

## TEMA 1

### Contexto das Estruturas e dos Materiais Sujeitos a Reacções Expansivas Internas

# ÍNDICE

Pág.

<b>1.</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>7</b>
<b>2.</b>	<b>Degradação do betão por reacções álcalis-silica (RAS)</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1.</b>	<b>Definição e mecanismos</b> .....	<b>7</b>
<b>2.2.</b>	<b>Factores condicionantes da RAS no betão</b> .....	<b>11</b>
	2.2.1. ÁLCALIS NO BETÃO .....	12
	2.2.2. AGREGADOS REACTIVOS.....	14
	2.2.3. HUMIDADE ELEVADA .....	16
<b>2.3.</b>	<b>Medidas preventivas da RAS</b> .....	<b>17</b>
	2.3.1. EMPREGO DE AGREGADOS NÃO REACTIVOS .....	17
	2.3.2. REDUÇÃO DA ALCALINIDADE DA SOLUÇÃO INTERSTICIAL DO BETÃO .....	21
	2.3.3. CONTROLO DA HUMIDADE DO BETÃO.....	23
	2.3.4. MODIFICAÇÃO DAS PROPRIEDADES EXPANSIVAS DO GEL DA RAS .....	23
<b>2.4.</b>	<b>Manifestação da RAS no betão</b> .....	<b>24</b>
<b>3.</b>	<b>Reacção sulfática interna no betão</b> .....	<b>31</b>
<b>3.1.</b>	<b>As reacções sulfáticas nos betões</b> .....	<b>31</b>
<b>3.2.</b>	<b>As fontes externas de sulfatos</b> .....	<b>32</b>
<b>3.3.</b>	<b>As fontes internas de sulfatos</b> .....	<b>33</b>
	3.3.1. A FORMAÇÃO DE ETRINGITE RETARDADA (DEF) .....	35
<b>3.4.</b>	<b>Os factores determinantes e as medidas preventivas da DEF</b> .....	<b>36</b>
	3.4.1. CONTROLO DA TEMPERATURA MÁXIMA DO BETÃO .....	38
	3.4.2. CONTROLO DOS TEORES DE ÁLCALIS DO BETÃO E DE ALUMINATOS E SULFATOS DO LIGANTE.....	38
	3.4.3. CONTROLO DA HUMIDADE DO BETÃO.....	38
	3.4.4. CONTROLO DO TEOR DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO DO BETÃO .....	39
	3.4.5. AVALIAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE DE COMPOSIÇÕES DO BETÃO À REACÇÃO SULFÁTICA INTERNA.....	39
<b>3.5.</b>	<b>Manifestação da DEF no betão</b> .....	<b>39</b>
<b>4.</b>	<b>Bibliografia</b> .....	<b>42</b>

**António Santos Silva**

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)*

*Departamento de Materiais, Núcleo de Materiais Metálicos*

*Lisboa, Portugal*

## **1. INTRODUÇÃO**

A degradação do betão por reacções químicas de origem interna engloba dois tipos de reacções expansivas: a reacção álcalis-silica (RAS) e a reacção sulfática de origem interna (RSI). O número de casos de estruturas de betão afectadas por reacções expansivas internas tem aumentado muito nos últimos anos, quer em Portugal como a nível internacional. Estas duas reacções, que têm manifestações macroscópicas semelhantes, quando detectadas são muito difíceis de combater, não existindo ainda um método totalmente eficaz e económico de reparação para estruturas degradadas por RAS ou RSI.

## **2. DEGRADAÇÃO DO BETÃO POR REACÇÕES ÁLCALIS-SILICA (RAS)**

### **2.1. Definição e mecanismos**

As reacções álcalis-agregado (RAA) correspondem a uma designação atribuída a um grupo de reacções químicas que ocorrem entre certos tipos de minerais dos agregados e os iões alcalinos (sódio e potássio) e hidroxilos (OH<sup>-</sup>) presentes na solução intersticial da pasta de cimento no betão. Estas reacções, que são de dissolução, ocorrem em resultado da grande solubilidade que as formas amorfas, desordenadas ou mal cristalizadas de sílica apresentam em soluções muito alcalinas. A reacção origina um gel higroscópico alcalino que absorve água e expande, originando tensões internas no betão que provocam a sua fissuração (figura 1).

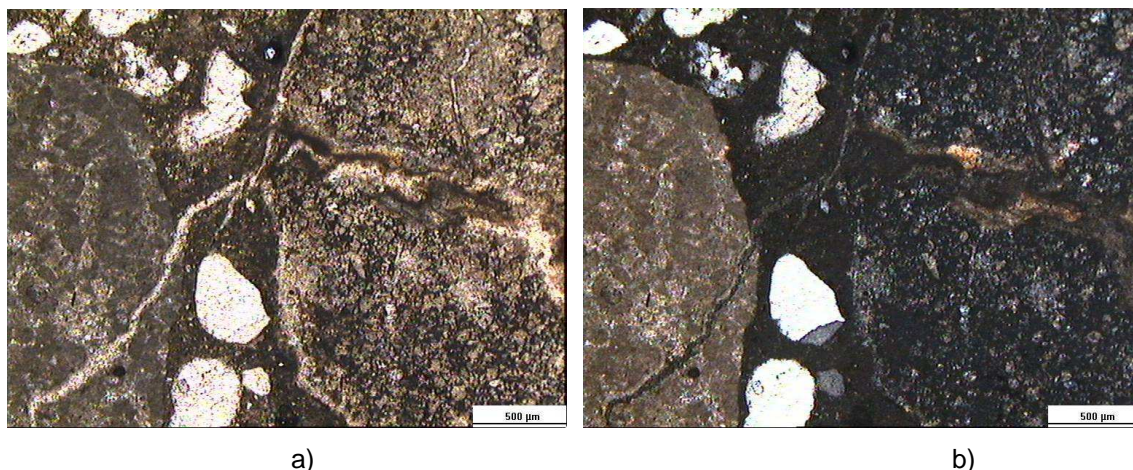


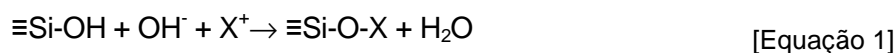
Figura 1 – Observação ao microscópio petrográfico de lâminas delgadas de betão que mostram a microfissuração por gel da RAA: (a) imagens com polarizadores paralelos e (b) cruzados.

Embora as RAA sejam poucas vezes referidas como causa primária do colapso ou da necessidade de demolição total de uma estrutura, contribuem, quando ocorrem, para uma diminuição da durabilidade do betão.

É geralmente considerada a existência de três tipos distintos de RAA: reacções álcalis-sílica, reacções álcalis-silicato e reacções álcalis-carbonato (RAC).

A reacção álcalis-sílica (RAS), que foi a primeira a ser identificada, processa-se, em geral, a velocidades relativamente elevadas (< 10 anos) fazendo intervir formas de sílica amorfas (por ex.: opala<sup>1</sup>) ou mal cristalizadas (por ex: calcedónia<sup>2</sup>) presentes nos agregados. É também o tipo de reacção mais comum e a que tem recebido maior atenção e sido objecto de mais intenso trabalho de investigação, existindo, no entanto, ainda alguma controvérsia sobre as hipóteses que têm sido estabelecidas para os mecanismos das reacções e a criação das forças expansivas.

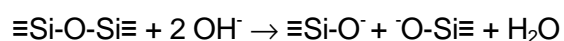
A RAS corresponde essencialmente a um ataque a certas formas de sílica reactiva, possuindo uma estrutura mais ou menos desordenada e por isso instável num meio de elevado pH, pelos iões alcalinos (Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup>) e hidroxilos (OH<sup>-</sup>) presentes na solução intersticial do betão, produzindo um gel de silicato alcalino. Esquemáticamente a RAS pode representar-se pela reacção de neutralização dos grupos silanol ácidos (-Si-OH) pelos iões hidroxilos e álcalis, seguida da ruptura das pontes siloxano (-Si-O-Si-):



<sup>1</sup> Sílica amorfa com quantidades de água variáveis (SiO<sub>2</sub>.nH<sub>2</sub>O)

<sup>2</sup> Nome geral aplicado a sílica fibrosa e criptocristalina, e por vezes mais especificamente aplicada a uma variedade, que ao microscópio óptico tem uma coloração castanho translúcido com brilho.

Em que X representa os iões Na<sup>+</sup> ou K<sup>+</sup>.



[Equação 2]

A velocidade do ataque dependerá da concentração dos hidróxidos alcalinos na solução intersticial e da estrutura da sílica. O quartzo “bem cristalizado” é geralmente considerado não reactivo em solução alcalina. De facto, quando grãos de quartzo são colocados na solução intersticial do betão, o ataque pelos hidróxidos alcalinos ocorre essencialmente à sua superfície (figura 2) de acordo com as equações 1 e 2. A velocidade de penetração dos hidróxidos alcalinos na estrutura bem cristalizada do quartzo é baixa devido à sua pequena área superficial interna, enquanto no quartzo criptocristalino já é maior devido ao aumento da área superficial. O mesmo comportamento é observado em grãos de grandes dimensões de quartzo que tenham defeitos ou estejam deformados. Esta situação sugere que nenhum agregado silicioso possa ser considerado à partida “inerte” no que se refere à RAS.

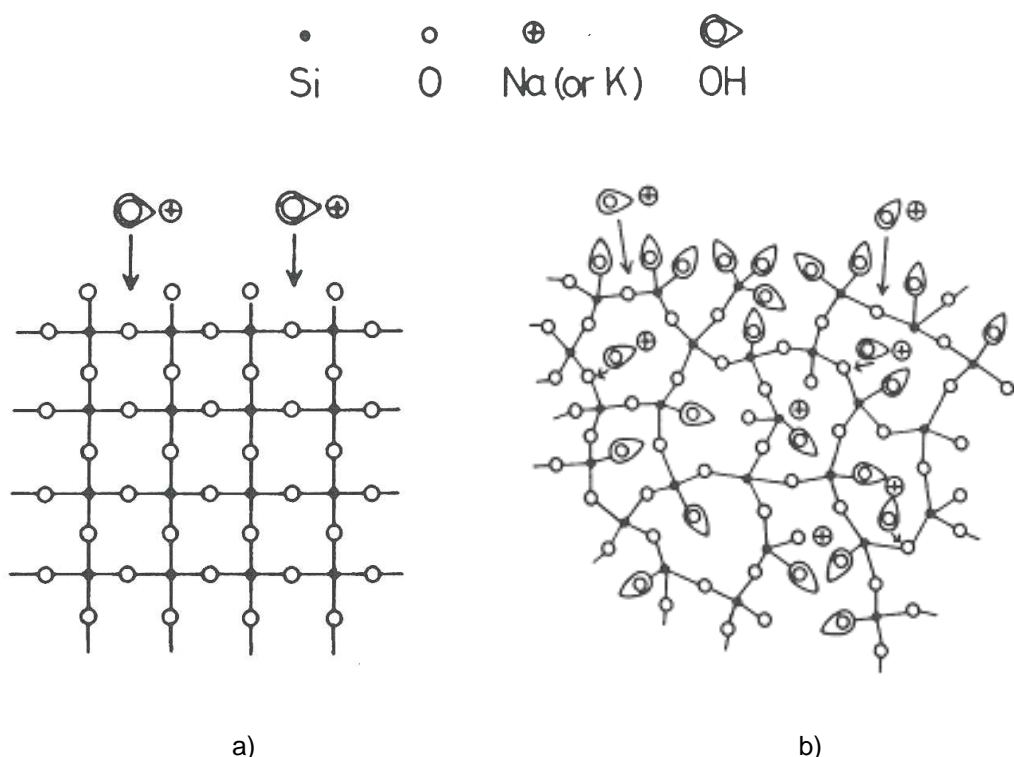


Figura 2 – Representação esquemática do ataque dos álcalis à (a) sílica bem cristalizada e (b) mal cristalizada.

Os iões cálcio (Ca<sup>2+</sup>), cuja fonte principal é a portlandite (hidróxido de cálcio) formada pelas reacções de hidratação do cimento, penetram rapidamente no gel, originando-se assim no betão, em torno dos agregados, geles de silicatos de cálcio, sódio e potássio

de composição variável. Estes geles são capazes de absorver moléculas de água e expandir, gerando forças expansivas. São estas forças que originam tensões de tracção dentro do betão ou da argamassa e vão causar fissuração. A intensidade da força expansiva varia com a composição do gel, dum modo ainda não bem compreendido, e com a quantidade total de gel formado.

