

DISCUSSÕES E SIMPLIFICAÇÕES PARA ENTENDIMENTO E LIMITAÇÕES DOS ASPECTOS TÉRMICOS PARA EXECUÇÃO DE ESTRUTURAS MASSIVAS

GAMBALE, Eduardo de Aquino
Engenheiro Especialista Senior – Eletrobrás Furnas
gambale@furnas.com.br

ANDRIOLO, Francisco Rodrigues
Diretor- Andriolo Engenharia Ltda.
www.andriolo-eng.com - fandrio@andriolo-eng.com

RESUMO

A partir dos estudos e desenvolvimentos do **Eng. Físico, Prof. Dr. Roy W. Carlson**, nos anos 30, para a construção do **Projeto Hoover (Boulder)**, e nas barragens precedentes que serviram para balizar os Modelos de Análise, três períodos básicos marcaram o desenvolvimento e as ferramentas para avaliar os Aspectos Térmicos devido a geração de calor nos concretos, principalmente nas estruturas massivas.

Os dados de monitoramento de temperaturas e deformações em estruturas, acompanhados pelos estudos computacionais permitem fazer correlações, confirmações e estabelecer simplificações, quanto às influências dos elementos e parâmetros de origem e os comportamentos decorrentes dos concretos nas estruturas massivas. A intenção dos Autores é apresentar essas informações, estabelecer discussões para a eventual e possível simplificação no entendimento e as limitações aplicáveis para controle do aspecto térmico na execução de estruturas massivas. Os dados a debater foram obtidos através de estudos computacionais atualizados e através de medições em protótipos e estruturas de obras, executadas.

ABSTRACT

From the studies and developments of **Eng., Physicist Prof. Dr. Roy W. Carlson**, in 30's years, to the construction of the **Hoover Project** and the precedents that were used to develop the Models for Analysis, three basic periods marked the development and the tools to evaluate the Thermal Aspects due to heat generation in concretes, especially in massive structures.

The monitoring data of temperature and strains in structures, accompanied by computational studies allow to make correlations confirmations and establish simplifications, as influences

from the elements and parameters of origins and behaviors resulting from the concretes in massive structures. The Authors' intention is to present this information, establish discussions for the feasible and possible simplification in understanding and limitations applicable for thermal aspect control on execution of massive structures. Discussing data form obtained by computational studies to date and through measurements on prototypes and structures of works performed

Palavras Chave: concreto massa; temperatura máxima; cálculo térmico; propriedades térmicas

1. INTRODUÇÃO

No campo da engenharia civil relacionada com a tecnologia do concreto o engenheiro se depara com problemas relacionados com o fenômeno da geração de calor no concreto devido a reação de hidratação do cimento ser exotérmica, e quando este fenômeno é considerado importante, o concreto é denominado concreto massa.

O surgimento de fissuras no concreto é um dos problemas mais freqüentes e o conhecimento do fenômeno térmico é de fundamental importância para uma correta avaliação do comportamento destas estruturas tendo em vista a distribuição de temperaturas no interior do maciço. Uma boa estimativa da temperatura máxima pode revelar antecipadamente uma possível tendência de ocorrência de fissuras de origem térmica.

Este artigo procura agrupar fatores objetivando avaliar a temperatura máxima em uma estrutura de concreto massa, de modo simplificado e rápido. Apresenta-se um estudo envolvendo propriedades térmicas que permitirá correlacionar com tipos similares de dosagem ou concreto. O estudo realizado envolveu variáveis intervenientes no processo de cálculo térmico considerando que, com os resultados, será possível determinar ferramentas práticas para formulação de especificações e tomada de decisão rápida em canteiro de obra no que se refere a problemas relacionados ao fenômeno térmico do concreto massa.

2. APRESENTAÇÃO E OBJETIVO

As reações de hidratação do Cimento Portland, que são exotérmicas, dão origem a elevações consideráveis de temperatura em estruturas cujo concreto tem características massivas e o conhecimento da quantidade de calor liberado é importante pois o calor é, algumas vezes favorável e outras vezes desfavorável.

O concreto gera calor após o início da hidratação do cimento nas primeiras idades, quando o módulo de elasticidade é baixo e o concreto está inicialmente ganhando resistência. Até o momento que concreto está aumentando a temperatura, aparecem na estrutura tensões de compressão que não acarretarão fissuras, mas a partir do momento em que atinge a temperatura máxima na estrutura, tenderá a entrar em equilíbrio térmico com a temperatura ambiente e as tensões de compressão ali instaladas começarão a diminuir até o momento que podem mudar de sinal, isto é, as tensões de compressão irão se transformar em tensões de tração. Como já é sabido, o concreto resiste pouco à tração e, portanto a partir deste momento, os problemas de fissuras poderão aparecer desde que as tensões de tração sejam maiores que as tensões admissíveis do concreto a tração.

A elevação máxima da temperatura depende da temperatura do concreto fresco, tipo e consumo de cimento. Entre os fatores que afetam a temperatura máxima na estrutura, estão as dimensões da estrutura, espessura da camada, geração do calor de hidratação, consumo de cimento por metro cúbico de concreto, tipo de forma, pós refrigeração do concreto, temperatura de lançamento, temperatura ambiente e propriedades térmicas do concreto.

No campo prático da Engenharia da Tecnologia do Concreto, o Profissional enfrenta o problema de ter que lançar grandes volumes de concreto e devido à reação de hidratação do cimento ser exotérmica é freqüente a geração de calor na massa de concreto.

A previsão da temperatura máxima que pode ocorrer em uma estrutura e a sua estabilização com a temperatura ambiente é muito importante para que sejam tomadas decisões quanto aos melhores métodos executivos de projeto. Segundo Carlson^[01], muitas vezes existem ótimos planejamentos de construção que produzirão temperaturas favoráveis no concreto massa sem grande custo, mas informações para auxiliar a seleção desses planejamentos geralmente têm faltado.

Uma previsão precisa da distribuição de temperatura no concreto é praticamente impossível pela falta de exatidão e pela complexidade das condições. Contudo, as equações que representam o fenômeno são complexas, e como mostrado por Ulm & Coussy (apud Carvalho, 2002)^[02], a temperatura resultante no fenômeno afeta as propriedades térmicas do concreto, principalmente a dinâmica da elevação adiabática da temperatura na estrutura, fenômeno este denominado energia de ativação.

As temperaturas na superfície da estrutura são geralmente variáveis e raramente conhecidas de maneira precisa. Observa-se que o coeficiente de transmissão de superficial é variável em função da velocidade do vento no local da obra, sendo desconhecido pelos pesquisadores a sua variação no tempo. As características térmicas do concreto são difíceis de serem medidas com precisão e variam em função da temperatura e umidade ambiente e da idade do concreto.

A previsão exata das temperaturas após o lançamento do concreto massa é importante para a análise paramétrica do comportamento térmico do concreto e para tomadas de decisões técnicas a fim de lançar o concreto de uma maneira que não produza fissuras de origem térmica.

Entretanto, até o presente momento não são disponíveis ábacos, figuras ou equações paramétricas que possam correlacionar diretamente os diversos parâmetros influentes com a temperatura máxima alcançada em uma determinada estrutura. Portanto, o conhecimento da temperatura máxima em uma estrutura na qual foi empregado o concreto massa utilizando ábacos, figuras ou equações é o grande desafio contemporâneo.

Para o monitoramento das estruturas, também é importante a instalação de termômetros para leitura das suas temperaturas.

3. DESENVOLVIMENTO DO CONHECIMENTO SOBRE O ASPECTO TÉRMICO DO CONCRETO

Desde a modelagem apresentada pelo Prof. Carlson em 1938^[03], até agora, os métodos de análise térmica, tornaram-se de cada vez, mais rápidos, devido à disponibilidade de computadores. Os conceitos em termos de difusividade, condutividade e mudanças de calor são praticamente os mesmos, mas os soft-wares dão opções para verificar alternativas (condições de concreto colocação - temperaturas, altura de camadas, intervalo entre camadas, Restrição, propriedades térmicas, condições ambientais), para adotar uma condição ótima para construção, controle de temperatura, seleção de equipamentos e custos. É importante lembrar que os métodos de análise térmica concreto mostraram a seguinte evolução:

| Ano | Entidade | Documento | Objetivo |
|----------------------|---|--|--|
| 1960 ^[04] | CoE Army Engineer - Water-ways Experiment Station Vicksburg, Mississippi | Um programa de IBM-656 para cálculo dos gradientes térmicos em estruturas de concreto massa | Um programa para o cálculo do histórico das temperaturas que se desenvolvem durante a construção de uma barragem de concreto em camadas. Informações referentes a condições ambientais e estruturais e propriedades térmicas, tempo de colocação da camada, espessura, número de dias entre as camadas e difusividade térmica e evolução da temperatura adiabática do concreto foram utilizadas para o cálculo. |
| 1981 ^[05] | Reclamation- Bureau of Denver | Monografia de Engenharia n ^o 34 -Controle de fissuração em estruturas de concreto massa | Verificadas as condições de exposição, a temperatura da água e progresso de construção que podem afetar as condições adotadas, e os ajustes que são feitos durante o período de construção. Práticas e procedimentos de construção são antecipadas durante a fase de projeto e especificações. Revisões e alterações são feitas durante a construção, quando necessário, para obter o melhor possível de estrutura consistente com economia e construção de boas práticas. |
| 2000 ^[06] | U.S. Army Corps Engineers Washington, DC | Estudos de Engenharia de Projeto para estruturas de concreto em massa | A análise térmica é categorizada em três níveis de complexidade. O nível de análise térmica selecionado deve ser apropriado para o tamanho, tipo, função e risco e fase de projeto da estrutura, bem como o potencial de economia de custos resultante da análise |

Entretanto, mesmo com as evoluções dos Modelos, da imensa quantidade de dados de monitoramento, praticamente pouco se estabeleceu para uma retro-análise e com isso estabelecer simplificações para o entendimento e apoio prático às decisões, quanto as defesas para controlar o Aspecto Térmico, durante a execução das obras. Causando dificuldades – científicas- para as decisões práticas de engenharia.

