



**INSTITUTO BRASILEIRO
DO CONCRETO**

REUNIÃO DO IBRACON EM 1981

São Paulo, 06 a 10 de julho

COLÓQUIO SOBRE CONCRETO MASSA

MATERIAIS POZOLÂNICOS - UTILIZAÇÃO E BENEFÍCIOS

M8

Engº Luércio Scanduzzi(*)

Engº Francisco Rodrigues Andriolo(**)

Francisco Rodrigues Andriolo
Eng.º Civil

(*) Divisão de Laboratórios e Instrumentação de Concreto
ITAIPU BINACIONAL

(**) Departamento de Tecnologia dos Materiais e Técnicas das Construções -
THEMAG Engenharia Ltda.

MATERIAIS POZOLÂNICOS - UTILIZAÇÃO E BENEFÍCIOS

*Engº Luércio Scandiuzzi ***e**Engº Francisco Rodrigues Andriolo***

RESUMO

A aplicação dos materiais Pozolânicos, que se fez marcante na construção da Obra de Ilha Solteira - CESP, despertou a atenção dos tecnologistas brasileiros para seu maior emprego em diversas obras.

Através de resultados obtidos por estudos efetuados, inicialmente no Laboratório da CESP em Ilha Solteira e complementados no Laboratório de ITAIPÚ, este trabalho procura enfatizar os benefícios decorrentes da utilização de materiais Pozolânicos, quer sob a forma de reposição a parte do cimento, quer sob a forma de Cimento Portland Pozolânico. É chamada atenção para as vantagens obtidas na Resistência à Compressão Axial Simples.

Procura-se despertar atenção sobre a possibilidade que o uso desse tipo de material traz como alternativa para redução de custos, consumo e de produção de aglomerantes.

* Divisão de Laboratório e Instrumentação de Concreto, ITAIPÚ BINACIONAL.

** Departamento de Tecnologia dos Materiais e Técnicas das Construções, Themag Engenharia.

1. OBJETIVO

Este trabalho apresenta uma série de informações sobre a utilização de Materiais Pozolânicos tanto em reposição a parte do Cimento Portland em concretos e argamassas, quanto como Cimento Portland Pozolânico, e os benefícios decorrentes de seu uso.

Procura-se despertar a atenção e evidenciar as informações, mostrando as vantagens de utilização de Materiais Pozolânicos com intenção de se obter *ganho* de resistência nos concretos, mesmo em idades entre 7 e 28 dias. Este objetivo é enfocado com intuito de esclarecer (ou contornar) um conceito ou *tabu* segundo o qual a utilização de Materiais Pozolânicos não traz vantagens no que se refere à resistência em baixas idades, visto que os concretos de características estruturais são dosados (ver NB-1), em sua maioria, para que as Resistências Mínimas Requeridas sejam atendidas à idade de 28 dias.

A utilização criteriosa dos Materiais Pozolânicos pode, além de reduzir o consumo de aglomerantes para o usuário, propiciar sensível redução do consumo de energia (aqui subentendido como combustível) na fabricação dos cimentos, visto que ao se produzir Cimento Portland Pozolânico, estar-se-ia produzindo uma menor quantidade de *clínquer* (onde incide o maior consumo de combustível) para uma mesma quantidade de aglomerante.

Outros benefícios decorrentes da utilização de Materiais Pozolânicos, tais como minimização de efeitos térmicos, combate à reação álcalis-agregado, melhoria nas propriedades da mistura fresca; não são objetos de considerações mais profundas neste trabalho.

2. MATERIAIS POZOLÂNICOS

2.1. Definição

Pozolanas são comumente definidas como materiais que por

si só não possuem propriedades aglomerantes, mas que contêm substâncias (silicosas ou sílico-aluminosas) que, a temperatura ordinária, se combinam com a cal em meio aquoso, para formarem substâncias insolúveis que possuem propriedades aglomerantes.

Quando misturadas ao cimento tem capacidade de fixar o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do mesmo, para formar compostos cimentantes.

2.2. *Classificação e obtenção*

As Pozolanas classificam-se, geralmente, em naturais e artificiais. São naturais aquelas formadas por algum processo da natureza e que, em geral, necessitam apenas de uma moagem para seu uso. As artificiais são aquelas obtidas por processo industrial ou como um subproduto.

Como exemplo de Pozolanas naturais temos:

- . Tufos e cinzas vulcânicas - são talvez as primeiras pozolanas que se têm notícia, usadas na antiguidade pelos romanos e que são ainda hoje exploradas. No Brasil a probabilidade de ocorrência desses materiais recai sobre o Triângulo Mineiro.
- . Rochas contendo minerais de Opala - em geral encontradas na forma de xistos, contendo outras formas de sílica que não a amorfa, necessitando portanto de uma calcinação para sua ativação completa.
- . Terras diatomáceas - são as Pozolanas mais ativas na reação com a cal. O diatomito é formado por sedimentação de carapaças de micro-organismos. A ocorrência de diatomito é bastante grande ao sul do Estado de Mato Grosso 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 por causa da for-

ma alongada de suas partículas.

Experiências realizadas pelo Laboratório da CESP mostram que a Água Requerida diminui sensivelmente quando o diatomito é aquecido ao redor de 650°C e em seguida moído.

As Pozolanas artificiais são as seguintes:

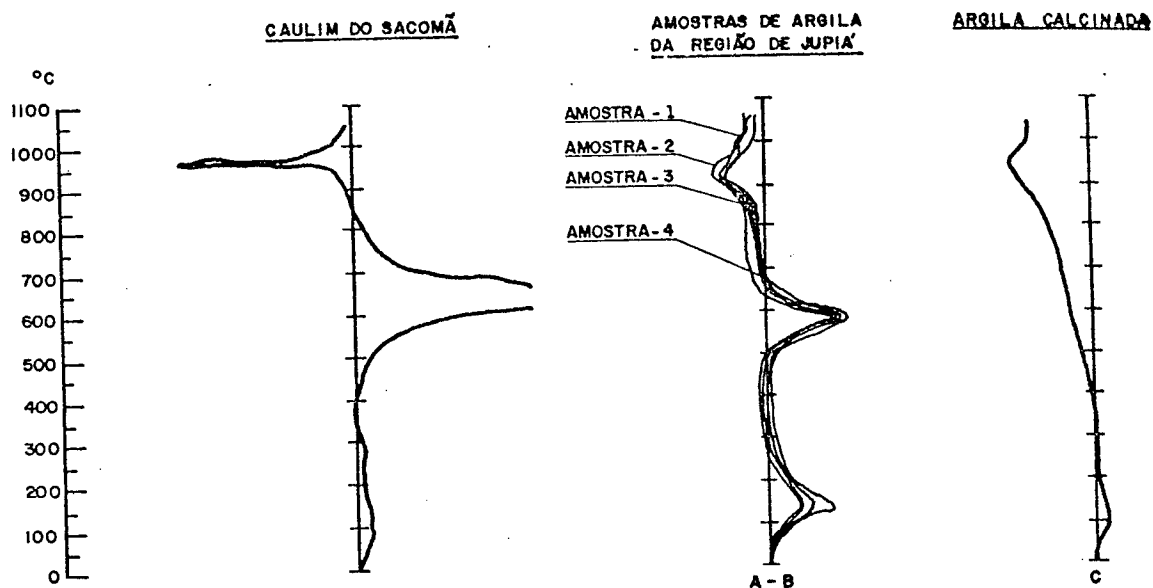
- . Xistos e argilas calcinadas. - as argilas e xistos calcinados são mais comumente usados que as pozolanas naturais, devido à facilidade em obter-se matéria prima adequada para sua fabricação. Em contra posição às jazidas de pozolanas naturais, as de xistos e argilas, próprios à fabricação de pozolana, 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 super aquecimento das argilas a temperaturas de 920°C a 1000°C provoca uma recristalização com formação de compostos estáveis, diminuindo muito a atividade química. O controle de temperatura tem, portanto, um papel importante na fabricação de pozolanas.

Durante a calcinação, a argila caulinítica desidrata-se completamente entre 560°C a 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 ($-\text{Al}_2\text{O}_3$), sendo que este produto é de difícil moagem e baixa atividade. A partir deste fato é conveniente, como método de controle de fabricação, fazer-se uma

Análise Térmica Diferencial da argila calcinada. Uma argila bem calcinada, quando submetida a *Análise Térmica Diferencial*, não deverá apresentar o pico endotérmico de 500°C a 560°C , devendo porém revelar o pico exotérmico a 950°C . Ilustrativamente é apresentada no Desenho 1 uma série de *Análises Térmicas Diferenciais*.



DESENHO 1 - GRÁFICOS ILUSTRATIVOS RESULTANTES DE ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL DE ARGILAS.

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 ocorrerá entre 750°C e 1000°C .

- Fly-Ash - são cinzas ricas em sílica, obtidas em usinas termoelétricas em que o carvão é pulverizado e usado como combustível. As Fly-Ashes disponíveis nas usinas termoelétricas do sul do País são de boa qualidade, porém na finura que se apresentam não têm grande valor como material pozolânico.

Vários estudos têm mostrado a necessidade de uma moagem, com intuito de torná-las mais ativas. A finura i

deal para essas Fly-Ashes está ao redor de 5000 a 7000 cm²/g (BLAINE).

3. UTILIZAÇÃO E BENEFÍCIOS GERAIS

3.1. Aspectos gerais

O uso de um bom material pozolânico, na proporção adequada e em condições ideais de cura, melhora a maioria das principais propriedades do concreto. Não é mal lembrar que os concretos contendo materiais pozolânicos necessitam de uma cura mais prolongada, tendo-se em vista as suas características de hidratação.