A reacção álcalis-silicato, também conhecida por reacção álcalis-sílica de expansão lenta e retardada, é semelhante à RAS excepto no facto de que, neste caso, o constituinte reactivo do agregado não é a sílica livre, mas a sílica presente como constituinte em sistemas siliciosos polifásicos (ex.: granitos, xistos, grauvaques<sup>3</sup>). É aceite no entanto que, no geral, o mecanismo da reacção expansiva seja análogo ao da reacção álcalis-sílica, existindo possivelmente algumas diferenças no comportamento químico e físico dos geles e outros produtos de reacção formados. Outros associam este tipo de reacção essencialmente à reacção entre os iões alcalinos da solução intersticial e certos minerais interestratificados com os filossilicatos<sup>4</sup>, caso que é frequente ocorrer em rochas como grauvaques, filitos<sup>5</sup> ou argilitos<sup>6</sup>; a remoção daqueles minerais provoca uma esfoliação do filossilicato que pode então expandir por absorção de água. A reacção álcalis-silicato é mais lenta do que a reacção álcalis-sílica, podendo coexistir os dois tipos de reacção no betão, pois normalmente nas rochas contendo filossilicatos existe quartzo microcristalino. Pelas relações intrínsecas existentes entre as reacções álcalis-sílica e álcalis-silicato, estes dois tipos de reacção são frequentemente englobados num mesmo termo geral reacção álcalis-sílica (RAS).

A RAC, que é uma reacção que envolve a reacção dos iões hidroxilos e alcalinos com certos dolomitos argilosos<sup>7</sup>, é explicada por uma desdolomitização, ou seja uma decomposição do carbonato duplo de cálcio e magnésio no meio alcalino da solução do betão:

---

3 Rocha sedimentar de cores cinza a esverdeada devido aos minerais máficos e fragmentos de rocha que a compõe. O elemento característico do grauvaque é a matriz de granulometria fina, formada pelo intercrescimento de clorite e sericite e grãos do tamanho de silte de quartzo e feldspato.

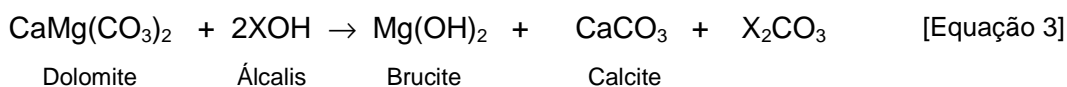
4 Subdivisão do grupo dos silicatos. A estrutura cristalina apresenta camadas paralelas de que resulta clivagem basal perfeita. Pertencem a esta divisão as micas, clorites e cloritóides, talco, serpentina e a pirofilita, bem como minerais das argilas (caulinites, montmorilonóides e ilites).

5 Rocha metamórfica intermediária entre ardósia e xisto. Nos filitos, ao contrário das ardósias, o plano de xistosidade é bem definido e brilhante, determinado principalmente pela disposição de mica muscovítica e clorite.

6 Rocha sedimentar de granulação fina, constituída por argilas e minerais na fracção de silte, maciça, pouco ou não estratificada.

7 Os dolomitos são rochas sedimentares (superior a 50% de carbonatos), em que o carbonato duplo de cálcio e magnésio (dolomite) entra em quantidade superior à do carbonato de cálcio.





onde o X representa os iões sódio ou potássio.

A expansão, que se processa de forma muito rápida e com intensa fissuração ao fim de menos de 5 anos, pensa-se que esteja relacionada com a desdolomitização, essencialmente em resultado da absorção de água pelos minerais argilosos que ficam expostos no decorrer do processo (figura 3).

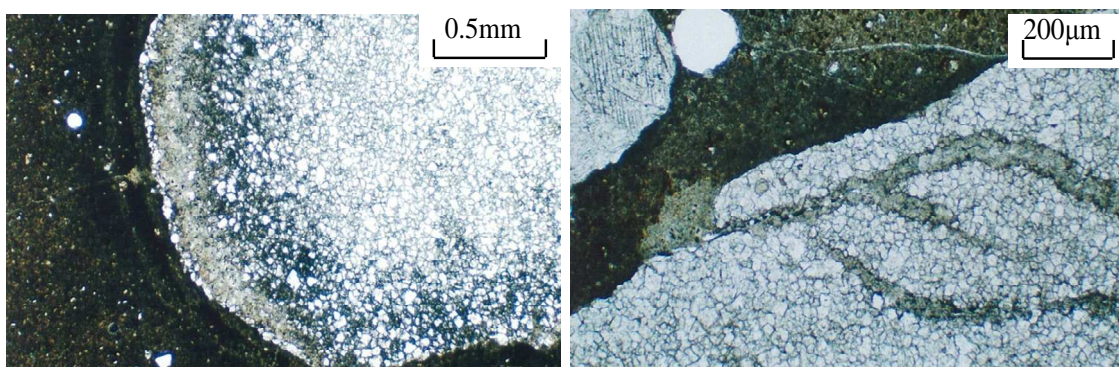


Figura 3 – Observação ao microscópio petrográfico de lâminas delgadas de betão, evidenciando o processo de desdolomitização através da ocorrência de orlas de alteração e de fissuras num agregado dolomítico.

A ocorrência de casos de degradação do betão por RAC, não sendo internacionalmente muito frequente, parece afectar sobretudo o Canadá e a China. Em Portugal apenas se conhece um caso em que se detectou um processo de desdolomitização associado a um ataque por sulfatos.

## 2.2. Factores condicionantes da RAS no betão

Os factores que promovem o desenvolvimento da RAS no betão são os seguintes:

- Alcalinidade suficientemente elevada da solução intersticial do betão.
- Existência de agregados reactivos com concentrações dentro duma gama crítica.
- Humidade elevada.

A RAS só ocorrerá quando se verificarem todas estas condições. Se algum dos factores não existir então não haverá degradação do betão e não terão que ser tomadas precauções especiais para prevenir a RAS. Assim, duma maneira ou doutra

todas as especificações que são propostas para evitar a deterioração por RAS procuram excluir pelo menos um dos três factores referidos.

### 2.2.1. Álcalis no betão

Em consequência da hidratação do cimento portland resulta uma solução intersticial no betão contendo essencialmente hidróxidos de cálcio, sódio e potássio. A concentração dos iões  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{OH}^-$  será dependente do teor de alcalinos<sup>8</sup> no cimento anidro. Os compostos alcalinos no clínquer são constituídos essencialmente por sulfatos alcalinos, aluminatos alcalinos e silicatos alcalinos. Os sulfatos alcalinos são facilmente solubilizados na água da amassadura, enquanto os dos aluminatos e dos silicatos são libertados lentamente durante o processo de hidratação.

De forma a caracterizar o risco da RAS associado ao teor de álcalis, tendo em conta a contribuição de cada um dos álcalis (sódio e potássio), o seu teor é expresso em termos de  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente que é calculado a partir da seguinte fórmula:

$$\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O} \quad [\text{Equação 4}]$$

Em que 0,658 corresponde à razão entre as massas moleculares do  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ .

Embora os álcalis no betão provenham essencialmente do cimento, deve atender-se que os álcalis de outras fontes, nomeadamente águas de amassadura, adições (cinzas volantes, escórias granuladas moídas, sílica de fumo, pozolanas naturais), agentes descongelantes, podem contribuir para a alcalinidade da solução intersticial. Os próprios agregados contendo minerais ricos em álcalis, como por exemplo os feldspatos e as micas, podem vir a contribuir para um aumento do teor de álcalis no betão.

Importa salientar que nem todos os álcalis no betão são utilizados no ataque à sílica reactiva, apenas os “álcalis activos”, isto é, aqueles que não ficam fixos na estrutura cristalina dos silicatos de cálcio hidratados ou nos próprios agregados, é que podem participar na RAS.

Relativamente à contribuição dos agregados em termos de álcalis activos, os trabalhos canadianos da Universidade de Laval confirmaram que quantidades significativas de

---

<sup>8</sup> No contexto da RAA é usual referir os iões alcalinos por álcalis, correspondendo essencialmente aos óxidos de sódio e potássio, respectivamente.



álcalis são libertadas ao longo do tempo para a solução intersticial do betão, e que essa contribuição é particularmente elevada para o caso de agregados de natureza granítica, atribuindo essa causa como responsável do aparecimento de casos de degradação por RAS em estruturas em que o cimento usado era de baixo teor em álcalis (inferior a 0,60%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq.}}$ )

Esta denominação, que foi dada aos cimentos com um teor em álcalis inferior a 0,60%, expresso em  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq.}}$ , foi baseada em resultados obtidos em ensaios de expansão de barra de argamassa em que se concluiu da não existência de RAS nos casos em que o teor de álcalis no cimento não ultrapassava aquele limite. Este valor foi depois aceite nos Estados Unidos como o limite máximo a usar com agregados reactivos, e incluído na norma americana dos cimentos ASTM C 150.

No entanto, a melhor garantia para impedir a RAS será antes a de impor um valor limite para o teor de álcalis activos do betão já que um teor elevado de cimento no betão contribui com mais álcalis do que um betão com menos cimento do mesmo tipo (figura 4).

No intuito de impor um teor de álcalis que prevenisse a RAS no betão, a maioria dos países adoptou o valor limite de  $3,0 \text{ kg/m}^3$  de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq.}}$  de álcalis solúveis no betão. Porém, rapidamente se constatou, com a descoberta de RAS em betões que haviam satisfeito esse limite, da necessidade de incluir outro tipo de prevenção adicional. Nesse sentido as mais recentes recomendações definem diferentes valores limite em função da classe de reactividade dos agregados.

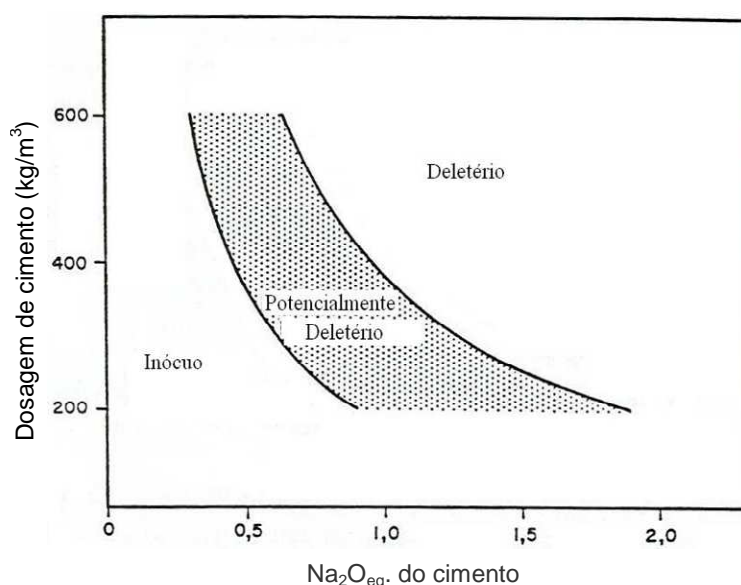


Figura 4 – Relação entre o teor de álcalis activos do cimento e a dosagem de cimento no betão, e o resultante potencial para a RAS.

### 2.2.2. Agregados reactivos

A segunda condição para a RAS no betão é a presença de agregados reactivos aos álcalis, que no caso da sílica reactiva pode ser muito variável, sendo em geral tanto maior quanto mais fina e mais desordenada for a estrutura cristalina.

Os agregados para betão podem ser originários de rochas ígneas<sup>9</sup>, metamórficas<sup>10</sup> ou sedimentares<sup>11</sup>. Muito embora várias listagens com os tipos de minerais e rochas potencialmente reactivos aos álcalis em agregados tenham sido publicadas (ver Quadro 1), é normal que agregados provenientes da mesma rocha, dada a sua diferente história geológica, possam apresentar diferentes reactividades potenciais. Assim, as metodologias utilizadas para detectar a reactividade dos agregados aos álcalis assentam essencialmente na realização de ensaios petrográficos complementados, ou não, com ensaios de expansão de prismas de argamassa ou de betão (LNEC E 461).

Um factor importante que determina a reactividade de alguns agregados é a proporção de sílica reactiva. É característico que, para uma dada quantidade de álcalis disponível e condições ambientais específicas, parece haver um teor mais desfavorável ou crítico de sílica reactiva disponível que conduz a uma expansão máxima. Em alguns casos verifica-se que, com formas de sílica muito reactivas, esta proporção crítica (por vezes designada de "péssimo") representa apenas alguns por cento do agregado, enquanto com formas de sílica menos reactivas aquele "péssimo" pode corresponder à totalidade do agregado. Atendendo a que a reacção entre os iões hidroxilo e a sílica reactiva é restringida à superfície do grão de agregado, o grau de expansão do betão será influenciado pela superfície específica do agregado e daí pela granulometria (figura 5) e em menor extensão pela sua forma e textura.