Chama-se a atenção sobre a limitada disposição prática para entender o aspecto da Difusão Térmica das camadas do Concreto Compactado com Rolo (CCR), e o rápido equilíbrio com a temperatura ambiente, devido a relação da grande área (da superfície exposta) para a troca de calor e a pequena espessura (da camada, ao redor de 30cm), levando a uma grande massa térmica, com uma grande área de exposição como mostrado por Andrade et al. (2003)^[07].

Devido a essa falta de praticidade, ainda se estabelece limitações na temperatura de lançamento do CCR em vários Países.

Um sistema perfeito da teoria do controle de temperatura e tensões térmica é encontrado em várias publicações^[08], cada uma com maior precisão, com resultados com vários decimais, e inclui os seguintes tópicos:

- Método de simulação para a computação, das variações de temperatura e de tensões da estrutura tendo em conta as influências de fatores incluindo:
 - o processo de construção;
 - as propriedades mecânicas e térmicas, variando com a idade do concreto, da temperatura;
 - a variação da água e do ar ambiente;
 - as várias medidas de controle de temperatura;
- A lei de variação e peculiaridade de tensões térmicas de diferentes tipos de estruturas de concreto maciços;
- Várias medidas técnicas para evitar fissuras do concreto, tais como escolha de matérias-primas, pré e pós resfriamento, isolamento térmico;
- Na fase de projeto de uma estrutura de concreto massa, vários esquemas de controle de temperatura podem ser aplicados.

No conjunto da literatura técnica, praticamente com exceção dos estudos térmicos para o **Projeto Hoover**, se debate sobre o valor individual obtido nos ensaios para cada propriedade térmica e suas dispersões no próprio ensaio, e a significância disso na validade da determinação de uma temperatura máxima, com até duas casas decimais.

4. PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA E CONTROLE DO CENÁRIO TÉRMICO DO CONCRETO

A FIGURA 4.1 apresenta uma adaptação de Calmon (1995) ^[09] dos parâmetros que influem no comportamento térmico de uma estrutura, partindo da caracterização do concreto até a realização do cálculo da temperatura e das tensões de campo.

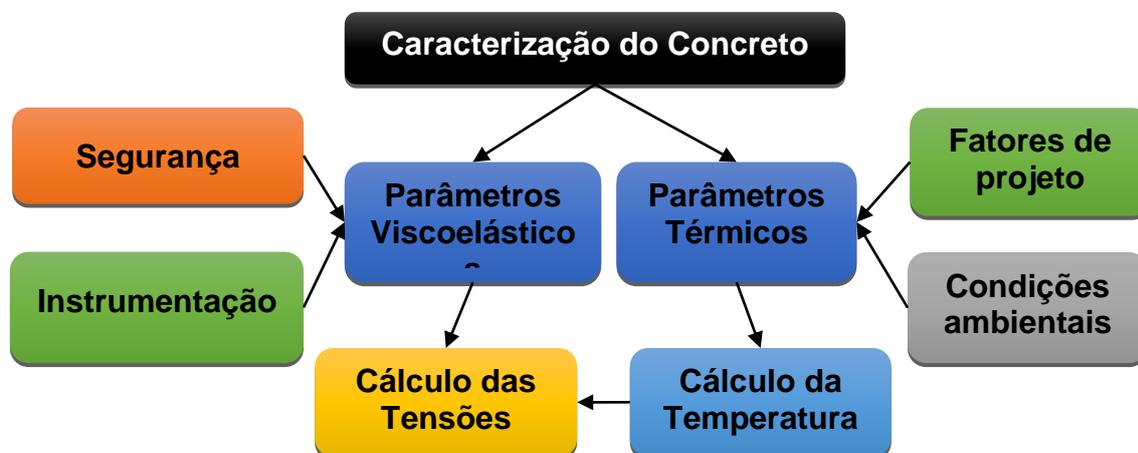


FIGURA 4.1 – Fatores que influem no comportamento térmico de uma estrutura de concreto, adaptado a partir de ^[09].

A Literatura Técnica sobre o assunto é ampla e com muitos detalhes^[10], podendo lembrar os vários aspectos de influência

| Medida Tecnicamente Disponível | Aplicabilidade Prática | Razões e Comentários |
|--|--|--|
| Utilizar concretos com menor teor de aglomerante | Viável e prático | Tem repercussões favoráveis |
| Utilizar aglomerante de reduzido Calor de Hidratação | Viabilidade limitada | Depende da disponibilidade no mercado local |
| Utilizar material Pozolânico | Viabilidade limitada, porém prático | Depende da disponibilidade no mercado local |
| Utilizar concretos com agregados de maior tamanho máximo | Viabilidade limitada, porém prático | Depende das características da estrutura (dimensões e armadura) bem como dos equipamentos disponíveis para manuseio do concreto |
| Utilizar concretos com maior capacidade de alongamento | Viabilidade limitada, porém prático | Pouco prático devido a disponibilidade de outros tipos de agregados, porém viável através da adição de Fibras Metálicas |
| Utilizar concretos com menor difusividade térmica | Viabilidade limitada, e pouco prático | Pouco prático devido a disponibilidade de outros tipos de agregados |
| Tirar proveito das condições ambientes | Pouco prático | Depende na cronologia adotada e da quantidade de concreto a ser colocado em cada estrutura, de modo aproveitar o período de baixas temperatura ambiente |
| Moldar a estrutura em blocos de pequenas dimensões | Pouco viável | Há a necessidade de compatibilizações de Projeto |
| Moldar a estrutura em camadas de pequena altura (HL) | Bastante viável e prático | É uma medida tradicional, com repercussões favoráveis e comprovadas |
| Executar as concretagens das camadas a intervalos (IL) de tempo, mais espaçados | Viável, prático, porém de benefícios limitados | É uma medida tradicional, tem repercussões cronológicas e no aspecto térmico |
| Utilizar Isolamento térmico | Viável porém pouco prático | Serve para controlar o gradiente de queda de temperatura. Usual em zonas de clima frio |
| Controlar a temperatura de colocação (TL) por meio do pré-resfriamento dos agregados e concreto | Viável e muito prático | Tem sido adotado somente em grandes obras, devido ao seu impacto nos custos. |
| Controlar a temperatura de colocação (TL) por meio descompressão térmica pela uso de Nitrogênio Líquido | Viável e prático | Tem sido adotado em elementos estruturais de grande volume unitário |
| Controlar a limitação da temperatura máxima do concreto na estrutura (TM) por meio do pós-resfriamento | Viável e prático | Tem sido adotado somente em grandes obras, devido ao seu impacto nos custos |
| Minimizar a Restrição | Viável em casos específicos | No caso de estruturas onde se considera a necessidade de uso das tensões do contato com a base (como Barragens) é inviável. Nos casos de revestimentos de túneis e condutos é viável e prático |

5. AVALIAÇÕES ATRAVÉS DOS MODELOS MATEMÁTICOS

O problema da condução térmica de calor no concreto consiste na resolução numérica da equação de propagação de calor em um meio sólido, deduzida da *Lei de Fourier* para propagação de calor e do princípio da conservação da energia. A equação constitutiva do fenômeno é apresentada a seguir:

$$h^2 \nabla^2 T + \frac{\partial Ta}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad \{1\}$$

em que:

- $h^2 = \text{difusividade térmica} = \frac{k}{\gamma \cdot c}$
- $k = \text{condutividade térmica}$
- $\gamma = \text{massa específica}$
- $c = \text{calor específico}$
- $T = \text{temperatura do elemento de volume considerado}$
- $t = \text{variável tempo}$
- $Ta = \text{elevação adiabática de temperatura no elemento de volume do concreto em questão.}$

A resolução da equação diferencial {1} é realizada pelo Método dos Elementos Finitos. Entretanto, pode ser demonstrado que para uma propagação unidirecional, segundo Lewis et al. (1996)^[11], que aquela equação se transforma na seguinte expressão:

$$T(t + \Delta t) = \left(h^2 + \frac{C}{\Delta t} \right)^{-1} \cdot \left[W(t) + \frac{C \cdot T(t)}{\Delta t} \right] \quad \{2\}$$

em que:

- $C = \text{matriz que é função das dimensões dos elementos}$
- $h^2 = \text{matriz função das difusividades térmicas dos elementos}$
- $W(t) = \text{vetor carga térmica que é função da elevação adiabática do concreto.}$

Segundo Carlson (1975)^[03] muitos trabalhos foram escritos sobre o método dos elementos finitos após 1953, mas não havia procura deste método para usar na prática. Durante o ano de 1962, foi questionada a segurança de uma barragem em Arkansas, nos Estados Unidos, devido uma grande trinca vertical que a repartia em duas. A única maneira encontrada pelos especialistas da época para quantificar a segurança desta barragem foi a análise paramétrica por elementos finitos, e felizmente foi constatado um grande coeficiente de segurança para este caso. Esta foi uma das primeiras aplicações conhecidas onde foi utilizado o método dos elementos finitos para resolver um problema da engenharia em benefício da sociedade. Carlson (1975)^[03] comenta que em meados da década de 1930 o pesquisador Douglas McHenry já havia iniciado seus estudos de modo a propor um modelo estrutural que pudesse ser feito de matemática em vez de material.

