



## 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'Amenagement et des Reseaux, [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

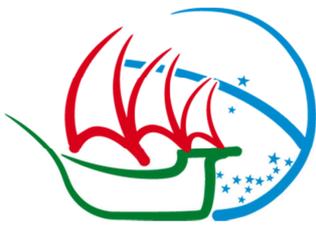
Nos últimos anos vários casos de degradação prematura de estruturas de betão têm sido relacionados com a reação sulfática interna (RSI). Esta forma de degradação está relacionada com a remobilização dos sulfatos incluídos na matriz de cimento, devido ao aquecimento excessivo do betão durante as idades 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.

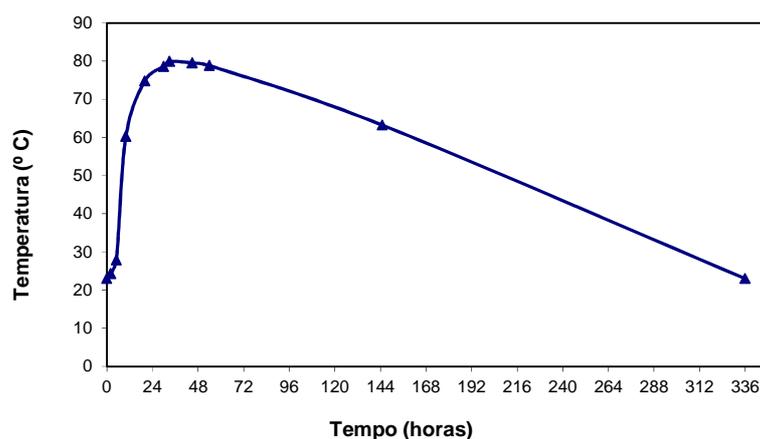


Fig. 1 – Ciclo térmico usado na cura dos provetes ( $T_{\text{máx}} = 80$  °C)

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	-	-	-	-	-	-	-	-
Teores de adições minerais		-	5	-	5	-	-	-	
		10	10	10	10	-	-	10	
		15	15	15	-	-	-	15	
		20	20	20	-	-	-	20	20/10
		30	-	-	-	30	30	30	
		-	-	40	-	-	-	-	
		-	-	-	-	-	-	10 sem NaOH	-

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

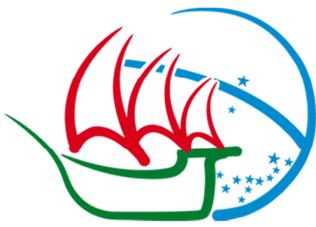
Um dos mecanismos propostos para explicar a eficácia do uso de adições minerais na supressão da expansão devida à RAS é a redução de alcalinidade na pasta de cimento pela formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) com capacidade de fixação desses álcalis. No caso da RSI pensa-se que essa diminuição 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.

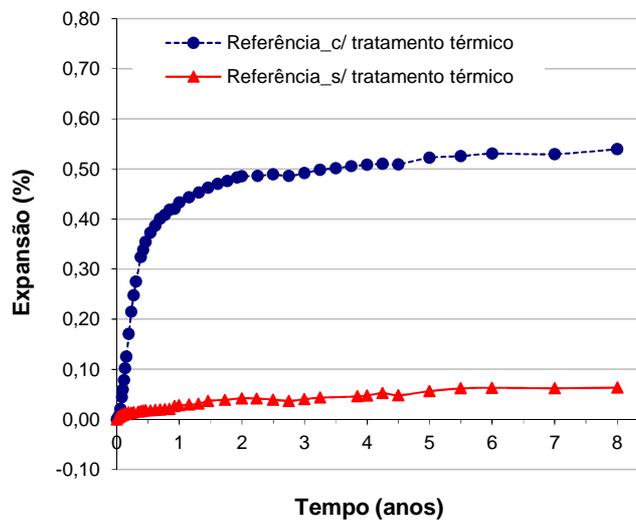
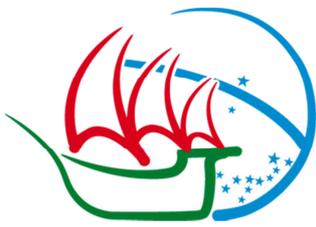


Fig. 2 – Curvas de expansão para a composição de betão de referência com e sem tratamento térmico

