

XXI NACIONAL DE BARRAGENS ANUÁRIO DE BARRAGENS

Rio de Janeiro, dezembro de 1994

ANALIS
Volume II

Solo - Aglomerante - Disponibilidade para
Uso como Elemento Estrutural em
Barramentos



**Comitê Brasileiro de
Grandes Barragens**

ENTIDADE COORDENADORA

FURNAS  CENTRAIS ELÉTRICAS SA

SOLO-AGLOMERANTE - DISPONIBILIDADE PARA USO
COMO ELEMENTO ESTRUTURAL EM BARRAMENTOS

AUTORES: PAULO JOSÉ RIBEIRO DE OLIVEIRA (*)
FLÁVIO MOREIRA SALLES (*)
FRANCISCO RODRIGUES ANDRIOLO (**)

(*) Engenheiro Civil - CESP - CIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO - Laboratório Central de Engenharia Civil
(**) Engenheiro Civil - ANDRIOLO ENGENHARIA S/C LTDA

RESUMO: Os autores fornecem um conjunto de dados de ensaios realizados com misturas de solos-aglomerantes, englobando solo-cimento, solo-cal e solo-cal-material pozolânico, relativos a fase preliminar de um programa de pesquisa, com vistas a possível aplicação dessas composições de materiais alternativos em estruturas de barramentos.

A utilização de solo estabilizado com aglomerantes é de amplo domínio no âmbito da engenharia de estradas.

A disponibilidade de produtos sintéticos, como mantas e geotêxteis, motiva o emprego de materiais com características distintas para a construção de estruturas tradicionais de barragens.

Assim os autores procuram deixar à disposição dos técnicos uma série de informações, abrindo e motivando a discussão para uso mais amplo e abrangente de misturas solo-aglomerante.

1 - INTRODUÇÃO:

Há mais de 24 anos, quando da realização da "Asilomar Conference - Rapid Construction of Concrete Dams", Jerome M. Raphael, através do texto "The Optimum Gravity Dam" lançou a primeira semente para o emprego do Concreto Rolado.

Em seu artigo o Prof. Raphael fez seguidas comparações entre maciços de solo, solo-cimento e concreto massa. A partir delas sugeriu aplicar a simplicidade da metodologia de produção, transporte, colocação e compactação usada em aterros, nos empreendimentos de concreto.

Durante os anos seguintes, o Concreto Rolado teve a preferência das pesquisas e sua aplicação desenvolveu-se rapidamente, mais nos países desenvolvidos do que naqueles

arentes do emprego de materiais alternativos e técnicas executivas econômicas que permitissem redução de custos.

A busca de materiais de construção estáveis, duráveis e de baixo custo tem sido uma chama perene nas pesquisas atuais.

Em consonância com os interesses do meio técnico, a CESP, através do Laboratório Central de Engenharia Civil, definiu as diretrizes para a realização de um amplo estudo para conhecimento das propriedades de solos estabilizados com aglomerantes, para uso como elemento estrutural.

Decorrente dessa pesquisa, a primeira etapa diz respeito à divulgação dos resultados obtidos e o estímulo ao estabelecimento de um ciclo de debates.

- HISTÓRICO

A aplicação de misturas de solo e aglomerantes tem crescido e obtido destaque em obras de engenharia, mostrando ser um material versátil e econômico.

O uso do cimento e da cal na estabilização de solos é bastante antigo, porém nos últimos anos tem provado ser eficiente para diversas aplicações: pavimentos de rodovias, aeroportos e vias urbanas, leitos ferroviários, fundações de edifícios, canais, diques de reservatórios, diques e proteções de barramentos.

Em 1951 [1] a Portland Cement Association construiu uma seção experimental de proteção de talude no Reservatório da Barragem de Conroy, no Colorado, E.U.A.. Essa seção experimental foi implantada em região sujeita à severas variações climáticas.