Devido a dimensão da peça estrutural, a propagação de calor pode ocorrer em três, duas ou uma direção. Todavia, na prática da engenharia civil é bastante comum o lançamento de concreto em grandes áreas, fato este que dá preferência para a propagação unidimensional. Neste trabalho foi contemplada a propagação de calor em uma dimensão considerando o concreto um material isotrópico. Outra limitação

do tema refere-se ao fenômeno da energia de ativação que foi desprezado devido a complexidade das equações que representam o fenômeno.

6. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO

6.1 MODELOS ESTATÍSTICOS ADOTADOS

Desenvolveu-se um estudo estatístico envolvendo propriedades térmicas que permite correlacionar com tipos similares de dosagem ou concreto. O estudo envolveu variáveis intervenientes no processo de cálculo térmico considerando que, com os resultados, possa ser possível determinar ferramentas práticas para formulação de especificações e tomada de decisão rápida em canteiro de obra no que se refere a problemas relacionados ao fenômeno térmico do concreto massa.

Segundo William et al. (2006)^[12] quando há vários fatores de interesse em um experimento, que neste caso é uma simulação numérica, um planejamento fatorial deve ser usado. Este projeto foi identificado como projeto fatorial do tipo 2^k sem repetições, pela razão da simulação ser determinista, com sete fatores envolvidos, analisados em dois níveis. Nesta etapa foi utilizado o algoritmo de Yates^[13].

O objetivo desta avaliação é priorizar os fatores mais significantes. Após esta análise preliminar foi escolhido os três fatores mais significantes e rodado em um modelo de projeto de superfície resposta do tipo de três fatores, contemplando a parte fatorial 2^k , ou seja, um cubo com dimensão $k=3$, um ponto central e a parte estrela conforme mostrou Ribeiro (2006)^[14]. Após esta etapa foi feita uma regressão múltipla com blocagem de alguns fatores, usando conhecimentos técnicos.

6.2 FATORES INTERVENIENTES NO PROJETO

Éctore (2004)^[15] observou que o consumo de cimento está diretamente ligado a elevação adiabática da temperatura do concreto. Esse calor, embora possa ser medido por ensaios com o próprio cimento na pasta pura ou em argamassa, só pode ser conhecido com exatidão através da curva de elevação adiabática da temperatura do concreto, medida em um equipamento denominado calorímetro adiabático, cuja descrição mais detalhada pode ser observada em Gambale et al. (2004)^[16]. Por sua vez, segundo Liduário (2006)^[17 & 18], o tipo de cimento e o tipo de adição mineral tem um efeito significativo na elevação adiabática da temperatura do concreto massa. Devido a estas considerações o consumo de cimento é eleito para representar esta parcela do fenômeno.

A difusividade térmica do concreto é definida como sendo um índice que mede a velocidade de dissipação do calor através do concreto. O concreto é considerado um compósito, com uma grande parte constituída de agregados e, segundo Scandiuzzi & Andriolo (1986)^[19], a difusividade térmica é grandemente influenciada pelas características mineralógicas dos agregados e pelo seu grau de saturação.

A análise de 522 resultados de ensaios de difusividade térmica realizados pela Equipe de Furnas (1997)^[20] com diversos tipos de agregados, resulta na distribuição mostrada na FIGURA 6.1 a seguir.

Percebe-se na FIGURA 6.1 uma distribuição de freqüência com comportamento de uma distribuição normal dos resultados em torno de um valor médio aproximado de 0,10 m²/dia. Para este trabalho foi admitido um valor mínimo de 0,05 m²/dia e um valor máximo de 0,20 m²/dia, pois isto corresponde a uma probabilidade de aproximadamente 90% do espaço amostral.

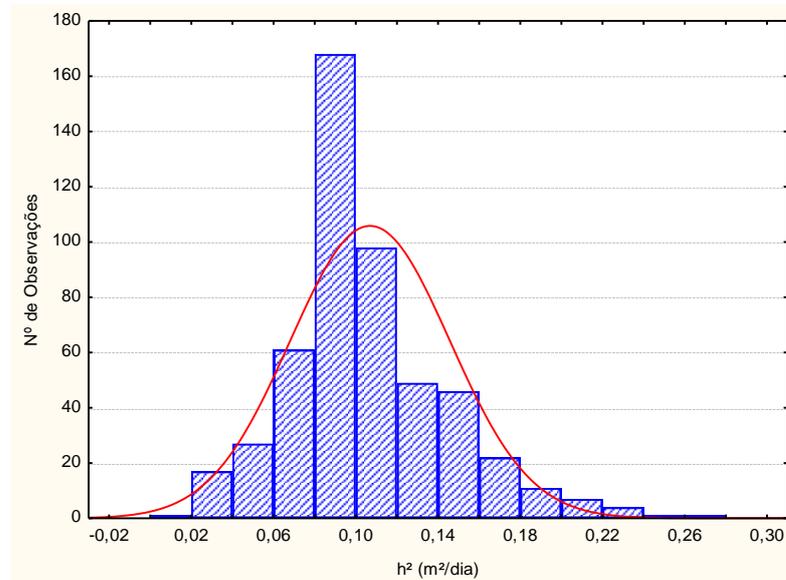


FIGURA 6.1 – Variação da difusividade térmica de diversos concretos, [19], figura feita pelo programa Statsoft - Statística 7.0. (Média = 0,11, desvio padrão da amostra = 0,0386).

Silvoso (2003)^[21] realizou uma pesquisa de campo e definiu a amplitude dos parâmetros de contorno “espessura da camada” e “intervalo de lançamento entre camadas”. Estes valores estão apresentados na TABELA 6.1. As temperaturas ambiente e de lançamento foram definidas de acordo com os limites normalmente encontrados em obras ou regiões do Brasil.

Quanto ao coeficiente de transmissão de calor foi admitido o mais comum na execução de estruturas massivas, que é o uso de cura com água, para isso foi fixado este valor em 300 kcal/m.d.°C.

Neste estudo a variável resposta foi definida como sendo a temperatura máxima no concreto massa. Os intervalos dos outros fatores foram definidos em função da experiência e conhecimento técnico do assunto dos autores do trabalho. Os fatores definidos estão relacionados na TABELA 6.1:

TABELA 6.1 – Fatores intervenientes no projeto

| Fator | Mínimo | Máximo |
|--|--------|--------------|
| Consumo de cimento (kg/m ³) | 150 | 450 |
| Difusividade térmica (m ² /dia) | 0,05 | 0,2 |
| Temperatura de colocação (°C) | 5 | 35 |
| Temperatura ambiente (°C) | 5 | 35 |
| Espessura da camada de concreto (m) | 0,5 | 3 |
| Intervalo de lançamento entre camadas | 1 | 7 |
| Número de camadas | Duas | Muitas (>10) |

O fluxograma mostrado na FIGURA 6.2 apresenta a rotina utilizada pelo “Gerenciador” desenvolvido para auxiliar a execução das 128 interações resultantes através de Yates 2^K .

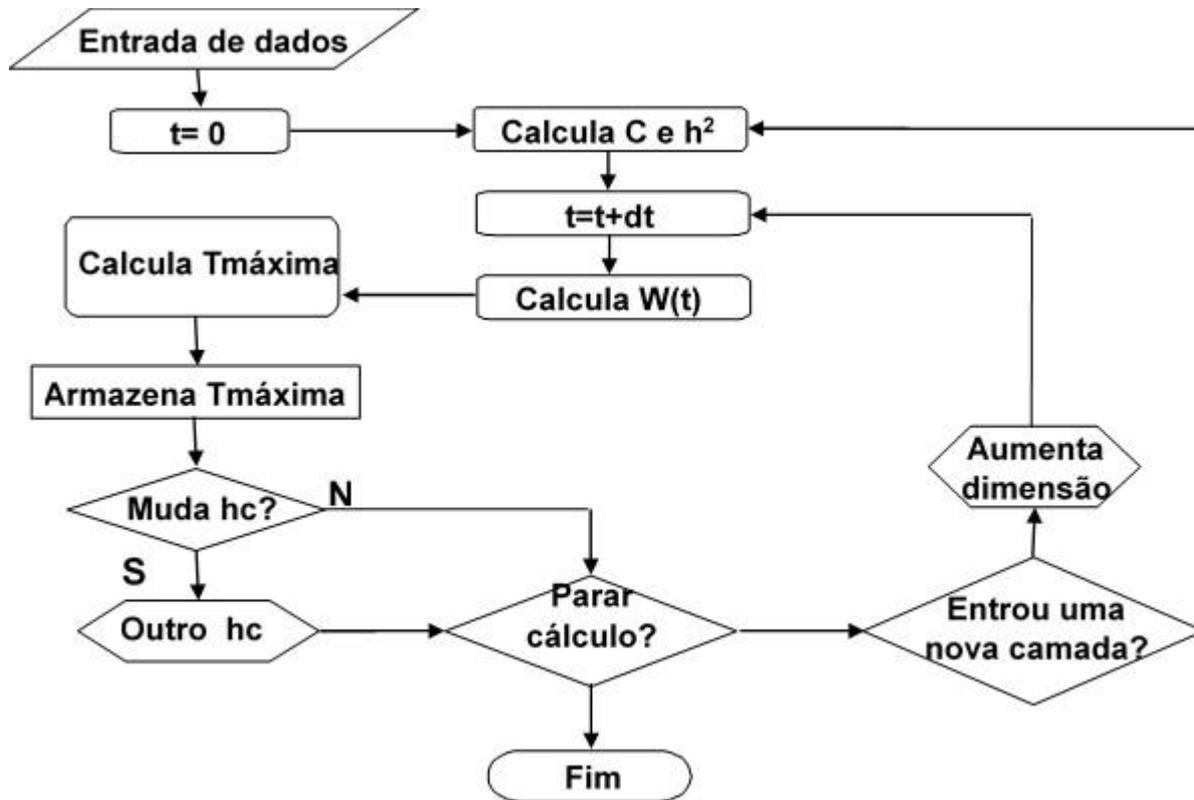


FIGURA 6.2 Fluxograma da rotina do “Gerenciador”

Esse gerenciador leva a um arquivo que foi importado para o MS-Excel para a realização da análise de variância. Com intuito de garantir ainda mais o entendimento da modelagem estatística, os cálculos foram inicialmente executados com a utilização dos recursos do MS-Excel, e para validação final, foi utilizado o Software Statistica 7.0.