---

9 Rochas que cristalizaram a partir de um magma; podem ser classificadas de plutónicas (com tamanho de grão médio a grosseiro) ou vulcânicas (tamanho de grão mais fino).

10 Rochas que sofreram metamorfismo (transformações mineralógicas, texturais e estruturais) sob a acção de variáveis temperatura e/ou pressão e que foram reorganizadas texturalmente, estruturalmente e/ou mineralogicamente face a essas novas condições ou factores de metamorfismo.

11 Rochas constituídas pela acumulação de sedimentos clásticos, químicos e/ou biogénicos e que sofreu diagênese ou petrificação.

Quadro 1 - Principais rochas e minerais reactivos.

Rochas		Minerais reactivos aos álcalis
Ígneas	Granitos <sup>12</sup> Granodioritos <sup>13</sup>	Quartzo com rede deformada e apresentando uma extinção ondulante. Minerais feldspáticos alterados com juntas entre grãos abertas.
	Riolitos <sup>14</sup> Dacitos <sup>15</sup> Andesitos <sup>16</sup> Basaltos <sup>17</sup>	Presença de vidros siliciosos ou basálticos, tridimite, cristobalite, opala.
	Obsidianas <sup>18</sup> Tufos vulcânicos	Vidros ricos em sílica mais ou menos desvitrificados, por vezes microfissurados.
Metamórficas	Gnaisses <sup>19</sup> Mica-xistos <sup>20</sup>	Quartzo com extinção ondulante. Quartzo microcristalino de alteração, minerais feldspáticos e micáceos alterados.
	Quartzitos <sup>21</sup> Corneanas <sup>22</sup>	Quartzos associados a um cimento quartzoso e opalino. Presença de quartzo microcristalino, de extinção ondulante ou microfissurado. Presença de filossilicatos.
Sedimentares	Grauvaques Siltitos <sup>23</sup>	Opala, quartzo microcristalino
	Folhetos (shales) <sup>24</sup>	Calcedónia, opala.
	Calcários Calcários dolomíticos <sup>25</sup> Dolomitos	Presença de sílica do tipo opala em micronódulos ou difusa.

<sup>12</sup> Rocha plutónica de tamanho de grão grosseiro composta essencialmente por quartzo e feldspatos (K-feldspato predominando sobre feldspato Na-Ca plagioclásico), aos quais, frequentemente, associam-se, em quantidades bem menores, minerais máficos, como a biotite, ou félsicos como a moscovite.

<sup>13</sup> Rocha similar ao granito com mais feldspato plagioclásico do que potássico.

<sup>14</sup> Rocha vulcânica ácida equivalente ao granito mas de tamanho de grão fino.

<sup>15</sup> Rocha vulcânica ácida de cores cinza médio até escuro, com 63 a 68% SiO<sub>2</sub>, plagioclásio oligoclásico a andesina predominante nos feldspatos, frequentemente porfírica com feldspato e/ou piroxênio/anfibólio associados como fenocristais e na matriz.

<sup>16</sup> Andesito é o equivalente vulcânico do diorito, calcialcalina, de cores cinza a cinza escuro, composta essencialmente por feldspatos.

<sup>17</sup> Rocha vulcânica escura de grão fino, frequentemente com textura micro ou criptocristalina, composta essencialmente por plagioclase básica (anortite superior a 50%) e piroxenas.

<sup>18</sup> Rocha ígnea formada durante o arrefecimento rápido da lava e composta somente por vidro com alto teor de sílica.

<sup>19</sup> Rocha metamórfica essencialmente quartzo-feldspática e de grão frequentemente médio a grosso.

<sup>20</sup> Rocha que deriva, frequentemente, de pelitos (rocha detrítica cujos componentes principais são da fracção argilosa e do silte e que se originam pela litificação de lamas.), representando um grau mais elevado de metamorfismo do que a ardósia e o filito.

<sup>21</sup> Rocha metamórfica cujo componente principal é o quartzo (superior a 75% como ordem de grandeza).

<sup>22</sup> Rochas muito duras que apresentam normalmente uma textura fina constituída por grãos equidimensionais, sem qualquer orientação preferencial

<sup>23</sup> Os siltitos são rochas sedimentares de grão muito fino, entre 4 µm e 64 µm, e constituídos essencialmente por quartzo, feldspatos, micas e argilas.

<sup>24</sup> Rocha sedimentar clástica muito fina, argilosa a siltico-argilosa com óptima estratificação, finamente laminada.

<sup>25</sup> Rocha sedimentar em que a proporção de dolomite pode variar entre 50 a 90% .

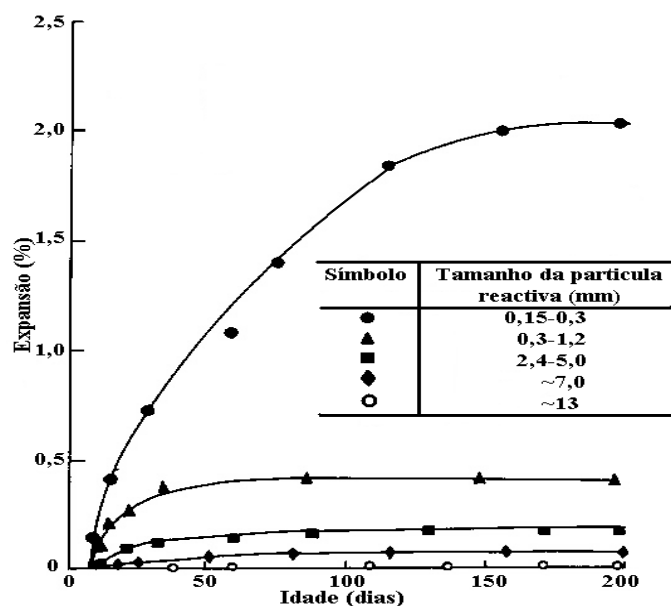


Figura 5 – Influência do tamanho da partícula reactiva na expansão por RAS.

### 2.2.3. Humidade elevada

A água parece desempenhar um duplo efeito na RAS: como agente reactivo, a água influencia a velocidade de expansão no momento da formação dos produtos da reacção, e como meio reaccional, para assegurar o transporte das diferentes espécies reactivas.

Vários trabalhos em laboratório têm referido que os valores críticos de humidade relativa (HR) para que a RAS ocorra no betão deverão ser superiores a 80 – 85 %. No entanto, vários estudos, como os realizados por Olafsson, vieram mostrar que o limite dos 80% de HR desce com o aumento da temperatura, tendo observado expansões significativas para valores de 70% de HR a 38° C. Também parece haver uma relação entre o teor de álcalis e a HR necessária para o desenvolvimento da RAS, pois constatou-se para uma mesma composição de betão que o aumento no teor de álcalis necessita duma menor HR para desencadear a RAS.

Resultados da avaliação da HR em estruturas afectadas por RAS revelaram que a profundidades superiores a 10 cm quaisquer que sejam as condições climatéricas exteriores, excepção feita a climas desérticos, a HR é superior a 80%.

A ideia de que a expansão por RAS não está necessariamente dependente do ingresso de água, mas que aquela pode ocorrer em resultado da humidade existente no interior do betão, é suportada pelo aparecimento de fissuração em zonas secas por oposição a zonas que estão permanentemente imersas. No entanto, uma vez que a reacção tenha ocorrido e se tenha formado suficiente gel, qualquer aumento na

humidade poderá conduzir a uma rápida expansão e conseqüente fissuração. Por esta razão os ciclos molhagem-secagem podem ser particularmente perigosos para uma estrutura.

Todas as estruturas de betão devem ser consideradas susceptíveis à RAS, com excepção dos betões que por si mesmos conseguem regular a humidade interna para um valor inferior a 80%, e estarem permanentemente protegidos das condições atmosféricas e de outras fontes de humidade.

### **2.3. Medidas preventivas da RAS**

As medidas preventivas da RAS assentam no pressuposto da necessidade de se eliminar pelo menos uma das condições necessárias para que esta reacção expansiva não ocorra no betão. Essas condições são: presença de agregados reactivos em quantidade suficiente, alcalinidade elevada na solução intersticial do betão e humidade elevada. Este capítulo apresenta uma panorâmica da situação relacionada com a avaliação e controlo de cada uma destas condicionantes da RAS, bem como da utilização de aditivos químicos – sais de lítio – que visam modificar as propriedades expansivas do gel da RAS.

#### **2.3.1. Emprego de agregados não reactivos**

Uma das formas de evitar a RAS passa naturalmente pela utilização de agregados não reactivos aos álcalis, pelo que é necessário dispor de metodologias fiáveis para se avaliar a reactividade aos álcalis de agregados para betão.

Uma análise baseada apenas nos aspectos litológicos não oferece uma suficiente garantia de que um determinado agregado possa, ou não, ser considerado reactivo 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<sup>26</sup>, ou a partir do comportamento de provetes de argamassa ou betão em ensaios de expansão, estando associado com a maior ou menor presença de espécies minerais reactivas aos álcalis.

A análise petrográfica, sendo uma técnica que requer obrigatoriamente conhecimentos geológicos de base, está porém muito dependente da experiência do observador. Geólogos que não tenham conhecimento ou experiência da degradação do betão

---

<sup>26</sup> A petrografia refere-se ao estudo macro e microscópico das rochas e seus minerais, definindo as texturas e estruturas, a mineralogia e a classificação da rocha.

raramente produzem relatórios de observações petrográficas úteis. Raros são também os países que têm sistemas de qualificação de laboratórios que efectuam análises petrográficas, por exemplo, na província de Ontário no Canadá, num dos países onde a RAS é bem conhecida, existem apenas 5 laboratórios reconhecidos. Uma outra condicionante que contribui para esta situação é a grande diversidade de significados, umas vezes sinónimos outros contraditórios, dados aos minerais ou às rochas nos diferentes países e, por vezes, mesmo dentro do próprio país.

Em termos de prioridades, na generalidade das recomendações internacionais para a prevenção da RAS, a análise petrográfica é ainda referida como o primeiro ensaio a realizar para a avaliação da reactividade aos álcalis dum agregado para betão. No entanto, e apesar dos esforços feitos nos últimos anos no sentido de se ultrapassarem algumas das limitações da aplicação da técnica, subsistem muitas incertezas acerca da sua utilidade em termos da classificação da reactividade dum agregado. A primeira dificuldade que é colocada à análise petrográfica é no estabelecimento dum critério de não reactividade, o qual é baseado num teor limite para a quantidade de espécies reactivas identificadas. Também neste aspecto não há ainda um consenso internacional. Países como a Dinamarca, França e Alemanha apresentam como valor limite de reactividade dum agregado a existência de mais de 2% de espécies reactivas, enquanto a grande maioria dos países não apresenta qualquer limite, apenas referindo a necessidade de se realizarem outros ensaios complementares quando é detectada a presença de constituintes reactivos.

O método acelerado de barra de argamassa, originalmente proposto em 1986 na África do Sul, é talvez o ensaio mais em voga actualmente e o que tem sido mais utilizado e discutido, tendo sido adoptado nas normas americanas com a designação de ensaio ASTM C 1260. Os prismas de argamassa utilizados neste ensaio são fabricados, em termos gerais, de maneira semelhante aos do ensaio da norma portuguesa NP 1381. Após desmoldagem, os prismas são colocados em água a 23º C e introduzidos numa estufa a 80º C. Passadas 24 horas é feita a medida inicial (valor zero) de cada provete, sendo depois introduzidos numa solução de hidróxido de sódio 1N a 80º C onde permanecem 14 dias, sendo realizadas nesse período 4 medidas de expansão. O agregado é considerado reactivo se a expansão aos 14 dias for superior a 0,20%. Se o resultado aos 14 dias estiver compreendido entre 0,10% e 0,20%, é aconselhado que se prolongue o ensaio até aos 28 dias, e classificar o agregado de reactividade aos álcalis duvidosa se a expansão aos 28 dias não ultrapassar o valor de 0,20%.

A RILEM também adoptou já este ensaio, com a designação de AAR-2, como um dos métodos de qualificação da reactividade aos álcalis de agregados para betão.

