



## PREVENÇÃO DA REAÇÃO SULFÁTICA INTERNA NO BETÃO. RESULTADOS A LONGO PRAZO DO EFEITO DE ADIÇÕES MINERAIS

*António Santos Silva<sup>1</sup>, Dora Soares<sup>2</sup>, Loïc Divet<sup>3</sup>, António Bettencourt Ribeiro<sup>4</sup>*

*<sup>1</sup>Departamento de Materiais, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, [ssilva@lnec.pt](mailto:ssilva@lnec.pt), <sup>2</sup>Departamento de Materiais, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, [dsoares@lnec.pt](mailto:dsoares@lnec.pt), <sup>3</sup>Département Matériaux et Structures, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, [loic.divet@ifsttar.fr](mailto:loic.divet@ifsttar.fr), <sup>4</sup>Departamento de Materiais, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, [bribeiro@lnec.pt](mailto:bribeiro@lnec.pt)*

### RESUMO

Nos últimos anos vários casos de degradação prematura de estruturas de betão têm sido relacionados com a reação sulfática interna (RSI). Esta forma de degradação está relacionada com a remobilização dos sulfatos incluídos na matriz de cimento, devido ao aquecimento excessivo do betão durante as idades iniciais, que conduzem à formação de etringite expansiva (também conhecida por delayed ettringite formation - DEF). Verifica-se que a DEF aparece em betões expostos a humidade frequente e que foram submetidos a um tratamento térmico ( $T > 65\text{ °C}$ ) ou terão atingido temperaturas elevadas por outra razão (elevada dosagem em cimento, peças muito espessas, betonagem durante o verão, etc.).

A prevenção da RSI é normalmente efetuada tendo em vista a eliminação de pelo menos um dos fatores que a promovem, nomeadamente pelo controlo da temperatura máxima do betão, dosagem e composição do ligante e humidade.

Algumas adições minerais têm a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio da hidratação do cimento, formando compostos hidratados como o silicato de cálcio hidratado, e assim controlar a alcalinidade da solução dos poros do betão, inibindo a formação dos produtos expansivos. No entanto, não há ainda dados suficientes sobre o desempenho a longo prazo dos diferentes tipos de adições.

Nesta comunicação apresentam-se e discutem-se os resultados de ensaios de expansão de betão com diferentes tipos de adições minerais (cinzas volantes de carvão, metacaulino, escórias granuladas de alto-forno, sílica fumo, lamas de minas de tungsténio, cinzas de biomassa e fíler calcário) referentes a cerca de 8 anos de acompanhamento, e tecem-se algumas considerações sobre os teores a considerar na prevenção da DEF.

Palavras-chave: Betão / RSI / DEF / Prevenção / Adições minerais



## IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

### 1. INSTRUÇÃO

A degradação de estruturas de betão por reações expansivas de origem interna (REOI) é um problema de durabilidade, que tem vindo a afetar um número cada vez maior de estruturas de betão em vários países. Acresce que estas reações são difíceis de detetar precocemente exigindo meios de diagnóstico caros e de elevada especialização.

As REOI são assim designadas porque as suas causas estão relacionadas com os constituintes internos do betão (álcalis e sulfatos, essencialmente), e devem-se a dois mecanismos distintos: Reação Álcalis-Sílica (RAS) e Reação Sulfática Interna (RSI).

No caso da RSI uma das fontes internas pode provir da remobilização dos sulfatos inicialmente contidos na matriz cimentícia, consecutiva a um aquecimento excessivo do betão nas primeiras idades. Fala-se neste caso de formação de etringite retardada, também denominada por DEF, do termo inglês “Delayed Etringite Formation”. Este fenómeno é conhecido desde há duas dezenas de anos (Hobbs, 1999; BRE, 1999), e tem sido encontrado em betões de composição particularmente sensível, expostos a um ambiente propício (humidificação frequente) e tendo sofrido um tratamento térmico relativamente elevado ( $> 65^{\circ}\text{C}$ ) ou tendo atingindo temperaturas equivalentes por outra razão (peças maciças de betão, betonagem em período estival, etc.). Estas degradações foram observadas principalmente sobre elementos de betão pré-fabricados (travessas de caminhos de ferro, tubos, postes de iluminação...) e sobre peças maciças de pontes de betão betonadas in-situ (Santos Silva, 2009; Godard e Divet, 2013).

Esta situação motivou a necessidade de se estudarem formas preventivas destinadas a evitar a ocorrência de DEF nas novas construções. À semelhança do que se conhece para a RAS, a utilização de adições minerais pozolânicas podem, em substituição parcial do cimento no betão e em quantidade suficiente, mitigar os efeitos destas reações, embora a sua ação dependa da composição e reatividade pozolânica.

