

## Reacções expansivas internas no betão: mitigação da expansão pelo emprego de adições minerais



**António Santos Silva<sup>1</sup>**



**Dora Soares<sup>1</sup>**



**Lina Matos<sup>1</sup>**



**Manuela Salta<sup>1</sup>**



**António Bettencourt Ribeiro<sup>1</sup>**



**Arlindo Gonçalves<sup>1</sup>**

### RESUMO

As reacções expansivas de origem interna (REOI) no betão, em particular a reacção álcalis-sílica (RAS) e reacção sulfática interna (RSI), são particularmente perigosas já que os seus produtos são extremamente expansivos, o que origina a fissuração do betão contribuindo para a redução da vida útil das estruturas, podendo em casos extremos levar à sua demolição.

Acresce que a detecção das REOI é difícil, necessitando de meios de diagnóstico que exigem elevada especialização. Igualmente problemática é a reparação das estruturas afectadas, que além dos elevados custos, acarreta um elevado risco de insucesso.

É neste contexto que a mitigação das REOI se torna necessário, nomeadamente com a avaliação dos seus condicionalismos e dos materiais susceptíveis a este tipo de reacções. Particularmente importante é o estudo da influência de diferentes tipos de adições minerais como forma de evitar a ocorrência futura das REOI. Em Portugal, para além das cinzas volantes e metacaulino na RAS e RSI, pouco se conhece sobre a influência de outros tipos de adições minerais na mitigação das REOI. Já as adições do tipo I, nomeadamente o fíler calcário, suscitam dúvidas quanto à sua eficácia.

Esta comunicação tem como objectivo dar a conhecer os resultados dum estudo em curso no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) sobre o efeito a médio/longo prazo das adições minerais na inibição das REOI. São discutidos os resultados referentes a ensaios de expansão e da evolução da microestrutura de betões fabricados com diversos tipos de adições minerais e teores de substituição.

### PALAVRAS-CHAVE

RSI, RAS, DEF, adições minerais, reacções expansivas

<sup>1</sup> LNEC, Departamento de Materiais, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. [ssilva@lneec.pt](mailto:ssilva@lneec.pt); [dsoares@lneec.pt](mailto:dsoares@lneec.pt); [lpmatos@lneec.pt](mailto:lpmatos@lneec.pt); [msalta@lneec.pt](mailto:msalta@lneec.pt); [bribeiro@lneec.pt](mailto:bribeiro@lneec.pt); [arlindo@lneec.pt](mailto:arlindo@lneec.pt)

## **1. INTRODUÇÃO**

O número de casos de estruturas de betão afectadas (pontes e barragens) por reacções expansivas de origem interna (REOI) tem aumentado muito nos últimos anos, tanto em Portugal como a nível internacional. Este fenómeno justifica o desenvolvimento e implementação de medidas que previnam a sua ocorrência em novas construções, dada a extrema dificuldade, ou por vezes impossibilidade, de reparar as estruturas afectadas por estas reacções.

A deterioração e degradação do betão sujeito a este tipo de patologia resultam na alteração das suas propriedades mecânicas, físicas e químicas. Acresce que as REOI são difíceis de detectar precocemente exigindo meios de diagnóstico caros e de elevada especialização. Em termos de sintomas visuais as REOI evidenciam-se em geral pela ocorrência de fissuração desordenada (map-cracking), com expansão, destacamento e desagregação do material.

Os principais factores que levam ao desenvolvimento das REOI estão relacionados com os constituintes internos do betão, nomeadamente os álcalis e os sulfatos, respectivamente para a RAS e para a RSI.

A crescente manifestação destas patologias em estruturas de betão motivou a necessidade de se estudarem medidas mitigadoras capazes de evitar a sua ocorrência em novas construções. Uma das medidas que tem vindo a evidenciar mais potencialidades, é a da utilização de adições minerais pozolânicas em substituição de uma parte do cimento. O mecanismo de inibição parece estar relacionado com a redução da alcalinidade do meio, como resultado da reacção pozolânica com a portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), por via do consumo da portlandite como pela diminuição do teor de iões alcalinos em solução ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ).

As adições são geralmente classificadas em dois tipos: adições tipo I ou “quase inertes” (ex. filer calcário) e adições tipo II: pozolânicas (ex. cinzas volantes, metacaulino e sílica de fumo) ou hidráulicas latentes (ex. escórias granuladas de alto-forno). As adições do tipo II são as que têm apresentado melhores resultados na mitigação dos efeitos das REOI, ainda que a sua eficiência dependa também da composição química e reactividade pozolânica da adição.

