QUADRO XXV

Tensões de rotura de betões fabricados com pozolanas, moídas em conjunto com o cimento e adicionadas na betoneira

Cimento	Pozolana	Moedura	Tensões de rotura	7 dias	28 dias	3 meses	6 meses	1 ano	3 anos
A	—	Moedura industrial	Compressão, kg cm^{-2}	67	102	140	131	142	202
			Flexão, kg cm^{-2}	14	22	29	28	28	29
	Artificial n.º 1	Moedura separada (Pozolana moída no laboratório adicionada na betoneira ao cimento moído industrialmente)	Compressão kg cm^{-2}	57	98	134	145	167	186
			Compressão %	*85*	*96*	*96*	*111*	*118*	*92*
			Flexão kg cm^{-2}	8	17	26	30	34	31
			Flexão %	*57*	*77*	*89*	*107*	*121*	*107*
		Moedura conjunta no laboratório	Compressão kg cm^{-2}	67	114	154	154	183	215
			Compressão %	*100*	*112*	*110*	*118*	*129*	*106*
			Flexão kg cm^{-2}	13	23	30	31	34	36
			Flexão %	*93*	*104*	*103*	*110*	*118*	*124*
Modificado C	—	Moedura industrial	Compressão, kg cm^{-2}	74	146	188	186	280	286
	Santo Antão moída a 8000 cm^2 g^{-1}	Moedura separada (Pozolana moída no laboratório adicionada na betoneira ao cimento moído industrialmente)	Compressão kg cm^{-2}	36	86	149	171	240	266
			Compressão %	*49*	*59*	*79*	*92*	*86*	*93*
	—	Moedura no laboratório	Compressão, kg cm^{-2}	104	188	258	270	312	308
	Santo Antão	Moédura conjunta no laboratório	Compressão kg cm^{-2}	86	176	225	228	257	320
			Compressão %	*83*	*93*	*87*	*84*	*83*	*104*
Modificado C	—	Moedura industrial	Compressão, kg cm^{-2}	74	146	188	186	280	286
	Artificial n.º 1	Moedura separada (Pozolana moída no laboratório adicionada na betoneira ao cimento moído industrialmente)	Compressão kg cm^{-2}	67	114	137	178	266	314
			Compressão %	*91*	*78*	*73*	*96*	*95*	*110*
	—	Moedura no laboratório	Compressão, kg cm^{-2}	104	188	258	270	312	308
		Moedura conjunta no laboratório	Compressão kg cm^{-2}	95	177	209	230	269	278
			Compressão %	*91*	*94*	*81*	*85*	*86*	*90*

de rotura dos betões de cimento portland base.

Apesar da dispersão dos ensaios ser elevada, no quadro XXVI está indicado o valor médio destas tensões de rotura, em percentagem.

A comparação destes resultados indica que a moedura em conjunto faz, pelo menos, aumentar as tensões de rotura iniciais. Com efeito, pode-se dizer que a substituição de 30 % de cimento por pozolana provoca, nas primeiras idades, uma perda na resistência de 20 a 25 % e 5 a 15 % de 28 dias a 3 meses (quadro XXIV e quadro XXV). Quando a moedura se faz em conjunto a queda das tensões de rotura nas idades jovens é menos acusada, atingindo apenas 10 % até cerca de 3 a 6 meses, como indica o quadro XXVI, e, facto de importância capital, não parece afectar as tensões de rotura a longo prazo, acima de 1 ano.

As altas tensões de rotura obtidas com o cimento A e com a pozolana n.º 1 moídos conjuntamente em laboratório são talvez devidas ao facto de as tensões de rotura que serviram de termo de comparação terem sido obtidas com o cimento moído industrialmente, na fábrica. Com efeito, a moedura de laboratório provoca uma diferença grande na finura do cimento, designadamente uma maior proporção de elementos finos, que pode contribuir para aumentar as tensões de rotura iniciais. A mesma objecção já se não pode pôr aos resultados obtidos com o cimento modificado C pois as tensões de rotura dos betões feitos com o cimento pozolânico moído no laboratório foram comparadas com as tensões de rotura do betão fabricado com o cimento portland moído também no laboratório em condições rigorosamente idênticas.

53. Influência da natureza da pozolana sobre a resistência dum dado cimento. — A observação dos resultados que até aqui têm vindo a ser referidos mostra uma grande dispersão nas tensões de rotura obtidas com as diferentes pozolanas e com os diferentes cimentos. Isto levou a pensar no estudo da adição das diferentes pozolanas já referidas a um dado cimento, para determinar se, de facto, a acção da pozolana depende da natureza do cimento. Assim, no quadro XXVII estão indicadas as tensões de rotura de betões fabricados com o cimento A_1 e com as pozolanas artificiais n.º 1 e n.º 3, e naturais, de St.º Antão e italiana, a que já se fez referência no § 32.

Neste quadro, em itálico, figuram as tensões de rotura, em percentagem, dos betões com pozolana relativamente aos betões sem pozolana.

Considerando as tensões de rotura a 3 anos, vê-se que há, de facto, diferenças notáveis nas pozolanas, comportando-se o cimento de maneiras diferentes. No caso da pozolana de St.º Antão nem a origem nem a sua finura afectam as tensões de rotura a longo prazo, aumentando as do cimento base de 22 a 23 %.

A pozolana artificial n.º 3 aumenta a tensão de rotura de 19 % e a natural, italiana, apenas de 7 %.

Esta questão da influência da natureza do clínquer sobre a eficiência duma pozolana será retomada com mais pormenor no capítulo seguinte.

54. Influência, na resistência, duma dada pozolana sobre diferentes cimentos. — Assim como a natureza da pozolana tem influência sobre a resistência dum dado cimento, também

QUADRO XXVI

Comparação da moedura em conjunto da pozolana com o cimento, com a sua adição na betoneira

(Tensões de rotura do betão feito com o cimento portland base, 100)

Pozolana	Tensões de rotura	7 dias	28 dias	3 meses	6 meses	1 ano	3 anos
Adicionada na betoneira	Compressão	75	78	83	100	100	100
	Flexão (1 série única de ensaios) .	85	96	96	111	118	92
Moída em conjunto	Compressão	91	100	92	96	100	100
	Flexão (1 série única de ensaios) .	93	104	103	110	118	124

QUADRO XXVII

Tensões de rotura de betões fabricados com o cimento portland A_1 e com substituição de 30 % deste por diferentes pozolanas adicionadas na betoneira

Pozolana que substitue 30 % do cimento portland A_1			Tensões de rotura à compressão	28 dias	3 meses	1 ano	3 anos
Cimento portland A_1			kg cm^{-2}	126	169	162	173
Pozolana artificial n.º 1			kg cm^{-2}	133	163	182	200
			%	*105*	*96*	*112*	*116*
Pozolana artificial n.º 3			kg cm^{-2}	105	156	178	206
			%	*83*	*92*	*110*	*119*
Pozolana natural italiana			kg cm^{-2}	80	125	170	184
			%	*64*	*74*	*105*	*107*
Pozolana natural de St.º Antão	Moída a 8000 cm^2 g^{-1}	Brejo	kg cm^{-2}	126	141	151	212
			%	*100*	*83*	*93*	*123*
		Mistura de diferentes origens topográficas	kg cm^{-2}	112	163	178	213
			%	*89*	*96*	*110*	*123*
	Moída a 4000 cm^2 g^{-1}	Fundão	kg cm^{-2}	86	158	201	211
			%	*68*	*94*	*124*	*122*

uma dada pozolana se não comporta igualmente quando substitue parte do cimento portland de diferentes origens.

No quadro XXVIII estão indicados os resultados obtidos com a pozolana artificial n.º 3 quando substitue 30 % do cimento portland que se indica na primeira coluna.

Apesar da dispersão manifestada podemos afirmar que esta pozolana quase não aumenta pràticamente as tensões de rotura nem do cimento B, nem do moderado da mesma origem.

O aumento mais importante, 10 % a 1 ano e 19 % a 3 anos, é conseguido com o cimento A_1, e com os cimentos D e C o aumento é apenas de 7 % e 2 % a 1 ano.

A comparação dos resultados obtidos com a pozolana natural de St.º Antão quando adicionada ao cimento modificado C (quadro XXV) com os obtidos quando se adiciona ao cimento portland A_1 (quadro XXIV ou XXVII), também mostra comportamentos muito diferentes desta pozolana.

Com efeito, enquanto com o cimento A_1 o aumento da tensão de rotura é de 22 a 23 % a 3 anos, com o cimento modificado C não há, pràticamente, aumento na resistência até 3 anos.

55. Influência da pozolana no calor de hidratação do cimento. — No quadro XXIX estão indicados os valores dos calores de hidratação dos cimentos portland que temos referido e da mistura de 70 % destes cimentos com 30 % de pozolana. O calor de hidratação foi determinado pelo conhecido método de dissolução; (69) a pozolana foi adicionada ao cimento no próprio recipiente no qual se faz a confecção da pasta de cimento. A quantidade de água usada foi a normal, isto é, de 0,40 do peso total de cimento e pozolana.

Neste quadro figuram, em itálico, os calores de hidratação das misturas de cimento e pozolana em percentagem do calor de hidratação do cimento portland base respectivo. Como se vê, ao contrário do que acontece com as resistências,

QUADRO XXVIII

Tensões de rotura do betão fabricado com cimentos portland de diferentes origens e com substituição de 30 % destes cimentos por pozolana artificial n.º 3, adicionada na betoneira

Cimento	Pozolana artificial n.º 3	Tensões de rotura à compressão	28 dias	3 meses	1 ano	3 anos
A_1	—	kg cm^{-2}	126	169	162	173
	30 %	kg cm^{-2}	105	156	178	206
		%	*84*	*92*	*110*	*119*
B	—	kg cm^{-2}	188	198	234	219
	30 %	kg cm^{-2}	157	178	193	240
		%	*83*	*90*	*84*	*110*
Moderado B	—	kg cm^{-2}	150	188	182	233
	30 %	kg cm^{-2}	125	182	205	225
		%	*83*	*97*	*113*	*97*
C	—	kg cm^{-2}	114	176	188	—
	30 %	kg cm^{-2}	101	137	191	—
		%	*89*	*78*	*102*	—
D	—	kg cm^{-2}	109	137	170	—
	30 %	kg cm^{-2}	100	128	182	—
		%	*91*	*94*	*107*	—

os calores de hidratação do cimento com pozolana nunca ultrapassam, nem sequer atingem, a longo prazo, os calores de hidratação do cimento portland base.

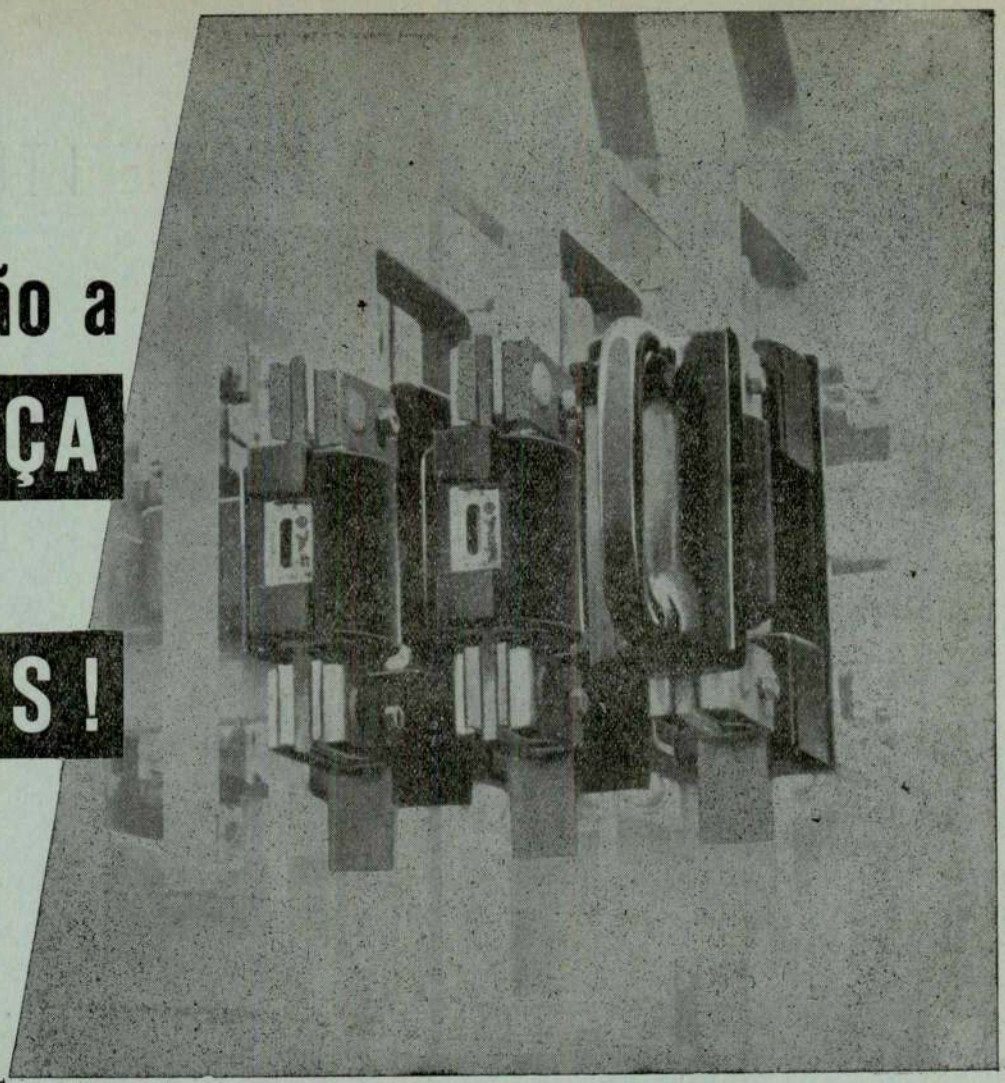
A 28 dias de idade o abaixamento é, em média, de 20 % e a 2 anos é de 15 %. As dispersões são também grandes, como no caso das resistências, verificando-se também que a acção da pozolana é específica, isto é, depende da sua natureza e da natureza do cimento base. A pozolana natural de St.º Antão baixa os calores de hidratação de 20 a 25 % a 28 dias e de cerca de 20 % a 2 anos, enquanto a pozolana artificial n.º 1 misturada com o cimento A_2 provoca apenas um abaixamento da ordem de 10 % após 28 dias.

56. Comparação dos calores de hidratação com as resistências. — Quando, num betão, se reduz a dosagem de cimento numa dada percentagem, a sua tensão de rotura, regra geral, baixa nessa percentagem, e o calor de hidratação do betão baixa, evidentemente, na mesma percentagem. A vantagem da utilização de pozolanas reside precisamente em não permitir que a tensão de rotura baixe na proporção em que se faz a substituição do cimento por pozolana (quadro XXIV) mesmo até 28 dias, e em conseguir que a tensão de rotura a longo prazo, acima de 1 ano, seja superior à do betão fabricado exclusivamente com o cimento portland base.

O facto dos calores de hidratação não baixarem de 30 % quando se faz a substituição de 30 % de cimento por pozolana, prova que a reacção da pozolana com o cimento em presença da água é também exotérmica, embora com menor intensidade do que a reacção da hidratação do cimento que produz a mesma resistência mecânica.

Efectivamente, a experiência prova tambem que a reacção da pozolana com a cal é exotérmica. De

Tenha em consideração a SEGURANÇA e as PERDAS!



Soprel

SCHRÉDER

Senhor Engenheiro:

Ao estabelecer os seus projectos, não esqueça que a indústria nacional fabrica

CORTA-CIRCUITOS FUSÍVEIS DE ALTO PODER DE CORTE

que são o tipo de fusíveis hoje preferido para protecção de instalações contra sobrecargas e curto-circuitos.

CAPACIDADE DE CORTE: 55000 A sob 550 V C. A.
INTENSIDADE NOMINAL: 63, 100, 200, 350, 600 e 1000 A

CARTUCHOS INEXPLOSÍVEIS, RECARREGÁVEIS PELOS UTILIZADORES
PERDAS REDUZIDAS. GRANDE ECONOMIA DE CONSUMO
MAIS EFICIENTES, MAS NÃO MAIS DISPENDIOSOS

SOPREL • SOCIEDADE DE OBRAS E PROJECTOS DE ELECTRICIDADE

REPRESENTANTES GERAIS
INDÚSTRIAS ELÉCTRICAS ASSOCIADAS-INEL

Sede em Lisboa: Rua Rodrigo da Fonseca, 76, 4.°
Telef. 73016 1/2/3/4/5 — Teleg. INELA — LISBOA
Delegação no Porto: Rua de Santa Catarina, 470
Telef. 28841, 28842 e 28843—Teleg. INELAPO-PORTO

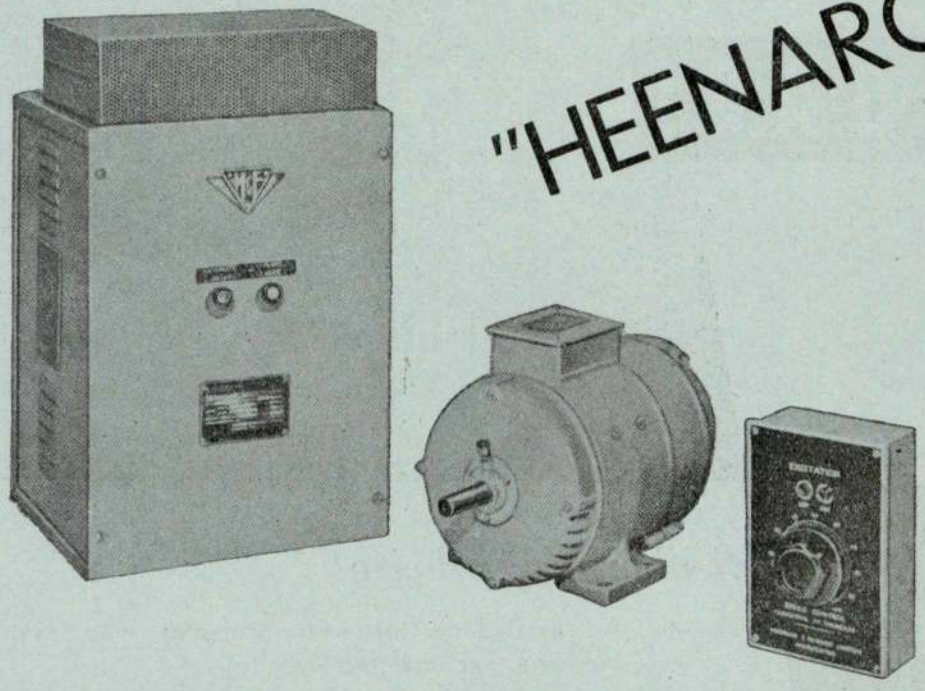
HEENAN & FROUDE LTD.

WORCESTER

ENGLAND

VELOCIDADE VARIÁVEL COM

"HEENARON"



Motor «shunt» de corrente contínua

Unidade electrónica de rectificação

Regulador de velocidade

Representada por:

THE ENGINEERING COMPANY OF PORTUGAL, LDA.

Rua dos Remolares, 12-1.º — LISBOA

QUADRO XXIX

Influência da pozolana no calor de hidratação do cimento portland

Cimento	Pozolana	Calores de hidratação	3 dias	7 dias	28 dias	3 meses	1 ano	2 anos
A_1	—	cal g^{-1}	69	81	89	96	99	104
	Santo Antão moída a 8000 cm^2 g^{-1}	cal g^{-1}	39	54	67	74	79	80
		%	*57*	*67*	*75*	*77*	*80*	*77*
	Santo Antão moída a 4000 cm^2 g^{-1}	cal g^{-1}	42	55	72	79	84	85
		%	*61*	*68*	*81*	*82*	*85*	*82*
A_2	—	cal g^{-1}	49	66	77	83	91	92
	Artificial n.º 1	cal g^{-1}	35	53	71	75	82	91
		%	*71*	*80*	*92*	*91*	*90*	*99*
B	—	cal g^{-1}	56	67	84	90	97	102
	Artificial n.º 3	cal g^{-1}	41	55	67	74	80	87
		%	*73*	*82*	*80*	*82*	*82*	*86*
Moderado B	—	cal g^{-1}	40	52	64	74	83	84
	Artificial n.º 3	cal g^{-1}	34	47	55	61	70	71
		%	*85*	*90*	*86*	*83*	*84*	*84*
Modificado C	—	cal g^{-1}	53	68	72	77	92	—
	Artificial n.º 1	cal g^{-1}	37	44	48	57	66	—
		%	*70*	*65*	*67*	*74*	*72*	—
Valor médio		%	*63*	*75*	*80*	*81*	*82*	*85*

QUADRO XXX

Calores de hidratação de pastas de cal e pozolana (1 parte, em peso, de hidróxido de cálcio para 3 partes, em peso, de pozolana)

Pozolana	7 dias	28 dias
Artificial n.º 2	10 cal g^{-1}	27 cal g^{-1}
Natural de St.º Antão moída a 8000 cm^2 g^{-1}	31 cal g^{-1}	47 cal g^{-1}

facto, feita a determinação do calor de hidratação de pastas de uma parte, em peso, de cal (hidróxido de cálcio) para três partes, em peso, de pozolana, obtiveram-se os resultados indicados no quadro XXX. As pastas de hidróxido de cálcio e pozolana artificial n.º 2 foram amassadas com 0,60 de água em relação à soma dos pesos destes materiais, e as de hidróxido de cálcio e pozolana natural de St.º Antão, com 0,55 da soma dos pesos de cal e pozolana.

Nestas determinações foi usado o mesmo método que o utilizado para o cimento. (69)

Os valores dos calores de hidratação estão referidos ao peso da mistura de cal e pozolana depois de sujeita à temperatura de 1000º C, tal como se costuma proceder também para o cimento.

A pozolana mais enérgica é a que dá maiores calores de hidratação, e a menos enérgica conduz a menores calores de hidratação, mas o seu nível é bastante inferior ao dos cimentos.

A eficiência duma mistura de pozolana com cimento pode ser avaliada comparando os calo-

res de hidratação deste ligante com a resistência por ele conferida ao betão. Com o fim de a tornar independente da natureza do betão, esta comparação poderá fazer-se considerando os valores, em percentagem, das resistências e dos calores de hidratação que figuram em itálico nos quadros XXIV e XXIX.

Assim, um valor unitário do cociente do coeficiente do calor de hidratação pelo da resistência significa que nada se ganha nem nada se perde pelo facto de se substituir 30 % de pozolana por cimento.