Os materiais pozolânicos têm sido usados em taxas de reposição entre 15% a 40% em substituição ao cimento, nos concretos. A porcentagem de substituição refere-se, em geral, a *volume sólido* do cimento, para facilidade dos trabalhos de dosagem.

Os materiais pozolânicos podem ser usados como *aditivos* a serem misturados no concreto durante a betonagem, ou moídos juntamente com clínquer e gesso, dando os Cimentos Pozolânicos.

Dessas duas formas, somos particularmente favoráveis à moagem em separado e posteriormente, durante a betonagem, misturados. Isto porque os Cimentos Pozolânicos prefixam a proporção de cimento e pozolana, e esta proporção pode não ser a melhor para o uso. Além disso, os Cimentos Pozolânicos, como são produtos de uma mesma moagem, teriam as partículas de cimento e pozolana em uma mesma finura. Com isto não estaríamos tirando o máximo proveito dos dois materiais, pois a finura ótima de cada um dos produtos poderá estar em faixas diferentes.

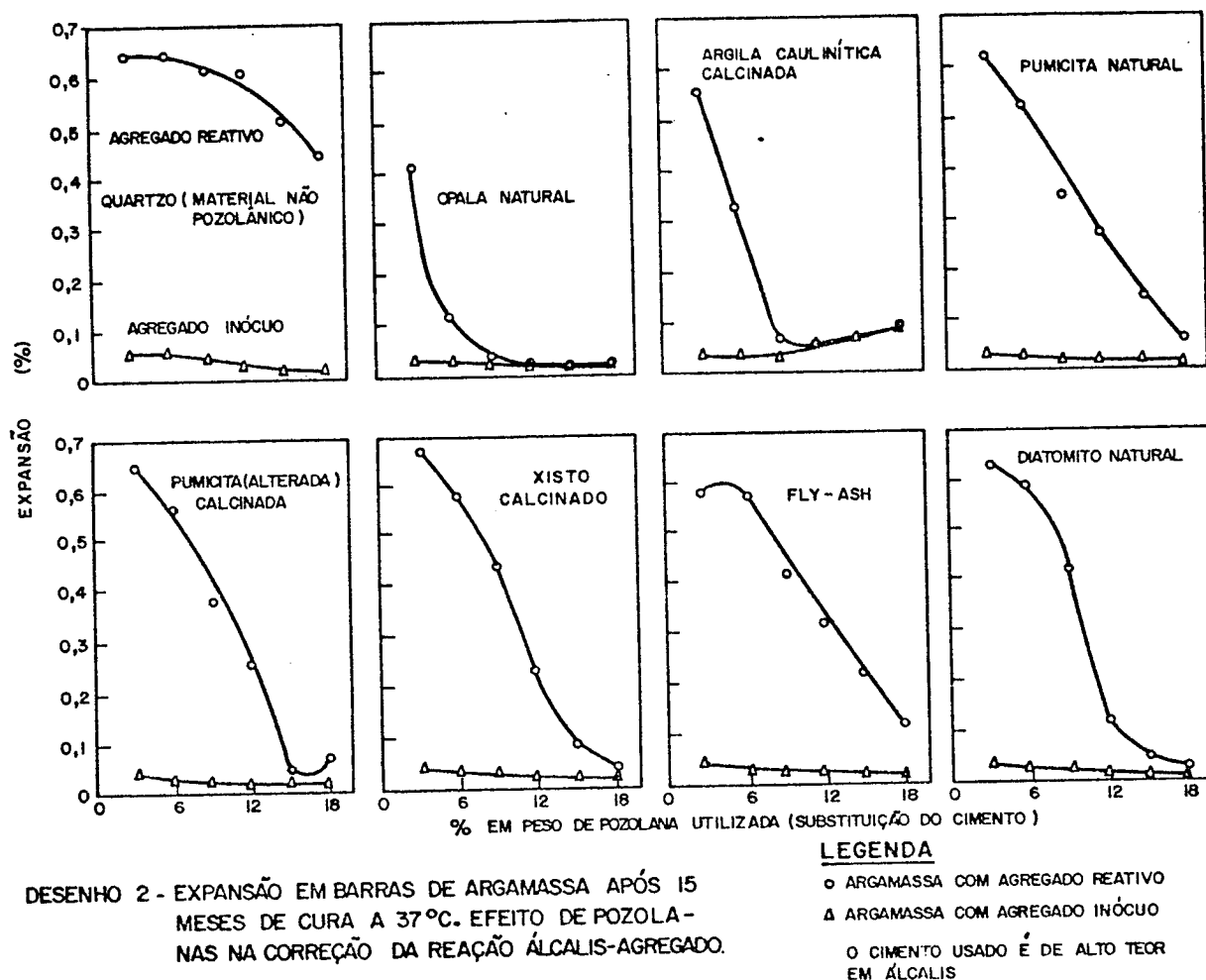
Além dos benefícios trazidos pelo uso dos materiais pozolânicos relativos à resistência do concreto, que será o objetivo principal deste trabalho, outros serão rapidamente descritos abaixo.

3.1.1. Combate à reação álcalis - agregado

Ao redor do ano de 1938 descobriu-se que alguns agregados reagem com os álcalis do cimento, podendo causar uma deterioração do concreto. Dos estudos realizados, a hipótese mais aceita é de que a Sílica Ativa de certos agregados reage com os álcalis do cimento (Na_2O e K_2O), em presença de água, formando um gel em torno dos agregados. A pasta de cimento em torno do agregado, com a presença desse gel, passa a ser uma membrana semipermeável que permite o desenvolvimento de pressões osmóticas. Segundo essa teoria, para agregados internos à massa de concretos, as pressões osmóticas seriam anuladas pela contraposição de pressões de outros agregados, sendo que na superfície, não havendo esse equilíbrio, a pasta de cimento poderia trincar provocando uma deterioração gradativa do concreto. Sabe-se que, de fato, a deterioração de concretos contendo agregado reativo ocorre inicialmente na superfície. São agregados reativos aqueles que contêm minerais de opala, calcedônia, ágata, tridimita e outros mais raros, todos porém na forma de sílica amorfa ou micro-cristalizada.

Descobriu-se que a adição de certos materiais silicosos, finamente moídos, reduzem a expansão de argamassas contendo agregado reativo e cimento de alto teor em álcalis. Posteriormente, o uso de materiais pozolânicos foi reconhecido como um método efetivo no controle da reação álcalis-agregado. Tendo uma Superfície Específica alta, os materiais pozolânicos reagem prontamente com os álcalis, minimizando a concentração de tensões na superfície dos agregados. Assim, o produto formado fica melhor distribuído por toda a massa de concreto, não apresentando a tumefação osmótica.

Tendo em vista determinar qual a porcentagem de cimento a ser substituído por material pozolânico, para um controle efetivo das reações álcalis-agregado, foram feitos estudos na Universidade da Califórnia, para diversos tipos de Pozolanas. Verificou-se que essa substituição deve ser de 15% a 25% dependendo da sua natureza. Cada caso deve ser, portanto, verificado por um estudo similar, como mostrado no Desenho 2.



As fotos das figuras 3 e 4 mostram resultados de estudos realizados nos Laboratórios da CESP em Ilha Solteira.

O bloco da foto 3, exposto ao tempo por 8 anos, foi moldado com concreto contendo agregado reativo (basicamente Quartzo e Calcedônia) e cimento com alto teor de álcalis ($\approx 1\%$ em Na_2O) mostra o estado de deterioração do concreto, conseqüentemente da reação álcalis-agregado.

O bloco da foto 4 moldado com o mesmo concreto e na mesma época, porém, com substituição de 25% de cimento por pozolana, evidencia a eficiência desse material no combate à reação álcalis-agregado.

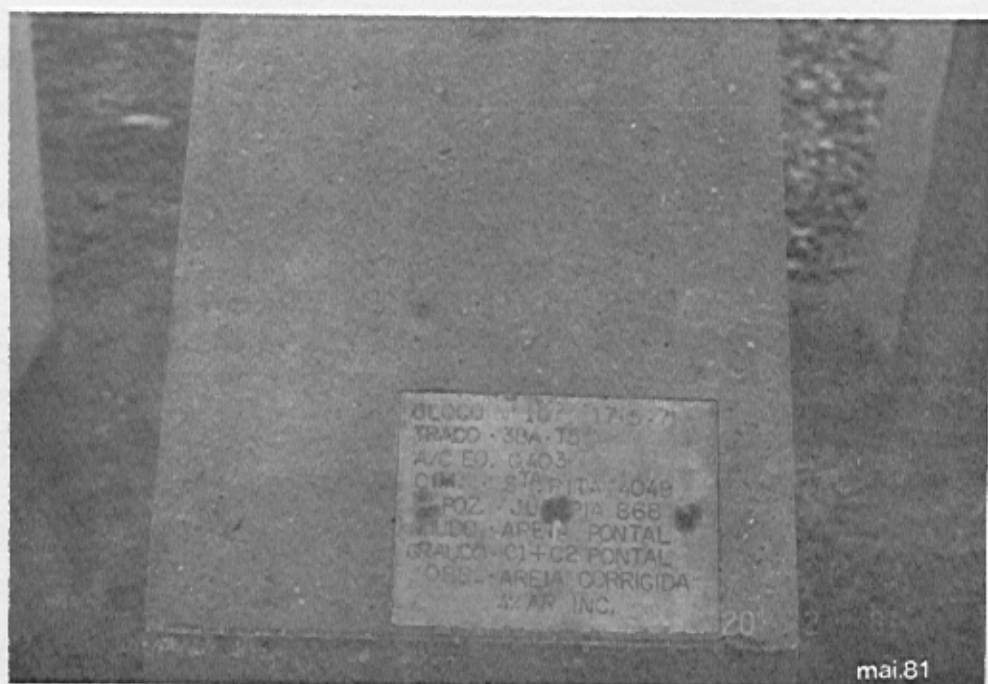


Figura 3 - Detalhe de deterioração de concreto devida à reação álcalis-agregado. Data de moldagem - 1972.

