

DURABILIDADE DO BETÃO. MITIGAÇÃO DAS REACÇÕES EXPANSIVAS INTERNAS.

António Santos Silva
Departamento de Materiais
Laboratório Nacional de Engenharia
ssilva@lnec.pt

1. INTRODUÇÃO

O número de casos de estruturas de betão afectadas por reacções expansivas internas tem aumentado muito nos últimos anos, tanto em Portugal como a nível internacional. A degradação do betão por reacções químicas de origem interna engloba dois tipos de reacções expansivas: a reacção álcalis-sílica (RAS) e a reacção sulfática de origem interna (RSI). Estas duas reacções, que têm manifestações macroscópicas semelhantes (Figura 1), quando detectadas são muito difíceis de combater, não existindo ainda um método totalmente eficaz de reparação para estruturas degradadas por RAS ou RSI. Este aspecto salienta assim a necessidade da tomada de medidas mitigadoras contra a sua ocorrência no futuro.



Figura 1 – Fissuração no betão característica de reacções expansivas internas.

2. DEGRADAÇÃO DO BETÃO POR REACÇÕES ÁLCALIS-SÍLICA (RAS)

2.1. Definição e mecanismos

As reacções álcalis-sílica (RAS) correspondem a uma designação atribuída a um grupo de reacções químicas que ocorrem entre certas formas de sílica reactiva dos agregados e os iões alcalinos (Na^+ e K^+) e hidroxilos (OH^-) presentes na solução intersticial da pasta de cimento no betão. Estas reacções ocorrem em resultado da grande solubilidade que as formas amorfas, desordenadas ou mal cristalizadas de sílica apresentam em soluções muito alcalinas originando um gel higroscópico silico-alcalino. Este gel reage com os iões cálcio (Ca^{2+}), cuja fonte principal é a portlandite (hidróxido de cálcio) formada pelas reacções de hidratação do cimento, dando origem a geles de silicatos de cálcio alcalinos de composição variável, que são capazes de absorver moléculas de água e expandir, gerando forças expansivas. São estas forças que originam tensões de tracção dentro do betão e vão causar fissuração (Figura 2).

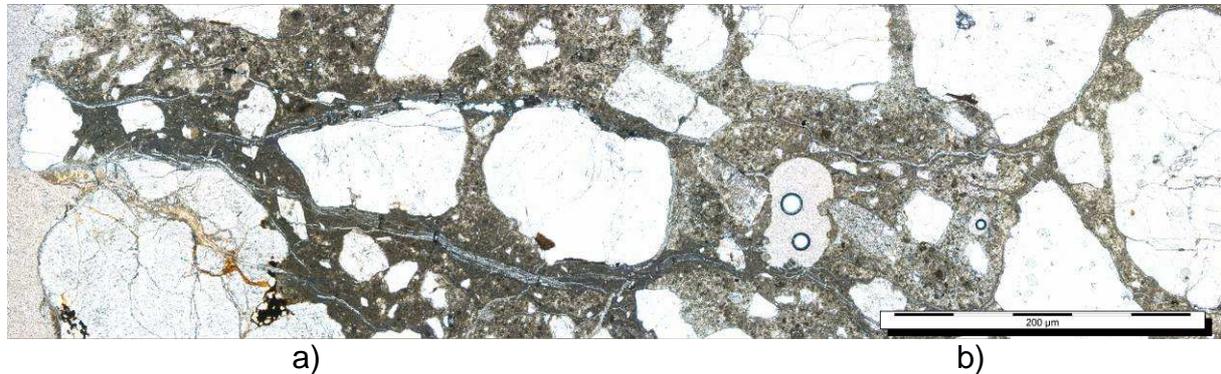


Figura 2 – Observação ao microscópio petrográfico duma lâmina delgada de betão que mostra a presença de gel e a microfissuração por RAS em torno de grãos siliciosos.

2.2. Factores condicionantes e as medidas mitigadoras da RAS no betão

A RAS só ocorrerá no betão quando todas as condições que promovem o seu desenvolvimento estão presentes, isto é:

- Existência de agregados reactivos com teores dentro duma gama crítica;
- Alcalinidade elevada da solução intersticial;

- Humidade elevada.

Assim, duma maneira ou doutra, as recomendações que são propostas para mitigar a RAS procuram excluir pelo menos um dos três factores referidos.

