

1985

PERFIL DOS CIMENTOS PORTLAND
POZOLÂNICOS BRASILEIROS

por

199.6055

*Yushiro Kihara
Geólogo, Chefe do Departamento
de Físico-Química da ABCP*

e

*Mario William Esper
Engenheiro Civil, Departamento
de Engenharia de Qualidade da ABCP*



ASSOCIAÇÃO
BRASILEIRA DE
CIMENTO PORTLAND

Associação Brasileira de Cimento Portland

PERFIL DOS CIMENTOS PORTLAND
POZOLÂNICOS BRASILEIROS

por

Yushiro Kihara
Geólogo, Chefe do Departamento
de Físico-Química da ABCP

e

Mario William Esper
Engenheiro Civil, Departamento
de Engenharia de Qualidade da ABCP

São Paulo
novembro de 1985

F

691.545 Kihara, Yushiro
K47p Perfil dos cimentos portland pozolânicos
brasileiros, por Yushiro Kihara e Mario
William Esper. São Paulo, ABCP, 1985.
34p. ilus. 30cm. (ET-82)

Cimento pozolânico
Pozolanas
Esper, Mario William, colab.
Série

Todos os direitos reservados à
Associação Brasileira de Cimento Portland
Avenida Torres de Oliveira, 76
CEP 05347 São Paulo/SP
Fone: 268.5111 - Telex: (011) 39185 ASSD BR

Agradecimentos

A elaboração deste trabalho foi possível graças ao apoio da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) pela concessão de recursos necessários à sua execução, a quem os autores registram os seus agradecimentos.

Agradecimentos especiais são dirigidos aos engenheiros Argos Menna Barreto, Luércio ScandiuSSI e Vladimir Antonio Paulon que colaboraram, com sugestões e críticas, na redação final do trabalho.

LISTA DAS FIGURAS

<i>nº</i>	<i>Título</i>	<i>p.</i>
1	<i>Elevação adiabática da temperatura de concretos com diferentes teores de pozolana de argila calcinada (Jupiá) em substituição a igual volume de cimento</i>	6
2	<i>Elevação adiabática da temperatura de concretos com diferentes teores de pozolanas de cinzas volantes (Tubarão) em substituição a igual volume de cimento</i>	6
3	<i>Efeito do uso do material pozolânico na água de exsudação do concreto</i>	8
4	<i>Eficácia da pozolana de argila calcinada na redução da expansão de argamassa com vidro "pirex"</i>	9
5	<i>Eficácia das pozolanas (argila calcinada e cinza volante) na redução da expansão da argamassa com vidro "pirex"</i>	10
6	<i>Resistência à compressão × tempo de cimentos com diferentes teores de pozolana e cinza volante</i>	13
7	<i>Ciclo térmico</i>	14
8	<i>Comportamento mecânico do cimento tratado em vapor puro</i>	15
9	<i>Comportamento mecânico dos cimentos POZ e CPC tratados em vapor puro para mesma maturidade</i>	17
10	<i>Evolução do consumo de cimento portland pozolânico em relação à produção total de cimento no Brasil</i>	20
11	<i>Evolução das resistências mecânicas dos cimentos brasileiros (CPC, POZ e AF) no ano de 1983, obtidas através dos mapas de auto-controle de qualidade</i>	24
12	<i>Calor de hidratação dos cimentos portland pozolânico brasileiros (método de "Langavant")</i>	25

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

LISTA DAS FIGURAS

1	INTRODUÇÃO	1
2	DEFINIÇÃO E CONCEITO	1
2.1	Definição	1
2.2	Considerações Acerca de Cimentos Portland Comum e Pozolânico	2
3	ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO	5
3.1	Calor de Hidratação	5
3.2	Trabalhabilidade	5
3.3	Inibição da Expansão Devida à Reação Álcali-Agregado	7
3.4	Permeabilidade	11
3.5	Propriedades Elásticas	11
3.6	Resistências Mecânicas	11
3.7	Cura Térmica	12
4	CIMENTOS POZOLÂNICOS BRASILEIROS	16
5	CONCLUSÃO	26
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

1 INTRODUÇÃO

Os cimentos com adições ativas vêm alcançando grande destaque em todo mundo em virtude das vantagens oferecidas, tais como:

- a) obtenção de cimentos com características especiais;
- b) aproveitamento de resíduos industriais; e,
- c) economia energética.

Dentre os cimentos com adições ativas, o mais antigo é o cimento pozolânico, remontando o descobrimento do material pozolana à idade da civilização romana, com o aparecimento da terra grega *Santorin* e as cinzas vulcânicas romanas de *Pozzuoli*.

A fabricação industrial de cimentos pozolânicos no Brasil iniciou-se em 1969, com um total de 42.910 t, visando o aproveitamento de cinzas volantes da termelétrica de Charqueadas no Rio Grande do Sul. Entretanto, desde 1964, as cinzas volantes foram utilizadas, esporadicamente, em substituição parcial ao cimento portland, para a produção de argamassas e concretos¹.

Nestes últimos anos, a produção brasileira de cimentos pozolânicos tem aumentado em taxas significativas, com um crescimento na produção de cerca de 97,0% de 1984 em relação a 1980, decorrente de um maior conhecimento técnico na fabricação e utilização de cimentos pozolânicos, bem como de uma maior atenção no campo de pesquisa de materiais pozolânicos brasileiros.

A Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) tem pesquisado sistematicamente o assunto desde 1970, tendo sido desenvolvido estudo sobre as cinzas volantes e argilas calcinadas, além de investigação sobre diatomitos, cinzas de palha de arroz, pó de silício e rochas vulcânicas.

2 DEFINIÇÃO E CONCEITO

2.1 Definição

O cimento portland pozolânico é definido pela norma NBR 5736, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT),

como um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer portland e pozolana, sem adição, de outra substância durante a moagem, a não ser uma ou mais formas de sulfato de cálcio. O teor de pozolana varia de 10% a 40% da massa total.

A mistura de cimento portland com pozolana deve ser feita em proporção adequada a permitir a combinação da pozolana com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do clínquer. Um excesso de pozolana no sistema leva-a a se comportar como inerte por falta de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disponível para a reação pozolânica. Por outro lado, uma deficiência de pozolana resulta em $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disponível no sistema. Portanto a qualidade de um cimento pozolânico depende da proporção ótima entre o cimento portland e a pozolana, bem como das características da pozolana.

Os cimentos pozolânicos apresentam as seguintes características fundamentais²:

- a) basicidade total mais baixa devido a menor proporção de hidróxido de cálcio disponível no cimento;
- b) resistência mecânica em geral mais alta, a idades longas comparadas com cimento portland comum;
- c) baixo calor de hidratação;
- d) aumento da resistência aos sulfatos; e,
- e) inibição da expansão por reação álcali-agregado.

A nova norma em estudo baseia-se na larga experiência brasileira adquirida nas construções de grandes obras, nas últimas duas décadas, adequando-a à realidade nacional, onde verfica-se que o cimento portland pozolânico adquire características pozolânicas com teores em torno de 15% em massa de material pozolânico.

2.2 Considerações Acerca de Cimentos Portland Comum e Pozolâ^ñnico

Os constituintes principais do clínquer de cimento portland são o silicato tricálcico (C_3S), silicato bicálcico (C_2S),

aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), responsáveis pelas propriedades dos cimentos. As diferentes proporções entre os seus constituintes são o fator responsável pela variação das características dos cimentos.

Os silicatos cárnicos (C_3S e C_2S) constituem as fases mais abundantes, perfazendo 80% a 85% da composição do clínquer. São os responsáveis pelo desenvolvimento das resistências mecânicas, principalmente às idades moderadas e longas. O conteúdo de silicatos e a proporção entre eles são controlados e planejados pelos módulos químicos durante o processo de fabricação do clínquer.

Quanto mais alto o fator de saturação em cal, maior é a proporção de C_3S e quanto mais alto o módulo de sílica, maior é a proporção de silicatos e menor o conteúdo da fase intersticial (C_3A e C_4AF). O C_3S é o principal responsável pelo desenvolvimento das altas resistências do cimento e seu alto conteúdo no cimento contribui para liberação de elevado calor durante a hidratação: 28,7 J/g (120 cal/g).

O aluminato tricálcico (C_3A) e o ferroaluminato tetracálcico (C_4AF) são os constituintes da fase intersticial do clínquer. Quando da hidratação do cimento, o C_3A reage rapidamente com a água, conferindo ao cimento a resistência inicial às solicitações mecânicas. Juntamente com o C_3S desenvolve-se um elevado calor de hidratação: 47,8 J/g (200 cal/g).

Durante a hidratação do cimento, a liberação de altas quantidades de $Ca(OH)_2$, calculando em até 25% do material endurecido, proporciona uma pasta de cimento com alta basicidade, tornando-a mais vulnerável ao ataque por águas agressivas, o que se constitui em uma característica negativa dos cimentos portland comuns. Por outro lado, estas peculiaridades protegem as armaduras do concreto do fenômeno da corrosão (passividade das armaduras).

A exigência de altas resistências mecânicas iniciais implica em um cimento com alto conteúdo de C_3A , consequentemente

dificultando o controle de pega e tornando-o mais vulnerável ao ataque de sulfatos, facilitando a formação de etringita expansiva. As normas limitam o teor de C_3A em 8% para cimentos empregados em obras marítimas.

O alto conteúdo de C_3S e C_3A nos cimentos confere um elevado calor de hidratação, o qual pode dar origem a fenômenos de fissuração por retração térmica, dada a baixa condutibilidade e capacidade de deformação do concreto, principalmente em concretos massa.