7. AVALIAÇÕES PRÁTICAS

Em algumas obras de barragens, os Autores tiveram oportunidade de avaliar o aspecto térmico através de moldagens de blocos para medições das temperaturas e comparações com a Modelagem ^[22].

7.1. MOLDAGEM DE BLOCOS

Foram moldados (em duas épocas) blocos de concreto para medições de temperaturas para comparar com os resultados do estudo Térmico por Elementos Finitos. Foram utilizadas diferentes dosagens com distintos teores de aglomerante (cimento + material pozzolânico).

Para as medições de temperatura, foram idealizados blocos que induzissem ao Fluxo Unidirecional de calor que é o preponderante nas estruturas massivas. Dessa

maneira as dimensões laterais dos Blocos sempre foram maiores que a altura. A tabela a seguir fornece as dimensões e demais características dos Blocos moldados.

TABELA 7.1 – Moldagem de Blocos para avaliação de temperaturas do concreto

| Etapa (Período de Execução) | Experimento | Aglomerante (Cimento+ Material Pozolânico)(kg/m ³) | Altura da Camada (m) | Área do Bloco (m ²) | Intervalo entre Camadas (dias) | Número de Camadas | Temperatura de Colocação Prevista (°C) | Temperatura de Colocação Realizada (°C) | Frequencia de Leituras de Temperaturas |
|--------------------------------|-------------|--|----------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|--|---|---|
| I- Janeiro a Fevereiro de 2007 | α | 200 + 50 | 0,5 | 2,5*2,5 | 1 | 2 | 25 | 25,0 e 24,5 | Ao início do lançamento do concreto e horária durante as primeiras 48 horas, desde o início, e a cada 12 horas,nos dias seguintes |
| | β | 240+ 60 | | | 2 | | | 23,8 e 21,6 | |
| | γ | 260 + 40 ^(a) | | | 3 | | | 25,0 e 25,0 | |
| | δ | 240 + 60 | | | 2 | | | 24,8 e 25,0 | |
| | ε | 200 + 50 ^(b) | 2 | | 30 | | 29,1 e 29,6 | | |
| | σ | | 1,0 | | 29,1 e 29,9 | | | | |
| | φ | 400 + 0 | 1 | | 20 | | 20,0 e 19,0 | | |
| | ω | | 1,0 | | 21,7 e 23,0 | | | | |
| II- Maio a Julho de 2007 | A | 350 + 0 | 2,0 | 5 | 12 | 18,3 e 15,8 | Ao início do lançamento do concreto e horária durante as primeiras 120 horas, desde o início, e a cada 12 horas,nos dias seguintes | | |
| | B | 300 + 50 | 2 | 30 | 30,5 e 30,0 | | | | |
| | C | | 3 | 29,8 e 28,0 | | | | | |
| | D | + Pó de Pe | 2 | 30 | 27,8 e 28,9 | | | | |
| | E | | 3 | 29,0 e 30,3 | | | | | |
| | F | 300 + 50 | 2,0 | 5 | 12 | 12, 0 e 8,5 | | | |
| Notas: | | (a)- Primeira camada com 260+ 40 e a segunda camada com 240+ 60 | | | | | | | |
| | | (b)- Primeira camada com 200+ 50 e a segunda camada com 240+ 60 | | | | | | | |



FIGURAS 7.1- Preparativos concretagem de um dos Blocos, através do uso de concreto bombeado



FIGURAS 7.2- Posicionamento do caminhão betoneira para a descarga do concreto na bomba



FIGURA 7.3- Lançamento do Concreto no Bloco para a medição das Temperaturas



FIGURA 7.4- Aspecto geral dos Blocos com distintas Alturas de Camada (HL)

7.2. Medições de Temperaturas nos Blocos Moldados

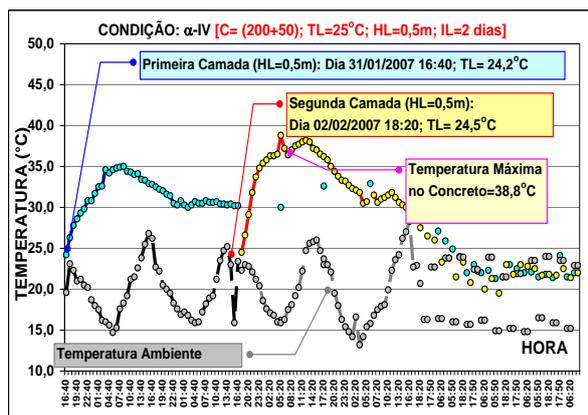


FIGURA 7.5- Condição α -IV, com 200kg/m^3 de Cimento e 50kg/m^3 de Pozolana, Lançado a 25°C , em Camadas de Altura de $0,5\text{m}$, em Intervalos de 2 dias. Temperatura Máxima atingida igual a $38,8^\circ\text{C}$. Para essa condição a Temperatura Máxima Prevista pelos Estudos foi de $40,4^\circ\text{C}$.

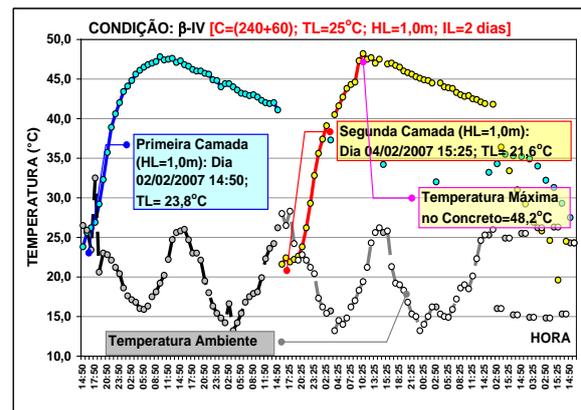


FIGURA 7.6- Condição β -IV, com 240kg/m^3 de Cimento e 60kg/m^3 de Pozolana, Lançado a 25°C , em Camadas de Altura de $0,5\text{m}$, em Intervalos de 2 dias. Temperatura Máxima atingida igual a $48,2^\circ\text{C}$. Para essa condição a Temperatura Máxima Prevista pelos Estudos foi de $46,6^\circ\text{C}$.

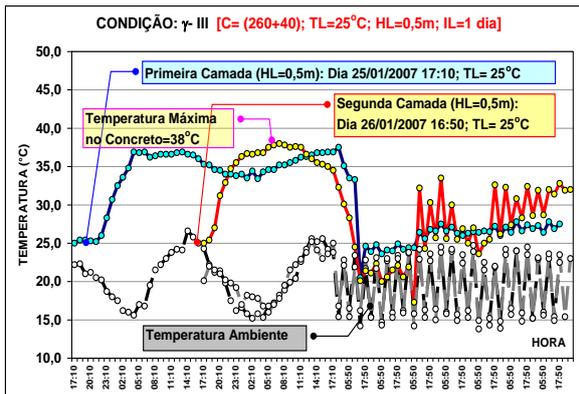


FIGURA 7.7- Condição γ -III, com 260kg/m³ de Cimento e 40kg/m³ de Pozolana, Lançado a 25° C, em Camadas de Altura de 0,5m, em Intervalos de 1 dia. Temperatura Máxima atingida igual a 38° C. Para essa condição a Temperatura Máxima Prevista pelos Estudos foi de 40,4° C.

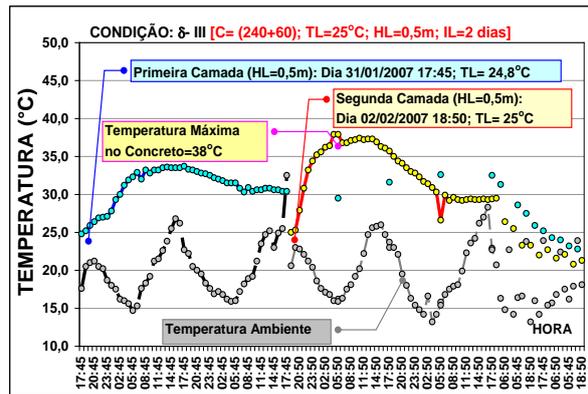


FIGURA 7.8- Condição δ -III, com 240kg/m³ de Cimento e 60kg/m³ de Pozolana, Lançado a 25° C, em Camadas de Altura de 0,5m, em Intervalos de 2 dias. Temperatura Máxima atingida igual a 38° C. Para essa condição a Temperatura Máxima Prevista pelos Estudos foi de 36,3° C.

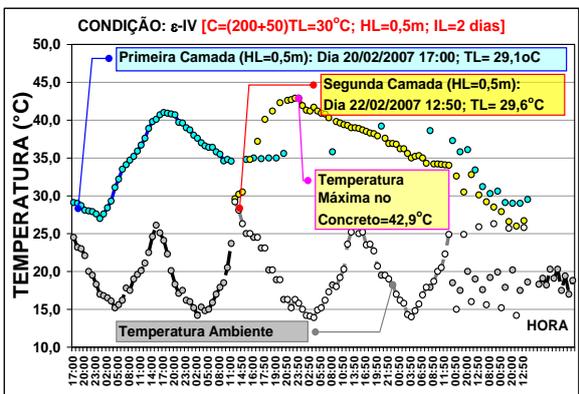


FIGURA 7.9- Condição ϵ -IV, com 200kg/m³ de Cimento e 50kg/m³ de Pozolana, Lançado a 30° C, em Camadas de Altura de 0,5m, em Intervalos de 2 dias. Temperatura Máxima atingida igual a 42,9° C. Para essa condição a Temperatura Máxima Prevista pelos Estudos foi de 42,4° C.