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



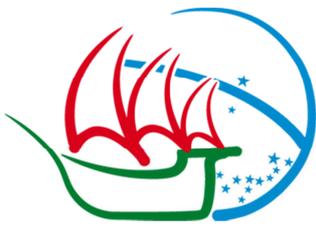
LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

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

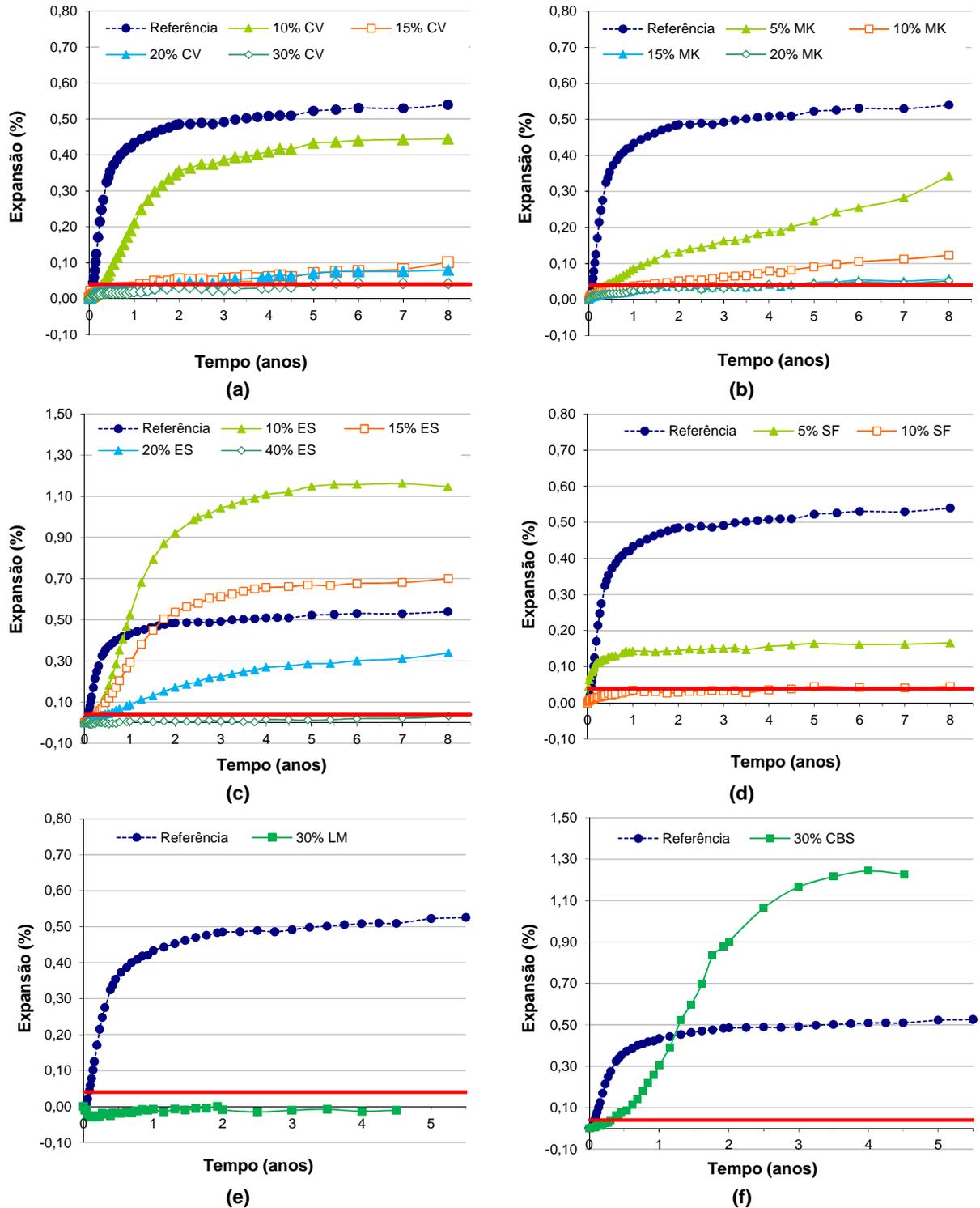


Fig. 3 – Efeito do teor de substituição (% massa) de (a) CV, (b) MK, (c) ES, (d) SF, (e) LM e (f) CB na expansão devida à DEF

