560.000	65.000	40 kg

Figura 3.107 — Uso de pozolana de argila calcinada, em obras da Cesp [3.143]

Para o conhecimento do material e orientação para o beneficiamento e produção introduziu-se uma rotina de procedimento [3.144] que se firmou ao longo do período.

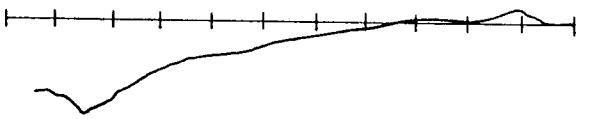
A rotina consiste no levantamento geotopográfico da região de interesse, após o que são feitas coletas de amostras.

É comum aceitar materiais argilosos, que tenham mais de 80% passante pela peneira de malha n.° 270 (0,053 mm). Essa limitação auxilia na escolha das áreas a serem estudadas em detalhe.

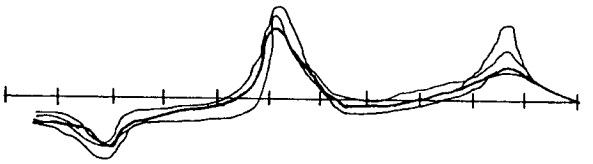
Após o delineamento da área são tomadas amostras representativas para a análise térmica diferencial, para verificação dos picos endo e exotérmicos, pois durante a calcinação a argila caulinítica se desidrata completamente entre 500°C e 560°C e o arranjo atômico é destruído formando uma substância sílico-aluminosa amorfa, sendo que neste estado a argila adquire as propriedades pozolânicas. A temperatura de 950°C (pico-exotérmico), aproximadamente, há a formação de alumina.

As argilas montmorilinítica reagem um pouco diferente das cauliníticas, pois a desidratação ocorre na faixa de 450°C a 750°C e a quebra da estrutura cristalina se dá entre 750°C e 1.000°C.

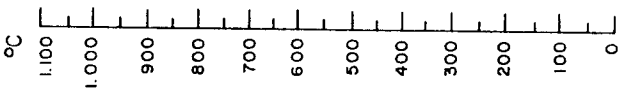
A figura 3.108 de [3.142] ilustra uma avallação pela análise térmica diferencial (ATD), feita sobre amostras de argilas.

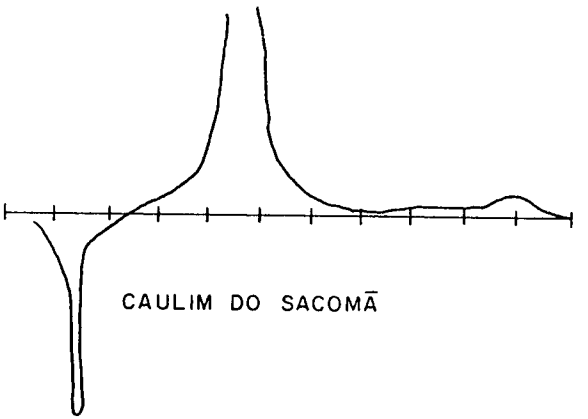


ARGILA CALCINADA



AMOSTRAS DE ARGILAS DA
ÁREA DAS PERDIZES – JUPIÁ





CAULIM DO SACOMÃ

Figura 3.108 — Análise térmica diferencial — Material de Jupiá [3.142]

Com base na ATD estabelecem-se temperaturas de calcinação, em forno mufla, como mostrado na figura 3.109.

As amostras são calcinadas nas temperaturas estabelecidas, sendo que após o resfriamento as amostras são britadas (pode ser usado um britador semelhante ao mostrado na figura 3.45), e moídas a vários graus de finura em um moinho de bolas, como ilustrado na figura 3.110.

Após a moagem, em várias finuras, as amostras são submetidas aos ensaios, que se descrevem a seguir.

Outros materiais pozolânicos como, por exemplo, as cinzas volantes, não recebem os tratamentos iniciais, sendo que o processo pode ser iniciado, através da moagem a várias finuras.

A figura 3.111 apresenta alguns valores de ensaios sobre argilas calcinadas e moídas a várias finuras [3.144].

Pelos valores da figura 3.111 pode-se observar que a argila apresenta resultados satisfatórios quando calcinada a temperaturas ao redor de 800°C a 900°C, e moída a finura Blaine, ao redor de 8.000 cm²/g.

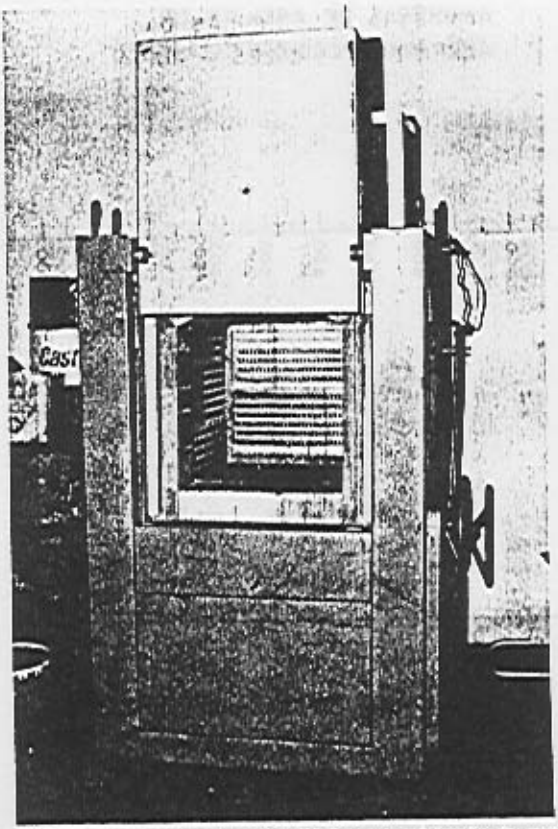


Figura 3.109 — Mufla elétrica, para temperatura até 1.200°C, para calcinação de materiais

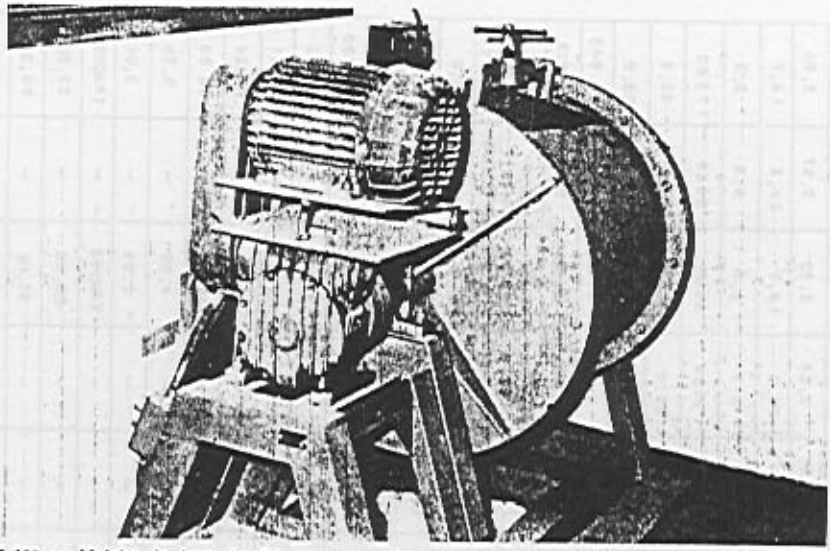


Figura 3.110 — Moinho de ferro fundido com revestimento interno de porcelana. Usa-se o revestimento de porcelana para que, durante a moagem, não se altere o teor de Fe_2O_3 na amostra

3.3.3.3 Massa Específica

A massa específica do material pozolânico, da mesma maneira que visto no item 3.2.3.1, é uma propriedade usada para controle e para o proporcionamento e dosagem dos concretos.

Para a determinação da massa específica de material pozolânico é usado o mesmo procedimento citado em 3.2.3.1, sendo que é usado também o frasco volumétrico de Le Chatelier, visto na figura 3.58. Para a retirada de bolhas de ar, da mistura do líquido (normalmente, para esse material, é usada a água) com o material pozolânico é comum se empregar um sistema de vácuo.

Para o cálculo da massa específica pode ser usada a expressão (III-XV).

3.3.3.4 Finura

A moagem do material pozolânico até uma granulometria desejada permite aumentar a atividade pozolânica do material, como preliminarmente mostrado na figura 3.111 e que é confirmado adiante, pela figura 3.115. A finura também propicia variações na massa específica como evidenciado na figura 3.126.

Através de um estudo de finura variável pode-se estabelecer a faixa ótima para o material.

A determinação da finura pode ser feita por peneiramento, pelo permeabilímetro e pelo turbidímetro, de mesma forma que o citado em 3.2.3.2.

Sendo o material pozolânico normalmente mais fino que os cimentos, não é usual se determinar o resíduo na peneira de malha n.º 200. De preferência são obtidas finuras como base no teor retido na peneira de malha n.º 325 e na superfície específica, pelo permeabilímetro ao ar de Blaine.

São usados os mesmos procedimentos e cuidados citados em 3.2.3.2. Os cálculos podem ser feitos pelas expressões referidas.

TEMPERATURA DE CALCINAÇÃO (°C)			600 °C	600 °C	700 °C	700 °C	800 °C	800 °C	900 °C	900 °C
DENSIDADE APARENTE (g/cm^3)			0,794	0,764	0,813	0,753	0,809	0,750	0,859	0,773
MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS (g/cm^3)			2,63	2,64	2,63	2,64	2,64	2,65	2,67	2,66
FINURA	# 325 (% RETIDA)		30,6	18,0	35,3	20,4	31,0	18,7	29,2	16,7
	BLAINE	Ø MÉDIO (μ)	3,7	2,8	3,7	2,8	3,7	2,8	3,8	2,8
		SUPERFÍCIE ESPECÍFICA (cm^2/g)	6156	8095	6171	8162	6154	8050	5969	7980
ÁGUA DE CONSISTÊNCIA	PASTA COM 100% CIMENTO (%)		23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	22,2	22,2
	PASTA COM 20% POZOL. (%)		26,0	25,8	26,4	26,4	27,0	26,6	25,2	25,2
EXPANSÃO EM AUTO CLAVE	PASTA COM 100% CIMENTO (%)		2,817	2,817	2,817	2,817	2,817	2,817	5,845	5,845
	PASTA COM 20% POZOL. (%)		0,132	0,130	0,164	0,134	0,141	0,124	0,289	0,219
REATIVIDADE COM ALCALIS	REDUÇÃO DA EXPANSÃO (%)		71,8	71,3	84,2	82,8	82,8	81,3	75,7	76,9
	EXPANSÃO DA ARGAMASSA (%)		0,006	0,008	0,006	0,002	0,004	0,009	0,006	0,006
INDÍCES DE ATIVIDADE POZOLÂNICA	ÁGUA REQUERIDA (%)		111,3	108,9	111,3	112,1	113,7	112,9	105,3	103,8
	COM CIMENTO (%)		73,8	82,5	72,7	88,0	76,4	87,3	95,1	87,0
	COM CAL (Kg/cm^2) (MPa)		24 (2,4)	53 (5,4)	64 (6,5)	82 (6,3)	68 (6,9)	76 (7,7)	68 (6,9)	77 (7,8)
AUMENTO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM %			0,023	0,034	0,014	0,026	0,012	0,018	0,055	0,020
UMIDADE DA AMOSTRA (%)			0,39	—	—	—	—	0,41	—	0,26
ANÁLISE QUÍMICA (%)	PERDA AO FOGO		1,23	—	—	—	—	1,61	—	0,61
	SiO_2		74,94	—	—	—	—	74,56	—	74,24
	Al_2O_3		15,12	—	—	—	—	15,61	—	16 53
	Fe_2O_3		4,88	—	—	—	—	4,99	—	5,75
	MgO		2,41	—	—	—	—	2,39	—	2,01
	SO_3		TRAÇOS	—	—	—	—	TRAÇOS	—	TRAÇOS
	$Al_2O_3 + Fe_2O_3$		20,00	—	—	—	—	20,60	—	22,28
	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$		94,94	—	—	—	—	95,16	—	96,52
	CaO		0,62	—	—	—	—	0,62	—	—

Figura 3.111 — Estudo de calcinação sobre argila, para produção de pozolana [3.144]

Além de se determinar a finura, pelos processos mencionados, é comum ainda se determinar o diâmetro médio das partículas, através da expressão (III-XXXVIII), com base

$$\varnothing \text{ médio} = \frac{60.000\ (1\text{-}e)\ \sqrt{n}\ .\ \sqrt{Tp}\ .\ \sqrt{e_p^3}}{\sqrt{e^3}\ .\ \sqrt{T}\ .\ Ap\ .\ \gamma p\ .\ (1\text{-}e_p)\ .\ \sqrt{n_p}} \quad \text{(III-XXXVIII)}.$$

sendo:

$\varnothing$ médio = diâmetro médio das partículas de amostra (microns), e demais legendas referentes à expressão (III-XXIII), de 3.2.3.2.

3.3.3.5 Índices de atividade pozolânica

São índices que atestam a pozolanicidade de um material em relação ao poder de combinar com a cal liberada. São distinguidos por:

— água requerida,
— atividade pozolânica com cimento,
— atividade com a cal.

- Água Requerida

É a comparação entre as quantidades de água requerida para uma mesma trabalhabilidade das argamassas do ensaio de atividade com cimento, em termos percentuais.

Para a execução desse ensaio [3.146] [3.147] [3.148] são usados uma misturadeira de argamassa, como visto no item 3.1.3.14 e nas figuras 3.37, 3.38, e a mesa de escoamento mostrada nas figuras 3.40 e 3.41.

A areia recomendada para esse ensaio é a areia de sílica natural na granulometria citada na figura 3.112. O método original [3.146] recomenda a areia de Ottawa-Illinois, entretanto, vários laboratórios nacionais têm estabelecido subpadrões [3.149] satisfatórios, com areias brasileiras.

PENEIRA Nº	PORCENTAGEM RETIDA
16	0
30	2 ± 2
40	30 ± 5
50	75 ± 5
100	98 ± 2

Figura 3.112 — Areia de sílica natural para ensaios de atividade pozolânica [3.146]

Através de duas misturas, uma contendo somente o cimento e outra contendo uma mistura de cimento (65% em volume sólido) e de material pozolânico (35% em volume sólido) são determinados os teores de água para um determinado escoamento, medido pela mesa de escoamento, como mostra a figura 3.113.

A água requerida é expressa em termos percentuais, da água da argamassa com a mistura de cimento e material pozolânico, para com a água da argamassa com o cimento.

O teor de material pozolânico, usado pela padronização do método, não é necessariamente o usado nas dosagens de concretos de interesse.

- Atividade pozolânica com cimento

É o índice comparativo (percentual) da resistência de duas argamassas de mesma proporção aglomerante-agregado e mesma trabalhabilidade (com as mesmas quantidades de água do ensaio de água requerida), sendo uma moldada com cimento Portland e a outra, com substituição de 35% (em volume sólido) de cimento por material pozolânico, à idade de 28 dias, curadas em ambiente saturado, a 38°C.

Para a determinação das resistências, o método original [3.146] indica o uso de corpos de prova cúbicos, usando moldes semelhantes aos mostrados na figura 3.114.



Figura 3.113 — Medida do escoamento da argamassa para determinação da água requerida, como índice de atividade pozolânica

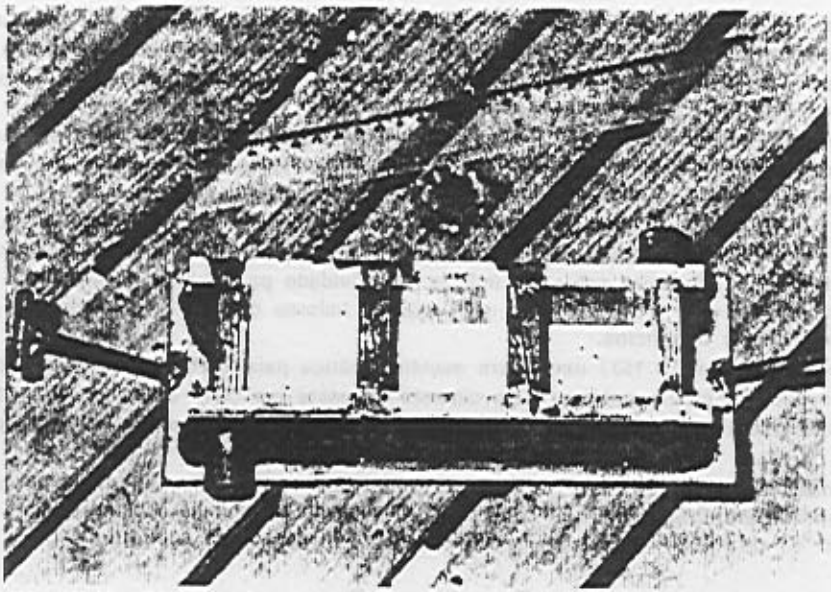


Figura 3.114 — Molde cúbico montado, para a moldagem de corpos de prova do ensaio de atividade pozolânica com cimento

Após a moldagem os corpos de prova são mantidos em câmara úmida a 23 ± 1,7°C por 20 a 24 horas, sendo que após esse período são colocados em recipientes selados e armazenados a 38 ± 1,7°C por 27 dias. Decorrido esse período os corpos de prova são retirados do ambiente de cura acelerada, resfriados e rompidos.

O índice de atividade pozolânica é calculado como a relação entre as resistências médias dos corpos de prova com material pozolânico, e as resistências médias dos corpos de prova somente com cimento, sendo que o índice é expresso em porcentagem.

- Atividade com cal

É a Resistência à Compressão de argamassas preparadas com areia, pozolana e cal, moldadas em corpos de provas cilíndricos de 5 x 10 cm, à idade de 7 dias e curadas à temperatura de 55°C.

A atividade com cal é determinada com base na resistência obtida em argamassas moldadas com uma proporção de uma parte de cal hidratada, nove partes de areia padrão (ver ensaio para água requerida e figura 3.112), uma quantidade de material pozolânico, igual a duas vezes a massa da cal hidratada multiplicada pela relação entre as massas específicas da pozolana e da cal. A quantidade de água é a requerida para uma certa consistência, determinada semelhantemente ao procedimento descrito para a água requerida.

A cal hidratada deve estar dentro das seguintes condições [3.146] [3.150] [3.151]:

— óxido de cálcio e magnésio (não voláteis)	$\geqslant$	95%
— dióxido de carbono	$\leqslant$	7%
— óxido de magnésio (após calcinação)	$\leqslant$	5%
— resíduo na peneira n.° 30	$\leqslant$	0,5%
— resíduo na peneira n.° 325	$\leqslant$	5%

Após a determinação da água requerida, são moldados corpos de prova cilíndricos, que são mantidos em câmara úmida a 23 ± 1,7°C por 24 horas sendo então mantidos

em cura acelerada a 55 ± 1,7°C por 6 dias, até aproximadamente 4 1/4 horas antes do ensaio. Após o resfriamento dos corpos de prova estes são ensaiados à ruptura por compressão axial simples, sendo que os valores obtidos referem-se à atividade pozolânica com a cal e são expressos em kgf/cm² ou MPa.

Deve ser chamada atenção para as comparações que possam ser feitas, desses índices de atividade pozolânica quando obtidos através de procedimentos de diversos métodos de ensaio, o que pode levar a interpretações errôneas ou dúbias.

A figura 3.115 mostra valores de índices de atividade de três materiais pozolânicos, distintos, obtidos de estudos de finura variável [3.152]. É de se observar a nítida influência da finura sobre os índices de atividade pozolânica dos materiais. Observa-se que há uma tendência para um ponto de valores ótimos, a partir do qual não se teria maiores benefícios.

De acordo com [3.153] uma outra maneira prática para verificar a atividade pozolânica de um material pozolânico com cimento, consiste em fazer ensaios comparativos de resistência à compressão em argamassas de cimento com e sem o material pozolânico.

Ainda segundo [3.153], o melhor procedimento para calcular a atividade pozolânica consiste em determinar, com base nos ensaios de resistência à compressão, o coeficiente "K" de Feeret. Este coeficiente é calculado de acordo com (III-XXXIX).

$$Kj = Rj \cdot \left[\frac{\frac{c}{a} + p}{\frac{c}{a}} \right] \qquad \text{(III-XXXIX)}$$

sendo:

Kj = Coeficiente energético do aglomerante a j dias
Rj = Resistência à compressão a j dias
$\frac{c}{a}$ = Relação em massa — cimento puro/água
p = Massa específica do cimento

De acordo com Feret, [3.153] o aumento do coeficiente "Kj" indica que o material adicionado é pozolânico. Se "Kj" se mantiver constante é indicação que o material é inerte.

Os resultados obtidos nos cálculos do coeficiente "Kj" a partir de [3.154] são mostrados na figura 3.116.

Pelos valores da figura 3.125, pode-se observar que a melhor atividade do cimento "P" se explica, pois libera uma quantidade de Ca $(OH)_2$ maior que o cimento "V" devido ao maior teor de C_3S e Cao livre que possui.

O tempo necessário para liberação do Ca $(OH)_2$ é menor no cimento "P", por apresentar uma superfície específica maior que no cimento "V". Como se sabe o tempo necessário para liberação do Ca $(OH)_2$ depende da velocidade de reação do cimento, que é também função da sua finura.

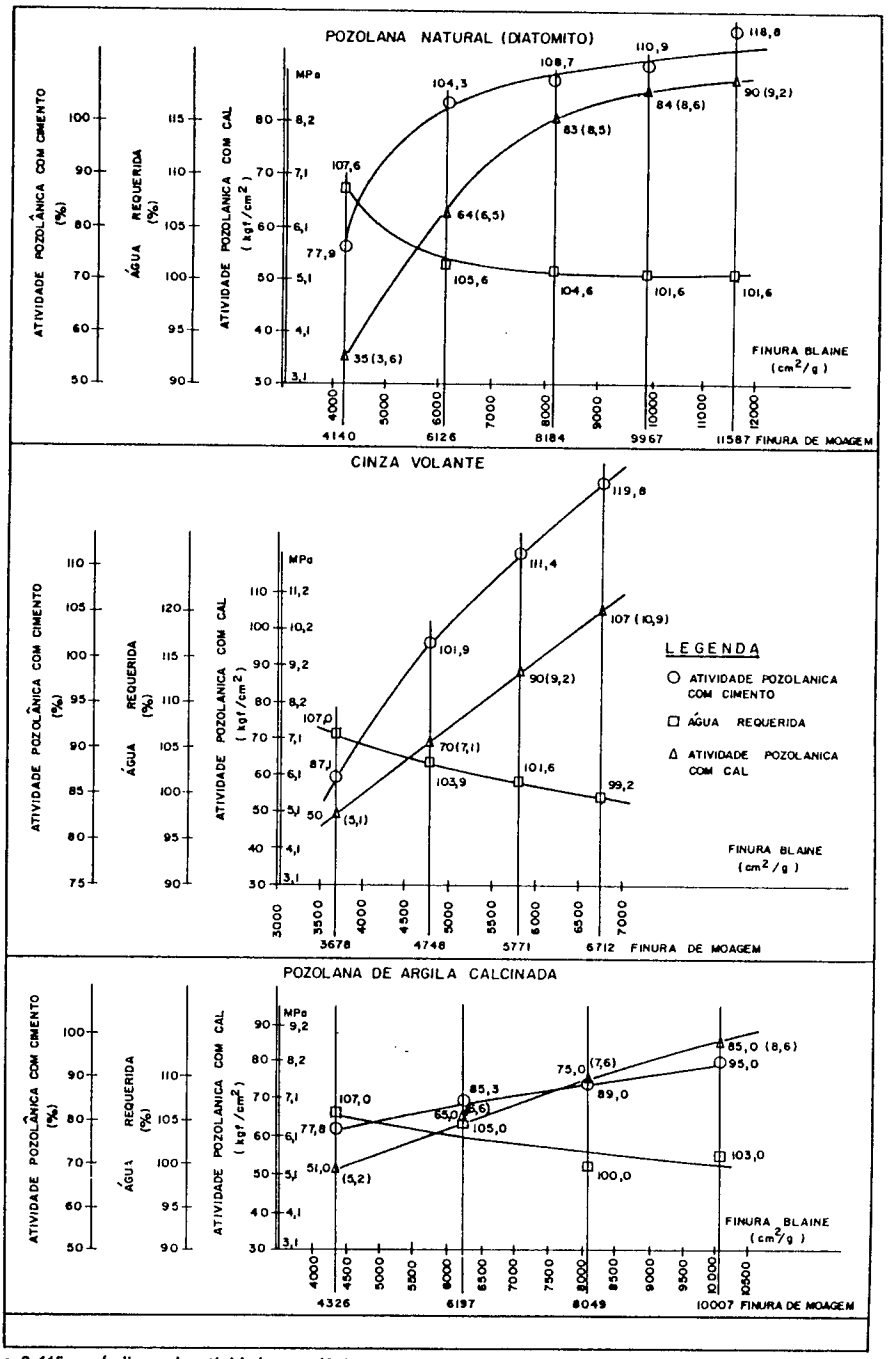


Figura 3.115 — Índices de atividade pozolânica, obtidos em estudo de finura variável

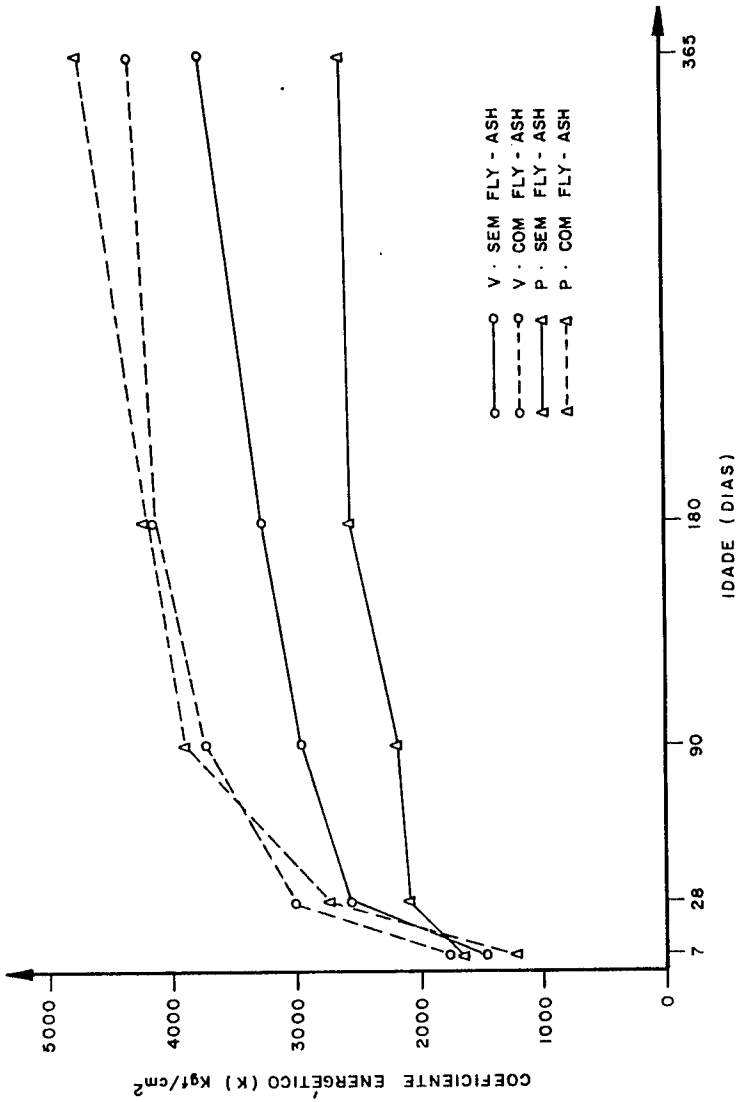


Figura 3.116 — Coeficientes energéticos, para avaliação da atividade pozolânica

Figura 3.116 — Continuação

CIMENTO	COEFICIENTE ENERGÉTICO - (K)									
	ARGAMASSA SEM FLY - ASH					ARGAMASSA COM FLY - ASH				
	7	28	90	180	360	7	28	90	180	360
V	1443	2572	2961	3268	3714	1769	3028	3742	4117	4310
P	1636	2072	2180	2544	2586	1210	2751	3865	4165	4732
V - (75 %) + P - (25 %)	1543	2269	2838	2838	2994	1694	2845	4246	4088	4889
V - (50 %) + P - (50 %)	1600	2260	2509	2478	2964	1653	3136	4350	4350	4868
V - (25 %) + P - (75%)	1546	2395	2609	2725	2905	2737	3156	4135	4432	4454

TIPO DE CIMENTO			V	P	V75 + P25	V50 + P50	V25 + P75
PERÍODO (DIAS)							
DATA DA COLETA			13/01	13/01	13/01	13/01	13/01
FINURA	PENEIRA 200 (% RETIDA)		5,2	8,0	5,6	6,0	6,6
	PENEIRA 325 (% RETIDA)						
	SUP. ESPECÍFICA (BLAINE) cm^2/g		3602	3900	3694	3755	3834
	SUP. ESPECÍFICA (WAGNER) cm^2/g						
DENSIDADE g/cm^3		APARENTE					
		ABSOLUTA	3,22	3,09	3,21	3,20	3,15
ÁGUA DE CONSISTENCIA PASTA		GRAMAS	111	111	110	111	111
		A/C	22,2	22,2	22,0	22,2	22,2
INÍCIO DE PEGA (h min)							
EXPANSÃO EM AUTO CLAVE (%)							
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	CONSISTÊNCIA DE ARGAMASSA	GRAMAS	146	146	146	146	146
		A/C	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
	FLOW (mm)		164	166	161	163	166
	DATA DA MOLDAGEM						
	TENSÃO 3 DIAS (MPa)		15,4	16,8	15,8	14,3	19,4
	TENSÃO 7 DIAS (MPa)		23,0	27,4	24,7	25,7	25,3
	TENSÃO 28 DIAS (MPa)		41,0	34,7	36,3	36,3	39,2
	TENSÃO 90 DIAS (MPa)		47,2	36,5	45,4	40,3	42,7
CALOR DE HIDRATAÇÃO	7 DIAS (CAL/g)						
	28 DIAS (CAL/g)						
ANÁLISE QUÍMICA (%)	PERDA AO FOGO		0,83	2,61	1,16	1,83	2,30
	INSOLUVEIS		0,11	0,33	0,17	0,00	0,43
	SiO_2		22,23	21,15	21,89	21,82	21,25
	Fe_2O_3		3,63	3,18	3,44	3,40	3,28
	Al_2O_3		5,47	5,06	5,16	5,30	5,02
	CaO		62,88	63,16	63,12	63,18	63,00
	MgO		3,31	2,47	3,25	2,87	2,66
	SO_3		1,18	1,67	1,27	1,41	1,47
	Na_2O						
	K_2O						
	EQUIV. ALCALINO EM Na_2O						
	CAL LIVRE EM CaO		0,64	1,70	0,94	1,05	1,23
COMPOSTOS MÉTODO DE BOGUE (%)	C_3S		39,15	46,17	43,59	42,62	47,37
	C_2S		34,20	25,80	29,87	30,40	37,37
	C_3A		8,35	8,02	7,85	8,29	5,19
	C_4AF		11,04	9,67	10,46	10,34	7,76
	$CaSO_4$		2,00	2,83	2,15	2,39	9,98

Figura 3.116 — Continuação

TIPO DE MATERIAL POZOLÂNICO			FLY — ASH
PERÍODO DIAS			
DATA DE COLETA			JANEIRO
DENSIDADE APARENTE (g/cm^3)			
MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS (g/cm^3)			2,10
FINURA	# 325 (% RETIDA)		
	BLAINE	Ø MEDIO (μ)	9,3
		SUPERFÍCIE ESPECÍFICA (cm^2/g)	3072
ÁGUA DE CONSISTÊNCIA	PASTA COM 100% CIMENTO (%)		
	PASTA COM 20% POZOL. (%)		
EXPANSÃO EM AUTO CLAVE	PASTA COM 100% CIMENTO (%)		
	PASTA COM 20% POZOL. (%)		
REATIVIDADE COM ALCALIS	REDUÇÃO DA EXPANSÃO (%)		
	EXPANSÃO DA ARGAMASSA (%)		
INDÍCES DE ATIVIDADE POZOLÂNICA	ÁGUA REQUERIDA (%)		111,6
	COM CIMENTO %		55,4
	COM CAL (MPa)		3,9
AUMENTO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM %			
UMIDADE DA AMOSTRA (%)			0,81
ANÁLISE QUÍMICA (%)	PERDA AO FOGO		5,26
	SiO_2		52,40
	Al_2O_3		30,36
	Fe_2O_3		7,08
	MgO		0,88
	SO_3		0,36
	$Al_2O_3 + Fe_2O_3$		37,44
	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$		89,84
	CaO		—
	Na_2O		—
	K_2O		—
	EQUIV. ALCALINO EM Na_2O		—

Figura 3.116 — Continuação

3.3.3.6 Eficiência no combate à reação álcalis-agregado

Como citado no item 3.1.3.14 há certos agregados que reagem com os álcalis do cimento, acarretando expansões.

É sabido também que se a quantidade dos grãos reativos for grande a concentração de álcalis é rapidamente reduzida, e que se granulometria indicar partículas reativas muito pequenas, essas são inteiramente consumidas antes do aparecimento do gel expansivo.

Dessa forma, como citado em 3.3.3.1, uma das medidas preventivas e minimizadoras dos efeitos da reação álcalis-agregados é o uso de material pozolânico.

Tendo em vista a determinação da porcentagem de cimento a ser substituída por material pozolânico para um controle eficiente das reações álcalis-agregado, foram feitos estudos [3.1] [3.142] na Universidade de Berkeley, na Califórnia — EUA, para diversos tipos de materiais pozolânicos, como ilustra a figura 3.117.

No Brasil o primeiro caso de reatividade potencial álcali-sílica estudado foi para barragem de Jupiá (Cesp), e devido a essa preocupação a fábrica de pozolana de argila calcinada de Jupiá foi a primeira instalação industrial no País projetada para fabricar pozolana por calcinação e moagem de argila.

Uma das testemunhas mais contundentes do efeito da pozolana no combate à reação álcalis-sílica é mostrada pelas figuras 3.118 a 3.120.

Para avaliação da reatividade com os álcalis do cimento são efetuados ensaios padronizados para essa finalidade [3.155] [3.156]. A avaliação é baseada na expansão desenvolvida em barras de argamassa feitas com agregado reativo, durante certo tipo de sazonamento.

Como agregado reativo é usado o vidro "Pirex", britado e moído, colocado na granulometria mostrada na figura 3.121.

O cimento usado deve conter um teor de álcalis (expresso em equivalente alcalino em Na_2O) de aproximadamente 1% ou mais.

São preparadas duas argamassas, uma para controle e outra para avaliar o material pozolânico.

A mistura controle é feita com 400 g de cimento de alto teor de álcalis e 900 g de vidro Pirex, com água estabelecida como água requerida (ver item 3.3.3.4).

A mistura do ensaio é feita com 300 g de cimento de alto teor de álcalis, 900 g de vidro Pirex, a água estabelecida como água requerida, e um peso de material pozolânico tendo um volume absoluto igual ao de 100 g de cimento, ou seja, substitui com equivalência através das massas específicas.

As argamassas são preparadas de acordo com o citado em 3.3.3.5.

Para moldagem são usados os moldes citados em 3.1.3.14 e na figura 3.34.

Logo após a moldagem das barras de argamassa, os corpos de prova são mantidos em câmara úmida a 23 ± 1,7°C durante 24 horas. Após esse período as "Barrinhas" são desformadas, medidas e colocadas para sazonamento a 38 ± 1,7°C, por 14 dias como citado em 3.1.3.14 e na figura 3.35. Decorrido o período de cura acelerada, os corpos de prova recebem um tratamento de resfriamento lento até a temperatura ambiente, quando são feitas as leituras de medida do comprimento, usando um comparador semelhante ao da figura 3.36.

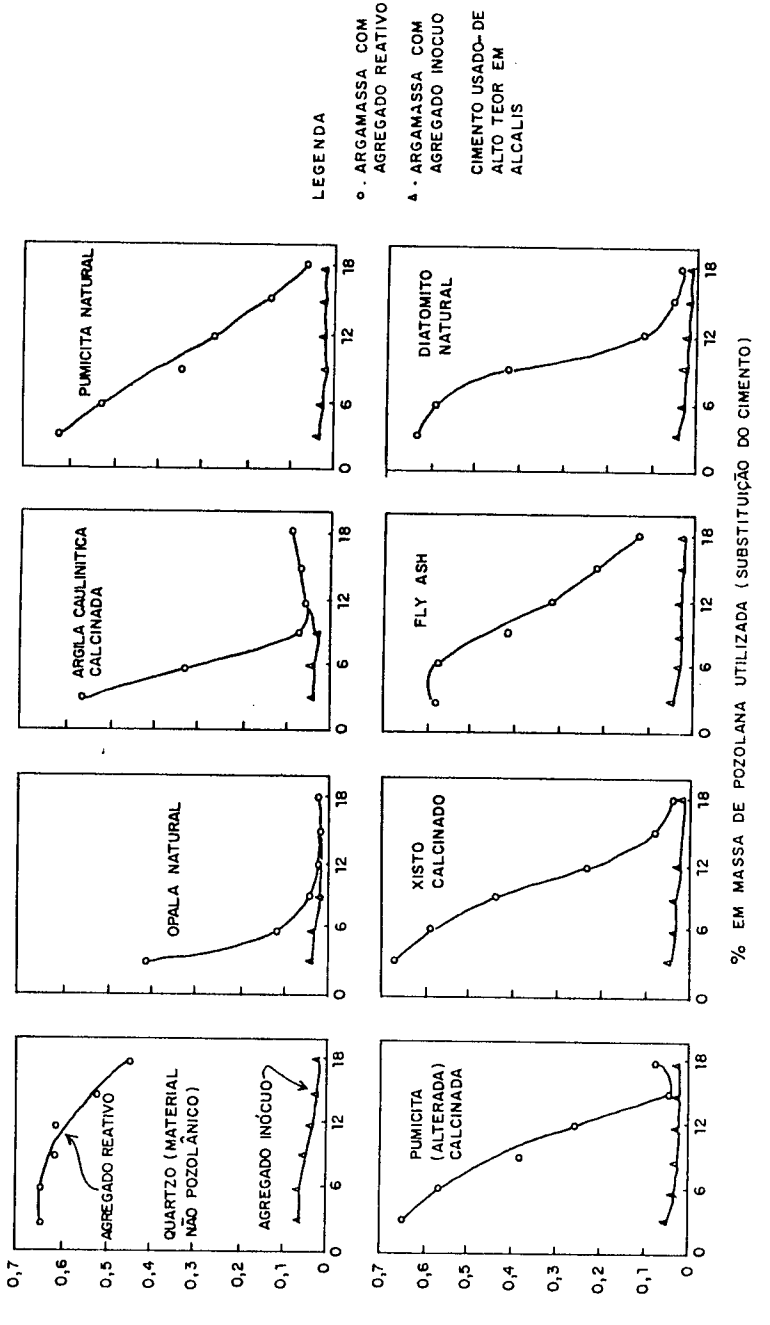


Figura 3.117 — Estudos de expansão em barras de argamassa, após 15 meses de cura a 37°C, mostrando o efeito de pozolanas na redução da expansão [3.1] [3.142]

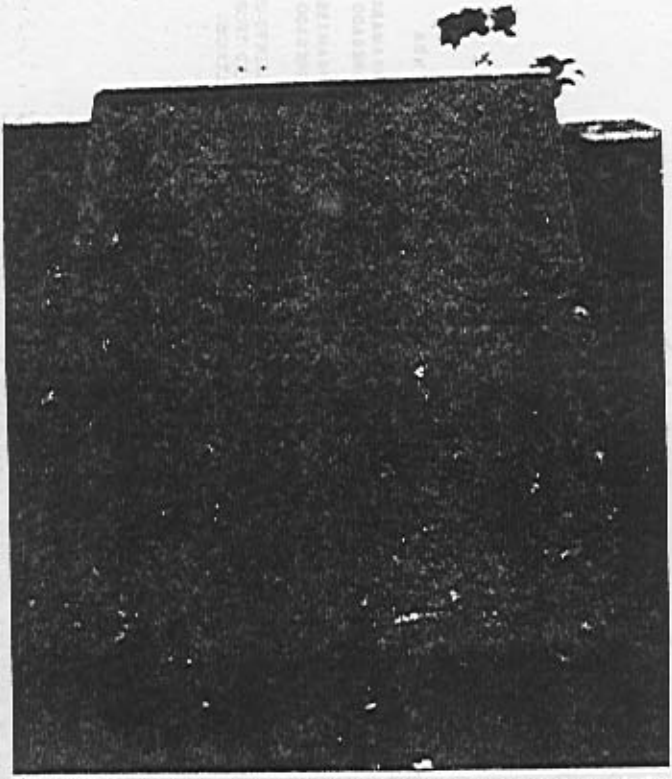


Figura 3.118 — Testemunho (Cesp-15) de concreto contendo cimento com equivalente alcalino = 1,05%, agregados reativos ∅ máx. 19 mm e 38 mm com calcedônia, quartzito e ágata, sem a utilização de material pozolânico. Moldagem em 1972, situação da foto vista em 1978. Primeiras fissuras observadas à idade de 6 meses

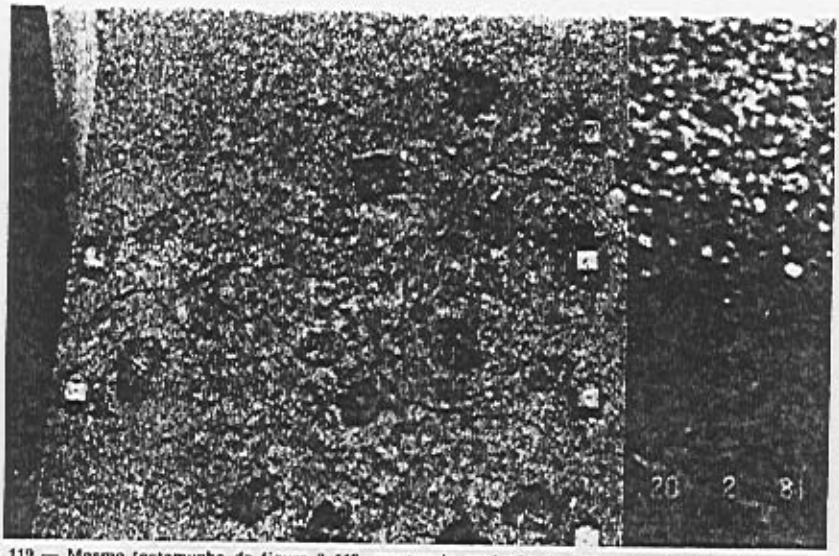


Figura 3.119 — Mesmo testemunho da figura 3.118, mostrando evolução de fissuras após oito anos (foto da situação em 20-2-81)

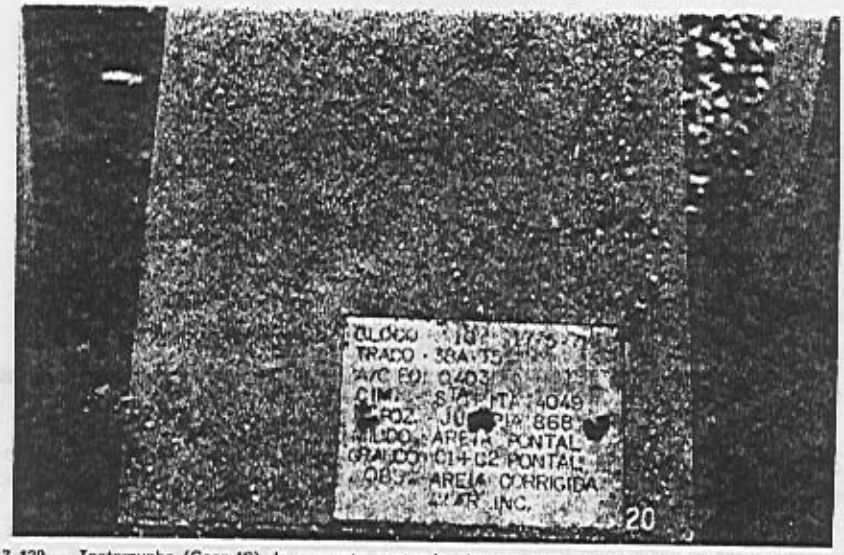


Figura 3.120 — Testemunho (Cesp-IS) de concreto contendo cimento com equivalente alcalino 1,05%, agregados reativos, e com 20% de volume sólido (em reposição à parte de cimento) de pozolana de argila calcinada de Jupiá. Observa-se a ausência de fissuras a aproximadamente dez anos (ver data da fotografia — 20-2-81 — e do bloco 17.05.71)

DIMENSÃO DAS PENEIRAS		% EM PESO
PASSANDO	RETIDO NA	
Nº 4	Nº 8	20
Nº 8	Nº 16	20
Nº 16	Nº 30	20
Nº 30	Nº 50	20
Nº 50	Nº100	20

Figura 3.121 — Granulometria do vidro pirex, para ensaio de reatividade com os álcalis

A redução de expansão da argamassa é calculada por (III-XL).

$$Re = \frac{(Ec - Ee)}{Ec} \times 100\% \qquad \text{(III-XL) onde:}$$

Re = redução da expansão da argamassa (%)

Ec = expansão média das barras de argamassa da mistura de controle (%)

Ee = expansão média das barras de argamassa da mistura com o material pozolânico (%)

Pode ser verificada a expansão da argamassa usando-se, em lugar do cimento de alto teor de álcalis, o cimento (ou mistura de cimento e material pozolânico) proposto para a obra.

A figura 3.122 mostra a eficácia de vários teores de material pozolânico de argila calcinada [3.143], no combate à reação álcalis-sílica. A figura 3.123 de maneira semelhante, mostra outro conjunto de valores [3.123], usando cinzas volantes brasileiras.

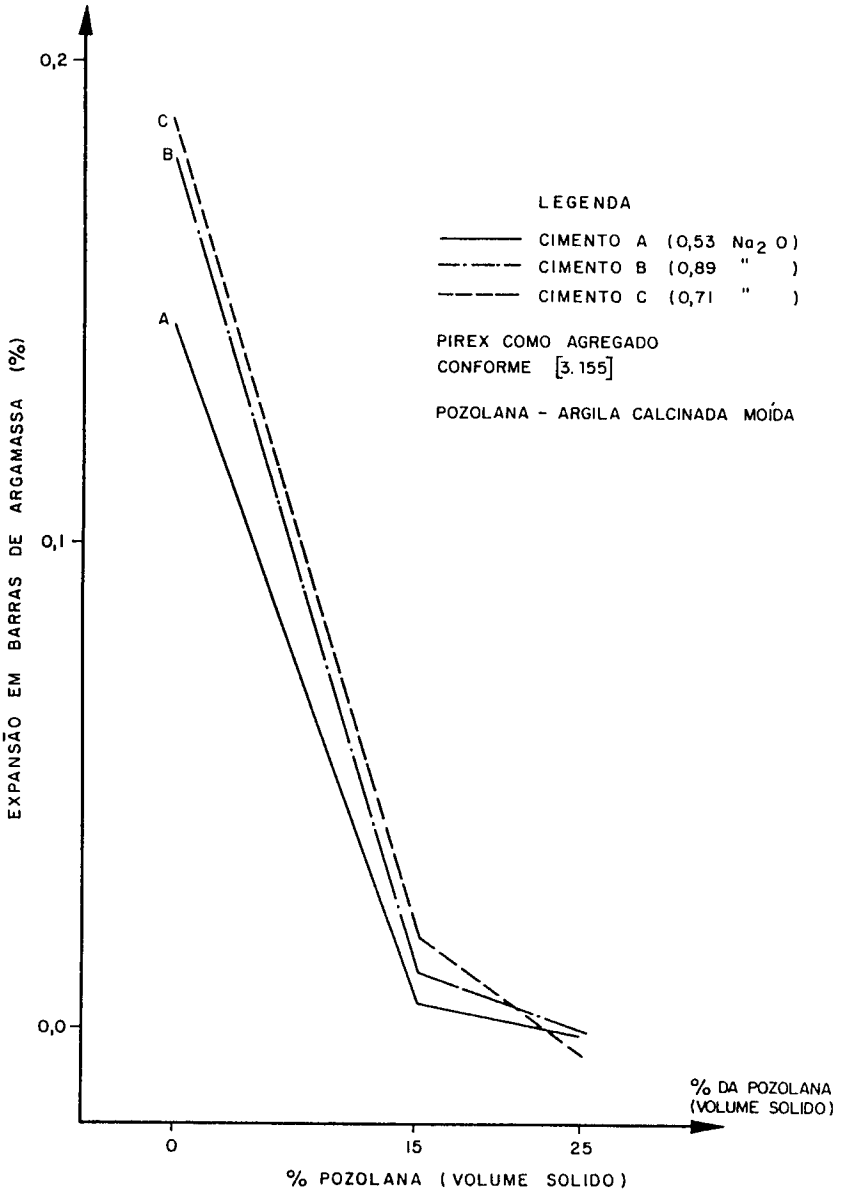


Figura 3.122 — Eficácia da pozolana na redução da expansão de argamassa com vidro pirex

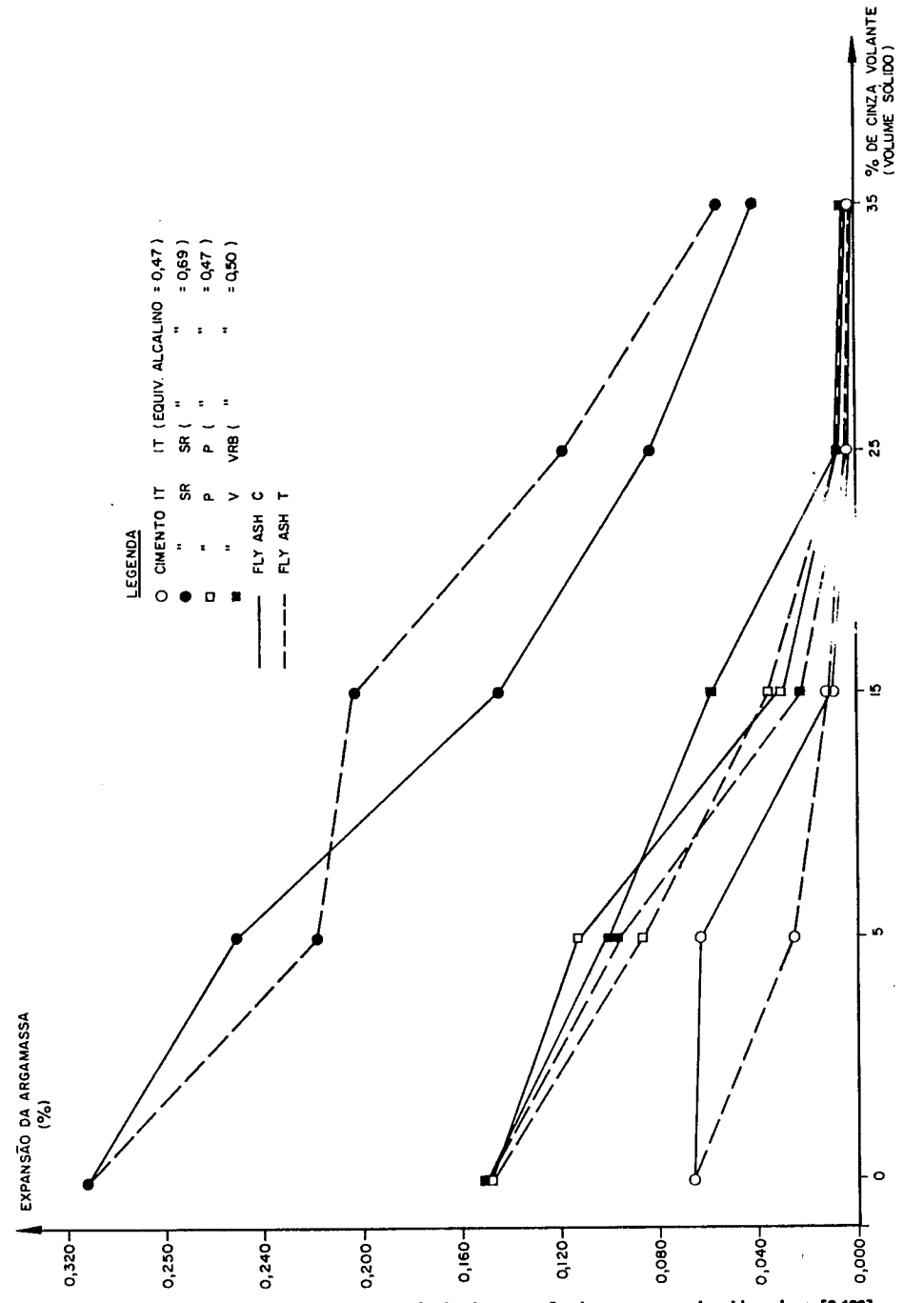


Figura 3.123 — Eficácia de cinzas volantes na redução da expansão de argamassa de vidro pirex [3.123]

3.3.3.7 Retração por secagem

Como já citado, é visto nas figuras 3.111 e 3.115, que normalmente o uso de material pozolânico aumenta o teor de água requerida e, portanto, as misturas ficam sujeitas a uma maior retração por secagem (retração hidráulica)

Isso pode ser avaliado através de procedimento padronizado [3.146] [3.147] [3.157], onde barras de argamassa são submetidas a um sazonamento em câmara seca.

Para a moldagem das barras é usada uma mistura de acordo com a figura 3.124.

As "barrinhas" são moldadas como citado em 3.3.6, sendo que após a moldagem os corpos de prova são mantidos em câmara úmida, imersos em água saturada de cal a 23 ± 1,7°C por 24 horas.

MATERIAIS	CONTROLE	ENSAIO
CIMENTO	500 g	325 g
POZOLANA	—	$\frac{175 \times \text{MASSA ESPECÍFICA POZOLANA}}{\text{MASSA ESPECÍFICA DO CIMENTO}}$
AREIA	1375 g	1375 g
ÁGUA	DE ACORDO COM O CONCEITO DE ÁGUA REQUERIDA	

Figura 3.124 — Composição da argamassa para ensaio de retração por secagem

Decorrido esse período os corpos de prova são desmoldados, medidos e sazonados à temperatura de 23 ± 1,7°C e umidade relativa de 50 ± 4%, por 28 dias, após o que os corpos de prova são medidos e a retração por secagem calculada por (III-XLI)

$$RS = SE - SC \qquad \text{(III-XLI) e}$$

$$S = \frac{(L1 - L2)}{L1} \times 100 \qquad \text{(III-XLII) onde:}$$

R = variação da retração por secagem das barras de argamassa (%)
SE = média da retração por secagem das barras de ensaio (%)
SC = média de retração por secagem das barras de controle (%)
S = retração por secagem (%)
L1 = leitura inicial, após a cura úmida (microns)
L2 = leitura final, após a cura seca (microns)

3.3.3.8 Calor de hidratação

No item 3.3.3.1 citou-se que os concretos dosados com material pozolânico desprendem menos calor.

Isso pode ser avaliado de maneira semelhante ao visto no item 3.2.3.6 pelos processos de dissolução e da garafa de Langavant, considerando a mistura de cimento com material pozolânico como um cimento pozolânico.

Salienta-se, entretanto, que no método por dissolução, para esse tipo de cimento aditivado deve ser feita adaptação uma vez que a dissolução do material pozolânico na solução ácido nítrico — ácido fluorídrico não é total, dentro do tempo estipulado para ensaio, além do que o tempo de dissolução pode variar com o aumento do material pozolânico na mistura.

Alguns ensaios [3.123] mostram a redução do calor de hidratação com o aumento do teor de utilização de material pozolânico, como mostrado na figura 3.125.

As figuras 3.126 e 3.127 apresentam valores de estudo de finura variável [3.152] sobre cinza volante, brasileiras.

Através desses resultados são evidenciadas as influências da finura e do teor do material pozolânico nas diversas propriedades de interesse.

CIMENTO	CINZAS VOLANTES	MISTURA % VOLUME SÓLIDO		CALOR DE HIDRATAÇÃO (Cal / g) 1 J = 4,18 CAL		
		Cimento	Fly-Ash	2 dias	3 dias	7 dias
IT	–	100	–	65,2	68,1	71,7
IT	C	85	15	52,8	54,6	60,8
IT	T	85	15	51,9	53,7	58,0
SR	–	100	–	68,4	71,5	75,2
SR	C	85	15	42,8	45,7	50,8
SR	T	85	15	49,7	53,1	56,9
P	–	100	–	40,7	45,0	53,1
P	C	85	15	33,0	36,7	43,1
P	T	85	15	33,3	36,7	43,3
VRB	–	100	–	57,4	59,7	63,4
VRB	C	85	15	44,5	45,8	51,2
VRB	T	85	15	48,	51,1	54,8

Figura 3.125 — Variações do calor de hidratação (determinado pela garrafa de Langavant) com aumento de teor de material pozolânico [3.123].

PROPRIEDADES		AMOSTRAS				
		N	A	B	C	D
MASSA ESPECÍFICA - (g/cm³)		2,07	2,17	2,25	2,30	2,33
FINURA	RESÍDUO RETIDO NA PENEIRA Nº 325 - (%)	61,5	44,9	19,0	9,5	3,0
	SUPERFÍCIE ESPECÍFICA (BLAINE) - (cm²/g)	2962	4024	5200	6056	7142
ATIVIDADE POZOLÂNICA	ÁGUA REQUERIDA - (%)	113,2	105,9	102,0	100,4	100,0
	ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CIMENTO - (%)	74,2	83,3	116,2	128,1	140,0
	ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CAL - (MPa)	3,9	4,4	7,8	9,9	10,8
REATIVIDADE COM ÁLCALIS	EXPANSÃO DA ARGAMASSA - (%)	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03
	REDUÇÃO DA EXPANSÃO - (%)	57,6	71,7	73,3	73,7	77,8
AUMENTO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM - (%)		- 0,005	- 0,003	- 0,002	- 0,002	- 0,009

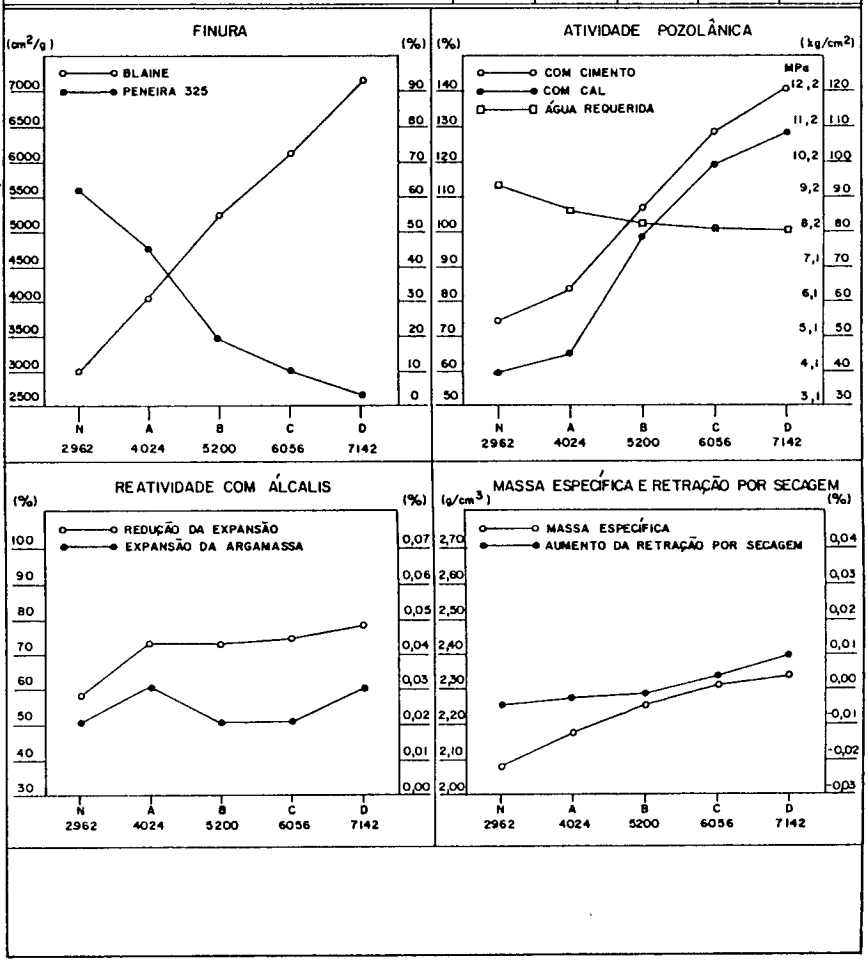


Figura 3.126 — Caracterização de cinzas volantes com a variação da finura (Blaine)

CINZA VOLANTE UTILIZADA NA REPOS.		–	AMOSTRA N				AMOSTRA A				AMOSTRA B				AMOSTRA C				AMOSTRA D			
FINURA (BLAINE) DA CINZA VOLANTE		–	2962 cm²/g				4024 cm²/g				5200 cm²/g				6056 cm²/g				7142 cm²/g			
PORCENTAGEM DE REPOSIÇÃO - (EM PESO)		CONTR. ARGAM.	10	15	20	30	10	15	20	30	10	15	20	30	10	15	20	30	10	15	20	30
CONSISTÊNCIA DA ARGAMASSA	A/Ceq	0,512	0,536	0,552	0,582	0,592	0,528	0,536	0,540	0,544	0,512	0,516	0,520	0,524	0,504	0,508	0,512	0,516	0,500	0,508	0,512	0,512
	FLOW (mm)	212	206	211	214	213	207	214	214	214	209	209	213	209	207	206	212	212	205	212	214	212
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	7 DIAS - (kg/cm²)	209	166	159	139	107	205	192	172	116	237	211	188	155	238	198	163	152	226	205	214	169
	28 DIAS - (kg/cm²)	331	254	243	233	169	319	318	282	199	351	325	296	253	385	339	303	298	391	372	377	345
	90 DIAS - (kg/cm²)	397	342	352	327	279	433	423	420	308	436	421	428	413	479	452	435	477	450	481	500	502
	365 DIAS - (kg/cm²)	426	435	471	472	389	548	538	537	466	559	553	548	579	557	553	546	585	551	569	589	605
CALOR DE HIDRATAÇÃO POR DISSOLUÇÃO	7 DIAS - (Cal/g)	76	63	60	63	52	68	64	61	62	68	65	61	57	64	62	59	60	68	66	83	58
	28 DIAS - (Cal/g)	80	74	72	72	68	83	73	73	73	76	74	70	71	73	74	75	71	78	78	70	70
REDUÇÃO DA EXPANSÃO DA ARGAM. (%)		–	30,6	55,2	58,6	76,6	48,3	59,0	77,4	89,3	44,8	58,2	76,2	75,9	34,9	54,0	76,3	80,8	53,6	60,9	74,7	

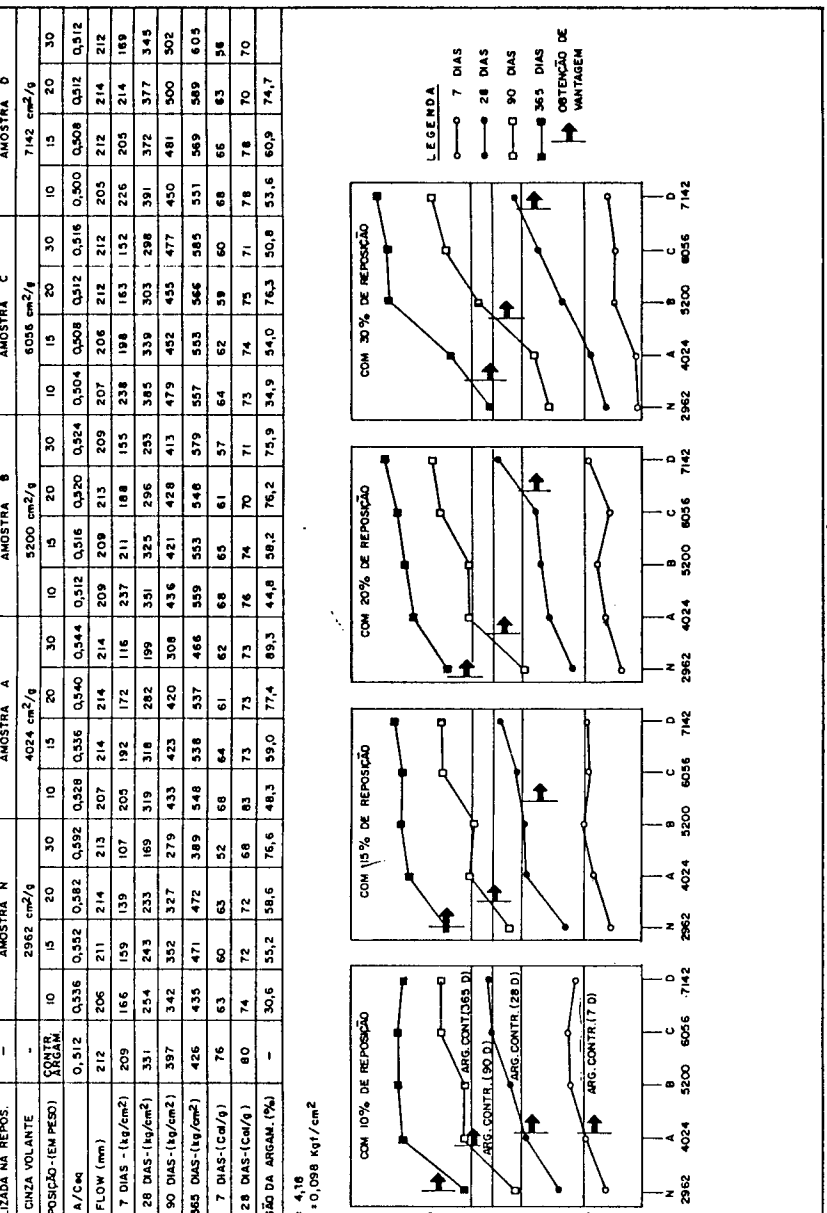


Figura 3.127 — Verificação de variação da resistência à compressão axial simples e do calor de hidratação, devida à taxa de reposição e finura da cinza volante

3.3.3.9 Análise química

Da mesma forma que o citado em 3.2.3.8 a análise química do material pozolânico possibilita agregar conhecimentos, o que facilita a interpretação e o melhor aproveitamento do material.

Para a análise química do material pozolânico é, também, seguida uma rotina de procedimentos [3.146] [3.158], usando materiais e equipamentos citados anteriormente.

A determinação da umidade é feita através da secagem em estufa (ver figura 3.83) a temperatura de 110 ± 5°C, sendo que por diferença de massas determina-se o teor de umidade, expresso em porcentagem.

A determinação da perda ao fogo é feita para verificar a eliminação de produtos de carbono, pela calcinação da amostra. É um índice de qualidade, principalmente das cinzas volantes, pois evidencia a situação da queima do carvão, na termoelétrica.

A perda ao fogo é feita pela exposição da amostra em cadinho de porcelana (e não de platina como permitido em 3.2.3.8) em forno-mufla (ver figura 3.84) à temperatura de 800°C. Por diferença de massas, calcula-se a perda ao fogo que é expressa em porcentagem com relação à massa inicial da alíquota.

O material pozolânico é constituído de silicatos que não se decompõem completamente em HCl, e então deve ser feita uma fusão com Na_2CO_3. Durante a fusão os silicatos são transformados em silicato de sódio e em orto ou meta silicatos, os quais são decompostos por tratamento posterior com HCl.

A fusão é feita em forno mufla a 1000°C e o precipitado, após tratamento com HCl, é queimado em um bico de Bunsen, como mostra a figura 3.128, após o que volta ao forno-mufla para calcinação a 1000°C.

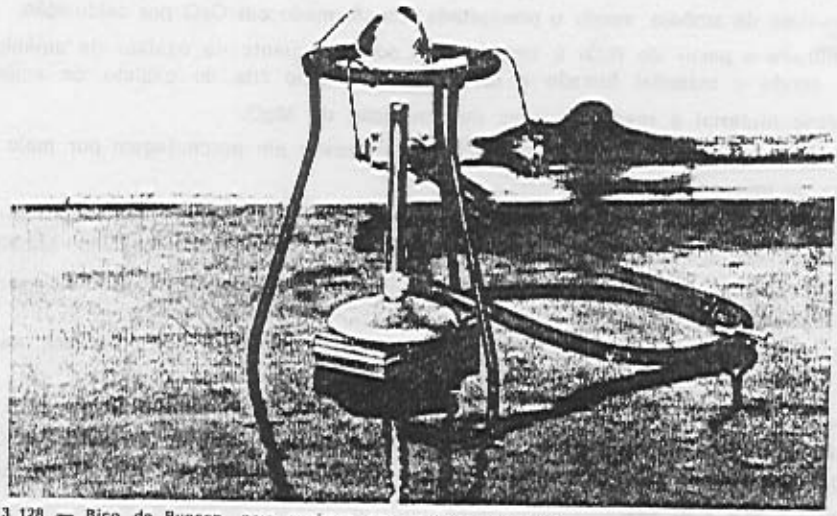


Figura 3.128 — Bico de Bunsen, para queimas nas análises químicas

O teor de sílica é determinado por diferenças de massas, a partir da alíquota, e expresso em porcentagem.

De maneira análoga ao citado em 3.2.3.8, é determinado também o grupo do hidróxido de amônia — R_2O_3 (Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2), sendo que é feita a precipitação do ferro e alumínio na forma de hidróxido de amônia e em presença de sais de amônia para evitar a precipitação do cálcio e magnésio. O ferro é oxidado pelo HNO_3, do estado ferroso para o férrico.

Após o tratamento com NH_4OH e lavagem com NH_4NO_3 até eliminação dos cloretos, o precipitado é colocado em cadinho de platina, seco em chapa quente (ver figura 3.129), queimado em bico de Bunsen, colocado em forno-mufla a 1000°C e posteriormente resfriado em dessecador, como mostra a figura 3.130.

O resíduo é determinado como Fe_2O_3 + Al_2O_3, expresso em porcentagem.

Se o teor de CaO for elevado é conveniente uma nova precipitação.

O resíduo Fe_2O_3 + Al_2O_3 chamado de R_2O_3 é fundido com pirossulfato de potássio e titulado com bicromato de potássio, sendo o ferro reduzido ao estado ferroso com cloreto estanoso.

A fusão é feita com resíduo do grupo de hidróxido de amônia com $K_2S_2O_7$, dissolvido em HCl, reduzido com $Sn Cl_2$ e, após o resfriamento, tratado com cloreto de mercúrio (Hg Cl) e titulado com $K_2Cr_2O_7$.

O cálculo do teor de ferro, expresso em porcentagem, é feito multiplicando-se o volume de $K_2Cr_2O_7$ gasto na titulação pelo fator de equivalência da solução $K_2Cr_2O_7/Fe_2O_3$.

Por diferença do R_2O_3 e o Fe_2O_3, determina-se o teor, em porcentagem, do Al_2O_3, sendo que o anidrido fosfórico (P_2O_5) e óxido de titânio (TiO_2) são computados como Al_2O_3.

O óxido de cálcio (CaO) é determinado por precipitação sob a forma de oxalato, com o oxalato de amônio, sendo o precipitado transformado em CaO por calcinação.

O filtrado a partir do R_2O_3 é tratado com solução quente de oxalato de amônia e NH_4OH, sendo o material filtrado e lavado com solução fria de oxalato de amônia. Parte desse material é reservada para determinação do MgO.

O filtrado é calcinado e o teor de cálcio é expresso em porcentagem por meio de diferença de massas.

O óxido de magnésio é obtido por uma parte do filtrado acima citado, através da precipitação do magnésio sob forma de fosfato de amoníaco-magnesiano $Mg(NH_4)PO_4$ e pela calcinação, para transformar em pirofosfato de magnésio ($Mg_2P_2O_7$), sendo o MgO, equivalente, calculado.

O teor de MgO é calculado em termos percentuais pela diferença de massas, multiplicado pela relação molecular do MgO para o $Mg_2P_2O_7$.

O anidrido sulfúrico (SO_3) é obtido pela precipitação do sulfato pelo cloreto de bário, sendo o precipitado calcinado e pesado sob a forma de sulfato de bário ($Ba SO_4$), e o SO_3 equivalente calculado pela diferença de massa multiplicada pela relação molecular entre o SO_3 e $Ba SO_4$.



Figura 3.129 — Chapa de secagem com termostato regulável



Figura 3.130 — Dessecador de vidro com placa de porcelana

3.3.4 Valores de materiais pozolânicos

A figura 3.131 mostra, a título de informação, resultados de alguns materiais pozolânicos usados no Brasil.

Complementarmente são fornecidos alguns valores de micro-sílica estudada no Brasil.

1 - DIATOMITO NATURAL - JUPIA
2 - POZOLANA DE ARGILA CALCINADA - JUPIA
3 - DIATOMITO CALCINADO - JUPIA
4 - CINZA DE CASCA DE ARROZ
5 - CINZA VOLANTE DA TERMOELÉTRICA - CANDIOTA
6 - CINZA VOLANTE DA TERMOELÉTRICA - TUBARÃO
7 - POZOLANA CINEPAR

REFERÊNCIA			(3.159)	(3.159)	(3.159)	(3.160)	(3.123)	(3.123)	(3.161)
TIPO DE MATERIAL POZOLÂNICO			1	2	3	4	5	6	7
PERÍODO DIAS									
DATA DE COLETA									
DENSIDADE APARENTE (g/cm³)									
MASSA ESPECÍFICA DOS GRÃOS (g/cm³)			2,19	2,60	2,31	2,26	2,15	2,03	2,75
FINURA	BLAINE	# 325 (% RETIDA)	11,6	13,2	12,2	10,3	27,1	41,2	11,42
		ø MÉDIO (μ)					8,8	10,5	
		SUPERFÍCIE ESPECÍFICA (cm²/g)	13700	6500	10200		3190	2830	6252
ÁGUA DE CONSISTÊNCIA	PASTA COM 100% CIMENTO (%)								
	PASTA COM 20% POZOL. (%								
EXPANSÃO EM AUTO CLAVE	PASTA COM 100% CIMENTO (%)		0,03	- 0,03	- 0,01				
	PASTA COM 20 % POZOL. (%)		0,04	- 0,02	0,03				
REATIVIDADE COM ALCALIS	REDUÇÃO DA EXPANSÃO (%)		109,0	87,0	101,0		64,3	68,9	
	EXPANSÃO DA ARGAMASSA (%)		- 0,03	0,005		- 0,003			
ÍNDICES DE ATIVIDADE POZOLÂNICA	ÁGUA REQUERIDA (%)		101,0	104,5	105,3				102,0
	COM CIMENTO (%)		85,0	80,0	89,4				87,2
	COM CAL (MPa)		7,3	6,4	8,7		3,6	3,1	4,6
AUMENTO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM %			0,05	0,02	0,03				
UNIDADE DA AMOSTRA (%)			2,2	0,3	0,9		0,26	0,09	0,28
ANÁLISE QUÍMICA (%)	PERDA AO FOGO		4,8	1,6	3,5	10,34	0,96	5,43	0,64
	SiO_2					73,22	67,86	54,54	75,90
	Al_2O_3					2,53	22,73	28,99	15,63
	Fe_2O_3					1,67	6,45	6,81	3,62
	MgO		—	1,0	1,7	0,94	0,91	0,83	0,20
	SO_3		—	—	—	0,86	0,11	0,28	0,19
	$Al_2O_3 + Fe_2O_3$					4,20	29,18	35,80	19,27
	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$		92,0	94,0	94,7	77,42	97,04	90,34	95,15
	CaO					7,60	0,70	1,32	1,85
	Na_2O					0,05			
	K_2O					3,96			
	EQUIV. ALCALINO EM Na_2O								

Figura 3.131 — Valores de ensaios sobre materiais pozolânicos brasileiros [3.123] [3.159] [3.160] [3.161]

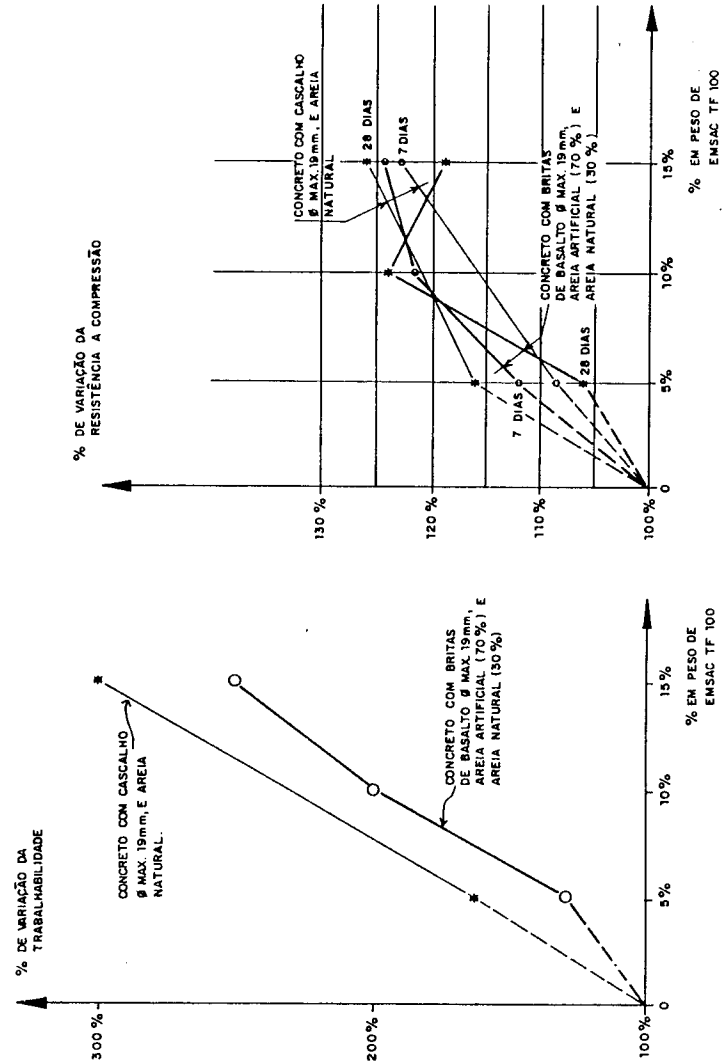


Figura 3.132 — Variações de propriedades do concreto com adição de percentuais em peso de micro-sílica — Cortesia de Elken Participação Ltda.

3.4 Água

3.4.1 Generalidades

A extrema importância da quantidade de água de mistura na resistência do concreto e nas demais propriedades é repetidamente citada. Sem sombra de dúvidas também é importante a qualidade dessa água. Impurezas na água podem alterar a pega do cimento, a resistência do concreto, causar defeitos arquitetônicos nas superfícies e causar corrosão na armadura. Por essas razões a água para mistura e cura do concreto deve ser

controlada. Deve ser feita, entretanto, uma nítida distinção entre os efeitos da água de mistura e o ataque ao concreto endurecido, por meio de águas agressivas.

Uma citação muito frequente é de que se a água for boa para beber será boa também para emprego em concreto.

Esta afirmação não é a forma técnica mais adequada para avaliação da água de determinada fonte, pois, se contiver mesmo pequenas quantidades de açúcar, será adequada para beber mas não necessariamente para emprego em concreto. Da mesma forma, algumas águas não potáveis podem produzir concretos de boa qualidade.

Uma maneira simples de verificar a adequabilidade de uma água é comparando-se o tempo de pega e a resistência de corpos de prova de argamassas com a água em questão, e outros com a água considerada boa. Uma tolerância de aproximadamente 10% é normalmente permitida para variações. Entretanto, o tempo de pega não é uma informação conclusiva para avaliar adequabilidade de uma água para concreto.

A presença de impurezas em quantidades relativamente baixas faz com que a maioria dos resultados sejam satisfatórios.

A melhor maneira de medir a qualidade da água é por meio de ensaios comparativos de resistência do concreto ou argamassa, à idade de 28 dias.

Odor e cor não são indicativos de qualidade da água.

A presença de algas na água de amassamento tende a provocar grande aumento na incorporação de ar do concreto com consequente queda de resistência. Isto se deve à atividade dos compostos orgânicos, de natureza gelatinosa, que cobrem as algas.

Água empregada na cura do concreto também não deve conter impurezas agressivas que possam causar a deterioração do concreto e quando estruturas forem aparentes, não devem ser manchadas ou descoloridas pela água de cura. As manchas são geralmente causadas por matéria orgânica e/ou hidróxidos de ferro dissolvidos na água

Água contendo sais de sódio e potássio podem acarretar expansões devidas às reações álcalis-agregado, mesmo quando o cimento usado for de baixo teor de álcalis.

Normalmente as fontes de água tratada possuem sólidos totais de 200 a 400 ppm. Com exceção de carbonatos e bicarbonatos, as impurezas individuais, com certa turbidez, não afetam a qualidade do concreto.

Concretos feitos com água [3.162], contendo cloreto de sódio (sal comum), apresentam reduções significativas da resistência em idades superiores à idade de 7 dias. Uma concentração de 5% produz uma redução de aproximadamente 30%.

Carbonatos e bicarbonatos de sódio e potássio causam diferentes efeitos na pega, de diferentes cimentos, podendo acelerar ou retardar a pega. Em grandes quantidades esses sais podem reduzir a resistência.

As considerações, sobre o elevado teor de cloreto nas águas, são baseadas na possibilidade dos efeitos adversos dos íons de cloro, na corrosão da armadura.

O limite de aceitação do teor de cloro nos concretos depende do grau de impermeabilização do concreto, do recobrimento e das características de exposição.

Carbonatos de cálcio e magnésio não são muito solúveis em água, sendo muito raro encontrá-los em concentrações que possam afetar a resistência do concreto.

Sais de ferro são normalmente encontrados em águas superficiais.

3.4.2 Caracterização

3.4.2.1 Concentração hidrogeniônica (pH)

A determinação do pH de água pode ser feita [3.163] pelo processo colorimétrico, ou pelo método eletrométrico, através de aparelho semelhante ao mostrado na figura 3.133.

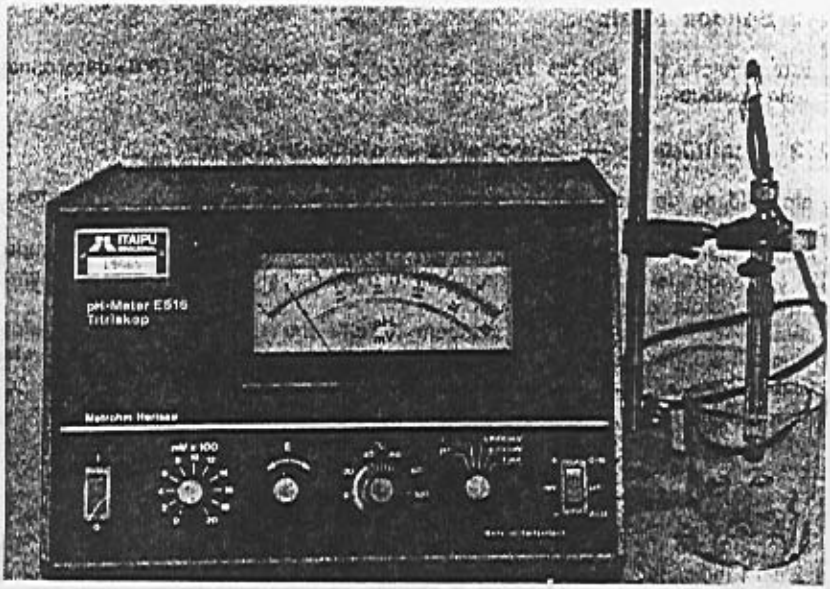


Figura 3.133 — PH metro para medida direta da concentração hidrogeniônica de soluções

RESULTADO DA TITULAÇÃO	VALORES DOS RADICAIS EXPRESSOS EM Ca Co_3		
	HIDROXIDOS	CARBONATOS	BICARBONATOS
P=0	0	0	T
P< I/2 T	0	2P	T-2P
P= I/2 T	0	2P	0
P>I/2 T	2P-T	2(T-P)	0
P=T	T	0	0

P = ALCALINIDADE EM PRESENÇA DE FENOLFTALEINA

T = " " " " METIL-ORANGE

Figura 3.134 — Tabela para cálculo dos teores de carbonatos e bicarbonatos

3.4.2.2 Sólidos totais

A determinação dos sólidos totais é feita por evaporação, a 110°C, determinando-se o teor pelo resíduo.

3.4.2.3 Alcalinidade — carbonatos e bicarbonatos

A alcalinidade de uma água é geralmente devida à presença de carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos (menos frequentes), boratos, silicatos e fosfatos.

A alcalinidade à fenolftaleína é feita por titulação com ácido clorídrico, usando como indicador a fenolftaleína e determinando-se o teor de alcalinidade em miligramas por litro com referência ao Ca CO_3.

A alcalinidade ao metil-orange também é feita por titulação com ácido clorídrico, usando o metil-orange como indicador. A alcalinidade é expressa em mg/l com referência ao Ca CO_3.

O teor de carbonatos e bicarbonatos é feito a partir das alcalinidades citadas ima, usando os valores da figura 3.134.

3.4.2.4 Cloretos

A determinação de cloretos na água é feita por titulação de soluções de carbonato de sódio com indicador de fenolftaleína e solução de nitrato de prata com indicador de cromato de potássio.

3.4.2.5 Sulfatos

Os sulfatos, na água, são determinados por titulação, precipitação e posterior calcinação à temperatura entre 700°C a 750°C.

3.4.2.6 Ferro

O teor de ferro na água é determinado por precipitação com hidróxido de amônio. Nas amostras com acentuado teor de matéria orgânica esta deve ser eliminada por calcinação.

3.4.2.7 Alcalis

O teor de álcalis, sódio e potássio, é determinado pelo fotômetro de chamas, como citado em 3.2.3.8.

3.4.2.8 Avaliação da qualidade da água pela resistência à compressão axial simples de argamassa

A principal intenção é avaliar a qualidade da água, quando em outros ensaios tenha apresentado dúvidas.

Para essa avaliação são preparadas argamassas com água ensaio e com água destilada, em proporções idênticas [3.164] [3.165].

A areia usada deve ser de sílica natural, na granulometria da figura 3.135.

Cada mistura é composta de 600 g de cimento, 2100 g de areia e 360 g de água. A mistura é preparada, moldada e ensaiada de acordo com o procedimento citado no item 3.2.3.7 e a valiação é feita pela relação das resistências da argamassa com a água ensaio, sobre as da argamassa com água destilada, expressa em porcentagem.

PENEIRA Nº	PORCENTAGEM RETIDA
16	0
30	54
50	32
100	14
<100	0

Figura 3.135 — Granulometria da areia para ensaio de avaliação da água através da resistência

3.4.2.9 Avaliação da qualidade da água pelos tempos de pega

Usando o conceito do método citado em 3.2.3.4 são determinados os tempos de início e fim de pega de pastas com água de consistência ensaio e água de consistência destilada. Os valores obtidos são então comparados entre si e com as eventuais especificações.

3.4.2.10 Avaliação da água de cura

A água de cura pode ser avaliada quanto à possibilidade de causar manchas no concreto [3.166] [3.167].

O ensaio consiste em provocar a sedimentação e secagem da água em um corpo de prova moldado com gesso ou cimento branco, fazendo-se a avaliação qualitativa das eventuais manchas que surgem.

3.5 Aditivos

3.5.1 Generalidades

Aditivos são materiais que, além de água, agregados ou cimento, são usados como ingredientes do concreto. Os aditivos são usados para modificar as propriedades do concreto, tais como: melhorar a trabalhabilidade, aumentar a resistência, retardar ou acelerar a pega, retardar ou acelerar a evolução da resistência, incorporar ar etc. Os aditivos podem alterar substancialmente o custo do concreto dependendo do seu tipo e objetivo.

A ação dos aditivos não é, em geral, específica e única em relação a uma certa finalidade e, então, paralelamente a uma ação principal podem exercer ações secundárias que podem ser tanto benéficas como maléficas se não forem devidamente consideradas.

O mesmo aditivo pode apresentar ação oposta, dependendo da sua quantidade, das condições de emprego e da natureza e proporções do aglomerante e agregados com que se emprega.

Deve-se ressaltar que os aditivos não suprem as deficiências dos materiais, da dosagem do concreto ou da execução da obra.

Em geral, os aditivos são adicionados aos componentes normais do concreto durante mistura. Quando se trata de aditivos solúveis são dissolvidos pela água de amassamento. Quando se apresentam como sólidos insolúveis, são adicionados na forma de pó ou dispersos em água de amassamento.

Como pequenas variações na proporção dos aditivos podem ocasionar efeitos muito diferentes dos esperados, é necessária uma pesagem cuidadosa e distribuição homogênea do aditivo dentro da massa do concreto.

3.5.2 Tipos

Os aditivos podem ser classificados de acordo com critérios baseados na sua ação ou baseados nos seus efeitos sobre o concreto.

A figura 3.136 apresenta [3.168] um quadro geral de classificação de aditivos.

O critério, baseado na natureza de sua ação, permite distinguir os aditivos de ação puramente química e os de ação físico-química.

Os aditivos de ação puramente química são aqueles que por reação, eventualmente hidrólises, na fase líquida, modificam o pH ou a solubilidade dos compostos anidros ou hidratados do cimento, promovendo a proteção das fases anidras ou a formação e cristalização de fases hidratadas distintas das usuais, modificando, assim, em um sentido ou outro, a cinética do processo total. Pertencem a este tipo os aditivos modificadores de pega e do endurecimento.

Os aditivos de ação físico-química tem caráter misto de reações químicas superficiais e de forças (De Wander Waals) de natureza tensoativa, que modificam a tensão superficial da fase líquida e a tensão interfacial entre esta e as fases sólidas, assim como entre os próprios sólidos. Pertence a esta categoria a grande maioria dos aditivos.

A classificação dos aditivos de acordo com o seu efeito principal nem sempre é a mais adequada, embora a mais usada, pois, um mesmo aditivo pode exercer funções contrárias dependendo do seu teor.

De acordo com este critério, os aditivos podem atuar em uma ou mais das seguintes etapas:

— sobre o material fresco, durante a mistura e colocação em obra;
— durante a pega;
— durante o endurecimento;
— sobre o material já endurecido.

Sobre o material fresco atuam todos os aditivos cuja função é facilitar o transporte, lançamento e adensamento, modificando no sentido favorável a trabalhabilidade. A ação destes aditivos pode limitar-se a esta etapa ou prolongar-se com outras ações secundárias no endurecimento.

No período de pega e endurecimento atuam os chamados modificadores de pega e endurecimento.

Outros aditivos como incorporadores de ar, espumantes, geradores de gás e os hidrófugos de massa atuam durante a mistura e o efeito de sua ação permanece no concreto endurecido.

Sobre o concreto endurecido atuam os hidrófugos de superfície, os endurecedores de superfície e os produtos de cura.

No caso específico de concreto, os aditivos mais empregados são:
— Incorporadores de ar;
— Plastificantes redutores de água;
— Modificadores de pega;
— Outros (expansores, corantes, etc.)

EFEITO DESEJADO	TIPO DO ADITIVO	MATERIAL USADO COMO ADITIVO
MELHORA DE DURABILIDADE	INCORPORADOR DE AR (AI)	- SAIS DE RESINAS DE MADEIRA - DETERGENTES SINTÉTICOS - SAIS LIGNOSULFONATOS - SAIS DE ACIDOS DE PETRÓLEO - SAIS DE MATERIAIS PROTEICOS - SAIS DE ALCOOIS GORDOS E SEUS SAIS ALCOOIS - BENZENO SULFONATOS
REDUÇÃO DA ÁGUA PARA UMA CERTA TRABALHABILIDADE	REDUTOR DE ÁGUA (RA)	- LIGNOSULFONATOS - SAIS DE ÁCIDOS CARBOXILICOS (TENDEM A RETARDAR A PEGA SE ADICIONAR ACELERADOR)
RETARDAR A PEGA	RETARDADOR (RP)	- LIGNINA - BORATOS - AÇUCARES - SAIS E ACIDOS TARTARICOS
ACELERAR A PEGA E ENDURECIMENTO INICIAL	ACELERADOR (AP)	- CLORETO DE CALCIO - TRIETANOLAMINA
REDUÇÃO DA ÁGUA E ACELERAÇÃO DA PEGA	REDUTOR E ACELERADOR DE PEGA (RAP)	- VER (RA) COM ADIÇÃO DE ACELERADOR (AP)
MELHORA DA TRABALHABILIDADE E PLASTICIDADE	MATERIAL POZOLANICO	- VER ITEM 3.3
EXPANSÃO ANTES DA PEGA	EXPANSOR GASOSO	- PÓ DE ALUMINIO - RESINAS SAPONACEAS E RESINAS VEGETAIS
DIMINUIR A PERMEABILIDADE	IMPERMEABILIZANTES	- ESTEARATO DE CALCIO, ALUMINIO, AMONIO - CLORETOS SOLÚVEIS - GRAXAS DE PETRÓLEO - POZOLANAS
MELHORA DO BOMBEAMENTO	ADITIVOS PARA BOMBEAMENTO	- POZOLANAS - POLIMEROS ORGANICOS
ALTA TRABALHABILIDADE	SUPER PLASTIFICANTES	- CONDENSADOS DE SULFONATOS MELAMÍNICOS, FORMALDEIDOS - CONDENSADOS DE SULFONATOS NAFTALÍNICOS, FORMALDEIDOS

Figura 3.136 — Classificação geral de aditivos [3.168]

3.5.2.1 Incorporadores de ar

Ao término da II Guerra Mundial o projeto e construção de barragens, nos Estados Unidos, adquiriu prioridade. Devido a grandes volumes de concreto a serem aplicados, a preocupação quanto a geração de calor e quanto a durabilidade do concreto sob a ação de gelo-degelo, o Corps of Engineers [3.74] instituí o uso do aditivo incorporador de ar, reduzindo substancialmente o consumo de cimento.

Os aditivos incorporadores de ar podem ser definidos como substâncias tensoativas de origem orgânica, geralmente insolúveis em água, que adicionadas ao concreto ou argamassa, antes ou durante a mistura, provocam a ocorrência de minúsculas bolhas com a finalidade de melhorar a trabalhabilidade.

As bolhas de ar, para essa finalidade, têm dimensões variáveis entre 5 μm (5 micras) e 1 mm, com predominância para a faixa entre 20 e 200 μm, espaçadas entre si de 50 a 200 μm.

São utilizados como aditivos incorporadores de ar:

— Resinas naturais da madeira, conhecidas comercialmente como resina vinsol;
— Alguns detergentes sintéticos;
— Alguns subprodutos da fabricação da pasta de papel, como os lignossulfonatos;
- Sais de ácidos do petróleo;
- Sabões alcalinos de ácidos gordos naturais, como o estearato de sódio;
— Sais de álcoois gordos sulfonados.

Uma série de fatores afeta a quantidade de ar incorporado bem como as dimensões das bolhas, dentre os quais merecem citação:

— Finura do cimento;
— Natureza e concentração do aditivo incorporador de ar;
— Natureza e proporcionamento da mistura;
— Tipo e duração da mistura do concreto;
— Consistência;
- Tipo e grau de adensamento aplicado no concreto;
- Temperatura;
- Emprego simultâneo com aditivo redutor de água;
— A forma das partículas e graduação dos agregados têm influência na quantidade de incorporação de ar à mistura;
— Agregados miúdos britados podem aumentar a necessidade de aditivo incorporador de ar, em comparação com concretos dosados com agregados miúdos naturais, para o mesmo teor de incorporação de ar;
— Impurezas orgânicas nos agregados costumam afetar a incorporação de ar, aumentando ou diminuindo, dependendo da sua natureza;
— Aumento na dureza de água de amassamento diminui a eficiência do aditivo;
— Maior finura e maior consumo de cimento diminuem a incorporação de ar;
— Cimentos com elevados teores de álcalis exigem menores quantidades de aditivos enquanto que cimentos pozolânicos ou de alta resistência inicial exigem maiores quantidades de aditivos para alcançar os mesmos resultados;
— Adições de materiais pozolânicos normalmente reduzem a incorporação de ar dos concretos;
— O tipo e as condições da betoneira podem afetar a incorporação de ar da mistura;
— O tempo de mistura aumenta a incorporação de ar até um determinado ponto, decrescendo depois lentamente;
— O aumento do abatimento (slump) faz com que seja aumentada a incorporação de ar;

— O tempo de adensamento da mistura influi na razão inversa do teor de ar incorporado, isto é, quanto menor o teor de ar incorporado mais prolongado é o adensamento;
— O volume de ar incorporado varia inversamente com a temperatura, na faixa entre 5 e 35°C, pois ainda que as bolhas sejam maiores, a perda pela superfície do concreto se fará muito mais rapidamente;
— Quando o incorporador de ar é empregado junto com um redutor de água há tendência de aumento na incorporação de ar, sendo normal a redução do consumo do incorporador de ar.

O ar introduzido sob a forma de bolhas tem acentuada influência na melhoria da trabalhabilidade, pois desempenha o papel de fluido e inerte ao mesmo tempo. Substitui parte da água de amassamento exercendo a função de um lubrificante e parte da fração fina da areia, com vantagem, devido a sua forma esférica.

O aumento da incorporação de ar em 1% permite reduzir a água da mistura em torno de 3% e a percentagem de areia entre 0,5% e 1,0% (ver item 4).

A exsudação em concretos com ar incorporado é diminuída, pois as bolhas tendem a dificultar a sedimentação das partículas mais pesadas e a subida da água à superfície.

A consolidação dos concretos com ar incorporado é facilitada pela maior uniformidade da mistura enquanto que a compacidade é diminuída.

A resistência do concreto é reduzida, com o aumento de incorporação de ar em uma proporção em torno de 4% para cada 1% de aumento desta última. Raramente, porém, a redução de resistência ultrapassa 15% na compressão ou 10% na tração, dentro da faixa normal de utilização de incorporação de ar.

Concretos com ar incorporado apresentam menor permeabilidade do que aqueles sem ar incorporado e a absorção também é diminuída.

A durabilidade dos concretos com ar incorporado é melhorada pelo aumento da uniformidade, diminuição da permeabilidade, absorção e consequente eliminação da camada mais fraca que tende a se formar no todo das camadas (exsudação).

3.5.2.2 **Plastificantes — redutores de água**

Aditivos plastificantes são produtos tensoativos que se dissolvem, ou dispersam, na água de amassamento e modificam a reologia do concreto fresco, pela redução, por meio de uma ação físico-química de adsorção da tensão superficial da água e da tensão interfacial entre a água e as partículas finas dos sólidos.

Os aditivos redutores permitem a redução do consumo de aglomerante, para uma dada resistência. Permitem a redução do pico máximo de temperatura, nos concretos-massa, devido à redução do consumo de aglomerante. Melhoram a qualidade da mistura fresca, facilitando a trabalhabilidade, reduzindo o consumo d'água para uma dada plasticidade.

São empregados como aditivos redutores de água:
— Sais de ácidos lignossulfônicos (lignossulfonatos);
— Sais dos ácidos carboxílicos hidroxilados;
— Derivações, formulações ou modificações dos anteriores;

Para uma mesma consistência e mesma incorporação de ar, este tipo de aditivo pode reduzir a exigência de água do concreto em mais de 10%. A redução de água é afetada pela natureza do aditivo, dosagem e propriedades do cimento e da mistura de concreto.

Alteração da pega e início do endurecimento podem ser observados dependendo das quantidades empregadas, propriedades do cimento e outras condições de uso. Tanto pode

haver retardamento como aceleração. O retardamento se deve à adsorção das moléculas do aditivo pelos grãos de cimento, o que retarda a precipitação dos primeiros componentes e, como consequência, retarda o início da pega.

Sais dos ácidos lignossulfônicos geralmente incorporam ar ao concreto.

Os aditivos redutores de água derivados dos sais dos ácidos carboxílicos, em geral atender os requisitos de redução de água e incorporação de ar.

Os aditivos redutores de água derivados dos sais dos ácidos carboxílicos, em geral, não incorporam ar à mistura. Quando for desejado evitar a incorporação de ar empregando aditivos derivados dos sais dos ácidos lignossulfônicos devem ser adicionadas substâncias específicas, tais como fosfato tributílico, ftalato bórico ou carbônico, insolúveis em água.

Em geral os lignossulfonatos diminuem a exsudação enquanto os ácidos carboxílicos hidroxilados a aumentam.

Mantendo a água de mistura constante, os aditivos redutores de água aumentam a consistência do concreto (abatimento).

Para o mesmo abatimento, o concreto apresenta maior facilidade de lançamento, menor segregação e mais fácil adensamento.

Observa-se em concreto com aditivos que um aumento na água de amassamento provoca um aumento maior na consistência (abatimento) do que em concretos sem aditivos. Por outro lado a perda de consistência é ligeiramente maior em concretos com aditivos em comparação com outros sem aditivos.

Entretanto, com mesma água de amassamento, a consistência (abatimento) mais elevada dos concretos com aditivos permite um espaçamento de tempo maior entre a mistura e o lançamento do concreto.

Concretos com aditivos redutores de água apresentam aumentos na resistência. O aumento pode ser maior do que o normalmente esperado pela consequente redução na relação água-cimento ou, em outras palavras, para uma mesma relação água-cimento e mesmo consumo de cimento, o concreto com aditivo apresenta maior resistência do que aquele sem aditivo. A composição química e a finura do cimento governam esta variação observando-se que cimentos com baixos teores de álcalis e aluminato tricálcico apresentam-na menor.

O mesmo ocorre com cimentos mais finos devido à exigência de maior quantidade de aditivo para produzir a mesma ação dispersante.

É possível um pequeno aumento na resistência aos efeitos de águas ou solos agressivos devido à consequente redução de água, diminuição da permeabilidade e aumento da resistência.

3.5.2.3 Modificadores da pega

São substâncias solúveis em água que agem quimicamente, modificando a solubilidade e a velocidade de dissolução dos constituintes do cimento, promovendo a proteção das fases anidras ou a formação de outras fases não usuais, agindo sobre a cinética do processo de hidratação do cimento.

Podem ser classificados em dois grupos:

— Aceleradores de pega;
— Retardadores de pega.

Os aceleradores de pega são produtos que agem sobre os compostos anidros do cimento aumentando a solubilidade ou acelerando sua velocidade de reação com a água.

Devido às variações que ocorrem na composição do cimento e pelo importante papel que desempenham tanto a presença de impurezas como a finura, deve-se estar atento à ocorrência de resultados imprevistos, muitas vezes inesperados.

Os aceleradores de pega são derivados das seguintes substâncias químicas:

— Cloretos de cálcio, sódio, alumínio, ferro e amônia;
— Hidróxidos alcalinos;
— Amônia;
— Carbonato de sódio;
— Aluminatos de sódio;
— Silicatos;
— Silicofluoretos.

Cloretos de cálcio são mais empregados embora com riscos de perda de qualidade do concreto, devido à corrosão da armadura.

Algumas propriedades do concreto são afetadas pelo emprego de aceleradores de pega.

A resistência inicial à compressão é aumentada enquanto que a resistência aos 28 dias é menor do que a do concreto correspondente sem aditivo, ou seja, há uma evolução inicial mais rápida porém a resistência final é menor. Isto se deve ao desenvolvimento irregular e mais desordenado dos cristais.

A natureza salina desses aditivos pode aumentar a retração ou produzir eflorescências.

A presença de cloretos no concreto destrói a proteção contra a corrosão da armadura (Não devendo ser usados em concretos com embutidos de alumínio ou zincados, por produzirem corrosão).

Em geral existe um limite de concentração abaixo do qual atuam como retardadores e acima como aceleradores ou vice-versa.

A ação danosa que ocorre entre cimentos de elevado teor de álcalis e agregados reativos é aumentada pelo emprego destes aditivos.

Como alguns aceleradores de pega tendem a incorporar ar ao concreto, é recomendado que sejam tomados cuidados especiais quando usados juntamente com incorporadores de ar.

O cloreto de cálcio precipita a maioria dos incorporadores de ar sendo, por este motivo, recomendada a adição deste à água de mistura, em separado.

Os retardadores de pega são produtos largamente empregados na execução de concreto, especialmente em regiões e períodos de temperaturas mais elevados.

Os íons que diminuem ou impedem a solubilidade dos aluminatos são retardadores, assim como aqueles que precipitam o íon cálcio, impedindo a hidratação dos aluminatos.

A maneira como é adicionado o retardador de pega tem significativa influência no comportamento do concreto.

Quando adicionado junto com o cimento age com o gesso sobre o aluminato tricálcico que os absorve mais facilmente do que os silicatos.

Adicionado alguns minutos após o início da mistura, quando o gesso já estiver combinado com o aluminato tricálcico, o retardador fixa-se aos silicatos retardando sua hidratação.

Os retardadores de pega derivam, normalmente, de produtos de origem orgânica, tais como:

— Lignossulfonatos de cálcio, sódio ou amônia;
— Ácidos e sais dos ácidos carboxílicos hidroxilados;
— Hidratos de carbono;
— Ácidos fosfórico e fluorídrico e seus sais, fosfatos e fluoretos;
— Glicerina;
— Óxidos de zinco e chumbo;

— Boratos de zinco e sódio;

— Sais de magnésio, zinco, cobre e chumbo.

Os retardadores de pega, ao contrário dos aceleradores, geralmente são benéficos às propriedades de concreto.

A resistência que é reduzida às primeiras idades, a partir dos três dias apresenta-se maior do que a dos concretos sem aditivos. Em idades mais avançadas o ganho de resistência é bastante significativo.

Isto se explica pela cristalização mais perfeita que ocorre, pois os cristais têm mais tempo para se desenvolver.

A resistência à tração é também aumentada, porém em menor proporção do que a resistência à compressão.

A curva de elevação de temperatura do concreto pode ser alterada em relação a de concretos sem aditivos.

3.5.2.4 Outros aditivos

Entre os outros aditivos podem ser englobados os:

— agentes de cura;

— expansores;

— aditivos de injeção;

— aditivos corantes etc.

Tais aditivos são bastante diversificados e têm usos específicos. Para a aplicação de algum desses aditivos é prudente que sejam feitos estudos específicos procurando caracterizar o comportamento do mesmo, bem como a alteração nas propriedades dos concretos.

Os materiais pozolânicos podem ser considerados como aditivos, mas neste trabalho foram abordados separadamente, devido a sua importância.

3.5.3 Caracterização

A padronização, embora desejável, é bastante difícil no caso dos aditivos, por várias razões:

— Quase todos os aditivos apresentam, junto a uma ação considerada principal, outras secundárias;

— Essas ações secundárias podem ser favoráveis ou desfavoráveis ao concreto em determinados aspectos;

— Mesmo o efeito da ação principal pode ter um efeito favorável ou não, dependendo do teor;

— Não há um limite prático do teor de aditivo que separa as ações positivas das negativas, pois tal limite depende de um número considerável de variáveis (natureza do cimento e dos agregados, temperatura, relação água-cimento, mistura do concreto etc.).

Portanto é aconselhável verificar em ensaios prévios de laboratório, as indicações dadas pelas normas ou instruções de emprego dos produtos comercializados.

Os ensaios de laboratório são em geral esquemáticos e respondem a condições particulares médias, não garantindo o valor absoluto de um aditivo, pois a ação deste depende de variáveis alheias a ele, relativas aos materiais e à produção do concreto.

Na avaliação dos aditivos é comum a aplicação dos seguintes [3.169] [3.170] [3.171] [3.172] ensaios para:

— Verificação da uniformidade sobre o aditivo
  pH
  Resíduo sólido
  Massa específica

— Verificação do comportamento junto ao concreto
  Abatimento no tronco de cone
  Teor de ar incorporado
  Tempo de pega
  Teor de água
  Exsudação
  Resistência à compressão
  Resistência à flexão

3.5.3.1 Concentração hidrogeniônica

O pH do aditivo pode ser avaliado como descrito no item 3.4.2.1.

3.5.3.2 Resíduo sólido

O resíduo sólido do aditivo pode ser determinado por evaporação, como descrito em 3.4.2.2.

3.5.3.3 Massa específica

A massa específica dos aditivos líquidos pode ser determinada através da leitura direta por densímetro.

Para os aditivos sólidos, em pó, pode ser usado um frasco volumétrico como citado em 3.2.3.1 e 3.3.3.3, através de um líquido que não possa reagir com o aditivo.

3.5.3.4 Abatimento do tronco de cone

A avaliação da trabalhabilidade no concreto fresco com e sem aditivo, ou com aditivo ensaio e com aditivo padrão é feita em misturas de proporcionamento padronizado e pela aplicação do procedimento visto no item 6.

3.5.3.5 Teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado pode ser determinado pelo processo da pressão volumétrica ou pelo método gravimétrico, como visto no item 6.

A avaliação de um aditivo incorporador de ar é feita comparativamente através de concretos dosados, com aditivo em ensaio e com um aditivo padronizado de desempenho conhecido.

3.5.3.6 Tempos de pega

Os tempos de início e fim de pega de concretos com e sem aditivo, para efeitos comparativos, podem ser determinados pela resistência à penetração de agulhas padronizadas, como descreve o item 6.

3.5.3.7 Teor de água

O teor de água é determinado e expresso percentualmente, comparando os teores de água da mistura ensaio (com aditivo ensaio) e da mistura padrão (com aditivo padrão, no caso de aditivo incorporador de ar, e sem aditivo, no caso de redutores e/ou modificadores da pega), para manter uma mesma trabalhabilidade.

3.5.3.8 Exsudação

A exsudação é avallada como visto no item 6.

3.5.3.9 Resistência à compressão

A resistência à compressão axial simples dos concretos com e sem aditivos é avaliada como cita o item 7.

3.5.3.10 Resistência à tração

Da mesma forma que citado acima, a resistência à tração pode ser avaliada como mostra o item 7.

3.5.3.11 Outras caracterizações

Alguns aditivos como, por exemplo, os expansores e os fluidificadores para injeção são avallados por ensaios específicos, como o de estabilidade volumétrica, retentividade, injetabilidade, que têm uma conotação específica e podem ser observados em literatura correspondente.

3.6 Referências bibliográficas

[3.1] "Construções de Concreto — Manual de Práticas para Controle e Execução" — Francisco Rodrigues Andriolo — Editora Pini — 1984.

[3.2] NBR-5734 (EB-22) — ABNT — Peneiras para Ensaio.

[3.3] ASTM E-11 — Standard Specification for Wire Cloth Sieves For Testing Purposes.

[3.4] NBR-7217 — ABNT — Determinação da composição granulométrica dos agregados.

[3.5] NBR-7216 — ABNT — Amostragem dos Agregados.

[3.6] ASTM-C-136 — Standard Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregate.

[3.7] A.C.I. — Education Bulletin n.° E1-78 — Aggregates for Concrete.

[3.8] NBR-7810 — ABNT — Determinação da Massa Unitária de Agregados em Estado Solto.

[3.9] NBR-7251 — ABNT — Agregado em Estado Solto. Determinação da Massa Unitária.

[3.10] ASTM-C-29 — Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregate.

[3.11] ASTM-C-127 — Standard Test Method for Specific Gravity and Absortion of Coarse Aggregate.

[3.12] ASTM-C-128 — Standard Test Method for Specific Gravity and Absortion of Fine Aggregate.

[3.13] ASTM-C-566 — Standard Test Method for Total Moisture Content of Aggregate by Drying.

[3.14] ASTM-C-70 — Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate.

[3.15] CRD-C-119 — Corps of Engineers — Method of Test for Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate.

[3.16] NBR-7809 — ABNT — Agregado Graúdo — Determinação do índice de forma pelo método do Paquímetro.

[3.17] NBR-6465 — ABNT — Determinação da Abrasão Los Angeles de Agregados.

[3.18] ASTM-C-131 — Standard Test Method for Resistance to Abrasion of Small Size Coarse Aggregate by use of the Los Angeles Machine.

[3.19] ASTM-C-535 — Standard Test Method for Resistance to Abrasion of Large Size Coarse Aggregate by use of the Los Angeles Machine.

[3.20] NBR-7219 — ABNT — Determinação do Teor de Materiais Pulverulentos nos Agregados.

[3.21] ASTM-C-117 — Standard Test Method for Materials Finer Than 75 μm (n.° 200) Sieve in Mineral Aggregate by Washing.

[3.22] NBR-7218 — ABNT — Determinação do teor de Argila em torrões nos agregados.

[3.23] ASTM-C-142 — Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates.

[3.24] ASTM-C-123 — Standard Test Method for Lightweight Pieces in Aggregates.

[3.25] NBR-7220 — ABNT — Avaliação das Impurezas Orgânicas das Areias para Concreto.

[3.26] ASTM-C-40 — Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete.

[3.27] NBR-7221 — Areia — Ensaio e Qualidade.

[3.28] ASTM-C-87 — Standard Test Method for Effect of Organic Impurities in Fine Aggregate on Strength of Mortar.

[3.29] NBR-7389 — ABNT — Apreciação Petrográfica de Agregados.

[3.30] ASTM-C-295 — Recomended Practice for Petrografic Examination of Aggregates for Concrete.

[3.31] LCI-022 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para verificação da Durabilidade de Rochas através da ciclagem natural ao tempo.

[3.32] C-21/74 — CESP — Ensaio de Desagregabilidade de Rochas — Água Vermelha — Material das Sondagens SR-97 a 102.

[3.33] LCI-021 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para Verificação da Durabilidade de Rochas através da ciclagem artificial Água Estufa.

[3.34] LCI-020 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para verificação da expansão de Rochas, pela imersão no etileno glicol.

[3.35] CRD-C-144 — Corps of Engineers — Method of Testing Stone Resistance to Freezing and Thawing.

[3.36] CRD-C-148 — Corps of Engineers — Method of Testing Stone for Expansive Breakdow on Soaking in Ethylene Glycol.

[3.37] ASTM-D-2693 — Standard Specification for Ethylene Glycol.

[3.38] CESP — RO-TC-02/17-RT-0131 — Análise dos Resultados de Ciclagem, Obras de Rosana — Bento Carlos Sgarboza — José R. A. Andrade.

[3.39] Overall date of Basalts and Comparative Studies Between Sound and Unsound Basalt used as Concrete Aggregate — CESP — Francisco Rodrigues Andriolo — Miguel N. A. Saad — Bento Carlos Sgarboza.

[3.40] CESP — ISC-13/80 — Ensaios de Reatividade Potencial e Análises Petrográfica e Mineralógica de Basalto e Areia da Região da Obra de Taquaruçu — Miguel N. A. Saad — Flávio Moreira Sales.

[3.41] Alcali-Silica Reaction — 40 years later — ACI — Concrete International Abril/82 — Lewis H. Tuthill.

[3.42] Reação Álcali-Sílica — Mecanismo, Diagnóstico e Medidas Preventivas — II Simpósio sobre Normalização de Cimento, Concreto e Agregados — Heraldo de Souza Gitahy — Novembro/1982.

[3.43] "Influence of Cement and Aggregate on Concrete Expansion" — Engineers News Record — Fevereiro/1940 — Stanton, Thomas E.

[3.44] "Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate" — Proceedings A.S.C.E. — Dezembro/1940 — Stanton, Thomas E.

[3.45] "California Experience with the Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate — ACI — Journal Proceedings — Janeiro 1948 — Stanton, Thomas E.

[3.46] ASTM-C-227 — Standard Test Method for Potencial Reactivity of Cement — Aggregate Combinations (Mortar — Bar Method).

[3.47] LCI-018 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para a verificação da Reatividade Potencial dos Álcalis do Cimento com Agregados — Método Físico.

[3.48] ASTM-C-305 — Standard Method for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.

[3.49] ASTM-C-109 — Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 50 mm cube speciments).

[3.50] CRD-C-123 — Corps of Engineers — Standard Method of Test for Potential Alkali Reactivity of Cement Aggregate Combinations.

[3.51] C-34/74 — CESP — Ensaios de Reatividade Álcali-Agregado — Material de Água Vermelha (II).

[3.52] Investigação e Seleção de Agregados para Concreto — Ibracon — 1981 — Miguel Normando — Abdalla Saad — Paulo José R. de Oliveira — Flávio Moreira Sales.

[3.53] ASTM-C-289 — Standard Test Method for Potencial Reactivity of Aggregates (Chemical Method).

[3.54] LCI-017 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para Verificação da Reatividade Potencial dos Agregados.

[3.55] CRD-C-128 — Corps of Engineers — Standard Method of Test for Potential Reactivity of Aggregates.

[3.56] Agregado — Verificação da Reatividade Potencial pelo Método Químico — Simpósio sobre Normalização de Cimento, Concreto e Agregados — ABNT — Evelyne Yvone Lange Valdergorin.

[3.57] Tests used by the Bureau of Reclamation for Identifying Reactive Concrete Aggregates — Proceedings — ASTM — Mielenz R. C. Witt L. P.

[3.58] C-03/73 — CESP — Testes de Desagregabilidade e Reatividade em Rochas da Usina de São Simão — CEMIG.

[3.59] RC-21/80 — Itaipu Binacional — Estudos dos Agregados da Obra de Itaipu.

[3.60] Influência das propriedades de algumas Rochas nas propriedades do Concreto — Ibracon 1983 — Walton Pacelli de Andrade, José Tomaz França Fontoura — Rubens Machado Bitencourt — Helcio A. Guerra.

[3.61] ASTM-C-586 — Standard Test Method for Potential Alkali reactivity of carbonate rocks for Concrete Aggregates (rock Cylinder Method).

[3.62] Durability of Concrete Construction — ACI — Monograph n.° 4.

[3.63] Living with Marginal Aggregates — ASTM — Evaluation of Potential Alkali-Carbonate Reactions. J. J. Emery — R. G. Drysdale.

[3.64] CRD-C-125 — Corps of Engineers — Method of Test for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Coarse Aggregate (strain gage method).

[3.65] LCI-023 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para a determinação do coeficiente de Expansão Térmica do Agregado Graúdo.

[3.66] C-13/72 — CESP — Determinação do Coeficiente de Expansão Térmica dos Agregados.

[3.67] C-78/72 — CESP — Determinação do Coeficiente de Expansão Térmica dos Agregados de Água Vermelha.

[3.68] C-80/72 — CESP — Determinação do Coeficiente de Expansão Térmica dos Agregados de Capivara.

[3.69] RC-29/79 — Itaipu Binacional. — Determinação e Verificação do Coeficiente de Expansão Térmica do Agregado Graúdo (Basalto), da Pasta, Argamassa e do Concreto.

[3.70] CRD-C-124 — Corps of Engineers — Method of Test for Specific Heat of Aggregates Concrete and other Materials (Method of Mixture).

[3.71] LCI-025 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para Determinação do Calor Específico dos Agregados, Concretos e outros Materiais (Método das Misturas).

[3.72] "A Selection of Historic American Papers on Concrete" 1876-1926 — A.C.I. — Publication SP-52.

[3.73] "Cements, Limes and Plasters" — E. C. Eckel 1928.

[3.74] "Control of Cracking in Concrete Gravity Dams" — William R. Wangh — James A. Rhodes — Journal of the Power Division — A.S.C.E. — 1959.

[3.75] NBR-5732 — ABNT — Cimento Portland Comum.

[3.76] "Hidration of Portland Cement Compounds" — Industrial and Engineering Chemistry — R. H. Bogue — W. Lerch — 1934.

[3.77] ASTM — C-150 — Standard Specification for Portland Cement.

[3.78] NBR-5733 ABNT — Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (A.R.I.).

[3.79] NBR-5737 — ABNT — Cimento Portland de Moderado Calor de Hidratação.

[3.80] "Propriedades do Concreto" — Adam M. Neville — Tradução Salvador E. Giamusso — 1982.

[3.81] "The Chemistry of Cement and Concrete" — F. M. Lea 1970.

[3.82] Comitê 204 — Concreto Massa — Práticas Recomendadas para Projetos, Execução e Controle de Obras de Concreto Massa — Subcomitê — Materiais Constituintes do Concreto Massa — Ibracon.

[3.83] ASTM C-595 — Standard Specification for Blended Hydraulic Cements.

[3.84] NBR-5735 — ABNT — Cimento Portland de Alto Forno.

[3.85] NBR-5736 — ABNT — Cimento Portland Pozolânico.

[3.86] ASTM-C-91 — Standard Specification for Masonry Cement.

[3.87] Concrete Technology — Volume 1 — Properties of Materials — D. F. Orchard.

[3.88] NBR-6474 — ABNT — Método de Ensaio para Determinação da Massa Específica de Cimentos.

[3.89] ASTM-C-188 — Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement.

[3.90] LCI-102 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para Determinação do peso Específico de Cimento.

[3.91] Resultados do Segundo Programa Interlaboratorial — 1978 — ABCP.

[3.92] Resultados do Terceiro Programa Interlaboratorial — 1979 — ABCP.

[3.93] IV — Programa Interlaboratorial de Ensaios de Cimento — 1980 — ABCP.

[3.94] Resultados do Quinto Programa Interlaboratorial de Ensaios de Cimento — 1981 - ABCP.

[3.95] VI — Programa Interlaboratorial de Ensaios de Cimento — 1982/1983 — ABCP.

[3.96] ASTM-C-184 — Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the n.° 100 (150 μm) and 200 (75 μm) sieves

[3.97] LCI-103 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para Determinação da Finura do Cimento através das peneiras n.° 100 (150 μm), 200 (75 μm) e 325 (45 μm).

[3.98] ASTM-C-430 — Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the n.° 325 (45 μm) sieve.

99] Fineness of Cement — STP-473 — ASTM — 1968.

[3.100] Lea, F. M. and Nurse R. W. "The Specific Surface of fine Powders" — Journal of the Society of Chemical Industry — 1939.

[3.101] Carman, P. C. — "Fluid Through Granular Beds" Transactions, Institute of Chemical Engineers — 1937.

[3.102] Carman, P. C. — "The determination of the Specific Surface of Powders" — Journal of the Society of Chemical Industry — 1939.

[3.103] Carman, P. C. — "Determination of the Specific Surface of Powders" — Journal of the Society of Chemical Industry — 1939.

[3.104] Lea, Frederick M. — "The Chemistry of Cement and Concrete" — 1935 — 1970 (3.a Edição)

[3.105] Blaine R. L. — "A simplified Air Permeability Fineness Aparatus" — ASTM — Bulletin 1943.

[3.106] Rigden P. J. — The Specific Surface of Powders. A modification of the Air Permeability Method for Rapid Routine Testing — Journal of the Society of Chemical Industry - 1943.

[3.107] ASTM-C-204 — Standard Test Method for Fineness of Portland Cement by Air Permeability Apparatus.

[3.108] NBR-7224 — ABNT — Determinação da finura do cimento Portland mediante emprego do aparelho de permeabilidade ao ar.

[3.109] LCI-104 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para determinação da finura do cimento Portland através do aparelho de permeabilidade ao ar.

[3.110] "Cimento Portland e outros materiais em pó - determinação da área especifica" — J. C. Marques — P. P. F. Rodrigues — Anais do II Simpósio sobre Normalização de Cimento, concreto e agregados — ABNT — 1982.

[3.111] RC-11/77 — Itaipu Binacional — Resumo do Estudo preliminar de moagem de aglomerantes.

[3.112] ASTM-C-115 — Standard Test Method for Fineness of Portland Cement by the Turbidimiter.

[3.113] ASTM-C-187 — Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement.

[3.114] NBR-7215 — ABNT — Ensaio de cimento Portland.

[3.115] LCI-106 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para determinação da consistência normal da pasta de cimento.

[3.116] ASTM-C-191 — Standard Test Method for Time of setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle.

[3.117] LCI-107 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para determinação do tempo de pega de cimentos, através da agulha Vicat.

[3.118] ASTM-C-151 — Standard Test Method for Auto Clave Expansion of Portland Cement.

[3.119] LCI-108 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para determinação da expansão, do cimento Portland em Auto Clave.

[3.120] ASTM-C-186 — Standard Test Method of Heat of Hydraulic Cement.

[3.121] LCI-109 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para determinação do calor de hidratação de cimentos hidráulicos.

[3.122] MCG-09-CESP — Ilha Solteira — Método de Ensaio para determinação do calor de hidratação do cimento pela garrafa térmica de Langavant.

[3.123] RC-30/79 — Itaipu Binacional — Valores de Atividade Pozolânica das Fly-Ashes e cimentos em uso na obra de Itaipu/1979.

[3.124] RE-05/80 — "Controle de qualidade de cimentos" — Francelino Fernandes Neto — Itaipu Binacional — 1980.

[3.125] NBR-5742 — ABNT — Análise química de cimento Portland — Processos de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio.

[3.126] NBR-5743 — ABNT — Análise química de cimento Portland — determinação da perda ao fogo.

[3.127] NBR-5744 — ABNT — Análise química de cimento Portland — determinação do resíduo insolúvel.

[3.128] NBR-5745 — ABNT — Análise química de cimento Portland — determinação de anidrido sulfúrico.

[3.129] NBR-5746 — ABNT — Análise química de cimento Portland — determinação de enxofre na forma de sulfeto.

[3.130] NBR-5747 — ABNT — Análise química de cimento Portland — determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama.

[3.131] NBR-5748 — ABNT — Análise química de cimento Portland — determinação de óxido de cálcio livre.

[3.132] NBR-5749 — ABNT — Análise química de cimento Portland — Processos optativos para determinação de dióxido de silício, óxido de ferro e alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio.

[3.133] ASTM-C-114 — Standard Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement.

[3.134] LCI-113 — Itaipu Binacional — Método para análise química de cimento.

[3.135] Cimento Portland — Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol — II simpósio sobre normalização de cimento, concretos e agregados — ABNT — 1982 — Paulo Rodrigues.

[3.136] O uso de espectrofotometria de absorção atômica em análises químicas de cimento — IBRACON — 1982 — Francelino Fernandes Netto e Luercio Scandiuzzi.

[3.137] SNIC — Sindicato Nacional de Indústria de Cimento.

[3.138] Controle de qualidade na fabricação de materiais para construções de concreto — considerações sobre vantagens e custos. IBRACON — 1985 — Francisco Rodrigues Andriolo.

[3.139] Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures — ACI — Committee-207.

[3.140] "A micro-sílica no concreto" — I Seminário Tecnologia da Elken Microsilica — Setembro/1984 L. Hjörth.

[3.141] "Fly Ash Increases Resistance of Concrete to Sulfate Attack" — Research Report n.º 23 Bureau of Reclamation.

[3.142] "A Utilização da Pozolana na Construção do Conjunto Hidroelétrico de Urubupungá — CESP — Francisco Rodrigues Andriolo — 1975.

[3.143] Propriedade do concreto massa contendo pozolana de argila — Miguel Normando Abdalla Saad — Walton Pacelli de Andrade — Vladimir Antonio Paulon — IBRACON — 1983.

[3.144] Avaliação das propriedades pozolânicas de argilas e cinzas — Miguel Normando Abdala Saad — Paulo José Ribeiro de Oliveira — Flávio Moreira Sales — IBRACON — 1983.

[3.145] LCI-155 — Itaipu Binacional — Método para cálculo do diâmetro médio das partículas de material pozolânico.

[3.146] ASTM-C-311 — Standard Method of Sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use as a mineral admixture in Portland cement concrete.

[3.147] ASTM-C-618 — Standard Specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete.

[3.148] LCI-156 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para determinação dos índices de atividade pozolânica.

[3.149] RC-12/80 — Itaipu Binacional — Estudos de qualidade de areias com vistas ao uso em ensaio de materiais pozolânicos, em substituição à areia de Ottawa — 1980.

[3.150] ASTM-C-6 — Standard Specifications for Normal Finishing Hydrated lime.

[3.151] ASTM-C-206 — Standard Specifications for Finishing Hydrated lime.

[3.152] Materiais pozolânicos — Utilização e Benefícios — Luercio Scandiuzzi — Francisco Rodrigues Andriolo — IBRACON — 1981.

[3.153] Fabricacion, características y aplicaciones de los diversos tipos de cemento — M. Papadakis.