2.2.1. Emprego de agregados não reactivos

Uma das formas de evitar a RAS passa naturalmente pela utilização de agregados não reactivos aos álcalis. O conceito de reactividade de um agregado ou mistura de agregados relativamente à RAS é, geralmente, definido a partir do resultado que é obtido pelo agregado em ensaios de caracterização petrográfica, ou a partir do comportamento de provetes de argamassa ou betão em ensaios acelerados de expansão, estando associado com a maior ou menor presença de minerais reactivos aos álcalis.

A avaliação da reactividade aos álcalis dum agregado para betão deve incluir, quando o agregado foi anteriormente considerado de reactivo por análise petrográfica e pelo método acelerado da barra de argamassa, a realização de ensaios em betão. Esta metodologia visa, por um lado, aproximar mais a caracterização em laboratório da realidade prática da utilização dum determinado agregado no betão e, por outro, permitir que agregados que haviam sido considerados reactivos, quando misturados com outros não reactivos, possam vir a ser utilizados. Esta abordagem tem a vantagem de permitir fazer uma gestão mais racional e sustentada dos recursos naturais.

Indo ao encontro desta preocupação o LNEC elaborou a Especificação E 461 que apresenta a metodologia a seguir para a caracterização da reactividade aos álcalis de agregados para betão – Figura 3. Os agregados são classificados em 3 classes de reactividade: classe I – agregado não reactivo; classes II e III – agregados potencialmente reactivos, sendo os da classe III mais reactivos que os da classe II. No entanto, os agregados que sejam classificados como pertencentes às Classes II ou III poderão ainda vir a ser empregues em betão quando, por exemplo misturados com outros agregados, a mistura for considerada não reactiva, ou quando utilizado numa composição particular de betão o ensaio de prisma de betão confirmar a não reactividade da composição (Figura 4).

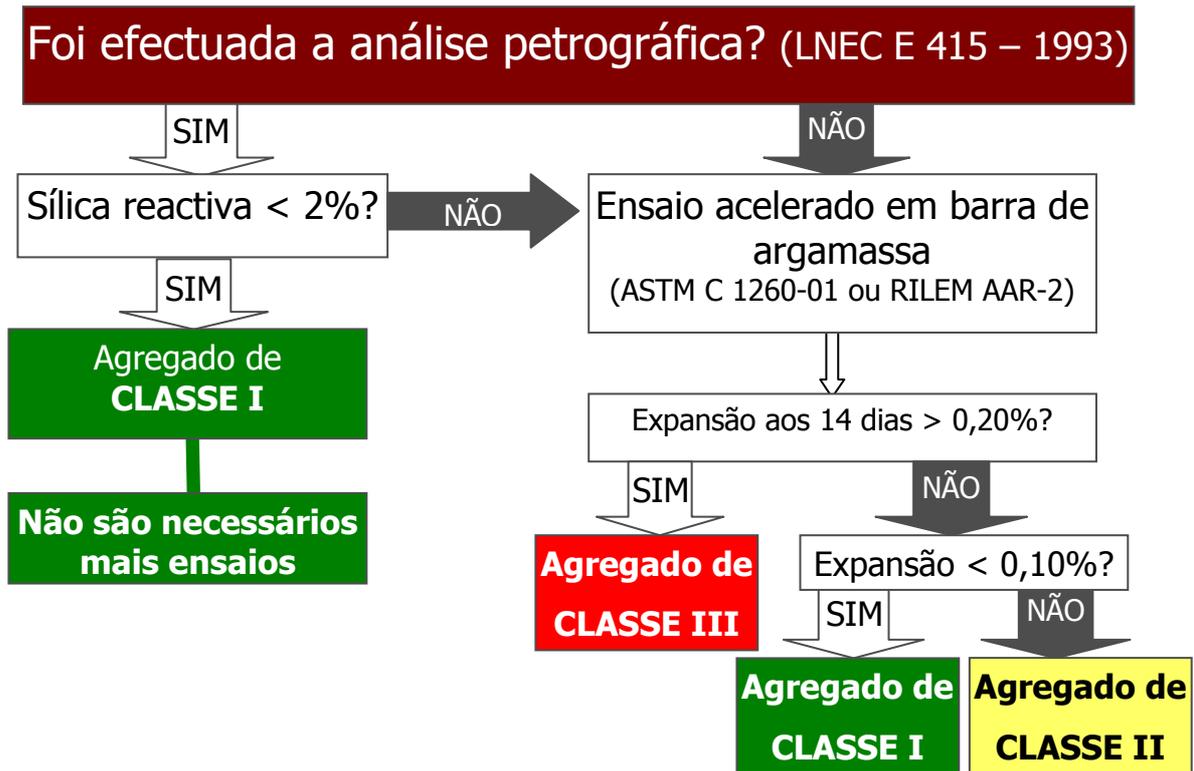


Figura 3 – Metodologia para avaliação da reactividade dos agregados.