De acordo com os limites do ensaio ASTM C 1260 resulta que qualquer agregado que apresente um resultado superior a 0,10% aos 14 dias, e na ausência de informações locais sobre a sua utilização, deva ser considerado como potencialmente reactivo aos álcalis. Esta situação tem levantado muitas críticas por parte de produtores, e também por parte essencialmente dos países de expressão francófona, incluindo o Canadá, que advertem que este método é muito severo conduzindo à rejeição de muitos agregados que nunca levaram ao desenvolvimento da RAS. Para esta facção, este ensaio não deve ser utilizado para rejeitar agregados a não ser em situações em que o resultado da análise petrográfica confirme o resultado do ensaio ASTM C 1260, devendo no caso contrário ser efectuados ensaios de expansão de betão para confirmar a reactividade do agregado. Igualmente, tem-se verificado em algumas situações de agregados que contêm mais de 2% (em massa) de cherte<sup>27</sup> poroso ou com agregados da família dos granitóides, que este ensaio não evidencia a reactividade do agregado.

Apesar das críticas e de algumas limitações ao seu uso, o método acelerado da barra de argamassa (ASTM C 1260 ou AAR-2) tem demonstrado ser muito útil já que permite reconhecer agregados muito reactivos em apenas 2 semanas, permitindo detectar uma proporção significativa de agregados não reactivos. Este ensaio é por isso considerado como uma ferramenta importante na decisão, estando normalmente incluído nas principais metodologias de caracterização da reactividade aos álcalis de agregados para betão.

A maioria dos autores e das recomendações internacionais para a RAS são unânimes em considerar que 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 avaliação do seu desempenho num ensaio de betão. Esta metodologia visa, por um lado, aproximar mais a caracterização em laboratório com a 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.

---

<sup>27</sup> Rocha sedimentar química, biolítica (carapaças de diatomáceas, de radiolários ou espículas de esponjas) ou vulcanoquímica, densa, dura, maciça ou acamadada, semivítrea de cores normalmente cinza, preta ou branca e cujo constituinte principal é a sílica amorfa e quartzo microcristalino.



O ensaio de prisma de betão, originalmente desenvolvido no Canadá, consiste em avaliar o comportamento de um agregado grosso ou fino, ou a mistura de agregados, em provetes prismáticos de betão de dimensões 7,5 cm x 7,5 cm x 25 ± 5 cm. Os provetes são confeccionados com um cimento de elevado teor em álcalis, normalmente superior a 0,9% Na<sub>2</sub>O<sub>eq.</sub>, ajustando depois o teor de álcalis com a adição de hidróxido de sódio à água de amassadura, para atingir um teor de 1,25% Na<sub>2</sub>O<sub>eq.</sub>, relativamente à massa de cimento. Os provetes, depois de desmoldados, são conservados durante 12 meses numa câmara a 38° C e com HR superior a 95%, efectuando-se medidas de expansão a idades definidas, sendo o agregado considerado reactivo se o valor de expansão aos 12 meses for superior a 0,04% (ASTM C 1293 ou RILEM AAR-3).

No ensaio AAR-3 é possível usar 3 combinações de agregados: (i) areia e brita do mesmo agregado em análise, (ii) areia do agregado em análise com uma brita dum agregado não reactivo e (iii) brita do agregado em análise com uma areia dum agregado não reactivo. No ensaio ASTM C 1293, apenas é prevista as duas últimas combinações do ensaio RILEM.

O ensaio AAR-4, é semelhante ao ensaio AAR-3 com excepção da temperatura do ensaio, que passa dos 38° C para 60° C, e da duração, que é reduzida de 1 ano para 3 meses. Está prevista a publicação durante o ano de 2010 duma especificação LNEC com a descrição do modo operatório do ensaio e dos limites para a avaliação da reactividade.

A avaliação da reactividade aos álcalis dum agregado não pode ser realizada com base nos aspectos litológicos nem, para a maioria das situações, apenas com recurso a um determinado método de ensaio. Esta avaliação deve ser efectuada de uma forma integrada, privilegiando sempre a não rejeição dum determinado agregado com base apenas no resultado de um único ensaio. Seguindo o que de mais recente tem sido publicado sobre esta temática, o LNEC na Especificação E461, apresentou uma metodologia de caracterização da reactividade aos álcalis de agregados para betão, que foi ao encontro desta preocupação.

De acordo com esta metodologia 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, de acordo com a E 461, 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 (AAR-3 ou AAR-4) confirmar a não reactividade da composição.

### 2.3.2. 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 um cimento de baixo teor de álcalis<sup>28</sup>;
- Utilizando no betão adições minerais do tipo II, em quantidade considerada suficiente.

Usualmente a principal fonte de álcalis para o betão é a proveniente do cimento, 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. O controlo deste teor pressupõe que os fabricantes ou fornecedores de cimento num determinado país certifiquem para um determinado cimento o teor médio de álcalis e a sua variabilidade. Esta medida é já utilizada em vários países (por exemplo, em França e no Reino Unido) como fazendo parte do processo de controlo e normalização do betão. Em alternativa, deverão ser os utilizadores a recorrerem a um laboratório independente para a realização da análise do teor de álcalis do cimento.

Para além do cimento deverão ser consideradas outras fontes de álcalis para o betão, nomeadamente, as provenientes de agregados, de adições pozolánicas, de adjuvantes e da água de amassadura.

A Especificação LNEC E 461 recomenda que o teor de álcalis do betão seja igual à soma do teor de álcalis dos seus constituintes, excluindo as cinzas volantes e as escórias granuladas de alto-forno se utilizadas em percentagem superior a 30% do total do ligante.

Mais problemática é ainda a situação relacionada com a contribuição dos álcalis dos agregados no cálculo global do betão. Esta discussão passou a ter mais relevância com a descoberta de vários casos de degradação de estruturas por RAS, onde o cimento utilizado era de baixo teor de álcalis ou o teor de álcalis do betão era inferior a

---

<sup>28</sup> Um cimento de baixo teor de álcalis é um cimento que tem um teor total em álcalis inferior a 0,6%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ .

3,0 kg/m<sup>3</sup>, em que ficou demonstrado que a degradação ocorrida estava relacionada com a libertação de álcalis dos próprios agregados. Neste sentido foram realizados diversos ensaios, com diferentes meios de ataque, para avaliar a contribuição de diferentes tipos de agregados em termos de álcalis, tendo-se obtido resultados surpreendentes – quadro 2.

Quadro 2 – Teores de álcalis libertados por diferentes tipos de agregados após 1,5 anos em solução de 0,7N de NaOH ou KOH

Agregado	Álcalis libertados <sup>1</sup> (kg/m <sup>3</sup> Na <sub>2</sub> O <sub>eq.</sub> )	Agregado	Álcalis libertados <sup>1</sup> (kg/m <sup>3</sup> Na <sub>2</sub> O <sub>eq.</sub> )
Granito	3,4	Calcário dolomítico	1,1
Diorito	3,3	Dolomito	2,4
Tufo riolítico	1,5	Ardósia	1,1
Andesito	1,9	Grauvaque	2,7
Calcário puro	0,4	Arenito	0,2
Calcário silicioso	0,3	Quartzito	0,1

<sup>1</sup> Baseado numa dosagem de agregado de 1850 kg/m<sup>3</sup>.

Estas recentes constatações levaram a que, por exemplo, no Canadá se limitasse o teor de álcalis do betão para valores entre 1,7 e 3,0 kg/m<sup>3</sup> de Na<sub>2</sub>O<sub>eq.</sub>, de acordo com o tipo e grau de reactividade do agregado, e as condições de exposição da estrutura.

A recomendação da RILEM sobre esta questão é de que, salvo alguma evidência nacional em contrário, o teor de álcalis dos agregados não deve ser incluído no cálculo do teor de álcalis do betão.

O emprego de cimentos de baixo teor de álcalis, como forma de prevenir a RAS no betão, tem vindo nos últimos anos a perder importância, pela descoberta de estruturas degradadas pela RAS onde esse tipo de cimento fora usado, e devido ao elevado custo e dificuldade na sua obtenção. Igualmente, esta medida pode vir a não ser eficaz em situações em que é necessário fabricar betões com elevadas dosagens de cimento, ou quando podem existir outras fontes internas ou externas que possam vir a aumentar o teor de álcalis do betão.

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 tema já com alguns anos de grande discussão e controvérsia. Parece que existe alguma

unanimidade no conceito de que estes materiais podem ser eficazes na prevenção da RAS. No entanto, a sua variabilidade, a nível internacional e por vezes nacional, não tem permitido a adopção duma recomendação internacional.

A Especificação LNEC E 461, elaborada com base em trabalho realizado a nível nacional e a partir de dados publicados pela RILEM nos últimos anos, recomenda a utilização dos seguintes teores de adições: superior a 10% se só for utilizada sílica de fumo, superior a 30 % se só forem utilizadas cinzas volantes siliciosas e superior a 50 % se só for utilizada escória granulada de alto forno moída.

Para além das cinzas volantes, sílica de fumo e escória granulada de alto-forno, nos últimos anos tem também vindo a ser referida, como efectiva no controlo e prevenção da RAS, a utilização do metacaulino. O grupo de trabalho da RILEM (TC 191-ARP) reflectindo esta tendência internacional apresenta como valor de referência, um teor mínimo de 15% para o metacaulino (para teores de SiO<sub>2</sub> superior a 45%).

### **2.3.3. Controlo da humidade do betão**

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

Numa publicação recente do LCPC referente à gestão de estruturas afectadas por reacções expansivas internas (RAS e RSI), onde são apresentados vários exemplos de soluções de tratamento aplicadas em estruturas afectadas por estas reacções, ressalta que a melhor solução nestes casos passa por restabelecer sistemas de drenagem das águas pluviais defeituosos e posteriormente aplicar um revestimento estanque. Em todo o caso é salientado que estas soluções estão longe de constituir um tratamento definitivo, apenas permitindo retardar a progressão das reacções.

### **2.3.4. Modificação das propriedades expansivas do gel da RAS**

A utilização de sais de lítio para prevenir a RAS foi reportada por McCoy and Caldwell em 1951, tendo ensaiado mais de 100 compostos diferentes, incluindo sais metálicos, ácidos, produtos orgânicos, proteínas e adjuvantes. Os resultados mostraram que os mais prometedores candidatos na supressão da RAS eram sais de lítio

(nomeadamente, cloreto, carbonato, fluoreto, silicato, nitrato e sulfato de lítio). Durante mais de 40 anos poucos estudos foram realizados para avaliar a eficácia destes compostos. No entanto, nos últimos 10 anos tem havido um ressurgimento do interesse na aplicação destes compostos com a publicação de vários artigos em revistas e congressos.

O mecanismo pelo qual os sais de lítio reduzem a expansão ainda não está totalmente esclarecido, embora tenham sido propostas varias hipóteses para explicar o efeito do lítio, nomeadamente: o ião lítio altera a composição do gel da RAS, resultando num produto menos expansivo; a redução da dissolução da sílica; a redução da polimerização da sílica e dos silicatos; e a redução das forças repulsivas entre as partículas coloidais de gel.

Um relatório da Federal Highway Administration dos Estados Unidos da América, sobre a utilização do lítio na prevenção ou mitigação da RAS no betão apresenta um estado da arte sobre a utilização deste produto no betão, onde é feita referência a uma recomendação elaborada em 2002 pelo Building Research Establishment do Reino Unido que apresenta as dosagens mínimas de sais de lítio a utilizar no betão com agregados reactivos. O nitrato de lítio é o sal de lítio recomendado, e a sua dosagem está dependente da reactividade dos agregados – quadro 3. Estas mesmas dosagens foram também transcritas pela RILEM e incluídas na Especificação LNEC E 461.

Quadro 3 – Dosagens mínimas numa solução a 30% de nitrato de lítio

Classe de reactividade dos agregados	Dosagem (kg) de $\text{LiNO}_3$ (a 30%) por kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ . no betão
Classe III	5,95
Classe II	3,75

## 2.4. Manifestação da RAS no betão

A obtenção de informações sobre o estado do betão numa estrutura degradada e um diagnóstico correcto das causas da sua deterioração poderá contribuir para uma definição atempada dos procedimentos de manutenção/reparação mais adequados e para a adopção de medidas preventivas de minimização dos riscos do prosseguimento de reacções expansivas.

As zonas das estruturas mais sensíveis ao desenvolvimento da RAS (ou da RSI) são aquelas que estão mais expostas às intempéries (ex: com orientação norte-sul, vigas de bordadura, capiteis, etc.), em contacto com a água (ex: maciços e base dos pilares,

partes dos tabuleiros expostas às infiltrações ou condensações, etc.) ou em contacto com os solos (ex: muros testa, pilares, embasamentos, etc.).