[3.154] RC-02/79 — Itaipu Binacional — Estudo dos efeitos do fly-ash na resistência à compressão dos cimentos Votoran e Vallemi.

[3.155] ASTM-C-441 — Standard test Method for Effectiveness of Mineral Admixtures in Preventing Excessive Expansion of Concrete due to the Alkali-Aggregate Reation.

[3.156] LCI-157 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para verificação da eficiência do material pozolânico no combate a reação álcalis-agregado — (redução da expansão da argamassa).

[3.157] LCI-158 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para verificação da retração por secagem de barras de argamassa.

[3.158] LCI-159 — Itaipu Binacional — Método para análise química de material pozolânico.

[3.159] RC-08/70 — CESP — Ilha Solteira — "Palestra feita em 17/03/70 na ABCP" — José Florestino de Castro Sobrinho — 1970.

[3.160] Atividade pozolânica da cinza de casca de arroz — José Dafico Alves — Benedito da Costa Goulart — IBRACON — 1981.

[3.161] Relatório — TUC-40-6 — ELETRONORTE — Controle de Qualidade.

[3.162] Concrete Construction Handbook — Joseph J. Waddell.

[3.163] LCI-353 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para análise química de águas para uso na mistura e cura do concreto.

[3.164] CRD-C-406 — Corps of Engineers — Method of Test for the Staining Properties of Water.

[3.165] LCI-354 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para avaliação da qualidade da água de mistura, através da resistência à compressão.

[3.166] CRD-C-401 — Corps of Engineers — Method of Test for Compressive Strength of Mortar for use in Evaluating Water for Mixing Concrete.

[3.167] LCI-352 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para determinação das manchas causadas pela água de cura.

[3.168] "Design and Control of Concrete Mixture" — P.C.A.

[3.169] ASTM-C-260 — Standard Specification for Air Entranning Admixtures for Concrete.

[3.170] ASTM-C-403 — Standard Test Method for Time of setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance.

[3.171] ASTM-C-494 — Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.

[3.172] LCI-229 — Itaipu Binacional — Especificações de Aditivos para uso em concreto de cimento Portland.

Índice

4.	Proporcionamento e Dosagem do Concreto	251
4.1	Evolução Histórica	251
4.2	Procedimentos para o Proporcionamento e Dosagem	252
4.2.1	Conceito	252
4.2.2	Método do Volume Absoluto — Das Tentativas	254
4.2.2.1	Fator Água/Cimento	254
4.2.2.2	Trabalhabilidade	254
4.2.2.3	Tamanho Máximo do Agregado (Ø Máx.)	254
4.2.2.4	Consumo de Água (Teor de Água)	258
4.2.2.5	Teor de Agregado Miúdo e Teor de Argamassa	258
4.2.2.6	Combinação dos Agregados Graúdos	262
4.2.2.7	Informações Adicionais	262
4.2.2.8	Procedimento para o Cálculo da Dosagem pelo Método do Volume Absoluto	265
4.2.2.9	Estabelecimento das Condições	266
4.2.2.10	Conhecimento dos Materiais	266
4.2.2.11	Combinação do Agregado Graúdo	267
4.2.2.12	Adoção da Quantidade de Água	267
4.2.2.13	Adoção do Teor de Agregado Miúdo e Volume de Argamassa	267
4.2.2.14	Determinação da Mistura Inicial e do Traço-Base	267
4.2.2.15	Sequência de Operações	269
4.2.2.16	Obtenção de Mistura Base (Traço-Base)	270
4.2.2.17	Misturas Refrigeradas	270
4.2.2.18	Moldagens e Escolhas das Misturas para Aplicação	271
4.2.3	Método do "Módulo de Figura"	271
4.2.3.1	Introdução	271
4.2.3.2	Graduação Geométrica	272
4.2.3.3	Graduações Geométricas e as Curvas de Referência do A.C.I. — Comitê — 207 : (4.21)	282
4.2.3.4	Procedimentos para a Dosagem pelo Método do Módulo Finura	282
4.2.3.5	Combinação do Agregado Graúdo	287
4.2.3.6	Determinação das Misturas Básicas	287
4.3	Exemplos	288
4.3.1	Exemplo com Base no Método do Volume Absoluto (das Tentativas)	288
4.3.1.1	Dados Iniciais	288
4.3.1.2	Cálculos	288
4.3.1.3	Betonada (mistura)	295
4.3.1.4	Verificações	295
4.3.1.5	Cálculos Complementares	296
4.3.2	Exemplo com Base no Método do "Módulo de Finura"	299
4.4	Recomendações para Dosagens de outros tipos de Concreto	299

4.4.1	Concreto Estrutural Leve	299
4.4.2	Concreto Pesado	309
4.4.3	Concreto Bombeável	309
4.4.4	Concreto com Agregado Pré-Colocado	310
4.4.5	Concreto Projetado	311
4.5	Referências Bibliográficas	311

4 Proporcionamento e dosagem do concreto

4.1. Evolução Histórica

Ao longo dos tempos, vários métodos têm sido usados para proporcionamento dos ingredientes nos concretos como, por exemplo, a utilização de volumes em uma mistura como 1:2:4 — significando uma parte de cimento, duas partes de areia e quatro partes de pedra.

Não se sabe ao certo o início do uso desse critério, mas tem-se conhecimento (4.1) (4.2) (4.3) que tenha sido usado por Smeaton em 1756, no proporcionamento de argamassas aplicadas na construção da "Eddystone Lighthouse".

O primeiro estudo de proporcionamento racional, provavelmente (4.1) (4.2), tenha sido feito por René Feret — Chefe do Laboratório de "Ponts Et Chausseés" na França entre 1892 e 1897 (4.4). Feret concluiu que com um mesmo cimento, mesma areia e mesma idade e condições de cura, a resistência à compressão de uma série de argamassas plásticas é função, somente, da relação do volume de cimento para o volume de água e de vazios de ar, e que a resistência varia com o quadrado dessa relação.

O próximo a elaborar um estudo detalhado do proporcionamento foi William B. Fuller, junto com Sanford E. Thompson em 1901. Como resultado desse estudo Fuller estabeleceu uma série de regras para proporcionamento, sendo as mais importantes (4.5):

— Com um certo teor de cimento e dadas areia e agregado graúdo, o concreto mais resistente e denso será obtido quando a areia, cimento e água são suficientes para preencher somente os vazios dos agregados graúdos.

— Quando os agregados são graduados de modo a se obter, após a adição de água e cimento, uma mistura mais densa, o concreto será mais resistente do que quando se usar a mesma quantidade de cimento sem a graduação dos agregados.

Observa-se então que Fuller e Thompson foram os pioneiros em defenderem a idéia da influência da composição granulométrica dos agregados, no proporcionamento do concreto, ao contrário dos pesquisadores anteriores, que utilizaram misturas do tipo 1:2:4 — sem caracterizar a dimensão dos agregados.

Algo novo foi introduzido no estudo do proporcionamento, em 1918 (4.6) por L. N. Edwards, do Departamento de Obras, Toronto — Ontário, através do que foi denominado de "Método da Área Superficial", no qual a área superficial dos agregados era computada através da análise granulométrica. Entretanto, esse método não teve muita aplicação prática, embora se apresentasse satisfatoriamente respaldado sob o ponto de vista teórico.

Logo antes (4.1) de Edwards publicar seu método da "Area Superficial", Duff A. Abrams trabalhando para a Associação de Cimento Portland — USA (P.C.A.) publicou um pequeno artigo em maio de 1918, na Engineering News Record — sobre um novo método que propunha. Esse método foi definitivamente publicado em fins de 1918, início de 1919.

O método proposto chamava atenção para a determinação do "Módulo de Finura" do agregado e depositava maior ênfase na quantidade de água de mistura com relação ao teor de cimento.

O novo termo — Módulo de Finura — foi usado para designar a "dimensão e graduação efetivas do agregado" e era obtido através da análise granulométrica, com base em uma série de nove peneiras começando com a de malha n.º 100 (0,15 mm), sendo que a abertura das demais crescia em uma progressão geométrica de razão 2 (dois), e o "Módulo de Finura" era a soma dos porcentuais retidos em cada uma, dividido por 100.

Abrams afirmava, um pouco contra os pontos de vista da época, que o concreto mais resistente não era o de maior densidade, mas sim aquele com agregados mais grossos (maior tamanho de agregado) (4.7).

Abrams informava que enquanto a graduação do agregado afetava o teor de água da mistura, a resistência dependia apenas da relação entre água e cimento.

Ao redor de 1923, enquanto seus estudos ainda se desenvolviam na Universidade de Illinois, A. N. Talbot e F. E. Richart questionaram (4.8) a validade da abrangência das afirmativas de Abrams de que a resistência do concreto era determinada somente pela relação entre o cimento e a água. Talbot e Richart acreditavam que era a magnitude dos vazios no concreto, espaços ocupados pela água e o ar, que afetavam a resistência do concreto. Desenvolvendo essa idéia, atestavam que dentro de certos limites a resistência de um concreto era a mesma da sua argamassa pois o agregado atuava somente como inerte de enchimento (Fuller).

O termo "Relação de Vazios — Cimento" era usado para expressar a relação entre os vazios remanescentes no concreto lançado e o volume absoluto de cimento.

Embora vários autores e pesquisadores tenham dado ênfase a diferentes elementos como vazios, densidade, área superficial dos agregados e teor de água, é notório que alguns desses elementos possuam inter-relações tais como vazios-densidade, reduzindo-se então as diferenças entre os métodos até então propostos.

Em 1931, o Professor Inge Lyse publicou (4.9) a sugestão de se usar a relação água-cimento em peso, em lugar da relação volumétrica, afirmando que a resistência era uma função linear dessa relação em peso.

Nessa época surgiu a preocupação sobre a maneira de se controlar de modo simples e econômico a quantidade de água. Dos vários esquemas sugeridos, na época, os que se apresentavam como mais práticos foram o — Abatimento do Tronco de Cone (slump test) e o da Mesa de Consistência (flow table).

Com a aplicação de material pozolânico a partir dos anos de 1930 (4.10) introduziu-se uma modificação no conceito da relação água/cimento, passando-a para relação ou fator água/cimento equivalente, sendo que o termo cimento equivalente passou a corresponder ao peso de equivalente volume de cimento. Alguns, entretanto, consideram o material pozolânico como parte do agregado.

Com o surgimento e desenvolvimento (4.11), pelo Corps of Engineers, da técnica de incorporação de ar passou-se a levar em conta, ainda, a existência de vazios intencionalmente introduzidos no concreto. Desta forma, neste texto procurar-se-á levar em consideração a rotina mais ampla, abrangendo a maior gama das variáveis possíveis.

4.2 Procedimentos para o proporcionamento e dosagem

4.2.1 Conceito

O proporcionamento das misturas de concreto é o processo que determina a mais prática e econômica combinação dos materiais dando uma mistura, que em seu estado plástico pode ser facilmente manuseada, consolidada e acabada nas fôrmas e que, quando endurecida, apresenta a adequada resistência, densidade, estabilidade volumétrica e estanqueidade, para os fins que se propõe.

A facilidade com que uma mistura é manuseada, consolidada e acabada é avaliada pela trabalhabilidade.

Para se ter economia, o proporcionamento deve minimizar o uso dos materiais de maior custo, sem entretanto sacrificar a qualidade do concreto. Normalmente o componente de maior custo é o aglomerante. Como a qualidade do concreto depende basicamente da relação água/cimento, esta deve ser mantida em níveis tais que possibilitem a redução dos teores de cimento e de água.

Os passos para reduzir os teores de água e cimento incluem:

— misturas mais rígidas (menor trabalhabilidade)
— emprego de agregados de tamanho máximo o maior possível
— a relação, ótima, entre agregados miúdo e graúdo

Deve ser levado em conta, ainda, o custo relativo dos agregados miúdo e graúdo.

Ao longo dos tempos, vários métodos foram sugeridos para o proporcionamento das misturas, sendo conhecidos (4.12):

— Método dos volumes escoihidos arbitrariamente (do tipo 1:2:4);
— Método da relação de vazios;
— Método da máxima densidade;
— Método da análise mecânica;
— Método do "módulo de finura";
— Método da área superficial dos agregados
— Método da relação água-cimento.

Vários grupos de usuários justificam vantagens sobre um ou outro método que tenha sido adotado.

Neste trabalho são abordados dois métodos que têm sido usados mais rotineiramente no Brasil e abrangem uma maioria.

Um dos métodos é uma ampliação do método original do módulo de finura, desenvolvido por Abrams (4.1) (4.7) adaptado para agregados com tamanho máximo superior a 38 mm (tamanho máximo do agregado no método original (4.7) era 38 mm).

Outro método é o do proporcionamento através do volume absoluto estabelecido através (4.13) de tentativas por meio de betonadas experimentais.

Ambos os métodos, bem como outros anteriormente citados, produzem no final aproximadamente a mesma mistura, após os ajustes na obra. O acerto é mais próximo, dependendo da experiência e do conhecimento da pessoa que está dosando o concreto.

Os métodos aqui descritos, e os demais, apresentam efetivamente pouca diferença entre si, pois procuram compor os agregados de maneira bastante similar como é visto adiante.

Deve ser lembrado (4.14) que a dosagem não deve ser encarada como uma equação matemática onde as incógnitas são os consumos dos materiais.

Os materiais são vários e muitas das suas propriedades não podem ser assumidas quantitativamente. Tendo isso em vista, deve-se estimar as proporções dos materiais, e também fazer misturas experimentais para a verificação das propriedades dessas misturas até a obtenção das características desejadas.

A dosagem em laboratório, entretanto, não fornece o proporcionamento final da mistura, pois deve ser levada em conta a condição de umidade dos materiais. Deve ser levado em conta, também, o desempenho dos equipamentos de misturas (betoneiras) tanto de laboratório como do local de produção.

Outros fatores (4.14), tais como os efeitos do manuseio, transporte, espera para lançamento, condições climáticas, podem influenciar as propriedades do concreto, devendo se orientar as correções ou tomar medidas minimizadoras.

4.2.2 Método do volume absoluto — das tentativas

O proporcionamento da mistura do concreto através do método das tentativas baseia-se em parâmetros previamente adotados a partir de estudos e experiências anteriores das características exigidas para o concreto, pelas condições de aplicação e de exposição das estruturas.

A figura 4.1 fornece um diagrama dos fatores básicos que são considerados na determinação das proporções dos componentes da mistura.

4.2.2.1 Relação água/cimento

A relação água/cimento é definida como sendo a relação entre a quantidade de água — excluindo-se a água necessária para a absorção dos agregados — e a quantidade de aglomerante no concreto ou argamassa, de preferência expresso em massa.

A relação água/cimento é escolhida com base na durabilidade e resistência indicadas para a estrutura. A durabilidade é comandada pelas condições de exposição e a resistência é recomendada pelo carregamento previsto.

Do ponto de vista de durabilidade tem-se determinado que a máxima relação água/cimento não deve exceder os limites recomendados pela tabela da figura 4.2.

É importante também considerar a condição do clima das diversas regiões do País, para a adoção dos valores estabelecidos na figura 4.2.

A máxima relação água/cimento para fornecer uma determinada resistência pode ser (e é conveniente que seja) determinada através da moldagem e ensaios sobre corpos de prova, entretanto a tabela da figura 4.3 (de 4.14) fornece valores orientativos.

É conveniente lembrar que os valores indicados na figura 4.3 podem ser úteis para um proporcionamento rápido, pois quando se dispõe de uma programação de trabalho e de uma previsão de que misturas semelhantes podem ser usadas no transcorrer dos trabalhos, é prudente obter curvas de correlação das propriedades e das proporções.

4.2.2.2 Trabalhabilidade

A escolha da trabalhabilidade do concreto deve ser feita em função das condições específicas de transporte, lançamento, espalhamento e adensamento. Condições quanto à geometria da peça, bitola e espaçamento da armadura, presença de embutidos ou outros elementos, são itens que determinam a escolha da trabalhabilidade mais adequada.

O concreto deve, sempre, ser dosado para uma trabalhabilidade, consistência e plasticidade adequadas para condições da obra a ser construída.

A tabela da figura 4.4 sugere uma faixa de abatimento relacionada com as características das estruturas.

Não resta dúvida de que a escolha do valor da trabalhabilidade deve ser feita por pessoa experiente, judiciosa, observando também a melhor consistência.

4.2.2.3 Tamanho máximo do agregado (∅ máx)

A escolha do tamanho máximo do agregado também deve ser feita tendo em vista as limitações de equipamentos e condições geométricas da estrutura. Sob ponto de vista econômico deve-se procurar o maior tamanho máximo possível para o agregado, mas com uma razoável dose de bom-senso e experiência. Por exemplo, um bloco de concreto de dimensões 20 m x 40 m e altura 2,5 m, permite que se aplique concretos com agregado de tamanho máximo superior a 152 mm, porém a produção de concretos com agregados de tamanho máximo acima de 152 mm, envolve um processo de beneficiamento e estocagem com maior complexidade para os diversos agregados, equipamentos de produção, transporte, lançamento e adensamento e isto pode resultar em uma situação antieconômica.

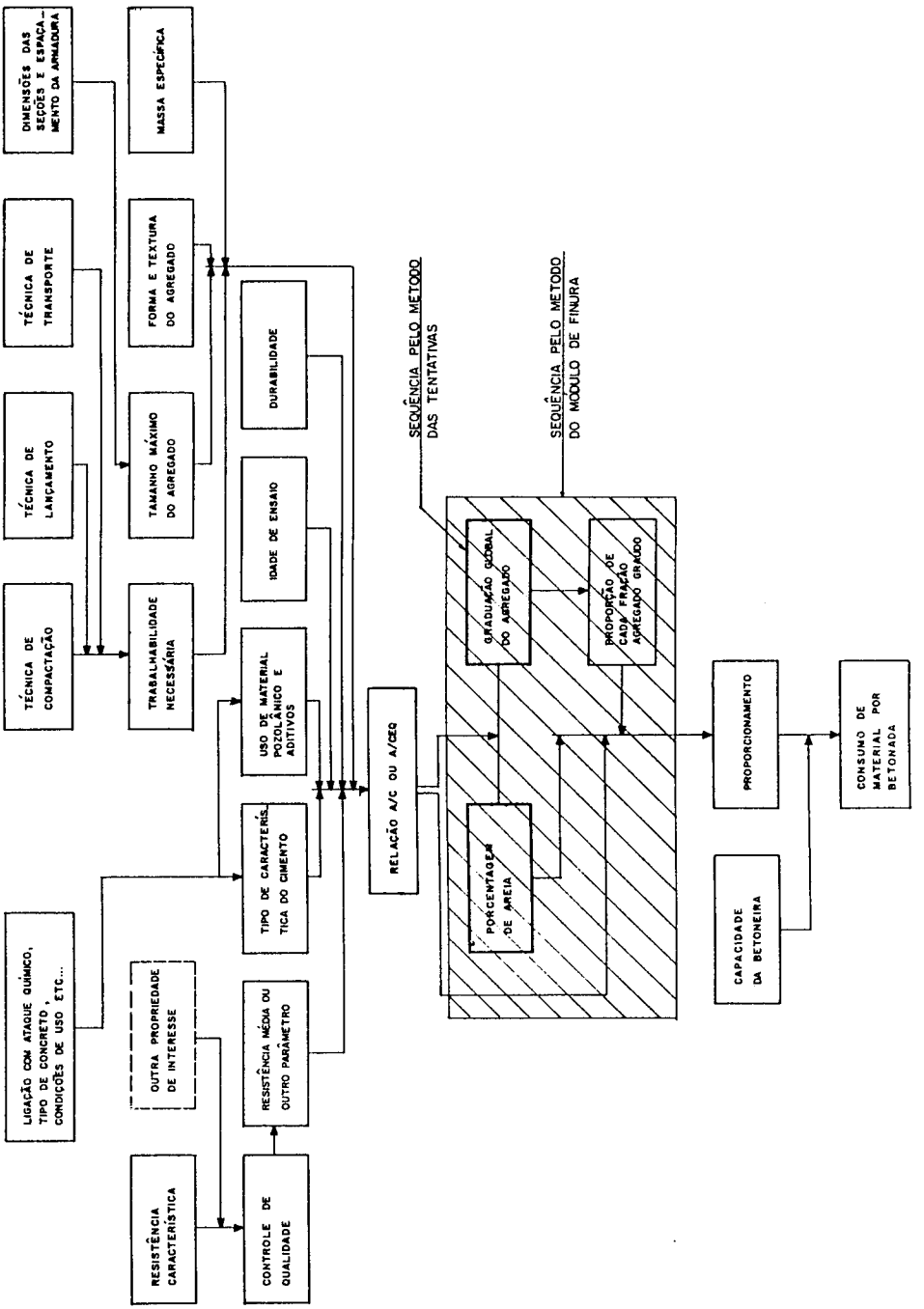


Figura 4.1 — Fatores básicos para dosagem

ESTRUTURA	FATOR ÁGUA / CIMENTO (MASSA)			
	CLIMA SEVERO		CLIMA BRANDO	
	SEÇÕES DELGADAS	SEÇÕES MASSIVAS	SEÇÕES DELGADAS	SEÇÕES MASSIVAS
LINHAS HIDRÁULICAS, ONDE É POSSÍVEL UMA SATURAÇÃO INTERMITENTE INCLUINDO PARAMENTOS DE MONTANTE E JUSANTE DE BARRAGENS, EM PARAMENTOS DE ESCOAMENTO E SUPERFÍCIES EXPOSTAS, CANAIS.	0,50	0,55	0,55	0,60
INTERIOR DE BARRAGENS, CANAIS, PARAMENTO NÃO HIDRÁULICO E INTERIOR DE OUTRAS ESTRUTURAS DE GRAVIDADE, ONDE PODE-SE USAR DUAS CLASSES DE CONCRETO.	—	0,80	—	0,80
ESTRUTURAS COMUNS, EXPOSTAS.				
ESTRUTURAS COMPLETAMENTE SUBMERSAS.	0,60	0,65	0,60	0,65
CONCRETO LANÇADO SOB ÁGUA.	—	0,50	—	0,50
LAJES DE PAVIMENTOS - ESTRUTURAL FUNDAÇÃO	0,50 0,60	— —	0,55 0,60	— —
EXPOSIÇÃO A ÁGUA ALTAMENTE SULFATADA OU OUTROS LÍQUIDOS CORROSIVOS OU SAIS.	0,45	0,45	0,45	0,45
CONCRETO SUBMETIDO A ESCOAMENTO SOB ALTA VELOCIDADE.	0,45	0,45	0,45	0,45

- PARA CONCRETOS LANÇADOS OU EXPOSTOS A ÁGUAS DE MAR O FATOR A/C DEVE SER REDUZIDO DE 0,05 EM RELAÇÃO AOS SUPRA CITADOS.
- QUANDO SE USAR MATERIAL POZOLANICO, A RELAÇÃO A/C DEVE SER TRANSFORMADA EM A/CEQ.
- OS VALORES DE A/C OU A/CEQ PODEM SER ALTERADOS COM BASE EM ESTUDOS DE LABORATÓRIOS OU OUTRAS COMPROVAÇÕES.

Figura 4.2 — Valores orientativos da relação a/c

A/C ou A/Ceq	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES A IDADE DE 28 DIAS (MPa) CILINDROS Ø 15 x 30 cm															
	AGREGADO NATURAL Ø MAX (mm)								AGREGADO BRITADO Ø MAX (mm)							
	19		38		76		152		19		38		76		152	
0,40	37	33	36	32	33	30	32	30	40	36	39	35	36	31	35	31
0,50	31	28	30	27	27	24	26	23	37	33	33	30	28	25	27	24
0,60	24	22	23	22	22	20	21	20	26	23	25	22	24	22	23	21
0,70	18	16	17	15	16	14	15	13	20	18	19	17	18	16	17	15
0,80	12	10	12	10	11	9	10	8	14	12	14	12	13	11	12	10

OBS. Resistência a compressão aproximada para concretos com ar incorporado (de 4% a 6% na fração _ peneirada) com abatimento ao redor de 50mm e temperatura de 22°C.

Figura 4.3 — Valores aproximados e orientativos da resistência à compressão

TIPO DE CONSTRUÇÃO	FAIXA DE ABATIMENTO (mm)
FUNDAÇÕES ARMADAS, PAREDES E PISOS	50 A 120
FUNDAÇÕES MACIÇAS E SUBESTRUTURAS DE MUROS	30 A 100
LAJES, VIGAS E MUROS, PILARES DE PRÉDIOS	50 A 150
PAVIMENTOS	50 A 80
MASSA	INFERIOR A 60

Figura 4.4 — Abatimentos recomendados para alguns tipos de estruturas

A escolha conveniente do Ø máx do agregado vai determinar certa economicidade do concreto, pois quanto maior o tamanho máximo de uma composição de agregados bem graduados, menor é o índice de vazios.

Há muitas razões para se especificar limites granulométricos e o tamanho máximo do agregado.

A granulometria e o Ø máx do agregado têm certa influência no proporcionamento dos concretos bem como nos teores de água e de cimento e na trabalhabilidade, economia, porosidade, retração e durabilidade do concreto. Variações nas graduações podem afetar seriamente a uniformidade do concreto.

O tamanho máximo do agregado que pode ser usado, geralmente depende das dimensões e formas das peças de concreto e da quantidade e distribuição da armadura e embutidos. De maneira geral o tamanho máximo do agregado deve obedecer às seguintes condições:

$$\varnothing \text{ máx} \leqslant \frac{1}{5} \text{ L (um quinto da menor dimensão da peça)}$$

$$\varnothing \text{ máx} \leqslant \frac{3}{4} \text{ A (três quartos do menor espaçamento entre barras da armadura)}$$

$$\varnothing \text{ máx} \leqslant \frac{1}{3} \text{ E (um terço da espessura das lajes)}$$

Esses requisitos podem sofrer variações devido à experiência do técnico e com a trabalhabilidade do concreto.

4.2.2.4 Consumo de água (teor de água)

O proporcionamento econômico das misturas de concreto implica em uma minimização do consumo de água (que indiretamente significa a minimização do consumo de aglomerante).

A quantidade de água para atender determinada trabalhabilidade (com uma dada quantidade de argamassa) depende principalmente da finura do aglomerante, forma, textura, granulometria e tamanho máximo dos agregados e ainda, os aditivos eventualmente em uso e as temperaturas ambientes e do concreto.

A figura 4.5 (4.15) ilustra o consumo de água para vários tamanhos máximos.

Na figura 4.6 (4.14 e 4.15) podem ser observados valores de teores de água para agregados britados, ou naturais bem graduados, dentro de especificações usuais, para vários tamanhos máximos de agregados, para diversos teores de incorporação de ar e vários graus de trabalhabilidade.

4.2.2.5 Teor de agregado miúdo e teor de argamassa

Uma outra determinação de grande importância na sequência de definição de parâmetros orientativos para o proporcionamento é o teor de areia e o volume de argamassa da mistura, que devem, sempre que possível, ser mantidos nos níveis mínimos indispensáveis, com uma margem de segurança, cuja amplitude é função da uniformidade da graduação dos agregados [illegible] fases de produção e beneficiamento.

As figuras 4.7 e 4.8 apresentam alguns valores orientativos dos teores de agregado miúdo e da argamassa.

As porcentagens de areia citadas na figura 4.7 já estão acrescidas de 1% a 2% em relação à porcentag[illegible] item 4.2.2.16) de modo a poder cobrir possíveis e permissíveis variações gr[illegible]as dos agregados.

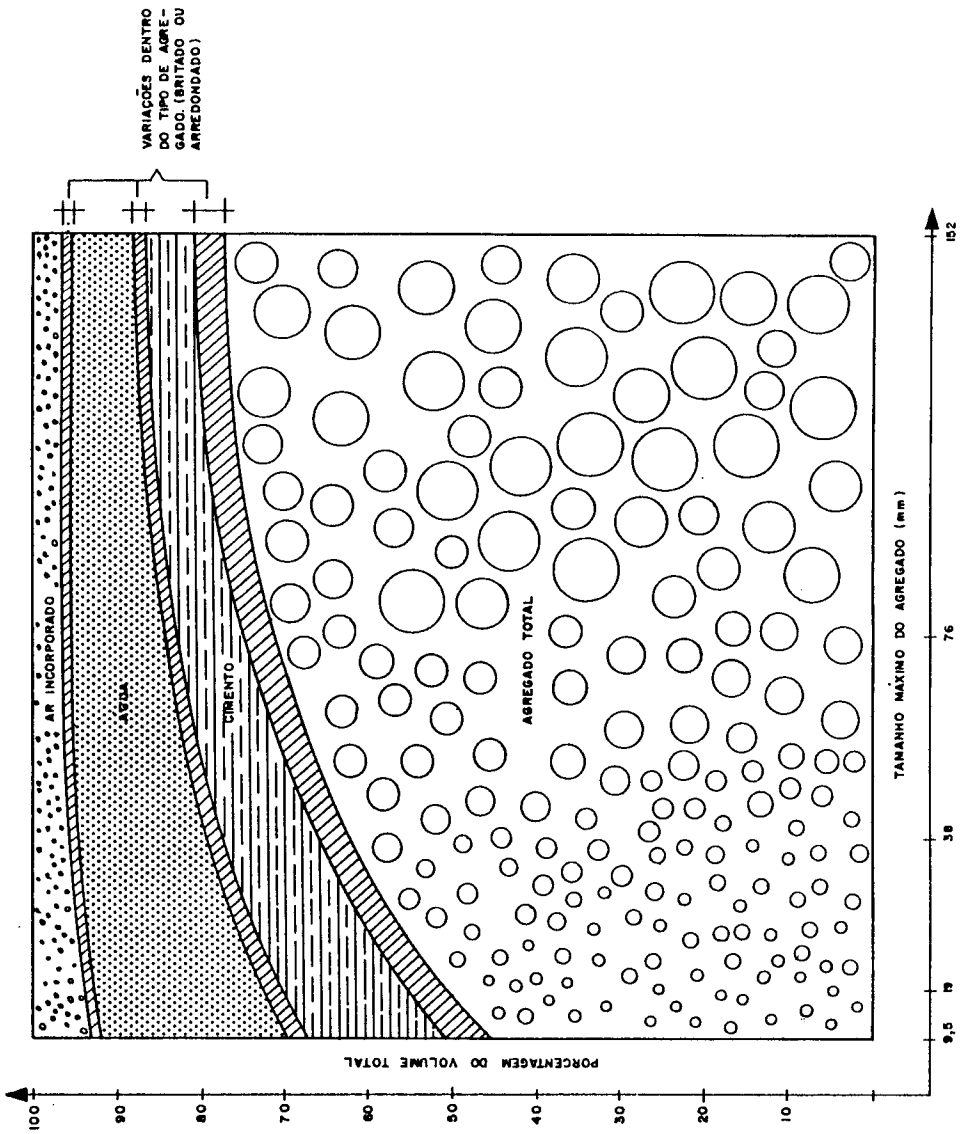


Figura 4.5 — Ilustração da variação dos teores de materiais em relação ao tamanho máximo do agregado (Exemplo para trabalhabilidade = 5 a 6 cm)

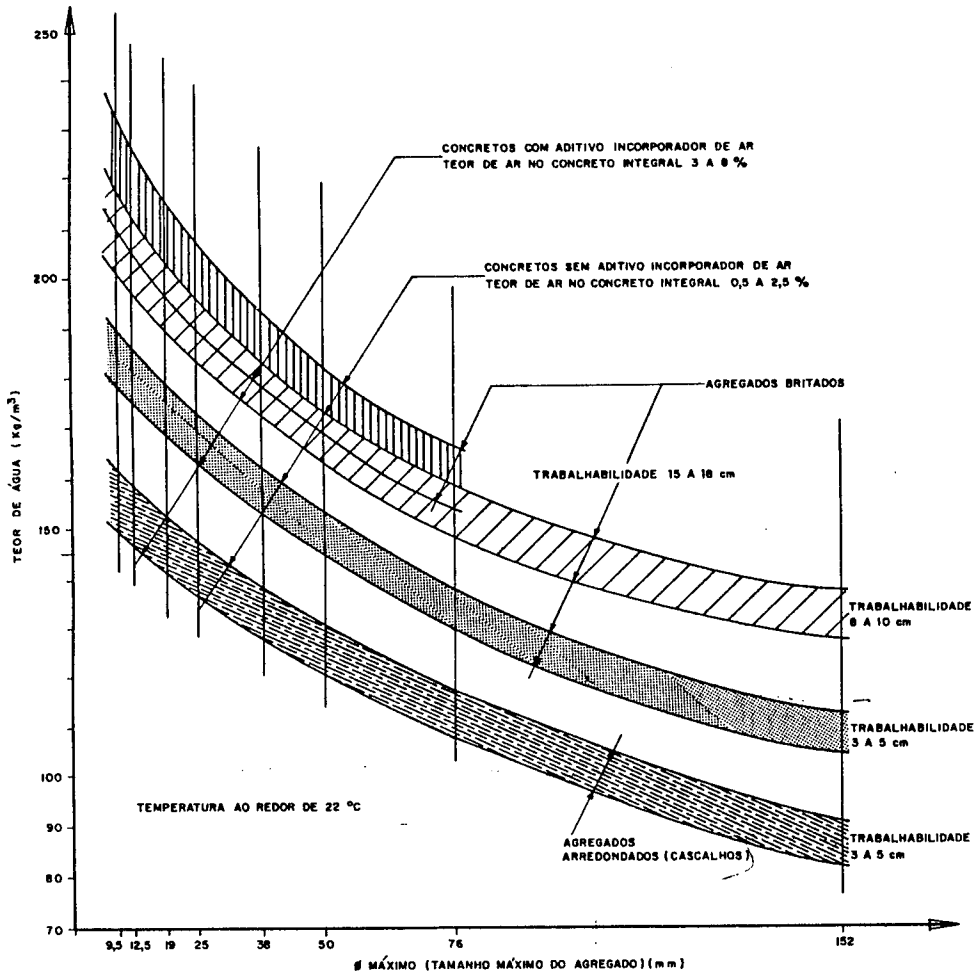


Figura 4 6 — Valores aproximados dos teores de água para vários tamanhos e tipos de agregados, teores de ar e trabalhabilidade

TEOR DE AGREGADO MIÚDO NO CONCRETO EM % DO VOLUME ABSOLUTO DE AGREGADO TOTAL													
Ø MÁX. (mm)	TIPO DO GRAUDO	MÓDULO DE FINURA E TIPO DE AREIA											
		2,00		2,20		2,40		2,60		2,80		3,00	
		N	B	N	B	N	B	N	B	N	B	N	B
152	BRITADO	18	20	19	21	20	22	21	23	22	24	23	25
	NATURAL	16	18	17	19	18	20	19	21	20	22	21	23
76	BRITADO	23	24	24	26	25	27	26	28	27	29	28	30
	NATURAL	21	23	22	24	23	25	24	26	25	27	26	28
38	BRITADO	28	30	29	31	31	33	33	35	35	37	37	39
	NATURAL	25	28	27	29	29	31	31	33	33	35	35	37
19	BRITADO	33	35	35	37	37	39	39	41	41	43	43	45
	NATURAL	31	33	33	35	35	37	37	39	39	41	41	43
OBS = N = NATURAL B = BRITADO													

Figura 4.7 — Teores aproximados de agregado miúdo

TEOR DE ARGAMASSA NO CONCRETO % EM RELAÇÃO AO VOLUME ABSOLUTO – TOTAL		
Ø MAX. (mm)	TIPO DE AGREGADO	% DE ARGAMASSA EM VOLUME ABSOLUTO
19	BRITADO	53 – 57
	NATURAL	51 – 55
38	BRITADO	46 – 50
	NATURAL	44 – 48
76	BRITADO	37 – 41
	NATURAL	34 – 38
152	BRITADO	31 – 35
	NATURAL	28 – 32

Figura 4.8 — Teores de argamassa no concreto

4.2.2.6. Combinação dos agregados graúdos

Os agregados graúdos, a partir de faixas granulométricas usualmente especificadas, devem ser combinados de maneira que uma quantidade mínima de argamassa forneça a trabalhabilidade desejada, e de modo uniforme. Isto significa que a combinação dos agregados deve ser aquela que apresente a menor porcentagem de vazios, ou seja, a de maior massa específica aparente da combinação de agregados.

Um critério muito aceito para a combinação entre os agregados é o preconizado pelo U. S. Army — Corps of Engineers (4.16). Baseia-se nos estudos experimentais de Talbot e Richart (4.8), posteriormente modificados por Bolomey (4.17), sendo que a menor porcentagem de vazios pode ser obtida através da expressão (VI-I).

$$p = \frac{(d)^x - (0{,}1875)^x}{(D_{max})^x - (0{,}1875)^x} \times 100\ \% \qquad \text{(IV-I) (em polegadas)}$$

$$p = \frac{(d)^x - (4{,}8)^x}{(D_{max})^x - (4{,}8)^x} \times 100\% \text{ onde} \qquad \text{(IV-II) (em milímetros)}$$

p = porcentagem acumulada que passa na malha de abertura "d";

d = abertura da malha da peneira;

D_{max} = tamanho máximo nominal;

x = expoente

Como comentado anteriormente, embora as granulometrias de vários tipos de agregados possam ser iguais, a área específica, devido à forma das partículas, pode ser distinta. Agregados provenientes de britagem podem ter uma área superficial quase que o dobro da área superficial dos seixos rolados; consequentemente, a massa específica máxima da mistura desses materiais requer combinações diferentes.

Com base em estudos complementares o Corps of Engineers (4.18) (4.19) recomenda que para agregados naturais arredondados seja adotado x = 0,5 (expoente = 0,5) e para materiais britados x = 0,8. Quando se usa uma combinação dos dois tipos de materiais, sugere-se interpolar o valor do expoente.

As curvas da figura 4.10 foram obtidas através dos valores da tabela da figura 4.9.

Admitindo que os agregados graúdos se enquadrem dentro das faixas granulométricas usualmente especificadas (Corps of Engineers e/ou ASTM), sugere-se os valores da figura 4.11 para a composição da combinação do agregado graúdo.

4.2.2.7 Informações adicionais

Para a dosagem podem ser usadas outras informações complementares, tais como:

— Cada 10 mm de aumento ou redução da trabalhabilidade (abatimento) corresponde, aproximadamente, a 1% de aumento ou redução do teor de água;

ABERTURA (mm)	MATERIAL NATURAL (X = 0,5) - % PASSANDO - D MÁX.										
	6"	5"	4"	3"	2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"
152	100										
127	89,4	100									
100	77,7	86,9	100								
76	64,4	72,0	82,9	100							
64	56,9	63,7	73,3	88,4	100						
50	48,7	54,4	62,6	75,5	85,5	100					
38	39,3	43,9	50,5	60,9	69,0	80,7	100				
25	28,1	31,4	36,2	43,6	49,4	57,8	71,6	100			
19	21,5	24,0	27,6	33,3	37,7	44,1	54,7	76,4	100		
12,5	13,6	15,2	17,5	21,1	23,9	27,9	34,6	48,3	63,3	100	
9,5	8,9	9,9	11,4	13,8	15,6	18,3	22,6	31,6	41,4	65,4	100
	MATERIAL ARTIFICIAL (X = 0,8) - % PASSANDO - D MAX.										
152	100										
127	85,5	100									
100	70,5	82,4	100								
76	54,6	63,8	77,5	100							
64	46,3	54,1	65,7	84,8	100						
50	37,6	44,0	53,4	69,0	81,3	100					
38	28,5	33,4	40,6	52,2	61,6	75,8	100				
25	18,8	22,0	26,7	34,4	40,6	49,9	65,8	100			
19	13,5	15,8	19,2	24,8	29,3	36,0	47,5	72,1	100		
12,5	7,9	9,3	11,3	14,6	17,2	21,1	27,9	42,3	58,7	100	
9,5	4,9	5,8	7,0	9,1	10,7	13,1	17,3	26,3	36,5	62,2	100

Figura 4.9 — Valores para a composição do agregado graúdo

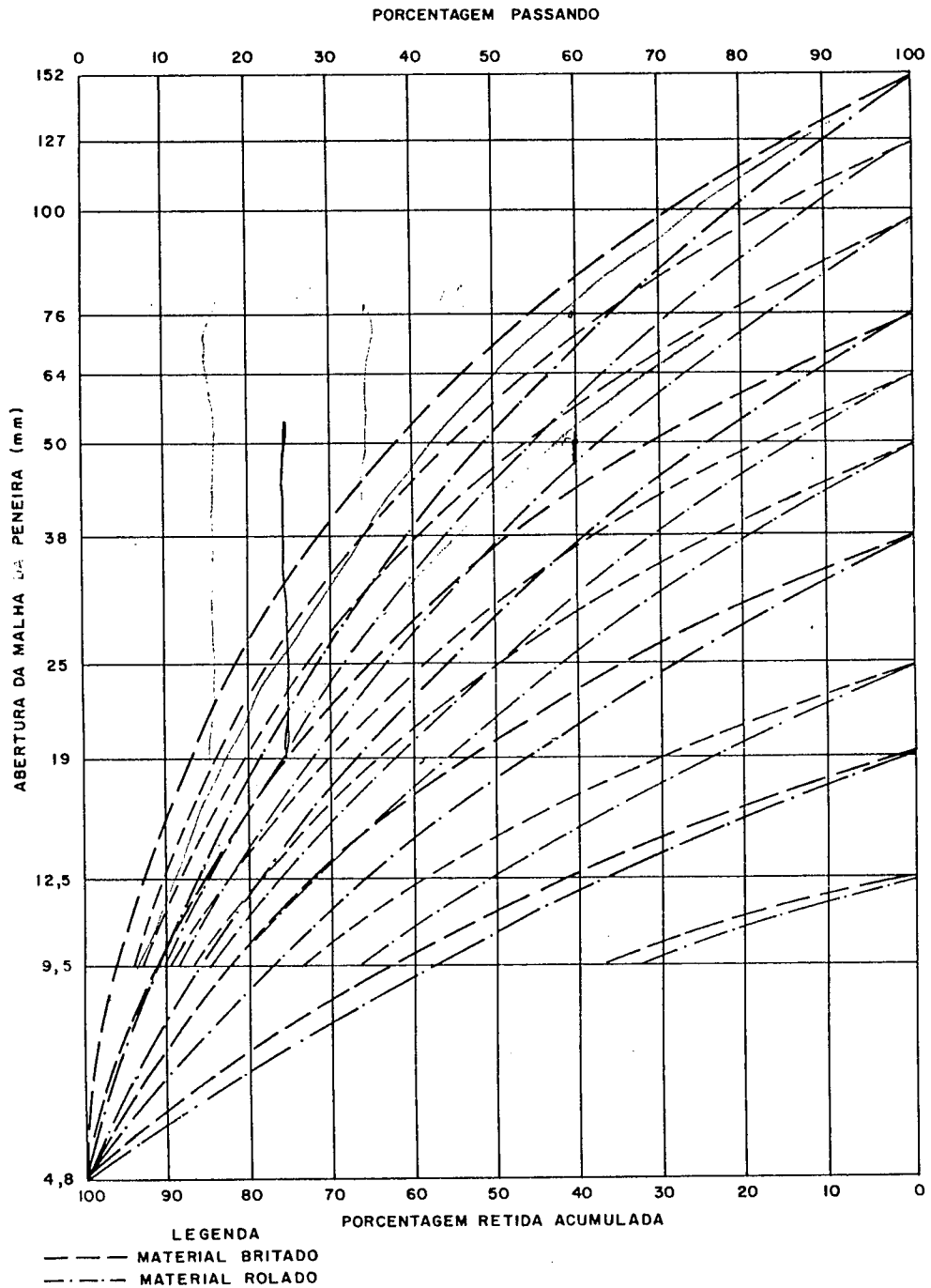


Figura 4.10 — Curvas para a composição de agregado graúdo

Ø MAX. (mm)	% VOLUME ABSOLUTO DAS FRAÇÕES DE AGREGADO GRAÚDO			
	19	38	76	152
152	15-25	15-25	25-35	25-40
76	30-35	25-35	35-45	–
38	45-50	50-55	–	–
19	100	–	–	–

Figura 4.11 — Valores para a combinação do volume absoluto dos agregados graúdos

— Cada 1°C de aumento ou diminuição na temperatura do concreto corresponde, aproximadamente, a 0,3% de aumento ou redução no teor de água;

— Cada 1% de aumento ou redução no teor de ar incorporado corresponde a uma redução ou aumento de 3% no consumo de água e de 0,5% a 1% no teor de areia.

4.2.2.8 Procedimento para o cálculo da dosagem pelo método do volume absoluto

Como citado anteriormente, o procedimento adotado parte do princípio de que o volume do concreto adensado é igual à soma dos volumes absolutos de todos os ingredientes. As quantidades dos ingredientes são calculadas para perfazer 1 (um) m³ de concreto, tendo-se:

$$\frac{M_{AGU\,(Água)}}{\gamma_{AGU\,(Água)}} + \frac{M_{AGL\,(Aglomerante)}}{\gamma_{AGL\,(Aglomerante)}} + \frac{M_{AGm\,(Agregado\ miúdo)}}{\gamma_{AGm\,(Agregado\ miúdo)}} + \frac{M_{AGG\,(Agregado\ graúdo)}}{\gamma_{AGG\,(Agregado\ graúdo)}} = 1000\ l$$

sendo:

M = Massa (kg) e γ = massa específica absoluta (kg/m³)

Ao se usar ar incorporado deve ser descontado o volume de ar = $\left(1 - \frac{\%\ AR}{100}\right)$ 1000 (l).

Ao se usar material pozolânico o volume de aglomerante:

$$Vagl = \frac{M\ AGL}{\gamma\ AGL}, \text{ passa a ser } Vagl = \frac{Mc\ (cimento)}{\gamma c\ (cimento)} + \frac{Mp\ (pozolana)}{\gamma p\ (pozolana)}$$

Dessa maneira, as quantidades dos materiais podem ser agrupadas de forma mais ampla como se segue:

$$\frac{M\ agu}{\gamma\ agu} + \frac{Mc}{\gamma\ c} + \frac{Mp}{\gamma\ c} + \frac{M\ agm}{\gamma\ agm} + \frac{M\ agg}{\gamma\ agg} = 1000\left(1 - \frac{\%\ AR}{100}\right)$$

4.2.2.9 Estabelecimento das condições

Com os dados disponíveis têm-se condições de iniciar o estudo de uma dosagem qualquer. Para o adequado proporcionamento é conveniente que se estabeleça:

— consistência adequada;
— tamanho máximo (Ø máx) permitido;
— durabilidade exigida;
— propriedades mecânicas (resistências, capacidade de alongamento etc.) exigidas;
— conhecimento sobre os materiais disponíveis.

4.2.2.10 Conhecimento dos materiais

Os materiais disponíveis devem ser conhecidos, isto é, caracterizados.

— Aglomerantes

Os cimentos destinados à utilização na obra devem ser amostrados para ensaios de caracterização físico-química completa. Neste passo entende-se que já se tenha atendido previamente à especificação adotada. Na necessidade da substituição de parte do cimento por material pozolânico, esse porcentual já deve ter sido definido em estudos especiais, bem como as características do material pozolânico.

Não se considerando, inicialmente, as demais imposições de especificação, a única característica realmente indispensável para começar a dosagem é a massa específica.

— Agregados

Deverão ser conhecidas as seguintes características:

Granulometria, massa específica na condição saturada superfície seca, absorção e umidade.

— Aditivos

Os aditivos, quando usados, devem ter comportamento conhecido.

4.2.2.11 Combinação do agregado graúdo

Com base no tamanho máximo permitido e das graduações disponíveis, passa-se a determinar a combinação mais favorável, que pode estar compreendida nas faixas sugeridas no item 4.2.2.6

Recomenda-se compor as curvas granulométricas de várias combinações e compará-las com a curva de compacidade máxima das figuras 4.9 e 4.10.

Em paralelo, uma série de moldagens de corpos de prova com concretos de mesma consistência, consumo de aglomerantes e com as combinações em estudo, pode ser útil aliando a uma combinação granulométrica satisfatória, uma resistência mecânica correspondente.

4.2.2.12 Adoção da quantidade de água

Baseado no estabelecido no item 4.2.2.4 e nas características gerais do concreto, adota-se uma quantidade de água para início das tentativas de acerto do "Traço-Base".

4.2.2.13 Adoção do teor de agregado miúdo e volume de argamassa

Com os dados orientativos do item 4.2.2.5, pode ser adotada uma certa porcentagem de agregado miúdo adequada às condições dos materiais disponíveis, observando-se teores de argamassa e areia sugeridos.

4.2.2.14 Determinação da mistura inicial e do Traço-Base

Com os dados já em mãos passa-se à determinação do "Traço-Base", assim denominado pois a partir desse traço, devidamente ajustado tanto para as condições nominais quanto para adequação da quantidade de areia, é que se poderá passar a moldagens com a finalidade da elaboração da curva Água/Cimento x propriedade.

— Adotar a quantidade da água — M (água) = kg/m³

Para determinação do Traço-Base, adotar a relação A/Ceq ou A/C próxima a 0,50. A partir do Traço-Base podem ser estudadas outras (traços) relações A/C ou A/Ceq. Quando a dosagem é para obtenção de valores imediatos é aconselhável usar a A/C ou A/Ceq recomendada pelas figuras 4.2 e 4.3.

— Determinar o teor de aglomerante = M aglom = $\dfrac{\text{M (água)}}{0{,}50}$ (kg/m³).

— Determinar o volume absoluto de aglomerantes:

V aglom = $\dfrac{\text{M aglom}}{\gamma \text{ aglom}}$, sendo γ aglom a massa específica do aglomerante.

— Quantidade de ar estimado para o concreto integral — ar%.

Para se saber o valor da quantidade de ar na fração peneirada (passante pela malha de 38 mm) deve ser efetuado o cálculo porcentual excluindo a fração superior à malha de 38 mm.

— Determinar o volume absoluto do agregado total.

V agreg-total = 1000 (l) — (V ar) — (V aglom) — (V água)

— Determinar os volumes absolutos, parciais, dos agregados graúdos e miúdos.

Através dos valores adotados a partir da figura 4.7 e do item 4.2.2.6, calculam-se os volumes absolutos dos vários agregados graúdos e do agregado miúdo.

— Calcular os volumes absolutos de cimento e material pozolânico (quando se optar pela utilização deste).

Esses valores são obtidos pela quantidade de material pozolânico que se deseja que substitua em parte o cimento.

— Calcular as massas dos materiais através das massas específicas (na condição de saturada superfície seca).

— Determinar a água livre através dos valores de umidade e absorção dos materiais. Determina-se a quantidade de água livre a ser somada (quando a somatória das absorções for maior que as das umidades) ou subtraída (quando a soma das umidades for maior que a das absorções) à quantidade de água.

Para esse cálculo é necessário conhecer o conceito da água livre e absorção dos agregados, facilmente compreendido através do esquema da figura 4.12.

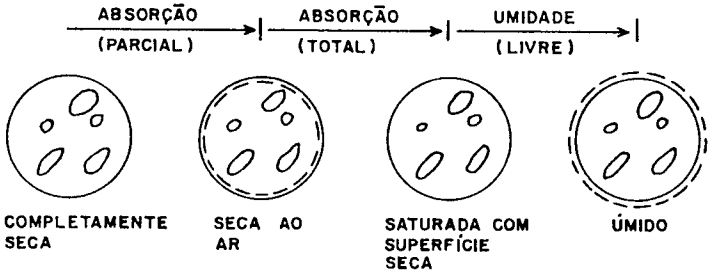


Figura 4.12 — Representação esquemática da condição seca-saturada-úmida

Tendo em vista as condições de absorção serem influenciadas pelas áreas específicas dos agregados, normalmente se adotam fatores práticos para a correção da água livre a ser somada ou subtraída, ou seja, se a quantidade de água livre a ser subtraída (quando umidade for maior que a absorção) for Δ água adota-se:

— água a ser subtraída da água estimada = (0,75).(Δ água) para D máx = 19 mm;

— água a ser subtraída da água estimada = (0,70).(Δ água) para D máx = 38 mm;

— água a ser subtraída da água estimada = (0,65).(Δ água) para D máx = 76 mm;

— água a ser subtraída da água estimada = (0,60).(Δ água) para D máx = 152 mm.

Os coeficientes 0,75 a 0,60 referem-se às condições estimadas a partir da indicação da referência (4.14).

— Determinar as quantidades dos materiais na condição de trabalho. Através do desconto ou acréscimo da água livre (dos materiais) obtêm-se as massas dos materiais nas condições de trabalho.

— Determinar as quantidades dos aditivos, quando utilizados, através dos percentuais adotados, em relação à massa de aglomerante.

4.2.2.15 Sequência de operações

Após o cálculo inicial dos vários componentes há necessidade de se efetuar a verificação do proporcionamento através de ensaio sobre a mistura. Pode ser adotada a seguinte sequência:

— Pesar os agregados com a maior precisão possível.

— Pesar o cimento (e o material pozolânico) separadamente.

— Pesar uma quantidade de água (e gelo quando usado) menor do que a estimada. Manter o complemento da quantidade de água estimada em provetas graduadas.

— Pesar a(s) quantidade(s) de aditivo(s) e adicioná-lo(s) à água. Quando a quantidade de aditivos utilizados for tal que supere 1% da quantidade de água é aconselhável que o teor de água seja diminuído a fim de manter a mesma quantidade de líquido.

— Proceder à mistura como se segue:

  — untar o interior da betoneira com argamassa semelhante à do "traço" em estudo;

  — colocar os agregados graúdos e miúdos e parte da água com os aditivos. Adicionar o aglomerante. Essa operação deverá ser efetuada com a betoneira em movimento e não deverá durar mais do que 1/2 (meio) minuto;

  — adicionar o restante da água com aditivo;

  — betonar a mistura durante 2 minutos, descansar 3 minutos e remisturar por mais 2 minutos. Durante o repouso deverá ser feita a observação visual, pelo operador, quanto ao aspecto de trabalhabilidade e consistência da mistura, e sua possível correção (com o lançamento de parte ou totalidade de água deixada nas provetas). Essa etapa é bastante importante e requer larga experiência e bom senso do operador;

  — lançar o concreto em carrinho, estanque e não absorvente, e suficientemente amplo a fim de permitir uma homogeneização manual, que reduzirá eventuais segregações do descarregamento;

  — separar o concreto, se contiver agregado com Ø máx superior a 38 mm por peneiramento e homogeneizar novamente a fração para a determinação de: trabalhabilidade; ar incorporado; massa específica; temperatura; consistência "Vebe" (para concretos de abatimento baixo); quantidade real de água usada para a obtenção do concreto estudado; porcentagem real de aditivos; fator de correção "f" (se houver corte — redução — da água $f > 1$; se houver acréscimo de água $f < 1$).

— Usando-se o fator de correção "f" recalcular as quantidades dos componentes.

— Adotar outro valor para a porcentagem de agregado miúdo e reiniciar as operações de acordo com o descrito em 4.2.2.14 e 4.2.2.15.

— Adotar, no mínimo, três ou quatro valores de teor agregado miúdo.

4.2.2.16 Obtenção da mistura base (Traço-Base)

Com um mínimo de três ou quatro porcentagens de areia, isto é, quatro traços com diferentes teores de areia e as respectivas quantidades necessárias de água e A/C (corrigidos, quando assim se obrigar) traçar um gráfico semelhante ao indicado na figura 4.13.

Opcionalmente pode-se inserir também os valores de resistência à compressão para cada teor de areia, que pode auxiliar na definição do traço-base. Através do procedimento assim descrito obtém-se um teor ideal de areia que corresponde a um mínimo consumo de água e, consequentemente, a uma melhor resistência. Entretanto com o objetivo de suprimir possíveis variações granulométricas dos agregados, normalmente se adota para o "teor adotado" o ideal (ótimo) acrescido de 1 a 2%. Desta forma o traço assim obtido é denominado de "Traço-Base da Dosagem".

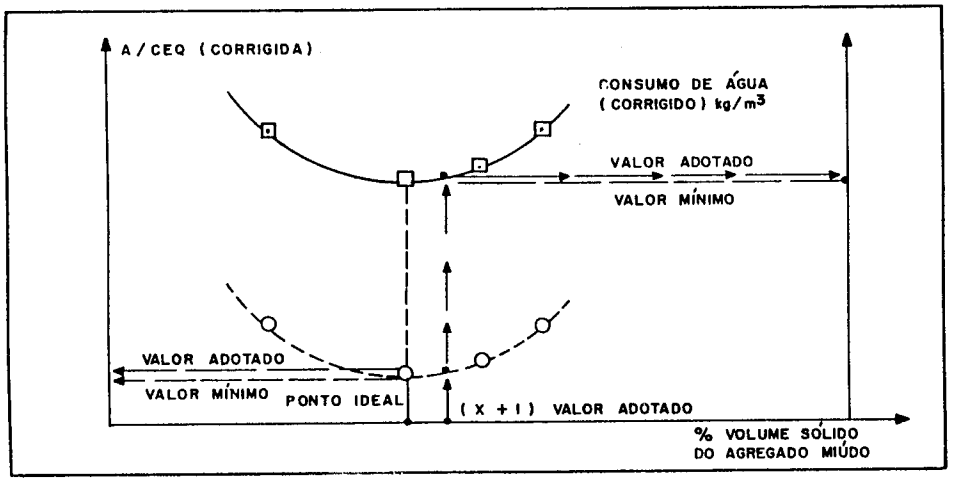


Figura 4.13 — Obtenção do "Traço-Base"

4.2.2.17 Misturas refrigeradas

Quando as misturas em proporcionamento tiverem a necessidade de ser estudadas dentro de uma faixa de temperatura, pode ser adotado um critério de cálculo para determinação da quantidade de gelo a substituir a água, a fim de atender à temperatura desejada. Essa correção de temperatura compensa as trocas de calor, causadas pela betonagem, transporte, manuseio, lançamento e hidratação inicial. Esse valor deve ser determinado experimentalmente.

A equação para o cálculo do equilíbrio térmico é a seguinte (IV-III):

$$Pc.Cc\ [tc\text{-}to] + Pam.Cam.[tam\text{-}to] + Pag.Cag.[tag\text{-}to] + pam.CA\ [tam\text{-}to] + pag.CA\ [tag\text{-}to] + [PA\text{-}Pg].CA.[ta\text{-}to] + PG.[tg \times CG - toCa] - PG.F = 0 \quad \text{— IV-III}$$

sendo:

P = peso de cada ingrediente (kg/m³);
C = calor específico de cada ingrediente (cal/g°C);
t = temperatura inicial de cada ingrediente (°C);
to = temperatura usada no cálculo to = t − Δt (°C);

T = temperatura especificada;
Δt = correção de temperatura devido aos ganhos térmicos;
F = calor de fusão do gelo = 334 J/g (ou 80 cal/g);
c = cimento;
am = agregado miúdo;
ag = agregado graúdo;
pam = água devida à umidade no agregado miúdo;
pag = água devida à umidade no agregado graúdo;
A = água;
G = gelo.

4.2.2.18 Moldagens e escolha das misturas para aplicação

Após a obtenção do traço-base faz-se a moldagem dos corpos de prova (para estudo das propriedades de interesse) em várias relações de A/C (ou A/Ceq). Desta maneira pode-se obter uma curva de variação das diversas propriedades em estudo, para com os vários fatores de A/C (ou A/Ceq.).

Normalmente adotam-se os valores "redondos" de 0,35; 0,40; 0,50; 0,60; 0,70 e 0,80.

Para esses cálculos (vários A/C) fixa-se o volume absoluto do agregado graúdo, da água e do ar incorporado apresentado pelo traço-base. Faz-se então uma permuta de aglomerante com areia (em volume absoluto) para se obter os vários A/C estipulados. Para A/C próximos (± 0,10) ao traço-base, as alterações do consumo de água para atender a trabalhabilidade desejada (nominal) podem ser desprezadas. Entretanto para A/C fora desta faixa recomenda-se fazer nova determinação do traço-base, adotando um fator A/C próximo ao desejado.

Recomenda-se no mínimo três pontos para se obter uma curva das diversas propriedades em estudo com os vários fatores A/C.

De posse desses ábacos passa-se a escolher a mistura que melhor atende às características desejadas.

4.2.3 Método do "Módulo de Finura"

4.2.3.1 Introdução

Esse método proporciona elementos para uma determinação criteriosa do traço-base ideal. Devido ao tempo necessário para se fazer a dosagem completa e o número de batidas experimentais, recomenda-se que seja usado principalmente quando a composição em estudo corresponda a um volume significativo de concreto a ser aplicado.

A dosagem consiste em se estabelecer uma mistura entre os agregados graúdos e miúdos, de tal forma que esta proporcione uma curva granulométrica próxima a uma outra com as porcentagens dos materiais geometricamente distribuídos nas peneiras.

Observa-se que esta mistura deve ser tal que proporcione um envolvimento satisfatório dos graúdos pela argamassa, proporcionando concretos trabalháveis e consistentes.

A essas curvas geometricamente distribuídas dá-se o nome de "graduação geométrica" ou "graduação ideal", que nada mais é que uma progressão geométrica. Através de cálculos obtém-se curvas ideais para diversos tamanhos máximos (D máx) do agregado e que permite uma comparação com as graduações dos agregados propostos para composição do concreto. Portanto, ajustando-se a graduação da mistura otimizada experimentalmente, para estar próxima da graduação geométrica de mesmo módulo de finura, esta representa a mistura de menor índice de vazios.

Pode-se utilizar o módulo de finura da combinação ótima como um dado de controle da composição dos agregados, pois quaisquer dos agregados de mesmo tipo (artificiais-britados ou naturais) que possuam o mesmo módulo de finura, não obstante podendo ter diferentes percentagens de tamanhos individuais, produzem concretos de igual consumo de água e trabalhabilidade substancialmente igual. Desta forma são feitos ajus-

tes para manter o módulo de finura, pois sabe-se que pequenas variações durante a produção de agregados normalmente ocorrem.

Uma outra característica valiosa é de se poder estender a graduação geométrica de uma combinação otimizada, para o "D máx" mais próximo, que proporcione nesse novo tamanho de agregado uma combinação também otimizada com novo módulo de finura, mas com a mesma graduação geométrica. Em resumo, a graduação geométrica é a mesma para agregados de tamanhos máximos (D máx) próximos, se o teor de cimento for ajustado para levar em conta o argamassamento devido à adição de um tamanho de agregados (4.20).

4.2.3.2 Graduação geométrica

Chama-se de graduação geométrica uma curva granulométrica contínua, em que as percentagens dos tamanhos sucessivos da série normal de peneiras mantêm uma relação geométrica entre si, por exemplo: graduação geométrica de 65% representa que o percentual de cada tamanho sucessivamente menor é de 65% do tamanho maior mais próximo.

No cálculo da percentagem de agregado retido na peneira imediatamente inferior àquela correspondente ao D máx de acordo com a definição, a graduação geométrica é uma progressão geométrica, cuja razão é a graduação, e cuja soma é igual a 100. Estabelece-se desta forma a percentagem retida na primeira peneira imediatamente inferior ao D máx da combinação e, consequentemente, as demais da série normal através da expressão:

$$\beta = \frac{100\ (1 - \alpha)}{1 - \alpha^n} \qquad \text{(IV-IV)}$$

onde:

β = percentagem retida na próxima peneira, imediatamente inferior àquela correspondente ao D máx.

α = indicador da graduação geométrica.

n = número de peneiras da série normal.

O módulo de finura tem grande importância no desempenho dos concretos e uma vez estabelecida a finura de controle "finura média", esta deve sempre ser mantida, pois desta forma não se verificarão mudanças sensíveis na água e na trabalhabilidade, não se introduzindo, então, variações nos concretos. Para o cálculo do módulo de finura, uma vez conhecida a graduação geométrica e o tamanho máximo do agregado graúdo, aplica-se a expressão a seguir:

$$MF = \frac{\beta}{1 - 2}\left[(n-1) - \alpha\frac{1 - 2^{n-1}}{1 - 2}\right] \qquad \text{(IV-V)}$$

A simbologia é idêntica à expressão (IV-V)

As curvas das graduações geométricas compreendidas entre 58% e 85% são citadas juntamente com o cálculo analítico nas figuras 4.14 a 4.17 para os tamanhos máximos 19, 38, 76 e 152 mm.

Comparações das Curvas de Graduação Geométrica com as de Talbolt — Richart.

Como se sabe (ver item 4.2.2.6) a expressão de Talbolt — Richart (IV-I) é utilizada com frequência para o cálculo das curvas mais favoráveis para os agregados combinados.

$$P = \frac{[d]^x - [0{,}1875]^x}{[D\ máx.]^x - [0{,}1875]^x} \qquad \text{(IV-I)}$$

A expressão (IV-I) passa a ter o seguinte (IV-II) aspecto quando se utiliza a abertura da malha das peneiras em "mm".

$$P = \frac{[d]^x - [4{,}8]^x}{[D\ máx.]^x - [4{,}8]^x} \qquad \text{(IV-II)}$$

Considerando o agregado miúdo juntamente com o graúdo, as expressões (IV-I) e (IV-II) se transformam nas expressões (IV-VI — abertura das malhas em polegadas) e (IV-VII) — Abertura das malhas em mm).

$$P = \frac{[d]^x - [0{,}00293]^x}{[D\ máx.]^x - [0{,}00293]^x} \text{ (IV-VI)} .$$

$$P = \frac{[d]^x - [4{,}8]^x}{[D\ máx.]^x - [4{,}8]^x} \text{ (IV-VII)} .$$

Nas figuras 4.14 a 4.17 tem-se, também, o cálculo das percentagens retidas em cada peneira para os diâmetros de 19, 38, 76 e 152 mm calculadas através da expressão (IV-VI), e comparadas graficamente com as graduações geométricaos de mesmo módulo de finura. Pela observação gráfica constata-se uma boa concordância entre as graduações de 58% (agregado britado) e 70% (agregado rolado) com as curvas de Talbolt-Richart, para todos os diâmetros, mostrando que as granulometrias dos traços devem, se possível, ser ajustadas de tal modo que sua graduação geométrica se situe, para cada caso, próxima às graduações de 70% e 58%.

Por experiências realizadas, observa-se que graduações dessa ordem (58% e 70%) apesar de estarem granulometricamente próximas às curvas de compacidade máxima de Talbolt-Richart, proporcionam concretos pouco trabalháveis. A figura 4.22 fornece parâmetros mais satisfatórios e representa misturas mais trabalháveis.

GRADUAÇÕES GEOMÉTRICAS

D. MAX = Ø máx : 19 mm

PENEIRAS EM POLEGADAS	GRADUAÇÃO 58		GRADUAÇÃO 65		GRADUAÇÃO 70	
	% RETIDA	% RET. AC.	% RETIDA	% RET. AC.	% RETIDA	% RET. AC.
3/8" - 3/4"	42,5	42,5	36,1	36,1	31,8	31,8
Nº 4 - 3/8"	24,7	67,2	23,5	59,6	22,3	54,1
Nº 8 - Nº 4	14,3	81,5	15,3	74,9	15,6	69,7
Nº 16 - Nº 8	8,3	89,5	10,0	84,9	10,9	80,6
Nº 30 - Nº 16	4,8	94,6	6,4	91,2	7,6	88,2
Nº 50 - Nº 30	2,5	97,4	4,2	95,4	5,4	93,6
Nº 100 - Nº 50	1,6	99,0	2,7	98,1	3,8	97,4
FUNDO	1,0	100,0	1,8	100,0	2,6	100,0
MÓDULO DE FINURA		5,72	—	5,40	—	5,18

PENEIRAS EM POLEGADAS	GRADUAÇÃO 75		GRADUAÇÃO 80		GRADUAÇÃO 85	
	% RETIDA	% RET. AC.	% RETIDA	% RET. AC.	% RETIDA	% RET. AC.
3/8" - 3/4"	27,8	27,8	24,0	24,0	20,8	20,8
Nº 4 - 3/8"	20,9	48,7	19,2	43,2	17,2	38,1
Nº 8 - Nº 4	15,6	64,3	15,4	58,6	14,9	53,0
Nº 16 - Nº 8	11,7	76,0	12,3	70,9	12,7	65,7
Nº 30 - Nº 16	8,8	84,8	9,8	80,8	10,8	76,5
Nº 50 - Nº 30	6,8	91,4	7,9	88,6	9,3	85,6
Nº 100 - Nº 50	4,9	96,3	6,3	94,9	7,8	93,4
FUNDO	3,7	100,0	5,1	100,0	6,6	100,0
MÓDULO DE FINURA		4,89		4,61		4,33

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA TEÓRICA

$$P = \frac{d^{\frac{1}{2}} - 0{,}00293^{\frac{1}{2}}}{D^{\frac{1}{2}}_{max} - 0{,}00293^{\frac{1}{2}}}$$

Dmáx. 19 mm

	PENEIRA	mm.	FRAÇÃO POLEG.	Dmáx. 19 mm X=0,8 P (PASS.) %	P (RETIDA) %	P (RET. AC.) %
	3/4	19	0,75	100,00	0,00	0,00
	3/8	9,5	0,375	56,93	43,07	43,07
	Nº 4	4,8	0,1875	32,19	24,74	67,81
	Nº 8	2,4	0,09375	17,07	14,22	82,03
X=0,8	Nº 16	1,2	0,046375	9,81	8,16	90,19
	Nº 30	0,6	0,023437 5	5,13	4,68	94,87
	Nº 50	0,3	0,01172	2,43	2,70	97,57
	Nº 100	0,15	0,00586	0,89	1,54	99,11
	FUNDO	0,075	0,00293		0,89	100,0
	M. F.					5,75

				Dmáx. 19 mm X=0,5		
	3/4	19	0,75	100,00	0,00	0,00
	3/8	9,5	0,375	68,76	31,24	31,24
	Nº 4	4,8	0,1875	46,67	22,09	53,33
	Nº 8	2,4	0,09375	31,05	15,62	68,95
X=0,5	Nº 16	1,2	0,046875	20,00	11,05	80,00
	Nº 30	0,6	0,023437 5	12,19	7,81	87,21
	Nº 50	0,3	0,01172	6,67	5,52	93,33
	Nº 100	0,15	0,00586	2,78	3,91	97,24
	FUNDO	0,075	0,00293	0,00	2,76	100,00
	M. F.					5,12

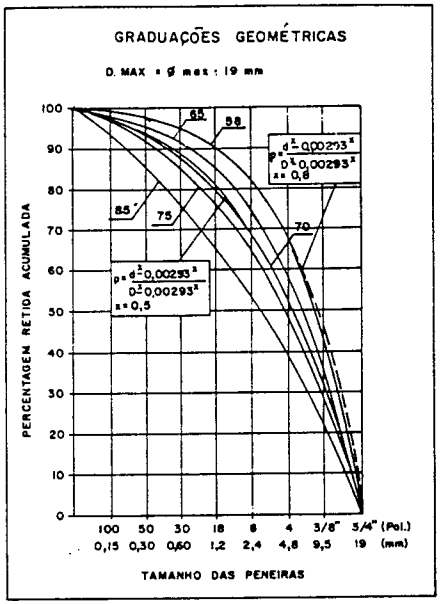


Figura 4.14 — Composições granulométricas de referência — Ø máx 19 mm

GRADUAÇÕES GEOMÉTRICAS

D. MAX = Ø máx : 38 mm

PENEIRAS EM POLEGADAS	GRADUAÇÃO 58		GRADUAÇÃO 65		GRADUAÇÃO 70	
	% RETIDA	% RET. AC.	% RETIDA	% RET. AC.	% RETIDA	% RET. AC.
3/4" - 1 1/2"	42,3	42,3	35,7	35,7	31,3	31,3
3/8" - 3/4"	24,8	66,8	23,2	55,9	21,9	53,2
Nº 4 - 3/4"	14,2	81,0	15,1	74,0	15,3	68,9
Nº 8 - Nº 4	8,3	89,3	9,8	83,8	10,7	79,2
Nº 16 - Nº 8	4,6	94,1	6,4	90,2	7,5	86,7
Nº 30 - Nº 16	2,8	96,9	4,2	94,4	5,3	92,0
Nº 50 - Nº 30	1,6	98,5	2,7	97,1	3,7	95,7
Nº 100 - Nº 50	0,9	99,4	1,8	98,9	2,6	98,3
FUNDO	0,6	100,0	1,1	100,0	1,7	100,0
MÓDULO DE FINURA		6,63	–	6,33	–	6,05

PENEIRAS EM POLEGADAS	GRADUAÇÃO 75		GRADUAÇÃO 80		GRADUAÇÃO 85	
	% RETIDA	% RET. AC.	% RETIDA	% RET. AC.	% RETIDA	% RET. AC.
3/4" - 1 1/2"	27,0	27,0	23,1	23,1	19,5	19,5
3/8" - 3/4"	20,3	47,3	18,5	41,6	16,6	36,1
Nº 4 - 3/8"	15,2	62,5	14,8	56,4	14,1	50,2
Nº 8 - Nº 4	11,4	73,9	11,8	65,2	12,0	62,2
Nº 16 - Nº 8	8,6	82,5	9,5	77,7	10,2	72,4
Nº 30 - Nº 16	6,4	88,9	7,6	85,3	8,7	81,1
Nº 50 - Nº 30	4,8	93,7	6,1	91,4	7,4	98,5
Nº 100 - Nº 50	3,6	97,3	4,8	96,2	6,2	94,7
FUNDO	2,7	100,0	3,8	100,0	5,3	100,0
MÓDULO DE FINURA		5,73	–	5,40	–	5,05

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA TEÓRICA

$$\frac{d^{\frac{1}{2}} - 0{,}00293^{\frac{1}{2}}}{D^{\frac{1}{2}}\,max - 0{,}00293^{\frac{1}{2}}}$$

Ø max. 38 mm

	PENEIRA			Dmáx. 38mm. X = 0,8		
	POLEGADA	mm.	FRAÇÃO POLEG.	P (PASS.) %	P(RETIDA) %	P(RET.AC) %
X=0,8	1 1/2	38	1,5	100,00	0,00	0,00
	3/4	19	0,75	57,14	42,86	42,86
	3/8	9,5	0,375	32,53	24,61	67,47
	Nº 4	4,8	0,1875	18,39	14,14	81,61
	Nº 8	2,4	0,09375	10,27	8,12	89,73
	Nº 16	1,2	0,046875	5,60	4,67	94,40
	Nº 30	0,6	0,0234375	2,93	2,67	97,07
	Nº 50	0,3	0,011172	1,39	1,54	98,61
	Nº 100	0,15	0,00566	0,50	0,89	99,50
	FUNDO	0,075	0,00293		0,50	100,00
	M. F.					6,71

				Dmax. 38mm X=0,5		
X=0,5	1 1/2	38	1,5	100,00	0,00	0,00
	3/4	19	0,75	69,35	30,65	30,65
	3/8	9,5	0,375	47,69	21,66	52,31
	Nº 4	4,8	0,1875	32,37	15,32	67,63
	Nº 8	2,4	0,09375	21,54	10,85	78,48
	Nº 16	1,2	0,046875	13,87	7,65	86,13
	Nº 30	0,6	0,0234375	8,46	5,41	91,54
	Nº 50	0,3	0,011172	4,63	3,83	95,37
	Nº 100	0,15	0,00566	1,91	2,72	98,09
	FUNDO	0,075	0,00293	0,00	2,01	100,00
	M.F.					6,00

GRADUAÇÕES GEOMÉTRICAS

D. MAX = Ø max : 38 mm

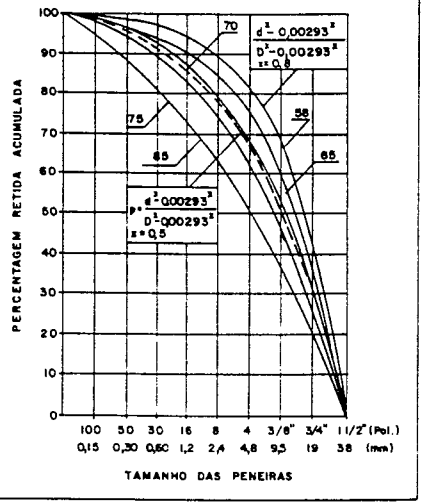


Figura 4.15 — Composições granulométricas de referência — Ø máx 38 mm

GRADUAÇÕES GEOMÉTRICAS

D. MAX = ø máx : 19 mm

PENEIRAS EM POLEGADAS	GRADUAÇÃO 58 % RETIDA	GRADUAÇÃO 58 % RET. AC.	GRADUAÇÃO 65 % RETIDA	GRADUAÇÃO 65 % RET. AC.	GRADUAÇÃO 70 % RETIDA	GRADUAÇÃO 70 % RET. AC.
3/8" - 3/4"	42,5	42,5	36,1	36,1	31,8	31,8
Nº 4 - 3/8"	24,7	67,2	23.5	59,6	22,3	54,1
Nº 8 - Nº 4	14,3	81,5	15,3	74,9	15,6	69,7
Nº 16 - Nº 8	8,3	89,5	10,0	84,9	10,9	80,6
Nº 30 - Nº 16	4,8	94,6	6,4	91,2	7,6	88,2
Nº 50 - Nº 30	2,5	97,4	4,2	95,4	5,4	93,6
Nº 100 - Nº 50	1,6	99,0	2,7	98,1	3,8	97,4
FUNDO	1,0	100,0	1,8	100,0	2,6	100,0
MÓDULO DE FINURA		5,72	—	5,40	—	5,15

PENEIRAS EM POLEGADAS	GRADUAÇÃO 75 % RETIDA	GRADUAÇÃO 75 % RET. AC.	GRADUAÇÃO 80 % RETIDA	GRADUAÇÃO 80 % RET. AC.	GRADUAÇÃO 85 % RETIDA	GRADUAÇÃO 85 % RET. AC.
3/8" - 3/4"	27,8	27,8	24,0	24,0	20,8	20,8
Nº 4 - 3/8"	20,9	48,7	19,2	43,2	17,2	38,1
Nº 8 - Nº 4	15,8	64,5	15,4	58,6	14,9	53,0
Nº 16 - Nº 8	11,7	76,0	12,3	70,9	12,7	65,7
Nº 30 - Nº 16	8,8	84,8	9,8	80,8	10,8	76,5
Nº 50 - Nº 30	6,8	91,4	7,9	88,6	9,3	85,6
Nº 100 - Nº 50	4,9	96,3	6,3	94,9	7,8	93,4
FUNDO	3,7	100,0	5,1	100,0	6,6	100,0
MÓDULO DE FINURA		4,89		4,61		4,33

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA TEÓRICA

Dmáx. 19 mm

$$P = \frac{d^{\frac{1}{2}} - 0{,}00293^{\frac{1}{2}}}{D^{\frac{1}{2}}_{max} - 0{,}00293^{\frac{1}{2}}}$$

	PENEIRA POLEG.	mm.	FRAÇÃO POLEG.	Dmáx. 19mm X=0,8 P(PASS.) %	P(RETIDA) %	P(RET. AC.) %
X=0,8	3/4	19	0,75	100,00	0,00	0,00
	3/8	9,5	0,375	56,93	43,07	43,07
	Nº 4	4,8	0,1875	32,19	24,74	67,81
	Nº 8	2,4	0,09375	17,07	14,22	82,03
	Nº 16	1,2	0,046375	9,81	8,16	90,19
	Nº 30	0,6	0,0234375	5,13	4,68	94,87
	Nº 50	0,3	0,01172	2,43	2,70	97,57
	Nº 100	0,15	0,00586	0,89	1,54	99,11
	FUNDO	0,075	0,00293		0,89	100,0
	M.F.					5,75
				Dmáx. 19mm X=0,5		
X=0,5	3/4	19	0,75	100,00	0,00	0,00
	3/8	9,5	0,375	68,76	31,24	31,24
	Nº 4	4,8	0,1875	46,67	22,09	53,33
	Nº 8	2,4	0,09375	31,05	15,62	68,95
	Nº 16	1,2	0,046875	20,00	11,05	80,00
	Nº 30	0,6	0,0234375	12,19	7,81	87,21
	Nº 50	0,3	0,01172	6,67	5,52	93,33
	Nº 100	0,15	0,00586	2,78	3,91	97,24
	FUNDO	0,075	0,00293	0,00	2,76	100,00
	M.F.					5,12

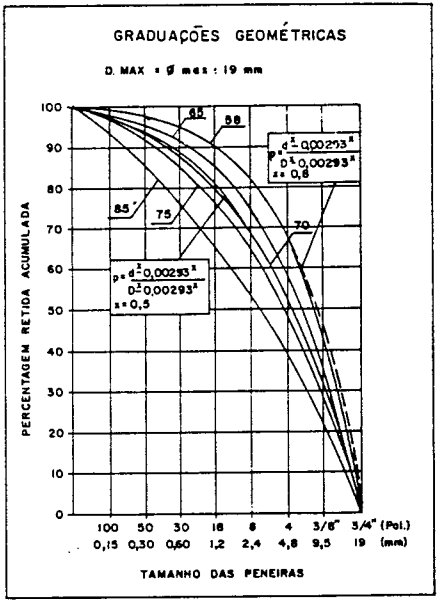


Figura 4.14 — Composições granulométricas de referência — Ø máx 19 mm

GRADUAÇÕES GEOMÉTRICAS

D MAX = ϕ max = 76 mm

PENEIRAS EM POLEGADAS		GRADUAÇÃO 55		GRADUAÇÃO 65		GRADUAÇÃO 70	
		% RETIDA	% RET AC.	% RETIDA	% RET. AC.	% RETIDA	% RET. AC.
1 1/2"	3"	42,2	42,2	35,5	35,5	31,0	31,0
3/4"	1 1/2"	24,5	66,7	23,2	58,7	21,6	52,6
3/8"	3/4"	14,2	80,9	15,0	73,7	15,1	67,7
Nº 4	3/8"	8,2	89,1	9,7	83,4	10,6	78,3
Nº 8	Nº 4	4,8	93,9	6,3	89,7	7,4	85,7
Nº 16	Nº 8	2,8	96,7	4,1	93,6	5,2	90,9
Nº 30	Nº 16	1,8	98,3	2,7	96,5	3,6	94,5
Nº 50	Nº 30	0,9	99,2	1,7	98,2	2,5	97,0
Nº 100	Nº 50	0,5	99,7	1,1	99,3	1,8	98,8
FUNDO		0,3	100,0	0,7	100,0	1,2	100,0
MÓDULO DE FINURA			7,67	—	7,29	—	6,97

PENEIRAS EM POLEGADAS		GRADUAÇÃO 75		GRADUAÇÃO 80		GRADUAÇÃO 85	
		% RETIDA	% RET. AC.	% RETIDA	% RET. AC.	% RETIDA	% RET. AC.
1 1/2"	3"	28,5	28,5	22,4	22,4	18,7	18,7
3/4"	1 1/2"	19,9	48,4	17,9	40,3	15,9	34,6
3/8"	3/4"	14,9	61,3	14,3	54,6	13,5	48,1
Nº 4	3/8"	11,2	72,5	11,5	66,1	11,5	59,6
Nº 8	Nº 4	8,4	80,9	9,2	75,3	9,8	69,4
Nº 16	Nº 8	6,3	87,2	7,3	82,6	8,2	77,6
Nº 30	Nº 16	4,7	91,9	5,9	88,5	7,0	84,6
Nº 50	Nº 30	3,8	95,4	4,7	93,2	6,0	90,6
Nº 100	Nº 50	2,6	98,0	3,8	97,0	5,1	95,7
FUNDO		2,0	100,0	3,0	100,0	4,3	100,0
MÓDULO DE FINURA			6,60	—	6,20	—	5,79

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA TEÓRICA

ϕ max : 76 mm

$$p = \frac{d^{\frac{1}{2}} - 0{,}00293^{\frac{1}{2}}}{D^{\frac{1}{2}} - 0{,}00293^{\frac{1}{2}}}$$

	PENEIRA			D max : 76 mm		X = 0,8
	POLEG.	mm	FRAÇÃO POLEG.	P(PASS.) %	P(RETIDA) %	P(RET.AC.) %
X=0,8	3"	76	3	100,0	0,0	0,0
	1 1/2"	38	1,5	57,3	42,7	42,7
	3/4"	19	0,75	32,7	24,6	67,3
	3/8"	9,5	0,375	18,6	14,1	81,4
	Nº 4	4,8	0,1875	10,5	8,1	89,5
	Nº 8	2,4	0,09375	5,9	4,6	94,1
	Nº 16	1,2	0,046875	3,2	2,7	96,8
	Nº 30	0,6	0,0234375	1,7	1,5	98,3
	Nº 50	0,3	0,01172	0,8	0,9	99,2
	Nº 100	0,15	0,00586	0,3	0,5	99,7
	FUNDO	0,075	0,00293		0,3	100,0
	M. F.					7,69
				D máx : 76 mm		X = 0,5
X=0,5	3"	76	3	100,0	0,0	0,0
	1 1/2"	38	1,5	69,8	30,2	30,2
	3/4"	19	0,75	48,4	21,4	51,6
	3/8"	9,5	0,375	33,3	15,1	66,7
	Nº 4	4,8	0,1875	22,8	10,7	77,4
	Nº 8	2,4	0,09375	15,0	7,6	85,0
	Nº 10	1,2	0,046875	9,7	5,3	90,3
	Nº 30	0,6	0,0234375	5,9	3,8	94,1
	Nº 50	0,3	0,01172	3,2	2,7	96,8
	Nº 100	0,15	0,00583	1,3	1,9	98,7
	FUNDO	0,075	0,00293		1,3	100,0
	M.F.					6,91

GRADUAÇÕES GEOMÉTRICAS

D. MAX = ϕ max : 76 mm

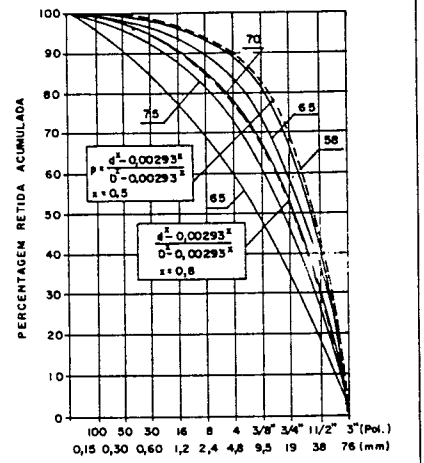


Figura 4.16 — Composições granulométricas de referência — Ø máx 76 mm

GRADUAÇÕES GEOMÉTRICAS

D. MAX = Ø max : 152 mm

PENEIRAS EM POLEGADAS		GRADUAÇÃO 58		GRADUAÇÃO 65		GRADUAÇÃO 70	
		% RETIDA	% RET. AC.	% RETIDA	% RET. AC.	% RETIDA	% RET. AC.
3"	6"	42,1	42,1	35,3	35,3	30,6	30,6
1 1/2"	3"	24,4	66,5	23,0	58,3	21,4	52,0
3/4"	1 1/2"	14,2	80,7	14,9	73,2	15,0	67,0
3/8"	3/4"	8,2	88,0	9,7	82,9	10,5	77,5
Nº 4	3/8"	4,8	93,7	6,3	89,2	7,4	84,9
Nº 8	Nº 4	2,8	94 4	4,1	93,3	5,1	90,0
Nº 16	Nº 8	1,6	98,0	2,7	96,0	3,6	93,6
Nº 30	Nº 16	0,9	98,9	1,7	97,9	2,5	96,1
Nº 50	Nº 30	0,6	99,5	1,1	98,5	1,8	97,9
Nº 100	Nº 50	0,2	99,8	0,7	99,5	1,2	99,1
FUNDO		0,2	100,0	0,5	100,0	0,9	100,0
MODULO DE FINURA			8,63	—	8,24	—	7,89

PENEIRAS EM POLEGADAS		GRADUAÇÃO 75		GRADUAÇÃO 80		GRADUAÇÃO 85	
		% RETIDA	% RET. AC.	% RETIDA	% RET. AC.	% RETIDA	% RET. AC.
3"	6"	26,1	26,1	21,8	21,8	18,0	18,0
1 1/2"	3"	19,6	45,7	17,4	39,2	15,3	33,3
3/4"	1 1/2"	14,7	60,4	13,9	53,1	13,0	46,3
3/8"	3/4"	11,0	71,4	11,1	64,2	11,0	57,3
Nº 4	3/8"	8,2	79,6	9,5	73,7	9,4	66,7
Nº 8	Nº 4	6,2	85,8	7,1	80,8	8,0	74,7
Nº 16	Nº 8	4,6	90,4	5,7	86,5	6,5	81,5
Nº 30	Nº 16	3,5	93,9	4 6	91,1	5,8	87,3
Nº 50	Nº 30	2,6	96,0	3,7	94,8	4,9	92,2
Nº 100	Nº 50	2,0	98,0	2,9	97,7	4,2	98,4
FUNDO		1,5	100,0	2,3	100,0	3,6	100,0
MODULO DE FINURA			7,48	—	7,03	—	6,54

COMPOSIÇÃO GRANULOMETRICA TEÓRICA

Ø max : 152 mm

$$p = \frac{d^{x} - 0{,}00293^{x}}{D^{x}max - 0{,}00293^{x}}$$

	PENEIRA			Dmax: 152 mm		X = 0,8
	POLEG.	mm.	FRAÇÃO POLEG.	P(PASS.) %	P(RET.) %	P(RET.AC.) %
X=0,8	6"	152	6	100,0	0,0	0,0
	3"	76	3	57,3	42,7	42,7
	1 1/2"	38	1,5	32,8	32,8	67,2
	3/4"	19	0,75	18,8	14,0	81,2
	3/8"	9,5	0,375	10,7	8,1	89,3
	Nº 4	4,8	0,1875	6,0	4,7	94,0
	Nº 8	2,4	0,09375	3,4	2,6	96,6
	Nº 16	1,2	0,046875	1,8	1,8	96,2
	Nº 30	0,6	0,0234375	1,0	0,8	99,0
	Nº 50	0,3	0,01172	0,5	0,5	99,5
	Nº 100	0,15	0,00585	0,2	0,3	99,8
	FUNDO	0,075	0,00293	0,0	0,2	100,0
	M. F.					8,68
				Dmax : 152 mm.	X = 0,5	
X=0,5	6"	152	6	100,0	0,0	0,0
	3"	76	3	70,1	29,9	29,9
	1 1/2"	38	1,5	48,9	21,2	51,1
	3/4"	19	0,75	33,9	15,0	66,1
	3/8"	9,5	0,375	23,3	10,6	76,7
	Nº 4	4,8	0,1875	15,8	7,5	84,2
	Nº 8	2,4	0,09375	10,5	5,3	89,5
	Nº 16	1,2	0,46875	6,8	3,7	93,2
	Nº 30	0,6	0,0234375	4,1	2,7	95,9
	Nº 50	0,3	0,01172	2,3	1,8	97,7
	Nº 100	0,15	0,00585	0,9	1,4	99,1
	FUNDO	0,075	0,00293	0,0	0,9	100,0
	M.F.					7,83

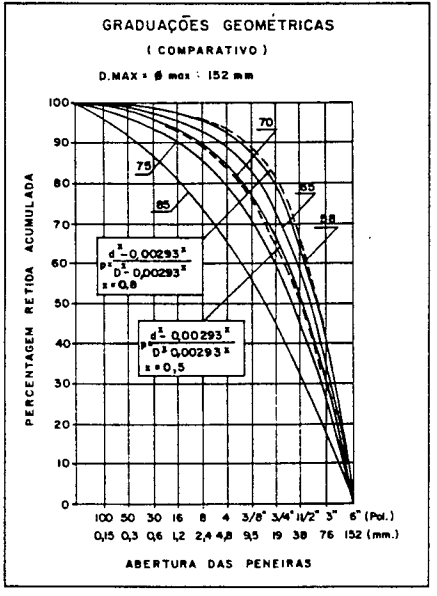
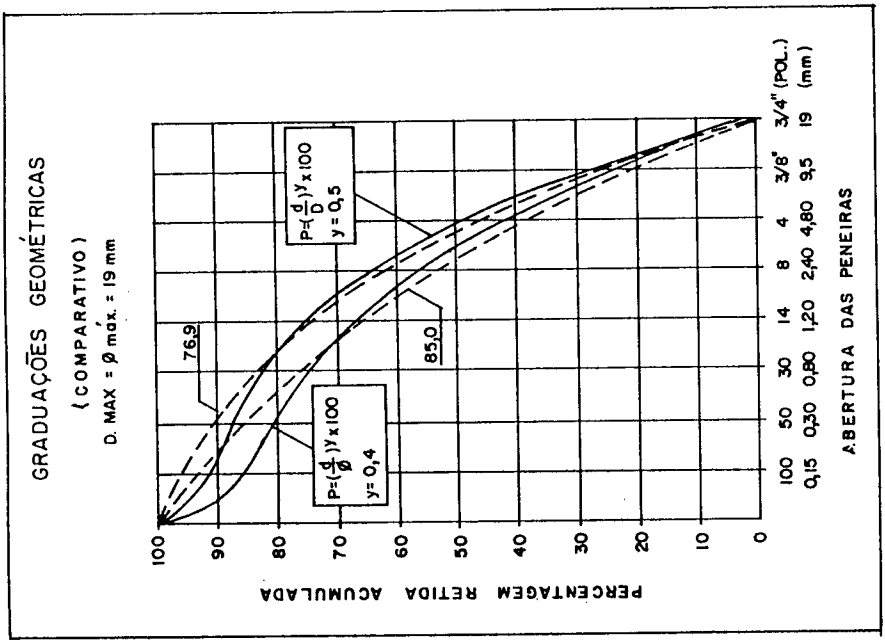


Figura 4.17 — Composições granulométricas de referência — Ø máx 152 mm



COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA TEÓRICA

D. MAX = Ø máx. = 19 mm

$P = \left(\frac{d}{D}\right)^y \times 100$

	PENEIRA (mm)	PERCENT. ACUMUL. PASSANDO	PERCENT. ACUMUL. RETIDA	PERCENT. RETIDA	GRADUAÇÃO 76,9 % RETIDA	GRADUAÇÃO 76,9 % RET. ACUM.
y=0,5	19					
	9,5	70,7	29,3	29,3	26,3	26,3
	4,8	50,0	50,0	20,7	20,2	46,5
	2,4	35,4	64,6	14,6	15,6	62,1
	1,2	25,0	75,0	10,4	12,0	74,1
	0,6	17,8	82,2	7,2	9,2	83,3
	0,3	12,8	87,4	5,2	7,1	90,4
	0,15	8,9	91,1	3,7	5,4	95,8
	FUNDO				4,2	100,0
	M.F.		4,80			4,79

	GRADUAÇÃO 85					
y=0,4	19					
	9,5	75,8	24,2	24,2	20,6	20,6
	4,8	57,4	42,6	18,4	17,5	38,1
	2,4	43,5	56,5	13,9	14,9	53,0
	1,2	33,1	66,9	10,4	12,7	65,7
	0,6	25,1	74,9	8,0	10,8	76,5
	0,3	19,0	81,0	6,1	9,1	85,5
	0,15	14,4	85,6	5,5	7,3	93,4
	FUNDO				6,6	100,0
	M.F.		4,32			4,33

Figura 4.18 — Composições granulométricas de referência — Ø máx 19 mm

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA TEÓRICA

D. MAX = Ø máx. = 38 mm

$$P = \left(\frac{d}{\varnothing}\right)^{y} \times 100$$

	PENEIRA (mm)	PERCENT. ACUMUL. PASSANDO	PERCENT. ACUMUL. RETIDA	PERCENT. RETIDA	GRADUAÇÃO 75 % RETIDA	GRADUAÇÃO 75 % RET. ACUM.
y=0,5	38					
	19	70,7	29,3	29,3	27,0	27,0
	9,5	50,0	50,0	20,7	20,3	47,3
	4,8	35,4	64,6	14,6	15,2	62,5
	2,4	25,0	75,0	10,4	11,4	73,9
	1,2	17,8	82,2	7,2	8,6	82,5
	0,6	12,8	87,4	5,2	6,4	88,9
	0,3	8,9	91,1	3,7	4,8	93,7
	0,15	6,3	93,7	2,6	3,6	97,3
	FUNDO				2,7	100,0
	M.F.		5,73			5,73

	PENEIRA (mm)	PERCENT. ACUMUL. PASSANDO	PERCENT. ACUMUL. RETIDA	PERCENT. RETIDA	GRADUAÇÃO 82,5 % RETIDA	GRADUAÇÃO 82,5 % RET. ACUM.
y=0,4	38					
	19	75,8	24,2	24,2	21,3	21,3
	9,5	57,4	42,6	18,4	17,5	38,8
	4,8	43,5	56,5	13,9	14,5	53,5
	2,4	33,1	66,9	10,4	11,9	65,2
	1,2	25,1	74,9	8,0	9,9	75,1
	0,6	19,0	81,0	6,1	8,1	83,2
	0,3	14,4	85,6	4,6	6.7	89,9
	0,15	10,9	89,1	3,5	5,5	95,4
	FUNDO				4,6	000,0
	M.F.		5,21			5,22

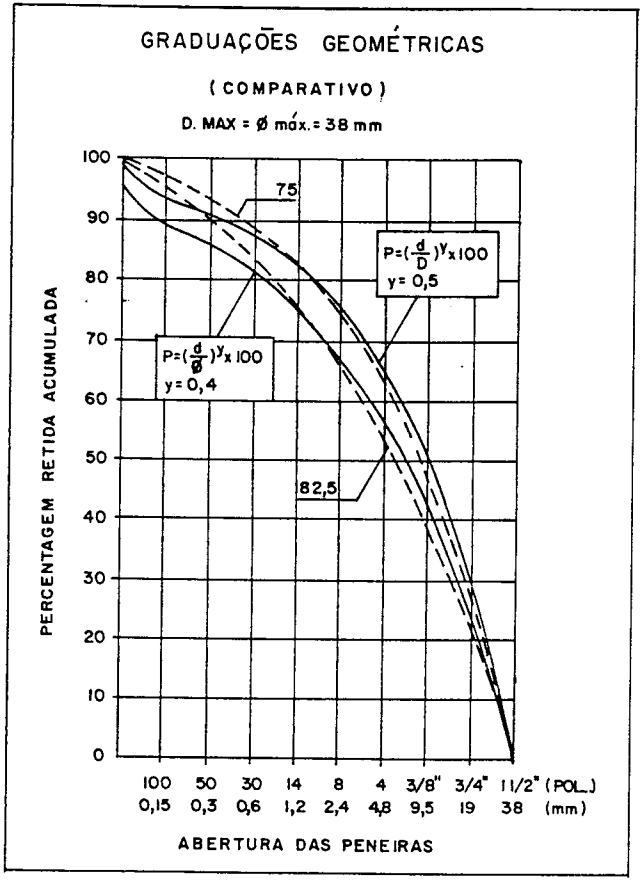
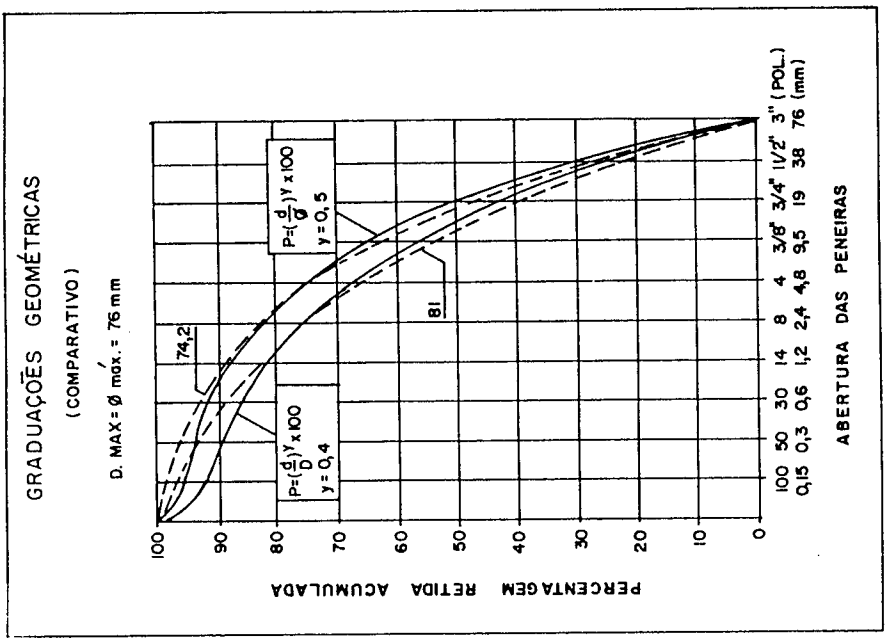


Figura 4.19 — Composições granulométricas de referência — Ø máx 38 mm



COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA TEÓRICA

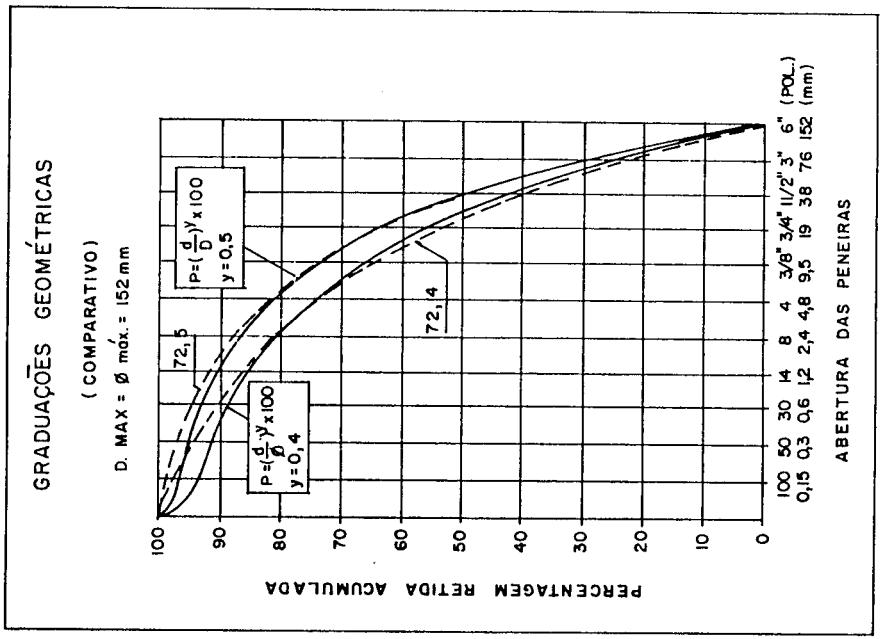
D. MAX = Ø max. = 76 mm

$P = (\frac{d}{D})^{y} \times 100$

	PENEIRA (mm)	PERCENT. ACUMUL. PASSANDO	PERCENT. ACUMUL. RETIDA	PERCENT. RETIDA	GRADUAÇÃO 74,2 % RETIDA	GRADUAÇÃO 74,2 % RET. ÁCUM.
y=0,5	76					
	38	70,7	29,3	29,3	27,2	27,2
	19	50,0	50,0	20,7	20,2	47,4
	9,5	35,4	64,6	14,6	15,0	62,4
	4,8	25,0	75,0	10,4	11,1	73,5
	2,4	17,6	82,2	7,2	8,2	81,7
	1,2	12,6	87,4	5,2	6,1	87,4
	0,6	8,9	91,1	3,7	4,5	92,3
	0,3	6,3	93,7	2,6	3,4	95,7
	0,15	4,1	95,6	1,9	2,5	98,2
	FUNDO				1,8	100,0
	M.F.		6,69			6,66

	PENEIRA (mm)	PERCENT. ACUMUL. PASSANDO	PERCENT. ACUMUL. RETIDA	PERCENT. RETIDA	GRADUAÇÃO 81 % RETIDA	GRADUAÇÃO 81 % RET. ÁCUM.
y=0,4	76					
	38	75,6	24,2	24,2	21,6	21,6
	19	57,4	42,6	18,4	17,5	39,1
	9,5	43,5	56,5	13,9	14,2	53,3
	4,8	33,1	66,9	10,4	11,5	64,8
	2,4	25,1	74,9	8,0	9,3	74,1
	1,2	19,0	81,0	6,1	7,5	81,6
	0,6	14,4	85,6	4,6	6,1	87,7
	0,3	10,9	89,1	3,5	4,9	92,6
	0,15	8,3	91,7	2,6	4,0	96,6
	FUNDO				3,4	100,0
	M.F.		6,13			6,11

Figura 4.20 — Composições granulométricas de referência — Ø máx 76 mm



COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA TEÓRICA

D. MAX = Ø máx. = 152 mm

$P = (\frac{d}{\emptyset})^y \times 100$

	PENEIRA (mm)	PERCENT. ACUMUL. PASSANDO	PERCENT. ACUMUL. RETIDA	PERCENT. RETIDA	GRADUAÇÃO 72,5 % RETIDA	GRADUAÇÃO 72,5 % RET. ACUM.
y=0,5	152					
	76	70,7	29,3	29,3	28,3	28,3
	38	50,0	50,0	20,7	20,5	48,8
	19	35,4	64,6	14,6	14,9	63,7
	9,5	25,0	75,0	10,0	10,8	74,5
	4,8	17,8	82,2	7,2	7,8	82,3
	2,4	12,6	87,4	5,2	5,7	88,0
	1,2	8,9	91,1	3,7	4,1	92,1
	0,6	6,3	93,7	2,6	3,0	95,1
	0,3	4,4	95,6	1,9	2,2	97,3
	0,15	3,1	96,9	1,3	1,6	98,9
	FUNDO		100,00		1,1	100,0
	M. F.		7,66			7,69

	PENEIRA (mm)	PERCENT. ACUMUL. PASSANDO	PERCENT. ACUMUL. RETIDA	PERCENT. RETIDA	GRADUAÇÃO 79,4 % RETIDA	GRADUAÇÃO 79,4 % RET. ACUM.
y=0,4	152					
	76	75,6	24,2	24,2	22,4	22,4
	38	57,4	42,6	18,4	17,5	40,2
	19	43,5	56,5	13,9	14,1	54,3
	9,5	33,0	67,0	10,5	11,2	65,5
	4,8	25,1	74,9	7,9	8,9	74,4
	2,4	19,0	81,0	6,1	7,0	81,4
	1,2	14,4	85,0	4,6	5,6	87,0
	0,6	10,9	89,1	3,5	4,4	91,4
	0,3	8,3	91,7	2,6	3,5	94,9
	0,15	6,3	93,7	2,0	2,8	97,7
	FUNDO		100,00		2,3	100,0
	M. F.		7,02			7,09

Figura 4.21 — Composições granulométricas de referência — Ø máx 152 mm

4.2.3.3 Graduações geométricas e as curvas de referência do ACI Committee 207: (4.21)

Uma outra expressão utilizada para ajuste da combinação mais favorável é a dada pelo ACI Committee 207, a seguir:

$$P = \left(\frac{d}{D}\right)^{y} 100 \qquad \text{(IV-VIII)}$$

onde:

P = porcentagem acumulada passando na peneira de malha d.
d = abertura da malha.
D = tamanho máximo do agregado.
y = fator relacionado com a forma e a textura das partículas do agregado graúdo, sendo que para agregados arredondados é recomendável usar valores entre 0,4 e 0,5.

As tabelas com os valores numéricos e as curvas granulométricas de graduações geométricas de mesmo módulo de finura são mostradas nas figuras 4.18 a 4.21.

As curvas de referência de acordo com a expressão IV-VIII estão próximas às seguintes graduações geométricas:

D máx. (mm)	y = 0,5	y = 0,4
19	76,9	85,0
38	75,0	82,0
76	74,2	81,0
152	72,5	79,4

Figura 4.22 — Graduações geométricas de granulometrias obtidas a partir da expressão (IV-VIII)

Como visto, as curvas granulométricas dos agregados se situam entre a graduação geométrica de 58% (Talbolt-Richart) e 85% (ACI-American Concrete Institute).

No método proposto a seguir são utilizadas as recomendações de Talbolt-Richart e os conceitos de módulo de finura, conjuntamente.

4.2.3.4 Procedimentos para dosagem pelo método do Módulo de Finura

Com os parâmetros citados passa-se à elaboração de um programa de trabalho, procurando analisar, em princípio, qual o intervalo de variação do consumo de aglomerantes, em que certamente se situa a maioria dos concretos da obra. Para isso são avaliadas experiências anteriores, comparando-se dados nominais, resistências etc. Enfim, orientações que possam posicionar a escolha das proporções mais próximas da mistura ideal desejada.

Todos os materiais destinados à dosagem devem estar devidamente caracterizados, conforme descrito no item 4.2.2.10.

No estudo da combinação ideal, além das interpretações visuais, a análise dos resultados de resistência à compressão é devida a sua praticidade, evidenciada pelo que se segue. Se uma série de misturas de uma determinada proporção de cimento/agregado, de mesma consistência e teor de ar incorporado e com vários módulos de finura da composição — conseguidos, por exemplo, através da variação do porcentual de areia, de tal modo que se tenha misturas desde argamassadas até ásperas —, a mistura que apresentar resistência mais alta é a que, teoricamente, apresenta o módulo de finura ideal, pois misturas com excesso de areia (menor módulo de finura), produzem resistências menores devido a um consumo maior de água. Em contrapartida misturas com falta de areia têm excesso de agregados graúdos e pouca plasticidade.

Recomenda-se a idade de referência, para ruptura desses corpos de prova (15 x 30 cm) de 28 dias. Como esses valores de resistência são importantes para definição da melhor composição, normalmente não se rompem corpos de prova a baixas idades, devido a grande dispersão de valores que dificulta a interpretação dos resultados. Recomenda-se para cada proporção cim/agregado, em análise, pelo menos cinco misturas com diferentes porcentagens de areia, passando de uma fase nitidamente áspera para misturas cada vez mais trabalháveis, até atingir a fase argamassada onde há excesso de areia.

Para cada porcentagem de areia em análise na mistura, devem ser estabelecidas, visualmente, as condições em que esta se encontra quanto ao envolvimento dos graúdos pela argamassa. É usual adotar a seguinte caracterização em cada situação:

— Mistura áspera: grande preponderância do agregado graúdo na mistura como mostrado na figura 4.23.

— Mistura satisfatória: condição intermediária entre a mistura áspera e a ideal.

— Mistura ideal: a porcentagem de areia no agregado total é aquela que proporciona uma condição mínima de trabalhabilidade. Normalmente é a mistura que fornece a maior resistência mecânica.

A figura 4.24 mostra a mistura ideal.

— Mistura pouco mais argamassada: condição intermediária entre a condição ideal e a argamassada. Normalmente essa condição de mistura é a mais recomendada.

— Mistura argamassada: a preponderância de areia já é acentuada conforme se verifica na figura 4.25.

— Mistura muito argamassada: ponto extremo da presença da areia na mistura. Mais utilizada para efeito de complementação do gráfico resistência x módulo de finura da mistura.

Não é recomendável utilizar cegamente, como controle da mistura, os dados nominais principalmente na medição da consistência, tanto para o lado argamassado, quanto para o lado áspero da proporção em estudo, devendo permitir o abatimento um pouco superior ao nominal para concretos bem argamassados e o inverso para concretos ásperos, pois neste caso várias vezes o acréscimo de água não induz a abatimentos progressivamente maiores devido a circunstância (falta de areia), chegando a desagregar o cone.

A mistura ideal é determinada em função da resistência mais alta, pois fornece uma porcentagem mínima de areia (módulo de finura ideal) e consequentemente um consumo menor de água. Entretanto, não é essa porcentagem de areia que se recomenda adotar, pois trabalhando nesse limite poderia haver tendência de desagregação no lançamento a qualquer variação granulométrica no beneficiamento dos agregados. Para atenuar esse problema adota-se como ótimo um traço deslocado do módulo de finura ideal (aproximadamente 0,2) para o lado argamassado.

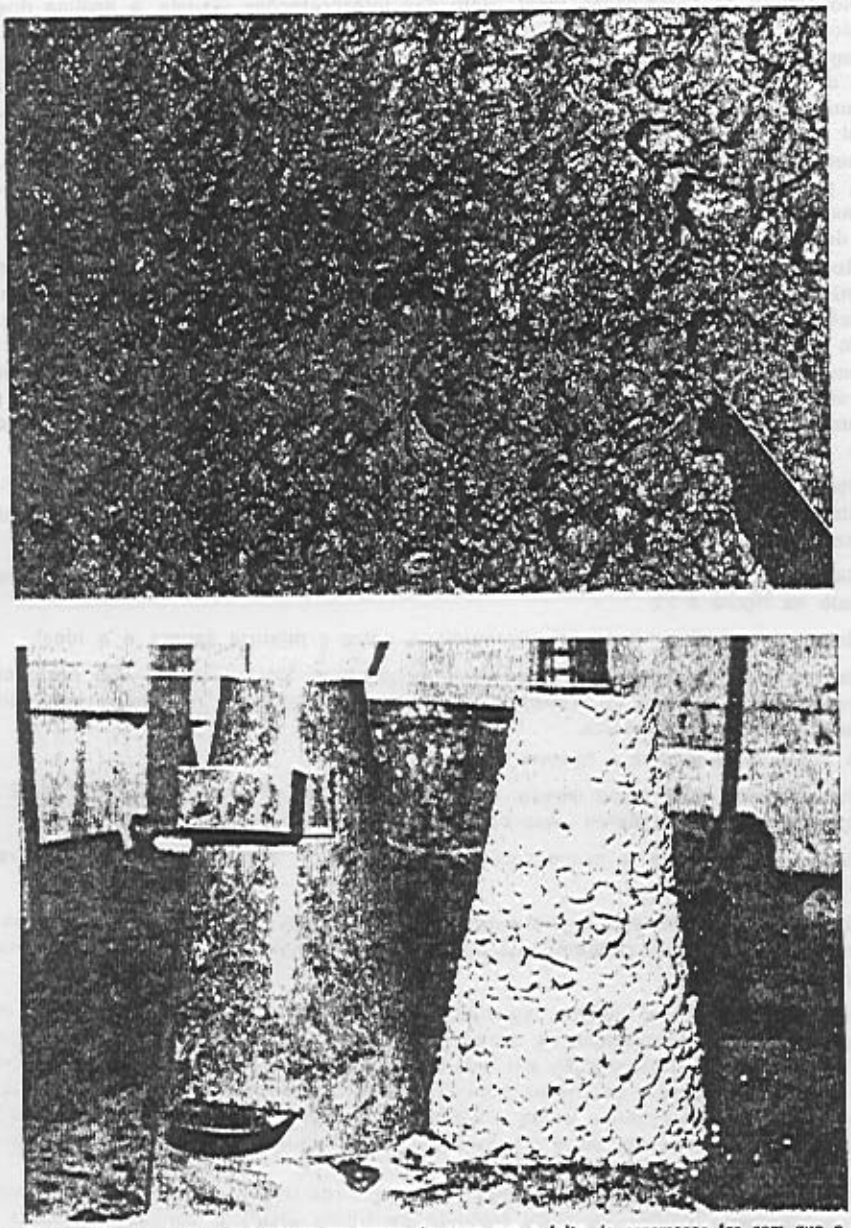


Figura 4.23 — Mistura áspera, notando-se no tronco de cone que a falta de argamassa faz com que o agregado graúdo fique exposto. Observa-se a baixa consistência e sem condições de melhorá-la pois como foi visto, acréscimos de água induzem uma desagregação do cone e não um aumento de consistência

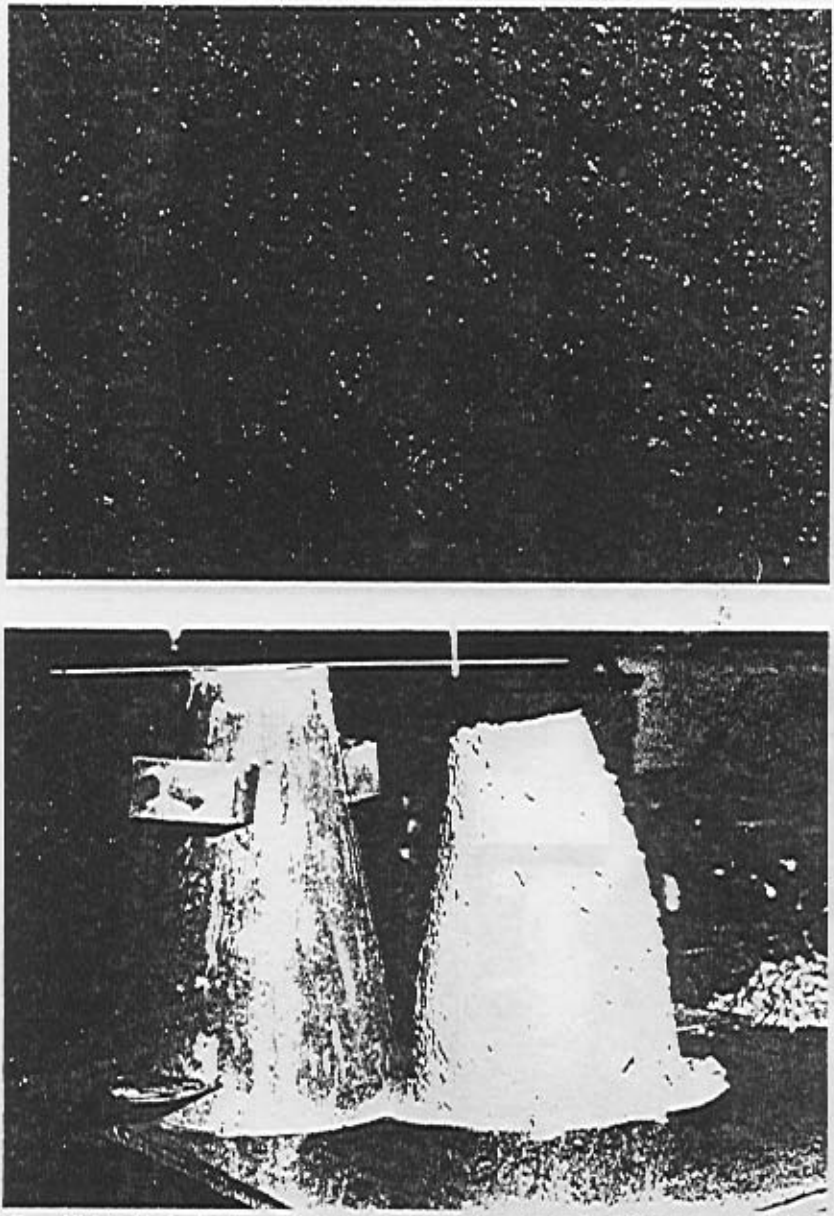


Figura 4.24 — Mistura ideal. No tronco do cone não se percebe excesso de graúdo e a rugosidade vista se deve à justa quantidade de argamassa

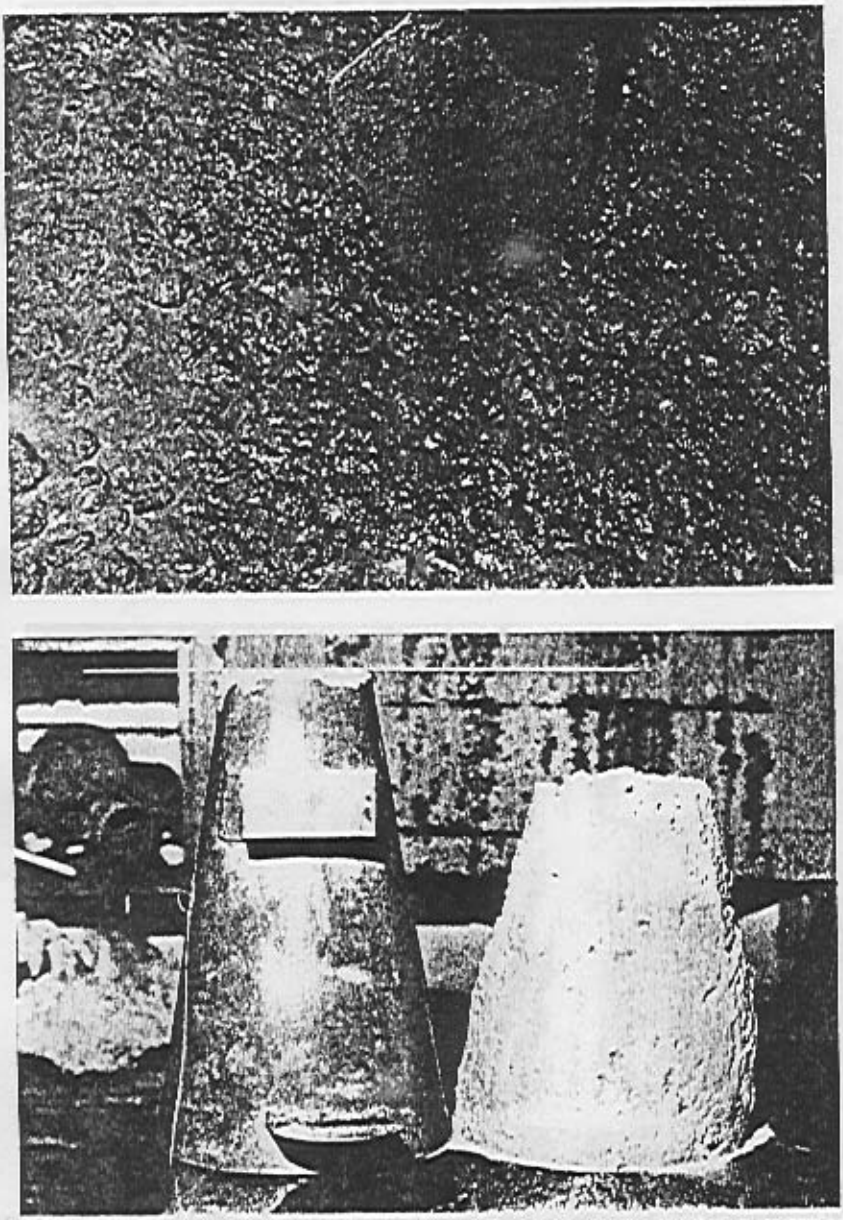


Figura 4.25 — Mistura argamassada, percebe-se a preponderância da argamassa sobre o agregado graúdo

4.2.3.5 Combinação do agregado graúdo

Para definição da distribuição do graúdo as informações da figura 4.11 podem ser úteis para uma distribuição inicial. A seguir deve-se ajustar essas composições com as recomendações de Talbot-Richart, citadas nas figuras 4.9 e 4.10. Em seguida recomenda-se avaliar as composições mais prováveis à propriedade de interesse.

O cálculo das porcentagens de agregados miúdo e graúdo, necessário para dar um determinado módulo de finura do agregado total, pode ser feito pela expressão:

$$p = 100 \frac{A - B}{A - C} \qquad \text{(IV-IX)}$$

onde:

P = porcentagem do agregado miúdo na mistura

A = módulo de finura do agregado graúdo

B = módulo de finura do agregado total na mistura

C = módulo de finura do agregado miúdo

4.2.3.6 Determinação das misturas básicas

Com os parâmetros nominais estabelecidos conforme comentado no item 4.2.2, passa-se a escolha da melhor mistura, dentro do intervalo de consumo de aglomerante pretendido. Esta etapa corresponderia ao estudo da porcentagem de areia "do método das tentativas" (item 4.2.2) e é nesta ocasião que são determinados os níveis de resistência (ou outra propriedade) para cada proporção que passa a ser referência para a determinação das composições.

As porcentagens de areia a serem estudadas basear-se-ão, inicialmente, na experiência de outras obras, podendo-se utilizar das indicações da figura 4.7.

Esse porcentual diminuído ou aumentado progressivamente é que caracteriza concretos ásperos até argamassados, cuja conceituação já foi vista.

Para julgar se a combinação de agregados miúdos e graúdos está satisfatória para o início dos estudos, basta comparar graficamente a curva da combinação inicial com a da graduação geométrica que possua o mesmo módulo de finura. Esta graduação deve estar compreendida entre os limites que proporcionam os concretos.

É importante citar, também, que ao se usar agregado britado ou escória como agregado, o valor usual do módulo de finura é aproximadamente 0,25 inferior ao módulo de finura para agregados arredondados equivalentes. Se o agregado britado for muito lamelar ou alongado, essa diminuição deve chegar a aproximadamente 0,40.

Ao se usar areia britada, em lugar de areia natural, é conveniente reduzir o módulo de finura em 0,25.

Para concretos de caráter massivo, o módulo de finura pode ser elevado em aproximadamente 0,30 e 0,40, respectivamente para agregados de tamanho máximo 76 mm e 152 mm.

4.3. Exemplos

4.3.1 Exemplo com base no método do volume absoluto (das tentativas)

Como exemplo é feita a dosagem com os materiais indicados na figura 4.26 a fim de obedecer as seguintes características nominais:

Ø — tamanho máximo do agregado (D máx) = 38 mm;
trabalhabilidade = 60 a 80 mm;
características estruturais;
ar incorporado $\leqslant$ 1,5%
temperatura $\cong$ 15°C

4.3.1.1 Dados Iniciais

Adotando as indicações do item 4.2.2 tem-se:

— Combinação do agregado graúdo em volume sólido

— Ø máx 38 mm (cascalho 2) = 55%

— Ø máx 19 mm (cascalho 1) = 45%

— Teor de areia (com módulo de finura = 2,68) entre 30% e 34% do volume sólido do agregado total.

— Teor de ar = 1,5% = 15 litros/m³.

— Devido às características estruturais e à condição de que o agregado graúdo é deletério com relação aos álcalis adotou-se uma reposição de 20% do volume sólido de cimento, por material pozolânico.

— Teor de água — adotado o valor 136 kg/m³.

4.3.1.2. Cálculos

Usando impressos adequados (figuras 4 27 a 4.29) é efetuado o cálculo que se segue:

— areia (volume sólido) = 30%;
— A/Ceq = 0,50
água = 136 kg/m³;
— aglomerante = 136/0,50 = 272 kg/m³;
— volume sólido de aglomerante = 272/3,2 = 85 l
— agregado total = 1.000 — 136—85—15 = 764 l
— volume de agregado graúdo = (volume total de agregado — volume de areia)

× Teor da gama granulométrica =

C_1 = (100—30) × 0,45 = 31,5

C_2 = (100—30) × 0,55 = 38,5

— volume sólido para um metro cúbico

$C_1 = 0{,}315 \times 764 = 240{,}7$ (l)
$C_2 = 0{,}385 \times 764 = 294{,}1$ (l)
areia $= 0{,}3 \times 764 = 229{,}2$ (l)
Total $= 764{,}0$ (l)

Aglomerantes — cimento $= 0{,}8 \times 85 = 68$ (l)
pozolana $= 0{,}2 \times 85 = 17$ (l)
85 (l)

— Massas específicas absolutas (condição SSS — ver figura 4.26).