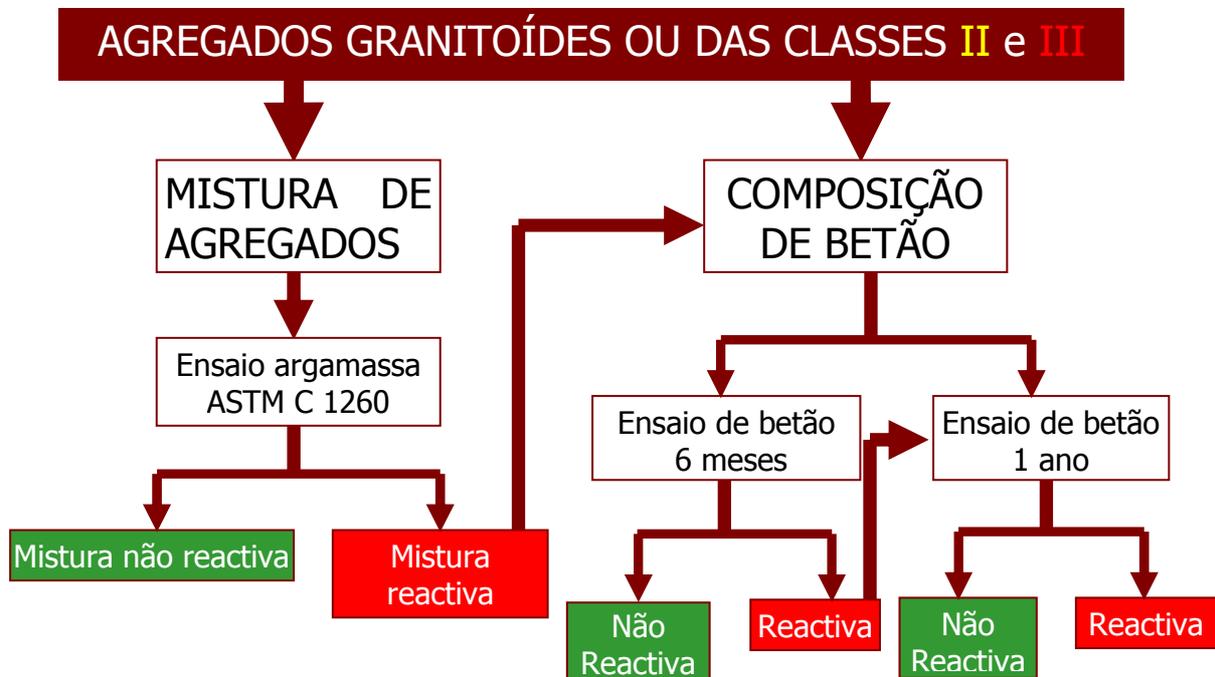


Figura 4 – Metodologia de avaliação da susceptibilidade dum mistura de agregados ou dum composição de betão desenvolverem reacções álcalis-sílica.

2.2.2. Redução da alcalinidade da solução intersticial do betão

A redução do teor de álcalis da solução intersticial do betão pode ser realizada de diferentes formas:

- Controlando o teor de álcalis do betão;
- Utilizando adições minerais do tipo II, em quantidade considerada suficiente.

Usualmente o cimento é a principal fonte de álcalis para o betão, pelo que o teor de álcalis do betão é obtido a partir do teor de álcalis do cimento (expresso em $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq.}}$) multiplicado pela dosagem de cimento e a adição de um factor que traduza o teor proveniente de outros constituintes. Para além do cimento deverão ser consideradas outras fontes de álcalis para o betão, nomeadamente, as provenientes de agregados, de adições pozolânicas, de adjuvantes e da água de amassadura. A utilização de adições tipo II no betão, como adição ou em ainda em substituição do cimento, para o controlo da alcalinidade da solução intersticial do betão, é um conceito que reúne alguma unanimidade na prevenção da RAS. A E 461, elaborada com base em trabalho realizado a nível nacional e a partir de dados publicados pela RILEM, recomenda a utilização dos seguintes teores por tipo de adição: sílica de fumo = 10%, cinzas volantes siliciosas ≥ 30 %, escória granulada de alto forno moída ≥ 50 %. Para além destes três tipos de adição, também a utilização de metacaulino em teor da ordem dos 15% tem vindo a ser referido como efectivo no controlo e prevenção da RAS.