A constatação dessas características e o uso inadequado do cimento portland comum para determinadas obras podem comprometer as estabilidade e durabilidade das construções. Uma das soluções propostas para contornar os aspectos negativos do uso do cimento portland comum em determinados tipos de obras é a utilização de cimentos portland pozolânicos.

O primeiro critério em que se fundamenta a fabricação dos modernos cimentos pozolânicos é o de diminuir a quantidade de $Ca(OH)_2$ proveniente da hidratação pela fixação deste pela pozolana, formando compostos estáveis³. As diferenças na cinética das reações de hidratação do clínquer e da pozolana provocam um aumento inicial e posterior redução de $Ca(OH)_2$, conforme a relação de proporção entre os componentes e a reatividade da pozolana.

As pozolanas desenvolvem tanto melhor a sua ação e propriedades quanto maior for o fator de saturação em cal do clínquer, ou seja, quanto maior o teor de C_3S , possibilitando em tais casos, uma maior substituição do clínquer pela pozolana⁴. O processo de diluição do clínquer pela pozolana ocasiona a diminuição de C_3S , C_3A e CaO livre no cimento pozolânico, atenuando desse modo a ação de águas agressivas, os efeitos expansivos decorrentes do ataque de sulfatos e a retração e fissuração do concreto.

A substituição de parte do clínquer pela pozolana acarreta uma menor evolução das resistências mecânicas iniciais dos

cimentos pozolânicos. Entretanto, nas idades tardias (> 90 dias) as resistências mecânicas tendem, em geral, a ser superiores às dos cimentos portland comuns.

3 ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DO CIMENTO PORTLAND POZOLÂNICO

Os cimentos pozolânicos adequadamente fabricados e dosados com clíqueres e pozolanas de qualidade, podem superar os inconvenientes dos cimentos portland comuns, como também apresentar vantagens adicionais e benéficas ao concreto, que são destacadas a seguir.

3.1 Calor de Hidratação

O calor de hidratação do cimento portland assume papel preponderante quando o aglomerante é utilizado tanto em concreto massa aplicado em barragens, como em galerias, reservatórios, muros de arrimo e estruturas em geral onde possam surgir fissuras de origem térmica que comprometam a durabilidade da obra.

A utilização de cimento pozolânico é uma solução eficaz para a minimização da ocorrência de fissuras, tendo em vista seu baixo calor de hidratação, como é mostrado na seção 4.

Verifica-se, através das *Figuras 1 e 2*, a eficácia das pozolanas de argilas calcinadas e de cinzas volantes brasileiras na redução da elevação adiabática da temperatura do concreto.

3.2 Trabalhabilidade

O concreto de cimento pozolânico apresenta melhor trabalhabilidade e menor tendência de segregação.

Algumas pozolanas aumentam a quantidade de água requerida para uma mesma trabalhabilidade, sendo que esse aumento é maior para pozolanas naturais e de argilas calcinadas em relação às de cinzas volantes⁶. A menor quantidade de água requerida para a mesma trabalhabilidade utilizando cinzas volantes deve-se a um maior grau de esfericidade das partículas.

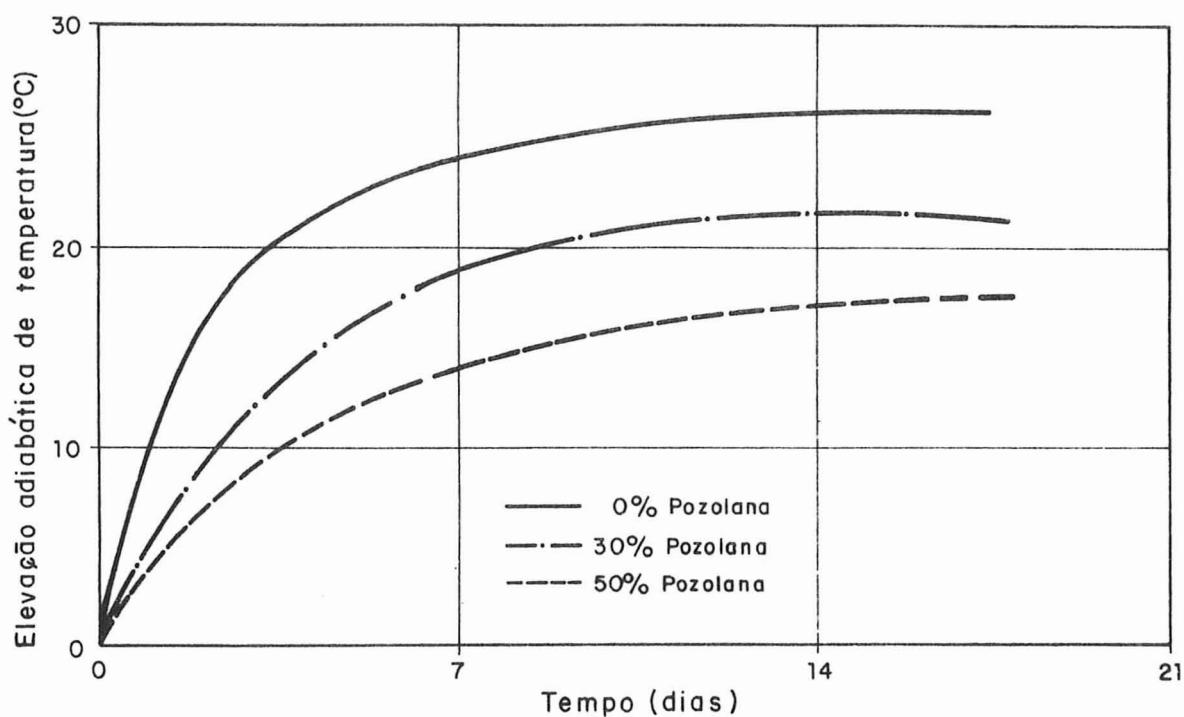


FIGURA 1 - Elevação adiabática da temperatura de concretos com diferentes teores de pozolana de argila calcinada (Jupiá) em substituição a igual volume de cimento (Paulon & Kuperman)

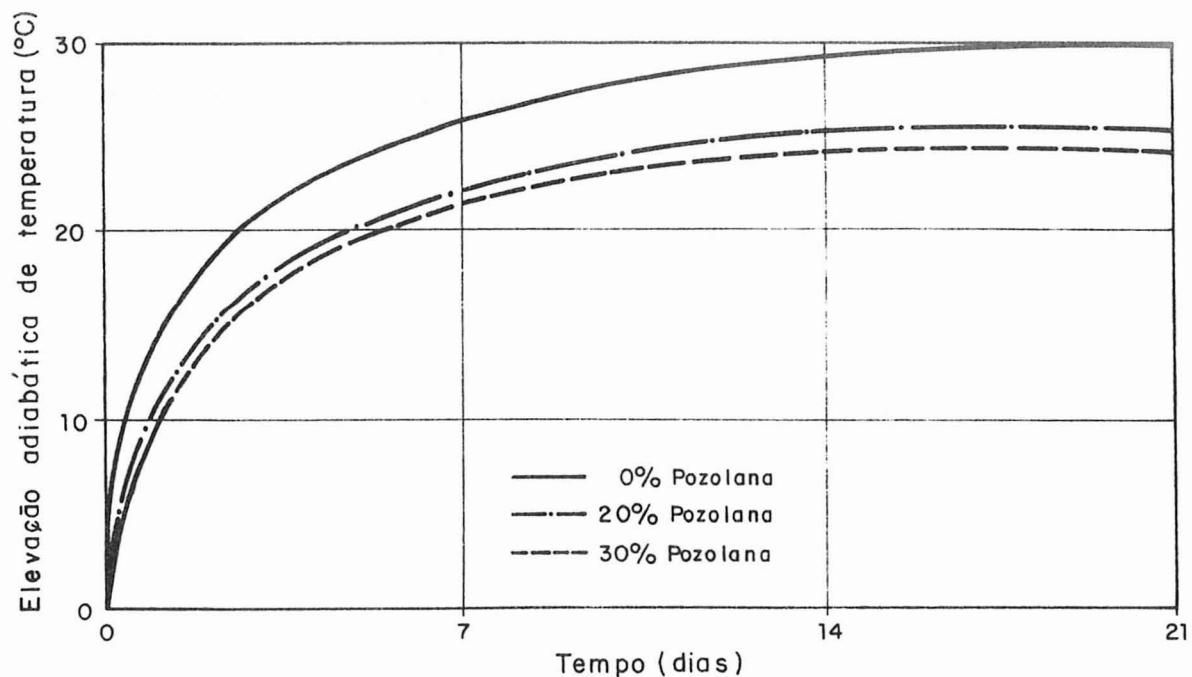


FIGURA 2 - Elevação adiabática da temperatura de concretos com diferentes teores de pozolanas de cinzas volantes (Tubarão) em substituição a igual volume de cimento

A exsudação dos concretos é sensivelmente minimizada com a utilização de cimento pozolânico⁶, como mostra a *Figura 3*. Este bom desempenho deve-se à finura das pozolanas, que acarreta um aumento da superfície específica.

3.3 Inibição da Expansão Devida à Reação Álcali-Agregado

A reação álcali-agregado, que consiste numa reação entre álcalis liberados pelos cimentos e alguns componentes deletérios dos agregados em presença de água, provoca expansão e fissuras no concreto.

A adição de materiais pozolânicos (em geral entre 15% e 25%, em volume) ao cimento inibe a expansão por reação álcali-agregado, tendo em vista que a sílica dos materiais pozolânicos reage com os álcalis do cimento, minimizando o efeito da reação.