Apesar dos bons resultados já demonstrados por algumas adições, o seu uso poderá estar comprometido a curto/médio prazo tendo em conta a cada vez maior preocupação por parte da maioria dos Países na utilização de energias “limpas”. Esta tendência terá como consequência uma diminuição ou mesmo o esgotamento de alguns subprodutos industriais e, no caso dos produtos naturais, limitações de exploração e seu tratamento. Foi neste contexto que se iniciou no LNEC a avaliação do emprego de materiais com características pozolânicas, capazes de responderem às necessidades da indústria do betão a curto/médio



prazo. Esta comunicação apresenta resultados que têm vindo a ser obtidos sobre o efeito a médio/longo prazo das adições minerais na inibição da DEF.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

Prepararam-se provetes de betão (cilindros com 110 mm de diâmetro e 220 mm de altura) utilizando um cimento CEM I 42,5R (Tabela 1) e um agregado (brita e areia) quartzítico de origem francesa, conhecido pela sua não reatividade aos álcalis. Os provetes foram fabricados utilizando  $440 \text{ kg/m}^3$  de ligante, com uma razão água/ligante de 0,45 e um teor de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  igual a  $5,50 \text{ kg/m}^3$  de betão, teor esse que foi ajustado pela adição na água de amassadura de hidróxido de sódio (NaOH). Preparou-se ainda uma composição sem adição de NaOH para avaliar do efeito da diminuição da alcalinidade no desenvolvimento da DEF.

Foram estudadas diferentes adições minerais (Tabela 1), pozolânicas e não pozolânicas, nomeadamente: cinzas volantes de carvão (CV), metacaulino (MK), escórias granuladas de alto-forno (ES), sílica de fumo (SF), lamas de minas de tungsténio (LM), cinzas de biomassa (CB), e filer calcário (FC). Estas adições foram usadas em substituição da massa de cimento e em diversos teores (Tabela 2). Foi ainda ensaiada uma mistura binária (CV + FC) para avaliar a possibilidade de um eventual efeito sinérgico dessa combinação.

**Tabela 1 – Composição química e índice de atividade dos materiais**

Teores (%)	CEM	CV	MK	ES	SF	LM	CB	FC
$\text{SiO}_2$	19,74	53,22	54,66	38,09	96,9	60,78	31,0	0,09
$\text{Al}_2\text{O}_3$	4,14	23,20	37,98	9,38	0,52	18,26	8,5	0,04
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,69	5,85	1,22	0,89	0,14	9,46	3,0	0,06
CaO	63,54	5,36	0,01	36,24	0,58	0,61	24,0	55,66
MgO	2,42	1,63	0,46	7,40	0,00	2,16	4,8	0,10
$\text{SO}_3$	3,11	1,00	0,01	0,27	0,13	-	-	0,02
$\text{K}_2\text{O}$	0,64	1,42	3,09	0,52	0,42	3,93	2,7	0,04
$\text{Na}_2\text{O}$	0,08	0,44	0,00	0,25	0,04	0,46	6,6	0,02
$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq. calculado}}$	0,50	1,37	2,03	0,59	0,32	3,05	8,38	0,05
Perda ao rubro	3,13	5,16	0,94	2,66	1,47	3,12	13,5	43,23
<b>Índice de Atividade Pozolânica (%) (NP EN 450, 1995)</b>								
28 dias	-	87	118	88	n.d. <sup>(*)</sup>	74	n.d. <sup>(*)</sup>	76
90 dias	-	101	119	94	n.d. <sup>(*)</sup>	n.d. <sup>(*)</sup>	n.d. <sup>(*)</sup>	72

<sup>(\*)</sup> valor não determinado



## 2.2. Amassadura. Ensaios de expansão em betão

Os ensaios de expansão, que foram acompanhados pela medição da massa dos provetes, foram efetuados de acordo com o método acelerado LPC nº 66 (Pavoine e Divet, 2007). A fim de promover a formação de DEF, imediatamente após a amassadura os betões foram sujeitos a um tratamento térmico (Fig. 1), que reproduz o aumento de temperatura no interior de uma peça maciça de betão com dimensões de 14 m x 3,5 m x 1,5 m (c x l x h), betonada in-situ com uma temperatura externa média de 23 °C. O betão atinge uma temperatura máxima de 80 °C após 15 horas e é mantido a temperaturas acima de 70 °C durante 3 dias. O programa de temperaturas foi modelado pelo método dos elementos finitos no módulo Texo do programa de cálculo CESAR-LCPC (Divet et al., 1998). Após o final do ciclo térmico, os provetes de betão foram desmoldados e posteriormente sujeitos a dois ciclos de secagem-humidificação de forma a acelerar a cinética da formação de etringite. Cada ciclo teve a duração de 14 dias e é composto de duas fases: secagem durante 7 dias a  $38 \pm 2$  °C e a HR < 30 %, seguida de imersão durante 7 dias a  $20 \pm 2$  °C. Após a realização dos ciclos de secagem-humidificação os provetes foram imersos em água a  $20 \pm 2$  °C, onde permanecem durante o desenrolar do ensaio, sendo só retirados periodicamente a idades pré-definidas para as medições de expansão e de massa.

Adicionalmente foi fabricada uma composição de referência (sem adições) que não foi sujeita a tratamento térmico para avaliar a influência da temperatura no desenvolvimento da formação da DEF.