2.2.3. Controlo da humidade do betão

Sendo necessário um teor de humidade superior a 75-80% no betão para desencadear a RAS, qualquer método que previna o acesso da água ao betão com agregados reactivos, pode limitar o risco de desenvolvimento da RAS. Nesses métodos incluem-se condutas ou outras soluções de projecto que evitem a acumulação da água na estrutura de betão, ou ainda a aplicação de revestimentos por pintura ou revestimentos selantes. De salientar que todos estes sistemas deverão ser considerados na fase de projecto.

2.2.4. Modificação das propriedades expansivas do gel da RAS

A utilização de sais de lítio, nomeadamente de nitrato, para prevenir a RAS tem na última década sido muito referida a nível internacional. A sua dosagem está dependente da reactividade dos agregados – quadro 1.

Quadro 1 – Dosagens mínimas numa solução a 30% de nitrato de lítio

Classe de reactividade dos agregados	Dosagem (kg) de LiNO_3 (a 30%) por kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$. no betão
Classe III	5,95
Classe II	3,75

3. REACÇÃO SULFÁTICA INTERNA NO BETÃO

3.1. Definições e mecanismos

A degradação do betão pelos sulfatos é conhecida desde há cerca de um século. Poderia pensar-se que este tipo de patologia no betão estaria em regressão graças a uma adequada selecção dos materiais, nomeadamente do tipo de cimento a utilizar. No entanto, estruturas e peças de betão ainda são afectadas por uma actividade sulfática, cuja origem é por vezes atribuída aos constituintes usados no fabrico do betão. Esta patologia é por isso denominada por reacção sulfática de origem interna. Ao contrário das reacções sulfáticas mais clássicas onde os sulfatos atacam o betão a partir do exterior, provocando uma degradação progressiva desde a superfície para o interior da peça, a reacção sulfática de origem interna afecta o conjunto do betão sem ter necessidade de uma fonte externa de sulfatos. Esta reacção provoca a expansão do material, originando a nível macroscópico a fissuração da estrutura e é atribuída à formação de etringite (trisulfoaluminato de cálcio hidratado de fórmula $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) que apresenta, sob certas condições termodinâmicas, propriedades expansivas.

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 D.E.F., do termo inglês “*Delayed Etringite Formation*”. Este fenómeno é conhecido desde há duas dezenas de anos, e tem sido encontrado em betões de composição particularmente sensível, expostos a um ambiente propício (humidificação frequente) e tendo sofrido um tratamento térmico elevado ($\geq 65^{\circ}\text{C}$) ou tendo atingido 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.

De entre os vários mecanismos reaccionais propostos, distinguem-se dois que intervêm na formação da DEF:

- A instabilidade da etringite aumenta com o aumento da temperatura e da basicidade.
- Uma modificação das reacções de hidratação do par C_3A -gesso devido a uma elevação de temperatura.

3.2. Os factores determinantes e as medidas mitigadoras da DEF

A principal causa da DEF é uma elevação de temperatura ($> 65^{\circ}\text{C}$) durante a presa do betão. Uma segunda causa é um forte teor em álcalis do cimento. De facto, a presença de iões em solução tal como os iões Na^+ ou K^+ aumenta a solubilidade da etringite. Igualmente, a DEF só ocorre se o cimento utilizado apresentar teores suficientemente elevados de C_3A e de sulfatos. Também a humidade desempenha um papel fundamental no desenvolvimento da reacção sulfática. De facto, a água intervém tanto no processo de transferência como na formação dos produtos de reacção.

As medidas mitigadoras da DEF assentam também no pressuposto da necessidade de se implementar pelo menos uma das condições necessárias para evitar que a reacção ocorra. Essas condições são:

- Controlar a temperatura máxima do betão.
- Controlar o teor de álcalis do betão e de aluminatos e sulfatos do ligante.
- Controlar a humidade e manter o betão num estado relativamente seco.
- Controlar o teor de hidróxido de cálcio do betão.