Um valor do cociente superior à unidade significa que para se obter um betão com pozolana com resistência igual à do betão com cimento portland apenas, se desenvolve maior calor de hidratação do que no betão de cimento portland e a pozolana desempenha portanto um papel prejudicial. Se o cociente é inferior à unidade então para resistências iguais do betão com pozolana e do betão sem pozolana, o calor desenvolvido pelo betão com pozolana é inferior ao calor desenvolvido pelo betão de cimento portland exclusivamente, e a pozolana desempenha portanto um papel eficiente.

No quadro XXXI estão indicados os valores destes cocientes para a compressão e para a flexão.

Como não há resultados das tensões de rotura a 2 anos, as percentagens dos calores de hidratação a 2 anos foram divididas pela média das percentagens das tensões de rotura a 1 e a 3 anos.

Como se vê, este cociente passa, em regra, por um máximo a 7 dias, quer na compressão quer na flexão e por vezes a 28 dias, atingindo então valores superiores à unidade, mais frequentes aliás na compressão. Isto traduz o facto que, a 7 ou 28 dias, a substituição de cimento por pozolana não é eficaz, isto é, perde-se tensão de rotura para a quantidade de calor desenvolvida. Este facto não tem uma importância grande pois, nas grandes massas de betão, a resistência mecânica não interessa a 7 dias, porque apesar de ser em um pouco menos que esta idade que as temperaturas desenvolvidas atingem o máximo, produzindo tensões de compressão, estas não causam, normalmente, apreensões. Sòmente quando a massa arrefece se geram tensões de tracção, o que se verifica, normalmente, bastante depois de 28 dias. (70) (71)

Com efeito, nos métodos de construção normais, a temperatura da massa de betão começa a diminuir por volta de 1 mês e as tensões de tracção começam a gerar-se uns 15 dias depois de atingir este máximo de temperatura chegando ao seu valor máximo bastante depois de 2 ou 3 meses após a betonagem.

Ora, como o mostra o quadro XXXI, o valor do cociente do calor de hidratação pela tensão de rotura a 3 meses é de cerca de 0,75 para a flexão e de 0,87 para a compressão. Isto significa portanto que, de facto, apesar da pozolana não melhorar o cimento nas primeiras idades ela melhora-o nas idades em que é chamada a desempenhar o seu papel, isto é, após 1 mês.

Os mais baixos coeficientes são obtidos com a pozolana natural de Santo Antão, na flexão e com a pozolana artificial n.º 1 misturada ao cimento C modificado, na compressão (quadro XXIV) mas as tensões de rotura deste cimento e da sua mistura com a pozolana são muito baixas. A pozolana natural da Ilha de Santo Antão chega a atingir à flexão a 3 meses, uma eficiência da ordem de 36 % (cociente de 0,64, quadro XXXI).

Isto significa que, quando o betão de cimento A_1 e pozolana de Santo Antão tem uma dosagem tal que conduz à mesma resistência que a obtida no betão de cimento portland A_1 as temperaturas atingidas adiabàticamente no betão com pozolana são 36 % inferiores às atingidas no betão confeccionado exclusivamente com o cimento portland A_1.

Para as outras pozolanas e cimentos a eficiência é apenas de uns 10 a 20 %, a 2 anos.

57. Influência da pozolana no coeficiente de permeabilidade do betão.

57.1. **Método usado.** — A discussão da influência da pozolana na permeabilidade do betão é importante, pois poucos estudos precisos há sobre esta acção. (72)

É bastante conhecida a dificuldade da realização de ensaios precisos de permeabilidade e foi por isso que nos ensaios que se vão descrever em seguida, onde foi estudada a influência da pozolana, se utilizou uma técnica diferente da clássica. Esta técnica consistiu na utilização do método do cilindro furado. *

---

* Esta técnica foi sugerida e desenvolvida pelo sr. eng.º M. Gonçalves Ferreira, assistente do L. N. E. C.

QUADRO XXXI

Cocientes dos valores, em percentagem, do calor de hidratação conferido pelas diferentes pozolanas aos cimentos pelos valores, em percentagem, da tensão de rotura por compressão e por flexão conferida pelas diferentes pozolanas aos cimentos (quadros XXIV e XXIX)

Tipo de rotura	Cimento	Pozolana	3 dias	7 dias	28 dias	3 meses	1 ano	2 anos
Compressão	A_1	Santo Antão moida a 8000 $cm^2\ g^{-1}$	1,03	1,15	0,75	0,92	0,86	0,72
		Santo Antão moída a 4000 $cm^2\ g^{-1}$	—	1,13	1,19	0,87	0,68	0,67
	A_2	Artificial n.º 1	—	0,80	1,00	0,88	0,83	0,91
	B	Artificial n.º 3	0,88	1,00	0,96	0,91	1,00	0,90
	Moderado B	Artificial n.º 3	—	1,24	1,02	0,86	0,75	0,81
	Modificado C	Artificial n.º 1	0,66	0,63	0,53	0,80	0,70	—
	Valor médio		0,86	0,99	0,91	0,87	0,80	0,80
Flexão	A_1	Santo Antão moída a 8000 $cm^2\ g^{-1}$	—	0,67	0,72	0,64	0,73	0,69
		Santo Antão moída a 4000 $cm^2\ g^{-1}$	—	—	—	—	—	—
	A_2	Artificial n.º 1	—	0,80	0,98	0,87	0,82	0,91
	B	Artificial n.º 3	—	0,82	0,94	0,72	0,70	0,79
	Moderado B	Artificial n.º 3	—	1,30	1,26	0,79	0,74	0,77
	Modificado C	Artificial n.º 1	—	1,16	0,79	0,76	0,58	—
	Valor médio		—	0,95	0,94	0,76	0,71	0,79

Neste método é usado um espécime cilíndrico, com 30 cm de altura e 15 cm de diâmetro, com um furo de 1 cm de raio ao longo de toda a altura do cilindro (fig. 43). Os topos do cilindro são preparados com uma mistura de enxofre e argila refractária, aplicada a quente sobre estas faces, com o enxofre em fusão; no topo inferior é aplicado um tubo de latão fino, com 5 mm de diâmetro interior apertado contra as paredes do furo por meio de uma anilha de borracha.

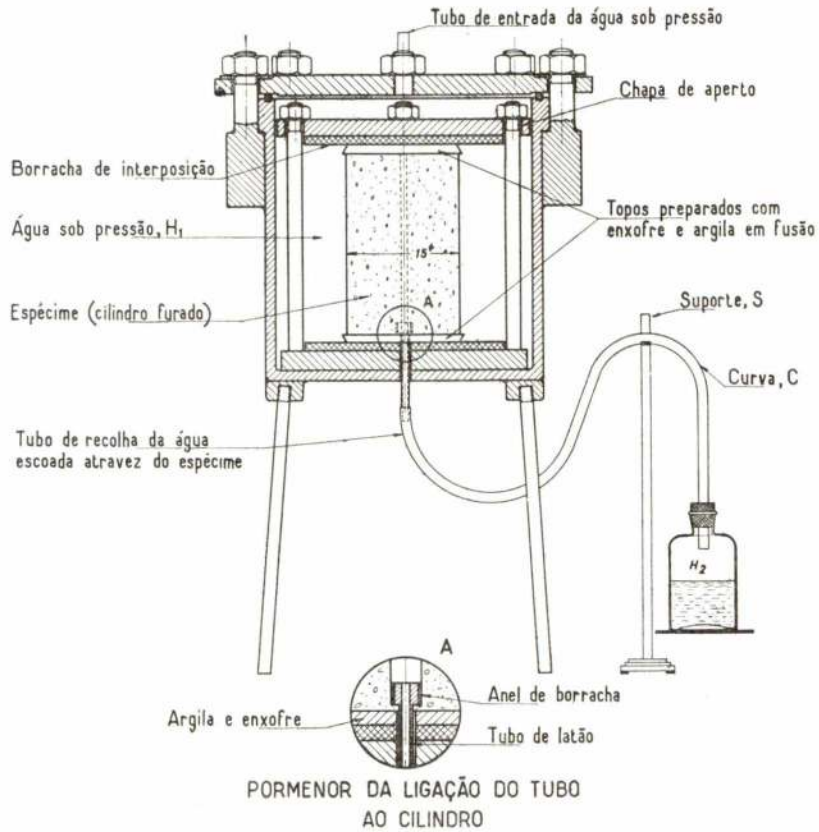


Fig. 43 — Esquema da montagem usada para o ensaio de permeabilidade

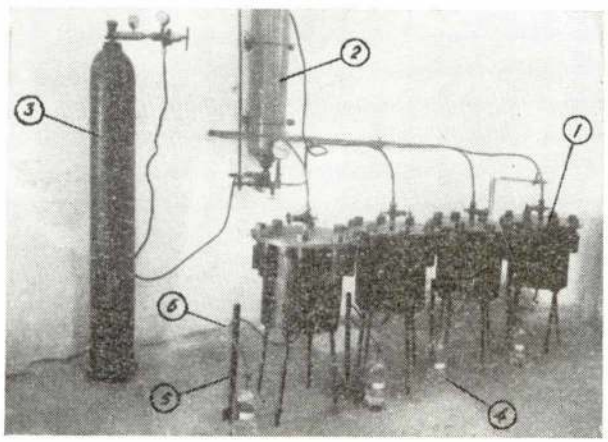


Fig. 44 — Fotografia da montagem para o ensaio de permeabilidade

(1) Potes onde estão montados os cilindros furados
(2) Reservatório de água
(3) Reservatório de ar comprimido
(4) Frascos de recolha de água
(5) Suporte, S
(6) Tubo de borracha e curva C.

O cilindro é apertado entre duas placas de ferro, com interposição de placas de borracha com cerca de 10 mm de espessura, dentro do vaso em que se vai sujeitar o espécime à acção da água sob pressão; a placa inferior está ligada ao fundo deste vaso que é o aparelho clássico de permeabilidade, do tipo Amsler (fig. 44).

A água, actuando sob pressão na superfície lateral dos cilindros, atravessa-os em direcção ao seu furo central, sendo recolhida num frasco depois de ter passado através do tubo de latão e de um tubo de borracha.

Para evitar as perdas por evaporação da água escoada através do betão utiliza-se um tubo de borracha, formando sifão, que conduz a água desde o tubo de latão que termina o furo do cilindro até ao frasco onde é recolhida e pesada. O tubo de borracha é obrigado a passar pelo suporte S, fazendo subir o nível da borracha até uma cota ligeiramente inferior à do fundo do pote de permeabilidade. Deste modo a superfície inferior do furo fica em contacto com a água, que também enche a borracha até ao nível superior do suporte. A evaporação da água só poderá pois fazer-se ao nível da curva C, e no vaso de recolha, no qual aliás é fácil impedir.

Para se encher de água o tubo de borracha e

o furo do cilindro faz-se prèviamente o vácuo nesse espaço, lançando-se em seguida a água para o interior do tubo.

A partir da medição do caudal da água recolhida no frasco, e que passa através do betão, determina-se o coeficiente de permeabilidade do betão, K,

$$K = \frac{V}{2\,\pi\,t\,(H_1 - H_2)\,h} \times \lg_e \frac{R}{r}$$

onde

V — volume de água recolhido, cm^3
t — tempo, em segundos, para recolher o volume V de água
H_1 — pressão aplicada, em altura de água, cm
H_2 — pressão atmosférica, em altura de água, cm
h — altura do cilindro, cm
R — raio do cilindro, cm
r — raio do furo do cilindro, cm.

A pressão utilizada nestes ensaios foi de 25 kg cm^{-2}.

A curva de variação da quantidade de água escoada através do betão com o tempo deveria ser, teòricamente, uma linha recta para se poder definir um coeficiente de permeabilidade.

Tal não se verifica porém. Nas primeiras horas em que começa o ensaio o volume de água escoado é pequeno, pois grande parte da água que atravessa o betão vai-o saturar, preenchendo os seus poros. Depois, passadas algumas horas, em geral menos do que 24 horas no caso dos nossos cilindros com 15 cm de diâmetro, o volume de água escoada aumenta, mantendo-se muito sensìvelmente constante, durante umas 24 a 100 horas. Após este tempo o volume escoado começa de novo a diminuir, devido à colmatação dos poros da superfície do betão, se a água não é agressiva, como é geralmente o caso.

O coeficiente de permeabilidade é determinado, por definição, no período em que o caudal de água escoado é constante. Esse período é aquele que tem, no caso destes cilindros, como instante médio, o tempo de 35 horas. Foi neste instante que se determinou o coeficiente de permeabilidade, K, coeficiente angular da tangente à curva de variação do volume de água V com o tempo t. O ensaio tinha sempre a duração de 4 dias, para se obter uma definição satisfatória desta curva.

O betão com que foram fabricados os cilindros e comparados os diferentes cimentos com e sem a adição de pozolana tinha a curva granulométrica indicada na fig. 49 mas a sua dosagem era de 275 kg de cimento ou de cimento e pozolana, com 146 litros de água por metro cúbico de betão.

Os ensaios foram realizados aos 6 meses, idade que é suficientemente avançada para se trabalhar numa zona da curva de variação do coeficiente de permeabilidade com o tempo que já não é muito sensível à idade. Por outro lado, quando se usam pozolanas, a uma tal idade já estas terão desenvolvido uma actividade razoável e portanto já se poderá medir o seu valor com um certo grau de confiança.

Durante este tempo a conservação dos espécimes fez-se numa atmosfera saturada.

57.2. Resultados obtidos. — Os resultados obtidos estão indicados no quadro XXXII, quer em valor absoluto quer em relação ao betão de cimento portland apenas. Como se vê no caso que se apresenta, a pozolana adicionada na betoneira faz aumentar o coeficiente de permeabilidade, de cerca de duas a seis vezes.

A uma variação do simples ao dobro do coeficiente de permeabilidade deste betão corresponde, se este fosse confeccionado apenas com cimento portland, uma variação no $\frac{A}{C}$ de 0,06; a uma variação de 6 vezes do coeficiente de permeabilidade corresponde uma variação no $\frac{A}{C}$ de 0,20, se este fosse confeccionado apenas com cimento portland. (73)

Deve notar-se portanto que uma variação no coeficiente de permeabilidade do simples ao dobro não é significativa pois ocorre fàcilmente nos betões de cimento portland fabricados em qualquer estaleiro por muito preciso que ele seja: por exemplo, a um intervalo no $\frac{A}{C}$ de 0,06 corresponde, para a dosagem de 275 kg, uma variação na água de amassadura de 15 l m^{-3}, precisão na água de amassadura que só excepcionalmente é atingível num estaleiro. Já a variação de 6 vezes no coeficiente de permeabilidade, que corresponde a uma diferença de 0,20 no $\frac{A}{C}$, é significativa, pois a uma tal variação corresponde um intervalo de 55 l m^{-3} na água de amassadura, o qual só num estaleiro mal controlado pode ocorrer.

QUADRO XXXII

Influência da pozolana no coeficiente de permeabilidade dos betões

Cimento	Pozolana	Coeficiente de permeabilidade	
		10^{-9} cm s^{-1}	%
A	—	5,95	100
	n.º 1	35,0	590
B	—	0,31	100
	n.º 3	0,58	187
Moderado B	—	1,93	100
	n.º 3	5,32	276

Por outro lado, nalguns ensaios realizados no laboratório com inertes, cimentos, pozolanas e betões diferentes dos que temos vindo a referir e em que se substituiu cimento por pozolana que se adicionou ao betão na betoneira, pode-se observar uma diminuição no coeficiente de permeabilidade. Conforme o módulo de finura da areia e sua composição granulométrica assim se pode obter uma diminuição ou uma subida no coeficiente de permeabilidade do betão com pozolana.

Verifica-se portanto que o coeficiente de permeabilidade dos betões fabricados com adição de pozolana necessita ser prèviamente bem estudado, pois tais betões podem apresentar coeficientes um pouco maiores do que sem pozolana, o que depende das naturezas do cimento, da pozolana e da areia.

58. Influência da pozolana no valor da contracção

58.1. Método usado. — O estudo da contracção que se vai referir a seguir foi realizado sobre pastas de cimento e de cimento e pozolana e sobre betões com a dosagem de 200 kg de cimento por metro cúbico.

As pastas de cimento e de cimento e pozolana foram confeccionadas com uma quantidade de água igual a 0,33 do peso do ligante. Os espécimes utilizados foram prismas com 5×5×25 cm.

Os betões tinham a seguinte composição:

godo, com a máxima dimensão de 25 mm e a mínima de 4,76 mm	1360 kg m^{-3}
areia	815 kg m^{-3}
água	150 l m^{-3}
cimento, ou cimento e pozolana	200 kg m^{-3}

A curva granulométrica deste betão está indicada na fig. 45.

Os espécimes de betão que se utilizaram foram prismas com as dimensões de 8×8×33,3 cm. A máxima dimensão do inerte era portanto de um pouco mais de 1/4 da dimensão transversal do prisma.

Logo após a desmoldagem eram os prismas pesados, quer de pasta quer de betão, de modo a poder calcular-se a quantidade de água de amassadura inicial. Depois estes prismas de pasta eram conservados durante 18 a 24 horas numa câmara de nevoeiro e os de betão durante 48 horas.

Após este período eram desmoldados, feitas as leituras iniciais de comprimento e de peso e colocados nas atmosferas de conservação respectivas, que tinham as humidades relativas de 55 %, 75 % e 99 %. Foi ainda usado um meio de conservação sem trocas de humidade; os prismas assim conservados, logo a seguir à desmoldagem, eram embrulhados em papel de estanho e cobertos com uma camada de parafina com alguns milímetros de espessura.

As atmosferas de 55 % e de 75 % de humidade relativa foram obtidas pela acção de soluções concentradas de, respectivamente, carbonato de potássio e cloreto de amónio.

A conservação em 99 % de humidade relativa foi realizada numa câmara de nevoeiro.

As medições da contracção foram executadas todas pelo método clássico de comparação do comprimento dos espécimes com o duma barra de aço padrão.

58.2. Resultados obtidos. — No quadro XXXIII estão indicados os resultados obtidos na medição da contracção e das perdas de água de amassadura, a 2 anos. Neste quadro o sinal + significa uma expansão ou um aumento de peso, isto é, aumento de comprimento ou absorção de água. O sinal — indica ou uma diminuição de dimensões ou uma diminuição de peso, isto é, uma perda de água.

Tal como nos quadros anteriores, em itálico figura a percentagem da contracção ou da perda de água do cimento ou betão com pozolana rela-

QUADRO XXXIII

Influência da pozolana no valor da contracção
(a 2 anos)

Tipo de medição	Cimento	Pozolana	Valores das contracções					Perdas da água de amassadura		
				Sem trocas de humidade	Humidade relativa			Humidade relativa		
					99 %	75 %	55 %	99 %	75 %	55 %
Em pasta de cimento	A_1	—	10^{-3}	— 0,46	+ 0,98	— 1,48	— 5,01	+ 13,5	— 13,2	— 40,6
		Santo Antão moída	10^{-3}	— 0,64	+ 2,03	— 1,83	— 4,42	+ 9,9	— 18,9	— 44,5
		a 8000 cm^2 g^{-1}	%	*139*	*208*	*123*	*88*	*73*	*143*	*110*
		Santo Antão moída	10^{-3}	— 0,60	+ 1,79	— 2,84	— 5,41	+ 10,9	— 37,5	— 56,2
		a 4000 cm^2 g^{-1}	%	*130*	*183*	*192*	*108*	*81*	*284*	*138*
	A_2	—	10^{-3}	— 0,65	+ 0,80	— 2,20	— 4,08	+ 8,8	— 20,0	— 45,8
		Artificial	10^{-3}	— 1,41	+ 0,35	— 2,32	— 3,65	+ 14,0	— 21,4	— 45,3
		n.º 1	%	*217*	*44*	*105*	*89*	*159*	*107*	*98*
	B	—	10^{-3}	+ 0,03	+ 1,15	— 0,97	— 1,63	+ 9,0	— 23,2	— 43,4
		Artificial	10^{-3}	— 0,97	+ 0,43	— 1,29	— 1,52	+ 9,7	— 24,4	— 49,6
		n.º 3	%		*37*	*133*	*93*	*108*	*105*	*115*
	Moderado B	—	10^{-3}	— 0,89	+ 0,70	— 1,73	— 2,12	+ 9,9	— 26,3	— 52,9
		Artificial	10^{-3}	— 1,14	+ 0,28	— 1,47	— 2,06	+ 11,3	— 28,8	— 53,5
		n.º 3	%	*128*	*40*	*85*	*98*	*114*	*109*	*103*
Em betão	A_1	—	10^{-3}	— 0,15	+ 0,07	— 0,35	— 0,48	+ 9,3	— 53,0	— 70,0
		Santo Antão moída	10^{-3}	— 0,19	+ 0,21	— 0,32	— 0,50	+ 9,0	— 65,2	— 79,2
		a 8000 cm^2 g^{-1}	%	*127*	*300*	*91*	*104*	*97*	*123*	*113*
		Santo Antão moída	10^{-3}	— 0,09	+ 0,21	— 0,31	— 0,37	+ 9,2	— 71,0	— 87,0
		a 4000 cm^2 g^{-1}	%	*60*	*300*	*89*	*77*	*99*	*134*	*124*
	A_2	—	10^{-3}	— 0,09	+ 0,16	— 0,40	— 0,39	+ 12,5	— 56,0	— 72,0
		Artificial	10^{-3}	— 0,28	+ 0,25	— 0,14	— 0,38	+ 4,8	— 66,0	— 78,8
		n.º 1	%	*310*	*156*	*35*	*97*	*38*	*118*	*110*
	B	—	10^{-3}	— 0,06	+ 0,15	— 0,19	— 0,14	+ 11,4	— 48,0	— 76,2
		Artificial	10^{-3}	— 0,19	+ 0,13	— 0,22	— 0,36	+ 6,6	— 53,3	— 78,4
		n.º 3	%	*317*	*86*	*116*	*258*	*58*	*111*	*103*
	Moderado B	—	10^{-3}	— 0,12	+ 0,17	— 0,21	— 0,22	+ 18,1	— 54,3	— 60,8
		Artificial	10^{-3}	— 0,16	+ 0,13	— 0,12	— 0,35	+ 7,5	— 47,2	— 68,9
		n.º 3	%	*133*	*76*	*57*	*159*	*42*	*87*	*114*

tivamente à contracção ou perda de água do cimento ou betão sem pozolana, base do anterior.