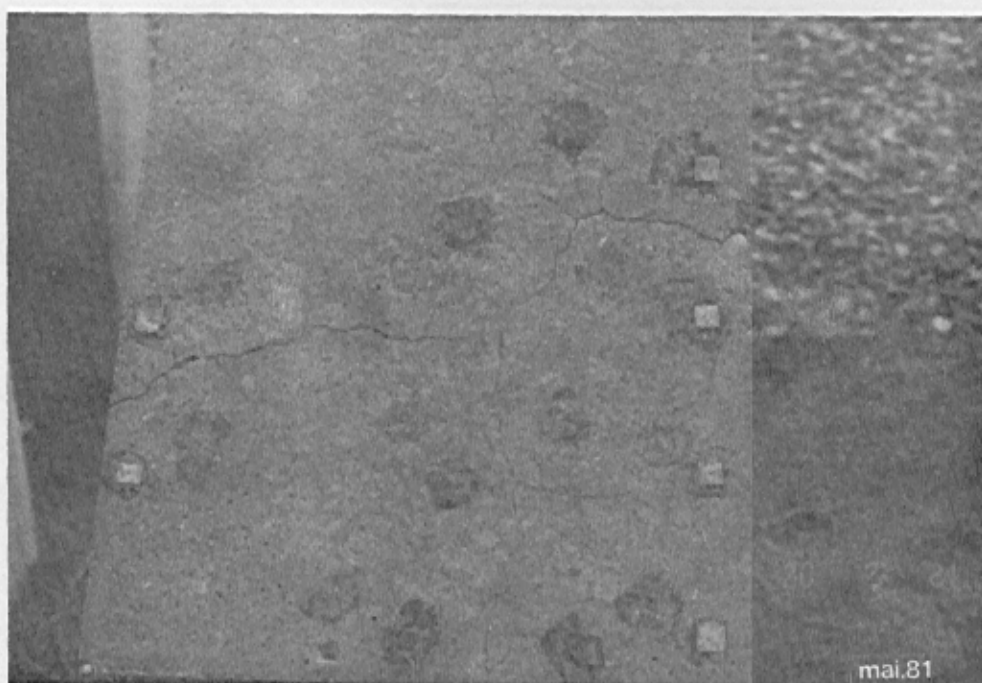


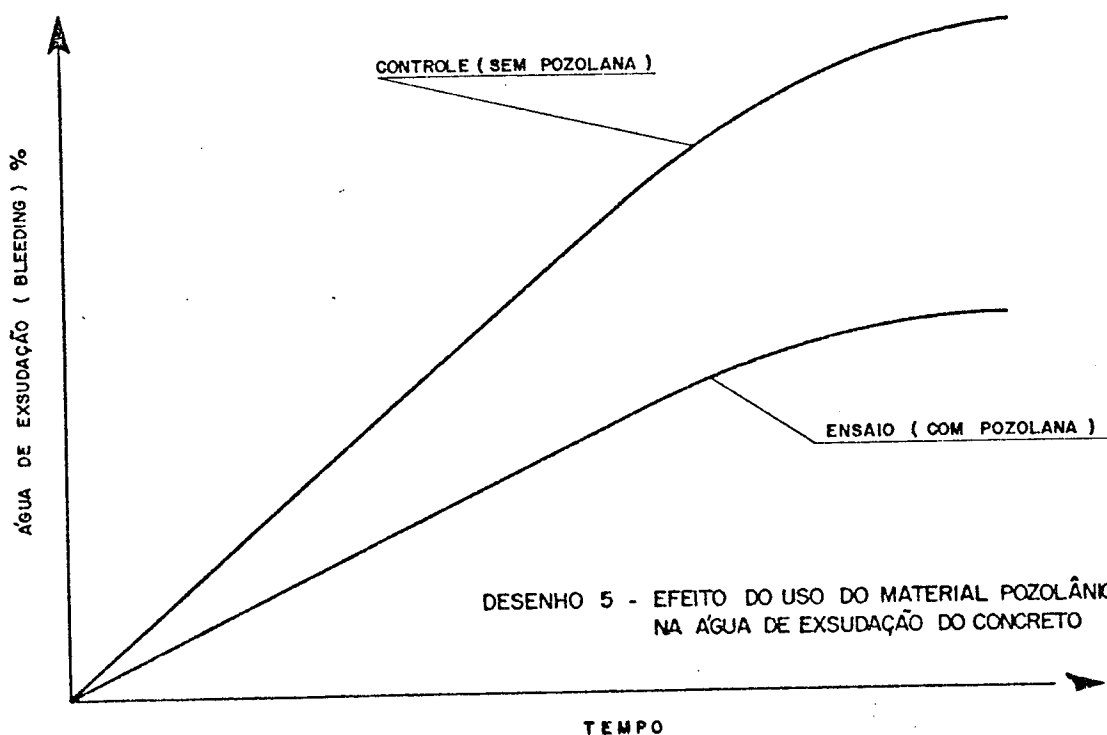
Figura 4 - Bloco de concreto contendo agregado reativo, cimento com alto teor de álcalis e material pozolânico para combate da reação álcalis-agregado. Data de moldagem - 1972.

3.1.2. Concreto fresco

Trabalhabilidade: 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* (altos fatores água/cimento) do que nos *ricos* (baixos fatores água/cimentos), e dependerá diretamente da finura do produto e da porcentagem substituída. Os produtos que melhores resultados têm apresentado a esse respeito são os diatomitos e as argilas calcinadas, finamente moídas, e algumas Fly-Ashes finas.

Água de exsudação (Bleeding): Como citado acima, as pozolanas vem contribuir para evitar a segregação. Essa melhoria faz-se também sentir em um tipo de segregação específica, que é a água de Exsudação - Bleeding.

No Desenho 5 são apresentados resultados de ensaios ilustrando o fenômeno.



3.1.3. Outras propriedades

Permeabilidade: Os materiais pozolânicos agem positivamente, tornando os concretos mais impermeáveis. Também essa propriedade é mais afetada em concretos pobres do que nos de alto teor de aglomerante. Estudos efetuados pelo *Army Corps of Engineers* dos Estados Unidos mostraram que os concretos com A/C des de 0,5 até 1,0 tem permeabilidade baixa e constante quando se usa material pozolânico.

Retração por secagem: As pozolanas naturais em geral aumentam a água requerida para obter-se uma dada trabalhabilidade e portanto, produzem concretos sujeitos a uma maior Retração por Secagem. As pozolanas de argila calcinada afetam pouco o conteúdo de água unitário do concreto. As Fly-Ashes com finura adequada praticamente não alteram a Água Requerida.

Calor de hidratação: 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 minimizar o aparecimento de trincas em concretos massa.

Resistência química: Estudos efetuados pelo Bureau of Reclamation em 1972, mostraram que concretos produzidos com material pozolânico resistem de maneira surpreendente ao ataque dos sulfatos, superando inclusive o desempenho dos concretos produzidos com cimento Tipo II e V (cimentos Resistentes aos Sulfatos) da A.S.T.M..

3.2. Exemplos e estudos de materiais pozolânicos

3.2.1. Exemplos de tipos e propriedades

Com o intuito de ilustrar o comportamento dos materiais pozolânicos, no que se refere às suas características de resistência à compressão, é apresentado na figura 6, o comportamento de três tipos de materiais pozolânicos, relativamente às suas características de atividade com cal e cimento, em função da mesma.