3.2.1. Controlo da temperatura máxima do betão

A temperatura máxima do betão nas primeiras idades não deve exceder 65 °C. O controlo da temperatura pode ser feito actuando na composição do betão e durante e após a sua colocação. No primeiro caso, pode utilizar-se um cimento de baixo calor de hidratação, limitar a dosagem do cimento ou utilizar adições tipo II. No segundo caso, pode promover-se o arrefecimento do betão durante o fabrico (por ex. com adição de nitrogénio líquido, de gelo na betoneira, arrefecendo previamente os agregados), durante e após a colocação (por ex. fazendo circular água fria em condutas) ou realizar as betonagens fora dos períodos de maior calor.

3.2.2. Controlo dos teores de álcalis do betão e de aluminatos e sulfatos do ligante

A maior parte dos casos de expansões e de deteriorações observadas em estruturas ou em laboratório, referem-se a cimentos de teor em $\text{SO}_3 > 2,6\%$ e $\text{C}_3\text{A} > 8\%$. Por esta razão a E 461 indica que o teor de álcalis no betão deve ser inferior a 3,0 kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ e os valores limites para SO_3 e C_3A são, em percentagem do ligante, os seguintes:

- $\text{SO}_3 \leq 3,5 \%$ se $\text{C}_3\text{A} \leq 3\%$
- $\text{SO}_3 \leq 2,5 \%$ se $3\% \leq \text{C}_3\text{A} \leq 5\%$.

3.2.3. Controlo da humidade do betão

O controlo da humidade pode ser realizado seguindo integralmente a mesma abordagem estabelecida para a RAS (secção 2.2.3).

3.2.4. Controlo do teor de hidróxido de cálcio do betão

As adições minerais, como a sílica de fumo, cinzas volantes, escórias de alto-forno, metacaulino, têm, dependendo do teor adicionado, um papel benéfico na inibição da DEF – Figura 5. De facto, as adições ao reagirem com a portlandite controlam a alcalinidade do meio evitando a formação de produtos expansivos.