Uma vez mais se verifica que as dispersões são elevadas. Mas, em todo o caso, observa-se o seguinte:

a) — A pozolana provoca sempre um aumento na contracção das pastas conservadas sem trocas de humidade, em média de cerca de 50 %, mas pode atingir influências muito maiores, como no caso do cimento A_2 com a pozolana artificial n.º 1 e do cimento B com a pozolana artificial n.º 3.

b) — Em 99 % de humidade relativa, em média, a pozolana provoca uma diminuição na expansão da ordem de 40 %. Exceptua-se o caso do cimento A_1 com a pozolana natural de Santo Antão que apresenta um aumento na

expansão de mais de 100 %. Mas este comportamento não é normal.

c) — Em 75 % de humidade relativa, em média, a pozolana provoca um aumento na contracção da ordem de 30 %. O valor máximo é atingido com a pozolana natural de Santo Antão moída a 4000 $cm^2\ g^{-1}$ que provoca um aumento na contracção do cimento portland base de quase o dobro. O valor mínimo é obtido com a pozolana n.º 3 que provoca uma diminuição de 15 % na contracção do cimento moderado B.

d) — Finalmente, o resultado mais interessante é obtido em 55 % de humidade relativa: nesta higrometria tão baixa a pozolana faz diminuir a contracção; a diminuição é, em média de 5 %, mas atinge 12 % para a pozolana de Santo Antão moída a 8000 $cm^2\ g^{-1}$, e 2 % para a pozolana artificial n.º 3 adicionada ao cimento moderado B. A única excepção verifica-se para a pozolana de Santo Antão moída a 4000 $cm^2\ g^{-1}$, que faz aumentar a contracção do cimento portland base de 8 %.

Os resultados obtidos em betão são consideràvelmente mais dispersos, mas o sentido da variação é o mesmo, quer na conservação sem trocas de humidade quer na conservação em 99 % de humidade relativa.

Enquanto a pozolana faz aumentar a contracção das pastas conservadas em 75 % de humidade relativa, ela provoca uma diminuição na contracção do betão conservado neste ambiente, verificando-se o contrário na conservação em 55 % de humidade relativa.

No que se refere às perdas de água verifica-se que, em geral, a pozolana provoca um aumento na absorção de água quando a pasta se conserva em 99 % de humidade. Exceptua-se o caso da pozolana natural da ilha de Santo Antão, que faz diminuir a absorção de água. Em betão, a pozolana provoca sempre uma diminuição na absorção de água, menos acusada nas pozolanas de Santo Antão (diminuição de 3 e 1 %) e bastante acusada nas outras pozolanas (diminuição de 50 %).

Em 75 % de humidade relativa, a perda de água das pastas de cimento é muito aumentada pela pozolana, chegando a atingir quase um valor de 3 vezes o obtido com cimento portland no caso da pozolana de Santo Antão moída a 4000 $cm^2\ g^{-1}$ e um valor 50 % superior no caso desta pozolana moída mais finamente.

O aumento na perda de água provocado por estas pozolanas no betão também é grande, da ordem de 20 a 30 %. Com as outras pozolanas, o aumento da perda de água é de 5 a 9 % nas pastas e de 11 a 18 % no betão. A pozolana artificial n.º 3 provoca uma diminuição na perda de água do cimento moderado B, o que está de acordo com a diminuição na contracção que também se verifica, como vimos.

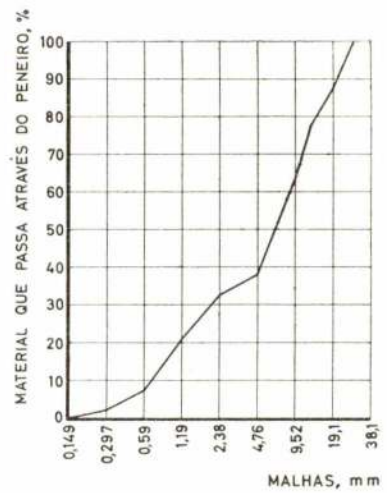


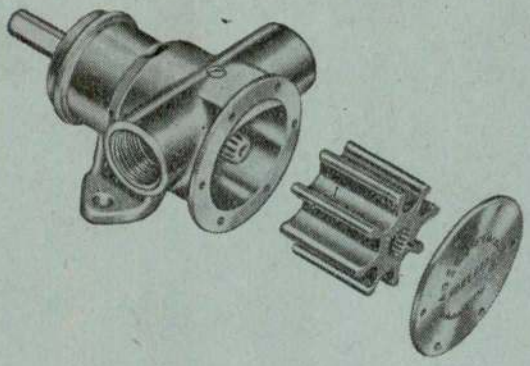
Fig. 45 — Curva granulométrica do inerte usado no estudo da contracção dos betões com pozolana.

Inertes rolados provenientes dos usados na construção da barragem de Castelo do Bode.

Em 55 % a influência da pozolana na perda de água é pràticamente igual no betão e na pasta, mas essa influência é substancialmente menor que em 75 % de humidade relativa. Isto está de acordo com a pequena influência da pozolana na contracção das pastas conservadas em 55 % de humidade relativa.

O facto da contracção do cimento portland conservado sem trocas de humidade aumentar quando se lhes junta 30 % de pozolana explica-se se se notar que a reacção pozolânica necessita de uma maior quantidade de água para se produzir do que a água que é necessária para a hidratação do cimento. Nestas condições, tudo se passa como se o betão ou pasta de cimento pozolânico conservado sem trocas de humidade «secasse» mais intensamente do que o cimento portland correspondente: isto é, no cimento pozolânico passa, de livre a combinada, uma maior quantidade de água, o que provoca um aumento na contracção.

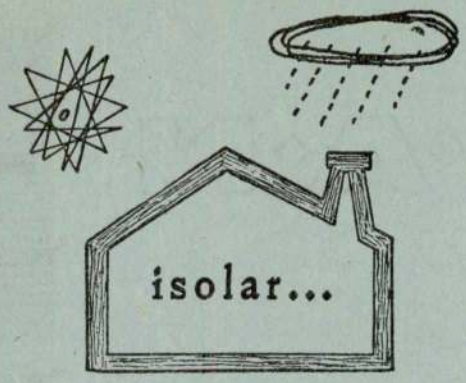
BOMBAS



Se há um problema de bombas consulte

VASCO PESSOA, LDA.

Rua da Boa Vista, 63 — LISBOA



... do calor,
frio,
ruído,
... problema resolvido:

VITROFIB

INFORMAÇÕES TÉCNICAS E COMERCIAIS

NACIONAL FIBRAS DE VIDRO, L.DA

R. Braamcamp, 15, 2.º-D. Tel: 59150 - 59124

LISBOA

OFICINAS E LABORATÓRIOS

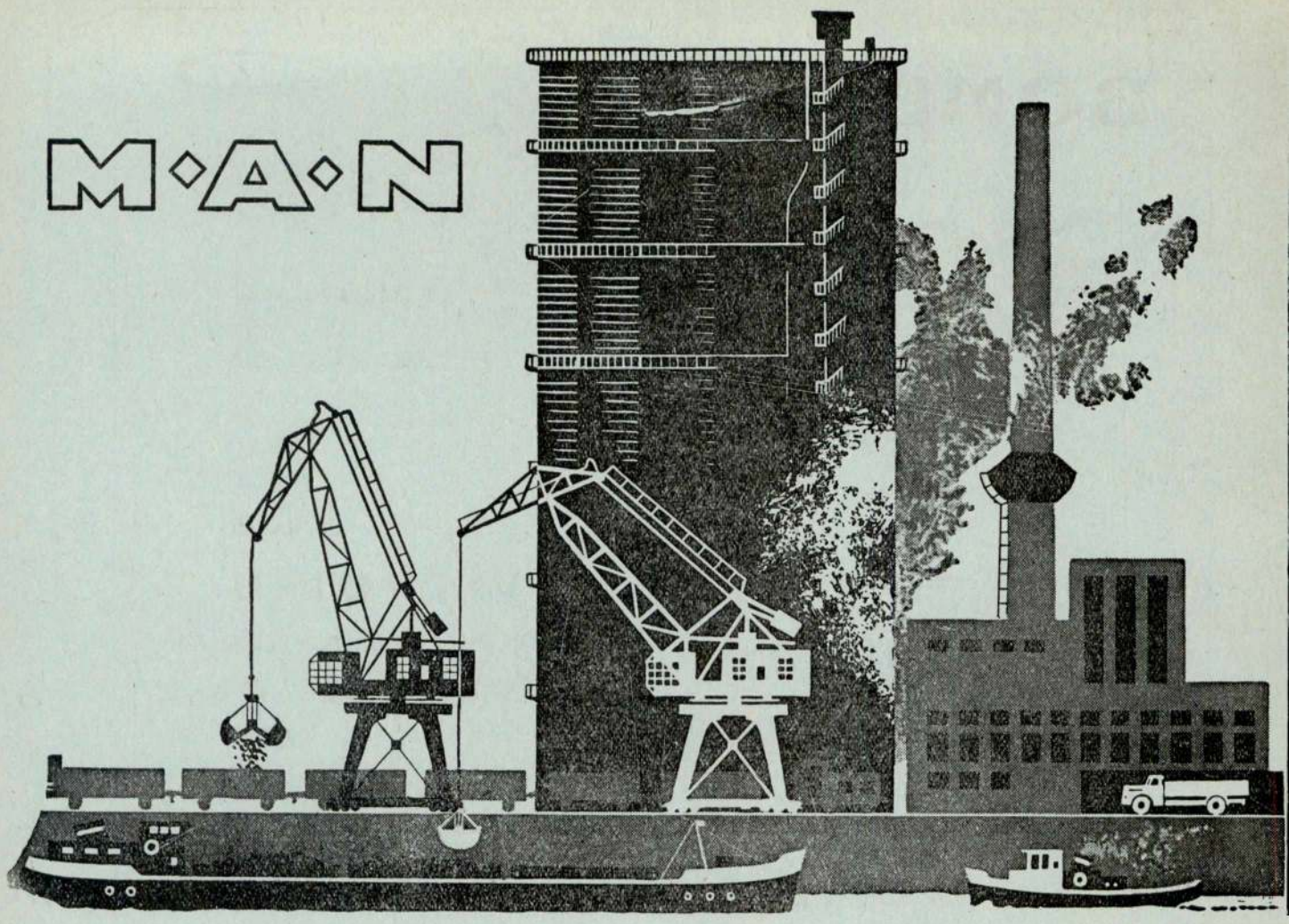
DO

INSTITUTO SUPERIOR TECNICO

As oficinas pedagógicas do Instituto Superior Técnico, de CARPINTARIA DE MOLDE, de INSTRUMENTOS DE PRECISÃO e de ELECTROTÉCNICA, fornecem todo o género de material escolar e de demonstração para o ensino técnico. Nos laboratórios de QUÍMICA ANALÍTICA, FÍSICA INDUSTRIAL E DE MINERALOGIA executam-se análises para o público

Para quaisquer informações, dirigir-se ao secretário da comissão executiva

M·A·N



MASCHINENFABRIK AUGSBURG-NÜRNBERG A·G · WERK NÜRNBERG

INSTALAÇÃO DE FORÇA MOTRIZ A VAPOR · INSTALAÇÕES DE FORÇA MOTRIZ A GÁS · GUINDASTES E TRANSPORTADORES · MATERIAL CIRCULANTE FERROVIÁRIO · MÁQUINAS PARA ENSAIOS DE MATERIAIS · INSTALAÇÕES DE CONDICIONAMENTO DE AR · PONTES DE AÇO · INSTALAÇÕES HIDRÁULICAS DE AÇO · CONSTRUÇÕES METÁLICAS · BOMBAS · GASÓMETROS · CALDEIRAS A VAPOR CANALIZAÇÕES DE AÇO · MOTORES DIESEL TERRESTRES E MARÍTIMOS

REPRESENTAÇÃO GERAL PARA PORTUGAL E ULTRAMAR

INDUMA

MÁQUINAS INDUSTRIAIS LIMITADA

AVENIDA ANTÓNIO AUGUSTO DE AGUIAR, 88-3.° · LISBOA

59. Influência da pozolana no valor da fluência.

59.1. Método usado. — A fluência foi determinada sobre prismas de argamassa com o traço de 1:1, em peso, com $8 \times 8 \times 30$ cm, submetidos a uma tensão de compressão de 39,1 kg cm^{-2} aos 7 dias de idade. Foi usada a areia utilizada nos ensaios de resistência e de contracção (figs. 42 e 45) tendo a argamassa um $\frac{A}{C} = 0{,}328$. A conservação prévia, antes da carga dos prismas, e a conservação durante o ensaio foram feitas numa sala a uma temperatura média de 20° C com uma humidade relativa média de 70 %. As deformações foram medidas por meio de cordas vibrantes montadas em pernos de aço que atravessavam os prismas de lado a lado e colocados no instante da moldagem.

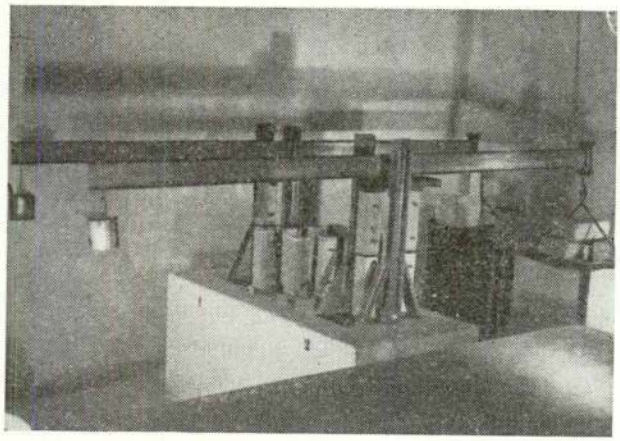


Fig. 46 — Montagem dos ensaios para o estudo da acção da pozolana na fluência do cimento (alav ncas de 5 toneladas).
Quatro espécimes em ensaio simultâneo em cada alavanca e espécimes livres para a correcção da contracção (prismas com $8 \times 8 \times 30$ cm).

Com o fim de corrigir a deformação dos prismas devida apenas à carga aplicada, da relaxação das cordas vibrantes e da contracção das argamassas livres de qualquer tensão, a cada prisma sujeito ao ensaio de fluência correspondia um prisma perfeitamente idêntico, conservado nas mesmas condições, mas não sujeito a qualquer tensão. Às deformações observadas nos prismas sujeitos à tensão constante eram deduzidas as deformações medidas nestes prismas livres.

A fig. 46 mostra a montagem utilizada neste ensaio.

59.2. Resultados obtidos. — No quadro XXXIV estão indicados os valores das fluências específicas das argamassas de cimento portland e das argamassas obtidas por substituição de 30 % do cimento por pozolana. Estes valores são medidos após 60 dias de carga.

QUADRO XXXIV

Influência da pozolana no valor da fluência

Cimento	Pozolana	Fluência	
		10^{-6} kg^{-1} cm^2	%
A_1	—	18,5	100
	Santo Antão moída a 8000 cm^2 g^{-1}	15,7	85
A_2	—	13,5	100
	Artificial n.° 1	14,3	106
B	—	9,1	100
	Artificial n.° 3	10,2	112
Moderado B	—	11,7	100
	Artificial n.° 3	9,2	79

Como se vê, a pozolana natural de Santo Antão faz diminuir a fluência do cimento portland base, A_1, de 15 %, e a pozolana artificial n.° 3 provoca um aumento de 12 % na fluência do cimento portland normal B e uma diminuição de 21 % na do cimento moderado B.

Mais uma vez se verifica portanto que a influência da pozolana não é específica mas depende da sua natureza e da do cimento portland base.

60. Reflexões sobre a substituição de cimento portland por pozolana. — Os resultados acabados de apresentar demonstram que a acção da pozolana sobre o cimento portland é muito complexa, e depende da natureza de ambos estes produtos. Assim, não se pode falar duma acção específica duma pozolana ou dum cimento; a modificação das propriedades deste faz-se duma maneira imprevisível, de que só a experiência directa pode fornecer o resultado.

É certo que, muitas vezes, feita a média da

variação das propriedades do betão pela introdução da pozolana, é possível tirar uma linha geral da acção pozolânica, como acontece por exemplo no caso das resistências e dos calores de hidratação, mas a verdade é que pode haver afastamentos notáveis dessa «evolução média», que, pràticamente, é necessário ter em conta, pois esses afastamentos estão longe de serem desprezíveis.

Por estes factos pensamos que, em face dum cimento portland e duma pozolana, apenas a determinação das propriedades dos betões com eles fabricados pode dizer qual a influência da pozolana nesse cimento e nesse betão, e a medição das suas grandezas e a sua cuidadosa interpretação poderá indicar as vantagens ou desvantagens da utilização duma tal pozolana. Veremos ainda, no capítulo seguinte, que a discussão da *percentagem de substituição* do cimento pela pozolana é também fundamental: as propriedades não variam sempre no mesmo sentido quando se procede a uma substituição progressiva do cimento pela pozolana.

Todavia, não é corrente dar a atenção devida a estes factos. Com efeito, a literatura americana habituou-nos a pensar que, quer os betões com pozolana, quer os betões fabricados com cimento pozolânico gozam dum certo número de propriedades que, como vamos mostrar no capítulo seguinte, na maior parte das vezes se não verificam.

Assim, é corrente atribuir na literatura americana as seguintes modificações nas propriedades dos betões fabricados com pozolana, ou com cimentos pozolânicos, relativamente às dos betões idênticos fabricados só com cimento portland, (72) (com uma dosagem de cimento igual à soma da dosagem de cimento com a de pozolana):

a) as pozolanas aumentam a água de amassadura do betão, para lhes conservar a mesma trabalhabilidade, medida, por exemplo, pelo abaixamento do cone de Abrams (excepto no caso das cinzas volantes em que a água de amassadura é reduzida); o aumento de água é menor para as pozolanas naturais do que para as artificiais;

b) as tensões de rotura dos betões com pozolana nas idades jóvens (7 e 28 dias) são inferiores às dos betões idênticos sem pozolana, mas nas idades avançadas as tensões de rotura são consideràvelmente maiores;

c) os módulos de elasticidade dos betões com pozolana são em geral menores do que os dos mesmos betões sem pozolana;

d) a fluência do betão, tanto em compressão como em tracção, é tanto maior quanto maior é a percentagem de pozolana;

e) a contracção por secagem dos betões com pozolana é tanto maior quanto maior é a percentagem de pozolana;

f) a permeabilidade do betão é consideràvelmente reduzida quando se usa pozolana, efeito que só é sensível, aliás, em idades superiores a 3 meses;

g) o calor de hidratação do cimento é reduzido numa proporção de cerca de metade da percentagem de substituição do cimento por pozolana;

h) a pozolana aumenta a resistência do betão aos ataques químicos quer de águas puras e carregadas de anidrido carbónico, quer de águas com sulfatos em dissolução, como a água do mar;

i) a pozolana possui ainda outras propriedades, como a de evitar a reacção entre a sílica de certos inertes usados na fabricação do betão, e os álcalis do cimento, mas confere ao betão uma menor resistência à acção do gelo.

Como vimos já, e como vamos ver no capítulo seguinte, para as propriedades referidas nas alíneas *d*) a *g*) não se podem fazer afirmações tão categóricas, pois estas dependem, numa larga medida, das naturezas do cimento e da pozolana.

A determinação rigorosa da influência duma pozolana num cimento deve ser feita estudando a variação duma propriedade com a quantidade de pozolana pela qual se vai substituindo o cimento, dentro dum intervalo de substituição do cimento por pozolana suficientemente grande. Assim se determina, com rigor, a variação do parâmetro dentro desse intervalo, o que permite escolher a percentagem de pozolana mais conveniente.

Como a influência duma pozolana varia com a qualidade do cimento, acresce ainda que os resultados encontrados com um determinado cimento só são válidos para esse cimento.

No capítulo que se vai seguir vamos apresentar um estudo comparado de diferentes pozolanas segundo este método, determinando a evolução das propriedades do cimento, como a sua resistência, o seu calor de hidratação, a sua permeabilidade, a sua contracção, etc. quando se substituem quantidades sucessivamente crescentes de

cimento, 10 %, 20 %, 30 %, etc., por pozolana.

Devemos contudo referir que, embora sem nosso conhecimento, já há alguns anos dois italianos, Cereseto e Rio, (74) seguiram este método para o estudo da acção pozolânica. O nosso trabalho, que vamos expor em seguida, foi, contudo, realizado sem que tivéssemos conhecimento do estudo citado de Cereseto e Rio.

CAPÍTULO 9

CIMENTOS POZOLÂNICOS E INFLUÊNCIA DO CLÍNQUER NA SUA QUALIDADE

61. Condições experimentais do estudo sistemático da influência da pozolana no cimento. — Neste estudo foram preparados cimentos pozolânicos com percentagens de pozolana de 0 a 50 %. Estes cimentos foram preparados por moedura, no laboratório, de clínquer de cimento portland preparado industrialmente com pozolanas artificiais (preparadas também industrialmente) e com pozolanas naturais.

Estes clínqueres eram triturados prèviamente num britador de maxilas (fig. 47) e, depois de

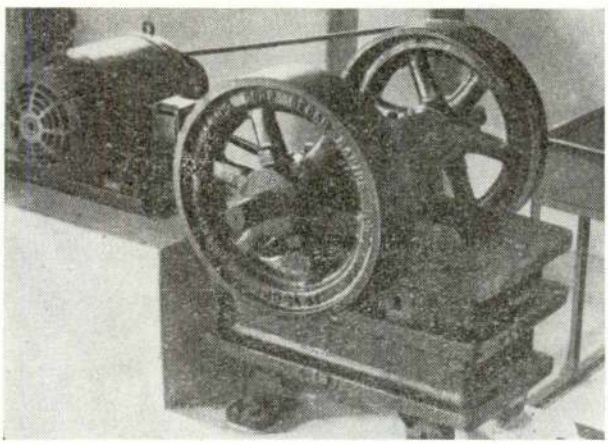


Fig. 47 — Britador de maxilas, de laboratório, usado para a trituração prévia do clínquer antes da sua introdução no moínho de bolas.

passados por um peneiro com 4,76 mm de abertura, de modo a eliminar as porções de dimensões superiores a esta, eram moídos num moínho de bolas de laboratório (fig. 48). Deste modo, a finura do material que ia para dentro do moínho de bolas era sempre a mesma.

A moedura foi efectuada com 45 kg de bolas de ferro e 15 kg da mistura de clínqueres adi-

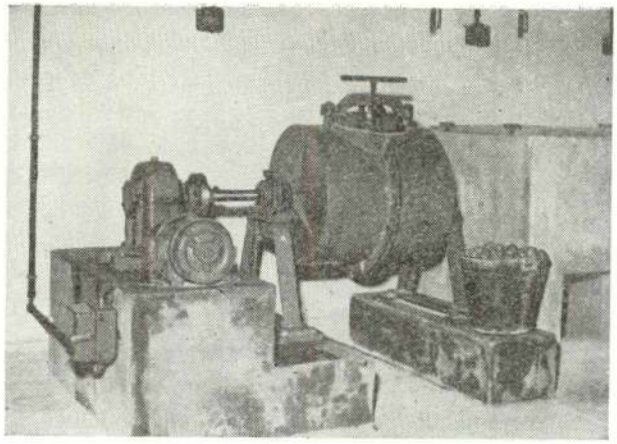


Fig. 48 — Moinho de bolas, de laboratório, usado na moedura dos cimentos pozolânicos.

cionada de 4 % de gesso em relação ao peso total de clínquer de cimento e pozolana (600 g). A duração desta moedura em todos os casos foi de 5 horas.