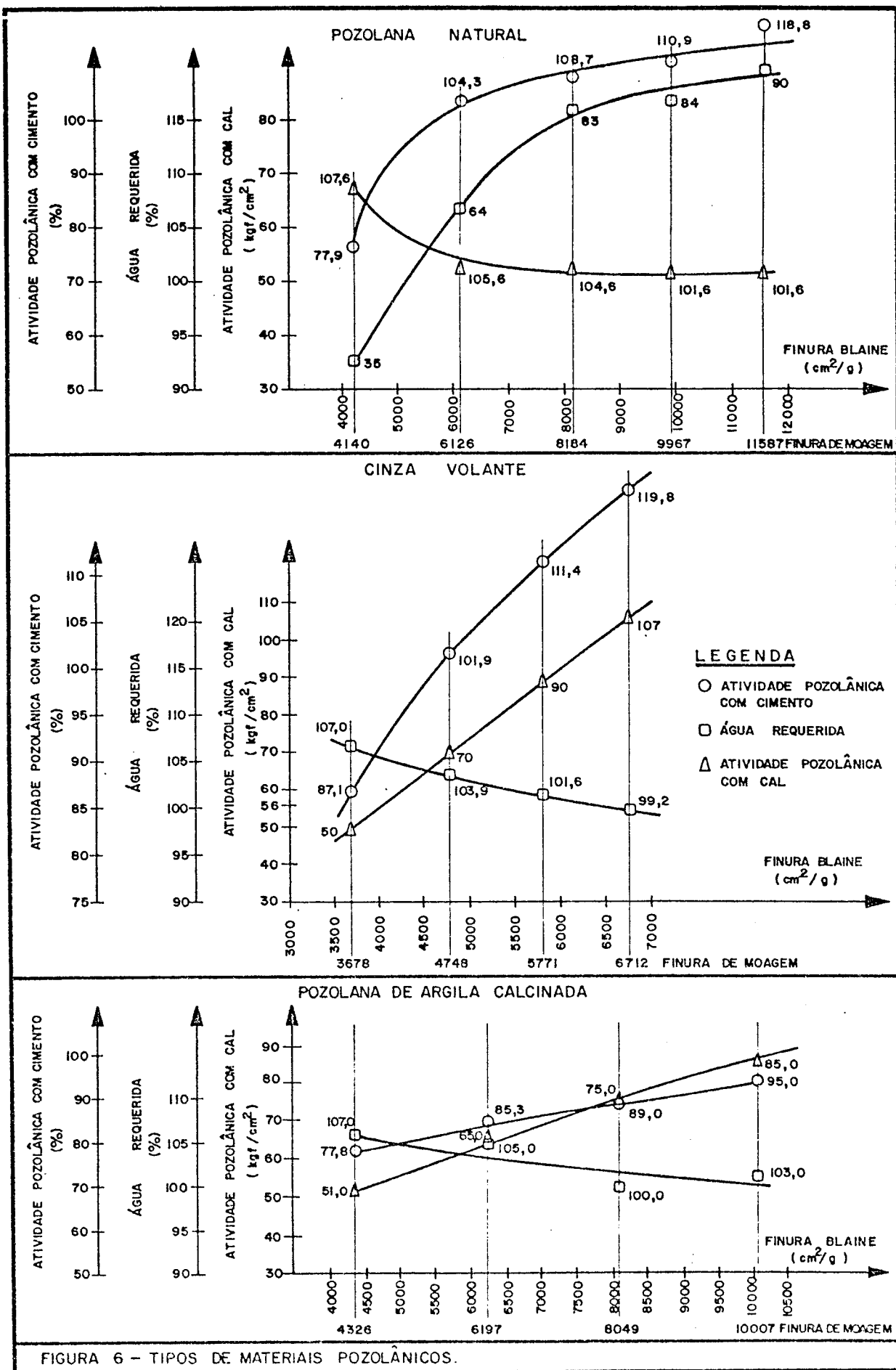


FIGURA 6 - TIPOS DE MATERIAIS POZOLÂNICOS.

. Atividade pozolânica com cimento

É o índice comparativo da resistência de duas argamasas de mesma proporção aglomerante - agregado e mesma trabalhabilidade, 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.

. 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.

. Água Requerida

É a comparação entre as quantidades de água requeridas para a mesma trabalhabilidade das argamassas do ensaio de atividade com cimento, em termos percentuais.

Os ensaios acima descritos são baseados na A.S.T.M. . Na figura 6 observa-se que as atividades pozolânicas com cimento e cal aumentam sensivelmente com a finura, acompanhadas de uma queda na quantidade de água requerida.

Não foram apresentados valores referentes à reatividade de com álcalis (Redução da Expansão, e Expansão da argamassa) e variação da retração por secagem pois o comportamento dos materiais pozolânicos quanto a essas propriedades, são de amplo conhecimento e fogem dos objetivos fundamentais deste trabalho.

3.2.2. Estudos sobre cinzas volantes e cimentos

3.2.2.1. Programa de ensaios

Os valores aqui citados fazem parte de um amplo estudo efetuado pelo Laboratório de Concreto da ITAIPÚ Binacional, a respeito do comportamento de Cimentos Portland comuns, Cimentos Pozolânicos e Cinzas Volantes.

O programa de estudos desenvolveu-se, basicamente, em duas etapas. Na primeira etapa procurou-se verificar o efeito da *Finura* nas propriedades das Cinzas Volantes e na segunda etapa, procurou-se verificar o efeito da moagem da Cinza Volante em conjunto com clíntquer de Cimento Portland.

3.2.2.2. Procedimentos e resultados

Para o desenvolvimento da programação foram usados:

- . Clíntqueres aqui denominados como IT-VRB-SR.
- . Cimento: *Cimento Mistura*- composto dos cimentos obtidos pela moagem dos clíntqueres.
- . Cinza Volante: *Cinza Volante Mistura* - mistura de cinzas volantes de Tubarão e Candiota.
- . Areia: Natural do Rio Paraná, na granulometria indicada para areia de Ottawa (Padrão ASTM para ensaio de atividade com cal).

Para desenvolvimento da primeira etapa, uma amostra da cinza volante foi dividida em cinco porções (Amstras N, A, B, C e D).

A amostra N representa a cinza volante na *Finura in natura* (como recebida) e as amostras A, B, C e D representam a mesma cinza com Finuras (Blaine) mais elevadas. Assim, as amostras A, B, C e D foram moídas, em um moinho de laboratório,

até atingirem valores de Finura Blaine superiores, respectivamente, em 1000, 2000, 3000 e 4000 (± 200) cm^2/g ao valor de Finura Blaine da amostra N.

As cinco amostras acima mencionadas foram submetidas a ensaios para verificar o efeito da cinza volante na Resistência à Compressão de Argamassas, no Calor de Hidratação e na Redução da Expansão devida à reação álcalis-agregado, tanto em função da Finura da Cinza quanto em função da taxa de reposição, nas porcentagens de (0%, 10%, 15%, 20% e 30% em peso).

Os resultados obtidos são fornecidos nas Figuras 7 e 8.

Na segunda etapa os clíngueres foram inicialmente moídos para se obter cimentos com Finura Blaine de $3500 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$. Posteriormente, mantendo-se constante o tempo requerido na moagem dos clíngueres e substituindo parte do clínguer por cinza volante (Amostra N com Finura de $2962 \text{ cm}^2/\text{g}$) preparou-se, com cada clínguer, misturas com 10%, 15%, 20% e 30% de cinza, em peso.

As misturas assim obtidas (Cimentos Pozolânicos) foram submetidas a ensaios de Finura (Blaine e Resíduo nas Peneiras nºs 200 e 325), Peso Específico, Calor de Hidratação e Resistência à Compressão Axial Simples (em argamassas).

Os valores encontrados nessa etapa são mostrados na Figura 9. Na figura 10 são fornecidos, a título de comparação, os valores de Resistência à Compressão obtidos com as amostras de cinzas volantes na finura *in natura* e B (cinza volante com finura Blaine em torno de $5000 \pm 200 \text{ cm}^2/\text{g}$).

As duas etapas de ensaios acima descritas, diferiram fundamentalmente no conceito do tipo de aglomerante a ser obtido pois, enquanto na primeira etapa obteve-se um Cimento Portland comum, para uma posterior reposição por material pozolânico (Procedimento usual nas Construções das Hidroelétricas), na segunda etapa obteve-se Cimento Portland Pozolânico, por moagem conjunta de clínguer e cinza volante.

PROPRIEDADES		AMOSTRAS				
		N	A	B	C	D
PESO ESPECÍFICO - (g/cm^3)		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) - (cm^2/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 - (kg/cm^2)	39	44	78	99	108
REATIVIDADE COM ALKALIS	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