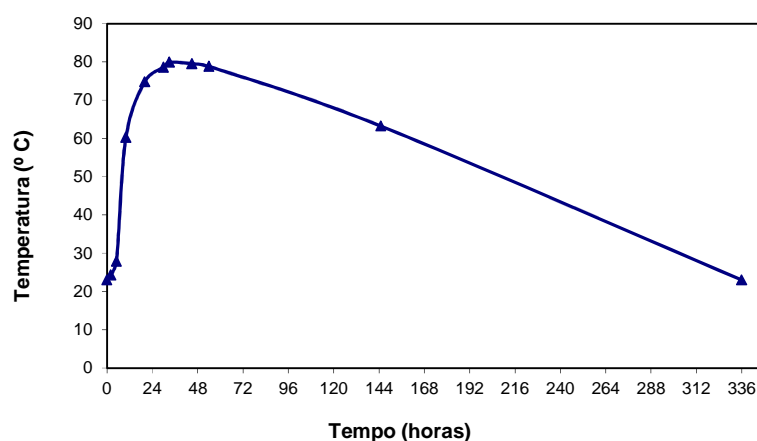


Fig. 1 – Ciclo térmico usado na cura dos provetes ( $T_{\text{máx}} = 80$  °C)

As composições de betão estudadas são apresentadas na Tabela 2.



## IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

**Tabela 2 – Composições de betão usadas**

Composição		Tipo de adição e teor de substituição (% massa)							
		CV	MK	ES	SF	LM	CB	FC	CV/FC
Referência	com tratamento térmico	-	-	-	-	-	-	-	-
	sem tratamento térmico	-	-	-	-	-	-	-	-
		-	5	-	5	-	-	-	
		10	10	10	10	-	-	10	
		15	15	15	-	-	-	15	
Teores de adições minerais		20	20	20	-	-	-	20	20/10
		30	-	-	-	30	30	30	
		-	-	40	-	-	-	-	
		-	-	-	-	-	-	10	
		-	-	-	-	-	-	sem NaOH	

### 2.3. Determinação do teor de álcalis solúveis em água

Um dos mecanismos propostos para explicar a eficácia do uso de adições minerais na supressão da expansão devida à RAS é a redução de alcalinidade na pasta de cimento pela formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) com capacidade de fixação desses álcalis. No caso da RSI pensa-se que essa diminuição pode afetar a solubilidade da etringite, aumentando assim o potencial para a formação de DEF no betão (Divet, 2001; Way e Shayan, 1989; Damidot e Glasser, 1993).

A fim de avaliar a evolução da alcalinidade ao longo do tempo, procedeu-se ao longo de 3 anos à determinação do teor de álcalis solúveis nas composições de betão contendo CV, MK, FC, ES e SF, utilizando o método de extração de água quente (Bérubé et al., 2000). Os teores de sódio (Na) e potássio (K) das soluções extraídas foram determinados por espectrometria de absorção atómica (EAA), e posteriormente expressos em % de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ .

### 2.4. Determinação do teor de hidróxido de cálcio

O consumo de hidróxido de cálcio (portlandite) por meio da reação pozolânica é, de acordo com diversos autores (Shehata e Thomas, 2000), o principal mecanismo de controlo da expansão devida à RAS. No que diz respeito à inibição da DEF, alguns estudos (Ramlochan et al., 2003) demonstraram que o consumo de portlandite pode também ser benéfico.

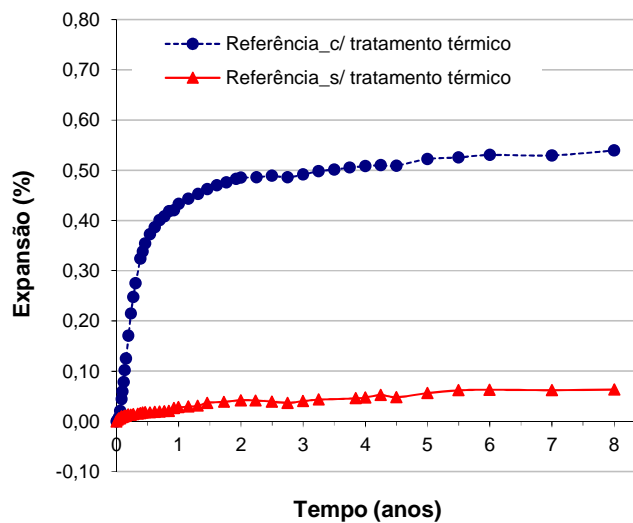
Neste contexto, a par do teor de álcalis foi determinado nas mesmas composições de betão o teor de portlandite durante 3 anos. As análises foram realizadas por termogravimetria em atmosfera inerte (árgon – 3 l/h), com uma velocidade de aquecimento de 10 °C/min, desde a temperatura ambiente até 1000 °C.



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Ensaios de expansão

A Fig. 2 mostra as curvas de expansão obtidas para a composição de referência com e sem tratamento térmico. Os resultados obtidos mostram que o betão que sofreu o tratamento térmico apresenta uma expansão de 0,54 % após 8 anos de ensaio, contra 0,06 % do mesmo betão mas sem tratamento térmico. Este resultado demonstra bem a importância da temperatura de cura na potencialidade de formação da DEF no betão.