A principal evidência associada à deterioração do betão por RAS é a fissuração à superfície do betão, a qual estará mais ou menos pronunciada conforme o grau de humidade existente no betão. No betão não armado essa fissuração apresenta vulgarmente uma distribuição aleatória das fissuras (figura 6). Este tipo de fissuração irregular é muito comum em estruturas afectadas por RAS sendo muitas vezes referenciada, usando a terminologia inglesa, por “map-cracking”. A medida da abertura das fissuras é variável de acordo com o grau de extensão das reacções, podendo atingir nalguns casos a ordem de alguns milímetros. A profundidade de fissuração pode ser apreciável, chegando mesmo nalguns casos a atravessar na totalidade o elemento afectado.



Figura 6 – Fissuração tipo “map-cracking” no pavimento do coroamento numa barragem.

No betão armado, as forças expansivas internas encontram-se restringidas pelas armaduras, o que origina uma fissuração que pode estar direccionada segundo uma ou duas direcções. A fissuração orientada segundo uma direcção ocorre devido ao facto dos esforços de compressão se oporem à expansão interna, originando fissuras orientadas preferencialmente segundo a direcção desses esforços (figura 7). A fissuração orientada segundo duas direcções ocorre sobretudo em elementos com armaduras com recobrimentos muito diminutos, em que a fissuração vai corresponder à distribuição da malha de armaduras (figura 8).





Figura 7 – Fissuração orientada segundo as armaduras principais num arco e num pilar duma ponte.

Outros sinais, quando acompanhados pela existência duma fissuração tipo “map-cracking”, podem advertir para a ocorrência de RAS, nomeadamente, o fecho de juntas de dilatação, a existência duma flecha importante, o empolamento diferencial do betão em torno duma fissura, ruptura de armaduras, desagregação do betão, coloração dos paramentos – figura 9, presença de pequenas crateras (“pop-outs”) no fundo das quais é visível um agregado ou um produto esbranquiçado, aparecimento de exsudações ao longo das fissuras.



Figura 8 – Fissuração orientada segundo as direcções das armaduras num pilar duma ponte.





Figura 9 – Descoloração do paramento dum maciço dum pilar numa ponte.

Se a observação visual do betão fizer suspeitar da ocorrência de RAS, a metodologia a seguir para confirmar esse diagnóstico preliminar incluirá várias fases, incluindo recolha de informações sobre os constituintes do betão, extracção de amostras em várias zonas da estrutura e realização de ensaios em laboratório.

Todas as informações relacionadas com a construção da estrutura deverão ser obtidas, nomeadamente a data de construção, diagramas com a localização e tipo de armaduras, composição do betão, origem dos materiais, relatórios de anteriores inspecções ou intervenções, e particularmente as datas referentes ao aparecimento dos primeiros sinais de degradação.

A amostragem, por extracção de carotes de localizações específicas da estrutura para posterior observação e ensaios em laboratório, é uma das mais importantes fases do diagnóstico. O número de amostras necessário está directamente dependente do tipo e complexidade da estrutura, devendo normalmente seleccionar-se 3 zonas em cada estrutura (laje, pilar, fundação, etc.) representativas de betão são, moderadamente degradado e bastante degradado, e de cada zona retirar-se pelo menos uma carote. Geralmente, obtém-se um diagnóstico mais representativo realizando poucos ensaios num grande número de amostras, que a situação inversa. As amostras depois de extraídas devem de imediato ser protegidas em sacos plásticos fechados, de forma a prevenir a secagem e carbonatação.

As amostras em laboratório são examinadas e fotografadas. Situações relacionadas com o incorrecto condicionamento das amostras devem ser também registadas, já que

a secagem poderá influenciar a extensão da carbonatação e isso afectar a subsequente expansividade do gel da RAS.

O exame das amostras deverá permitir também registar o diâmetro e comprimento de cada carote, tipo(s) de agregado(s) e aspectos particulares, como presença de fissuras, poros preenchidos, zonas húmidas, orlas nos agregados, etc. – figura 10. Sempre que possível a observação visual das amostras deverá ser complementada – figura 11 – com a observação à lupa binocular (ampliações em geral até 60x). Esta observação permitirá também ajudar na selecção de provetes para ensaios de caracterização mineralógica por difractividade de raios X, e de caracterização microestrutural por observação ao microscópio de luz polarizada ou ao microscópio electrónico de varrimento.

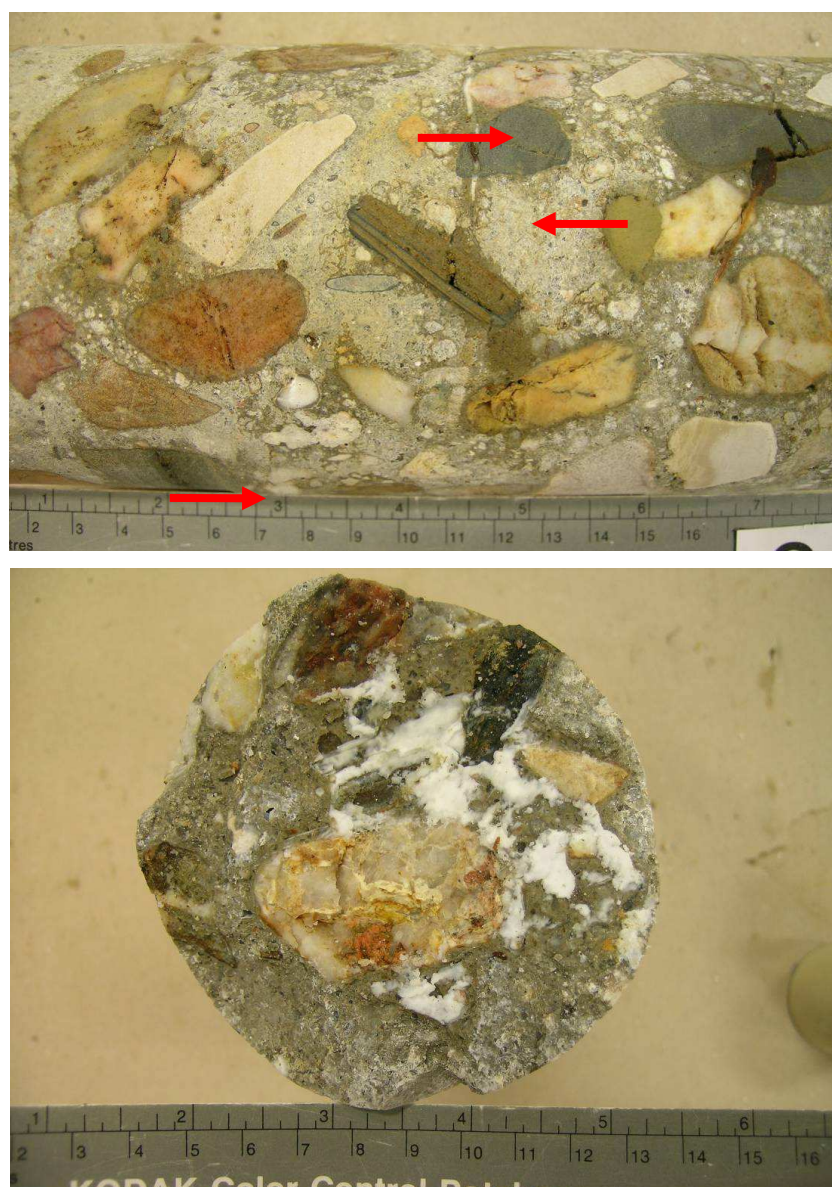


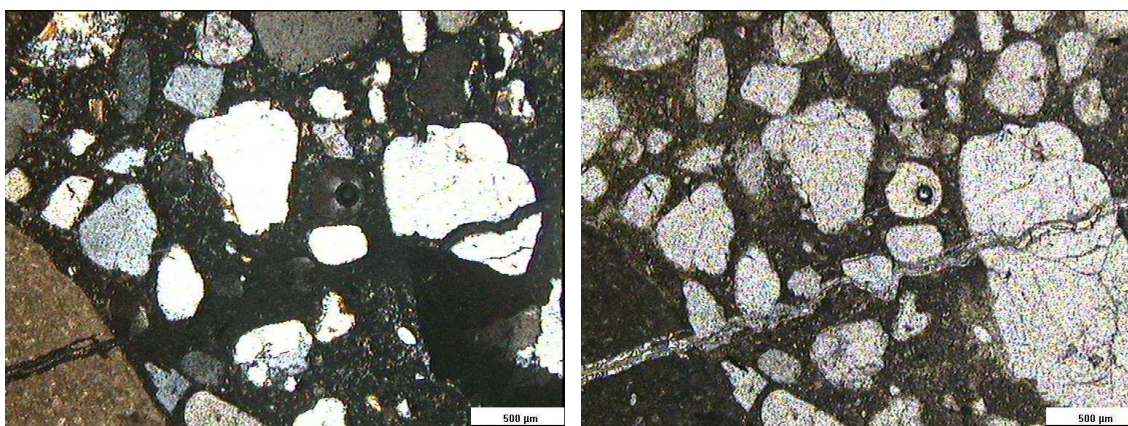
Figura 10 – Carote de betão em que são visíveis fissuras e poros preenchidos por produtos brancos.





Figura 11 – Observação à lupa binocular e um poro recoberto de gel com uma morfologia botrioidal típica de alguns dos gels da RAS.

A análise microscópica (petrografia e MEV/EDS) de provetes de betão é, provavelmente, a metodologia mais segura de confirmar a presença da RAS e o seu grau de desenvolvimento. Esta análise além de detectar a presença de morfologias típicas de produtos da RAS – figuras 12 e 13, permite avaliar a presença, ou não, de eventuais produtos decorrentes de outros processos de degradação do betão.



a)

b)

Figura 12 – Imagens ao microscópio petrográfico em (a) polarizadores paralelos e (b) cruzados que mostram uma fissura preenchida por gel RAS atravessando partículas de agregados.

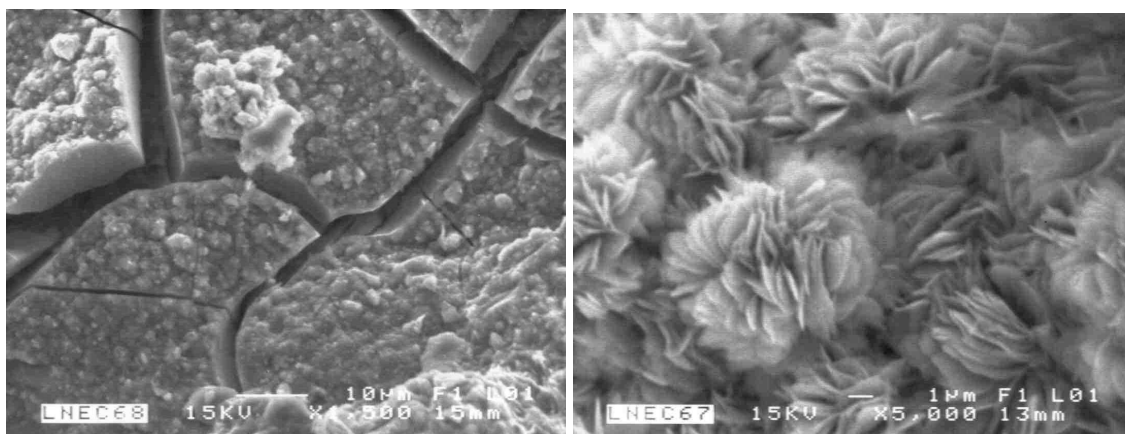


Figura 13 – Morfologias ao MEV de geles amorfos e produtos cristalinos do tipo roseta decorrentes da RAS no betão.

No caso de ser confirmada a ocorrência de RAS, segue-se a fase do prognóstico da evolução futura da reacção. A selecção dos ensaios deverá servir como um complemento aos ensaios de diagnóstico e poderá incluir:

- Determinação do teor de álcalis solúveis: fornece informação acerca do potencial remanescente em álcalis presentes no betão;
- Ensaios para confirmação da reactividade dos agregados: inclui a realização de ensaios de expansão de carotes de betão ou de ensaios de expansão específicos para agregados, por exemplo a partir de agregados retirados da pedreira utilizada para a construção;
- Ensaios de reactividade residual aos álcalis de carotes de betão: este ensaio constitui um elemento de diagnóstico da RAS, bem como de prognóstico sobre a possível evolução futura da RAS no elemento de betão do qual foi extraída a carote na estrutura.
- Ensaios físicos de carotes de betão: podem incluir ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água e permeabilidade.