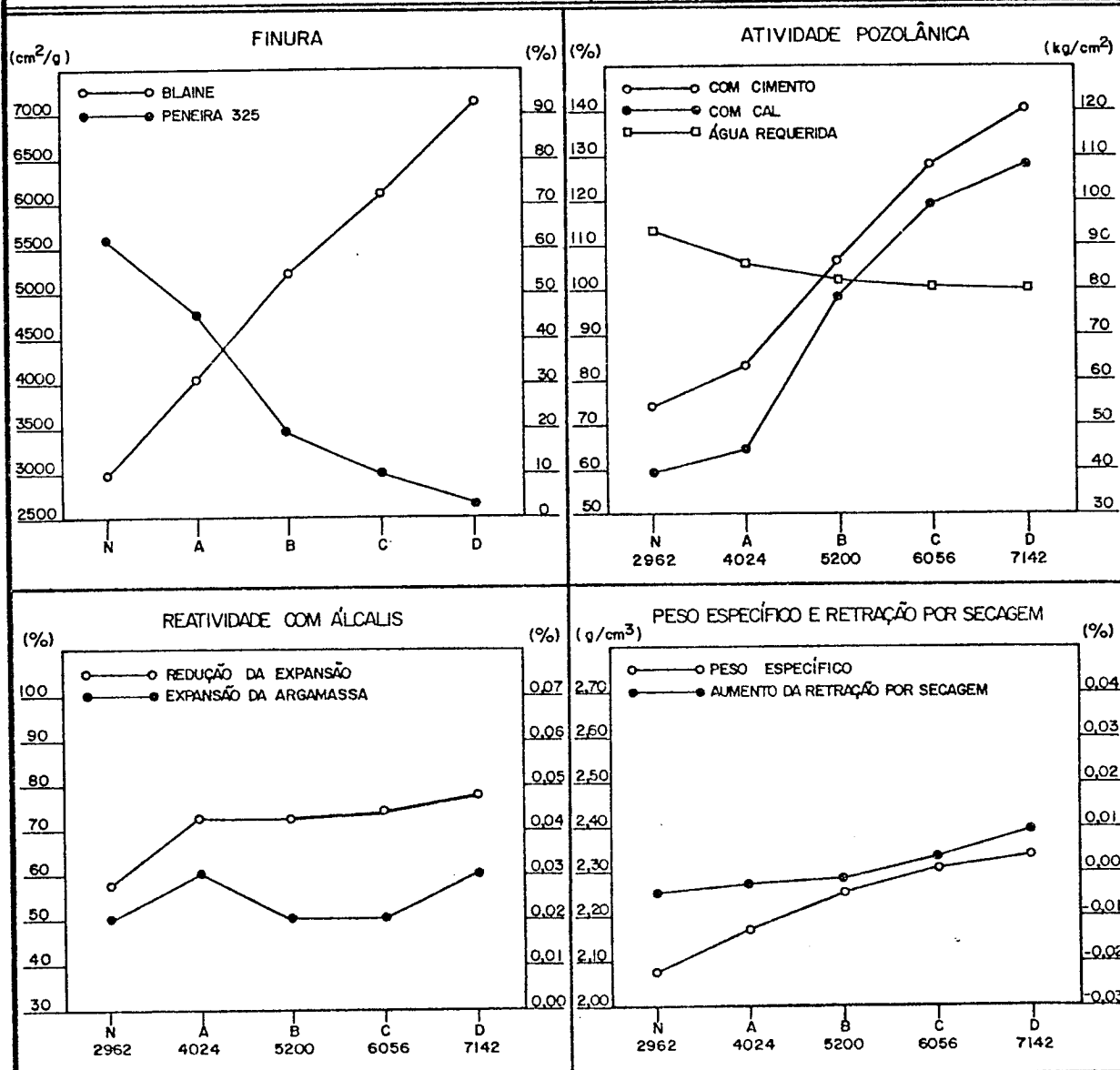


FIGURA 7 - CARACTERIZAÇÃO DE CINZAS VOLANTES COM A VARIAÇÃO DA FINURA (BLAINE)

CINZA VOLANTE UTILIZADA NA REPOSIÇÃO		AMOSTRA N				AMOSTRA A				AMOSTRA B				AMOSTRA C				AMOSTRA D			
FIN. DA (BLAHE) DA CINZA VOLANTE		2.962 cm ² /g				4.024 cm ² /g				5.200 cm ² /g				6.056 cm ² /g				7.142 cm ² /g			
FATOR DE REPOSIÇÃO - (EM PESO)		10	15	20	30	10	15	20	30	10	15	20	30	10	15	20	30	10	15	20	30
CONTROLE ARGAMASSA		0,512	0,536	0,552	0,578	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	0,503	0,507	0,511
COMPRESSÃO A ARGAMASSA		212	206	211	214	207	214	214	214	209	209	213	209	207	206	212	212	205	212	212	214
F DAS - (kg/cm ²)		166	159	159	159	197	192	172	116	217	211	188	155	238	198	163	152	235	235	235	235
28 DIES - (kg/cm ²)		211	213	213	213	169	318	332	199	351	375	396	253	385	339	303	293	371	372	377	377
90 DIES - (kg/cm ²)		342	342	342	342	279	433	433	433	433	433	433	413	479	432	432	477	430	431	431	431
365 DIES - (kg/cm ²)		426	435	471	472	389	538	537	466	559	553	548	579	557	553	566	525	551	559	559	559
7 DIES - (Cal/g)		63	63	63	63	52	68	64	61	68	65	61	57	64	62	59	60	63	66	63	63
28 DIES - (Cal/g)		74	74	72	72	68	73	73	73	76	74	70	71	73	74	75	71	78	78	70	70
REDUÇÃO DA EXPRESSÃO DA ARGAMASSA - (%)		33,6	33,6	33,6	33,6	76,6	43,3	59,0	77,4	44,3	63,2	76,2	75,9	34,9	54,0	76,3	33,2	53,6	53,9	72,7	72,7

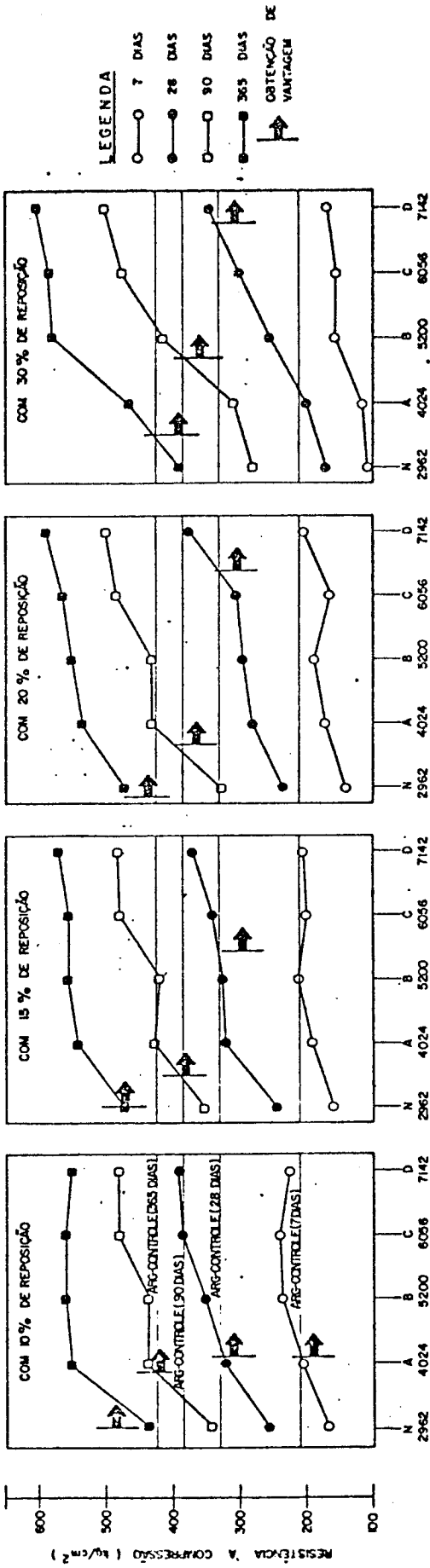


FIGURA 8 - VERIFICAÇÃO DE VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES E DO CALOR DE HIDRATAÇÃO, DEVIDA À TAXA DE REPOSIÇÃO E FINURA DA CINZA VOLANTE.

MARCA DO CIMENTO				IT					VRB					SR				
PORCENTAGEM DE CINZA VOLANTE (EM PESO)				0	10	15	20	30	0	10	15	20	30	0	10	15	20	30
PESO ESPECÍFICO (g/cm^3)				3,14	3,05	3,00	2,98	2,96	3,17	3,05	3,05	3,02	2,93	3,15	3,06	3,02	3,00	2,90
FUSÃO NA PENEIRA Nº 200 - (%)				2,8	2,2	1,6	1,4	1,2	3,0	2,6	2,4	2,0	2,0	5,6	4,4	4,0	3,6	2,4
FUSÃO NA PENEIRA Nº 325 - (%)				17,9	15,5	12,1	9,6	7,2	17,9	11,7	9,6	9,4	6,8	15,1	15,2	13,0	12,5	9,2
SUPERFÍCIE ESPECÍFICA (BLAINE) - (cm^2/g)				3,485	4,034	4,356	4,724	5,433	3,589	4,300	4,454	4,714	5,517	3,606	4,075	4,253	4,575	4,77
A/C - (%)				0,48	0,48	0,43	0,48	0,49	1,48	1,49	1,48	0,49	0,48	0,48	0,49	1,43	0,43	0,43
FLOW - (mm)				250	248	245	242	239	250	248	245	242	239	251	251	250	247	242
7 DIAS - (kg/cm^2)				295	279	261	230	219	247	252	222	216	184	245	240	213	220	209
28 DIAS - (kg/cm^2)				375	333	359	384	378	344	363	329	310	296	301	293	327	334	306
90 DIAS - (kg/cm^2)				433	462	514	536	487	401	465	516	497	473	335	424	435	479	441
365 DIAS - (kg/cm^2)				459	541	557	589	565	448	530	573	573	570	385	485	508	534	522
7 DIAS - (Cal/g)				85	74	72	71	71	72	71	70	68	68	74	73	73	64	63
28 DIAS - (Cal/g)				93	89	85	83	80	87	84	83	84	76	86	84	83	79	77