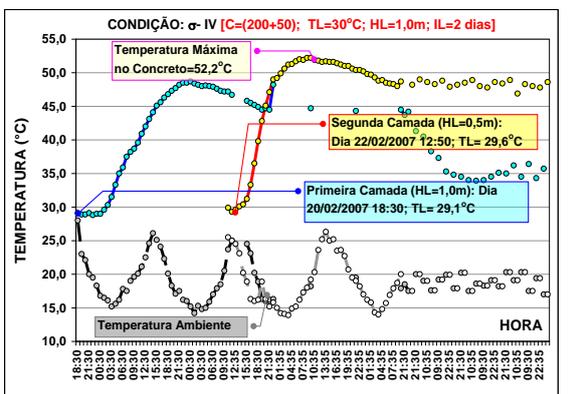


FIGURA 7.10- Condição σ -IV, com 200kg/m³ de Cimento e 50kg/m³ de Pozolana, Lançado a 30° C, em Camadas de Altura de 1,0m, em Intervalos de 2 dias. Temperatura Máxima atingida igual a 52,2° C. Para essa condição a Temperatura Máxima Prevista pelos Estudos foi de 49,7° C.

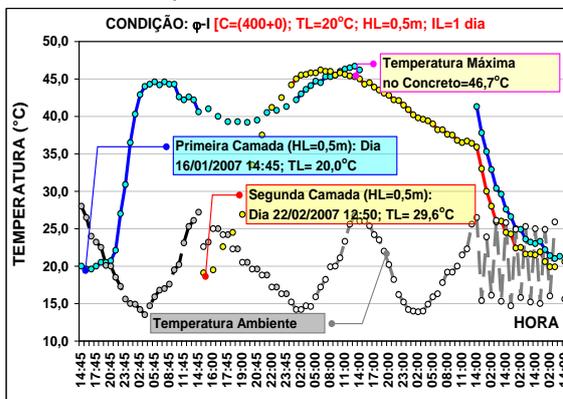


FIGURA 7.11- Condição ϕ -I, com 400kg/m³ de Cimento e (zero)0kg/m³ de Pozolana, Lançado a 20° C, em Camadas de Altura de 0,5m, em Intervalos de 1 dia. Temperatura Máxima atingida igual a 46,7° C. Para essa condição a Temperatura Máxima Prevista pelos Estudos foi de 58,5° C.

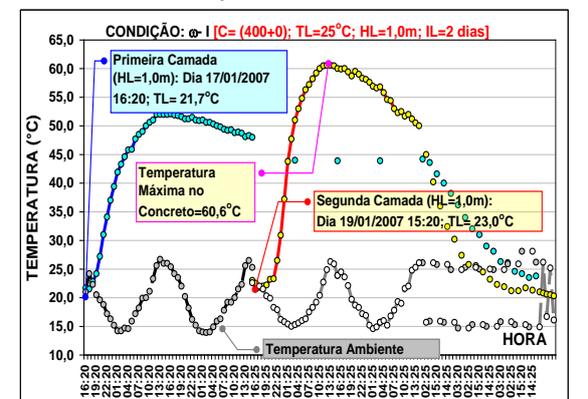


FIGURA 7.12- Condição ω -I, com 400kg/m³ de Cimento e (zero)0kg/m³ de Pozolana, Lançado a 25° C, em Camadas de Altura de 1,0m, em Intervalos de 2 dias. Temperatura Máxima atingida igual a 60,6° C. Para essa condição a Temperatura Máxima Prevista pelos Estudos foi de 56,9° C.

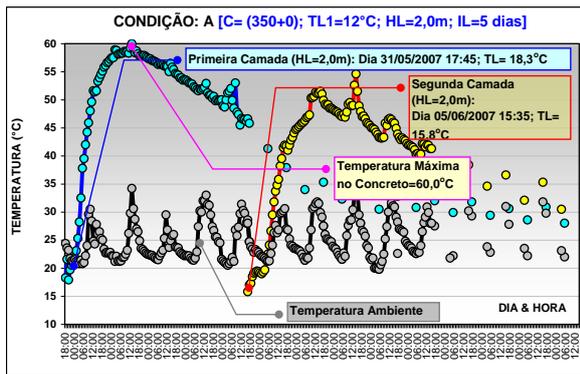


FIGURA 7.13- Condição A, com 350kg/m³ de Cimento e (zero)0kg/m³ de Pozolana, Lançado a 12° C, em Camadas de Altura de 2,0m, em Intervalos de 5 dias. Temperatura Máxima atingida igual a 60,6° C. Para essa condição a Temperatura Máxima Prevista pelos Estudos foi de 48° C.

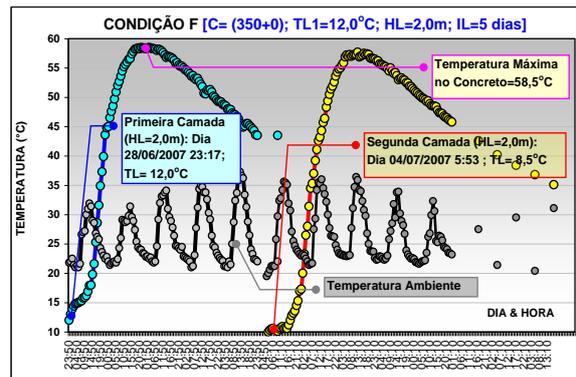


FIGURA 7.14- Condição F, com 350kg/m³ de Cimento e (zero)0kg/m³ de Pozolana, Lançado a 12° C, em Camadas de Altura de 2,0m, em Intervalos de 5 dias. Temperatura Máxima atingida igual a 58,5° C. Para essa condição a Temperatura Máxima Prevista pelos Estudos foi de 48° C.

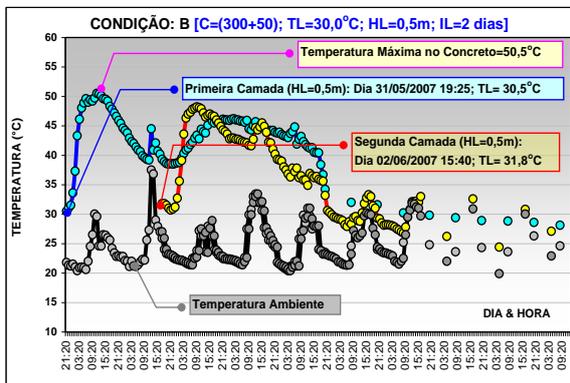


FIGURA 7.15- Condição B, com 300kg/m³ de Cimento e 50kg/m³ de Pozolana, Lançado a 30° C, em Camadas de Altura de 0,5m, em Intervalos de 2 dias. Temperatura Máxima atingida igual a 50,5° C. Para essa condição a Temperatura Máxima Prevista pelos Estudos foi de 49° C.

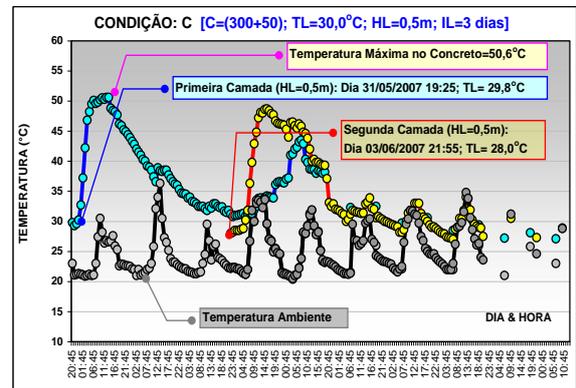


FIGURA 7.16- Condição C, com 300kg/m³ de Cimento e 50kg/m³ de Pozolana, Lançado a 30° C, em Camadas de Altura de 0,5m, em Intervalos de 3 dias. Temperatura Máxima atingida igual a 50,6° C. Para essa condição a Temperatura Máxima Prevista pelos Estudos foi de 48° C.

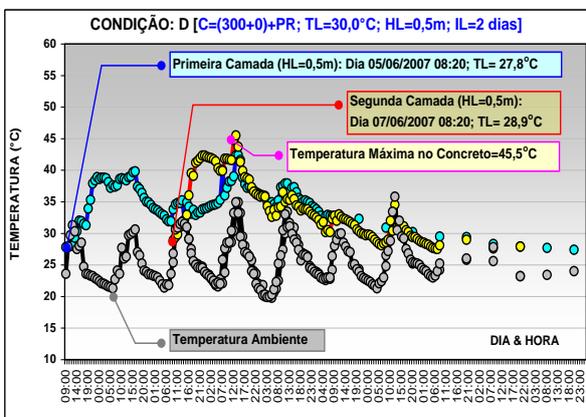


FIGURA 7.17- Condição D, com 300kg/m³ de Cimento e Pó de Pedra, Lançado a 30° C, em Camadas de Altura de 0,5m, em Intervalos de 2 dias. Temperatura Máxima atingida igual a 45,5° C. Para essa condição a Temperatura Máxima Prevista pelos Estudos foi de 45,7° C.

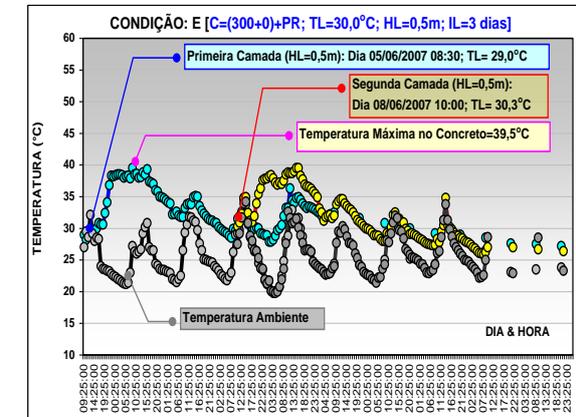


FIGURA 7.18- Condição E, com 300kg/m³ de Cimento e Pó de Pedra, Lançado a 30° C, em Camadas de Altura de 0,5m, em Intervalos de 3 dias. Temperatura Máxima atingida igual a 39,5° C. Para essa condição a Temperatura Máxima Prevista pelos Estudos foi de 41,5° C.