Nos quadros XXXVI e XXXVIII estão indicadas as finuras obtidas.

Embora os resíduos nos peneiros sejam sensìvelmente constantes, mostrando contudo uma tendência para diminuirem quando aumenta a quantidade de pozolana, as superfícies específicas aumentam notàvelmente, sobretudo no caso das

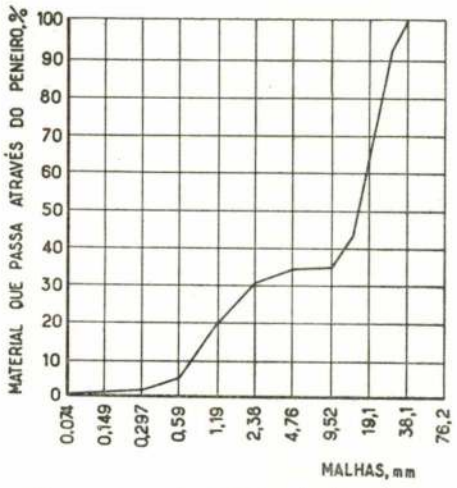


Fig. 49 — Curva granulométrica do inerte usado nos estudos das propriedades dos betões fabricados com cimentos pozolânicos.

Inertes rolados provenientes dos usados na construção da barragem de Castelo do Bode.

pozolanas mais friáveis (a de Santa Cruz e a de Santo Antão). A maior constância, tanto em superfície específica como em resíduos, é obtida com o inerte silicioso.

Com estes cimentos foram fabricados betões constituídos por inerte rolado, silicioso, da mesma natureza do usado nos estudos referidos no capítulo anterior e com a curva granulométrica indicada na fig. 49. A sua composição era:

godo (entre 38 mm e 9,52 mm)	1280 kg m^{-3}
areia	650 kg m^{-3}
cimento	300 kg m^{-3}
água	160 l m^{-3}.

A quantidade de água indicada foi usada nos betões fabricados com o cimento portland e com os cimentos pozolânicos com baixas percentagens de pozolana.

62. Primeira série de ensaios, com o clínquer I, pobre de óxido de cálcio. — Numa primeira série de ensaios em que se determinou com rigor a influência da pozolana sobre um dado cimento, foi usado um clínquer que apresentava a composição indicada no quadro XXXV.

Os componentes principais foram calculados pelo conhecido método de Bogue.

QUADRO XXXV

Composição química do clínquer I, moído com 4 % de gesso, usado na primeira série de ensaios do estudo sistemático da acção da pozolana no cimento (clínquer pobre de óxido de cálcio)

Óxidos elementares, %		Componentes principais	
Perda ao rubro	2,76		
Insolúvel . . .	1,35	$SiO_2 . 3\,OCa$ . .	37,2
OCa comb. . .	58,72	$SiO_2 . 2\,OCa$ . .	28,6
SiO_2	19,74	$O_3Al_2 . 3\,OCa$.	13,0
O_3Al_2	7,46	$O_3Al_2 . O_3Fe_2 .$	
O_3Fe_2	4,00	$. 4\,OCa$ . . .	12,2
SO_3	2,30	SO_4Ca	3,9
OCa livre . .	1,12		
OMg	2,08		
$OK_2 + ONa_2$ . .	0,40		

Trata-se pois dum clínquer pobre de cal, embora com um ligeiro excesso de silicato tricálcico sobre o silicato bicálcico.

Este clínquer foi moído até às finuras indicadas no quadro XXXVI, e nas condições descritas no § 61, com 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % e 50 % das seguintes pozolanas: artificial n.º 1, artificial n.º 2, natural de St.º Antão, natural italiana, artificial americana da marca Santa Cruz e com um sub-produto industrial resultante da despoeiração dos fumos duma fábrica de cimento (cinza volante) a que foi feita referência no cap. 7. Para termo de comparação da acção pozolânica foi ainda usado um inerte constituido por uma areia natural siliciosa contendo 97,9 % de SiO_2 e 0,5 % de OCa.

Com a utilização deste inerte também se teve em vista determinar uma possível acção da pozolana sobre a compacidade do betão, e eliminar a sua influência. Os resultados obtidos com este inerte (fig. 50) mostram contudo que não havia a recear qualquer acção sobre a compacidade do betão, pois as tensões de rotura do betão diminuem regularmente com o aumento da percentagem de inerte, e numa proporção tal que é exclusivamente devida à diminuição da dosagem de cimento.

63. Variação da trabalhabilidade com a natureza e dosagem da pozolana. — Durante a fabricação dos betões anteriormente indicados (§ 61) com os cimentos pozolânicos, procurou manter-se a sua trabalhabilidade constante, para o que houve necessidade de se alterar a quantidade de água de modo a conseguir esta finalidade, conforme está indicado na fig. 50. A trabalhabilidade que figura na parte inferior dos diagramas mostrados nesta figura foi medida pelo tempo de vibração de um cubo de 20 cm de aresta cheio de betão, com uma agulha vibratória colocada verticalmente no seu eixo; o tempo de vibração que se considera é o tempo necessário para que os elementos mais finos da argamassa aflorem à superfície tornando-a perfeitamente acabada, com uma camada contínua de elementos finos que lhe dá uma superfície rigorosamente plana.

Apenas no caso das pozolanas artificial n.º 2 e de Santa Cruz se não fez a correcção da água, tendo esta sido mantida constante e procedendo-se à determinação do tempo de vibração.

Como se vê todas as pozolanas artificiais exigem um aumento na água de amassadura à medida que a sua dosagem aumenta. O tempo de vibração do betão de cimento pozolânico com a pozolana n.º 2 passou de cerca de 7 s, sem pozolana, para 11 s com 30 % de pozolana, e, com

QUADRO XXXVI

Finuras dos cimentos pozolânicos da primeira série de ensaios (clínquer I pobre de óxido de cálcio) preparados no laboratório

Pozolana	Percentagem de pozolana	Resíduos nos peneiros de abertura:			Superfície específica Blaine $cm^2 g^{-1}$	Porosidade usada
		200 μ	89 μ	44 μ		
—	0	0,78	10,5	30,5	4200	0,505
Artificial N.° 1	10			34,0	4060	0,510
	20			33,0	4980	0,515
	30			31,5	6000	0,520
	40			30,0	6490	0,525
	50			30,0	6900	0,530
Artificial N.° 2	10	0,78	12,2	30,7	4330	0,512
	20	1,43	9,99	30,6	4910	0,519
	30	0,81	12,7	34,3	5740	0,526
	40	1,60	12,0	30,3	6010	0,533
	50	1,50	11,2	31,0	6700	0,540
Natural de St.° Antão	10	0,46	10,7	29,8	4900	0,512
	20	0,72	10,7	29,7	5670	0,519
	30	0,58	10,2	29,3	6860	0,526
	40	0,73	8,3	29,0	8060	0,533
	50	0,69	7,5	28,5	9420	0,540
Cinza volante	10	0,59	6,55	26,0	4340	0,512
	20	0,42	6,45	25,5	4440	0,519
	30	0,26	5,48	24,0	4830	0,526
	40	0,22	4,53	21,5	4900	0,533
Artificial, americana, da fábrica de St.ª Cruz	10	0,58	11,50	31,0	4690	0,512
	20	0,30	8,9	23,0	6800	0,519
	30	0,27	7,61	25,0	8770	0,526
	40	0,29	5,63	23,0	10650	0,533
	50	0,24	4,5	20,0	13300	0,540
Natural, italiana	10	0,71	9,3	31,2	4420	0,512
	20	1,03	8,8	31,0	5400	0,519
	30	0,83	11,65	31,5	5550	0,526
	40	0,56	10,9	30,5	5750	0,533
	50	0,95	5,9	29,0	7140	0,540
Inerte silicioso	10	0,43	7,85	28,5	4010	0,530
	20	0,66	7 04	27.5	4050	0,530
	30	0,51	7,60	27,0	4200	0,530
	40	0,41	6,96	30,0	4260	0,530
	50	0,26	6,74	28,5	4280	0,530

50 % de pozolana este tempo atingiu 36 s. Para restabelecer o tempo de 7 s seria necessário aumentar a quantidade de água de cerca de 50 lm^{-3} (30 %) o que faria ainda baixar a resistência de 45 %.

O aumento do tempo de vibração também não é muito importante até 30 % de pozolana de Santa Cruz (apenas de 7 s a 13 s) mas para substituições de cimento superiores a 30 % o aumento de tempo é importante, passando para o dobro.

No caso das pozolanas naturais, tanto de Santo Antão como italiana, a *trabalhabilidade mantém-se constante* com o aumento da percentagem da pozolana.

Quando se utilizam as cinzas volantes há necessidade de retirar água ao betão, à medida que aumenta a sua percentagem para manter a trabalhabilidade constante. Este é um resultado que é, geralmente, referido na literatura (75) e é atribuído à forma esférica das partículas deste material. Com efeito, as cinzas volantes são constituídas, como vimos no § 4, por esferas vitrosas provenientes da fusão da argila do carvão e por esferas de magnetite provenientes do ferro das pirites. Deve-se, todavia, notar que estas cinzas volantes foram moídas em conjunto com o clínquer, o que provàvelmente lhes teria tirado esta forma; mas noutra série de ensaios em que as cinzas foram misturadas ao cimento na própria betoneira, obteve-se o mesmo resultado, isto é, supressão de água para manter a trabalhabilidade constante, à medida que a sua proporção aumenta.

No caso do cimento moído com o inerte também há necessidade de retirar água de amassadura à medida que a sua percentagem sobe, para restabelecer a trabalhabilidade.

64. Variação da resistência com a natureza e dosagem da pozolana. — Na fig. 50 estão representadas as tensões de rotura dos betões fabricados com os cimentos pozolânicos referidos, obtidas a 7 dias, 28 dias, 6 meses e 2 anos.

Como se vê, a diferença de comportamento entre as diversas pozolanas é notável. É impossível falar duma lei geral de variação da resistência com a percentagem de sustituição de pozolana.

A pozolana artificial n.º 2 comporta-se quase como um inerte, pois em nenhum caso se obtém aumento de resistência, nem com o tempo, nem com a percentagem de pozolana.

Se se fizesse a correcção da dosagem de água, como vimos no parágrafo anterior, a queda na resistência ainda mais se acentuaria tendendo para a queda verificada com o inerte.

Com a pozolana de Santo Antão obtém-se um resultado muito nítido a 28 dias e a 6 meses, concluindo-se que a melhor proporção é a de 20 %. Mas a subida na resistência de 6 meses para 2 anos na proporção de 20 % de pozolana é muito menor do que nas outras proporções. A 2 anos, o máximo de resistência é obtido com percentagens de pozolana de 30 %. Para proporções superiores a 30 %, começa a haver uma queda importante nas resistências. O cimento mostra portanto uma sensibilidade notável à variação da quantidade de pozolana.

A pozolana de Santo Antão, quando empregada no cimento pozolânico mantém ainda a sua característica notável duma alta reactividade inicial pois a subida das resistências dos 7 para os 28 dias chega a atingir 100 % (com 20 % de pozolana) enquanto para as outras pozolanas o máximo que se obtém é de 73 % (para 30 % de pozolana de Santa Cruz). Em contrapartida, a subida da resistência de 28 dias para 2 anos já não é tão acusada como para os outros cimentos pozolânicos.

Com as cinzas volantes obtém-se sempre um crescimento da resistência, mesmo para percentagens de substituição de 40 %, não sendo diminuída a resistência nas idade jovens, ao contrário do que correntemente é afirmado na literatura americana. Neste caso teria sido desejável prolongar a série de ensaios para percentagens superiores a 40 %.

Com a pozolana italiana as tensões de rotura mantêm-se pràticamente constantes até 20 % de pozolana. A 2 anos, a subida na tensão de rotura é já acusada até 20 % e, para percentagens superiores, até mesmo de 30 %, o decréscimo nas tensões de rotura é já importante.

Com a pozolana artificial de Santa Cruz as resistências são pràticamente constantes nas idades jovens, e, a 6 meses há um aumento notável na resistência até 40 % de substituição.

O mesmo se verifica a 2 anos, onde aliás as tensões de rotura sobem até percentagens de 50 %. Como no caso das cinzas volantes, tam-

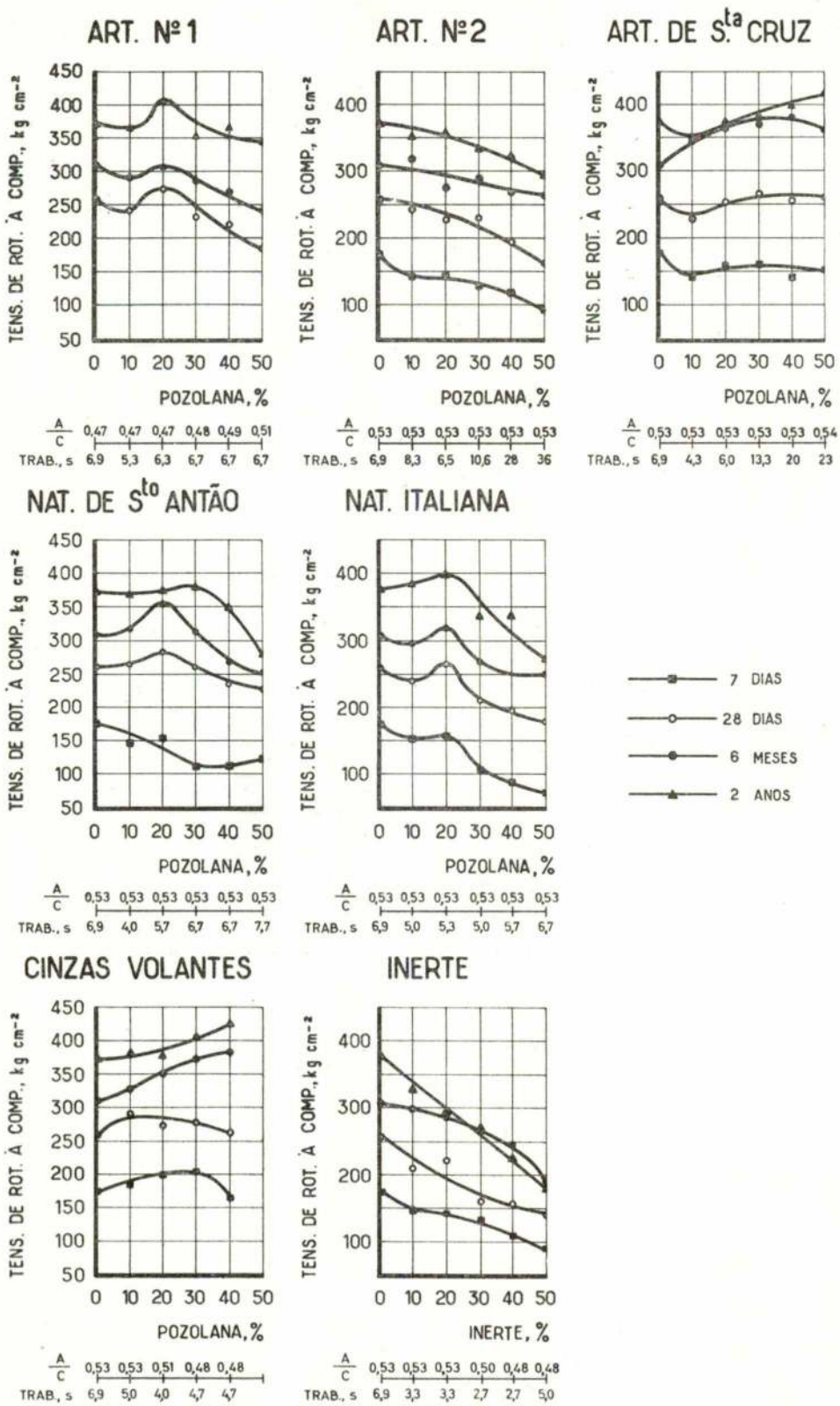


Fig. 50 — Tensões de rotura do betão fabricado na primeira série de ensaios com os cimentos pozolânicos que têm por base o clínquer 1 pobre de óxido de cálcio.

bém tinha sido desejável prolongar esta série de ensaios para além de 50 % de substituição de cimento por pozolana.

Com o inerte, como não podia deixar de ser, há sempre uma queda na resistência.

No caso da pozolana n.º 1 os resultados são semelhantes aos obtidos com as pozolanas italiana ou artificial n.º 2, havendo uma tendência para aumentar as resistências até 20 % da substituição de cimento por pozolana.

65. Segunda série de ensaios, com o clínquer II, rico de óxido de cálcio. — Os resultados acabados de referir no parágrafo anterior mostram bem que não se pode falar numa percentagem óptima de substituição de cimento por pozolana. Essa percentagem varia com a natureza da pozolana.

Mas vamos ver agora que a natureza do clínquer também influi bastante na reactividade da

QUADRO XXXVII

Composição química do clínquer II, moido com 4 % de gesso, usado na segunda série de ensaios do estudo sistemático da acção da pozolana no cimento (clínquer rico em óxido de cálcio)

Óxidos elementares, %		Componentes principais	
Perda ao rubro	1,48	$Si O_2 . 3 OCa$	57,5
Insolúvel . . .	0,42	$Si O_2 . 2 OCa$	8,5
OCa comb. . .	61,70	$O_3 Al_2 . 3 OCa$	8,0
SiO_2	18,10	$O_3 Al_2 . O_3 Fe_2 . 4 OCa$	15,8
$O_3 Al_2$	6,39		
$O_3 Fe_2$	5,21	$SO_4 Ca$ . . .	3,6
SO_3	2,13		
OCa livre . .	3,50		
OMg	2,47		

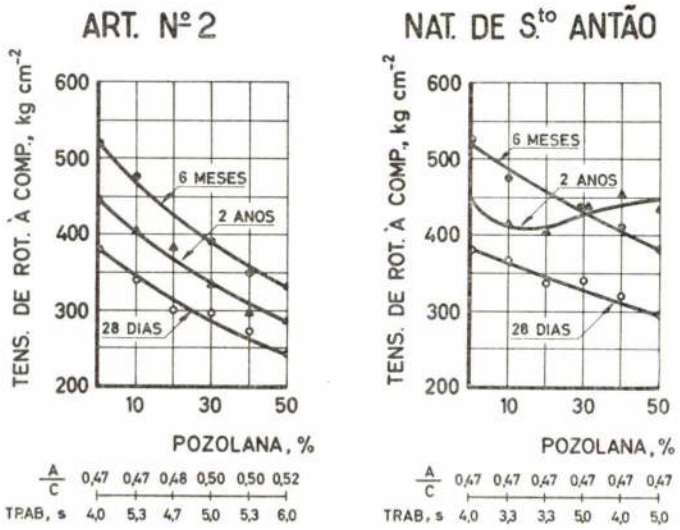


Fig. 51 — Tensões de rotura do betão fabricado na segunda série de ensaios com os cimentos pozolânicos que têm por base o clínquer II rico de óxido de cálcio.

pozolana. Com efeito, a utilização dum clínquer diferente, por exemplo, bastante rico em óxido de cálcio e em silicato tricálcico, apresentando a composição indicada no quadro XXXVII moído com as pozolanas artificial n.º 2 e natural de Santo Antão, segundo a técnica já descrita no § 61, conduziu aos resultados que vamos passar a referir.

As finuras dos cimentos obtidos estão indicadas no quadro XXXVIII, e na fig. 51 estão indicados os resultados obtidos nos ensaios de resistência.

Os betões, rigorosamente idênticos aos anteriores, fabricados com estes cimentos pozolânicos mostraram a mesma sensibilidade à trabalhabilidade: necessidade de aumentar a dosagem de água à medida que aumenta a dosagem de pozolana artificial, e manutenção da dosagem de água constante no caso da pozolana natural.

As tensões de rotura do betão fabricado com

QUADRO XXXVIII

Finuras dos cimentos pozolânicos da segunda série de ensaios (clínquer II rico em óxido de cálcio) preparados no laboratório

Pozolana	Percentagem de pozolana	Resíduos, % no peneiro de abertura 44 μ	Superfície específica Blaine $cm^2\ g^{-1}$	Porosidade usada
—	0	27,2	5200	0,505
Artificial n.º 2	10	26,0	6450	0,512
	20	27,0	6400	0,519
	30	29,0	7270	0,526
	40	30,2	7370	0,533
	50	32,0	8010	0,540
Natural de Santo Antão	10	25,0	6250	0,512
	20	24,6	7330	0,519
	30	23,5	7790	0,526
	40	23,0	8330	0,533
	50	21,5	10230	0,540

o cimento portland sem pozolana, indicadas na fig. 51, são mais elevadas do que as obtidas com o clínquer anterior, pois aquele é muito mais rico em silicato tricálcico.

Por outro lado, observa-se um facto curioso: uma queda sistemática na tensão de rotura dos 6 meses para os dois anos, com excepção apenas dos betões fabricados com o cimento pozolânico com 40 % e 50 % de pozolana da ilha de Santo Antão.

66. Terceira série de ensaios, com um cimento natural. — Numa terceira série de ensaios foi estudada a acção da pozolana natural de Santo Antão num cimento natural, que se designa muitas vezes no comércio do nosso país por cal hidráulica.

Este cimento natural, obtido no comércio, apresentava a composição química indicada no quadro XXXIX.