$C_2 = 2{,}61$ kg/dm³
$C_1 = 2{,}63$ kg/dm³
areia $= 2{,}65$ kg/dm³

— Peso por metro cúbico na condição SSS

$C_2 = 294{,}1 \times 2{,}61 = 767{,}6$ kg/m³
$C_1 = 240{,}7 \times 2{,}63 = 633{,}0$ kg/m³
areia $= 229{,}2 \times 2{,}65 = 607{,}4$ kg/m³
cimento $= 68 \times 3{,}2 = 217{,}6$ kg/m³
pozolana $= 17 \times 2{,}5 = 42{,}5$ kg/m³

— Absorções

$C_2 = 0{,}43$ %
$C_1 = 0{,}50$ %
areia $= 0{,}30$ %

— Umidades no instante da dosagem

$C_2 = 0{,}08$ %
$C_1 = 0{,}06$ %
areia $= 0{,}11$ %

— Água livre %

$C_2 = 0{,}43 - 0{,}08 = 0{,}35$ %
$C_1 = 0{,}50 - 0{,}06 = 0{,}44$ %
areia $= 0{,}30 - 0{,}11 = 0{,}19$ %

DESCRIÇÃO			AREIA	CASCALHO	CASCALHO					
LOCAL DE EXTRAÇÃO DA M. PRIMA			APORÉ	APORÉ	APORÉ					
PROCESSO INDÚSTRIAL										
Nº DE AMOSTRAS										
TAMANHO MÁXIMO (mm)			4,8	19	38					
GRANULOMETRIA % RETIDA ACUMULADA		178								
		152								
		127								
		100								
		76								
		64								
		50								
		38								
		25			45					
		19			86					
		12,7		44	99					
		9,5		71	100					
		4,8	1	99	100					
		2,4	16	100	100					
		1,2	29	100	100					
		0,6	46	100	100					
		0,3	80	100	100					
		0,15	96	100	100					
		0,075								
MÓDULO DE FINURA			2,68	6,70	7,85					
DENSIDADE ABSOLUTA - g/cm³			2,65	2,63	2,61					
DENSIDADE APARENTE - g/cm³			1,61	1,62	1,63					
ABSORÇÃO %			0,30	0,50	0,43					
PULVERULENTO %			0,50	1,00	1,00					
MATERIAL FRIAVEL %				ISENTO	ISENTO					
MATERIA ORGANICA			ISENTA							
ABRASÃO. - % DE DESGASTE				28,6	28,6					
FORMA - % DE NÃO CHATA E NÃO ALONGADA.	NÚMERO									
	PESO									
REATIVIDADE - MET. QUÍMICO			INÓCUO	DELETERIO	DELETERIO					
REATIVIDADE MET. FÍSICO EXPANSÃO MAX. %	3 MESES		0,015	0,015	0,015					
	6 MESES		0,029	0,025	0,025					
	1 ANO		0,060	0,033	0,033					
ANALISE PETROGRAFICA GRAÚDO % EM PESO	CALCEDONIA			14,0	45,9					
	QUARTZITO			81,3	51,6					
	QUARTZO			3,1	0,2					
	OUTROS			1,6	2,3					
% PERDA DE PESO - CICL.			2,9	1,0	1,0					
CICLAGEM - ETILENO GLICOL										
% PERDA DE PESO - CICL. NATURAL										
% PERDA DE PESO - CICL. ÁGUA EST.										
RESIST. A COMPRESSÃO Kg/cm²	MAX.									
	MIN.									
MODULO DE ELASTICIDADE x 10³ Kg/cm²	MAX.									
	MIN.									
COEF. EXPANSÃO TÉRMICA - 10⁻⁶ / °C				11,4	11,5					
COND. TÉRMICA - CAL./cm x Seg x °C			0,00730	0,01100	0,01100					
CALOR ESPECÍFICO - CAL./g °C			0,175	0,170	0,170					
ANÁLISE PETROGRAFICA AREIA - % PESO	DELETÉRIO		18,1							
	INÓCUO		76,0							
	FRIAVEL		2,4							
ENSAIO DE QUALIDADE AREIA - % RESISTENCIA EM RELAÇÃO ARG. PADRÃO	3 DIAS									
	7 DIAS									
	28 DIAS									

Figura 4.26 — Características dos materiais do exemplo — 4.3.1

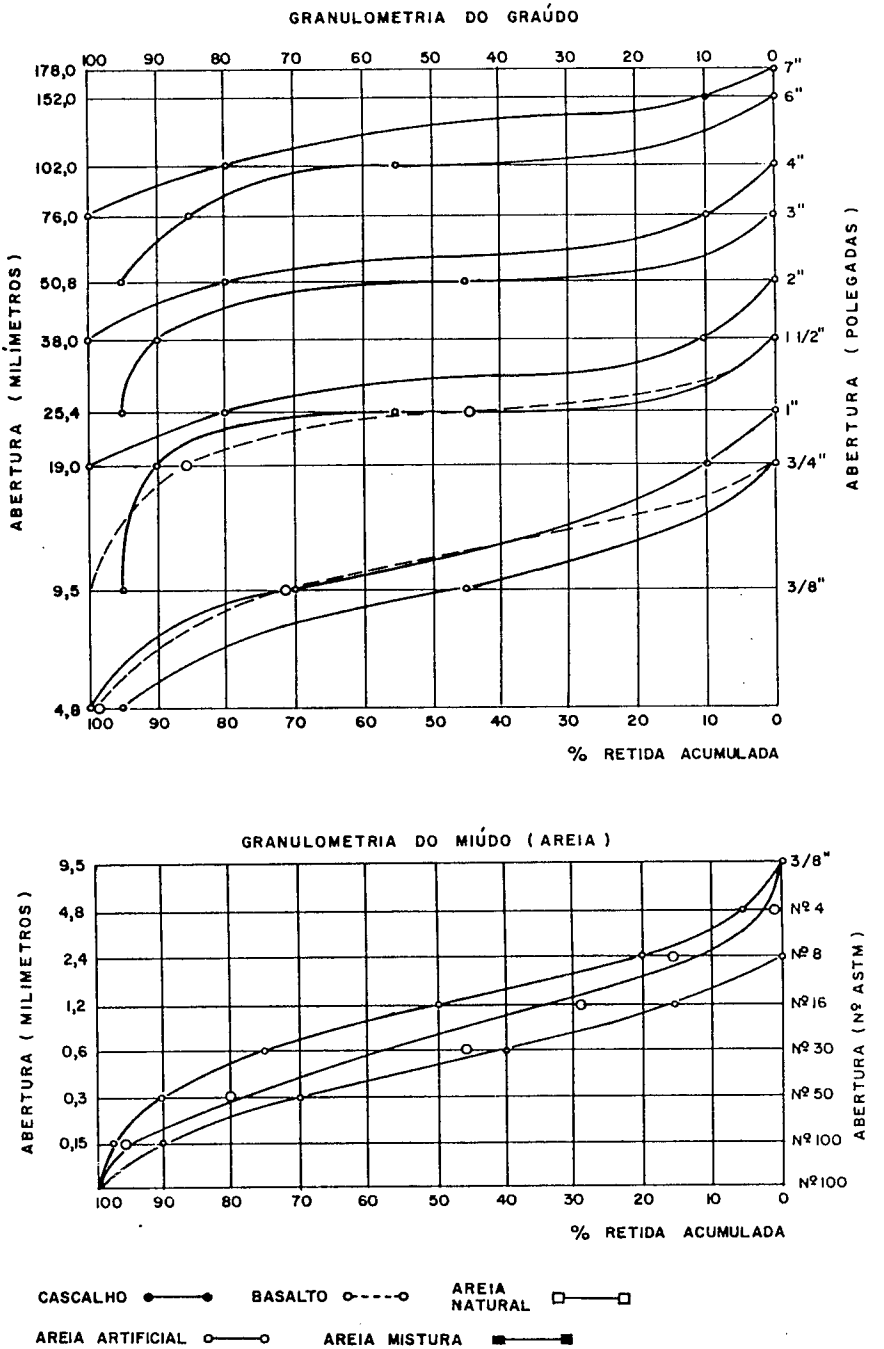


Figura 4.26 — Continuação

SOLICITADO POR :	APLICAÇÃO : DOSAGEM AV - 4			CALCULADO POR :
	DATA			
VALORES NOMINAIS	TENSÃO kg/cm²	SLUMP (cm)	AR % ∞	TEMPERATURA °C
	—	6 A 7	≤ 1,5	15°

MATERIAL	INICIAL		RECÁLCULO		CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS		
	VOLUME (S)	MASSA	VOLUME (S)	MASSA	CIMENTO	CORUMBÁ	REF. 6194
% AREIA	30				POZOLANA	JUPIÁ	REF. 927
A/C OU A/CEQ		0,50		0,507	MIÚDO	AREIA DA CASCALHEIRA DO APORÉ	
AR	15		15,0				
AGREGADO	764		762,5		GRAÚDO	G1 , G2 — APORÉ	
AGLOMERANTE	85	272	84,8	271,4			
ÁGUA	136	136	137,7	137,7	INCORPORADOR		%
TOTAL	1000		1000,0				%
FATOR	$f = \frac{1000}{1000 + (138 - 136)} = \frac{1000}{1002} = 0,998$						%
					RETARDADOR		%

% VOLUME COMBINADO			55	45							
COMPONENTES	4	3	2	1	AREIA 2	AREIA 1	CIMENTO	MATERIAL POZOLÂNICO	ÁGUA	INC.	RET.
% VOLUME AGREGADO			38,50	31,50		30,00					
VOLUME SOL.			294,10	240,70		229,20	68	17			
DENSIDADE (SSS)			2,61	2,63		2,65	3,20	2,50			
MASSA / m³ (SSS)			767,60	633,00		607,40	217,60	42,50	136 ←	138	
ABSORÇÃO %			0,43	0,50		0,30	—	—			
UMIDADE %			0,08	0,06		0,11					
ÁGUA LIVRE %			0,35	0,44		0,19					
MASSA DA ÁGUA LIVRE			2,70	2,80		1,10	6,6 X	0,7 =	+ 3		
MASSA / m³			765	630		606	217,60	42,50	141	143	
PARA 50 ℓ			38,30	31,50		30,30	10,88	2,13	7,05		

CORREÇÃO DA ÁGUA	TEMPERATURA DO CONCRETO	SLUMP (cm)	VEBE (SEG)	AR %	δAP-∞ Kg/m³	δAP-INT-Kg/m³	BLEEDING %	DATA DE MOLDAGEM
+ 100 g	16,2	6,8		1,5				

Nº C.P.	DATA DE RUPTURA	IDADE DIAS	TENSÃO kg/cm²	MÉDIA kg/cm²		Nº C.P.	DATA DE RUPTURA	IDADE DIAS	TENSÃO kg/cm²	MÉDIA kg/cm²

OBSERVAÇÕES : 7,05 + 0,10 = 7,15 7,15/0,05 = 143 143 — 5 = 138

Figura 4.27 — Exemplo de cálculo

SOLICITADO POR :	APLICAÇÃO : DOSAGEM AV – 4			CALCULADO POR :
	DATA			
VALORES NOMINAIS	TENSÃO kg/cm²	SLUMP (cm)	AR % ≈	TEMPERATURA °C
	–	6 A 7	≤1,5	15°

MATERIAL	INICIAL		RECÁLCULO		CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS		
	VOLUME (S)	MASSA	VOLUME (S)	MASSA	CIMENTO	CORUMBÁ	REF. 6194
% AREIA	32				POZOLANA	JUPIÁ	REF. 927
A/C OU A/C EQ		0,50			MIÚDO	AREIA DO APORÉ	
AR	15						
AGREGADO	764				GRAÚDO	C1 , C2 – APORÉ	
AGLOMERANTE	85	272					
ÁGUA	136	136			INCORPORADOR		%
TOTAL	1000						%
FATOR							%
					RETARDADOR		%

% VOLUME COMBINADO			55	45							
COMPONENTES	4	3	2	1	AREIA 2	AREIA 1	CIMENTO	MATERIAL POZOLÂNICO	ÁGUA	INC.	RET.
% VOLUME AGREGADO			37,40	30,60		32,00					
VOLUME SOL. / m³			285,70	233,80		244,50	68,00	17,00	136		
DENSIDADE (SSS)			2,61	2,63		2,65	3,20	2,50			
MASSA/m³ (SSS)			745,70	614,90		647,90	217,60	42,50	136		
ABSORÇÃO %											
UMIDADE %											
ÁGUA LIVRE %			0,35	0,44		0,19					
MASSA DA ÁGUA LIVRE			2,50	2,70		1,20	6,4 X	0,7 ≈	5		
MASSA / m³			743,20	612,20		646,70	217,60	42,50	141		
PARA 50 ℓ			37,20	30,60		32,30	10,88	2,13	7,05		

CORREÇÃO DA ÁGUA	TEMPERATURA DO CONCRETO	SLUMP (cm)	VEBE (SEG)	AR %	δAP-≈ kg/m³	δAP-INT-kg/m³	BLEEDING %	DATA DE MOLDAGEM
–	16,1	6,5		1,5				

Nº C.P.	DATA DE RUPTURA	IDADE DIAS	TENSÃO kg/cm²	MÉDIA kg/cm²		Nº C.P.	DATA DE RUPTURA	IDADE DIAS	TENSÃO kg/cm²	MÉDIA kg/cm²

OBSERVAÇÕES : NÃO HOUVE CORREÇÃO NA ÁGUA f = 1

Figura 4.28 — Exemplo de cálculo

SOLICITADO POR :	APLICAÇÃO : DOSAGEM AV – 4 DATA			CALCULADO POR :
VALORES NOMINAIS	TENSÃO kg/cm²	SLUMP (cm)	AR % #	TEMPERATURA °C
	–	6 A 7	≤1,5	15°

MATERIAL	INICIAL		RECÁLCULO		CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS		
	VOLUME (S)	MASSA	VOLUME (S)	MASSA	CIMENTO	CORUMBÁ	REF. 6194
% AREIA	34				POZOLANA	JUPIÁ	REF. 927
A/C OU A/CEQ		0,50		0,515	MIÚDO	AREIA DO APORÉ	
AR	15		15,0				
AGREGADO	764		760,8		GRAÚDO	C1 , C2 – APORÉ	
AGLOMERANTE	85	272	84,7	270,9			
ÁGUA	136	136		139,5	INCORPORADOR		%
TOTAL	1000,00		1000,00				%
FATOR							%
f	$f = \frac{1000}{1000 + (140 - 136)} = \frac{1000}{1004} = 0,996$				RETARDADOR		%

% VOLUME COMBINADO			55	45							
COMPONENTES	4	3	2	1	AREIA 2	AREIA 1	CIMENTO	MATERIAL POZOLÂNICO	ÁGUA	INC.	RET.
% VOLUME AGREGADO			36,30	29,70		34,00					
VOLUME SOL. /m³			277,30	226,90		259,80	68,00	170	136		
DENSIDADE (SSS)			2,61	2,63		2,65	3,20	2,50	1		
MASSA /m³ (SSS)			723,70	596,70		688,50	217,60	42,50	136 ←	140	
ABSORÇÃO %											
UMIDADE %											
ÁGUA LIVRE %			0,35	0,44		0,19					
MASSA DA ÁGUA LIVRE			2,50	2,60		1,30	6,4 x	0,7 =	5		
MASSA /m³			721,20	594,10		687,20	217,60	42,50	141	145	
PARA SO 2			36,10	29,70		34,40	10,88	2,13	7,05		
									7,25 ←		

CORREÇÃO DA ÁGUA	TEMPERATURA DO CONCRETO	SLUMP (cm)	VEBE (SEG)	AR %	δAP-# Kg/m³	δAP-INT Kg/m³	BLEEDING %	DATA DE MOLDAGEM
+ 200 g	16,0	6,8	–	1,3				

Nº C.P.	DATA DE RUPTURA	IDADE DIAS	TENSÃO kg/cm²	MÉDIA kg/cm²		Nº C.P.	DATA DE RUPTURA	IDADE DIAS	TENSÃO kg/cm²	MÉDIA kg/cm²

OBSERVAÇÕES : 7,05 + 0,2 = 7,25 7,25 /0,05 = 145 145 – 5 = 140

Figura 4.29 — Exemplo de cálculo

— Massa da água livre

$$C_2 = \frac{0{,}35}{100} \times 767{,}6 = 2{,}7 \text{ kg/m}^3$$

$$C_1 = \frac{0{,}44}{100} \times 633{,}0 = 2{,}8 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{areia} = \frac{0{,}19}{100} \times 607{,}4 = 1{,}1 \text{ kg/m}^3$$

Total ..... 6,6 kg/m³

— Água a ser acrescida (pois absorção maior que a umidade) = 6,6 × 0,7 (ver item 4.2.2.14) ≅ 5 kg/m³

— Massa por metro cúbico (na condição a ser betonada)

$C_2 = 767{,}6 - 2{,}7 \cong 765$ kg/m³
$C_1 = 633{,}0 - 2{,}8 \cong 630$ kg/m³
areia = $607{,}4 - 1{,}1 \cong 606$ kg/m³
água = $136 + 5 = 141$ kg/m³

— Quantidade a betonar para um volume de 50 l (que é suficiente para os ensaios da mistura fresca).

C_2	= 765	× 0,05	=	38,3 kg
C_1	= 630	× 0,05	=	31,5 kg
areia	= 606	× 0,05	=	30,3 kg
cimento	= 217,6	× 0,05	=	10,88 kg
pozolana	= 42,5	× 0,05	=	2,13 kg
água	= 141	× 0,05	=	7,05 kg
gelo	= calculado de acordo com o descrito no item 4.2.2.17			

4.3.1.3. Betonada (mistura)

Durante a primeira betonada observou-se a necessidade de um acréscimo de 100 g de água, para se obter um abatimento de 68 mm.

4.3.1.4. Verificações

Com o acréscimo da quantidade de água tem-se:

— Água real = 7,05 + 0,10 = 7,15 kg para 50 l
= 7,15/0,05 = 143 kg/m³

— Água para o agregado na condição "SSS" = 143 − 5 = 138 kg/m³

— Cálculo do fator "f"

Devido ao acréscimo de água 138 — 136 = 2 l

$$\frac{1.000}{1.000 + (138-136)} \qquad \frac{1.000}{1.002} = 0,998 = \text{"f"}$$

— Recálculo do consumo de materiais

Água = 0,998 × 138 = 137,7 kg/m³

Aglomerante = 0,998 × 272 = 271,4 kg/m³
271,4/3,2 = 84,81

Agregado total = 985 — 137,7 — 84,8 = 762,5

A/Ceq = 137,7/271,4 = 0,507

Obteve-se desta forma o primeiro ponto da curva — correspondente a 30% de volume sólido de areia (ver figura 4.30).

4.3.1.5 Cálculos complementares

Adotando outros teores de areia, repetem-se os cálculos e os recálculos, como nas figuras 4.28 e 4.29, obtendo-se, então, o seguinte quadro de valores:

% Areia Volume sólido	A/Ceq	Água kg/m³
30	0,507	137,7
32	0,500	136,0
34	0,515	139,5

Esses valores são plotados, como mostra a figura 4.30.

Através do gráfico da figura 4.30, adotou-se o valor 34% para o volume sólido de areia, tendo em vista o caráter estrutural da mistura, ficando com razoável teor de argamassa — aproximadamente 49% do volume sólido total.

O traço-base é o seguinte:

A/Ceq	=	0,515
Aglomerante	=	270,9 kg/m³
Água	=	138,5 kg/m³
Ar	=	1,5%

Volume absoluto total do agregado = 760,9 l
sendo:

34,0 % areia	=	258,7 l
29,7 % C_1	=	226,0 l
36,3 % C_2	=	276,2 l
total	=	760,9 l

Variando-se o fator A/Ceq e moldando corpos de prova para os diversos ensaios, obtém-se a família de valores nas diversas A/Ceq como mostra a figura 4.31. Isto permite escolher a mistura mais adequada para os fins desejados.

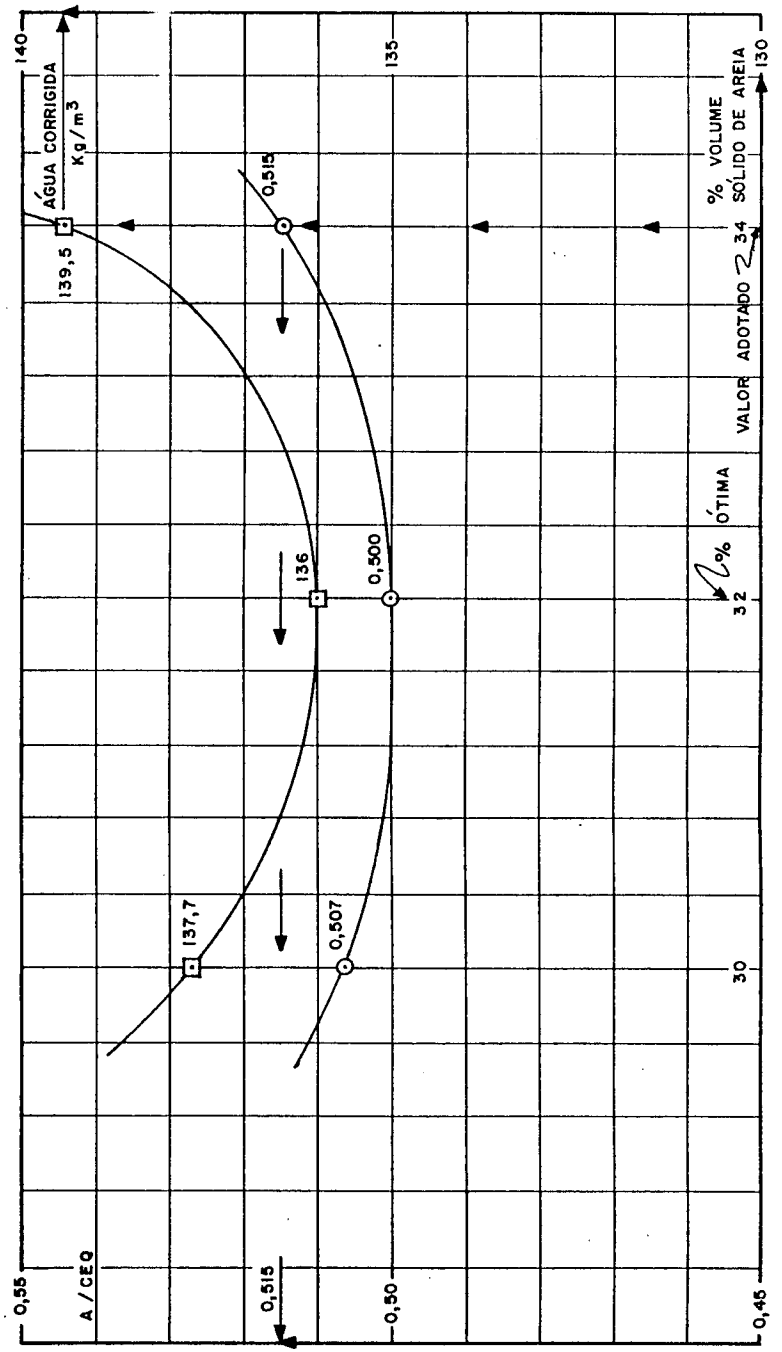


Figura 4.30 — Determinação do traço-base

DOSAGEM			AV	AV-4		AV-4
DIAMETRO MÁXIMO (mm)			38	38	38	38
ÁGUA/CIMENTO (EQUIV.)			0		0,50	0,60
MATERIAL POZOLANICO - % VOLUME SÓLIDO			20		20	20
COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS EM VOLUME SÓLIDO	AREIA - % VOL. SÓLIDO		20,7		33,8	35,0
	ø 19 mm		45		45	45
	ø 38 mm		55		55	55
	ø 76 mm					
	ø 152 mm					
TRAÇO EM VOLUME SÓLIDO			1:3,5	1:6,8	1:8,7	1:10,6
CIMENTO (Kg/m³)			371,8	279,0	223,4	186,2
MATERIAL POZOLANICO (Kg/m³)			72,8	54,5	43,5	36,5
ÁGUA (Kg/m³)			172,0	139,5	139,5	139,5
AREIA 1 (Kg/m³)			524,7	620,9	678,7	717,1
AREIA 2 (Kg/m³)						
CASCALHO 1 (Kg/m³)			594,4	594,4	594,4	594,4
CASCALHO 2 (Kg/m³)			720,9	720,9	720,9	720,9
CASCALHO 3 (Kg/m³)						
BRITA 1 (Kg/m³)						
BRITA 2 (Kg/m³)						
BRITA 3 (Kg/m³)						
BRITA 4 (Kg/m³)						
ADITIVOS %	INCORPORADOR					
	RETARDADOR					
NOMINAL	AR %					
	SLUMP (cm)		6 A 7	6 A 7	6 A 7	6 A 7
OBTIDO	AR %			1,5	1,4	1,5
	SLUMP (cm)		5,0	5,9	7,0	6,2
	CONSISTENCIA VEBE (S)					
	TEMPERATURA °C		14,2	16,7	14,5	17,2
	ÁGUA EXSUDAÇÃO %			2,3	6,1	6,7
	DENSIDADE t/m³	FRESCO	2,433	2,420	2,417	2,408
		28 DIAS	2,434	2,448	2,436	2,444
3 DIAS	RUP. (INTEGRAL) Kg/cm²		260	180	117	73
	" (PENEIRADO) "					
	" (DIAMETRAL) "		26,2		17,5	
	MOD. EL. INTEGRAL - Kg/cm²		442.000			
	" " PENEIRADO "					
	" COEF. POISSON "		0,16			
7 DIAS	RUP. (INTEGRAL) - Kg/cm²		355	254	192	127
	" (PENEIRADO) "					
	" (DIAMETRAL) "		35,7		21,2	
	MOD. EL. INTEGRAL - Kg/cm²		484.000	460.000	357.000	
	" " PENEIRADO "					
	" COEF. POISSON "		0,15	0,14	0,15	
28 DIAS	RUP. (INTEGRAL) Kg/cm²		430	423	316	261
	" (PENEIRADO) "					
	" (DIAMETRAL) "		34,9		30,8	
	MOD. EL. INTEGRAL - Kg/cm²		546.000	523.000	510.000	
	" " PENEIRADO "					
	" COEF. POISSON "		0,19	0,19	0,18	
90 DIAS	RUP. (INTEGRAL) Kg/cm²		489	427	353	287
	" (PENEIRADO) "					
	" (DIAMETRAL) "		30,4		30,7	
	MOD. EL. INTEGRAL - Kg/cm²		555.000	589.800	547.500	
	" " PENEIRADO "					
	" COEF. POISSON "		0,17	0,15	0,17	
PERMEAB.	BUREAU cm/s (90 DIAS)					
	PENETRAÇÃO (cm)	28 DIAS				

Figura 4.31 — Família de valores para diversos fatores água/cimento equivalente

4.3.2 Exemplo com base no método do "Módulo de Finura"

Como exemplo é feita a dosagem com os materiais indicados na figura 4.32 a fim de atender às seguintes características nominais:

Ø máx = tamanho máximo do agregado = 76 mm

trabalhabilidade = 25 a 35 mm

ar incorporado = 5,5 ± 0,5%

características de concreto massa

temperatura $\leqslant$ 24°C

Com base nas informações do item 4.2.3 e na experiência tem-se as proporções indicadas na figura 4.33.

Utilizando as informações da figura 4.11 pode ser feito o estudo gráfico da distribuição do agregado graúdo como mostra a figura 4.34, comparando-o com as curvas de Bolomey.

Com os dados da figura 4.33 e os da figura 4.34, interligados pela expressão (IV-IX) do item 4.2.3.6 podem ser estabelecidas as curvas da figura 4.35, permitindo indicações da localização das misturas no intervalo delimitado pelas graduações extremas, fora da qual as misturas não apresentariam trabalhabilidade desejada.

Adotando o teor de água próximo ao indicado pelas figuras 4.5 e 4.6 são moldados corpos de prova para avaliação das "Misturas Ideais", como é citado na figura 4.36.

Após a análise passa-se à elaboração das misturas complementares como mostra na figura 4.37 e que são, também, apresentadas na figura 4.38.

Nesse gráfico é definida a porcentagem de areia otimizada para cada proporção cimento/agregado estudado e os níveis de resistência obtidos aos 28 dias, de fundamental importância na determinação das misturas.

Outras relações podem ser estabelecidas, tais como:

— Teor de agregado miúdo e o módulo de finura do agregado total (equação IV-IX — item 4.2.3.6).

— Resistência à compressão axial simples e o fator água/cimento.

4.4 Recomendações para dosagens de outros tipos de concreto

Os procedimentos citados nos itens 4.2.2 e 4.2.3 são aplicáveis a dosagens de concretos de características normais.

Alguns tipos especiais de concretos requerem alguns cuidados ou recomendações específicas que são lembradas a seguir.

4.4.1. Concreto estrutural leve

O concreto estrutural leve é um concreto (4.15) produzido a partir de agregados leves, com massa específica inferior a 1.850 kg/m³ e resistência à compressão axial simples superior a 175 kgf/cm².

Os agregados leves podem ser obtidos de várias maneiras e geralmente apresentam massa específica inferior a 1.120 kg/m³ e absorções entre 5% e 20%.

Devido a elevada absorção, os procedimentos de dosagem de concretos leves devem englobar o pré-umedecimento do agregado de modo a não alterar o teor de água de mistura.

Devido a baixa massa específica do agregado, os concretos apresentam trabalhabilidade inferior a de um concreto normal de mesmo abatimento, pelo tronco de cone.

DESCRIÇÃO		AREIA	CASCALHO	CASCALHO	CASCALHO	BASALTO	BASALTO	BASALTO	BASALTO
PROCEDENCIA		ILHA 18				AV	AV	AV	AV
DIAMETRO MAXIMO (mm)		2,4				19	38	76	152
GRANULOMETRIA % RETIDA ACUMULADA	7"								—
	6"								3
	5"								13
	4"								53
	3"							0	96
	2 1/2"							25	100
	2"						0	56	100
	1 1/2"						4	96	100
	1"						71	100	100
	3/4"					3	97	100	100
	1/2"					33	100	100	100
	3/8"					62	100	100	100
	Nº 4					98	100	100	100
	Nº 8	1				100	100	100	100
	Nº 16	7				100	100	100	100
	Nº 30	37				100	100	100	100
	Nº 50	78				100	100	100	100
	Nº 100	98				100	100	100	100
	<Nº 100	—				—	—	—	—
MODULO DE FINURA		2,21				6,63	8,01	8,96	9,99
DENSIDADE ABSOLUTA - g/cm³		2,64				2,87	2,90	2,91	2,93
DENSIDADE APARENTE - g/cm³		1,45				1,44	1,50	1,52	1,56
ABSORÇÃO %		0,40				1,70	0,86	0,51	0,36
PULVERULENTO %		1,0				0,65	0,94	0,11	0,11
MATERIAL FRIAVEL %						ISENTO	ISENTO	ISENTO	ISENTO
MATERIA ORGANICA		ISENTA				—	—	—	—
ABRASÃO — % DE DESGASTE						13,0	12,0	14,0	14,0
FORMA - % DE NÃO CHATA E NÃO ALONGADA	NÚMERO					85	83	82	86
	PESO					81	82	80	90
REATIVIDADE - MET. QUÍMICO						INOCUO	INOCUO	INOCUO	INOCUO
REATIVIDADE MET. FÍSICO EXPANSÃO MAX. %	3 MESES					0,030	0,030	0,030	0,030
	6 MESES					0,030	0,030	0,030	0,030
	1 ANO					0,030	0,030	0,030	0,030
ANALISE PETROGRAFICA GRAUDO % EM PESO	CALCEDONIA					—	—	—	—
	QUARTZITO					—	—	—	—
	QUARTZO					—	—	—	—
	OUTROS					—	—	—	—
% PERDA DE PESO - CICL.						3,0	3,0	3,0	3,0
CICLAGEM - ETILENO GLICOL						INOCUO	INOCUO	INOCUO	INOCUO
% PERDA DE PESO - CICL. NATURAL						1,3	1,3	1,3	1,3
% PERDA DE PESO - CICL. ÁGUA EST.						2,6	2,6	2,6	2,6
RESIST. A COMPRESSÃO Kg/cm²	MAX.					2.500	2.500	2.500	2.500
	MIN.					880	880	880	880
MODULO DE ELASTIDADE - 10³ Kg/cm²	MAX.					1.000	1.000	1.000	1.000
	MIN.					300	300	300	300
COEF. EXPANSÃO TÉRMICA -						6,5 A 8,1	6,5 A 8,1	6,5 A 8,1	6,5 A 8,1
COND. TÉRMICA - CAL/cm/Seg/°C						0,00450	0,00450	0,00450	0,00450
CALOR ESPECÍFICO - CAL/g °C						0,180	0,180	0,180	0,180
ANALISE PETROGRAFICA AREIA - % PESO	DELETERIO								
	INOCUO								
	FRIAVEL								
ENSAIO DE QUALIDADE AREIA - % RESISTENCIA EM RELAÇÃO ARG. PADRÃO									

Figura 4.32 — Características dos materiais do exemplo 4.3.2

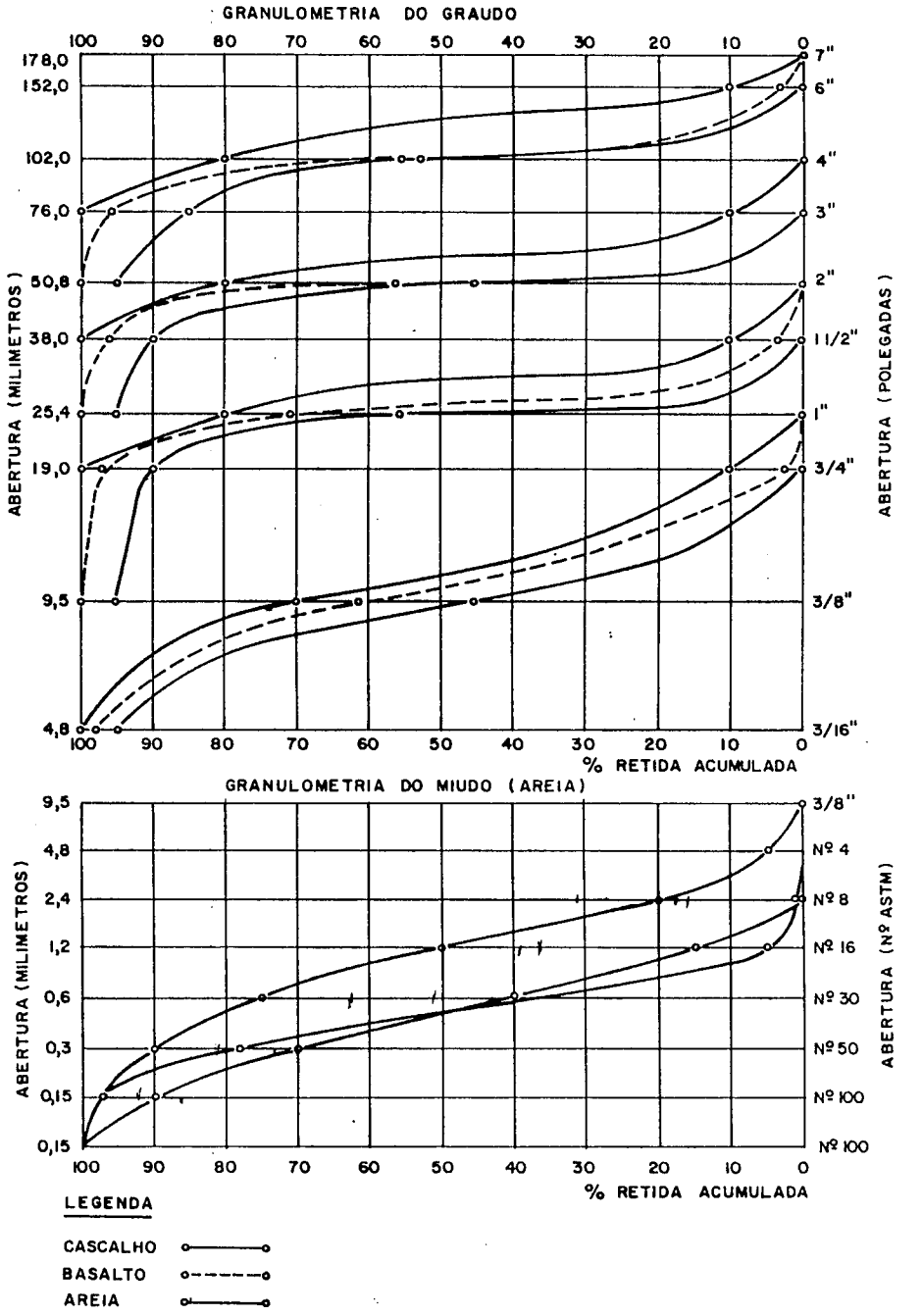


Figura 4.32 — continuação

Ø MAX. (mm)	PROPORÇÕES CIMENTO/AGREGADO ESTUDADAS	PORCENTAGEM DE AGREGADO MIÚDO EM VOLUME NO AGREGADO TOTAL.					
76	1 : 10	24	26	28	30	–	–
	1 : 14	24	26	28	30	32	–
	1 : 18	–	–	28	30	32	34

Figura 4.33 — Porcentagens de agregado miúdo em estudo

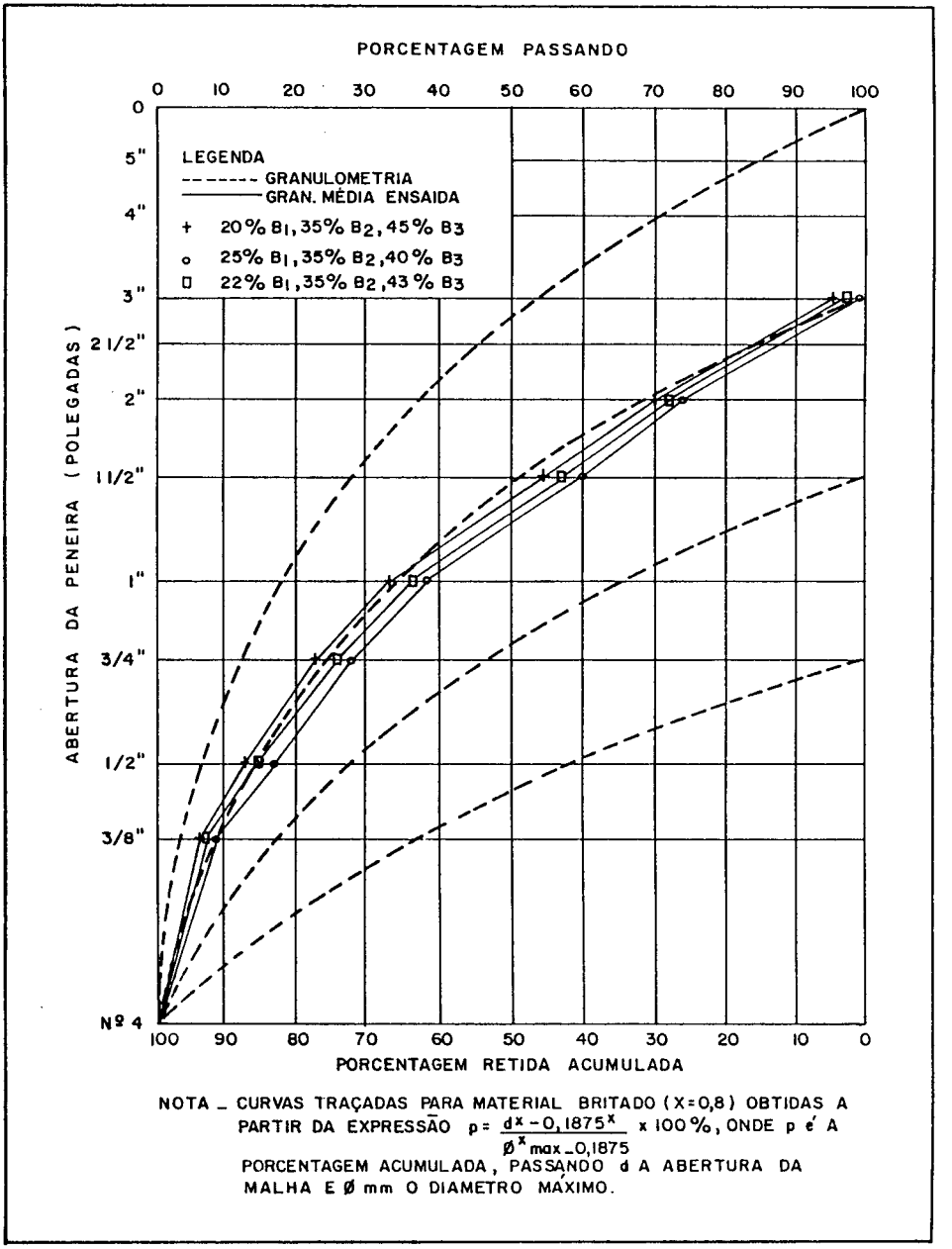


Figura 4.34 — Estudo gráfico da distribuição do agregado graúdo

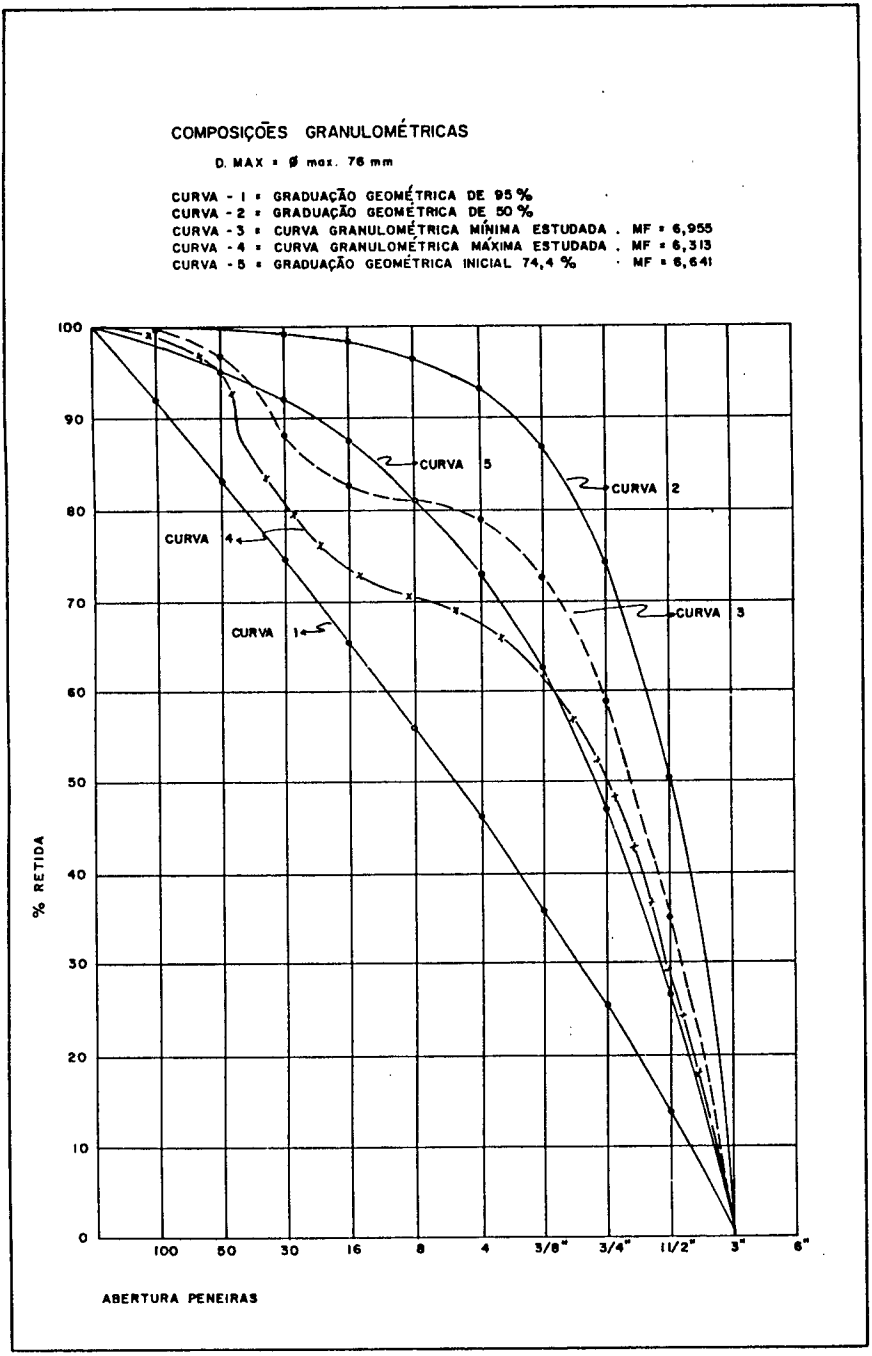


Figura 4.35 — Comparação das curvas granulométricas extremas com as graduações geométricas

REFERÊNCIA FIG. 4.38	A/Ceq	AR ℓ/m^3	COMPOSIÇÕES DAS MISTURAS — kg/ m^3							CONCRETO FRESCO				TENSÃO MPa
			B3	B2	B1	AREIA	CIMENTO	POZOLANA	ÁGUA	AR %	TEMP. °C	TRAB. (cm)	EXSUDAÇÃO %	7 DIAS
A	0,60	33,7	730,8	568,4	324,8	621,4	131,8	44,7	113,0	4,4	25	2,7	15,0	60
B	0,60	34,9	649,8	568,4	406,0	618,2	131,5	44,9	113,0	4,5	24	3,0	11,0	83
C	0,60	34,0	698,3	568,4	357,3	620,1	131,8	44,7	113,0	4,8	24	2,8	8,6	83

Figura 4.36 — Dados da composição e resultados obtidos para as combinações dos agregados graúdos

TRAÇO	% AREIA VOLUME	FATOR A/C MASSA EQUIV.	M.F. MISTURA	AR ℓ/m^3	COMPOSIÇÃO (SSS) – kg/m^3								CONCRETO FRESCO			
					B3 76mm	B2 38mm	B1 19mm	PEDRISCO	AREIA	CIMENTO	POZOLANA	ÁGUA	AR %	TEMP. °C	SLUMP cm	RESISTÊNCIA MPa
1:10	24	0,479	6,842	33,6	737,8	600,3	377,3	126,4	379,5	166,1	56,8	113,7	3,9	24	3,1	27,4
1:10		0,484	6,740	33,8	717,5	584,1	367,1	136,8	410,5	165,4	56,4	114,7	3,7	23	3,2	30,2
1:10	28	0,485	6,636	34,2	698,3	568,4	357,0	147,2	441,7	165,1	56,6	114,5	3,8	24	3,3	28,4
1:10	30	0,491	6,524	34,5	677,3	551,6	346,8	157,5	472,8	164,5	56,6	115,4	4,0	24	2,5	28,2
1:14	24	0,628	6,842	33,2	760,7	619,1	389,2	130,2	390,9	121,9	42,0	109,6	4,5	24	2,9	17,2
1:14	26	0,648	6,740	33,6	736,9	600,9	377,3	141,5	462,0	121,6	41,4	112,6	4,1	23	3,3	14,0
1:14	28	0,656	6,636	33,9	716,9	583,2	366,6	151,2	453,9	121,0	41,7	113,5	3,9	23	3,0	18,2
1:14	30	0,668	6,524	34,2	795,4	565,8	355,5	162,1	484,9	120,3	41,5	115,2	4,2	22	2,9	15,8
1:14	32	0,699	6,421	34,6	671,6	546,4	343,4	171,6	514,6	119,7	41,2	119,7	4,4	24	2,9	15,8
1:18	28	0,878	6,636	33,8	722,4	587,8	369,5	152,3	457,1	94,7	32,8	119,2	4,8	24	3,0	8,3
1:18	30	0,897	6,524	34,1	700,1	570,1	357,9	162,4	488,7	94,7	32,5	121,4	4,0	24	3,0	8,1
1:18	32	0,915	6,421	34,2	678,9	552,4	347,1	173,4	520,2	94,1	32,2	123,0	4,5	24	3,0	7,8
1:18	30	0,934	6,313	34,8	656,6	534,2	335,8	183,5	551,2	93,8	32,0	125,2	4,5	24	2,8	6,8

Figura 4.37 — Características gerais das misturas

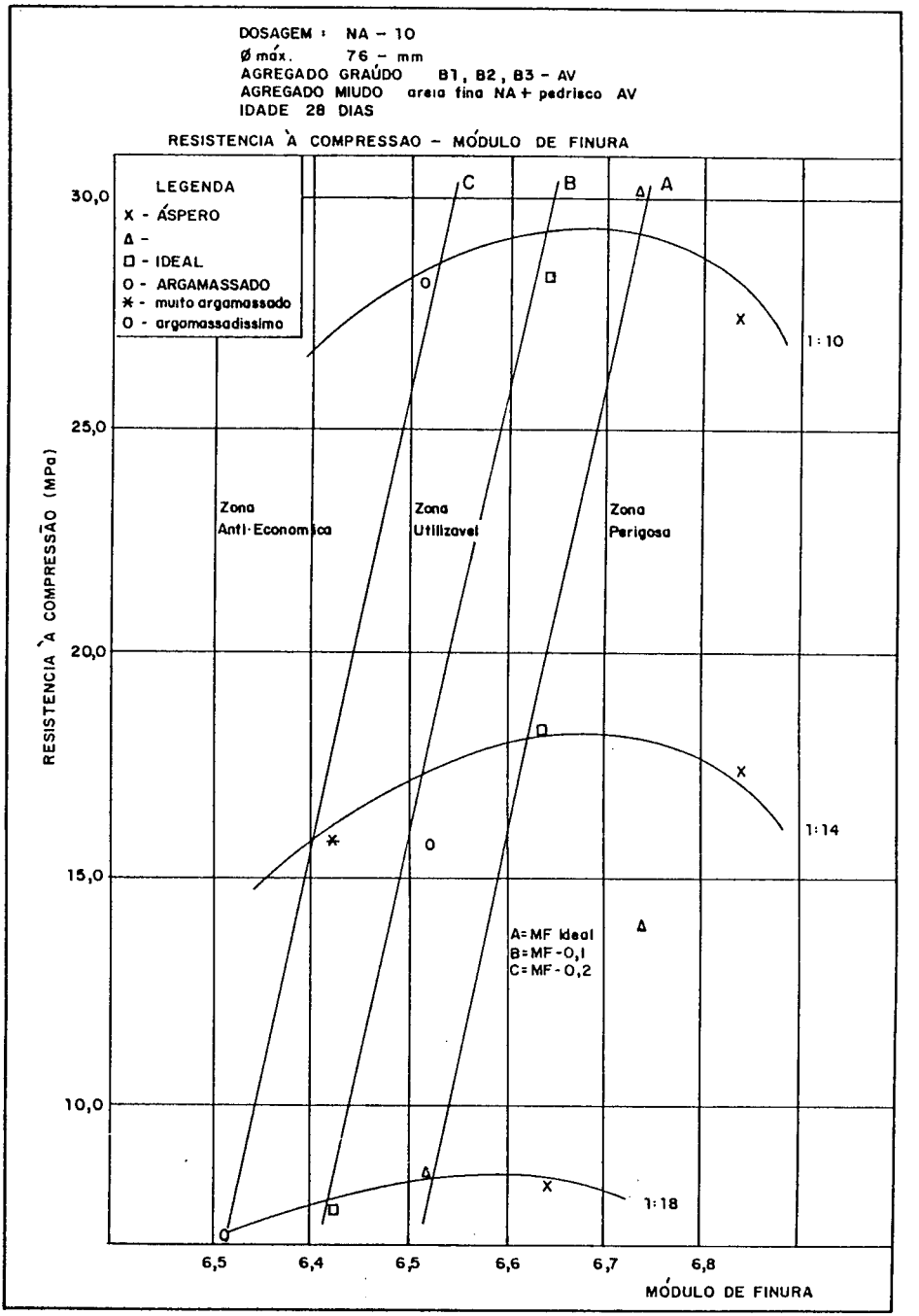


Figura 4.38 — Gráfico da resistência à compressão x módulo de finura da composição de agregados (miúdo e graúdo)

É recomendável a utilização da técnica de incorporação de ar nos concretos leves. Devido a característica de absorção desses concretos deve ser tomado cuidado suplementar na medida do teor de ar incorporado.

O teor de água para os concretos leves varia consideravelmente, dependendo das caractcerísticas dos agregados.

Os concretos leves podem, entretanto, apresentar razoáveis valores de resistência à compressão (4.22) e (4.23) evidenciados na figura 4.39.

CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO LEVE	TEOR DE ÁGUA NA MISTURA Kg/m³	CONCRETO		
		MASSA ESPECÍFICA Kg/m³	RESISTÊNCIA MPa	IDADE (DIAS)
ARGILA EXPANDIDA MASSA ESPECÍFICA 1,15 t/m³ TAMANHO MÁXIMO 20 mm	129	1750	29,9	7
			35,7	28
ESTIROPOR EXPANDIDO (ISOPOR) TAMANHO MÁXIMO 3mm	197	800	3,5	28
	194	950	6,0	
	191	1150	8,5	
	195	1400	14,5	
	235	1600	20	

Figura 4.39 — Características de concretos leves

4.4.2. Concreto pesado

Concreto pesado é um concreto obtido a partir de agregados especiais de elevada massa específica.

O concreto pesado é geralmente usado para isolamento e encamisamento contra radiações e, também, para contrapesos ou estruturas onde se requeira elevada massa específica.

O tipo e intensidade da radiação, normalmente, são fatores importantes para determinar a massa específica e o teor de água do concreto.

Os agregados pesados, normalmente usados, são materiais ferrosos como exemplificado (4.14) (4.15) na figura 4.40.

TIPO DO AGREGADO	MASSA ESPECÍFICA - Kg/m^3	
	DO AGREGADO	DO CONCRETO
LIMONITA	3450 – 3700	2880 – 3360
BARITA	4200 – 4300	3360 – 3680
HEMATITA	4400 – 4600	3850 – 4170
FERRO PELOTIZADO	6000 – 7000	4650 – 6090
AÇO	7850	6400
MAGNETITA	4300 – 4550	3360 – 4170

Figura 4.40 — Agregados e concretos pesados

De maneira geral a escolha do agregado é ditada pelas propriedades físicas, disponibilidade e custo.

4.4.3 Concreto bombeável

O concreto bombeável pode ser considerado como sendo um concreto a ser transportado por tubulações rígidas ou flexíveis, sob pressão, e descarregado diretamente na área desejada.

É a água, no concreto, que transmite a pressão aos demais componentes do concreto quando do bombeamento.

As experiências (4.24) têm mostrado que as graduações dos agregados miúdo e graúdo são os fatores mais importantes para determinação da maior ou menor facilidade de bombeamento do concreto.

Para o concreto ser bombeável o tamanho máximo do agregado deve ser no máximo igual a 1/3 do diâmetro da tubulação. Ao se usar seixo rolado o tamanho máximo do agregado pode chegar a 2/5 do diâmetro da tubulação.

De maneira geral, entretanto, o tamanho máximo do agregado nos concretos bombeáveis não é superior a 38 mm.

A textura e a forma do agregado graúdo afetam consideravelmente as condições de bombeamento do concreto, alterando o teor de pasta.

As propriedades e características do agregado miúdo são muito importantes para o bombeamento. É conveniente que possua de 10% a 30% de material passante pela peneira de malha n.° 50 (0,3 mm).

Essa fração, juntamente com o aglomerante, constitui uma película lubrificante que facilita o bombeamento.

A prática recomenda que o concreto bombeável possua um teor de material, passante pela malha de abertura 0,3 mm, entre 350 kg/m³ a 400 kg/m³. Isto implica, em alguns casos, a necessidade de se adicionar um "Filler" como, por exemplo, um material pozolânico. O módulo de finura do agregado miúdo deve estar entre 2,4 e 3,0.

A figura 4.41 fornece teores de agregado graúdo para os concretos bombeáveis.

TAMANHO MÁXIMO DO AGREGADO (mm)	MÓDULO DE FINURA DO AGREGADO MIÚDO			
	2,40	2,60	2,80	3,00
10 mm	45	43	41	40
12,5 mm	53	51	49	48
19 mm	59	57	55	54
25 mm	64	62	60	59
38 mm	67	66	64	62

Figura 4.41 — Teores percentuais de volume sólido de agregado graúdo, no concreto bombeado

Observa-se que os valores da figura 4.41 levam a concretos sensivelmente mais argamassados que aqueles decorrentes do uso da figura 4.7 (item 4.2.2).

Os fatores água/cimento das misturas de concretos bombeáveis normalmente se situam entre 0,4 e 0,6.

A trabalhabilidade dos concretos bombeáveis geralmente se situa entre 60 mm e 150 mm, sendo que os valores mais comuns estão entre 100 mm e 120 mm.

4.4.4 Concreto com agregado pré-colocado

O concreto com agregados (4.14) pré-colocados é obtido pela colocação, por injeção, de uma argamassa por entre os vazios de uma massa de agregado graúdo, limpo e com certa granulometria, formando um corpo único resistente e durável.

O proporcionamento dos concretos com agregados pré-colocados resume-se a um estudo de dosagem de argamassa. A relação entre os pesos de cimento e agregado miúdo normalmente se situa no intervalo 1:1 e 1:2, sendo que a fluidez da argamassa é controlada por um cone de escoamento (4.14).

4.4.5 Concreto projetado

Concreto projetado é o concreto, ou argamassa, transportado através de uma tubulação e projetado pneumaticamente contra uma superfície.

A relação água/cimento do concreto projetado normalmente se situa na faixa de 0,35 a 0,50 (em massa), o que é razoavelmente baixo comparando-o com os concretos convencionais.

O conreto projetado, quando não requer acabamento, pode ser produzido com agregado miúdo um pouco mais grosso (módulo de finura ao redor de 3,0) que o usual para os concretos convencionais.

O agregado total a ser usado raramente possui tamanho máximo superior a 20 mm. A quantidade de agregados geralmente se apresenta ao redor de 1700 kg/m³.

O teor de aglomerante geralmente oscila entre 250 kg/m³ e 450 kg/m³.

Os teores de água e, eventualmente, de aditivo são determinados fundamentalmente pelas condições de aplicação.

4.5. Referências bibliográficas

[4.1] A Selection of Historic American Pappers on Concrete 1876-1926 — A.C.I. Publication SP-52.

[4.2] A Brief History of Lime, Cement, Concrete and Reinforced Concrete — Jasper O. Draffin — University of Illinois Bulletin — 29/Junho/1943.

[4.3] John Smeaton — A Narrative of the Building and a Description of the Construction of the Eddystone Lighthouse with Stone — 1791.

[4.4] R. Feret — "Etudes sur la Constitution Intimedes Mortiers Hydrauliques" — Bulletin de la Societe D'Encouragement pour L'Industrie Nationale — 1897.

[4.5] F. W. Taylor — S. E. Thimpson — "A Treatise on Concrete: Plain and Reinforced" — 1912.

[4.6] L. N. Edwards "Proportioning the Materials of Mortars and Concretes by Surface Area of Aggregates" — Proceedings A.S.T.M. — March — 1943.

[4.7] "Design of Concrete Mixtures" — Bulletin n.° 1 Structural Materials Research Laboratory — Lewis Institute — Chicago — 1918.

[4.8] A. N. Talbot e F. E. Richart — "The Strenght of Concrete, Its Relation to the Cement, Aggregates and Water" — Bulletin n.° 137 — University of Illinois.

[4.9] Engineering News Record — November 1931.

[4.10] "Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures" — A.C.I. — Committee 207.

[4.11] "Control of Cracking in Concrete Gravity Dams" — William R. Waugh — James A. Rhodes — Journal of the Power Division — A.S.C.E. — 1959.

[4.12] "History of Concrete Proportioning" — SP-46-10 — William A. Gordon — Proportioning Concrete Mixes Publication SP-46 — A.C.I.

[4.13] "Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal and Heavyweight Concrete" A.C.I. — Committee 211.

[4.14] "Construções de Concreto — Manual de Práticas para Controle e Execução" — Francisco Rodrigues Andriolo — Editora Pini — 1984.

[4.15] "Design and Control of Concrete Mixtures" — P.C.A. — Portland Cement Association.

[4.16] "Handbook for Concrete and Cement" — Corps of Engineers — U. S. Army — Waterways Experiment Station Vicksburg — Mississippi.

[4.17] "Determination de la Résistance à la Compression des Mortiers et Bétons" — J. Bolomey — Suisse Romande 1925.

[4.18] "Mixture Proportioning for Mass Concrete" — SP-46-6. John B. Scanlon Jr — Proportioning Concrete Mixes Publication SP-46 — A C.I.

[4.19] "Technical Report n.° 6-819 — "Effect of Fineness of Continuously Graded Coarse Aggregate on Properties of Concrete" — U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg Mississippi.

[4.20] "III Relatório Preliminar de Concreto — Relatório L.C.C-038 — setembro/76 — Obra de Tucuruí" — W. Pacelli de Andrade, F. G. Holanda, J. T. Fontoura, J. M. Manhago.

[4.21] A.C.I — Committee 207 — Mass Concrete for Dams and Other Massive Structure.

[4.22] Relatório C-54/72 — CESP — Dosagem de Concreto com Argila Expandida — Agosto/1972.

[4.23] Relatório C-64/72 — CESP — Dosagem de Concreto Leve com Isopor — setembro/1972.

[4.24] "Pumping Concrete" — A Collection of Articles from Concrete Construction Magazine.

Indice

5.	Amostragem	315
5.1	Generalidades	315
5.2	Conceitos	315
5.3	Amostragem dos Materiais e do Concreto	316
5.3.1	Considerações	316
5.3.2	Amostragem dos Agregados	317
5.3.3	Amostragem do Aglomerante	319
5.3.4	Amostragem do Concreto	319
5.4	Referências Bibliográficas	320

5 Amostragem

5.1 Generalidades

Ao se tentar determinar uma certa propriedade de um material é importante que se defina essa propriedade e a maneira de efetuar essa determinação.

Como visto no item 3 e complementarmente nos itens 6 e 7, quase sempre são adotadas rotinas padronizadas, que detalham os procedimentos para a determinação das propriedades.

Ao se repetir [5.1] os procedimentos de um ensaio, sobre um mesmo material, em várias condições, mas estritamente dentro da rotina estabelecida, obter-se-á uma série de resultados diferentes para a propriedade, sendo que todos os valores são obtidos com mesma acuracidade. Sente-se então que há uma tendência de determinar a média da série de valores obtidos, tomando-a como o valor mais representativo da propriedade do que qualquer de um dos valores individuais. E, ainda, essa média está sujeita a menor variação. Ou seja, ao se ter uma outra série de valores, de determinações semelhantes, ter-se-á a probabilidade de se obter uma outra série de valores, mas a diferença entre os valores médios, provavelmente, é menor que a dos valores individuais.

Nota-se então que a média não é o real valor, sendo uma estimativa do valor verdadeiro.

Decorre, então, que o valor obtido através de um conjunto finito de ensaios é apenas uma aproximação do valor verdadeiro.

Ao ter uma certa quantidade de material para se avaliar as propriedades desse material é comum lançar mão de amostras.

Dessa forma, amostra é uma fração do material coletada de uma grande porção do mesmo, com o objetivo de estimar propriedades ou composição da porção original. O principal objetivo de uma amostra é o de estimar as propriedades de um lote, que se enquadrem ou não dentro de uma faixa especificada ou adotada.

A amostra deve então ser representativa do lote. É imperativo que cada amostra seja coletada cuidadosa e conscientemente e, ainda, em estreita concordância com os procedimentos estabelecidos no plano de amostragem.

A dimensão, ou seja, o tamanho da amostra normalmente é ditada pela quantidade necessária para executar o ensaio. Entretanto, a uniformidade de um material pode ser avaliada coletando frações separadas e misturando-as no laboratório e, por quarteamento, usar uma amostra que de tal modo é chamada de "amostra média" ou "amostra composta".

5.2 Conceitos

A variação em um conjunto de resultados de ensaios é uma das preocupações no plano de amostragem.

Dessa forma, além de se procurar conhecer o valor médio de um conjunto de resultados para se aproximar do valor verdadeiro é importante se conhecer a variação desse conjunto.

A maneira usual e mais conhecida para indicar a variação é através do desvio padrão, que é baseado no quadrado das diferenças entre o valor médio e os valores individuais e numericamente definido por (V—I).

$$S = \sqrt{\frac{\Sigma (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad \text{— (V-I) onde:}$$

S = desvio padrão do conjunto de valores
x_i = valor individual
$\bar{x}$ = média dos valores
n = número de valores do conjunto

A média dos valores é determinada por (V—II)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \quad \text{— (IV-II) sendo:}$$

Xi = o valor individual, desde 1 até n

Outra forma de expressar a variação é através do "coeficiente de variação", que é uma medida adimensional da variação, obtida pela divisão do desvio padrão pela média dos valores, indicando-se em porcentagem. (V—III)

$$Cv = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\% \quad \text{— (V—III) sendo:}$$

Cv = coeficiente de variação (%)

O desvio padrão tem a característica de poder ser usado para indicar a quantidade de valores que podem cair fora ou dentro de certos limites, quando os valores são obtidos aleatoriamente.

5.3 Amostragem dos materiais e do concreto

5.3.1 Considerações

Diferentes problemas ou dificuldades são enfrentadas na amostragem de materiais e do concreto.

Para estabelecer um plano de amostragem deve se saber que o lote tem alguma chance de ser selecionado e que se tenha alguma estimativa dos valores a serem obtidos.

Deve ser, ainda, considerado um balanço entre os tipos e quantidades de amostras e os custos decorrentes dessa amostragem. Esse processo deve ser dinâmico e iterativo.

À medida que se adquire experiência a amostragem pode ser aumentada ou diminuída, com intuito de caracterizar mais acuradamente ou economicamente o material.

Para se estabelecer o plano de amostragem pode ser adotada uma rotina recomendada [5.2], com base em certas formulações e de algum conhecimento empírico. Deve se ter idéia sobre o desvio padrão do conjunto de valores da propriedade em avaliação.

Deve-se estabelecer, aproximadamente, a precisão desejada para a estimativa, ou seja, deve decidir-se por um determinado erro máximo, a ser tolerado, entre a estimativa e o valor que pode ser obtido.

Dessa forma o número "n" de amostras pode ser dado por (V—IV)

$$n = (\xi \cdot S_o / E)^2 \qquad \text{(V-IV)}$$ onde:

n = número de amostras
S_o = estimativa inicial do desvio padrão
E = erro máximo tolerável, entre a estimativa e o resultado obtido
ξ = fator correspondente à probabilidade de que a diferença entre o valor estimado e o resultado obtido seja maior que "E".

Com base em uma distribuição normal os valores ξ podem ser:

Fator de Confiança ξ	**Probabilidade Aproximada**
3	3 em 1000
2,576	10 em 1000 (1 em 100)
2	45 em 1000
1,960	50 em 1000 (5 em 100)
1,645	100 em 1000 (10 em 100)
1,282	200 em 1000 (20 em 100)

Algumas vezes o número "n" pode ser avaliado por (V—V)

$$n = (\xi \cdot CV_o/e)^2 \qquad \text{(V-V)}$$ sendo:

CV_o = estimativa do coeficiente de variação
e = erro máximo relativo = $E/\bar{X}_o$, com
$\bar{X}_o$ = estimativa da média

5.3.2 Amostragem dos agregados

A amostragem deve receber a mesma importância que o ensaio decorrente e o amostrador deve, sempre, ser cuidadoso para coletar as amostras, de modo a representar as condições do material.

As amostras [5.3] [5.4] de agregados para estudos preliminares deve representar a jazida escolhida.

As amostras para inspeção devem ser coletadas de preferência do produto final. A amostra coletada em correia transportadora deve [5.3] ser formada (amostra composta) de pelo menos três partes tomadas ao acaso, devendo a correia estar parada.

De modo análogo deve se proceder para coletar amostras no fluxo de descarga de silos ou do fluxo de agregados.

A parte inicial do fluxo de uma correia ou do fluxo de descarga de um silo deve ser desprezada.

A amostragem na pilha de estoque deve ser evitada para não ser influenciada por eventual segregação.

O número de amostras, em um controle de produção, deve ser suficiente para dar uma confiança adequada sobre os resultados.

Nesta oportunidade pode-se citar um exemplo obtido do controle de qualidade executado sobre os materiais na construção da obra da hidrelétrica de Itaipu [5.5].

O plano inicial de controle [5.6] estabelecia que a granulometria e o módulo de finura da areia artificial de basalto britado fosse controlada na saída do britador (usado para produção de areia), através de amostras coletadas horariamente.

Após, aproximadamente, um ano de funcionamento do sistema de britagem efetuou-se uma reavaliação e como exemplo obteve-se [5.5].

— Areia artificial — Linha B (Britador Itaipu)

— Período: 02/01/79 a 26/01/79 — 25 dias, com 20 horas/dia de funcionamento

— Número de amostras — n = 370

— Módulo de finura (média) — MF = 3,72

— Desvio padrão obtivo — S = 0,195

— Coeficiente de variação obtido — CV = 5,24%

Dessa forma o valor mais provável da média, dado por (V-VI), pode ser:

$$\bar{X} - \frac{\xi \cdot S}{\sqrt{n}} \leqslant \bar{X} \leqslant \bar{X} + \frac{\xi \cdot S}{\sqrt{n}} \qquad \text{(V-VI)}$$

sendo que para uma confiança de 99% (10 em 1000) $\xi = 2{,}576$, o módulo de finura se situa entre

$$3{,}72 - \frac{2{,}576 \times 0{,}195}{\sqrt{370}} \leqslant X \leqslant 3{,}72 + \frac{2{,}576 \times 0{,}195}{\sqrt{370}}$$

$$3{,}69 \leqslant X \leqslant 3{,}75 \text{ , e}$$

o número mínimo de amostras admitindo-se que apenas 1 em 100 valores (99% de confiança) tenha valor superando o erro máximo tolerado, pode ser estimado por (V-V)

$$\eta = \left(\xi \cdot \frac{CV}{e}\right)^2 \text{ com}$$

$$e = \text{erro relativo} = \frac{\text{E (erro máximo permitido)}}{\text{X (valor médio)}} = \frac{0{,}10}{3{,}82} =$$

$= 2{,}7\%$ logo

$$\eta = \left(2{,}576 \times \frac{5{,}24}{2{,}7}\right)^2 \cong 25 \text{ amostras}$$

Observa-se, pelo exposto acima, que para o controle através do módulo de finura da areia artificial, no período de 02/01/79 a 26/01/79, seria necessário apenas 25 amostras, ou seja, um ensaio por dia. Após essa avaliação, o plano de amostragem foi redimensionado.

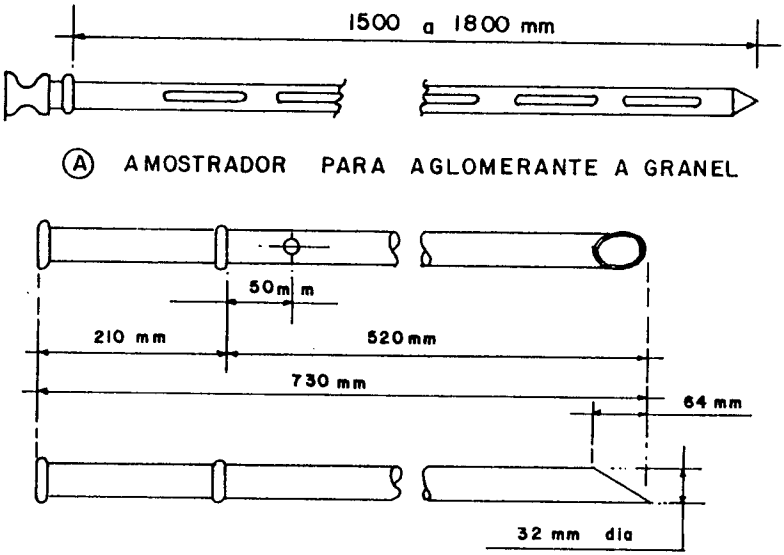
5.3.3 Amostragem do aglomerante

O material pozolânico, para diversos técnicos, tem sido considerado como um aditivo que se adiciona à mistura. Entretanto, para efeitos de amostragem está sendo considerado neste item, juntamente com o aglomerante.

A amostragem do aglomerante pode ser feita de acordo com rotinas estabelecidas [5.7] [5.8] e aceitas.

As amostras podem ser obtidas nos diversos tipos de fornecimento. Assim é que pode ser coletada no transportador que armazena o material a granel. Nesse processo, adota-se o procedimento da "amostra composta". Da mesma forma pode ser feito no sistema transportador desde o depósito e os pontos de descarga.

A amostra de aglomerante em sacos é feita com auxílio de tubo amostrador mostrado na figura (5.1).



Ⓐ AMOSTRADOR PARA AGLOMERANTE A GRANEL

Ⓑ AMOSTRADOR PARA AGLOMERANTE EM SACOS

TUBOS AMOSTRADORES

Figura 5.1 — Tubos amostradores

O dimensionamento do número de amostras pode ser feito de maneira análoga à descrita em 5.3.2.

5.3.4 Amostragem do concreto

A amostragem do concreto pode ser feita por meio de rotina estabelecida [5.9] [5.10] e comumente aceita.

Os procedimentos usados para amostragem do concreto fresco dependem em muito do equipamento de onde se coleta a amostra.

Ao extrair amostras a partir de caminhões betoneira deve-se obter incrementos a cada terça parte do fluxo de descarga. Deve ser entendido que não é prudente obter amostra nem do início da descarga nem do fim do fluxo. Quando o procedimento de obter incrementos a cada terça parte for impossível, pode-se coletar amostra da parte central da mistura.

A amostra deve ser coletada cortando-se o fluxo de descarga de concreto.

Os incrementos devem ser homogeneizados, compondo-se a amostra.

Para a extração de amostras de misturadores e pavimentadores, toda a betonada deve ser descarregada, sendo que se coletam pelo menos 5 incrementos em diferentes pontos do material descarregado.

Para a coleta de amostras em misturadores estacionários pode se proceder como para extração de amostras em caminhão misturador.

As amostras devem possuir uma quantidade de material de modo a se poder efetuar os ensaios programados.

Se o concreto possuir agregados de tamanho máximo (Ø máx) superior a 38 mm, é comum se efetuar um peneiramento sobre a malha de abertura 38 mm, como citado no item 6. Esse procedimento deve ser levado em consideração na análise e interpretação dos resultados, como citado nos itens 6 e 7.

5.4 Referências bibliográficas

[5.1] Concrete and Statiscs — J. D. Mc Intosh.

[5.2] ASTM-E-122 — Standard Recommended Practice for Choice of Sample to Estimate the Average Quality of a Lot Process.

[5.3] ASTM-D-75 — Standard Method of Sampling Aggregates.

[5.4] MB-6-55 — ABNT — Amostragem de Agregados.

[5.5] RT-03/79 — Itaipu Binacional — Relatório Técnico Mensal — Mês de Fevereiro de 1979.

[5.6] RC-14/77 — Itaipu Binacional — Manual para Controle e Inspeção dos Materiais para (e do) Concreto — Usina de Itaipu.

[5.7] ASTM-C-183 — Standard Method of Sampling Hydraulic Cement.

[5.8] MB-508-ABNT — Cimentos — Extração e Preparação de Amostras.

[5.9] ASTM-C-172 — Standard Method of Sampling Fresh Concrete.

[5.10] MB-833 — ABNT — Amostragem de Concreto Fresco Produzido por Betoneiras Estacionárias.

Índice

6.	Propriedades da Mistura de Concreto Fresco	323
6.1	Generalidades	323
6.2	Características e Propriedades da Mistura Fresca	323
6.2.1	Temperatura	323
6.2.2	Trabalhabilidade	325
6.2.3	Ar Incorporado	335
6.2.4	Massa Específica do Concreto Fresco	338
6.2.5	Exsudação	339
6.2.6	Pega	344
6.3	Referências Bibliográficas	346

6 Propriedades da mistura de concreto fresco

6.1 Generalidades

Todas as misturas de concreto devem ser adequadamente dosadas para atender aos requisitos de economia, trabalhabilidade, resistência e durabilidade.

Esses diferentes objetivos induzem a diferenças no proporcionamento como, por exemplo, uma trabalhabilidade ótima que geralmente pode ser obtida com um alto teor de aglomerante, alto teor de agregado miúdo, baixo teor de agregado graúdo e elevado consumo de água, o que indubitavelmente não leva a uma economia e as propriedades podem não ser as desejadas. Desta forma, deve-se tomar precauções para que se consiga um razoável equilíbrio entre as diversas propriedades, economia e condições de aplicação do concreto.

Não resta dúvida que, para manter a economicidade desejada pelo adequado proporcionamento das misturas, é necessário manter um controle efetivo durante a produção do concreto. Somente dessa forma são minimizadas as variações e é obtida a segurança adequada.

Uma das maneiras de efetuar o controle de um concreto [6.1] é sobre a mistura de concreto fresco, o que permite, através de alguns ensaios, manter a uniformidade da mistura durante a produção.

São ensaios de fácil execução e que, através da prática e de parâmetros de correlação, permitem avaliar a mistura de concreto.

6.2 Características e propriedades da mistura fresca

6.2.1 Temperatura

Temperaturas elevadas podem causar problemas adicionais no manuseio do concreto e, ainda, alterar substancialmente as propriedades.

A preocupação quanto aos trabalhos com concreto em clima frio é também importante. Levando em consideração o clima de quase a totalidade do território brasileiro, esta abordagem não é feita neste texto.

O clima quente, por outro lado, traz problemas especiais na produção e lançamento do concreto, pois normalmente uma temperatura elevada acelera a pega (ver item 6.2.6), aumenta a evaporação da água de mistura, reduz a resistência final (ver item 7.2), aumenta a tendência à fissuração e aumenta o teor de água da mistura como evidencia a figura 6.01 de [6.2].

Os efeitos indesejáveis do clima quente no concreto podem ser minimizados pelo pré-resfriamento dos ingredientes, de modo a manter a temperatura do concreto em níveis desejáveis e aplicando uma cura logo após a concretagem.

A avaliação da temperatura do concreto fresco não é baseada em uma metodologia normalizada, como para as demais propriedades.

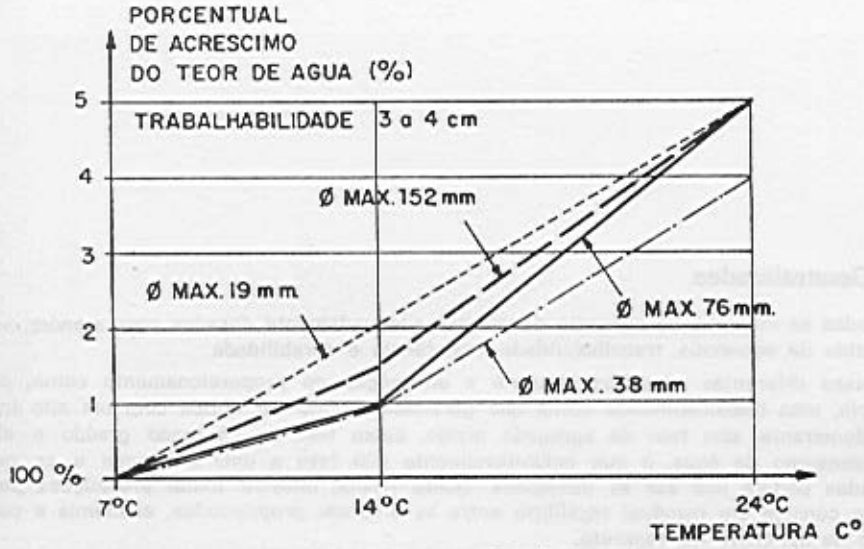


Figura 6.1 — Variação do teor de água da mistura, com a variação da temperatura, para uma certa trabalhabilidade [6.2]

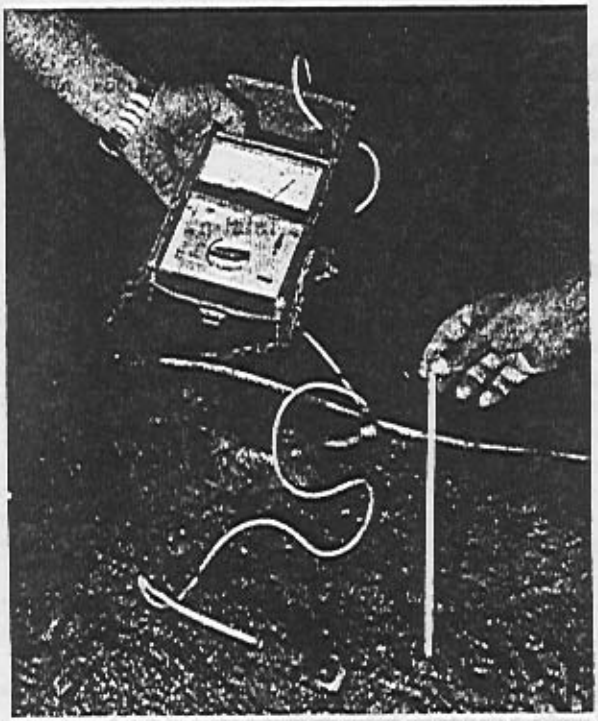


Figura 6.2 — Tomada de temperatura do concreto através de termômetro eletrônico ou de vidro

A determinação da temperatura é feita pela introdução do bulbo de um termômetro na massa de concreto ou pela inserção de um sensor, de um medidor elétrico ou eletrônico, como mostra a figura 6.02.

O instante preciso para a medida da temperatura do concreto deve ser orientado pelo tipo de refrigeração usado. Por exemplo, quando se usa apenas água gelada e gelo a medida de temperatura do concreto não deve ser efetuada antes de haver decorrido aproximadamente 20 minutos após a mistura do concreto. Isto porque as partículas dos agregados podem estar refrigeradas somente na superfície.

6.2.2 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade de um concreto pode ser entendida como sendo a facilidade com a qual o concreto pode ser misturado, manuseado, transportado, colocado e compactado com a menor perda de homogeneidade. Termos como consistência, plasticidade, coesão e fluidez expressam elementos de trabalhabilidade.

A trabalhabilidade de uma betonada de concreto depende, sobretudo, das características e da proporção relativa dos vários componentes, ao passo que o grau de trabalhabilidade, necessário para o lançamento e adensamento adequados a uma estrutura, depende dessa estrutura em termos de armadura e geometria. Seções delgadas, relativamente densas ou com muitas peças embutidas, requerem concreto de elevada trabalhabilidade. Por outro lado, misturas com baixa trabalhabilidade podem ser lançadas em estruturas massivas e adensadas por vibradores adequados. Isto quer dizer que o grau de trabalhabilidade depende do tipo e condições da estrutura e de lançamento e, a capacidade de trabalhabilidade do concreto depende dos materiais e de como eles são dosados.

O elemento da trabalhabilidade que indica a maior aspereza de um concreto é a coesão. Concretos finos (com pequeno Ø máx.) são normalmente mais consistentes que concretos grossos. Os concretos com agregados britados são mais ásperos que concretos com seixos arredondados e tendem a segregar mais facilmente. A areia grossa causa aspereza no concreto. A água de exsudação é um índice que demonstra a maior ou menor capacidade de segregação.

Vários fatores podem alterar consideravelmente a trabalhabilidade das misturas. Dentre os fatores comumente controláveis pode-se citar:

— quantidade de água;
— quantidade e qualidade dos aglomerantes;
— temperatura;
— quantidade e qualidade dos agregados;
— tipos e quantidades de aditivos.

O aumento ou diminuição do teor de água de mistura pode alterar significativamente a trabalhabilidade e a consistência do concreto. Aumentando indiscriminadamente a quantidade de água na mistura pode-se aumentar o abatimento (que é um índice de trabalhabilidade) e tornar a mistura áspera, facilmente segregável e com grande capacidade para sofrer retração por secagem. O acerto da trabalhabilidade e consistência adequada não deve ser, então, feito indiscriminadamente, somente pelo aumento do teor de água.

Uma mistura com baixo teor de aglomerante, chamada de "concreto pobre", normalmente é áspera. Diferenças na finura do aglomerante afetam a trabalhabilidade e consistência do concreto.

A trabalhabilidade pode ser reduzida de forma significativa devido à insolação e ao aumento de temperatura. A perda de trabalhabilidade é severa durante os dias ensolarados, devido à perda de água por evaporação. A temperatura de produção do concreto também afeta a trabalhabilidade, como mostrado em 6.2.1.

A consistência ou fluidez do concreto é um parâmetro importante da trabalhabilidade.

A trabalhabilidade é o parâmetro comumente usado para efetuar o controle da mistura do concreto fresco e pode ser feita de várias maneiras.

A medida mais usual da trabalhabilidade é obtida pelo abatimento do tronco de cone (slump test) [6.3] [6.4] [6.5]. É um método aplicável ao concreto plástico possuindo agregado graúdo não maior que 38 mm. Se o concreto contiver agregados com Ø máx superior a 38 mm os procedimentos são aplicáveis sobre a fração peneirada passante pela malha de abertura de 38 mm.

Para o peneiramento úmido do concreto fresco pode ser usada uma malha, efetuando-se peneiramento manualmente, ou através de um peneirador mecânico semelhante ao mostrado na figura 6.3.

Para a determinação do abatimento pelo tronco de cone é usado um molde como mostrado na figura 6.04 e detalhado na figura 6.05.

A figura 6.06 ilustra a sequência de operações para a moldagem e medida da trabalhabilidade pelo abatimento do tronco de cone, que se vê também na figura 6.07.

Esses procedimentos não são adequados para concretos secos (tipo concreto rolado).

O teor de ar incorporado afeta a trabalhabilidade, o que pode ser evidenciado [6.2] pela variação (aumento ou diminuição) de aproximadamente 3% no teor de água, para cada 1% de variação (diminuição ou aumento respectivamente) no teor de ar incorporado.

Uma outra maneira de avaliar a trabalhabilidade é a do ensaio de remoldagem [6.6] [6.7], que foi desenvolvido por Powers [6.8] em 1932, sendo que a trabalhabilidade é observada através da facilidade ou dificuldade que uma quantidade de concreto fresco requer para a mudança de forma.

Para essa avaliação é usado o conjunto mostrado na figura 6.08, sendo que o molde cônico é preenchido com concreto e desmoldado, após o que coloca-se o disco sobre o topo da massa de concreto e aplicam-se golpes para que essa massa sob ação do peso passe a ocupar o cilindro de remoldagem. O esforço necessário para essa remoldagem é expresso pelo número de golpes aplicados.

É um ensaio de pouco uso no Brasil, se limitando a alguns poucos laboratórios. Não é usado como procedimento para controle. Da mesma forma que o abatimento pelo tronco de cone é limitado a concretos com agregados de Ø máx 38 mm.

Outro modo de se avaliar a trabalhabilidade é através do consistômetro Vebe [6.9] [6.10], que foi desenvolvido na Suécia por V. Bährner (nome Vebe é oriundo das iniciais V. B.) e pela Dynapac Maskin AB (vibro Verken) — Solna.

É uma variante do ensaio de remoldagem e é mais usado para misturas secas, pois a relação da trabalhabilidade e consistência depende do método usado para compactação.

Para o ensaio V. B. ou Vebe é usado o aparelho mostrado na figura 6.09 e esquematizado na figura 6.10. O concreto fresco é moldado no interior do tronco de cone e o molde retirado, sendo que se assenta o disco sobre o topo do concreto recém-desmoldado e liga-se a mesa vibratória e o cronômetro simultaneamente. A remoldagem termina quando o disco móvel estiver em contato, completo, com a massa de concreto, então a máquina e o cronômetro são desligados. Isto é avaliado visualmente sendo um ponto questionável do ensaio, o que pode propiciar algumas divergências nos tempos medidos.

Uma outra maneira de avaliar a trabalhabilidade é através do fator de compactação, ou adensamento, que é usado pelas normas britânicas [6.9] [6 11]. O fator de compactação ou grau de adensamento é medido pela relação da massa específica realmente obtida no ensaio e a que seria obtida com o mesmo concreto plenamente compactado.

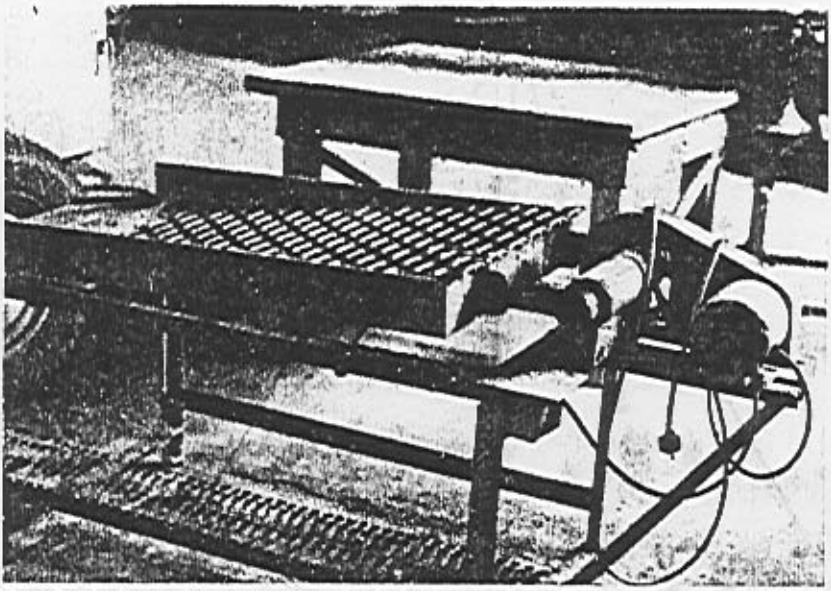


Figura 6.3 — Penetrador mecânico para separação da fração superior a 38 mm

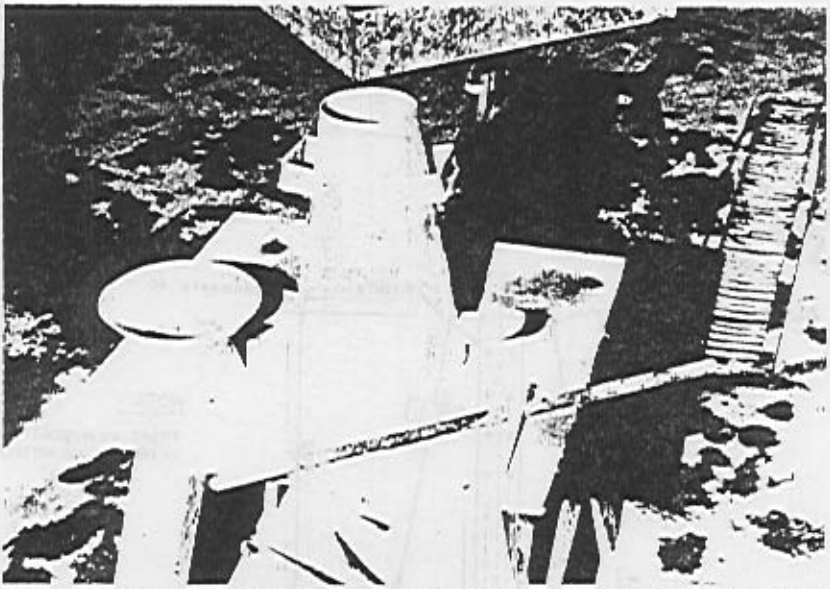


Figura 6.4 — Molde para o ensaio de abatimento do tronco de cone, vendo-se o molde, haste metálica para o apiloamento, o colar para auxiliar no enchimento e régua sobre chapa metálica

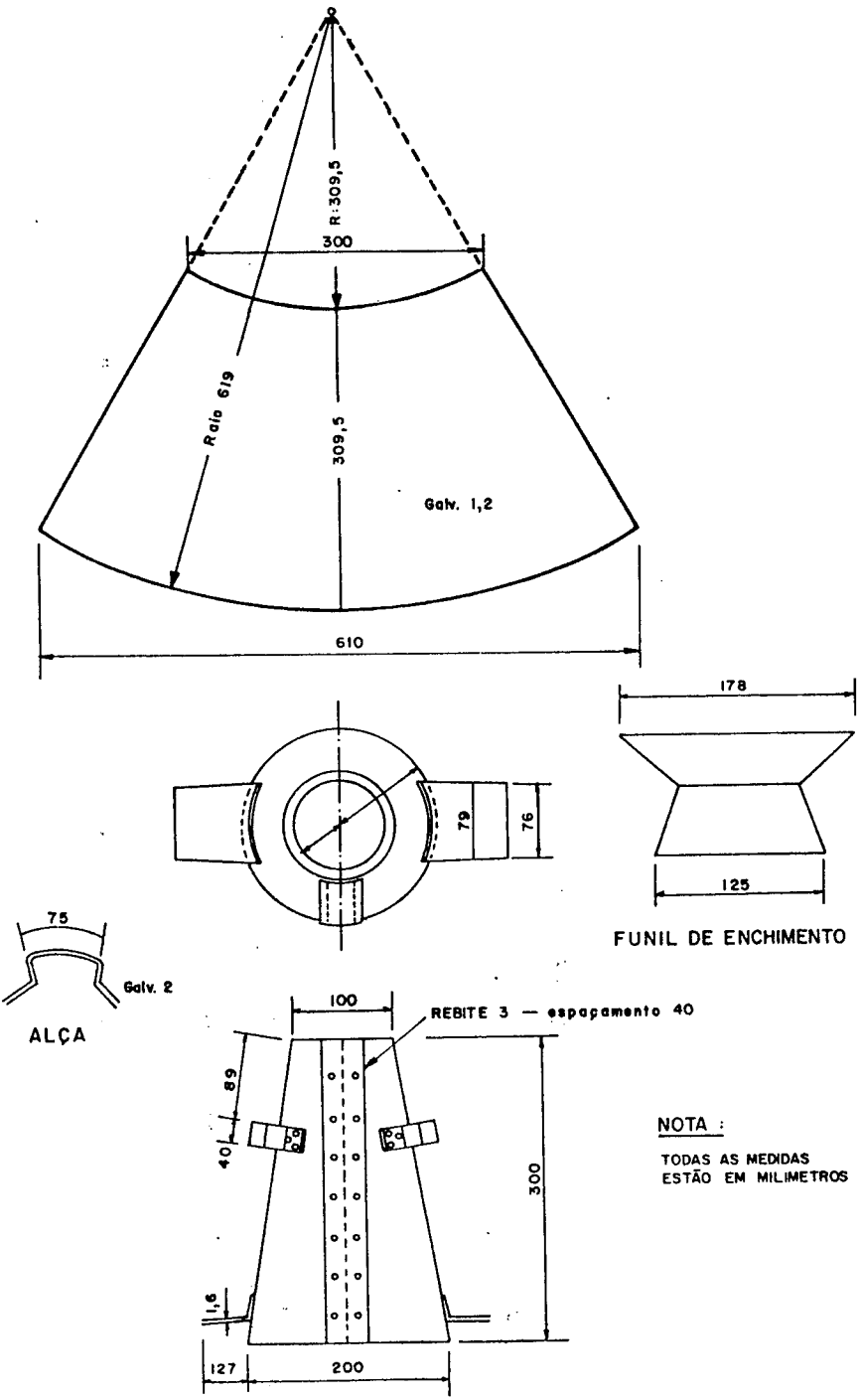


Figura 6.5 — Molde para ensaio do abatimento

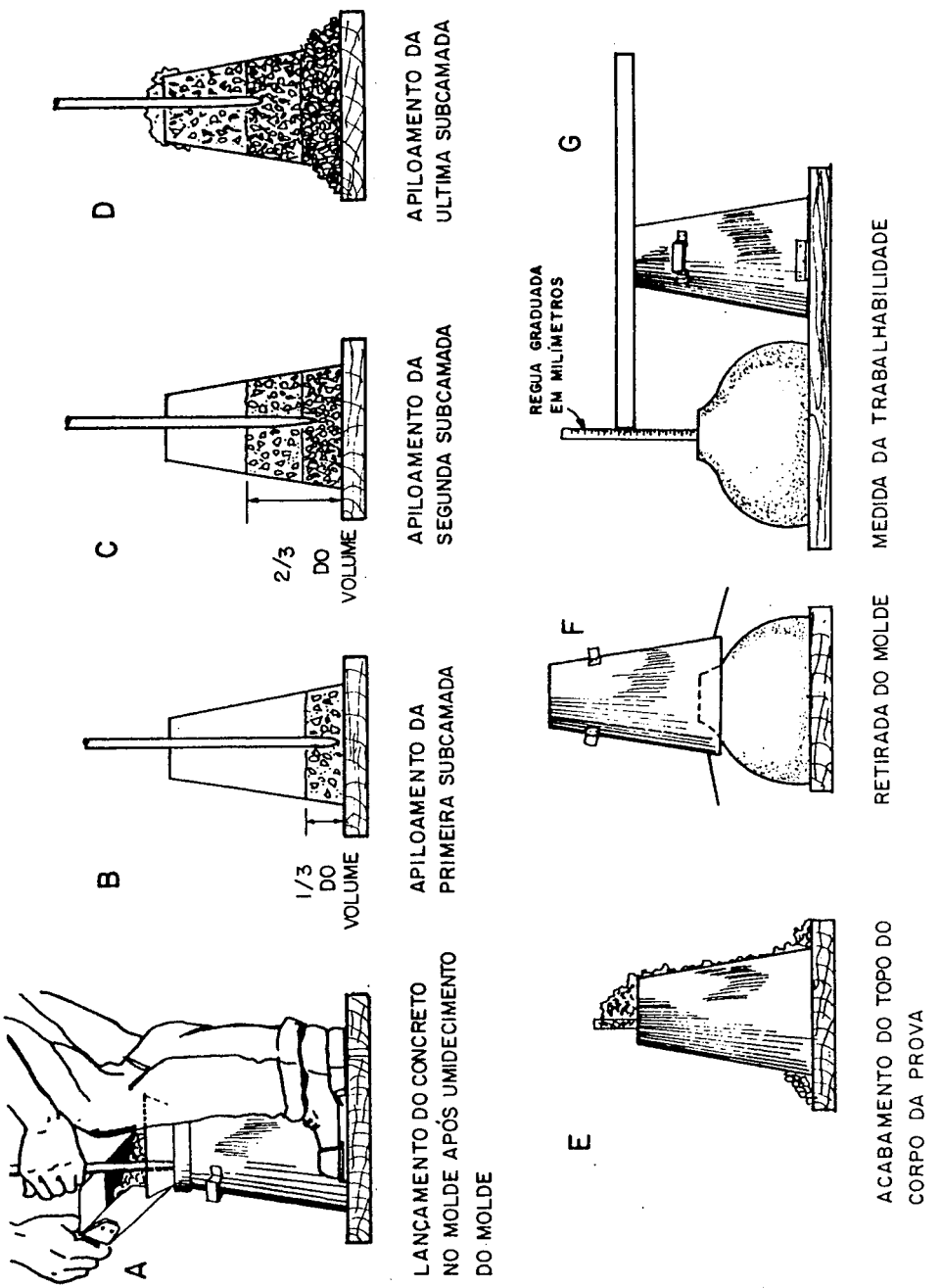


Figura 6.6 — Sequência de procedimentos para medida do abatimento

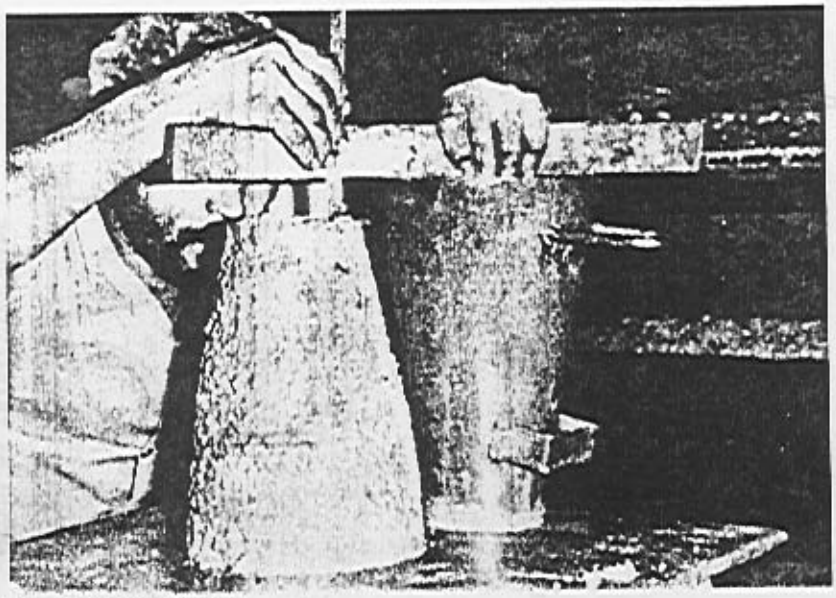


Figura 6.7 — Medida do abatimento

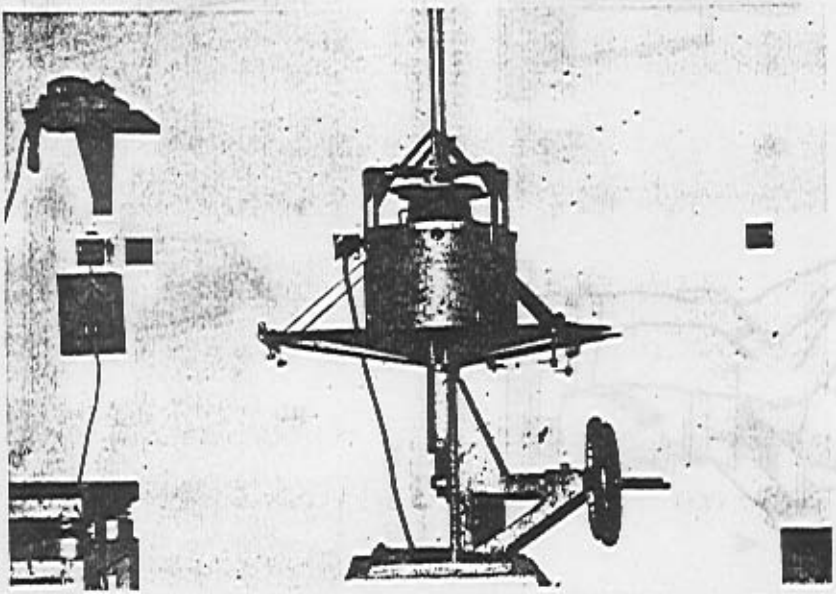


Figura 6.8 — Aparelho para o ensaio de remoldagem, constituído de cone de abatimento, cilindro de remoldagem, haste móvel com disco de contato e mesa de fluidez

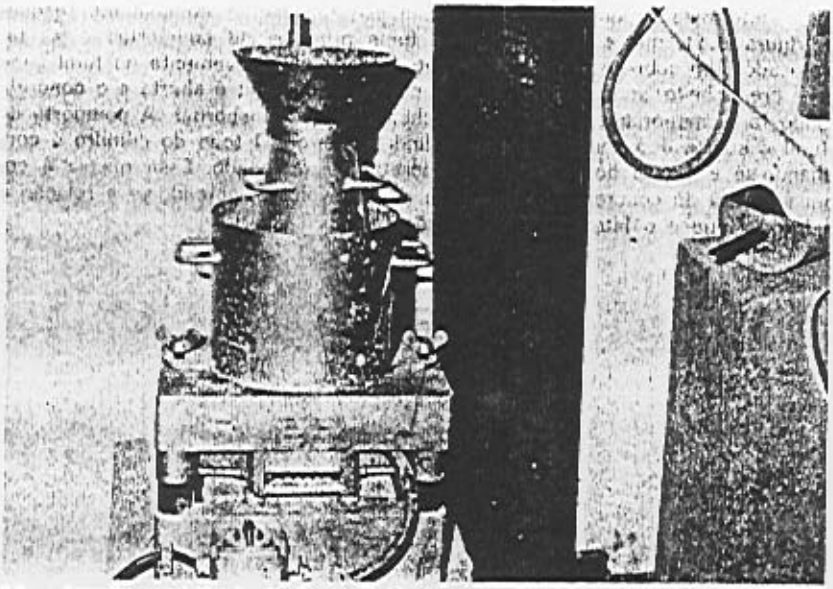


Figura 6.9 — Aparelho consistômetro V. B. constituído de mesa vibratória, cone de moldagem, anel para enchimento, haste e disco para adensamento e cilindro de remoldagem

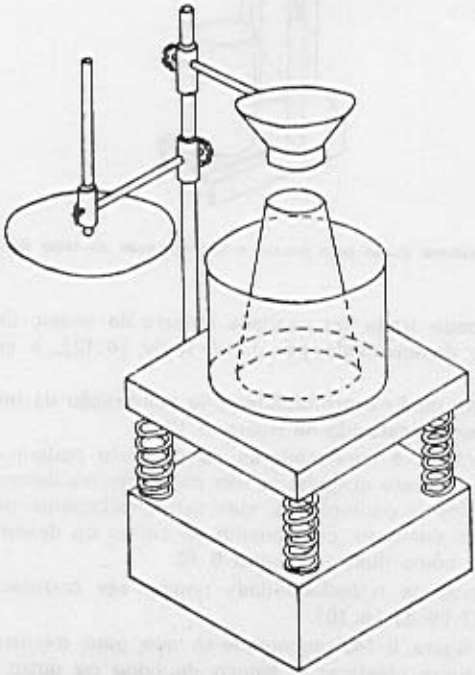


Figura 6.10 — Vista esquemática do aparelho V. B. para ensaio de consistência

Para a determinação do fator de compactação é usado o equipamento esquematizado na figura 6.11, que consiste de dois funis providos de comportas e de um cilindro colocados um sobre o outro. O concreto é colocado suavemente no funil superior, de modo a preenche-lo, sem compactação. A comporta do funil é aberta e o concreto cai no segundo funil, menor que o primeiro, enchendo-o até transbordar. A comporta do segundo funil é aberta e o concreto cai no cilindro inferior. O topo do cilindro é cortado, determinando-se a massa do volume de concreto nesse estado. Essa massa é comparada com a massa de concreto, adensado no mesmo volume, obtendo-se a relação entre os dois fatores que é o fator de compactação.

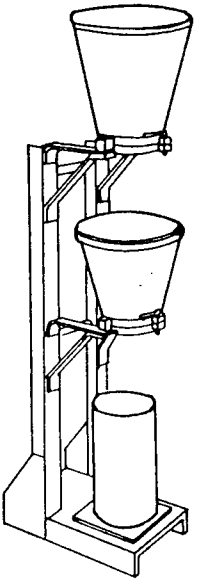


Figura 6.11 — Esquema do sistema usado para ensaio e determinação do fator de compactação

A trabalhabilidade pode ainda ser avaliada através do ensaio de penetração da bola de Kelly, pelo processo desenvolvido por J. W. Kelly [6.12], e se aplica a concretos plásticos.

O ensaio consiste em medir a profundidade de penetração de uma massa semi-esférica, através do sistema esquematizado na figura, 6.12.

As pessoas com prática e conhecedoras de concreto podem avaliar a trabalhabilidade e consistência do concreto através do uso da colher ou desempenadeira de pedreiro, procedendo não de forma padronizada, mas satisfatoriamente prática. Corresponde a ação de "desempeno" do concreto, com auxílio de colher ou desempenadeira, avaliando-se a coesão da mistura, como ilustra a figura 6.13.

Os vários parâmetros de trabalhabilidade podem ser correlacionados como ilustra a figura (6.14) de [6.2] [6.9] [6.10].

Pelas medidas da figura 6.14, recomenda-se que para misturas secas seja aplicado o Vebe e para misturas plásticas o tronco de cone ou outro procedimento atende satisfatoriamente.

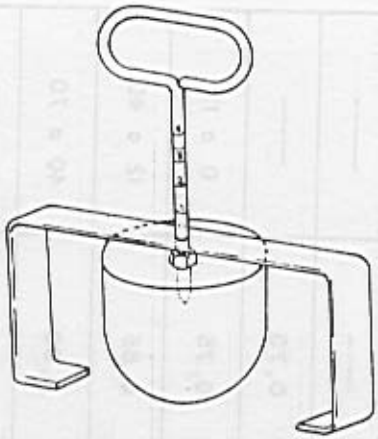


Figura 6.12 — Esquema da bola de Kelly para ensaio de consistência em concretos plásticos

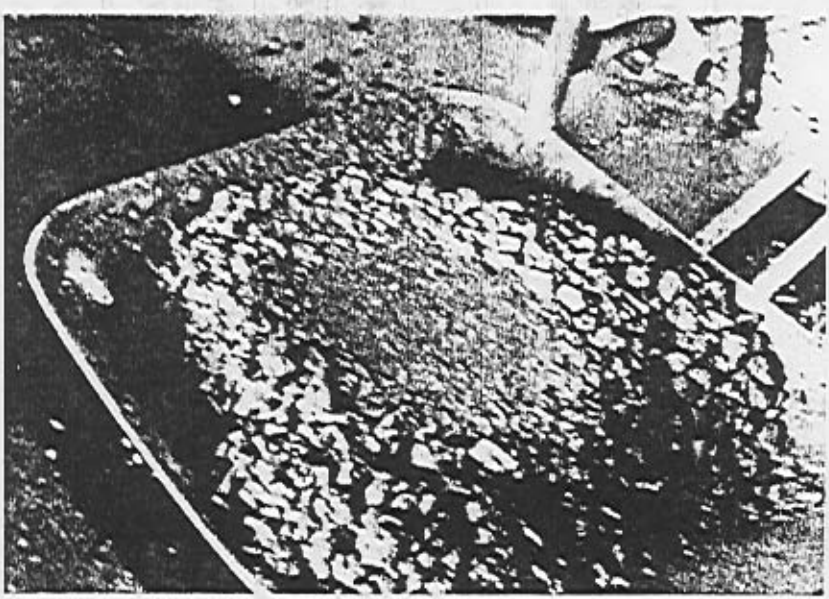


Figura 6.13 — Avaliação da consistência pela ação da colher

CONDIÇÃO DA CONSISTENCIA DO CONCRETO	ABATIMENTO PELO TRONCO DE CONE (mm)	VEBE (SEG)	FATOR DE COMPACTAÇÃO	BOLA DE PENETRAÇÃO
EXTREMAMENTE SECO	——	32 a 18	——	——
MUITO SECO	——	18 a 10	0,70	——
SECO	0 a 25	10 a 5	0,75	0 a 12
PLASTICO-SECO	25 a 75	5 a 3	0,85	12 a 40
PLASTICO	75 a 125	3 a 0	0,90	40 a 70
FLUIDO	125 a 175	——	0,98	70 a 95

Figura 6.14 — Correlações das medidas de consistência

6.2.3 Ar incorporado

O ar incorporado no concreto pode ser entendido como o ar introduzido intencionalmente através de um agente adequado, diferindo do conceito de ar aprisionado pelas dimensões das bolhas, visto que as bolhas produzidas pelo agente incorporador de ar são microscópicas — (ver item 3.5), ao passo que as de ar aprisionado são maiores. Outra característica da incorporação de ar é que as minúsculas bolhas não constituem canalículos ou capilares, permanecendo isoladas. Desta forma os concretos com ar incorporado tornam-se mais impermeáveis do que concretos sem ar incorporado.

A incorporação de ar no concreto melhora a trabalhabilidade, como pode ser visto na figura 4.6. Aumentando a quantidade de finos no concreto (quer seja aumentando o consumo de aglomerante, quer seja pelo uso de material mais fino, de maior finura) há uma maior dificuldade de incorporação de ar requerendo uma maior quantidade de aditivos.

O aumento da temperatura requer [6.2] um aumento do consumo de aditivo incorporador de ar, para manter uma certa incorporação. Ou seja, aumentando-se a temperatura diminui-se a incorporação de ar.

A determinação do teor de ar incorporado no concreto fresco é fundamental para manter a qualidade e uniformidade da mistura.

Há três métodos para a determinação do teor de ar de um concreto fresco.

O método gravimétrico [6.13] [6.14] consiste em comparar a massa específica de um concreto fresco adensado contendo ar com a massa específica do concreto fresco sem ar (calculado teoricamente). Essa determinação é feita em conjunto com a determinação da massa específica do concreto fresco, descrita no item 6.2.4, e é calculada por (VI-I).

$$TA\% = \left(\frac{MsA - McA}{MsA}\right) \times 100\% \qquad \text{(VI-I)} \quad \text{onde}$$

TA = Teor de ar (porcentagem de vazios) no concreto fresco

MsA = Massa específica teórica do concreto, calculada a partir da composição (kg/m³)

McA = Massa específica do concreto fresco (kg/m³)

Esse procedimento é o mais antigo e atualmente é pouco usado, sendo que apresenta erros de 1% a 2% no teor de ar calculado, decorrente dos eventuais erros na determinação da massa específica.

Não é recomendado como um procedimento para controle de uniformidade da mistura de concreto fresco.

O método volumétrico [6.15] consiste em determinar a diferença entre os volumes de uma amostra de concreto fresco antes e depois da eliminação do ar incorporado, de maneira semelhante ao que se faz com um picnômetro (ver item 3). O ar é eliminado por agitação, rolagem (o método é também conhecido nas Normas Americanas por Roll-A-Meter). É um processo de difíceis e cansativas operações de manuseio, sendo mais adequado para concretos de agregados leves.

É pouco usado para concretos de massa específica normal.

O método mais usado e mais adequado para o controle, quer seja em campo, quer seja em laboratório é o da pressão [6.16] [6.17]. É o método de melhor acuracidade, exceto para concretos com agregados leves.

O procedimento baseia-se na lei de Boyle para a determinação do teor de ar incorporado pela relação da pressão e volume, a uma dada temperatura.

O método da pressão pode ser aplicado por meio do uso de dois medidores usuais, vistos na figura 6.15.

O medidor do tipo com "pescoço" é constituído por uma campânula de medida e um sistema de vedação. O princípio de operação desse medidor consiste na introdução de água até uma determinada altura, acima da amostra de volume conhecido de concreto, e na aplicação de uma pressão de ar preestabelecida sobre a água. A determinação consiste na redução do volume de ar da amostra de concreto, pela observação da quantidade de água que penetra sob a pressão aplicada, sendo que essa quantidade é calibrada em termos de porcentagem de vazios (de ar) na amostra de concreto.

O medidor com sistema de medição independente, visto na figura 6.16, é constituído por uma campânula de medida e um sistema de leitura, conectados, porém de uso independente. O princípio de operação desse medidor consiste na adição de um volume conhecido de ar, sob pressão estabelecida em uma câmara estanque, a um volume desconhecido de ar na amostra de concreto, sendo o manômetro calibrado em termos de porcentagem de ar para as pressões lidas junto aos volumes.

Tendo em vista que esse sistema possui a parte de leitura separada do recipiente de manuseio da amostra, é o processo mais adequado ao controle, quando se realiza grande quantidade de ensaios.

De maneira geral, todos os processos são aplicáveis a concretos com agregados de Ø máx não superior a 38 mm.

Ao se trabalhar com concretos com agregados de Ø máx superior a 38 mm, o ensaio é feito sobre a fração passante pela malha de 38 mm.

Dessa forma o teor de ar incorporado no concreto integral é calculado por (VI-II).

$$A_i = \frac{100 \times A_p \times V_p}{100\ V_i - A_p \cdot V_a} \qquad \text{(VI-II)} \qquad \text{onde}$$

A_i = teor de ar no concreto integral (%)

V_p = volume absoluto dos ingredientes da mistura que passam pela malha de 38 mm, livre de ar, determinado pelas massas iniciais da betonada (m^3).

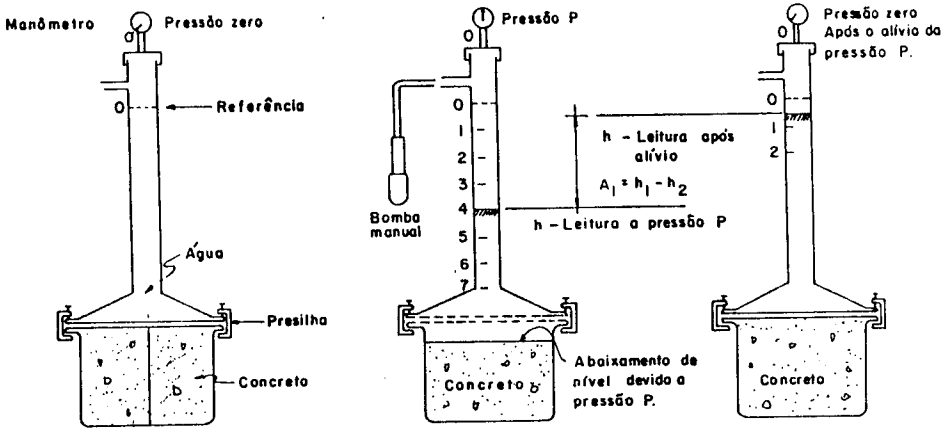
V_i = volume absoluto do concreto integral (m^3), sem ar

V_a = volume absoluto dos agregados maiores que 38 mm determinados pelas massas iniciais da betonada (m^3)

A_p = teor de ar na amostra de concreto

O cálculo pode ser melhor entendido pelo esquema abaixo:

Material:	Volume absoluto: (m^3)		
cimento material pozolânico (se usado) água (e aditivos) areia agregado graúdo < 38 mm passante)	Volume argamassa	V_p (volume da fração passante)	V_i
agregado graúdo > 38 mm	V_a		
TOTAL			V_i

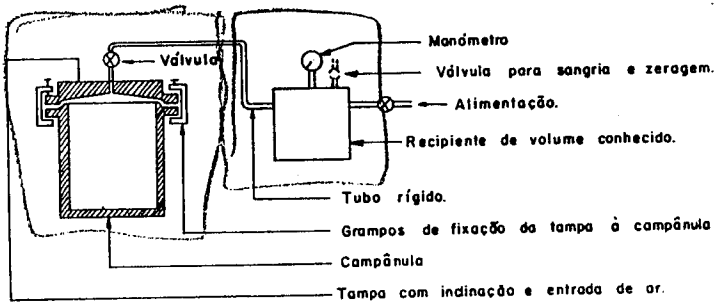


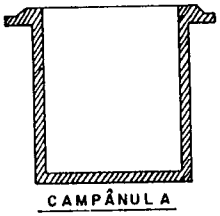
$A_1 = h_1 - h_2$ Quando a Campânula está cheia de concreto.

$G = h_1 - h_2$ Quando a Campânula está só com água e agregado.

G = Fator de correção do agregado.

A = A - G Ar incorporado ao concreto





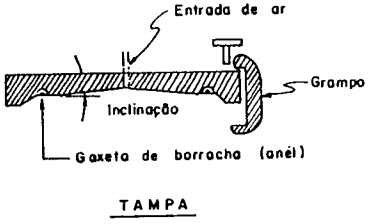


Figura 6.15 — Esquema de medidores de ar incorporado

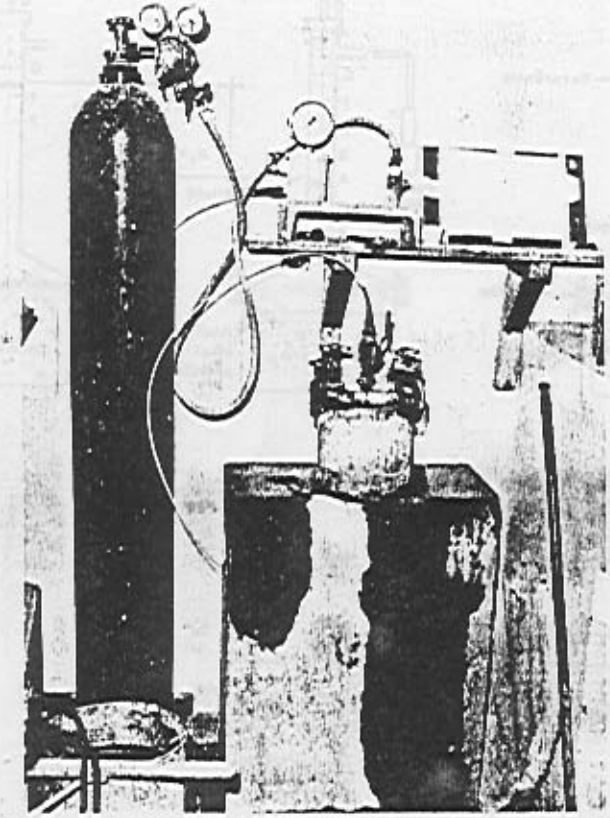


Figura 6.16 — Sistema do medidor de ar incorporado, pelo processo da pressão. Constituído de campânula para amostra, recipiente de medida de pressão, com manômetro e tubo de ar (oxigênio) com válvula reguladora de pressão

6.2.4 Massa específica do concreto frésco

Para assegurar a uniformidade de uma mistura de concreto fresco é usual se determinar a massa específica do concreto fresco, que pode ser, então, usada para determinação do teor de ar incorporado pelo processo gravimétrico (ver item 6.2.3) [6.13] [6.14].

Para a determinação da massa específica do concreto fresco é usado um recipiente de volume conhecido. Normalmente se utiliza da campânula do medidor de ar incorporado, como mostra a figura 6.17.

A amostra de concreto é adequadamente compactada no recipiente de volume e massa conhecida, após o que determina-se a massa de concreto e por diferenças calcula-se a massa específica da amostra.

É um índice de controle, normalmente obtido em concretos com agregados de Ø máx não superior a 38 mm.

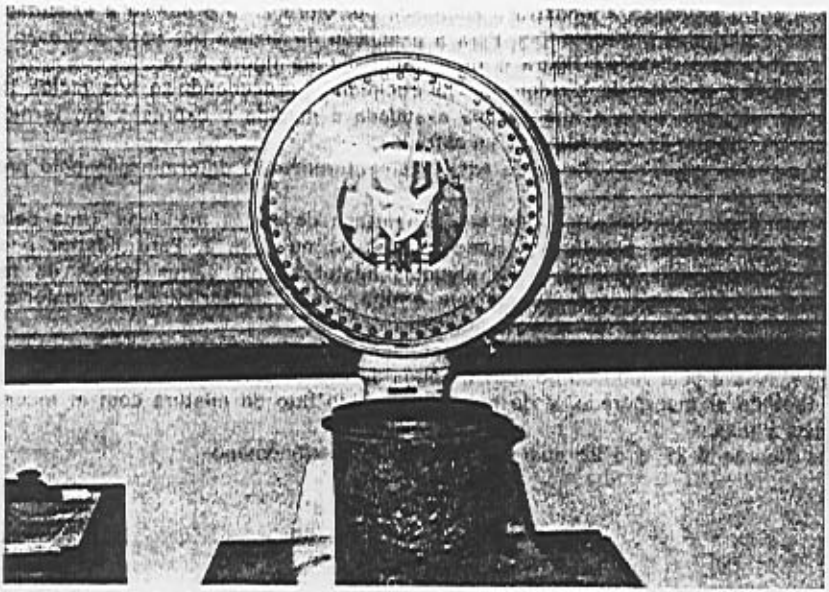


Figura 6.17 — Determinação da massa específica do concreto fresco, adensado na campânula do medidor de ar incorporado (referente à figura 6.16)

6.2.5 Exsudação

Após o concreto ter sido lançado e adensado, ocorre um fenômeno conhecido como exsudação ou sedimentação, quando as partículas sólidas (cimento e agregado) tendem a se mover para baixo (sedimentação) e a água tende a exsudar, atingindo a superfície. A quantidade e a velocidade da exsudação dependem da dosagem do concreto, teor de água, temperatura, finura do cimento, finura do material pozolânico, granulometria do agregado e a ação de certos aditivos. O acabamento é afetado pela exsudação excessiva. A água de exsudação pode afetar a aderência entre os agregados e a pasta, bem como entre a armadura e a pasta.

A exsudação pode ser lembrada como um fenômeno benéfico, pois reduz o teor de água da mistura e consequentemente o fator A/C (ou A/Ceq). Entretanto a exsudação provoca quebra da homogeneidade e integridade da mistura, acarretando inconvenientes.

Devido à exsudação, o topo da camada de concreto tende a ficar poroso e fraco. E, ainda, a exsudação pode fazer com que a água carreie finos do concreto e consequente produção de canalículos permeáveis.

A exsudação do concreto pode durar até que a pasta tenha enrigecido o suficiente para fazer cessar o processo.

Para a determinação da exsudação podem ser adotados dois procedimentos [6.18] [6.19] que diferem basicamente, pelo grau de adensamento. Os dois processos não dão valores correlacionáveis [6.2], para amostras de mesmo concreto.

Por um dos processos a amostra é adensada por apiloamento e o ensaio se procede sem agitação suplementar da amostra colocada, em recipientes semelhantes a bandejas. A água exsudada é retirada por pipeta e medida até o término do fenômeno.

Pelo outro processo a amostra é adensada por vibração e o ensaio é executado com agitações a períodos intermitentes. Para a execução do ensaio por esse processo é usado o equipamento visto na figura 6.18 e detalhado na figura 6.19.

A amostra é colocada e adensada no recipiente, procedendo-se aos ciclos intermitentes de vibração, após o que a água exsudada é medida e expressa em termos percentuais da massa de concreto da amostra.

De maneira geral os valores de exsudação referem-se à determinação pelo processo das vibrações.

A exsudação no concreto pode ser minimizada de várias maneiras. Uma delas é a utilização de material pozolânico, como comentado no item 3. Para ilustrar o fato, a figura 6.20 apresenta resultados de algumas misturas com vários teores de material pozolânico [6.20]. Não resta dúvida que o tipo e as características do material pozolânico têm influências também na exsudação.

A exsudação é, ainda, afetada pelo teor de ar da mistura. Isto ocorre devido a duas parcelas, uma é pela redução do teor de água da mistura (ver item 6.2.2), ao se aumentar o teor de ar incorporado, e de outro modo pelo fato da mistura com ar incorporado ser mais coesa.

As figuras 6.21 e 6.22 ilustram também esse fenômeno.