8. TEMPERATURAS MÁXIMAS OBTIDAS NAS AVALIAÇÕES PCARAMÉTRICAS

As FIGURAS a seguir mostram a influência dos parâmetros que mais atuam no fenômeno de evolução de temperatura nas estruturas de concreto.

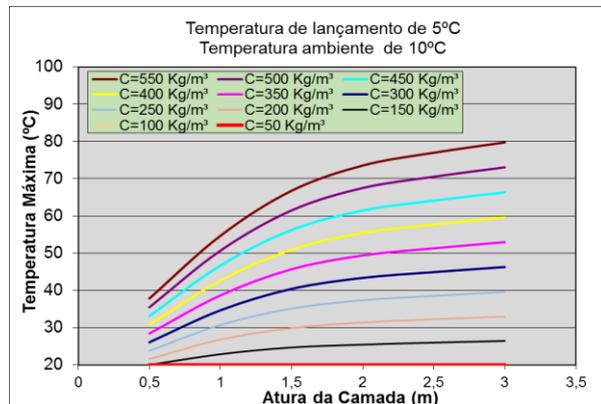


FIGURA 8.1- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 5°C, em ambiente a 10°C

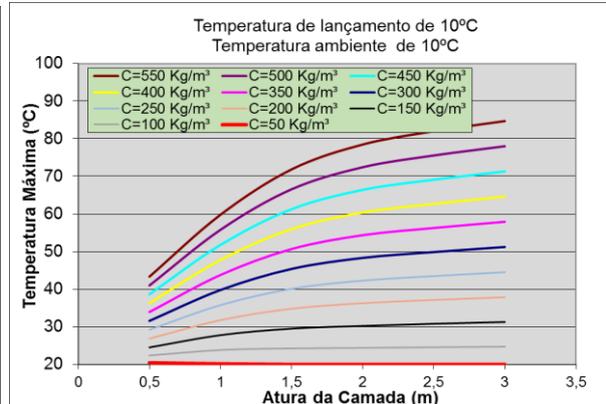


FIGURA 8.2- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 10°C, em ambiente a 10°C

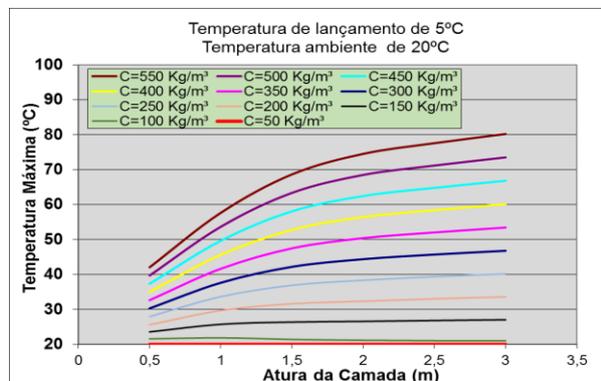


FIGURA 8.3- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 5°C, em ambiente a 20°C

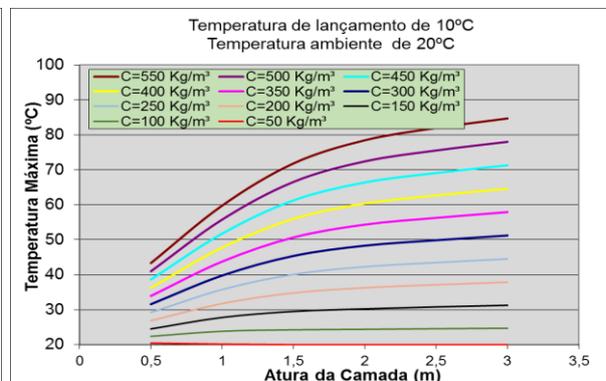


FIGURA 8.4- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 10°C, em ambiente a 20°C

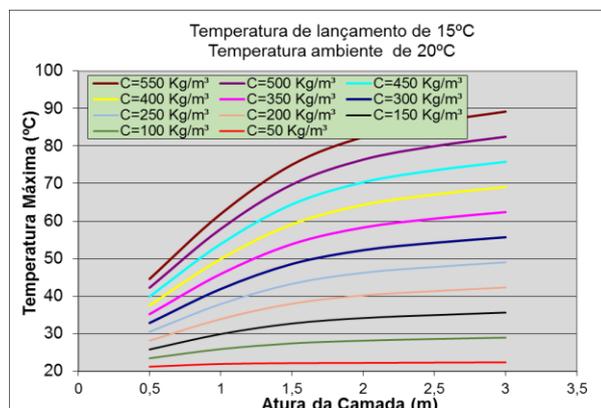


FIGURA 8.5- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 15°C, em ambiente a 20°C

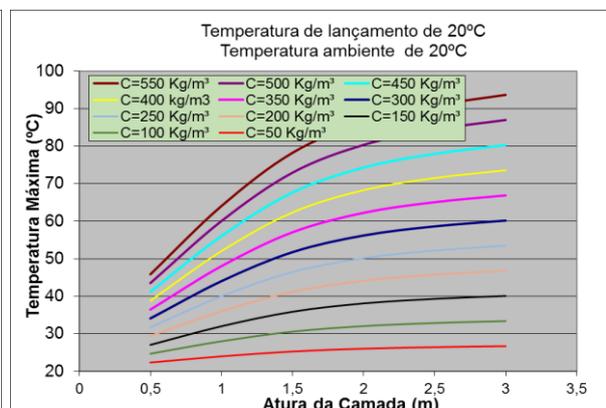


FIGURA 8.6- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 20°C, em ambiente a 20°C

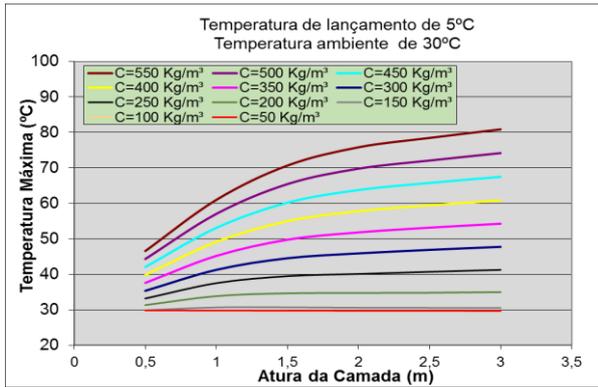


FIGURA 8.7- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 5°C, em ambiente a 30°C

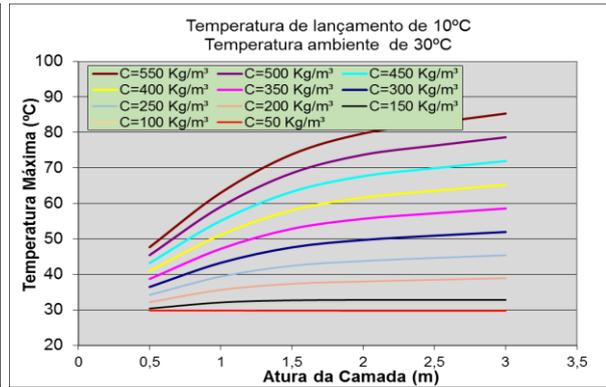


FIGURA 8.8- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 10°C, em ambiente a 30°C

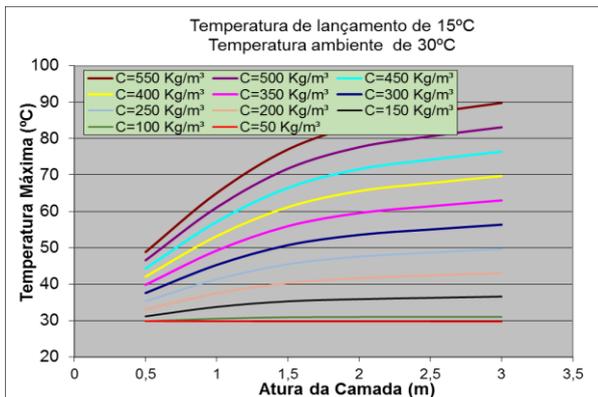


FIGURA 8.9- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 15°C, em ambiente a 30°C

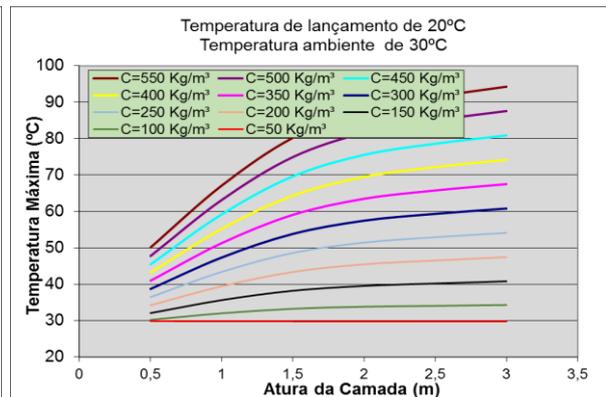


FIGURA 8.10- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 20°C, em ambiente a 30°C