Como a cozedura deste produto se faz por volta de 1000º C, os compostos mais prováveis que

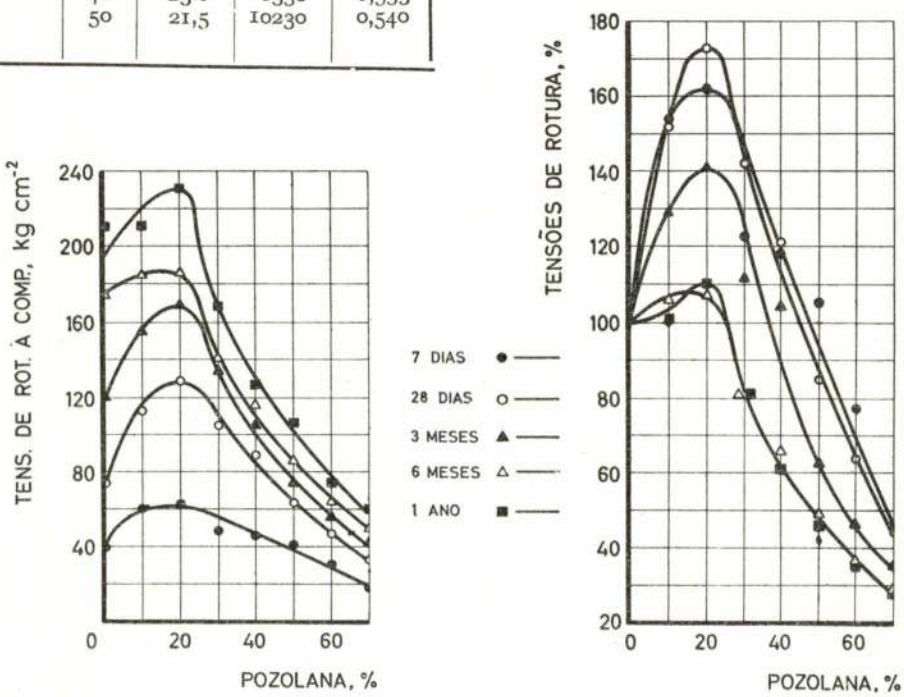


Fig. 52 — Tensões de rotura do betão fabricado na terceira série de ensaios, com o cimento natural e a pozolana natural de St.º Antão.

Betão composto com inertes britados, calcários, da região de Lisboa: meio cascalho (mód. de finura, 8,12) 645 kg, murraça n.º 1 (mód. de finura, 7,12) 332 kg, granito n.º 2 (mód. de finura, 4,86) 332 kg, areia siliciosa, natural (mód. de finura 2,91) 535 kg. Cimento natural (ou cimento natural e pozolana) 300 kg. Água (constante em toda a série de ensaios) 189 l.

Trabalhabilidade medida pelo tempo de vibração de um cubo, 2 s.

se formam são o silicato bicálcico, o aluminato bicálcico e o alumino-ferrito tetracálcico. (76) Na composição deste produto não deve pois existir o silicato tricálcico.

Este cimento serviu pois para comprovar a acção da pozolana sobre o silicato bicálcico, a que fizemos referência no § 20, citando o curioso trabalho de Ferrari. (44)

Por não dispormos de clínquer deste cimento os betões foram fabricados com substituição de cimento natural pela pozolana natural de Santo Antão moída a 8000 $cm^2\ g^{-1}$ adicionada na betoneira, segundo a técnica corrente destas amassaduras (§ 49).

QUADRO XXXIX

Composição química do cimento natural usado na terceira série de ensaios

Óxidos elementares, %		Componentes principais	
Perda ao rubro	6,54	SiO_2 . 2 OCa .	65,3
Insolúvel . . .	3,71	O_3Al_2 . 2 OCa .	12,1
OCa	53,25	O_3Al_2 . O_3Fe_2 .	
SiO_2	22,78	. 4 OCa . .	8,6
O_3Al_2	7,46		
O_3Fe_2	2,39		
SO_3	2,46		
OMg	3,30		

Na fig. 52 estão indicadas as tensões de rotura dos betões fabricados com percentagens de substituição de 0 a 70 % de cimento natural pela pozolana natural de Santo Antão.

Observa-se em primeiro lugar que a acção da pozolana neste cimento tem um carácter completamente diferente do carácter da acção sobre os outros cimentos (figs. 50 e 51); as tensões de rotura crescem muito nas primeiras idades: com 20 % de pozolana a 7 dias, são quase as tensões de rotura do betão sem pozolana a 28 dias. Além disto a pozolana provoca uma subida na tensão de rotura em relação ao betão sem pozolana até percentagens de 40 a 50 % nas primeiras idades e até 20 % nas idades mais avançadas. Estes resultados mostram portanto uma acção muito marcada da pozolana, sobretudo nas primeiras idades, o que demonstra a acção desta sobre o silicato bicálcico, como foi previsto pelas experiências de Ferrari. (44)

67. Influência da natureza do cimento base na resistência do cimento pozolânico. — Os resultados referidos nos parágrafos anteriores, 64, 65 e 66 podem ser agora apresentados sob outro aspecto. Com efeito, na fig. 53 estão indicadas as tensões de rotura relativas ao cimento portland base, a 28 dias, 6 meses e 2 anos, dos cimentos pozolânicos preparados com os dois clínqueres em estudo, I e II, pobre e rico de óxido de cálcio e ainda do cimento preparado com o clínquer I, pobre de óxido de cálcio, com substituição progressiva por inerte.

Como se vê, o comportamento do clínquer II, rico em óxido de cálcio, com a pozolana está mais próximo do comportamento do clínquer com inerte do que do clínquer I, pobre em óxido de cálcio com pozolana. A 6 meses de idade mesmo, há uma nítida diminuição no valor do cimento pozolânico em relação a um cimento preparado com inerte.

Apenas a 2 anos o clínquer II mostra vantagens, quando se substituem altas percentagens, de 40 ou 50 %, por pozolana natural de Santo Antão, sobre o clínquer I. No que se refere à pozolana artificial, quando esta é empregada com o clínquer II, as suas desvantagens são evidentes.

Na fig. 52 estão indicadas também as tensões de rotura dos betões de cimento natural com substituição progressiva por pozolana de Santo Antão, em percentagem das tensões de rotura do betão sem pozolana. O andamento destas curvas faz lembrar o andamento correspondente das curvas referentes à mesma pozolana com o clínquer I (fig. 53), o que põe em evidência a reactividade entre a pozolana e o silicato bicálcico.

A explicação do facto do clínquer II, rico em óxido de cálcio, se comportar pior com as pozolanas do que o clínquer I com o inerte (fig. 53), pode ser talvez dada pela interpretação dos resultados da análise térmica diferencial (§ 23.2, c).

Com efeito, a reacção da pozolana com o hidróxido de cálcio resulta duma acção química muito localizada, sendo natural prever que os produtos da reacção se não espalhem uniformemente, devido à natureza coloidal da maior parte dos componentes hidratados. Por isso, durante a hidrólise do silicato tricálcico, o hidróxido de

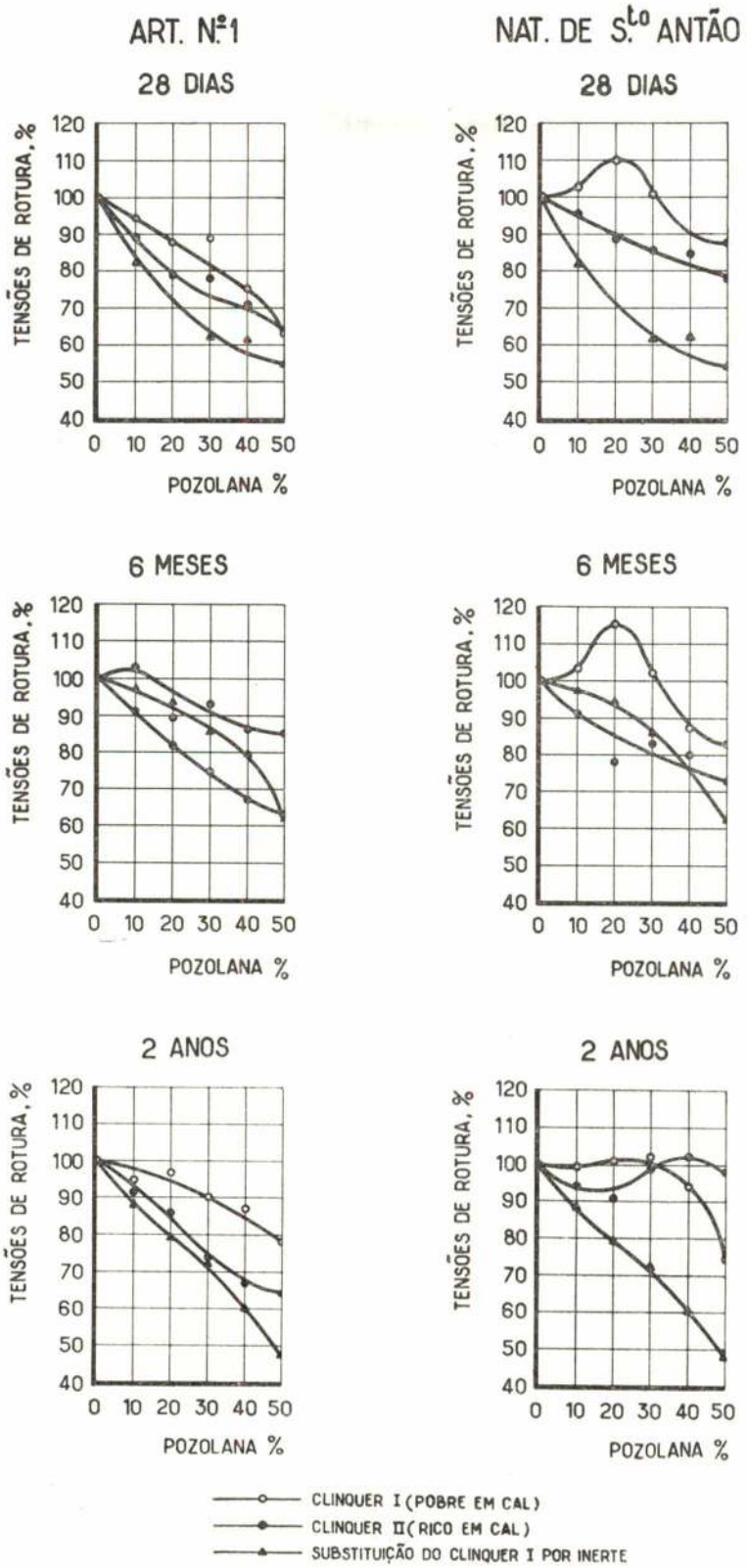


Fig. 53 — Tensões de rotura, relativas às do cimento portland base, dos cimentos pozolânicos indicados nas figs. 50 e 51.

cálcio libertado ficará protegido pelos gels que resultam da reacção da pozolana com este, obtendo-se portanto, em esquema, grãos constituídos por compostos de basicidade crescente para o seu interior, o qual será apenas constituído por hidróxido de cálcio. Deste modo, acontecendo este fenómeno a grande parte do hidróxido de cálcio que se vai formando pela hidrólise do silicato tricálcico, este vai tendo cada vez mais dificuldade em se hidrolisar, visto que, como se sabe, necessita estar em contacto com soluções saturadas de cal para o fazer (§ 78).

É desta dificuldade maior que resulta uma acção negativa, digamos assim, da pozolana; esta dificulta a hidrólise do silicato tricálcico pela formação de compostos pouco básicos na periferia dos grãos de hidróxido de cálcio e portanto o cimento não pode desenvolver toda a sua resistência.

Os resultados acabados de apresentar mostram como é *necessário estudar as reacções entre a pozolana e os componentes do cimento*, não bastando, para este efeito, o que já é conhecido das reacções entre a pozolana e o hidróxido de cálcio.

68. Variação do calor de hidratação com a natureza e dosagem da pozolana nos cimentos pozolânicos preparados com o clínquer I. — No quadro XL estão indicados os calores de hidratação dos cimentos pozolânicos preparados com o clínquer I pobre de óxido de cálcio com 0 % e com 30 % de pozolana aos 3, 7 e 28 dias e só aos 7 dias no caso dos cimentos preparados com outras proporções de pozolana.

Considerando os resultados obtidos com 30 %, fàcilmente se verifica que a pozolana que mais influência tem no abaixamento do calor de hidratação é a de Santa Cruz, baixando-o em média para 72 % do valor correspondente ao do cimento base.

Em seguida vem a pozolana de Santo Antão, que baixa o calor de hidratação do cimento de cerca de 76 %.

A cinza volante é o produto que menos influência tem no abaixamento do calor de hidratação, passando-o para 83 % do do cimento base.

Na fig. 54 estão representados estes resultados. As curvas a tracejado dos calores de hidratação a 3 e a 28 dias foram desenhadas por paralelismo com os resultados obtidos a 7 dias. Como se vê, a grandeza e a lei da influência da pozolana no abaixamento do calor de hidratação é variável com a natureza da pozolana, não se podendo falar com rigor em termos gerais.

QUADRO XL

Calores de hidratação dos cimentos pozolânicos preparados com clinquer I, pobre de óxido de cálcio

Pozolana	Percentagem de pozolana	Calor de hidratação cal g^{-1}		
		3 dias	7 dias	28 dias
Clínquer I, pobre de cal	0	60	73	78
Pozolana artificial N.º 2	10	—	68	—
	20	—	60	—
	30	46	55	63
	40	—	42	—
	50	—	41	—
Pozolana artificial de Santa Cruz	10	—	61	—
	20	—	57	—
	30	43	54	59
	40	—	51	—
	50	—	50	—
Cinza volante	10	—	67	—
	20	—	59	—
	30	55	60	70
	40	—	58	—
Pozolana natural de Santo Antão	10	—	63	—
	20	—	61	—
	30	45	54	61
	40	—	49	—
	50	—	31	—
Pozolana natural italiana	10	—	66	—
	20	—	58	—
	30	46	50	67
	40	—	46	—
	50	—	42	—
Inerte (areia siliciosa)	10	—	62	—
	20	—	52	—
	30	41	49	57
	40	—	44	—
	50	—	37	—

69. Comparação dos calores de hidratação com as resistências dos cimentos pozolânicos preparados com o clínquer I. — Como já foi dito no capítulo anterior, a consideração exclusiva do calor de hidratação tem pouco interesse, pois normalmente o que interessa considerar nas aplicações é a relação entre o calor de hidratação e a resistência. Com efeito, quanto menor for a resistência dum ligante maior terá de ser a sua dosagem para se obter uma dada resistência, e como a temperatura alcançada no betão em

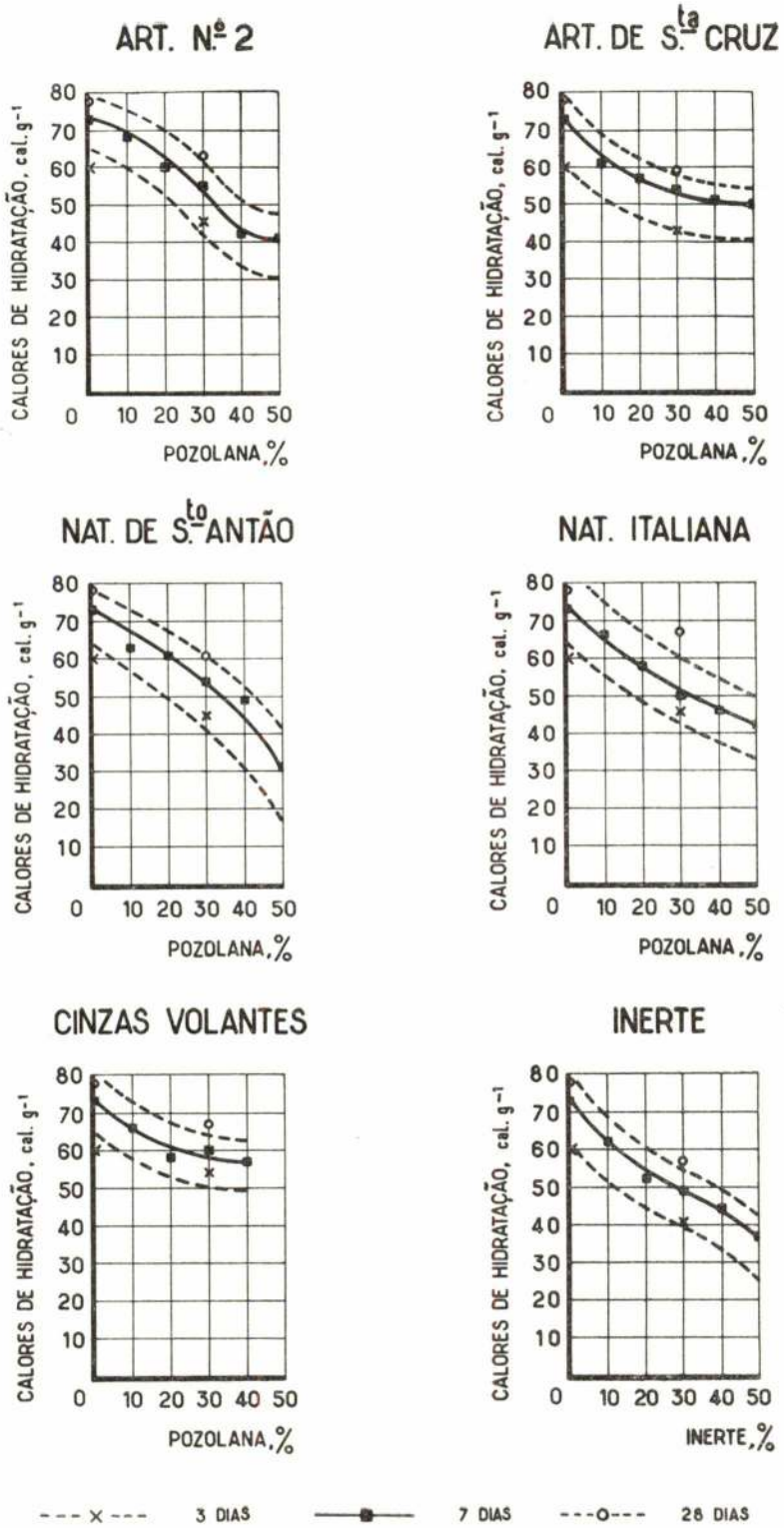


Fig. 54 — Calores de hidratação dos cimentos pozolânicos preparados com o clínquer 1, pobre de óxido de cálcio.

Representação gráfica dos valores indicados no quadro XL.

massa é tanto maior quanto maior é a dosagem de ligante, pode não interessar por vezes a utilização de ligantes com calor de hidratação baixo, se ele tiver de ser empregado em maiores dosagens.

Como já foi feito no capítulo anterior, vamos proceder à comparação das variações relativas do calor de hidratação destes cimentos pozolânicos relativamente ao calor de hidratação do cimento base, com as variações relativas de resistência destes cimentos pozolânicos relativamente à resistência obtida com o cimento base.

Para este efeito basta achar a percentagem c do valor do calor de hidratação dum dado cimento pozolânico em relação ao calor de hidratação do cimento base (que se acha fàcilmente a partir dos elementos indicados no quadro XL e na fig. 54) e a percentagem σ do valor da tensão de rotura do mesmo cimento em relação ao cimento portland base (que é fácil tirar das curvas da fig. 50).

No quadro XLI estão indicados os valores de $\frac{c}{\sigma}$ a 7 dias e a 28 dias pois não foram determinadas as tensões de rotura a 3 dias, não sendo portanto possível determinar o valor deste cociente a 3 dias.

Com o fim de facilitar a apresentação dos resultados, neste quadro estão indicados os valores médios deste cociente determinados para as percentagens de 10 a 50 % de pozolana a 7 dias e a 28 dias, podendo portanto fazer-se um estudo comparativo dos valores das diferentes pozolanas.

Este quadro mostra que a pozolana mais eficiente é a constituída pelas cinzas volantes: apesar destas, como vimos, baixarem pouco o calor de hidratação a sua influência na tensão de rotura é notável, pois que se obtém uma eficiência da ordem de 19 %, isto é, o calor de hidratação de um betão de cimento pozolânico fabricado com as cinzas volantes é de 19 % inferior ao do betão de cimento portland com a mesma tensão de rotura.

Em seguida vem a pozolana de Santa Cruz e depois a pozolana natural de Santo Antão, com uma eficiência de 15 %.

Verifica-se também, tal como já se tinha encontrado no capítulo anterior, que a 7 dias a eficiência do cimento pozolânico é contrária à que se obtém a 28 dias e a idades mais avançadas. Em geral o cociente $\frac{c}{\sigma}$ é superior a 1, o que indica que as tensões são demasiadamente baixas para o calor desenvolvido.

QUADRO XLI

Valor médio da relação entre o calor de hidratação comparado com as resistências conferidos por diferentes pozolanas ao clínquer I pobre de óxido de cálcio

Pozolana	7 dias	28 dias	Valor médio global
Clínquer moído	1,00	1,00	1,00
Artificial n.º 2.	1,03	0,94	0,98
Artificial de Santa Cruz	0,87	0,78	0,82
Cinza volante	0,77	0,85	0,81
Natural de Santo Antão	0,96	0,74	0,85
Natural italiana	1,13	1,00	1,06
Inerte (areia siliciosa)	0,93	1,07	1,00
Pozolana de Segni (74)	1,12	0,96	1,04
Pozolana de Bacoli (74)	1,30	0,95	1,12

Este facto não tem uma importância grande pois, como já foi acentuado no capítulo anterior, nas grandes massas de betão as tensões desenvolvidas a 7 dias não são importantes: apenas bastantes dias depois do betão começar a arrefecer há o perigo do desenvolvimento de tensões de tracção, as quais só aparecem depois de algumas semanas. (70) (71)

O resultado obtido com o inerte deve ser atribuído mais á dispersão dos ensaios do que à lei de variação das tensões de rotura com o tempo, como aliás se é levado a pensar ao observar os diagramas da fig. 50. Mas em média a eficiência é unitária, como não podia deixar de ser, tratando-se de um inerte.

Com o intuito de compararmos os nossos resultados com os obtidos por Cereseto e Rio e publicados no artigo já referido, (74) na parte inferior do quadro XLI figuram os resultados dos cálculos feitos por nós dos valores médios dos cocientes $\frac{c}{\sigma}$, calculados exactamente como no caso que vimos a referir. Como se vê, a eficiência destes cimentos pozolânicos não é muito grande e situa-se perto dos piores resultados por nós obtidos. Conquanto as tensões de rotura por eles obtidas sejam maiores que as nossas, aquelas

descem quase sempre quando se substitui cimento por pozolana, excepto no caso da pozolana de Sacrofano que, com 10 % provoca uma subida de 8 % na tensão de rotura. Mas como os calores de hidratação só foram determinados para as pozolanas de Segni e de Bacoli só para estas foi possível fazer estes cálculos. Com a pozolana de Segni também estes autores obtiveram uma subida na tensão de rotura com 20 % de substituição, da ordem de 4 %.

Voltando aos nossos resultados e comparando agora os calores de hidratação até 28 dias com as tensões de rotura desenvolvidas a longo prazo, comparação que também interessa quando o cimento é chamado a desenvolver a sua resistência máxima ao fim de um largo período de tempo, poderá então tomar-se a soma dos calores de hidratação a 3 dias, 7 dias e 28 dias, e dividi-la pela tensão de rotura dos betões a 2 anos. Este cálculo foi realizado apenas para os betões de cimento pozolânico com 30 % de pozolana, e os resultados obtidos estão indicados no quadro XLII.