As inspeções periódicas por mais de 10 anos [2] comprovaram o bom desempenho do material e possibilitaram a adoção de misturas de solo-cimento como alternativa na proteção de taludes das barragens de Merritt, em Nebraska, e Cheney, em Kansas, respectivamente em 1961 e 1963.

É conhecido [1] [3], que em 1963 se construiu próximo de Corpus Christi, Texas, E.U.A., um barramento sólido para formação de um reservatório de cerca de 445 ha, para resfriamento d'água da Central Elétrica de Barney M. Davis. Esse barramento foi construído com solo-cimento (10%) com a altura variando de 2,4 m a 7,7 m, extensão de 10,5 Km e volume total de 268.000 m³.

- CONCEITUAÇÃO:

Os processos construtivos com solo-aglomerantes são simples e econômicos. Os equipamentos utilizados para mistura, lançamento e compactação são de amplo domínio.

A técnica de construção segue procedimentos que resultam na aplicação de misturas pulverizadas do solo com a correta quantidade de aglomerante e água suficiente para permitir a máxima compactação. Produzida a mistura, seguem-se o espalhamento, a compactação e a cura do material aplicado.

A cinza volante (Fly Ash) tem sido usada com relativo sucesso em misturas solo-aglomerante, melhorando as características e condições de trabalho do solo.

Os solos naturais são, na quase totalidade, aceitáveis para a composição com aglomerantes. Os granulares são preferidos aos argilosos para as misturas de solo-cimento, porque pulverizam mais facilmente e requerem menos cimento para alcançar a resistência e a durabilidade desejadas.

Para a adição da cal, os melhores resultados são observados em solos plásticos ou medianamente plásticos. Para os granulares ou os solos de pequena plasticidade pode-se adicionar materiais pozolânicos, que auxiliam na ação aglutinante.

A potencialidade do Brasil é bastante favorável para o desenvolvimento e aplicação dessa tecnologia, tanto pelo solo existente em seu território, diversidade de materiais disponíveis, como pela disposição geográfica das fábricas de cimento e cal.

4. PROGRAMA DE PESQUISA

O programa em desenvolvimento no Laboratório de Engenharia Civil em Ilha Solteira procura avaliar as propriedades e o comportamento de misturas de solo-cimento, solo-cal e solo-cal-material pozolânico, de modo a ter estes materiais como alternativas para construção de barragens, em substituição aos barramentos convencionais de concreto, enrocamento e solo.

4.1. Materiais

4.1.1. Solos:

Foram selecionados três tipos de solos distintos, a saber:

A: Arenoso (A-2-4)

B: Médio (A-4)

C: Argiloso (A-7-6)

A tabela 1 mostra as principais características dos solos utilizados no estudo.

Solo			A	B	C
Classificação NFB			A-2-4	A-4	A-7-6
Classificação US			0	4	15
Ph			4,99	4,96	5,86
Limite de Liquidez - LL - %			23	26	48
Limite de Plasticidade - LP - %			13	16	27
Índice de Plasticidade - IP - %			10	10	21
Massa Esp. Absoluta Grãos-g/cm ³			2,73	2,74	2,85
% grãos retida nas faixas	2,0 a 0,42 mm	areia média	10	2	4
	0,42 a 0,05 mm	areia fina	60	55	36
	0,05 a 0,005 mm	silte	4	12	8
	< 0,005 mm	argila	26	31	52
Umidade ótima - %			10,5	12,8	20,5
Densidade seca máxima - g/cm ³			2,008	1,914	1,697

Tabela 1 - Caracterização dos solos utilizados

4.1.2. Aglomerantes:

Cimento Portland CP-II-E

Cal hidratada

Material Pozolânico: Cinza Volante (Fly Ash)

A tabela 2 apresenta as características físico-químicas dos aglomerantes utilizados:

Aglomerante			Cimento	Fly Ash	Cal
Finura # 325 - % retida			14,0	57,5	-
Superfície Esp. Blaine - cm²/g			3154	2466	-
Diâmetro médio grãos - μ			-	11,6	-
Densidade (g/cm³)	Aparente		1,12	-	-
	Absoluta		3,15	-	-
Reatividade com álcalis	Redução expansão %		-	63,3	-
	Expans.Argamassa %		-	0,053	-
Índice de Atividade Pozolânica	Água requerida %		-	106,3	-
	com cimento - MPa		-	69,6	-
	com cal - MPa		-	3,5	3,5
Água de Consistência da Pasta		gramas	130	-	-
		%	25,9	-	-
Retração por secagem - %			-	-0,016	-
Tempo de Início de Pega h:m			2:19	-	-
Expansão em Auto Clave (%)			0,054	-	-
Resistência à Compressão Axial	Tensão de Ruptura (MPa)	03 dias	22,0	-	-
		07 dias	28,8	-	-
		28 dias	34,5	-	-
		90 dias	35,6	-	-
Calor de Hidratação (cal/g)		07 dias	89	-	-
		28 dias	93	-	-
Umidade da amostra - %			-	0,03	-
Análise Química (%)	Perda ao fogo		3,54	0,71	28,61
	Resíduos insolúveis		0,33	-	1,70
	SiO2		19,85	56,36	-
	Fe2O3		3,57	6,08	-
	Al2O3		5,07	30,54	-
	CaO		63,68	1,58	57,29
	MgO		1,42	0,26	11,61
	SO3		1,81	0,34	0,08
	Na2O		0,10	-	-
	K2O		0,92	-	-
	Al2O3+Fe2O3		-	36,62	0,62
	Al2O3+Fe2O3+SiO2		-	92,98	-
	Equiv.Alcalino Na2O		0,71	0,55	-
	Cal livre em CaO		1,12	-	-
Compostos Método de Bogue (%)	C3S		56,23	-	-
	C2S		15,12	-	-
	C3A		9,21	-	-
	C4AF		8,96	-	-

Tabela 2 - Análise físico-química dos aglomerantes utilizados

4.2. Misturas:

Utilizando-se de técnica apropriada foram elaboradas misturas e moldadas séries de corpos de prova cilíndricos 50x100 mm, para as determinações das resistências a compressão axial e diametral

e do módulo de deformação, nas idades de 3, 7, 28, 90, 180 e 360 dias. A tabela 3 mostra as misturas estudadas e os teores e pesos de aglomerantes adicionados à massa de solo.

Misturas solo +	Aglomerantes				
	teor (%) / consumo (Kg/m³)				
cimento	2/32,3	4/64,2	6/94,7	8/125,8	10/155,8
cal	2/31,1	4/51,1	6/88,7	8/116,0	10/140,4
cal	2/29	4/56	6/84	8/109	10/133
+fly ash	10/147	10/145	10/140	10/137	10/133
cal	2/28	4/56	6/82	8/107	10/131
+fly ash	15/213	15/210	15/205	15/202	15/196
cal	2/28	4/55	6/80	8/104	10/127
+fly ash	20/280	20/277	20/266	20/260	20/254

Tabela 3 - Misturas estudadas e teores de aglomerantes empregados.

Para cada uma das misturas determinou-se as densidades máximas e umidades ótimas no ensaio de compactação, como mostra a tabela 4.