Ainda que os resultados demonstrados pelas adições tipo II em diversos estudos sejam promissores, a sua aplicação pode estar comprometida a curto/médio prazo, devido ao facto de cada vez mais existir uma real preocupação por parte da maioria dos Países na utilização de energias “limpas”, o que irá reduzir substancialmente a quantidade de resíduos e de produtos industriais produzidos, bem como na limitação de exploração e tratamento de produtos naturais.

Perante este cenário, iniciou-se no LNEC um estudo a longo prazo com o objectivo de avaliar o emprego de materiais com características pozolânicas, capazes de responder, a curto/médio prazo, às necessidades existentes na indústria do betão, seleccionando-se alguns materiais ditos não tradicionais, designadamente de origem mineral e/ou com origem em subprodutos industriais.

Este artigo tem por objectivo divulgar os resultados que têm vindo a ser obtidos no referido estudo, nomeadamente nos efeitos que as adições têm tido na inibição das REOI, sendo apresentados dados de ensaios de expansão, da evolução dos teores de álcalis, sulfatos e portlandite, bem como a análise da evolução da microestrutura dos betões fabricados, com vários teores e tipos de adição a várias idades.

## **2. ESTUDO EXPERIMENTAL**

### **2.1 Condições de ensaio. Materiais**

O estudo do efeito das adições minerais nas REOI foi levado a cabo através de métodos específicos indicados para cada tipo de reacção. Para o estudo da RAS utilizou-se o ensaio acelerado em barra de argamassa ASTM C 1260 [1] (equivalente à recomendação RILEM AAR-2 [2]). Para tal foram fabricados provetes de argamassa prismáticos utilizando um cimento CEM I 42,5R (CEM a) e um agregado reactivo (0,30% ao 14 dias de acordo com o método ASTM C 1260). Para tal, substituiu-se (% em massa) parte do cimento por diferentes teores de adição mineral, de modo a avaliar o seu efeito na inibição da expansão, por comparação com a composição de referência.

No estudo da DEF foram produzidos provetes de betão cilíndricos e ensaiados de acordo com o método acelerado MLPC nº 66 para avaliação da formação de etringite retardada em betão [3]. Neste caso foi utilizado um cimento CEM I 42,5R de outra origem (CEM b) e um agregado (brita e areia) quartzíticos não reactivo.

Para os referidos ensaios, foram seleccionadas 9 adições minerais, onde estão incluídos tanto subprodutos industriais, como materiais de origem natural, nomeadamente: cinzas volantes (CV), metacaulino (MK), escórias granuladas de alto-forno (ES), filer calcário (FC), diatomito (DT), pozolana dos Açores (PZA), lamas residuais de extracção de minério (LM) e cinzas de biomassa (CB1).

No quadro 1 apresenta-se a composição química dos diferentes materiais utilizados, assim como o índice de actividade das adições [4].

Quadro 1. Composição química e índice de actividade dos materiais.

	CEM <i>a</i>	CEM <i>b</i>	CV	MK	ES	FC	DT	PZA	LM	CB
<b>Análise química (%)</b>										
<i>SiO<sub>2</sub></i>	18,81	19,74	53,22	54,66	38,09	0,09	69,13	53,99	60,78	31,0
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	5,15	4,14	23,20	37,98	9,38	0,04	12,75	16,37	18,26	8,5
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	3,18	2,69	5,85	1,22	0,89	0,06	3,74	4,67	9,46	3,0
<i>CaO</i>	63,70	63,54	5,36	0,01	36,24	55,66	0,11	1,46	0,61	24,0
<i>MgO</i>	1,50	2,42	1,63	0,46	7,40	0,10	0,41	0,19	2,16	4,8
<i>SO<sub>3</sub></i>	2,69	3,11	1,00	0,01	0,27	0,02	-	0,11	-	-
<i>K<sub>2</sub>O</i>	1,02	0,64	1,42	3,09	0,52	0,04	1,26	4,63	3,93	2,7
<i>Na<sub>2</sub>O</i>	0,19	0,08	0,44	0,00	0,25	0,02	0,28	-	0,46	6,6
<i>Na<sub>2</sub>O<sub>eq.</sub></i>	0,86	0,50	1,37	2,03	0,59	0,05	1,11	3,05	3,05	8,38
<i>Perda ao rubro</i>	3,18	3,13	5,16	0,94	2,66	43,23	11,7	5,80	3,12	13,5
<b>Índice de Actividade Pozolânica (%)</b>										
28 dias	-	-	87	118	88	76	-	-	74	-
90 dias	-	-	101	119	94	72	-	-	85	-
<b>Composição Potencial de Bogue (%)</b>										
<i>C<sub>3</sub>S</i>	51,0	62,7								
<i>C<sub>2</sub>S</i>	15,0	9,3								
<i>C<sub>3</sub>A</i>	8,0	6,4	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>C<sub>4</sub>AF</i>	10,0	8,2								