Estudos realizados por *SAAD et alii*⁷ mostram o comportamento da pozolana de argila calcinada na redução da expansão devida à reação álcali-sílica. Nesse trabalho utilizou-se cimento com teores de álcalis variáveis e vidro *pirex* (altamente reativo) como agregado, conforme prescrição da norma C-441 da *American Society for Testing and Materials (ASTM)*. Observa-se na *Figura 4* a eficácia da pozolana com teores acima de 15% em volume sólido, verificando-se sensível minimização da expansão, mesmo para cimentos com alto teor de álcalis.

Por outro lado, observa-se na *Figura 5*⁸ que a pozolana de argila calcinada utilizada no estudo apresenta melhor desempenho quanto à inibição da expansão resultante da reação álcali-agregado do que a de cinzas volantes. É importante notar que a eficácia das pozolanas (cinza volante e argila calcinada) é verificada com teores acima de 12% de adição em volume.

Ressalta-se que o teor de adição de material pozolânico para a minimização da reação álcali-agregado é variável e está em função do tipo e finura da pozolana, bem como das características físicas-químicas do concreto.

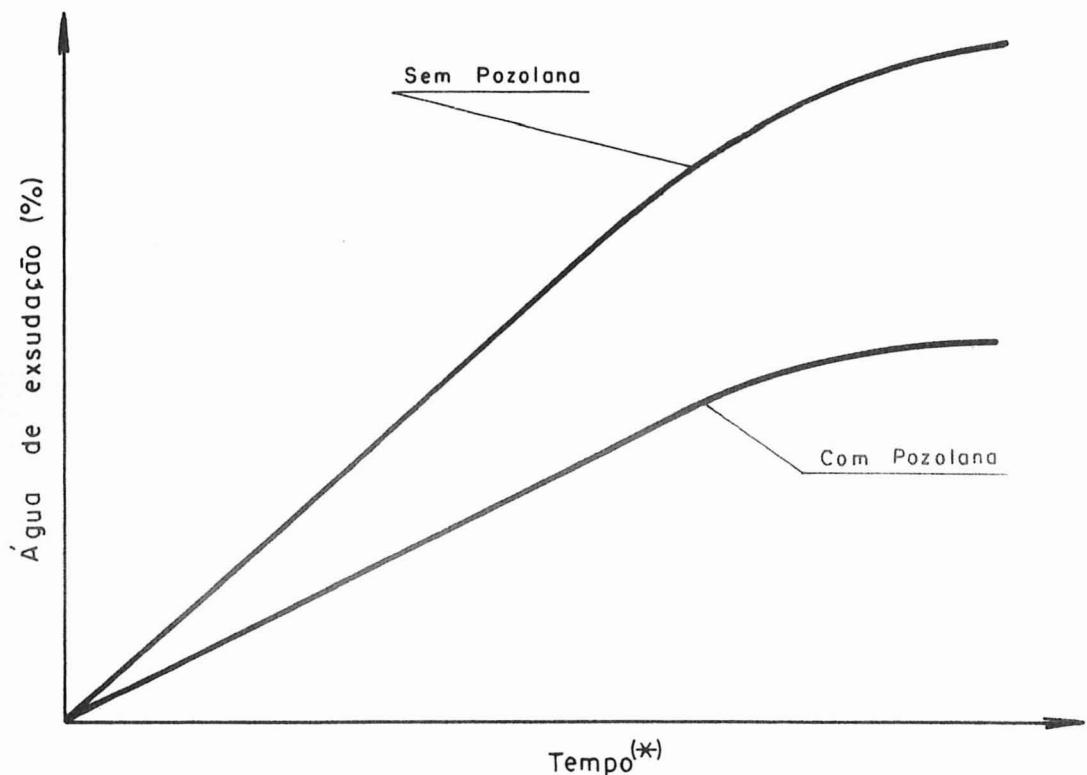


FIGURA 3 - Efeito do uso do material pozolânico na água de exsudação do concreto (Scandiuzzi & Andriolo)

Observação: * Contado até o final de pega

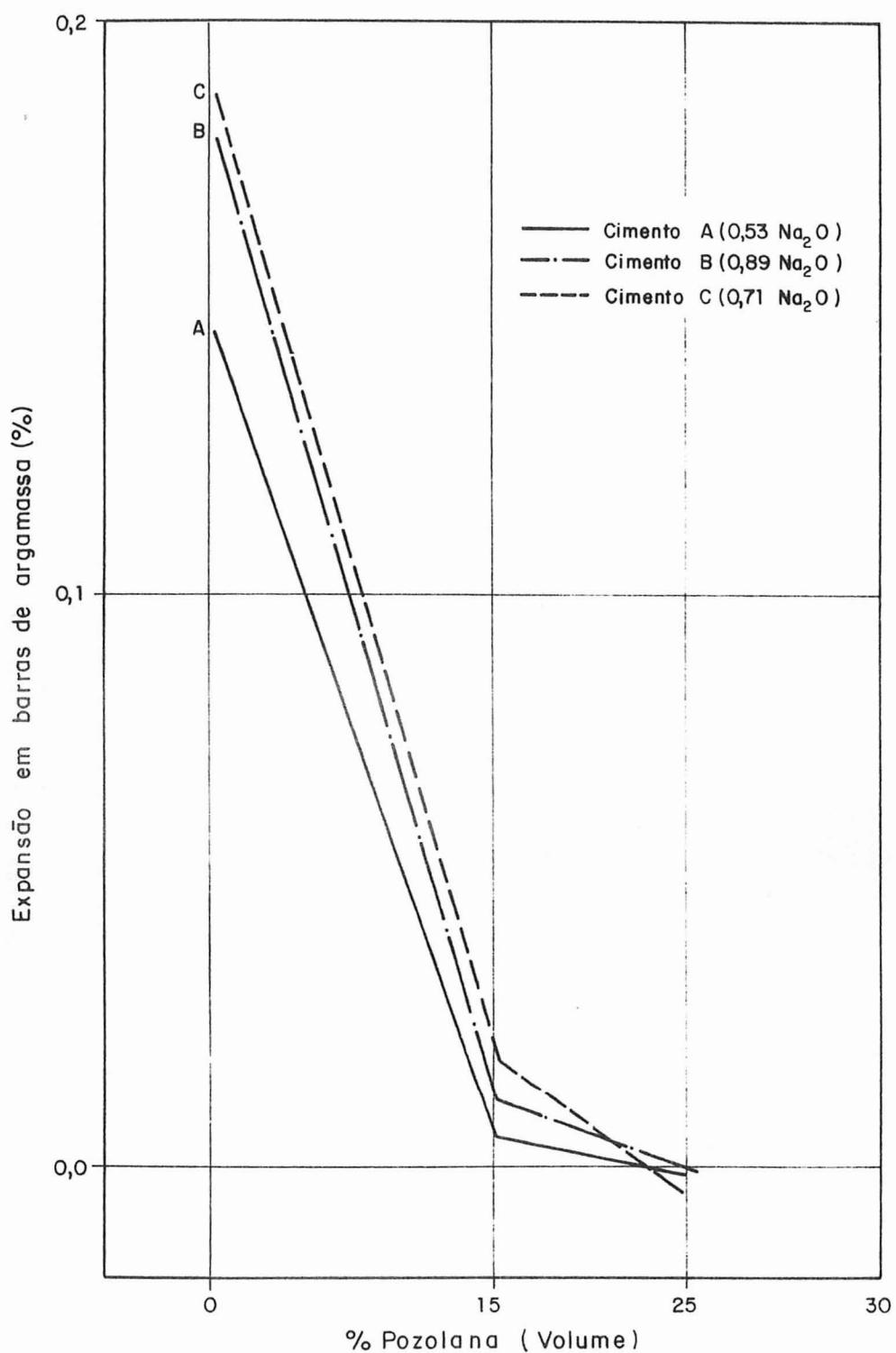


FIGURA 4 - Eficácia da pozolana de argila calcinada na redução da expansão de argamassa com vidro pirex

(SAAD et alli)