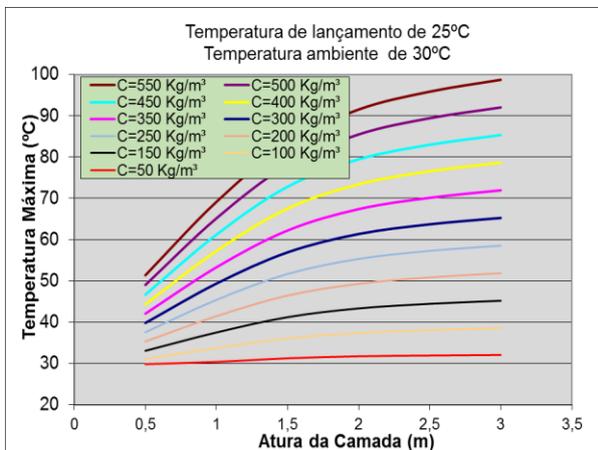


FIGURA 8.11- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 25°C, em ambiente a 30°C

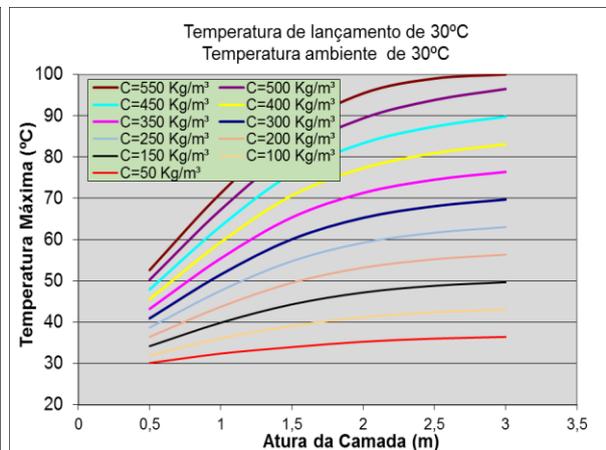


FIGURA 8.12- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 30°C, em ambiente a 30°C

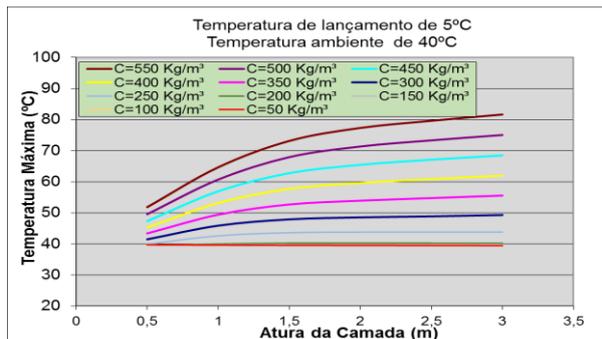


FIGURA 8.13- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 5°C, em ambiente a 40°C

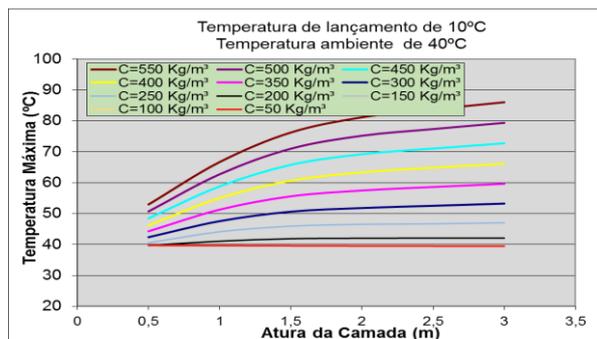


FIGURA 8.14- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 10°C, em ambiente a 40°C

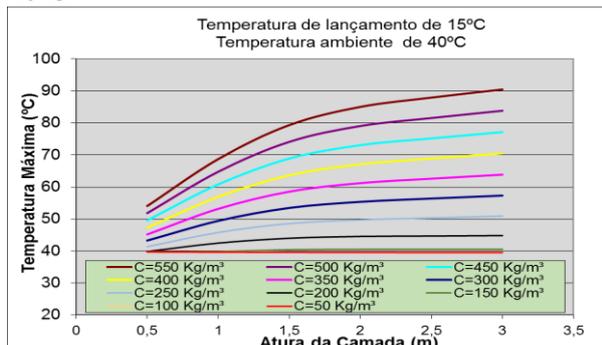


FIGURA 8.15- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 15°C, em ambiente a 40°C

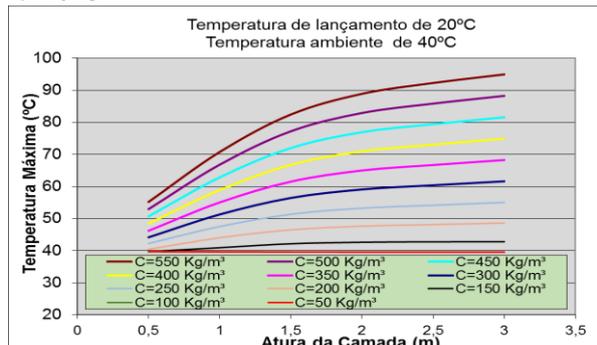


FIGURA 8.16- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 20°C, em ambiente a 40°C

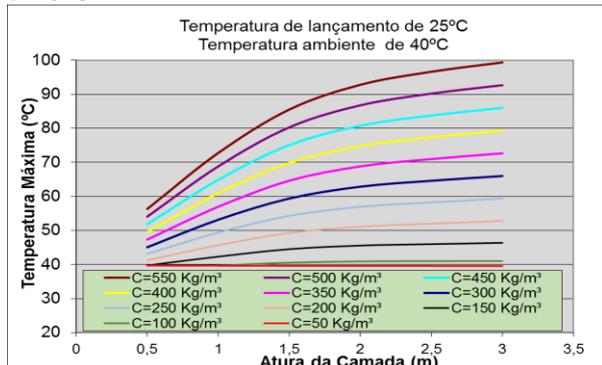


FIGURA 8.17- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 25°C, em ambiente a 40°C

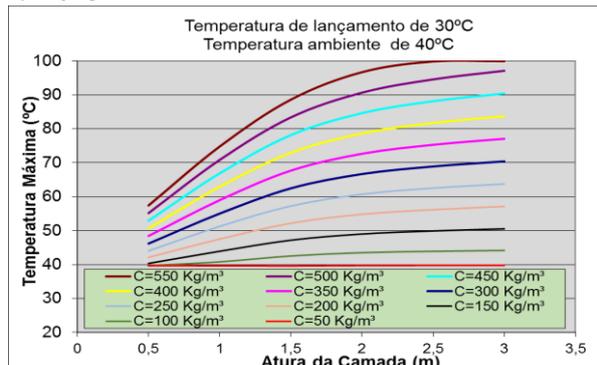


FIGURA 8.18- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 30°C, em ambiente a 40°C

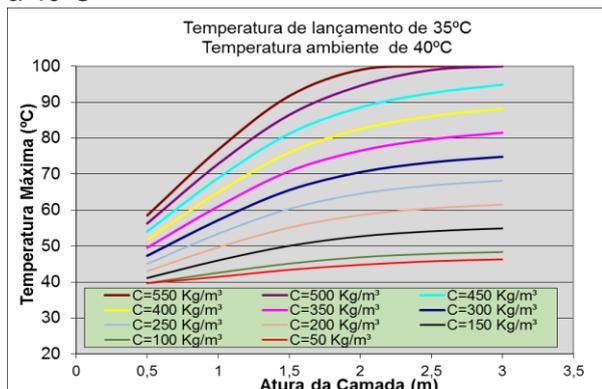


FIGURA 8.19- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 35°C, em ambiente a 40°C

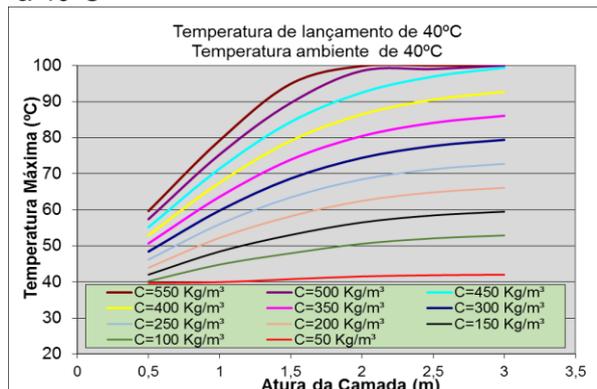


FIGURA 8.20- Temperaturas Máximas, na condição de lançamento a 40°C, em ambiente a 40°C

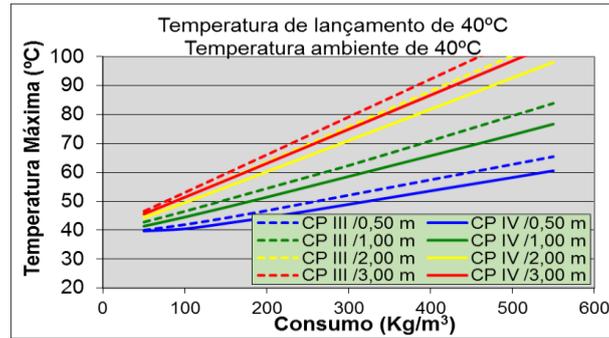


FIGURA 8.21- Influência do tipo de cimento na condição de lançamento a 40°C, em ambiente a 40°C

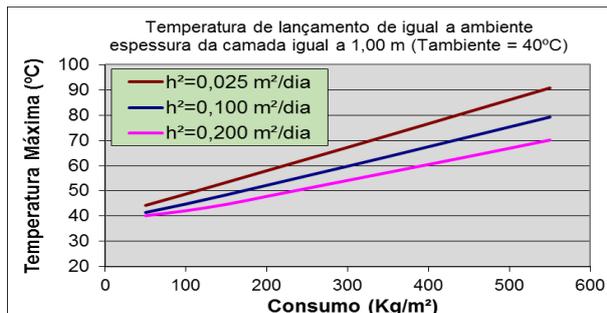


FIGURA 8.22- Influência da Difusividade Térmica, na condição de lançamento em camadas de altura 1,0m, em ambiente a 40°C