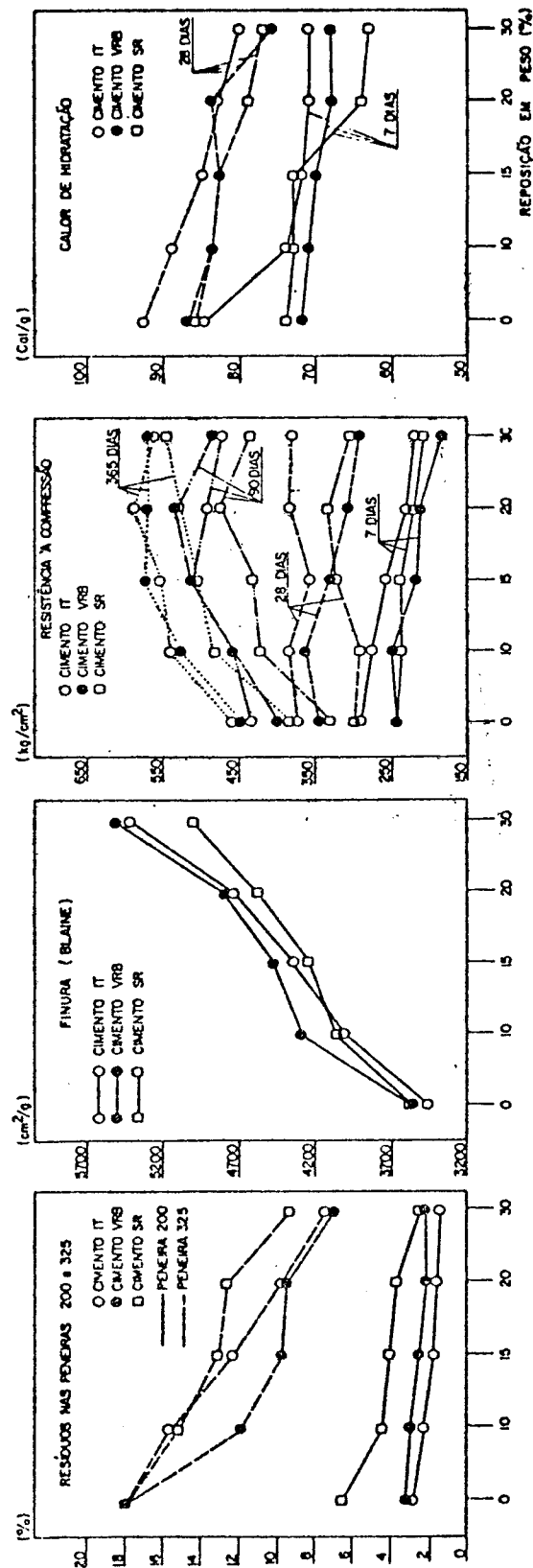


FIGURA 9 - VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E CALOR DE HIDRATAÇÃO EM AGLOMERANTES CONSTITUÍDOS POR CIMENTO E MATERIAL POTOLÂNCIO.

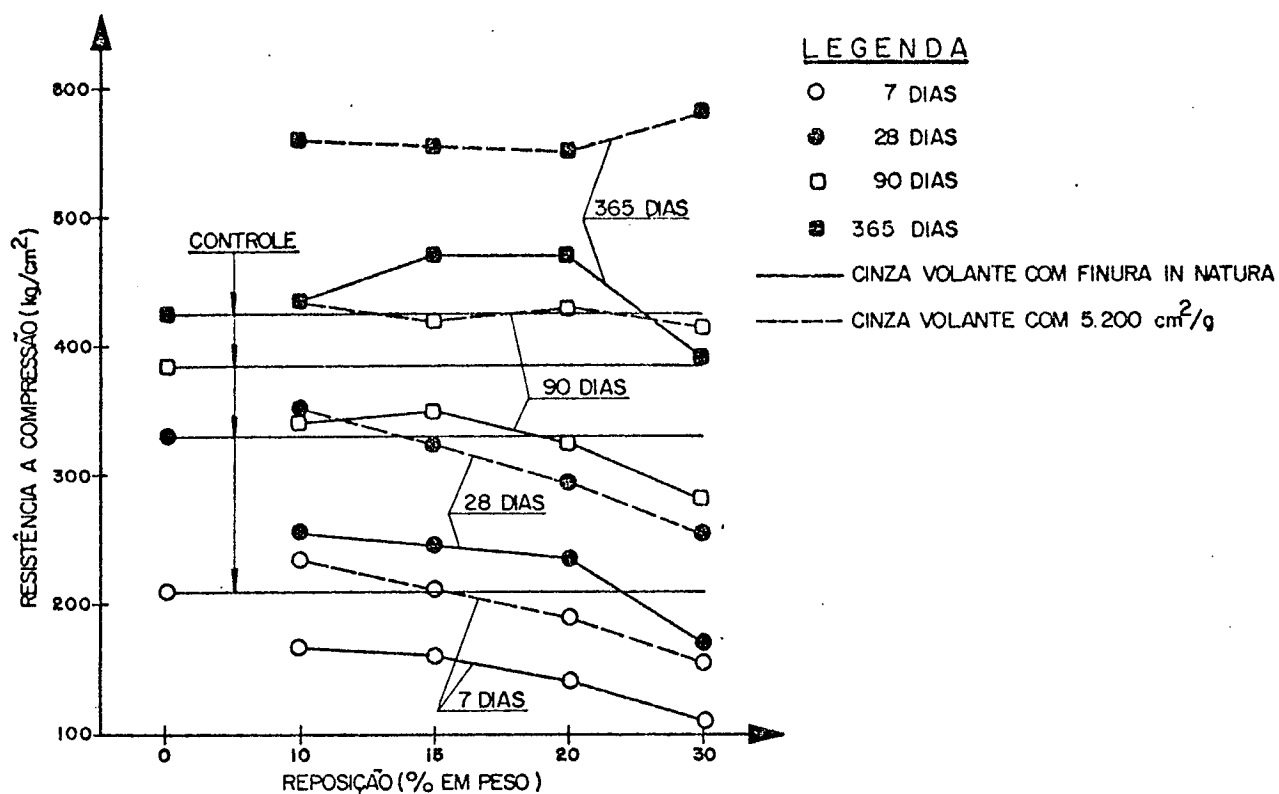


Figura 10 - Resistência à Compressão Simples, nas finuras *N* e *B* e taxas variáveis de reposição.

3.2.2.3. Comentários

Os gráficos da Figura 7, bem como aqueles da Figura 6, evidenciam a influência e os benefícios da finura sobre as propriedades físicas dos materiais pozolânicos. Observa-se o aumento notório da atividade pozolânica da cinza volante e a redução de água requerida, quando do aumento da finura Blaine.

Pelos diagramas da Figura 8 nota-se a evolução da resistência com o aumento da finura. Pode-se notar que os melhores resultados obtidos foram:

- . À idade de 7 dias - Taxa de Reposição: 10% (peso)
Finura Blaine mínima da Fly-Ash
4000 cm²/g

- . À idade de 28 dias - Taxa de Reposição: 10% (peso)
Finura Blaine mínima da Fly-Ash
4000 cm²/g
- . À idade de 90 dias - Taxa de Reposição: 15 a 20% (peso)
Finura Blaine mínima da Fly-Ash
3500 cm²/g (aproximadamente)
- . À idade de 365 dias - Taxa de Reposição: 20% (peso)
Finura Blaine mínima da Fly-Ash
3000 cm²/g ou
Taxa de Reposição: 30% (peso)
Finura Blaine mínima da Fly-Ash
3500 cm²/g

Pelos dados da Figura 9 observa-se que o aglomerante *Cimento Portland Pozolânico*, obtido pela moagem de clínquer com cinza volante na finura N (in natura) $\approx$ 3000 cm²/g, pelo mesmo tempo utilizado para se obter um Cimento Portland com finura ao redor de 3500 cm²/g apresenta melhores (valores mais elevados) de resistências a partir de 28 dias em percentual de 10% de reposição, chegando-se à idade de 365 dias com reposição ao redor de 20% em peso.

Nota-se também uma sensível redução do calor de hidratação (idades de 7 e 28 dias), com o aumento da taxa de reposição.

Comparando-se os valores das tabelas das Figuras 8 e 9 observa-se que não houve diferença técnica significativa entre a reposição na moagem (moagem conjunta) e a moagem da cinza isoladamente, para posterior reposição na mistura.

3.2.3. *Valores comparativos de controle de Cimentos Portland e Cimento Portland Pozolânico*

Com intuito de evidenciar os benefícios decorrentes do uso de materiais pozolânicos, no que diz respeito ao aumento da Resistência à Compressão, são fornecidas as tabelas das Figuras 11 e 12, sendo que a Figura 11 mostra valores de ensaios de con