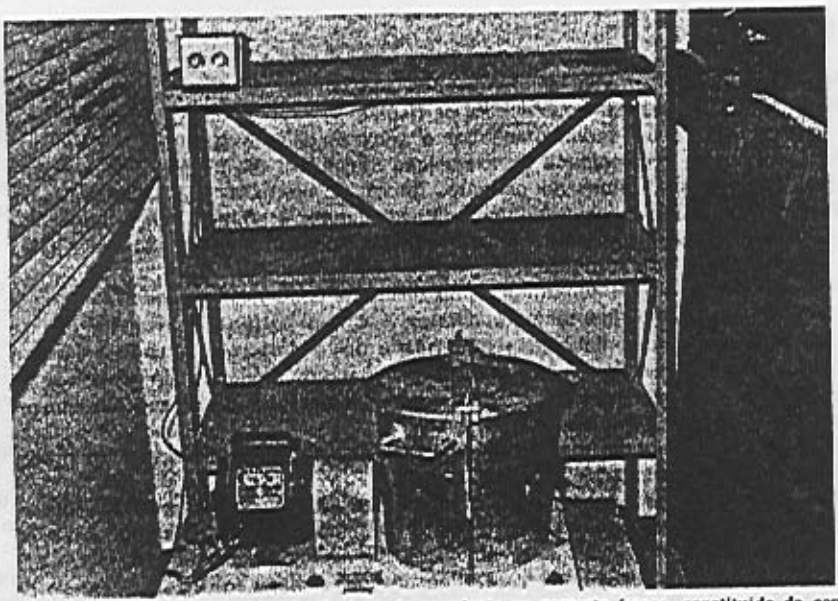
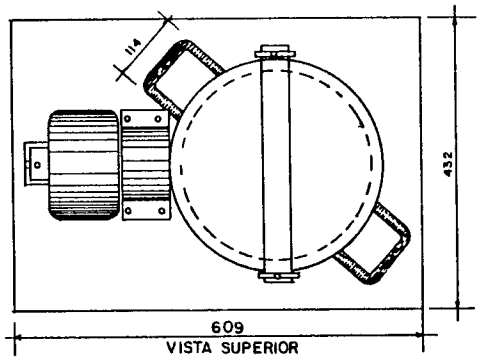
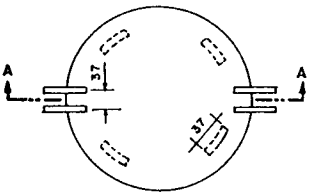
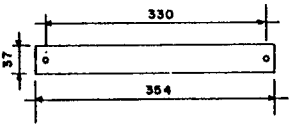
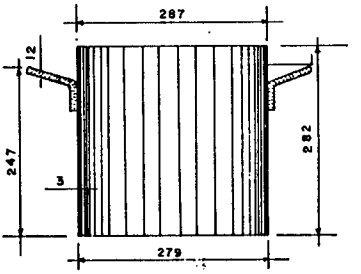


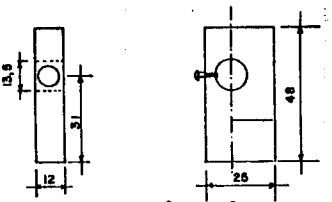
Figura 6.18 — Aparelho para determinação da água de exsudação no concreto fresco, constituído de campânula para amostra, motor com excêntrico para produzir vibração e temporizador automático



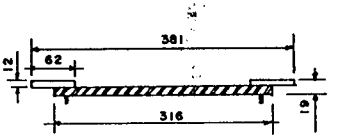


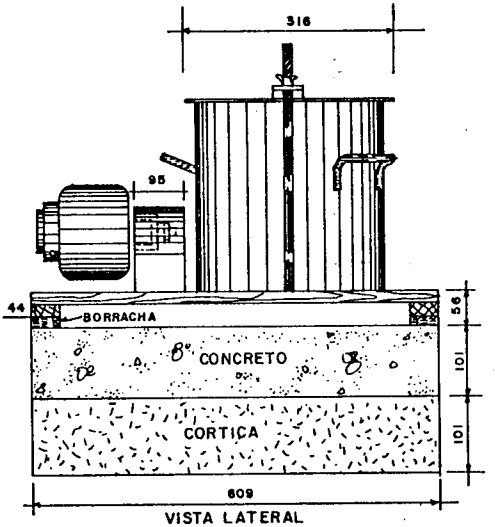






NOTA:
Medidas em milímetros





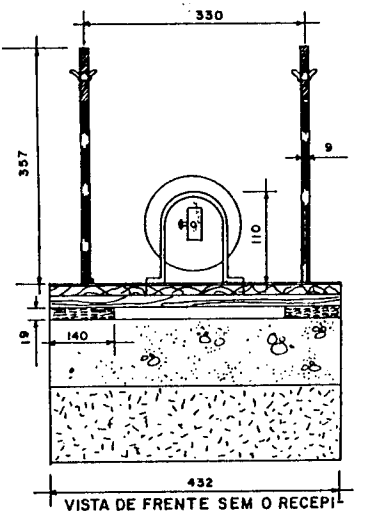


Figura 6.19 — Aparelho para ensaio de exsudação

Ø MAX (mm)	76	76	76	152	152	152	152	152	152
A/C (EQUIVALENTE)	0,800	0,816	0,813	0,633	0,627	0,626	0,658	0,651	0,650
PORCENTAGEM DE POZOLANA (VOLUME SÓLIDO)	0	30	50	0	30	50	0	30	50
CIMENTO (kg/m3)	120	84	60	120	84	60	120	84	60
POZOLANA (kg/m3)	—	29	49	—	29	49	—	29	49
ÁGUA (kg/m3)	96	99	100	76	76	77	79	79	80
AREIA (kg/m3)	488	479	475	430	429	425	408	408	403
CASCALHO 3/4" (19mm) (kg/m3)	539	539	539	305	305	305	—	—	—
CASCALHO 11/2" (38mm) (kg/m3)	505	505	505	344	344	344	—	—	—
CASCALHO 3" (76mm) (kg/m3)	639	639	639	—	—	—	—	—	—
BASALTO 3/4" (19mm) (kg/m3)	—	—	—	—	—	—	—	—	—
BASALTO 11/2" (38mm) (kg/m3)	—	—	—	—	—	—	338	338	338
BASALTO 3" (76mm) (kg/m3)	—	—	—	515	515	515	574	574	574
BASALTO 6" (152mm) (kg/m3)	—	—	—	743	743	743	815	815	815
AR INCORPORADO (%)	5,6	5,6	5,4	5,4	5,4	5,7	5,4	5,6	5,4
ABATIMENTO (SLUMP) (cm)	4,3	4,7	4,8	4,5	4,6	4,6	4,8	4,6	4,6
EXSUDAÇÃO (%)	11,9	9,4	6,9	10,2	8,1	4,8	9,0	7,3	4,4

Figura 6.20 — Exemplo da influência do teor de material pozolânico na exsudação [6.20]

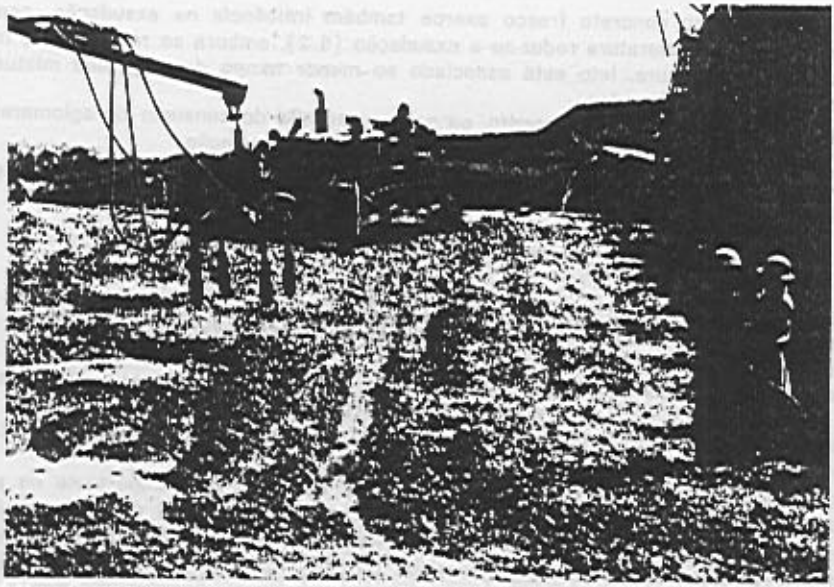


Figura 6.21 — Concreto magro com excesso de exsudação devido à utilização de uma inadequada (baixa) porcentagem de ar incorporado

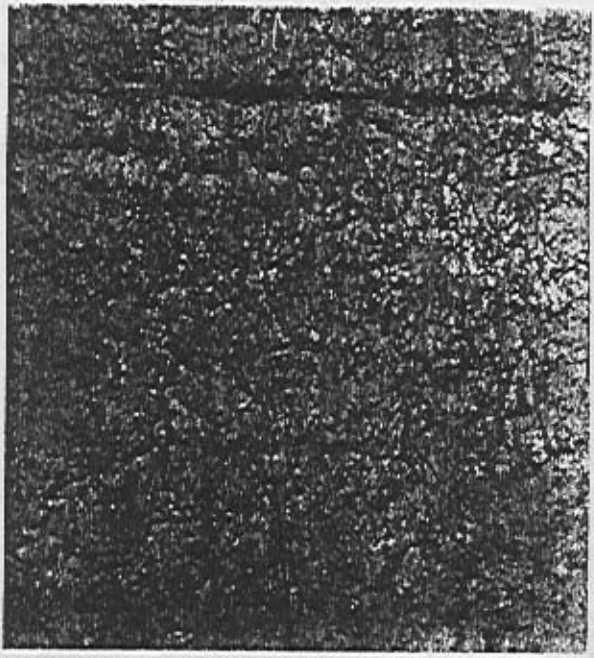


Figura 6.22 — Concreto com excesso de água de exsudação, com surgimento de água junto à fôrma através de um fluxo ascendente

A temperatura do concreto fresco exerce também influência na exsudação, sendo que ao se elevar a temperatura reduz-se a exsudação [6.2], embora se requeira um teor de água maior na mistura. Isto está associado ao menor tempo de pega das misturas a temperaturas mais elevadas.

O aumento da relação água/cimento, ou seja, a redução do consumo de aglomerante (a uma mesma trabalhabilidade) aumenta [6.2] a água de exsudação.

A utilização de aditivo redutor de água reduz a exsudação pela redução da água de mistura.

6.2.6 Pega

O processo de determinação dos tempos de pega do cimento usando a agulha de Vicat, não se aplica ao concreto devido às dimensões das partículas constituintes do concreto.

É, entretanto, interessante conhecer os tempos de pega do concreto, principalmente quando se trabalha em regime de concretagem contínua, como em lajes ou "blocos" de concretos de estruturas gravidade ou, ainda, quando se usam formas deslizantes ou temporariamente fixas.

O ganho de resistência e o enrijecimento inicial do concreto é importante na avaliação do tempo após o qual qualquer conturbação ou vibração não é conveniente. É o tempo de acentuada perda de trabalhabilidade ou de condições de manuseio do concreto.

Como o endurecimento do concreto é um processo gradativo, qualquer definição do tempo de pega é sempre arbitrária.

Os tempos de início e fim de pega são determinados de acordo com uma rotina estabelecida [6.21] [6.22] com base no endurecimento do concreto, por meio da resistência da argamassa, extraída desse concreto, à penetração de agulhas padronizadas, sob esforço aplicado.

O tempo de início de pega é definido como o tempo decorrido desde o contato inicial do cimento com água (início da hidratação) até o instante em que a argamassa obtida do concreto resista a uma penetração de 3,5 MPa.

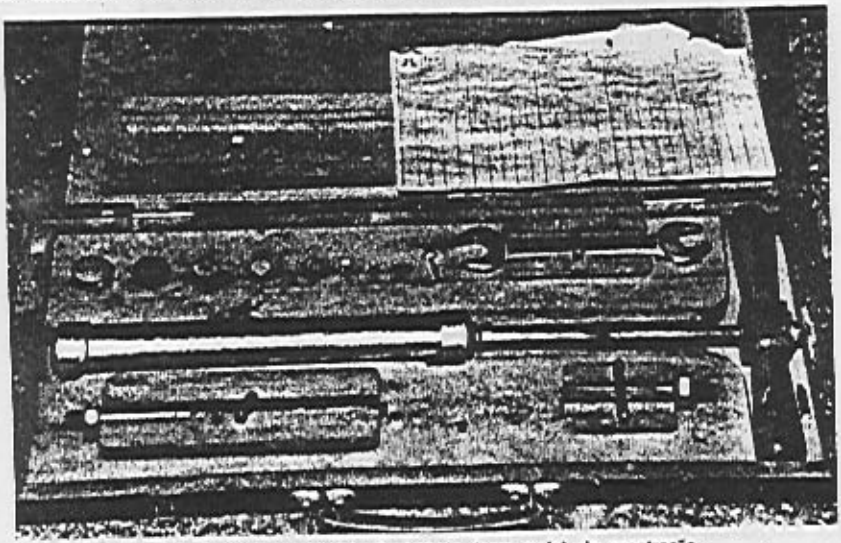


Figura 6.23 — Penetrômetro Proctor, constituído de êmbolo (com mola) de penetração, hastes e agulhas de várias seções

O tempo de fim de pega é definido como o período desde o contato inicial da água com o cimento até o instante em que a argamassa extraída do concreto resista à penetração de 27,6 MPa.

Para a determinação dos tempos de pega das argamassas de concretos é usado um aparelho de penetração (penetrômetro Proctor) visto na figura 6.23.

Para a execução do ensaio, a amostra de concreto fresco é peneirada sobre a malha n.° 4 (4,8 mm) e a fração passante (argamassa) é colocada e adensada por apiloamento em recipientes padronizados. Para o peneiramento, quando se trabalha com grandes quantidades de amostras, pode ser usado o peneirador mostrado na figura 6.3, com a malha adequada.

Por meio de procedimento padronizado a penetração das várias agulhas (inicia-se com agulha de seção maior e vai decrescendo com o tempo decorrido) é feita em intervalos regulares até atingir resistências superiores a 28 MPa.

Dessa forma pode ser obtido um gráfico de evolução da resistência à penetração, ao longo do tempo, desde o instante da mistura. O ensaio é executado em ambiente padronizado, pois a temperatura afeta [6.2] o tempo de pega, como mostra a figura 6.24.

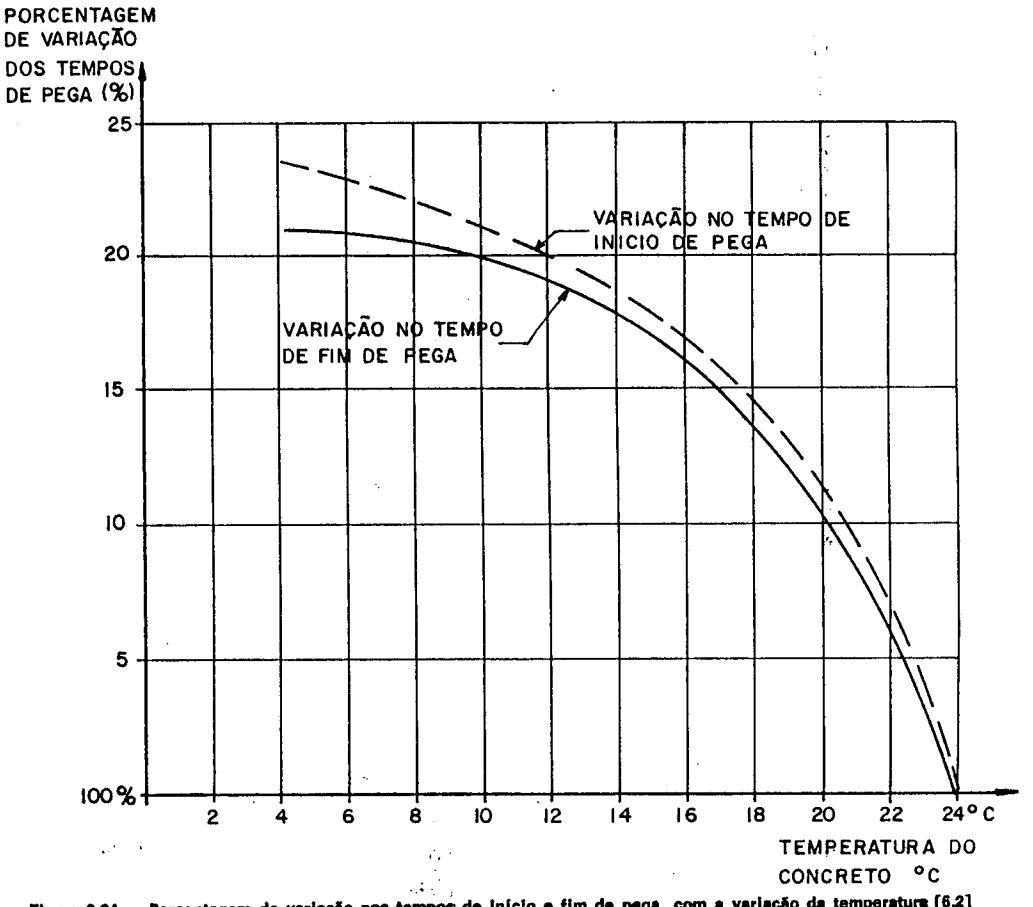


Figura 6.24 — Porcentagem de variação nos tempos de início e fim de pega, com a variação da temperatura [6.2]

Nota-se que aumentando a temperatura da mistura reduzem-se os tempos de pega.

O teor de material pozolânico também afeta os tempos de início e fim de pega [6.2], pois aumentando-se o teor de material pozolânico os tempos de pega são aumentados.

Os aditivos podem modificar os tempos de pega, como visto no item 3.

Sem dúvida, como já citado no item 3, o teor de aglomerante e as suas características afetam os tempos de pega, assim é que [6.2] concretos com maior consumo de cimento apresentam menores tempos de pega do que concretos de baixo consumo de aglomerante.

6.3 Referências bibliográficas

[6.1] Construções de Concreto: Manual de Práticas para Execução e Controle — Francisco Rodrigues Andriolo — 1984.

[6.2] PC-27/79 — Itaipu Binacional — Verificação da Influência de Materiais e Temperaturas nas Propriedades do Concreto Fresco e Endurecido — Resultados de Ensaios.

[6.3] NBR-7223 — ABNT — Concreto — Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone.

[6.4] ASTM-C-143 — Standard Test Method for Slump of Portland Cement Concrete.

[6.5] LCI-203 — Itaipu Binacional — Método para determinação do Abatimento do Concreto Fresco.

[6.6] CRD-C-61 — Corps of Engineers — Method of Test for Remolding Effort of Freshly Mixed Concrete.

[6.7] LCI-219 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para determinação do Índice para Remoldagem de Mistura de Concreto Fresco.

[6.8] "Studies of Workability of Concrete" — T. C. Powers 1932.

[6.9] ACI-211-3 — "Recommended Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete".

[6.10] LCI-214 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para Determinação da Consistência do Concreto Fresco, através do consistômetro Vebe.

[6.11] Methods of Testing Concrete — BS-1881 — British Standards Institution — 1952.

[6.12] ASTM-C-360 — Standard Test Method for Ball Penetration in Fresh Portland Cement Concrete.

[6.13] ASTM-C-138 — Standard Test Method for Unit Weight, Yield, and Air Content (Gravimetric) of concrete.

[6.14] LCI-205 — Itaipu Binacional — Método para Determinação do Peso Específico, Temperatura, Volume da Betonada e Teor de Ar (Método Gravimétrico) do Concreto Fresco.

[6.15] ASTMC-173 — Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concret by the Volumetric Method.

[6.16] ASTM-C-231 — Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method.

[6.17] LCI-204 — Itaipu Binacional — Método para Determinação do Teor da Mistura de Concreto Fresco — Método da Pressão.

[6.18] ASTM-C-232 — Standard Test Method for Bleeding of Concrete.

[6.19] LCI-206 — Itaipu Binacional — Método para Determinação da Água de Exsudação em Concreto Fresco.

[6.20] Propriedade do Concreto Massa contendo Pozolana de Argila — Miguel Normando Abdalla Saad — Walton Pacelli de Andrade — Vladimir A. Paulon — IBRACON — 1983.

[6.21] ASTM-C-403 — Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance.

[6.22] LCI-215 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio para Determinação do Tempo de Pega das Misturas de Concreto pela Resistência à Penetração.

Índice

7.	Propriedades do Concreto Endurecido	351
7.1	Massa Específica do Concreto Endurecido	351
7.1.1	Determinação da Massa Específica	351
7.1.2	Valores e Fatores de Influência	351
7.2	Resistência à Compressão	354
7.2.1	Resistência à Compressão Axial Simples	354
7.2.1.1	Cuidados na Moldagem e Manuseio dos Corpos de Prova	356
7.2.1.2	Cura dos Corpos de Prova	361
7.2.1.3	Capeamento dos Corpos de Prova	363
7.2.1.4	Ensaio de Compressão Axial Simples	363
7.2.1.5	Fatores de Influência	363
7.2.2	Resistência à Compressão sob Estado Múltiplo de Tensão	388
7.2.2.1	Introdução	388
7.2.2.2	Princípio do Ensaio	388
7.2.2.3	Revestimento do Corpo de Prova	390
7.2.2.4	Ensaio	391
7.2.2.5	Valores de Ensaios de Compressão Triaxial	394
7.2.3	Avaliação por Ensaio não Destrutivos	394
7.2.3.1	Generalidades	394
7.2.3.2	Ensaios de Penetração e Arrancamento	394
7.2.3.3	Ensaios de Dureza da Superfície	396
7.2.3.4	Ensaio de Reflexão	396
7.2.3.5	Ensaios de Vibração	397
7.2.3.6	Métodos Radioativos e Nucleares	400
7.2.3.7	Métodos Elétricos e Magnéticos	400
7.3	Propriedades Elásticas e Fluência na Compressão	400
7.3.1	Módulo de Deformação (Elasticidade)	400
7.3.2.1	Conceito	441
7.3.1.2	Métodos de Ensaios	402
7.3.1.3	Fatores que Influenciam	405
7.3.1.4	Módulo de Deformação na Tração	411
7.3.2	Fluência	411
7.3.2.1	Conceito	411
7.3.2.2	Método de Ensaio	416
7.3.2.3	Fatores que Influenciam	422
7.3.2.4	Aplicações dos Valores de Fluência	435
7.3.2.4.1	Transformação de Deformação em Tensão	435
7.3.2.4.2	Relaxação de Tensão	436
7.3.2.4.3	Previsão da Capacidade de Deformação	436
7.3.2.5	Estimativa da Fluência	437
7.4	Resistência à Tração	438

7.4.1	Conceito	438
7.4.2	Métodos de Ensaios	438
7.4.2.1	Tração por Flexão de Vigas	438
7.4.2.2	Tração por Compressão Diametral	445
7.4.2.3	Tração Pura	446
7.4.3	Resultados de Resistência à Tração por vários Métodos	447
7.4.3.1	Tração por Compressão Diametral em Corpos de Provas de Diferentes Dimensões	447
7.4.3.2	Correlações entre Resultados de Tração por Flexão e por Compressão Diametral	449
7.4.3.3	Correlações entre Resultados de Tração e Compressão Axial Simples	450
7.4.3.3.1	Tração por Flexão e Compressão Axial Simples	450
7.4.3.3.2	Tração por Compressão Diametral e Resistência à Compressão	450
7.4.4	Fatores que Influenciam	450
7.5	Capacidade de Alongamento	455
7.5.1	Conceito	455
7.5.2	Método de Ensaio	455
7.5.3	Fatores que Influenciam	462
7.6	Permeabilidade e Absorção do Concreto	462
7.6.1	Conceito	462
7.6.2	Métodos de Ensaios	464
7.6.3	Fatores que Influenciam	467
7.7	Resistência ao Cisalhamento	470
7.7.1	Conceito	470
7.7.2	Métodos de Ensaios	470
7.7.3	Fatores que Influenciam	475
7.8	Aderência do Concreto	478
7.8.1	Aderência Concreto-Aço	478
7.8.2	Aderência Concreto-Concreto	478
7.9	Propriedades Térmicas	478
7.9.1	Expansão Térmica	480
7.9.1.1	Conceito	480
7.9.1.2	Método de Ensaio	480
7.9.1.2.1	Aparelhos	481
7.9.1.2.2	Procedimento de Ensaio	481
7.9.1.2.3	Cálculos	483
7.9.1.3	Fatores que Influenciam	483
7.9.2	Calor Específico	487
7.9.2.1	Conceito	487
7.9.2.2	Método de Ensaio	487
7.9.2.2.1	Aparelhos	487
7.9.2.2.2	Procedimento de Ensaio	487
7.9.2.3	Fatores que Influenciam	490
7.9.3	Condutividade Térmica	495
7.9.3.1	Conceito	495
7.9.3.2	Método de Ensaio	495
7.9.3.2.1	Aparelhos	495
7.9.3.2.2	Procedimentos de Ensaios	497
7.9.3.3	Fatores que Influenciam	499
7.9.4	Elevação Adiabática de Temperatura	502
7.9.4.1	Conceito	502
7.9.4.2	Método de Ensaio	502

7.9.4.2.1	Equipamentos	502
7.9.4.2.2	Procedimentos de Ensaios	505
7.9.4.3	Fatores que Influenciam	507
7.9.5	Estimativas de Elevação Adiabática do Concreto	516
7.9.5.1	Elevação Adiabática a partir da Evolução Unitária de Temperatura e Consumo de Aglomerante	516
7.9.5.2	Elevação Adiabática a partir da Evolução Unitária, Consumo e Calor de Hidratação do Aglomerante	516
7.10	Variações Volumétricas	519
7.10.1	Conceito	519
7.10.2	Variações Volumétricas do Concreto Fresco	519
7.10.3	Variações Volumétricas do Concreto Endurecido	520
7.10.3.1	Devidas à Temperatura	520
7.10.3.2	Devidas ao Grau de Saturação	523
7.10.3.2.1	Mecanismo	523
7.10.3.2.2	Método de Ensaio	524
7.10.3.2.3	Fatores que Influenciam	524
7.10.3.3	Devidas à Reação Álcalis-Agregado	526
7.10.3.3.1	Mecanismo	526
7.10.3.3.2	Métodos de Ensaios	529
7.10.3.3.3	Fatores que Influenciam	529
7.10.3.4	Devidas ao Ataque por Sulfatos	529
7.10.3.4.1	Mecanismo	529
7.10.3.4.2	Métodos de Ensaios	529
7.10.3.4.3	Fatores que Influenciam	531
7.10.3.5	Variações Autógenas	531
7.1.1	Resistividade do Concreto	532
7.1.2	Durabilidade do Concreto	536
7.12.1	Generalidades	536
7.12.2	Ensaios de Durabilidade	539
7.13	Referências Bibliográficas	548

7 Propriedades do concreto endurecido

Como o concreto endurecido é uma massa de materiais heterogêneos, suas propriedades são influenciadas por um grande número de variáveis devido aos diferentes tipos e quantidades dos ingredientes, diferentes tipos de mistura, transporte, colocação, adensamento e cura.

7.1 Massa específica do concreto endurecido

A massa específica é uma das características importantes do concreto, principalmente levando-se em conta sua aplicabilidade em estruturas, quer do tipo gravidade, quer sejam peças estruturais leves, quer sejam peças divisórias etc... Como outras propriedades, a massa específica também é afetada pela qualidade e pela composição granulométrica dos agregados.

7.1.1 Determinação da massa específica

Para a determinação da massa específica do concreto endurecido deve [7.1] ser usada uma balança hidrostática, semelhante à mostrada na figura 3.12 e estufa similar à mostrada na figura 3.6.

Sempre que possível a amostra deve ser constituída por vários fragmentos do concreto endurecido, isento de trincas, fissuras ou outros defeitos que possam afetar a representatividade da amostra.

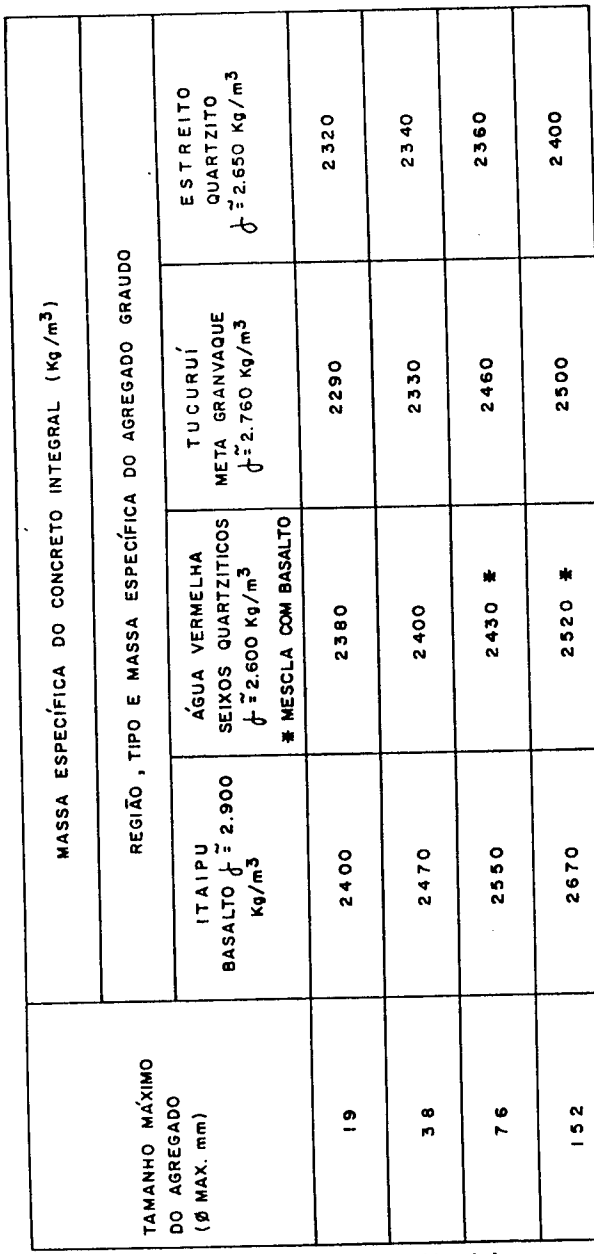
As porções de concreto são secas em estufa a 110 $\pm$ 5°C até a constância de massa. Após essa secagem os fragmentos são imersos em água até se obter a condição saturada superfície seca. Determina-se, também, com auxílio da balança hidrostática, a massa imersa em água.

É determinada, então, por meio da diferença das massas, a massa específica do concreto endurecido.

Através desse ensaio pode ser determinada a absorção do concreto endurecido, como é visto no item 7.6.

7.1.2 Valores e fatores de influência

Pode-se observar que os concretos com britas de basalto têm massa específica sensivelmente maior do que concretos com seixos rolados de quartzito. Isto porque os agregados britados a partir do basalto (ver item 3.1) tem massa específica maior (γ SSS $\cong$ 2.900 kg/m³) do que o seixo rolado de quartzito (γ SSS $\cong$ 2.600 kg/m³). Observa-se também que à medida que se aumenta o tamanho máximo do agregado se eleva a massa específica do concreto. Isto devido aos concretos mais "grossos", com elevado diâmetro máximo possuírem menor quantidade de vazios e serem preenchidos por argamassa que, normalmente, tem menor massa específica do que o agregado. Isto pode ser observado pela figura 7.1 [7.2] e [7.3].



TAMANHO MÁXIMO DO AGREGADO (Ø MAX. mm)	MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO INTEGRAL (Kg/m³)			
	REGIÃO, TIPO E MASSA ESPECÍFICA DO AGREGADO GRAUDO			
	ITAIPU BASALTO $\delta \tilde{=} 2.900$ Kg/m³	ÁGUA VERMELHA SEIXOS QUARTZITICOS $\delta \tilde{=} 2.600$ Kg/m³ * MESCLA COM BASALTO	TUCURUÍ META GRANVAQUE $\delta \tilde{=} 2.760$ Kg/m³	ESTREITO QUARTZITO $\delta \tilde{=} 2.650$ Kg/m³
19	2400	2380	2290	2320
38	2470	2400	2330	2340
76	2550	2430 *	2460	2360
152	2670	2520 *	2500	2400

Figura 7.1 — Influência do tipo e tamanho máximo do agregado (Ø máx.) na massa específica do concreto [7.2] [7.3]

A incorporação de ar, embora reduza o teor de água da mistura (o que poderia ser um fator para o aumento da massa específica do concreto), diminui a massa específica do concreto, como exemplifica a figura 7.2, [7.4] [7.5].

TAMANHO MÁXIMO DO AGREGADO (ø MAX. mm)	MASSA ESPECÍFICA DO CONCRETO INTEGRAL (Kg/m³)			
	REGIÃO, TIPO E MASSA ESPECÍFICA DO AGREGADO, E TEOR DE AR INCORPORADO.			
	ÁGUA VERMELHA SEIXOS QUARTZITICOS $\delta \cong 2.600$ Kg/m³		ITAIPU BASALTO $\delta \cong 2.900$ Kg/m³	
	CONCRETO SEM INCORPORAÇÃO DE AR	CONCRETO COM 4% DE AR INCORPORADO	CONCRETO SEM INCORPORAÇÃO DE AR	CONCRETO COM 4% DE AR INCORPORADO
19	2416	2393	2473	2414
38	2441	2404	2502	2442

Figura 7.2 — Influência da incorporação de ar na massa específica do concreto [7.4] [7.5]

Concretos pesados, com agregados metálicos, apresentam massa específica ao redor de 4.000 kg/m³. Concretos leves, por outro lado, contendo agregados leves ou expandidos, podem apresentar baixa massa específica. Nestes casos o aumento do teor de argamassa aumenta a massa específica. Por exemplo, ao se produzir concretos com esferas, de estiropor expandido, com diâmetros de 1 mm a 3 mm, e massa específica unitária de 12 kg/m³, obteve-se concretos com as características mostradas na figura 7.3.

O adensamento também afeta a massa específica, além de alterar outras propriedades.

A figura 7.4 fornece um conjunto de valores de alguns concretos produzidos no Brasil, e dos respectivos agregados usados [7.2] [7.3] [7.4] [7.5].

MASSA ESPECÍFICA APROXIMADA (Kg/m3)	TEOR DE ARGAMASSA	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa) AOS 28 DIAS
800	37,7	3,5
950	43,7	6,0
1150	51,0	8,5
1400	59,2	14,5
1600	69,6	20,0

Figura 7.3 — Influência do teor de argamassa na massa específica de concreto leve

7.2 Resistência à Compressão

A determinação da resistência é, provavelmente, o ensaio que mais importância recebe. E devido a isso, adequada ou inadequadamente, é tomada como base para mostrar a qualidade do concreto. Um concreto de alta resistência normalmente é tomado como sinônimo de qualidade. Mas a resistência, alta, obtida apenas pela redução da relação A/C ou aumento do teor de aglomerante, pode provocar uma retração excessiva ou, ainda, problemas oriundos da geração de calor.

A resistência à compressão tornou-se consagrada através dos ensaios a 28 dias de idade sobre cilindros moldados e curados sob condições padrões.

7.2.1 Resistência à compressão axial simples

A maioria dos concretos é dosada para atender uma certa resistência à compressão, a uma idade, normalmente, determinada pela ruptura axial de corpos de prova cilíndricos de Ø 15 x 30 cm [7.6] [7.7] [7.8].

Alguns países, principalmente na Europa, adotam corpos de prova cúbicos.

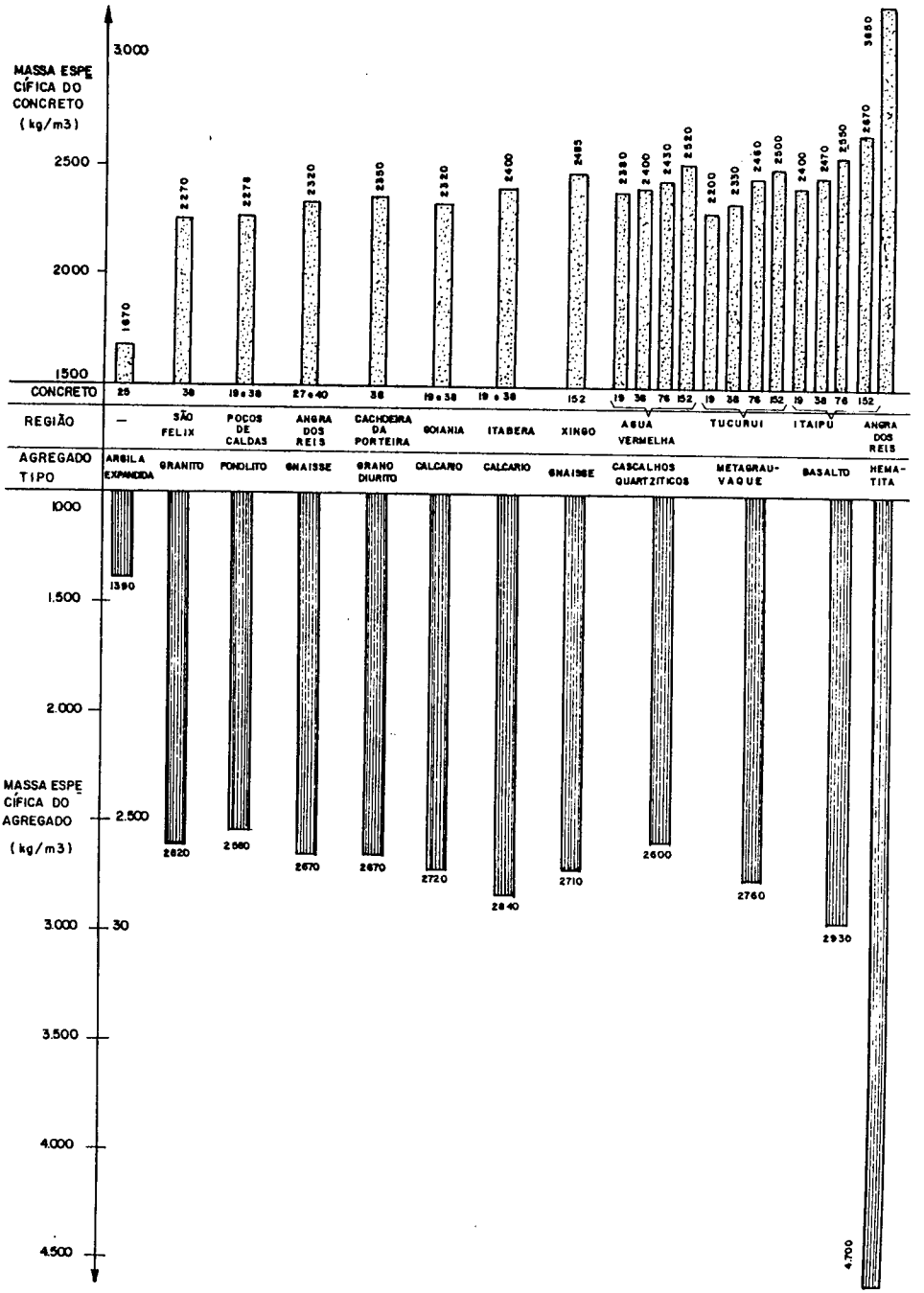


Figura 7.4 — Massa específica de concretos e dos respectivos agregados graúdos [7.2] [7.3] [7.4] [7.5]

7.2.1.1 Cuidados na moldagem e manuseio dos corpos de prova

Grandes variações podem ser causadas aos resultados dos ensaios de compressão, se não forem tomados cuidados na moldagem, estocagem e manuseio dos corpos de prova.

Os corpos de prova cilíndricos, padronizados, são moldados em fôrmas semelhantes à vista na figura 7.5. Para a moldagem de corpos de prova são adotados os procedimentos mostrados na figura 7.6.

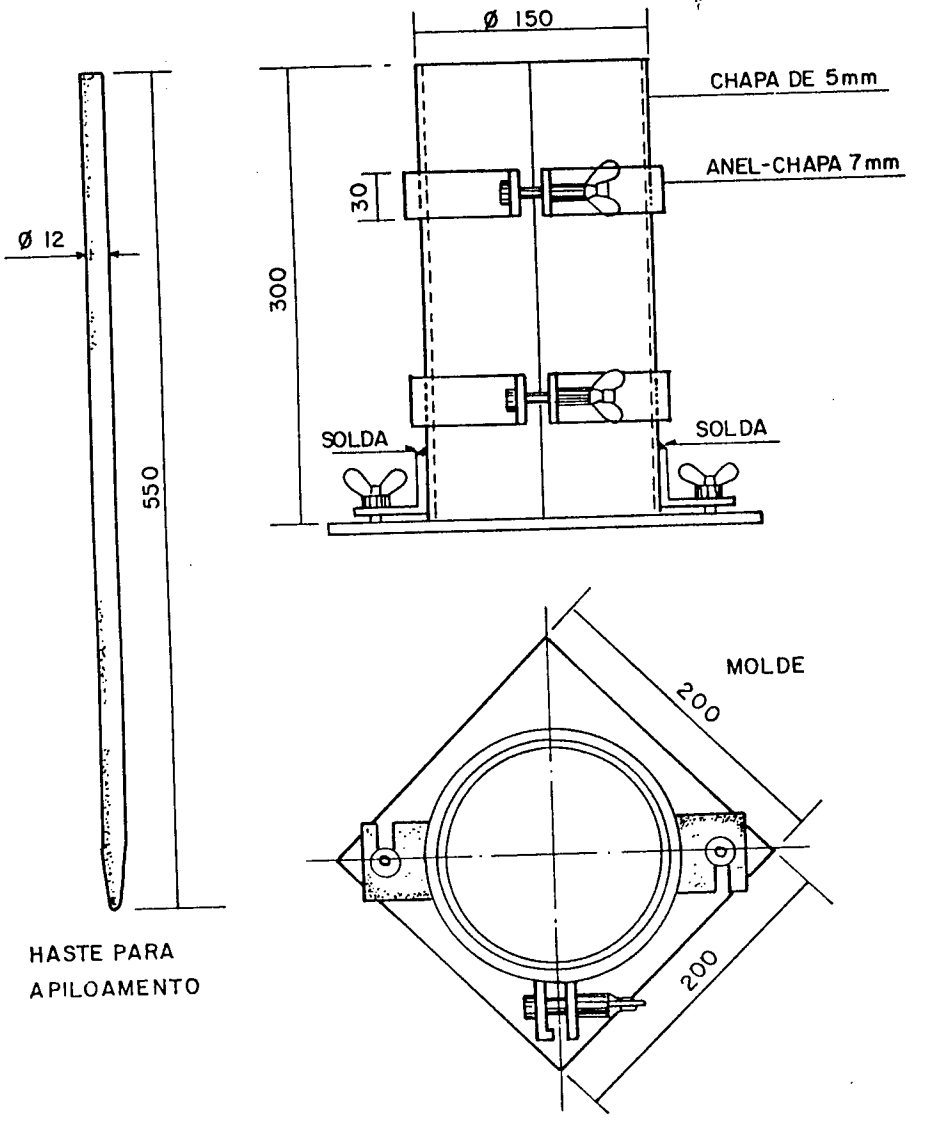
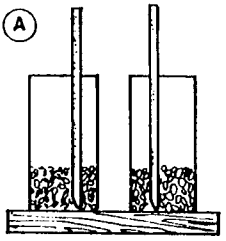
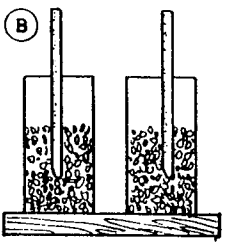


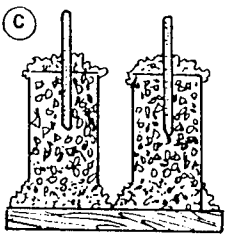
Figura 7.5 — cilindro para corpos de prova Ø 15 x 30 cm de acordo com [7.7]



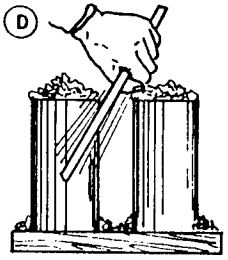
COLOCAÇÃO DE PARTE DA AMOSTRA DE CONCRETO FRESCO, ATÉ COMPLETAR AO REDOR DE 1/3 DO MOLDE; ADENSANDO COM GOLPES DE HASTE.



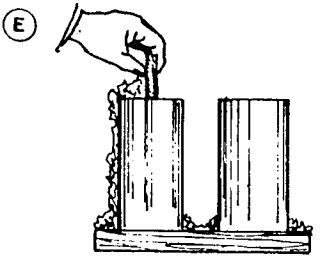
COLOCAÇÃO DE MAIS UMA CAMADA DE CONCRETO FRESCO, COMPLETANDO 2/3 DO MOLDE. E ADENSANDO NOVAMENTE COM HASTE, FAZENDO-A PENETRAR PARCIALMENTE NA CAMARA SUBJACENTE.



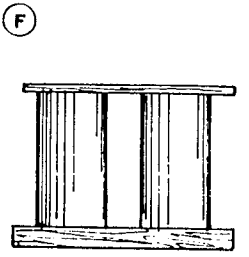
COMPLEMENTAÇÃO DO ENCHIMENTO E DA COMPACTAÇÃO, DO CORPO DE PROVA.



BATIDAS LATERAIS NO MOLDE PARA RETIRADA DE BOLHAS DE AR



ACABAMENTO E DESEMPENO DO TOPO DE CORPO DE PROVA



IDENTIFICAÇÃO ADEQUADA DOS CORPOS DE PROVA

Figura 7.6 — Sequência usual para moldagem e identificação de corpos de prova cilíndricos Ø 15 x 30 cm

Os procedimentos A,B,C, da figura 7.6, podem ser substituídos pelo adensamento através de vibrador. de imersão, como mostra a figura 7.7.

O manuseio dos corpos de prova, desde o local de moldagem até o local de cura e/ou de ensaio deve ser, preferencialmente, feito ainda dentro dos seus moldes, como exemplifica a figura 7.8.

Deve-se lembrar que as fôrmas cilíndricas Ø 15 x 30 cm são usadas para moldagem de concreto com agregados de Ø máx até 38 mm. Ao se trabalhar com concretos de agregados de tamanho máximo superior a 38 mm devem ser usados moldes de modo a manter o diâmetro do corpo de prova no mínimo igual a três vezes o tamanho máximo do agregado. Assim é que para concretos com Ø máx até 76 mm podem ser usados moldes cilíndricos com Ø 25 x 50 cm (ver figura 7.10) e para concretos com Ø máx até 152 mm podem ser usados moldes com Ø 45 x 90 cm (ver figura 7.11).

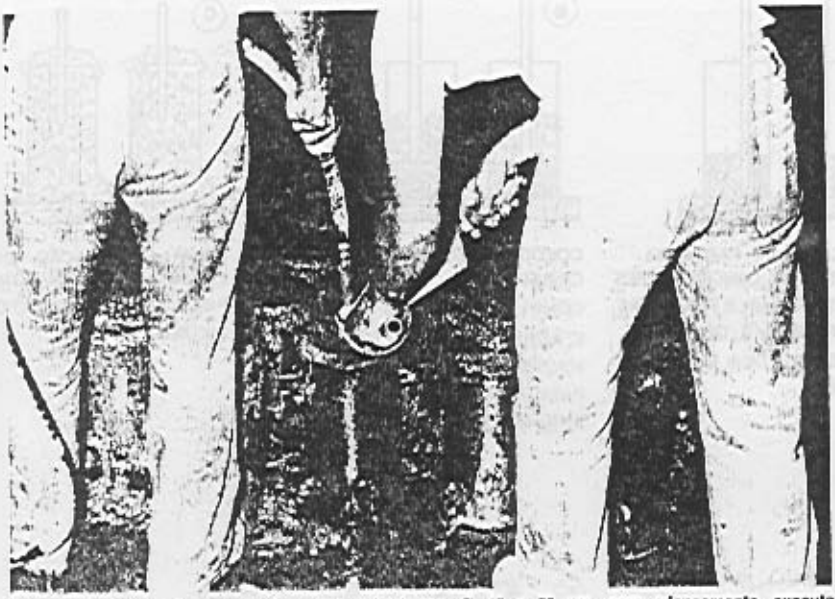


Figura 7.7 — Moldagem de corpos de prova cilíndricos ∅ 15 x 30 cm, com adensamento executado por vibrador de imersão. A haste (agulha) do vibrador de imersão, usada para ∅ 15 x 30 cm é no máximo igual a 25 mm

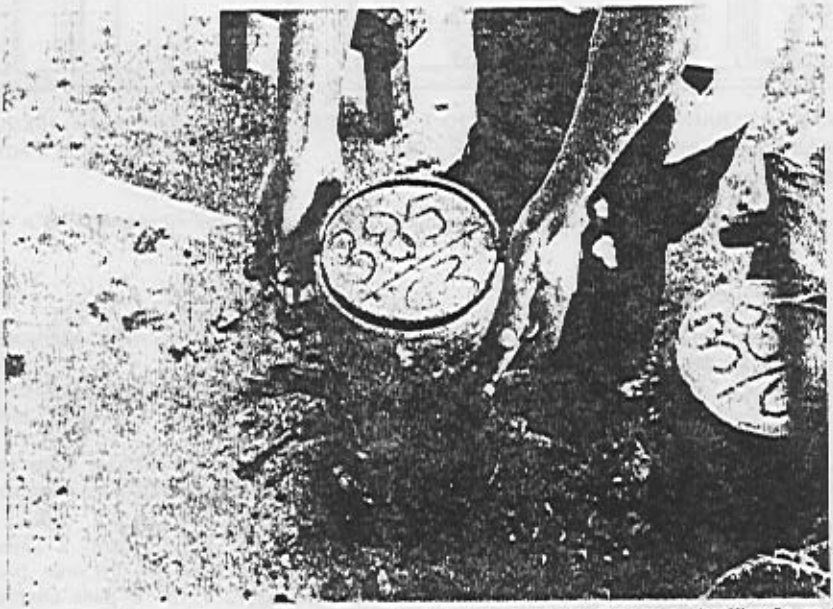


Figura 7.8 — Desmoldagem de corpos de prova no local de cura e ensaio. Nota-se a identificação no topo de corpo de prova, e um saco de aniagem úmido, sobre o corpo de prova (à direita)

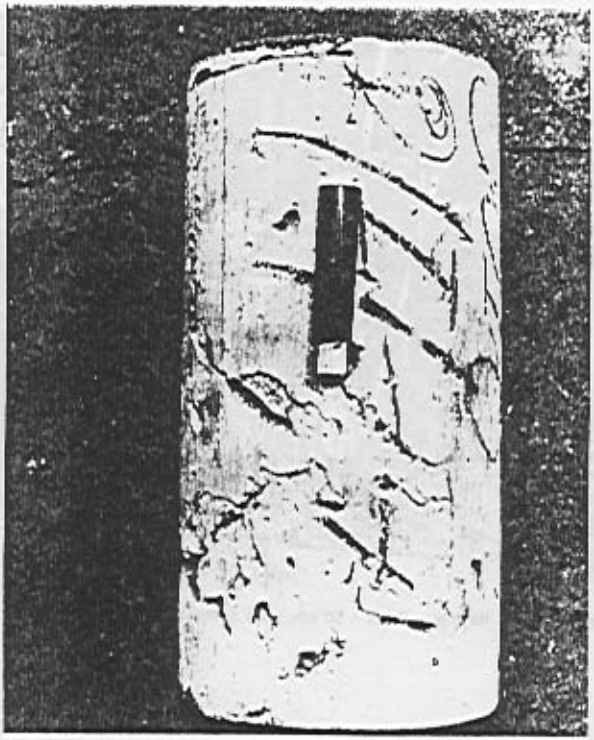


Figura 7.9 — Corpo de prova moldado incorretamente, mostrando bicheiras (embora fosse um concreto argamassado)

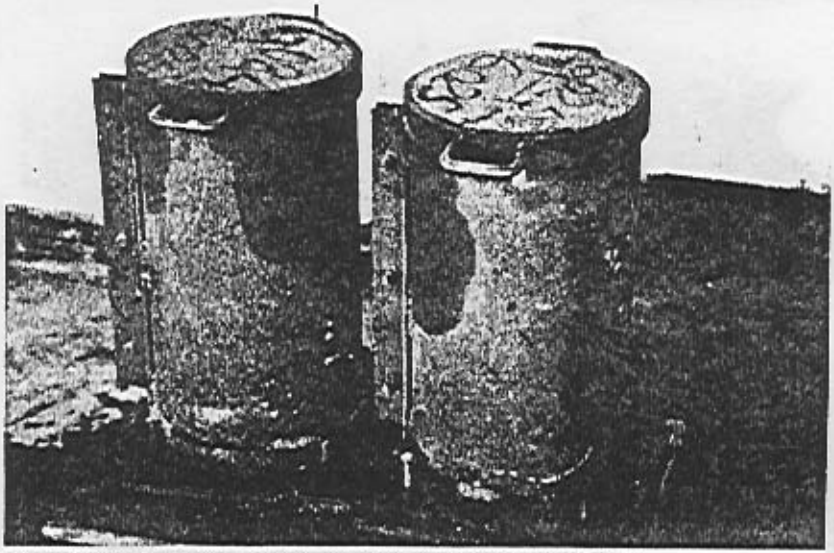


Figura 7.10 — Corpos de prova cilíndricos moldados em fôrmas ∅ 25 x 50 cm

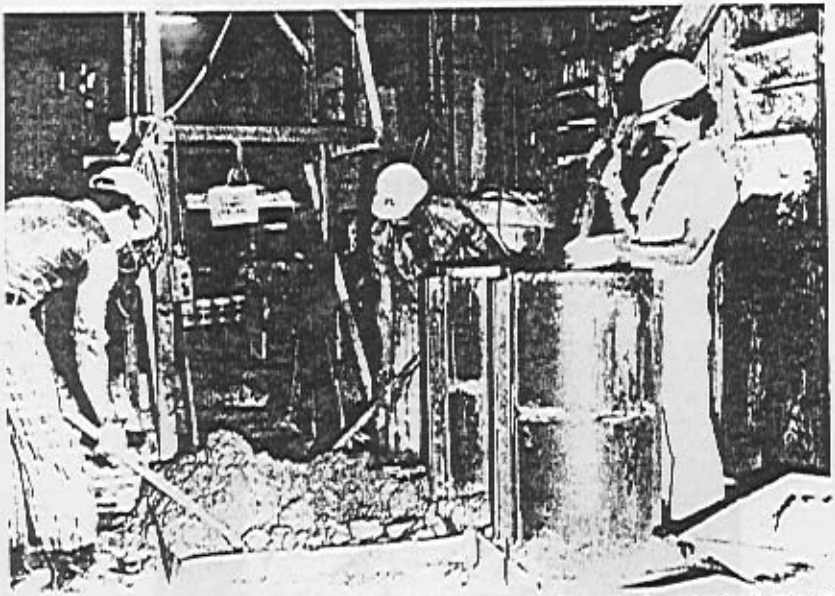


Figura 7.11 — Moldagem de corpos de prova ∅ 45 x 90 cm, com concreto massa de agregado ∅ máx. 152 mm

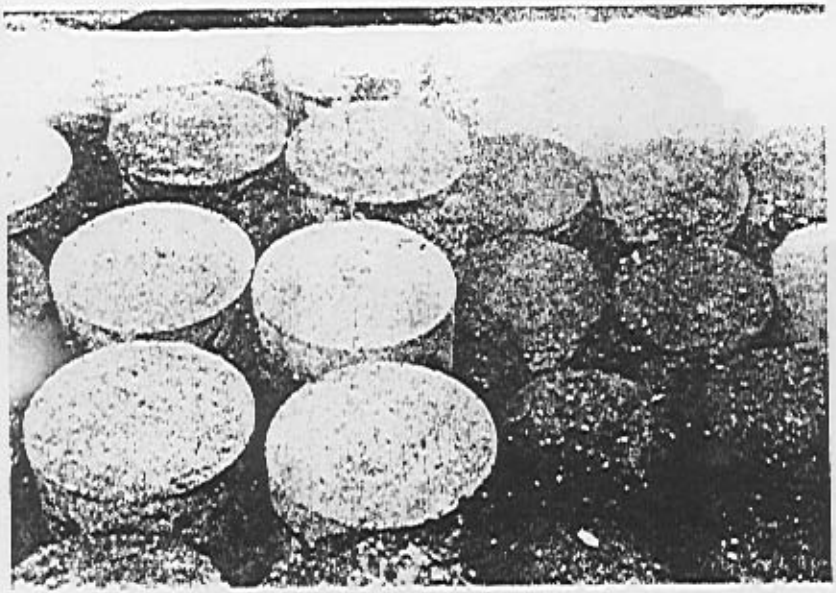


Figura 7.12 — Cura de corpos de prova cilíndricos submersos em um tanque

7.2.1.2 Cura dos corpos de prova

Após a moldagem os corpos de prova devem ser sazonados sob condições padrões até a idade do ensaio. De maneira geral as normas requerem condições bastante próximas para a cura, sendo que a temperatura deve estar ao redor de 23°C e a umidade acima de 90%.

A condição de umidade para a cura é importante, pois pode causar queda no valor da resistência em mais de 10% [7.9]. A temperatura do ambiente durante o período de sazonamento também é de fundamental importância no valor da resistência do concreto. A temperatura é usada, no processo de cura a vapor, como elemento acelerador do processo de hidratação, principalmente na fabricação de peças pré-moldadas em concreto.

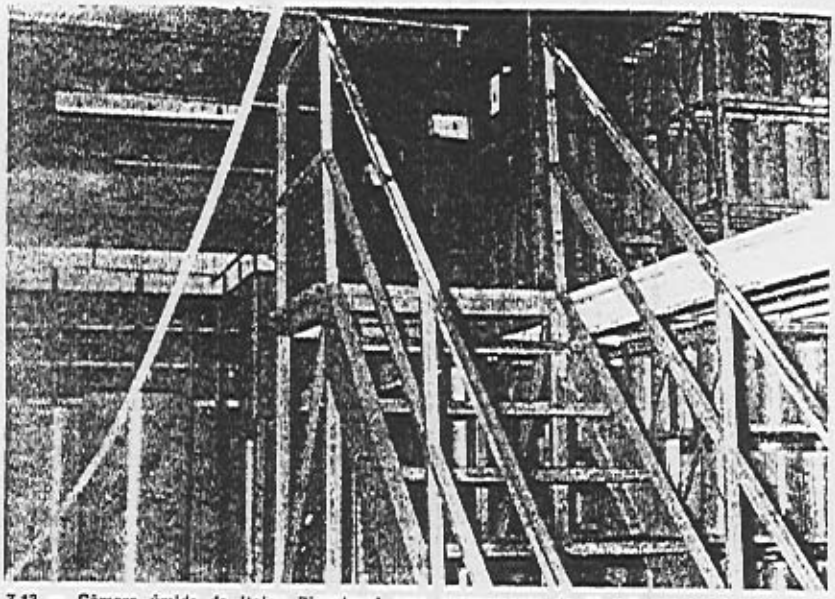


Figura 7.13 — Câmara úmida da Itaipu Binacional para sazonamento de 30 mil corpos de prova

Assim é que corpos de prova moldados em dias frios, normalmente apresentam menores valores de resistência a baixas idades do que corpos de prova moldados com o mesmo concreto em dias mais quentes.

O efeito da temperatura, de sazonamento de corpos de prova, pode ser notado pelos valores da figura 7.14 bem como por aqueles obtidos nos ensaios de argamassa de cimentos figura 3.96.

A ocorrência de temperatura elevada no período inicial de cura resulta em uma evolução rápida da resistência, mas leva a uma resistência final inferior à obtida com cura sob condição padronizada.

MISTURA	A/CEQ	CIMENTO Kg/m³	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)							
			IMEDIATA		3 DIAS		7 DIAS		28 DIAS	
			NORMAL	CURA A VAPOR	NORMAL	CURA A VAPOR	NORMAL	CURA A VAPOR	NORMAL	CURA A VAPOR
19-18	0,40	450	8,4	17,3	19,2	25,0	29,4	30,5	41,7	40,9

CURA NORMAL — $\theta = 23 \pm 1{,}7$ °C UR = 90 %

CURA A VAPOR — PERÍODO INICIAL DE 10 HORAS A 75 °C, SOB VAPOR

Figura 7.14 — Exemplo do efeito da temperatura e cura na resistência do concreto

7.2.1.3 Capeamento dos corpos de prova

Para a execução do ensaio de compressão axial dos corpos de prova de concreto, é necessário que as superfícies, onde se aplicam as cargas, sejam planas, paralelas e lisas, de modo que o carregamento seja uniforme. As faces devem, ainda, ser ortogonais ao eixo do corpo de prova. Os corpos de prova cúbicos levam vantagem neste particular, visto que ao usar moldes adequados é fácil de se obter pelo menos duas faces paralelas, entre as seis existentes. Isto não acontece facilmente com corpos de prova cilíndricos, visto que as duas faces paralelas usadas para carregamento no ensaio de compressão axial são as únicas duas faces planas existentes.

Dessa forma, um dos preparativos para o ensaio de compressão axial simples é a regularização dos topos dos corpos de prova, que é também conhecido por capeamento. Esse procedimento é padronizado [7.10] [7.11], sendo que diversas normas especificam [7.12] desvios máximos em relação ao plano para as faces de carga dos corpos de prova ou para as faces internas dos moldes. Para atender essas exigências as superfícies de carga devem ser acertadas previamente, sendo que recorre-se ao polimento ou ao capeamento.

O polimento com abrasivo pode ser suficiente, mas requer equipamento de precisão e de custo elevado.

Dessa forma o método mais usual é o do capeamento, através de um remate com material resistente e de fácil moldagem, que pode ser pasta de cimento Portland de alta resistência inicial ou cimento aluminoso, ou gesso de alta resistência. Mas esses materiais requerem um lapso de tempo não inferior a 3 horas, para o adequado endurecimento, antes da aplicação do carregamento.

Quando se trabalha com controle de qualidade que requeira rupturas em curtos períodos de tempo ou com grande quantidade de corpos de prova é comum se empregar uma mistura de enxofre e um inerte (Filler), aplicada em estado de fusão.

Um criterioso estudo desenvolvido pela ABCP [7.12], visando a obtenção de um material destinado ao capeamento de corpos de prova de modo a se ter facilidade de preparação, baixo custo, mínima influência operacional, rapidez de aplicação, grande recuperação e obtendo-se superfícies planas, lisas e regulares, e resistentes levou a recomendar o uso de misturas de enxofre, com Filler, que normalmente tem sido um material pozolânico, entre 20 a 30% em massa na mistura.

Para o capeamento é comum se adotar moldes, como visto na figura 7.15.

A mistura de enxofre em fusão, embora seja de fácil aplicação, requer cuidados e proteção para operador.

7.2.1.4 Ensaio de compressão axial simples

Para a execução do ensaio o corpo de prova é colocado e centrado sobre o prato da máquina de ensaio, sendo que a aplicação da carga é feita a uma velocidade entre 0,15 a 0,35 MPa/s, até a ruptura do corpo de prova, anotando-se o valor da carga máxima observada. A resistência à compressão é calculada dividindo-se a máxima carga lida pela área da seção transversal do corpo de prova.

7.2.1.5 Fatores de influência

Sendo os materiais constituintes do concreto proporcionados, adequadamente, de modo a se obter uma mistura trabalhável, e que se hidrata sob condições propícias de umidade na cura, a resistência do concreto endurecido, a uma certa idade, é muito influenciada pela relação água/cimento da mistura. A correta posição da curva resistência contra a relação água/cimento depende das propriedades de cada componente, do proporcionamento da trabalhabilidade e do processo de cura (temperatura).

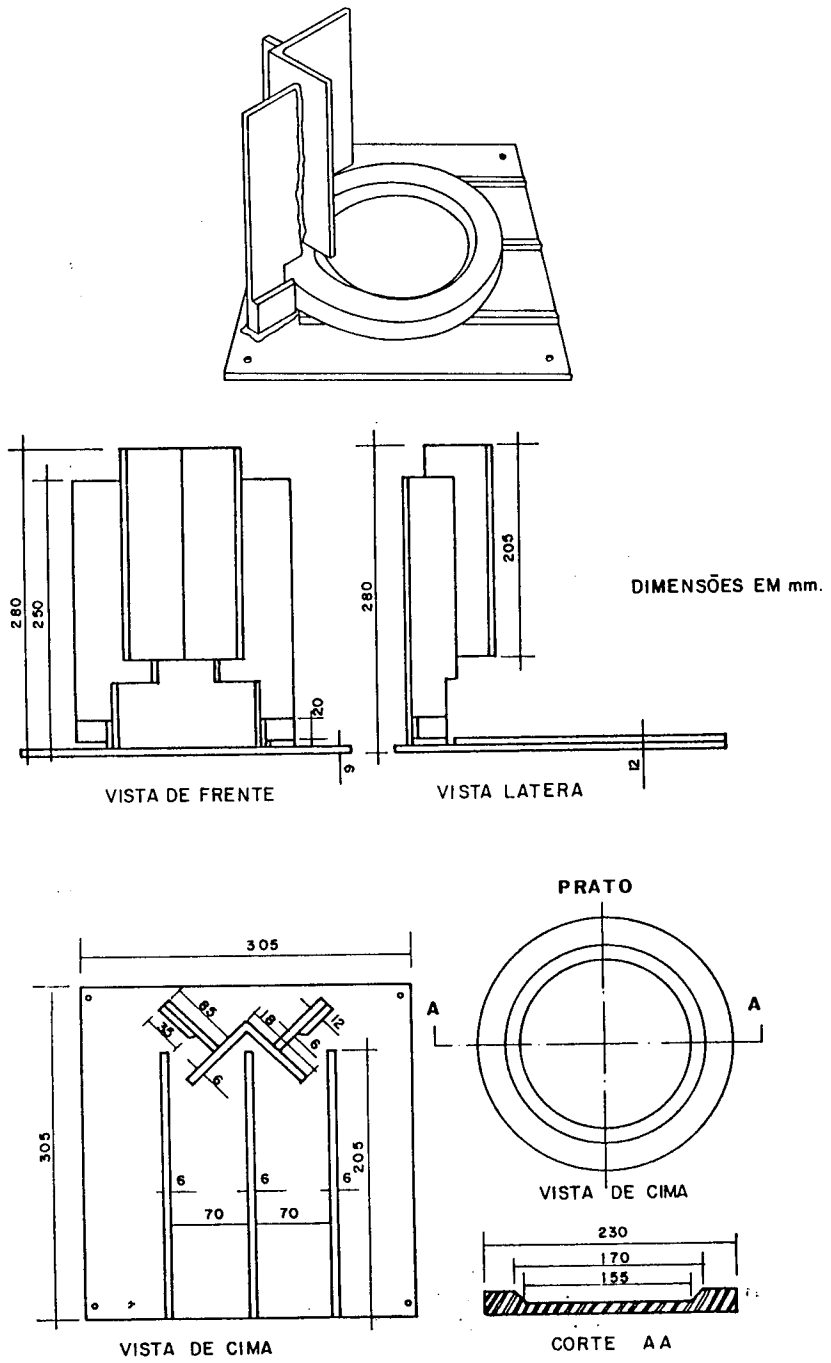


Figura 7.15 — Molde para capeamento de corpos de prova cilíndricos Ø 15 x 30 cm

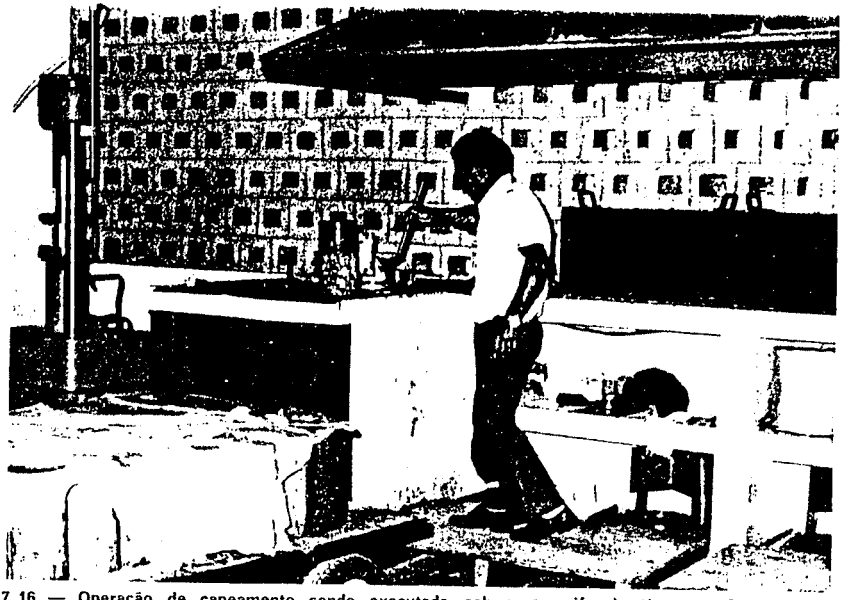


Figura 7.16 — Operação de capeamento sendo executada sob uma coifa de tiragem. Observam-se ainda aquecedores (à direita sobre a bancada) para fusão da mistura; os corpos de prova cobertos com sacos úmidos (sobre o carrinho à esquerda). Nota-se a alvenaria vazada permitindo uma adequada ventilação

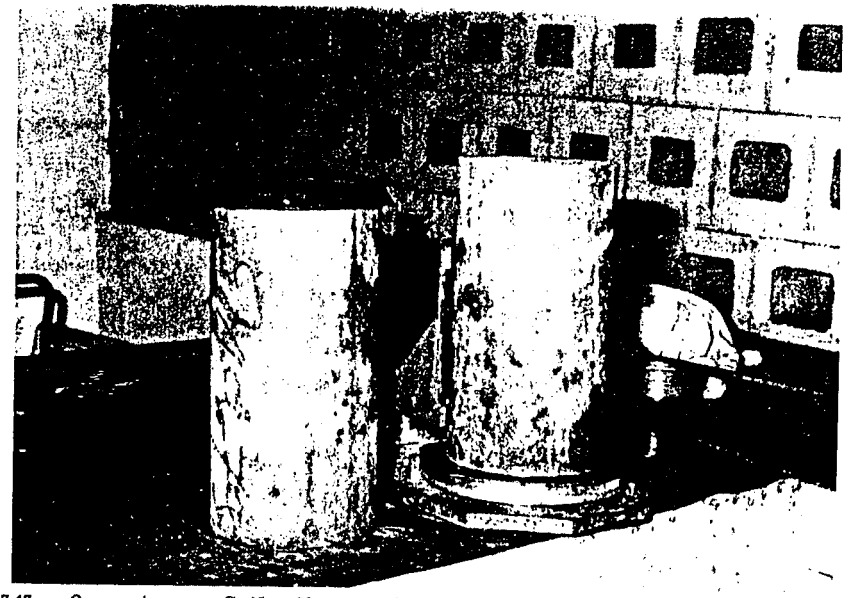


Figura 7.17 — Corpos de prova ∅ 15 x 30 cm sendo capeados com mistura de enxofre e cinza volante

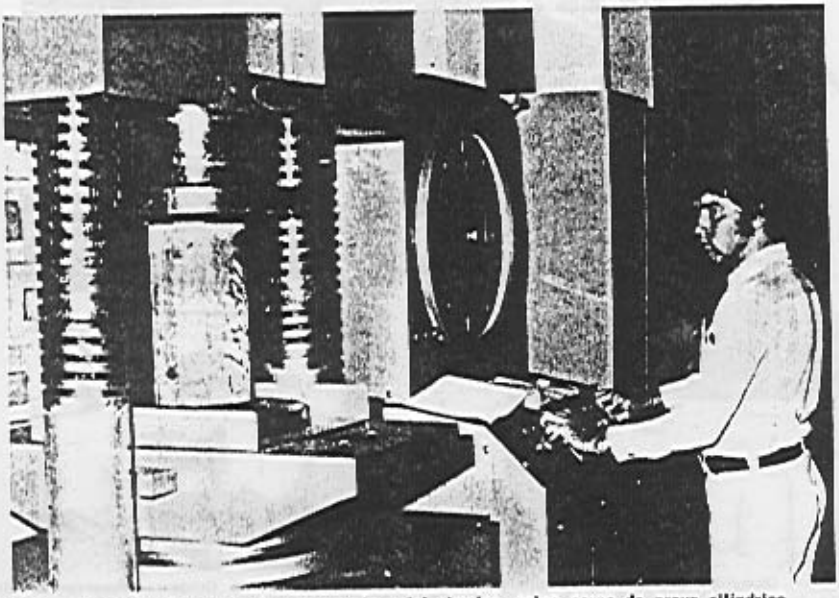


Figura 7.18 — Execução do ensaio de compressão axial simples sobre corpo de prova cilíndrico (Ø 15 x 30 cm) de concreto

As curvas da figura 7.19 [7.9], mostram a influência da relação A/Ceq na resistência dos concretos, para várias Ø máx do agregado.

Em decorrência da relação A/C nota-se que para concreto de mesma trabalhabilidade, mesmos materiais, mesma massa específica, a resistência do concreto aumenta com o aumento do teor de aglomerante, o que pode ser notado pelas tabelas da figura 7.19. Não resta dúvida, como já exposto no item 3, que a finura do aglomerante, bem como a sua composição, se refletem na resistência do concreto.

O agregado, adequado e são, também afeta a resistência do concreto. Essa influência se faz notar pela forma, textura, graduação, Ø máx. e outros.

O tipo de agregado, natural ou britado, geralmente influi de maneira indireta sobre a resistência do concreto. Por exemplo, devido à forma das partículas os teores de água e de cimento (e eventualmente cimento + material pozolânico) se alteram, acarretando resistências de valores diferentes.

Os valores das misturas citadas [7.13] na figura 7.20 ilustram as diferenças de resistências obtidas para misturas, em mesmas relações A/Ceq, com mesma trabalhabilidade e incorporação de ar, usando agregados naturais (seixos de quartzito) e agregados de basalto britado.

Observa-se pela figura 7.20 que os concretos com britas de basaltos sempre requerem maior teor de água, em uma mesma relação A/Ceq, para atender a uma certa trabalhabilidade do que os concretos correspondentes com seixos rolados. Para melhor avaliar a influência do tipo de agregado pode-se valer do conceito de rendimento [7.2], ou eficiência, de dosagem = n = definido como o quociente da resistência pelo consumo total de aglomerante (cimento + material pozolânico) e expresso em:

$$n = \frac{\text{MPa}}{\text{kg/m}^3} \text{ ou } \frac{\text{kgf/cm}^2}{\text{kg/m}^3}$$

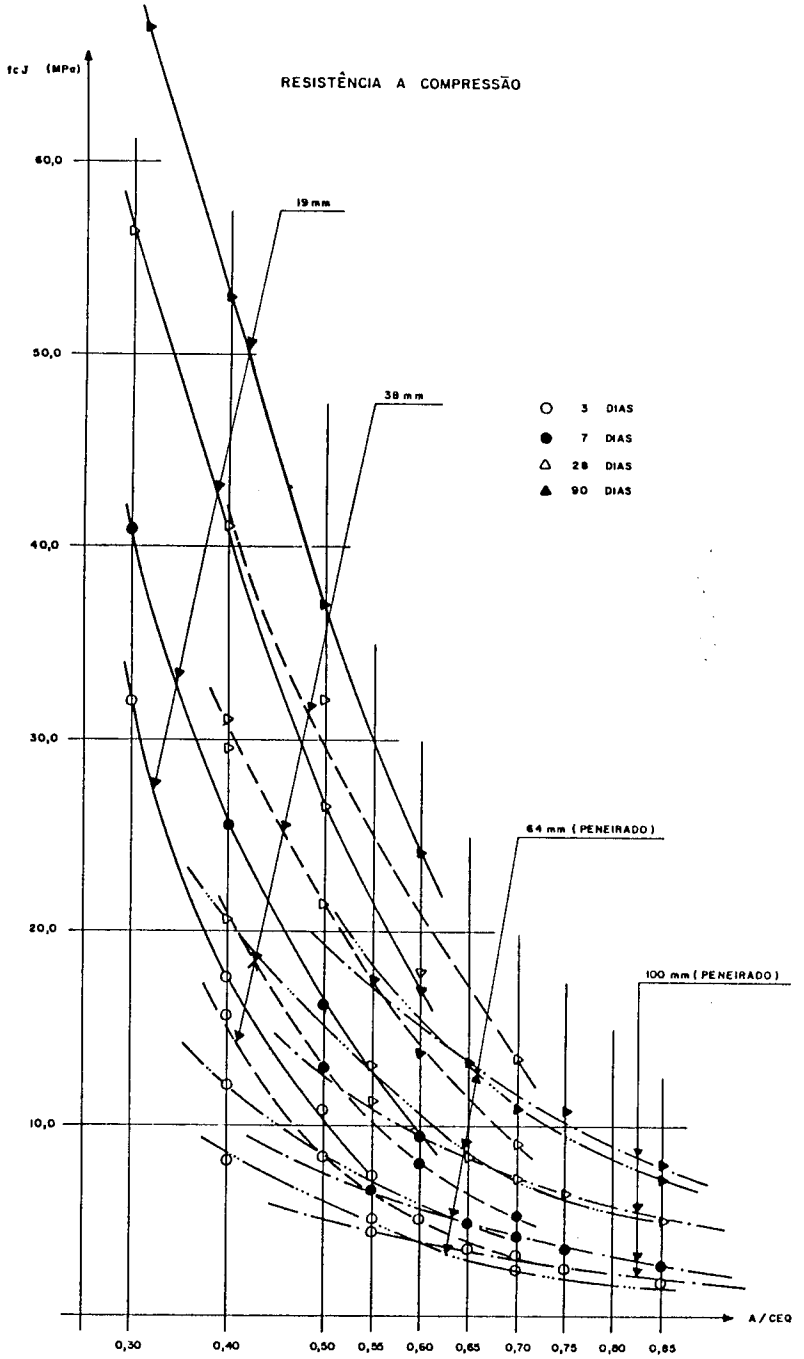


Figura 7.19 — Variação da resistência do concreto com o fator A/CEQ a várias idades e vários Ø máx. do agregado

DOSAGEM					
DIÂMETRO MÁXIMO (mm)			01	01	01	01
ÁGUA / CIMENTO (EQUIV.)			19	19	19	19
FLY ASH – % VOLUME SÓLIDO			0,300	0,400	0,500	0,600
COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS EM VOLUME	AREIA-% V. SÓLIDO		20	20	20	20
	ø 19 mm		27,5	36,2	38,5	39,9
			72,5	63,8	61,5	60,1
TRAÇO EM VOLUME SÓLIDO			1:3,02	1:5,05	1:6,51	1:7,95
CIMENTO (Kg / m³)			506,6	344,0	276,8	232,0
FLY ASH (Kg / m³)			91,5	62,1	49,9	41,8
ÁGUA (Kg / m³)			190,0	172,0	173,0	174,0
AREIA (Kg / m³)			433,5	648,6	715,4	759,0
BRITA 1 (Kg / m³)			1272,7	1272,7	1272,7	1272,7
OBTIDO	SLUMP (cm)		5,9	6,0	5,8	5,8
	TEMPERATURA °C		9,5	10,8	11,5	10,2
	ÁGUA EXSUDAÇÃO %		1,3	4,1	4,7	4,9
	DENSIDADE t/m³ 28 DIAS		2,537	2,536	2,530	2,526
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL MPa		3 DIAS	32,1	17,7	10,7	6,1
		7 DIAS	40,8	25,7	16,2	9,4
		28 DIAS	56,3	40,7	26,6	17,0
		90 DIAS	69,1	52,8	37,0	24,0

DOSAGEM						
DIÂMETRO MÁXIMO (mm)			02	02	02	02
ÁGUA / CIMENTO (EQUIV.)			38	38	38	38
FLY ASH – % VOLUME SÓLIDO			0,400	0,500	0,600	0,700
COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS EM VOLUME	AREIA-% V. SOLIDO		20	20	20	20
	ø 19 mm		34,8	36,5	37,2	37,4
	ø 38 mm		32,6	31,75	31,4	31,3
			32,6	31,75	31,4	31,3
TRAÇO EM VOLUME SÓLIDO			1:6,38	1:8,07	1:9,45	1:10,72
CIMENTO (Kg / m³)			283,8	230,4	198,7	176,0
FLY ASH (Kg / m³)			51,3	41,6	35,8	31,9
ÁGUA (Kg / m³)			142,0	144,0	149,0	154,0
AREIA (Kg / m³)			649,7	699,6	719,1	729,2
BRITA 1 (Kg / m³)			677,7	677,7	677,7	677,7
BRITA 2 (Kg / m³)			680,0	680,0	680,0	680,0
OBTIDO	AR %		3,8	3,5	3,8	3,5
	SLUMP (cm)		6,6	5,5	5,5	5,0
	TEMPERATURA °C		10,0	11,1	10,7	9,8
	ÁGUA EXSUDAÇÃO %		5,0	4,7	4,5	5,0
	DENSIDADE t/m³ 28 DIAS		2,517	2,552	2,541	2,534
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL MPa		3 DIAS	15,6	8,5	5,2	3,3
		7 DIAS	20,8	13,0	8,2	5,3
		28 DIAS	31,1	21,3	13,7	9,0
		90 DIAS	40,8	32,0	17,9	14,0

Figura 7.19 — Continuação

DOSAGEM								
DIÂMETRO MÁXIMO (mm)								
ÁGUA / CIMENTO (EQUIV.)								
FLY ASH - % VOLUME SÓLIDO								
COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS EM VOLUME	AREIA - % V. SÓLIDO							
	Ø 19 mm							
	Ø 38 mm							
	Ø 64 mm							
TRAÇO EM VOLUME SÓLIDO								
CIMENTO (Kg/m³)								
FLY ASH (Kg/m³)								
ÁGUA (Kg/m³)								
AREIA (Kg/m³)								
BRITA 1 (Kg/m³)								
BRITA 2 (Kg/m³)								
BRITA 3 (Kg/m³)								
OBTIDO	AR %							
	SLUMP (cm)							
	TEMPERATURA °C							
	ÁGUA EXSUDAÇÃO %							
	DENSIDADE t/m³	28 DIAS						
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL MPa	3 DIAS							
	7 DIAS							
	28 DIAS							
	90 DIAS							

03	03	03	03
64	64	64	64
0,400	0,550	0,700	0,850
30	30	30	30
25,6	27,5	28,0	28,2
18,7	18,2	18,1	18,0
18,7	18,2	18,1	18,0
37,0	36,1	35,8	35,8
1:9,31	1:12,89	1:15,80	1:18,41
187,2	138,6	113,9	98,2
58,0	43,0	35,3	30,3
107,0	109,0	114,0	119,0
527,5	579,5	595,3	600,9
426,9	426,9	426,9	426,9
428,3	428,3	428,3	428,3
853,1	853,1	853,1	853,1
4,6	4,5	4,1	5,0
4,9	4,0	4,0	4,8
10,2	12,0	10,0	9,3
5,5	4,0	5,4	5,8
2,531	2,523	2,547	2,545
8,2	5,3	2,5	1,8
12,1	7,5	4,3	2,5
20,4	13,2	7,3	5,0
29,5	18,0	10,8	7,3

DOSAGEM								
DIÂMETRO MÁXIMO (mm)								
ÁGUA / CIMENTO (EQUIV.)								
FLY ASH - % VOLUME SÓLIDO								
COMPOSIÇÃO DOS AGREGADOS EM VOLUME	AREIA - % V. SÓLIDO							
	Ø 19 mm							
	Ø 38 mm							
	Ø 64 mm							
	Ø 100 mm							
TRAÇO EM VOLUME SÓLIDO								
CIMENTO (Kg/m³)								
FLY ASH (Kg/m³)								
ÁGUA (Kg/m³)								
AREIA (Kg/m³)								
BRITA 1 (Kg/m³)								
BRITA 2 (Kg/m³)								
BRITA 3 (Kg/m³)								
BRITA 4 (Kg/m³)								
OBTIDO	AR %							
	SLUMP (cm)							
	TEMPERATURA °C							
	ÁGUA EXSUDAÇÃO %							
	DENSIDADE t/m³	28 DIAS						
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL MPa	3 DIAS							
	7 DIAS							
	28 DIAS							
	90 DIAS							

04	04	04	04
100	100	100	100
0,550	0,650	0,750	0,850
30	30	30	30
26,7	27,0	27,3	27,5
11,1	11,0	11,0	10,9
14,7	14,7	14,6	14,6
18,3	18,2	18,1	18,1
29,2	29,1	29,0	28,9
1:14,42	1:16,45	1:18,68	1:20,88
126,1	110,7	98,2	88,0
39,0	34,4	30,3	27,2
99,0	103,0	105,0	107,0
573,1	580,5	590,3	596,9
264,0	264,0	264,0	264,0
352,5	352,5	352,5	352,5
438,4	438,4	438,4	438,4
704,5	704,5	704,5	704,5
5,7	5,6	5,7	5,6
3,2	3,6	3,5	3,6
12,1	11,2	12,0	10,0
6,9	6,9	7,3	7,4
2,647	2,623	2,630	2,669
4,5	3,6	2,8	2,0
6,8	4,9	3,8	2,9
11,3	8,4	6,5	5,3
17,6	13,3	10,8	8,0

Figura 7.19 — Continuação

DOSAGEM	% POZOLANA (VOLUME SÓLIDO)	A/C EQ	GRAÚDO	ÁGUA Kg/m³	CIMENTO Kg/m³	POZOLANA Kg/m³	AGLOMERANTE (CIMENTO + POZOLANA)	TEMPERATURA (°C)	TRABALHABILIDADE (cm)	TEOR DE AR (%)	CONCRETO PENEIRADO NA MALHA 38 mm		RENDIMENTO = TENSÃO / CONSUMO (MPa/Kg/m³)	
											σc 7 (MPa)	σc 28 (MPa)	7t 7	7t 28
C1	20	0,30	C1	185,0	493,4	96,2	589,6	15,0	6,1	—	43,1	32,8	0,073	0,090
C1	20	0,50	C1	150,0	240,0	46,7	286,7	13,5	7,3	—	26,3	38,1	0,092	0,136
B1	20	0,30	B1	220,0	586,9	114,5	701,4	14,4	4,9	—	47,6	57,4	0,068	0,082
B1	20	0,50	B1	177,0	283,2	55,3	338,5	14,7	5,3	—	25,7	41,0	0,076	0,121
C2	20	0,30	C1 + C2	172,0	371,8	72,8	444,6	14,2	5,0	—	38,5	43,0	0,080	0,097
C2	20	0,50	C1 + C2	139,5	223,4	43,5	266,9	14,5	6,5	—	19,2	32,0	0,072	0,118
B2	20	0,30	B1 + B2	193,0	514,6	100,5	615,1	15,7	4,5	—	44,7	54,6	0,073	0,089
B2	20	0,50	B1 + B2	154,0	246,4	48,3	294,7	15,3	6,5	—	22,3	37,4	0,076	0,127
C3	30	0,55	C1 + C2 + C3	93,0	118,4	39,5	157,9	13,0	4,5	4,8	13,1	24,1	0,096	0,153
C3	30	0,85	C1 + C2 + C3	98,0	80,6	27,0	107,6	13,2	4,5	5,1	8,3	11,6	0,049	0,103
B3	30	0,55	B1 + B2 + B3	110,0	140,2	47,0	187,2	17,3	4,5	5,1	14,7	26,6	0,079	0,142
B3	30	0,85	B1 + B2 + B3	115,0	94,7	31,8	126,5	16,8	4,2	5,3	5,7	10,1	0,045	0,080
C4	30	0,55	C1 + C2 + B3 + B4	79,0	100,5	33,6	134,3	18,2	4,5	5,9	13,4	22,6	0,099	0,168
C4	30	0,85	C1 + C2 + B3 + B4	82,0	67,6	22,7	90,3	16,3	4,0	5,6	4,2	11,0	0,047	0,122
B4	30	0,55	B1 + B2 + B3 + B4	92,0	117,1	39,3	156,4	16,0	4,2	6,3	13,4	25,1	0,086	0,160
B4	30	0,85	B1 + B2 + B3 + B4	97,0	80,0	26,3	106,3	15,3	4,2	5,8	5,3	10,6	0,050	0,100

C = SEIXOS ROLADOS DE QUARTZITO
B = BRITAS DE BASALTO

1 = ϕ MAX. 19 mm 2 = ϕ MAX. 38 mm
3 = ϕ MAX. 76 mm 4 = ϕ MAX. 52 mm

Figura 7.20 — Valores comparativos da influência do tipo do agregado na resistência do concreto [7.13]

Observa-se então pela figura 7.20, que os concretos com cascalhos (seixos rolados de quartzito) podem ter rendimento médio superior (ao redor de 9% a idade de 7 dias, e 12% a idade de 28 dias) que os concretos com britas de basalto.

Pelos valores da figura 7.19, nota-se que para um mesmo Ømáx — tamanho máximo do agregado — o rendimento "n" apresenta um ligeiro decréscimo com o aumento da relação A/C ou A/Ceq. Entretanto, o rendimento aumenta sensivelmente com o aumento do diâmetro máximo. Isto pode ser notado pela figura 7.21.

Observa-se então que um determinado nível de resistência pode ser obtido com um menor teor de aglomerante, quando se usa um concreto com agregado de maior tamanho máximo que um concreto de pequena bitola.

A variação da finura da areia acarreta variações no consumo de água e, por conseguinte, do aglomerante, mantidas as características de trabalhabilidade da mistura. Isto pode ser observado através da figura 7.22 de [7.15], onde se nota que o menor teor de água foi obtido para areia quartzosa de módulo de finura ao redor de 2,70.

O tipo da areia, decorrente do processo de produção, natural ou britada (ou moída) também influencia a resistência do concreto, quando se compara concretos de mesma trabalhabilidade e incorporação de ar, como mostrado na figura 7.23 [7.15].

Decorre da figura 7.23 a observação que a areia natural quartzosa apresenta um melhor rendimento.

Como já anteriormente citado, no item 3, e evidenciado pelas figuras 3.126 e 3.127, é importante ressaltar a influência do uso de material pozolânico na resistência do concreto. A utilização de uma pozolana de boa qualidade em substituição a uma parte do cimento pode trazer além de outras melhorias ao concreto, uma modificação no processo de evolução de resistência do mesmo, como mostra a figura 7.24 [7.16].

A resistência à compressão do concreto aumenta com a idade, na presença de umidade. Essa evolução depende da composição química do cimento, do teor de material pozolânico (se usado) e das suas características. A figura 7.25 obtida a partir de [7.5] [7.14] [7.17] [7.18] [7.19] [7.20] evidencia a evolução da resistência do concreto com a idade, tomando-se como referência o valor obtido a 28 dias de idade.

Denota-se pela figura 7.26, além da evolução de resistência com a idade, a influência do material pozolânico ao se observar os valores obtidos para a obra da barragem de Oroville (Estados Unidos), [7.20].

Os aditivos têm efeitos distintos na resistência do concreto. Esses efeitos variam muito em decorrência das propriedades do aditivo e com as características da mistura do concreto e do desempenho conjunto dos componentes.

Os aditivos redutores de água atuam diminuindo o teor de água, o que pode resultar em uma variação na resistência do concreto. Isso depende da atuação do aditivo. O mesmo pode ser obtido com o uso de aditivos retardadores.

Os aditivos incorporadores de ar, como visto no item 3, por atuarem dando maior consistência à mistura, permitem uma redução do teor de água, o que pode resultar em uma alteração do consumo, ou de outra maneira, em uma variação na resistência como ilustra a figura 7.26 [7.21].

Como citado em 7.2.1.1, ao se usar concretos com agregados de tamanho máximo superior a 38 mm, há necessidade que a avaliação da resistência seja feita sobre corpos de prova cilíndricos com diâmetro no mínimo igual a três vezes o Ømáx do agregado usado no concreto. Entretanto isso leva a dimensões de corpos de prova que dificultariam o controle de qualidade desses concretos, devido às dificuldades de manuseio, estocagem, necessidade de equipamentos especiais de ensaio.

Para contornar essa dificuldade, lança-se mão do controle de qualidade através de corpos de prova cilíndricos de Ø 15 x 30 cm, moldados com concretos da fração passante pela malha de 38 mm, através do peneiramento úmido do concreto integral fresco, como se faz para os ensaios citados no item 6.

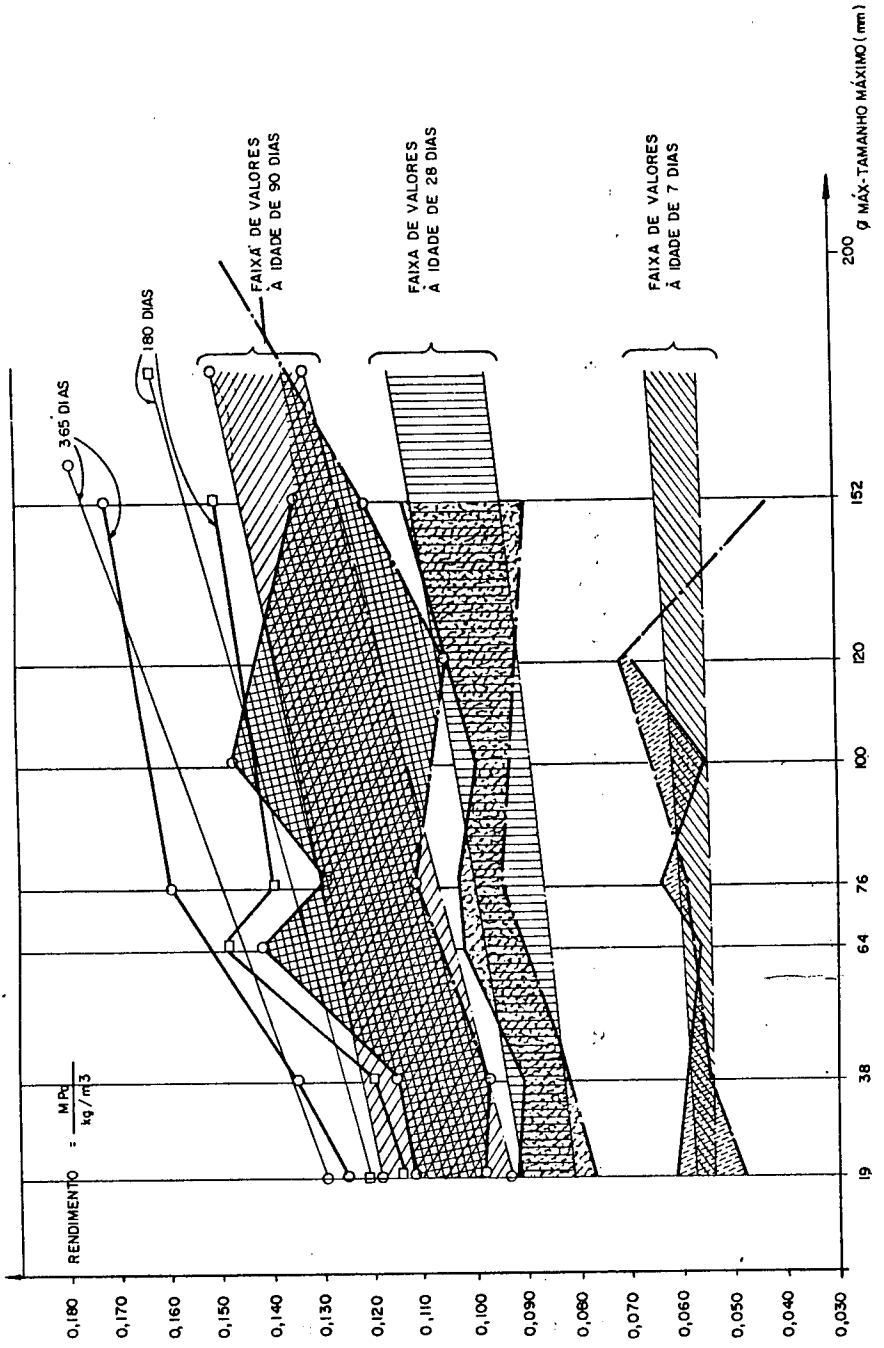


Figura 7.21 — Valores de rendimentos obtidos pelos concretos [7.14] de 24 obras de barragens no Brasil, totalizando aproximadamente 38.000.000 m³ de concreto.

MÓDULO DE FINURA DA AREIA	DIAMETRO MÁXIMO DO AGREGADO GRAÚDO (mm)	a/c EQ	COMPOSIÇÃO DA MISTURA (Kg/m³)							RESISTÊNCIA MPa		RENDIMENTO MPa / Kg/m³	
			CIMENTO	POZOLANA	AREIA	19 mm	38 mm	76 mm	152 mm	ÁGUA	7 DIAS	28 DIAS	η_7	η_{28}
3,9	19	0,50	304	59	893	974				190	22,6	36,1	0,062	0,100
3,4	19	0,50	297	58	811	1081				186	23,5	37,2	0,066	0,105
2,7	19	0,50	291	57	773	1145				182	23,2	35,0	0,067	0,101
2,1	19	0,50	296	58	763	1145				185	23,7	37,0	0,067	0,105
1,5	19	0,50	296	58	710	1202				185	25,0	38,5	0,071	0,109
3,4	38	0,50	270	53	745	618	618			167	21,7	35,6	0,067	0,110
2,7	38	0,50	264	51	709	648	648			165	21,3	35,1	0,068	0,111
2,1	38	0,50	269	53	698	648	648			168	22,7	34,8	0,071	0,108
3,4	76	0,50	166	55	551	506	501	618		119	14,9	26,9	0,067	0,121
2,7	76	0,50	162	54	523	520	515	635		116	15,6	26,6	0,072	0,123
2,1	76	0,50	167	56	512	520	515	635		119	17,5	28,5	0,079	0,128
3,4	152	0,50	136	45	494	374	540	594	490	97	16,3	28,2	0,090	0,156
2,7	152	0,50	133	44	468	382	347	607	500	95	17,4	27,0	0,098	0,152
2,1	152	0,50	137	46	457	382	347	607	500	98	16,6	27,4	0,091	0,149

Figura 7.22 — Influência do módulo de finura da areia sobre a resistência do concreto

TIPO DE AREIA	M.F.	DIÂMETRO MÁXIMO DO AGREGADO GRAÚDO (mm)	a/c EQ	COMPOSIÇÃO DA MISTURA (Kg/m³)							RESISTÊNCIA MPa		RENDIMENTO MPa/Kg/m³	
				CIMENTO	POZOLANA	AREIA	19 mm	38 mm	76 mm	152 mm	ÁGUA	7 DIAS	28 DIAS	η_7	η_{28}
NATURAL	2,50	19	0,50	283	55	795	1141				177	22,1	36,3	0,065	0,107
BASALTO	2,75	19	0,50	302	59	836	1141				189	20,2	34,2	0,056	0,095
GRANITO	2,60	19	0,50	328	64	636	1141				205	21,9	34,6	0,056	0,088
NATURAL	2,50	38	0,50	256	50	730	645	652			160	20,9	32,0	0,068	0,105
BASALTO	2,75	38	0,50	278	54	805	620	628			174	18,4	30,5	0,055	0,092
GRANITO	2,60	38	0,50	296	58	615	645	652			185	19,8	31,8	0,053	0,090
NATURAL	2,50	76	0,85	97	32	595	518	517	635		118	4,9	11,3	0,038	0,087
BASALTO	2,75	76	0,85	99	33	661	518	517	635		120	4,2	8,9	0,032	0,067
GRANITO	2,60	76	0,85	112	38	522	518	517	635		136	4,7	10,4	0,031	0,069
NATURAL	2,50	152	0,85	80	26	525	381	349	607	500	97	5,2	10,3	0,049	0,097
BASALTO	2,75	152	0,85	86	29	558	381	349	607	500	105	4,3	9,3	0,037	0,081
GRANITO	2,60	152	0,85	93	31	462	381	349	607	500	113	5,2	11,7	0,042	0,094

Figura 7.23 — Influência do tipo de areia sobre a resistência do concreto

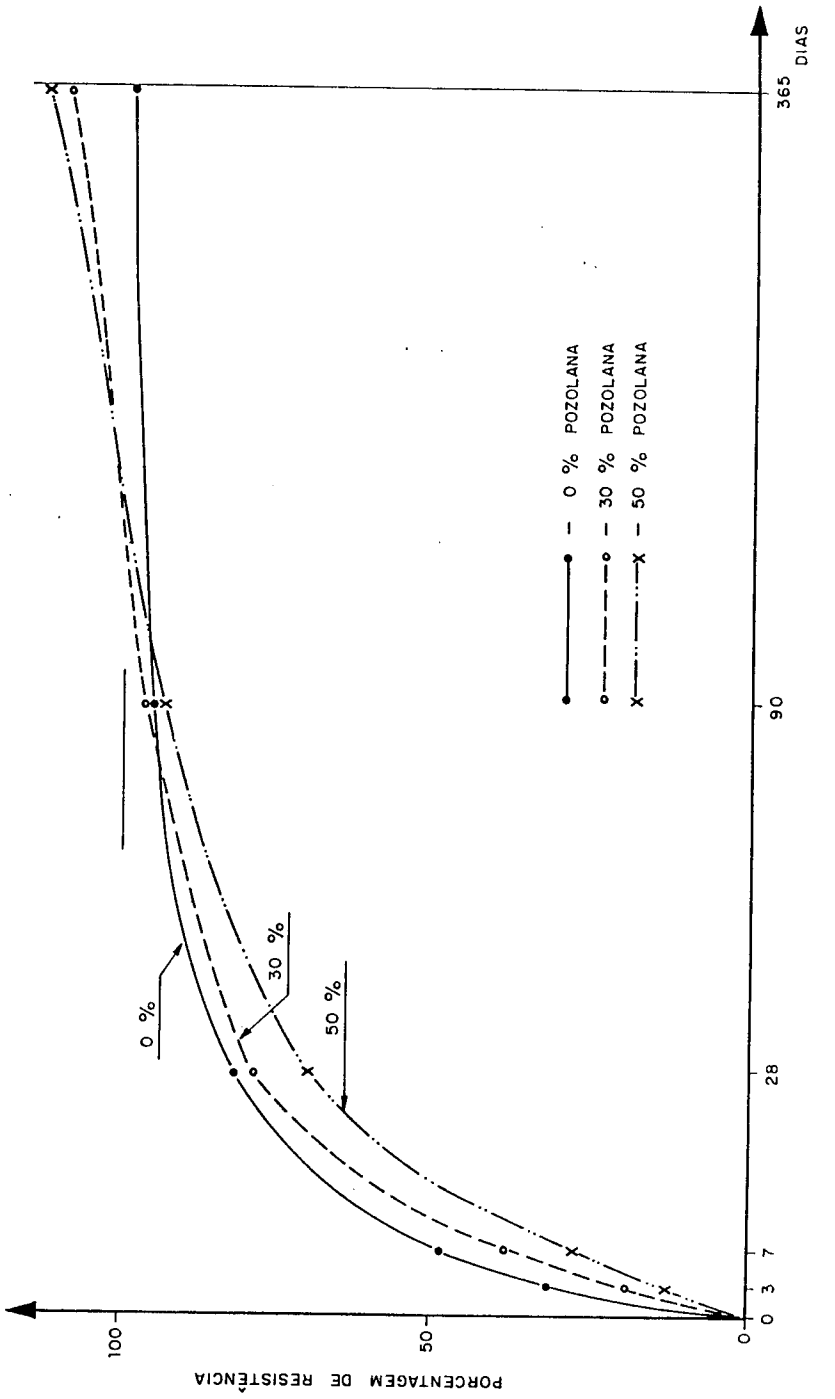


Figura 7.24 — Evolução média da resistência à compressão onde a resistência a 365 dias do concreto com 0% de pozolana é considerada como referência (100% de resistência)

OBRA DE BARRAGEM	Ø MAX. (mm)	CONSUMO Kg/m³			EVOLUÇÃO %							
					IDADE (dias)					IDADE (anos)		
		CIM.	MAT. POZ.	TOTAL	7	28	90	180	360	2	4	5
ITAIPU (7.14) (COMPRESSÃO AXIAL)	19	*	*	*	49	100	142	152	163			
	38	*	*	*	56	100	138	150	156	161		178
	76	*	*	*	54	100	138	152	154	156		165
	152	*	*	*	55	100	137	150	155	157		168
AGUA VERMELHA (7.14)	38	*	*	*	61	100	118	133	135			
	76	*	*	*	62	100	115	120	133			
	152	*	*	*	57	100	121	127	133			
ILHA SOLTEIRA (7.14)	19	*	*	*	73	100			125			
	38	*	*	*	66	100	115		120			
	76	*	*	*	59	100	117		124			
	152	*	*	*	58	100	119		127			
HUNGRY HORSE (7.17)	152	113	54	167	52	100	151	181	196			
	152	169	54	223	57	100	136	149	153			
SHASTA (7.18)	152	226		226	42	100	164	174	178			
HARTWELL (7.18)	152	148	51	199	55	100	165	181	196			
FRIANT (7.18	152	226		226	34	100	169	189	203			
ANGOSTURA (7.17)	152	226		226	60	100	139		145			
KORTES (7.17)	152	173		173	47	100	128		143			
	152	206		206	53	100	128		137			
CANYON FERRY (7.17)	200	107	33	140	58	100	149		177			
	200	151	47	198	52	100	126		133			
MONTICELLO (7.17)	152	127	42	169	35	100	122		171			
HARTWELL (7.19)	152			140	39	100	185	232	243			
	152			212	51	100	164	187	200			
SUTTON (7.19)	152			140	45	100	162	191	193	212		
	152			226	53	100	151			163		
OROVILLE (7.20)	152	71	42	113	31	100	154	192	215	223	235	
	152	113		113	62	100	138	154	158	162	169	
	152	99	42	141	40	100	150	170	185	195	200	
	152	141		141	50	100	135	145	148	150	150	
	152	127	42	169	37	100	126	131	134	135	141	
	152	169		169	58	100	123	131	131	131	131	

Figura 7.25 — Evolução da resistência à compressão axial simples em obras de barragens

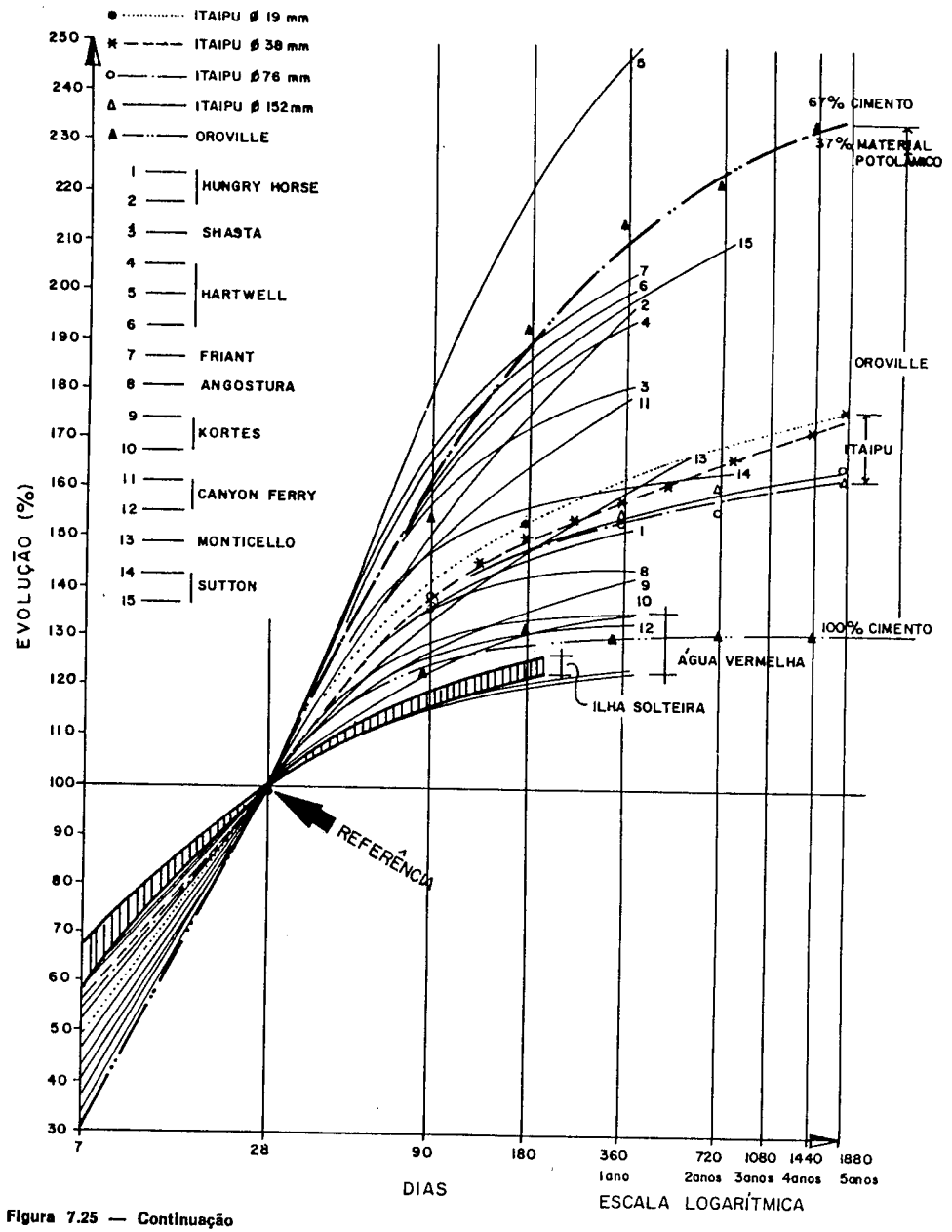


Figura 7.25 — Continuação

A/C (EQUIVALENTE)		0,800	0,816	0,813	0,633	0,627	0,626	0,658	0,651	0,650
PORCENTAGEM DE POZOLANA (VOLUME)		0	30	50	0	30	50	0	30	50
CIMENTO (Kg/m^3)		120	84	60	120	84	60	120	84	60
POZOLANA (Kg/m^3)		—	29	49	—	29	49	—	29	49
ÁGUA (Kg/m^3)		96	99	100	76	76	77	79	79	80
AREIA (Kg/m^3)		488	479	475	430	429	425	408	408	403
CASCALHO 3/4" (19 mm) (Kg/m^3)		539	539	539	305	305	305	—	—	—
CASCALHO 1 1/2" (38 mm) (Kg/m^3)		505	505	505	344	344	344	—	—	—
CASCALHO 3" (76 mm) (Kg/m^3)		639	639	639	—	—	—	—	—	—
BASALTO 3/4" (19 mm) (Kg/m^3)		—	—	—	—	—	—	—	—	—
BASALTO 1 1/2" (38 mm) (Kg/m^3)		—	—	—	—	—	—	338	338	338
BASALTO 3" (76 mm) (Kg/m^3)		—	—	—	515	515	515	574	574	574
BASALTO 6" (152 mm) (Kg/m^3)		—	—	—	743	743	743	815	815	815
AR INCORPORADO (%)		5,6	5,6	5,4	5,4	5,4	5,7	5,4	5,6	5,4
ABATIMENTO (SLUMP) (cm)		4,3	4,7	4,8	4,5	4,6	4,6	4,8	4,6	4,6
RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (DIAS) (MPa)	3	2,5	1,1	0,9	3,5	2,0	1,4	4,6	3,0	1,9
	7	4,4	3,3	2,1	6,8	5,4	3,4	7,3	6,3	4,7
	28	7,3	6,2	5,6	11,1	11,8	10,0	12,6	12,0	11,0
	90	9,1	7,8	8,5	13,6	14,6	12,7	12,6	14,5	14,1
	365	9,6	9,0	10,2	14,3	16,7	15,4	13,3	16,6	17,1

Figura 7.25 — Continuação

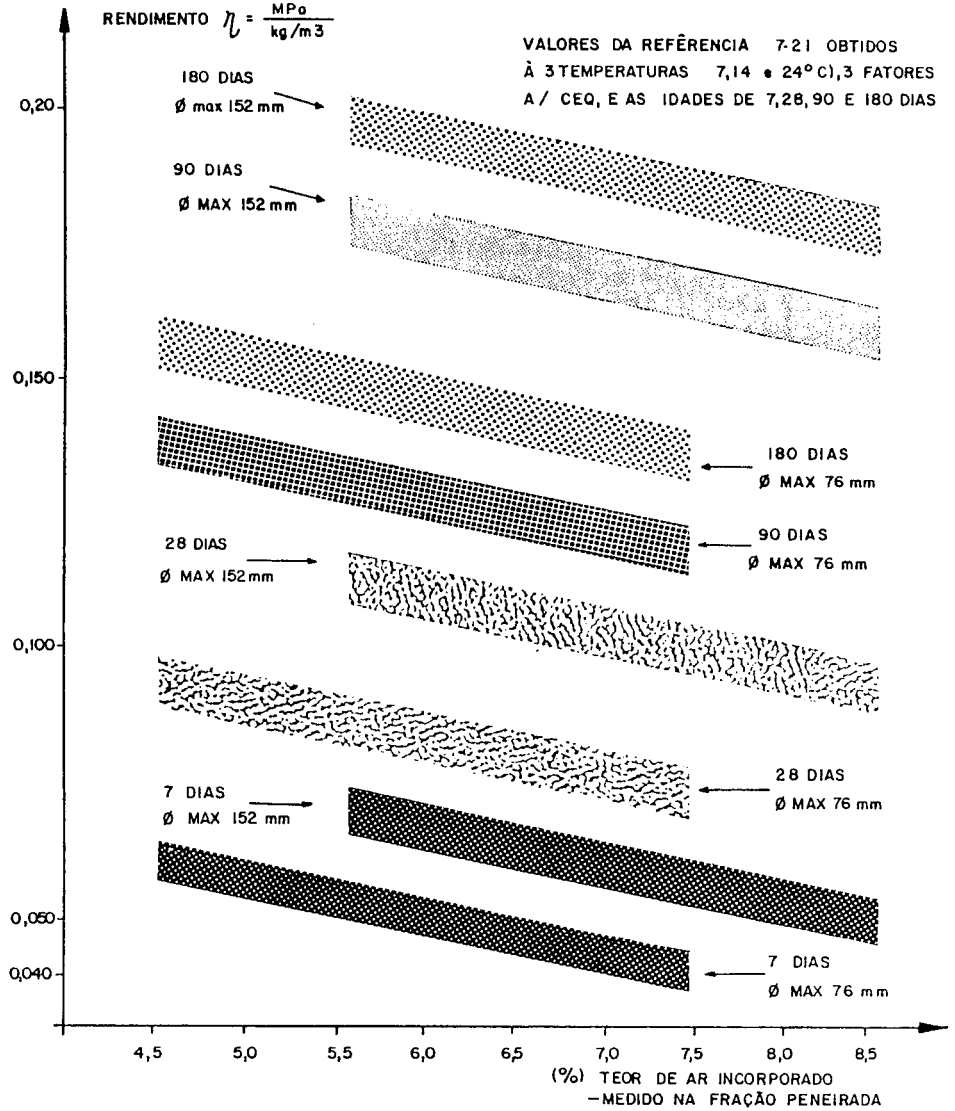


Figura 7.26 — Variação do rendimento com o teor de ar incorporado

A partir de ensaios comparativos se estabelece um fator de correlação, denominado fator "q" = fator de forma, que é a relação entre a resistência do concreto obtida através dos corpos de prova moldados com concreto passante pela malha de 38 mm e a obtida pelos corpos de prova moldados com concreto integral.

Os valores normalmente obtidos no Brasil [7.2] [7.22] situam-se ao redor de:

$1{,}20 \leqslant q \leqslant 1{,}30$ para Ø máx 76 mm e
$1{,}05 \leqslant q \leqslant 1{,}25$ para Ø máx 152 mm.

Deve ser salientado que os valores referidos nas figuras de 7.19 a 7.26, a concretos com Ømáx > 38 mm dizem respeito a valores obtidos sobre corpos de prova moldados com a fração do concreto peneirado.

O adensamento do concreto pode também afetar a sua resistência. Isso pode ser demonstrado pela ação da revibração. Estudos efetuados durante a construção da obra de Itaipu [7.23] mostraram que a resistência à compressão pode ser aumentada sensivelmente como mostram as figuras 7.27 e 7.28, sendo que os valores da figura 7.28 foram obtidos sobre testemunhos extraídos das áreas revibradas [7.2].

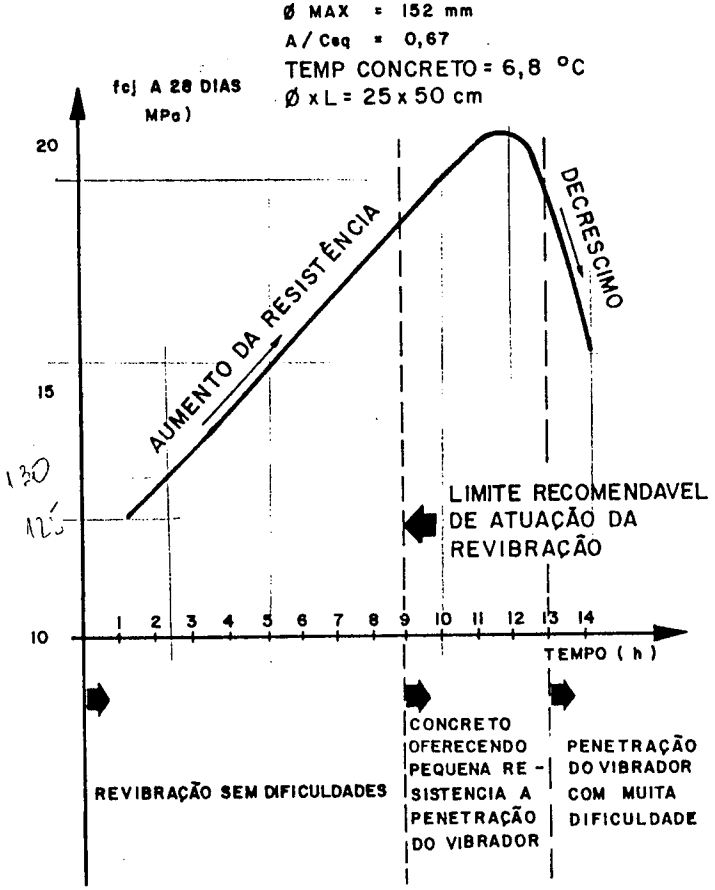


Figura 7.27 — Influência da revibração na resistência — Extraído de ensaios sobre corpos de prova de testemunhos

Como foi citado, uma das maneiras de se avaliar a resistência do concreto de uma estrutura consiste no ensaio de corpos de prova obtidos a partir de testemunhos extraídos da própria estrutura, como ilustra a figura 7.29.

Nessas oportunidades, com o intuito de melhor aproveitar toda a extensão do testemunho, é comum se utilizar corpos de prova com relação comprimento/diâmetro de diversos valores. Há então necessidade [7.24] [7.25] de uma correção, como mostra a figura 7.30.

Corpos de prova obtidos a partir de testemunhos extraídos da estrutura de concreto normalmente apresentam [7.26] resistências superiores (entre 5% e 20%) em relação aos corpos de prova moldados com o concreto da estrutura.

No item 3 comentou-se a influência da velocidade de carregamento na resistência de argamassas, no ensaio de avaliação de cimento.

O resultado da resistência à compressão do concreto também é afetado pela velocidade de carregamento. Essa influência pode ser avaliada também em correspondência com as deformações que ocorrem durante o carregamento.

É o "fator velocidade de carregamento" que determina a influência do fator tempo no valor da resistência, a influência do carregamento e a influência do comportamento elastoplástico. Em um ensaio rápido convencional obtêm-se a tensão de ruptura em aproximadamente cinco a dez minutos. Interrompendo-se o ensaio ligeiramente abaixo do valor do ensaio rápido e mantendo-se a tensão constante, pode-se ter uma ruptura após um tempo maior com uma deformação também maior. Esse processo não caminha indefinidamente pois pode existir uma tensão mínima, na qual o material só se rompe após tempo infinitamente grande, representada pela tensão que é a resistência sob carga constante, como ilustrado na figura 7.31.

Para essa avaliação ainda não há até 1985 uma padronização de procedimentos. Entretanto algumas entidades (Cesp e Itaipu) já executaram esse tipo de ensaio no Brasil.

Para esse ensaio pode ser usado um sistema incremental de aplicação de carga, que é esquematicamente mostrado [7.27] na figura 7.32.

O carregamento do corpo de prova é efetuado por um macaco plano sob o corpo de prova, a pressão é lida em um manômetro, previamente aferido com o sistema. A pressão atuante é aplicada por um êmbolo carregado incrementalmente por cargas previamente estipuladas. As deformações dos corpos de prova são lidas por relógios comparadores ou por extensômetros elétricos (tipo wire strain gage ou equivalentes) embutidos ou colados.

As figuras 7.33 e 7.34 ilustram a fase inicial do ensaio (sem o carregamento), uma fase intermediária e a fase de ruptura dos corpos de prova.

Um dos estudos efetuados [7.27] permitiu obter as curvas mostradas na figura 7.35, onde se observa o fenômeno.

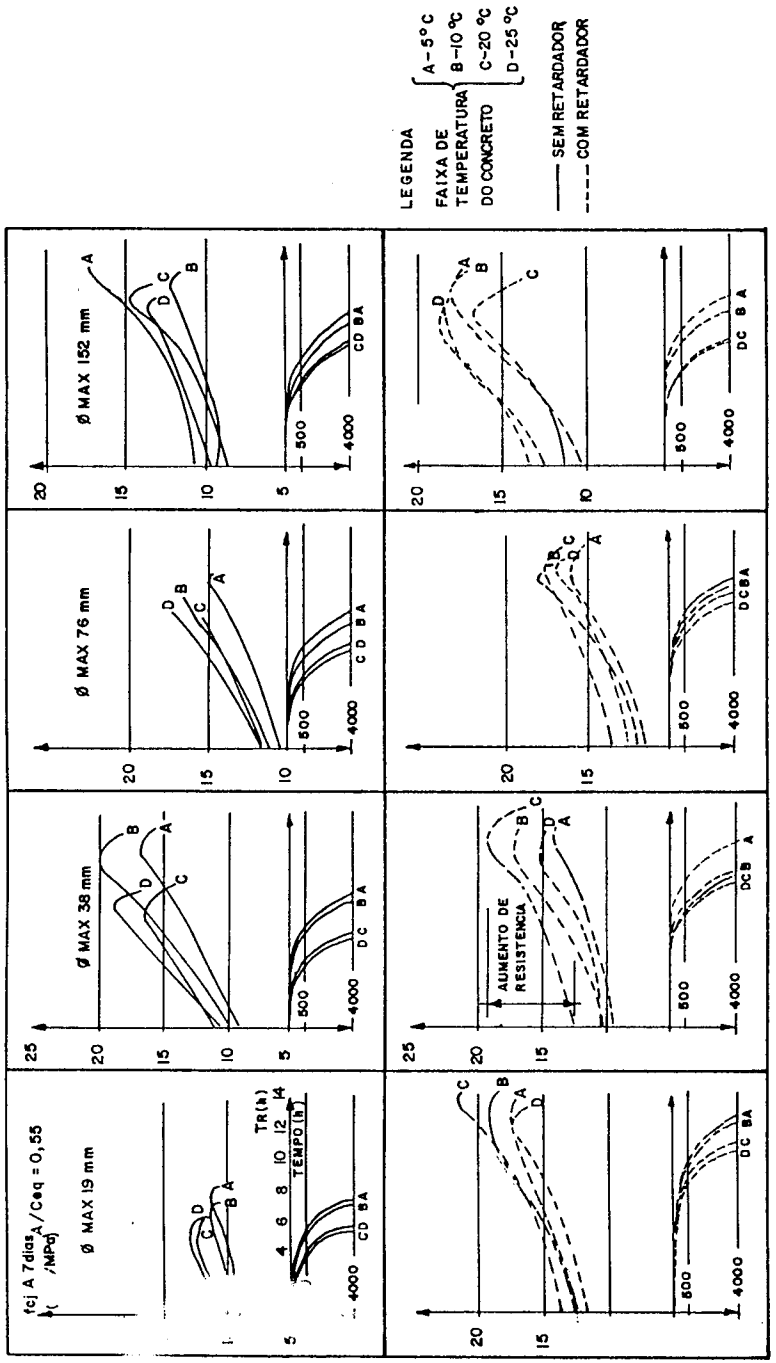


Figura 7.28 — Influência de revibração na resistência axial simples (ensaios em laboratório)

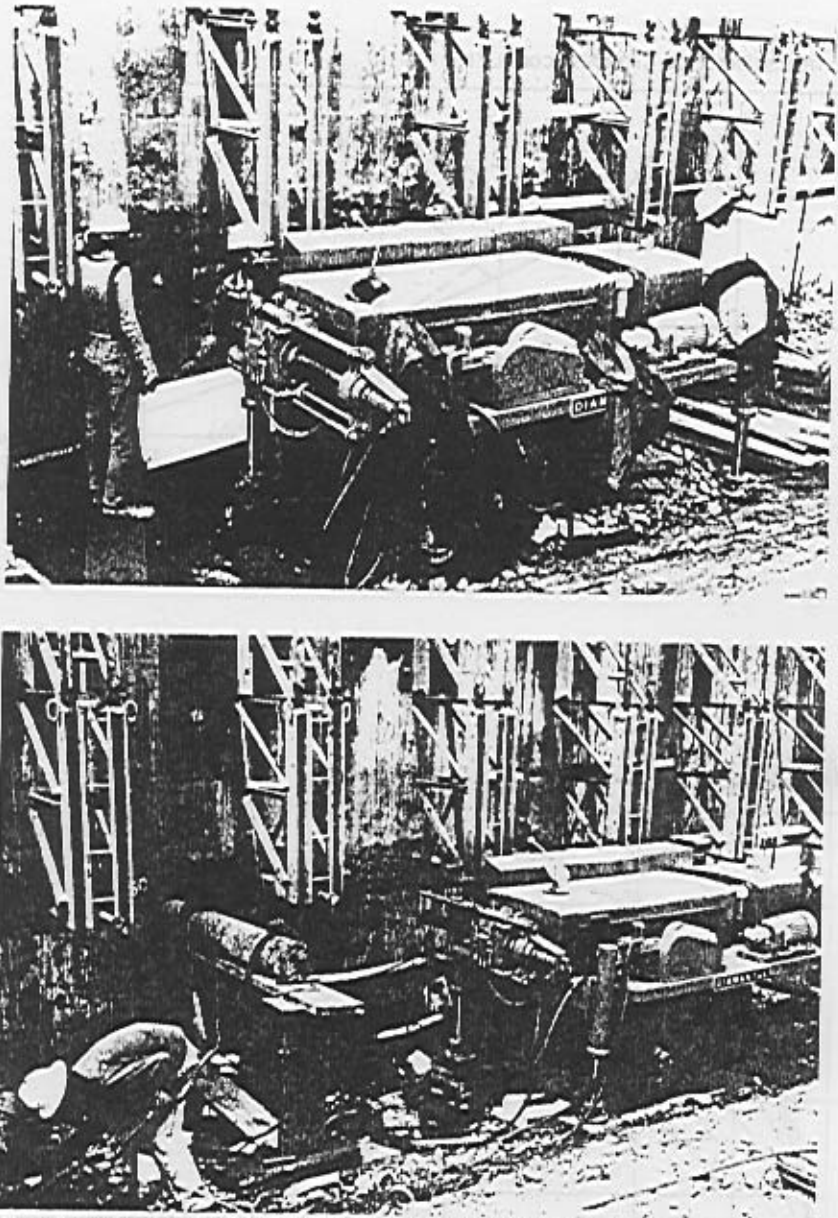


Figura 7.29 — Operações de extração de testemunhos de uma estrutura de concreto para avaliação da resistência

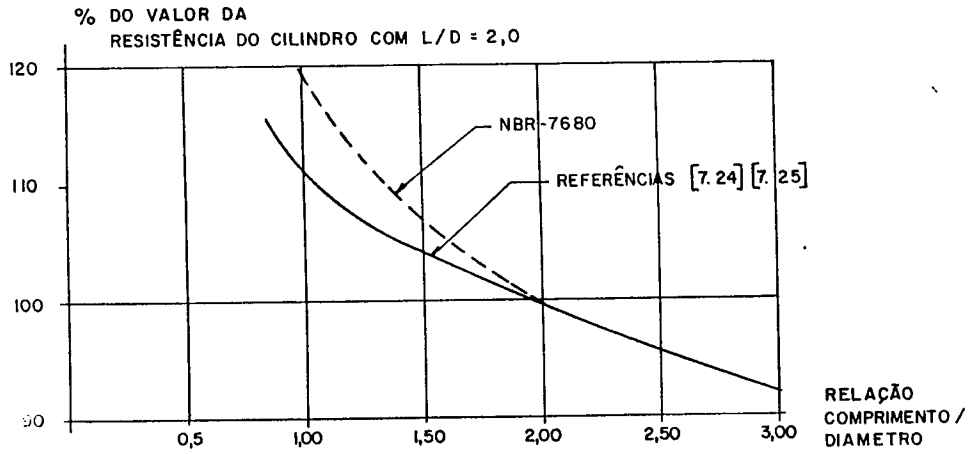


Figura 7.30 — Dados para correção de valores de resistência à compressão obtidos sobre corpos de prova de relação L/D = 2

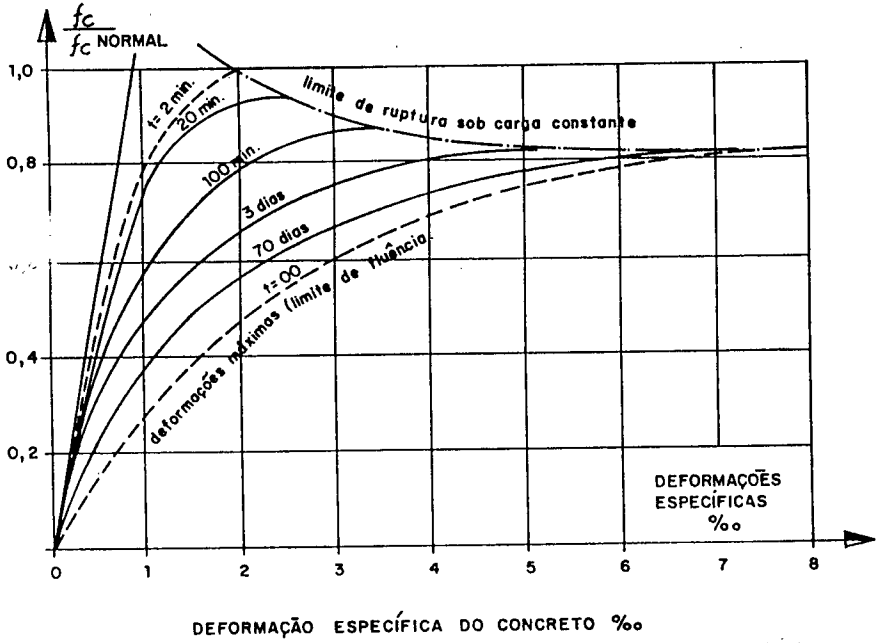


Figura 7.31 — Ilustração do fenômeno de variação da resistência em função da velocidade de carregamento

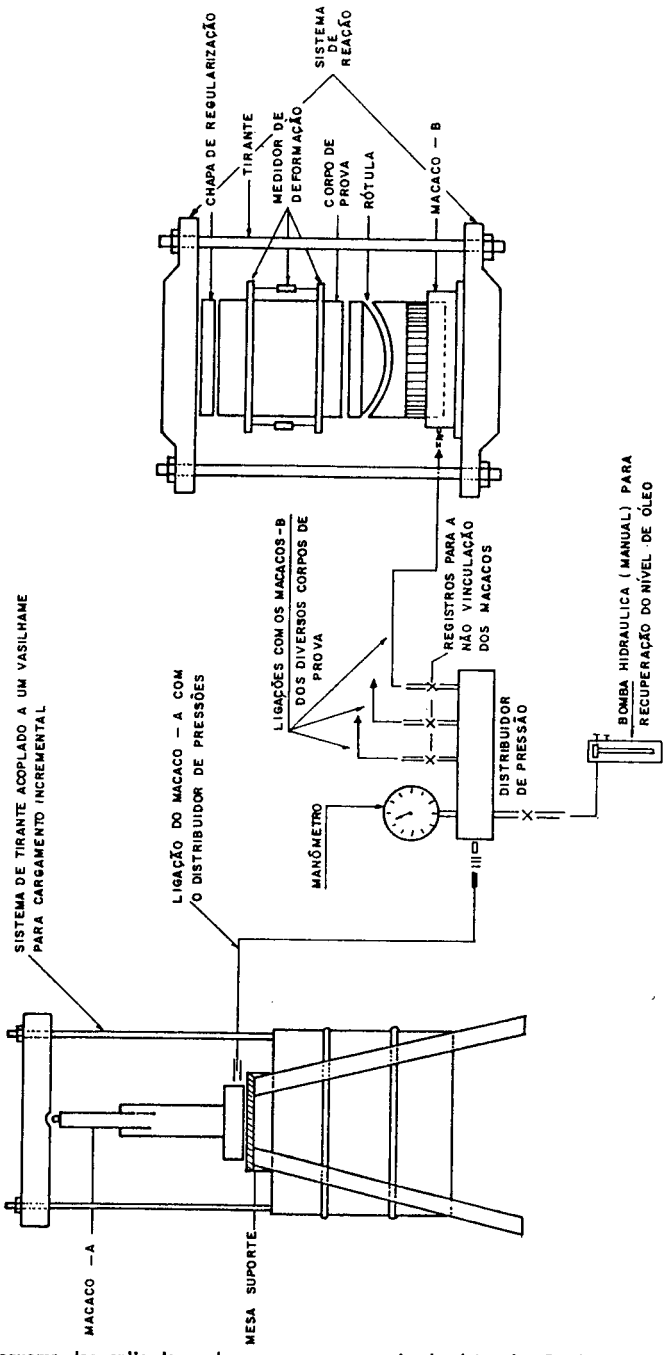


Figura 7.32 — Esquema dos aplicadores de carga para o ensaio de determinação da curva limite de deformação na ruptura

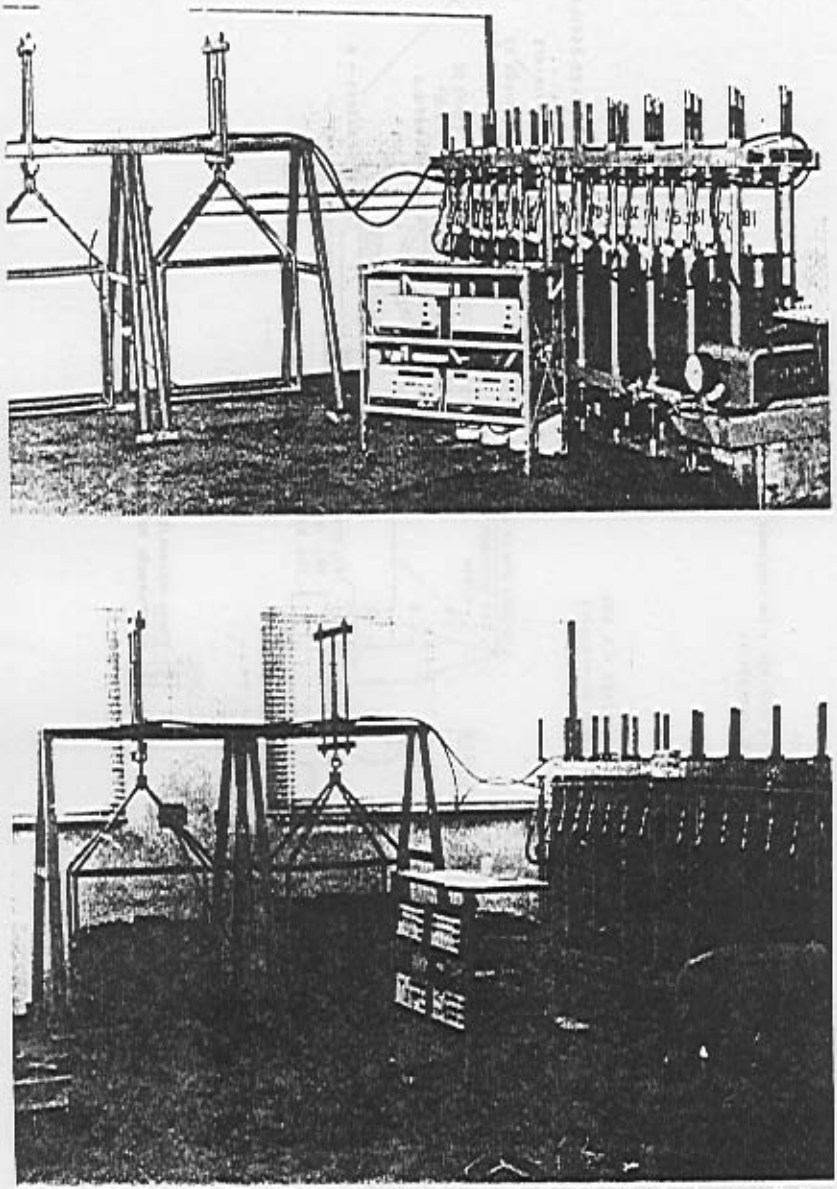


Figura 7.33 — A foto superior mostra o instante inicial do ensaio de determinação da curva limite de deformação na ruptura, vendo-se os corpos de prova sobre os macacos de carga, o aplicador de pressão no sistema hidráulico (à esquerda), e ao centro um conjunto com temporizador para leitura automática das deformações através de extensômetros elétricos de resistência.
A foto inferior mostra uma fase intermediária do ensaio, vendo-se o aplicador de pressão com certa carga (tarugos de barras de aço)

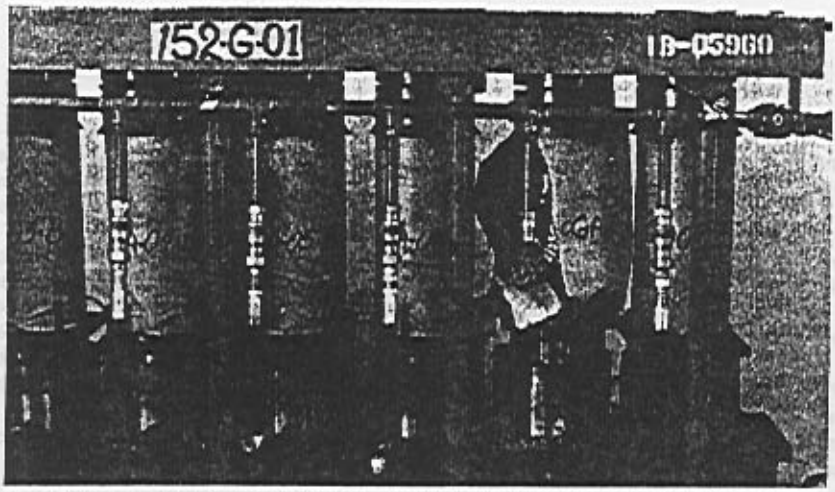


Figura 7.34 — Fase de ruptura de corpos de prova, no ensaio de determinação da curva limite de deformação na ruptura, mostrando um dos corpos já rompidos (o segundo da direita), e circuito hidráulico desconectado para o respectivo macaco

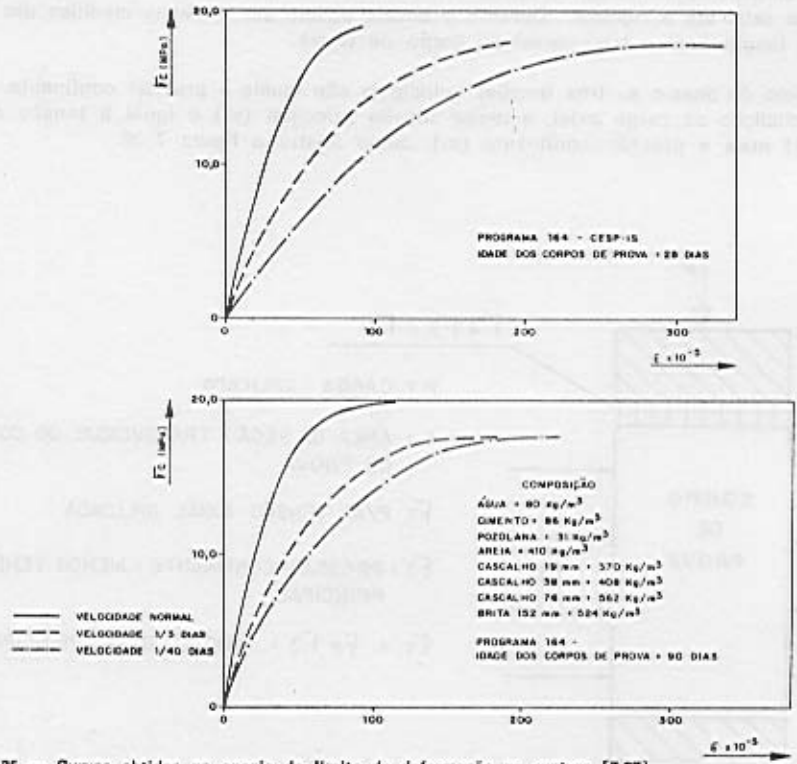


Figura 7.35 — Curvas obtidas no ensaio de limite de deformação na ruptura [7.27]

7.2.2 Resistência à compressão sob estado múltiplo de tensão

7.2.2.1 Introdução

As estruturas de concreto submetidas a esforços multiaxiais são, geralmente, avaliadas pelos esforços máximos permitidos com base nos conhecimentos de compressão axial simples e nas tensões de tração e cisalhamento. Isto, pois quando a solicitação ocorre em mais de uma direção, os valores limites das tensões são normalmente estabelecidos pelos critérios de resistência, baseados em considerações teóricas.