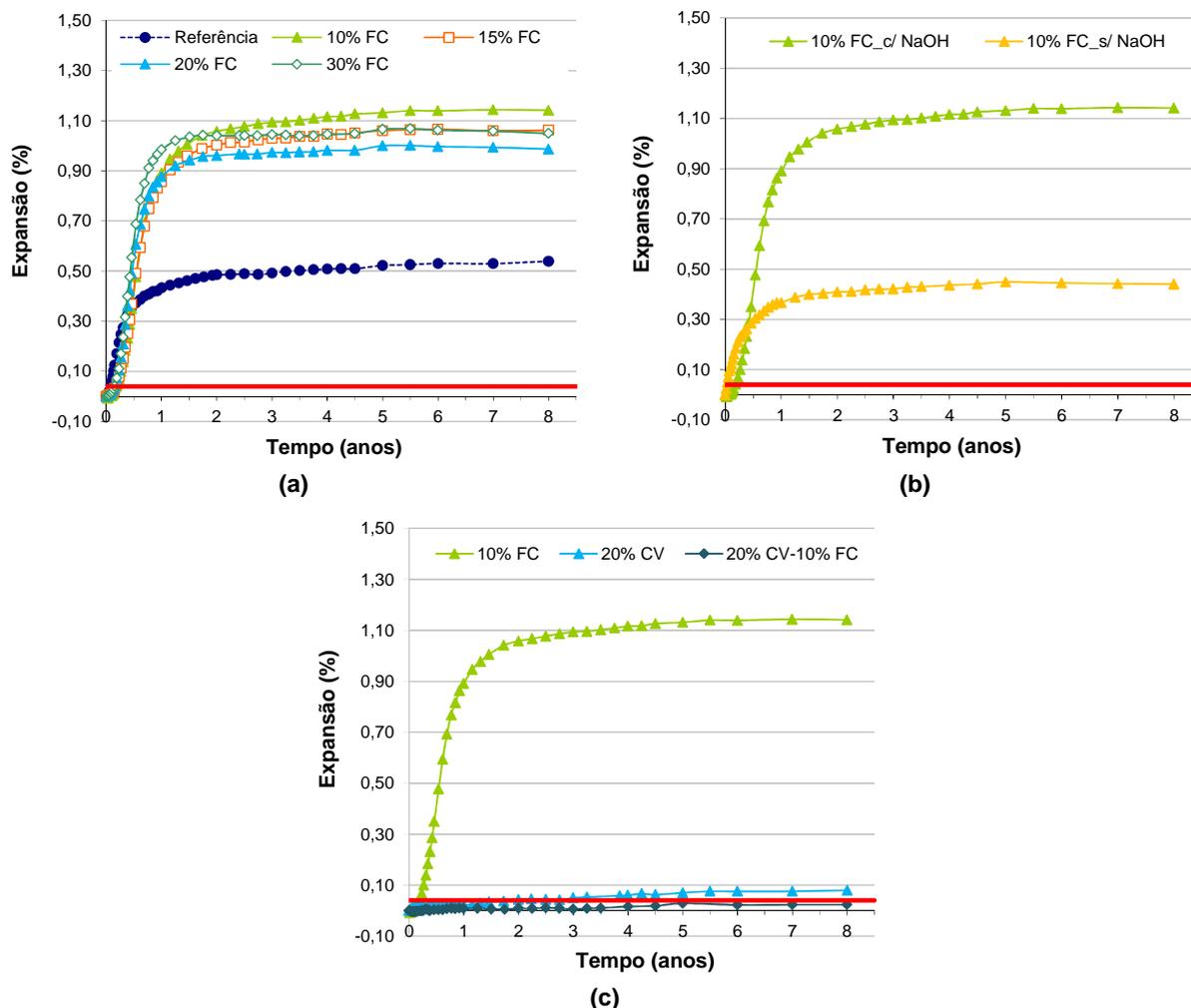
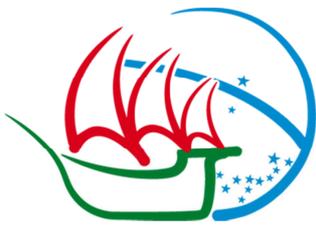


Fig. 4 – Efeito do teor de substituição (% massa) de (a) FC, (b) FC com e sem adição de álcalis, e (c) mistura de FC e CV, na expansão devida à DEF