Estes resultados mostram que a pozolana mais eficaz é ainda a de Santa Cruz que faz baixar o coeficiente do calor inicial de hidratação comparado com a resistência a longo prazo de 30 %; em seguida vem a pozolana natural de Santo Antão, que melhora o cimento sob este ponto de vista de 26 %; depois vem a cinza volante, que o melhora de 19 % e em seguida a pozolana artificial n.º 2, comparável com a italiana, que provocam uma melhoria de 13 e 15 % respectivamente.

O inerte, como já se tinha visto anteriormente, deixa o cimento pràticamente inalterado sob este aspecto.

70. Variação do calor de hidratação e sua comparação com as resistências, dos cimentos pozolânicos preparados com o clínquer II. — Se a influência da natureza do clínquer é importante no valor das tensões de rotura não menos importante o é também no valor dos calores de hidratação.

QUADRO XLII

Relação entre o calor inicial de hidratação (até 28 dias) e a tensão de rotura a 2 anos conferidos por 30 % de substituição do clínquer I por diferentes pozolanas

Cimento pozolânico preparado com o clinquer I	Cociente da soma dos calores de hidratação a 3d, 7d e 28d pela tensão de rotura a 2 anos cal g^{-1} kg^{-1} cm^2	Valor relativo ao cimento moído sem pozolana, %
Clínquer I moído sem pozolana	0,570	100
Com 30 % de pozolana artificial n.º 2	0,495	87
Com 30 % de pozolana artificial de Santa Cruz	0,398	70
Com 30 % de cinza volante	0,464	81
Com 30 % de pozolana natural de Santo Antão	0,425	74
Com 30 % de pozolana italiana	0,485	85
Com 30 % de inerte	0,568	100

Com efeito, os calores de hidratação dos cimentos pozolânicos fabricadas com o clínquer II, rico de silicato tricálcico (§ 65), quadro XXXVII, e com as pozolanas artificial n.º 2 e natural de Santo Antão estão indicados no quadro XLIII e na fig. 55.

Como se vê, a pozolana de Santo Antão mantém ainda a notável influência no abaixamento do calor de hidratação, que chega a ser dupla da influência da pozolana artificial.

Fazendo o cociente do valor relativo do calor de hidratação a 28 dias pelo valor relativo da resistência a 28 dias, conforme se explicou no parágrafo anterior, obtêm-se os abaixamentos do calor de hidratação comparado com as resistências que estão indicados no quadro XLIV.

Agora vê-se claramente como o cimento pozolânico fabricado com o clínquer rico de cal e com a pozolana artificial n.º 2 não tem interesse, pois com ele não se obtém nunca, para

QUADRO XLIII

Calores de hidratação dos cimentos pozolânicos fabricados com o clínquer II rico em óxido de cálcio

Pozolana	Percentagem de pozolana	Calores de hidratação, a 28 dias	
		cal g^{-1}	%
Clínquer II, rico de cal	—	73	100
Artificial n.º 2	10	69	94
	20	65	89
	30	63	86
	40	60	82
	50	58	79
Natural de Santo Antão	10	66	90
	20	56	77
	30	51	70
	40	44	60
	50	41	56

QUADRO XLIV

Calores de hidratação comparados com as resistências, a 28 dias, conferidos pelas pozolanas artificial n.º 2 e natural de Santo Antão ao clínquer II rico em óxido de cálcio

Pozolana	Percentagem	$\frac{c}{\sigma}$ a 28 dias
Clínquer II, rico em óxido de cálcio	—	1,00
Artificial n.º 2	10	1,06
	20	1,12
	30	1,11
	40	1,15
	50	1,23
Valor médio de 10 a 50 %		1,13
Natural de St.º Antão	10	0,95
	20	0,87
	30	0,82
	40	0,71
	50	0,72
Valor médio de 10 a 50 %		0,81

as tensões de rotura obtidas só com o cimento base, abaixamentos nas temperaturas devidas

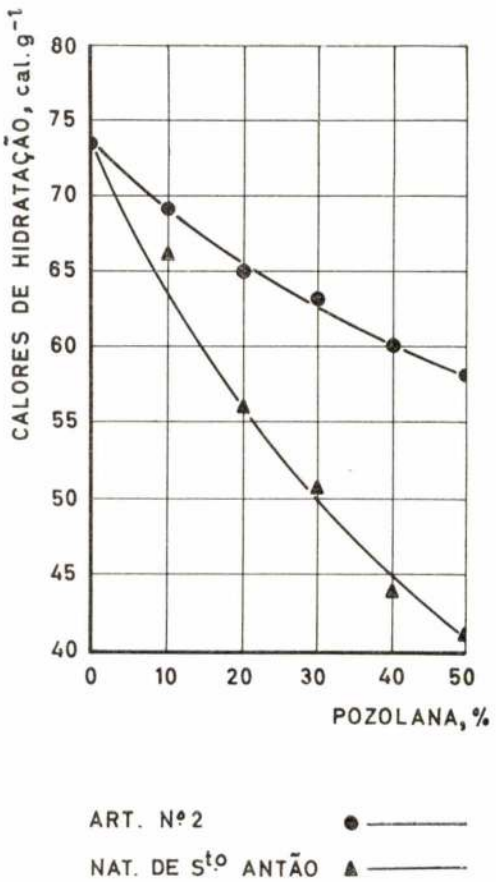
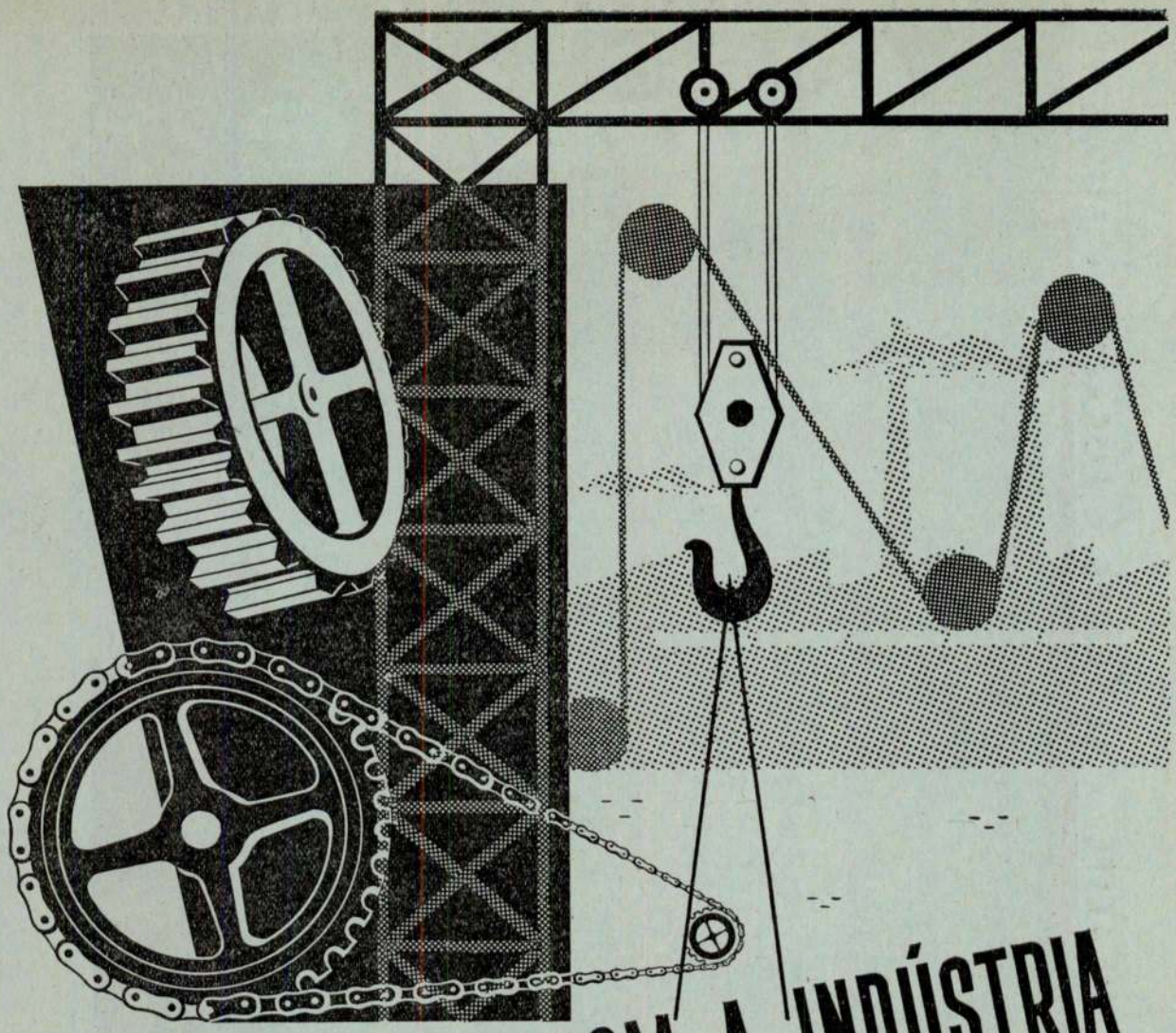


Fig. 55 — Calores de hidratação dos cimentos pozolânicos preparados com o clínquer II, rico de óxido de cálcio. Representação gráfica dos valores indicados no quadro XLIII.

aos calores de hidratação: o cociente $\frac{c}{\sigma}$ é sempre superior à unidade, enquanto no caso do cimento pozolânico fabricado com a pozolana natural de Santo Antão este cociente é sempre inferior à unidade, atingindo o valor médio de 0,81, que é no entanto superior ao de 0,74 obtido com o clínquer pobre de cal (quadro XLI).

71. Variação do calor de hidratação e sua comparação com as resistências, das misturas de cimento natural com a pozolana de Santo Antão. — Como vimos no § 66 os resultados mais interessantes obtidos com a substituição do cimento natural por pozolana natural de Santo Antão, foram aqueles que se obtiveram com 20 % de substituição. Por este facto fez-se a determinação do calor de hidratação a 7 e a 28 dias do cimento natural, e das suas misturas com 20 e 30 % de pozolana de Santo Antão.



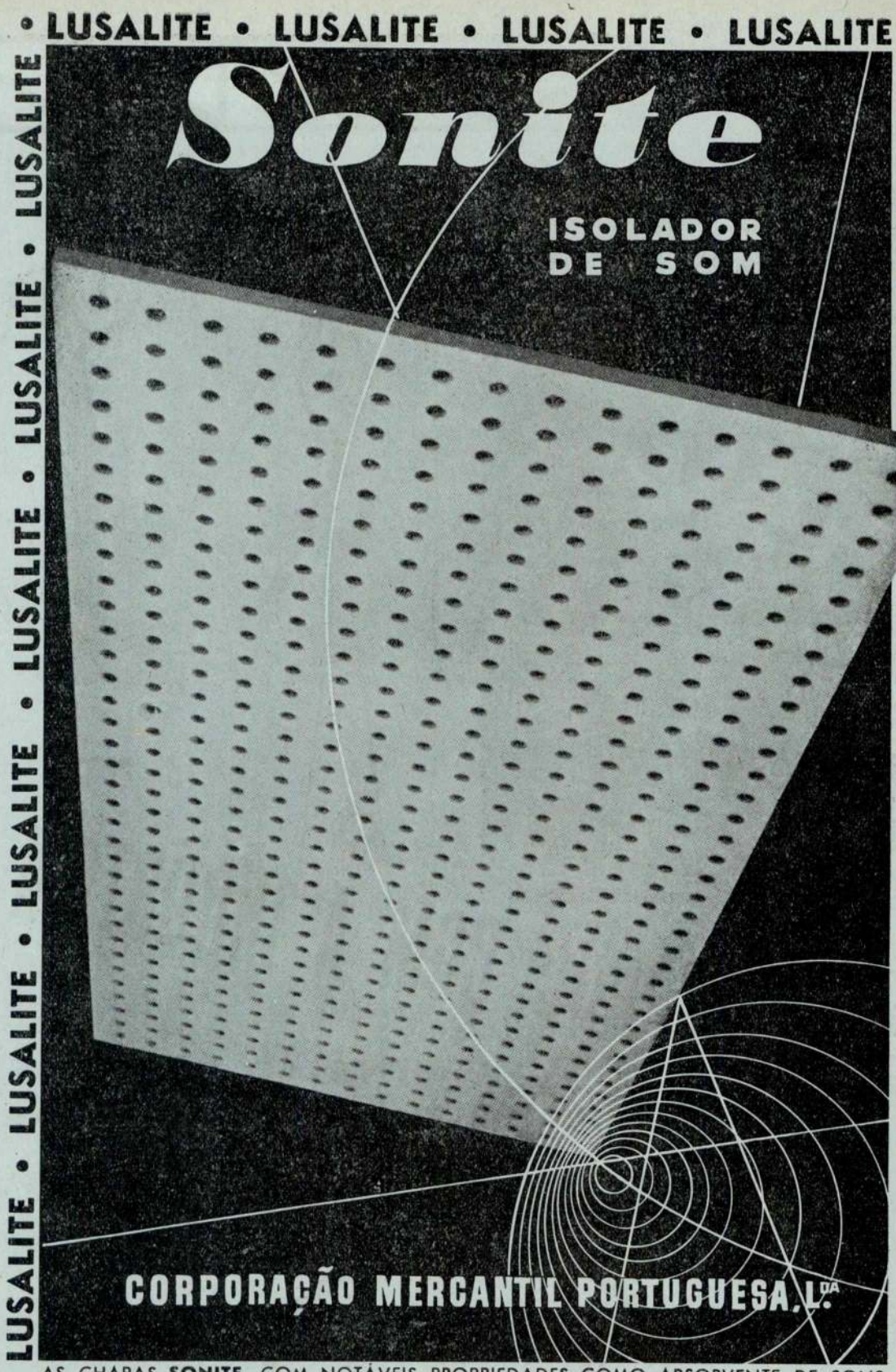
COLABORANDO COM A INDÚSTRIA

NA LUBRIFICAÇÃO DE TODOS
OS SISTEMAS DE ENGRENAGENS

LUBRIFICANTES

Sonap

57-154



AS CHAPAS **SONITE,** COM NOTÁVEIS PROPRIEDADES COMO ABSORVENTE DE SONS, DESTINAM-SE A CONSTITUIR REVESTIMENTOS DECORATIVOS EM PAREDES E TETOS DE SALAS.

ABSORÇÃO ACÚSTICA • ISOLAMENTO TÉRMICO

PARA MAIS COMPLETA INFORMAÇÃO SOBRE AS INCONTESTÁVEIS QUALIDADES DESTE NOVO MATERIAL, PEÇA O FOLHETO ELUCIDATIVO Á:

LUSALITE

R. S. NICOLAU, 123 — LISBOA • R. S. ANTÓNIO, 15-2.º — PORTO
OU AOS SEUS AGENTES NA PROVÍNCIA

No quadro XLV estão indicados os calores de hidratação obtidos. Os valores indicados para a percentagem de 10 % foram obtidos por interpolação dos resultados obtidos com 0 e 20 %.

QUADRO XLV

Calores de hidratação da mistura de cimento natural com pozolana de Santo Antão

Pozolana %	Calores de hidratação, cal g^{-1}	
	7 dias	28 dias
0	40	45
10	38	42
20	37	38
30	27	28

Fazendo agora o cociente do valor relativo do calor de hidratação pelo valor relativo da resistência (fig. 52), valores relativos estes tomados em relação ao cimento natural sem adição de pozolana (conforme se explicou no § 69), $\frac{c}{\sigma}$, obtêm-se os valores indicados no quadro XLVI.

Tal como se verificou nos resultados já anteriormente obtidos, este cociente diminui dos 7 para os 28 dias. Mas, o que é verdadeiramente notável, é que estes cocientes são extremamente baixos, indicando a importância enorme que possui o silicato bicálcico nas propriedades fundamentais do cimento pozolânico.

QUADRO XLVI

Cociente entre o valor relativo do calor de hidratação e o valor relativo da resistência, das misturas de cimento natural com pozolana de Santo Antão

Pozolana, %	Cociente $\frac{c}{\sigma}$	
	7 dias	28 dias
0	1,00	1,00
10	0,62	0,60
20	0,57	0,49
30	0,57	0,42

72. Exemplos da aplicação do estudo do cociente $\frac{c}{\sigma}$ à determinação da eficiência dalgumas pozolanas. — O critério que descrevemos para o estudo da eficiência dum cimento pozolânico ou duma pozolana adicionada a um betão foi aplicado ao estudo da eficiência do «trass», a pozolana de origem alemã a que nos referimos no § 33 e ao estudo da eficiência das duas pozolanas artificiais n.os 4 e 5, a que fizemos referência no § 42.

72.1. **Estudo do trass.** — Em complemento do que ficou dito no § 33 sobre esta pozolana, vamos agora apresentar os resultados obtidos nos ensaios com cimento, a que com ela se procedeu.

O cimento portland usado nos ensaios que vamos descrever em seguida foi um cimento corrente, do tipo do cimento B (quadro XXIII).

Os calores de hidratação deste cimento e da mistura de 70 % deste com 30 % de trass foram:

Ligante	Calores de hidratação, cal g^{-1}	
	7 dias	28 dias
Cimento portland	76	91
Mistura de 70 % do cimento portland com 30 % de trass	60	75

O abaixamento do calor de hidratação provocado por esta pozolana é pois da ordem de 20 % (21 % a 7 dias e 18 % a 28 dias).

A influência do trass na tensão de rotura do betão também se pode indicar. Com efeito, ensaios de betão com uma máxima dimensão de inerte de 100 mm, com uma dosagem de 250 kg de cimento por metro cúbico, realizados sobre prismas com 30 × 30 × 90 cm, deram as seguintes tensões de rotura, a cerca de 1 ano:

Betão de cimento portland do tipo B: 322 kg cm^{-2}
Betão idêntico com 70 % de cimento portland e 30 % de trass: 268 kg cm^{-2}.

A 1 ano, pois, ainda o trass não desenvolveu a sua resistência, provocando uma queda de 17 % no valor da tensão de rotura. Sendo o abaixamento do calor de hidratação de 20 %, verifica-se que este trass não apresenta grandes van-

tagens na sua utilização nos betões, apresentando o cociente

$$\frac{c}{\sigma} = \frac{0{,}81}{0{,}83} = 0{,}96 .$$

A análise destes resultados mostra que é sobretudo a tensão de rotura a responsável por este mau resultado: o crescimento da tensão de rotura do betão com pozolana não é normal, se o compararmos com os que obtivemos, e estão indicados neste capítulo e no anterior.

72.2. Estudo das pozolanas artificiais n os 4 e 5. — As argilas n.os 4 e 5, a que fizemos referência no § 42, foram cozidas no laboratório a 900° C e 700° C, respectivamente, e moídas em seguida com um clínquer dum cimento da mesma origem do cimento B (quadro XXIII), tambem no laboratório, e portanto nas condições já referidas anteriormente (§ 61).

As finuras obtidas foram as seguintes:

Cimento	Resíduo no peneiro de 88 μ de abertura	Superfície específica, Blaine, $cm^2\ g^{-1}$
Cimento portland (clínquer moído)	5,3 %	5000
70 % de clínquer + 30 % de pozolana n.° 4	3,9 %	6640
70 % de clínquer + 30 % de pozolana n.° 5	5,5 %	7120

As tensões de rotura à compressão, em $kg\ cm^{-2}$, do betão fabricado com estes cimentos pozolânicos foram:

Cimento	7 dias	28 dias	6 meses	2 anos
Cimento portland (clínquer moído)	272	314	414	470
70 % de clínquer + 30 % de pozolana n.° 4	200	314	402	397
70 % de clínquer + 30 % de pozolana n.° 5	210	318	308	341

Os betões tinham a composição e dosagem indicadas no § 61.

Os calores de hidratação destes cimentos foram, em $cal\ g^{-1}$:

Cimento	3 dias	7 dias	28 dias
Cimento portland (clínquer moído)	60	72	82
70 % de clínquer + 30 % de pozolana n.° 4	49	61	70
70 % de clínquer + 30 % de pozolana n.° 5	44	59	75

Destes dados deduz-se que, a 7 dias e a 28 dias, os calores relativos de hidratação, c, e as tensões de rotura relativas, σ, tomados em relação ao cimento base, são os indicados no quadro que encima a página seguinte, dos quais se deduzem fàcilmente os coeficientes $\frac{c}{\sigma}$ que figuram na última coluna.

A comparação dos cocientes $\frac{c}{\sigma}$ indicados na última coluna com os indicados na última coluna do quadro XLI leva-nos à conclusão que qualquer destes cimentos pozolânicos não tem interesse: a eficiência da pozolana junta a este clínquer é nula no caso da pozolana n.° 4 e é muitíssimo pequena, pràticamente desprezível, no caso da pozolana n.° 5. Estes coeficientes estão, com efeito, muito longe daqueles que se obtêm com as pozolanas de Santo Antão, de Santa Cruz, ou com as cinzas volantes (quadro XLI).

A comparação dos calores de hidratação a 3, 7 e 28 dias com as tensões de rotura a 2 anos, comparação semelhante à que está indicada no quadro XLII, também conduz às mesmas conclusões: ineficácia da pozolana n.° 4 e até mesmo, a longo prazo, inconveniente da pozolana n.° 5:

Cimento	Cociente da soma dos calores de hidratação a 3, 7 e 28 dias pela tensão de rotura a 2 anos
Cimento portland (clínquer moído)	0,455 $cal\ g^{-1}\ kg^{-1}\ cm^2$
70 % de clínquer + + 30 % de pozolana n.° 4	0,454 $cal\ g^{-1}\ kg^{-1}\ cm^2$
70 % de clínquer + + 30 % de pozolana n.° 5	0,524 $cal\ g^{-1}\ kg^{-1}\ cm^2$

Além disto, estes cimentos apresentam um crescimento da resistência com o tempo que é perfeitamente anómalo e difícil de explicar: o crescimento das tensões de rotura do cimento

Cimento	c, %		σ, %		$\frac{c}{\sigma}$		Média
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias	
Cimento portland (clínquer moído)	100	100	100	100	1	1	1
70 % de clínquer + 30 % de pozolana n.° 4	85	85	74	100	1,15	0,85	1,00
70 % de clínquer + 30 % de pozolana n.° 5	82	91	77	102	1,06	0,89	0,98

portland é maior do que o dos cimentos pozolânicos.

73. Variação do coeficiente de permeabilidade com a idade, a natureza e a dosagem da pozolana nos cimentos pozolânicos preparados com o clínquer I. — Os ensaios foram realizados pelo método já descrito no § 57.1, e os betões tinham a composição lá indicada para os betões com pozolana. Com o fim de manter as trabalhabilidades constantes, os valores de $\frac{A}{C}$ variaram, tomando os valores indicados na parte inferior dos diagramas da fig. 50.

Os ensaios foram também realizados com a idade de 6 meses, excepto no caso dos cimentos pozolânicos preparados com a pozolana artificial n.° 2, para os quais se realizaram ensaios a 7 dias, 6 meses e 2 anos.