Tipo de Aglomerante	Teor (%)	SOLO A		SOLO B		SOLO C	
		densid máxima (g/cm³)	umid ótima (%)	densid máxima (g/cm³)	umid ótima (%)	densid máxima (g/cm³)	umid ótima (%)
Cimento	2	1,986	10,7	1,852	13,1	1,680	20,6
	4	1,993	10,4	1,861	13,0	1,693	20,6
	6	1,990	10,6	1,864	12,9	1,698	19,7
	8	1,996	10,2	1,865	13,2	1,705	20,3
	10	2,008	10,2	1,868	12,5	1,717	19,7
Cal	2	1,940	11,5	1,824	12,7	1,680	20,7
	4	1,918	11,6	1,810	13,5	1,660	20,9
	6	1,914	11,7	1,811	13,9	1,650	21,1
	8	1,916	11,8	1,809	13,8	1,647	21,0
	10	1,886	12,0	1,789	14,0	1,644	21,5
Cal + 10% Fly Ash	2	1,867	11,9	1,772	13,7	1,650	20,5
	4	1,865	11,9	1,768	13,7	1,655	20,8
	6	1,843	12,1	1,763	14,4	1,620	21,4
	8	1,840	12,6	1,747	14,4	1,634	20,8
	10	1,816	12,4	1,747	14,6	1,624	21,2
Cal + 15% Fly Ash	2	1,822	12,4	1,744	14,0	1,634	20,3
	4	1,837	12,6	1,732	14,9	1,628	20,4
	6	1,821	12,7	1,730	14,7	1,621	20,7
	8	1,815	12,5	1,733	14,9	1,614	20,9
	10	1,798	12,6	1,718	15,2	1,613	21,0
Cal + 20% Fly Ash	2	1,818	12,7	1,723	14,5	1,622	20,4
	4	1,804	12,0	1,714	14,4	1,611	20,8
	6	1,793	13,1	1,693	14,9	1,608	20,8
	8	1,787	13,3	1,697	15,5	1,604	21,0
	10	1,764	13,0	1,694	14,4	1,589	21,6

Tabela 4 - Compactação sobre as composições - Energia Normal

Também, nas idades dos testes mecânicos, foram determinados os valores de pH.

.3. Resultados dos ensaios mecânicos:

Os resultados dos ensaios mecânicos de resistências a compressão axial e diametral e do módulo de deformação, para as composições solos/aglomerantes ensaiadas, não serão apresentadas neste texto, em razão do espaço disponível para tal. A referência 4] contém estes dados.

Nas figuras 1 a 3 são mostrados os gráficos de evolução das resistências a compressão axial com a idade, para as diferentes misturas e teores de aglomerantes.

.4. Ensaio complementares

A partir dos resultados obtidos nos ensaios supracitados, foram definidas as misturas para a próxima etapa do programa, que constará do seguinte:

.4.1. Relação entre dimensões dos cp's concreto/solo:

Serão estabelecidas correlações entre os resultados obtidos em cp's 50x100 mm, com os que serão obtidos em cp's 150x300 mm convencionais de concreto.

.4.2. Ensaio de concreto:

Em misturas solo-aglomerantes devidamente escolhidas serão executados ensaios específicos, para se conhecer as características e o comportamento destas, em relação às propriedades do concreto.

A figura 4 mostra as misturas escolhidas, em função dos resultados de resistências, e a série de ensaios programada para a próxima etapa da pesquisa.

COMENTÁRIOS:

- As amostras de solos são representativas de três tipos diferentes de materiais. Os corpos de prova foram moldados utilizando-se energia normal de compactação.

- De maneira geral as resistências cresceram com a idade, sendo que sintomaticamente as misturas de solo-cimento apresentaram uma pequena dispersão, para mais ou para menos, entre 90 e 360 dias, decorrente de desenvolvimento diferenciado: relativamente grande de 7 para 90/180 dias e pequeno de 180 para 360 dias, desenvolvimento este absorvido pela própria dispersão dos ensaios. Esse comportamento foi observado também, de maneira teórica, para as misturas de solos areno-argiloso com cal e argiloso com cal, sendo menos acentuado nas misturas com Fly Ash e al.

- Os solos A e B, com predominância de frações arenosas em suas composições, mostraram-se promissores para misturas com aglomerantes. O solo A com 10% de cimento (156 kg/m^3) chegou a 18 MPa de resistência a compressão aos 180 dias. O solo C, de característica argilosa, apresentou resultados inferiores aos

outros dois tipos, sendo que para as misturas com cal e cal + fly ash não se mostrou adequado.