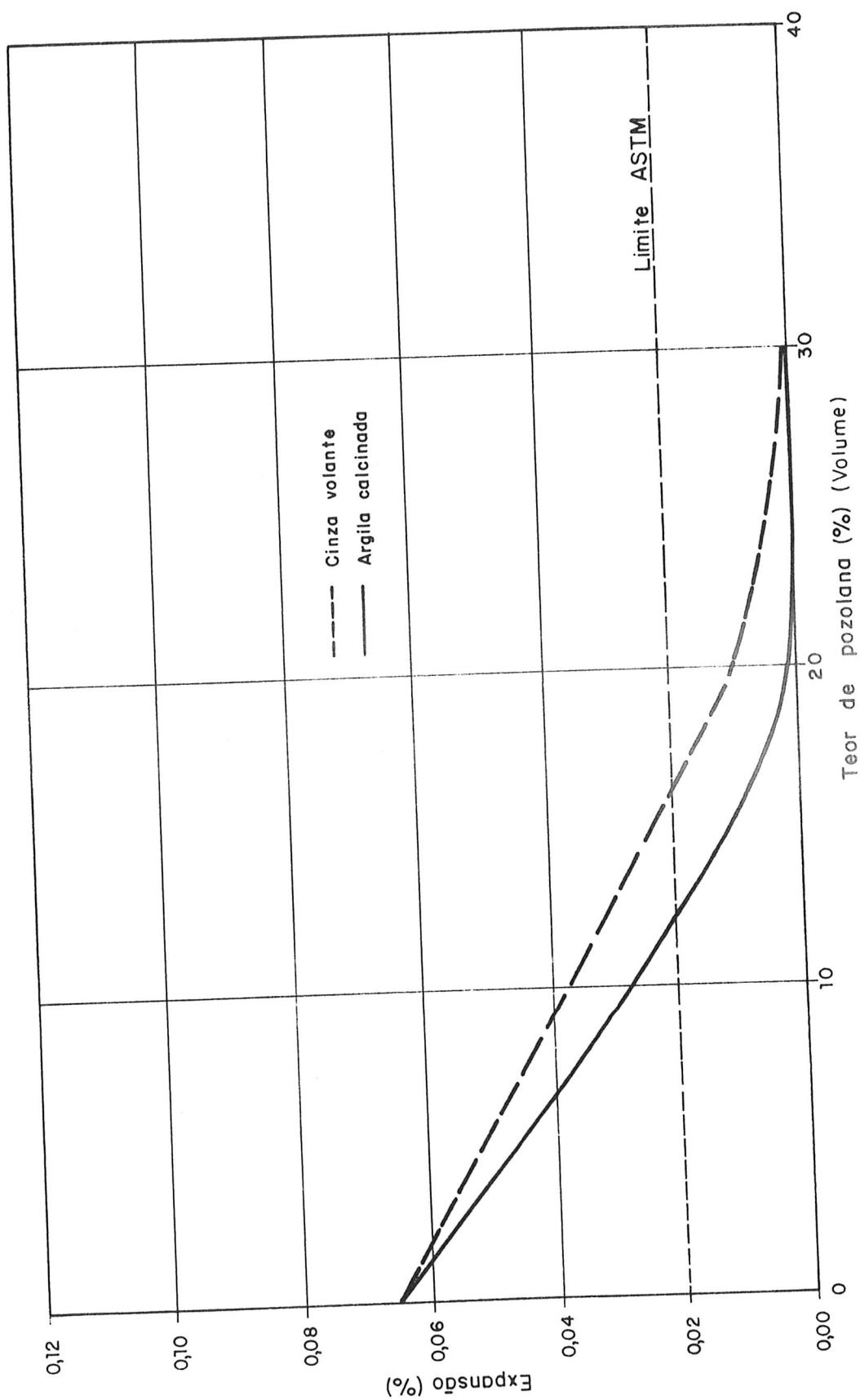


FIGURA 5 - Eficácia das pozolanas (argila calcinada e cinza volante) na redução da expansão da argamassa com vidro pirex.
(SAAD et alii) (8)

3.4 Permeabilidade

Nos concretos com cimento portland comum a colmatação⁹ dos poros capilares, isto é, o preenchimento dos vazios dos poros da pasta de cimento necessita de muito mais tempo que nos concretos com cimento portland pozolânico⁹. No caso do concreto com cimento pozolânico, essa colmatação deve-se ao gel com propriedades cimentícias, formado da reação do material pozolânico com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do clínquer. Em concretos com cimentos pozolânicos, a transformação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ instável em produto estável evita o aumento da permeabilidade pela dissolução do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pela água, e conseqüente aumento da quantidade de poros da massa.

3.5 Propriedades Elásticas

Uma vantagem bastante significativa do cimento pozolânico em relação ao cimento comum refere-se às propriedades elásticas.

O cimento pozolânico apresenta um tempo de hidratação mais prolongado que o cimento portland comum, passando portanto do estado plástico para o estado elástico de maneira mais lenta. O aumento gradativo da coesão e da resistência com a idade favorece o aumento do módulo de elasticidade¹⁰.

Este fator torna-se importante quando se requer concretos não só resistentes, mas capazes de se manter sem apresentar fissuras durante modificações bruscas de tensões provocadas por ciclos de retração-expansão nas idades de até 28 dias. Estas mudanças são decorrentes de variações de umidade por ações térmicas, condições especiais hidrométricas externas e as próprias ações térmicas.

3.6 Resistências Mecânicas

A resistência à compressão do cimento pozolânico nas primeiras idades é menor que a de um cimento portland comum de

um mesmo clínquer, visto que a pozolana nas primeiras idades comporta-se como inerte. Às idades acima de 90 dias a resistência do cimento pozolânico ultrapassa, em geral, a do portland comum, como mostra o gráfico da *Figura 6*.

É evidente que o desenvolvimento das resistências mecânicas depende também da finura do cimento, da qualidade da pozolana e da composição potencial do clínquer.

3.7 Cura Térmica

O tratamento a vapor consiste na cura acelerada do concreto utilizando vapor de água, a uma dada pressão e temperatura, visando o desenvolvimento acelerado das resistências mecânicas.

A cura acelerada torna-se imperiosa, principalmente, nas indústrias de peças pré-fabricadas de concreto, em geral, visando uma maior produtividade.

Um tratamento térmico apresenta geralmente quatro fases sucessivas, correspondentes ao ciclo térmico mostrado na *Figura 7*.

A resistência do concreto em cura a vapor é função do fator de maturidade, que consiste no somatório dos produtos dos intervalos de tempo pelas temperaturas correspondentes.

Existe um tempo de duração ótimo do ciclo de cura térmica, com temperaturas variáveis e adequadas para cada caso. Estes tempos são definidos em função de vários fatores; dentre eles destacam-se:

- a) a forma e tamanho da peça;
- b) o consumo de cimento; e,
- c) os tipos e composição do cimento.

O período isotérmico (T_i) depende do tipo de cimento. A *Figura 8* mostra que o cimento pozolânico apresenta melhor

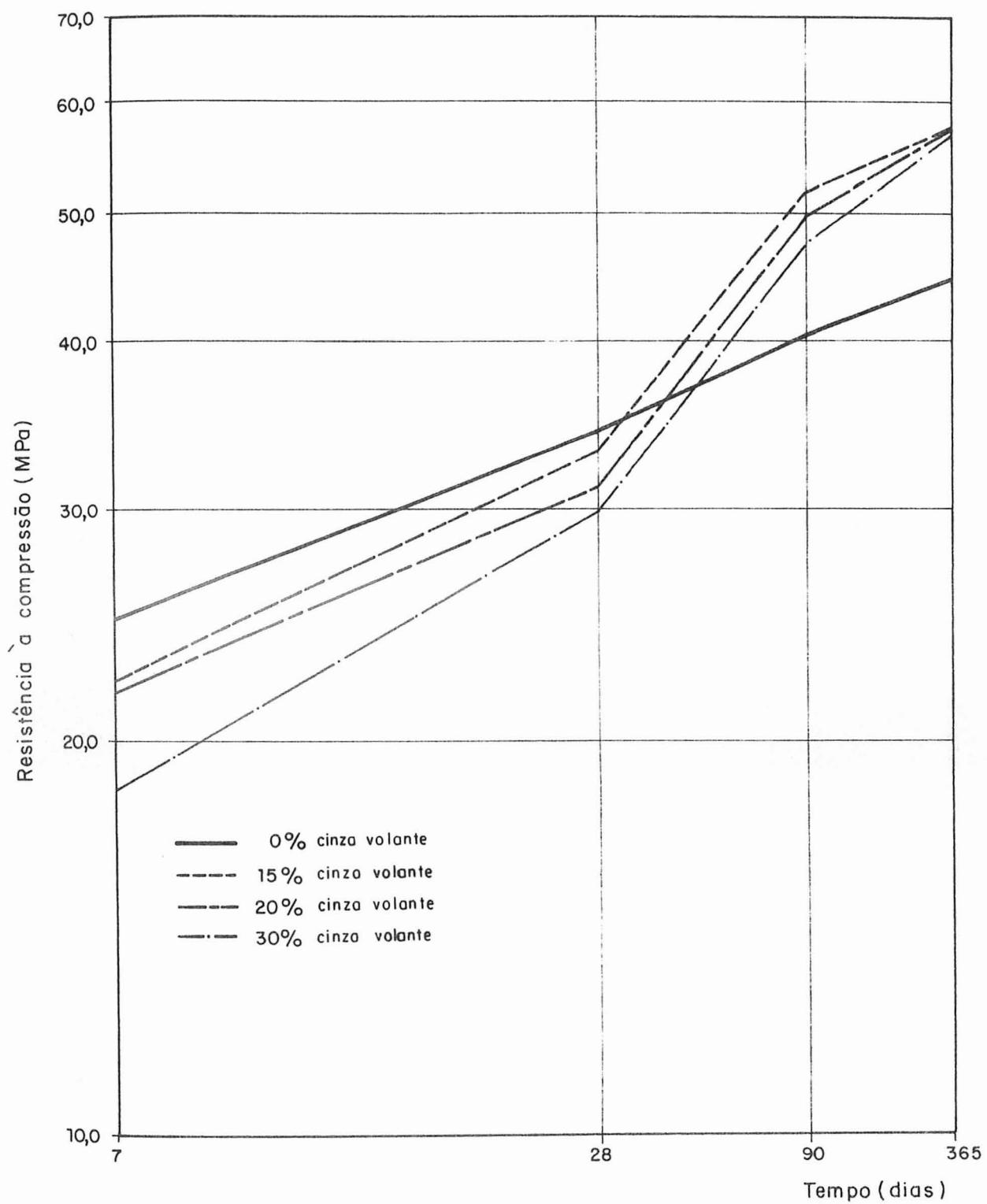


FIGURA 6 -Resistência à compressão X tempo de cimentos com diferentes teores de pozolana e cinza volante

T_0 = Tempo inicial de cura (h) a temperatura θ_0
 T_e = Tempo de elevação da temperatura (h) (a gradiente térmico G_e em $^{\circ}\text{C}/\text{h}$)
 T_i = Tempo de manutenção da temperatura máxima (regime isotérmico à temperatura θ_i)
 T_r = Tempo de resfriamento (h) (a gradiente térmico G_r em $^{\circ}\text{C}/\text{h}$)