Para o concreto tem sido usado a "Envoltória de Mohr" que fornece as condições de resistência em um determinado ponto da estrutura, quando atuam tensões em mais de um plano. Traçando vários círculos (σ_1 e σ_3, com σ_1 sendo a maior tensão e σ_3 a confinante), correspondentes a estados de ruptura, a envoltória (que é a envoltória de Mohr) dá o limite de resistência no estado múltiplo de tensões, sendo que o critério de Mohr estabelece que, para não haver ruptura, o círculo representativo do estado de tensões deve estar no interior da envoltória.

Para avaliação do comportamento do concreto sob um estado múltiplo de tensões pode se usar um ensaio de compressão triaxial [7.28] [7.29] [7(30] [7.31].

7.2.2.2 Princípio do ensaio

O ensaio consiste em submeter um corpo de prova cilíndrico, adequadamente revestido, à uma pressão hidráulica confinante, dentro de uma câmara de ensaio e a uma compressão axial até a ruptura. Durante o ensaio podem ser tomadas medidas das deformações longitudinal e transversal do corpo de prova.

No início do ensaio as três tensões principais são iguais à pressão confinante. Durante a aplicação da carga axial, a maior tensão principal (σ_1) é igual à tensão axial (σ = Q/A) mais a pressão confinante (σ_3), como ilustra a figura 7.36.

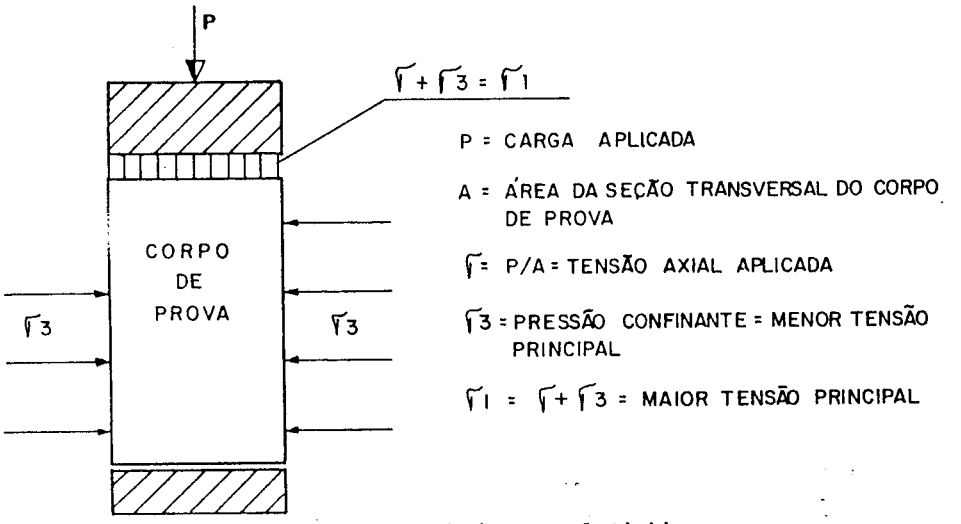


Figura 7.36 — Esquema de carregamento para ensaio de compressão triaxial

Obtendo-se a tensão principal σ_1, de ruptura a cada pressão (tensão) confinante (σ_3) têm-se elementos para o traçado da envoltória de Mohr, utilizando-se um sistema cartesiano, onde as escalas em ambos os eixos são iguais. Os centros dos círculos são locados a valores, de tensão normal, iguais a $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$, obtendo-se com isso a envoltória e, consequentemente, o ângulo de atrito "Ø" e a coesão "C", como ilustra a figura 7.37.

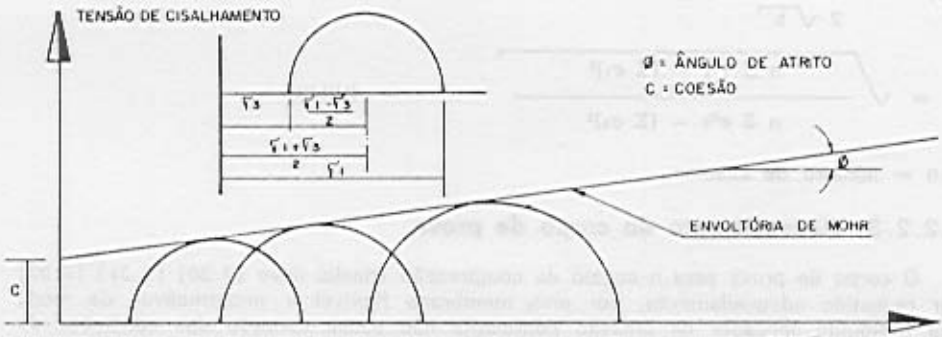


Figura 7.37 — Envoltória a ser obtida no ensaio de compressão triaxial

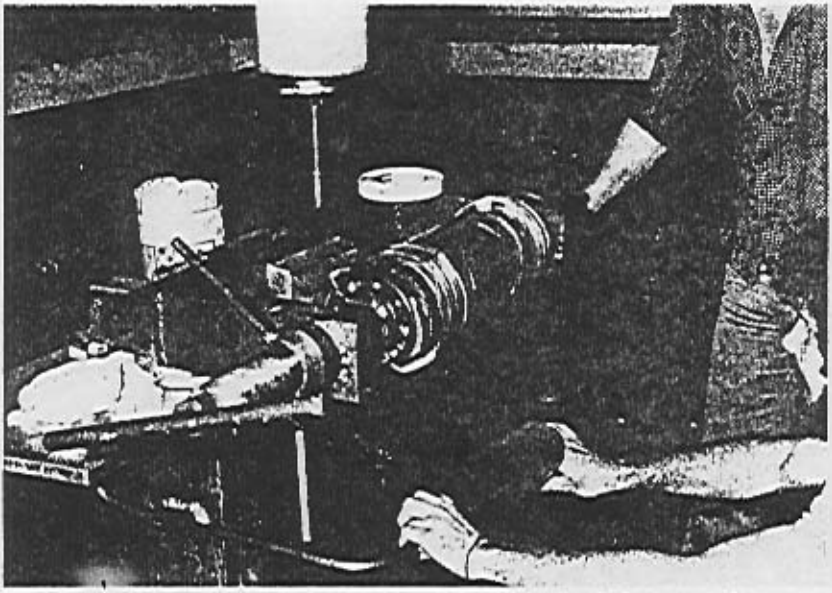


Figura 7.38 — Sistema de sarilho para aplicação do revestimento impermeável no corpo de prova para ensaio de compressão triaxial.

A envoltória é dada por (VII-I)

$$y = C + x \operatorname{tg} \varnothing \quad \text{— (VII-I)} \qquad \text{sendo}$$

$$C = \text{coesão} = \frac{\Sigma \sigma_1 - S \Sigma \sigma_3}{2 n \sqrt{s}} \qquad \text{(VII-II)}$$

$$\operatorname{tg}\varnothing = \frac{S - 1}{2\sqrt{s}} \quad \text{e}$$

$$S = \sqrt{\frac{n \Sigma \sigma^2_1 - (\Sigma \sigma_1)^2}{n \Sigma \sigma^2_3 - (\Sigma \sigma_3)^2}} \qquad \text{(VII-III)}$$

e n = número de ensaios.

7.2.2.3 Revestimento do corpo de prova

O corpo de prova para o ensaio de compressão triaxial deve [7.30] [7.31] [7.32] ser revestido adequadamente, por uma membrana flexível e impermeável, de modo que o líquido aplicador de pressão confinante não cause variação das condições de saturação do concreto.

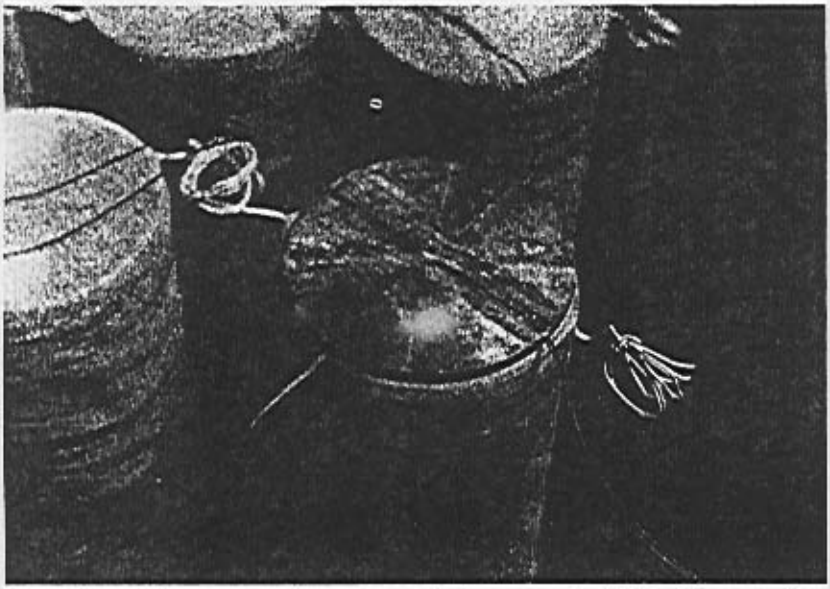


Figura 7.39 — Corpos de prova preparados para o ensaio de compressão triaxial. Nota-se a placa de aço de capeamento, usada no topo do corpo de prova, com fios para conectar os extensômetros elétricos.

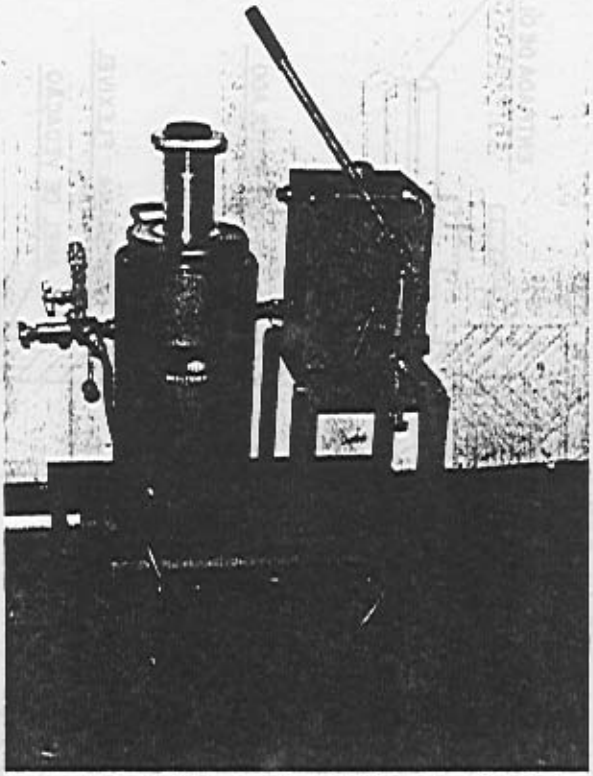


Figura 7.40 — Câmara para ensaio triaxial e a bomba hidráulica para aplicação da pressão confinante.

7.2.2.4 Ensaio

Para a execução do ensaio é usada uma câmara semelhante à mostrada na figura 7.40, cujos detalhes são vistos na figura 7.41.

Para o ensaio, os condutores dos extensômetros são conectados ao sistema de registro, os corpos de prova são colocados na câmara triaxial, que após vedada é posicionada na máquina de ensaio (prensa), como mostra a figura 7.42.

Aplica-se a pressão confinante, até o nível desejado e, posteriormente, efetua-se o carregamento axial até a ruptura. Durante a aplicação da carga axial são feitas as leituras das deformações, através dos extensômetros elétricos.

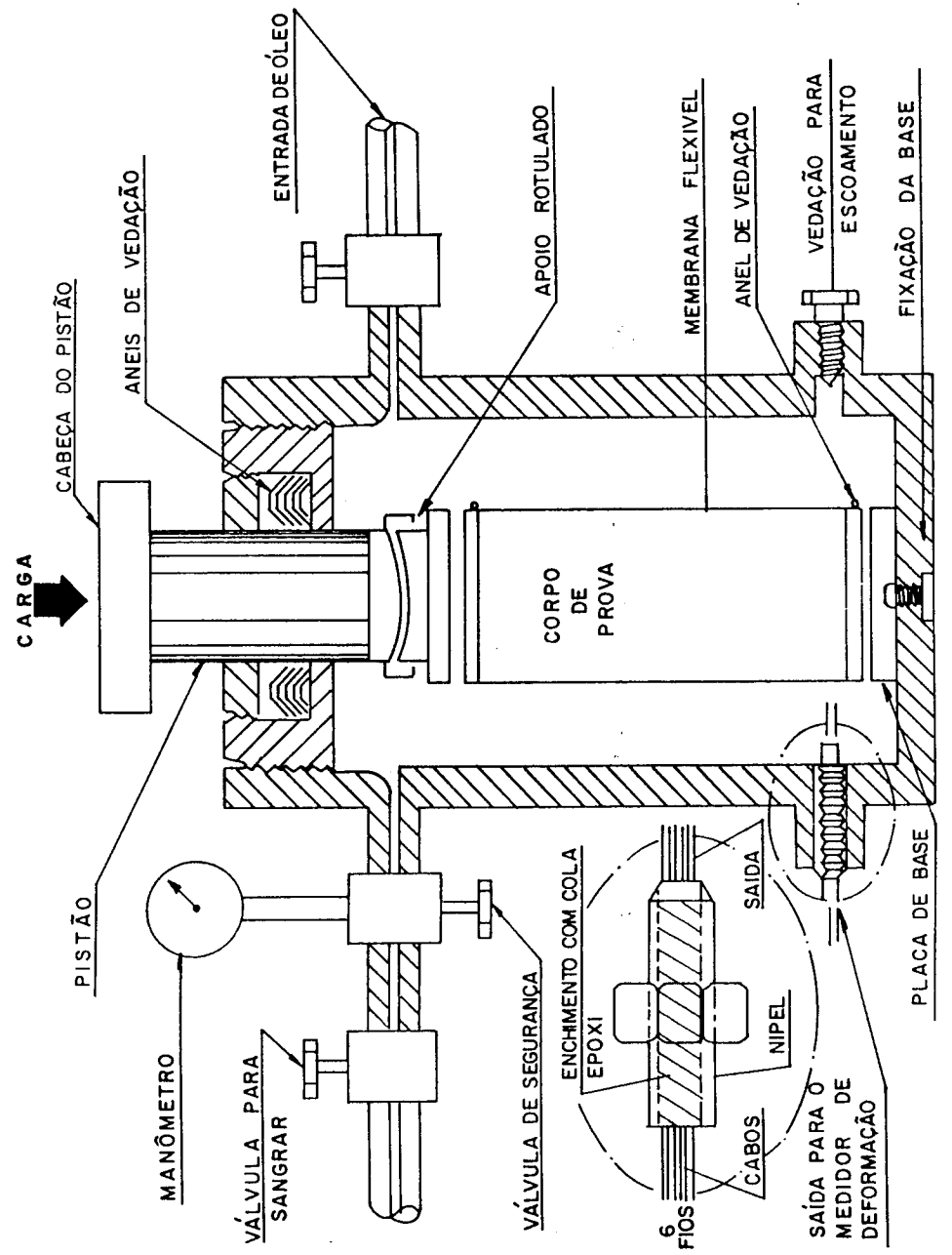


Figura 7.41 — Esquema da câmara triaxial

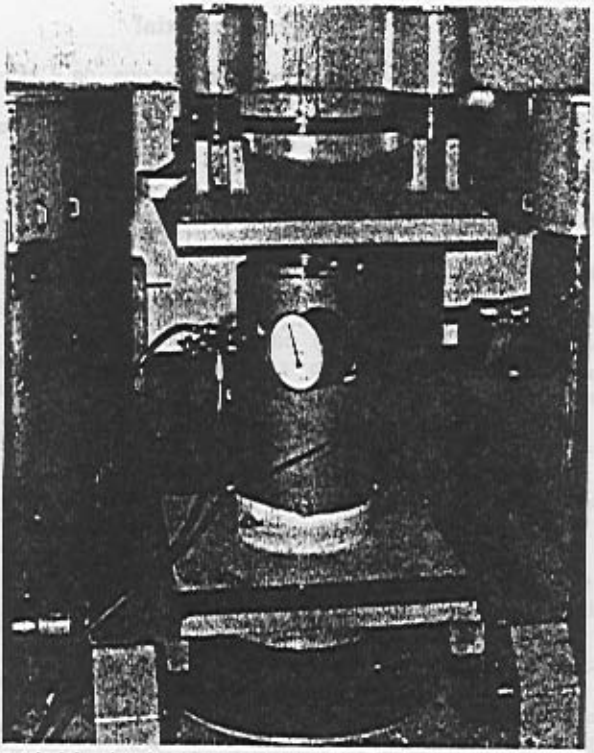


Figura 7.42 — Câmara triaxial colocada na prensa para aplicação da tensão normal

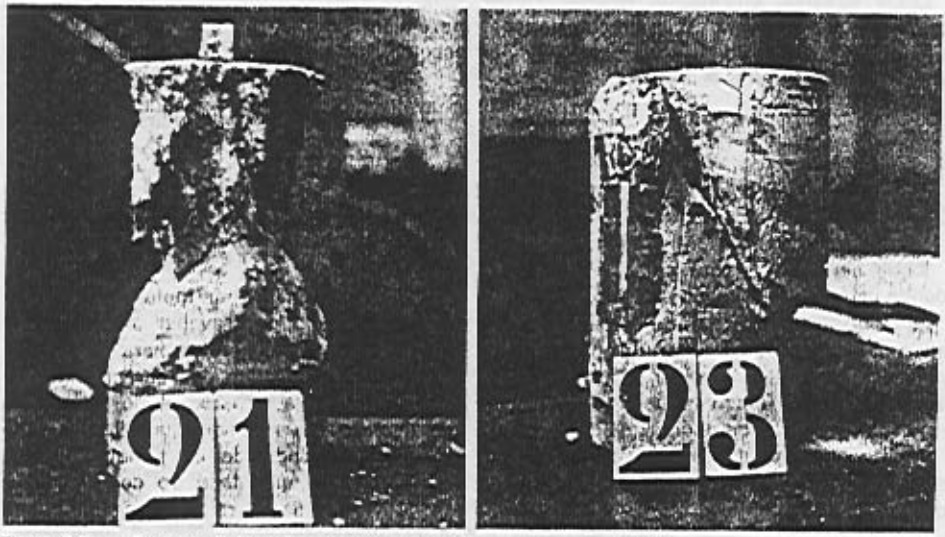


Figura 7.43 — Rupturas típicas do concreto submetido a compressão triaxial

7.2.2.5 Valores de ensaios de compressão triaxial

Ensaios executados [7.30] [7.31] [7.32], nos laboratórios da Cesp-Ilha Solteira e da Itaipu, obtiveram os valores mostrados na figura 7.44.

A tensão principal (σ_1) aumenta com o crescimento da tensão confinante. A coesão aumenta com a resistência do concreto.

7.2.3 Avaliação por ensaios não destrutivos

7.2.3.1 Generalidades

A grande maioria das estruturas de concreto é projetada e dimensionada direta ou indiretamente, com base na resistência à compressão. Praticamente, quase todos os critérios de qualidade e durabilidade do concreto são quantificados através da resistência do concreto. A resistência recebe então uma importância capital no controle de qualidade.

Com o crescente uso do concreto que se verifica no século XX, aumenta também o interesse de avaliar a qualidade, ou condições, de uma estrutura de concreto em serviço. Não raras vezes, essa avaliação é impedida de ser feita através da retirada de testemunhos (ver item 7.2.1), ou com base no registro de controle de qualidade que possa ter sido executado durante a execução da obra.

Essa avaliação deve então ser efetuada "in situ" e é feita por ensaios, corriqueiramente, denominados de "não destrutivos", mas que mais propriamente dever-se-iam chamar de ensaios "in situ", ou, no local, pois alguns desses ensaios causam danos, embora superficiais.

Com o intuito de estabelecer processos que pudessem avaliar a qualidade de um concreto é que desde meados da década de 30 [7.33] se tem procurado desenvolver métodos rápidos, precisos, não onerosos, de confiabilidade e reprodutibilidade compatíveis com os fins desejados. Isso levou à serie de ensaios não destrutivos, ou seja, "in situ".

Esses ensaios, entretanto, medem outras propriedades ou características do concreto, através das quais se estabelecem índices de durabilidade, resistência ou outros parâmetros. Algumas dessas características referem-se à dureza do concreto, à sua resistência à penetração, à sua frequência de ressonância, à capacidade do concreto absorver radiações.

Através desses métodos podem ser feitas avaliações quanto à qualidade do concreto.

7.2.3.2 Ensaios de penetração e arrancamento

Esses ensaios medem a resistência do concreto à penetração e ao arrancamento, podendo ser usados para comparações.

A resistência do concreto à penetração pode ser determinada por meio de um dispositivo de aço para perfurar o concreto [7.34]. É um ensaio para avaliar a dureza da superfície do concreto. Permite verificar a uniformidade do concreto, para delimitar áreas de baixa qualidade, ou deterioradas, ou para indicar variações das características do concreto. Não é um processo alternativo para determinar a resistência do concreto.

Esse ensaio é de fácil execução, através do uso de um revólver que dispara um projétil contra a superfície do concreto e mede-se a profundidade de penetração do projétil. Através de uma calibração prévia pode-se avaliar a qualidade do concreto.

As limitações quanto à aplicabilidade desse processo dizem respeito a representatividade do resultado obtido, pois é uma avaliação pontual e superficial.

Figura 7.44 — Valores de concretos submetidos a ensaios triaxiais

Ø MAX. DO AGREGADO (mm)	TIPO DO AGREGADO	FAIXA DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES (MPa)	FAIXA DE VALORES DA ENVOLTORIA DE MOHR NO ENSAIO TRIAXIAL	
			COESÃO "C" (MPa)	ANGULO DE ATRITO $\phi°$
19 - 38	SEIXOS ROLADOS DE QUARTZITO ILHA SOLTEIRA	17,0 a 40,0	5,0 a 7,0	31 a 44
19 - 38	BRITAS DE BASALTO -	7,8 a 26,1	2,2 a 5,7	39 a 43
	ITAIPU	18,9 a 41,5	4,6 a 9,6	40 a 42

Os ensaios de arrancamento consistem [7.35] em determinar a força necessária para deslocar e arrancar do concreto endurecido um dispositivo padronizado, previamente colocado durante a concretagem. Pode ser estabelecida uma correlação entre a resistência de arrancamento e a resistência do concreto.

As limitações desse tipo de ensaio são aquelas apontadas anteriormente.

7.2.3.3 Ensaios de dureza da superfície

A dureza da superfície do concreto pode ser avaliada através da resistência ao impacto aplicado de uma forma padronizada. Vários são os dispositivos [7.34] que podem ser usados. São de fácil manuseio e permitem a obtenção de várias e rápidas leituras.

Tendo em vista o campo de medida ser a superfície do concreto, as limitações desses processos decorrem dos cuidados para análise e interpretações.

7.2.3.4 Ensaio de reflexão

Dentre os processos para verificar a uniformidade e qualidade do concreto, o da avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão é o método mais usual.

Esse método [7.36] [7.37] [7.38] de ensaio não fornece, entretanto, valores absolutos de resistência.

O processo da medida da dureza da superfície, por meio da reflexão de um projétil lançado perpendicularmente contra a superfície do concreto, baseia-se na metodologia usada para determinação da dureza (shore) de metais, que foi aplicada ao concreto por Ernst Schimdt [7.33].

O instrumento desenvolvido por Schimdt, visto na figura 7.45 e detalhado na figura 7.46, consta basicamente de uma massa móvel que se choca contra a superfície do concreto, impulsionada através de uma mola padronizada. Parte dessa energia de impacto é consumida na forma de deformação plástica permanente da superfície, e parte é refletida elasticamente. Quanto mais duro e consequentemente mais resistente o material, maior é a reflexão.

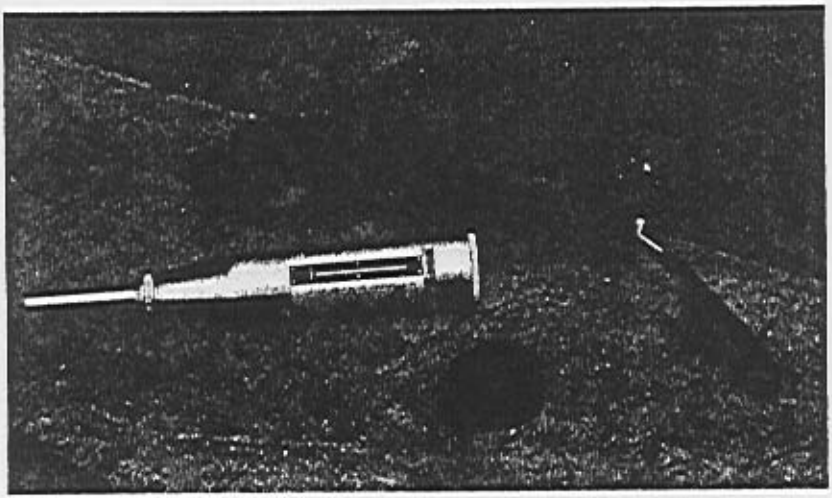
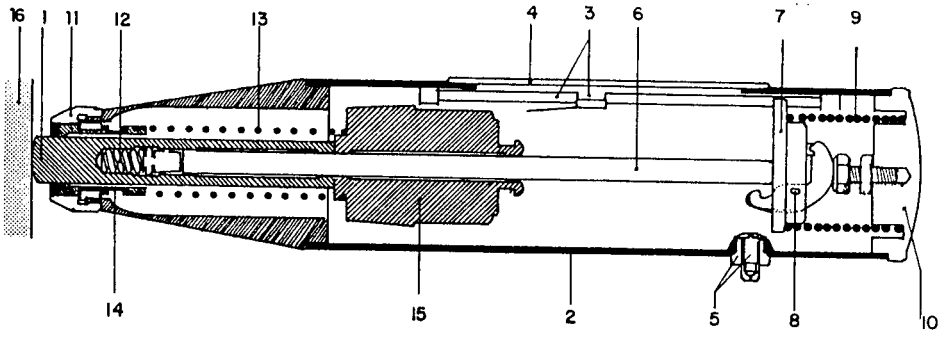


Figura 7.45 — Esclerômetro Schimdt



1 - PEÇA DE IMPACTO
2 - BLINDAGEM DE PROTEÇÃO DO APARELHO
3 - CURSOR DE LEITURA
4 - ESCALA DO VISOR
5 - BOTÃO DE DISPARO
6 - HASTE DO MARTELO DE IMPACTO
7 - DISCO
8 - TRAVA DE DISPARO
9 - MOLA DO SISTEMA DE IMPACTO
10 - PROTEÇÃO TRASEIRA
11 - PROTEÇÃO FRONTAL
12 - MOLA DE RETENÇÃO
13 - MOLA DE IMPACTO
14 - LUVA GUIA
15 - MASSA DO MARTELO DE IMPACTO
16 - SUPERFICIE A SER AVALIADA

Figura 7.46 — Corte esquemático do esclerômetro tipo Schimdt

Pode-se estabelecer uma correspondência entre o índice esclerométrico lido e a resistência do concreto. Essa correspondência tem validade limitada para situações particulares. Além do que o aparelho deve ser aferido periodicamente.

7.2.3.5 Ensaios de vibração

Esse grupo de ensaios inclui os métodos de avaliação através da frequência de ressonância por meio de pulsações ultra-sônicas.

Esses procedimentos são usados para verificar a durabilidade e uniformidade do concreto e estimar a resistência e o comportamento elástico.

O princípio fundamental, sobre o qual se baseia esse método, é o estudado por Ray Leigh [7.33] [7.39] referente à velocidade do som através de um material. Desse trabalho estabeleceu-se a relação matemática existente entre a velocidade do som através de um material, representado por um corpo de prova, e a frequência de ressonância, bem como com o módulo de deformação do material.

Essas relações dizem respeito a um meio sólido, considerado homogêneo, isotrópico e perfeitamente elástico. Podendo, entretanto, ser aplicadas a um material menos homogêneo, como o concreto, desde que as dimensões sejam suficientemente grandes para minimizar a influência da heterogeneidade do material.

Dessa forma a velocidade do som (vibração mecânica) é correlacionada com as características de vibração, a massa específica e as características elásticas do meio.

Dentre os métodos usuais para verificação da vibração, o da frequência fundamental (de ressonância) é um dos mais usados.

Esse método baseia-se [7.40] [7.41] na determinação da frequência fundamental de ressonância de vibração, gerada eletromecanicamente.

O método da frequência fundamental de ressonância é usado em laboratório para avaliar a evolução ou a uniformidade de propriedades de corpos de prova, normalmente avaliada através do módulo de elasticidade. Normalmente, o módulo de deformação assim determinado é denominado de módulo de elasticidade dinâmico.

A aparelhagem usada para essa avaliação é semelhante à vista na figura 7.47 e esquematicamente mostrada na figura 7.48.

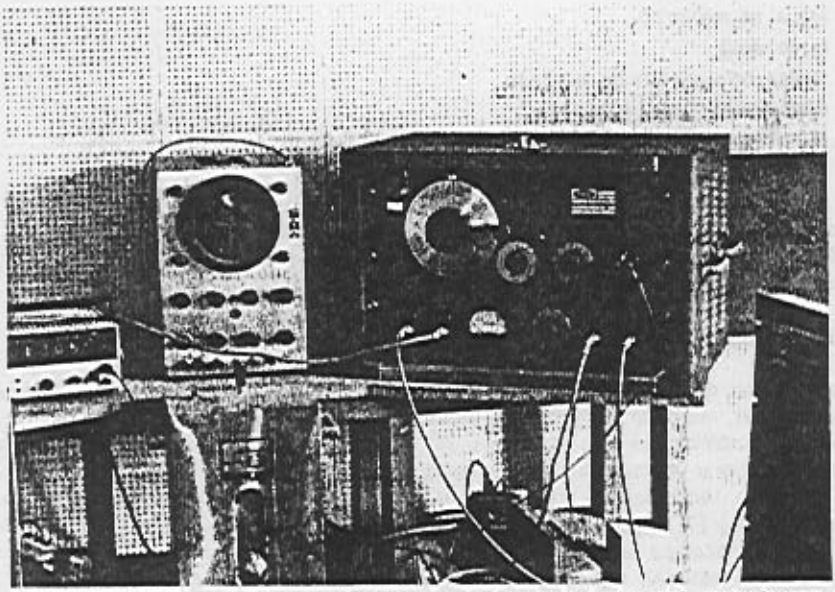


Figura 7.47 — Conjunto de aparelhos para determinação da frequência fundamental, contando com unidade excitadora e amplificador (à direita), osciloscópio (ao centro) e o medidor digital (à esquerda)

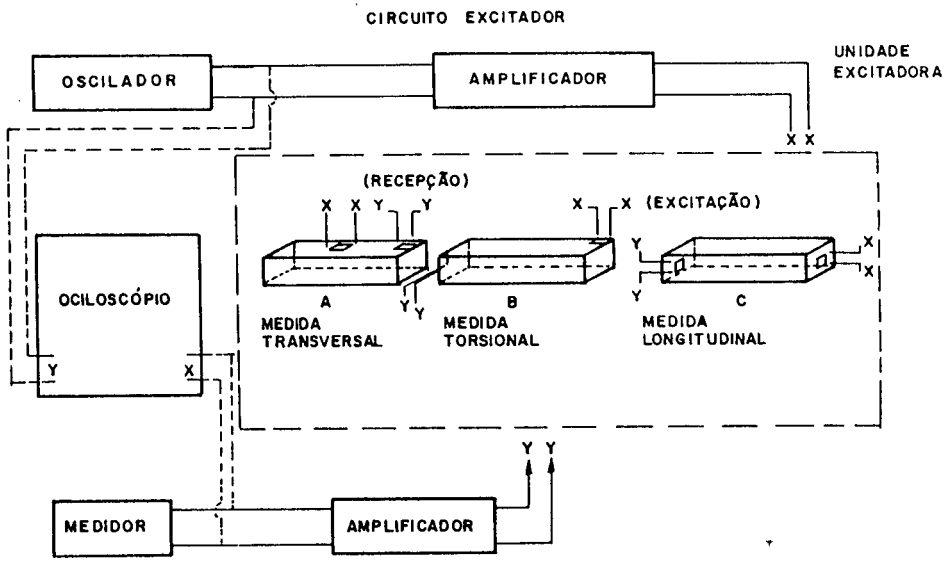


Figura 7.48 — esquema de medições das frequências fundamentais de vibração [7.41]

O módulo de elasticidade dinâmico pode ser obtido por (VII-IV):

$$Ed = 4\ l^2\ F_o^2\ \frac{\gamma}{g} \qquad \text{(VII-IV) sendo}$$

Ed = módulo de deformação dinâmico
l = comprimento do corpo de prova
γ = massa específica
g = aceleração da gravidade
F = frequência fundamental, longitudinal, de vibração

Outra maneira usada para verificação da vibração é a da velocidade de pulsação, que pode ser através da velocidade de pulsação mecânica, que envolve a medida do tempo de propagação de uma onda causada por um impacto, ou através da velocidade de pulsação ultra-sônica, que envolve a medida de tempo de propagação de pulsações mecânicas geradas eletronicamente. Essas frequências normalmente se situam entre 20 kHz e 150 kHz, de acordo com o tipo de concreto.

Deve ser observado que se avalia a resistência de forma substancialmente indireta. Além disso, as condições de rugosidade da superfície do material, de umidade e temperatura do material, a presença de armaduras e embutidos podem propiciar interpretações duvidosas.

7.2.3.6 Métodos radioativos e nucleares

Esses métodos incluem as aplicações de Raios "X" e de Raios "γ"" para avaliar a espessura, massa específica e uniformidade do concreto. Pode ser usada, também, a aplicação de neutrons para avaliar a umidade e o teor de cimento.

Essas técnicas são relativamente novas sendo que no Brasil já se fez [7.42] avaliação da massa específica de concretos de pavimentos através de densímetros nucleares.

7.2.3.7 Métodos elétricos e magnéticos

Os métodos elétricos e magnéticos podem ser usados com intuito de avaliar o cobrimento do concreto armado, através da aplicação de micro-ondas, e da condição de que a presença da armadura ou de embutido metálico altera o campo magnético.

7.3 Propriedades elásticas e fluência na compressão

7.3.1 Módulo de deformação (elasticidade)

7.3.1.1 Conceito

O concreto não é um material tipicamente elástico para qualquer estágio de carregamento a que está submetido, portanto a lei de Hooke tem, nesse material, uma aplicação apenas aproximada e grosseira. Devido a esta falta de proporcionalidade entre tensões e deformações, o módulo de deformação não é constante para qualquer intervalo de carga. Quando o concreto é submetido a um único carregamento o diagrama tensão-deformação tem o desenvolvimento apresentado na figura 7.49. Esse comportamento é ainda influenciado pela velocidade (ver figura 7.31) com que a tensão é aplicada, ou seja, carregamentos mais rápidos resultam em relação tensão-deformação mais próximas de material elástico e carregamentos com incrementos mais lentos de carga resultam em comportamento do concreto mais próximo de material elasto-plástico.

Da figura 7.49 nota-se que o módulo de deformação (inclinação da curva representativa da relação tensão-deformação) tem sido definido, para uma velocidade de carregamento preestabelecida, de três formas diferentes. O ponto "B" da curva corresponde a aproximadamente 40% da tensão de ruptura, em função de resultados experimentais que mostram que, até essa tensão, o concreto se comporta mais como um material elástico e a partir dela, mais como um material elasto-plástico:

— Módulo tangente inicial, obtido pelo ângulo α da tangente na origem da curva
— Módulo secante que é dado pelo ângulo β da secante à curva, entre os pontos A e B
— Módulo tangente final obtido pelo ângulo γ da tangente à curva do ponto B

Por outro lado, se o concreto for carregado e descarregado repetidas vezes verifica-se que, após cada carregamento, o material tende a se aproximar de um comportamento mais elástico conforme mostrado na figura 7.49 "B".

O módulo de deformação, quando determinado a partir do diagrama tensão-deformação, é obtido de um único carregamento e a velocidade controlada é denominada módulo de deformação estático.

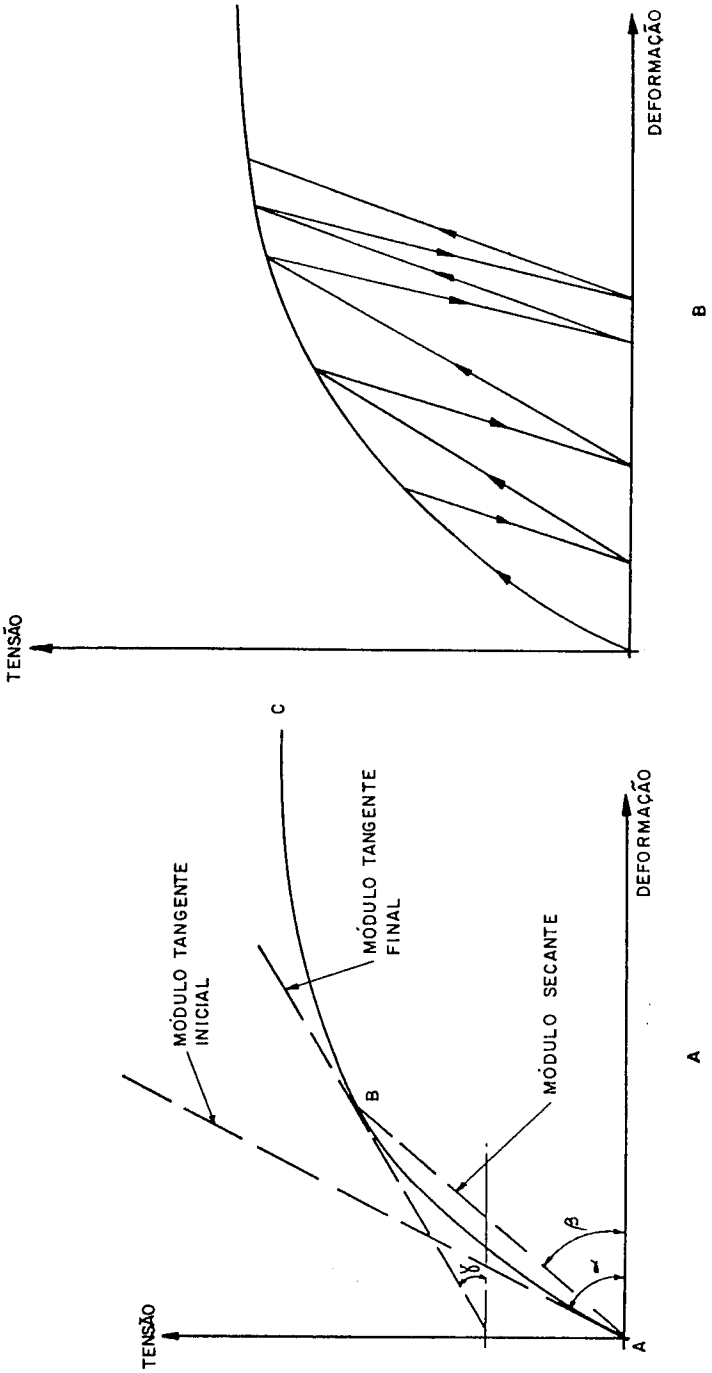


Figura 7.49 — Curvas típicas de concreto submetido a um único carregamento (A) e a ciclos de carregamento (B)

Por definição, no entanto, o módulo de deformação do concreto tem sido conceituado como sendo a relação entre a tensão correspondente a uma parcela da tensão de ruptura daquele concreto (aplicada com velocidade controlada) e a deformação causada por esta tensão, correspondendo, portanto, na figura 7.49A, ao módulo secante. As demais conceituações dadas ao módulo de deformação do concreto não serão portanto objeto de análise neste item.

Outro parâmetro usado para caracterizar a "elasticidade" do concreto é o coeficiente de Poisson, definido como sendo a relação entre as deformações lateral e longitudinal provocadas pelo carregamento.

7.3.1.2 Métodos de ensaios

Os procedimentos para determinação do módulo de deformação estático são muito variáveis ao se comparar as prescrições de várias normas internacionais. Comparando-as nota-se velocidades diferentes de carregamentos, limites diferentes para a carga máxima aplicada, pré-carregamentos em número e intensidade de carga também variáveis etc.

No Brasil a determinação do módulo de deformação estático e coeficiente de Poisson do concreto tem sido feita com base nas prescrições da ASTM [7.43], através da medida das deformações transversais e longitudinais de corpos de provas cilíndricos.

As deformações são lidas no terço médio do cilindro para o intervalo de carga de zero a 40% da carga de ruptura do concreto, na idade do ensaio carregado a uma velocidade de 0,25 $\pm$ 0,035 MPa/min.

Os corpos de provas têm o diâmetro da base no mínimo igual a 3 vezes o diâmetro máximo de agregado e altura igual a 2 vezes o diâmetro da base. O concreto é submetido à cura padrão até a idade do ensaio.

A máquina para execução do ensaio deve ser capaz de aplicar a carga com precisão igual à necessária para ensaios de determinação da resistência à compressão e com a velocidade preestabelecida.

As deformações longitudinais podem ser obtidas por sistemas mecânicos afixados externamente ao corpo de prova, como mostrado na figura 7.50, aparelhos elétricos colados na superfície (wire strain gages) ou embutidos na massa de concreto (strain meters).

Independente do tipo de aparelho usado, a precisão requerida é de 5 micro strains (0,00005 mm/mm).

A determinação através de aparelhos externos (mecânicos ou elétricos) deve ser feita em duas linhas longitudinais diametralmente opostas e centradas à meia altura do corpo de prova. O comprimento efetivo de cada linha de medida deve ser maior ou igual a três vezes o diâmetro máximo do agregado e menor ou igual a 2/3 da altura do corpo de prova. Esses procedimentos minimizam os efeitos de excentricidade de aplicação da carga e a influência dos pratos da prensa nos topos do corpo de prova.

Extensômetros embutidos (strain meters) são usados centrados no eixo longitudinal do corpo de prova, obedecendo as mesmas prescrições quanto a posicionamento e comprimento de medida descritas acima.

As deformações transversais são normalmente obtidas por equipamentos mecânicos, como mostrado na figura 7.50, em dois pontos diametralmente opostos à meia altura do corpo de prova.

Imediatamente antes do ensaio, a tensão de ruptura do concreto deve ser determinada através de corpos de prova auxiliares moldados e curados nas mesmas condições.

Colocado o corpo de prova na prensa, aplica-se um pré-carregamento ao mesmo, até 40% da carga de ruptura prevista, para ajuste e verificação do desempenho dos aparelhos de medida.

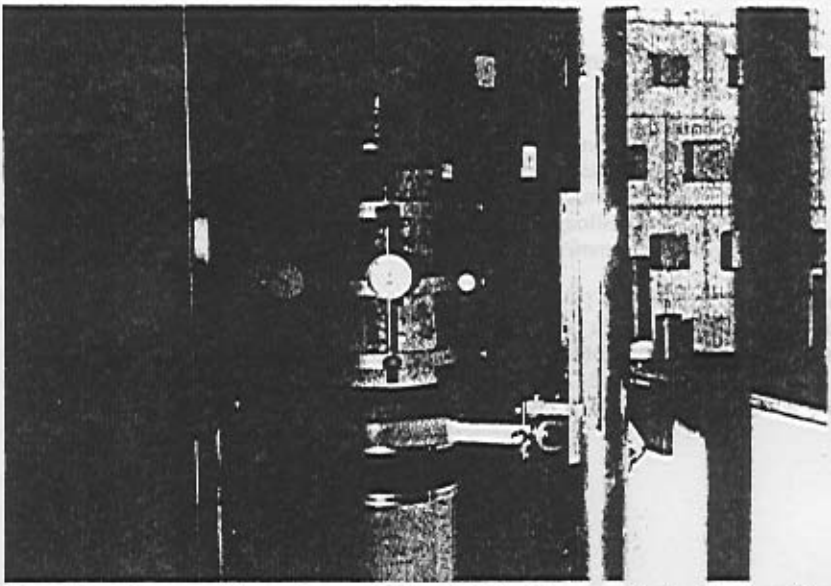


Figura 7.50 — Extensômetro mecânico usado para cilindros ∅ 15 x 30 cm na determinação do módulo de deformação e coeficiente de Poisson do concreto

Após esse pré-carregamento aplica-se continuamente e sem choque o carregamento na velocidade estabelecida registrando, sem interrupção, as deformações longitudinais e transversais a intervalos regulares, até a carga correspondente a 40% da carga de ruptura do concreto.

O cálculo do módulo de deformação e coeficiente de Poisson é feito com base em um mínimo de dois carregamentos, através de valores médios das leituras das linhas longitudinais e pontos transversais de medida e dos vários carregamentos através das fórmulas (VII-V) e (VII-VI).

$$E = \frac{Fc_2 - Fc_1}{\varepsilon_2 - 0{,}00005} \qquad \text{(VII-V) onde}$$

E = módulo de deformação estático (MPa)
Fc_2 = tensão correspondente a 40% da carga de ruptura do concreto (MPa)
Fc_1 = tensão inicial correspondente à deformação longitudinal de 0,00005 mm/mm (MPa)
ε_2 = deformação específica longitudinal provocada pela tensão Fc_2 (mm/mm)

$$\nu = \frac{\varepsilon t_2 - \varepsilon t_1}{\varepsilon_2 - 0{,}00005} \quad \text{(VII-VI) onde}$$

ν = coeficiente de Poison
εt_2 = deformação específica transversal à meia altura do corpo de prova produzida pela tensão Fc_2 (mm/mm)
εt_1 = deformação específica transversal à meia altura do corpo de prova, produzida pela tensão Fc_1 (mm/mm)

Estudos feitos em Itaipu [7.44] mostraram que as variações de módulo de deformação do concreto obtido por medidores mecânicos, elétricos colados na superfície e elétricos embutidos no concreto são menores que 5% e portanto, dentro da precisão do próprio ensaio. As figuras 7.51 e 7.52 mostram a distribuição dos medidores elétricos embutidos e os externos, usados nesse estudo.

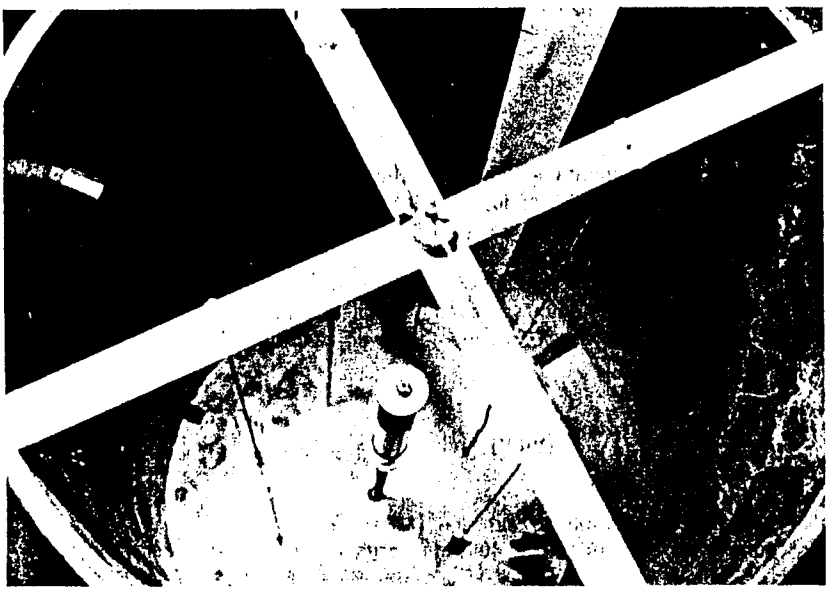


Figura 7.51 — Vista interna do molde Ø 45 x 90 cm, com os extensômetros elétricos instalados, do estudo feito em Itaipu para análise do desempenho de vários medidores de deformação (elétricos e mecânicos) na determinação do módulo de deformação do concreto

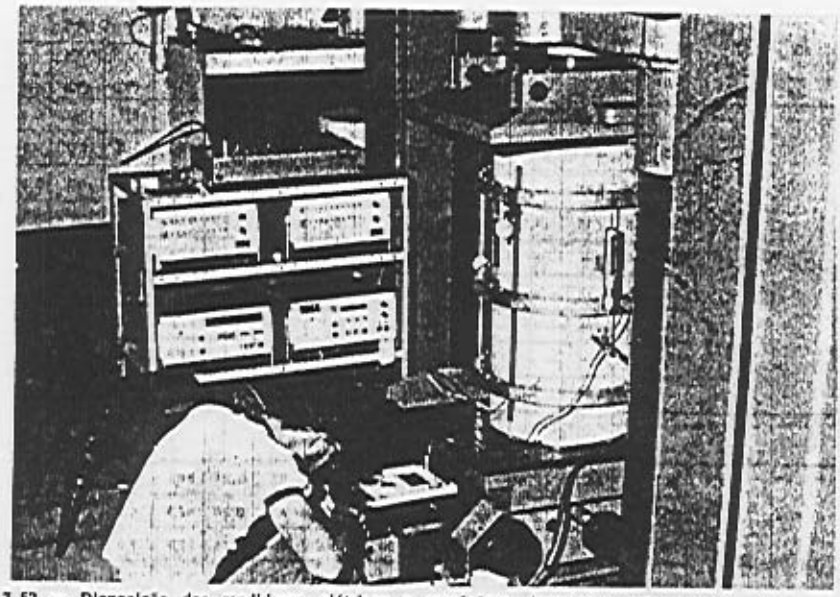


Figura 7.52 — Disposição dos medidores elétricos e mecânicos, instalados externamente ao corpo de provas

7.3.1.3 Fatores que influenciam

O módulo de deformação estático do concreto sofre variações fundamentalmente em função dos seguintes fatores:

— tipo e consumo de aglomerante
— idade do concreto
— tipo e quantidade do agregado
— porcentagem de ar incorporado

Não está sendo considerado o efeito da retração por secagem e nem a permanência de carga, já que o módulo de deformação obtido pela sistemática de ensaio anteriormente descrita, preconiza tanto o estado de equilíbrio higroscópico do concreto durante o ensaio quanto a velocidade de carregamento do corpo de prova.

A figura 7.53 apresenta um resumo de resultados de ensaios de módulo de deformação do concreto, obtidos durante o controle da obra de Itaipu [7.45]. Os resultados médios até a idade de 1 ano para todas as misturas foram obtidos com mais de 30 amostras.

As médias aos 2 e 5 anos foram obtidas, em geral, com menos de 10 amostras e portanto sua representatividade deve ser considerada apenas como de caráter orientativo. Os valores apresentados para os concretos com agregados de diâmetros máximos 76 e 152 mm se referem apenas a concretos peneirados na malha 38 mm.

Os resultados dos ensaios executados com concretos integrais, bem como suas correlações com os resultados obtidos com concretos peneirados são mostrados na figura 7.54.

Ø MÁX.	INTEG. (1) PENEIR. #	fck MPa	3 DIAS				7 DIAS				28 DIAS			
			M.E	C.V (%)	EVOL. (%)	ν	M.E MPa	C.V (%)	EVOL. (%)	ν	M.E MPa	C.V (%)	EVOL. (%)	ν
19	(1)	15 /3	32,0	8,9	77	0,21	36,5	7,10	88	0,20	41,5	18,1	100	0,22
		35 /28	26,4	10,8	66	0,21	34,7	21,6	86	0,22	40,2	19,5	100	0,24
		28 /28	28,5	11,5	72	0,20	32,8	15,3	83	0,22	39,7	6,4	100	0,20
		21 /28	21,5	14,8	60	0,19	29,3	9,4	82	0,20	35,8	7,2	100	0,21
		35 /360	—	—	—	—	32,8	8,5	83	0,22	39,4	4,9	100	0,23
		28 /360	—	—	—	—	30,6	10,0	83	0,22	37,0	7,0	100	0,22
		21 /360	—	—	—	—	25,2	14,4	77	0,21	32,8	6,3	100	0,23
		18 /360	—	—	—	—	23,5	3,0	72	0,21	32,6	6,6	100	0,21
		14 /360	—	—	—	—	19,8	10,7	67	0,20	29,4	8,3	100	0,22
38	(1)	21 /28	25 3	12,4	64	0,20	33,5	10,4	85	0,21	39,2	6,0	100	0,22
		35 /360	—	—	—	—	35,2	13,5	83	0,25	42,3	4,5	100	0,26
		28 /360	—	—	—	—	30,2	13,3	80	0,21	37,9	7,5	100	0,22
		21 /360	—	—	—	—	26,3	8,1	78	0,21	33,6	10,1	100	0,23
		18 /360	—	—	—	—	24,4	11,5	71	0,20	34,3	3,2	100	0,23
		14 /360	—	—	—	—	25,7	13,8	78	0,20	32,2	12,2	100	0,21
76	#	14 /07	28 1	15,9	64	—	38,6	2,8	88	—	43,6	7,3	100	—
		21 /28	33 0	10,6	85	—	33,0	7,5	85	—	38,6	10,3	100	—
		28 /90	—	—	—	—	27,6	—	78	—	35,3	10,3	100	—
		22 /90	—	—	—	—	31,2	21,0	85	—	36,8	9,0	100	—
		28 /360	—	—	—	—	29,4	9,7	79	0,21	36,9	9,2	100	0,24
		21 /360	—	—	—	—	27,8	8,2	77	0,20	35,9	8,5	100	0,20
		18 /360	—	—	—	—	25,6	9,9	80	0,18	31,7	10,2	100	0,20
		14 /360	—	—	—	—	21,7	12,2	76	0,17	28,2	9,7	100	0,21
152	#	21 /360	—	—	—	—	27,2	11,5	81	—	33,6	8,6	100	—
		18 /360	—	—	—	—	26,7	15,0	81	0,22	33,0	6,0	100	0,26
		14 /360	—	—	—	—	22,3	16,0	77	0,18	29,4	13,2	100	0,23
		10 /360	—	—	—	—	19,6	15,0	83	—	23,7	11,2	100	—

Figura 7.53 — Influência do consumo de aglomerante e idade no módulo de deformação do concreto

90 DIAS				180 DIAS				365 DIAS (1 ANO)				730 DIAS (2 ANOS)				1825 DIAS (5 ANOS)			
M.E MPa	C.V (%)	EVOL. (%)	ν	M.E MPa	C.V (%)	EVOL. (%)	ν	M.E MPa	C.V (%)	EVOL. (%)	ν	M.E MPa	C.V (%)	EVOL. (%)	ν	M.E MPa	C.V (%)	EVOL. (%)	ν
–	–	–		–	–	–		–	–	–	–	–	–	–		–	–	–	–
45,0	19,3	112	0,21	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
42,3	4,3	107	0,22	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
40,0	6,0	112	0,22	43,7	9,8	122	0,21	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
44,0	7,4	112	0,25	43,8	4,7	111	0,20	44,6	5,8	113	0,23	–	–	–	–	–	–	–	–
40,7	3,6	110	0,21	41,6	6,3	112	0,23	42,5	5,4	115	0,22	–	–	–	–	–	–	–	–
37,0	8,3	113	0,21	38,9	7,4	119	0,20	39,2	3,8	112	0,22	–	–	–	–	–	–	–	–
35,0	5,5	167	0,21	35,0	4,2	107	0,23	36,8	4,0	113	0,22	–	–	–	–	–	–	–	–
34,3	5,6	116	0,22	34,7	4,8	118	0,22	34,5	6,1	117	0,19	–	–	–	–	–	–	–	–
43,6	3,6	111	0,23	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
44,0	7,3	104	0,20	45,9	3,3	108	0,23	45,0	3,6	119	0,23	44,7	3,6	118	0,23	46,2	–	122	0,23
42,0	5,5	111	0,23	45,0	5,2	119	0,22	47,4	3,8	112	0,22	–	–	–	–	–	–	–	–
38,0	7,2	113	0,24	41,0	5,2	112	0,22	39,2	5,4	116	0,21	–	–	–	–	–	–	–	–
38,8	4,0	113	0,24	41,4	5,0	120	0,22	39,1	6,4	114	0,21	–	–	–	–	–	–	–	–
36,5	10,3	113	0,20	37,4	7,1	116	0,20	38,7	7,8	120	0,22								
–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
41,6	7,4	103	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
42,8	4,1	121	–	43,7	–	124	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
40,7	8,5	111	–	43,0	5,7	117	–	48,9	7,8	119	–	–	–	–	–	–	–	–	–
42,4	6,7	115	0,24	44,3	4,9	120	0,23	44,7	7,0	121	0,23	44,3	3,1	120	0,22	49,3	–	133	0,21
39,6	7,4	110	0,23	38,7	7,1	108	0,24	39,5	9,4	110	0,18	41,2	–	115	0,13	39,2	–	110	0,20
37,7	11,5	119	0,23	39,6	10,6	125	0,22	39,2	9,8	124	0,20	42,1	15,1	132	0,24	–	–	–	–
34,3	7,5	122	0,22	35,7	7,2	127	0,20	37,1	8,6	131	0,21	39,8	-	141	0,19	–	–	–	–
36,5	8,1	109	–	38,1	8,1	114	0,20	39,1	10,2	116	0,21	36,7	–		0,21	40,0	–	119	0,21
35,3	8,5	107	0,24	35,6	9,0	108	0,21	37,9	9,0	115	0,21	42,5	13,0	129	0,22	35,1	–	106	0,21
35,9	10,2	122	0,23	35,5	7,4	121	0,22	37,1	8,3	126	0,21	31,7	–	103	0,22	37,9	–	129	0,22
31,8	6,9	134	–	33,6	5,5	141	–	32,5	12,8	137	–	32,6	12,7	137	0,20	–	–	–	–

Ø MAX (mm)	FCK/IDADE (MPa / DIAS)	INTEGRAL (1) PENEIRADO (#)	7 DIAS		28 DIAS		90 DIAS		180 DIAS		360 DIAS	
			Nº DE AMOSTRAS	$E \times 10^3$ MPa	Nº DE AMOSTRAS	$E \times 10^3$ MPa	Nº DE AMOSTRAS	$E \times 10^3$ MPa	Nº DE AMOSTRAS	$E \times 10^3$ MPa	Nº DE AMOSTRAS	$E \times 10^3$ MPa
(76)	22 /90	(1)	-	-	04	35,9	03	45,4	-	-	-	-
		(#)	-	-	22	36,8	21	40,7	-	-	-	-
		(1)/(#)	-	-	-	0,97	-	1,12	-	-	-	-
	28 /360	(1)	-	-	07	36,4	05	42,3	05	43,6	45	46,8
		(#)	-	-	64	36,9	51	42,4	51	44,3	146	44,7
		(1)/(#)	-	-	-	1,04	-	1,0	-	0,98	-	1,05
	21 /360	(1)	-	-	-	-	-	-	-	-	17	42,6
		(#)	-	-	-	-	-	-	-	-	48	39,5
		(1)/(#)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,08
	18 /360	(1)	-	-	-	-	-	-	-	-	18	39,0
		(#)	-	-	-	-	-	-	-	-	50	39,2
		(1)/(#)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,0
	14 /360	(1)	01	19,4	03	32,2	-	-	04	34,6	25	37,1
		(#)	27	21,7	35	28,2	-	-	27	35,7	80	37,1
		(1)/(#)	-	0,91	-	1,14	-	-	-	0,97	-	1,0
(152)	21 /360	(1)	-	-	01	43,1	02	43,8	01	48,1	04	48,4
		(#)	-	-	18	33,6	18	36,5	12	38,1	31	39,1
		(1)/(#)	-	-	-	1,28	-	1,20	-	1,26	-	1,24
	18 /360	(1)	-	-	-	-	-	-	-	-	13	44,2
		(#)	-	-	-	-	-	-	-	-	51	37,9
		(1)/(#)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,16
	14 /360	(1)	03	25,1	11	37,7	19	43,1	25	44,2	79	41,0
		(#)	103	22,8	108	29,4	125	35,9	125	35,5	267	37,1
		(1)/(#)	-	1,10	-	1,28	-	1,20	-	1,21	-	1,10

RELAÇÃO ENTRE MÓDULOS DE DEFORMAÇÃO DE CONCRETOS INTEGRAIS E PENEIRADOS

Figura 7.54 — Influência do peneiramento no módulo de deformação do concreto

As figuras estão ordenadas de tal forma que os valores são mostrados no sentido decrescente da resistência solicitada e, consequentemente, de consumo de aglomerante. Desta forma, nos concretos de Ø máx 19 mm a mistura de fck 15/3 representa um concreto de resistência característica 15 MPa aos 3 dias.

Da análise da figura 7.53 pode-se observar o seguinte comportamento do módulo de deformação do concreto em função de alguns fatores que exercem influência sobre o mesmo:

Idade do concreto

Da mesma forma que a resistência à compressão, o módulo de deformação aumenta com a idade, porém, não obedecendo a mesma velocidade de crescimento, mas as curvas de ambas as propriedades, para uma mesma mistura, apresentam um mesmo sentido de orientação. Para análise e comparação entre as duas propriedades, foram calculados os percentuais de evolução do módulo de deformação do concreto em várias idades, com base na idade de 28 dias e comparados com os resultados de evolução de resistência, dessas mesmas misturas.

Nota-se que às primeiras idades, 3 e 7 dias, o módulo de deformação do concreto atinge valores médios entre 70 e 85% em relação aos 28 dias, enquanto que o percentual de resistência aos 7 dias, em relação aos 28 dias, é ainda em média de apenas 55%. (ver figura 7.25).

A partir da idade de 28 dias até ao redor de 180 dias, o módulo de deformação cresce, relativamente aos valores de 28 dias, ao redor de 20% quando praticamente se estabiliza. No entanto, a resistência à compressão tem percentual de aumento em relação aos 28 dias, às idades mais avançadas (1, 2 e 5 anos) que, dependendo do tipo e quantidade de cimento e uso ou não de material pozolânico, pode chegar a ser da ordem de 100%. (ver figura 7.25).

Esse comportamento de velocidade de crescimento diferenciado se explica fundamentalmente pela influência do agregado nos valores do módulo de deformação do concreto.

Consumo de aglomerante

De maneira geral, o concreto apresenta módulo de deformação crescente, em todas as idades, com o aumento do consumo de aglomerante. Analisando-se, no entanto, as evoluções percentuais do módulo de deformação em relação à idade de 28 dias, em função do consumo de aglomerante, nota-se que às baixas idades (até 28 dias) os concretos mais ricos tem maior evolução ao passo que a partir de 90 dias a evolução percentual do módulo passa a independer do consumo de aglomerante. Novamente credita-se à influência do agregado no módulo de deformação esse comportamento nas idades mais avançadas.

Tipo e quantidade de agregado

O agregado até certo ponto considerado como inerte, entra na composição do concreto com volumes sólidos que variam entre 70 e 85% do volume total do concreto. Por outro lado, os módulos de deformação dos agregados em geral são superiores a 80000 MPa e, dependendo do tipo de rocha da qual se originam, podem atingir valores da ordem de 2×10^5 MPa.

Estes dois fatores conferem ao agregado importância significativa sobre o módulo de deformação do concreto. Este fato é evidenciado no entanto a idades mais avançadas já que às primeiras idades, a pasta de cimento, por ser o ligante dos agregados e por apresentar módulo baixo, exerce grande influência no módulo de deformação da mistura.

Os agregados graúdos dos concretos usados na obra de Água Vermelha (Cesp) eram compostos de britas obtidas de basalto e seixos rolados de quartzito e calcedônia. Para permitir maleabilidade no manuseio e balanceamento dos estoques durante a fase de construção foram estudadas algumas misturas de mesma composição básica alterando algumas gamas dos agregados, de brita de basalto para seixos rolados de quartzito e vice-versa.

Os resultados fornecidos na figura 7.55 [7.4] mostram a influência do tipo de agregado no módulo de deformação do concreto, pela substituição apenas da faixa granulométrica entre 38 e 76 mm (agregado 3) de brita de basalto (módulo do basalto de 3×10^4 a 1×10^5 MPa) por seixo rolado (quartzito com módulo variando de 1×10^5 a $1{,}3 \times 10^5$ MPa).

Ø MÁX (mm)	A/C EQ	CONSUMO (KG/M³)	AGREGADO GRAÚDO	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO (MPa) (X10²)	
				28 DIAS	90 DIAS
152	0,55	132	$C_1 + C_2 + C_3 + B_4$	454	525
152	0,55	134	$C_1 + C_2 + B_3 + B_4$	393	471
152	0,85	90	$C_1 + C_2 + C_3 + B_4$	345	398
152	0,85	91	$C_1 + C_2 + B_3 + B_4$	274	302

C = CASCALHO DE QUARTZITO B = BRITA DE BASALTO

Figura 7.55 - Influência do tipo de agregado no módulo de deformação do concreto

Nota-se que os resultados apresentados confirmam também a influência do consumo de aglomerante (através da variação da relação A/C) no módulo de deformação do concreto.

No que se refere à quantidade de agregados no concreto, o peneiramento dos concretos com Ø máx > 38 mm para facilitar o controle mostra essa influência.

Os valores médios obtidos durante o controle de Ilha Solteira [7.4] mostraram que, à idade de 3 dias, o módulo de deformação do concreto peneirado é cerca de 80% do módulo do concreto integral e que esta relação tende à unidade a idades superiores.

Na figura 7.54 foram mostrados os resultados médios de módulos de deformação integral e peneirado de algumas misturas usadas na obra de Itaipu.

Esses resultados mostram também que de maneira geral a relação entre os módulos de deformação integral e peneirado do concreto Ø máx = 76 mm aproxima-se da unidade nas idades superiores a 28 dias.

Para o concreto com agregado 152 mm esta relação no entanto está entre 1,20 e 1,30.

Esta diferença é explicável pela diferença de quantidade de agregado que é retirada na mistura quando se peneira um concreto Ø máx 76 mm ou 152 mm.

Com relação aos concretos de Ilha Solteira, pelo fato de se usar basicamente seixos rolados como agregados 1 (19 mm) e 2 (38 mm) este efeito se faz sentir com menor intensidade, já que os concretos, mesmo peneirados, apresentam módulos de deforma-

ção muito altos, em função do alto módulo dos agregados. No entanto todo agregado de Itaipu foi brita de basalto, inclusive parte da areia que era formada por 70% em peso de basalto britado e 30% de areia natural.

Ar incorporado no concreto

A incorporação de ar ao concreto tende a diminuir o módulo de deformação do mesmo. Os resultados da figura 7.56 [7.4], mostram este fato que é facilmente explicável pelo aumento da porosidade da pasta com consequente queda do módulo de deformação da mesma.

ø MÁX (mm)	A/C EQ	CONSUMO (KG /M³)	AR INCORPORADO (%)	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO (MPa)		
				7 DIAS	28 DIAS	90 DIAS
19	0,50	269	4	410	442	510
19	0,50	286	-	430	489	535
19	0,60	224	4	328	440	460
19	0,60	239	-	370	487	530

Figura 7.56 — Influência do teor de ar incorporado no módulo de deformação do concreto

7.3.1.4 Módulo de deformação na tração

O módulo de deformação do concreto na tração tem sido admitido como sendo igual ao módulo obtido na compressão. No entanto, há informações bibliográficas [7.46] indicando que o módulo de deformação do concreto na tração é menor que o módulo na compressão. Para um certo tipo de concreto a relação obtida Ect/Ecc foi de 0,81.

A relação média entre os valores de módulo de deformação na tração por flexão de vigas não armadas e dos módulos de compressão, para as mesmas misturas, obtida dos estudos de concretos para a obra de Água Vermelha [7.4], foi de 0,75 para um coeficiente de variação de 20%.

Para os concretos da obra de Itaipu [7.47] o valor médio dessa relação foi de 0,82 para um coeficiente de variação de 25%.

7.3.2 Fluência

7.3.2.1 Conceito

A complexidade do fenômeno das deformações que o concreto apresenta quando submetido a um estado de tensão (seja por cargas externas ou, internas, tais como variações volumétricas devidas à retração hidráulica, variações de temperatura etc.) tem sido objeto de pesquisas, teorias e ensaios desde os primórdios da tecnologia desse material.

A própria conceituação de módulo de deformação bem como sua determinação tem sido feita de diferentes maneiras por diferentes pesquisadores, de diferentes nacionalidades, em função do comportamento peculiar desse material.

É sabido que de uma maneira geral vários materiais, quando submetidos a um estado de tensão constante, apresentam uma deformação inicial seguida por um aumento gradual, não mais linear, de deformação sem que haja alterações no estado das tensões iniciais aplicadas. Um exemplo clássico para ilustrar esse comportamento bem como as consequências do mesmo são as considerações feitas para a perda de carga dos cabos protendidos.

O concreto também se comporta de maneira similar só que de uma forma bem mais complexa em razão da heterogeneidade dos materiais que o constituem (aglomerantes, água, agregados de diferentes tipos e dimensões, ar incorporado e aditivos) e do próprio processo de hidratação, colocação, adensamento e cura do mesmo.

As propriedades do concreto são ainda modificadas pelo tempo após moldagem e condições de umidade e temperatura, às quais estará exposto durante sua vida útil.

Ao fenômeno de aumento de deformação com o tempo que o concreto apresenta quando submetido a uma carga constante tem-se chamado quase que internacionalmente de "creep". No meio técnico brasileiro, o fenômeno tem sido mais conhecido como fluência ou deformação lenta.

As consequências desses fenômenos, ou seja, perda de carga sob deformação constante denomina-se relaxação de tensões por fluência.

De maneira geral, a curva típica dos materiais que apresentam o fenômeno da fluência, quando submetidos a uma tensão elevada em relação à sua resistência por um período longo de tempo, é da forma apresentada na figura 7.57.

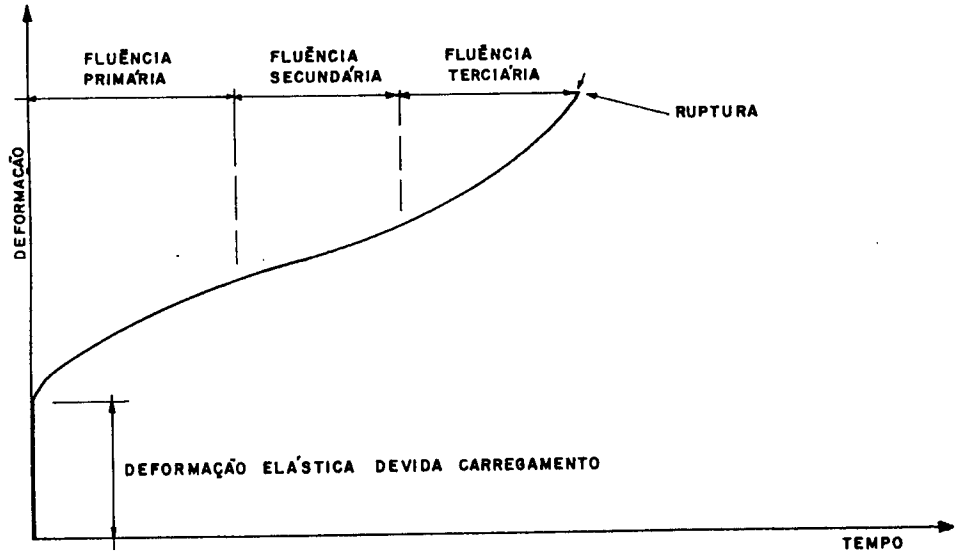


Figura 7.57 — Curva típica de fluência de um material carregado até a ruptura

O concreto em serviço está submetido a tensões que, em geral, não ultrapassam a 50% de sua carga de ruptura e portanto em termos de fluência interessa aos tecnologistas e calculistas a fluência primária, mostrada na figura 7.57.

A curva típica de deformações que o concreto apresenta quando submetido em uma certa idade, a uma determinada carga constante ao longo do tempo que é depois retirada, mantendo-se inalteradas as condições ambientais de umidade e temperatura e subtraindo-se ainda os valores das deformações autógenas de volume, é mostrada na figura 7.58.

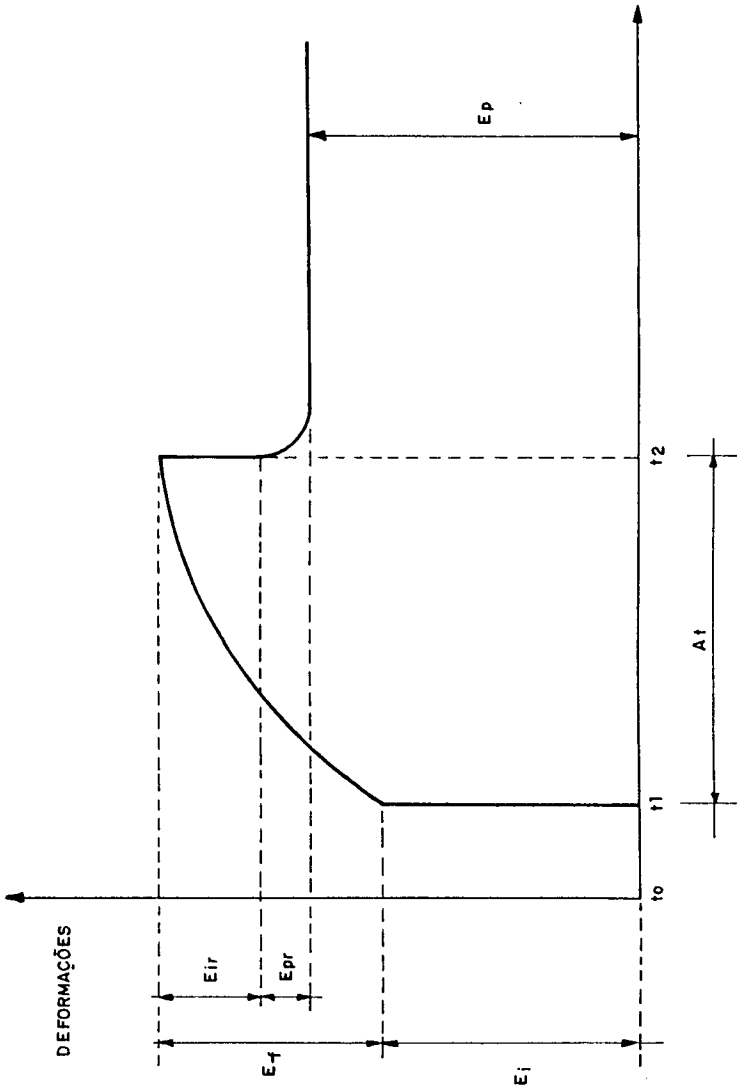


Figura 7.58 — Curva típica da fluência do concreto carregado até 40% da carga de ruptura e posteriormente descarregado

A forma como a fluência do concreto se processa é, nos dias atuais, motivo de discussões e estudos. As considerações a respeito da fluência do concreto devem levar em conta os dois componentes básicos do mesmo, ou seja, a pasta e o agregado.

Os estudos tentam, normalmente, explicar o mecanismo da fluência relativa à pasta em vista de sua magnitude em relação à do agregado.

As bibliografias [7.48] [7.49] [7.50] consultadas fazem considerações que se completam resultando num conjunto básico de mecanismo da fluência da pasta e, em consequência, do concreto. Estes mecanismos são:

— Movimento de água adsorvida pelos produtos da hidratação do cimento;
— Escorregamento cristalino;
— Escoamento viscoso;
— Aumento da solubilidade dos compostos do cimento devido à tensão a que estão sujeitos;

Movimento de água

As teorias a respeito da contribuição do movimento de águas, tanto livres quanto intramoleculares, ou dos poros do gel, têm sido aceitas como das mais convincentes para explicar a fluência do concreto. Alguns autores, no entanto, sugerem que nem a água quimicamente combinada nem a água livre dos poros e vazios contribuem para a fluência; apenas o movimento da água adsorvida na superfície do material poroso policristalino, que constitui o cimento hidratado, é uma das causas das deformações de fluência sob carga, função do tempo.

Efetivamente, diversas experiências realizadas com o concreto previamente seco, do qual se retirou a água evaporável, quer por vácuo quer em estufa a 150°C, mostram que a fluência final é reduzida sensivelmente, embora não anulada.

Também se tem verificado experimentalmente que a fluência é tanto maior quanto maior a tensão aplicada, aumentando ainda mais quando o gradiente de umidade na peça de concreto cresce em relação ao ambiente.

Escorregamento cristalino

O cimento hidratado é constituído por substâncias cristalizadas. Procura-se explicar a fluência por um processo de difusão dos deslocamentos desses cristais, não só ao longo dos seus planos naturais de movimento, mas também ao longo de outros planos Este mecanismo pode ser melhor compreendido através da ilustração mostrada na figura 7.59.

Escoamento viscoso

No mecanismo que tenta explicar a fluência por escoamento viscoso, o cimento endurecido é considerado um líquido eminentemente viscoso, cujo coeficiente de viscosidade aumenta com o tempo. A deformação viscosa seria devida a um escorregamento ou movimento muito lento das partículas umas sobre as outras, quando as forças de Van Der Waals que atuam nas suas superfícies são reduzidas.

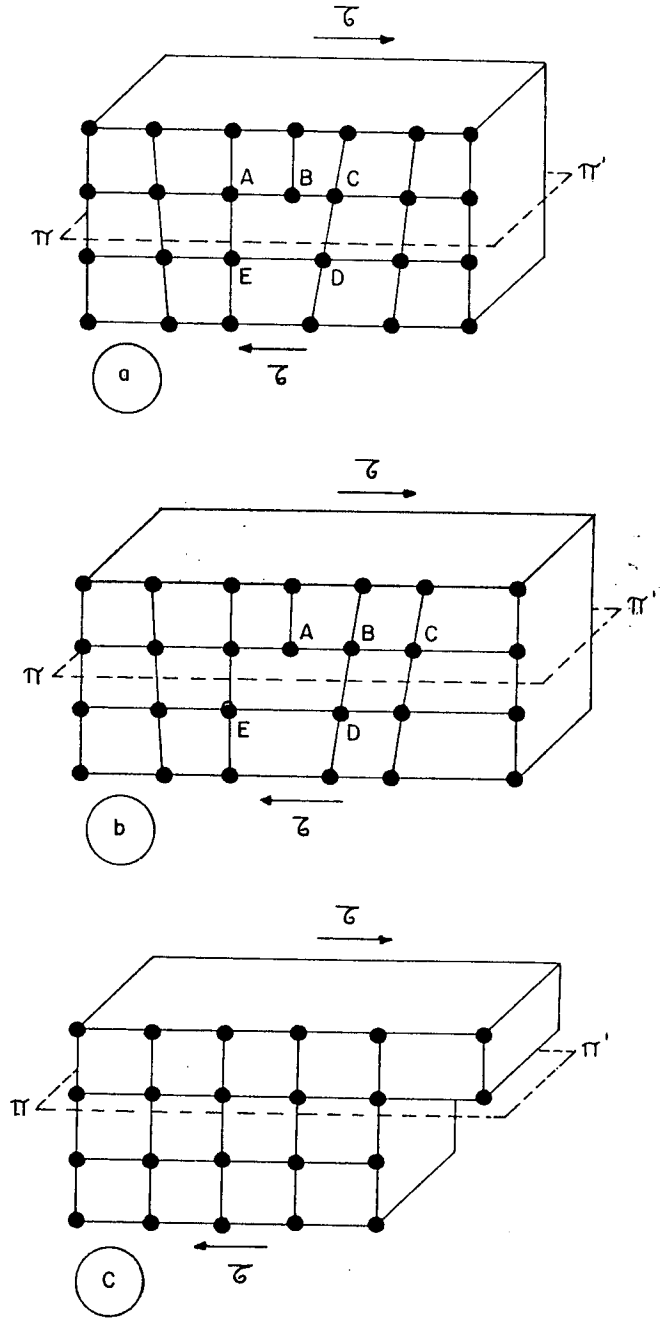


Figura 7.59 — Esquema ilustrativo da teoria da fluência por escorregamento cristalino

Aumento da solubilidade dos compostos do cimento

Mecanismo que resulta de uma reação química da água com os componentes ainda não hidratados do cimento sob pressão. Como a solubilidade dos sais que constituem o cimento aumenta com a tensão a que estão sujeitos, a passagem destes componentes para a solução na água produzirá uma diminuição do volume do concreto; a cristalização de tais componentes seria então realizada nos locais disponíveis, sem aumento de volume.

7.3.2.2 Método de ensaio

A Associação Brasileira de Normas Técnicas preconiza um método para ensaio de fluência [7.51] desenvolvido com base na ASTM [7.52] e na experiência brasileira, principalmente dos laboratórios da Cesp [7.53], Itaipu [7.54] e Furnas [7.55].

Assim como a deformação "elástica" instantânea é proporcional à carga aplicada, também o valor de fluência, bem como a velocidade com que a mesma se processa, dependem da intensidade da carga aplicada.

O ensaio de fluência consiste em se determinar a deformação total provocada por uma carga constante aplicada e mantida por um período mínimo necessário para que as deformações se estabilizem. A intensidade da carga aplicada é limitada a aproximadamente 40% da tensão de ruptura do concreto na idade do carregamento. A experiência tem demonstrado que até esse valor de tensão a fluência é praticamente proporcional à carga aplicada. Em geral, as estabilizações das deformações se dão por volta de 6 meses após a aplicação da carga.

Para aplicação da carga constante, pode ser utilizado um equipamento simples mostrado esquematicamente na figura 7.60. Conforme se observa, o sistema de ensaio é constituído basicamente por uma estrutura metálica de reação, por um macaco hidráulico aplicador de carga e por sistema mantenedor de carga através de outro macaco hidráulico e peso morto.

A figura 7.61 mostra a sala de ensaios de fluência do laboratório de Itaipu cujo sistema de ensaios é similar ao descrito anteriormente.

Na figura 7.62 é mostrada a sala de ensaios na universidade de Berkeley (USA) na qual o sistema de aplicação de cargas através de pesos mortos é substituído por uma bomba hidráulica de acionamento elétrico, com controle automático para manutenção da carga.

Para cada mistura, são moldados corpos de prova para os ensaios de fluência propriamente ditos, para controle (variações autógenas de volume), para ruptura axial (determinação da carga de ensaio) e para determinação do módulo de deformação.

As misturas de diâmetros máximos de agregado 19 e 38 mm são moldadas em corpos de provas cilíndricos Ø 15 x 45 cm, as de diâmetro máximo 76 mm em cilindros Ø 25 x 50 cm e as misturas com 152 mm de diâmetro máximo em cilindros Ø 45 x 90 cm.

Após a moldagem, os corpos de prova permanecem nas respectivas salas de ensaio, mantidas à temperatura de 21 ± 2°C no interior das formas metálicas e com a face superior protegida com areia úmida e/ou sacos de aniagem molhados, por um período de 48 horas, quando então são desmoldados, protegidos preliminarmente contra perda de umidade com plástico autofundente e capeados com discos de aço colados com resina epoxídica nos topos dos mesmos. A seguir são protegidos em definitivo, através de cilindros de borracha natural, fixados aos discos de aço, com cola e cintas de aço.

A figura 7.63 mostra um conjunto de corpos de prova em várias fases de preparação e proteção contra perda de umidade para o ensaio de fluência.

Um procedimento adicional que pode ser adotado durante a execução dos ensaios, em relação à "cura" dos corpos de provas, a fim de eliminar dúvidas com relação à proteção contra perda de umidade, é a instalação de tubos plásticos para injeções de água na superfície dos corpos de provas, conforme ilustrado na figura 7.64.

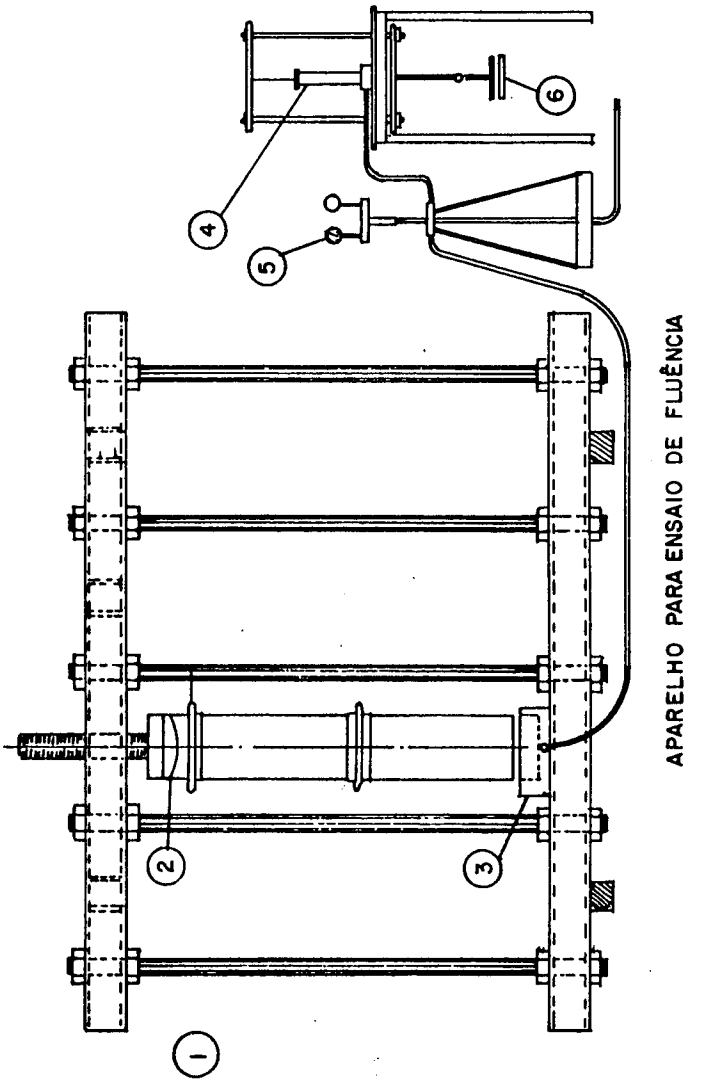


Figura 7.60 — Esquema de equipamento para manutenção da carga constante no ensaio de fluência

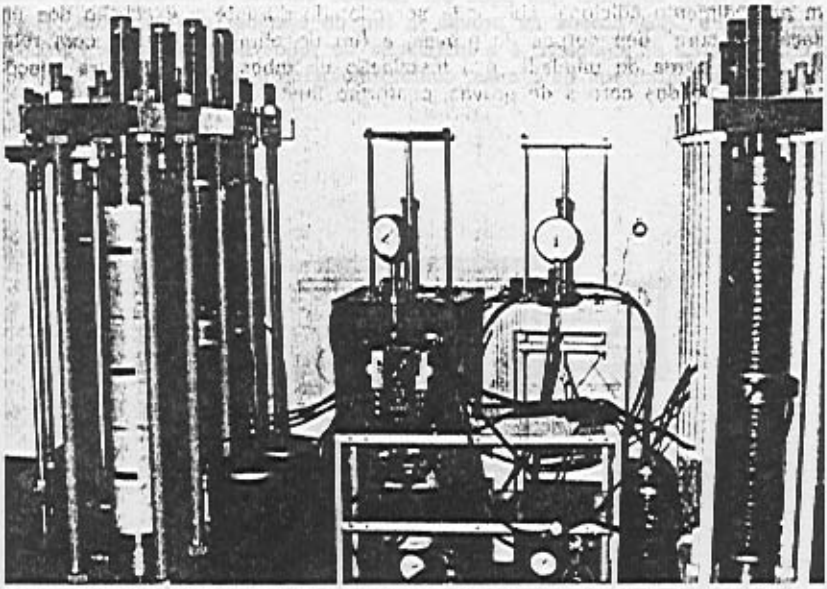


Figura 7.61 — Sistema hidráulico acionado por pesos mortos para manutenção da carga constante no ensaio de fluência

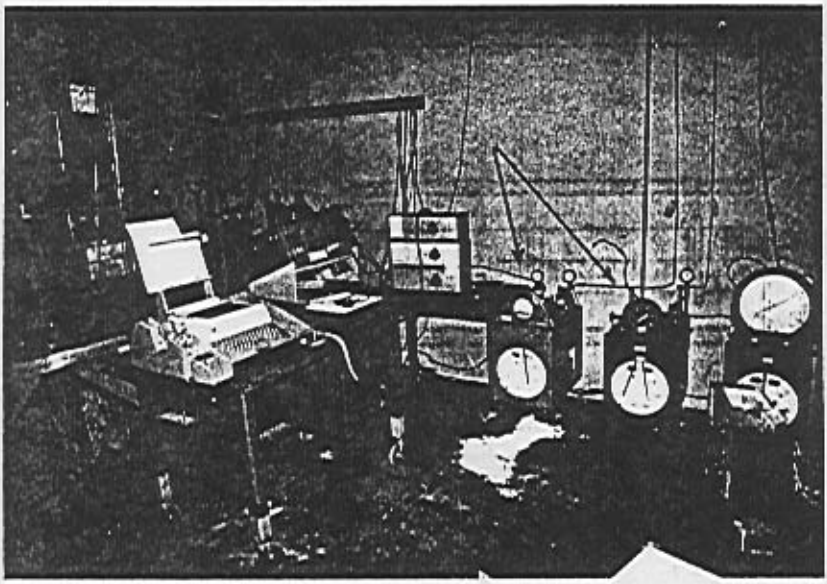


Figura 7.62 — Equipamento hidráulico de acionamento elétrico com controle automático, para manutenção de carga no ensaio de fluência (Universidade de Berkeley — U.S.A.)

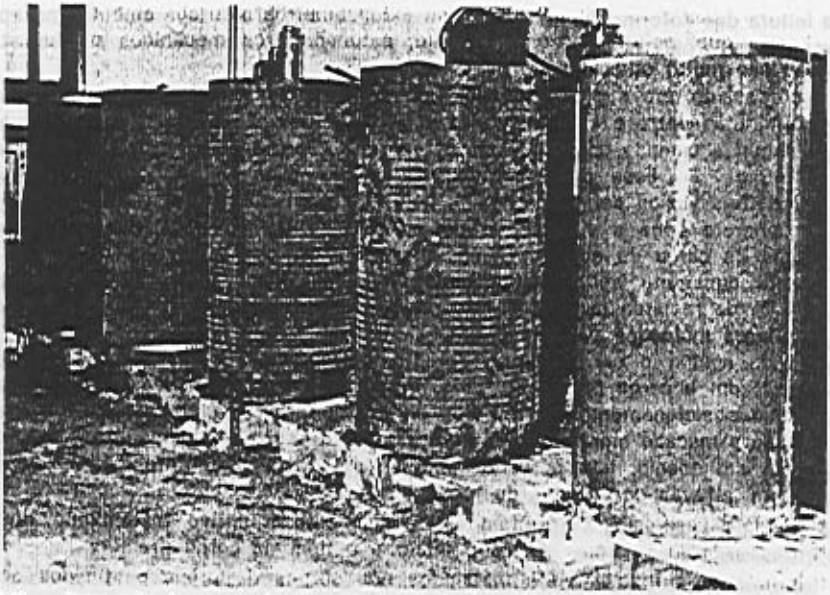


Figura 7.63 — Preparação de corpos de prova contra perda de umidade para ensaio de fluência

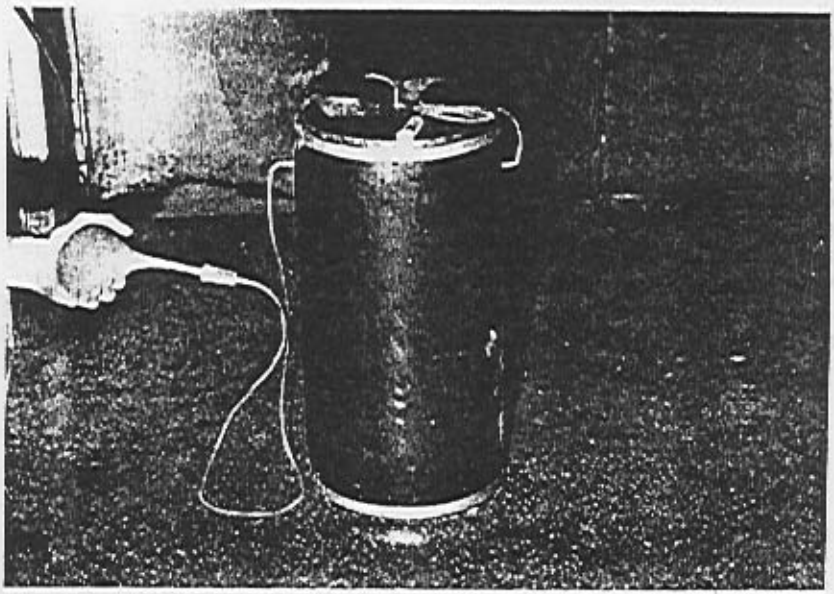


Figura 7.64 — Detalhe da sugestão de tubos plásticos instalados na proteção do corpo de provas, que permitem cura perfeita durante todo o tempo do ensaio de fluência

Para leitura das deformações utilizam-se extensômetros elétricos embutidos no corpo de provas já que, pela duração do ensaio, extensômetros mecânicos ou wire strain gages não são muito utilizados.

Os corpos de prova são moldados em três camadas aguardando-se aproximadamente 30 minutos entre o lançamento da segunda e terceira camadas, de forma que o topo da segunda camada coincida com o topo do deformímetro, conforme mostram as figuras 7.65 e 7.66. Esse procedimento visa evitar vazios na parte inferior da flange do aparelho. Tais vazios seriam formados pelo adensamento natural (assentamento plástico) do concreto após a vibração e podem mostrar deformações não reais, quando da aplicação de carga de ensaio.

A carga constante aplicada em cada idade de ensaio corresponde aproximadamente a 40% da resistência do concreto naquela idade, obtida da ruptura de corpos de prova auxiliares moldados para esse fim.

Antes de aplicar o carregamento definitivo é comum realizar dois carregamentos preliminares com a carga preestabelecida, quando então são verificados os medidores elétricos e o posicionamento correto dos corpos de prova no equipamento (centralização da rótula e macaco hidráulico). Esta verificação é baseada no módulo de deformação do concreto em ensaio, isto é, conhecendo-se o módulo de deformação na idade de carregamento, através dos corpos de prova auxiliares.

Concluída a verificação, é efetuado o carregamento definitivo, instantâneo, de modo a não ultrapassar 30 segundos entre o início e o final da carga prevista.

As leituras dos instrumentos instalados nos corpos de prova destinados aos ensaios de fluência e os de controle (variação autógena de volume), em todos os ensaios, obedecem à seguinte programação básica:

— Antes da moldagem
— Após moldagem
— Imediatamente antes da carga
— Imediatamente após a carga
— Horária, durante as 12 primeiras horas
— De 4 em 4 horas durante a primeira semana
— Diárias durante a segunda semana
Duas vezes por semana da terceira à sétima semana
Semanal após a sétima semana

Após o ensaio, a fluência do concreto pode ser obtida de funções tais como:

— Funções de potência
— Funções hiperbólicas
— Funções exponenciais
— Funções logarítmicas

A função mais adotada é a expressão logarítmica, desenvolvida pelo U.S. Bureau of Reclamation, [7.48] baseada na suposição de que o coeficiente da fluência específica é inversamente proporcional ao tempo, de acordo com a expressão (VII-VII).

$$\frac{d\,Csp}{dt} = \frac{F\,(K)}{t} \qquad \text{(VII-VII)}$$

onde:

Csp = fluência específica (relação entre a fluência e a tensão aplicada)
K = idade de carregamento
t = tempo decorrido desde o carregamento
F (K) = (coeficiente de fluência) Parâmetro obtido experimentalmente, representando a razão da fluência específica com o logaritmo do tempo sob carga.

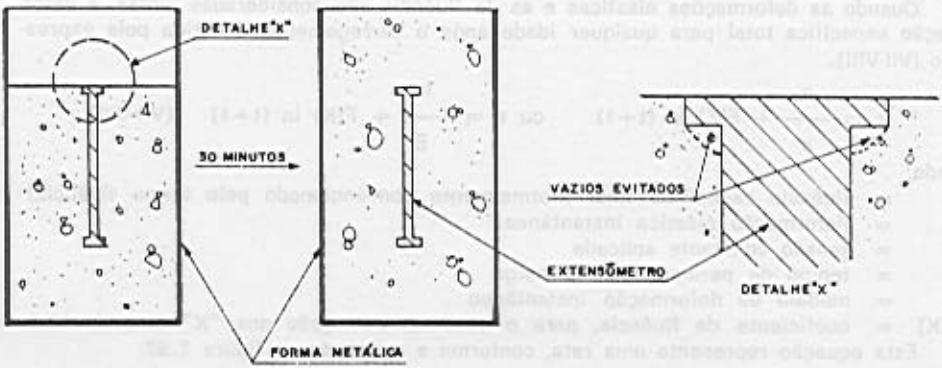


Figura 7.65 — Esquema ilustrativo de procedimento de moldagem de corpos de provas para o ensaio de fluência

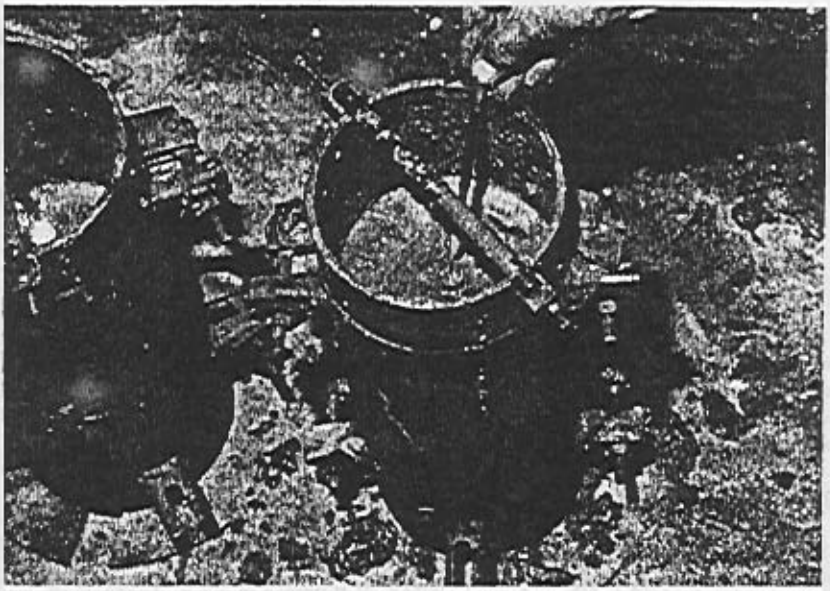


Figura 7.66 — (7.3.17) — Detalhe do lançamento do concreto na fôrma com o topo da segunda subcamada coincidindo com a flange superior do deformímetro

Quando as deformações elásticas e as de fluência são consideradas juntas, a deformação específica total para qualquer idade após o carregamento é obtida pela expressão (VII-VIII).

$$\varepsilon = \frac{e}{\sigma} + F(K)\ \ln\ (t+1) \qquad \text{ou } \varepsilon = \frac{1}{E} + F(K)\ \ln\ (t+1) \qquad \text{(VII-VIII)}$$

onde:

ε = fluência específica final (normalmente convencionado pelo termo fluência)
e = deformação elástica instantânea
σ = tensão constante aplicada
t = tempo de permanência da carga
E = módulo de deformação instantâneo
F(K) = coeficiente de fluência, para o concreto carregado aos "K" dias de idade

Esta equação representa uma reta, conforme a mostrada na figura 7.67.

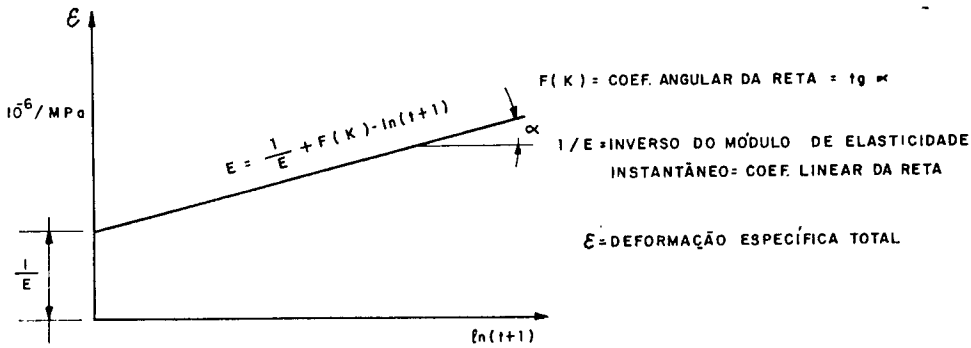


Figura 7.67 — Curva típica da fluência do concreto para cada idade de carregamento

A cada idade (K) de carregamento constante há uma equação de fluência específica e consequentemente um coeficiente de fluência F(K). Em geral, com um mínimo de 4 idades de carregamento, obtém-se a equação de fluência para cada mistura em estudo.

Os coeficientes de fluência para outras idades são obtidos da equação determinada por ensaios. As idades adotadas para carregamento têm sido 7, 28, 90 e 365 dias.

A equação que pode representar este fenômeno é expressa pela fórmula (VII-IX), vista na figura 7.68.

$$F(K) = \left(A + \frac{B}{K}\right). \qquad \text{(VII-IX)}$$

onde:

F(K) = coeficiente de fluência do concreto carregado aos "K" dias
K = idade de carregamento
A = coeficiente linear
B = coeficiente angular

7.3.2.3 Fatores que influenciam

Várias investigações têm mostrado a complexidade de fatores que afetam as propriedades fundamentais do concreto e consequentemente a fluência.

Neste item são abordados os principais fatores que alteram a fluência do concreto, muitos deles inter-relacionados.

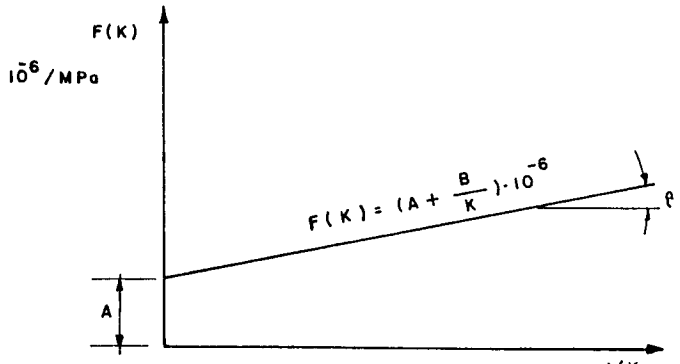


Figura 7.68 — Curva típica da fluência do concreto com o tempo

As propriedades do cimento que afetam a fluência do concreto e que merecem destaque são a finura, a resistência à compressão e a composição química.

Ensaios realizados [7.48] com diferentes tipos de cimento (classificação A.S.T.M.), mostram, de acordo com as figuras 7.69 e 7.70, uma evidente influência da composição do cimento sobre a fluência de concretos moldados com cimentos tipos I, III e aluminoso, com as seguintes composições:

— a/c = 0,55
— agregado/cimento = 5,4 e
— tensão aplicada/resistência = 1/3

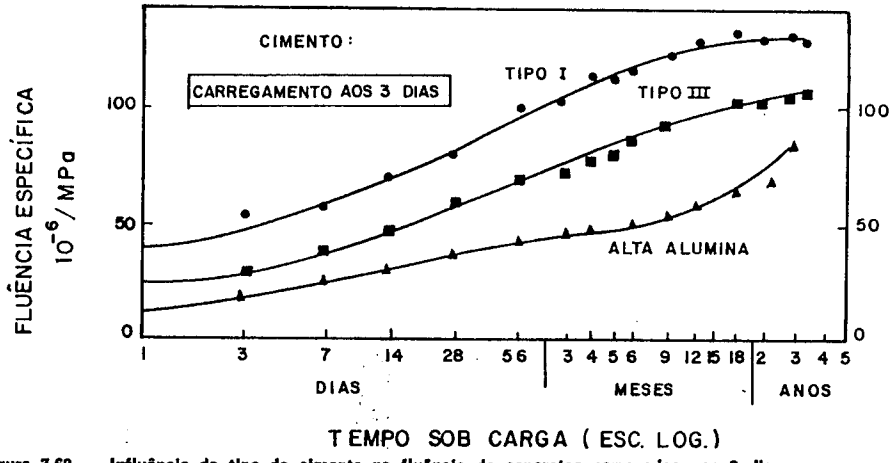


Figura 7.69 — Influência do tipo de cimento na fluência de concretos carregados aos 3 dias.

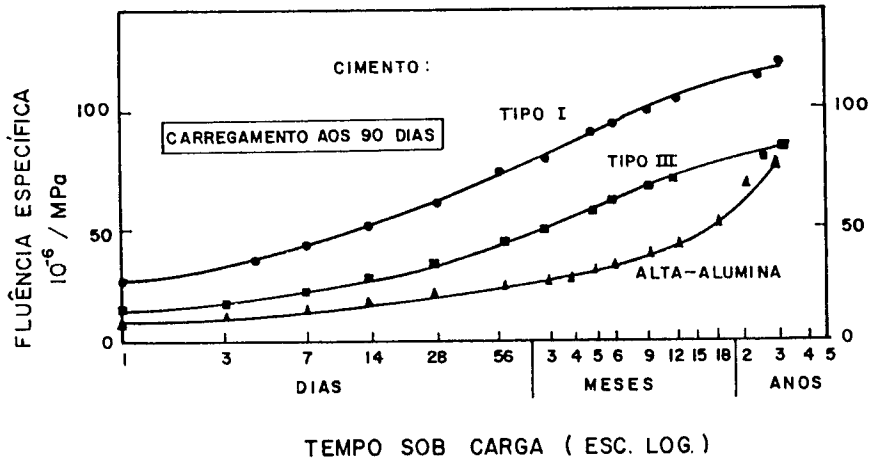


Figura 7.70 — Influência do tipo de cimento na fluência de concretos carregados aos 90 dias.

As resistências mecânicas das misturas acima, na idade de aplicação da carga, são mostradas na figura 7.71.

Pelos resultados apresentados, nota-se que a fluência é inversamente proporcional à velocidade de endurecimento do cimento usado, bem como da resistência do mesmo.

A substituição de parte do cimento por material pozolânico, aumenta o valor da fluência do concreto para baixas idades, pois há uma diminuição da resistência do concreto; nas idades mais avançadas a fluência desse concreto diminui, devido ao consequente aumento da resistência.

O aumento da finura do cimento conduz a uma diminuição da fluência, sempre que esse aumento resulte em maiores tensões de ruptura preponderantemente a baixas idades.

A fluência aumenta com o aumento da relação a/c, de acordo com Neville [7.48], a fluência é aproximadamente proporcional ao quadrado da relação a/c.

Ensaios executados com concretos de mesmo conteúdo de pasta mostraram a influência da relação a/c, conforme a figura 7.72.

CIMENTO	RESISTÊNCIA MPa NA IDADE DE CARREGAMENTO		
	3	28	90
TIPO I	14,6	32,3	40,7
TIPO III	35,6	50,4	57,4
ALTA-ALUMINA	53,4	67,2	69,3

Figura 7.71 — Resistências dos concretos (figuras 7.69 e 7.70) nas idades de carregamento

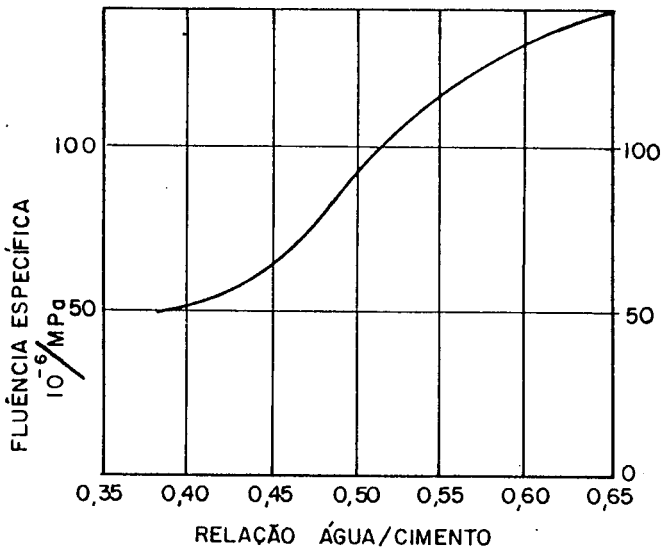


Figura 7.72 — Influência da relação água/cimento na fluência do concreto

No entanto é importante ressaltar que o aumento na dosagem de cimento e consequente diminuição da relação a/c, induz a um aumento da resistência e naturalmente uma diminuição da fluência. A partir de um certo limite (quando a pasta de cimento predomina sobre a quantidade necessária para envolver completamente o inerte e preencher os vazios) a fluência passa por um mínimo para em seguida aumentar, conforme se observa na figura 7.73 [7.48].

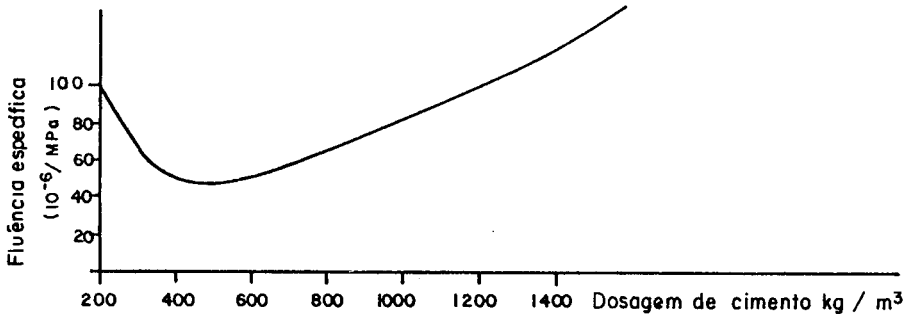


Figura 7.73 — Influência do consumo de cimento na fluência do concreto

Polivka [7.49], através de ensaios com concreto massa, concluiu que a fluência é diretamente proporcional ao conteúdo de pasta da mistura, portanto, quanto maior o conteúdo de pasta (menor quantidade de agregado) maior é a fluência, conforme se observa na figura 7.74.

Nota-se que os estudos feitos por Polivka se limitam a volumes de pasta que estão à esquerda do ponto mínimo da curva mostrada na figura 7.73.

A natureza, a quantidade e as propriedades elasto-mecânicas dos agregados (módulo de elasticidade, porosidade, tamanho e forma das partículas) afetam o valor da fluência do concreto.

Davis e seus colaboradores [7.48]estudaram a influência das características mineralógicas do agregado sobre a fluência. A figura 7.75 mostra um resumo dos resultados obtidos.

A influência do módulo de deformação do agregado é confirmada por ensaios de laboratório, executados em concretos com volume de pasta e quantidade de agregados fixos. A fluência específica e a recuperação da fluência do concreto aumentam quando o módulo de elasticidade do agregado decresce. A figura 7.76 mostra a relação entre a fluência específica final do concreto e o módulo de deformação do agregado usado.

Resultados de ensaios executados no laboratório de Furnas [7.56] com concretos moldados com agregados de diferentes procedências, mostram (figura 7.77) as variações dos valores da deformação elástica (1/E) e do coeficiente de fluência [F(K)] com função do tipo e diâmetro máximo do agregado.

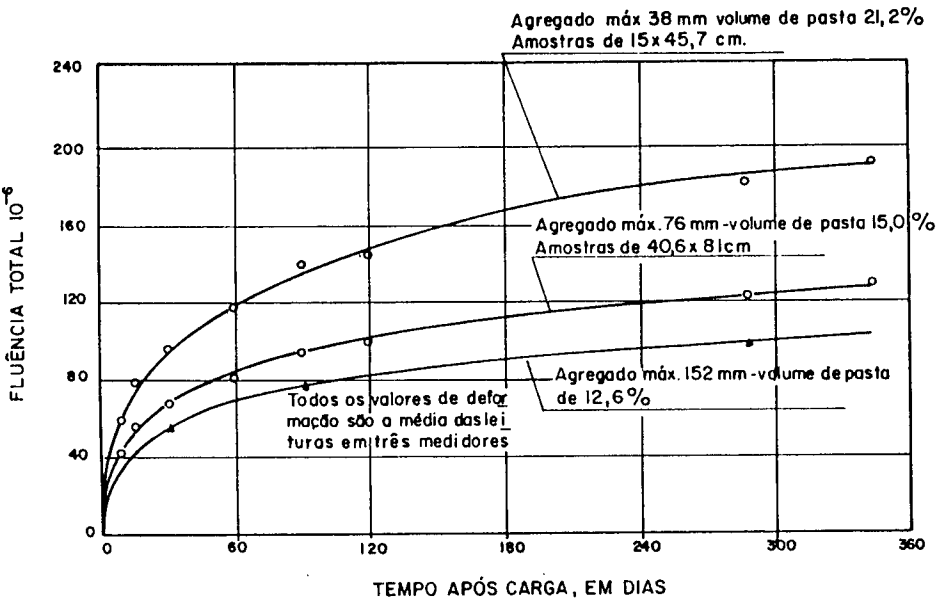


Figura 7.74 — Influência do volume de pasta da mistura na fluência do concreto

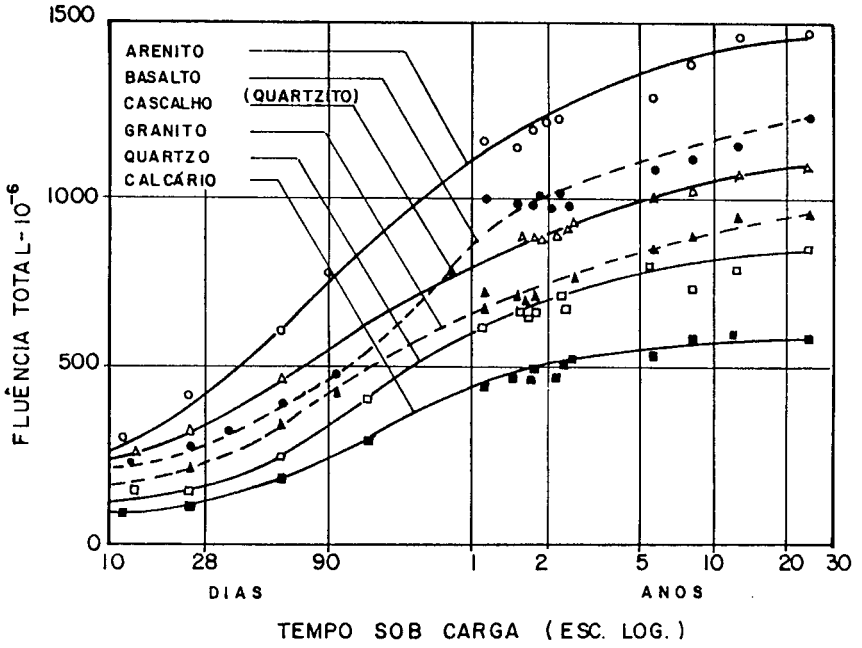


Figura 7.75 — Variação do valor da fluência do concreto com a mineralogia do agregado usado

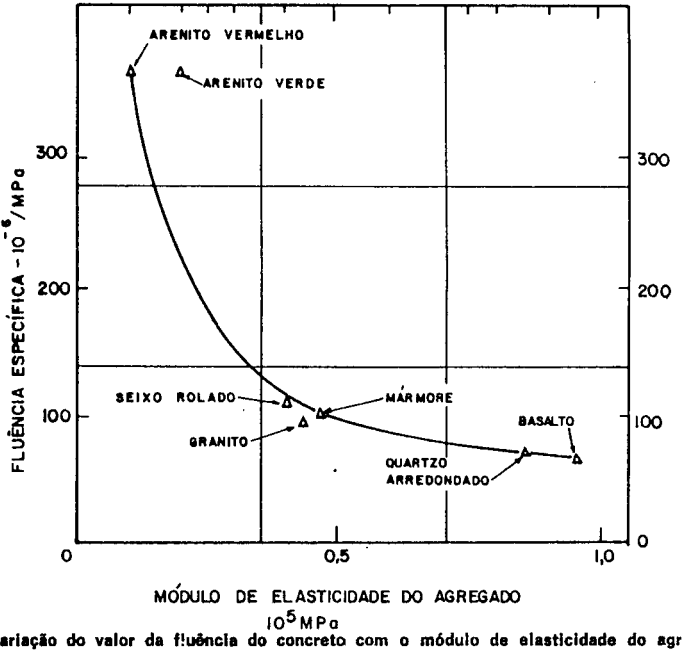
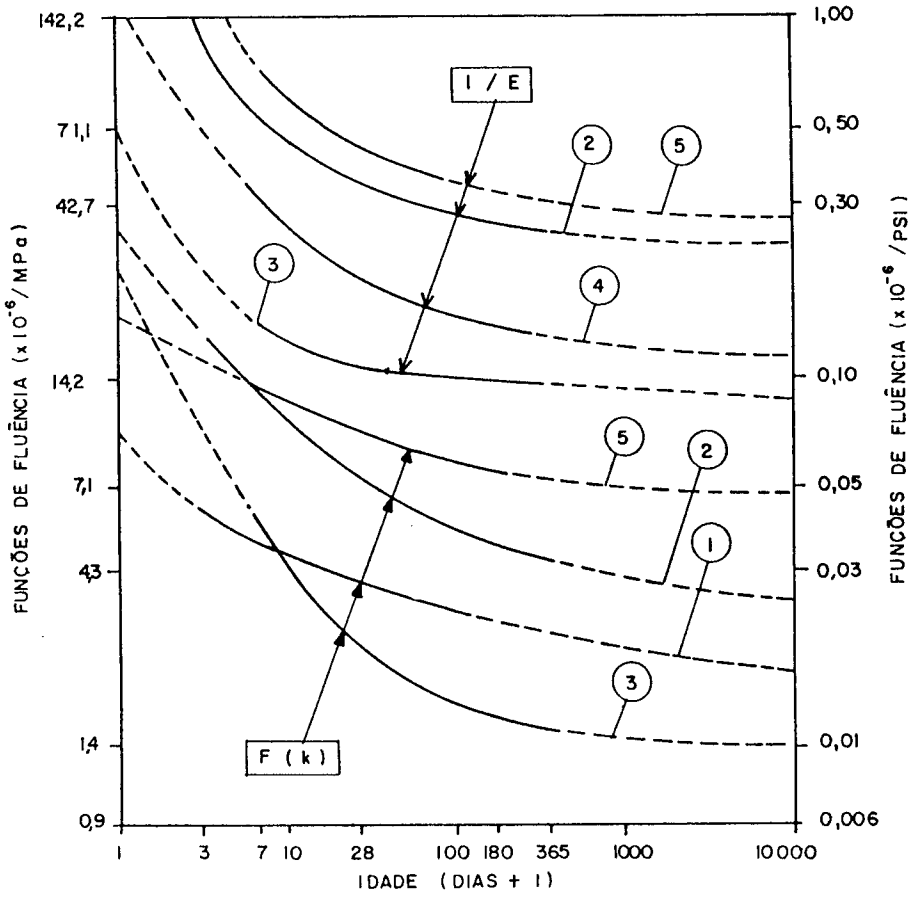


Figura 7.76 — Variação do valor da fluência do concreto com o módulo de elasticidade do agregado usado



DOSAGEM	OBRA	AGREGADO	Dmax (mm)	CURVA
140.6.1	ITUMBIARA	BASALTO	152	1
E-1941/ANG 260	C. N. A. A. A	GNAISSE	27	2
E-2300/TUC 333	TUCURUI	METAGRAUVAQUE	152	3
E-2380/IG 06	ILHA GRANDE	BASALTO	152	4
E-2299/BM 126	BALSAS MINEIRO	BASALTO	76	5

Figura 7.77 — Variação da fluência do concreto em função de diferentes agregados em obras brasileiras

Dos estudos feitos pela Cesp para os concretos da obra de Ilha Solteira [7.57] uma das misturas foi ensaiada em duas condições, ou seja, concreto integral com diâmetro máximo do agregado 152 mm em corpos de prova Ø 45 x 90 cm e peneirado na malha 38 mm com corpos de prova 15 x 45 cm. Os resultados mostrados na figura 7.78 confirmam, para todas as idades, o aumento da deformação instantânea e do coeficiente de fluência em função da menor quantidade de agregado da mistura peneirada, em comparação com a integral.