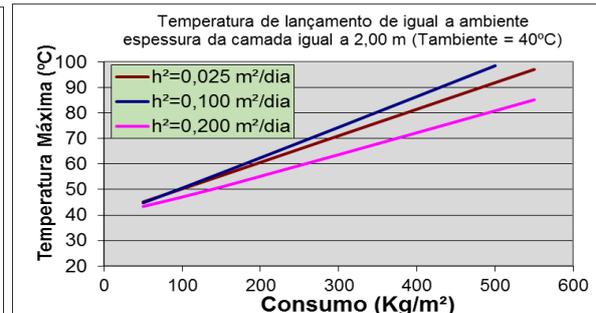


FIGURA 8.23- Influência da Difusividade Térmica, na condição de lançamento em camadas de altura 2,0m, em ambiente a 40°C

9. EQUAÇÃO RESUMIDA A PARTIR DO ESTUDO PARAMÉTRICO

Com base nas avaliações pode se estabelecer uma equação simplificada para se obter a T_{MAX} = Temperatura Máxima do concreto, considerando as influências relevantes, no cenário adotado para a avaliação paramétrica, como abaixo.

$$T_{MAX} = (-0,015 \cdot C + 0,0017) \cdot (x^2) + (0,0866 \cdot C - 0,0044) \cdot (x) + (0,0082 \cdot C + 19,918) + T_L - 20 \quad \{3\}$$

onde:

| | |
|-------------|---|
| T_{MAX} = | Temperatura Máxima na estrutura (°C) |
| x = | Altura da camada (m) |
| C = | Consumo de Aglomerante (kg/m ³) |
| T_L = | Temperatura de Lançamento do Concreto (°C) |

10. RISCO DE FISSURAÇÃO DECORRENTE DO CENÁRIO TÉRMICO

Uma proposta simplificada para critério de verificação do panorama de fissuração apresentada por Andrade et al. (2003)^[07], e de grande utilidade para tomada de decisões importantes no campo, está relacionada com a queda de temperatura em relação a temperatura de estabilização da estrutura.

Através do conhecimento prático de uma queda de temperatura admissível pode-se estabelecer o seguinte critério:

$$\Delta t = T_{MAX} - T_{AMB} \leq \Delta TADM \quad \{4\}$$

Em que:

| | |
|---------------|---|
| T_{MAX} | = Temperatura Máxima na estrutura (°C); |
| T_{AMB} | = Temperatura Ambiente (°C); |
| $\Delta TADM$ | = Queda admissível de Temperatura (°C); |
| Δt | = Queda da temperatura (°C) |

Analisando a queda de temperatura de uma estrutura pode-se estabelecer um limite crítico de alerta e um limite que indicaria uma grande probabilidade de ocorrência de fissuras de origem térmica.

11. COMENTÁRIOS, CONSIDERAÇÕES E SUGESTÕES

A metodologia apresentada representa uma alternativa simples para se avaliar o comportamento térmico das estruturas de concreto massa.

Deve-se salientar que neste estudo paramétrico não se fez considerações sobre a variação da condição de “restrição” mostrado no ACI N° 207^[23], à medida que se afasta da fundação, bem como com relação à altura da estrutura.

É importante destacar que as verificações estabelecidas neste trabalho objetivam apenas a uma análise preliminar dos riscos de aparecimento de fissuras de origem térmica. Para um melhor estudo, aconselha-se que seja efetuada uma análise detalhada de cada caso, adotando parâmetros pertinentes ao concreto e às condições ambientais e construtivas que mais se aproximam às condições reais *in loco* as quais estarão inseridas na estrutura a ser analisada.

Para propagações bidirecionais e em três direções a temperatura máxima, logicamente apresentará valores inferiores, e também, a dissipação do calor será mais rápida, e por isso sempre que for possível, uma análise mais aprofundada do fenômeno deve ser realizada.

Uma observação importante é que neste trabalho não foi analisada a interação entre os fatores, ficando este tipo de análise, juntamente com o bloqueio de outros fatores, sugerido para pesquisas futuras.

12. REFERENCIAS

- [01] CARLSON R. W.; HOUGHTON D. L.; POLIVKA, M. - "Causes and Control of Cracking in Reinforced Mass Concrete"- Detroit-USA, ACI Journal, julho/1979, págs. 821 - 837.
- [02] Carvalho, A.G. “Energia de Ativação dos Concretos: Experimentação”. Tese de Mestrado submetida ao corpo docente da coordenação dos programas de pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2002. 134p.
- [03] Carlson, R.W., “A Simple Method for Computation of Temperature in Concrete Structures”, ACI Journal, Proceedings, V.34, Nov-Dec.1997, PP.89-102

- [04] Um programa de IBM-656 para cálculo dos gradientes térmicos em estruturas de concreto massa CoE Army Engineer -Water-ways Experiment Station - Vicksburg, Mississippi-1960
- [05] Monografia de Engenharia n ° 34 –Controle de fissuração em estruturas de concreto massa Bureau of Reclamation- Denver-1981
- [06] Estudos de Engenharia de Projeto para estruturas de concreto em massa -U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC-200
- [07] GAMBALE, E.A; BOTASSI, S.S; ANDRADE, M.A.S; BITTENCURT, R.M.; PACELLI, W.A.; ANDRIOLO, F.R. – “Thermal Analysis of Roller Compacted Concrete” - 4th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RCC DAMS 17-19 November 2003, Madrid
- [08] Zhu Bofang- Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete- - China Institute of Water Resources and Hydropower Research and Chinese Academy of Engineering- 2014 Tsinghua University Press.
- [09] Calmon, J.L.N. “Estudio Termico y Tensional en Estructuras Macivas de Hormigon. Aplicacion a Las Presas Durante la etapa de Construccion”. Tesis Doctoral dirigida por Mirambell Arrizabalaga, Barcelona, mayo de 1995, 649p.
- [10] ANDRIOLO, F.R.; SKWARCZYNSKI, T.M.- “Concreto Pré-Refrigerado no Brasil- Uma Evolução de mais de 20 Anos”- Logos Engenharia SA- Editora Graphos- Rio de Janeiro-1988.
- [11] Lewis, R.W.; Morgan, K.; Thomas, H.R.; Seetharamu, K.N. “The Finite Element Method in Heat Transfer Analysis” England” : John Wiley & Sons Ltd, Baffins Lane, Chichester, West Sussex PO19 1UD, 1996, 279p.
- [12] William W.H., Montgomery D.C., Goldsman D.M., Borrer C.M. “Probabilidade e Estatística na Engenharia”; Tradução Vera Regina Lima de Farias e Flores; revisão técnica Ana Maria Lima de Farias - Rio de Janeiro, R.J. :LTC,2006
- [13] Yates Franck - Yates’s Algorithm for Calculating Estimated Effects- Process Development Study-1937
- [14] Ribeiro J.L.D, “Projeto de experimentos na otimização de produtos e processos”; Notas de Aula, Programa de pós-graduação em engenharia de produção Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Janeiro 2006
- [15] Êctore, F. F. “Predição da Exotermia da reação Hidratação do Concreto através de Modelo Termo-químico e Modelo de Dados”. 2004 130p. Tese (Mestre em Ciências) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
- [16] Gambale E.A., Andrade M.A.S, Bittencourt, R.M, Santos S.B. “Avaliação de Resultados do Ensaio de Elevação Adiabática do Concreto com base em um

- Novo Calorímetro”. 46º Congresso Brasileiro do Concreto – Florianópolis – S.C., 2004.
- [17] Liduário, A. S.; Farias, L. A. ; Vieira, F. L.; Geyer, A. L. B., DSc; Andrade, M. A. S. “Estudo das Propriedades Térmicas de Materiais Pozolânicos ou minerais, e sua Influência nas Propriedades Térmicas do Concreto”. 43º Congresso Brasileiro do Concreto - Olinda-PE , 2005
- [18] Liduário, A.S. “Contribuição ao estudo das propriedades térmicas do concreto convencional na presença das adições minerais”. 2006. 221 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006.
- [19] ANDRIOLO, F.R.; SCANDIUZI, L.- “Concreto e Seus Materiais- Propriedades e Ensaio”- Editora Pini- São Paulo-1986.
- [20] Equipe de Furnas, Laboratório de Concreto, Departamento de Apoio e Controle Técnico . “Concretos : massa, estrutural, projetado e compactado com rolo : ensaios e propriedades” - editor Walton Pacelli de Andrade - São Paulo: Pini Ltda, 1997,837p.
- [21] Silvosso, M. M. “Otimização da Fase Construtiva de Estruturas de Concreto Vis-à-Vis os Efeitos da Hidratação via Algoritmos Genéticos”. 2003. 166 p. Tese (Doutor em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- [22] Informe de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS – DCT.T.01.029.2004-R0- estudos de Materiais e Concretos- Porce III- Colombia;
- [23] ACI: AMERICAN CONCRETE INSTITUTE Committee N° 207 - "Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Massive Concrete", Detroit-USA, ACI Manual of Concrete Practice, 1978, Part 1, págs. 207-42 - 207-47.
- [24] Garotti, E. A. O., Gambale, E. A., Bosco, J. M. C., Marques, J. M., Pacelli, W. A. “Comportamento e Análise Térmica do Concreto Compactado com Rolo da UHE Salto Caxias”. 41º Congresso Brasileiro do Concreto, Salvador – BA, 1999.
- [25] Kruger, D.A.V. “Análise Térmica Transiente de Estruturas de Concreto Executadas por Camadas”. Dissertação (Mestre em Ciências), Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR,Brasil, 2001, 153p.
- [26] Metha, P. K., Monteiro, P. J. M. “Concrete - Structure, Properties and Materials”. São Paulo – SP : Editora Pini Ltda., 1994, Chapter 12, 573p.