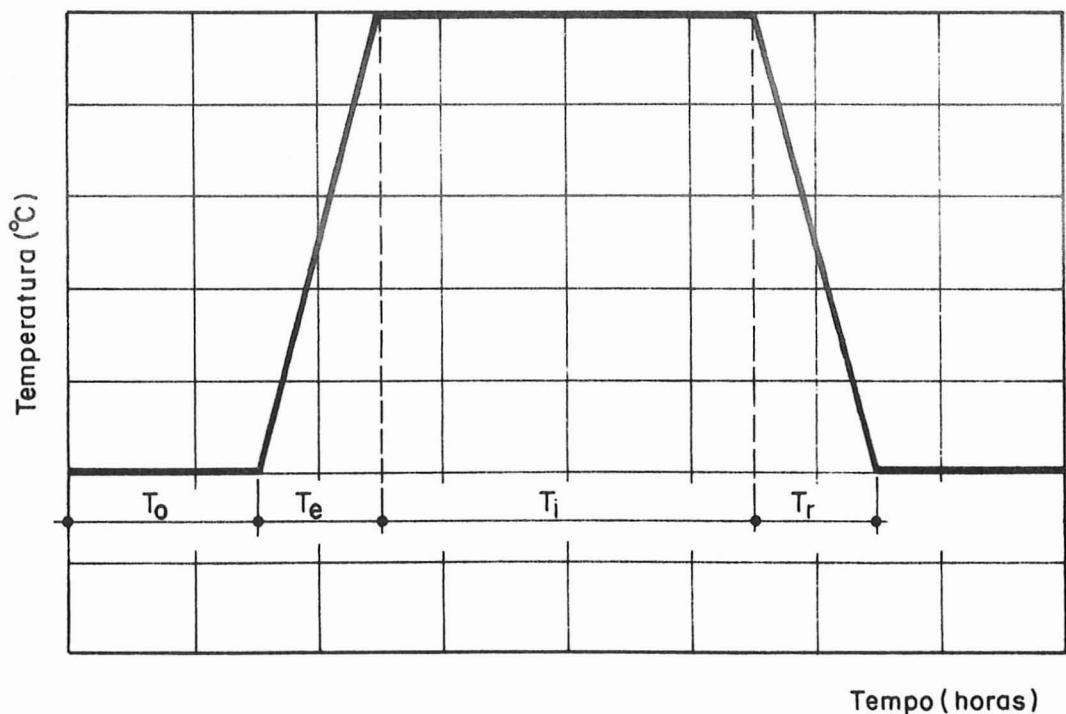


FIGURA 7 - Ciclo térmico

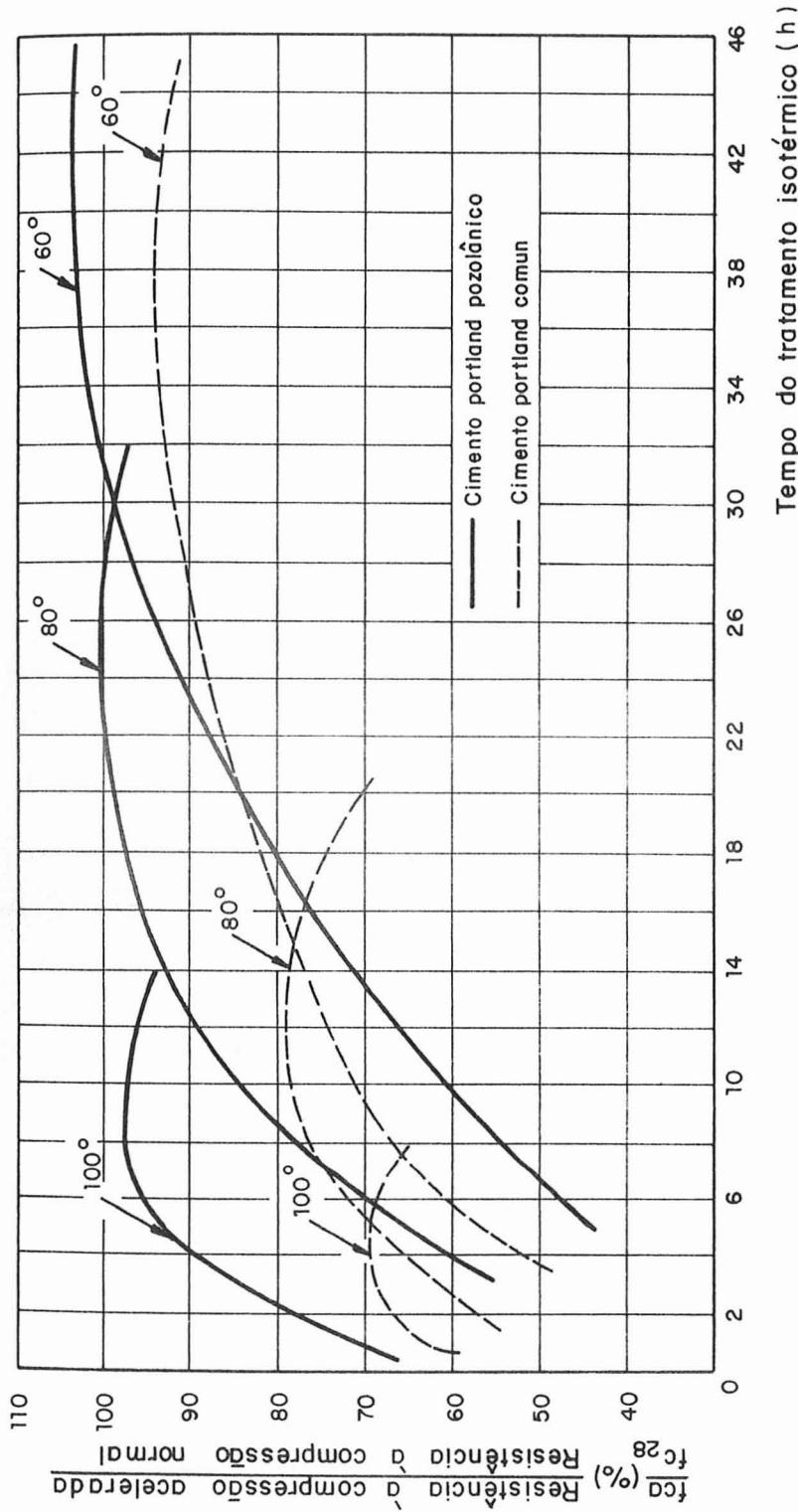


FIGURA 8 - Comportamento mecânico do cimento tratado em vapor puro

(PAPADAKIS MICHEL)

performance que o portland comum em cura térmica¹¹. Nesse estudo correlacionou-se o fator resistência acelerada com o fator resistência em cura normal aos 28 dias (fc_a/fc_{28}), em função do tempo de duração do tratamento isotérmico.

Verifica-se que:

- a) o cimento pozolânico apresenta níveis de resistência melhores que os do portland comum para todas as temperaturas (60°C , 80°C e 100°C);
- b) para períodos curtos de tratamento, de temperatura elevada (100°C), a diferença é sensível, sendo que o portland comum atinge 70% da resistência normal aos 28 dias, contra cerca de 98% do pozolânico; e,
- c) para períodos mais longos e temperaturas menores (60°C) a resistência à compressão do cimento pozolânico, obtida através de cura a vapor, é maior que a obtida por cura normal aos 28 dias.

Para uma mesma maturidade, o desempenho do cimento pozolânico é superior ao do portland comum, como mostra a Figura 9, que apresenta curvas de resistência à compressão relativa (fc_a/fc_{28}), em função de maturidade, calculadas unicamente para o período de temperatura máxima.

4 CIMENTOS POZOLÂNICOS BRASILEIROS

Os cimentos pozolânicos, de acordo com a especificação brasileira NBR 5736, admitem de 10% a 40% de adição de pozolanas nos de classe 25 e de 10% a 30% nos de classe 32.

Atualmente, são quatorze as unidades produtoras regulares de cimentos portland pozolânicos brasileiros e duas com produção intermitente (Quadro 1), todos de classe 32, contendo pozolanas de naturezas distintas, segundo a disponibilidade regional.