Feito o diagnóstico da ocorrência de RAS numa determinada estrutura, a gestão futura desta deverá preferencialmente englobar a instalação dum sistema de observação adequado para se avaliar a evolução das reacções, nomeadamente através do acompanhamento da evolução da fissuração ou por medida regular das deformações globais da estrutura. Um procedimento deste tipo é seguido já em Portugal para algumas barragens.

### 3. REACÇÃO SULFÁTICA INTERNA NO BETÃO

#### 3.1. As reacções sulfáticas nos betões

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 pelo 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. A origem da expansão é atribuída à formação de etringite secundária 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. Este fenómeno é conhecido desde há uma dezena 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 relativamente elevado (> 65°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.

Numerosos factores influenciam a formação de etringite retardada: os constituintes do betão, nomeadamente o tipo de agregados, o tipo de cimento, a razão água/cimento (A/C), as adições minerais, mas também as condições nas quais são expostos os betões: temperatura, humidade, etc.

Os meios mais agressivos para o betão são principalmente os salinos e muito frequentemente os sais de sulfatos.

Os sulfatos representam um risco elevado de reacção química para o betão. Segundo um inquérito da OCDE realizado em 1989, o ataque por sulfatos é a segunda causa de degradação assinalada em 800 000 pontes no mundo.

As fontes de sulfatos são múltiplas, podendo ser de origem externa ou interna ao betão (figura 14).

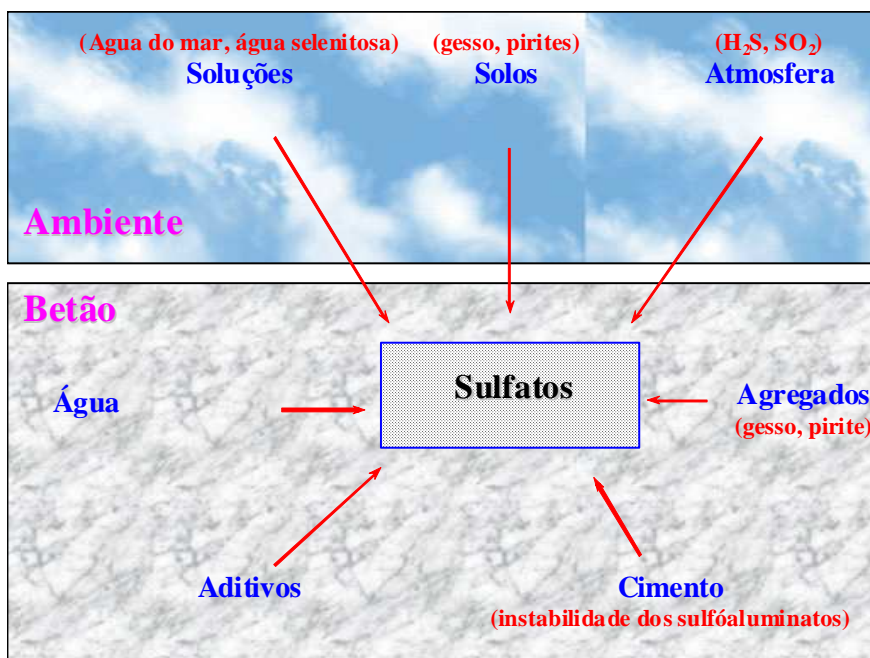


Figura 14 – As diferentes fontes de sulfatos para o betão.

### 3.2. As fontes externas de sulfatos

Os sulfatos podem ser de origem natural, biológica ou provir da poluição doméstica e industrial.

Estão naturalmente presentes nos solos onde constituem um elemento nutritivo importante das plantas. A concentração é habitualmente bastante fraca. Varia em média entre 0,01 e 0,05% do solo seco. No entanto, não é raro encontrar valores muito mais elevados (superiores a 5%) em certas regiões onde o subsolo contém gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) – é o caso da bacia parisiense, por exemplo.

Os sulfatos presentes nos solos podem também provir da decomposição biológica aeróbia de substâncias orgânicas contendo enxofre: adubo, plantas à superfície do solo, etc. O sulfato de amónio, particularmente agressivo, resulta da utilização intensiva dos adubos na agricultura.

Nos ambientes industriais (indústria química, fabrico dos adubos, fotografia...), a poluição das águas subterrâneas pode conduzir a concentrações muito superiores aos limites de agressividade geralmente admitidos.

Além disso, perto dos parques industriais e nas grandes aglomerações urbanas, a combustão dos carvões e dos óleos combustíveis, mais ou menos concentrados em enxofre, liberta o dióxido de enxofre que, na presença de oxigénio e humidade, conduz à formação de ácido sulfúrico que é um ácido particularmente corrosivo. O efeito indirecto dos fumos carregados de dióxido de enxofre manifesta-se também nas cidades, pela sujidade e pela degradação de certas fachadas, que frequentemente são devidas à formação superficial de gesso e à fixação de poeiras (cinzas).

Também a água do mar representa uma fonte de sulfatos importante. Além disso, as componentes agressivas do meio marinho são múltiplas.

### 3.3. As fontes internas de sulfatos

Diferentes fontes estão na origem da reacção sulfática interna, nomeadamente: a libertação tardia dos sulfatos do clínquer, a dissolução seguida de reprecipitação da etringite<sup>29</sup> resultante da hidratação normal dos cimentos e a formação de etringite secundária e retardada<sup>30</sup> devida ao efeito da temperatura.

Durante a hidratação do cimento portland, forma-se etringite primária resultante da hidratação precoce. Ela forma-se quando o betão é ainda fluido (reacção do C<sub>3</sub>A com o gesso<sup>31</sup>), e não tem acção expansiva – figura 15. Quando o betão endurece, a etringite secundária ou retardada que se forma tem geralmente uma acção expansiva – figura 16.

---

<sup>29</sup> A etringite é um trissulfoaluminato de cálcio hidratado de fórmula  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ . O seu nome vem da localidade alemã de Ettringen, onde Lehmann em 1874 assinala pela primeira vez a sua presença. Os cristais desenvolvem-se geralmente irradiando em redor de um núcleo central e têm o aspecto de agulhas.

<sup>30</sup> A etringite retardada também é denominada por D.E.F., do termo inglês “Delayed Etringite Formation”.

<sup>31</sup> Numa primeira fase, o aluminato tricálcico e o gesso dissolvem-se rapidamente. Os iões assim produzidos combinam-se para dar instantaneamente, no momento em que a solução está sobressaturada, cristais de etringite que não é nociva para o betão:  $6\text{Ca}^{2+} + 2\text{Al}(\text{OH})_4^- + 4\text{OH}^- + 3\text{SO}_4^{2-} + 26\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$



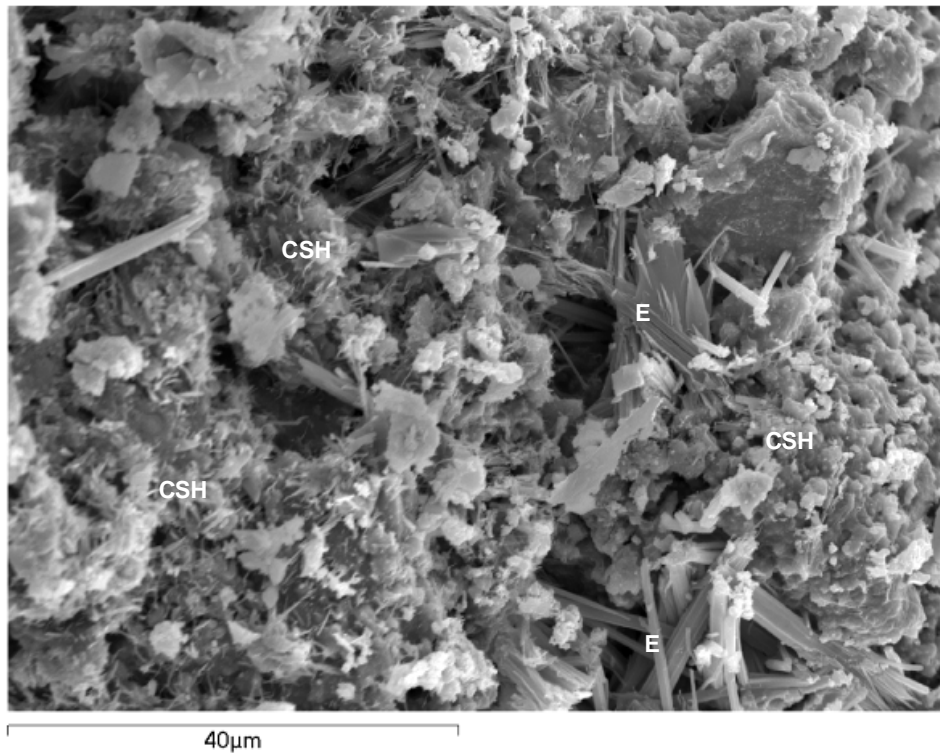


Figura 15 – Aspecto ao MEV duma pasta de cimento portland com silicatos de cálcio hidratados (CSH) e etringite primária (E).

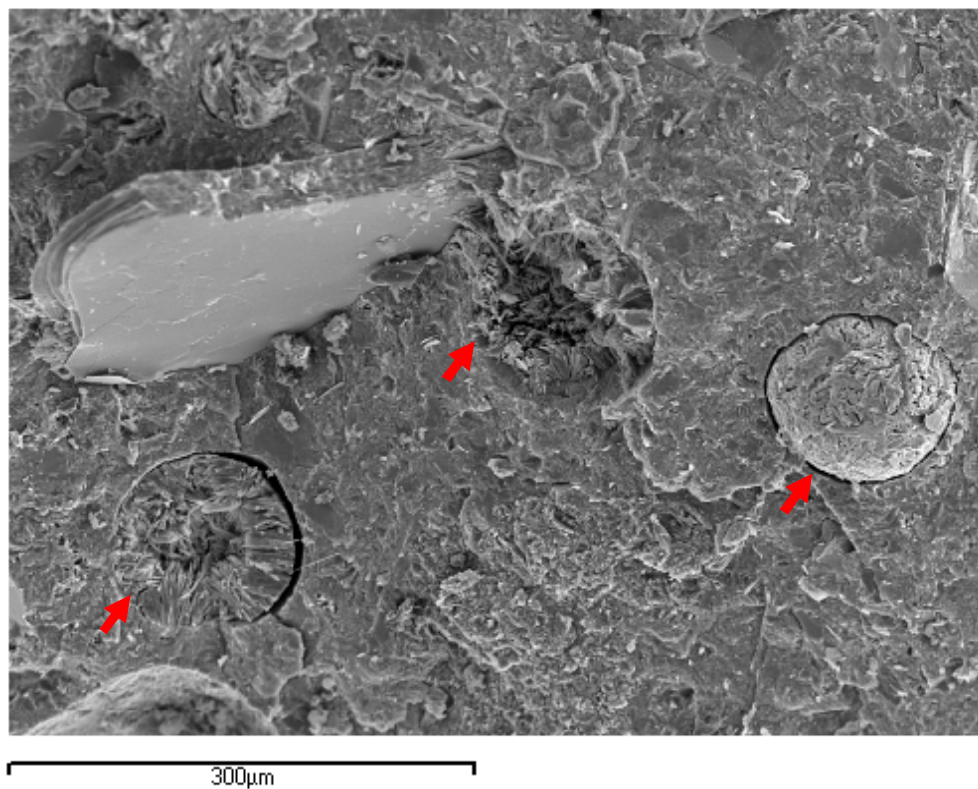


Figura 16 – Aspecto ao MEV duma pasta de cimento portland com poros preenchidos (seta) por etringite secundária.

### 3.3.1. A formação de etringite retardada (DEF)

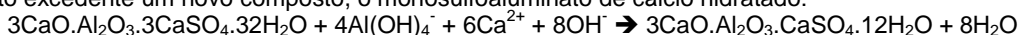
O estudo dos mecanismos reaccionais é ainda objecto de numerosas investigações. De entre os vários mecanismos propostos, distinguem-se mais frequentemente dois processos reaccionais principais que intervêm na formação de etringite retardada:

- A instabilidade da etringite aumenta com o aumento da temperatura e da basicidade. Acima de 80°C, o monosulfoaluminato de cálcio hidratado fica estável em detrimento da etringite<sup>32</sup>. Além disso, a solubilidade da etringite aumenta com a temperatura o que conduz a um aumento do teor em iões  $\text{SO}_4^{2-}$  na solução intersticial, susceptíveis de ser remobilizados posteriormente.
- Uma modificação das reacções de hidratação do par  $\text{C}_3\text{A}$ -gesso devido a uma elevação de temperatura. De facto, existe uma competição entre duas reacções que implicam o consumo dos iões sulfatos nas primeiras idades:
  - A reacção normal entre os  $\text{SO}_4^{2-}$  e o  $\text{C}_3\text{A}$  para formar etringite primária.
  - A fixação dos sulfatos por absorção física nos C-S-H. Estes podem ser remobilizados posteriormente para formar, depois do betão endurecido, etringite potencialmente expansiva.