Finalmente, a porosidade e a absorção do agregado afetam a fluência de várias formas:

— Através da absorção da água da mistura ou introduzindo ar na mesma.
— Através da redução do módulo de elasticidade.
— Através da facilidade da transferência de umidade.
— Através da natureza da sua superfície.

A absorção de água da mistura pelo agregado e a variação de volume da pasta de cimento envolvente modificam os valores das deformações, devidas ao carregamento permanente.

A porosidade do agregado está interligada aos valores de fluência, uma vez que agregados com alta porosidade geralmente apresentam baixo módulo de deformação e consequentemente altos valores de fluência.

A natureza da superfície do agregado influi no valor da deformação lenta, no que se refere à ligação com a pasta.

Outro fator a ser considerado no valor da fluência do concreto é a intensidade da tensão a que o mesmo está submetido.

Para uma mesma mistura, a fluência é proporcional à tensão aplicada e inversamente proporcional à resistência do concreto na idade de aplicação da carga.

Quando a tensão aplicada ultrapassa o limite de proporcionalidade (cerca da metade da tensão de ruptura), inicia-se a multiplicação dos efeitos das microfissuras do concreto, que se propagam com o aumento da tensão, alterando o comportamento da deformação lenta. O limite superior para ensaio, sem que ocorra ruptura do material, pode ser observado no item 7.2.1.5 e pelas figuras 7.31 a 7.34.

A figura 7.79 [7.49] mostra a relação entre a fluência e a tensão aplicada, para concretos submetidos a carregamento aos 180 dias, 1 e 2 anos de idade.

Por outro lado, concretos sujeitos a uma mesma relação tensão/resistência, quanto menor a idade de ensaio (menor a resistência) maior é o valor de fluência, como ilustrado nas figuras 7.80 e 7.81 [7.48].

A umidade relativa do meio ambiente tem influência direta sobre a deformação lenta, afetando a umidade interior do concreto sob carga.

Observa-se que concretos ensaiados em ambientes secos apresentam coeficientes de fluência e fluência específica finais mais altos do que concretos saturados.

Na figura 7.82 observa-se que existe uma grande influência da umidade relativa (U.R.), uma vez que para uma U.R. de 50% o coeficiente de fluência é de 2 a 3 vezes superior a de uma U.R. de 100% [7.48].

Deve-se distinguir a deformação devida à fluência daquela devida à retração por secagem. Esta última ocorre ao longo do tempo e é devida ao movimento da água do ou para o meio ambiente, independentemente da tensão aplicada.

Como os concretos expostos a baixas umidades relativas contraem-se, é possível que o valor da fluência seja afetado pela retração por secagem. Entretanto, isso não deve ser necessariamente interpretado como sendo somente a retração por secagem que afeta a fluência, mas apenas que os dois fenômenos são influenciados por um processo comum durante a secagem. Além disso, retração por secagem e fluência são influenciadas de maneira semelhante por outros fatores comuns.

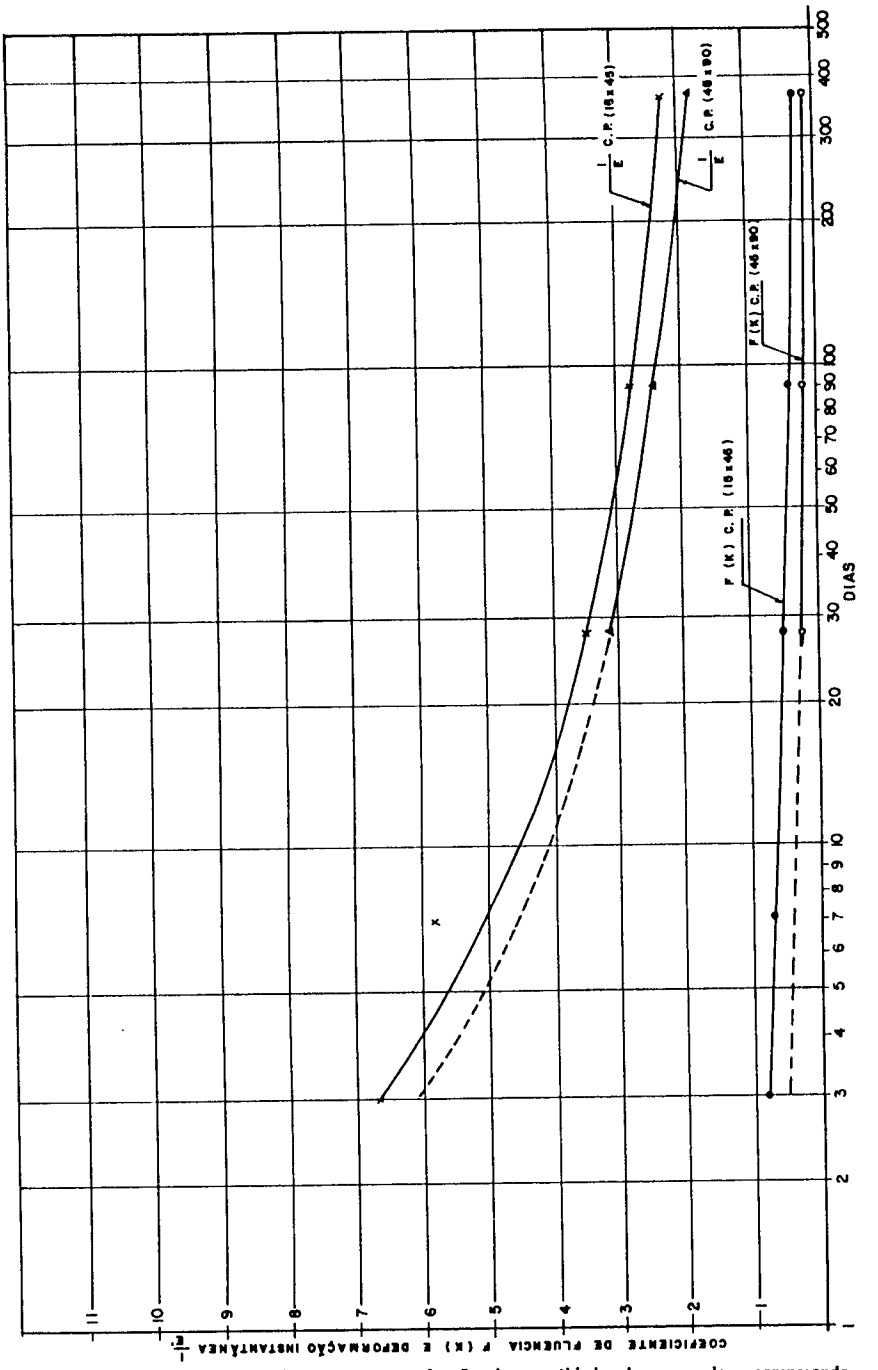


Figura 7.78 — Variação da fluência do concreto em função da quantidade de agregados, comparando resultados de ensaios de concretos integrais e peneirados

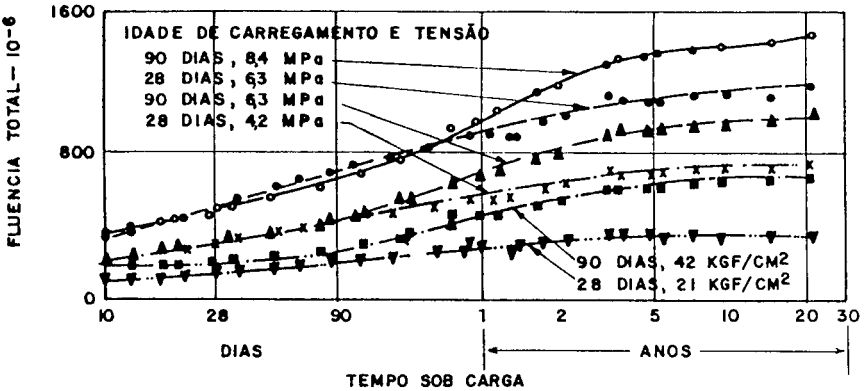


Figura 7.79 — Influência do nível de tensão aplicado no valor da fluência do concreto

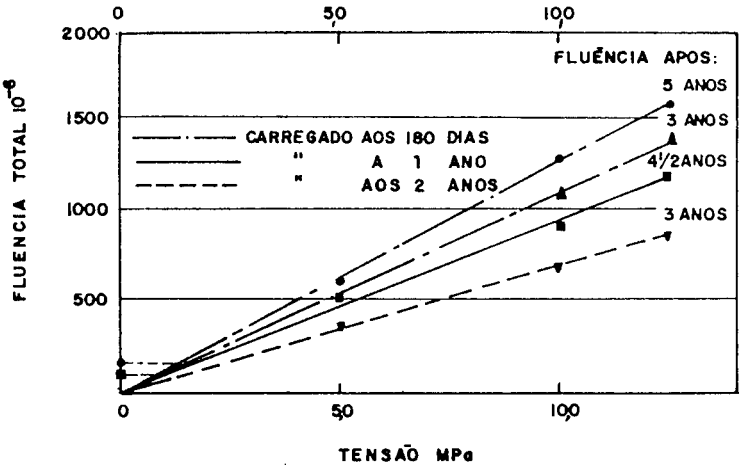


Figura 7.80 — Influência do nível de tensão aplicado e idade de carregamento na fluência do concreto

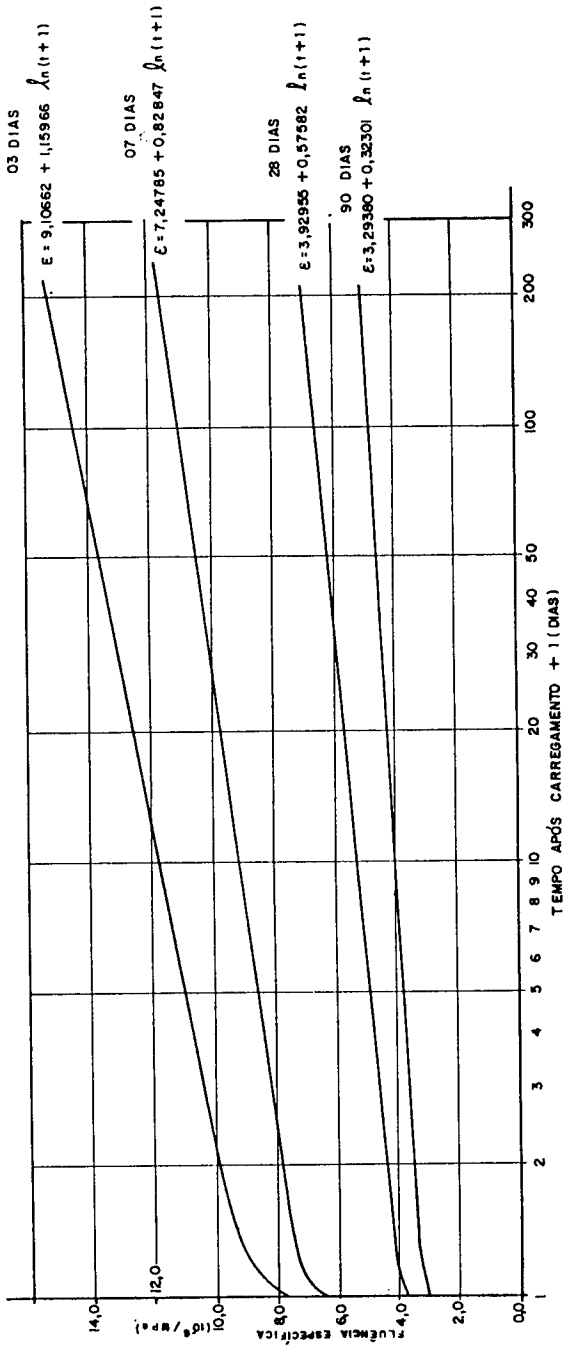


Figura 7.81 — Influência da idade de carregamento na fluência do concreto

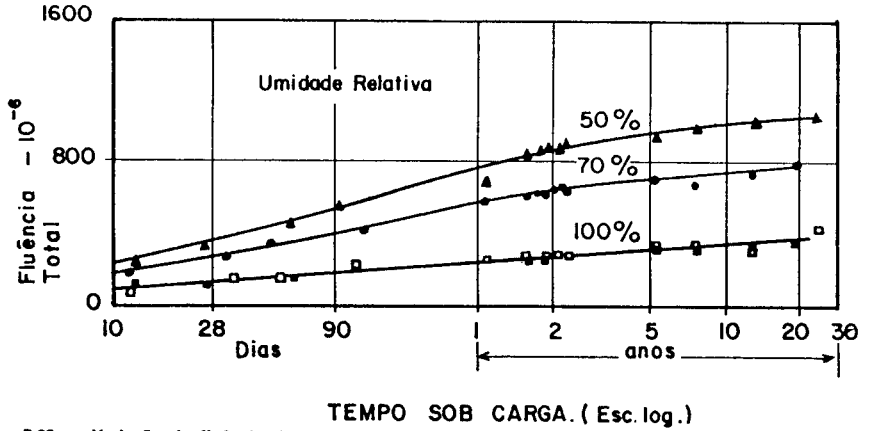


Figura 7.82 — Variação da fluência do concreto com a umidade relativa ambiente durante o ensaio

Quando o concreto está em equilíbrio higroscópico com o meio ambiente, a fluência é considerada independente do nível de umidade ambiente, desde que não se afete a umidade interna necessária para continuação da hidratação do cimento.

A fluência não depende somente da perda d'água do concreto durante a carga, mas também da umidade presente quando o carregamento é aplicado, isto é, depende da umidade relativa durante a cura, antes do carregamento, conforme se observa na figura 7.83 [7.48].

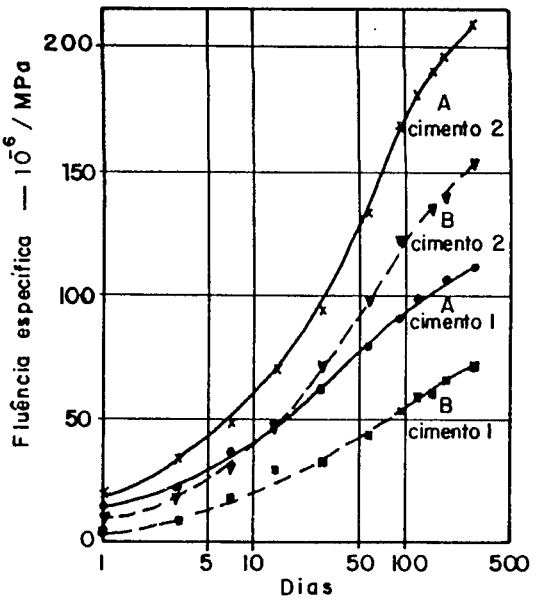


Figura 7.83 — Variação da fluência do concreto em função da umidade relativa durante a cura, antes do ensaio

No laboratório da Itaipu [7.58] uma mistura de concreto ensaiada em condições normalizadas foi também ensaiada nas mesmas condições de temperatura, carga e idade, porém em ambiente de umidade relativa de 50%, conforme mostrado na figura 7.84.

Essa mesma mistura foi também ensaiada com os corpos de provas protegidos contra perda de umidade a temperaturas de 4°C e 38°C.

Os resultados dos coeficientes de fluência obtidos são mostrados na figura 7.85.

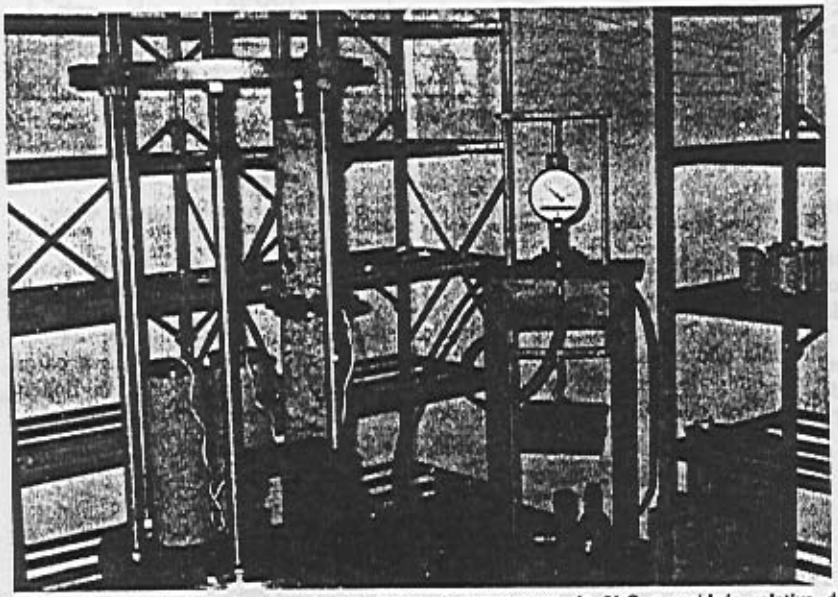


Figura 7.84 — Ensaio de fluência efetuado em Itaipu à temperatura de 21°C e umidade relativa de 50%

CONDIÇÕES DE ENSAIOS		VALORES DO COEFICIENTE DE FLUÊNCIA - F(K)-(10^{-5} MPa)				
		≃ 3 DIAS	≃ 7 DIAS	≃28 DIAS	≃ 90 DIAS	≃ 360 DIAS
	SALA DE 21°C	0,80429	0,73584	0,3542	0,2873	0,1047
	CAMARA FRIA 4° C	–	0,7058	–	0,3235	–
	CAMARA QUENTE 38°C	–	0,9690	–	0,3992	–
	CÂMARA 21°C SÊCA UR'.= 50'.	–	1,8477	–	1,1705	–

Figura 7.85 — Resultados de ensaios de fluência obtidos em Itaipu, executados em diferentes condições de umidade e temperatura

Notou-se, nesse estudo, aumento sensível (2,5 vezes) no coeficiente de fluência dos corpos de prova submetidos a ensaio na câmara seca (21° ± 2 °C e U.R. de 50 ± 5%) em relação aos estocados em sala climatizada a 21° ± 2 °C e protegidos contra perda de umidade.

O aumento do coeficiente de fluência com o aumento da temperatura de estocagem, dentro da faixa de temperatura pesquisada (de 4° a 38 °C), esteve de acordo com o obtido por outros pesquisadores [7.48].

De fato a figura 7.86 mostra os resultados das pesquisas efetuadas por Nasse e Neville em 1967, com um concreto carregado com uma carga constante aos 50 anos de idade, sujeito a várias temperaturas de estocagem.

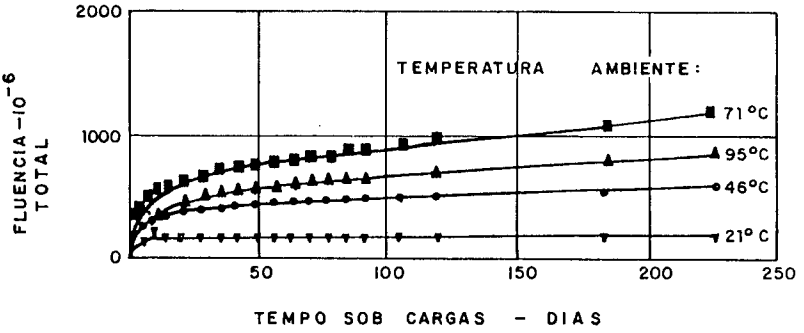


Figura 7.86 — Influência da temperatura ambiente durante o ensaio na fluência do concreto

As consequências de carregamentos anteriores sobre a fluência do concreto bem como da recuperação das deformações após a retirada da carga foram estudadas por Polivka, Pirtz e Adams (7.49), em duas séries de ensaios.

Na primeira série, corpos de prova peneirados na malha 76 mm foram pré-carregados às idades de 1 dia (0,55 mPa) 3 e 7 dias (2,4 mPa) e mantidos até 28 dias quando foram aumentadas para 5,5 mPa e mantidas até 412 dias quando os corpos de prova foram descarregados.

Na segunda série, corpos de provas com agregado 152 mm foram carregados às idades de 3, 7 e 28 dias mantidos com carga constante até 90 dias, quando as mesmas foram aumentadas e mantidas até 300 dias.

Em ambos os estudos, corpos de prova comparativos (sem carregamentos anteriores) foram também ensaiados.

As principais conclusões dos autores são de que cargas anteriores provocam um aumento na fluência final. Este fato é tão significativo quanto menor a idade do concreto na época do primeiro carregamento.

7.3.2.4 Aplicações dos valores de fluência

O conhecimento das propriedades elasto-mecânicas de concreto e no caso específico, da fluência, é essencial para o projeto, execução e análise do comportamento das estruturas.

Neste item são explicadas de modo sucinto as três principais aplicações práticas da fluência do concreto.

7.3.2.4.1 Transformação de deformação em tensão

O conhecimento do coeficiente de fluência (F(K)), do concreto envolvente de grupos de deformímetros é imprescindível para conversão, em tensões, das deformações obtidas nas direções desses medidores.

Utilizando-se o método da sobreposição dos efeitos, os acréscimos de tensão ($\Delta\sigma_n$) são fornecidos pela fórmula (VII-X).

$$\Delta\sigma_n = \left[E\,(K_n)^{-1} + F(K_n)\,\ln\,(1 + t_n - K_n) \right]_{-1} \times$$

$$\times\ \varepsilon^*_n - \left[\sum_{j=1}^{n-1} + \frac{\Delta\sigma_j}{E\,(K_j)} + \sum_{j=1}^{n-1} \Delta\sigma_j\ F(K_j)\ \ln\ (1+t_n-K_j) \right] \qquad \text{(VII-X)}$$

Sendo:

$E\,(K_j)$ = Módulo de deformação na idade K_j
$F\,(K_j)$ = Coeficiente de fluência na idade K_j
K_n = Idade de cálculo do acréscimo
ε^*_n = Deformação corrigida na idade n
K_j = Idade dos acréscimos de tensão $\Delta\sigma_n$

7.3.2.4.2 Relaxação de tensão

A fluência de um material está associada a outra propriedade, a relaxação. A fluência e a relaxação são dois aspectos de um mesmo fenômeno: a dissipação da energia de deformação em energia interna. Por definição a relaxação é uma redução de tensão com o tempo sob uma deformação constante (material apresentando restrições à deformação).

Dessa forma, com o conhecimento prévio do valor da fluência e através de transformações, obtém-se a relaxação que é de fundamental importância para o projeto de estruturas de concreto, já que a mesma poderá gerar efeitos benéficos ou não.

No caso de estruturas massivas de concreto, a relaxação das tensões de origem térmica é benéfica ao comportamento da estrutura, porque quanto maior a fluência do concreto, maior a relaxação das tensões, reduzindo a possibilidade de aparecimento de fissuras oriundas de variações de temperatura.

Para estruturas de concreto protendido, a relaxação provoca a redução no valor da protensão do aço e consequentemente modificações no estado de tensões. Portanto nessas estruturas o uso de concreto de menor fluência acarreta menores perdas de tensão à estrutura protendida.

Nos casos de protensão, o conhecimento prévio da fluência do concreto, possibilita acrescer o valor de carregamento, de modo a obter, no final, a carga de projeto.

7.3.2.4.3 Previsão da capacidade de deformação

A expressão utilizada por Houghton [7.50] para previsão da capacidade de deformação é dada pela fórmula (VII-XI).

tração na flexão (carregamento rápido) e a fluência específica do concreto em estudo.

A expressão utilizada por Houghton [7.50] para previsão da capacidade de deformação é dada pela fórmula VII-XI.

$$\varepsilon_j = \frac{\sigma_{tj}}{E_j} + \frac{\sigma_{tj} + \sigma_{tk}}{2} \cdot F(K) \qquad \ln\,(t+1) \qquad \text{(VII-XI)}$$

onde:

σ_{tj} = Tensão de ruptura à tração na flexão à idade de "j" dias.
ε_j = Capacidade de deformação estimada na idade de "j" dias.
E_j = Módulo de deformação instantâneo à compressão à idade de "j" dias.

σ_{tk} = Tensão de ruptura à tração na flexão na idade de carregamento.
F(K) = Coeficiente de fluência do concreto na idade do carregamento
t_1 = Idade de carregamento.
t = Tempo decorrido entre "t_1" e "t_k" (tempo sob carga).

A primeira parcela da expressão de Houghton se refere à deformação devida ao carregamento rápido e a segunda parcela considera a deformação devida à fluência.

7.3.2.5 Estimativa da fluência

O Laboratório de Concreto da Itaipu desenvolveu estudos para estimar os coeficientes de fluência de uma mistura a partir de concretos com valores de fluência conhecidos e baseados nos seguintes fatores de influência [7.58]:

— Volume de pasta
— Resistência à compressão simples
— Módulo de elasticidade
— $(A/C)^2$
— W — fator de correção proposto por Wagner (figura da pág. 359 do livro "Creep of Concrete: Plain, Reinforced and Prestressed" de A. M. Neville), baseado em resultados de ensaios que mostraram ser a fluência do concreto proporcional ao volume de pasta e ao fator A/C da mistura.

Foram propostos quatro modelos matemáticos:

— Modelo 1: $Fi = (Vi/Vj) \times (fcj/fci) \times Fj$
— Modelo 2: $Fi = (Vi/Vj) \times (Ej/Ei) \times Fj$
— Modelo 3: $Fi = (Vi/Vj) \times (Wi/Wj) \times Fj$
— Modelo 4: $Fi = (Vi/Vj) \times (A/Ci/A/Cj)^2 \times Fj$

onde:

— i : índice correspondente à mistura de fluência conhecida
— j : índice correspondente à mistura de fluência que se quer determinar
— F : Fluência
— V : Volume de pasta
— fc : Resistência à compressão axial
— A/C : Relação água/cimento
— W : Coeficientes de Wagner [7.48]

A análise das quatro formulações matemáticas desenvolveu-se com base em todos os ensaios realizados por aquele Laboratório, e a escolha recaiu na estimativa que apresentou o menor erro médio quadrático.

Essa análise mostrou que o modelo 2, no qual a fluência é proporcional ao volume de pasta e ao inverso do módulo de elasticidade do concreto, é a que melhor expressa os resultados obtidos. A figura 7.87 mostra os traços que foram ensaiados bem como aqueles para os quais eles foram usados para a estimativa da fluência.

A figura 7.88 apresenta os coeficientes a e b e os coeficientes de correlação r, da função representativa da fluência $F(K) = [a + (b/K)]$ para os concretos que envolvem rosetas instaladas nas estruturas da obra de Itaipu, ensaiados e calculados como descrito anteriormente.

CÓDIGO / MODELO	1 → 2	1 → 3	2 → 1	2 → 3	3 → 1	3 → 2	ERRO MÉDIO QUADRÁTICO	4 → 5	5 → 4	ERRO MÉDIO QUADRÁTICO
1	0,2538	0,1163	0,1736	0,0634	0,1176	0,0925	0,1362	0,1438	0,1330	0,1384
2	0,1535	0,0756	0,1267	0,0545	0,0856	0,0790	0,0958	0,1025	0,0953	0,0989
3	0,1980	0,2118	0,1518	0,0690	0,1914	0,0814	0,1506	0,3534	0,2440	0,2987
4	0,1993	0,2274	0,1524	0,0774	0,2000	0,0890	0,1576	0,3487	0,2421	0,2954

Figura 7.87 — Modelos matemáticos usados para estimativa da fluência de misturas usando resultados de ensaios de outras misturas

7.4 Resistência à tração

7.4.1 Conceito

Embora a resistência à compressão seja a propriedade mais utilizada nos cálculos de estruturas de concreto ou explorada como parâmetro de indício de qualidade do mesmo, em determinadas estruturas, armadas ou não, as solicitações de tração passam a ser determinantes, tendo-se como exemplo clássico os blocos de concreto massa tracionados por gradientes térmicos.

Por outro lado, a determinação das propriedades do concreto está associada a graus de dificuldades experimentais diferentes para cada propriedade. Assim a determinação da resistência à compressão do concreto é de execução mais simples e rápida que a resistência à tração, com a vantagem de ser menos afetada na sua qualidade intrínseca.

A maior dificuldade imposta na determinação experimental da resistência à tração pura do concreto está diretamente ligada ao baixo valor dessa propriedade em relação à compressão e às dimensões dos corpos de provas exigidos pelos agregados. Desses fatos decorre que, para ensaios de tração pura, há necessidade de que as excentricidades de aplicação das cargas sejam praticamente nulas, o que em termos práticos tem inviabilizado o desenvolvimento de métodos de ensaios diretos para conhecimento dessa propriedade. Decorre desses fatos o desenvolvimento de metodologias alternativas para conhecimento dessa propriedade através de flexão em vigas não armadas ou tração indireta por compressão diametral de cilindros. Dessa forma, a resistência à tração do concreto a que se refere este item é aquela obtida por esforços indiretos fazendo-se apenas menção a algumas tentativas de desenvolvimento de metodologia para tração direta do concreto.

7.4.2 Métodos de ensaios

7.4.2.1 Tração por flexão de vigas

O ensaio de resistência à tração na flexão é bastante utilizado para caracterização dessa propriedade. O ensaio, normalizado pela ASTM [7.59] e [7.60], é realizado em corpos de provas prismáticos de seção transversal quadrada conforme figura 7.89.

Os moldes devem proporcionar corpos de prova com variação máxima de ± 5% no comprimento e de ± 1% em qualquer seção transversal, relativamente às dimensões nominais mostradas na tabela da figura 7.89.

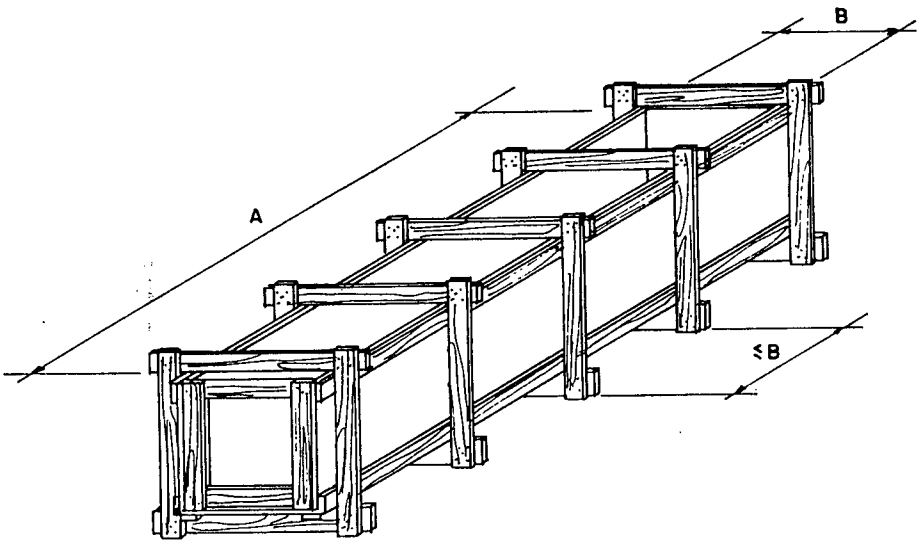
TRAÇO \ COEF.	a	b	r
38 - B - 04	0,257528	1,178118	0,951997
* 38 - B - 06	0,254363	1,947615	0,890928
38 - B - 11	0,193314	0,863460	0,950109
* 38 - B - 15	0,279058	1,745652	0,969529
* 38 - C - 06	0,246882	1,088975	0,891107
38 - F - 01	0,277917	1,799191	0,936884
38 - F - 03	0,253126	1,438437	0,925040
38 - J - 03	0,255570	2,397078	0,960169
76 - A - 05	0,209068	3,481103	0,988853
76 - B - 06	0,229912	2,919794	0,984244
76 - C - 04	0,243497	2,317975	0,975407
76 - C - 07	0,273612	2,027963	0,963186
* 76 - D - 04	0,234107	2,558958	0,981987
76 - D - 05	0,271166	2,694914	0,977273
* 76 - F - 03	0,231302	2,262922	0,963996
* 152 - B - 03	0,222218	1,025109	0,975375
152 - C - 01	0,210697	1,424131	0,989143
152 - D - 03	0,203703	0,903149	0,974641
* 152 - E - 01	0,440259	2,512463	0,904437
152 - E - 02	0,417711	2,496015	0,885810
152 - E - 03	0,308368	1,333945	0,890274
* 152 - F - 01	0,386012	3,082568	0,930013
152 - G - 01	0,336309	1,312870	0,872114
152 - I - 02	0,209944	1,908060	0,964453

* — Misturas ensaiadas

$F(K) = [a + (b/k)]$

r = Coeficiente de correlação

Figura 7.88 — Fluência de misturas obtidas por ensaio, estimadas pelo modelo proposto de acordo com a figura 7.87



Ø máx do agregado (mm)	B ≥ 3 Ø max (mm)	A = 4 B (mm)
≤ 38	150	600
76	250	1000
152	450	1800

Figura 7.89 — Molde e dimensões de vigas para ensaios de tração por flexão

As faces laterais bem como o fundo dos moldes devem ser travadas, conforme ia figura 7.89 a fim de se evitar deformações excessivas das paredes dos A distância entre os travamentos não excede a menor dimensão do molde.

As vigas são preferivelmente moldadas na própria sala de ensaios, a fim de se evitar manuseio excessivo das mesmas na preparação para ensaio.

Os concretos de diâmetro máximo de agregado até 38 mm são moldados com o concreto lançado em uma só camada e vibrados com vibrador de imersão tipo agulha de diâmetro 25 mm.

As vigas para concretos com agregados maiores que 38 mm são moldadas em duas subcamadas iguais e o concreto deve ser adensado com vibrador de imersão com diâmetro da agulha de 90 mm, conforme ilustra a figura 7.90.

A face não enformada deve receber acabamentos de forma a manter as tolerâncias das dimensões da seção das vigas.

A cura é iniciada imediatamente após a moldagem, através de sacos de aniagem úmidos aplicados à superfície exposta ou areia úmida. Os corpos de prova auxiliares são curados no mesmo local e nas mesmas condições das vigas.

Na figura 7.91 mostra-se uma série de corpos de prova sendo curados com areia úmida.

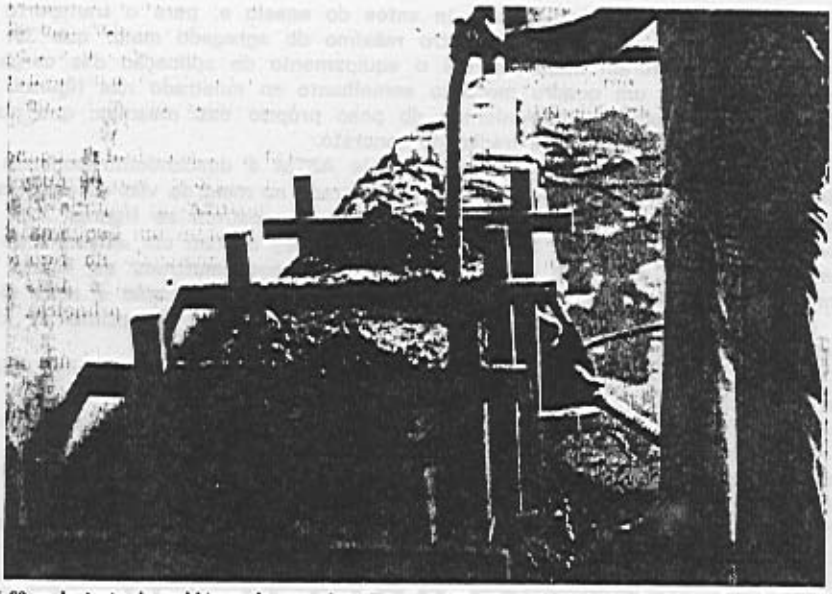


Figura 7.90 — Instante de moldagem de uma viga 45 x 45 x 180 cm, com concreto de agregado máximo 152 mm

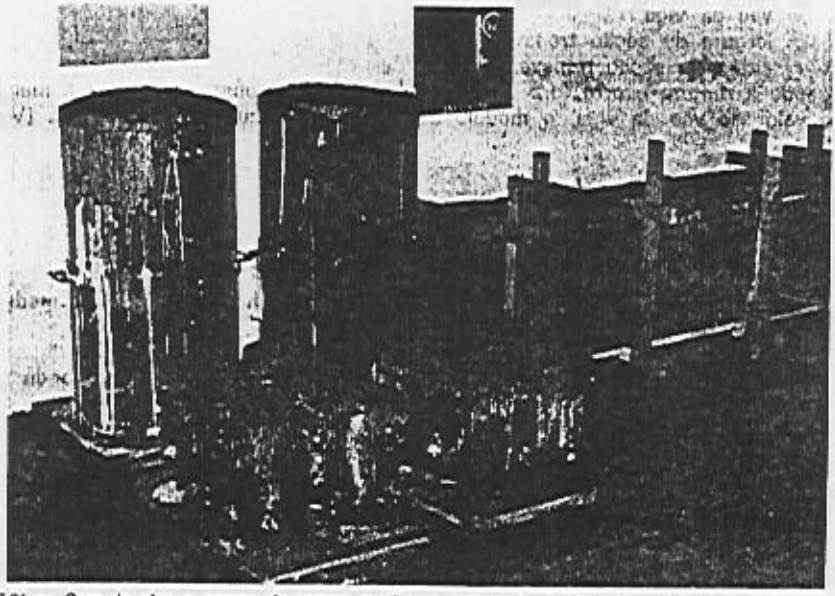


Figura 7.91 — Cura de viga e corpos de provas auxiliares com areia úmida, até a data de ensaio.

A desmoldagem é feita imediatamente antes do ensaio e, para o transporte das vigas moldadas com concretos de diâmetro máximo do agregado maior que 38 mm, desde o ponto onde foram moldadas até o equipamento de aplicação das cargas, é conveniente o uso de um quadro metálico semelhante ao mostrado nas figuras 7.92 e 7.93, para evitar esforços provenientes do peso próprio das mesmas, que podem alterar os valores de resistência à tração do concreto.

O sistema de carregamento preconizado pela ASTM é descendente podendo ser feito de duas maneiras distintas, ou seja, carga centrada no meio do vão ou duas cargas situadas nos terços do vão de carregamento conforme mostram as figuras 7.94 e b. Os laboratórios da Itaipu e Ilha Solteira [7.61] e [7.62] adotam um esquema de carregamento alternativo que tem sido usado, conforme esquematizado na figura 7.94, para minimizar os efeitos do peso próprio da viga. Esta minimização é mais significativa nas vigas de grandes dimensões e concretos ensaiados às primeiras idades e/ou de baixa resistência.

A figura 7.95 mostra uma viga em ensaio com carregamento ascendente aplicado nos terços médios.

Assim como na resistência à compressão, a velocidade de carregamento influi no valor final da resistência à tração determinada por flexão de vigas.

Em geral, aplica-se um carregamento rápido até 50% da carga de ruptura estimada (0,2 MPa/min) e o restante a uma velocidade de aproximadamente 1,0 MPa/min.

O cálculo das tensões de tração (módulo de ruptura) é feito quando a ruptura se dá na seção de momento constante, pela fórmula (VII-XII):

$$F_{tf} = \frac{P\,L}{b\,d^2} \qquad \text{VII-XII}$$

onde:

F_{tf} = módulo de ruptura na flexão
P = carga máxima de ensaio
L = vão da viga
b = largura da seção transversal
d = altura da seção transversal

Quando a ruptura ocorre fora da seção de momento constante, porém a menos de 5% do valor do vão da viga, o módulo de ruptura é calculado pela fórmula (VII-XIII)

$$F_{tf} = \frac{3\,Pa}{b\,d^2} \qquad \text{VII-XIII}$$

onde:

a = distância entre a linha de ruptura e o apoio externo mais próximo medida na fibra mais tracionada

Para valores de "a" maiores que 5% o ensaio deve ser desprezado.

O módulo de ruptura de vigas ensaiadas [7.59] com carga no centro de vão é pela fórmula (VII-XIV):

$$F_{tf} = \frac{3\,PL}{2b\,d^2} \qquad \text{VII-XIV}$$

O peso próprio da viga quando representa mais que 5% da carga máxima aplicada deve ser considerado.

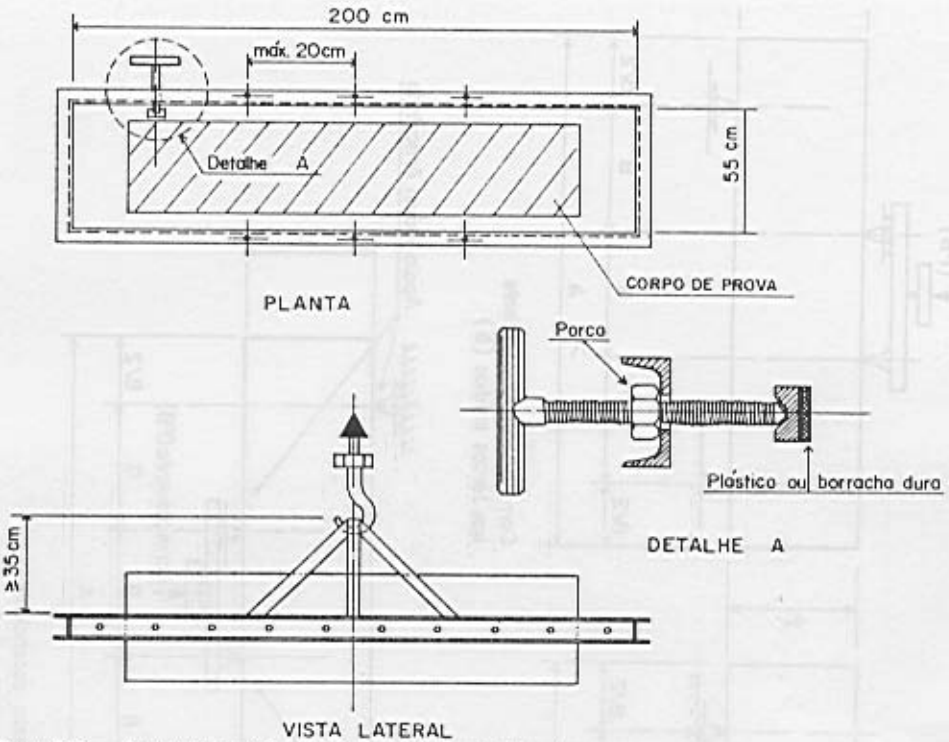


Figura 7.92 — Esquema de quadro metálico para manuseio de vigas

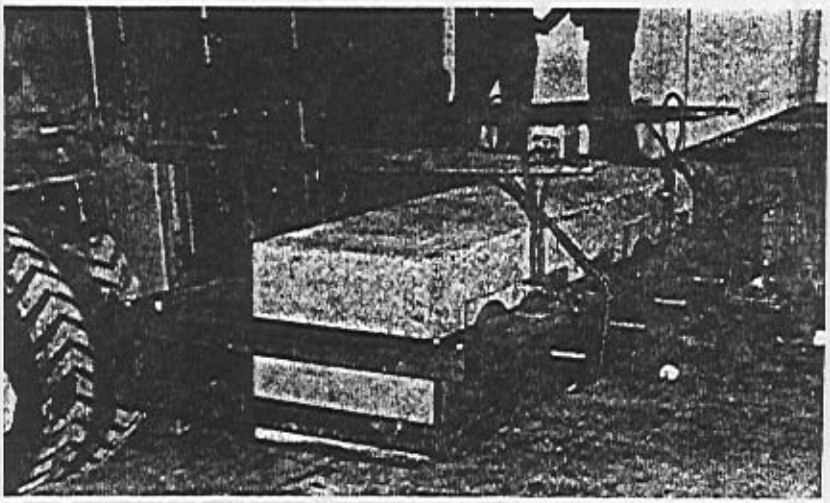


Figura 7.93 — Transporte de vigas de grandes dimensões, utilizando o quadro para manuseio

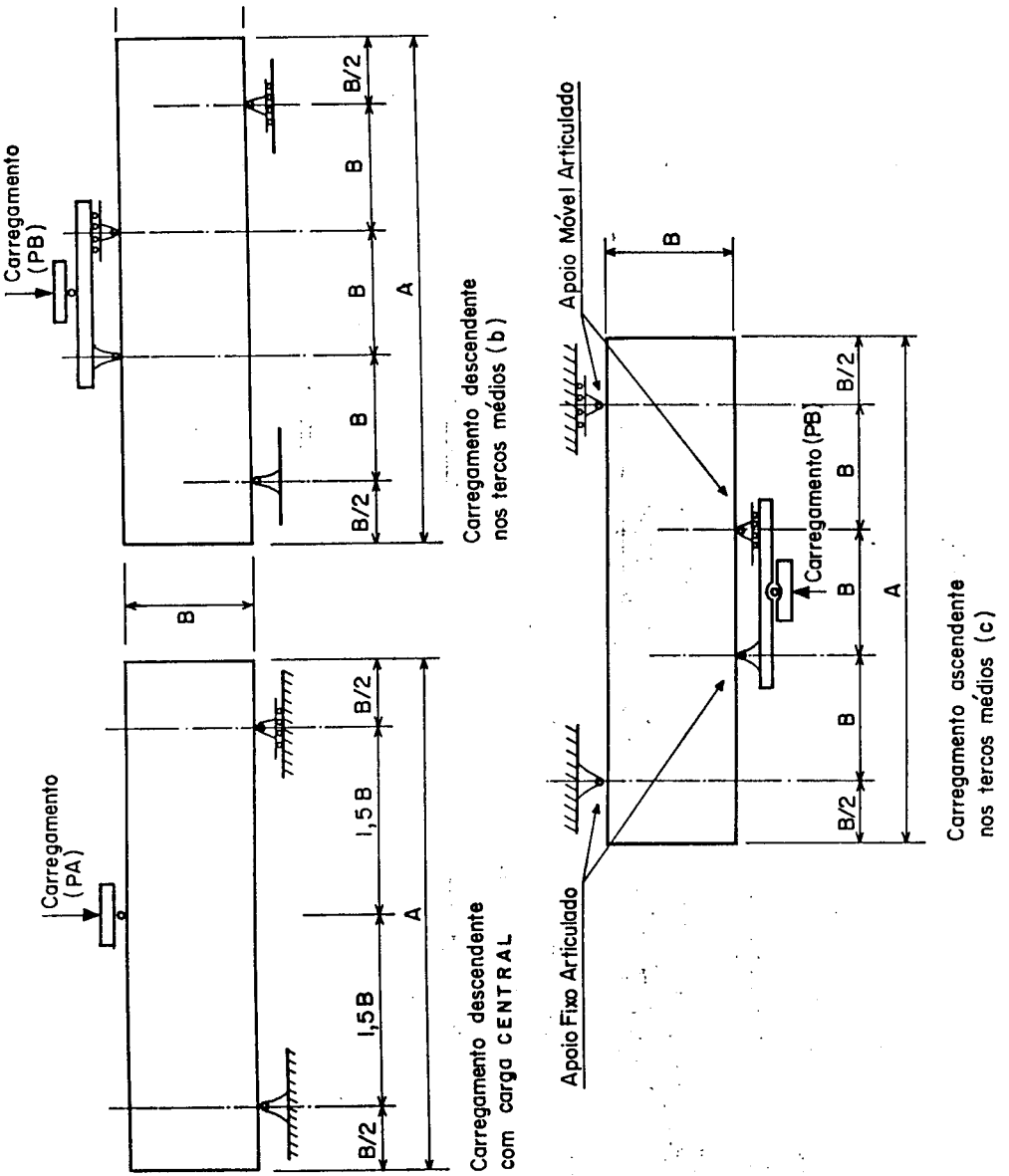


Figura 7.94 — Esquemas de carregamento no ensaio de tração por flexão de vigas



Figura 7.95 — Ensaio com carregamento ascendente aplicado nos terços médios.

7.4.2.2 Tração por compressão diametral

A resistência à tração pode ser também determinada de maneira indireta pelo método de ensaio desenvolvido por Lobo Carneiro [7.63] através da aplicação de compressão diametral de corpos de prova cilíndricos iguais aos usados na determinação da resistência à compressão axial simples.

A moldagem e a cura dos corpos de prova é feita obedecendo as prescrições da ABNT [7.64].

Imediatamente antes do ensaio os corpos de prova são removidos da câmara úmida e são colocadas duas talíscas de madeira paralelas ao eixo longitudinal do cilindro e diametralmente opostas. O cilindro é colocado na prensa apoiado sobre uma das talíscas e a carga aplicada a uma velocidade entre 0,7 e 1,4 MPa/min, conforme mostra a figura 7.96.

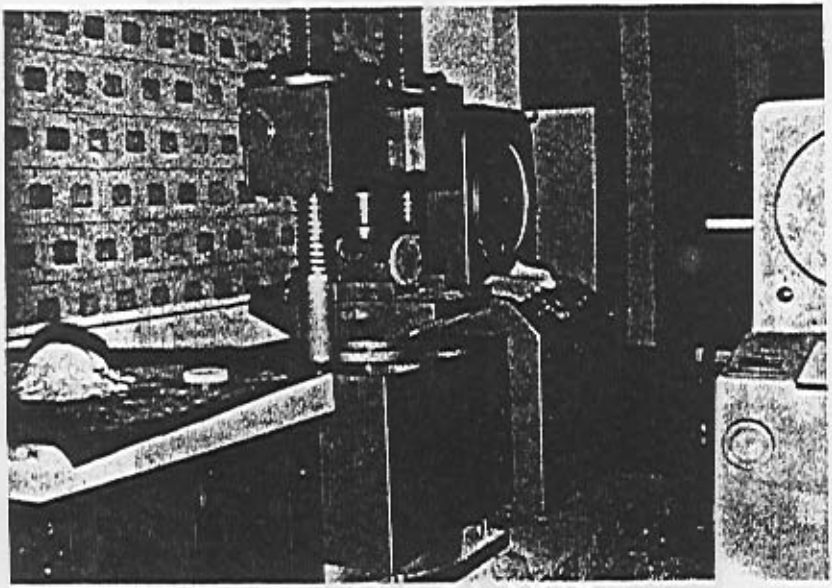


Figura 7.96 — Tração por compressão diametral de um cilindro ∅ 15 x 30 cm

A resistência à tração por compressão diametral no concreto é obtida pela fórmula (VII-XV).

$$F_{tc} = \frac{2\,P}{\pi . L . d} \qquad \text{(VII-XV)}$$

onde:

F_{tc} = resistência à tração por compressão diametral
P = carga máxima aplicada
L = altura do cilindro
d = diâmetro do cilindro

7.4.2.3 Tração pura

A determinação da resistência do concreto à tração por ensaios diretos, conhecida como tração pura, esbarra sempre na dificuldade de se obter cargas devidamente centradas, de tal forma que as excentricidades eventuais existentes não falseiem o resultado final. Estas dificuldades são consequências diretas da baixa resistência à tração do concreto e das dimensões mínimas necessárias do corpo de prova em função do tamanho dos agregados.

Algumas tentativas têm sido feitas com variações no que se refere à forma dos corpos de prova e ao sistema de fixação do mesmo no equipamento de ensaios, como ilustra a figura 7.97.

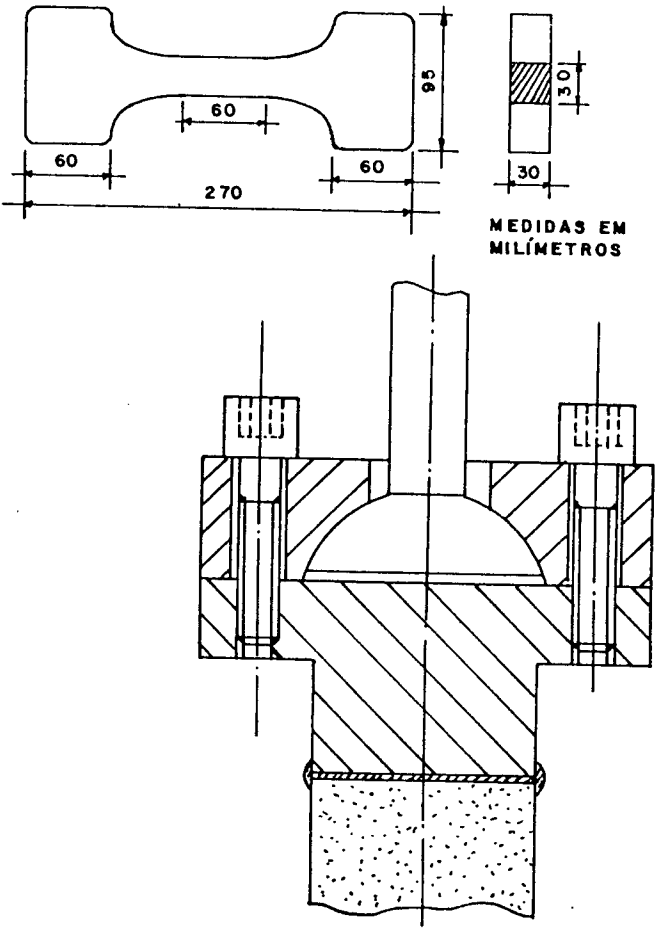


Figura 7.97 — Ilustração de um tipo de corpo de prova e de dispositivo de aplicação de carga e carregamento em ensaio de tração pura

7.4.3 Resultados de resistência à tração por vários métodos

As correlações de resultados de resistência à tração do concreto obtidas por vários métodos e procedimentos de ensaios e dos fatores que a influenciam, bem como suas comparações com os valores de resistência à compressão axial simples, têm sido objeto de pesquisas ao longo do tempo, no sentido de se obter a resistência à tração do concreto através de procedimentos mais simples que o ensaio por flexão de vigas.

7.4.3.1 Tração por compressão diametral em corpos de provas de diferentes dimensões

O ensaio para determinação da resistência indireta à tração por compressão diametral especifica corpos de provas cilíndricos até Ø 15 x 30 cm.

Este fato impede o ensaio para concretos com agregados de diâmetros máximos acima de 50 mm ou, traz a necessidade de executá-lo, para esses concretos, em concreto peneirado na malha 38 mm. Outra limitação que se impõe corresponde a testemunhos extraídos nos quais as dimensões (altura do cilindro igual a duas vezes o diâmetro da base) levam quase sempre a um aproveitamento não total do testemunho extraído. Em Itaipu, foram executados dois estudos visando tanto a correlação de resultados de tração indireta de concretos moldados em cilindros Ø 25 x 50 cm (concretos com agregados Ø máx 76 mm) e Ø 45 x 90 cm (concretos com agregados Ø máx 152 mm) com as respectivas misturas peneiradas na malha 38 mm e moldadas em cilindros Ø 15 x 30 cm, quanto na pesquisa da relação mínima altura pelo diâmetro do cilindro que não alterasse o valor obtido pelos ensaios padronizados [7.47] e [7.65]. A figura 7.98 ilustra o ensaio de tração por compressão diametral em um cilindro Ø 45 x 90 cm.

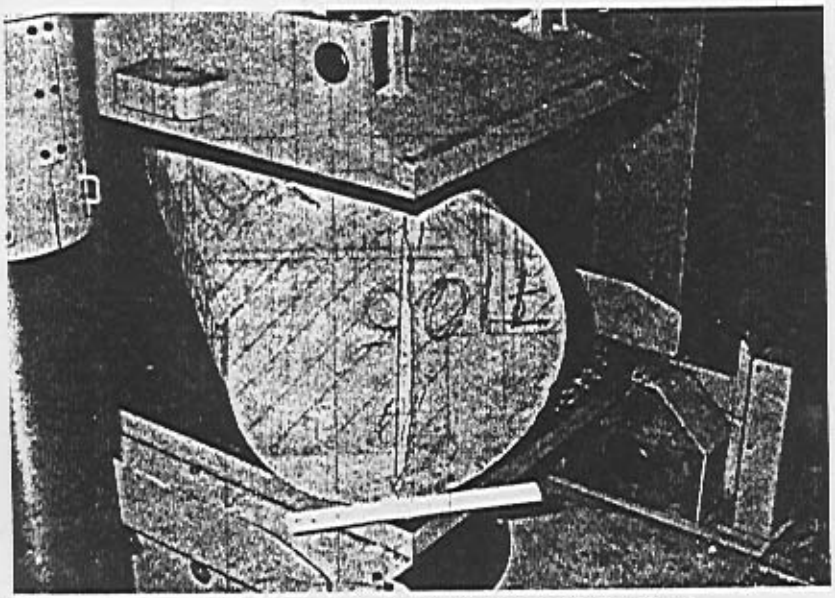


Figura 7.98 — Tração por compressão diametral em um corpo de prova (Ø 45 x 90 cm) não normalizado para esse ensaio

Do estudo feito para avaliar o efeito do "peneiramento" do concreto integral no que se refere à resistência à tração por ruptura diametral, segue:

$$q'76\,mm = \frac{\text{Resistência à Ruptura Diametral } \phi \text{ 15 x 30 cm (peneirado)}}{\text{Resistência à Ruptura Diametral Ø 25 x 50 cm (integral)}}$$

$$q'152\ mm = \frac{\text{Resistência à Ruptura Diametral } \phi \text{ 15 x 30 cm (peneirado)}}{\text{Resistência à Ruptura Diametral Ø 45 x 90 cm (integral)}}$$

foram obtidos nesses estudos [7.47], [7.65] os seguintes valores:

$q'\,76\,mm = 1{,}29$ e $q'\,152\,mm = 1{,}37$

O estudo da influência da variação da relação diâmetro-altura (H/D) do cilindro no valor de resistência à tração por compressão diametral mostrou que valores $4/3 \leqslant H/D \leqslant 2$ não alteram o resultado do ensaio. [7.65]

7.4.3.2 Correlações entre resultados de tração por flexão e por compressão diametral

Dos estudos de concreto feitos pela Cesp para a obra de Água Vermelha [7.4] obteve-se as seguintes relações médias entre tensão de tração por flexão e compressão diametral, a várias idades de ensaios:

Tração por Flexão / Compressão Diametral	3 dias	7 dias	28 dias	50 dias
=	1.7	1.3	1.1	1.1

Observou-se [7.4] haver uma tendência a um valor constante às idades mais avançadas e portanto com o aumento da resistência.

Ressalva-se que a compressão diametral foi feita em concretos peneirados quando o diâmetro máximo do agregado era maior que 38 mm, enquanto que a flexão das vigas sempre foi feita em concreto integral

Os estudos executados em Itaipu, bem como sua comparação com estudos de outras obras [7.47] mostrados na figura 7.99, são bastante similares àqueles obtidos para Água Vermelha [7.4] mostrando que a relação tração por flexão e por compressão diametral está em média entre 1,1 (para idades mais avançadas) e 1,8 para as primeiras idades de ensaio.

CONCRETO REFERENTE A OBRA DE :	Ø MAX. (mm)	IDADE (DIAS)			
		3	7	28	90
SOBRADINHO	76	–	1,6	1,0	1,1
ITAPARICA	76	–	1,2	1,0	1,0
ITAIPU	19	–	1,6	1,7	1,0
	38	–	1,6	1,4	1,6
	76	–	1,2	1,2	1,2
	152	–	1,1	1,0	1,1
ÁGUA VERMELHA	19	1,7	1,4	1,0	1,2
	38	1,6	1,1	1,1	1,3
	76	1,6	1,3	1,0	1,1
	152	1,5	1,5	1,1	1,0
ITAIPU (Estudado em Itumbiara)	19	–	–	–	–
	38	–	–	–	–
	76	–	1,4	1,2	–
	152	–	1,3	1,1	–

Figura 7.99 — Correlação entre resistências obtidas por flexão e por compressão diametral [7.47]

Ensaios executados na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) [7.66] mostraram que as resistências obtidas pelos dois procedimentos (para concretos com Ø máx <38 mm) se correlacionam por meio de uma função linear de acordo com a fórmula (VII-XVI).

$$F_{tf} = 0{,}37 + 1{,}19\ F_{tc} \qquad \text{(VII-XVI)}$$

onde:

F_{tf} = resistência à tração por flexão (módulo de ruptura)
F_{tc} = resistência à tração por compressão diametral

7.4.3.3 Correlações entre resultados de tração e compressão axial simples

7.4.3.3.1 Tração por flexão e compressão axial simples

A correlação entre as resistências à compressão axial simples e tração na flexão tem sido perseguida pelos pesquisadores para que seja possível a previsão da resistência à flexão do concreto, com razoável nível de confiança, a partir da resistência à compressão por sua maior facilidade e rapidez de execução.

Estudos de laboratório e pesquisas bibliográficas executados na Associação Brasileira de Cimento Portland mostraram os resultados da figura 7.100 [7.66].

Os autores fazem os seguintes comentários com relação aos valores da figura 7.100:

"A correlação obtida pela ABCP, juntamente com as propostas por Lobo Carneiro, PCA(*) e ACI(**) obtida com 63 pares de valores de resistência foi a da fórmula VII . XVII."

$$F_{tf} = 0{,}56\ F_{tc} \qquad \text{com } (r = 0{,}9) \qquad \text{(VII-XVII)}$$

"É interessante observar que as correlações obtidas pela ABCP e por Lobo Carneiro, conduzem a resultados bastante coincidentes, provavelmente devido à semelhança entre os agregados utilizados".

"Apesar da ampla variação dos parâmetros de dosagem do concreto, não foi possível, com o nível de resistência mecânica obtida, identificar nenhum parâmetro como consumo de cimento, tamanho máximo do agregado ou módulo de finura da areia que afetasse mais marcadamente o valor da resistência à tração na flexão sendo esta apenas dependente da resistência à compressão".

(*) Portland Cement Association
(**) American Concrete Institute

Estes estudos que limitaram-se a concretos com diâmetros máximos de 38 mm não são no entanto confirmados por ensaios realizados com concretos de diâmetros máximos de agregados variando de 19 a 152 mm, mostrados na figura 7.101 [7.67] que indicam a influência tanto do diâmetro máximo do agregado quando do consumo de aglomerante na evolução da resistência à tração por flexão.

Essas mesmas observações podem ser feitas com relação à evolução da resistência à tração por compressão diametral mostrada na figura 7.102 [7.67].

7.4.3.3.2 Tração por compressão diametral e resistência à compressão

As figuras 7.103 e 7.104 mostram que esta relação está na faixa de 8 a 15%.

7.4.4 Fatores que influenciam

Das correlações entre as resistências à tração e à compressão axial simples é conclusivo que todos os fatores que influem na resistência à compressão do concreto, in-

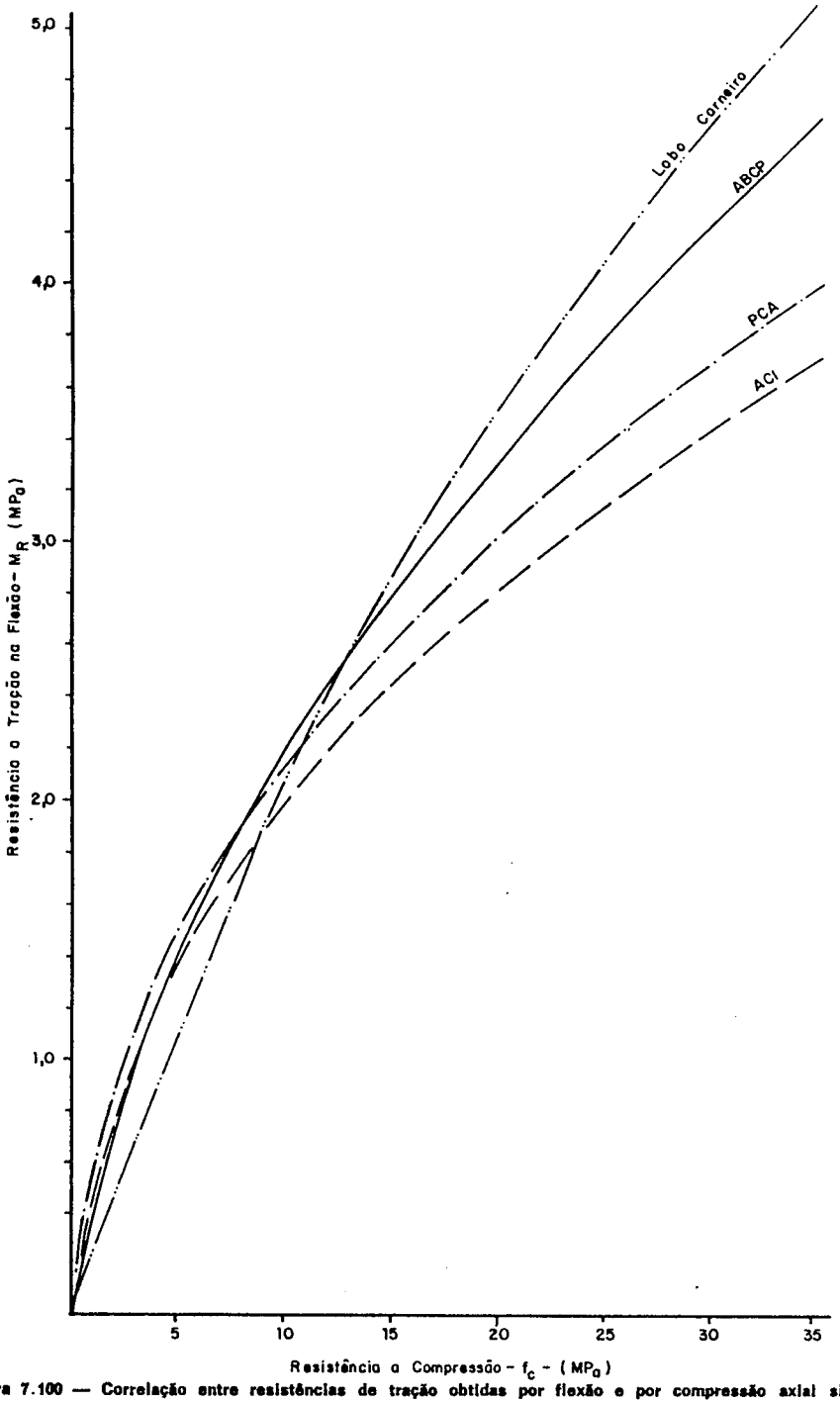


Figura 7.100 — Correlação entre resistências de tração obtidas por flexão e por compressão axial simples

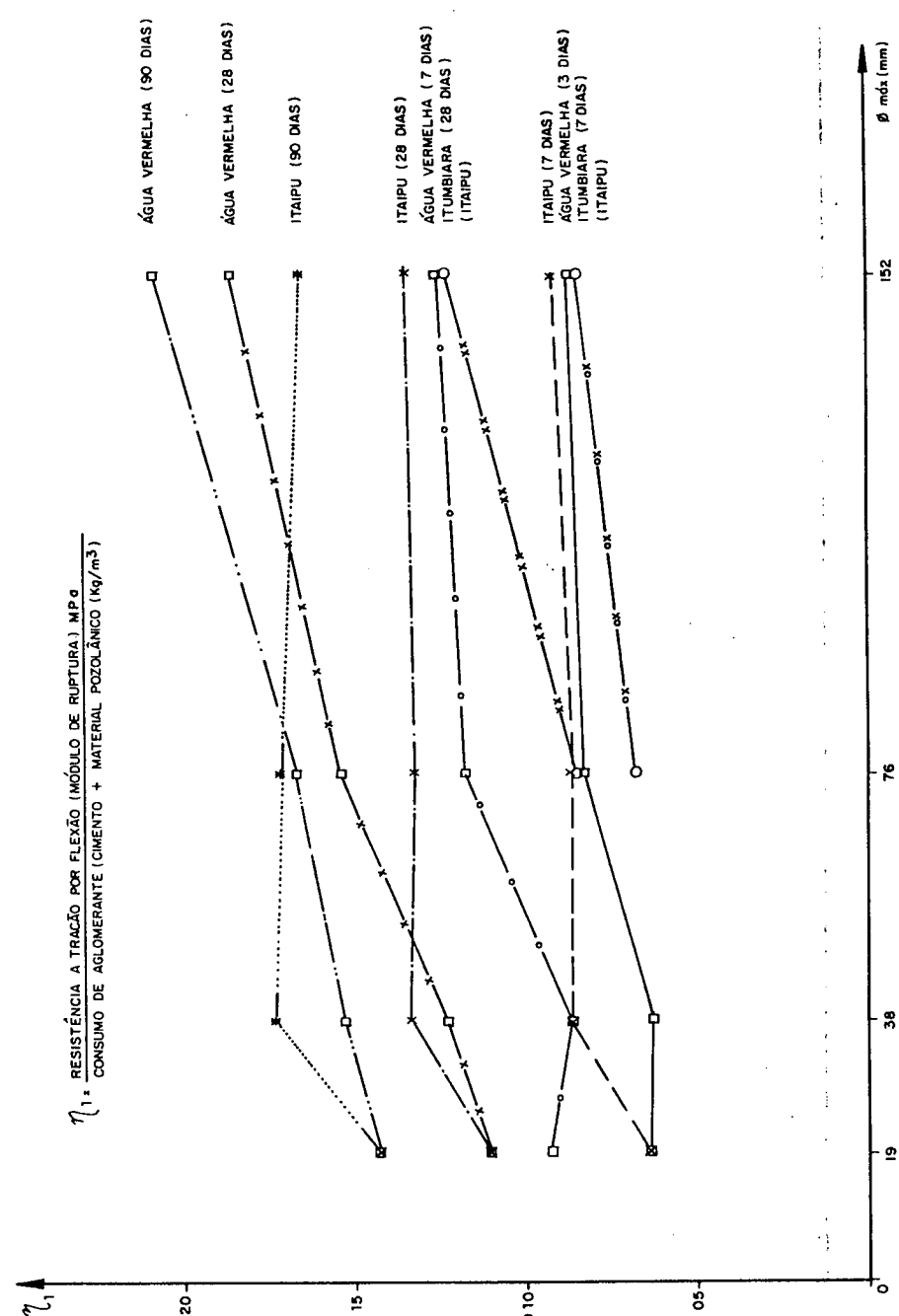


Figura 7.101 — Influência do tamanho máximo na eficiência da resistência obtida na tração por flexão

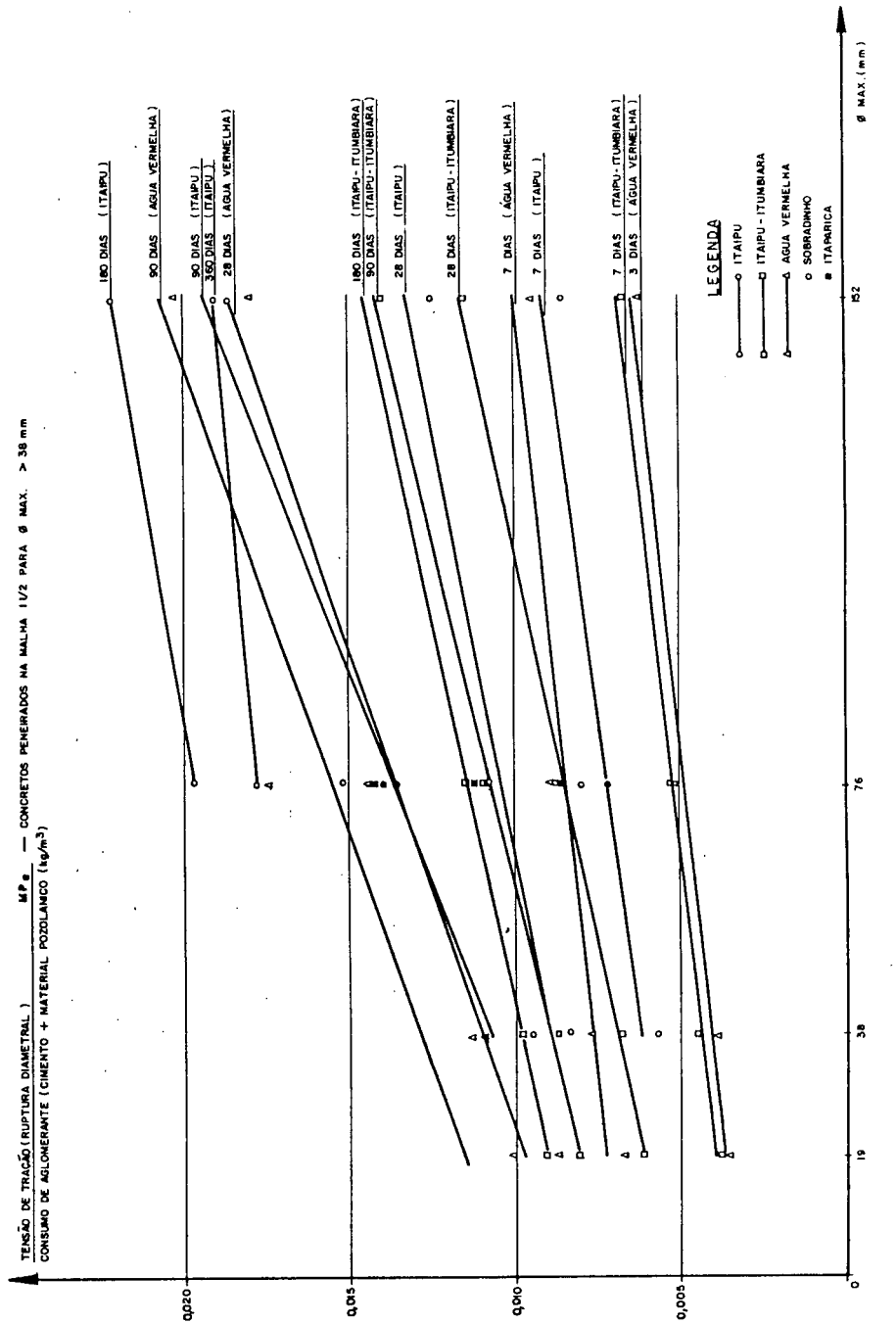


Figura 7.102 — Influência do diâmetro máximo na eficiência da resistência obtida por compressão diametral

OBRA	Ø MÁX. (mm)	IDADES (DIAS) %					
		3	7	28	90	180	360
ITAIPU	38	—	16,6	13,7	15,6	—	—
	76	—	15,7	13,2	12,5	12,2	14,5
	152	—	14,7	11,5	12,2	12,4	10,9
SOBRADINHO	76	—	9,2	10,1	7,9	—	—
ITAPARICA	76	—	14,3	10,4	11,8	—	—
ÁGUA VERMELHA	19	—	10,1	7,8	8,0	—	—
	38	—	10,8	9,4	8,1	—	—
	76	—	13,0	10,9	11,1	—	—
	152	—	12,7	12,4	11,6	—	—
ITAIPU (ESTUDADO EM ITUMBIARA)	19	—	10,1	9,1	8,5	8,5	—
	38	—	9,8	9,2	8,5	8,7	—
	76	—	12,0	10,2	9,4	9,8	—
	152	—	11,0	9,9	8,5	—	—

Figura 7.103 — Correlação entre resistências obtidas por tração na flexão e por compressão axial em várias obras brasileiras

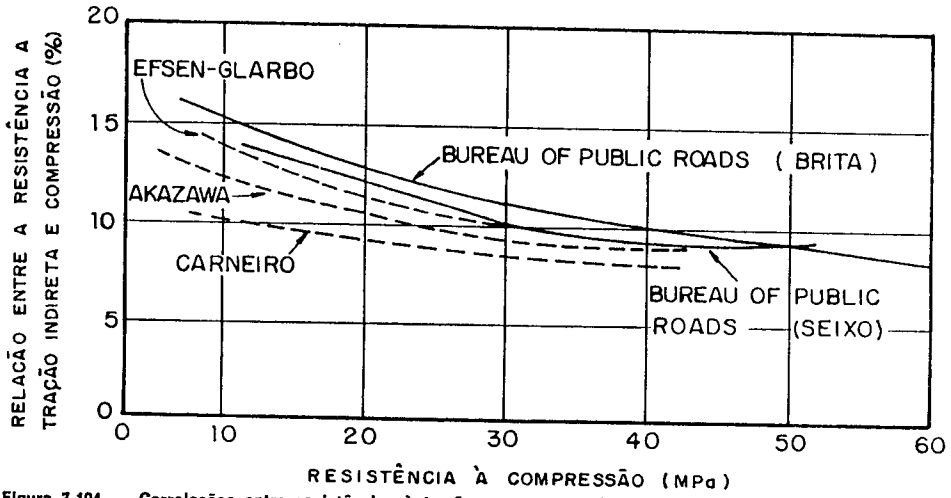


Figura 7.104 — Correlações entre resistências à tração por compressão diametral e resistência à compressão axial simples, obtidas por vários pesquisadores

fluem também na resistência à tração. Há no entanto um agravante com relação à resistência à tração e que se refere à textura do agregado. Concretos de mesmo consumo e quantidade de pasta, agregados com textura lisa, em geral seixos rolados, podem proporcionar concretos menos resistentes à tração que quando se usa agregados com textura mais rugosa devido à sua aderência com a pasta, como mostram as figuras 7.105 e 7.106 [7.68].

7.5 Capacidade de alongamento

7.5.1 Conceito

A capacidade de alongamento do concreto é conceituada como sendo a máxima deformação que o mesmo apresenta quando submetido a um esforço de tração aplicado por incrementos de cargas crescentes até a ruptura, a uma velocidade estipulada.

Em termos práticos pode-se dizer que a capacidade de alongamento do concreto é o somatório das deformações elásticas e de fluência do concreto submetido à tração, com cargas crescentes até a ruptura.

7.5.2 Método de ensaio

A capacidade de deformação do concreto tem sido determinada por ensaios [7.60] [7.61] [7.62] similares àqueles de determinação da resistência à tração por flexão de vigas. Os procedimentos de moldagem, cura e sistema de aplicação de carga são os mesmos, alterando apenas a velocidade com que a carga é aplicada, a proteção do corpo de prova contra perda de umidade durante o ensaio e o uso de medidores de deformação.

As medidas das deformações são feitas em geral por medidores elétricos tipo wire strain gages colocados na superfície tracionada, como mostrado na figura 7.107,

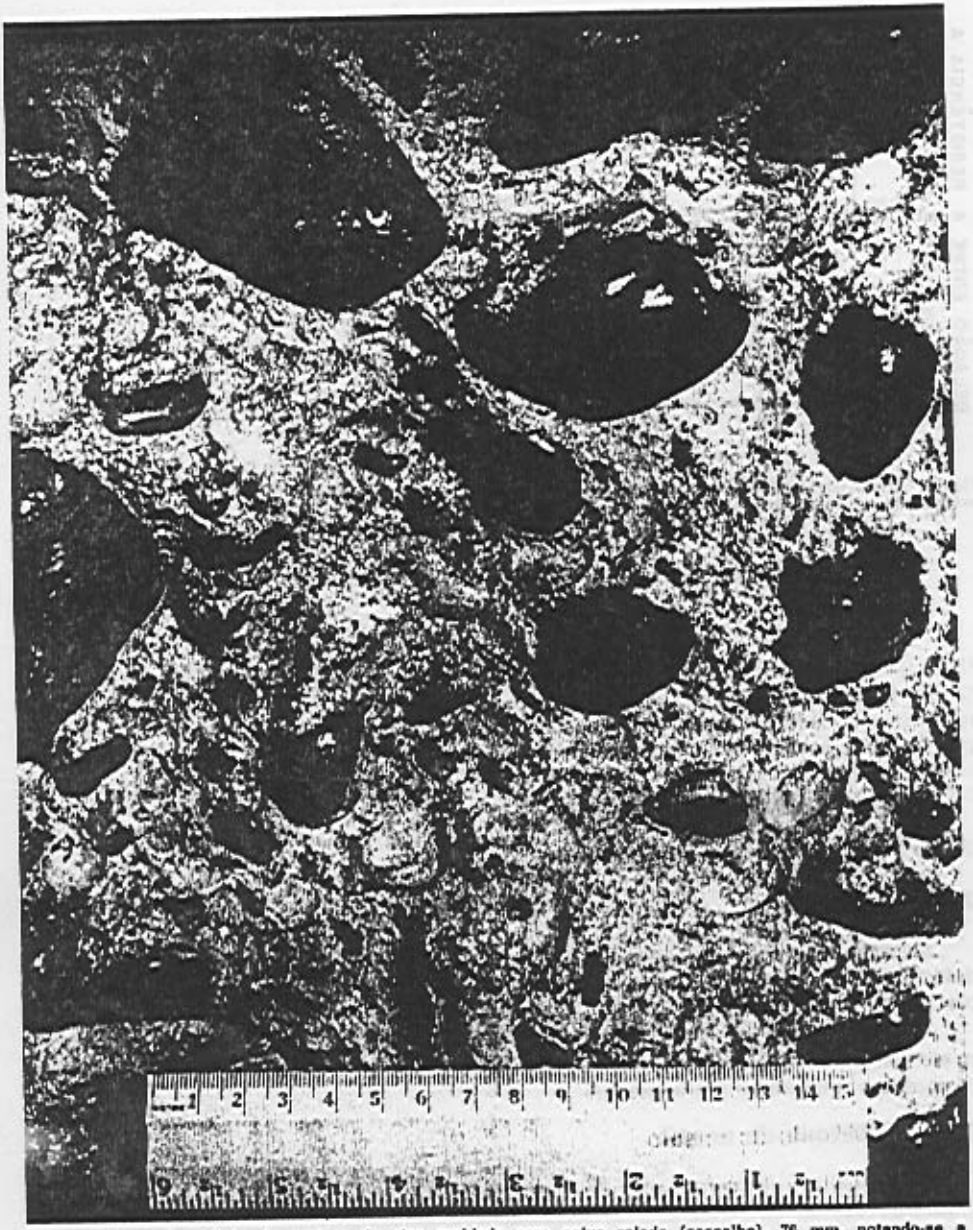


Figura 7.105 — Superfície de ruptura de viga moldada com seixo rolado (cascalho), 76 mm, notando-se a deficiência de aderência do agregado com a pasta de cimento

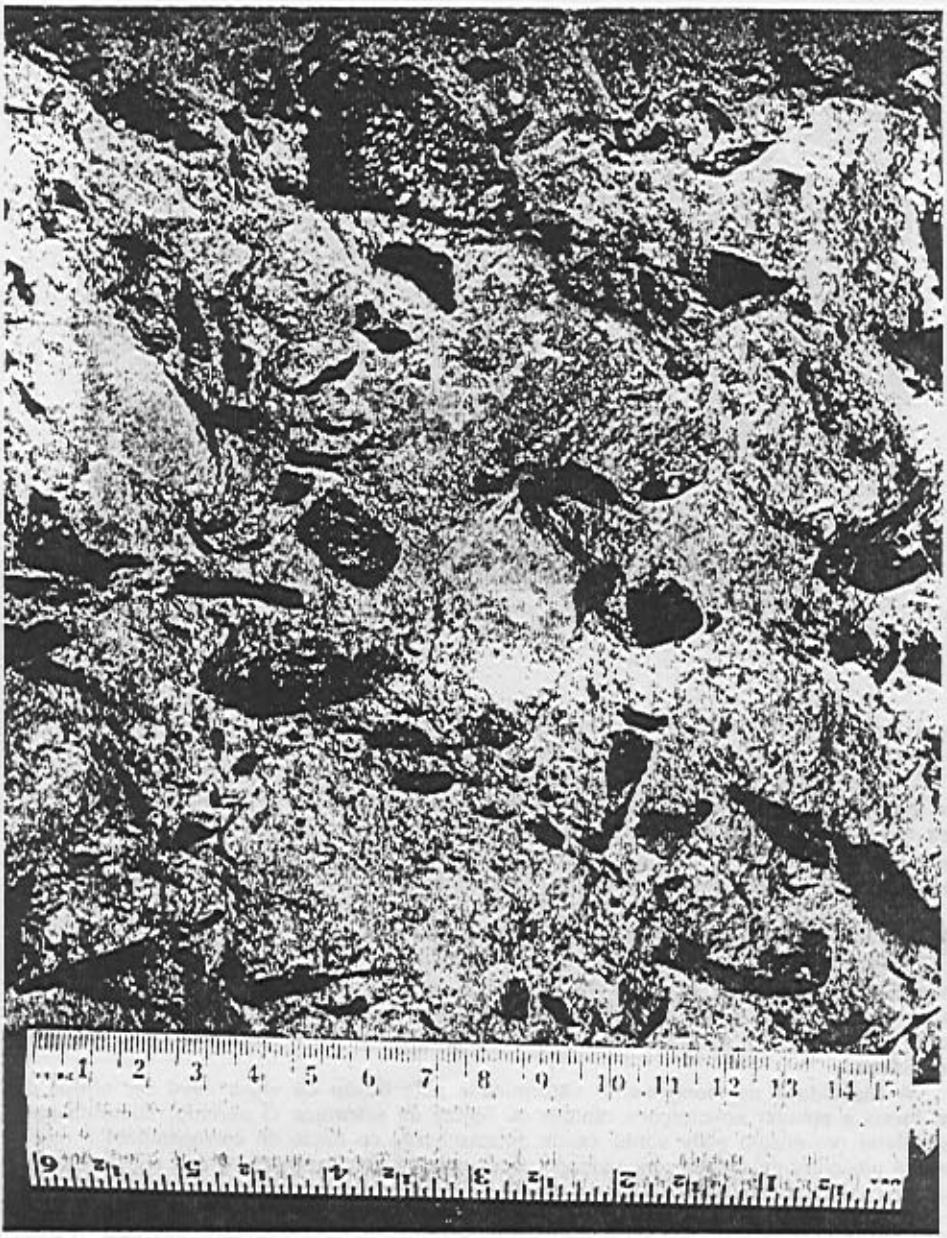


Figura 7.106 — Superfície de ruptura de viga moldada com brita de basalto, 38 mm, notando-se uma boa aderência do agregado com a pasta de cimento.

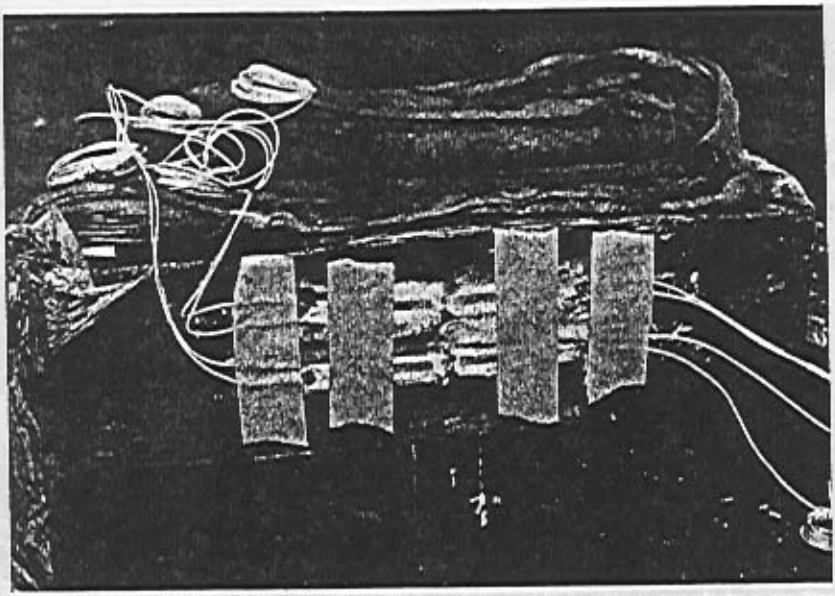


Figura 7.107 — Detalhe de colagem de aparelhos elétricos (wire strain gages) na superfície a ser tracionada, no ensaio de determinação da capacidade de deformação do concreto

ou por medidores elétricos tipo Carlson Strain Meter embutidos no concreto próximos à face a ser tracionada como mostram as figuras 7.108 e 7.109.

Os aparelhos para determinação da deformação devem ter base de medida no mínimo igual a três vezes o tamanho máximo do agregado, para que se evitem resultados falsos provocados pelos agregados que são menos deformáveis que a argamassa. Aparelhos embutidos devem ter suas posições perfeitamente conhecidas para que as deformações por eles fornecidas possam ser extrapoladas para a fibra mais tracionada.

Outro cuidado adicional a ser tomado no ensaio de determinação da capacidade de alongamento do concreto refere-se à "cura" do corpo de prova.

Como se trata de um ensaio que dependendo da finalidade pode levar horas ou meses, há necessidade de proteção contra perda de umidade para evitar que a retratação por secagem falseie os resultados de deformação provocados pelo carregamento, como mostrado na figura 7.110, na qual o corpo de prova é protegido com um filme de plástico.

A capacidade de alongamento determinada pela flexão de vigas deve ser obtida de tal forma a simular solicitações rápidas ou lentas da estrutura. O período requerido para completar um ensaio pode variar desde poucas horas do início de carregamento à ruptura, até períodos de meses, dependendo da complexidade do projeto e das condições ambientais do local de implantação da obra.

A velocidade de carregamento deve ser dada em MPa na fibra mais tracionada, pelo intervalo de incrementos de carga (horas ou dias).

A figura 7.111 ilustra um sistema empregado com a utilização de "pesos mortos" para os incrementos de carga até a ruptura.

As velocidades de aplicação podem variar desde valores de 0,02 MPa/min. na fibra mais tracionada (considerado ensaio semilento no que se refere à determinação da capacidade de alongamento) a 0,02 MPa/dia (considerado ensaio lento) .

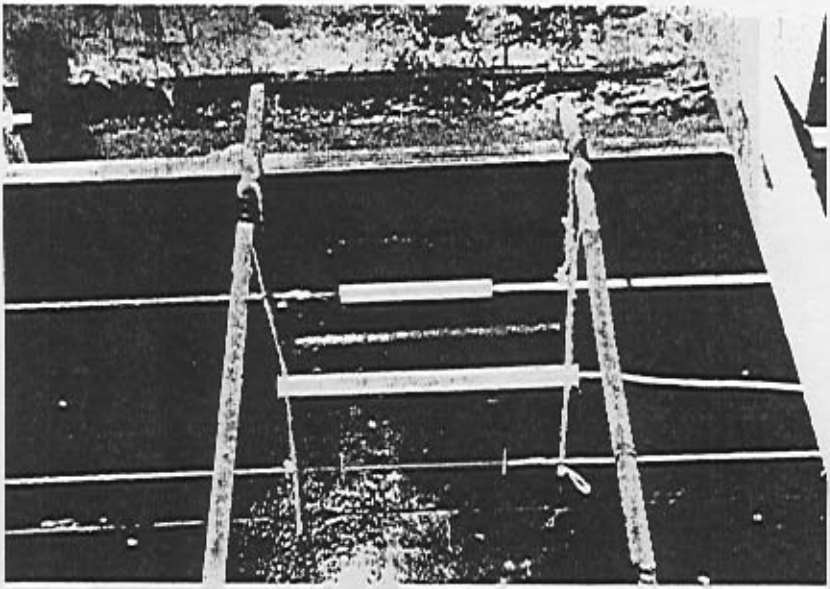


Figura 7.108 — Aparelhos elétricos tipos Carlson Strain Meters e Strain Gages, fixados à fôrma, que ficarão embutidos no concreto para determinação da capacidade de alongamento no ensaio de tração por flexão de viga

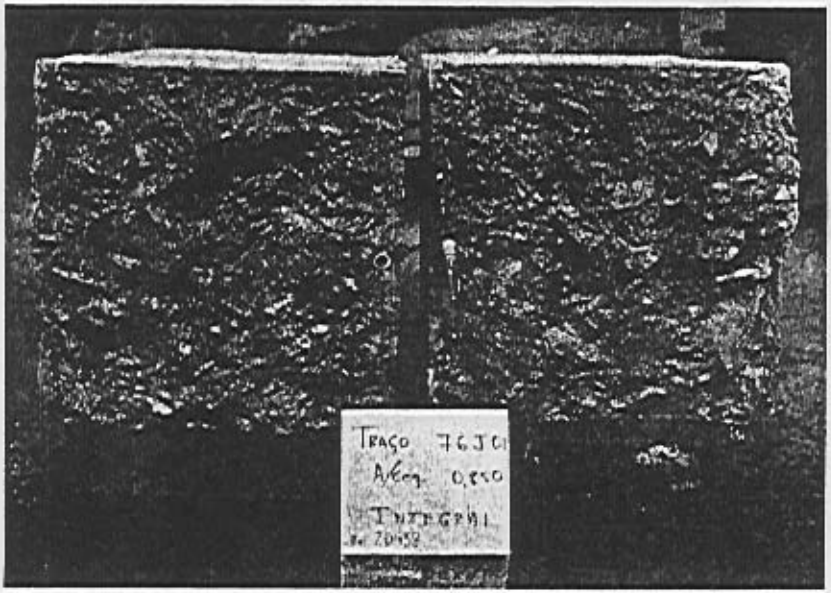


Figura 7.109 — Superfície de viga rompida na tração por flexão ilustrando a posição do Strain Meter em relação à face tracionada

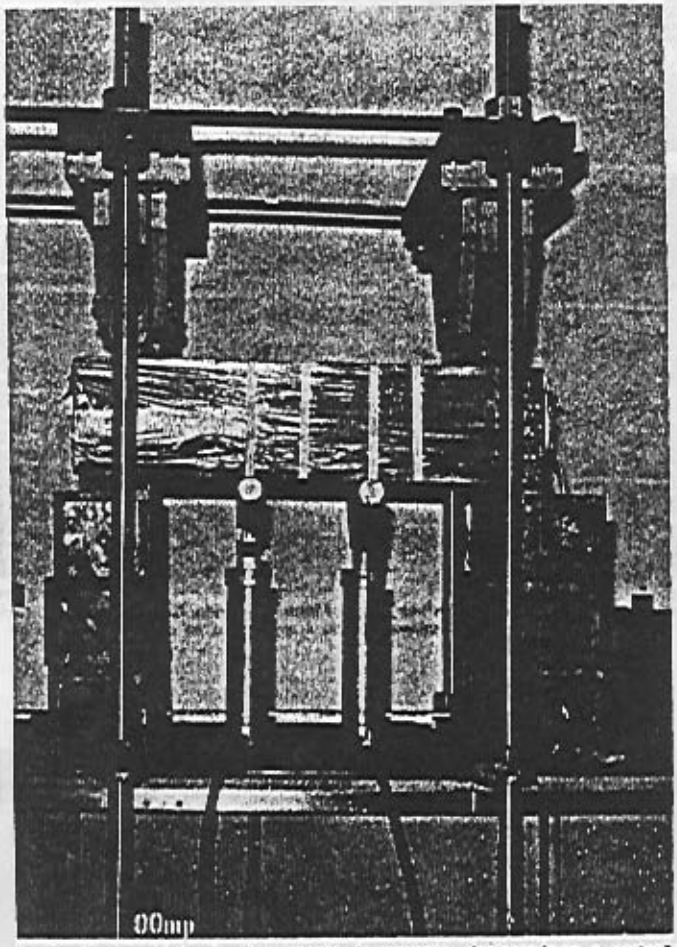


Figura 7.110 — Ensaio de capacidade de alongamento do concreto, destacando-se a proteção da viga contra perda de umidade

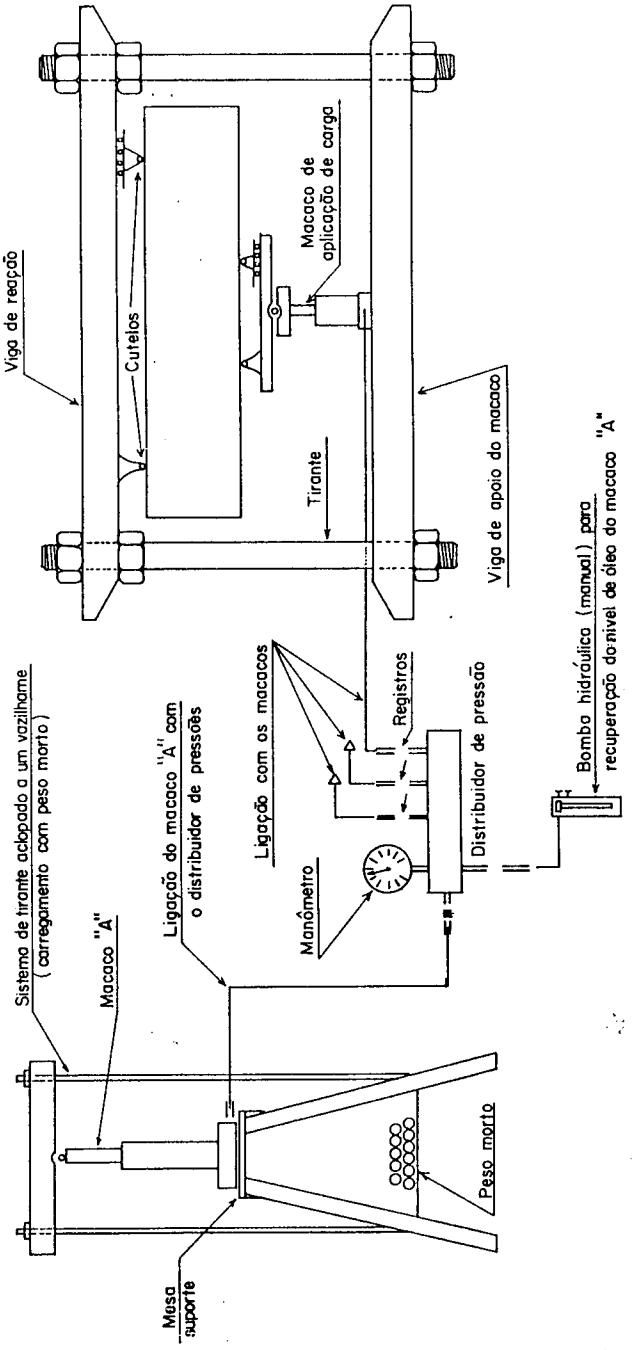


Figura 7.111 — Esquema de ensaio de viga com carregamento lento para determinação da capacidade de alongamento

7.5.3 Fatores que influenciam

Por se tratar de uma propr edade com características similares à fluência na compressão, a capacidade de alongamento do concreto é influenciada praticamente pelos mesmos fatores que influenciam aquela propriedade.

Assim, concretos com maior volume de pasta, confeccionados com o mesmo tipo de agregado apresentam maior capacidade de deformação. Por outro lado, enquanto que a fluência na compressão de concretos carregados às primeiras idades é maior na capacidade de deformação o fenômeno é inverso. Estes dois fatos podem ser observados na figura 7.112 resultantes de ensaios semi-rápidos [7.69] (velocidade de 0,04 MPa/min) de estudos com seixos rolados.

Os estudos feitos para a obra de Água Vermelha [7.4] em concretos similares, ensaiados nas mesmas condições, porém com agregados 1 e 2 sendo cascalho e 3 (76 mm) brita de basalto, mostram o aumento da capacidade de alongamento do concreto devido ao basalto em substituição ao cascalho.

Os estudos feitos para Ilha Solteira, na Universidade de Berkeley [7.68] mostram um aumento médio da ordem de 10% a 20% às idades de 7 e 28 dias para substituição de cascalho por brita de basalto, na capacidade de alongamento do concreto. Estes mesmos estudos mostram que concretos com diâmetro máximo de agregado 38 mm têm capacidade de deformação até 40% superior aos concretos com agregado 76 mm.

Esses fatos mostram que as variáveis dessa propriedade em função dos vários fatores que a influenciam limitam as possibilidades de estimativas, fazendo-se necessário, para cada caso, a execução de ensaios para seu conhecimento.

7.6 Permeabilidade e absorção do concreto

7.6.1 Conceito

A água penetra no concreto de forma semelhante ao fenômeno de fluxo através de qualquer corpo poroso, ou por capilaridade. O concreto, quando submetido a uma pressão hidrostática, sofre inicialmente um efeito composto de penetração da água por capilaridade, auxiliado pela pressão existente. Completada a saturação do concreto as forças capilares cessam e o fluxo d'água através do mesmo passa a ser estável a uma intensidade que depende fundamentalmente da pressão exercida e das características do próprio concreto.

Nessas condições o fluxo pode ser avaliado pela lei de Darcy de acordo com a fórmula (VII-XVIII) [7.70].

$$\frac{dq}{dt} \cdot \frac{1}{A} = K \frac{dh}{L} \qquad \text{(VII-XVIII)}$$

onde:

$\frac{dq}{dt}$ = vazão da água

A = seção transversal ao fluxo

dh = diferença da altura piezométrica através da amostra

L = espessura vencida pela água

K = coeficiente de permeabilidade

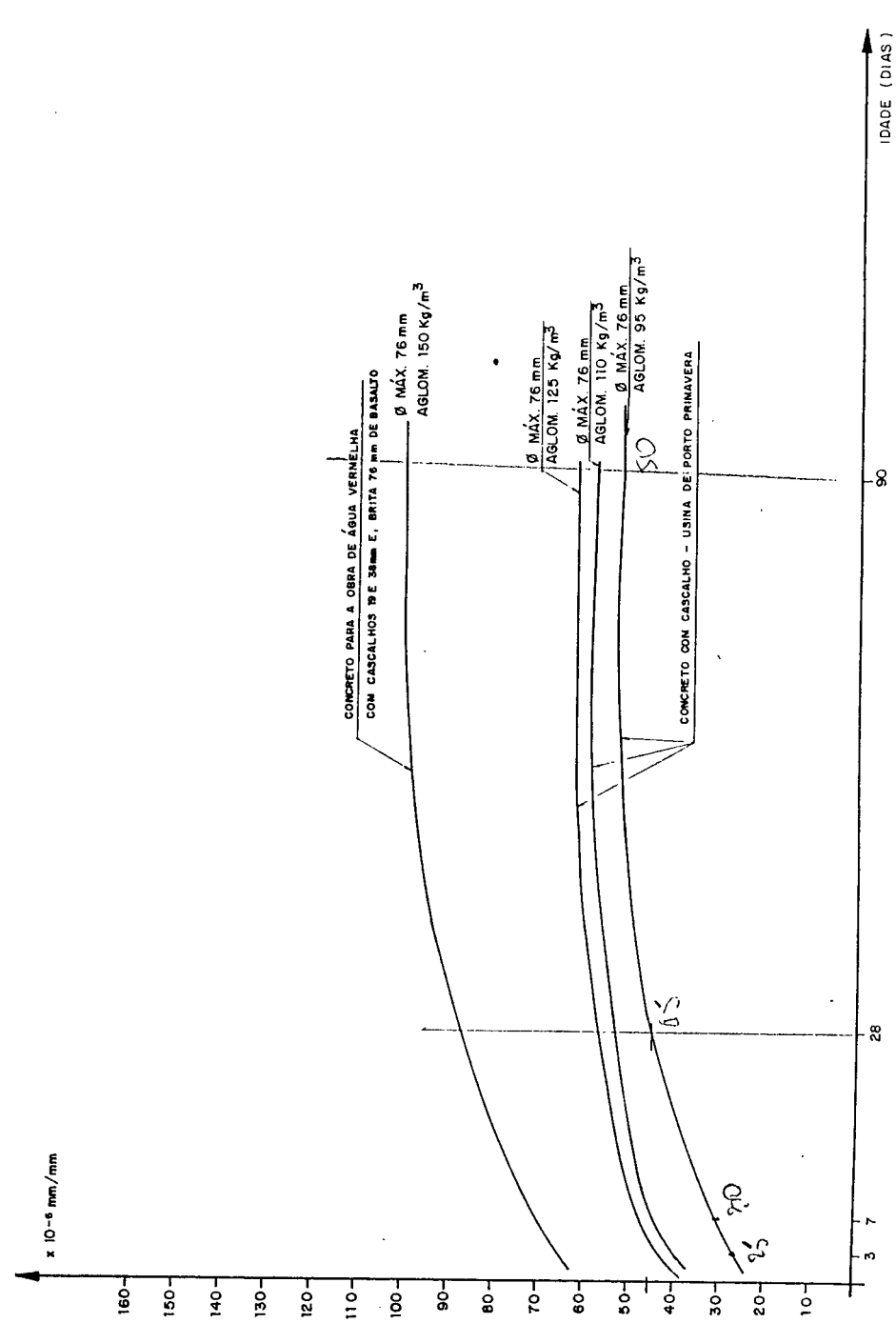


Figura 7.112 — Influência do consumo de aglomerante, tipo de agregado e velocidade de carregamento na capacidade de alongamento do concreto

Dessa forma, pode-se conceituar permeabilidade do concreto como sendo a propriedade que permite passar um certo fluxo de água através do mesmo, consequente de uma diferença de pressão hidrostática entre dois pontos.

Já a absorção pode ser conceituada como sendo a propriedade do concreto "drenar" água para seus poros e capilares, pelo simples contato com a água, independente de existir gradiente hidráulico entre dois pontos [7.2].

7.6.2 Métodos de ensaios

O método de ensaio mais difundido para determinação do coeficiente de permeabilidade de concretos foi desenvolvido pelo "Bureau of Reclamation — U.S.A." [7.71] com base na lei de Darcy.

O ensaio consiste basicamente em se forçar a penetração de água em um corpo de provas de dimensões conhecidas, através de uma pressão especificada e se medir nestas condições a velocidade de percolação da água pelo concreto.

A figura 7.113 mostra esquematicamente o sistema de ensaio desenvolvido pelo Bureau.

Na execução desse ensaio, os cuidados maiores a serem tomados referem-se à preparação e montagem do corpo de provas, controle da pressão aplicada e medida da vazão de água.

No que se refere à preparação do corpo de provas, principalmente os moldados, há necessidade de um jateamento ou escovamento das superfícies para eliminação da nata que nelas se deposita e que pode falsear o valor da permeabilidade. Por outro lado, o espaço entre a superfície lateral do corpo de provas e a campânula de ensaio deve ficar perfeitamente estanque para que a água percole apenas pelo concreto.

As figuras 7.114 e 7.115 mostram corpos de provas em preparação para ensaio. A figura 7.116 mostra um equipamento para ensaios de vários provas simultaneamente.

Após preparado, o corpo de provas é submetido a uma pressão de 2,55 MPa (variação máxima de 0,07 MPa) por um período aproximado de 500 horas.

As vazões de água são lidas periodicamente e o cálculo do coeficiente deve ser feito após a obtenção do fluxo constante (concreto totalmente saturado) de acordo com a (VII-XIX).

$$K = \frac{Q\,L}{A\,M} \qquad \text{(VII-XIX)}$$

onde:

K = coeficiente de permeabilidade

Q = vazão de água obtida na fase linear (fluxo constante)

L = altura do corpo de provas

M = altura da coluna d'água (pressão)

A = área da secção transversal ao fluxo

Um método alternativo que tem sido usado para controles expeditos foi desenvolvido pela "Swedish Standard Specification" [7.72] e trata-se de um processo de análise qualitativa do concreto sem no entanto determinar o valor da permeabilidade do concreto.

O método preconiza a aplicação de água sob pressão de 0,82 MPa por um período de 24 horas em um corpo de prova prismático 25,0 x 25,0 x 12,5 cm.

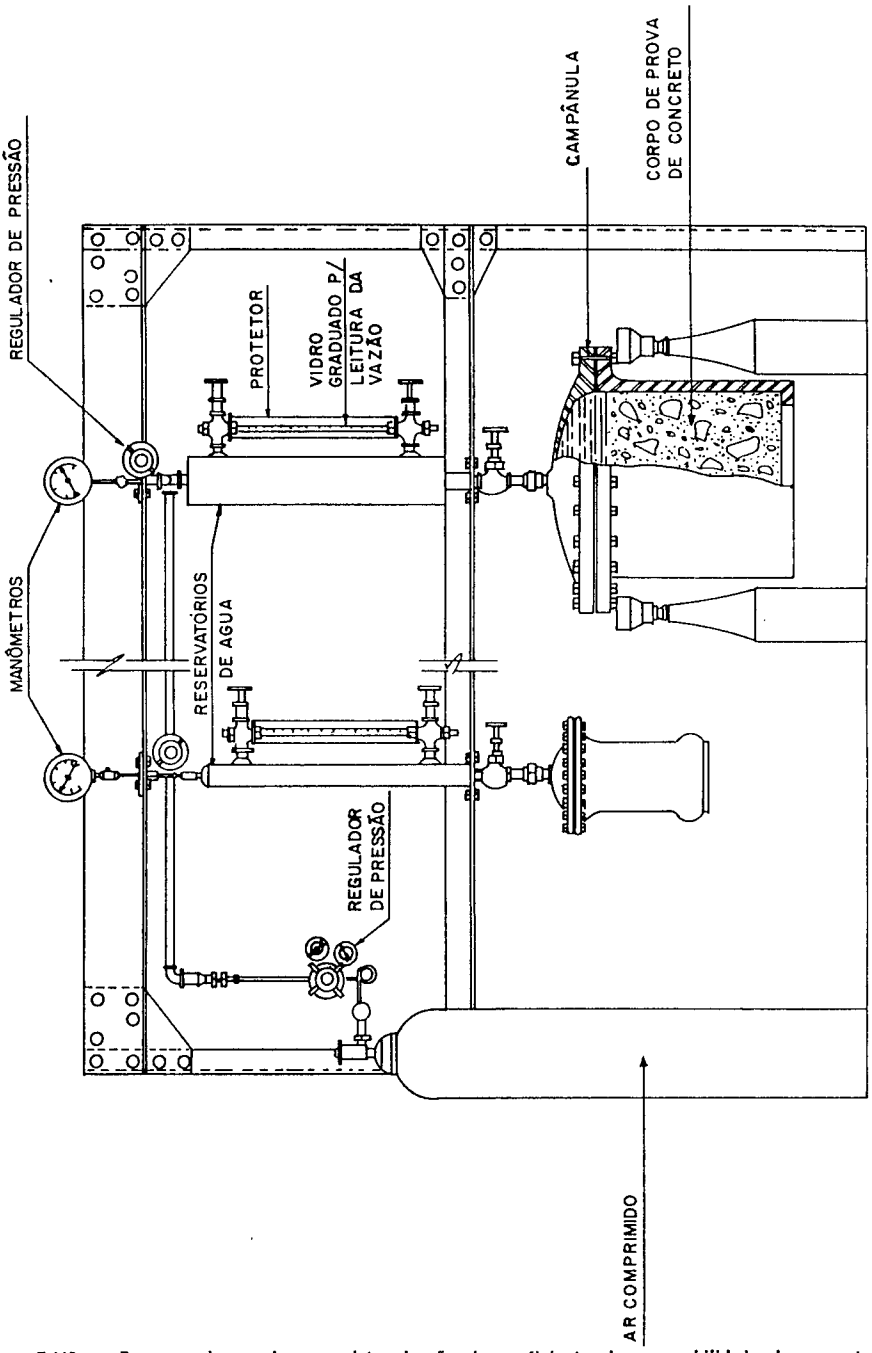


Figura 7.113 — Esquema de ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade do concreto pelo método "Bureau of Reclamation"

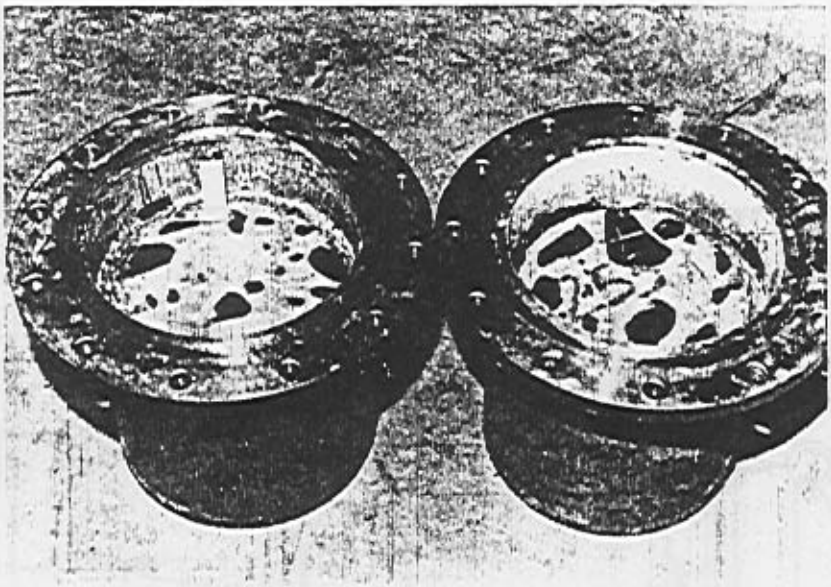


Figura 7.114 — Corpos de provas colocados na campânula de ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade. Nota-se a superfície tratada e a vedação entre o concreto e a campânula.

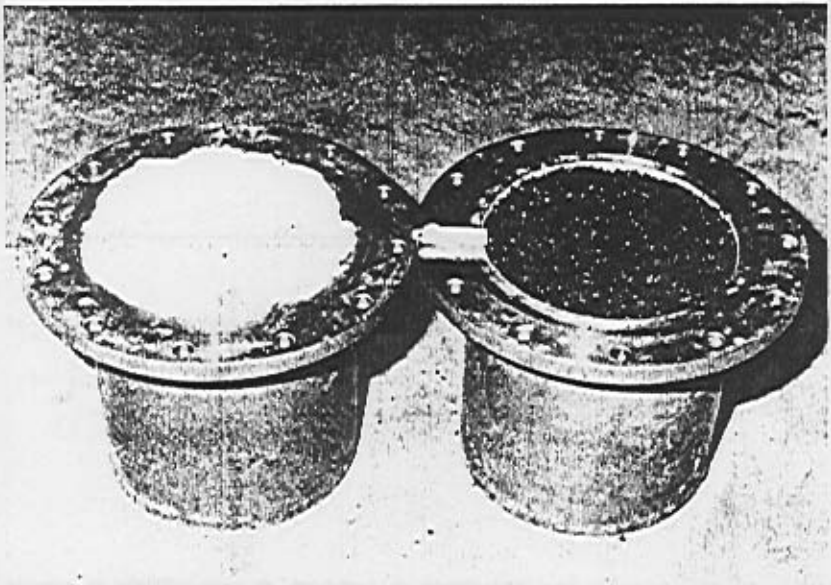


Figura 7.115 — Proteção das superfícies dos corpos de provas com pedrisco e algodão, para retenção de partículas eventualmente suspensas na água

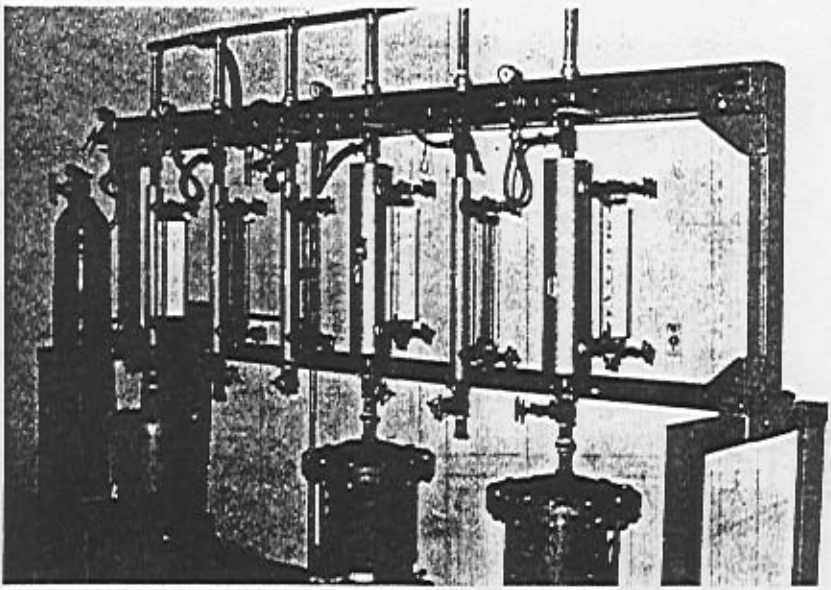


Figura 7.116 — Equipamento para ensaios de permeabilidade do concreto (método do Bureau of Reclamation)

Após esse período o corpo de provas é rompido e é medida a altura de penetração da água no concreto. Através de ensaios comparativos de valores obtidos por esse método, com o método quantitativo desenvolvido pelo "Bureau of Reclamation" pode-se obter um correlação de valores que permitem a estimativa da permeabilidade do concreto. Na figura 7.117 é mostrado o esquema de ensaio proposto pela "Swedish Standard", conhecido normalmente com método de ensaio para determinação da permeabilidade por penetração.

A figura 7.118 mostra uma curva de correlação obtida em ensaios executados por Sallstron [7.72] usando os métodos do Bureau e o de penetração.

As normas americanas ASTM-C-642/72 e CRD-C-23/76 [7.73] preconizam para determinação da absorção ensaios em corpos de prova de concreto, após secos em estufa a 110°C até constância de peso (evaporação de toda água livre). Posteriormente, são imersos em água a 21°C por um período de 48 horas (até constância de peso).

Pode-se avaliar as características de permeabilidade do concreto pela capilaridade, conforme mostrado na figura 7.119 [7.74].

O valor da absorção capilar é expresso pelo quociente do peso d'água absorvida (peso do espécime imediatamente antes do ensaio menos peso do espécime após 72 horas de contato com a água) pela área de contato (base do espécime).

7.6.3 Fatores que influenciam

A análise dos fatores que exercem influência na permeabilidade do concreto é feita considerando os concretos íntegros e bem adensados. O aumento de permeabilidade de um concreto em consequência de microfissuras ou fissuras e porosidade por deficiência de vibração é considerado como consequente de fatores alheios à propriedade do material.

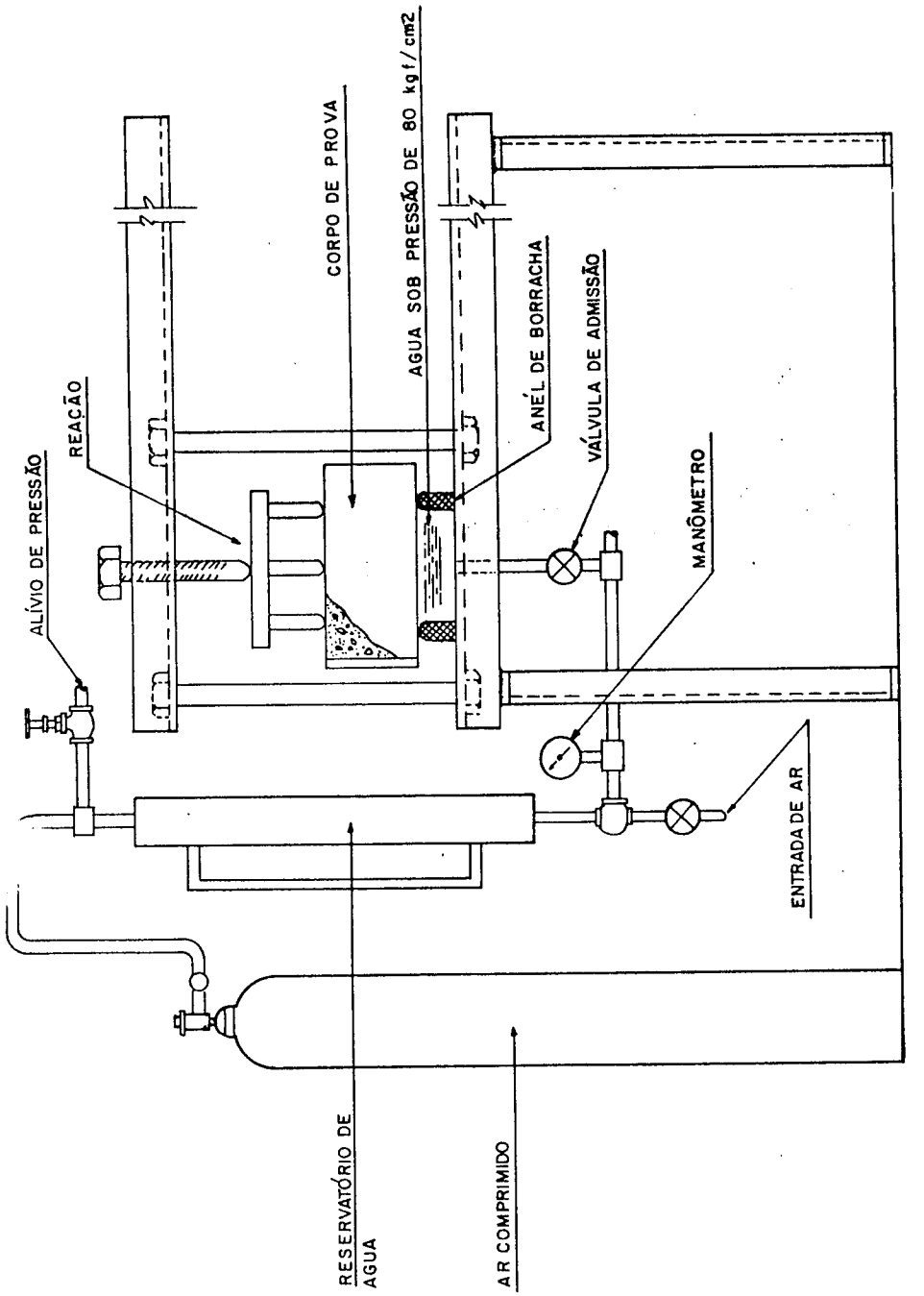


Figura 7.117 — Esquema de ensaio para determinação da permeabilidade do concreto por penetração (método sueco)

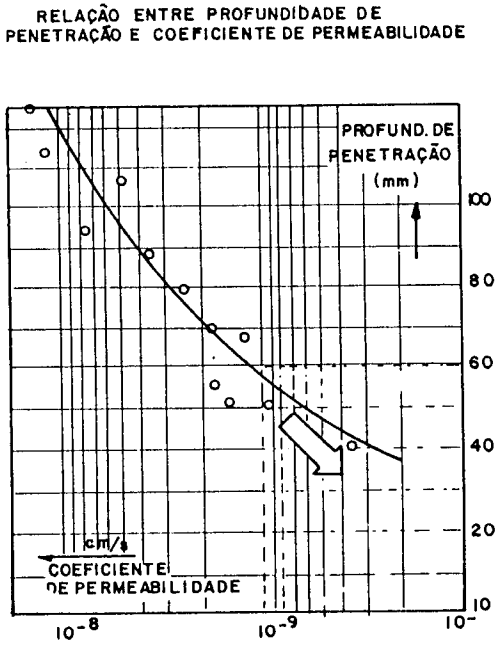


Figura 7.118 — Relação entre profundidade de penetração e coeficiente de permeabilidade obtida por Sallstrom

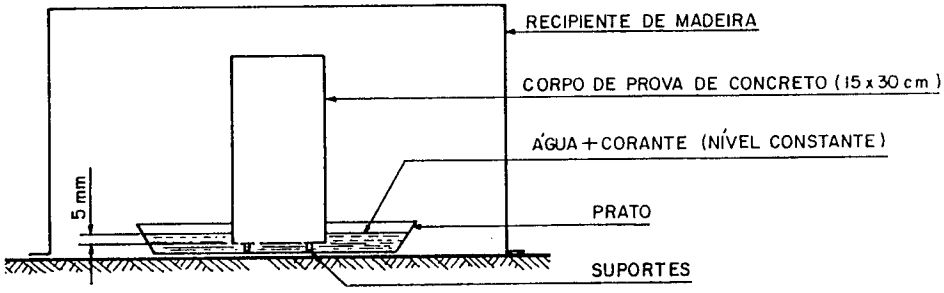


Figura 7.119 — Esquema de ensaio de absorção por capilaridade

Embora os agregados representem 70 a 85% do volume total do concreto é a composição da pasta e seu grau de hidratação (e portanto a idade do concreto) o fator de maior importância na permeabilidade e absorção do concreto.

Para pastas de mesma idade a permeabilidade, absorção e capilaridade do concreto são tanto mais baixas quanto maior o teor de cimento na mistura, ou seja, quanto menor for a relação água/cimento, conforme mostra a figura 7.120 [7.74].

A composição do cimento só afeta a permeabilidade no que concerne à sua maior ou menor rapidez de hidratação [7.70]. Terminada a hidratação nem a porosidade nem o coeficiente de permeabilidade finais são influenciados. Dessa forma pode-se concluir que há uma queda na permeabilidade do concreto com o aumento da idade até que, terminada a hidratação, esses fatores passam a ser constantes. Deve-se considerar que a falta de cura adequada provoca a interrupção parcial ou total da hidratação do cimento tendo, dessa forma, influência na permeabilidade e porosidade do concreto. A figura 7.121 [7.45] mostra a queda da permeabilidade com a idade e também com o consumo. Este fato é bem mais evidente nos concretos de menor consumo.

É necessário ter em mente que a análise da influência do consumo na permeabilidade do concreto deve ser feita para concreto de mesma trabalhabilidade tipo e diâmetro máximo de agregados já que o índice de vazios dos agregados é influenciado por esses fatores trazendo como consequência, alterações no volume de pasta por metro cúbico do concreto.

O uso de materiais pozolânicos é em geral benéfico do ponto de vista da permeabilidade do concreto agindo como "filler" e portanto preenchendo os poros da pasta e, principalmente, reagindo com a cal liberada na hidratação do cimento. A cal sendo solúvel em água pode ser carreada deixando poros e aumentando a permeabilidade e absorção do concreto.

O uso de aditivos plastificantes e incorporadores de ar tem também efeitos benéficos no que se refere à permeabilidade dos concretos. Os primeiros auxiliam na redução do fator água/cimento e os incorporadores formam microbolhas de ar isoladas e dificultam a formação de capilares durante a fase plástica do concreto.

Em linhas gerais pode-se admitir que concretos de usos normais com diâmetros máximos de 19 a 152 mm apresentam coeficiente de permeabilidade da ordem de 1×10^{-10} a 1×10^{-11} cm/s conforme resumo dos estudos de concreto para Água rmelha (Cesp) [7.4], mostrados na figura 7.122.