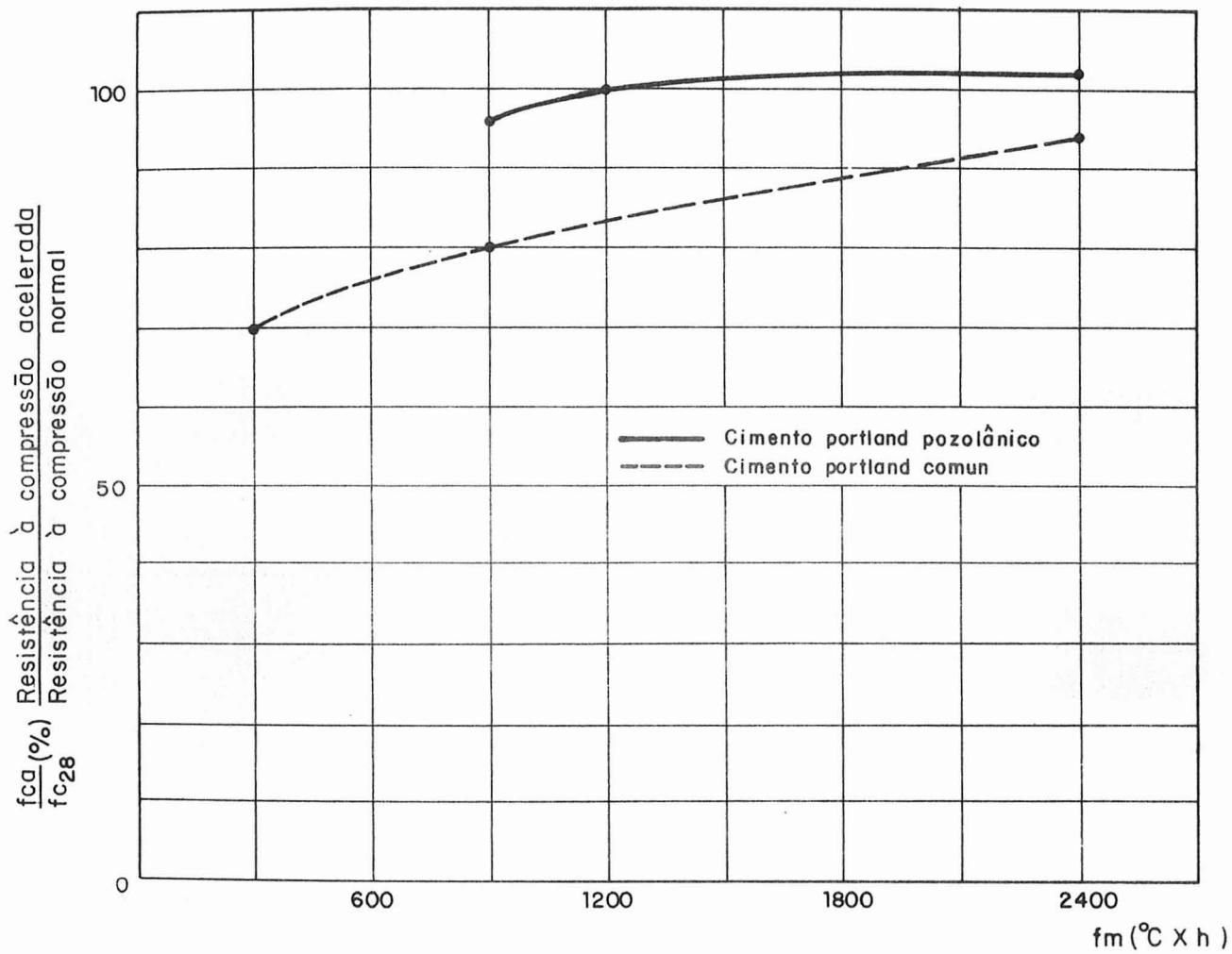


FIGURA 9 - Comportamento mecânico dos cimentos POZ e CPC
tratados em vapor puro para mesma maturidade
(PAPADAKIS MICHEL)

QUADRO 1 - Unidades produtoras de cimentos pozolânicos

Fábrica	UF	Natureza da pozolana presente	Classificação*
1	MA	Rocha vulcânica	N
2	RN	Rocha vulcânica e diatomito	N
3	CE	Rocha vulcânica	N
4	PB	Argila calcinada	N
5	PE	Rocha vulcânica	N
6	PE	Argila calcinada	N
7	SP	Cinza volante	C
8	PR	Cinza volante e outras cinzas	C e E
9	PR	Argila calcinada diatomítica e outras cinzas	N e E
10	PR	Cinza volante e outras cinzas	C e E
11	SC	Cinza volante	C
12	RS	Cinza volante e outras cinzas	C e E
13	RS	Cinza volante e outras cinzas	C e E
14	RS	Cinza volante e outras cinzas	C e E

(*) Especificação de materiais pozolânicos —CE 18:1.13/ABNT (em estudo).

Classe N: pozolanas naturais (certos materiais vulcânicos ácidos, *cherts* silicosos, terras diatomáceas) e argilas calcinadas.

Classe C: cinzas volantes.

Classe E: pozolanas que não preenchem os requisitos das classes anteriores.

Nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, sete unidades produzem cimento pozolânico, enquanto que seis localizam-se na Região Nordeste. O Quadro 2 apresenta a participação de cada região na produção dos cimentos portland comum e pozolânico, em 1984.

QUADRO 2 - Distribuição da produção de cimentos portland comum e pozolânico em 1984

Região	Cimento portland (%)	
	Comum	Pozolânico
Nordeste	64	36
Sul e Sudeste	28	72

Verifica-se acréscimo acentuado da produção de cimento portland pozolânico, a partir de 1979, tendo praticamente duplicado a produção de 1984, em relação a 1980, como mostra a *Figura 10*, onde se observa a evolução da produção de cimento portland pozolânico em relação ao total de cimentos produzidos no Brasil desde 1969.

A composição química de um cimento pozolânico é fortemente influenciada pelas composição química e proporção da pozolana adicionada ao cimento. As pozolanas, sendo materiais sílico-aluminosos ou silicosos (diatomitas), influem no aumento da proporção de SiO_2 e Al_2O_3 e na diminuição da maior parte de outros óxidos, conforme o teor de adição. O resíduo insolúvel dos cimentos pozolânicos indica indiretamente a proporção de pozolana adicionada, pois esta é pouco atacada pela solução ácida utilizada na dissolução do cimento. O *Quadro 3* apresenta a composição média de alguns cimentos pozolânicos brasileiros, constituídos de pozolanas de naturezas distintas.

QUADRO 3 – Composição química média de alguns cimentos pozolânicos brasileiros produzidos em 1983

Fábrica	n	Perda ao fogo (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	R.I.* (%)
A	12	2,03	30,10	6,98	2,87	49,87	2,39	2,10	0,53	1,82	19,49
B	12	1,08	31,13	7,75	3,55	50,42	3,63	1,53	0,04	0,62	18,68
C	12	2,91	30,57	9,76	2,87	49,00	1,36	2,13	0,07	0,93	21,52
D	12	2,40	29,85	8,19	4,32	48,37	4,11	1,27	0,21	0,76	20,27
E	12	4,06	23,56	7,71	3,79	52,93	4,37	2,10	0,11	0,98	12,21

(*) Resíduo insolúvel.

Legenda:

Fábrica A: pozolana natural (rocha vulcânica).

Fábrica B: pozolana artificial (argila calcinada).

Fábrica C: pozolana artificial (argila diatomítica calcinada e cinza volante).

Fábrica D: pozolana artificial (cinza volante do Rio Grande do Sul).

Fábrica E: pozolana artificial (cinza volante de Santa Catarina).

(n) número de determinações

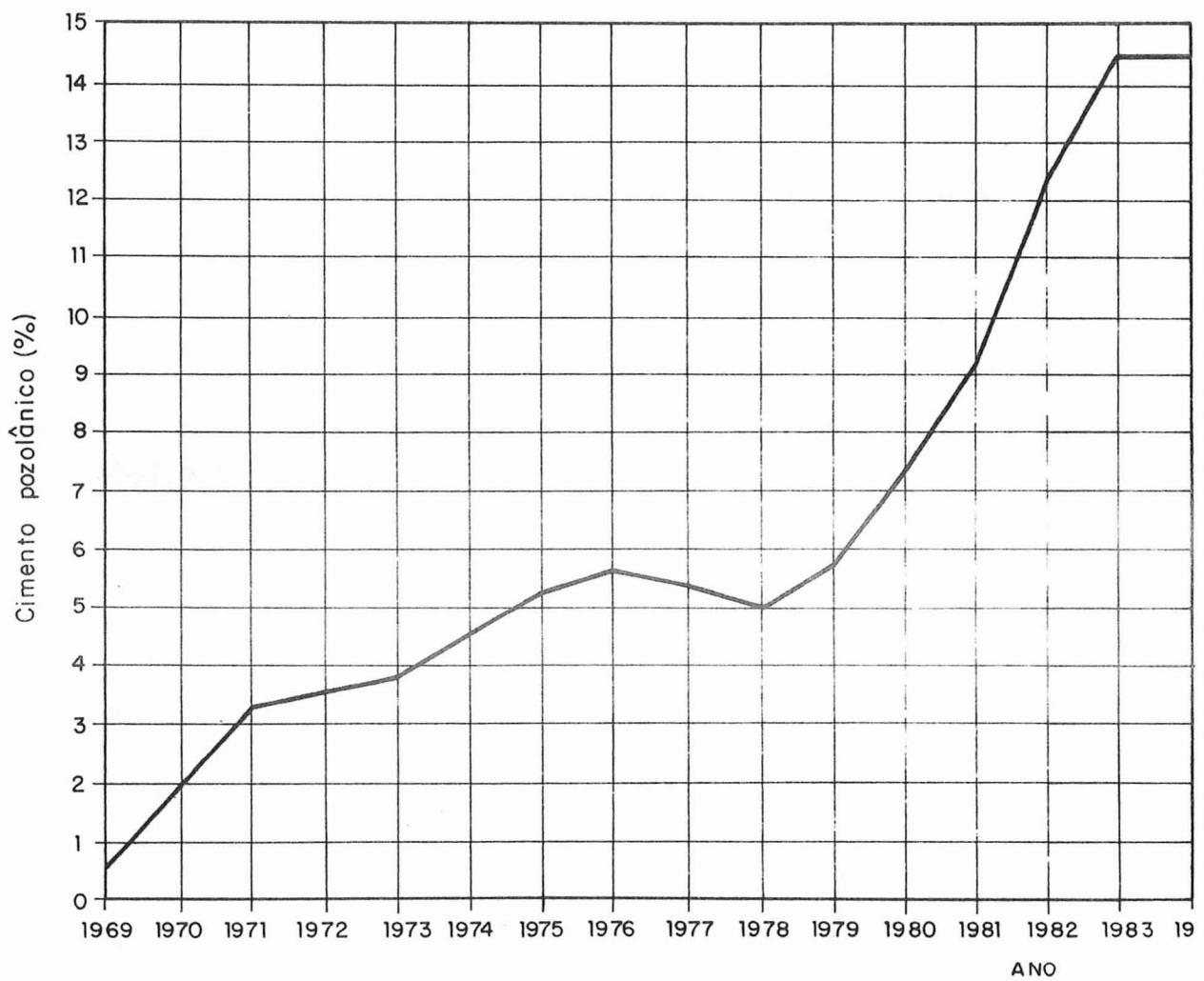


FIGURA 10 - Evolução do consumo de cimento portland pozolânicos em relação à produção total de cimento no Brasil

Os cimentos pozolânicos apresentam composições químicas distintas quando comparados com os outros tipos de cimento; apresentam alto resíduo insolúvel e são menos cálcicos e mais sílico-aluminosos. Entretanto, a composição química dos diferentes tipos de cimentos pozolânicos, para os principais óxidos, apresenta características similares. A composição química média dos cimentos pozolânicos brasileiros, produzidos em 1983, é apresentada no Quadro 4.