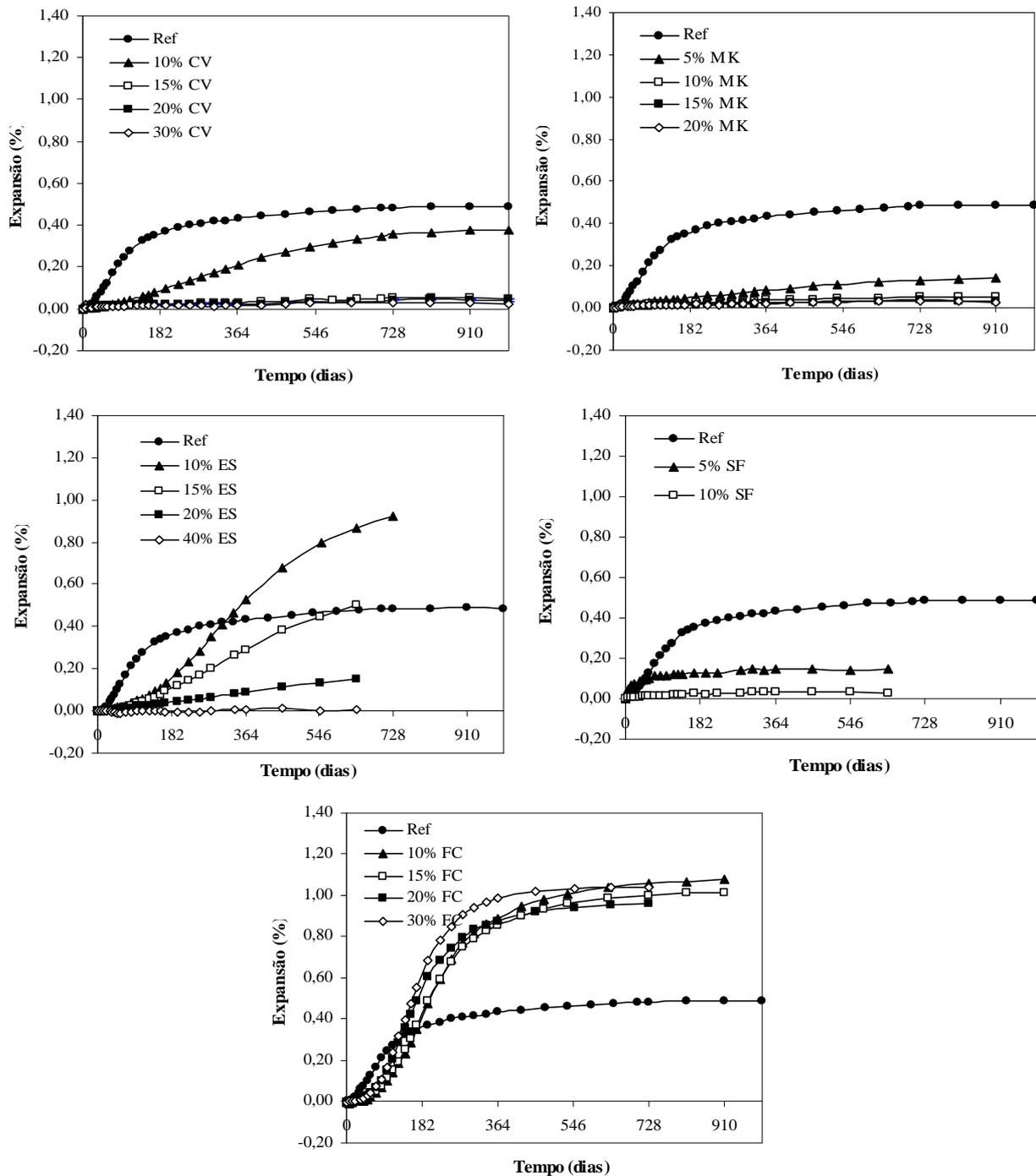


Figura 5 – Curvas de expansão de composições de betão com diferentes teores (% em massa) de adições minerais. *Legenda: Ref – sem adições; CV – cinzas volantes; MK – metacaulino; ES – escórias granuladas de alto-forno; SF – sílica de fumo; FC – filer calcário.*

4. CONCLUSÕES

A degradação por reacções expansivas internas tem vindo a ser detectada num número cada vez maior de estruturas de betão no nosso País. Tendo em

consideração os factores litológicos e ambientais, e a não aplicação, por eventual desconhecimento do meio técnico, do normativo nacional preventivo, é expectável que esses números aumentem consideravelmente nos próximos anos.

O actual normativo nacional para a mitigação desta forma de degradação aposta numa metodologia integrada que faz uso do controlo dos factores condicionantes desta anomalia. Neste contexto é dada particular atenção ao emprego de materiais com características pozolânicas, como cinzas volantes ou metacaulino, como forma de prevenção. Face à diminuição expectável nos próximos anos da produção de cinzas volantes das centrais térmicas, encontram-se em avaliação e estudo outros materiais nacionais de origem natural ou subprodutos industriais para avaliar a sua potencialidade na mitigação desta forma de degradação do betão.

As medidas mitigadoras actualmente em vigor, se forem respeitadas, deverão permitir num futuro próximo que as novas estruturas de betão apresentem uma maior durabilidade.

AGRADECIMENTOS

O artigo apresentado integra-se no Programa de Investigação Programada do LNEC e no Projecto EXREACT (Mitigação de reacções deletérias expansivas internas em estruturas de betão, PTDC/CTM/65243/2006) da FCT.

BIBLIOGRAFIA

- Santos Silva, A. (2005). *Degradação do betão por reacções álcalis-sílica. Utilização de cinzas volantes e metacaulino para a sua prevenção*, Tese de Doutoramento, LNEC/Universidade do Minho.
- Divet, L., Fasseu, P., Santos Silva, A. (2006). *Optimisation du choix du liant pour réduire l'expansion des bétons due à la formation différée de l'ettringite*, 7th CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canadá, 331-342.
- Especificação LNEC E 461, (2004). *Betão. Metodologias para prevenir reacções expansivas internas*, LNEC.
- Soares, D. e Santos Silva, A. (2008). *Estudo da influência de adições minerais na inibição da formação de etringite retardada no betão. Resultados preliminares*, Relatório LNEC 308/2008 – NMM, 145 p.

- Santos Silva, A., Ribeiro, A.B., Jalali, S., Divet, L. (2006). *The use of fly ash and metakaolin for the prevention of alkali-silica reaction and delayed ettringite formation in concrete*, RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, Madrid, Spain, 335-342.