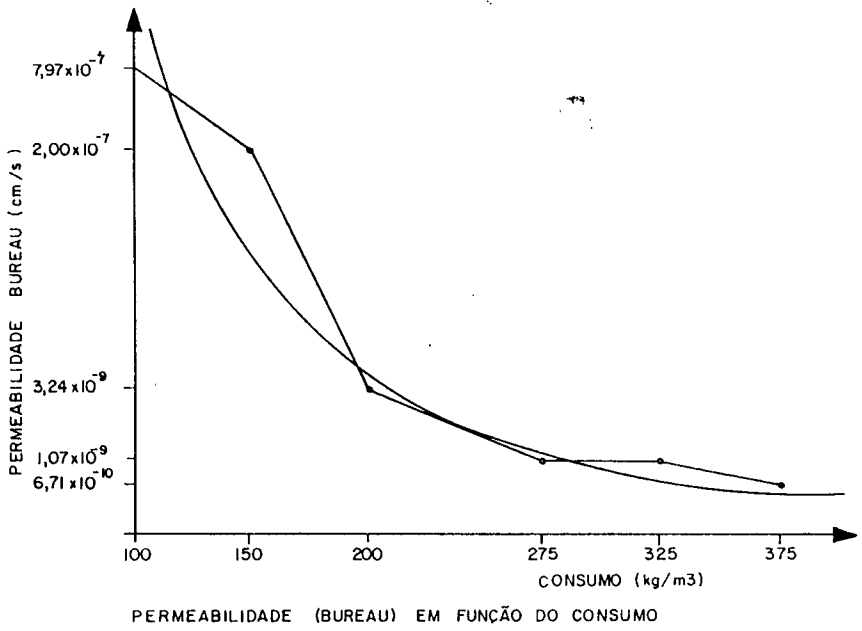
7.7 Resistência ao cisalhamento

7.7.1 Conceito

A resistência do concreto ao cisalhamento é conceituada como sendo a máxima tensão que o mesmo é capaz de desenvolver, com base na área real de uma seção transversal, tangente à qual uma força se desenvolve lembrando que o cisalhamento é uma força interna tangencial a esse mesmo plano.

7.7.2 Métodos de ensaio

Embora a resistência ao cisalhamento do concreto não seja uma propriedade comumente determinada em ensaios de rotina, ela pode ser obtida com razoável precisão através de ensaios diretos ou pela interseção da envoltória de Coulomb dos círculos de Mohr, com o eixo das ordenadas no diagrama $\varepsilon \times \sigma$, em ensaios de compressão triaxial de concreto (ver item 7.2.2).



PERMEABILIDADE (BUREAU) EM FUNÇÃO DO CONSUMO

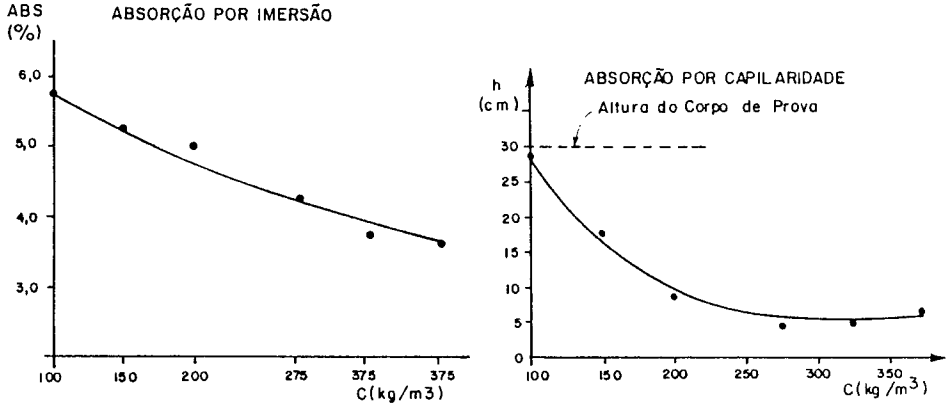


Figura 7.120 — Variações da absorção (por capilaridade e por imersão) e do coeficiente de permeabilidade do concreto em função do consumo de aglomerante (concreto com Ø máx. 38 mm e, sem ar incorporado)

ø MÁX (mm)	CONSUMO MÉDIO KG/M³	IDADE (DIAS)					
		28		90		360	
		Nº DE ENSAIOS	PENETRAÇÃO (CM)	Nº DE ENSAIOS	PENETRAÇÃO (CM)	Nº DE ENSAIOS	PENETRAÇÃO (CM)
76	285	14	8,9	14	7,3	14	5,5
76	200	20	7,1	22	5,9	22	4,7
76	140	20	10,6	22	7,8	22	7,2
152	167	20	5,9	22	6,1	22	6,2
152	117	32	10,2	32	7,7	32	5,7

Figura 7.121 — Influência do consumo de aglomerante e idade do concreto no valor da permeabilidade obtida pelo ensaio por penetração

AGREGADO ø MAX. (mm)	ÁGUA / CIMENTO	PENETRAÇÃO (cm)		PERMEABILIDADE BUREAU A 90 DIAS (cm/s)
		28 DIAS	90 DIAS	
19	0,50	—	—	$0,05 \times 10^{-10}$
19	0,60	2,1	—	$0,23 \times 10^{-10}$
38	0,60	1,3	—	$0,23 \times 10^{-10}$
76	0,55	—	—	$0,12 \times 10^{-10}$
	0,70	1,0	—	$0,1 \times 10^{-11}$
	0,85	2,8	1,8	$0,9 \times 10^{-10}$
152	[illegible]5	1,3	—	$0,45 \times 10^{-10}$
	0,70	2,7	1,7	$0,14 \times 10^{-11}$
	0,85	8,5	2,3	$0,15 \times 10^{-11}$

Figura 7.122 — Resultados de ensaios de permeabilidade por penetração e pelo método "Bureau" em concretos da obra de Água Vermelha [7.4]

A determinação da resistência ao cisalhamento do concreto em ensaios diretos tem sido executada através de dois procedimentos denominados de ensaio de cisalhamento longitudinal, sem confinamento e ensaio de cisalhamento no estado biaxial de tensões.

A determinação da tensão de cisalhamento longitudinal sem confinamento é feita com base em procedimentos do Corps of Engineers [7.75] e consiste em fixar parcialmente um corpo de prova cilíndrico de altura igual ao diâmetro da base, aplicando-se uma carga cisalhante pelo diâmetro do cilindro conforme mostrado nas figuras 7.123 e 7.124. A tensão de cisalhamento é obtida da relação entre a carga máxima aplicada e a área cisalhada.

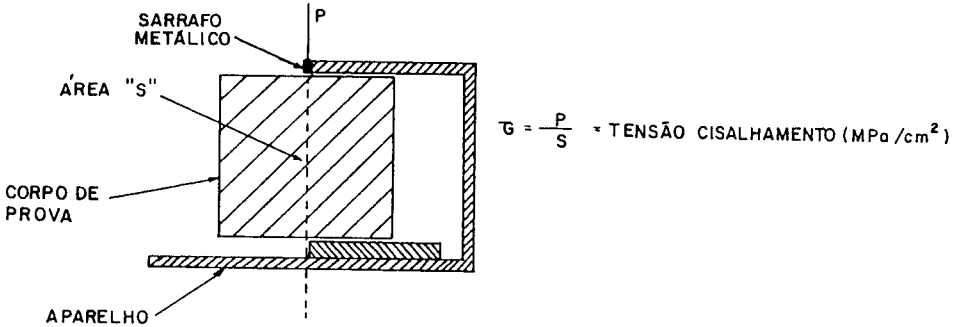


Figura 7.123 — Esquema de ensaio para determinação da tensão de cisalhamento do concreto sem confinamento

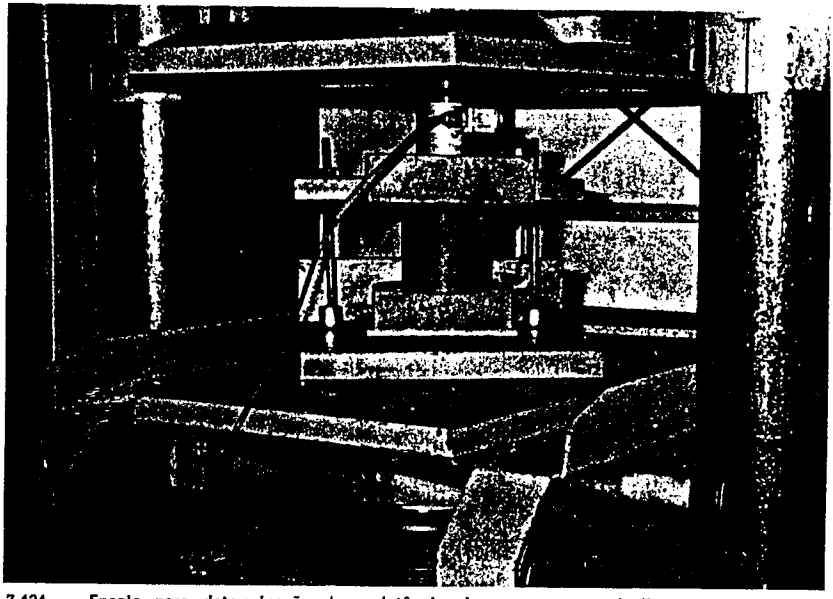


Figura 7.124 — Ensaio para determinação da resistência do concreto ao cisalhamento sem confinamento

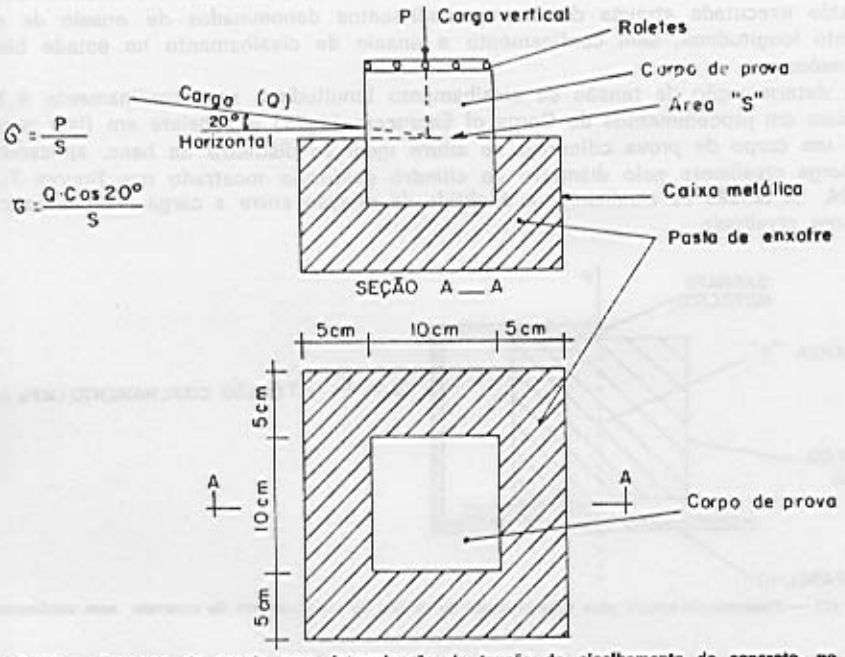


Figura 7.125 — Esquema de ensaio para determinação da tensão de cisalhamento do concreto, no estado biaxial de tensões

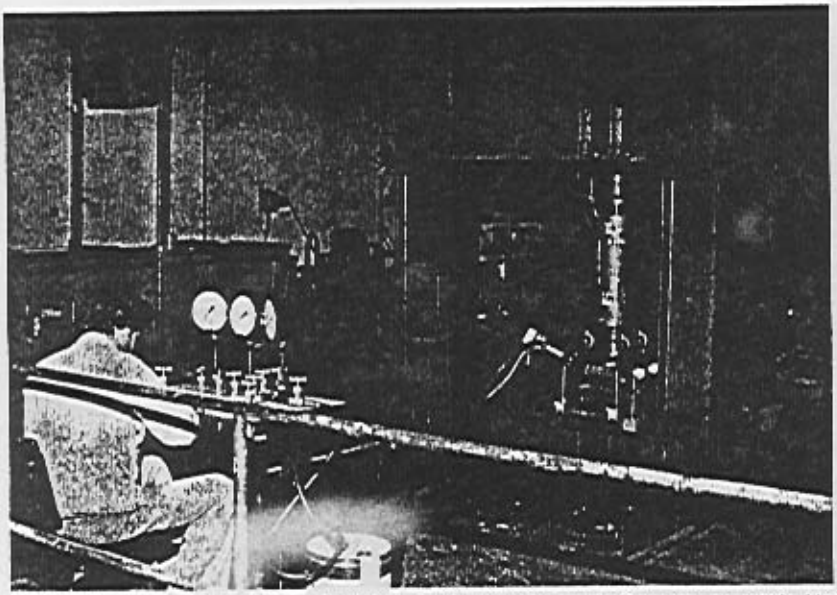
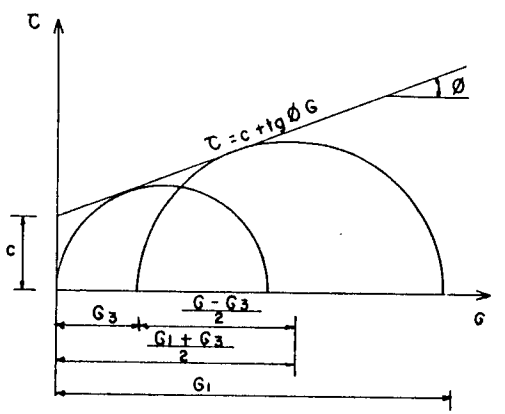


Figura 7.126 — Ensaio para determinação da resistência do concreto ao cisalhamento, no estado biaxial de tensões

Para obtenção da tensão de cisalhamento do concreto no estado biaxial utiliza-se uma adaptação do método de ensaio de cisalhamento direto em rochas (mecânica das rochas).

O ensaio consiste em fixar parcialmente um corpo de prova prismático em sua meia altura aplicando-se cargas normais e tangenciais, conforme ilustram as figuras 7.125 e 7.126.

A coesão do concreto, determinada de ensaios de compressão triaxial de concreto, é obtida conforme ilustrado na figura 7.127 [7.31] [7.32].



DETERMINAÇÃO GRÁFICA

$$c = \frac{\Sigma \sigma_1 - S \cdot \Sigma \sigma_3}{2 \cdot n \cdot \sqrt{S}}$$

n = Nº de ensaios

$$tg\,\emptyset = \frac{S - 1}{2 \cdot \sqrt{S}}$$

$$S = \sqrt{\frac{n \Sigma \sigma_1^2 - (\Sigma \sigma_1)^2}{n \Sigma \sigma_3^2 - (\Sigma \sigma_3)^2}}$$

$$\tau = c + \sigma \cdot tg\,\emptyset$$

DETERMINAÇÃO ANALÍTICA

Figura 7.127 — Metodologia gráfica e analítica para determinação da coesão do concreto a partir de ensaios triaxiais

Os resultados de resistência ao cisalhamento, obtidos pelos métodos diretos, devem ser vistos com restrições pelo fato de que as solicitações a que os corpos de provas são submetidos não são de cisalhamento puro.

7.7.3 Fatores que influenciam

A resistência ao cisalhamento obtida por diferentes métodos de ensaios e os fatores que influenciam o valor desse parâmetro foram investigados manuseando-se resultados de ensaios executados por laboratórios da Cesp em Ilha Solteira [7.30] e Itaipu Binacional [7.31] e [7.32].

As principais conclusões obtidas no que se refere à resistência ao cisalhamento do concreto foram:

Há um aumento de coesão do concreto com a resistência à compressão simples, ao nível de significância, de 1% conforme mostrado na figura 7.128.

Observou-se uma correlação linear significativa, ao nível de significância de 1%, entre a coesão fornecida pelo ensaio triaxial e a resistência à compressão simples do concreto traduzida pela expressão C = 0,2162 Fc, com um coeficiente de correlação linear igual a 0,9674 para os ensaios realizados.

Considerando como referência o valor de coesão fornecido pelo ensaio de compressão triaxial, o cisalhamento obtido pelo método longitudinal foi o que apresentou melhor correlação com o mesmo (r = 0,867), enquanto que a correlação com os valores obtidos pelo ensaio biaxial foi negativa (r = – 0,856). O valor negativo obtido não aconselha a utilização deste ensaio para medida indireta da coesão do concreto.

ESTUDO	SÉRIE	Ø max. DO AGREGADO (mm)	CONSUMO DE AGLOMER. (kg/m³)	IDADE DE ENSAIO (DIAS)	fcj COMPRESSÃO SIMPLES (MPa)	"c" COESÃO OBTIDA NO TRIAXIAL (MPa)	τ_L – CISALHAMENTO LONGITUDINAL (MPa)	τ_D – CISALHAMENTO NO ESTADO BIAXIAL DE TENSÕES	$\frac{c}{fcj}$	$\frac{\tau_L}{fcj}$	$\frac{\tau_D}{fcj}$
1 [7.31]	1	19	375	7	25,8	5,6	—	—	0,22	—	—
	2	19	273	7	11,5	2,4	—	—	0,21	—	—
	3	19	214	7	7,7	2,2	—	—	0,28	—	—
	4	19	375	28	41,0	9,5	—	—	0,23	—	—
	5	19	273	28	22,9	5,6	—	—	0,24	—	—
	6	19	214	28	18,6	4,5	—	—	0,24	—	—
2 [7.31] [7.32]	1	19 *	372	28	37,2	8,4	5,3	1,78	0,22	0,14	0,05
	2	19	345	28	38,9	8,3	4,4	3,3	0,21	0,11	0,08
	3	38	290	28	34,1	8,4	3,7	4,2	0,25	0,11	0,12

* ⟶ CONCRETO "FIBROSO" COM 1% DE FIBRAS DE AÇO — VOLUME SÓLIDO

Figura 7.128 — Correlações entre resistência à compressão axial simples, coesão (obtidas de ensaios triaxiais) e cisalhamento obtido pelo método direto e no estado biaxial de tensões

A figura 7.129 mostra um resumo de resultados de controle executados pelo método [7.75] do Corps of Engineers sobre misturas aplicadas em estruturas da obra de Itaipu [7.76] que seriam solicitadas preferencialmente ao cisalhamento.

Observa-se por esses resultados que a relação média entre os valores de resistência ao cisalhamento direto não confinado e as respectivas resistências à compressão axial simples são da ordem de 0,15 e, portanto, coerentes com os valores mostrados na figura 7.128.

MISTURA	Ø max AGREGADO (mm)	CONSUMO E AGLOMER (kg/m³)	Fcj (MPa) COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES			τ (MPa) CISALHAMENTO LONGITUDINAL			τ/Fcj	
			Nº DE AMOSTRAS	7 DIAS	28 DIAS	Nº DE AMOSTRAS	7 DIAS	28 DIAS	7 DIAS	28 DIAS
A	19	427	40	17,7	29,9	38	2,83	4,68	0,16	0,16
B	19	500	20	14,7	28,9	22	—	4,55	—	0,16
C	19	415	20	19,5	—	04	3,31	—	0,17	—
D	38	372	10	10,5	—	04	1,46	—	0,14	—

Figura 7.129 — Resistência à compressão axial simples, ao cisalhamento longitudinal e relação entre elas, obtidas no laboratório da obra de Itaipu

7.8 Aderência do concreto

Pouca atenção é dada à determinação da aderência.

O termo aderência é usado para designar a ligação do concreto com o aço ou do concreto velho com concreto novo, de um lançamento através de camadas sucessivas ou de um reparo.

A aderência do concreto, ao aço ou a outro concreto, pode ser avaliada indiretamente através de procedimentos nem sempre padronizados.

7.8.1 Aderência concreto-aço

A aderência concreto-aço é profundamente influenciada pela conformação geométrica das barras de aço e pode ser avaliada por meio de um ensaio [7.77] de arrancamento de uma barra moldada junto com um prisma de concreto.

O arrancamento é caracterizado quando ocorrer um escorregamento, na extremidade em carga, da barra, superior a 2,5 mm. É obtida a tensão média da ruptura da aderência dividindo-se a carga na barra que causou o escorregamento, pela área de envolvimento da barra.

7.8.2 Aderência concreto-concreto

Junta de concretagem é a superfície de contato entre uma camada de concreto recém-lançada e uma já anteriormente lançada e endurecida.

Vários são os processos e meios usados para tratamento das juntas de construção: jato de areia (seca ou úmida), jato com água sob alta pressão, apicoamento e corte verde (jato de água à baixa pressão sobre concreto de baixa idade).

Algumas vezes a superfície do concreto lançado pode ser tratada com aplicação de retardadores e a subsequente remoção da superfície não endurecida, através de água e sob ação de escovas.

Os processos de tratamento citados, quando aplicados corretamente, produzem resultados que expressam a união entre os concretos novo e velho.

A aderência entre o concreto novo e velho pode ser avaliada, em laboratório, através de um ensaio de cisalhamento [7.78] de um corpo de prova em forma de dupla cunha. Entretanto como a aderência concreto-concreto é verificada com intuito de se avaliar o desempenho de uma junta de construção, nessas oportunidades os corpos de prova são obtidos por meio de extração de testemunhos como mostram as figuras 7.130 e 7.131.

Dessa forma a avaliação da aderência do concreto novo com o velho é feita indiretamente através da aplicação de outros ensaios, tais como cisalhamento e tração por ruptura diametral, citados nos itens 7.4 e 7.7.

Através da aplicação desses procedimentos tem sido obtido um comportamento na união do concreto novo com o velho, em ordem de grandeza mostrada na figura 7.132. [7.2].

7.9 Propriedades térmicas

A elevação adiabática de temperatura, expansão térmica, difusividade, calor específico e condutividade térmica são fenômenos sempre associados ao concreto e que podem ter, isolada ou conjuntamente, importância fundamental no projeto e planejamento de construção das estruturas. Em obras de concreto massa ou sujeitas a gradientes de temperaturas extremas (vasos de reatores nucleares, por exemplo), as considerações dessas propriedades podem ser prioritárias em relação a outras, tais como resistências, módulo de deformação etc., para se manter a integridade da estrutura em serviço.

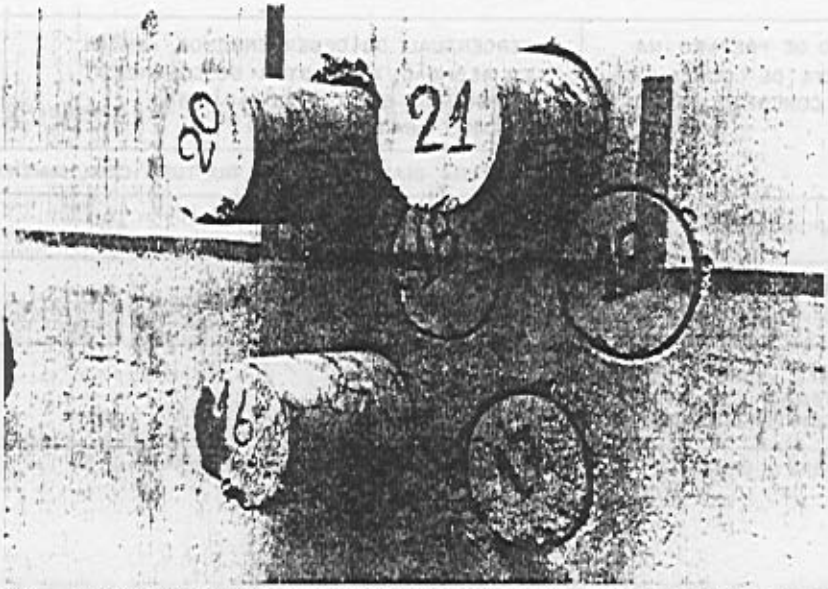


Figura 7.130 — Testemunhos de junta de construção (n.os 18 e 19), para serem comparados com concreto monolítico (16 e 17 abaixo e 20 e 21 acima da junta)

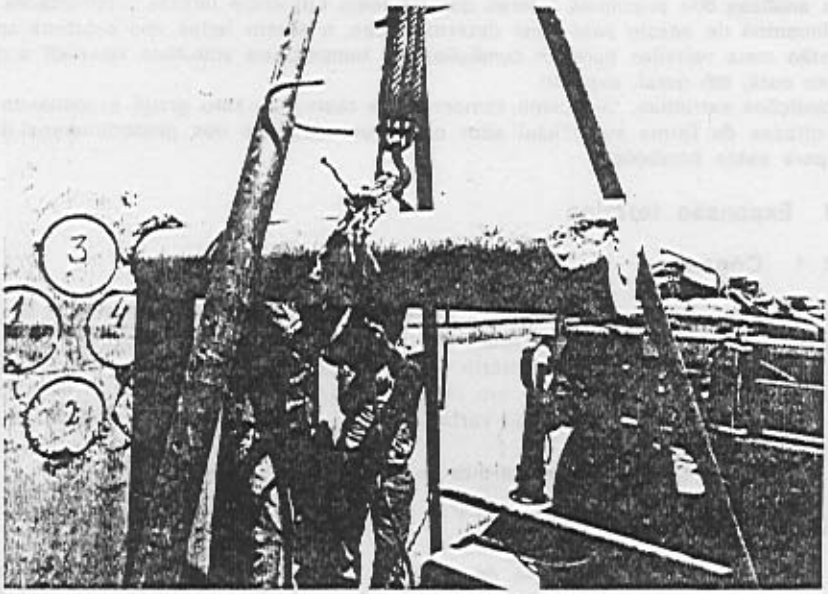


Figura 7.131 — Retirada de testemunhos de concreto de junta de construção

TIPO DE PREPARO NA JUNTA DE CONSTRUÇÃO DE CONCRETO MASSA.	PERCENTUAL DO DESEMPENHO DA JUNTA EM RELAÇÃO À AMOSTRA DO CONCRETO MONOLÍTICO ENVOLVENDO A JUNTA. (ACIMA E ABAIXO)	
	RUPTURA DIAMETRAL	RUPTURA CISALHAMENTO
SEM PREPARO	50	40
CORTE COM JATO D'ÁGUA SOB ALTA PRESSÃO (42 MPa)	85	75
CORTE VERDE – COM RETOMADA DE CONCRE – TAGEM INFERIOR A 5 DIAS	90	80

Figura 7.132 — Desempenho de aderência de juntas de construção de concreto-massa [7 2]

Mesmo em obras com outras características estruturais e menos sujeitas a grandes gradientes de temperatura, tais como pontes, pavimentos, edifícios etc., a consideração de uma ou mais dessas propriedades está sempre vinculada, com menor ou maior grau de importância aos critérios de dimensionamento.

Os valores dessas propriedades são no entanto variáveis de concreto para concreto, em razão da própria heterogeneidade dos materiais que o compõem, do proporcionamento desses materiais e das condições a que ficam expostos.

As análises dos principais fatores que exercem influência nessas propriedades e os procedimentos de ensaio para suas determinações, a serem feitas nos subitens seguintes, estão mais voltadas para as condições de temperatura ambiente normais a que o concreto está, em geral, exposto.

Condições extremas, tais como temperaturas abaixo de zero graus e acima de 60°C serão citadas de forma superficial sem entrar em detalhes nos procedimentos de ensaios para estas condições.

7.9.1 Expansão térmica

7.9.1.1 Conceito

O coeficiente de expansão térmica (α) é definido como sendo a variação linear de um comprimento unitário, causada por uma variação unitária de temperatura ou a variação volumétrica de um volume unitário também causada por uma variação unitária de temperatura. Como o concreto é um material considerado isotrópico, a determinação dessa propriedade é feita através da variação linear e é definida como coeficiente linear de expansão térmica.

É expresso normalmente em termos de deformação específica por °C.

7.9.1.2 Método de ensaio

A determinação do coeficiente de expansão térmica linear do concreto se resume em conhecer a relação entre a variação de comprimento do concreto e a variação de temperatura que provocou essa variação de comprimento, [7.79] até [7.82].

7.9.1.2.1 Aparelhos

— Câmaras Térmicas

Duas câmaras térmicas para abrigar os corpos de provas, sendo a térmica quente com temperatura de 40 ± 1.°C e a térmica fria com temperatura de 5 ± 1°C.

— Comparador de Comprimento

Um comparador de comprimento (interno ou externo ao concreto) com precisão mínima 0,001 mm, no caso de medidor mecânico, ou 5 μstrain quando se usam medidores elétricos colados ou embutidos ao concreto.

— Termômetro com Precisão de 0,1°C

7.9.1.2.2 Procedimento de ensaio

O concreto deve ser moldado integral (sem peneiramento) em corpos de provas cilíndricos de dimensões compatíveis com o diâmetro máximo do agregado. Após a desmoldagem e antes do início de ensaio o corpo de prova deve permanecer imerso em água por um período mínimo de 48 horas.

O corpo de prova deve permanecer em cada câmara pelo tempo necessário para que todo o concreto entre em equilíbrio térmico com o ambiente. Para corpos de prova de até Ø 25 x 50 cm tem-se constatado que 24 horas são suficientes para essa estabilização.

Para corpos de prova maiores ensaios prévios devem ser feitos para se determinar o tempo mínimo de permanência do mesmo em cada câmara, para que todo o concreto entre em equilíbrio com o ambiente.

Para que não haja perda de umidade do concreto, durante o período de ensaio podem ser adotados dois procedimentos. O corpo de prova ser protegido com borracha natural na superfície e placas de aço nos topos, conforme mostrado na figura 7.133 ou permanecer imerso em água durante todo o período de ensaio.

Os aparelhos para medida das deformações devem ter bases de medida no mínimo igual a três vezes o diâmetro máximo do agregado e serem posicionados de tal forma que suas extremidades fiquem equidistantes das bases dos corpos de provas.

Embora se permita o uso de aparelhos mecânicos de medida e extensômetros de fio colocados na superfície do corpo de prova, o uso de aparelhos embutidos no concreto (deformímetro) tem se mostrado mais eficiente e preciso na determinação do coeficiente de expansão térmica linear do concreto.

Os aparelhos mecânicos para esses ensaios são em geral menos adequados que os elétricos. Por outro lado, a fixação das bases de medida traz dificuldades quando o corpo de prova é protegido contra perda de umidade e, em caso contrário, há necessidade de removê-lo da água para se executar as leituras.

Os extensômetros de fio, embora com alta precisão de medida, são muito vulneráveis à umidade e sua proteção é bastante difícil. Por outro lado, a colagem desses aparelhos ao concreto é feita em geral com resinas epoxídicas, que têm alto coeficiente de expansão térmica, e uma colagem menos cuidadosa pode falsear o resultado do ensaio.

Os deformímetros, além de serem instrumentos de alta precisão, são dimensionados para serem embutidos ao concreto e fornecem, além da variação do comprimento, a temperatura do meio no qual estão embutidos.

As figuras 7.66 e 7.134 mostram, corpos de prova com extensômetros de fio elétrico (Wire Strain Gages) e deformímetros (Strain meter) em preparo para o ensaio.

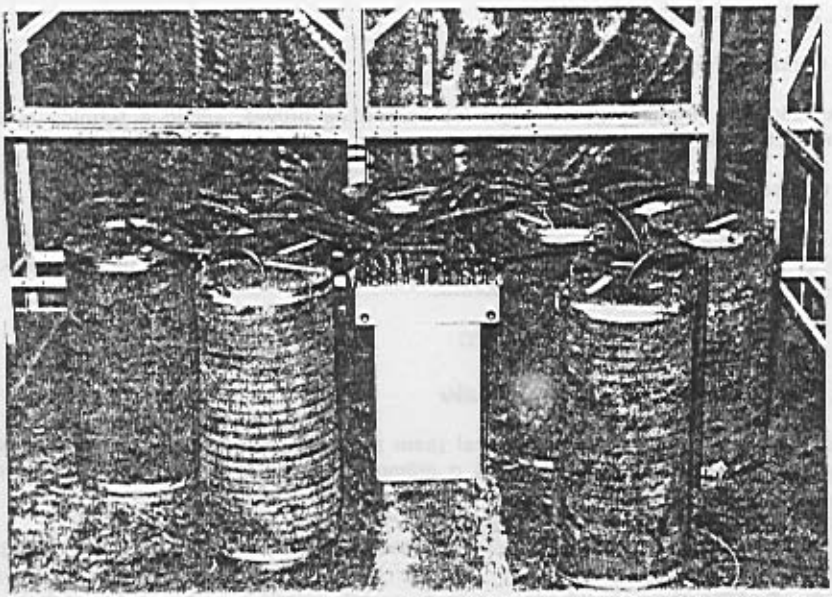


Figura 7.133 — Corpos de provas estocados em câmara térmica e protegidos contra perda de umidade, instrumentos com extensômetros embutidos

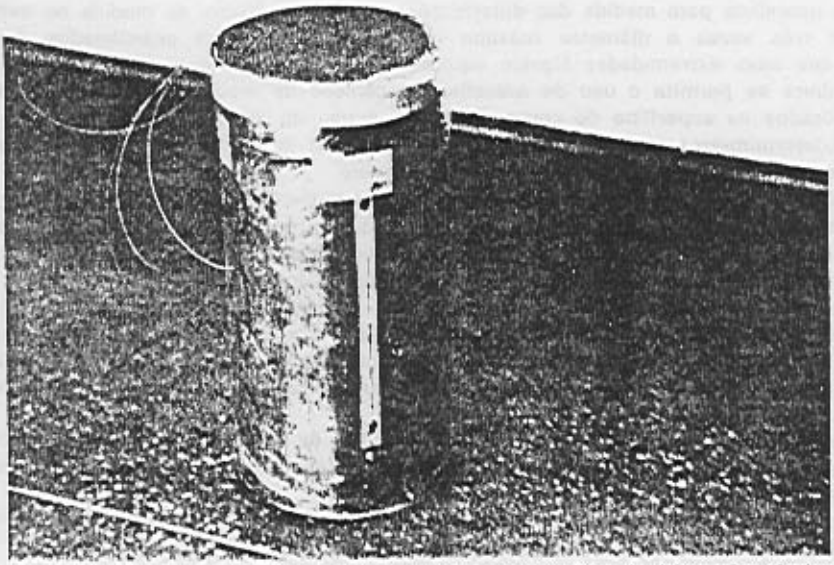


Figura 7.134 — Uso de Wire Strain Gage colado à superfície para medidas de deformações térmicas. Proteção de filme plástico contra perda de umidade

A primeira ciclagem do corpo de prova (24 horas no mínimo em cada câmara) deve ser desconsiderada permitindo ajuste do aparelho de medida. As temperaturas no instante da leitura das deformações devem ser obtidas com precisão de 0,1°C.

7.9.1.2.3 Cálculos

O coeficiente de expansão térmica linear deve ser obtido pela média aritmética de no mínimo seis ciclos completos, através de expressão (VII-XX).

$$\alpha = \frac{D_q - D_f}{T_q - T_f} \quad \text{onde:} \qquad \text{(VII-XX)}$$

α = coeficiente linear de expansão térmica

D_q = deformação específica calculada a partir da leitura na câmara quente

D_f = deformação específica calculada a partir da leitura na câmara fria

T_q = temperatura do concreto na câmara quente, no instante da leitura da deformação

T_f = temperatura do concreto na câmara fria, no instante da leitura da deformação.

7.9.1.3 Fatores que influenciam

A expansão térmica é um fenômeno físico comum a todos os materiais. A expansão térmica do concreto passa a ser um fenômeno físico complexo pela expansão diferencial e proporcionamento dos materiais básicos que o compõem, ou seja, a pasta de cimento e os agregados.

A composição mineral e a estrutura cristalina dos agregados são os fatores que maior influência exercem no coeficiente de expansão térmica do concreto, embora a pasta de cimento tenha em geral coeficiente de expansão térmica superior ao do agregado.

Este fato é facilmente entendido quando se observa que os agregados representam de 70 a 85% do volume total do concreto endurecido.

O coeficiente de expansão térmica das rochas geralmente usadas como agregados para concreto varia de valores de 3,5 x 10^{-6}/°C a 12,5 x 10^{-6}/°C.

Resultados de investigações científicas feitas em vários países [7.83] indicam que o principal fator que influencia a expansão térmica da rocha e, por conseguinte, do concreto, é a quantidade de quartzo. Rochas com formação predominantemente quartzosa, tais como quartzitos e arenitos têm coeficientes de expansão térmica linear ao redor de 12 x 10^{-6}/°C. As rochas com baixa porcentagem de quartzo na sua composição, tais como calcário, apresentam baixos coeficientes de expansão térmica, da ordem de 5 x 10^{-6}/°C.

Os granitos, riolitos, basaltos, etc. têm porcentagens intermediárias de quartzo e também valores de expansão térmica entre 5 e 12 x 10^{-6}/°C.

A quantidade de agregados nas misturas tem também papel preponderante no valor do coeficiente de expansão térmica do concreto. A figura 7.135 mostra uma série de resultados de coeficientes de expansão térmica obtidos de estudos em várias obras brasileiras, evidenciando a influência do tipo e quantidade de agregado na expansão térmica do concreto.

OBRA	TIPO DE AGREGADO		COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA ($\times 10^{-6}$/°C)			
	GRAÚDO	MIÚDO	DIAMETRO MÁXIMO DO AGREGADO (mm)			
			152	76	38	19
ILHA SOLTEIRA	QUARTZITO	AREIA NATURAL			13,4	
PORTO PRIMAVERA	QUARTZITO	AREIA NATURAL		12,25	12,30	
ANGRA DOS REIS	GNAISSE	AREIA NATURAL			10,25	12,16
ITUMBIARA	ANFIBOLIO GNAISSE	AREIA NATURAL			10,27	
TUCURUÍ	METAGRAUVAQUE	AREIA NATURAL	9,98	10,02	11,07	11,32
BALSAS MINEIRO	QUARTZO	AREIA NATURAL			11,99	
TAQUARUÇU	BASALTO	AREIA NATURAL	8,95 (Ø MAX. 100)	8,55 (Ø MÁX. 64)		
TUCURUI	BASALTO	AREIA NATURAL	8,74	8,83	9,84	10,24
ITUMBIARA	BASALTO	AREIA NATURAL	8,71		10,11	
ITAIPU	BASALTO	AREIA NAT. (30%) AREIA BAS. (70%)	8,41	8,37	8,39	8,61
ILHA SOLTEIRA	BASALTO	AREIA NATURAL	8,50		10,6	
ANGRA DOS REIS	HEMATITA	AREIA NATURAL			9,06	
ILHA GRANDE	BASALTO	AREIA NATURAL	8,75	9,15		
TRÊS IRMÃOS	BASALTO	AREIA NATURAL	8,00	8,10		
NOVA AVANHANDAVA	BASALTO	AREIA NATURAL	7,85	7,50		

Figura 7.135 — Variação do coefciente de expansão térmica do concreto com o tipo e diâmetro máximo do agregado

Estudos feitos em Itaipu [7.84] evidenciam também essa influência. Para uma mistura de concreto com agregados graúdos até 152 mm foram determinados os valores de coeficiente de expansão térmica de seus principais componentes, ou seja, do agregado, da pasta, da argamassa e do concreto. Esse estudo objetivou e comprovou, também, a possibilidade de se conhecer com boa precisão o coeficiente de expansão térmica do concreto, através do conhecimento dos valores dos componentes, contribuindo como uma média ponderada de seus volumes sólidos. Os resultados desse estudo mostraram:

— Mistura usada

Água	—	93 kg/m³
Cimento	—	155 kg/m³
Areia natural	—	154 kg/m³
Areia de Basalto	—	394 kg/m³
Britas de Basalto	—	1830 kg/m³

Resultados individuais de coeficiente de expansão térmica dos vários componentes e do concreto

Quartzito (areia natural)	α	=	13,7 x 10^{-6}/°C
Basalto	α	=	5,34 x 10^{-6}/°C
Pasta	α	=	18,04 x 10^{-6}/°C
Argamassa	α	=	10,48 x 10^{-6}/°C
Concreto	α	=	7,43 x 10^{-6}/°C

O cálculo do coeficiente de expansão térmica do concreto a partir dos valores dos componentes mostrou:

$$\alpha concr. = \frac{(\alpha pasta).(v\,s) + (\alpha quart.).(v\,s) + (\alpha basalto).(v\,s)}{\text{volume sólido total de mistura}}$$

$$\alpha concr. = \frac{(18{,}04 \times 142{,}2 + 13{,}7 \times 58{,}5 + 5{,}34 \times 757{,}6)}{958{,}6}$$

sendo

v.s. = volume sólido

αcalculado = 7,74 x 10^{-6}/°C

αobtido = 7,43 x 10^{-6}/°C

Observa-se a grande influência do agregado comparando-se os valores da pasta, da argamassa e do concreto.

Essa mesma mistura foi estudada de tal forma a se observar a influência de material pozolânico na expansão térmica do concreto. Para tanto, parte do cimento foi substituído, em volume sólido, por material pozolânico, nas porcentagens de 0, 15, 30 e 45%. Os resultados mostram que há um aumento do coeficiente de expansão térmica do concreto com o aumento da porcentagem de material pozolânico:

% Mat. Pozolânico	α do Concreto
zero	7,43 x 10^{-6}/°C
15	7,47 x 10^{-6}/°C
30	7,96 x 10^{-6}/°C
45	8,25 x 10^{-6}/°C

O fator água/cimento e a idade são também fatores que modificam o valor do coeficiente de expansão térmica do concreto, em função da variação do teor de pasta.

A figura 7.136 mostra a influência desses fatores em argamassas e concretos [7.85] e [7.86].

A queda verificada no coeficiente de expansão térmica da argamassa com o aumento da relação água/cimento é explicada pela queda da quantidade total de pasta na mistura e, portanto, maior influência do agregado. Nos concretos, como a quantidade de pasta é menor, a influência da relação água/cimento e da idade é menos significativa.

O grau de saturação do concreto tem também influência no valor do coeficiente de expansão térmica do mesmo. Concretos secos ou saturados apresentam coeficientes similares, mas situações intermediárias de umidade podem aumentar em até 20% este valor (7.87).

Outros fatores que podem exercer influência, embora em pequena intensidade, na expansão térmica do concreto são o tipo e finura do cimento e a quantidade de ar incorporado.

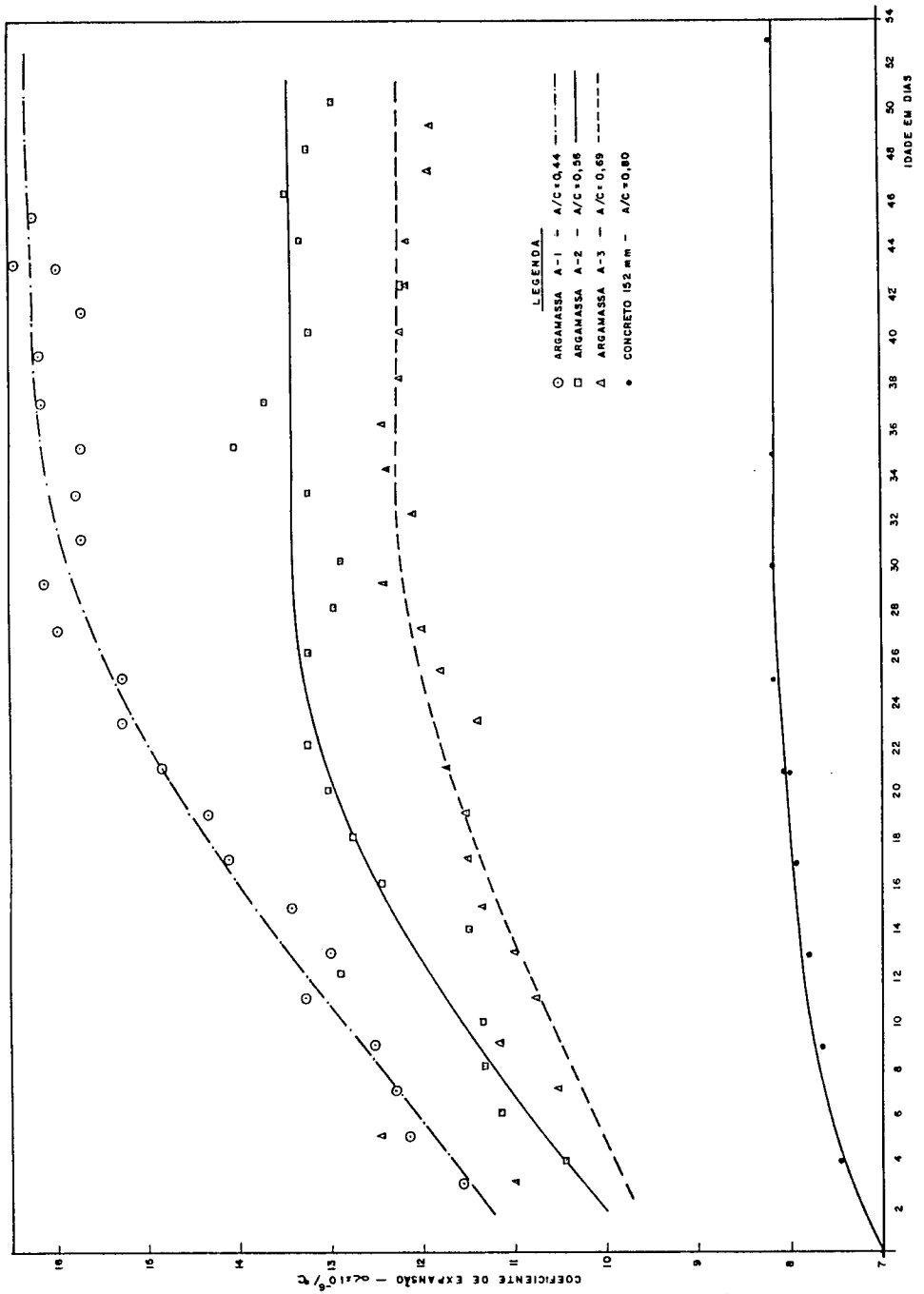


Figura 7.136 — Influência da idade e fator água/cimento no coeficiente de expansão térmica de argamassas e do concreto

Quando o concreto é, entretanto, submetido a elevadas temperaturas a variação de volume passa a ser complexa em função da variação de volume da pasta propriamente dita, e uma outra variação baseada no movimento migratório das águas dos capilares e dos poros do gel.

7.9.2 Calor específico

7.9.2.1 Conceito

O calor específico de um material é definido como sendo a quantidade de calor necessária para elevar de uma unidade de temperatura uma unidade de massa desse material. Para o concreto o calor específico é definido dentro de faixas limitadas de temperatura e umidade, já que esses fatores provocam variações consideráveis no seu valor que é comumente expresso em:

$$c = \frac{J}{g \cdot {}^{\circ}C}$$

7.9.2.2 Método de ensaio

O método para determinação do calor específico do concreto se resume em fornecer uma certa quantidade de calor a um bloco de concreto de massa conhecida, mantido isolado termicamente, e se medir, nessas condições, qual a variação de temperatura sofrida pelo mesmo em consequência do calor fornecido [7.88] e [7.89].

7.9.2.2.1 Aparelhos

— Recipiente adibático constituído por dois recipientes cilíndricos, um interno ao outro, entremeados por um material isolante (lã de vidro, paina etc.), conforme ilustrado na figura 7.137.

— Termômetros com precisão mínima de 0,05°C

— Balança com precisão de 1g

— Aquecedor para fornecimento de calor ao concreto e aparelho de medida da quantidade de calor fornecida, com sensibilidade de 0,05%

— Sistema de agitação para manter a distribuição homogênea de calor, interna e externamente ao corpo de prova.

A figura 7.138 mostra um conjunto completo para o ensaio de calor específico ao concreto

7.9.2.2.2 Procedimento de ensaio

Usa-se um corpo de prova de concreto, de dimensões compatíveis com o equipamento de ensaio (normalmente Ø 20 x 40 cm), provido de um orifício central pelo eixo, para permitir a colocação do aquecedor e do agitador no interior do mesmo.

Mantém-se o corpo de prova imerso em água por um período mínimo de 48 hs para a saturação completa do concreto já que este fator tem grande influência no valor do seu calor específico.

No instante da colocação do corpo de prova dentro do calorímetro, o concreto deve estar na condição saturado superfície seca.

Para a execução de ensaios com o concreto não saturado, deve-se isolar o corpo de prova para que se mantenha constante, durante o período de ensaio, o seu teor de umidade.

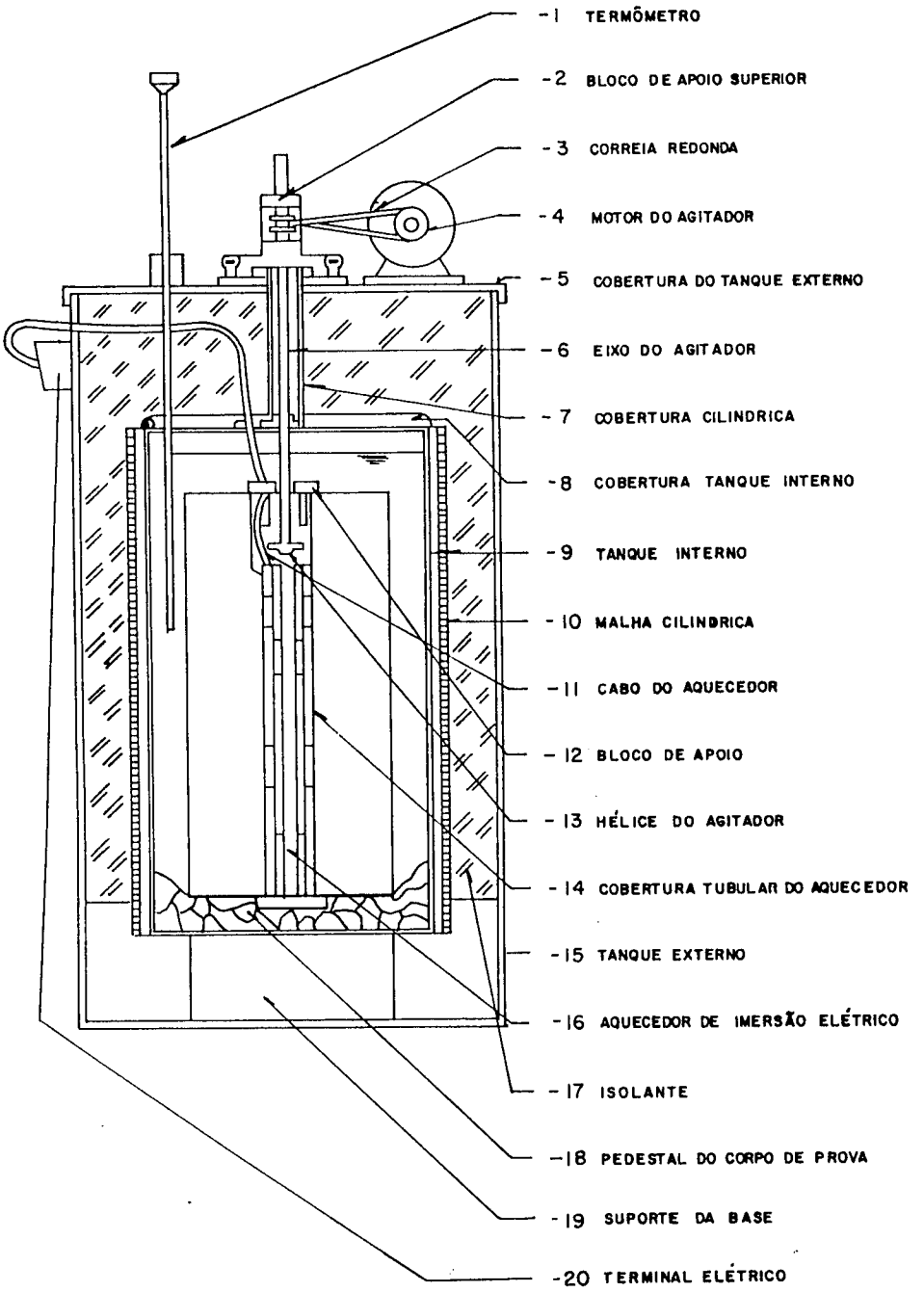


Figura 7.137 — Esquema do calorímetro adiabático usado no ensaio para determinação do calor específico do concreto

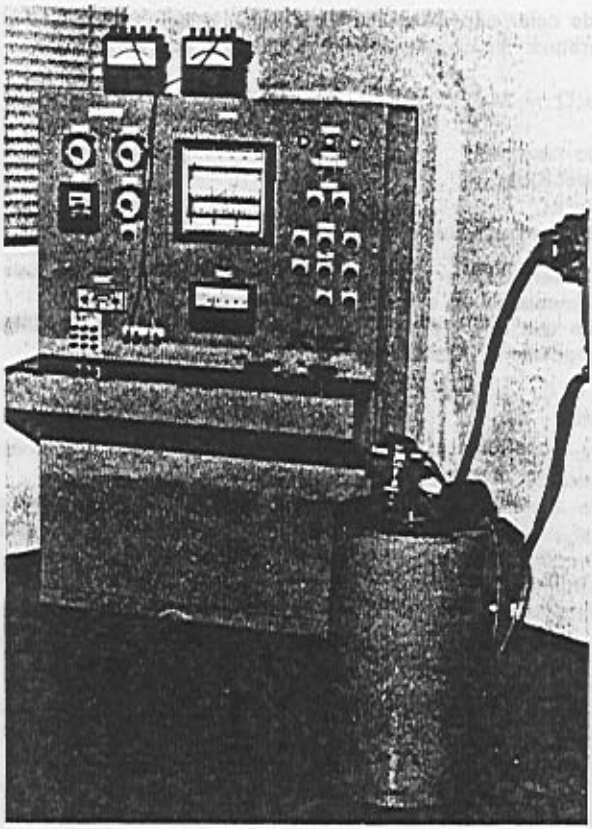


Figura 7.138 — Equipamento (painel de controle e calorímetro adiabático) para ensaios de calor específico do concreto

Embora durante o ensaio o corpo de prova fique armazenado dentro de uma câmara isolada termicamente, há necessidade de uma aferição desse sistema, já que o isolamento não pode ser considerado suficiente para que as perdas possam ser desprezadas. É necessário também o conhecimento da parcela de energia absorvida pelos elementos que também recebem calor do aquecedor, quais sejam, recipiente interno e tampa, água, sistemas de agitação e medição da temperatura.

Para tanto, os componentes dos calorímetros são construídos de materiais de calores específicos conhecidos (aço e cobre) e a água usada deve ser destilada.

Conhecidas as massas exatas desses elementos e usando-se um corpo de prova padrão (tem sido usado alumínio) executa-se uma série de ensaios prévios, a diferentes temperaturas, determinando-se a perda do calorímetro pela equação (VII-XXI)

$E_p = E_c - (E_a + E_{ei} + E_{cp})$ VII-XXI, onde

E_p = energia perdida pelo calorímetro
E_c = energia total fornecida ao sistema
E_a = energia absorvida pela água
E_{ei} = energia absorvida pelos elementos internos do calorímetro
E_{cp} = energia absorvida pelo corpo de prova padrão

A quantidade de calor necessária para elevar a temperatura do concreto da temperatura θ_1 à temperatura θ_2 é representada pela equação (VII-XXII).

$$\text{sendo } Q = M\int_{\theta_1}^{\theta_2} C.d\theta \qquad \text{(VII-XXII)}$$

M = massa do concreto
C = calor específico
θ = temperatura
Q = quantidade de calor necessária

A questão é determinar o valor do calor específico em qualquer temperatura a partir dos valores medidos do calor cedido e da temperatura.

O procedimento que tem sido adotado é baseado na seguinte relação entre o calor específico e a temperatura (VII-XXIII).

$$C = C_o + C_1\theta + C_2\theta^2 \qquad \text{(VII-XXIII)}$$

v.s. x volume sólido sendo

Os valores dos coeficientes C_o C_1 C_2 são determinados através dos resultados de três séries de ensaios, a diferentes temperaturas.

A execução do ensaio propriamente dito é feita conforme descrito a seguir:

Após a colocação do corpo de prova na câmara adiabática é ligado o agitador por um período aproximado de 30 minutos até se obter o equilíbrio térmico do concreto, da água e demais componentes internos da câmara.

Fornece-se então uma quantidade de calor conhecida para aumentar a temperatura do conjunto, com leituras periódicas dos valores intermediários de temperatura.

Desliga-se o aquecedor acompanhando os valores de temperatura até se obter o equilíbrio térmico do conjunto.

Nos cálculos do calor específico do concreto, leva-se em consideração a temperatura máxima do ensaio, as perdas do calorímetro e as quantidades de calor absorvidas pela água destilada e demais componentes internos ao isolamento.

A figura 7.139 ilustra uma planilha de cálculo do calor específico [7.90].

Um método alternativo para determinação do calor específico do concreto é preconizado pelo Corps of Engineers [3.70] e está descrito em detalhes no item 3.1.3.15. Para a determinação do calor específico por esse método há necessidade de se triturar o concreto para obtenção de partículas de tamanho máximo 25 mm. Os resultados obtidos por esse método são menos precisos que o anteriormente descrito.

7.9.2.3 Fatores que influenciam

O calor específico do concreto é influenciado pelo tipo e quantidade dos elementos que o compõem (principalmente agregados) e pela temperatura a que está sujeito quando de sua determinação.

No entanto, é o grau de saturação o elemento que mais provoca variações nessa propriedade.

Em função do tipo e quantidade de agregados o calor específico do concreto varia, em geral, dentro da faixa de 0,85 a 1,1 $\frac{J}{g \cdot °C}$ (0,20 a 0,26 $\frac{cal}{g \cdot °C}$).

Os concretos com agregados leves (argila expandida, vermiculita, isopor etc.) têm em geral valores mais altos.

A figura 7.140 mostra uma série de valores de calor específico de concretos confeccionados com diferentes agregados [7.91]. Esses valores se referem a concretos saturados ensaiados a 40°C.

	ASSISTÊNCIA CONSTRUÇÃO CONCRETO	FOLHA 100
801 – DSC	DIVISÃO DE CONTROLE DE CONCRETO	DESENHO

CALOR ESPECÍFICO –

PROGRAMA PC – 02/80 TRAÇO 152 – C – 01 PENEIRADO # 50 mm

C P Nº 105 281 MASSA DO CP (M) 32190 MASSA DA ÁGUA (Ma) 6198,6

TEMPO (MIN)	DESIGNAÇÃO	TEMPERATURA RESISTÊNCIA Ω	°C
0	T_I	108,749	21,805
5		108,772	21,864
10		108,796	21,924
15		108,820	21,985
20		108,840	22,037
25		108,862	22,092
30	T_0	108,881	22,142
35	T_1	109,519	23,772
40	T_2	110,115	25,295
45	T_3	110,689	26,761
50	T_4	111,123	27,869
55	T_5	111,589	29,059
60	T_6	112,041	30,213
65	T_7	112,500	31,386
70	T_8	112,990	32,637
75	T_9	113,414	33,720
80	T_{10}	113,812	34,736
85	T_{11}	114,227	35,796
90	T_{12}	114,699	37,002
95	T_{13}	114,504	36,502
100	T_{14}	114,380	36,186
105	T_{15}	114,309	36,006
110	T_{16}	114,265	35,892
115	T_{17}	114,239	35,827
120	T_{18}	114,224	35,788
125	T_{19}	114,215	35,764
130	T_{20}	114,211	35,754
135	T_{21}	114,210	35,751
140	T_{22}	114,210	35,751
145	T_{23}	114,210	35,751
150	T_n	114,212	35,757
155		114,215	35,764
160		114,218	35,773
165		114,222	35,781
170		114,226	35,792
175		114,230	35,803
180	T_F	114,234	35,813

TEMPO DE AQUECIMENTO (t) 3617 seg

ENERGIA CEDIDA (Ec)

LEITURA INICIAL (LI) 3970945 LEITURA FINAL (LF) 3985813

$AL = \frac{LF - LI}{64} = \frac{14868}{64} = 232,313$ W

$Ec = AL \times t \times 0,2389$

$Ec = 232,313 \times 3617 \times 0,2389 = 200742$ CAL

CORREÇÃO DE TEMPERATURA

$Co = \frac{Te - Ti}{6} = \frac{0,337}{6} = 0,056$

$Cb = \frac{Tf - Te}{6} = \frac{0,056}{6} = 0,009$

$Ta = \frac{Ti + Te}{2} = \frac{43,947}{2} = 21,974$

$Tb = \frac{Te + Tf}{2} = \frac{71,570}{2} = 35,785$

$Tm = \frac{Te - Ta}{2} = \frac{57,899}{2} = 28,950$

$Tc = -n(Co) - \left(\frac{Cb - Co}{Tb - Ta}\right)\left((T_1 + T_2 + T_3 \ldots\ldots + T_{23}) + Tm - n\,Ta\right)$

$Tc = -1,344 - \left((-5,40\ 3 \times 10^{-3})\ (763,218 + 28,950 - 527,376)\right)$

$Tc = -1,344 + 0,901 = 0,443$

$Af = Ta - Te + Tc = 35,757 - 22,142 - 0,443$

$Af = 13,1729$ C

DETERMINAÇÃO CALOR ESPECÍFICO

E ÁGUA (Ea) = ma x ca x Af

Ea = 6198,6 x 0,9974 x 13,172 = 81436 CAL

E CALORIMETRO (Ecal) = Eqa x Af

E cal = 627, 46 x 13,172 = 8265 CAL

E PERDIDA (Ep) = $(0,0928 \times Tm + 0,8506) \times \frac{Ec}{100}$

$Ep = (0,0928 \times 28,950 + 0,8506) \times \frac{200742}{100}$ = 7100 CAL

E CORPO DE PROVA = Ec (Ea + E cal + Ep)

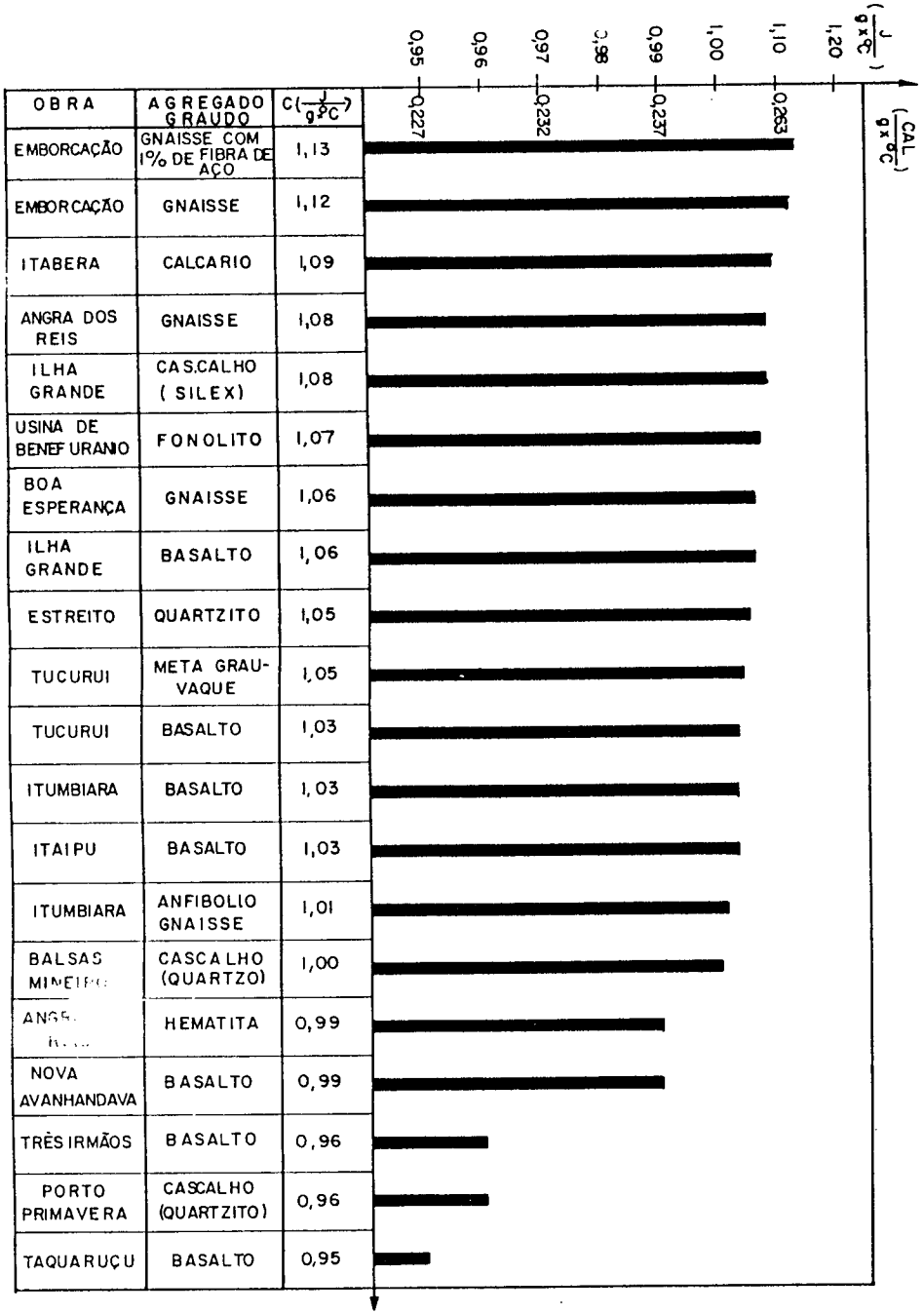
E cp 200742 – (81436 + 8265 + 7100) = 103941 CAL

$C = \frac{Ecp}{M \times Af}$

$C = \frac{103941}{32190 \times 13,172} = 0,245$ CAL

OBS. EQUIVALENTE EM ÁGUA DO CALORÍMETRO (Eqa) = 627,46 Cal / °C

Figura 7.139 — Exemplo de cálculo do calor específico do concreto a partir dos dados de ensaio



OBRA	AGREGADO GRAUDO	$C\left(\frac{J}{g\,^{\circ}C}\right)$
EMBORCAÇÃO	GNAISSE COM 1% DE FIBRA DE AÇO	1,13
EMBORCAÇÃO	GNAISSE	1,12
ITABERA	CALCARIO	1,09
ANGRA DOS REIS	GNAISSE	1,08
ILHA GRANDE	CAS.CALHO (SILEX)	1,08
USINA DE BENEF URANIO	FONOLITO	1,07
BOA ESPERANÇA	GNAISSE	1,06
ILHA GRANDE	BASALTO	1,06
ESTREITO	QUARTZITO	1,05
TUCURUI	META GRAU-VAQUE	1,05
TUCURUI	BASALTO	1,03
ITUMBIARA	BASALTO	1,03
ITAIPU	BASALTO	1,03
ITUMBIARA	ANFIBOLIO GNAISSE	1,01
BALSAS MINEIRO	CASCALHO (QUARTZO)	1,00
ANGRA [illegible]	HEMATITA	0,99
NOVA AVANHANDAVA	BASALTO	0,99
TRÊS IRMÃOS	BASALTO	0,96
PORTO PRIMAVERA	CASCALHO (QUARTZITO)	0,96
TAQUARUÇU	BASALTO	0,95

Figura 7.140 — Calor específico de concretos confeccionados com agregados de diferentes mineralogias

A influência do grau de saturação do concreto foi estudada por David Whiting et All [7.92] e os resultados são mostrados na figura 7.141.

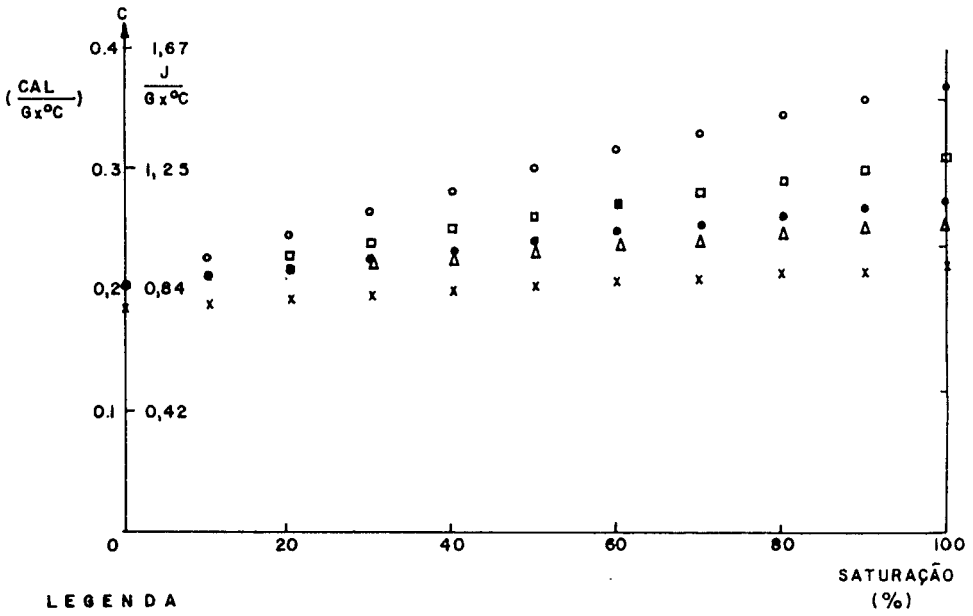
Esses resultados indicaram que o calor específico do concreto cresce com a absorção e com o seu grau de saturação, de acordo com a expressão (VII-XXIV).

$$C = \frac{C\,sss + \gamma\,(y - 1)}{1 + \gamma\,(y - 1)} \qquad \text{(VII-XXIV) onde}$$

C = calor específico do concreto, para qualquer teor de umidade.
C sss = calor específico do concreto, na condição saturado superfície seca
γ = teor de umidade do concreto na condição saturado superfície seca (absorção).
y = teor de umidade do concreto expresso como uma fração do valor da absorção.

A influência do tamanho máximo do agregado, relação água/cimento, teor de ar incorporado e temperatura de ensaio foram estudadas em Itaipu e Itumbiara [7.90] e os resultados são mostrados na figura 7.142.

Nota-se pelos resultados obtidos que com exceção da temperatura, que provoca um crescimento sistemático do calor específico com o seu aumento, a influência dos demais fatores, dentro dos limites normais de dosagens de concretos, é praticamente nula.



LEGENDA

MISTURA	SIMBOLOGIA	ABSORÇÃO (%)	TIPO DE AGREGADO
1	X	4,8	CASCALHO E AREIA NATURAL
2	Δ	6,8	BRITA E AREIA DE DOLOMITA BRITADA
3	•	9,4	ARGILA EXPANDIDA E AREIA NATURAL
4	□	13,3	MIUDO E GRAÚDO DE ARGILA EXPANDIDA
5	○	21,3	ISOPOR

Figura 7.141 — Influência do grau de saturação do concreto e absorção do agregado no calor específico do concreto [7.92]

MISTURA Nº	Ø MAX AGREG.(mm)	FATOR A/C	PASTA (KG/M³)	AREIA NATURAL (KG/M³)	AREIA DE BASALTO (KG/M³)	AGREGADO GRAÚDO (KG/M³)	AR INCORPORADO (%)	CALOR ESPECÍFICO C - J/G x °C (CONCRETO SATURADO) TEMPERATURA DE ENSAIO (°C)								
								20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
1	38	0,43	444	200	515	1330	4,8	-	1.05	-	-	1.06		1.08	-	-	-
2	76	0,45	444	147	372	1546	2.7	-	-	1.03		1.08		1.1		1.11	-
3	76	0,52	297	207	531	1531	5.8		1.02					1.05			-
4	76	0.35	390	181	409	1546	6.8			1.04		1.07		1.11		1.13	-
5	152	0,44	356	137	342	1783	5.8			1.04		1.08		1.12			
6	152	0,60	231	157	402	1822	8.5		1.03		1.05			1.1			
7	152	0,85	193	178	416	1837	7.5		0.95		0,96			0,99		1.00	

Figura 7.142 — Resultados de ensaios de calor específico de concretos (mesmo tipo de agregado) em função da temperatura de ensaio, diâmetro máximo do agregado, fator água/cimento e teor de ar incorporado

7.9.3 Condutividade térmica

7.9.3.1 Conceito

A condutividade térmica é a propriedade que mede a habilidade (facilidade) do material para conduzir calor, sendo definida como a razão do fluxo de calor para um gradiente de temperatura. Ela é medida em joules por segundo por metro quadrado de área, quando há uma diferença de temperatura de 1°C em uma espessura de 1 m do material [7.93].

A equação básica de escoamento unidirecional de calor por condução é a de Fourier [7.94] de acordo com a fórmula VII-XXV.

$$\frac{dQ}{d\theta} = -K_t A \frac{dt}{dx} \qquad \text{(VII-XXV) onde}$$

$\frac{dQ}{d\theta}$ = a razão instantânea de transmissão

$\frac{dt}{dx}$ = gradiente de temperatura medido na direção da propagação do calor

K_t = coeficiente de condutividade térmica

A = área da seção normal à direção de transmissão de calor

Para escoamento do calor em regime permanente, a temperatura em um dado ponto é independente do tempo e nesse caso a fórmula (VII-XXV) pode ser simplificada para a fórmula (VII-XXVI).

$$q = -K_t A \frac{dt}{dx} \qquad \text{(VII-XXVI)}$$

7.9.3.2 Método de ensaio

A determinação da condutividade do concreto é feita normalmente em corpos de prova cilíndricos com um furo central ao longo de seu eixo.

Através de um sistema de aquecimento na parte interior do corpo de prova e de um banho de água à temperatura constante na parte externa, é mantido um gradiente de temperatura que provoca um fluxo de calor através do concreto.

Para que esse fluxo seja unidirecional, os topos do corpos de provas são isolados termicamente [7.95].

7.9.3.2.1 Aparelhos

— Termômetros com precisão de 0,05 °C para medida das temperaturas interna e externa ao corpo de provas

— Sistema de três tanques para aquecimento, controle de temperatura e circulação da água, no qual fica imerso o corpo de provas durante o ensaio. A figura 7.143 mostra um esquema desse sistema de tanques e, detalhadamente, o tanque de ensaios

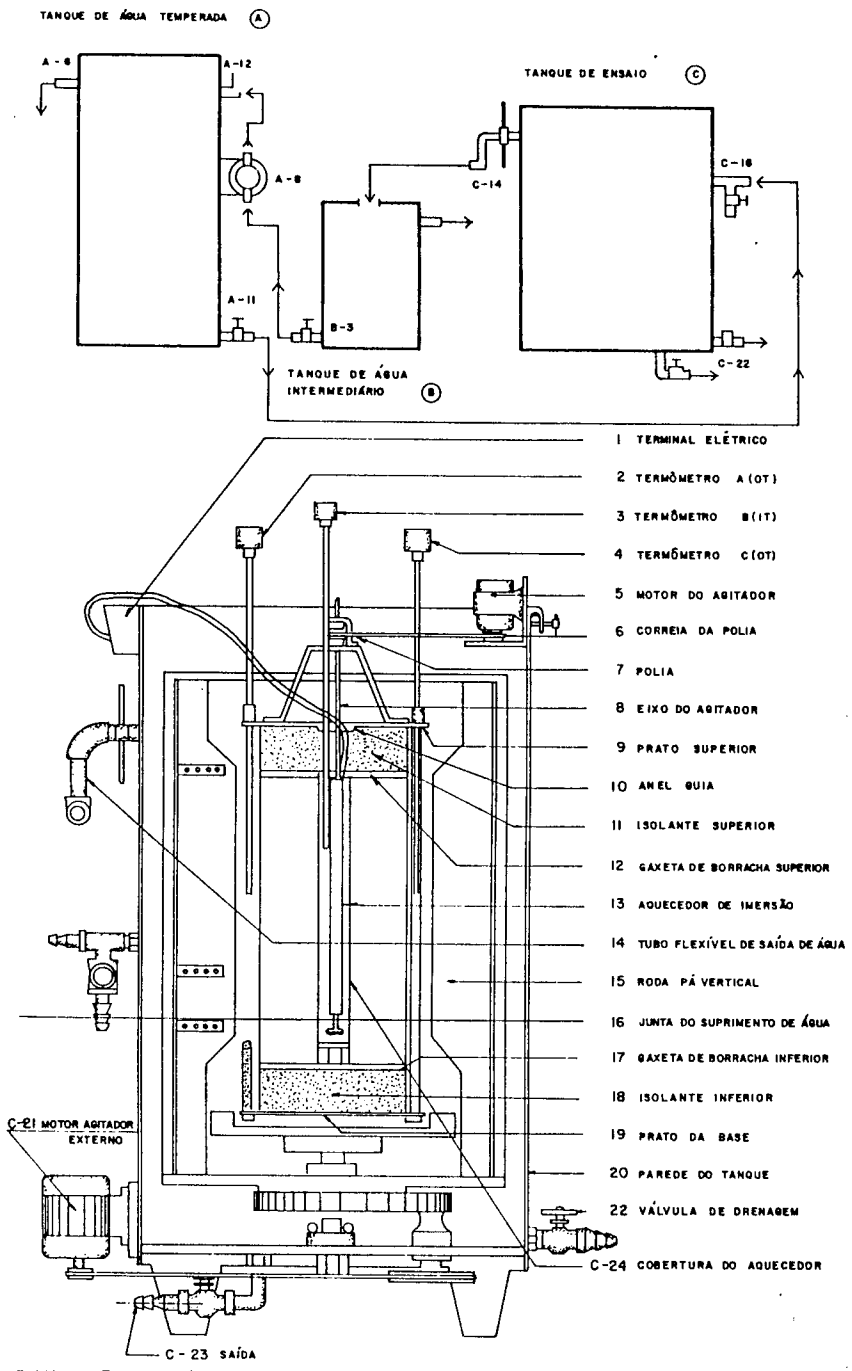


Figura 7.143 — Esquema dos equipamentos usados na determinação da condutividade térmica do concreto

— Aparelho para fornecimento e medida de energia ao interior do corpo de prova e controle da temperatura da água externa ao mesmo. A figura 7.144 mostra um conjunto completo para ensaio de condutividade.

7.9.3.2.2 Procedimentos de ensaios

A preparação do corpo de provas para o ensaio consiste, basicamente, em se isolar termicamente a base e o topo do mesmo, após saturação por um período de 48 horas e instalar o termômetro, aquecedor e agitador no furo central e completar o furo com água.

Complementarmente é feita a vedação desse furo para impedir trocas da água exterior com a do interior ao furo. Um corpo de provas preparado para colocação no tanque de ensaios é mostrado na figura 7.145.

Após a colocação do corpo de provas no tanque de ensaio, a determinação da condutividade térmica é feita mantendo-se um fluxo de calor do interior para o exterior, através de uma diferença de temperatura entre esses dois pontos, da ordem de 40°C.

O ensaio é dividido em duas etapas:

Na primeira etapa, com duração aproximada de 30 minutos, aquece-se a água do banho externo até a temperatura desejada quando então, com auxílio de um sistema automático de controle, a mesma é mantida constante pelos aquecedores instalados no tanque de água "temperada" ((ver figura 7.144). A temperatura do centro do corpo de prova é conseguida através do aquecedor instalado no mesmo.

Em paralelo à fase de aquecimento os sistemas de circulação e homogeneização das águas interna e externa ao corpo de provas já estão ligados.

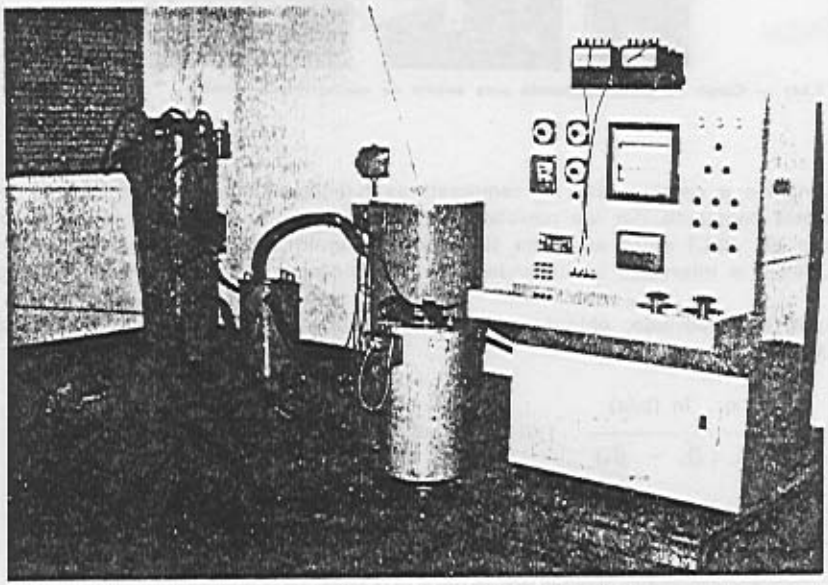


Figura 7.144 — Equipamentos para ensaio de condutividade térmica do concreto



Figura 7.145 — Corpo de prova preparado para ensaio de condutividade térmica

Atingidas e estabilizadas as temperaturas fixadas, inicia-se o ensaio que consiste em manter constante, por um período de aproximadamente 2 horas, a diferença de temperatura ($\cong$ 40°C) entre as faces (interna e externa) do corpo de provas. Neste período, lê-se, a intervalos aproximados de 10 minutos, a quantidade de calor que está

Após esse período, obtém-se a condutividade térmica do concreto pela fórmula (VII-XXVII).

$$K_t = \frac{q \cdot \ln (b/a)}{2\pi L (\theta_a - \theta_b)} \quad \text{(VII-XXVII) onde}$$

K_t = condutividade térmica
q = quantidade de calor fornecida ao corpo de prova
a = raio do furo do corpo de prova
b = raio do corpo de prova
L = comprimento (altura) do corpo de prova

θ_a = temperatura interna do corpo de prova

θ_b = temperatura externa do corpo de prova

Na consideração da quantidade de calor fornecida ao corpo de provas (q) deve-se levar em conta o calor fornecido pelo agitador interno e o calor perdido. Esses parâmetros são obtidos por ensaios prévios de aferição do sistema.

7.9.3.3 Fatores que influenciam

A condutividade térmica dos concretos é grandemente influenciada pelas características mineralógicas e quantidade dos agregados que o compõem e pelo seu grau de saturação. Nos concretos com agregados leves [7.91], a influência do grau de saturação se torna mais pronunciada, em razão da grande diferença das condutividades térmicas do ar e da água.

A figura 7.146 mostra que concretos de composições semelhantes podem ter alterado em até 100% o seu valor de condutividade em função da composição mineralógica do agregado usado.

Como a condutividade da pasta de cimento é da ordem de:

$5{,}7 \dfrac{J}{cm.s.°C}$ ($1{,}2 \dfrac{cal}{cm.s.°C}$), a influência da quantidade de agregado na mistura (diâmetro máximo do agregado) aumenta com a condutividade térmica do próprio agregado.

Dentro de condições consideradas como normais para utilização do concreto, a temperatura tem pouca influência na condutividade térmica, conforme resultados de ensaios feitos em Itaipu [7.96], mostrados na figura 7.147.

Nota-se, nesse caso, a pequena influência do diâmetro máximo do agregado na condutividade térmica do concreto, em razão da baixa condutividade do agregado (basalto) usado.

A massa específica do concreto tem também pouca influência na condutividade térmica do mesmo.

A partir do conhecimento do valor da condutividade térmica do calor específico e da massa específica do concreto obtém-se a difusividade térmica do concreto, que representa a velocidade em que ocorrem variações de temperatura de uma massa, e é calculada pela fórmula (VII-XXVIII).

$$h^2 = \frac{K_t}{\gamma\, C} \qquad \text{(VII-XXVIII) onde}$$

K_t = condutividade térmica

C = calor específico

γ = massa específica

h^2 = difusividade térmica

Desta expressão conclui-se que a difusividade térmica é influenciada por todos os fatores que exercem influência nas demais propriedades que a ela se relacionam.

OBRA	AGREGADO	CONDUTIVIDADE (K) $(\frac{J}{cmS\,^{o}C})_{x10^{-3}}$
ESTREITO	QUARTZITO	56,2
BALSAS MINEIRO	CASCALHO (QUARTZO)	51,0
ILHA GRANDE	CASCALHO SILEX	44,7
ANGRA DOS REIS	HERMATITA	44,0
SUBESTAÇÃO DE ITABERA	CALCARIO	39,2
BOA ESPERANÇA	GNAISSE	35,7
PORTO PRIMAVERA	CASCALHO (QUARTZITO)	35,1
TUCURUI	METAGRAU-VAQUE	34,8
ITUMBIARA	QUARTZITO	32,0
ITUMBIARA	ANFIBOLIO GNAISSE	32,0
TUCURUI	BASALTO	27,1
ILHA GRANDE	BASALTO	25,8
USINA DE BENEF. URANIO	FONOLITO	23,3
TAQUARUÇU	BASALTO	20,2
NOVA AVANHANDAVA	BASALTO	19,3
ITUMBIARA	BASALTO	19,3
ITAIPÚ	BASALTO	19,2
TRÊS IRMÃOS	BASALTO	17,1

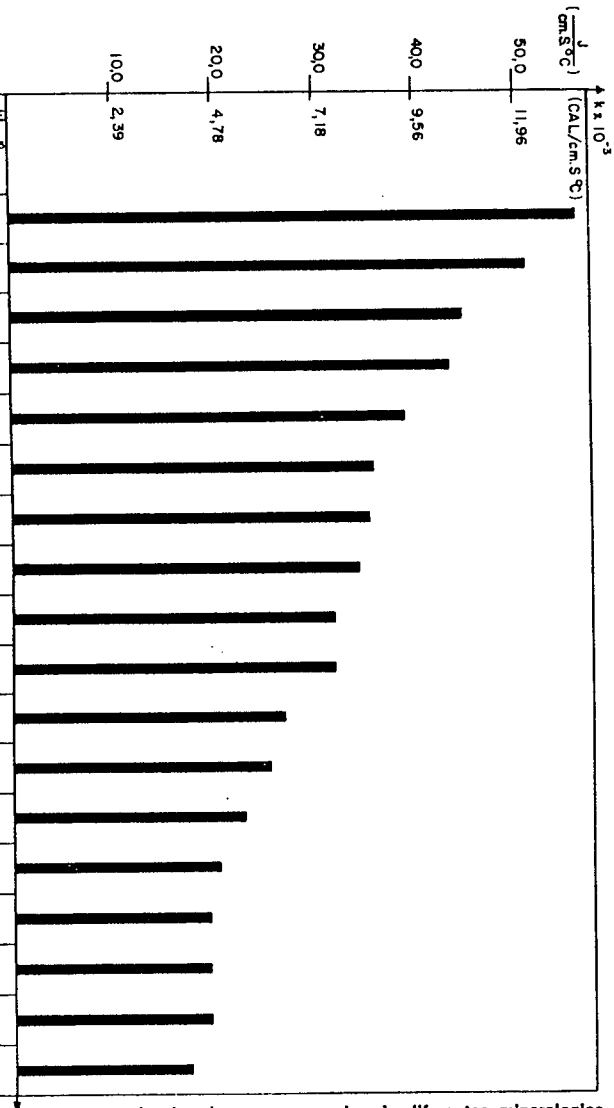


Figura 7.146 — Condutividade térmica de concretos confeccionados com agregados de diferentes mineralogias

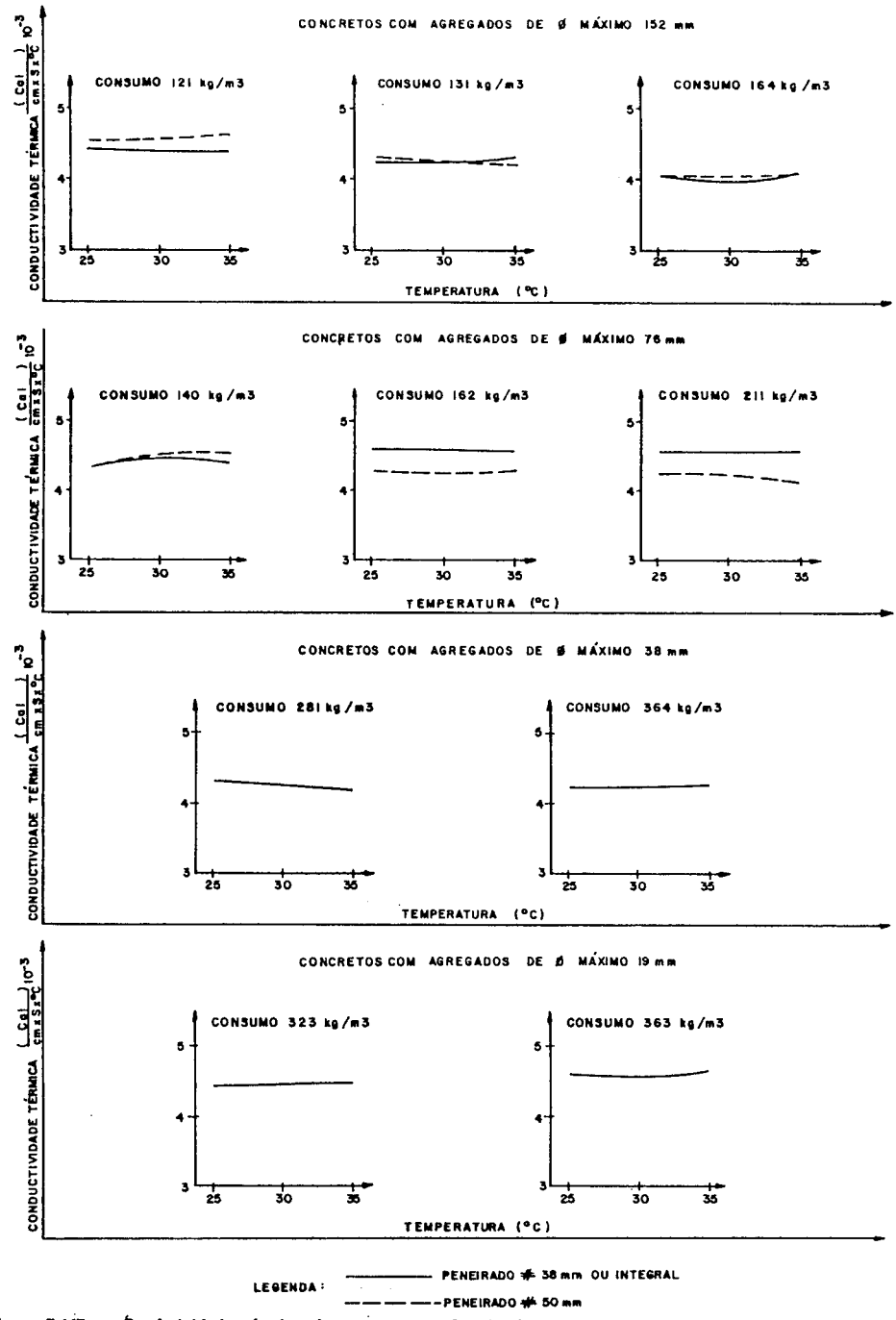


Figura 7.147 — Condutividade térmica do concreto em função da temperatura de ensaio e diâmetro máximo do agregado [7.96]

7.9.4 Elevação adiabática de temperatura

7.9.4.1 Conceito

Um corpo é considerado em condição adiabática quando não há trocas de calor entre ele e o ambiente que o envolve. A hidratação do cimento, sendo uma reação química exotérmica, provoca liberação de calor. Nesse sentido, a elevação adiabática da temperatura do concreto é conceituada como sendo a diferença entre a temperatura máxima que a massa de concreto atinge, menos a temperatura da mistura dos vários ingredientes, diferença esta provocada unicamente pelo calor gerado pela hidratação do aglomerante, sem trocas com o meio ambiente.

7.9.4.2 Método de ensaio

O método para determinação da evolução adiabática de temperatura do concreto consiste em controlar a temperatura de uma câmara, dentro da qual fica o concreto em ensaio, de tal forma que a temperatura dessa câmara seja sempre "igual" (com diferença máxima de 0,05°C) à do concreto em hidratação, determinando-se a curva de evolução de temperatura dessa massa [7.97], [7.98] e [7.99].

7.9.4.2.1 Equipamentos

Os equipamentos empregados na determinação da evolução adiabática de temperatura do concreto são constituídos, basicamente, de um calorímetro composto por duas câmaras climatizadas e um painel de controle e medição de temperatura.

As câmaras são em número de duas, uma externa e outra interna à primeira, construídas com paredes de material isolante.

No interior da câmara interna, que é o calorímetro propriamente dito, fica situado o corpo de prova durante o ensaio. A câmara externa tem a finalidade básica de auxiliar o isolamento do calorímetro do meio ambiente, evitando trocas de calor e absorver o calor gerado pelos equipamentos de circulação do ar das câmaras. Ambas as câmaras estão ligadas a um sistema de refrigeração e aquecimento. Esses sistemas são independentes para cada câmara e permitem variar as temperaturas em seus interiores de 0 a 70°C. As portas das câmaras interna e externa são do tipo frigorífico.

As câmaras são equipadas com sistemas distribuidores de calor, de tal forma a manter em todos os pontos das mesmas, diferenças de temperatura não maiores que 0,5°C.

O painel de controle dos equipamentos de ensaios é composto de:

— Registrador gráfico para registro contínuo de temperaturas de 0 a 75°C.
— Ponte termométrica para leitura de termômetros, com precisão de 0,025°C.
— Controladores automáticos de temperatura com a finalidade de acionar o sistema de climatização das câmaras interna e externa, de tal forma que a câmara interna apresente a mesma temperatura do corpo de prova em ensaio, com diferença máxima de $\pm$ 0,05°C.
— Caixa seletora para varredura dos diversos canais, sendo cada canal ligado a um único termômetro.
— Termômetros com sensores para a medição das temperaturas do concreto e câmaras interna e externa com precisão mínima de 0,01°C.

Na figura 7.148 é mostrado o sistema de ensaios para determinação da elevação adiabática da temperatura do concreto do laboratório de Itaipu, notando-se o painel de controle, as câmaras e em primeiro plano o molde para colocação do concreto.

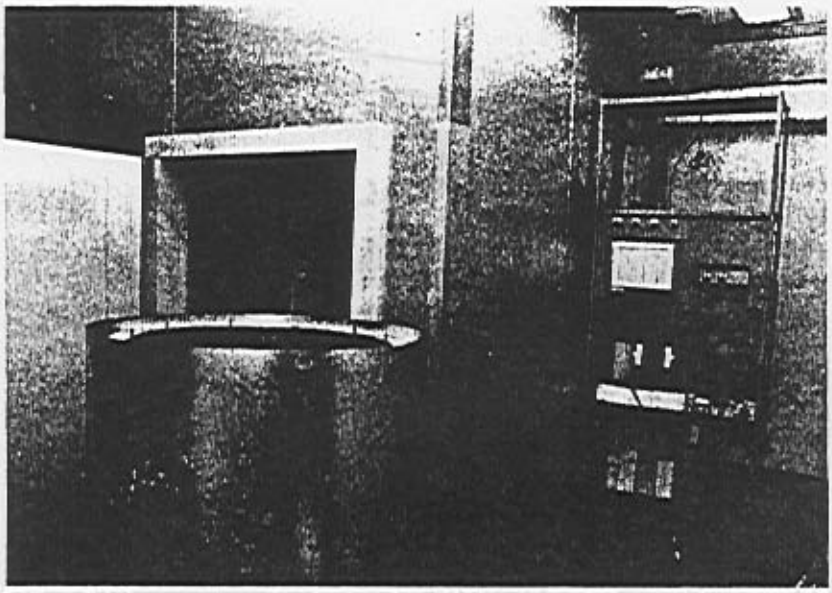


Figura 7.148 — Calorímetro para ensaios de elevação adiabática de temperatura — Lab. de concreto da Itaipu Binacional [7.96]

As figuras 7.149 a 7.151 mostram os painéis de controle dos laboratórios da Universidade de Berkeley (USA), Itaipu e Ilha Solteira (Cesp).

No calorímetro da Cesp (Ilha Solteira) adota-se um sistema diferente dos demais, no que se refere ao ambiente externo do corpo de prova. Naquele caso, o corpo de prova fica imerso em água, o que exige cuidados adicionais no sistema de vedação do molde.

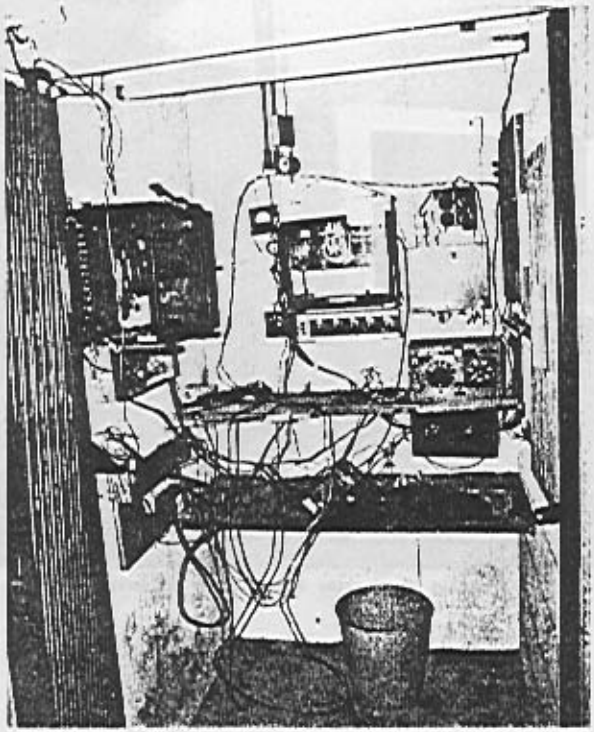


Figura 7.149 — Painel de controle do calorímetro para ensaios de elevação adiabática — Universidade de Berkeley — U.S.A.

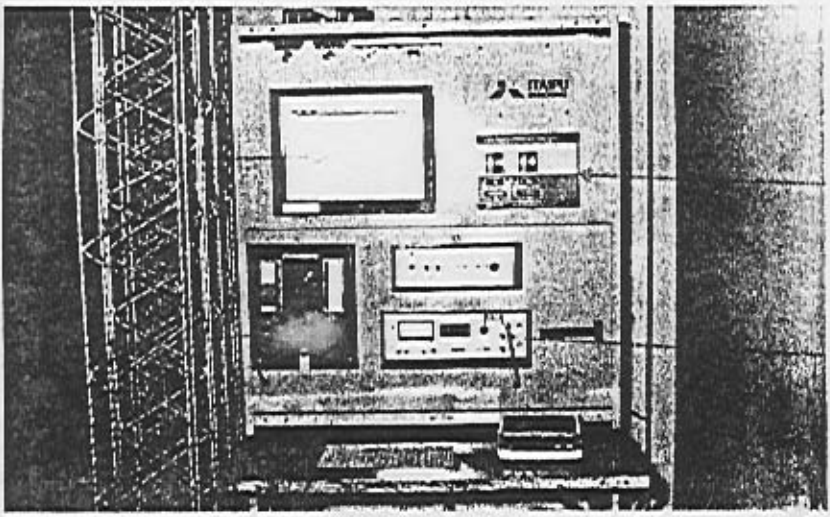


Figura 7.150 — Painel de controle do calorímetro para ensaios de elevação adiabática — Itaipu Binacional

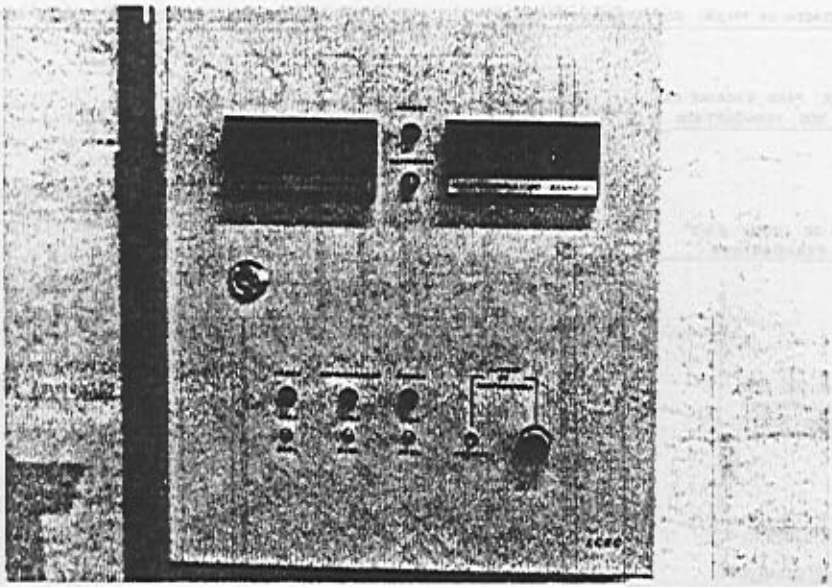


Figura 7.151 — Painel de controle do calorímetro para ensaios de elevação adiabática — Cesp — Ilha Solteira. Observa-se igualdade das temperaturas do concreto e do ambiente

7.9.4.2.2 Procedimentos de ensaio

O corpo de prova para ensaios de elevação adiabática de temperatura deve ter dimensões suficientes para um volume de concreto de no mínimo 0,3 m³ [7.97] e ser, de preferência, tronco cônico, de base e altura iguais, para facilitar a distribuição do calor ao seu redor e a desmoldagem.

Embora o ambiente seja controlado para ter temperatura igual à do concreto, aconselha-se um sistema de isolamento do próprio molde, para aumentar a precisão do ensaio.

Os termômetros instalados no interior do concreto devem fornecer informações da temperatura em vários pontos da massa e ao redor do molde.

A figura 7.152 ilustra um molde para ensaios de elevação adiabática e a distribuição de termômetros no concreto ao seu redor.

O termômetro do centro do corpo de prova e um dos termômetros instalados na superfície externa do molde são ligados diretamente ao controlador automático, para fazer o balanceamento da temperatura da câmara interna através da temperatura do concreto.

Um dos termômetros localizados entre o centro e a borda do corpo de prova é usado para leituras e cálculo de elevação adiabática de temperatura do concreto.

Os demais termômetros instalados tanto no corpo de prova quanto nas câmaras interna e externa fornecem informações relativas à uniformidade de distribuição de calor no sistema de ensaios.

Fixada a temperatura para início de ensaio, as câmaras são refrigeradas para aquela temperatura e o concreto betonado não deve apresentar temperatura com diferença maior que ± 1°C da fixada.

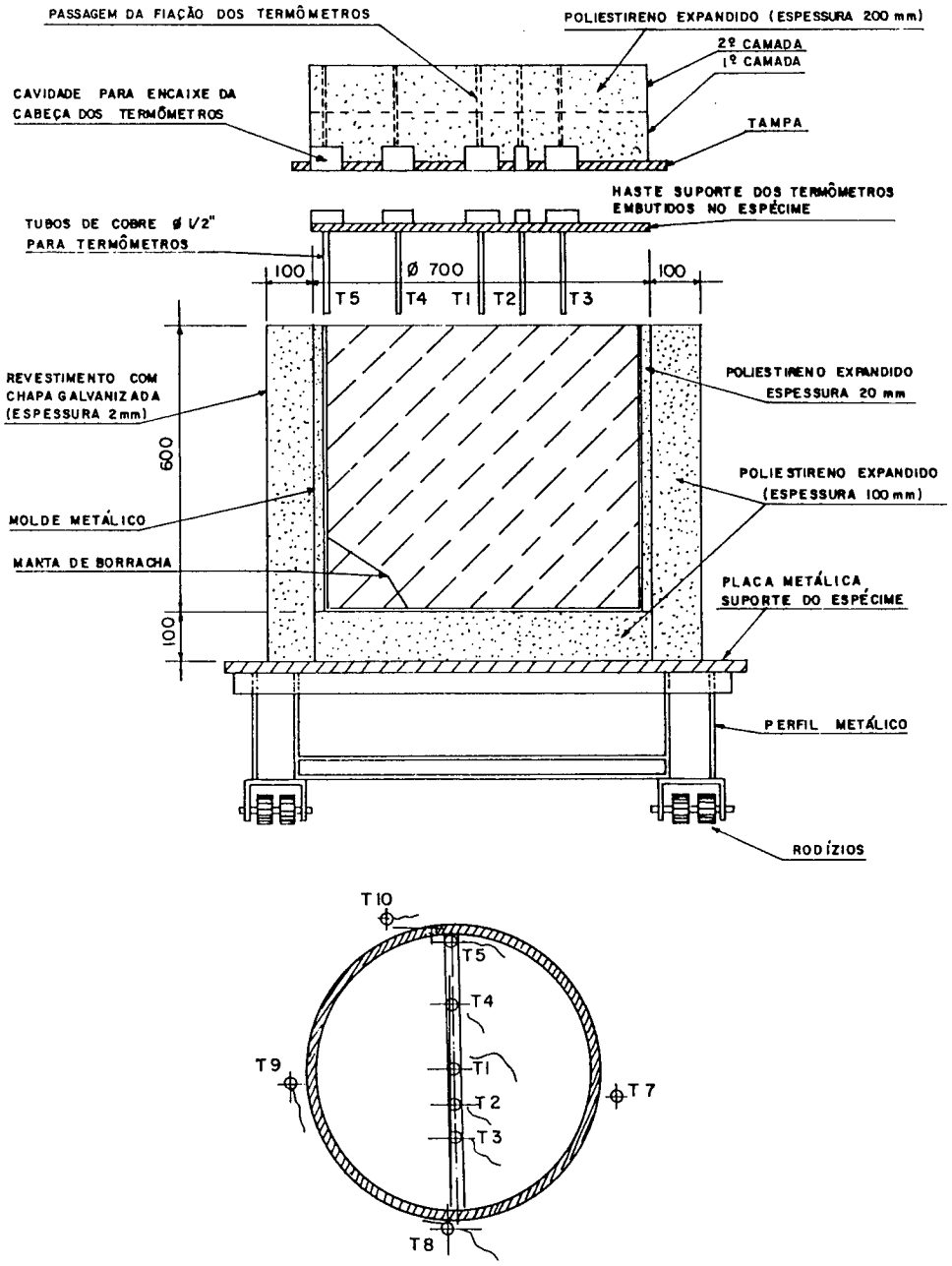


Figura 7.152 — Ilustração esquemática de um molde e distribuição de termômetros para ensaio de elevação adiabática de temperatura

O lançamento e adensamento do concreto na fôrma deve ser feito dentro do próprio calorímetro. Após moldar e isolar o topo do corpo de prova o sistema automático de controle de temperatura se encarrega de fazer o ajuste final da temperatura da câmara interna com a do concreto.

Considera-se como início de ensaio a temperatura do concreto no instante em que essa não diferir mais que 0,05°C da temperatura do ambiente que o envolve (câmara interna).

As figuras 7.153 a 7.155, mostram a moldagem e preparação do corpo de prova para início do ensaio.

As leituras das temperaturas para traçado da curva da elevação adiabática do concreto são tomadas a cada 15 minutos durante as primeiras 24 horas do ensaio, a cada 30 minutos no 2.° e 3.° dias e horária até a fase final do ensaio que vai, em geral, até 28 dias, idade em que o cimento já liberou mais de 90% do calor de hidratação e portanto a temperatura do concreto já está praticamente estabilizada.

7.9.4.3 Fatores que influenciam

A elevação adiabática de temperatura do concreto pode ser determinada através do correlacionamento de propriedades térmicas dos materiais que o compõem e de propriedades do próprio concreto, de acordo com a fórmula (VII-XXIX).

$$\Delta\theta = \frac{C_a \cdot H}{C \cdot \gamma} \qquad \text{(VII-XXIX) onde}$$

$\Delta\theta$ = Elevação adiabática de temperatura (°C)
C_a = Consumo de aglomerante (kg/m³)
H = Calor de hidratação do aglomerante ($\frac{J}{g}$)
C = Calor específico do concreto (J/g . °C)
γ = Massa específica do concreto (kg/m³)

Fica evidente que a elevação adiabática do concreto é diretamente proporcional ao consumo e calor de hidratação do aglomerante usado e inversamente proporcional ao calor específico e à massa específica do concreto.

A influência da variação do calor específico passa, no entanto, a ser desprezível em função dos seguintes parâmetros:

— O principal elemento de influência sobre o valor do calor específico é o grau de saturação do concreto e este fator não é variável na elevação adiabática do concreto em função das próprias características do ensaio (início do ensaio com o concreto ainda fresco e prosseguimento até o final sem perdas de umidade).

— A influência do tipo de agregado no calor específico é da ordem de no máximo 10% e menor em comparação com a influência do consumo e calor de hidratação do aglomerante. Deste fato, conclui-se também que a influência do tipo de agregado é pequena na elevação adiabática do concreto.

— A influência da massa específica está mais relacionada, para concretos confeccionados com agregados normais (excluídos os agregados leves e pesados), com o diâmetro máximo do agregado usado do que ao tipo de agregado.

— Este elemento de influência está no entanto interligado ao consumo de aglomerantes já que para concretos de mesma resistência e trabalhabilidade o aumento do diâmetro máximo do agregado é seguido de uma queda no consumo de aglomerante necessário.

Conclui-se que os elementos que têm influência marcante na elevação adiabática do concreto são o tipo e a quantidade de aglomerante.

Conforme mostrado no item 3.2, os compostos principais do cimento (C_3S, C_2S, C_4AF e C_3A) liberam quantidades diferentes de calor durante as reações de hidratação. Portanto a quantidade de calor liberada, responsável pela elevação adiabática de temperatura, está diretamente ligada à composição química do cimento usado.

A figura 7.156 [7.100] mostra resultados de ensaios de elevação adiabática de temperatura de uma mesma mistura na qual foram usados cimentos de diferentes composições químicas.

A finura do cimento tem influência apenas na velocidade de desenvolvimento das reações e não no valor final da quantidade de calor gerado. Desse fato decorre que as curvas de elevação adiabática de temperatura podem ter desenvolvimentos iniciais diferenciados quando o cimento usado apresenta finuras diferentes.

O uso de materiais pozolânicos tem influência marcante tanto no desenvolvimento da curva de elevação adiabática da temperatura do concreto quanto no valor final dessa propriedade. Embora usados como produtos para combater os efeitos das reações dos álcalis do cimento (Na_2O e K_2O) com certos tipos de agregados, o emprego das pozolanas tem se generalizado também como elemento de redução de picos térmicos em estruturas de caráter massivo.

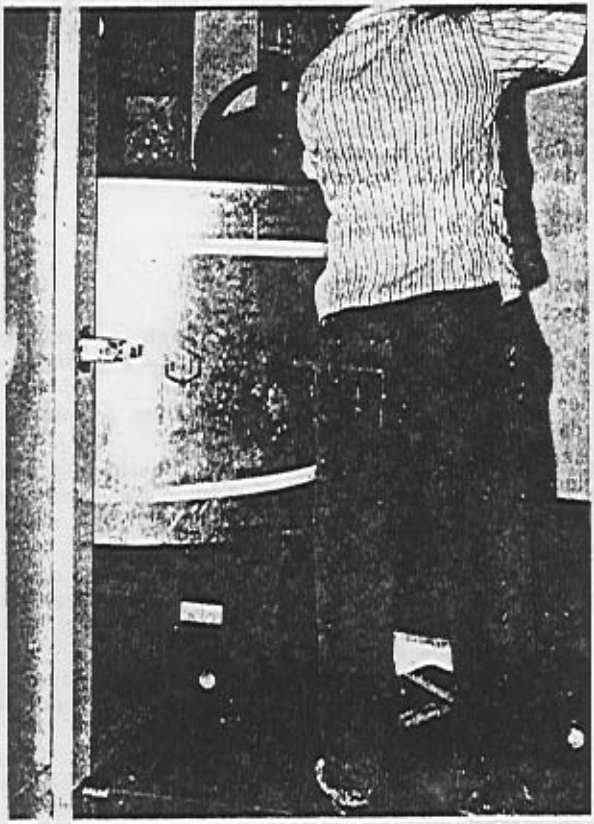


Figura 7.153 — Lançamento do concreto no molde já colocado dentro do calorímetro

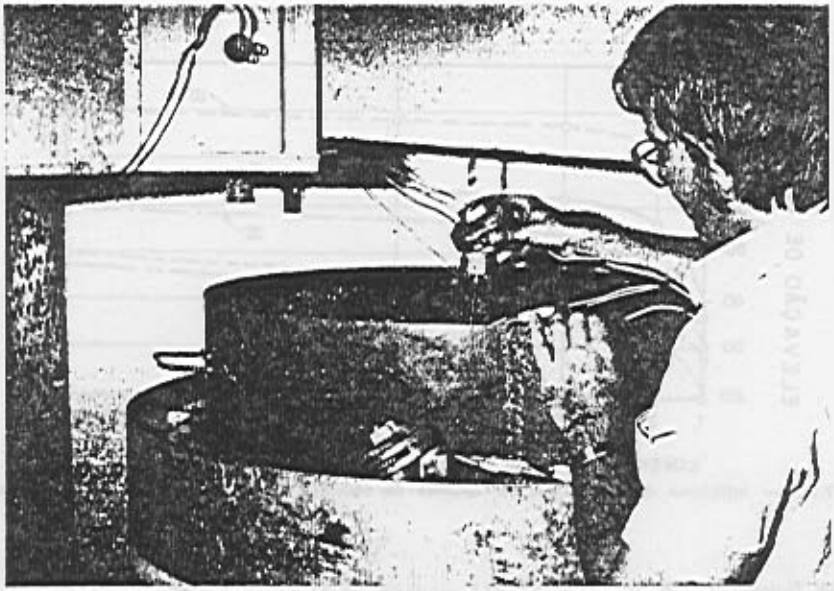


Figura 7.154 — Instalação de termômetros no concreto

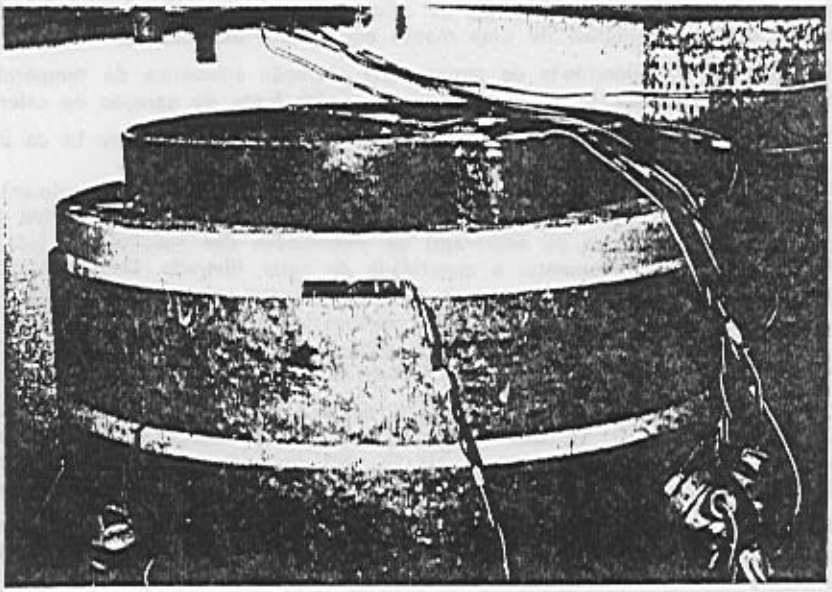


Figura 7.155 — Isolamento final do molde observando-se ainda os termômetros externos ao mesmo, para controle da temperatura ambiente

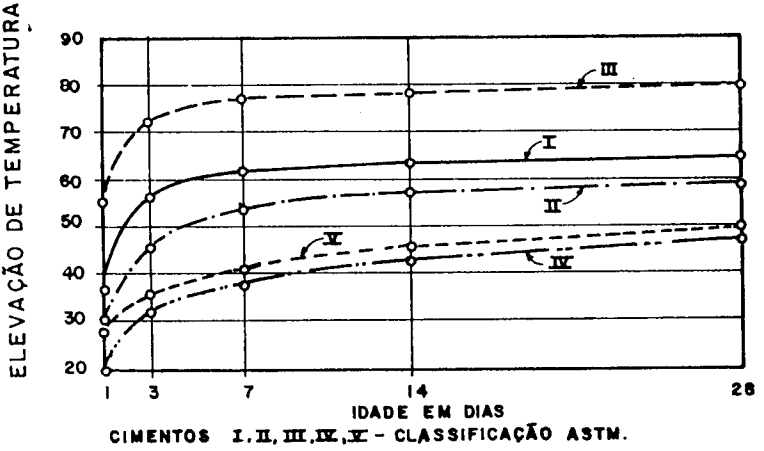


Figura 7.156 — Influência da composição do cimento na elevação adiabática da temperatura do concreto

As figuras 7.157 e 7.158 [7.101] evidenciam que a substituição de parte do cimento por materiais pozolânicos provoca uma queda acentuada tanto na velocidade de subida da temperatura do concreto quanto no valor final da temperatura. Estes comportamentos são explicados em primeiro lugar porque os materiais pozolânicos reagem com um subproduto (hidróxido de cálcio) de hidratação do cimento e, portanto, em idades mais avançadas; em segundo lugar, porque o calor gerado pela reação dos materiais pozolânicos com o hidróxido de cálcio é menor (cerca de 50%) [7.96] que o gerado pelos componentes de uma massa equivalente de cimento.

A influência da quantidade de cimento na elevação adiabática de temperatura é por si só auto-explicativa, já que o cimento é a única fonte de geração de calor.

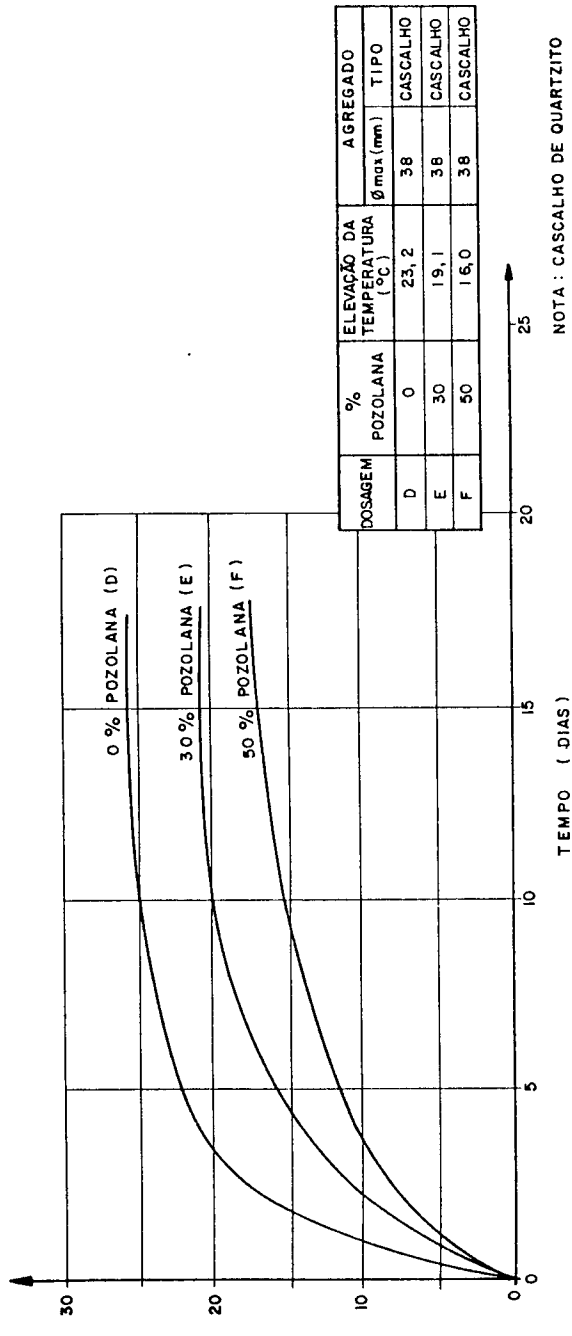
A figura 7.159 [7.96] mostra a influência da quantidade de cimento (e da porcentagem de material pozolânico) na elevação adiabática de temperatura.

Aditivos retardadores e aceleradores de pega têm influência principalmente nas velocidades de elevação de temperatura do concreto nas primeiras idades, já que nessas idades modificam (retardam ou aceleram) as velocidades das reações de hidratação do cimento e, consequentemente, a quantidade de calor liberado. Dentro desse contexto, a temperatura de início de ensaio pode ser considerada como um "aditivo", já que temperaturas baixas provocam um retardamento nas reações do cimento, sendo que à medida que a temperatura de betonagem do concreto aumenta, as velocidades das reações são também maiores, conforme pode ser verificado pela figura 7.160 [7.96].

Dentro desse campo, tem-se procurado aditivos com finalidades específicas de retardamento da liberação de calor do cimento. O uso de amônia com essa finalidade foi pesquisado no Brasil por Pacelli Et Alli [7.102]. Segundo os autores ,os primeiros trabalhos nesse campo foram desenvolvidos por engenheiros russos e canadenses.

As principais conclusões dos autores, que não se limitaram a ensaios de elevação adiabática, mas incluíram também ensaios sobre as propriedades mecânicas e elásticas do concreto, foram:

"A amônia, atuando como retardador da liberação de calor do concreto reduz, substancialmente, a elevação da temperatura do mesmo como mostrado na figura 7.161."



DOSAGEM	% POZOLANA	ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA (°C)	AGREGADO	
			Ø max (mm)	TIPO
D	0	23,2	38	CASCALHO
E	30	19,1	38	CASCALHO
F	50	16,0	38	CASCALHO

Figura 7.157 — Influência do uso de material pozolânico (argila calcinada) na elevação adiabática de temperatura do concreto

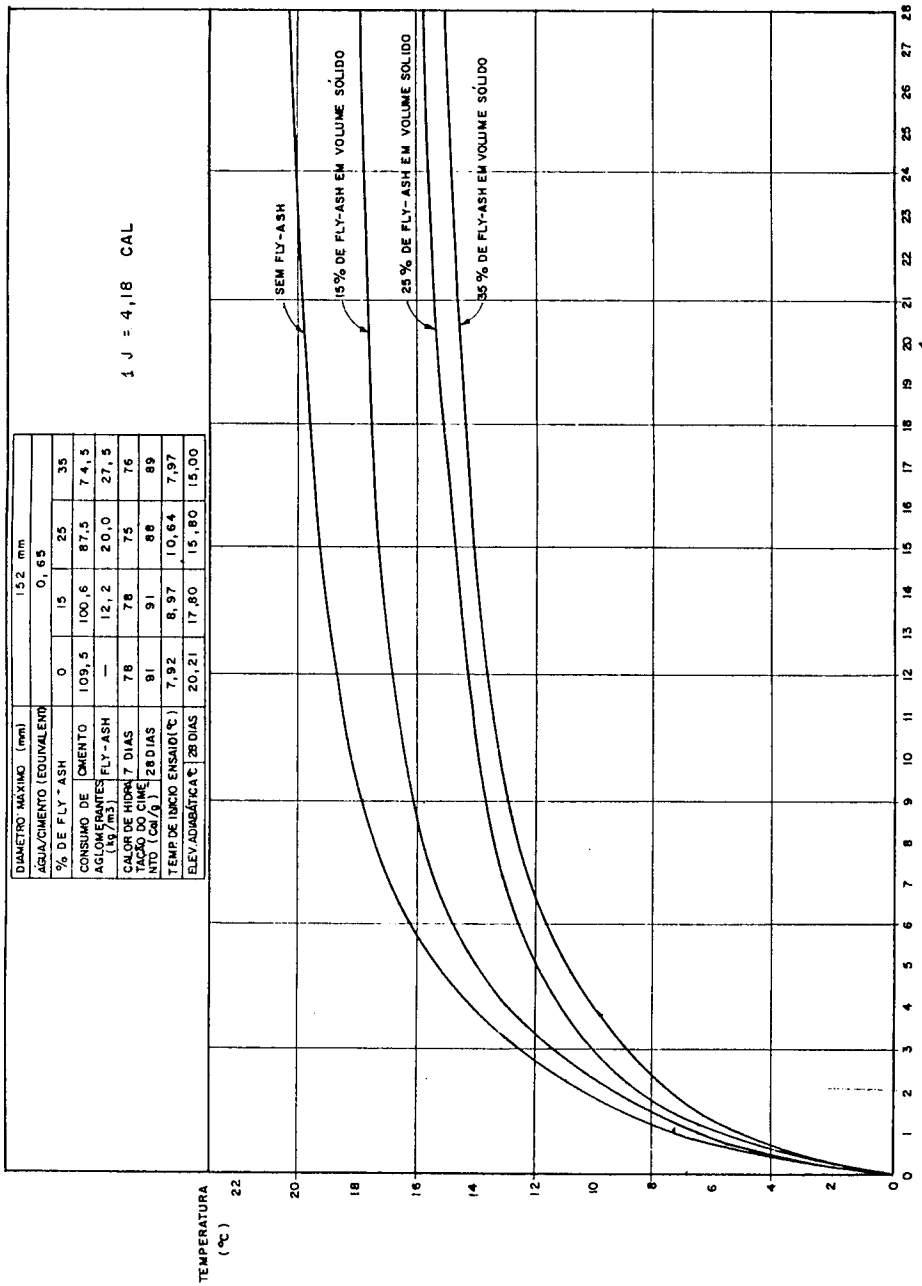
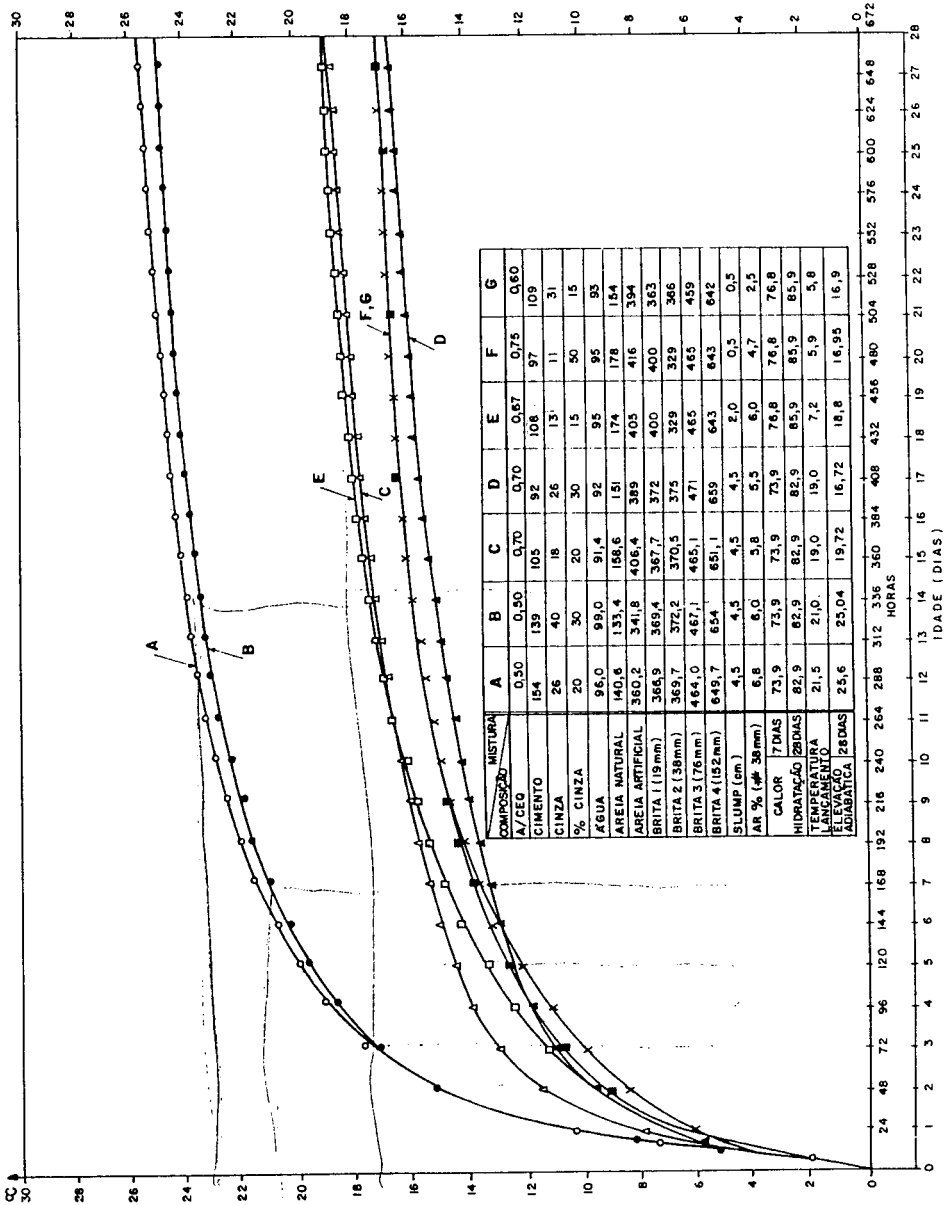


Figura 7.158 — Influência do uso de material pozolânico (Fly ASH) na elevação adiabática de temperatura do concreto



MISTURA / COMPOSIÇÃO	A	B	C	D	E	F	G
A/CEQ	0,50	0,50	0,70	0,70	0,67	0,75	0,60
CIMENTO	154	139	105	92	108	97	109
CINZA	26	40	18	26	13	11	31
% CINZA	20	30	20	30	15	50	15
ÁGUA	96,0	99,0	91,4	92	95	95	93
AREIA NATURAL	140,6	133,4	156,6	151	174	178	154
AREIA ARTIFICIAL	360,2	341,8	406,4	389	405	416	394
BRITA 1 (19mm)	366,9	369,4	367,7	372	400	400	363
BRITA 2 (38mm)	369,7	372,2	370,5	375	329	329	366
BRITA 3 (76mm)	464,0	467,1	465,1	471	465	465	459
BRITA 4 (152mm)	649,7	654	651,1	659	643	643	642
SLUMP (cm)	4,5	4,5	4,5	4,5	2,0	0,5	0,5
AR % (# 38mm)	6,8	6,0	3,8	5,5	6,0	4,7	2,5
CALOR 7 DIAS	73,9	73,9	73,9	73,9	76,8	76,8	76,8
HIDRATAÇÃO 28 DIAS	82,9	82,9	82,9	82,9	85,9	85,9	85,9
TEMPERATURA LANÇAMENTO	21,5	21,0	19,0	19,0	7,2	5,9	5,8
ELEVAÇÃO ADIABÁTICA 28 DIAS	25,6	25,04	19,72	16,72	18,8	16,95	16,9

Figura 7.159 — Influência da relação água/cimento (consumo) na elevação adiabática de temperatura do concreto

MISTURA	TEMPERATURA INICIAL (°C)
76 F 03	8,23
76 H 04	8,23
152 E 03	6,49
152 G 01	7,18

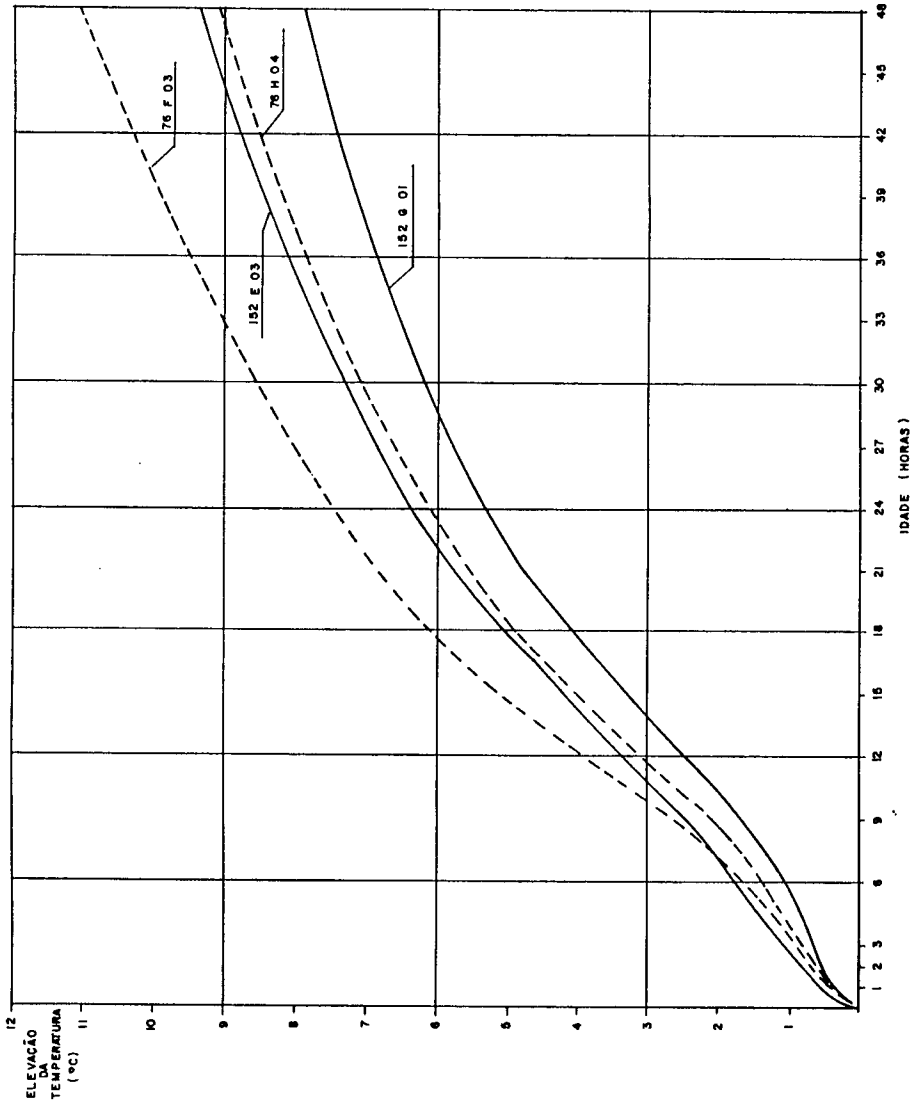


Figura 7.160 — Influência da temperatura de início de ensaio na elevação adiabática do concreto, às primeiras idades

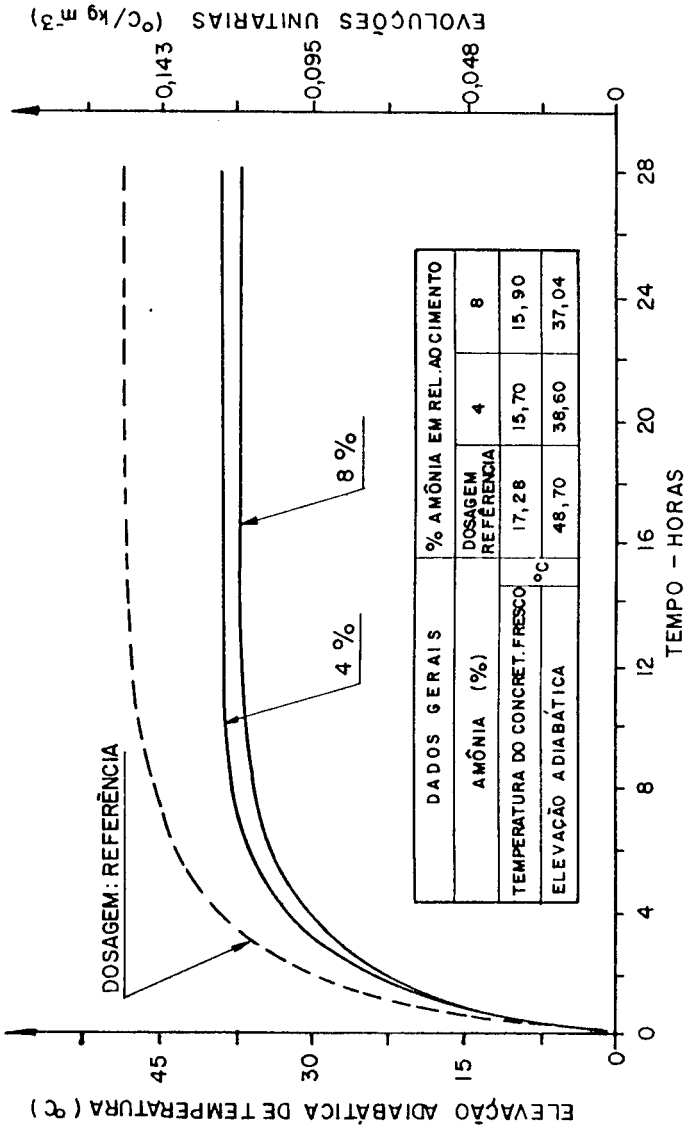


Figura 7.161 — Influência do uso de amônia como aditivo, na elevação adiabática de temperatura do concreto

"Com o retardamento da liberação de calor é também retardado o desenvolvimento das propriedades mecânicas e elásticas do concreto mas, em menor grau que o da liberação de calor".