QUADRO 4 - Composição química média de cimentos pozolânicos brasileiros

Parâmetros estatísticos	Perda ao fogo (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	R.I.* (%)
n	138	138	138	138	138	138	138	137	137	138
\bar{x}	2,60	28,30	8,73	3,71	49,74	3,19	2,00	0,27	0,95	18,70
s	0,97	3,33	1,36	0,62	6,06	1,33	0,87	0,38	0,45	6,96
v	37,3	11,8	15,6	16,6	12,2	41,6	43,5	137,2	46,8	37,2
Limite da NBR 5736	4	-	-	-	-	6	4	-	-	-

(*) Resíduo insolúvel.

Os resultados químicos dos cimentos pozolânicos brasileiros atendem às exigências da norma de cimento pozolânico.

De um modo geral, pode-se afirmar que o aumento da atividade pozolânica, representado por um aumento das resistências mecânicas, nas idades mais curtas é de natureza física, relacionada com a finura da pozolana, e nas idades mais longas é de natureza química, onde predomina a influência da constituição e composição da pozolana. A qualidade e o teor de pozolana adicionado constituem também parâmetros importantes no desenvolvimento das resistências mecânicas.

Resultados de ensaios físico-mecânicos de alguns cimentos pozolânicos brasileiros com constituição pozolânica distinta

(predominantemente por rochas vulcânicas ou argilas calcinadas e/ou cinzas volantes) são apresentados no Quadro 5.

QUADRO 5 - Ensaios físico-mecânicos de alguns cimentos pozolânicos produzidos em 1983

Fábrica	n	Resíduo na peneira 200 (%)	Superfície específica Blaine (cm ² /g)	Massa específica (g/cm ³)	Resistência à compressão nas idades (MPa)		
					3 dias	7 dias	28 dias
A	12	4,5	4320	2,98	16,9	25,4	37,0
B	12	3,0	4100	3,08	15,3	23,0	35,4
C	12	2,6	4880	2,97	19,9	27,1	38,4
D	12	1,0	4200	2,95	15,6	24,3	36,6
E	12	0,8	4400	3,01	24,1	30,4	39,8

Os cimentos pozolânicos apresentam massa específica mais baixa que os cimentos portland comuns em função da quantidade de adição da pozolana. De um modo geral, as resistências às primeiras idades são menores e estão relacionadas, principalmente, ao teor de pozolana.

A natureza das pozolanas brasileiras não influi sensivelmente na evolução da resistência mecânica dos cimentos pozolânicos, às idades mais curtas. A finura, o teor de adição e a qualidade dos clíqueres são os fatores de maior influência nas idades iniciais.

QUADRO 6 - Características físico-mecânicas médias dos cimentos pozolânicos brasileiros

Parâmetros estatísticos	Resíduo na peneira 200 (%)	Superfície específica Blaine (cm ² /g)	Massa específica (g/cm ³)	Resistência à compressão nas idades (MPa)		
				3 dias	7 dias	28 dias
n	138	138	138	138	138	138
\bar{x}	3,0	4390	2,98	17,9	25,4	37,6
s	2,0	399	0,06	4,1	3,8	2,9
v	65,6	9,1	2,1	22,7	14,8	7,6
Limite da NBR 5736	≤ 12	≥ 2900	-	$\geq 10,0$	$\geq 18,0$	$\geq 32,0$

O estudo comparativo da evolução das resistências mecânicas, desenvolvido na ABCP (*Figura 11*) para todos os tipos de cimento portland produzidos em 1983, evidencia que:

- a) os cimentos portland de alto-forno (AF) são os que apresentam as maiores resistências aos 28 dias, indicando a reatividade e a influência benéfica das escórias siderúrgicas na evolução das resistências mecânicas do cimento; devido à menor proporção de C₃A no cimento, as resistências às primeiras idades são menores que nos CPC e POZ;
- b) os cimentos portland comuns (CPC) apresentam melhor evolução mecânica que os cimentos pozolânicos às idades iniciais (3 dias e 7 dias), sendo praticamente similares aos 28 dias e superados, às idades mais longas, pelos AF e POZ; e,
- c) os cimentos portland pozolânicos (POZ) apresentam resistências menores, às idades iniciais, que os cimentos portland comuns, devido ao efeito da substituição do clínquer pela pozolana. Às idades longas (> 90 dias), devido à atuação lenta da reação pozolânica, as resistências mecânicas tendem a crescer, superando as resistências dos CPC.

A *Figura 12* apresenta as curvas de desenvolvimento do calor de hidratação de onze amostras de cimento portland pozolânico produzido no Brasil, em 1984, em função da idade. O procedimento adotado foi o da garrafa térmica de *Langavant*.

Constata-se que, em média, os cimentos pozolânicos apresentam calores de hidratação de cerca de 279 J/g (66,6 cal/g) e 289 J/g (69 cal/g) para as idades de 3 dias e 7 dias, respectivamente.

A variação que se apresenta nos valores do calor de hidratação é decorrente dos seguintes parâmetros:

- a) Teor de pozolana

Pode-se afirmar que quanto maior o teor de pozolana, menor é o calor de hidratação desenvolvido.

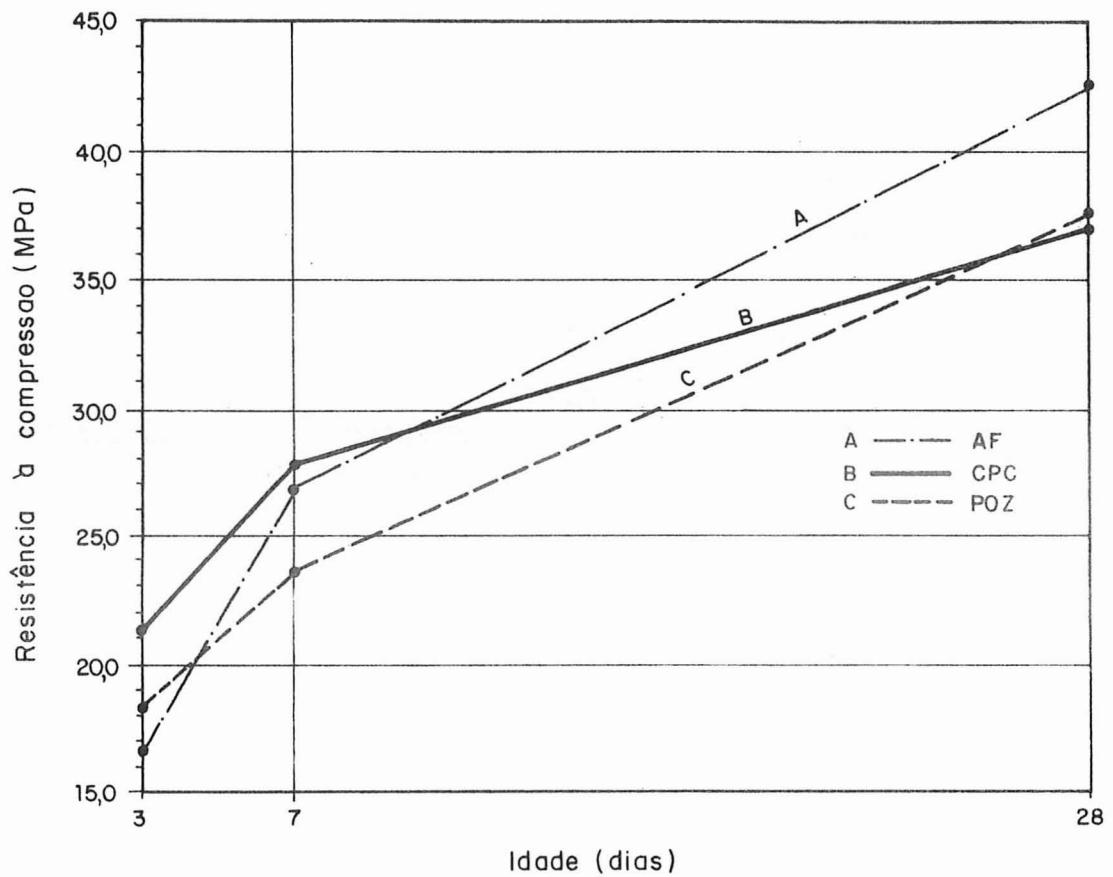


FIGURA 11 - Evolução das resistências mecânicas dos cimentos brasileiros (CPC, POZ e AF) no ano de 1983, obtidas através dos mapas de auto-controle de qualidade