**Fig. 2 – Curvas de expansão para a composição de betão de referência com e sem tratamento térmico**

De acordo com o método de ensaio, as composições de betão são consideradas adequadas no controlo da DEF, se for cumprido um dos seguintes critérios: a expansão média ser inferior a 0,04 % a 1 ano de ensaio, e nenhum valor individual ser superior a 0,06 %; ou no caso da expansão média a 1 ano ser entre 0,04 a 0,07 % o ensaio deve ser prolongado até 15 meses, e nesse caso a expansão acumulada entre 12 e 15 meses deve ser inferior a 0,006 % (Pavoine e Divet, 2007).

Nas Fig. 3 e 4 apresentam-se as curvas de expansão das várias composições de betão com uso de adições minerais em substituição do cimento. Constata-se que, em geral, as adições minerais, quando presentes em teores de substituição suficientes, têm um forte efeito de inibição da expansão devida à DEF. Excetuam-se deste comportamento as composições com CB (Fig. 3f) e FC (Fig. 4a), para as quais se verifica uma expansão final superior à da composição de referência.

No caso das cinzas de biomassa verifica-se um efeito retardador da expansão até cerca de 6 meses de ensaio, após o que se verifica um forte incremento na expansão (1,22 % aos 4,5 anos). Este efeito retardador nas primeiras idades poderá estar relacionado com uma eventual libertação de álcalis pelas CB (Tabela 1) para a solução porosa, e que diminuirá ao



## IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

longo do ensaio criando assim condições para a posterior cristalização da etringite com expansão.

Para o filer calcário, não se tratando de uma adição pozolânica, verifica-se que este não inibe a formação de DEF, duplicando mesmo os valores de expansão (1,15 % a 8 anos) em relação à composição de referência (Fig. 4a). O efeito catalisador do FC na DEF poderá estar relacionado com o seu papel nas reações de hidratação do cimento portland. Segundo Ye et al., 2007, as partículas de filer podem funcionar como núcleos de reação para a hidratação do  $C_3S$  e  $C_2S$ , o que levará a uma maior rapidez de hidratação do cimento com diminuição da porosidade da pasta cimentícia, e conseqüentemente menos espaço para acomodar os produtos expansivos. Para outros autores, a hidratação do cimento em presença do filer acelera a formação de etringite, diminuindo ou mesmo parando a sua conversão em monossulfatoaluminato (Poppe and Schutter, 2005), o que levará em presença de água a uma maior expansão. Para além destes fatores, constatou-se que a alcalinidade nos betões com FC (Fig. 4b) tem um efeito acelerador da expansão pela DEF (0,44 % com  $1,60 \text{ kg/m}^3$  de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ , vs. 1,14% com  $5,50 \text{ kg/m}^3$ , expansão aos 8 anos de ensaio). Face ao comportamento do FC, ensaiou-se a sua mistura com CV na proporção de 20% CV+10 %FC. Esta composição (Fig. 4c) apresentou uma expansão aos 8 anos de ensaio (0,02 %) bastante inferior à da composição 10% FC (1,14 %), e mesmo da 20 % CV (0,08 %). Este resultado parece indiciar que existe um efeito sinérgico pelo emprego de misturas binárias de adições minerais.

Os resultados dos ensaios das composições com CV (Fig. 3a) mostram que a partir de 15 % há uma evidente inibição da expansão (0,03% a 1 ano). No entanto, os resultados a longo prazo mostram que é mais seguro a utilização de um teor desta adição de pelo menos 30 % (0,04% aos 8 anos). Com o MK (Fig. 3b) constata-se, comparativamente às CV, existir uma maior eficácia na redução da expansão (0,04 % a 1 ano, na composição com 10% MK), embora a longo prazo seja mais eficaz um teor de 15% (0,05 % aos 8 anos). Nas composições com escórias (Fig. 3c), verifica-se que apenas uma substituição de 40% ES (0,03 % aos 8 anos) é suficiente para inibir a expansão. Com a sílica de fumo (Fig. 3d) obtém-se o mesmo comportamento com apenas 10 % desta adição (0,04 % aos 8 anos), enquanto para as lamelas de mineração (Fig. 3e) é necessário um teor de 30 %.

As diferenças que se obtêm para as várias adições parecem poder estar relacionadas com a sua composição química e atividade pozolânica. De acordo com alguns autores (Ramlochan et al., 2003) a disparidade no controlo DEF poderá estar relacionado também com o teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de as adições (Tabela 1). Isto poderia explicar por que, para o mesmo nível de substituição, o MK ou CV foram mais eficientes do que ES na inibição DEF. Além disso, a atividade pozolânica das adições é também um fator importante, uma vez que controla a alcalinidade da solução intersticial de betão, que desempenha um papel importante na formação de etringite (Divet, 2001; Santos Silva, 2010a, 2010b, 2011).



## IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

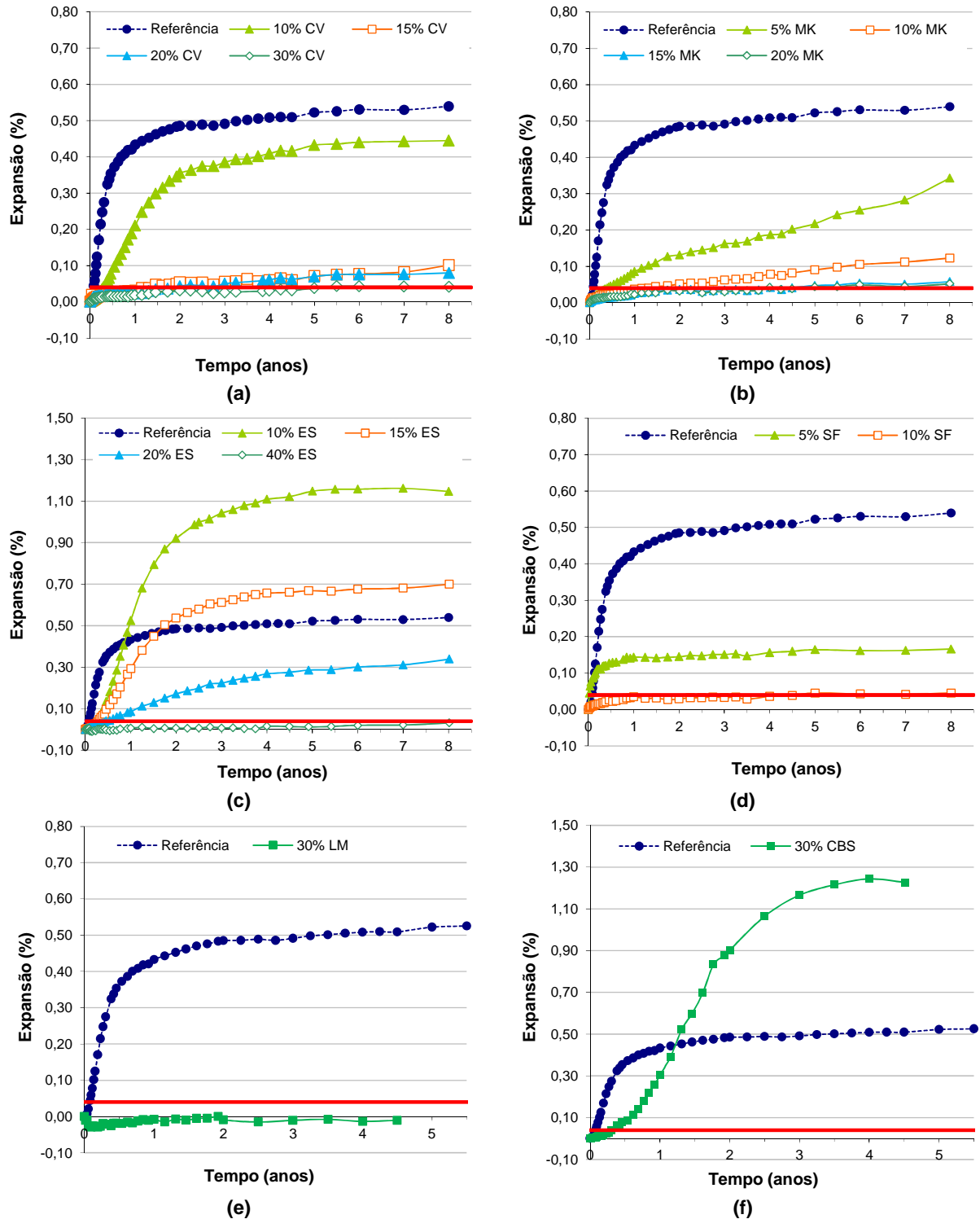


Fig. 3 – Efeito do teor de substituição (% massa) de (a) CV, (b) MK, (c) ES, (d) SF, (e) LM e (f) CB na expansão devida à DEF