- O uso de material pozolânico resultou em aumento de resistência a elevadas idades, que cresceu com o incremento de seu teor de 10% para 15%, estabilizando-se entre 15% e 20%.

- As misturas com o solo C (argiloso) mostraram-se com os menores índices para as propriedades mecânicas, e as misturas com o solo B (areno-argiloso) na faixa intermediária, o que era de se esperar. Dessa maneira tem-se que os solos arenoso e areno-argiloso são os mais promissores para a aplicação.

- As misturas com cimento mostraram crescimento de resistências até 180 dias e as misturas de cal e material pozolânico evoluíram significativamente de 28 para 360 dias.

- Nas misturas com 15% e 20% de cinza volante e cal, os valores de resistências estão mais próximos aos das misturas com cimento, para os solos A e B.

Embora não estejam apresentados neste texto os valores obtidos de resistência a compressão diametral e módulo de deformação, faz-se as seguintes observações, com relação a estas propriedades:

- A relação entre as resistências a tração por compressão diametral e a compressão axial simples se mostrou da ordem de 10%, com coeficiente de variação de 15%, no universo global dos valores de ensaios, sem haver uma tendência específica para qualquer das misturas estudadas.

- O Módulo de Deformação se apresentou entre 60.000 e 100.000 kgf/cm² para as misturas de solo-cimento e solo-cal, havendo uma diminuição dessa propriedade à medida que o solo torna-se mais plástico. Isso induz a uma maior fluência total, o que poderá ser comprovado nas fases complementares da pesquisa e deverá ser considerado para as estruturas altas.

6. DISCUSSÕES

Os resultados desta primeira fase mostram valores de propriedades mecânicas bastante animadores para determinadas composições significativamente econômicas, que a depender do local e das características da fundação e da obra podem servir como alternativa aos barramentos convencionais (concreto rolado, concreto massa convencional, solo compactado, enrocamento).

As pesquisas complementares, indicadas na figura 4, contemplam avaliações especiais e poderão dar suporte a modelos e seções estruturais de barramentos, considerando o emprego de materiais sintéticos como os geotêxteis para impermeabilização da face molhada do barramento.

É de se considerar também, a necessidade de avaliações quanto ao comportamento de estabilidade volumétrica, retração por secagem, fissuração, além de procedimentos de ordem prática - executiva no que se refere ao tratamento entre junta de construção e das condicionantes de vedação e drenagem do maciço.

Essas conclusões e comentários farão parte de uma etapa subsequente, que poderá incluir a execução de um barramento experimental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]- Wayne S. Adaska; William G. Dinchak - "SOIL - CEMENT FOR ELETRIC POWER PLANTS" - The American Power Conference; Chicago, Illinois; April/1980.

[2]- Coffey, C.T.; Jones, C.W. - "10 YEARS TEST OF SOIL - CEMENT SLOPE PROTECTION FOR EMBANKMENTS" - Bureau of Reclamation - U.S. Department of Interior, Denver, Colorado; 1961.

[3]- K.D. Hansen; J.K. Avera, Jr. - "DAMS THAT NEVER END" - Water Power & Dam Construction; March/1978.

[4]- Relatório LEC-E-07/94 - "ESTUDO DE MISTURAS DE SOLOS E AGLOMERANTES COMO ALTERNATIVA PARA CONSTRUÇÃO DE BARRAMENTOS - 1ª FASE" - LABORATÓRIO CENTRAL DE ENGENHARIA CIVIL - CESP; Ilha Solteira; 1994.