Além disso, o aumento de temperatura desordena a estrutura dos C-S-H e provoca um aumento da porosidade dos C-S-H, propícia aos movimentos de água e iões no material. Podem-se resumir estes mecanismos como se mostra na figura 17.

---

<sup>32</sup> A formação de etringite consome três moles de sulfato de cálcio por mole de aluminato tricálcico. O teor de gesso dos cimentos é limitado a um valor inferior à proporção estequiométrica descrita anteriormente. Há por isso um excesso de  $\text{C}_3\text{A}$  em relação ao gesso. Depois de várias horas, o consumo total do gesso faz baixar a concentração dos iões sulfatos. A solução intersticial do betão torna-se subsaturada em relação à etringite. Esta dissolve-se então e torna-se a nova fonte de iões sulfatos, que formam com o aluminato excedente um novo composto, o monosulfoaluminato de cálcio hidratado:



Esta reacção provoca uma dissolução rápida do aluminato anidro que alimenta a solução em iões aluminato.

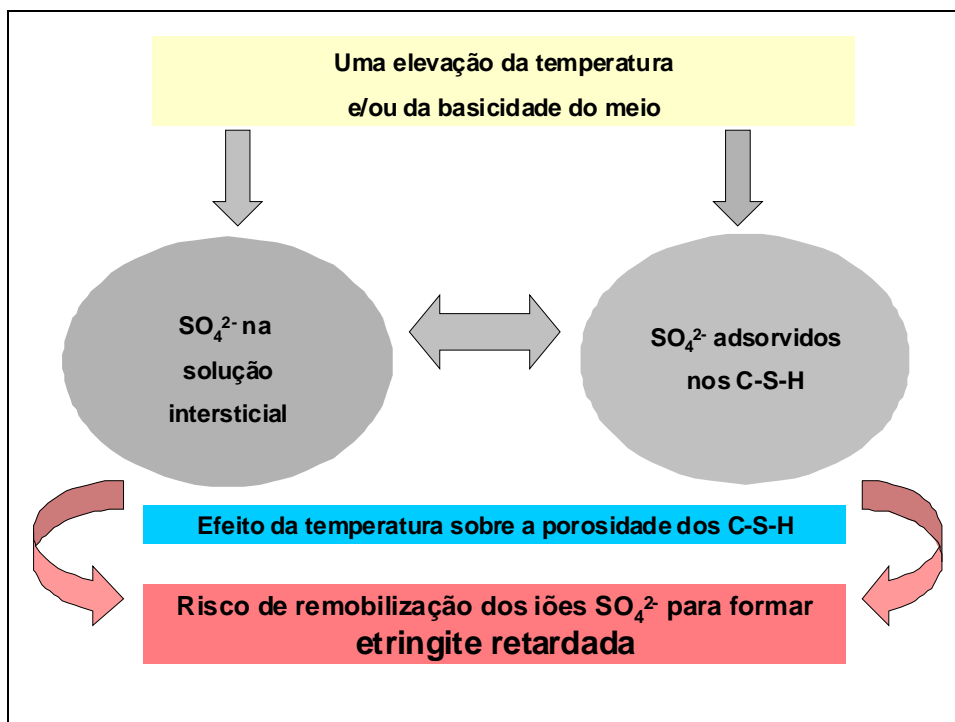


Figura 17 – Os mecanismos reaccionais da DEF.

### 3.4. Os factores determinantes e as medidas preventivas da DEF

A principal causa da DEF é uma elevação de temperatura (> 65°C) durante a presa do betão. Por esta razão, entre os casos de betões afectados pela DEF estão principalmente os betões pré-fabricados, curados em estufa, e as partes maciças de obras expostas a um ambiente húmido – figura 18.



Figura 18 – Elemento pré-fabricado com fissuração decorrente da DEF.

Uma segunda causa é um forte teor em álcalis do cimento. De facto, a presença de iões alcalinos em solução, tal como os iões  $\text{Na}^+$  ou  $\text{K}^+$ , aumenta a solubilidade da etringite. Nestas condições, sulfatos livres podem acumular-se em solução e dar lugar, a mais ou menos longo prazo, quando as condições termodinâmicas o permitirem, à recristalização da etringite potencialmente expansiva.

Igualmente, a DEF só ocorre se o cimento utilizado apresentar teores suficientemente elevados de  $\text{C}_3\text{A}$  e de sulfatos. A maior parte dos casos de expansões e de deteriorações observadas em estruturas ou em laboratório, referem-se a cimentos cujo teor em  $\text{C}_3\text{A}$  é superior a 8% e em  $\text{SO}_3$  superior a 2,6%.

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. Os movimentos da água são condições indispensáveis para favorecer a transferência dos sulfatos livres contidos, quer na solução intersticial do betão, quer fisicamente fixados nos C-S-H, para os sítios reaccionais.

As adições minerais, como a sílica de fumo, cinzas volantes, escórias de alto-forno, metacaulino, etc., parecem ter um papel benéfico na inibição da DEF. De facto, as adições ao reagirem com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , para formarem compostos hidratados similares aos da hidratação do cimento, como os C-S-H, controlam a alcalinidade do meio evitando a formação de produtos expansivos – figura 19.

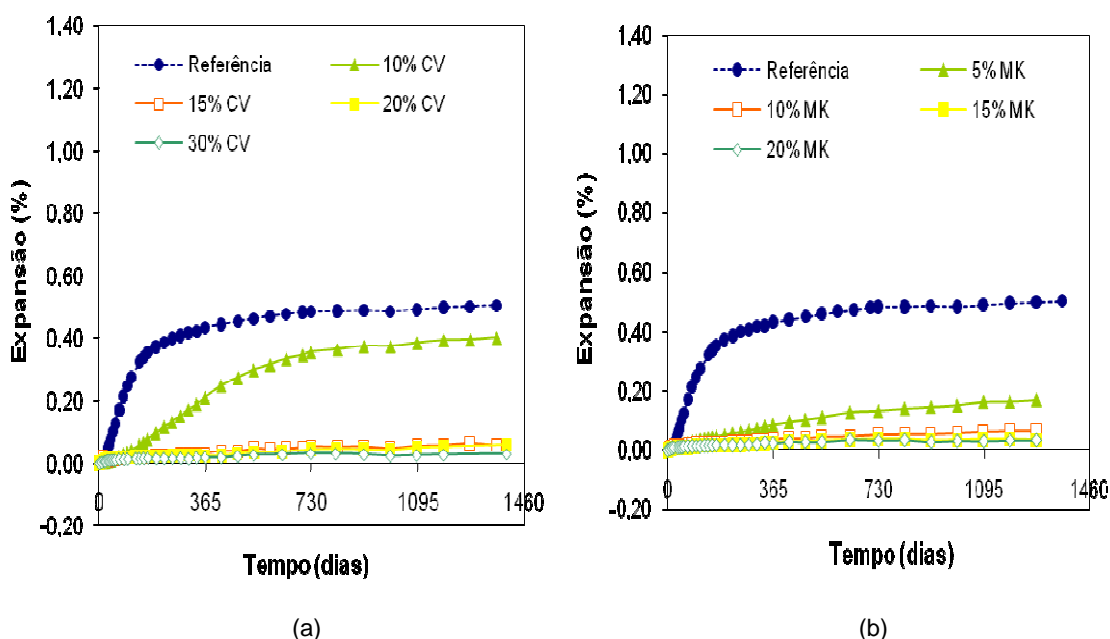


Figura 19 – Efeito da supressão da expansão devida à DEF com a variação do teor de substituição (% em massa) de cimento portland por adições minerais tipo II. Composições com cinzas volantes (a) e metacaulino (b).

As medidas preventivas da RSI assentam também no pressuposto da necessidade de se eliminar pelo menos uma das condições necessárias para que a reacção não 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.

#### **3.4.1. 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.

#### **3.4.2. Controlo dos teores de álcalis do betão e de aluminatos e sulfatos do ligante**

De acordo com a Especificação LNEC E 461, o teor de álcalis no betão deve ser inferior a 3,0 kg de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  por  $\text{m}^3$  de betão e os valores limites para  $\text{SO}_3$  e  $\text{C}_3\text{A}$  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  $3\% \leq \text{C}_3\text{A} \leq 5\%$ .

#### **3.4.3. Controlo da humidade do betão**

O controlo da humidade pode ser realizado seguindo integralmente a mesma abordagem estabelecida para a RAS (ver 1.3.3).

#### **3.4.4. Controlo do teor de hidróxido de cálcio do betão**

A etringite retardada tem carácter expansivo se a sua formação ocorrer em soluções saturadas de hidróxido de cálcio. Para reduzir a sua concentração podem utilizar-se adições tipo II seguindo a mesma metodologia da RAS (ver 1.3.2), podendo também avaliar-se a aptidão das adições para controlar aquela concentração por meio de ensaio de expansão de betão (ver 2.4.5).

#### **3.4.5. Avaliação da susceptibilidade de composições do betão à reacção sulfática interna**

No caso de não ter sido possível aplicar as medidas preventivas antes referidas pode-se ainda avaliar a susceptibilidade de uma dada composição de betão poder vir a desenvolver reacções sulfáticas internas, realizando ensaios de expansão de acordo com o método LPC nº 59 do LCPC (Especificação LNEC E 461). O betão depois de ensaiado é observado por microscopia electrónica de varrimento para confirmar a presença de etringite. Se não for detectada a presença de etringite retardada, a composição pode ser usada sem recorrer a medidas preventivas.

### **3.5. Manifestação da DEF no betão**

O diagnóstico da DEF é uma tarefa que pode ser complicada dado que a etringite é um produto que ocorre normalmente nos betões sãos. Acresce que os seus sintomas nas estruturas, nomeadamente o aparecimento de fissuração multidireccional, são similares aos de outra reacção expansiva – a RAS.

A metodologia de diagnóstico baseia-se numa avaliação que tem em conta, simultaneamente, aspectos microscópicos, próprios do material, e macroscópicos, ligados ao tipo de estrutura e ao grau de exposição (ciclos humedificação-secagem, imersão permanente, etc.). A recolha de informações relativa à composição e aplicação do betão são elementos úteis, pois podem ser relacionados com a patologia desta reacção.

Os ensaios em laboratório realizados sobre carotes de betão retiradas da estrutura, constituem a base indispensável do diagnóstico. Para tal é necessário que se retirem carotes em zonas alteradas e em zonas sãs. Dessa forma é possível dispor dum ponto de referência que possibilite a compreensão da ocorrência do fenómeno em determinadas zonas da estrutura. Por outro lado, é possível que numa zona aparentemente sã a reacção já esteja presente o que possibilita que se possa intervir preventivamente. De assinalar que as amostragens devem ser suficientemente



profundas para serem representativas das temperaturas máximas atingidas nos elementos de betão. No caso contrário, o material é susceptível de não evidenciar a presença de produtos de degradação, os quais poderão estar presentes mais no interior.

A microscopia, quer a óptica como a electrónica de varrimento, é a única técnica que permite identificar os produtos resultantes da DEF. Esta técnica permite distinguir a etringite normal (figura 20a), resultante da hidratação do cimento, da etringite deletéria de propriedades expansivas (figura 20b). A distinção das formas expansiva e não expansiva da etringite é bastante delicada, no entanto, a observação da morfologia, associada à sua localização, pode dar uma informação pertinente sobre o carácter expansivo da etringite. De facto, a etringite de morfologia acicular em que os cristais estão bem individualizados, corresponde à etringite não expansiva que precipitou na porosidade do betão. A etringite expansiva apresenta uma morfologia comprimida e encontra-se essencialmente localizada nas interfaces pasta/agregado.