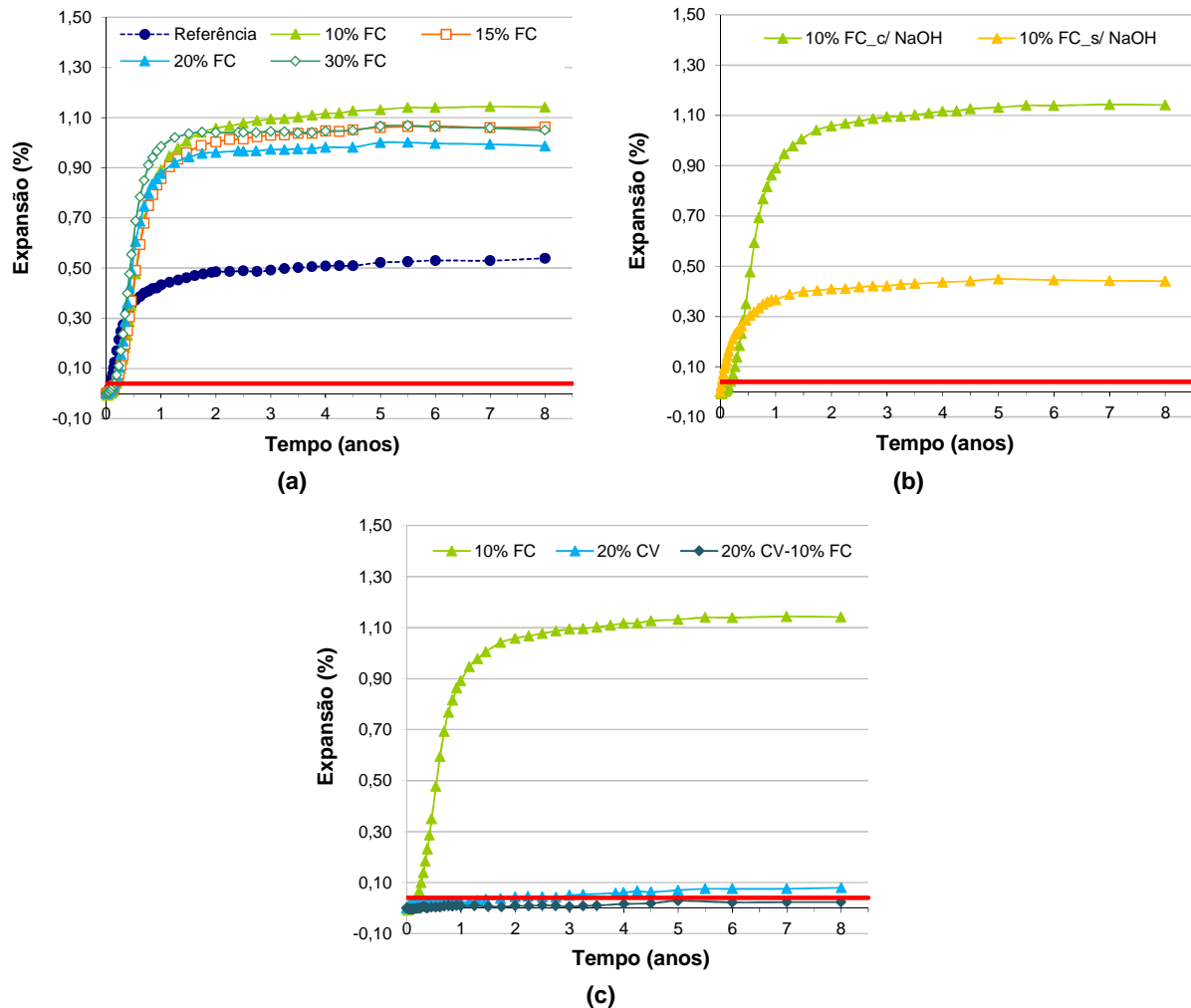


Fig. 4 – Efeito do teor de substituição (% massa) de (a) FC, (b) FC com e sem adição de álcalis, e (c) mistura de FC e CV, na expansão devida à DEF

### 3.2. Ensaio de determinação do teor de álcalis solúveis em água

Na Fig. 5 apresentam-se os resultados da evolução do teor de álcalis solúveis (expresso na forma de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ), para as composições de betão com CV, MK, FC, ES e SF. Em termos gerais verifica-se uma diminuição do teor de álcalis ao longo do tempo de ensaio, situação que pode ser atribuída à sua incorporação nos produtos de hidratação resultantes da reação entre o cimento e as adições minerais (Shehata e Thomas, 2000) e, também, pela lixiviação que ocorrerá em resultado da longa imersão dos provetes nos ensaios de expansão. Para além disso, os resultados indicam que quanto maior é o teor de substituição maior é o teor de álcalis solúveis do betão. Esta tendência, que ocorre com exceção das composições com FC, acompanha a tendência de diminuição da expansão com o aumento do teor de substituição. Estes resultados apontam assim para um efeito benéfico das adições minerais,



nomeadamente com o aumento da alcalinidade do betão às primeiras idades que retarda a formação de etringite (Way e Shayan, 1989) e aumenta a solubilidade desta (Damidot e Glasser, 1993).