"Os resultados da pesquisa em questão não devem ser extrapolados indistintamente sem uma pesquisa adequada dos materiais e das demais propriedades do concreto".

7.9.5 Estimativas de elevação adiabática do concreto

Embora a metodologia para determinação das propriedades térmicas do concreto seja bem desenvolvida, alguns procedimentos práticos podem se tornar úteis principalmente em obras de grande porte. Entre eles, a elevação adiabática de temperatura é a propriedade que apresenta variações mais sensíveis com o tipo e quantidade de cimento, uso de materiais pozolânicos e diâmetro máximo do agregado. Por outro lado, o tempo de ensaio (28 dias) é outro fator a ser considerado.

Estudos feitos em Itaipu [7.96] e [7.103] mostraram a viabilidade de conhecer com razoável precisão a evolução adiabática de uma mistura a partir dos resultados de ensaios de outras misturas usando procedimentos descritos a seguir.

7.9.5.1 Elevação adiabática a partir da evolução unitária de temperatura e consumo do aglomerante

A evolução unitária de temperatura é definida como sendo o quociente da elevação adiabática do concreto em uma certa idade pelo consumo total de aglomerante de acordo com a fórmula (VII-XXX):

$$eui = \frac{\Delta\theta\ i}{Ca} \qquad \text{(VII-XXX) onde}$$

eui = evolução unitária de temperatura à idade de i dias

$\Delta\theta$ i = evolução adiabática de temperatura à idade de i dias

Ca = massa total de aglomerante da mistura estudada

A figura 7.162 [7.96] mostra a boa coerência de curvas de evolução unitária de temperatura de misturas com diâmetros máximos de 19 e 38 mm de consumos diferentes, com o mesmo aglomerante.

A figura 7.163 [7.103] mostra as limitações do procedimento. As comparações entre valores reais e calculados dos concretos com diâmetro máximo de 152 mm foram feitas com bases nas evoluções unitárias obtidas de concretos, nos quais o cimento usado era diferente daquele dos ensaios. Por outro lado, os concretos dos quais as evoluções unitárias foram obtidas tinham o mesmo tipo de cimento usado no concreto ensaiado. Neste caso as diferenças entre as elevações adiabáticas calculadas e obtidas de ensaio são menores que 5%

7.9.5.2 Elevação adiabática a partir da evolução unitária, consumo e calor de hidratação do aglomerante

Para este procedimento, na determinação da evolução unitária de temperatura, entra em consideração o calor de hidratação do aglomerante de acordo com a fórmula (VII-XXXI):

$$e'ui = \frac{\Delta\theta\ i}{Ca\ Hi} \qquad \text{(VII-XXXI) onde}$$

e'ui = evolução unitária de temperatura na idade i dias

Ca = consumo de aglomerante

Hi = calor de hidratação do aglomerante à idade de i dias

$\Delta\theta$ i = elevação adiabática de temperatura à idade de i dias.

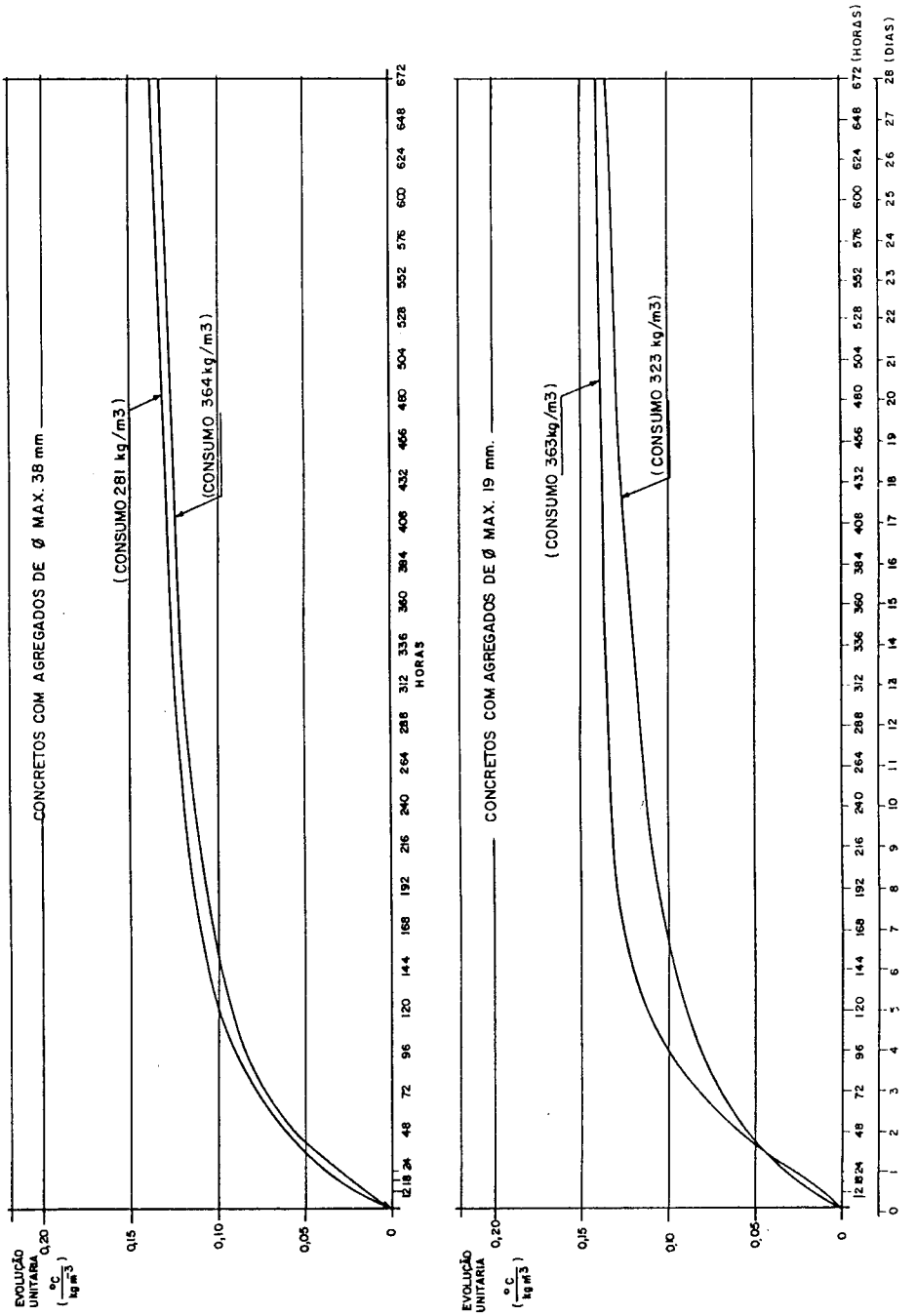


Figura 7.162 — Evoluções unitárias de temperatura obtidas de ensaios de concretos com diferentes diâmetros máximos de agregados, diferentes consumos e mesmo tipo de aglomerante

ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DE TEMPERATURA DO CONCRETO - Δ θ (°C)

Ø MÁX (mm)	152 mm						76 mm					
A/CEQ	0,65			0,80			0,65			0,80		
CONSUMO (kg/m3)	112,8			91,8			140,2			113,8		
IDADE(dias)	Δ θ REAL	Δ θ CALCULADO	DIFERENÇA(%)	Δ θ REAL	Δ θ CALCULADO	DIFERENÇA(%)	Δ θ REAL	Δ θ CALCULADO	DIFERENÇA(%)	Δ θ REAL	Δ θ CALCULADO	DIFERENÇA (%)
01	6,40	4,68	-27,2	4,47	3,80	-15,0	6,03	5,75	-4,6	5,10	4,76	-6,7
02	9,25	7,30	-21,1	6,83	5,95	-12,9	8,37	8,82	5,4	7,05	7,16	1,5
03	11,25	9,00	-20,0	8,32	7,33	-11,9	10,22	10,73	5,0	8,46	8,71	3,0
04	12,84	10,19	-20,6	9,45	8,30	-12,0	11,78	12,03	2,1	9,51	9,76	2,6
05	13,97	11,06	-20,8	10,38	9,01	-13,2	12,99	12,97	-0,2	10,41	10,53	1,2
06	14,74	11,74	-20,4	11,15	9,56	-14,3	13,94	13,68	-1,9	11,16	11,11	-0,4
07	15,29	12,27	-19,7	11,79	9,99	-15,3	14,63	14,24	-2,7	11,72	11,56	-1,4
08	15,69	12,70	-19,1	12,28	10,34	-15,8	15,12	14,70	-2,8	12,18	11,93	-2,1
09	16,05	13,06	-18,6	12,69	10,64	-16,2	15,53	15,07	-3,0	12,56	12,23	-2,6
10	16,31	13,36	-18,1	13,00	10,88	-16,3	15,89	15,38	-3,2	12,80	12,48	-2,5
11	16,57	13,61	-17,9	13,28	11,09	-16,5	16,15	15,64	-3,2	13,00	12,70	-2,3
12	16,75	13,84	-17,4	13,48	11,27	-16,4	16,41	15,87	-3,3	13,13	12,88	-1,9
13	16,92	14,02	-17,1	13,66	11,43	-16,3	16,61	16,07	-3,3	13,24	13,04	-1,5
14	17,05	14,20	-16,7	13,02	11,57	-16,3	16,84	16,24	-3,6	13,34	13,18	-1,2
15	17,18	14,35	-16,5	13,97	11,69	-16,3	16,97	16,39	-3,4	13,44	13,31	-1,0
16	17,26	14,48	-16,1	14,10	11,80	-16,3	17,12	16,53	-3,4	13,51	13,42	-0,7
17	17,31	14,60	-15,7	14,20	11,90	-16,2	17,25	16,65	-3,5	13,59	13,52	-0,5
18	17,41	14,71	-15,5	14,30	11,98	-16,2	17,38	16,76	-3,6	13,62	13,61	-0,1
19	17,44	14,81	-15,1	14,41	12,07	-16,2	17,48	16,86	-3,5	13,70	13,69	-0,1
20	17,51	14,90	-14,9	14,51	12,14	-16,3	17,56	16,95	-3,5	13,75	13,76	-0,1
21	17,54	14,99	-14,5	14,59	12,21	-16,3	17,64	17,04	-3,4	13,80	13,83	0,2
22	17,59	15,06	-14,4	14,64	12,27	-16,2	17,69	17,11	-3,3	13,85	13,89	-0,3
23	17,67	15,31	-14,4	14,69	12,32	-16,1	17,77	17,18	-3,3	13,91	13,95	0,3
24	17,70	15,20	-14,1	14,74	12,38	-16,0	17,85	17,25	-3,4	13,96	14,00	0,3
25	17,75	15,26	-14,0	14,77	12,43	-15,8	17,90	17,31	-3,3	14,01	14,05	0,3
26	17,77	15,31	-13,8	14,82	12,47	-15,9	17,97	17,36	-3,4	14,05	14,09	0,3
27	17,78	15,36	-13,6	14,87	12,51	-15,9	18,00	17,42	-3,2	14,08	14,14	0,4
28	17,80	15,41	-13,4	14,92	12,55	-15,9	18,05	17,46	-3,3	14,11	14,18	0,5

Equação para concreto com agregados Ø máximo 152 mm

$$\frac{1}{eui} = 17{,}492 \; \frac{1}{t} + 6{,}6878$$

Δ θ calculado = eui x consumo

Equação para concreto com agregados Ø máximo 76 mm

$$\frac{1}{eui} = 16{,}941 \; \frac{1}{t} + 17{,}4225$$

Figura 7.163 — Limitações de cálculo da elevação adiabática a partir da evolução unitária de temperatura, sem levar em conta o calor de hidratação do aglomerante

Esse procedimento permite a obtenção de elevações adiabáticas com precisão aceitável mesmo quando há mudanças na composição do cimento e, consequentemente, no calor de hidratação.

No entanto, o uso de materiais pozolânicos (ou cimentos pozolânicos) provoca dificuldades na obtenção do calor de hidratação do aglomerante principalmente às primeiras idades.

Esse fato pode ser parcialmente contornado levando-se em consideração recomendações do A.C.I. [7.104] de que o material pozolânico contribui para o calor de hidratação considerando 50% do peso do mesmo como cimento [7.96].

Esse valor não leva em consideração o tipo e qualidade nem do material pozolânico nem do cimento.

De acordo com relatório de Itaipu [7.96] a contribuição do material pozolânico (Fly Ash no caso) foi determinada através de quatro ensaios de elevação adiabática de uma mesma mistura nas quais parte do cimento foi substituído por Fly Ash (em volume sólido) nas porcentagens de zero, 15, 25 e 35%, de acordo com a figura 7.163.

A equação matemática (VII-XXXII) que melhor definiu as curvas de evolução unitária foi do tipo:

$$\frac{1}{(eui)} = \frac{(a)}{i} + (b) \qquad \text{(VII-XXXII)}$$

sendo a e b coeficientes numéricos

As conclusões desse estudo [7.105] mostraram que para aquele material pozolânico, a contribuição para o calor de hidratação era como se o mesmo fosse substituído em cerca de 40% de sua massa pelo cimento em uso.

Resultados comparativos de elevações adiabáticas calculadas e determinadas em ensaios por esse procedimento são mostrados na figura 7.164.

7.10 Variações volumétricas

7.10.1 Conceito

As variações de volume do concreto são conceituadas como sendo, no concreto fresco (sem aditivos expansores), diminuições de volume da massa compactada, devidas a fenômenos de assentamento diferencial dos vários componentes do mesmo, acompanhada, em maior ou menor intensidade, de migração de água do interior para a superfície da massa. No concreto endurecido as variações volumétricas do concreto são mais complexas e podem ser provocadas por reações de hidratação de componentes do cimento, por variações de temperatura, por reações de componentes do cimento com certos agregados, por migração de água da massa para a atmosfera e vice-versa, como também, consequentes das cargas externas a que o mesmo está submetido. Na prática, as variações volumétricas do concreto endurecido raramente acontecem de forma isolada mas, quase sempre, com uma associação das várias causas que as provocam.

7.10.2 Variações volumétricas do concreto fresco

Embora a compactação que o concreto sofre após seu lançamento seja entendida como sendo o processo pelo qual o mesmo tenha seu volume reduzido ao menor possível através de vibração, centrifugação etc, há no entanto um fenômeno combinado de assentamento diferencial dos componentes do concreto com uma tendência de migração da água de mistura para a superfície que traz como consequência uma diminuição de volume chamada de assentamento plástico do concreto. Este assentamento

ELEVAÇÃO ADIABÁTICA DO CONCRETO — Δ θ (°C)

Ø MÁXIMO (mm)		152 mm								76 mm							
A/CEQ		0,65				0,80				0,65				0,80			
% DE FLY-ASH		0	15	25	35	0	15	25	35	0	15	25	35	0	15	25	35
CONSUMO (kg/m³)	CIMENTO (C)	109,5	100,6	87,5	74,5	89,0	81,8	71,0	61,0	146,8	124,6	110,0	102,4	119,3	101,1	89,1	83,4
	FLY-ASH (Fa)	0	12,2	20,0	27,5	0	10,0	16,4	31,3	0	15,6	25,2	39,2	0	12,7	21,1	31,7
IDADE	C + Fa/2	109,5	106,7	97,5	88,25	89,0	86,8	79,2	76,5	146,8	132,4	122,6	122,0	119,3	107,5	99,7	99,3
3 dias	H cimento (cal/g)	67	67	65	66	61	66	68	61	60	60	55	54	56	57	57	57
	Δ θ Real (°C)	12,43	11,25	9,96	8,71	9,89	8,32	8,09	6,96	12,15	12,22	9,22	9,45	10,76	8,46	8,56	7,08
	Δ θ Calculado (°C)	10,64	10,37	9,19	8,45	7,88	8,31	7,81	6,78	12,25	11,05	9,38	9,17	9,29	8,53	7,91	7,87
	Diferença (%)	-14,4	-7,8	-7,7	-3,0	-20,3	-0,1	-3,5	-2,6	-0,8	8,1	1,7	-3,0	-13,7	0,8	-7,6	11,2
7 dias	H cimento (cal/g)	78	78	75	76	70	76	79	70	68	68	63	62	64	66	66	66
	Δ θ Real (°C)	16,74	15,28	12,92	12,12	12,87	11,79	11,05	9,35	17,8	14,63	13,15	12,64	14,69	11,72	11,67	9,85
	Δ θ Calculado (°C)	14,40	14,03	12,33	11,30	10,50	11,12	10,55	9,04	16,18	14,60	12,52	12,28	12,38	11,50	10,67	10,82
	Diferença (%)	-14,0	-8,2	-4,6	-6,8	-18,4	-5,7	-4,5	-3,3	-5,8	-0,2	-4,8	-3,0	-15,7	-1,9	-8,6	7,8
14 dias	H cimento (cal/g)	82	82	80	81	74	81	83	74	74	74	69	68	70	71	71	71
	Δ θ Real (°C)	18,98	17,05	14,56	13,84	14,25	13,82	12,64	10,71	19,57	16,84	15,21	14,31	16,69	13,34	13,67	11,47
	Δ θ Calculado (°C)	16,11	15,70	14,00	12,83	11,82	12,62	11,80	10,18	18,77	16,93	14,62	14,34	14,43	13,19	12,23	12,18
	Diferença (%)	-15,1	-7,9	-3,8	-7,3	-17,1	-8,7	-6,6	-4,9	-4,1	0,5	-3,9	0,2	-13,5	-1,1	-10,5	6,2
21 dias	H cimento (cal/g)	88	88	85	86	79	86	89	79	78	78	72	71	73	75	75	75
	Δ θ Real (°C)	19,80	17,54	15,30	14,56	14,69	14,59	13,41	11,40	20,47	17,64	16,00	14,98	17,33	13,80	14,44	12,17
	Δ θ Calculado (°C)	17,67	17,22	15,20	13,92	12,89	13,69	12,93	11,10	20,23	18,25	15,60	15,31	15,39	14,25	13,21	13,16
	Diferença (%)	-10,8	-1,8	-0,7	-4,4	-12,3	-6,2	-3,6	-2,6	-1,2	3,5	-2,5	2,2	-11,2	3,3	-8,5	8,1
28 dias	H cimento (cal/g)	91	91	88	89	82	89	92	82	81	81	75	74	76	78	78	78
	Δ θ Real (°C)	20,21	17,80	15,60	15,00	14,85	14,92	13,90	11,81	20,93	18,05	16,34	15,31	17,64	14,11	14,90	12,43
	Δ θ Calculado (°C)	18,48	18,00	15,90	14,56	13,53	14,32	13,51	11,65	21,25	19,17	16,43	16,14	16,20	14,99	13,90	13,84
	Diferença (%)	-8,6	1,1	0,6	-2,9	-8,9	-4,0	-2,8	-1,2	1,5	5,8	0,6	5,4	-8,2	6,2	-6,7	11,3

Equação para concreto Ø máximo 152 mm

$$\frac{1}{e'u\,i} = 504{,}0\,\frac{1}{i} + 521{,}3$$

Equação para concreto Ø máximo 76 mm

$$\frac{1}{e'u\,i} = 535{,}1\,\frac{1}{i} + 540{,}4$$

$$\Delta\theta \text{ Calculado} = e'u\,i \times H\text{cim.} \times \left(C + \frac{Fa}{2}\right)$$

Figura 7.164 — Cálculo de elevações adiabáticas de temperatura a partir da evolução unitária e do calor de hidratação do aglomerante

pode ser determinado por método de ensaio preconizado pela ASTM [7.106], pela medida da variação da altura da superfície do concreto moldado em corpos de provas cilíndricos de dimensões compatíveis com o tamanho máximo do agregado. A figura 7.165 ilustra fissuras provocadas por armaduras que restringiram o assentamento plástico do concreto lançado na fôrma.

O assentamento plástico do concreto varia em função de uma série de fatores que vão desde a composição química e finura do cimento, uso ou não de materiais pozolânicos, composição e trabalhabilidade da mistura, relação água/cimento até a eficiência do processo de compactação usado.

7.10.3 Variações volumétricas do concreto endurecido

7.10.3.1 Devidas à temperatura

As variações de volume do concreto devidas a alterações de temperatura estão diretamente ligadas ao coeficiente de expansão térmica do mesmo. O mecanismo, fatores que influenciam, bem como procedimentos de ensaio, já foram discutidos no item 7.9.

Como exemplo prático do fenômeno mostra-se na figura 7.166 a variação volumétrica do concreto devida à variação de temperatura ambiente, observada através de instrumentos instalados em uma junta de dilatação entre dois blocos adjacentes da barragem de Ilha Solteira (Cesp) [7.107].

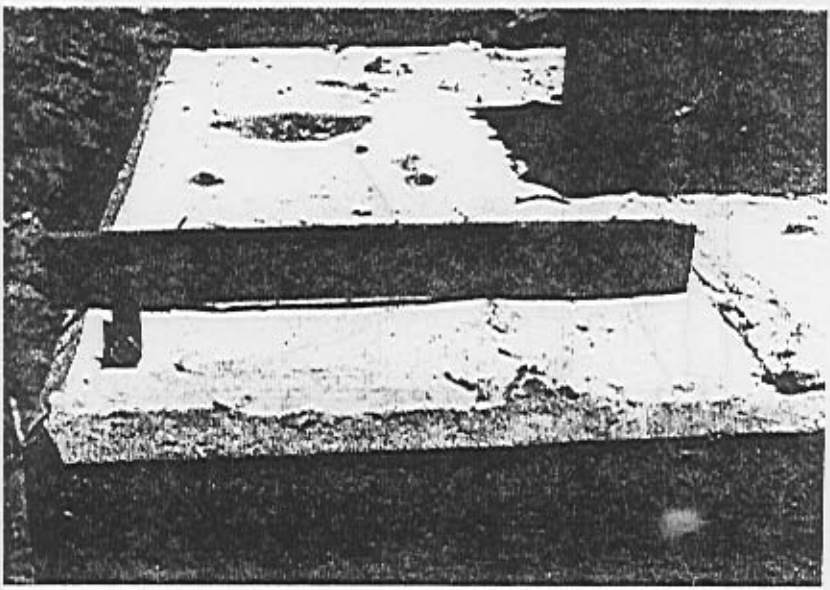


Figura 7.165 — Assentamento plástico do concreto. Os pontos de apoio do sarrafo correspondem à posição de armaduras que restringiram o assentamento

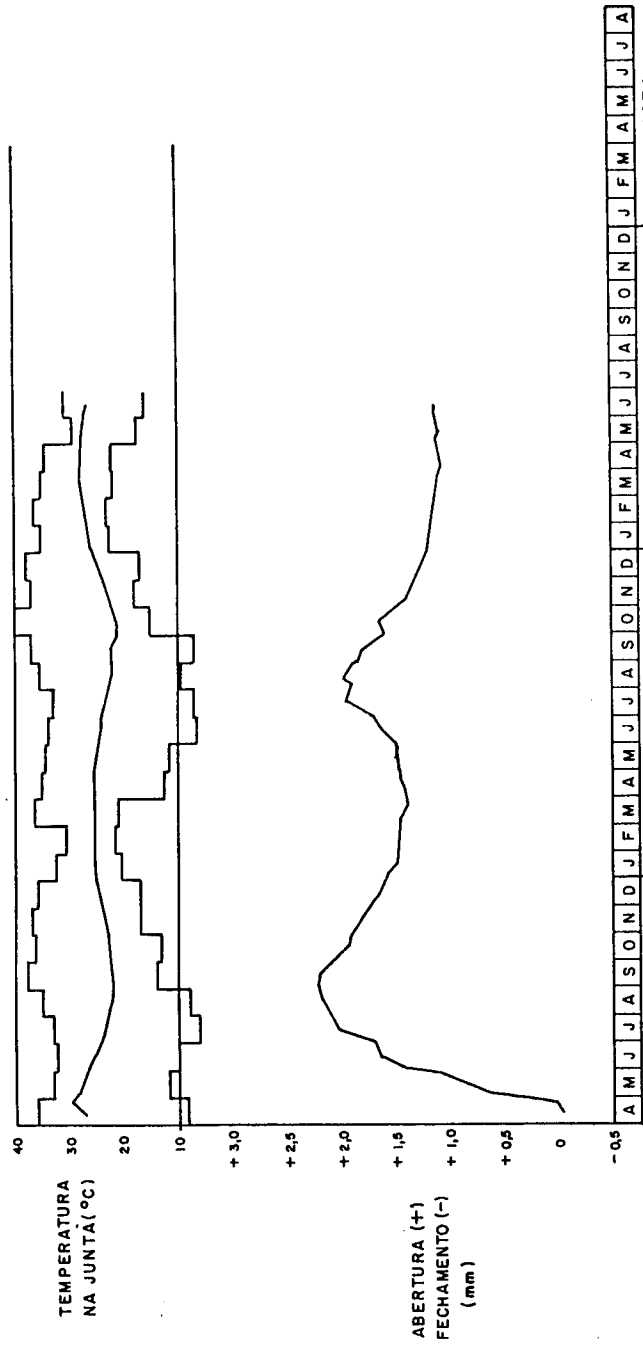


Figura 7.166 — Abertura e fechamento de juntas entre blocos devida à variação de temperatura (obra de Ilha Solteira — Cesp)

7.10.3.2 Devidas ao grau de saturação

Quando o concreto endurecido é exposto a am... com umidade relativa baixa, ele tend... perder água para o ambiente e se contrair.

Esse fenômeno é conhecido como retração hidráulica ou retração por secagem. Se, por outro lado, após um certo grau de secagem o concreto for colocado em ambiente úmido ele tende a absorver água e se expandir.

7.10.3.2.1 Mecanismo

Quando o cimento é misturado com a água iniciam-se as reações de hidratação, cujos produtos consistem essencialmente de materiais cristalinos (principalmente hidróxido de cálcio) e uma grande quantidade de gel de silicato de cálcio endurecido conhecido como gel de tobermorita [7.108]. Este gel é rígido e constituído de partículas de tamanho coloidal com uma área específica extremamente alta. Na pasta endurecida do cimento, parte da água excedente à necessária para a hidratação está nos ... capilares e, outra parte, no interior do gel de tobermorita. Atribui-se a retração ...a à perda da água absorvida por esse gel.

... perdida para o ambiente quando o concreto é submetido a um processo ... primeiramente, aquela que ocupa os poros e capilares da pasta, sendo que ... devida a essa perda é desprezível.

São as forças capilares devidas à perda da água absorvida pelo gel as responsáveis pela retração por secagem e, consequentemente, pelo aumento de volume no processo inverso.

A figura 7.167 [7.109] ilustra esquematicamente as variações de volume do concreto endurecido estocado submerso ou ao ar.

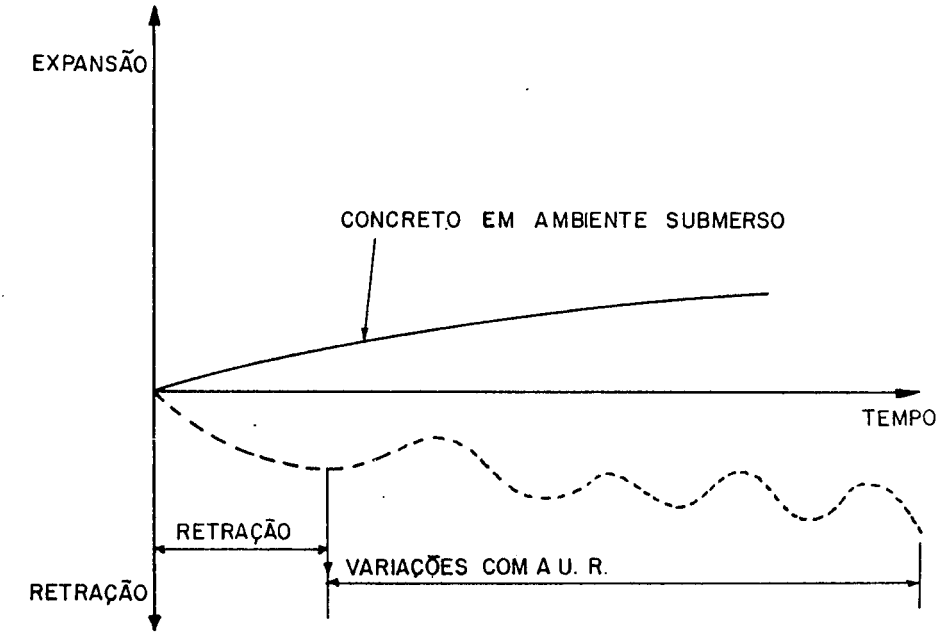


Figura 7.167 — Esquema ilustrativo das variações de volume do concreto com seu grau de saturação

7.10.3.2.2 Método de ensaio

A determinação das variações de volume do concreto endurecido pode ser feita por método preconizado pela ASTM [7.110]. Os corpos de prova usados para o ensaio são prismas de seção 10 X 10 cm e 28,5 cm de comprimento, quando o agregado máximo for até 50 mm ou prismas de seção 7,5 x 7,5 cm e mesmo comprimento para concretos com agregados até 25 mm.

Após a moldagem o concreto permanece nas fôrmas por 24 horas, em câmara úmida com umidade mínima de 90% e temperatura de 23 ± 1,7°C, período após o qual é feita a desmoldagem e a leitura do comprimento inicial.

Após essa leitura os corpos de prova são imersos em água saturada de cal, até a idade de 28 dias, quando novamente é tomada outra leitura de comprimento.

A retração hidráulica é determinada com a estocagem dos espécimes, curados após 28 dias como descrito anteriormente em câmara com temperatura de 23 ± 1,7°C e umidade relativa de 50 ± 4%, até estabilização de variação de comprimento. O aparelho para leitura das variações de comprimento deve ter precisão de 0,001 mm.

7.10.3.2.3 Fatores que influenciam

Os fatores de maior influência na intensidade da retração hidráulica do concreto são a quantidade de água por metro cúbico da mistura, tipo e quantidade agregado, composição e finura do cimento e as próprias dimensões das peças concretadas.

Como as variações volumétricas do concreto ocorrem fundamentalmente como consequência da água absorvida pelo gel de tobermorita, a quantidade de água usada na mistura passa a ser o principal fator de influência na intensidade do fenômeno.

Estudos feitos pela Portland Cement Association [7.109], mostrados na figura 7.168, evidenciam esse fato.

Os agregados que ocupam um volume da ordem de 70 a 85% do concreto alteram o valor da retração por secagem agindo como restrição interna às variações de volume da pasta, em intensidade que varia com a própria quantidade do agregado e rigidez do mesmo e/ou, pela retração ou expansão do próprio agregado em função de sua absorção.

A figura 7.169 [7.108] ilustra a influência da absorção do agregado na retração hidráulica do concreto.

Portanto, o uso de agregados com baixa absorção e baixo módulo de elasticidade são, do ponto de vista da retração hidráulica, mais aconselháveis para minimizar fissuras devidas a esse fenômeno.

Não resta dúvida também que concretos com agregados de diâmetros máximos maiores apresentam menor tendência à retração hidráulica.

As dimensões das peças de concreto influenciam na velocidade com que a umidade do concreto passa para o ambiente e têm, portanto, influência na retração por secagem. De acordo com resultados de estudos feitos por Carlson [7.108] num concreto exposto a uma umidade relativa de 50%, a retração alcança uma profundidade de 7,5 cm após um mês e 60 cm após dez anos.

Com relação à influência do cimento, a finura e composição química do mesmo tendem a aumentar a retração por secagem, na medida em que requerem mais água para manutenção da trabalhabilidade da mistura.

A figura 7.170 ilustra uma superfície de concreto com fissuras típicas de retração hidráulica.

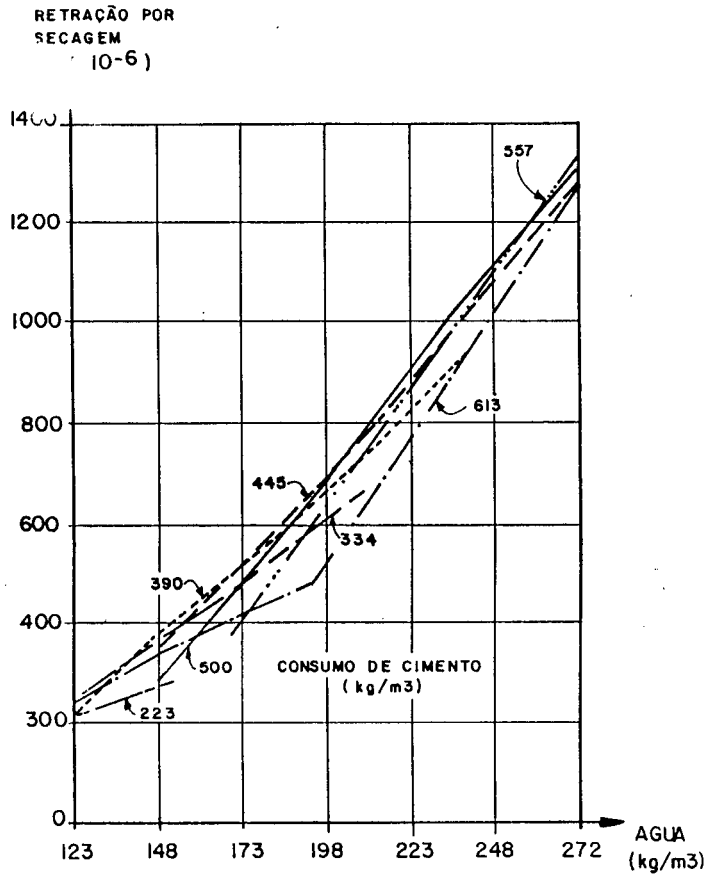


Figura 7.168 — Influência do teor de água da mistura na retração por secagem do concreto

TIPO DE AGREGADO	ABSORÇÃO DO AGREGADO %	RETRAÇÃO POR SECAGEM APOS 1 ANO (%)
ARENITO	5,0	0,116
GRANITO	0,8	0,047
CALCARIO	0,2	0,041
QUARTZO	0,3	0,032

Figura 7.169 — Influência da absorção do agregado na retração por secagem do concreto [7.108]

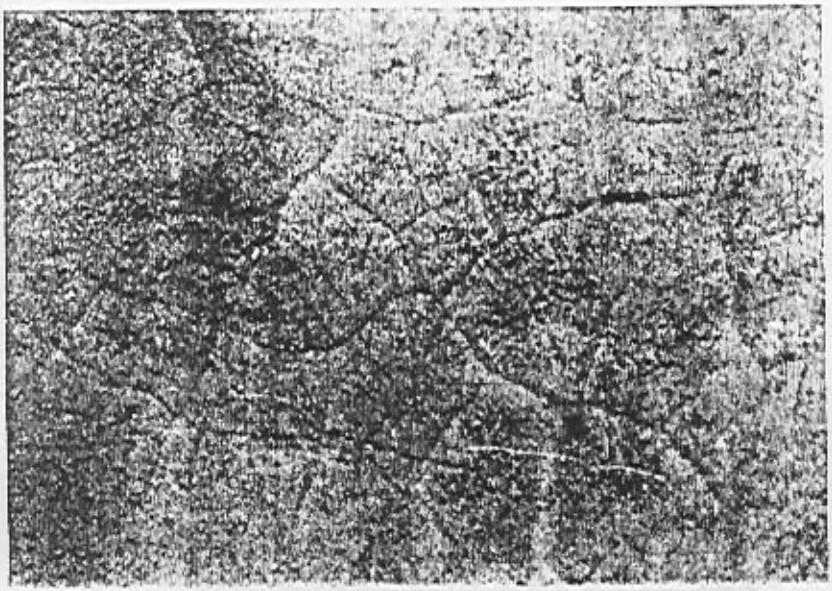


Figura 7.170 — Fissuração típica de retração por secagem

7.10.3.3 Devidas à reação álcalis-agregado

As variações de volume do concreto devidas ao fenômeno conhecido como reação álcalis-agregado são consequentes do produto expansivo que se forma quando os álcalis (compostos de sódio e de potássio) presentes nas soluções contidas nos poros do cimento entram em contato com certos tipos de agregado que contém sílica reativa.

Embora sempre que presentes no concreto a reação ocorra, para que haja a expansão do concreto devida à reação há necessidade de uma certa combinação entre quantidade de álcalis e quantidade e dimensão dos agregados, pois fora dessas condições a reação pode ser não expansiva.

7.10.3.3.1 Mecanismo

O mecanismo na reação álcalis-agregado é, ainda hoje, uma questão que observada pela primeira vez nos Estados Unidos, por volta de 1940, não tem uma explicação completa e totalmente esclarecida.

Os principais estudos a respeito do assunto, no que se refere ao mecanismo da reação, foram resumidos por Gitahy [7.111] e são citados no item 3.1.3.14.

As reações álcalis — agregado ocorrem como esquematizado na figura 7.171.

A pasta de cimento contém, entre outros, íons (Ca^{++}) provenientes do hidróxido de cálcio dissolvido, liberado durante a hidratação do cimento e íons (Na^{+} e K^{+}) dos compostos alcalinos dissolvidos, presentes no cimento. Os íons (Ca^{++}, CNa^{+}) reagem com o grão de sílica reativa, em meio básico, formando-se na superfície do grão um gel cal-álcali-sílica que não absorve água e que, portanto, não se expande. No seu início, o processo é, portanto, seguro e inofensivo (fase segura da reação).

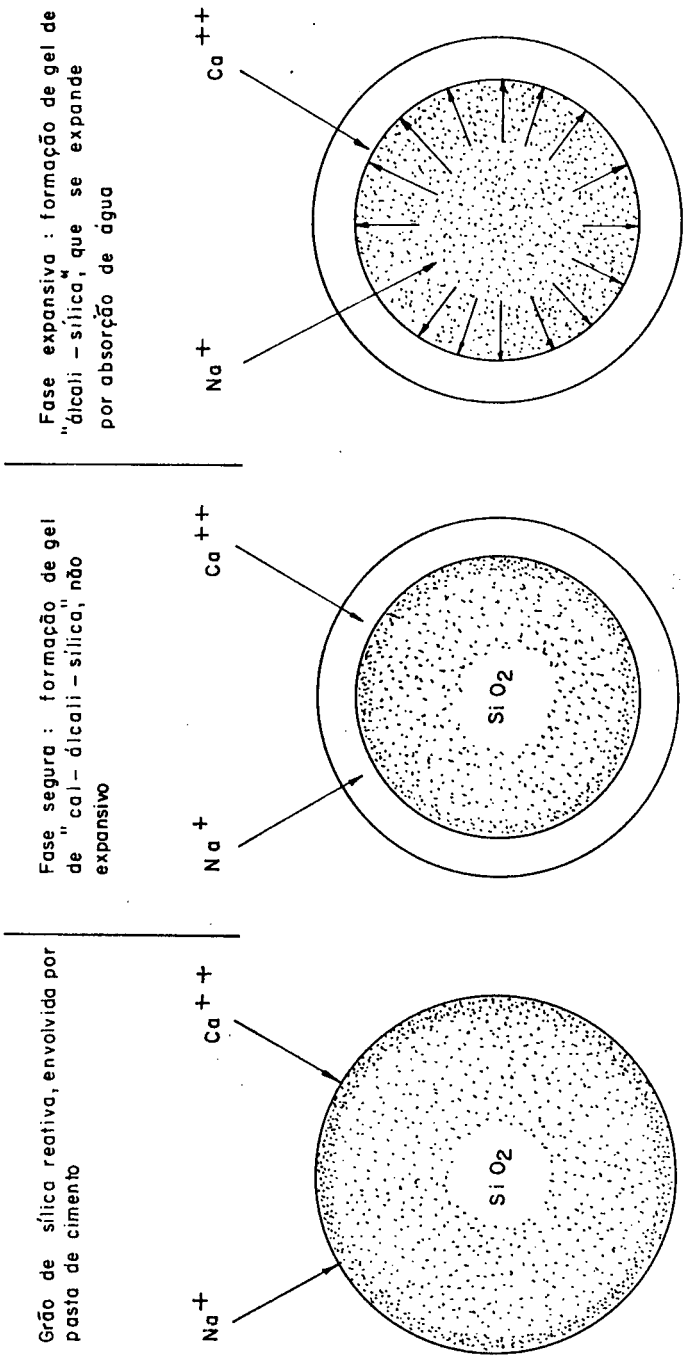


Figura 7.171 — Esquema ilustrativo do desenvolvimento das reações álcalis-agregado

Na continuação do processo reativo os íons (Ca^{++}, Na^{+}) estão separados do grão de sílica solúvel pela camada de gel não expansivo de cal-álcali-sílica e devem, portanto, atravessar a membrana para que a reação tenha continuidade.

O gel que forma a membrana tem área interna muito grande sendo, portanto, capaz de adsorver quantidades apreciáveis de Ca^{++} e Na^{+} sendo predominantemente Na^{+}, quando a concentração de álcalis é alta e Ca^{++}, quando a concentração de álcalis é baixa. Os íons (Na^{+}) têm maior mobilidade que os íons (Ca^{++}) por sua maior velocidade de difusão.

Dessa forma, no início do processo forma-se sempre gel não expansivo de cal-álcali-sílica, mas em seu prosseguimento podem ocorrer duas situações:

— O consumo de álcalis na reação sendo grande, a concentração de álcalis na pasta não chega a predominar sobre a de cal, de modo que os íons (Ca^{++} e Na^{+}) agem simultaneamente, e asseguram a formação contínua de gel de cal-álcali-sílica, não expansivo. Nesse caso, as reações continuam seguras e cessam quando atingem o centro da partícula, ou quando os álcalis tenham sido inteiramente consumidos.

— O consumo de álcalis na reação não sendo grande, a concentração de álcalis permanece alta, predominando sobre a da cal e garantindo a ação dos íons (Na^{+}), que atravessam a película de gel não expansivo e atacam o grão de sílica solúvel, na ausência de cal, dando origem ao gel de álcali-sílica expansivo que, ao contrário de gel cal-álcali-sílica, adsorve água, aumenta de volume e exerce forças de expansão capazes de romper o sistema quando ultrapassam a resistência à tração da pasta de cimento, como ilustra a figura 7.172.

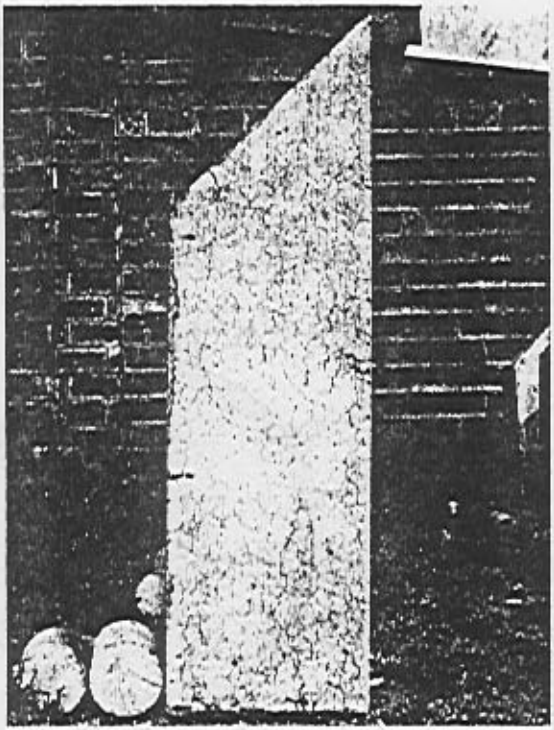


Figura 7.172 — Bloco de concreto exposto ao tempo (Ilha Solteira — Cesp) totalmente fissurado pela reação álcalis-agregado

7.10.3.3.2 Métodos de ensaios

Os métodos de ensaios para verificação da existência ou não de sílica reativa no agregado, bem como da intensidade de expansão álcali-sílica, estão detalhados no item 3.1.3.14.

7.10.3.3.3 Fatores que influenciam

Do mecanismo exposto conclui-se que a expansão do concreto se processa em função da existência e quantidade de grãos de sílica reativa no agregado, da concentração de álcalis na composição do cimento e da disponibilidade de água para ser adsorvida pelo gel sílica-álcali.

Quando a concentração de álcalis é elevada, a reação álcali-sílica passa mais rapidamente da fase segura para a expansiva.

Quando a quantidade de grãos reativos no agregado é pequena, o consumo de álcalis na reação é insignificante e, portanto, a concentração de álcalis não é suficientemente reduzida na fase inicial do processo para impedir a formação do gel expansivo.

Em termos de concreto é necessária uma porcentagem mínima do agregado reativo para se notar a expansão.

Quando a quantidade de grãos reativos é grande, a concentração de álcalis é rapidamente reduzida garantido-se reações seguras que terminam quando os álcalis tenham sido consumidos.

Portanto, há sempre uma combinação "ótima" de porcentagem de álcalis no cimento e sílica reativa nos agregados para expansões máximas no concreto, conforme ilustrado na figura 7.173.

Partículas de agregado reativo muito pequenas são inteiramente consumidas na fase segura da reação. Devido à sua elevada superfície específica, grãos reativos de dimensões reduzidas, disseminados entre os grãos reativos grandes, reduzem rapidamente a concentração de álcalis, evitando a formação do gel expansivo nos grãos maiores. Este princípio permitiu, portanto, o uso de materiais pozolânicos para inibição da expansão álcali-sílica, como mostram estudos feitos em Ilha Solteira [7.112] [7.113] [7.114] [7.115] [7.116] [7.117] e ilustra a figura 7.174.

7.10.3.4 Devidas ao ataque por sulfatos

7.10.3.4.1 Mecanismo

De acordo com vários pesquisadores há aparentemente duas reações que podem ser as responsáveis pelo ataque dos sulfatos ao concreto.

— Reação com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento formando, com aumento de volume, sulfato de cálcio (gesso).
— Reação com o aluminato de cálcio hidratado do cimento formando sulfaluminatos expansivos (etringita)

7.10.3.4.2 Métodos de ensaios

A resistência dos concretos aos sulfatos pode ser determinada colocando-se corpos de prova em soluções saturadas de sulfato de sódio ou magnésio.

Os efeitos da exposição, que podem ser acelerados por ciclos de molhagem e secagem, são avaliados por variações de resistências, módulos de deformação ou mesmo variações volumétricas, comparativamente a corpos de provas curados em câmara úmida.

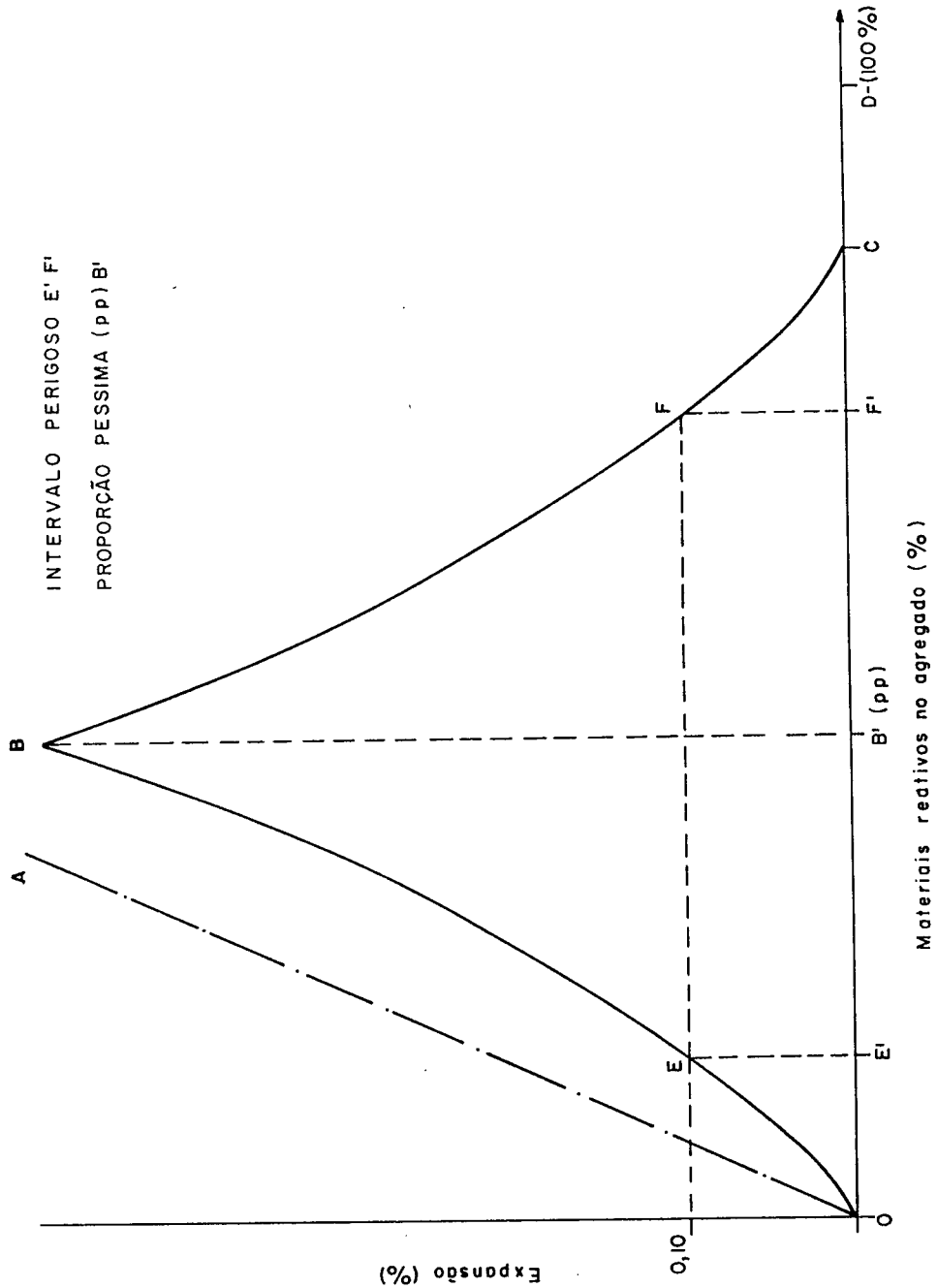


Figura 7.173 — Expansão das barras de argamassa em função da proporção de materiais reativos no agregado [7.111]

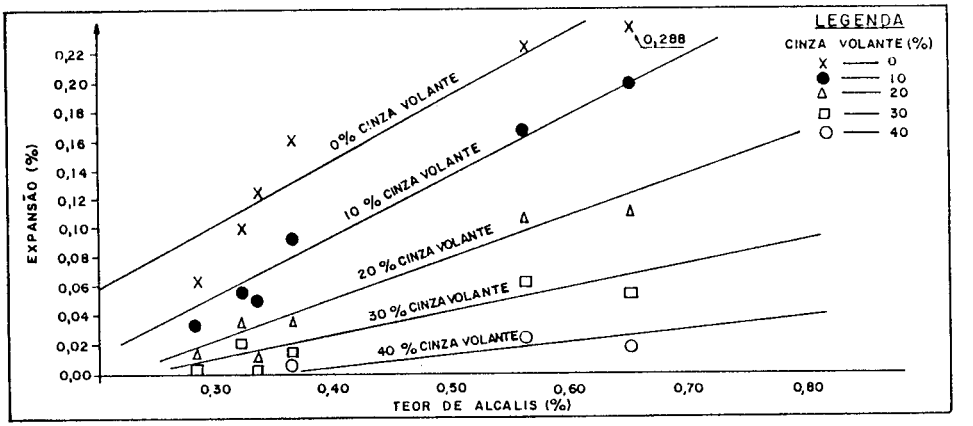


Figura 7.174 — Eficiência do uso de materiais pozolânicos na redução da expansão álcalis-agregado

7.10.3.4.3 Fatores que influenciam

Do próprio mecanismo do ataque dos sulfatos evidencia-se que a quantidade do aluminato tricálcico no cimento é um dos fatores determinantes no ataque dos sulfatos ao concreto. Cimentos com teores de C_3A menores que 5% na sua composição são considerados altamente resistentes ao ataque dos sulfatos.

Por outro lado, o uso de pozolanas, que fixam o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, inibe também o ataque.

Finalmente, concretos bem compactados e de baixa relação água/cimento minimizam sobremaneira os efeitos dos sulfatos ao concreto, por dificultarem a penetração dos mesmos no interior da massa e por consequência a reação dos sulfatos com o C_3A e/ hidróxido de cálcio.

7.10.3.5 Variações autógenas

As variações de volume, consideradas como autógenas, são aquelas resultantes de hidratação de elementos menores existentes no próprio cimento, basicamente o óxido de magnésio (MgO) na forma de periclasio e a cal livre (CaO) que já foram objeto de análises e comentários no item 3.2, no que se refere aos mecanismos e métodos de ensaios para verificação da expansibilidade dos cimentos.

Em termos de concreto, os ensaios para verificação de variações autógenas são feitos pela medida da variação de comprimento de corpos de provas cilíndricos protegidos contra perda de umidade e estocados em ambiente climatizado a 23± 2°C. Os agregados usados devem ser não reativos com os álcalis, para se evitar expansões conjuntas devidas a essa reação.

A figura 7.175 [7.118] mostra uma série de corpos de provas em ensaio para determinação da variação autógena de volume de concretos da obra de Itaipu.

A figura 7.176 mostra resultados de expansão moderada observada nos concretos estudados no laboratório da Itaipu, em função do teor de cal livre (≅ 1,5%) existente nos cimentos.

A figura 7.177 mostra a expansão de barras de argamassa em função do teor de MgO de vários cimentos estudados pela Cesp em Ilha Solteira [7.119].

7.11 Resistividade do concreto

O concreto armado pode sofrer fissuração e deterioração pela ação de correntes elétricas, sendo que a umidade diminui a resistência à passagem dessas correntes, podendo ocorrer a corrosão eletrolítica da armadura.

Para circular pela armadura, a corrente deve vencer a resistência elétrica das camadas de concreto, a da armadura e os potenciais de polarização.

A resistência elétrico-volumétrica [7.120] de um material é entendida como a relação entre a tensão aplicada aos eletrodos e a corrente que atravessa o material. E a resistividade elétrico-volumétrica é a relação entre o gradiente de potencial paralelo à direção da corrente nesse material e a densidade de corrente.

A resistividade do concreto aumenta com o aumento da massa específica e com a diminuição da porosidade.

Para a determinação da resistência elétrico-volumétrica [7.120] um corpo de prova é colocado em uma cuba contendo um filme de mercúrio metálico, líquido, que serve de eletrodo. Sobre o topo superior é posicionado um anel contendo, também, mercúrio que atua como outro eletrodo. Através da aplicação de uma tensão elétrica, mede-se a passagem da corrente, durante um certo período de tempo, após o que calcula-se a resistência elétrica.

O concreto, à medida que se reduz a umidade, aumenta a resistividade, podendo atingir um Megohm-Centímetro [MΩ.cm]. No estado úmido, o concreto pode apresentar valores de resistividade aproximadamente 1000 vezes menores, ou seja, ao redor de KΩ. cm.

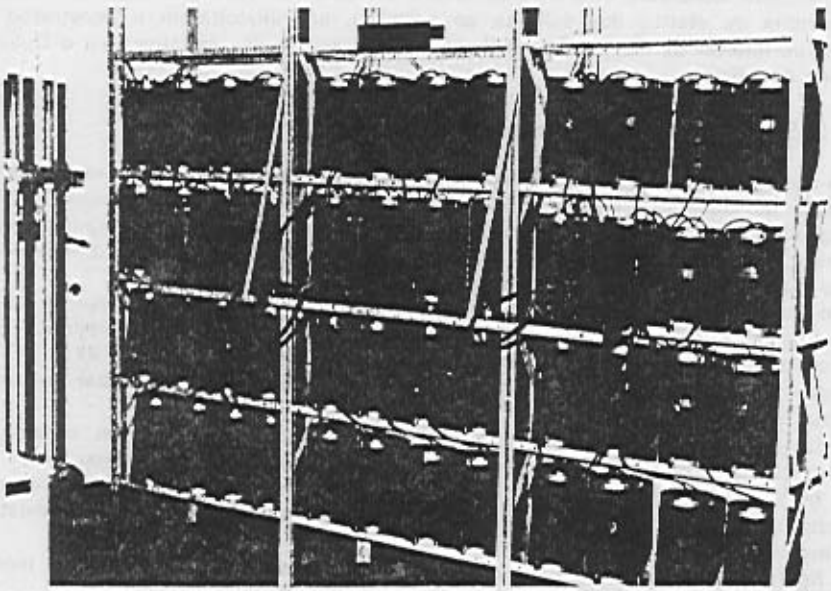


Figura 7.175 — Corpos de provas instrumentados e protegidos contra perda de umidade, estocados em sala climatizada (23 ± 2°C) em ensaio para determinação da variação autógena de volume

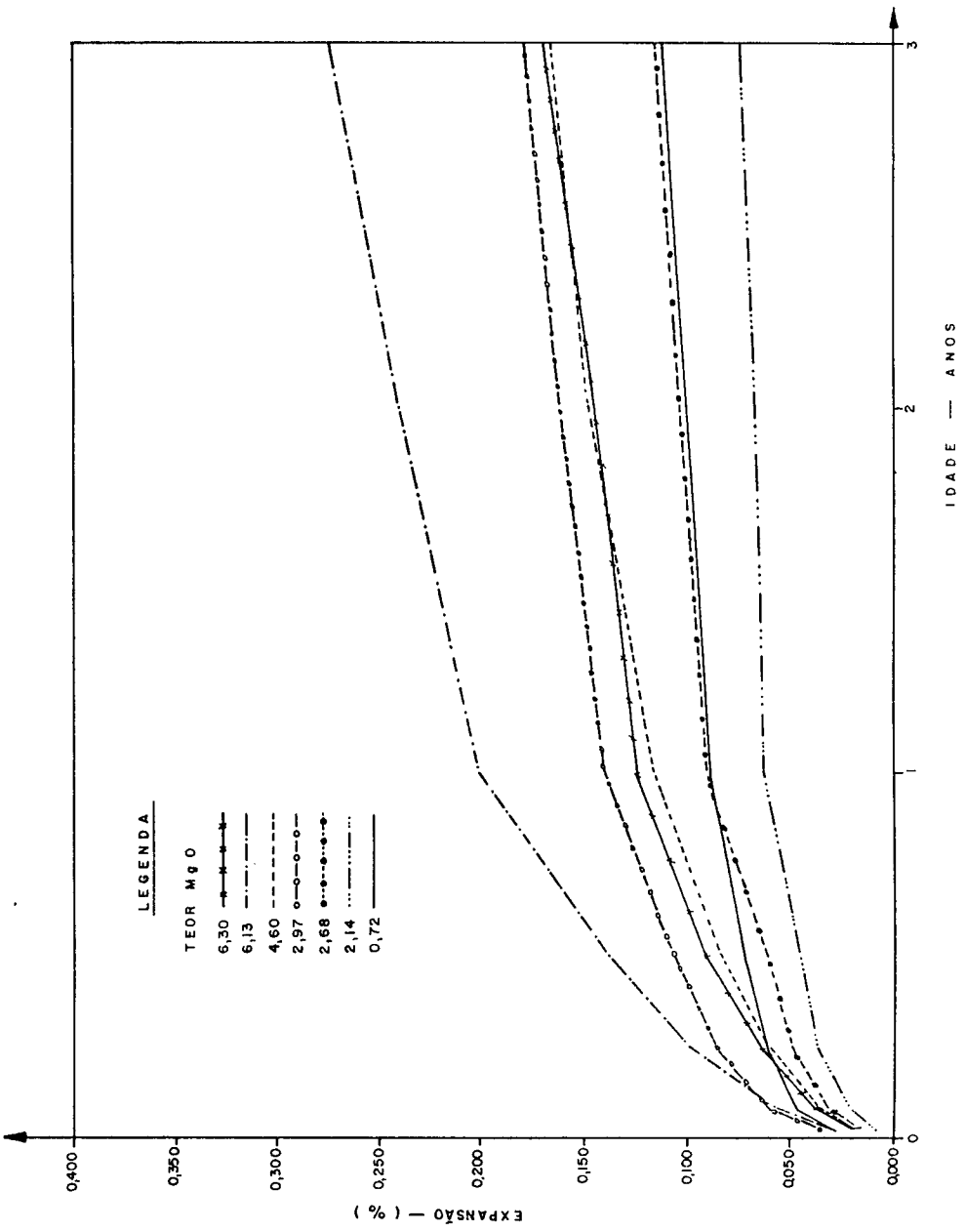


Figura 7.176 — Expansão de barras de argamassa devida ao teor de magnésio (MgO) do cimento

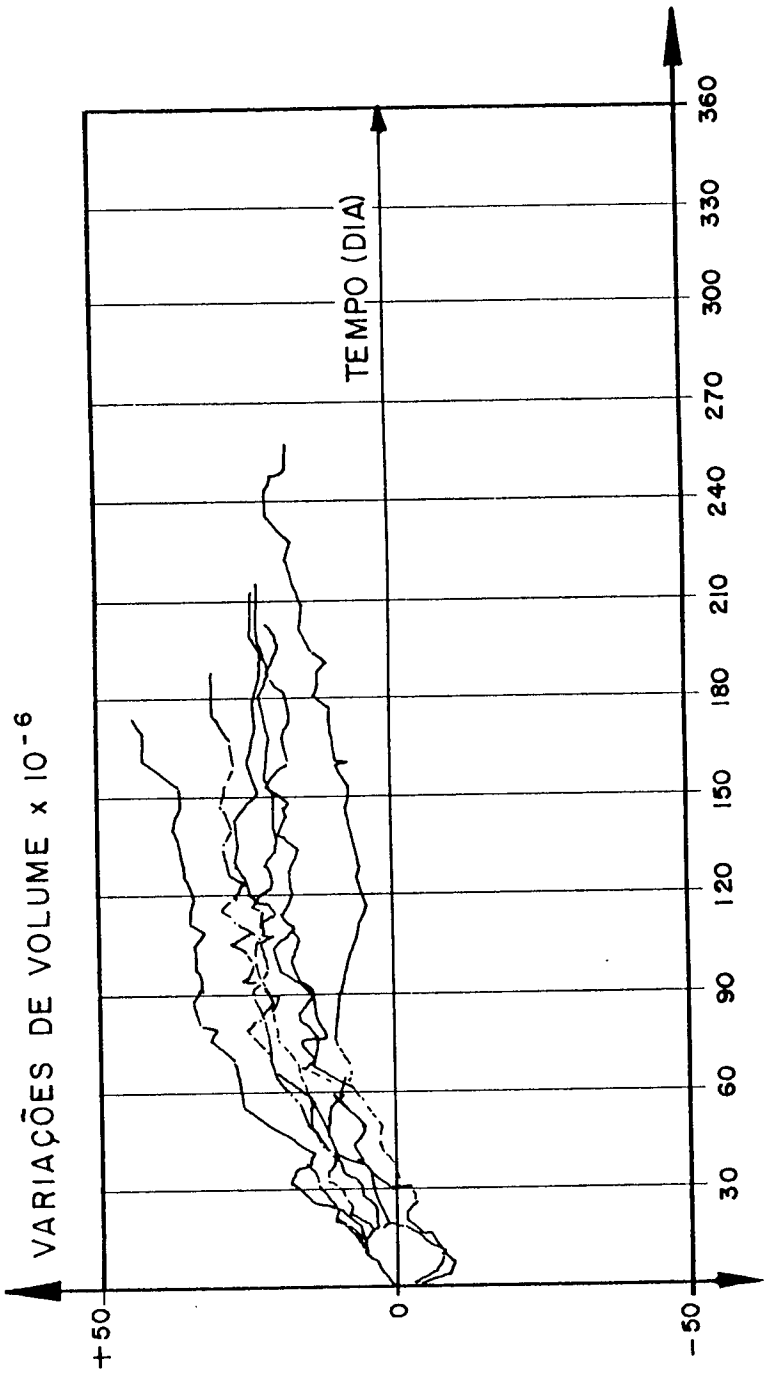


Figura 7.177 — Expansão de concreto devida ao teor de cal livre no cimento

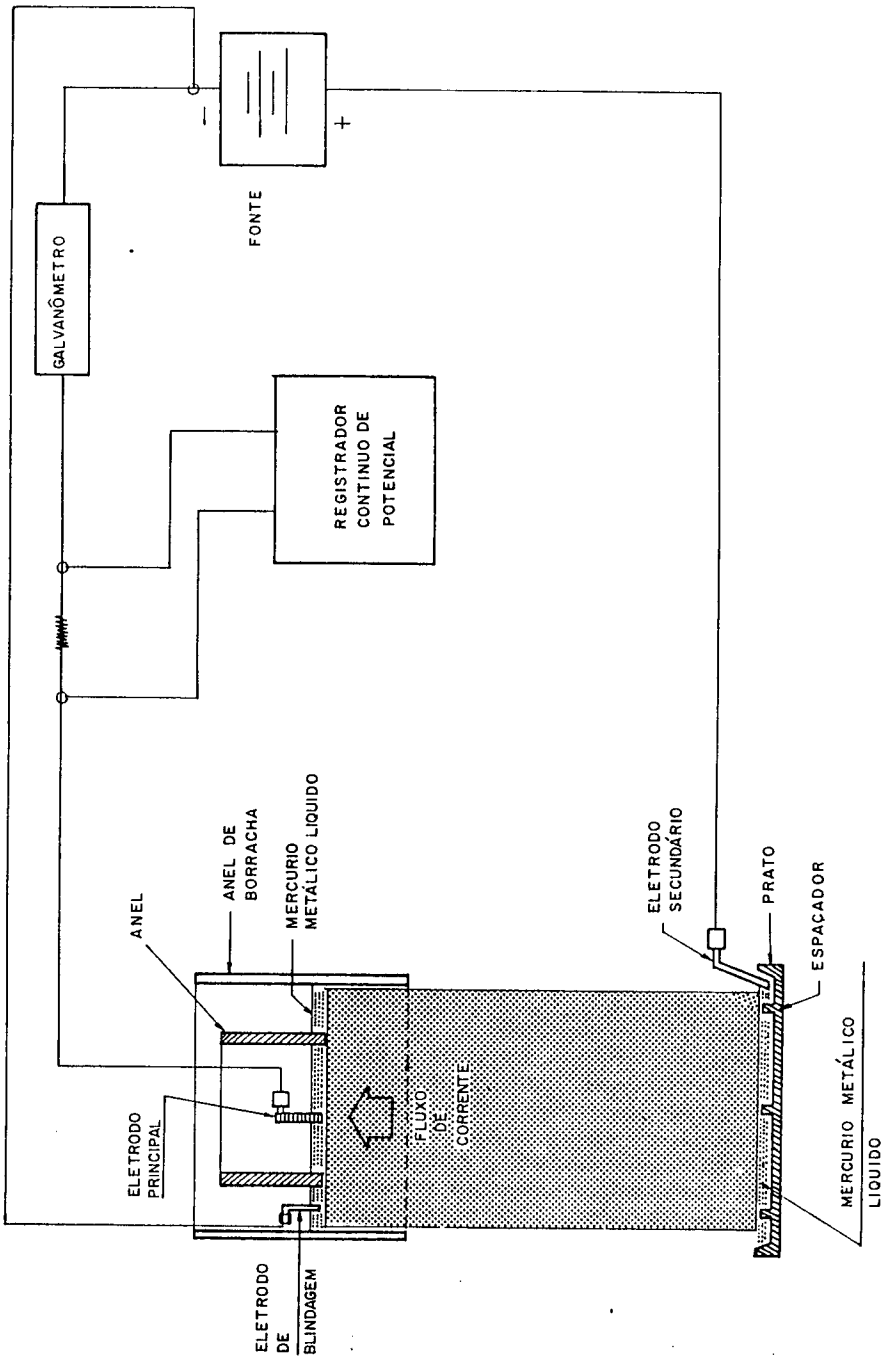


Figura 7.178 — Esquema para ensaio de determinação da resistência elétrica (resistividade) do concreto

7.12 Durabilidade do concreto

7.12.1 Generalidades

O termo durabilidade engloba uma série de propriedades do concreto, estando intimamente ligado ao projeto estrutural, aos materiais, ao manuseio e às condições de exposição. De um modo geral pode-se dizer que a durabilidade é afetada pelos seguintes fatores:

— características dos materiais componentes do concreto;
— propriedades físicas do concreto endurecido;
— condições de exposição;
— cargas impostas à estrutura;
— práticas usadas durante a construção;
— projeto estrutural.

A durabilidade está inversamente relacionada com a relação A/C, sendo menor a durabilidade quando a relação A/C é elevada. Um concreto durável requer bom adensamento, impermeabilidade, baixa absorção, baixa retração, ser isento de trincas, com adequada quantidade de ar incorporado; um projeto estrutural adequado inclusive com boas condições de fundação e sem mudanças bruscas de seção; uma armadura suficiente e corretamente colocada, especialmente ao redor de aberturas e cantos; juntas posicionadas criteriosamente; drenagem suficiente etc. A durabilidade requer, também, materiais adequados, mão-de-obra qualificada.

Materiais deletérios podem causar diminuição da durabilidade do concreto. No caso dos agregados, há necessidade de uma análise cuidadosa a fim de verificar a qualidade dos mesmos. A reação álcalis-agregados pode ser adequadamente controlada por meio de providências tomadas com base em ensaios criteriosos.

Certas substâncias podem atacar o concreto, de modo a diminuir a sua durabilidade. Substâncias como ácido sulfúrico, nítrico, fluorídrico, alguns sais inorgânicos como cloretos, sulfatos de alumínio, cálcio, amônia, alguns ácidos orgânicos como o acético e o lático produzem desintegrações ou ataques ao concreto.

A água do mar pode causar deterioração do concreto, quer seja por ação química, quer por ação física como devido à tumefação causada pela oxidação de materiais ferrosos ou pela ação múltipla dos dois processos.

As regiões de clima severamente frio podem ter problemas quanto à durabilidade do concreto, causados pela ação do gelo-degelo. Essa deterioração pode ser causada também se ocorrerem grandes diferenças entre coeficientes de expansão térmica dos agregados e da argamassa.

A durabilidade dos concretos pode ser acompanhada, ao longo do tempo, através de ensaios do tipo não destrutivo, tais como ciclagens e determinações do módulo de deformação dinâmico, ultra-som, esclerômetro etc...

O concreto também pode sofrer danos causados pela cavitação ou pela abrasão. A cavitação pode ocorrer em regiões sujeitas a alta velocidade d'água, onde houver uma deflexão abrupta entre a linha de fluxo e a superfície de escoamento, resultando em turbulência e, consequentemente, em áreas de subpressões, causando a remoção das partículas do concreto. Tais turbulências podem ocorrer devido aos ângulos, cantos vivos, projeções ou depressões. A superfície erodida por cavitação é áspera, rugosa, com agregados à vista dando o aspecto de uma "bicheira".

A erosão do concreto por abrasão pode ocorrer devido aos sólidos (argila, areia, cascalhos etc.) carreados pela água. Bacias de dissipação de energia, que não tenham sido adequadamente limpas, podem ser erodidas pelo efeito abrasivo dos materiais sólidos na água.

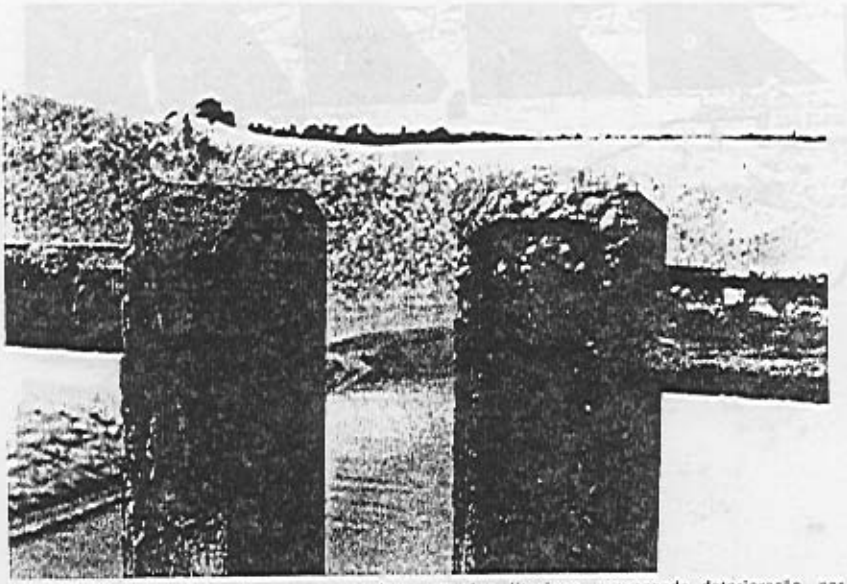


Figura 7.179 — Falta de cobrimento para a armadura, em obra litorânea, provocando deterioração por oxidação e a decorrente expansão na armadura

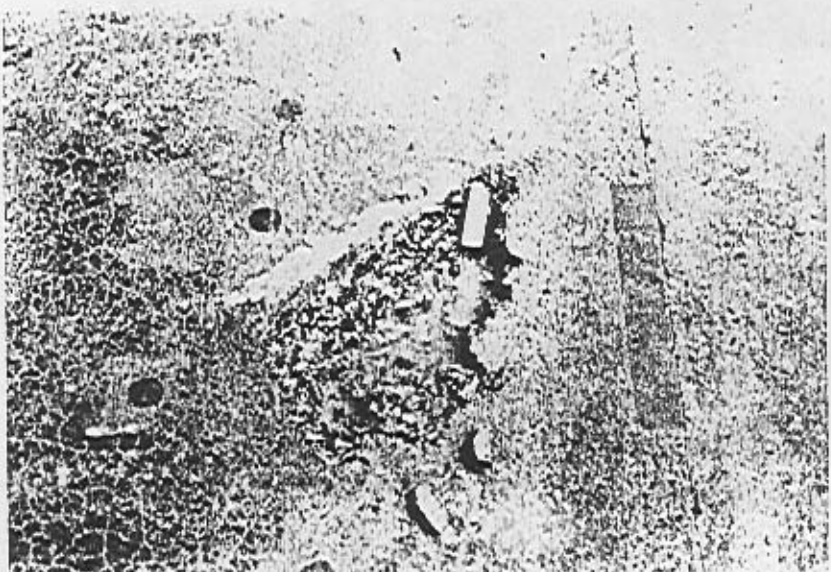


Figura 7.180 — Erosão por cavitação em área de alta velocidade de escoamento e deflexão abrupta (notar a marca de um ressalto de argamassa na região superior esquerda da erosão)

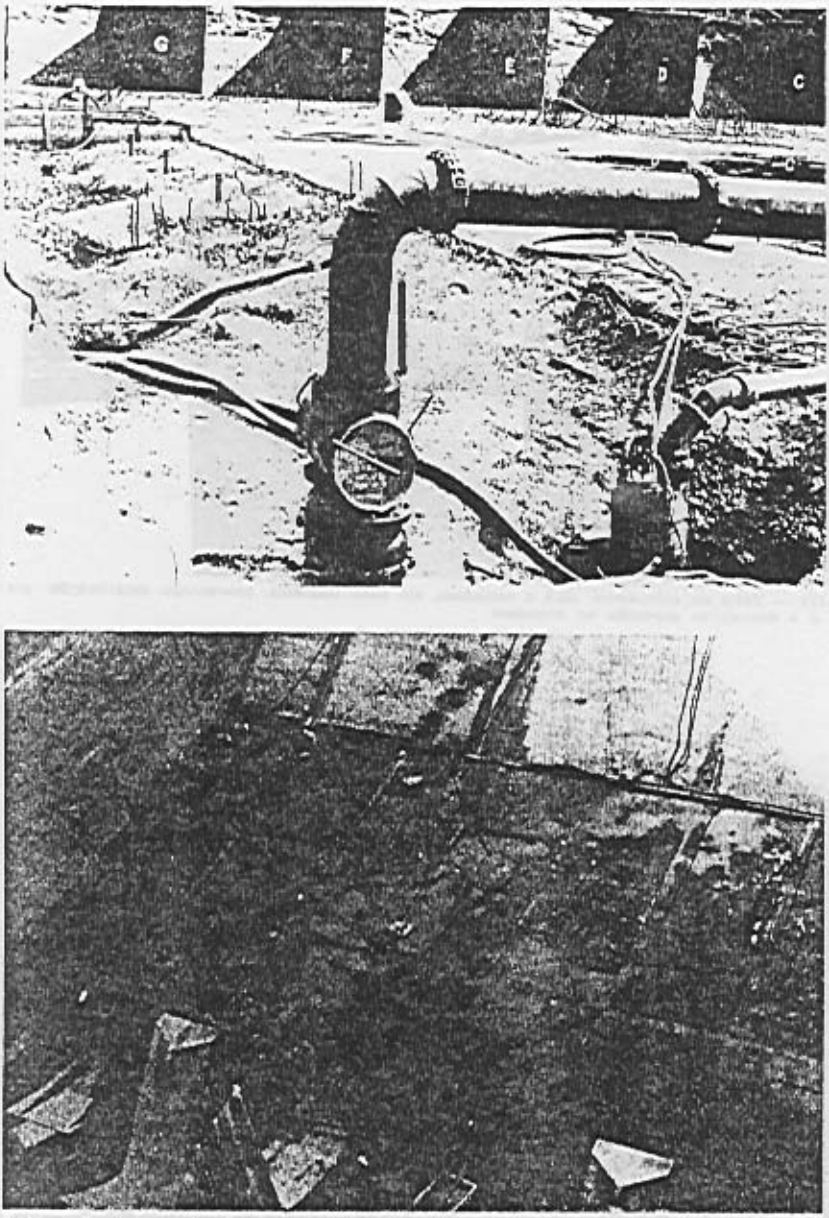


Figura 7.181 — Erosão por abrasão de superfícies de bacias de dissipação de vertedouros, causada por carreamento de fragmentos de rocha

A erosão do concreto pode resultar da formação de produtos solúveis que são removidos pelo fluxo de um líquido. O ataque por ácidos orgânicos ou inorgânicos pode ser desse tipo. A pasta de cimento tem desempenho distinto quando em contato com cada um desses ácidos.

Certos agentes podem combinar com elementos do cimento para formar compostos de baixa solubilidade mas que podem deteriorar o concreto por uma ação expansiva. É o caso das reações de soluções de sulfatos (sódio, magnésio e cálcio) com a cal hidratada, e o aluminato de cálcio hidratado, formando o sulfato de cálcio e cálcio sulfo-aluminato, de caráter expansivo.

O concreto sendo submetido a ciclos alternados de molhagem e secagem, e na ocorrência de certos sais, tais como carbonato de sódio, pode sofrer deterioração na superfície, pela sua cristalização expansiva nos poros do concreto.

Alguns metais podem sofrer corrosão quando em contato com o concreto. O alumínio, ao ser exposto ao concreto fresco, pode ser atacado pelos álcalis na presença de água. O chumbo pode sofrer corrosão em contato com o concreto fresco, mas não sofre ataque após o endurecimento do concreto ou na ausência de água.

A corrosão do aço da armadura evidencia-se pela fissuração e a esfoliação do concreto (ver figura 7.179).

7.12.2 Ensaios de durabilidade

O ensaio mais comum, para verificar a durabilidade do concreto, é o da aplicação de ciclos alternados de molhagem e secagem.

Outro ensaio comum é o de exposição às intempéries, como existente no laboratório da Cesp — Ilha Solteira [7.121]. Esses ensaios, entretanto, não são padronizados.

Outro tipo de exposição para verificar a durabilidade, muito usado nos países de clima frio, é o da ciclagem gelo-degelo [7.122].

O acompanhamento de desempenho do concreto e a verificação da durabilidade, nesses ensaios de exposição, pode ser feito através de corpos de prova auxiliares expostos às mesmas condições, ou através de ensaios não destrutivos (ver item 7.2.3) aplicados aos próprios corpos de prova expostos.

O desempenho do concreto sob a ação de certos agentes físicos ou químicos, por ensaios acelerados carece, entretanto, de padrão comparador com o ambiente real de exposição. Os ensaios são de grande valia, por outro lado, para comparar materiais sob mesmas condições de exposição, possibilitando a escolha de um mais resistente e durável.

O desempenho do concreto quanto a ações erosivas também pode ser avaliado através de ensaios.

Vários tipos de aparelhos têm sido usados em diferentes laboratórios para avaliar a resistência dos materiais à erosão por cavitação. Os diferentes aparelhos podem ser agrupados em duas categorias principais:

— Aqueles que dependem da formação de baixas pressões, resultantes de fluxos em alta velocidade.

— Aqueles que produzem cavitação por meio de pontos de descontinuidades localizadas.

O U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (WES) [7.123] e o Bureau of Reclamation [7.71] desenvolveram um aparelho do tipo Venturi (ver figuras 7.184 e 7.185) para atender a definição de aparelhos com baixa pressão. Nesse aparelho o corpo de prova é exposto paralelamente a um fluxo de água tentando simular as condições de campo.

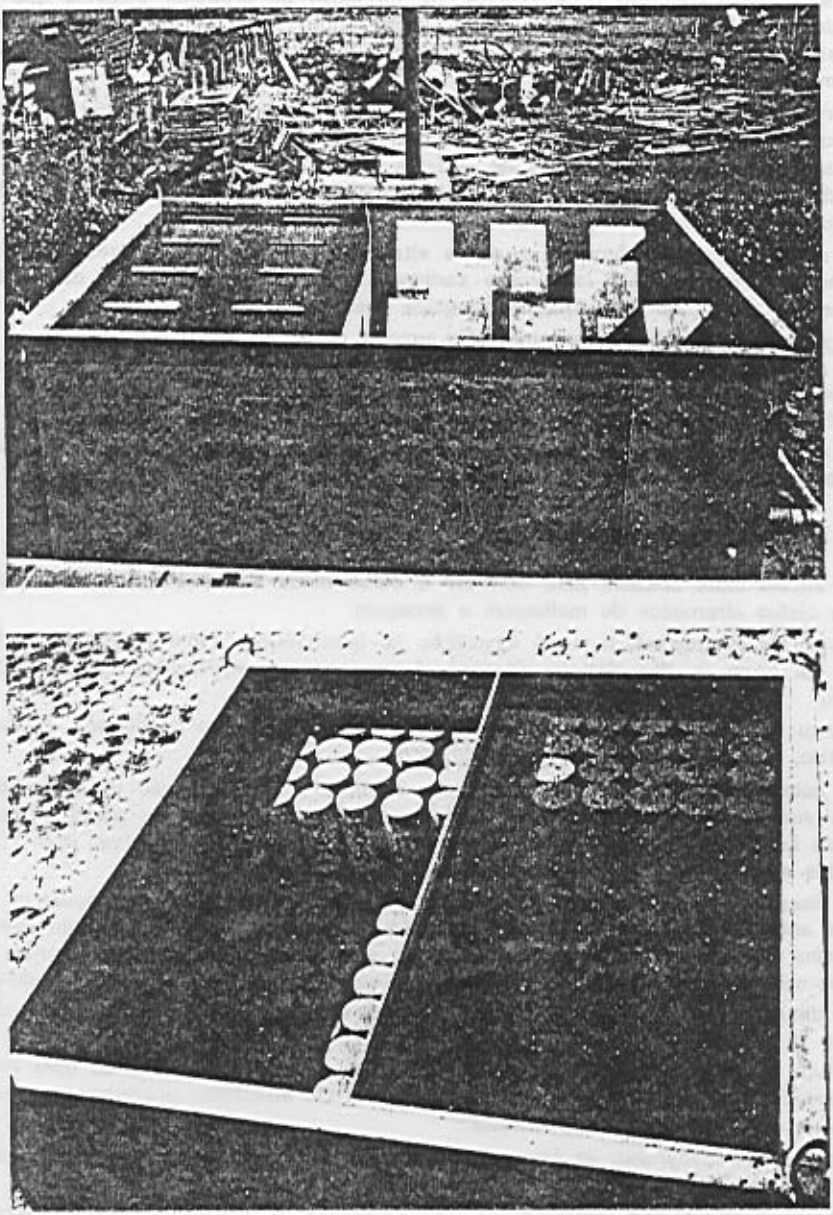


Figura 7.182 — Exposição de concretos a ciclos de molhagem e secagem. São vistos testemunhos e corpo de prova em um tanque para acompanhamento de propriedades — Laboratório Cesp — Ilha Solteira



Figura 7.183 — Exposição de concretos a ciclos naturais — Laboratório Cesp — Ilha Solteira

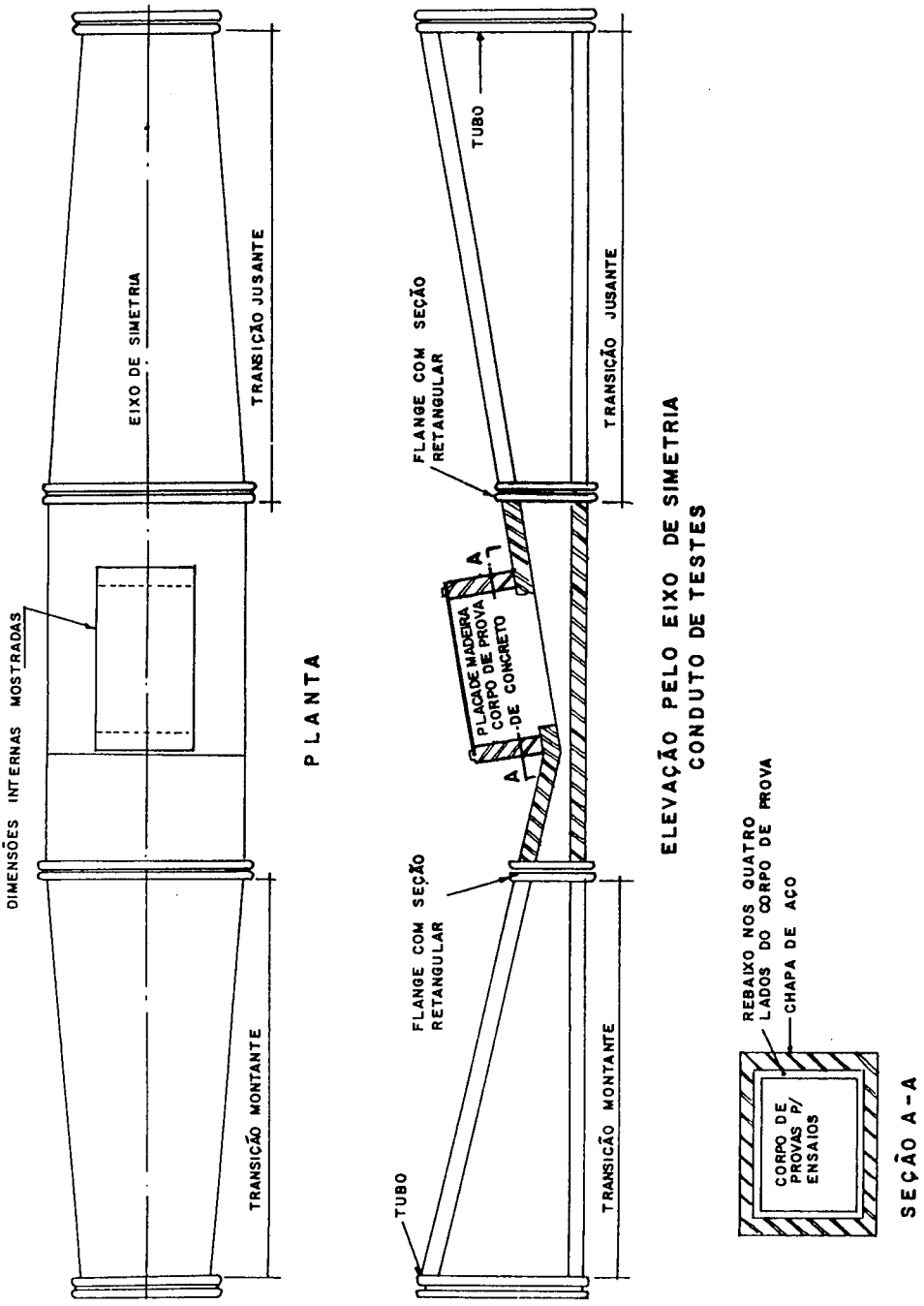


Figura 7.184 — Aparelho destinado a determinação dos efeitos de cavitação desenvolvido pelo WES-Waterways Experiment Station — Corps of Engineers

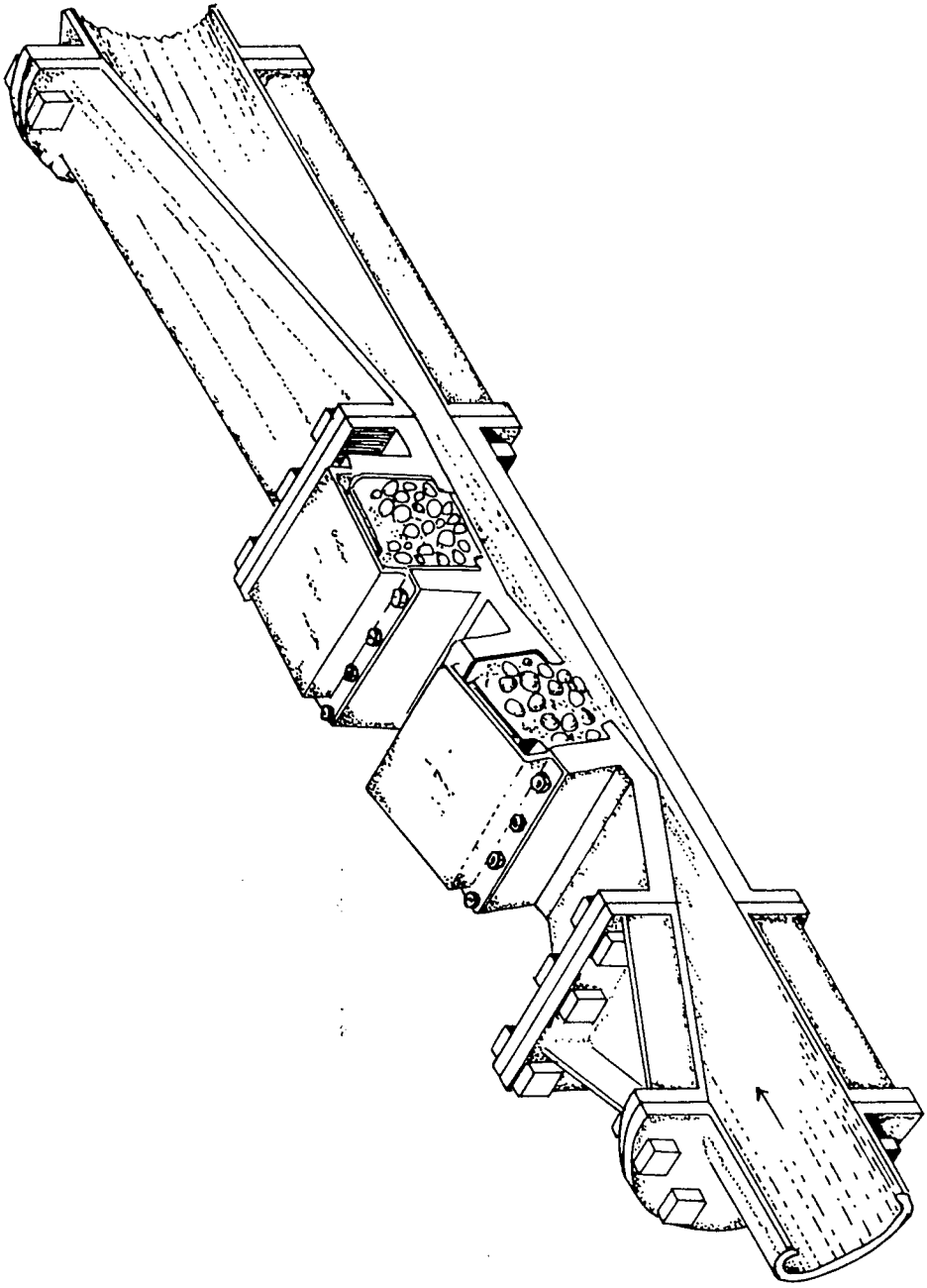


Figura 7.185 — Aparelho destinado à determinação dos efeitos de cavitação desenvolvido pelo Bureau of Reclamation

Esse tipo de aparelho tem sido usado [7.124] no Brasil pelo C.T.H. Centro Técnico de Hidráulica da E.P.U.S.P. — SP.

Tem-se notícia [7.123], entretanto, que esse tipo de aparelho apresenta um comportamento não constante ao longo de um período de uso, não podendo ser utilizado por longo tempo.

A partir de 1970 o Corps of Engineers [7.71] [7.125] [7.126] [7.127] desenvolveu um aparelho para ensaios submetendo o material a um fluxo de elevada velocidade e pressão, semelhante ao que ocorre em algumas superfícies de escoamento. O esquema do equipamento é mostrado na figura 7.186.

O equipamento da figura 7.186 procura produzir cavitação por pontos de descontinuidade do fluxo.

O sistema opera sob uma coluna de 73,2 m e é controlado para dar uma vazão de 1,7m³/s a uma velocidade ao redor de 37 m/s. Durante o ensaio, a cavitação é produzida por dois "cavitadores" — ressaltos metálicos — instalados em furos moldados na lage do corpo de prova.

Vários métodos de ensaios [7.128] [7.129] também têm sido usados pelos pesquisadores para avaliar a resistência da superfície de concreto contra a erosão por abrasão.

Dentre esses métidos os mais usados são os de rotação de discos abrasivos, rodas dentadas, rolamento de esferas e de jateamento com cargas abrasivas.

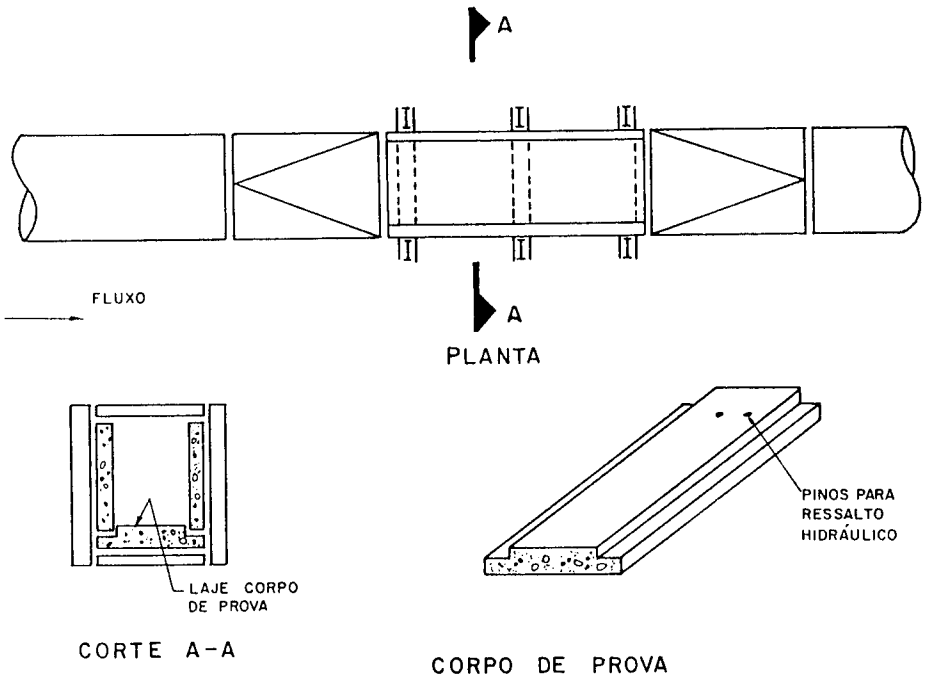


Figura 7.186 — Esquema do aparelho de ensaios para avaliar cavitação, empregado pelo Corps of Engineers na barragem de Detroit

Todos esses métodos, entretanto, têm apresentado dispersões [7.128] [7.130] e nenhum deles avalia satisfatoriamente a resistência da superfície do concreto quando submetida à ação abrasiva de sólidos no fluxo d'água. Esses ensaios podem orientar comparativamente o comportamento dos materiais.

Devido a insatisfatoriedade dos métodos usuais bem como pela conveniência de se avaliar o comportamento dos materiais, o Corps of Engineers — U.S. Army [7.128] [7.130] desenvolveu um método de ensaios de abrasão submerso. No Brasil, esse método foi adotado pelos laboratórios de concreto da Itaipu Binacional [7.131] e da Cesp em Ilha Solteira.

O aparelho desenvolvido para o ensaio consiste (ver figura 7.187) de um motor, uma pá agitadora, um recipiente cilíndrico. Esferas abrasivas de vários diâmetros são colocadas no recipiente com água.

A água e a carga abrasiva são mantidas em circulação sob a ação da pá agitadora, sobre a superfície do corpo de prova.

Esse método pode simular a ação abrasiva sobre a superfície do concreto, como ilustra a figura 7.188. Pode, desta forma, avaliar comparativamente a resistência à erosão por abrasão de superfícies de concretos. A resistência à erosão por abrasão é expressa pela perda (em massa) do corpo de prova, após ensaio.

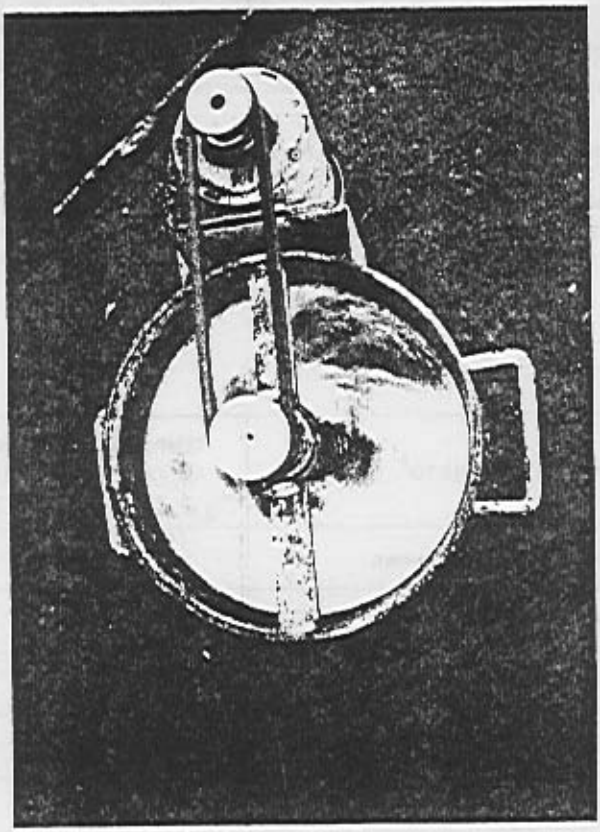


Figura 7.187 — Vista da ação abrasiva durante o ensaio

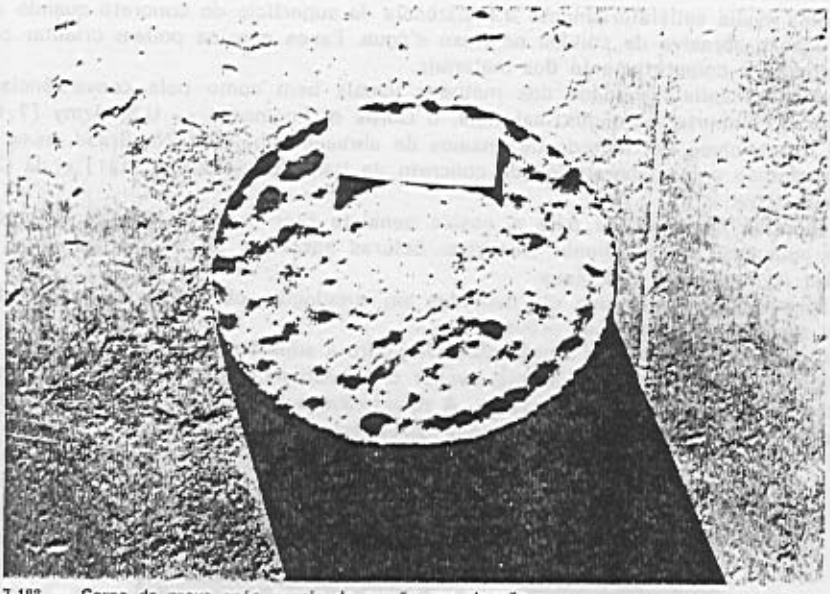


Figura 7.188 — Corpo de prova após ensaio de erosão por abrasão

Ensaios executados de acordo com a metodologia esquematizada como na figura 7.186, mostram ([7.123] [7.125] [7.126] [7.127] o quadro de valores da figura 7.189.

Os dados mostram que o uso de fibras de aço no concreto aumenta a resistência à erosão por cavitação quando comparada a do concreto com agregado comum.

A adição de polímeros ao concreto convencional também incrementa a resistência à cavitação.

TIPO DE CONCRETO	TEMPO EM HORAS PARA ERODIR ATÉ A PROFUNDIDADE DE			
	2,5 cm	3,8 cm	5 cm	7,5 cm
CONCRETO COM AGREGADOS COMUNS	4	7	15	40
CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO	15	28	49	121
CONCRETO POLIMERIZADO	32	60	84	122
CONCRETO COM FIBRAS E POLIMERIZADO	CONSTANTE APÓS 14	–	–	–
ARGAMASSA POLIMERIZADA	14	154	–	–

Figura 7.189 — Quadro de valores dos ensaios de cavitação — de acordo com ensaio da figura 7.186

A adição de polímeros aos concretos com fibras, bem como argamassa polimerizada, melhora significativamente a resistência à cavitação.

Os ensaios efetuados pelo Corps of Engineers [7.128] [7.129] e pela Itaipu Binacional [7.131] mostram que a redução do fator água/cimento aumenta a resistência à erosão por abrasão. Isto em outras palavras induz que o aumento da resistência mecânica à compressão traduz um incremento na resistência à abrasão por cavitação. Essa correlação geralmente não é linear.

Não há, entretanto, uma relação de variação entre a perda por abrasão (Los Angeles) dos agregados e a resistência à erosão por abrasão contendo os diversos agregados. No entanto, existe uma significativa correlação entre a dureza (Mohs) do agregado e resistência à abrasão dos concretos com esses agregados. Isto faz supor que concretos contendo agregados moles são menos resistentes à erosão por abrasão do que concretos com agregados duros.

A experiência de uso e a observação de superfícies de concreto submetidas a escoamento de água em alta velocidade [7.132] tem demonstrado que os concretos com agregados de menor tamanho máximo são mais resistentes à erosão do que concretos com agregados de grande bitola.

Os tipos de concretos também mostram comportamentos distintos quando analisados sob o ponto de vista de resistência à erosão por abrasão, pois, como citado anteriormente, a resistência à abrasão é correlacionável com a dureza do agregado e depende do agregado do concreto que se usa para a comparação. Assim o concreto com fibras de aço apresenta comportamento distinto quando comparado com concretos contendo britas de basaltos e quando comparado com concreto contendo seixo rolado de quartzito, como mostra a figura 7.190 de [7.131].

O concreto submetido a tratamento a vácuo [7.2], no qual o excesso de água é retirado pela sucção, é significativamente mais resistente à erosão do que o concreto produzido normalmente.

Concretos com polímeros e argamassas epoxídicas são mais resistentes à erosão do que o concreto convencional.

De maneira geral, materiais de revestimento superficial (resinas epoxídicas, poliuretanos, resinas acrílicas, agentes endurecedores, metais) têm boa resistência à abrasão. É importante considerar, entretanto, as condições de aplicação e uso desses materiais. Alguns materiais (por exemplo, certas resinas epoxídicas) apresentam comportamento distinto quando em condições de serviço diferentes. Isto é, apresentam um tipo de comportamento quando em superfícies submersas e outro comportamento em superfícies submetidas à submersão cíclica.

TIPO DE AGREGADO NO CONCRETO	Ø MAX.	A/C	PERDA EM PESO POR ABRASÃO (%)
BRITAS DE BASALTO + FIBRAS	19	0,40	3,38
BRITAS DE BASALTO	19	0,40	4,74
SEIXOS ROLADOS DE QUARTZITO	19	0,40	2,81

Figura 7.190 — Perdas em peso por abrasão no ensaio mostrado nas figuras 7.187 e 7.188

7.13 Referências Bibliográficas

[7.1] ASTM-C-642 Standard Test Method for Specific Gravity, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.

[7.2] Construções de Concreto — Manual de Prática para Controle e Execução — Editora Pini — Francisco Rodrigues Andriolo — 1984.

[7.3] Influência das Propriedades de algumas Rochas nas propriedades do Concreto — Ibracon — 1983 — Walton Pacelli de Andrade — José Thomaz França Fontoura — Rubens Machado Bittencourt — Elcio Antonio Guerra.

[7.4] Concretos para a obra da Usina de Água Vermelha — Cesp — 1974 — Francisco Rodrigues Andriolo — Bento Carlos Sgarboza.

[7.5] Informações sobre a evolução das resistências do concreto até a idade de 5 anos — Ibracon — 1984 — José Augusto Braga — Ademar Sonoda — Luércio Scandiuzzi — Francisco Rodrigues Andriolo.

[7.6] ASTM-C-39 — Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

[7.7] ABNT - NBR-5739 — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto.

[7.8] LCI-210 — Itaipu Binacional — Método de ensaio para ruptura axial de corpos de prova cilíndricos de concreto.

[7.9] Influência de alguns parâmetros sobre a resistência do concreto — Ibracon — 1983 — Miguel Normando Abdala Saad — Paulo José Ribeiro de Oliveira — Flávio Moreira Salles.

[7.10] ASTM-C-617 — Standard Method of Capping Cylindrical Concrete Specimens.

[7.11] LCI-209 — Itaipu Binacional — Método para Capeamento de Corpos de Prova Cilíndricos de Concreto.

[7.12] "Argamassas de Enxofre para Capeamento de Corpos de Prova" — Ibracon — 1983 — Hans Roman Edmundo Bucher — Hugo da Costa Rodrigues Filho.

[7.13] Relatório — C-41/74 — Cesp — Comparações de Propriedades de Concretos com britas e concretos com cascalhos.

[7.14] "Controle de Qualidade na Fabricação de Materiais para Construções de Concreto — Considerações sobre as vantagens e custos" — Ibracon — 1985 — Francisco Rodrigues Andriolo.

[7.15] Relatório C-07/75 — Cesp — Variações de Propriedades de Concretos devido à variação do tipo e finura da areia.

[7.16] Propriedade do Concreto Massa contendo Pozolana de Argila — Ibracon — 1983 — Miguel Normando Abdala Saad — Walton Pacelli de Andrade — Wladimir A. Paulon.

[7.17] "Bureau of Reclamation Practices in Mass Concrete" — Walter H. Price — Elmo C. Higginson — Symposium on Mass Concrete.

[7.18] "Concrete for Massive Structures" — Concrete Information-Portland Cement Association — 1966.

[7.19] "Corps of Engineers Experience with Pozzolans" — William R. Waugh — Symposium on Mass Concrete.

[7.20] "Mass Concrete for Oroville Dam" — Lewis H. Tuthill — Robert F. Adams — Donald R. Mithcell — Symposium on Mass Concrete

[7.21] PC-27/79 — Itaipu Binacional — Verificação da Influência de Materiais e Temperaturas nas Propriedades do Concreto Fresco e Endurecido — Resultados de Ensaios.

[7.22] Relação de Resistência entre Concretos Massa Integrais e peneirados — Ibracon — 1981 — Roberval Franzese da Silva — Luercio Scandiuzzi.

[7.23] RE-01/81 — Itaipu Binacional — V — Resumo do Controle Tecnológico do Concreto.

[7.24] ASTM-C-42 — Standard Method of Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete.

[7.25] Concrete Construction Handbook — Joseph J. Waddell.

[7.26] Concrete Manual — U. S. Department of the Interior — Bureau of Reclamation — 8.ª Edição.

[7.27] RC-06/75 — Cesp — Curva Limite de Deformação na Ruptura — Estudos Iniciais - 1975.

[7.28] CRD-C-93 — Corps of Engineers — Standard Recomended Practice for Determining the Mechanical Properties of Hardened Concrete Under triaxial Loads.

[7.29] LCI-213 — Itaipu Binacional — Método de Ensaio em Corpos de Prova cilíndricos de Concreto ou Rocha submetidos à compressão triaxial.

[7.30] RC-20/75 — Cesp — Ensaios Triaxiais em Concretos — Estudos Iniciais.

[7.31] RC-58/80 — Itaipu Binacional — Determinação dos Parâmetros de Tensão e a Relação Tensão Deformação de espécimes de Concreto submetidos à Compressão Triaxial.

[7.32] RC-38/81 — Itaipu Binacional — Estudos de Concretos Submetidos à Compressão Triaxial.

[7.33] Testing Hardened Concrete: Nordestructive Methods — A.C.I. Monoghaph n.º 9 — 1976 V. Mohan Malhotra.

[7.34] ASTM-C-803 — Tentative Test Method foi Penetration Resistance of Hardened Concrete.

[7.35] La Resistência efectiva del Hormigon — Analisis de Métodos Actuales para su valoracion y uso de los resultados obtenidos — Milan E. Klaric — Ibracon — 1984.

[7.36] NBR-7584 — ABNT — Concreto Endurecido — Avaliação da Dureza Superficial pelo Esclerômetro de Reflexão.

[7.37] ASTM-C-805 — Tentative Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete.

[7.38] Anais do II Simpósio sobre Normalização de Cimento, Concreto e Agregados - ABNT - 1982.

[7.39] Teory of Sound — Rayleigh, John — 1945.

[7.40] ASTM-C-215 — Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens.

[7.41] MCC-09:CESP-TS — Método de Ensaio para determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico.

[7.42] Possibilidades Técnico-Econômicas de Implantação do Controle de Execução de Pavimentos por Meio de Densímetro Nuclear — Boletim Técnico Sotaffe n.º 7 — 1978.

[7.43] ASTM C-469 — Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.

[7.44] Itaipu — Relatório RC-31/79 — Estudo comparativo entre diversos medidores de deformação para concreto.

[7.45] Scandiuzzi, L; Andriolo, F. R; Braga, J. A; Sonoda, A; Ibracon — Agosto — 1984 — Considerações sobre o módulo de deformação e permeabilidade do concreto.

[7.46] Borges, J. F. — CEB — 1973 — Structural Concrete Fundamental.

[7.47] RC-33/79 — Itaipu — Resistência à tração de Concretos da Obra de Itaipu.

[7.48] Neville, A. M. — "Creep of Concrete: Plain, Reinforced and Prestressed", North Holland Publishing — 1970.

[7.49] Polivka, M.; Pirtz, D.; Adams, R. F.; "Studies of Creep in Mass Concrete". ACI Special Publication SP-G — Symposium on mass concrete.

[7.50] Houghton, D. L.; "Determining Tensile Strain Capacity of Mass Concrete" ACI Journal Proceedings — V. 73 — n.º 12-1976.

[7.51] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) — Projeto 18:04.005 — 001/83 — Concreto Endurecido — Ensaio de Fluencia.

[7.52] ASTM-C-512-76 — Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression.

[7.53] Cesp — MCC-15 — Fluência do Concreto.

[7.54] Itaipu — LCI-227/76 — Método de Ensaio para determinação da fluência do concreto à compressao.

[7.55] Furnas — Pesquisa de Concreto para o Aproveitamento Hidrelétrico de Tucuruí.

[7.56] Ibracon — 1983 — Andrade, W. P.; Fontoura, J.T.F.; Bittencourt, R. M.; Guerra, E. A. — Determinação da Fluencia do Concreto.

[7.57] XI Seminário Nacional de Grandes Barragens Sverzut, H; Ferras, L, L. — Ensaios de deformaçao lenta em concretos usados na obra de Ilha Solteira.

[7.58] Itaipu — RC-31/82 — Considerações Básicas da Fluência do Concreto e Resultados de Ensaios na Obra de Itaipu.

[7.59] ASTM C-293-79 — Flexural Strength of Concrete (using simple beam with Center Point Loading).

[7.60] ASTM C-78-75 — Flexural Strength of Concrete (using simple beam with Third-Point Loading).

[7.61] Itaipu LCI-232/76 — Método de Ensaio para determinação da tensão de tração por flexão (aplicando carga no terço médio).

[7.62] Cesp — Ilha Solteira — MCC-16 — Resistência à tração e capacidade de deformação do concreto por flexão de vigas — carregamento rápido.

[7.63] Associação Brasileira de Normas Técnicas MB-212 — Resistência à tração simples de argamassas e concretos, por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

[7.64] Associação Brasileira de Normas Técnicas MB-2 — Confecção e cura de corpos de prova de concreto cilíndricos ou prismáticos.

[7.65] Itaipu — Relatório C-22/78 — Estudo Comparativo de dimensões dos corpos de provas para o ensaio de compressão diametral.

[7.66] Ibracon — Reunião de 1978 — Bucher, H. R. E.; Rodrigues, P. P. F. — Correlação entre resistências mecânicas do concreto.

[7.67] Ibracon — Reunião de 1982 — Andriolo F. R.; Scandiuzzi, L. — Parâmetros de Concretos destinados à Fundação de Obras em Concreto Massa.

[7.68] Concrete Studies for Ilha Solteira Dam — Universidade da Califórnia — Berkeley.

[7.69] Cesp — Ilha Solteira — Relatório LEC-CM-14/85 — Porto Primavera — Estudo dos Concretos feitos com cimento pozolânico.

[7.70] Sobral, Hernani, Savio — Propriedade do Concreto Endurecido — ABCP — Estudo Técnico n.° 61.

[7.71] Bureau of Reclamation — Materials Laboratory Procedures Manual — U. S. Department of Interior — 1957.

[7.72] Sallstrom — Swedish State Power Board.

[7.73] CRD-C23-76 — Corps of Engineers — Standard Method of Tests for Specific Gravity, Absorption and voids in Hardened Concrete.

[7.74] Itaipu RC-13/82 — Estudo de Permeabilidade de Concretos.

[7.75] Corps of Engineers — CRD-C-89/64 — Method of Test for Longitudinal Shear Strength, Unconfined Single Plane.

[7.76] Itaipu Binacional — Relatório RE-02/80 — Concretagem de Galerias da Fundação da Barragem principal — Testes e Concretagem da TT-3.

[7.77] ASTM-C-234 — Standard Test Method for Comparing Concretes on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel.

[7.78] ASTM-C-882 — Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems used with concrete.

[7.79] Corps of Engineers — CRD-C-39-55 — Method of Test for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Concrete.

[7.80] MCC-19-Cesp — Método de Ensaio de Dilatação Térmica do Concreto.

[7.81] LCI-233/76 — Itaipu — Método de Ensaio para Determinação do Coeficiente de Expansão Térmica do Concreto.

[7.82] Andrade, W. P.; Fontoura, J. T. F.; Bittencourt, R. M.; Guerra, M. A. — Pesquisa de Concreto para o Aproveitamento Hidrelétrico de Tucuruí.

[7.83] Zoldners, N. G. — Thermal properties of Concrete Under Sustained Elevated Temperature.

[7.84] Itaipu — Relatório RC-29/79 — Determinação e Verificação do Coeficiente de Expansão Térmica do Agregado Graúdo (Basalto) da Pasta da Argamassa e do Concreto.

[7.85] Cesp — Relatórios C-09 e C-10/68 — Estudo do Concreto para o Muro de Ligação Direito de Ilha Solteira.

[7.86] Cesp — Relatório C-39/72 — Determinação do Coeficiente de Expansão Térmica da Argamassa.

[7.87] Lea, F. M. — The Chemistry of Cement and Concrete.

[7.88] Bureau of Reclamation — Bulletin I — Part VII — Cement and Concrete Investigation Termal Properties of Concrete.

[7.89] Itaipu — LCI-231/78 — Método de Ensaio para Determinação do Calor Específico do Concreto.

[7.90] Itaipu — Relatório RC-45/79 — Determinação do Calor Específico de Misturas do Concreto.

[7.91] Ibracon — Propriedades Térmicas do Concreto — Comitê de Concreto Massa — 204 — Subcomitê — Propriedades.

[7.92] Whiting, Lituin and Goodwin — Specific Heat of Selected Concretes — ACI Journal — July 1978.

[7.93] Neville A. M. — Properties af Concrete.

[7.94] Colmbra A. L. — Manual do Engenheiro — 1.° Tomo — 3.° Volume — Termodinâmica.

[7.95] MCC-20-Cesp — Método de Ensaio para Determinação da Condutividade Térmica do Concreto.

[7.96] Itaipu — Relatório RC-37/81 — Estudo das Propriedades Térmicas do Concreto.

[7.97] LCI-222/76 — Itaipu — Método de Ensaio para determinação da elevação adiabática de temperatura do Concreto.

[7.98] CRD-C-38-73 — Method of Test por Temperature rise in Concrete.

[7.99] Boulder Canyon Project — Final Reports - Part VII - Cement and Concrete Investigations.

[7.100] Bureau of Reclamation — Concrete Manual — Eigth Edition.

[7.101] Saad, M. N. A.; Andrade, W. P.; Paulon, V. A. — Propriedades do Concreto Massa contendo pozolana de argila.

[7.102] Andrade, W. P.; Fontoura, J. T. F.; Bittencourt R. M. e Guerra, E. A. — A utilização de amônia como retardador da liberação de calor do concreto.

[7.103] Itaipu — Relatório RC-10/84 — Estudo das Influências do Teor de Material Pozolânico nas Propriedades Térmicas do Concreto.

[7.104] American Concrete Institute — Comitê 207 — Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures.

[7.105] Itaipu — Relatório RE-01/81 — 4.° Resumo do Controle Tecnológico do Concreto.

[7.106] ASTM C-827/78 — Test for Early Volume Change of Cementitious Mixtures.

[7.107] IX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Costanzo, J. E.; Kuperman, S, C. — A observação de barragens de concreto — Auscultação da Barragem de Ilha Solteira.

[7.108] American Concrete Institute — Committee 204 — Control of Cracking in Concrete Structures.

[7.109] Portland Cement Association — Design and Control of Concrete Mixtures.

[7.110] ASTM C-157-75 — Length Change of Hardened Cement Mortar and Concrete.

[7.111] Gitahy, H. S. — Reação álcali-sílica. Mecanismo diagnóstico e medidas preventivas.

[7.112] Cesp — Relatório C-09/69 — Considerações Técnicas sobre a Finura do Cimento e Pozolana de Jupiá.

[7.113] Cesp — Relatório C-14/71 — Estudo da Fabricação de Pozolana.

[7.114] Cesp — Relatório C-24/73 — Verificação da Propriedade do Concreto variando-se a Porcentagem de Material Pozolânico.

[7.115] Cesp — Relatório C-39/74 — Valores Comparativos de Concreto com Materiais Pozolânicos.

[7.116] Sgarboza, B. C.; Carvalho, P. A.; Andrade, J. R. A. — A Influência do uso de Cimentos Pozolânicos com alto teor de cinzas e alta finura, principalmente no combate à reação álcalis — agregado.

[7.117] Ibracon — 1983 — Propriedade do Concreto Massa contendo Pozolana de argila.

[7.118] Itaipu — Relatório RC-22/80 — Variação Autógena de Volume.

[7.119] Cesp — Ilha Solteira — Relatório C-22/77 — Estudo da Expansão causada pelo MgO do cimento.

[7.120] ABNT — Projeto 18:04-11.001/85 — Concreto Endurecido — Determinação da Resistividade Elétrica — Volumétrica.

[7.121] RC-05/75 — Cesp — Ilha Solteira — Verificação da Durabilidade do Concreto através da exposição ao tempo.

[7.122] ASTM-C-666 — Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.

[7.123] Laboratory and Field Evaluation of Polymeric Cavitation Erosion — Resistant Materials on Concrete — T. B. Husbands — L. Pepper — U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station — Corps of Engineers — 1976.

[7.124] Cavitação — Efeitos sobre Superfícies de Resina de Epóxi e de Concretos Comuns e Especiais — Joannis Gikas — Hikuo Tamada — Comunicação — XIV — S.N.G.B. — 1981.

[7.125] Investigation of Cavitation — Erosion Resistance of Conventional Steel Fiber and Polymer Impregnated Concrete for Tarbela Dam — Corps of Engineers — U. S. Army - 1977.

[7.126] Cavitation — Eroson Test of Polymer — Dry Sand Repair of Concrete, Libby Dam Sluiceways and Stilling Basin — Corps of Engineers — U. S. Army — 1977.

[7.127] Cavitation Resistance of Some Special Concretes — D. L. Houghton; O. E. Borge; J. A. Paxton — A. C. I. Journal/1978.

[7.128] Maintenance and Preservation of Concrete Structures — Abrasion-Erosion Resistance of Concrete — Tony C. Liu — U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station — 1980.

[7.129] Abrasion Resistance of Concrete — Tony C. Liu — A.C.I. — Journal — 1981

[7.130] Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials — STP — 169 B — A.S.T.M.

[7.131] Resistência à abrasão da superfície do concreto — Ibracon — 1983 — José Oscar Marchante — Luiz Cesar Rosário — José Augusto Braga.

[7.132] Reparos efetuados no Vertedouro de Superfície Ilha Solteira — Cesp.