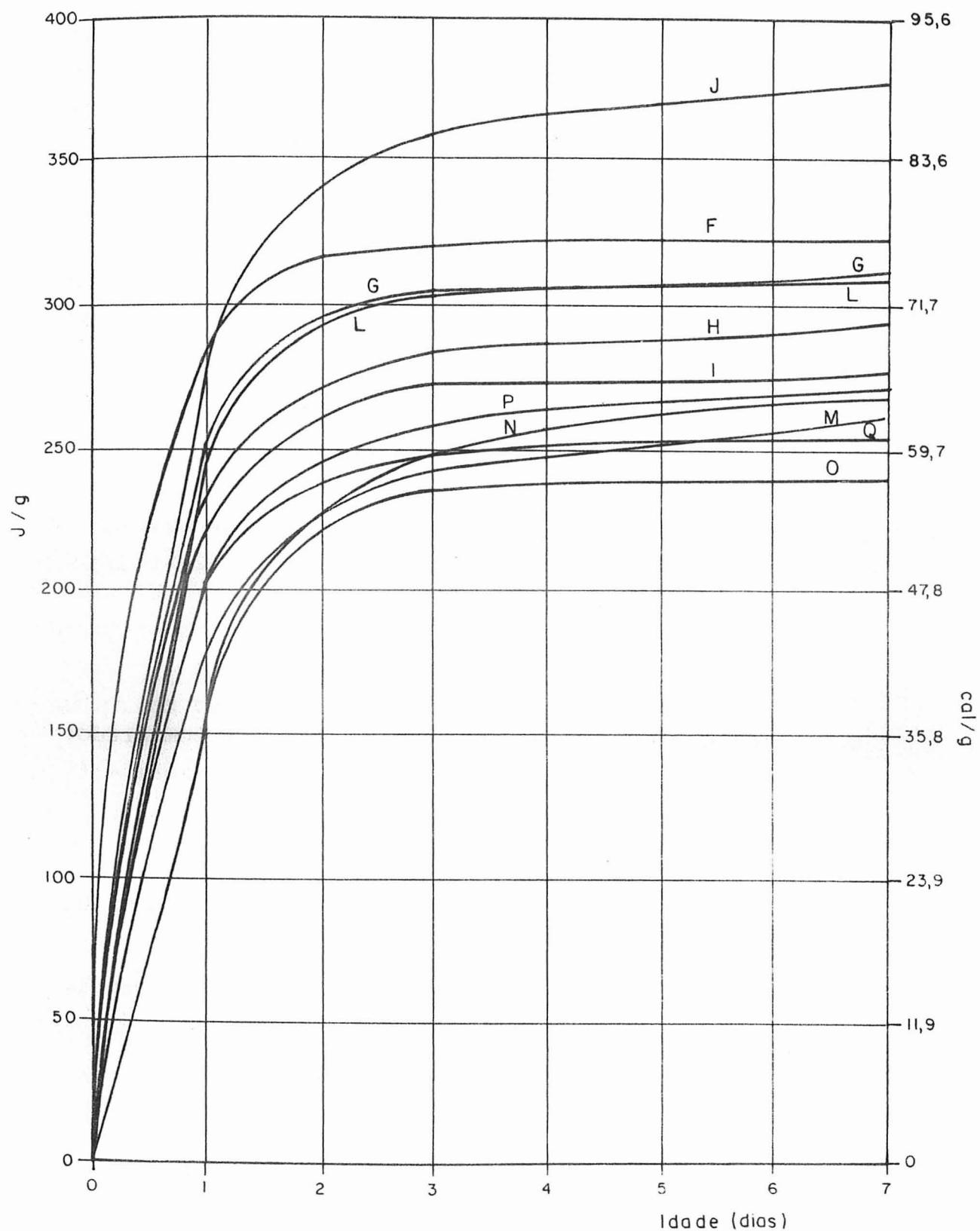


FIGURA 12- Calor de hidratação dos cimentos portland pozolânico brasileiros (método de Langavant)

b) Natureza da pozolana

Os resultados preliminares indicam que os cimentos pozolânicos de argilas calcinadas tendem a apresentar calores de hidratação maiores que os dos cimentos com outras pozolanas, provavelmente devido à maior finura e reatividade.

c) Finura

O aumento da superfície específica confere maior reatividade e hidraulicidade ao clínquer e às pozolanas e, como consequência, libera maior calor de hidratação.

d) Qualidade do clínquer

Clínqueres com teores mais elevados de C_3S não decomposto e C_3A cristalizado tendem a apresentar maior calor de hidratação, tendo em vista que os C_3S e C_3A desenvolve 28,7 J/g (120 cal/g) e 47,8 J/g (200 cal/g), respectivamente.

5 CONCLUSÃO

Os cimentos pozolânicos apresentam, quando comparados com os cimentos portland comuns, características químicas e físicas-químicas distintas, ou sejam:

- a) são menos cálcicos e mais sílico-aluminosos;
- b) apresentam alto resíduo insolúvel (> 10%), massa específica mais baixa e finuras mais altas;
- c) o baixo calor de hidratação, minimiza a ocorrência de fissuras, principalmente no concreto massa;
- d) as resistências são menores às idades iniciais, mas são maiores às idades mais elevadas; e,
- e) nos concretos, minimizam a expansão devida à reação álcali-agregado.

As características químicas e físicas-mecânicas dos cimentos nacionais atendem às exigências da norma brasileira para cimento pozolânico (NBR 5736), cabendo a ressalva de que

esta não exige a comprovação de algumas propriedades que são características dos cimentos pozolânicos, como seja, por exemplo, a minimização da expansão devida à reação álcali-agregado.

Nas regiões Sul e Sudeste, sete unidades produtoras de cimento pozolânico responderam por 72% da produção brasileira deste tipo de cimento no ano de 1984. Nessas regiões, as cinzas volantes constituem o principal tipo de pozolana adicionado ao cimento. Na região Nordeste, seis fábricas foram responsáveis no mesmo ano por 28% da produção nacional, adicionando argilas calcinadas e rochas vulcânicas como pozolana. Em caráter restrito, foi constatada a presença de diatomito associado a algumas dessas pozolanas utilizadas.

O cimento pozolânico, além de contribuir para a redução do consumo energético de fabricação, apresenta propriedades que trazem benefícios ao concreto. Caracterizam-se por apresentar menor calor de hidratação, maior resistência aos agentes agressivos, inibição da reação álcali-agregado, maior trabalhabilidade etc. Sua utilização não requer nenhum tratamento especial, mas simplesmente o adequado conhecimento de seu comportamento, em relação ao qual se recomenda:

- a) ter em conta que o cimento pozolânico requer mais água de amassamento que o cimento portland comum, para uma mesma consistência;
- b) estudar cuidadosamente o emprego de aditivos tendo em vista que a pozolana se comporta como um aditivo físico, tornando o cimento pozolânico mais sensível que o portland comum, no tocante, principalmente, às propriedades reológicas;
- c) não esperar, em tratamento de cura normal, resistências altas nas primeiras idades, pois não são características desse cimento; e,
- d) nos casos em que se emprega cimento pozolânico com a finalidade principal de minimizar a expansão devida à reação álcali-agregado, assegurar a sua completa atuação.

Referências Bibliográficas

- 1 - GOBETTI, Alfieri F. & SCARRONE, Arnaldo. *Características da cinza de carvão da termoelétrica de Charqueadas e sua influência no comportamento do cimento portland.* Porto Alegre, Instituto Tecnológico do Rio Grande do Sul, 1969. (Bol. n.49).
- 2 - MASSAZZA, Franco. *Chimica delle aggiunte pozzolaniche e dei cementi di miscela.* *Il Cemento*, Roma, (1): 3-38, Gen./Mar. 1976.
- 3 - SORIA SANTAMARIA, Francisco. *Panorama de los cementos puzolanicos en el futuro.* Madrid, Instituto Eduardo Torroja, 1969. (Monografia n.270).
- 4 - CALLEJA CARRETE, Jose. *Cementos puzolánicos. Materiales de Construcción.* Madrid, (165): 23-36, ene./mar. 1977.
- 5 - PAULON, Vladimir A. & KUPERMAN, Selmo C. *Principais fatores que influenciam as tensões de origem térmica.* In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON). *Colóquio sobre concreto massa*, São Paulo, 6 a 10 de julho de 1981.
- 6 - SCANDIUZZI, Luércio & ANDRIOLI, Francisco R. *Materiais pozolânicos: utilização e benefícios.* In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON). *Colóquio sobre concreto massa*, São Paulo, 6 a 10 de julho de 1981.
- 7 - SAAD, Miguel N. A. & ANDRADE, Walton Pacelli de & PAULON, Vladimir A. *Propriedade do concreto massa contendo pozolana de argila.* In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON). *Colóquio sobre concreto massa*, São Paulo, 27 de junho a 2 de julho de 1983.

8 - SAAD, Miguel N. A. & OLIVEIRA, Paulo J. R. de & SALLES, Flávio M. *Avaliação das propriedades pozolânicas de argilas e cinzas volantes.* In: INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO (IBRACON). *Colóquio sobre concreto massa.* São Paulo, 27 de junho a 2 de julho de 1983.

9 - CALLEJA CARRETE, Jose. *Cenizas, cementos y hormigones con cenizas.* Madrid, Instituto Eduardo Torroja, s.d.

10 - _____. *Las puzolanas.* Madrid, 1958.

11 - PAPADAKIS, Michel. *L'etuvage des produits en béton.* Épernon, CERIB, 1967. (Pub. tech. n.1).