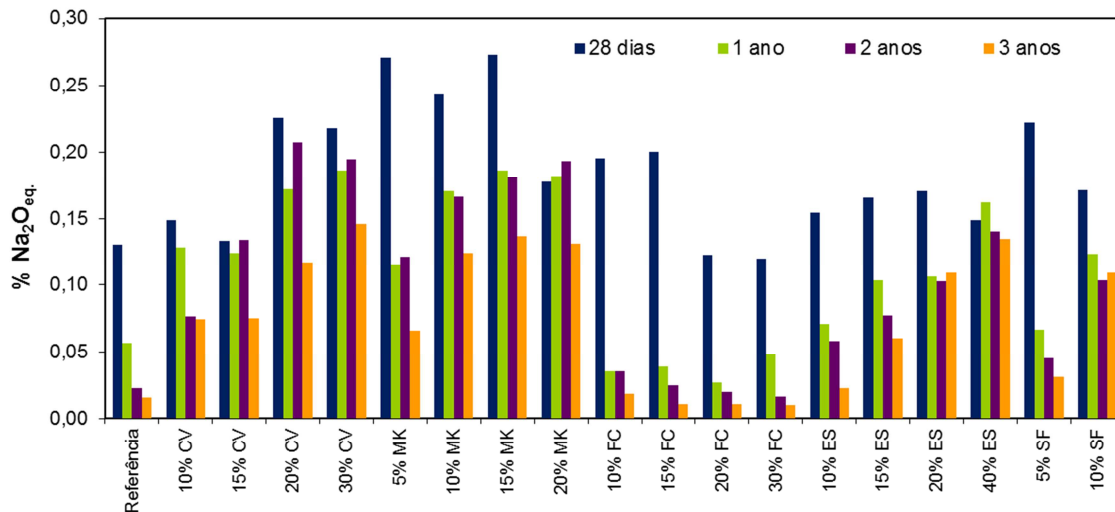


Fig. 5 – Evolução do teor de álcalis solúveis nas composições de betão ensaiadas de acordo com método LPC nº 66

### 3.3. Ensaios de determinação do teor de portlandite

Na Fig. 6 apresentam-se os resultados da evolução do teor de portlandite para as composições de betão analisadas. À exceção das composições com FC confirma-se, como era de esperar, que quanto maior o teor de substituição menor é o valor de portlandite livre no betão. Verifica-se, ainda, que as composições com MK e CV, que eram das que tinham apresentado menores valores de expansão, são as que registaram um maior consumo de portlandite por meio da reação pozolânica. Contrariamente, as composições com FC e ES (com exceção da composição 40% ES), que apresentaram maiores expansões, são as que evidenciam menor redução no teor de portlandite. O comportamento das composições com SF sai fora deste padrão, o que poderá estar relacionado com a possível aglomeração das suas partículas (nestas composições não foi adicionado qualquer superplastificante) que nessas condições não favorecem o desenvolvimento da reação pozolânica.

Com base nestes resultados pode-se inferir que há uma boa correlação entre a redução da expansão devida à DEF e o consumo de portlandite (Santos Silva et al., 2010a, 2010b). Esta observação sugere que a eficácia das adições minerais na mitigação da expansão por DEF dependerá, entre outros parâmetros, da redução do teor de portlandite (Ramlochan et al., 2003, 2004).

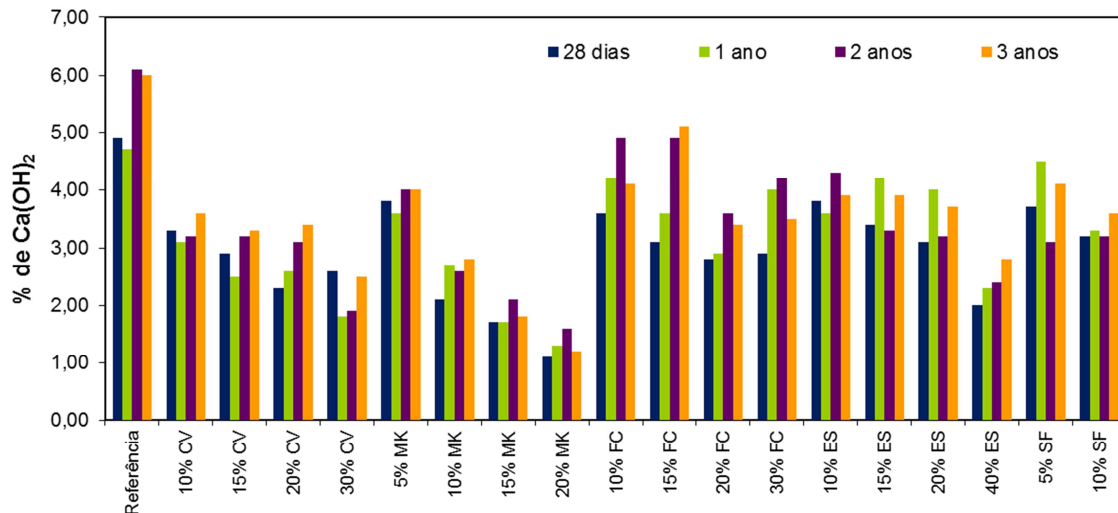


Fig. 6 – Evolução do teor de portlandite nas composições de betão ensaiadas de acordo com método LPC nº 66

#### 4. CONCLUSÕES

Nesta comunicação apresentaram-se os resultados de ensaios de betão com diferentes tipos de adições minerais (cinzas volantes de carvão, metacaulino, escória granulada de alto-forno, sílica de fumo, lamas de minas de tungstênio, cinzas de biomassa e filer calcário) referentes a cerca de 8 anos de acompanhamento.