Na fig. 56 está indicada a variação do coeficiente de permeabilidade com a percentagem de pozolana artificial n.° 2 e com a idade.

Como se vê, pelo que diz respeito à influência da idade, verifica-se que a pozolana nas idades jovens, a 7 dias, provoca um aumento extraordinário no coeficiente de permeabilidade; a 6 meses o coeficiente de permeabilidade já diminui com o aumento da quantidade de pozolana, até 30 %, aumentando em seguida com a sua dosagem.

A influência da pozolana a 2 anos é pràticamente paralela à influência a 6 meses, sendo notável que o abaixamento verificado para o betão de cimento portland tenha sido apenas de 8 % dos 6 meses para os 2 anos, enquanto no betão de cimento pozolânico com 30 % de pozolana o abaixamento é da ordem de 50 %.

O resultado obtido com a pozolana nas idades jovens é muito importante, facto que deve ser tido em atenção, não se sujeitando o betão jovem de cimento pozolânico à acção dos líquidos sob pressão, acção que pode ter efeitos nefastos

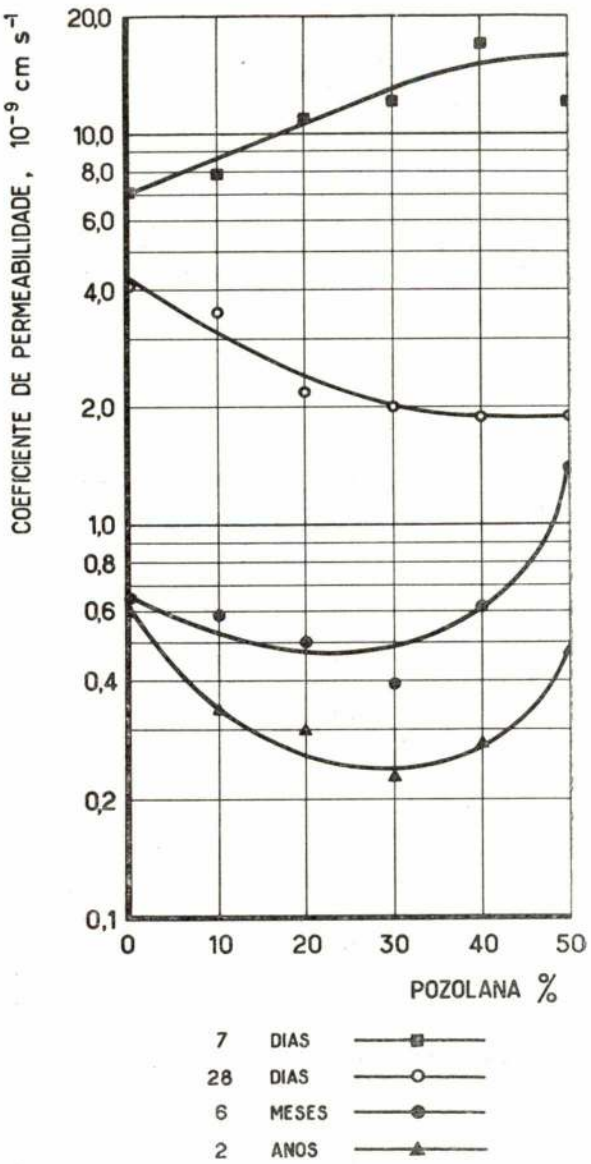


Fig. 56 — Variação do coeficiente de permeabilidade dos betões fabricados com os cimentos preparados com o clínquer I e com a pozolana artificial n.° 2, com a proporção de pozolana e com a idade.

Para as características dos betões, ver a parte final do § 57. 1.

sobre o comportamento do betão, pois tudo se passa como se a pozolana funcionasse ainda de

inerte e o betão tivesse uma dosagem muito baixa de cimento. Só depois de um mês a pozolana começa a fazer baixar o coeficiente de permeabilidade.

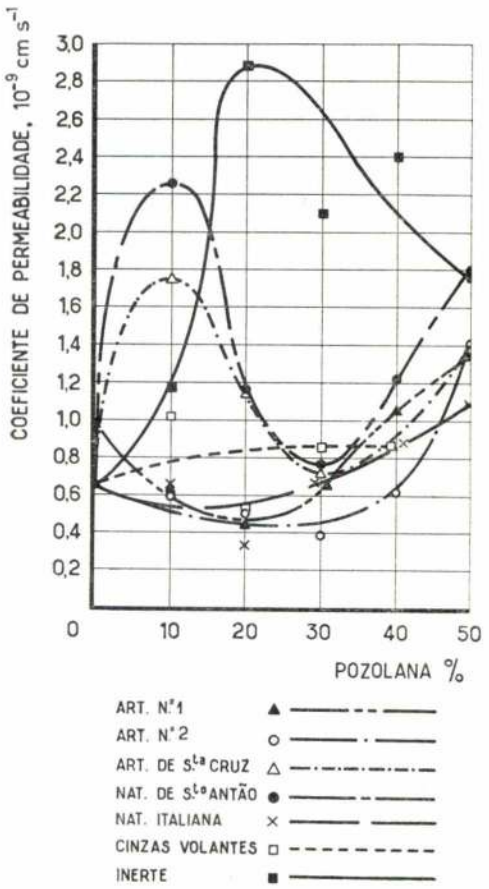


Fig. 57 — Coeficientes de permeabilidade dos betões fabricados com os cimentos pozolânicos que têm por base o clínquer 1, a 6 meses.

Para a descrição do método usado na determinação do coeficiente de permeabilidade e para a descrição dos betões, ver o § 57.1.

Por razões acidentais, o cimento pozolânico preparado com o pozolana artificial n.º 1 tem um clinquer diferente dos outros, embora com características muito próximas; a moedura também foi um pouco diferente.

Ao comparar as diferentes pozolanas entre si nos ensaios realizados a 6 meses (fig. 57) verifica-se que as pozolanas mais enérgicas (natural de Santo Antão e artificial de Santa Cruz) conduzem a coeficientes mais elevados do que as pozolanas menos enérgicas, mostrando aquelas uma influência mais eficaz na percentagem de 30 % de substituição.

O andamento das curvas de variação do coeficiente de permeabilidade com a dosagem de pozolana é também muito semelhante entre si no caso das pozolanas menos enérgicas, as artificiais n.os 1 e 2 e a natural italiana. O valor mínimo do coeficiente verifica-se para os cimentos pozolânicos com 20 % destas pozolanas.

O andamento da curva referente ao betão de cimento moído com inerte é nìtidamente diferente do andamento das curvas referentes aos betões preparados com cimentos pozolânicos, e, apesar das dispersões que se verificam, é nítida a conclusão de que a permeabilidade é sempre aumentada pela substituição de cimento por inerte.

Estes resultados mostram que, se é certo que a pozolana faz diminuir o coeficiente de permeabilidade do betão amassado exclusivamente com cimento portland, tal diminuição não é muito importante. Para dosagens elevadas de pozolana, da ordem de 50 % e nas idades jovens, o coeficiente é mesmo sèriamente aumentado.

A diminuição máxima que se verifica é apenas para metade do valor obtido com cimento portland (caso da pozolana artificial n.º 1 que, para 20 % faz diminuir o coeficiente de $0{,}98 \times 10^{-9}$ cm s^{-1} para $0{,}44 \times 10^{-9}$ cm s^{-1} e da pozolana natural italiana que, na mesma proporção faz baixar o coeficiente de permeabilidade de $0{,}65 \times 10^{-9}$ cm s^{-1} para $0{,}33 \times 10^{-9}$ cm s^{-1}). Ora uma tal redução consegue-se num betão de cimento portland normal diminuindo o $\frac{A}{C}$ de 0,57 para 0,52, o que equivale a passar a dosagem de cimento de 300 para 325 kg m^{-3}, ou a diminuir de 15 l a dosagem de água por metro cúbico.

O que é importante referir é que, a longo prazo, a substituição de cimento por pozolana não afecta o coeficiente de permeabilidade, o que se não verificaria se se substituisse esse cimento por inerte.

74. Variação da contracção com a natureza e dosagem da pozolana nos cimentos pozolânicos preparados com o clínquer I. — Na fig. 58 estão representadas as contracções, obtidas em pasta, destes cimentos pozolânicos, com 0,33 de água em relação ao peso de cimento, ao fim de 90 dias de conservação numa atmosfera com 75 % de humidade relativa. Estas pastas foram moldadas sob a forma de anéis com 25 cm de diâmetro exterior, de secção quadrada

com 2,5 cm de lado, sendo a evaporação impedida pela face interna do anel. (77)

A figura mostra que no caso das pozolanas mais enérgicas, artificial de Santa Cruz e natural de Santo Antão, a contracção é diminuída até 20 % de substituição, sendo depois substancialmente aumentada, sobretudo nas altas percentagens de pozolana. No caso da pozolana artificial n.º 2 a contracção é diminuída em 10 % de substituição e depois aumenta muito pouco com o aumento da dosagem de pozolana.

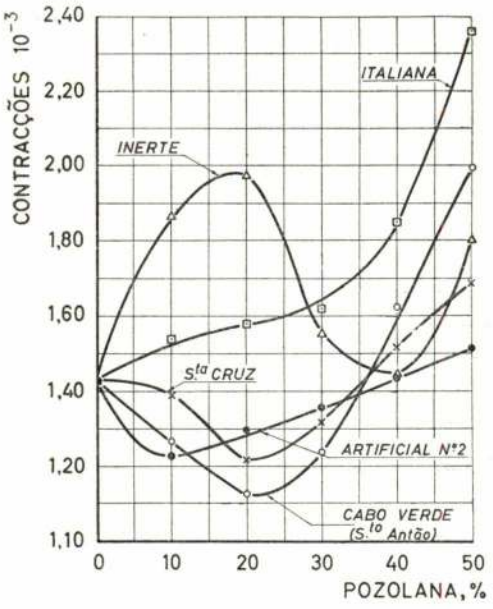


Fig. 58— Contracção de pastas dos cimentos pozolânicos preparados com o clínquer 1, conservadas em 75% de humidade relativa, ao fim de 90 dias.

Água de amassadura, 0,33 do peso de cimento pozolânico. Espécimes: aneis com 25 cm de diâmetro exterior, de secção quadrada com 2,5 cm de lado. Evaporação impedida pela face interna do anel (77).

No caso da pozolana italiana a contracção é sempre muito aumentada, e no caso do inerte, embora os resultados sejam um pouco confusos, pode-se afirmar que a contracção é sempre aumentada.

Pode pois dizer-se, em conclusão, que os cimentos pozolânicos não têm necessàriamente uma contracção superior à dos cimentos portland. A contracção pode mesmo diminuir para certas percentagens de pozolana, resultado que já se tinha observado no § 58.

75. Variação da fluência com a natureza e a dosagem da pozolana nos cimentos pozolânicos preparados com o clínquer I. — O estudo da fluência foi feito exactamente como no caso dos cimentos com pozolana, tendo sido portanto seguida a técnica descrita no § 59.1.

Na fig. 59 *a* estão indicadas as fluências obtidas após 60 dias de actuação da tensão de 39,1 kg cm^{-2}, quando se procede à substituição progressiva de cimento por pozolana.

Na fig. 59 *b* está representada a variação da fluência com o tempo de carga, dos cimentos pozolânicos preparados com 30 % de pozolana.

Como se vê, tal como nos casos anteriores, não se pode pròpriamente falar duma influência específica da pozolana sobre a fluência do cimento. Esta influência varia com a natureza e quantidade de pozolana. Se é certo que, dum modo geral, a fluência é aumentada, para percentagens até 20 % ou 30 %, a fluência pode ser substancialmente diminuída, como no caso da pozolana natural de Santo Antão.

É curioso verificar a concordância deste resultado com o da resistência (§ 64) que mostra também um máximo nesta percentagem. Isto prova que às altas resistências correspondem baixas fluências, e inversamente, às baixas resistências correspondem altas fluências.

Os diagramas da fig. 59 *b* mostram um facto muito importante: a fluência nas primeiras idades é sempre maior do que no caso do cimento portland, mesmo quando a pozolana faz diminuir a fluência nas idades mais avançadas, como acontece com a pozolana de Santo Antão e com a pozolana de Santa Cruz.

Este fenómeno pode também explicar-se pelo facto da pozolana, nas idades jovens, provocar uma diminuição na tensão de rotura, donde resulta portanto um aumento na fluência.

A influência do inerte (fig. 59 *a*) é típica, pois se pode dizer que a fluência não é pràticamente afectada pela dosagem de inerte pela qual se substitui o cimento.

76. Variação das tensões e da fissuração devidas à contracção com a natureza e dosagem da pozolana nalguns cimentos pozolânicos preparados com o clínquer I. — O conhecimento da contracção dos cimentos tem um interesse reduzido se não forem conhecidas as suas consequências, isto é, se não forem conhe-

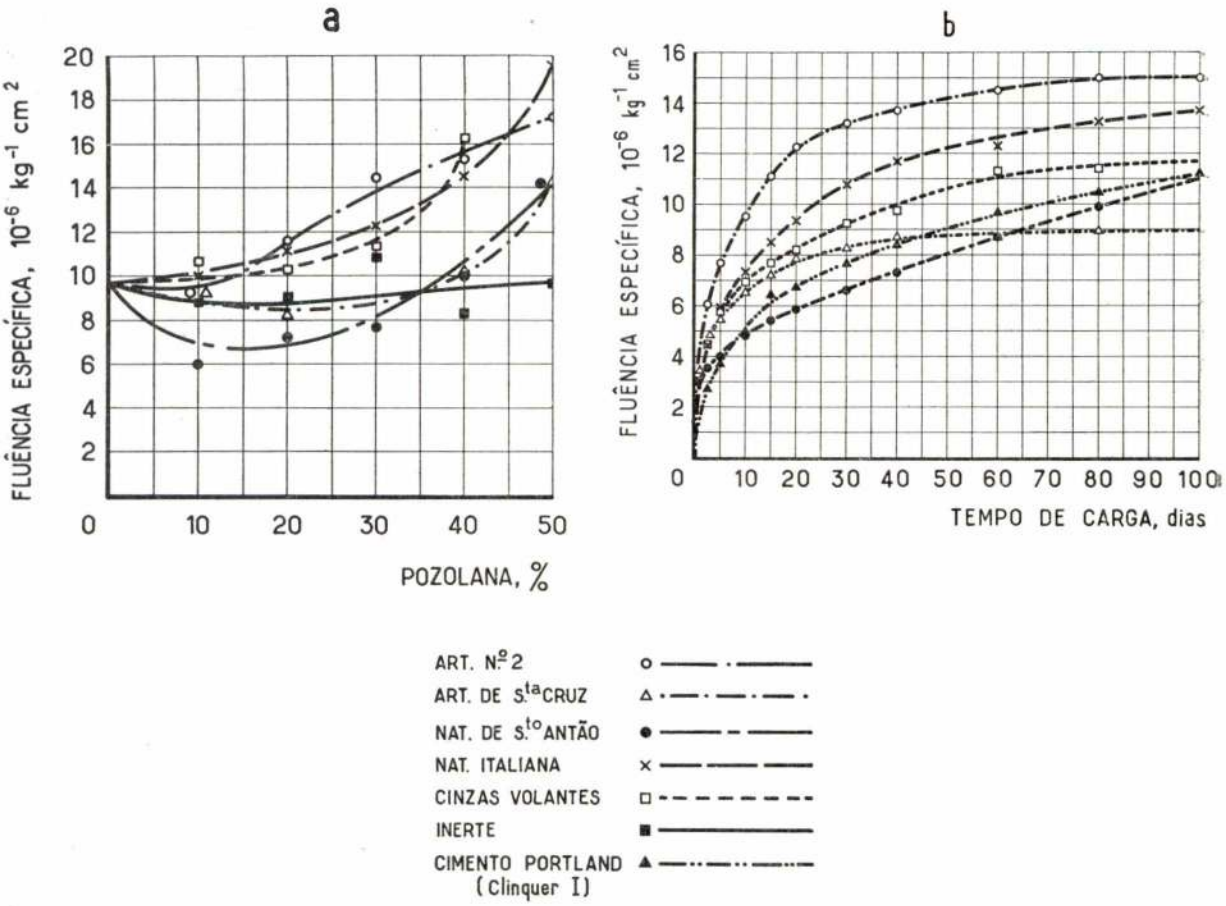


Fig. 59 — Fluências específicas das argamassas de 1 : 1 dos cimentos pozolânicos preparados com o clínquer 1, sujeitas a uma tensão de 39 kg cm^{-2} aos 7 dias de idade.

Conservação a cerca de 70 % de humidade relativa. Para as características das argamassas e técnica de ensaios, ver o § 59. 1.

a — Fluências específicas após 60 dias de carga.

b — Variação da fluência específica com o tempo de carga das argamassas preparadas com os cimentos pozolânicos com 30 % de pozolana.

A curva assinalada com os triângulos pretos refere-se ao cimento portland, base dos pozolânicos, preparado por moedura simples do clínquer 1.

cidas as circunstâncias em que, quando a contracção é impedida, se dá a rotura.

A grandeza das tensões provocadas pela contracção, quando a diminuição das dimensões é impedida (contracção a deformação constante), está directamente relacionada com a fluência e com a contracção, e como ambas têm, como vimos, variações sensìvelmente paralelas, não serão de esperar grandes variações na grandeza das tensões.

Com efeito, as tensões provocadas pela contracção a deformação constante foram medidas em argamassas de 1:3, conservadas numa atmosfera com 55 % de humidade relativa, com os cimentos pozolânicos preparados com as pozolanas de Santo Antão, artificial n.º 2 e ainda com o inerte.

O método usado para tal determinação já foi descrito noutra publicação (77), e consiste, em última análise, em medir as tensões num anel metálico que são impostas por um outro anel de argamassa moldado à volta do anel metálico. O anel de argamassa, ao tender a contrair-se, impõe tensões no anel metálico, a partir de cujo conhecimento é fácil deduzir as tensões no anel de argamassa. As tensões no anel metálico são medidas por meio de cordas vibrantes colocadas segundo diâmetros deste.

Ao mesmo tempo molda-se um anel de arga-

massa perfeitamente idêntico ao anel moldado à volta do metálico, mas livre de se contrair, e cuja contracção livre se mede.

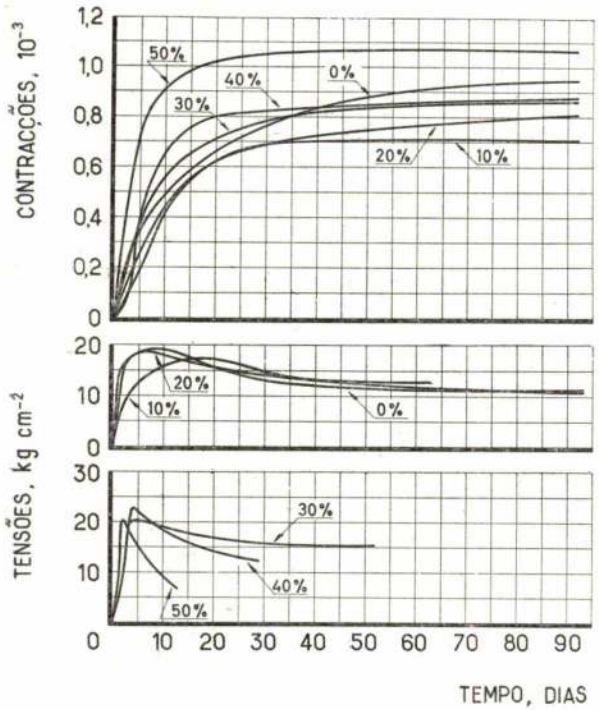


Fig. 60 — Contracções e tensões devidas à contracção a deformação constante, de argamassas de 1:3, conservadas em 55 % de humidade relativa, dos cimentos pozolânicos confeccionados com a pozolana artificial n.º 2 e com o clínquer 1.

Os números sobre as figuras indicam a percentagem de pozolana do cimento.

Medições efectuadas em aneis com 25 cm de diâmetro e secção quadrada de 2,5 cm de lado.

Água de amassadura: 0,70 do peso de cimento.

Nas figs. 60 e 61 estão indicadas as tensões determinadas em argamassas de 1:3 conservadas em atmosferas com 55 % de humidade relativa, mantidas a deformação constante, e bem assim as contracções das argamassas livres de qualquer sujeição, argamassas estas confeccionadas com os cimentos pozolânicos preparados com as pozolanas artificial n.º 2 e natural de Santo Antão.

A evolução das tensões com o tempo tem o aspecto característico das argamassas de 1:3 conservadas em estados higrométricos baixos: as tensões nos primeiros dias sobem muito, e, depois, começam a descer tendendo para um valor constante.

Verifica-se em primeiro lugar que a subida inicial da tensão se dá tanto mais ràpidamente, e é tanto mais acusada, quanto maior é a percentagem de substituição, e quanto maior é a reactividade da pozolana; as maiores subidas correspondem a tensões de estabilização mais baixas.

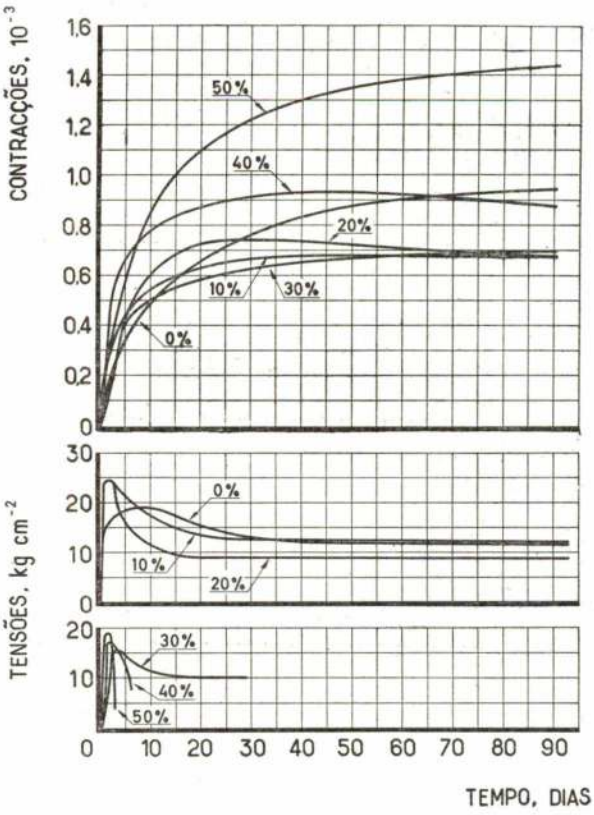


Fig. 61 — Contracções e tensões devidas à contracção a deformação constante, de argamassas de 1:3, conservadas em 55 % de humidade relativa, dos cimentos pozolânicos confeccionados com a pozolana natural de St.º Antão e com o clínquer 1.