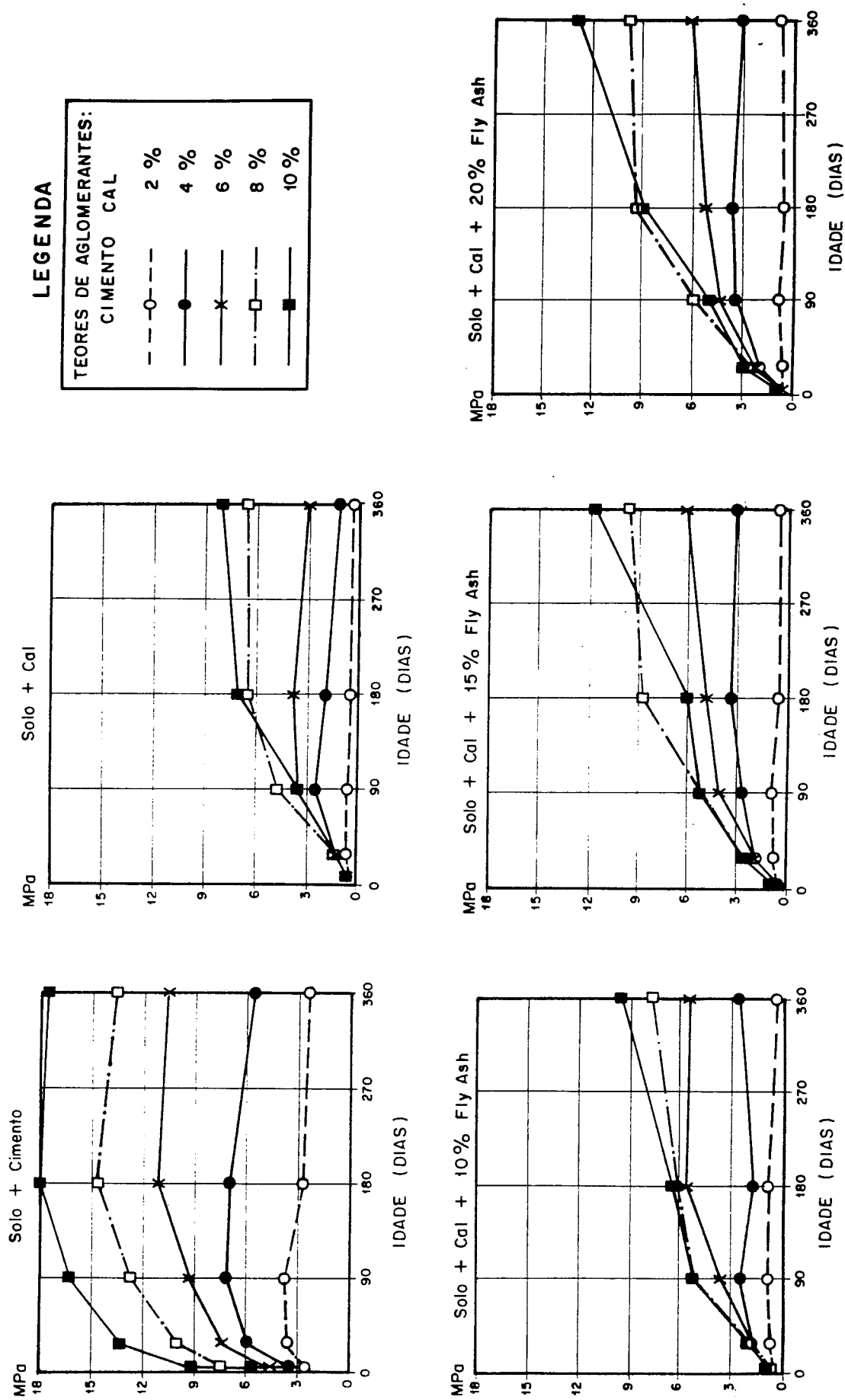


FIGURA 1 – RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL x IDADE – SOLO A + AGLOMERANTES