Os resultados obtidos mostram que as adições minerais podem ser eficientes na inibição da expansão por DEF, dependendo essa eficácia do tipo e teor de adição mineral, sendo as adições pozolânicas as únicas com capacidade mitigadora e de inibição da DEF. Para betões sujeitos à temperatura de cura da ordem dos 80 °C (temperatura máxima atingida por uma peça maciça de betão com dimensões de 14 m x 3,5 m x 1,5 m), os teores de adições para os quais a redução na expansão por DEF foi eficiente são: 30% de CV, 15 % de MK, 40 % de ES, 10 % de SF e 30% de LM. O mecanismo de supressão da expansão devida à DEF pelas adições minerais é complexo, no entanto, constatou-se que o controlo da alcalinidade do betão bem como a redução do teor de portlandite têm um efeito benéfico nesse processo.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Bérubé, M.A., Frenette, J., Rivest, M. and Vézina, D., 2000. Measurement of the alkali content of concrete using hot-water extraction, Proceedings of 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Québec City, Canada, p. 159-168.
- BRE, 2001. Delayed Ettringite formation: in-situ concrete, Information Paper IP 11/01.



## IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

- Damidot, D., Glasser, F.P., 1993. Thermodynamic investigation of the  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$  system at 25°C and the influence of  $\text{Na}_2\text{O}$ ", Cement and Concrete Research, vol. 23 (1), p. 221-238, 1993.
- Divet, L., Guerrier, F., Le Mestre, G., 1998. Existe-t-il un risqué de développement d'une activité sulfatique d'origine endogène dans les pièces en béton de grande masse. Le cas du pont d'Ondes (Haute-Garonne), Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 213, p. 59-72.
- Divet, L., 2001. Les réactions sulfatiques internes au béton: contribution à l'étude des mécanismes de la formation différée de l'ettringite, Laboratoire Central de Ponts et Chaussées (LCPC), vol. 40, Paris, p. 227.
- Godart, B., Divet, L., 2013. Lessons learned from structures damaged by delayed ettringite formation and the French prevention strategy. Fifth international conference on Forensic Engineering, Institution of Civil Engineers, Apr 2013, France, p. 12p.
- Hobbs D.W., 1999. Expansion and cracking of concrete attributed to delayed ettringite formation", In Proceedings of a 'technical Session – Ettringite: The sometimes host of destruction (Editor: Bernard Elvin), American Concrete Institute, Seattle, Washington, SP-177, p. 151-181.
- NP EN 450, "Cinzas volantes para betão. Definições, exigências e controlo da qualidade", IPQ, 1995.
- Pavoine, A., Divet, L., 2007. Réactivité des bétons vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne. Essais de performance. Techniques et méthodes des LPC.", Méthode d'essai des lpc, Vol. 66, p. 19.
- Poppe, A. M., Schutter, G., 2005. Cement hydration in the presence of high filler contents, Cement and Concrete Research, 35 (12), p.2290-2299.
- Ramlochan, T., Zacarias, P., Thomas, M.D.A., Hooton, R.D., 2003. The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature. Part I: Expansive behaviour, Cement and Concrete Research, 33 (6), p. 807-814.
- Ramlochan, T., Thomas, M.D.A. and Hooton, R.D., 2004. The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature. Part II: Microstructural and microchemical investigations', Cement and Concrete Research, 34 (8), p. 1341-1356.
- Santos Silva, A., 2009. Durabilidade do betão. Mitigação das reacções expansivas internas, Construção Magazine, Nº 31, p. 16-20.
- Santos Silva, A., Soares D., Matos, L., Salta, M., Ribeiro Bettencourt A., Gonçalves A., 2010a. Reacções expansivas internas no betão: mitigação da expansão pelo emprego de adições minerais, Proceedings of the BE2010 – Encontro Nacional de Betão Estrutural, Lisboa, Portugal, 11pp.
- Santos Silva, A., Soares D., Matos, L., Salta, M., Ribeiro Bettencourt A., Gonçalves A., 2010b, Mitigação das reacções expansivas no betão: avaliação do efeito do uso de adições minerais em substituição de cimento, Proceedings of the REABILITAR 2010 – Encontro Nacional Conservação e Reabilitação de Estruturas, Lisboa, Portugal, 10pp.
- Santos Silva, A., Soares, D., Matos, L., Divet, L., Salta, M., 2011. Inhibition of ASR and DEF: Evaluation of the microstructure of concrete mixes with pozzolanic additions, Proceedings of 13th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, EMABM 2011, edited by Alenka Mauko, Tadeja Kosec, Tinkara Kopar, Nina Gartner, Ljubljana, Slovenia, 15 p. ISBN 978-961-90366-7-9.
- Shehata, M.H. and Thomas, M.D.A., 2000. The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction, Cement and Concrete Research, 30 (7), p. 1063-1072.
- Shehata, M.H. and Thomas, M.D.A., 2002. Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress alkali silica reaction in concrete, Cement and Concrete Research, 32 (3), p. 341-349.
- Way, S.J., Shayan, A., 1989, Early hydration of a portland cement in water and sodium hydroxide solutions: Composition of solutions and nature of solid phases, Cement and Concrete Research, vol. 19 (5), p. 759-769.
- Ye, G., Liu, X., Schutter, G., Poppe, A. M., Taerwe, L., 2007. Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes, Cement and Concrete Research, 29 (2007), p. 94-102.