Os números sobre as figuras indicam a percentagem de pozolana do cimento.

Medições efectuadas em aneis com 25 cm de diâmetro e secção quadrada de 2,5 cm de lado.

Água de amassadura: 0,70 do peso de cimento.

Com efeito, no caso do cimento pozolânico com 10 % de pozolana de Santo Antão, a tensão máxima de cerca de 25 kg cm^{-2} é atingida ao fim de 2 dias enquanto no caso da pozolana artificial n.º 2 ela só é atingida ao fim de uns 15 dias.

Para percentagens de substituição de cimento por pozolana iguais ou superiores a 30 % começa-se a obter a fissuração, devido ao facto das

tensões de rotura diminuirem com o tempo de conservação em tão baixos estados higrométricos. Quando a tensão de rotura atinge o valor da tensão instalada no anel dá-se a rotura. O abaixamento das tensões de rotura à tracção do cimento pozolânico conservado em atmosferas

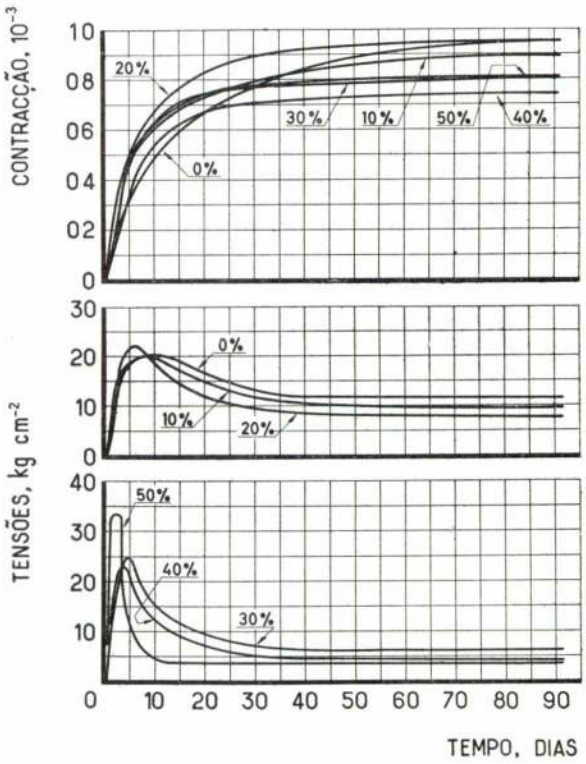


Fig. 62 — Contracções e tensões devidas à contracção a deformação constante, de argamassas de 1 : 3, conservadas em 55 % de humidade relativa, de cimentos obtidos por moedura do clínquer 1 com diferentes percentagens de inerte.

Os números sobre as figuras indicam a percentagem de inerte do cimento.

Medições efectuadas em aneis com 25 cm de diâmetro e secção quadrada de 2.5 cm de lado.

Água de amassadura: 0,70 do peso de cimento.

de baixa humidade foi também observado por Lucas. (78)

Quando é um inerte que substitui a pozolana, fig. 62, a fissuração nas argamassas de 1:3 não se dá nunca, sendo a relaxação das tensões tanto maior quanto maior é a percentagem de substituição. Na percentagem de 50 % de substituição de cimento por inerte obtém-se pràticamente uma argamassa com 1:6, para a qual a relaxação é extremamente acusada, tendendo as tensões para um valor muito pequeno.

Na fig. 63 estão indicadas as percentagens da contracção final, de estabilização, a que se dão as roturas por contracção a deformação constante, de pastas, de argamassas de 1:1 e das argamassas de 1:3 que descrevemos; esta percentagem é tanto menor quanto maior é a dosagem e a reactividade da pozolana.

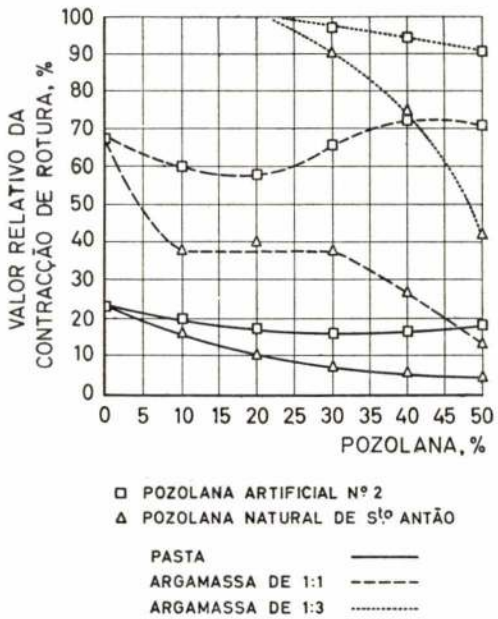


Fig. 63 — Percentagens da contracção final, a 90 dias, a que se dão as fissurações dos cimentos pozolânicos preparados com o clínquer 1 e com as pozolanas artificial n.º 2 e natural de St.º Antão (valor relativo da contracção de rotura).

Medições efectuadas sobre aneis de 25 cm de diâmetro e secção quadrada com 2,5 cm de lado, conservados em 55 % de humidade relativa.

Este resultado é compreensível se se atender à reactividade das pozolanas, e a que é a perda de água dos produtos da reacção da pozolana com a cal que provoca a queda nas tensões de rotura.

A pozolana natural de Santo Antão, muito mais enérgica que a outra, reagiu inicialmente com o cimento, tendo formado os produtos da sua reacção, que são fàcilmente decompostos quando perdem água, e daí a sua maior sensibilidade à dissecação. A pozolana artificial n.º 2 é muito mais lenta e só mais tarde a perda de humidade decompõe os produtos da reacção, resistindo por isso melhor à dissecação.

Os betões, de cimento pozolânico ou com pozolana, conservados ao ar livre, isto é, em

80 %), não mostram, contudo, um comportamento tão mau como estes ensaios podem levar a prever. É certo que a queda das tensões de rotura dos betões com pozolana conservados ao ar livre é, em geral, um pouco mais importante do que no caso dos betões de cimento portland, mas a diferença não é muito grande. Parece mesmo que no caso das pozolanas fracas não há diferença, e que essa diferença só é sensível no caso das pozolanas de alta reactividade.

O esclarecimento do comportamento do betão com pozolana ou de cimento pozolânico ao ar livre não está ainda completamente realizado, estando em curso ensaios no Laboratório Nacional de Engenharia Civil tendentes a estudar melhor este fenómeno.

77. Fissuração do betão de cimento pozolânico em grandes massas. - Os resultados que acabam de ser descritos no parágrafo anterior não devem ser confundidos com outros, já obtidos por Robert Blanks (71), por exemplo, sobre a resistência à fissuração provocada pelo arrefecimento do betão de cimento pozolânico conservado sem trocas de humidade, isto é, em grandes massas. Neste caso, a resistência à fissuração é, geralmente, melhorada, na medida em que as tensões de rotura também o são, relativamente à resistência à fissuração do cimento portland base.

Com efeito, quando a conservação se faz em meio húmido, a resistência à tracção do cimento pozolânico é, ao fim de pouco tempo, superior à resistência do cimento portland (cap. 8, § 51, quadro XXIV).

Quando, durante o arrefecimento do betão em grandes massas, se instalam tensões de tracção, o que se verifica ao fim de algumas semanas após a betonagem, já a tensão de rotura à tracção é superior à do cimento portland normal. Ora como já foi demonstrado num trabalho anterior (77) a resistência à fissuração é tanto maior quanto maior é a tensão de rotura, pois, embora a relaxação das tensões seja então menor, o aumento das tensões instaladas é sempre desprezível em face do aumento das tensões de rotura, e a resistência à fissuração é melhorada.

Este raciocínio foi feito na hipótese das causas que provocam as tensões serem idênticas, tanto no betão de cimento portland como no do cimento pozolânico. Ora, na verdade, essas causas, abaixamento da temperatura desde um máximo até ao valor médio, de equilíbrio com o ambiente, é menor no caso do cimento pozolânico do que no caso do portland, como já vimos neste capítulo e no anterior, e então esta razão soma-se à anterior para diminuir a fissurabilidade do betão de cimento pozolânico em grandes massas.

Quando, no decorrer deste trabalho, ao comparar os diferentes cimentos pozolânicos se toma a relação entre o calor de hidratação e as resistências, está-se desprezando um factor que é também de importância capital na fissuração do betão em grandes massas: é a sua fluência. Com efeito, tal como acontece quando se comparam diferentes cimentos sob o ponto de vista da contracção — não são os cimentos que têm maior contracção que são os mais fissuráveis — também se deverá admitir que não são os cimentos de mais baixo calor de hidratação que desenvolverão, necessàriamente, menores tensões, e que serão portanto os menos fissuráveis. As tensões desenvolvidas por virtude das temperaturas são função não só das temperaturas máxima e mínima a que está sujeito o betão, mas também da *fluência* do betão. A rotura dar-se-á quando as tensões desenvolvidas no betão atingirem as tensões de rotura.

Como vimos (§§ 59 e 75), a pozolana aumenta a fluência, nas primeiras idades, normalmente, até 60 dias (quadro XXXIV) e, nos casos em que a não aumenta a longo prazo, como no caso das pozolanas de alta reactividade (Santo Antão e americana de Santa Cruz), aumenta-a sempre nos primeiros dias de carga (fig. 59 *b*). Por outro lado, segundo as conclusões gerais a que chegámos no trabalho já citado sobre a fissuração dos cimentos, argamassas e betões (77), tensões de rotura e fluência variam em sentido inverso: a baixas tensões de rotura correspondem altas fluências e a altas tensões de rotura correspondem baixas fluências. Portanto, a pozolana, nas primeiras idades, fazendo baixar as tensões de rotura, faz aumentar a fluência, o que, juntamente com o abaixamento nos calores de hidratação provoca uma diminuição substancial nas tensões devidas ao arrefecimento do betão, estados higrométricos médios e secos (de 50 a

diminuindo portanto o perigo da fissuração.

Estas ideias são provadas pelas experiências de R. Blanks (71) e Davis (79).

Lògicamente, portanto, a comparação dos cimentos pozolânicos que foi feita no § 56 e nos §§ 69 a 71 deveria tê-lo sido tendo em atenção estes três parâmetros: calor de hidratação, fluência e tensão de rotura. Mas, ao atendermos apenas ao cociente $\frac{c}{\sigma}$, e ao desprezarmos a fluência, as considerações feitas apenas com este cociente $\frac{c}{\sigma}$ são mais prudentes, acentuando menos a influência benéfica da pozolana na diminuição das tensões de origem térmica.

(Continua)

C. D. U. 338.9 (469) (042)

Conclusões do II Congresso dos Economistas Portugueses e do II Congresso da Indústria Portuguesa

(Continuação)

5.7 — Indústria de matérias plásticas

1 — A fim de impedir a proliferação de estabelecimentos e a disseminação da produção, impõe-se a inclusão no regime de condicionamento, em pé de igualdade com a produção de resinas sintéticas, daquelas actividades transformadoras em que se requerem condições tecnológicas especiais e um fabrico normalizado. A reestruturação da indústria deve ainda ser promovida pelo recurso à especialização das produções em cada unidade fabril.

2 — Na instalação de fábricas, quer de matérias primas quer de transformação, em qualquer parcela do território nacional, deve atender-se à necessidade do desenvolvimento coordenado da indústria, cuidando-se especialmente de escolher a localização mais adequada (para o que deve ter-se já em conta a natural expansão ulterior dos diversos territórios) naqueles casos em que o volume do empreendimento, as economias de produção em grande escala e a dimensão do mercado justificam o acantonamento em um único local.

3 — A indústria necessita de uma rápida promulgação de normas regulamentares para o fabrico de artigos de plástico de utilização técnica e de aplicação industrial, de modo a conceder às fábricas garantias eficazes contra a concorrência do artigo de inferior categoria, o qual, sendo mais barato, conduz à regressão da qualidade e ao abastardamento da produção.

4 — Importa promover a defesa da indústria nacional perante a concorrência estrangeira, quer pela concessão de facilidades na importação de matérias-primas e na exportação de produtos fabricados, quer pelo impedimento por uma forma real e efectiva das importações de artigos estrangeiros sempre que a nossa indústria fabrique ou se mostre efectivamente interessada no fabrico de tais artigos.

5.8 — Indústria de produtos farmacêuticos

1 — São extremamente deficientes as condições em que se debate a indústria de produtos farmacêuticos, cumprindo realçar: a dependência perante o estrangeiro quanto a matérias-primas, a dispersão em número e grandeza das fábricas conduzindo a custos muito elevados e a condições técnicas e de rentabilidade extremamente diversas, a pulverização fictícia de marcas, a carência de padronização e racionalização das linhas de fabrico, a carestia dos sistemas de distribuição e propaganda, a forte concorrência do produto estrangeiro, a deficiente política oficial de preços, e a inexistência de ambiente científico e de cooperação entre a indústria e a Universidade, o que dificulta gravemente a preparação e recrutamento do pessoal especializado.

2 — Nenhuma solução para este conjunto de problemas será justa e viável se se partir da ignorância dos interesses estabelecidos, estando, para mais, a indústria consciente dos seus problemas, interessada em resolvê-los e apta a tomar perante o Governo e o País as responsabilidades inerentes a tal resolução.

3 — A reestruturação da indústria deve abarcar: a organização da produção em moldes tècnicamente adequados e econòmicamente lucrativos, dentro de um sistema de custos que permita a concorrência; a padronização da produção em moldes que ofereçam confiança e revelem eficácia; e a simplificação dos esquemas comerciais, de forma a não manter sobrecargas de preço que o mercado não comporta e as necessidades da saúde pública repelem. Deve conseguir-se esta reestruturação através de um sistema de condicionamento, e pela concentração fabril em linhas

ainda a definir e, de preferência, promovida pelos próprios industriais.

4 — São elementos importantes para o saneamento e progresso da indústria:

a) a organização de um sistema de protecção à indústria que a defenda da concorrência estrangeira quando esta se mostre dispensável, ou seja o resultado de práticas ilícitas;

b) a montagem de uma indústria química ligada à indústria farmacêutica ou, pelo menos, em colaboração com ela, como aliás está sendo já considerado pelo Governo;

c) a remodelação da legislação relativa à saúde pública, de forma a torná-la consequente com as novas técnicas da produção, a moderna orgânica da Previdência Social, e os novos meios e processo de ataque à doença;

d) a revisão da política que vem sendo seguida de controlo dos preços;

e) o estabelecimento de estreita cooperação entre a indústria e a Universidade, cabendo àquela a proposição dos problemas a investigar e a esta a cricação de um ambiente científico que garanta a formação e o recrutamento do pessoal especializado indispensável.

Recomendação:

Devem ser integrados no Plano de Fomento os elementos de reestruturação e desenvolvimento da indústria elaborados por acção conjunta das empresas e do Governo.

5.9 — Indústria de refinação de petróleos

1 — A indústria de refinação de petróleos está equipada com a mais moderna aparelhagem, possuindo mesmo algumas unidades para melhorar a economia da sua exploração que outras indústrias congéneres não possuem.

2 — Todavia, a indústria não utiliza por forma conveniente a capacidade das suas instalações em consequência do regime legal em que labora, ainda não atingiu o nível de rendimemento que a situação actual possibilita por carência de preparação dos seus quadros de pessoal, e não dispõe ao nível exigido de apoio das indústrias locais especializadas na produção e reparação do seu complexo equipamento fabril, quer por deficiência destas, quer por insuficiente coordenação e mobilização das suas possibilidades.

3 — Sendo das actividades que mais influência a balança de pagamentos, é de grande interesse complementar as actuais instalações com unidades que permitam um melhor e mais completo aproveitamento da matéria-prima que labora, alargando a produção a bens de consumo cada vez mais necessarios à vida moderna e que pertencem já ao domínio desta indústria.

4 — É absolutamente necessário que nas escolas superiores de engenharia, particularmente nos cursos de química industrial e em indispensável colaboração com as empresas, se dê maior relevo à indústria dos petróleos, organizando programas de ensino que atendam às exigências de uma indústria tão complexa e dinâmica, e incluindo nesses programas a matéria referente à técnica da automatização.

5 — Perante o crescente progresso da técnica dos processos e da aparelhagem desta indústria deve a refinaria nacional estabelecer um programa de renovação viva e constante dos conhecimentos dos seus técnicos, promovendo o estágio destes em refinarias que, por virtude da extensão dos seus recursos, estejam apoiadas em centros de estudo e investigação.

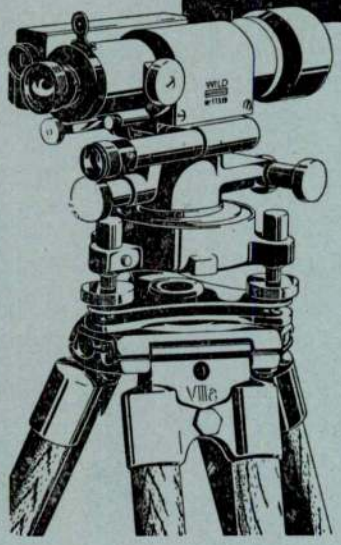
6.0 — Indústria siderúrgica

1 — Embora o valor anual das importações de produtos siderúrgicos ultrapasse já 1 milhão de contos, a capitação do seu consumo é extremamente baixa, prevendo-se porém que dentro dos próximos dez anos o consumo atinja as 500 mil toneladas. Conta-se produzir os primeiros laminados em Portugal no prazo de três anos; o programa de produção da Siderurgia Nacional é de 200.000 toneladas, a ampliar para 300.000, mas tudo se previu desde já para que possa ser ampliada ainda até ao milhão de toneladas.

2 — A constituição, neste momento, de uma unidade siderúrgica em Portugal pode beneficiar de muitas das vantagens da evolução técnica, e poderá funcionar em condições de rendimento e qualidade vantajosas em relação à maioria dos fabricantes mundiais de aço. A conjuntura mundial parece especialmente favorável à criação da indústria no nosso País, mas é necessário andar

WILD
HEERBRUGG

a marca suíça
de fama mundial



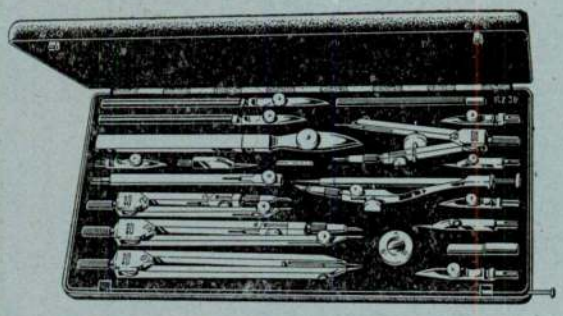
NÍVEIS E TEODOLITOS

de construção moderna
para todos os fins

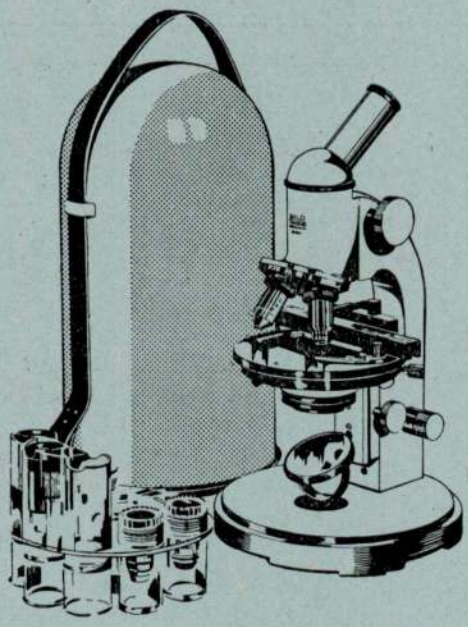
MICROSCÓPIOS

com equipamentos para todos
os trabalhos de microscopia

WILD
HEERBRUGG



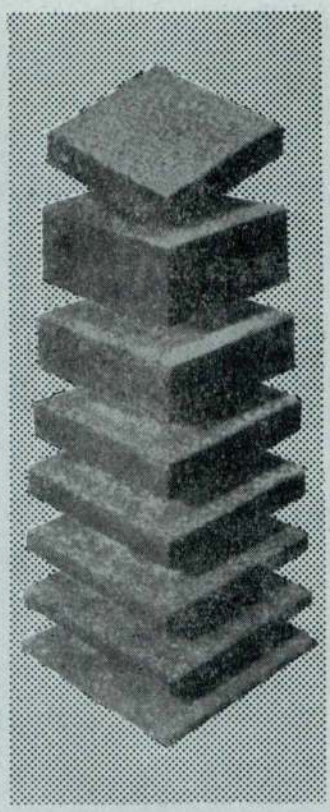
Estojos de desenho **Wild**
Únicos de aço crómio inoxidável



REPRESENTANTES EXCLUSIVOS

WILD PORTUGAL, LDA.

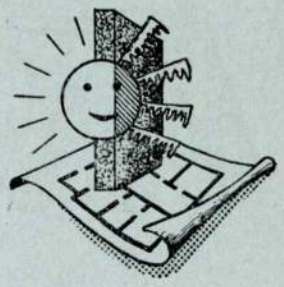
PRAÇA DAS ÁGUAS LIVRES, 8 S/L 6
LISBOA — TELEF. 68 11 27



AGLOMERADOS NEGROS DE CORTIÇA PARA ISOLAMENTOS

O isolante ideal do frio e calor, que reune as seguintes características:

BAIXO coeficiente de condutibilidade térmica.
ELEVADA resistência mecânica.
ESTRUTURA estável.
FACILIDADE de aplicação.
COMPORTAMENTO elástico a elevadas pressões.



Fábricas associadas da ISOLA:

MUNDET & C.ª, Lda. — Soc. Corticeira ROBINSON Bros, Lda. — INFAL, Indústria de Fabricação de Aglomerados, Lda. — SOPAC Soc. Portuguesa de Aglomerados de Cortiça, Lda. — SOCORQUEX, Lda. — CORÇA, Fábrica de Aglomerados de Cortiça, Lda.

AGENTES EM TODO O PAÍS

Soc. Comercial de Isolamentos de Cortiça, Lda.

Av. António Augusto de Aguiar, 17 — Telef. 4 7824 — Teleg. ISOLA — LISBOA

Acaba de aparecer

Manual de Hidráulica Geral

SÍNTESE TEÓRICA

TABELAS E ÁBACOS

FORMULÁRIO POLIGLOTA

Pelo Eng.º Armando Lencastre

Chefe da Secção de Hidráulica Fluvial do L. N. E. C.
Assistente do I. S. T.

Pedidos à "TÉCNICA"

Preço 150$00

Desconto 10 % aos assinantes