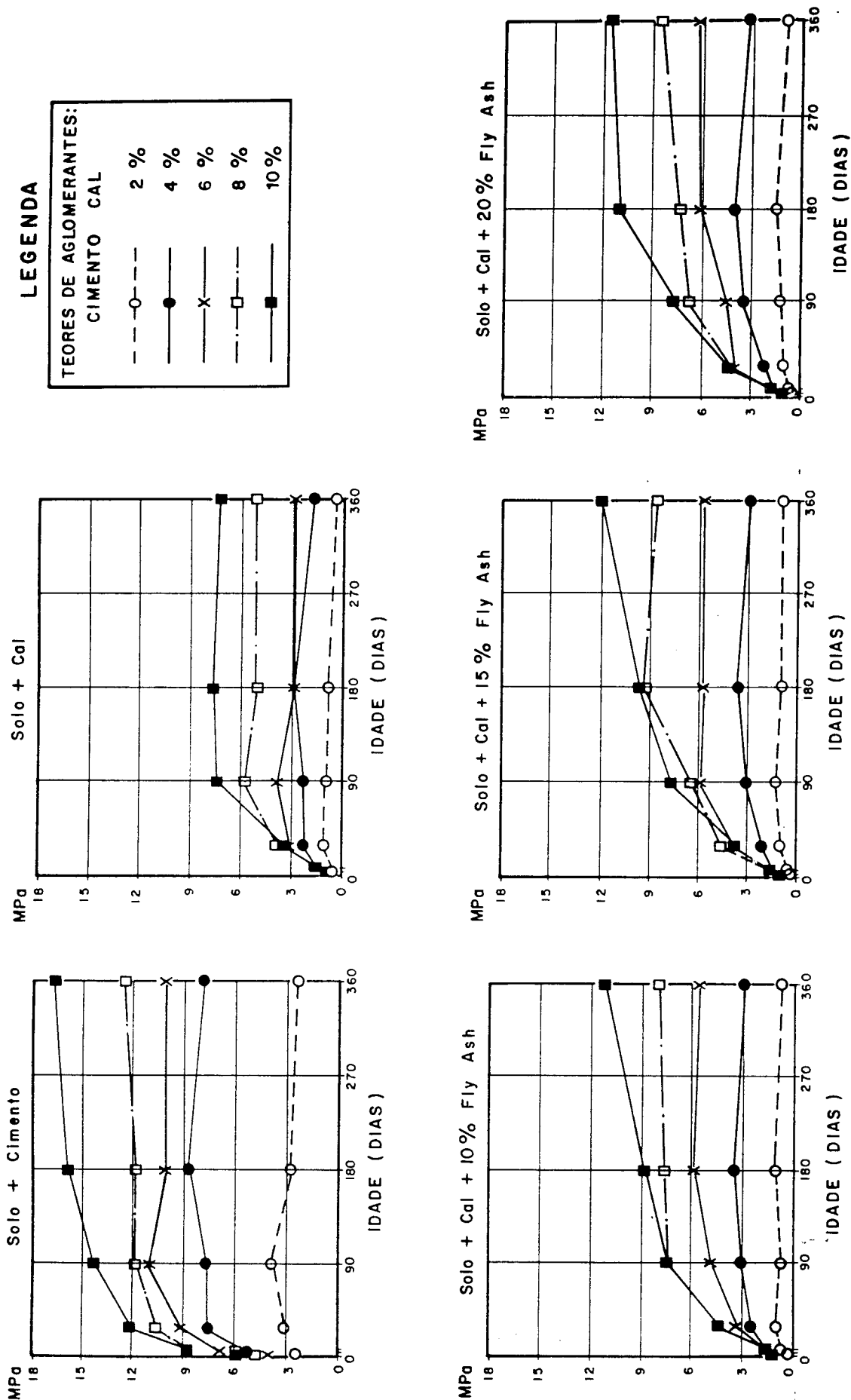


FIGURA 2 - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL x IDADE - SOLO B + AGLOMERANTES