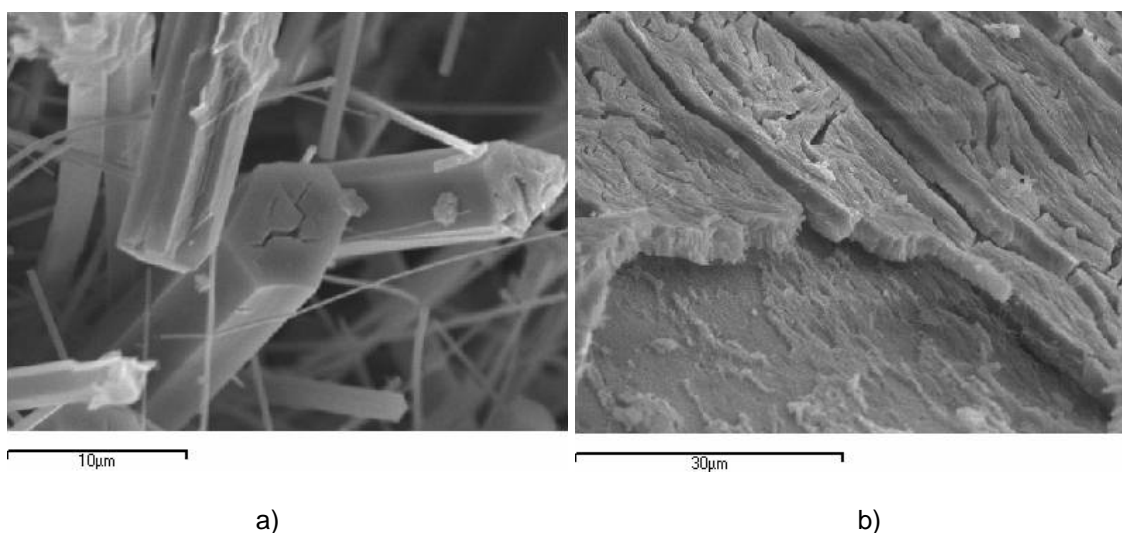


Figura 20 – Aspectos ao MEV de (a) etringite bem cristalizada, de morfologia acicular, não expansiva; e (b) de etringite mal cristalizada, de aspecto comprimido, e expansiva.

Em complemento da observação ao MEV, é necessário proceder-se à caracterização química do betão de forma de determinar a origem dos sulfatos (internos ou externos) implicados na reacção sulfática e verificar a presença de outros factores necessários ao desenvolvimento da DEF, como o teor de álcalis.

A temperatura é o factor primordial no mecanismo da DEF, pelo que a determinação da temperatura máxima atingida pelo betão durante a sua colocação e cura constitui um elemento importante para confirmar o diagnóstico. O LCPC desenvolveu uma metodologia simples de cálculo que permite avaliar se uma determinada peça de



betão deve ser considerada como susceptível de vir a desenvolver a DEF. O método baseia-se na determinação de parâmetros relacionados com as propriedades do betão (dosagem dos constituintes – cimento, adições e água; massa volúmica do betão; resistência à compressão do cimento aos 2 e 28 dias; calor de hidratação do cimento; e espessura da peça) e tem também em conta a geometria do elemento de betão em análise.

O diagnóstico e prognóstico futuro da evolução da DEF pressupõem ainda a realização de ensaios de expansão residual sobre carotes de betão retiradas da estrutura devendo evitar-se a intercepção com fissuras ou armaduras. O diâmetro recomendado das carotes é de 100 mm. Os provetes para ensaio são equipados com pernos para realização de medidas de expansão (figura 21a), e colocados em condições aceleradoras da reacção durante um ano. Na figura 21b mostram-se os resultados de expansão obtidos para dois provetes correspondentes a diferentes profundidades da mesma carote de betão. Os resultados mostraram maiores expansões para as zonas mais profundas, isto é, as mais atingidas pelas temperaturas elevadas durante a cura.

Além dos ensaios de expansão residual, a marcação e quantificação das fissuras é também uma forma de avaliar o desenvolvimento da DEF na estrutura. Exige-se é que essa avaliação seja precisa, fiável e reproduzível ao longo do tempo. Existem métodos simples de quantificação da fissuração, como o método do LPC 47, que consiste em medir com um fissurómetro todas as fissuras presentes numa determinada área ao longo do tempo, sendo a fissuração expressa em unidades de comprimento.

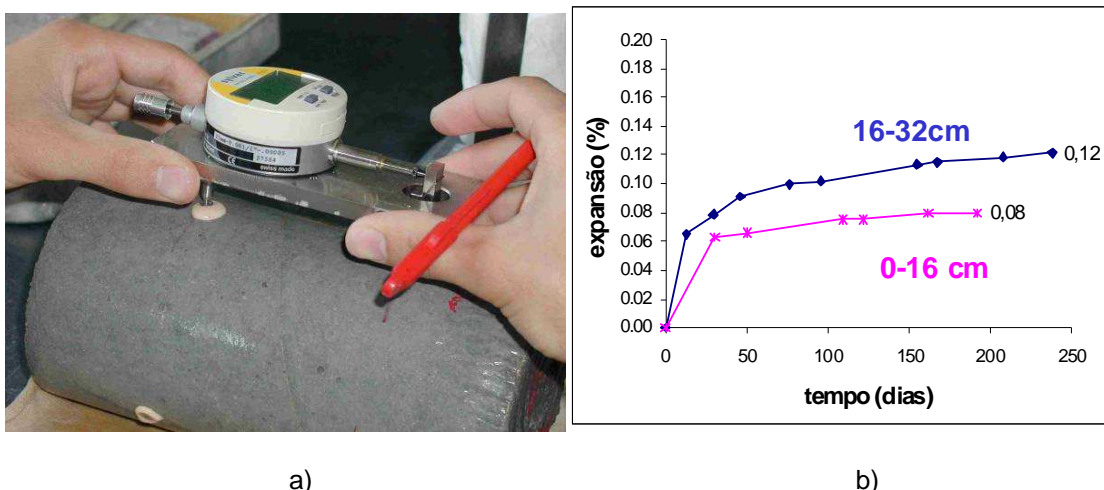


Figura 21 – a) Sistema de medida da expansão residual; b) Resultados de expansão residual duma mesma carote mas correspondente a diferentes profundidades do betão

#### 4. BIBLIOGRAFIA

- Santos Silva, A., *Degradação do betão por reacções álcalis-silica. Utilização de cinzas volantes e metacaulino para a sua prevenção*, Teses e Programas de Investigação LNEC, TPI 40, Edição LNEC, Lisboa, 2006, 339 p., ISBN-13 978-972-49-2083-2
- Santos Silva, A., Ribeiro, A.B., Jalali, S. and Divet, L., *The use of fly ash and metakaolin for the prevention of alkali-silica reaction and delayed ettringite formation in concrete*, Proceedings of the International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, Madrid, Spain, RILEM PRO 47 Publications, 2006, pp. 335-342. ISBN 978-2-912143-95-2.
- Divet, L., Fasseu, P., Santos Silva, A., *Optimisation du choix du liant pour réduire l'expansion des bétons due à la formation différée de l'ettringite*, Proceedings of the 7<sup>th</sup> CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canadá, 2006, pp. 331-342.
- Carde, C., Divet, L., Baroghel-Bouny, V., Ammouche, A., Chaussadent, T., Gallias, J.L., Caré, S., Amiri, O., Ait-Mokhtar, K., Santos Silva, A., Rougeau, P., Horanain, H., *GranDuBé - Grandeurs associées à la Durabilité des Bétons*, Sous la direction de Ginette Arliguie et Hughes Hornain, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 2007, 437 p. ISBN 978-2-85978-425-6
- Cristino, A.F., Melo Jorge, M.E., Salta, M., Santos Silva, A., *Inhibition of internal expansive reactions in concrete. A microscopy study*, Proceedings of the 11<sup>th</sup> Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Porto, 2007, 12 p.
- Soares, D., Candeias, A.E., Divet, L., Santos Silva, A., *Influence of fly ash and metakaolin in the inhibition of delayed ettringite formation in concrete - A microstructural characterization*, Proceedings of the 11<sup>th</sup> Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Porto, 2007, 10 p.
- Santos Silva, A., Ribeiro, A.B., Jalali, S., Divet, L., *Use of mineral additions for the inhibition of internal expansive reactions in concrete structures: good and bad synergies*, MEDACHS' 08 - 1st International Conference Construction Heritage in Coastal and marine Environments: Damage, Diagnostic, Maintenance and Rehabilitation, LNEC, 2008, 8 p.
- Fernandes, I., Santos Silva, A., Piteira Gomes, J., Tavares de Castro, A., Noronha, F., *Characterization of AAR in Fagilde dam*, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International

- Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, 2008, pp. 80-81.
- Santos Silva, A., Gonçalves, A.F., Pipa, M.; *Diagnosis and prognosis of Portuguese concrete railway sleepers degradation – a combination of ASR and DEF*, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, 2008, pp. 1240-1249.
- Santos Silva, A., Salta, M., Melo Jorge, M.E., Rodrigues, M.P., Cristino, A.F., *Research on the suppression expansion due to ASR. Effect of coatings and lithium nitrate*, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, 2008, pp. 1250-1259.
- Cristino, A.F., Melo Jorge, M.E., Salta, M., Santos Silva, A., *Internal expansive reactions in concrete. Prevention of its occurrence*, In Materials Science Forum, Vols. 587-588, 2008, pp 867-871.
- Santos Silva, A., Salta, M., Menezes, P., Couto, S., Adriano, P., *The role of SEM in the diagnosis of expansive chemical reactions in cement based building materials*, In Microscopy and Microanalysis, Vol. 14, Issue S3, 2008, pp 95-96.
- Santos Silva, A., Fernandes, I., Castro, N., *A problemática da avaliação da reactividade aos álcalis de agregados graníticos para betão*, Actas do Encontro Nacional Betão Estrutural 2008, UM, Guimarães, 2008, 9 p.
- Santos Silva, A., *Durabilidade do betão. Mitigação das reacções expansivas internas*, Construção Magazine, Nº 31, 2009, pp. 16-20. ISSN 1645-1767
- Castro, N., Fernandes, I., Santos Silva, A., *Alkali reactivity of granitic rocks in Portugal: a case study*, Proceedings of the 12<sup>th</sup> Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Dortmund, 2009, 11p.
- Soares, D., Santos Silva, A., Matos, L., Salta, M., Gonçalves, A., Ribeiro, B. R., Candeias, A., Mirão, J., Labrincha, J., Ferreira, V., Velosa, A., Ferreira, R.F., Jalali, S., *Emprego de adições minerais para mitigação de reacções expansivas internas*, Actas do ASCP'09 – 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes, FCT-UNL, Lisboa, 2009, pp. III.211 – III.218.
- Santos Silva, A., Soares, D., Matos, L., Salta, M., Pavoine, A., Divet, L., *Degradação do betão por reacções sulfáticas internas. Metodologia para o seu diagnóstico e prognóstico*, ASCP'09 – 1º Congresso de Segurança e Conservação de Pontes, FCT-UNL, Lisboa, 2009, pp. III.203-III.209.

- Santos Silva, A., Soares, D., Matos, L., Salta, M., Divet, L., Pavoine, A., Candeias, A., Mirão, J., 2009, *Influence of Mineral Additions in the Inhibition of Delayed Ettringite Formation in Cement based Materials – A Microstructural Characterization*, In Materials Science Forum, Vols. 636-637, 2010, pp 1272-1279
- Matos, L., Santos Silva, A., Soares, D., Salta, M., Mirão, J., Candeias, A., *The Application of Fluorescence Microscopy and Scanning Electron Microscopy in the Detection of Delayed Ettringite Formation in Concrete*, In Materials Science Forum, Vols. 636-637, 2010, pp 1266-1271.
- Santos Silva, A., Soares, D., Matos, L., Salta, M.M., *Inhibition of Internal Expansive Reactions in Cement Based Materials with Mineral Additions*, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Seminar MEDACHS 2010, LA Rochelle, 2010, 8p.
- Santos Silva, A., Gonçalves, A., Salta, M.M., *Degradation of Concrete Bridges by Internal Expansive Reactions – Portuguese Case Studies*, Proceedings of the 16<sup>th</sup> World Road meeting, Lisboa, 2010, 6 p.
- Santos Silva, A., Soares, D., Matos, L., Salta, M., Ribeiro, A., Gonçalves, A., *Mitigação das reacções expansivas no betão: avaliação do efeito do uso de adições minerais em substituição de cimento*, Encontro Nacional Conservação e Reabilitação de Estruturas (REABILITAR 2010), LNEC, Lisboa, 2010, 10 p.



## CONTEXTO DAS ESTRUTURAS E DOS MATERIAIS SUJEITOS A REACÇÕES EXPANSIVAS INTERNAS