### 3.2. Ensaios 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).

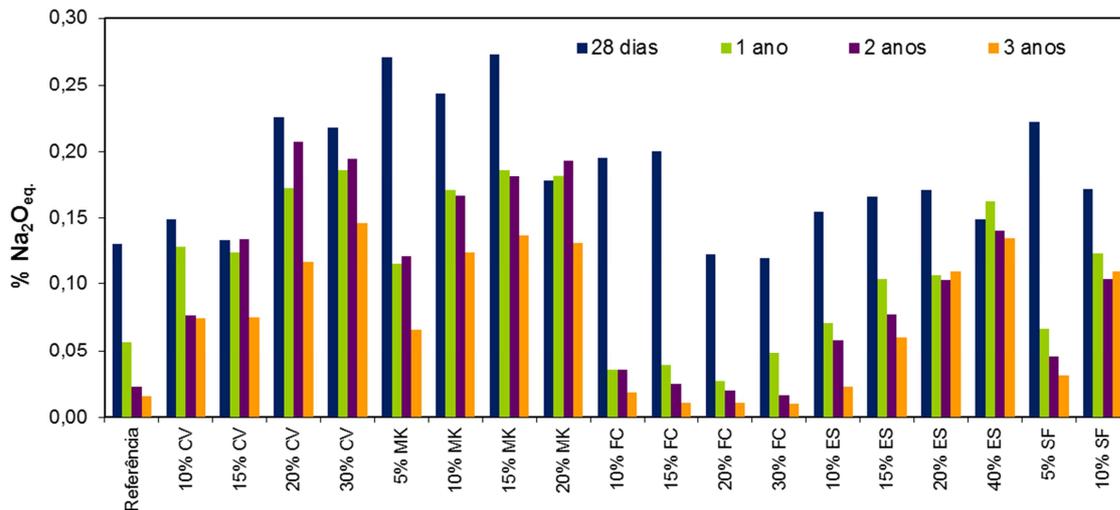


Fig. 5 – Evolução do teor de álcalis solúveis nas composições de betão ensaiadas de acordo com método LPC nº 66

### 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).

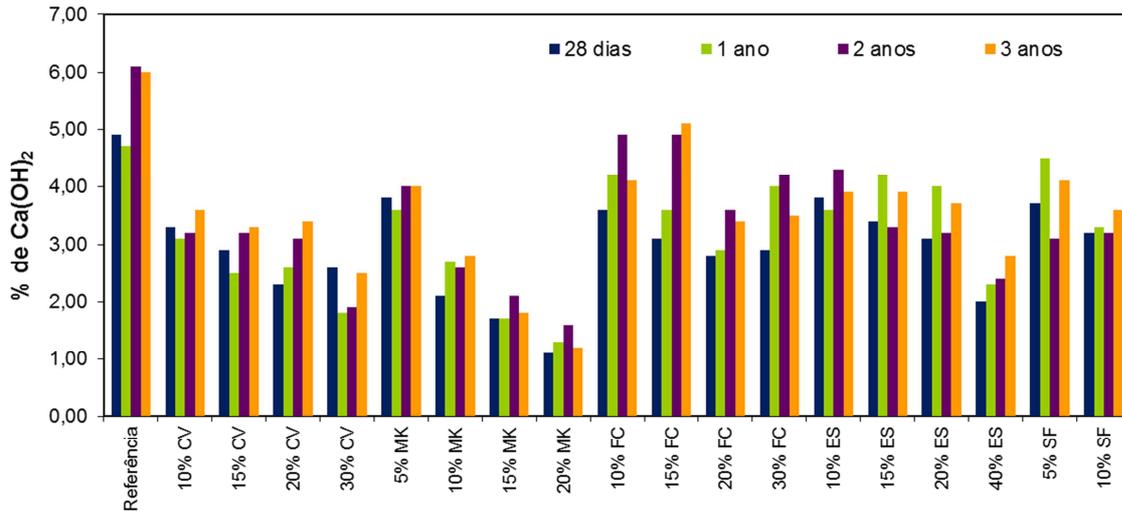
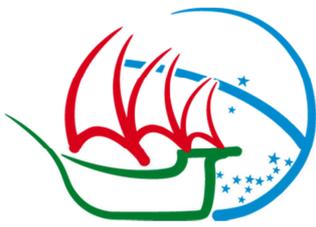


Fig. 6 – Evolução do teor de portlandite nas composições de betão ensaiadas de acordo com método LPC nº 66

#### 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 filler 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.