TIPO DE CIMENTO		VRB		SR		IT (POZOLÂNICO)		EL		BRR		GS	
NUMERO DE AMOSTRAS		6		5		6		6		6		6	
		MÉDIA	C. VARIACÃO (%)	MÉDIA	C. VARIACÃO (%)	MÉDIA	C. VARIACÃO (%)	MÉDIA	C. VARIACÃO (%)	MÉDIA	C. VARIACÃO (%)	MÉDIA	C. VARIACÃO (%)
FINURA	PENEIRA Nº 200 (% RETIDA)	7,0	9,9	8,5	20,9	4,2	11,1	4,7	20,9	4,7	19,5	7,0	12,0
	PENEIRA Nº 325 (% RETIDA)	21,4	10,1	22,9	17,5	14,6	18,2	16,7	14,9	18,9	13,9	21,7	9,5
	SUPERFÍCIE ESPECÍFICA(BLAINE)(cm ² /g)	3510	1,3	3550	6,5	4360	3,5	3476	3,8	3355	1,4	3510	2,5
MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)		3,20	0,5	3,18	1,2	3,02	0,6	3,19	0,7	3,17	0,6	3,15	0,5
TEMPO DE PEGA	ÁGUA DE CONSISTÊNCIA (%)	22,2	0,6	22,0	3,5	27,8	1,9	22,6	1,3	23,5	1,7	23,0	0,4
	INÍCIO DE PEGA (h:min.)	3:06	24,5	5:9	22,8	1:23	6,3	3:05	18,7	1:46	6,1	1:53	14,2
EXPANSÃO EM AUTOCLAVE (%)		0,30	25,9	0,09	45,7	0,003	590,0	0,02	44,7	0,02	91,9	0,03	19,4
		0,48	-	0,48	-	0,48	-	0,48	-	0,48	-	0,48	-
CONSISTÊNCIA À COMPRESSÃO	A/C	223	2,5	222	2,8	199	4,3	224	1,0	225	5,7	225	1,2
	FLOW (mm)	193	12,7	238	7,5	213	7,4	266	2,0	220	10,0	154	1,0
	TENSÃO (kg/cm ²)	259	8,5	303	11,4	305	7,6	345	4,3	288	11,0	273	11,1
CALOR DE HIDRATAÇÃO (cal/g)	3 DIAS	402	8,8	389	8,8	409	2,8	419	8,2	377	6,5	384	9,2
	7 DIAS	67	4,3	68	3,9	68	3,7	71	4,8	66	6,4	64	3,7
	28 DIAS	80	4,0	80	3,7	76	5,3	83	5,5	78	4,7	79	3,2
PERDA AO FOGO		0,85	3,0	0,74	8,6	2,13	3,4	0,75	21,6	1,23	17,2	1,87	13,7
ANÁLISE QUÍMICA (%)	RESÍDUO INSOLÚVEL	0,22	55,0	0,19	56,9	21,2	5,7	0,20	54,6	0,18	65,6	0,34	43,4
	SiO ₂	21,6	1,3	21,5	2,0	29,3	2,2	20,9	0,9	21,0	1,5	21,0	1,1
	Fe ₂ O ₃	3,88	5,4	3,21	4,9	4,25	5,2	3,94	3,2	4,41	2,1	4,22	2,4
	Al ₂ O ₃	4,62	10,8	4,21	3,9	10,46	3,0	5,24	5,0	5,12	8,7	5,06	3,2
	CaO	62,4	0,9	63,6	0,2	50,2	1,2	64,3	0,6	64,7	0,3	63,8	0,3
	MgO	4,10	9,5	3,13	11,6	1,09	13,9	1,63	16,4	0,64	12,5	0,95	12,0
	SO ₃	1,52	14,0	1,97	9,0	2,01	6,2	2,12	5,5	2,01	7,2	2,10	5,3
EQUIVALENTE ALCALINO (EM NO ₂ O) (%)	NO ₂ O	0,13	10,9	0,11	15,8	0,08	11,2	0,13	4,9	0,11	39,7	0,15	9,3
	K ₂ O	0,58	8,2	0,90	5,6	0,77	4,4	0,77	4,3	0,51	8,8	0,45	8,1
	CAL LIVRE (EM CaO)	1,14	26,2	0,75	28,3	1,38	31,9	0,67	25,6	1,85	35,9	2,44	22,9
	Mn ₂ O ₃	0,20	20,2	0,24	9,0	0,04	18,1	0,13	15,1	0,03	18,1	0,09	12,2
COMPOSTOS PELO MÉTODO DE BOGUE (%)	C ₂ S	0,51	6,4	0,70	4,8	0,58	3,7	0,64	3,1	0,44	12,1	0,44	6,5
	C ₂ S	44,1	7,0	52,2	4,1	-	-	53,0	3,2	43,6	5,1	44,2	3,3
	C ₃ A	22,6	9,4	23,0	9,8	-	-	20,0	5,8	22,9	6,0	26,8	4,1
	C ₄ AF	5,87	27,5	5,71	11,1	-	-	7,01	11,8	5,11	17,4	6,26	6,6
FIGURA 11 - VALORES DE ENSAIO DE CONTROLE DE RECEPÇÃO DE AGLOMERANTES (OBRA ITAIPU)		21,7	2,1	9,7	2,3	-	-	1,0	3,2	31,7	1,1	1,3	-

CENTRAL DE CONCRETO Nº		1		2		3		4		5		6	
TIPO DE CIMENTO		CIMENTO PORTLAND		CIMENTO PORTLAND		CIMENTO PORTLAND		CIMENTO PORTLAND		CIMENTO PORTLAND		CIMENTO PORTLAND	
NÚMERO DE AMOSTRAS		48		48		48		48		48		37	
		MÉDIA	C. VARIAÇÃO (%)	MÉDIA	C. VARIAÇÃO (%)	MÉDIA	C. VARIAÇÃO (%)	MÉDIA	C. VARIAÇÃO (%)	MÉDIA	C. VARIAÇÃO (%)	MÉDIA	C. VARIAÇÃO (%)
FINURA	PENEIRA Nº 200 (% RETIDA)	5,2	19,0	5,1	18,5	5,3	18,8	5,3	21,3	5,4	20,9	5,0	15,9
	PENEIRA Nº 325 (% RETIDA)	18,3	13,6	18,4	13,2	17,8	13,6	17,7	15,7	18,1	15,1	17,5	15,8
	SUPERFÍCIE ESPECÍFICA (BLANE) (cm ² /g)	3518	2,1	3518	2,4	3530	1,9	3547	1,7	3539	2,2	3546	1,8
MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)		3,20	0,6	3,19	0,6	3,19	0,6	3,20	0,6	3,20	0,6	3,20	0,7
TEMPO DE PEGA	ÁGUA DE CONSISTÊNCIA (%)	22,1	1,5	22,1	1,5	22,1	1,5	22,0	1,7	22,0	1,7	22,0	1,7
	ÍNDICE DE PEGA (N mm.)	2440	19,6	2441	24,2	2437	17,8	2414	21,0	2410	16,1	2403	15,5
EXPANSÃO EM AUTOCLAVE (%)		0,11	32,7	0,10	35,3	0,11	34,8	0,16	34,2	0,16	26,7	0,15	24,6
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	A/C	0,48	-	0,48	-	0,48	-	0,48	-	0,48	-	0,48	-
	FLOW (mm)	216	5,4	216	4,8	215	4,9	214	5,0	215	4,8	215	5,6
	3 DIAS	188	10,3	185	11,4	185	10,3	172	12,9	170	12,9	174	11,4
CALOR DE HIDRATAÇÃO (cal/g)	7 DIAS	272	9,0	267	9,8	270	9,7	257	9,9	254	10,5	253	10,8
	28 DIAS	395	6,6	397	7,5	398	8,0	395	8,7	389	8,4	389	8,9
	7 DIAS	69	4,6	69	4,4	70	4,6	69	4,6	70	4,6	69	4,1
ANÁLISE QUÍMICA (%)	28 DIAS	82	3,5	82	4,1	83	3,4	82	3,9	82	3,8	82	4,1
	PERDA AO FOGO	0,79	18,4	0,85	18,3	0,82	16,9	0,74	14,0	0,73	15,8	0,75	17,5
	RESÍDUO INSOLÚVEL	0,15	43,6	0,16	36,9	0,15	46,4	0,18	48,2	0,14	39,8	0,15	44,5
EQUIVALENTE ALCALINO (EM NO ₂ O) (%)	SiO ₂	21,5	1,2	21,4	1,1	21,5	1,1	21,6	1,2	21,7	1,2	21,7	1,2
	Fe ₂ O ₃	4,00	3,8	3,97	3,6	3,95	3,6	3,84	4,1	3,82	4,5	3,84	4,3
	Al ₂ O ₃	4,68	6,8	4,78	5,9	4,78	6,4	4,60	6,5	4,60	5,5	4,59	6,3
	CaO	63,6	0,7	63,6	0,6	63,6	0,6	63,2	0,8	63,2	0,8	63,2	0,7
	MgO	2,95	19,1	2,77	19,8	2,90	17,0	3,53	14,1	3,52	13,1	3,53	9,8
	SO ₃	1,74	8,1	1,79	8,9	1,74	8,5	1,63	7,9	1,63	6,7	1,64	5,1
	Na ₂ O	0,12	14,2	0,12	15,2	0,12	14,4	0,12	16,5	0,12	14,1	0,12	13,2
	K ₂ O	0,58	8,2	0,56	9,1	0,56	7,2	0,57	9,6	0,56	7,5	0,57	7,1
	CAL LIVRE (EM CaO)	1,22	21,5	1,26	20,8	1,19	21,4	1,14	20,3	1,14	17,4	1,14	20,2
	EQUIVALENTE ALCALINO (EM NO ₂ O) (%)	0,50	7,4	0,49	8,3	0,49	6,9	0,50	8,0	0,50	6,5	0,50	6,5
COMPOSTOS PELO MÉTODO DE BOGUE (%)	C ₃ S	45,5	15,3	48,0	5,7	47,9	6,0	47,3	8,3	46,7	7,6	46,7	7,6
	C ₂ S	55,1	10,1	55,3	9,5	55,5	9,7	56,3	12,9	57,1	11,7	56,9	12,1
	C ₃ A	5,33	21,3	5,96	13,6	5,98	15,1	5,69	16,5	5,73	14,5	5,68	16,1
	C ₄ AF	1,17	3,4	12,1	3,6	12,0	3,7	11,7	4,1	11,6	4,6	11,7	4,3

FIGURA 12 - VALORES DE ENSAIOS DE CONTROLE NAS CENTRAIS DE PRODUÇÃO (6 CENTRAIS) DA OBRA DE ITAIPU.

trole de recepção de aglomerantes para uso na Obra de ITAIPU, em função da origem de suprimentos. O IT Pozolânico é um Cimento Pozolânico com 15% de pozolana natural e os demais são Cimentos Portland comuns, atendendo às exigências das especificações técnicas da Obra de ITAIPU.

As informações da Figura 12 foram obtidas pelo controle de qualidade dos aglomerantes, através de amostras coletadas à entrada das betoneiras, separadamente em cada central de produção (6 Centrais Johnson), sendo que o Cimento Portland Pozolânico é utilizado isoladamente na central de produção nº 6.

Pelas informações de ambas as Figuras observa-se o comportamento de um Cimento Portland Pozolânico (de reposição de a proximadamente 15% em peso) e de vários Cimentos Portland, evidenciando os benefícios quanto a Resistência à Compressão.

3.2.4. *Valores comparativos a partir do controle de qualidade de concretos*

Para, finalmente, confirmar as vantagens decorrentes da utilização de materiais pozolânicos, relativas às resistências à compressão não só através dos estudos sobre argamassas, são a apresentados resultados de ensaios de controle de qualidade em concretos, obtidos durante a construção da Obra de ITAIPU.

3.2.4.1. *Valores referentes a várias taxas de reposição*

A Figura 13 mostra valores de controle de 3 misturas de concreto com Ø máx 152 mm e várias taxas de material pozolânico (cinza volante com Finura Blaine ao redor de 3000 cm²/g).

Pelos valores apresentados observa-se que os concretos com utilização de material pozolânico apresentaram melhores (valores mais elevados) resistências (notar os valores mais elevados de rendimentos) a partir da idade de 28 dias.

MISTURA	COMPOSIÇÃO EM kg/m^3 (S. S. S)												VOLUME TOTAL PRODUZIDO
	ÁGUA	CIMENTO	FLY-ASH	FLY-ASH (% v.s)	SLUMP (cm)	AR (%)	AREIA NATURAL	AREIA ARTIFICIAL	B 1 (19 mm)	B 2 (38 mm)	B 3 (76 mm)	B 4 (152 mm)	
152H-01	94	91	26	30	4,0±0,5	6,0±0,5	163	418	363	366	459	642	5.019
152H-02	90	125	—	0	4,0±0,5	6,0±0,5	167	429	363	366	459	642	2.226
152H-03	97	108	18	20	4,0±0,5	6,0±0,5	159	409	363	366	459	642	1.902

RESULTADOS										
MISTURA	RESISTÊNCIAS (kg/cm^2)					RENDIMENTOS ($\text{kg/cm}^2 / \text{kg/m}^3$)				
	7 DIAS	28 DIAS	90 DIAS	180 DIAS	365 DIAS	7 DIAS	28 DIAS	90 DIAS	180 DIAS	365 DIAS
152H-01	62	113	194	197	218	0,53	0,96	1,66	1,68	1,86
152H-02	108	130	182	186	—	0,86	1,04	1,46	1,49	—
152H-03	71	108	189	221	217	0,56	0,85	1,50	1,75	1,72

FIGURA 13 — COMPOSIÇÃO E VALORES DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL SIMPLES DE CONCRETOS COM DIFERENTES TAXAS DE REPOSIÇÃO DE MATERIAL POZOLÂNICO.

NOTAS — RESISTÊNCIAS OBTIDAS EM CORPOS DE PROVA CILINDRICOS $\varnothing 15 \times 30$ cm MOLDADOS — COM CONCRETOS PENEIRADOS PASSANTES NA MALHA 38 mm.

— RENDIMENTO ($\text{kg/cm}^2 / \text{kg/m}^3$) — RELAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA OBTIDA NUMA DETERMINADA IDADE E O CONSUMO TOTAL DE AGLOMERANTE EM PESO.

3.2.4.2. *Valores comparativos de concretos com a utilização de Cimento Portland Pozolânico e com aglomerantes compostos por Cimento Portland comum e reposição por material pozolânico (cinza volante)*

A Figura 14 fornece um conjunto de valores de rendimentos (Resistência à Compressão Axial Simples dividida pelo res-

pectivo Consumo de Aglomerante) médios obtidos pelo controle de qualidade de concretos da Obra de ITAIPU.

Nota-se um comportamento semelhante dos concretos com a glomerantes compostos por Cimento Portland e cinza volante (re- posição de 11% em peso) e os concretos com Cimento Portland Po- zolânico (clínquer moído com pozolana natural em reposição de 15% em peso).

DIÂMETRO MÁXIMO DO AGREGADO (mm)	AGLOMERANTE	RENDIMENTOS MÉDIOS $\frac{\text{kgf/cm}^2}{\text{kg/m}^3}$			
		IDADE (DIAS)			
		7	28	90	180
19	CIMENTO + CINZA	0,51	0,86	1,11	1,27
	CIMENTO POZOLÂNICO	0,74	1,02	1,25	1,32
38	CIMENTO + CINZA	0,43	0,76	1,05	1,14
	CIMENTO POZOLÂNICO	0,60	1,02	1,16	1,27
76	CIMENTO + CINZA	0,56	0,98	1,31	1,42
	CIMENTO POZOLÂNICO	0,70	1,07	1,27	1,43

LEGENDA

- 7 DIAS
- 28 DIAS
- 90 DIAS
- 365 DIAS

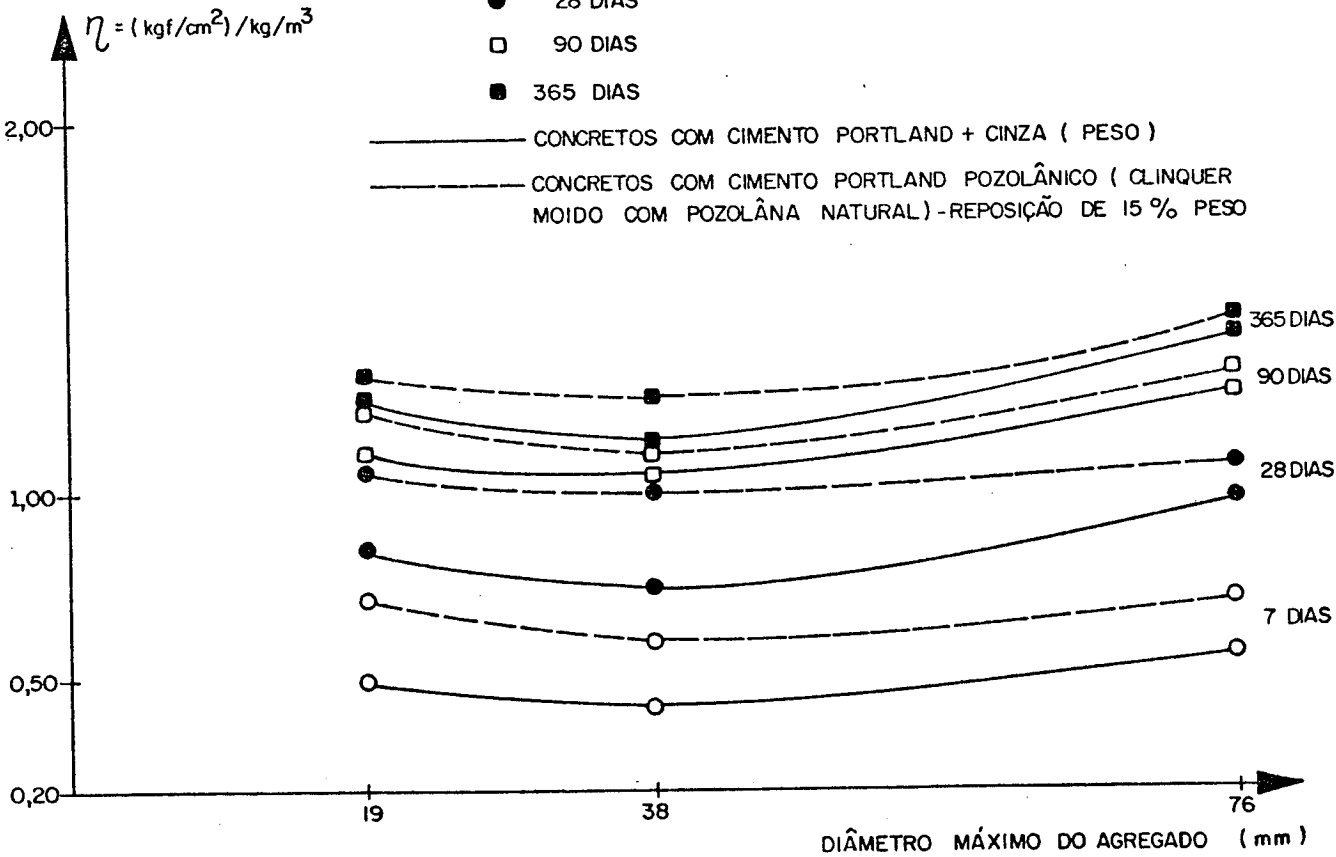


Figura 14 - Valores de rendimentos de concretos com materiais Pozolânicos.

4. COMENTÁRIOS

Pelo conjunto de valores apresentados neste trabalho, pode-se observar que a utilização de Materiais Pozolânicos nos concretos, quer sejam os de características massiva, quer sejam os estruturais, propicia benefícios sensíveis quanto à Resistência à Compressão Axial Simples, mesmo à idades inferiores a 28 dias.

Os valores reportados mostram que, através de um estudo criterioso dos tipos e das propriedades dos Materiais Pozolânicos, pode-se reduzir o consumo de aglomerantes, visto que se obtém valores de rendimentos mais elevados e ainda, ao se utilizar Material Pozolânico em reposição ao cimento está se reduzindo a quantidade de energia (de combustível) de produção do cimento (de clínquer)...

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. A utilização da pozolana na construção do conjunto hidroelétrico de Urubupungã - CESP - Ilha Solteira
Engº Francisco Rodrigues Andriolo.
2. Relatórios - C - CESP - Ilha Solteira
3. Relatórios - C - ITAIPÚ BINACIONAL
4. Relatórios - E - ITAIPÚ BINACIONAL