## 2.2 RAS - Ensaios de expansão de argamassa

Os ensaios para o estudo da influência das adições na RAS foram realizados de acordo com o ensaio acelerado de barra de argamassa (ASTM C 1260). Este ensaio consiste no acompanhamento da variação de comprimento de provetes prismáticos de argamassa (25 mm x 25 mm x 285 mm), confeccionados com uma razão água/ligante de 0,47. Os prismas foram desmoldados 24h após a amassadura, colocados em água a 23° C e introduzidos numa estufa a 80° C durante mais 24 horas, após o que é feita a medida inicial (valor zero) de cada provete. De seguida, foram introduzidos numa solução de hidróxido de sódio 1M a 80° C onde permaneceram 14 dias, sendo realizadas nesse período 4 medidas de expansão. De acordo com os limites da norma de ensaio, um agregado é considerado reactivo se a sua expansão aos 14 dias for superior a 0,20% [1]. Para um determinado agregado reactivo, a taxa de incorporação de adições minerais é considerada efectiva quando a expansão aos 14 dias fica abaixo de 0,10% [5, 6].

No quadro 2 apresentam-se as composições ensaiadas para o estudo da RAS.

Quadro 2. Composições das argamassas no ensaio ASTM C1260 para o estudo da RAS.

	Referência	CV	MK	ES	FC	DT	PZA	LM	CB	CB +MK
Teor de substituição de cimento (% massa)	-	20	10	30	20	20	20	20	20	20 + 10
	-	-	20	40	30	-	-	30	30	

### 2.3 RSI - Ensaio de expansão em betão

Os ensaios para o estudo da influência das adições na RSI foram realizados de acordo com o ensaio de betão MLPC nº 66 do LCPC [3]. Neste ensaio são moldados provetes de betão cilíndricos, com uma dosagem de 440 kg/m<sup>3</sup> de ligante, razão água/ligante de 0,45 e um teor de Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> de 5,50 kg/m<sup>3</sup> de betão. Após a amassadura, os betões são sujeitos a um tratamento térmico onde atingem a temperatura máxima de 80° C após 15 horas, sendo mantidos a temperaturas acima de 70° C durante 3 dias. Este ciclo térmico reproduz o aumento de temperatura no interior de uma peça maciça de betão com dimensões de 14m x 3,5m x 1,5m (c x l x h), betonada *in-situ* com uma temperatura externa média de 23° C, e tem como objectivo promover a formação de etringite retardada (ou DEF do termo inglês *delayed ettringite formation*), pois esta só se forma em betões sujeitos a altas temperaturas. O programa de temperaturas foi modelado pelo método dos elementos finitos no módulo Texo do programa de cálculo CESAR-LCPC [7].

Após o final do ciclo térmico, os provetes de betão (cilindros com 220 mm x 110 mm) foram desmoldados e posteriormente sujeitos a dois ciclos de secagem-humidificação de forma a acelerar a cinética da formação de etringite. Cada ciclo teve a duração de 14 dias e é composto de duas fases: secagem durante 7 dias a 38 ± 2° C e a HR < 30%, seguida de imersão em água durante 7 dias a 20 ± 2° C. Após a realização dos ciclos de secagem-humidificação os provetes foram imersos em água a 20 ± 2°C, onde permanecem até às idades estabelecidas. As medidas de expansão e variação de massa foram realizadas periodicamente [3] a partir do fim dos ciclos de secagem-humidificação.

No quadro 3 apresentam-se as composições ensaiadas para o estudo da RSI.

Quadro 3. Composições de betão no ensaio MLPC nº 66 para o estudo da RSI.

	Referência	CV	MK	ES	FC
Teor de substituição de cimento (% massa)	-	10	5	10	10
	-	15	10	15	15
	-	20	15	20	20
	-	30	20	40	30

### 2.4 RSI - Análise da microestrutura de amostras de betão

A microscopia, óptica ou electrónica, é a única técnica capaz de identificar nitidamente as características microestruturais dos produtos de reacção em estudo, nomeadamente presença, localização, morfologia e padrão de microfissuração nas amostras. Neste âmbito foram utilizadas duas técnicas de observação microscópica, a microscopia electrónica de varrimento num microscópio JEOL JSM-6400, acoplado com um sistema de microanálise de raios X por dispersão de energia OXFORD (MEV/EDS), nos modos de electrões retrodifundidos (amostras em superfície polida) e electrões secundários (amostras em superfície de fractura), e a microscopia óptica (lâminas delgadas) num microscópio petrográfico Olympus BX60 com luz polarizada e com luz fluorescente.

As amostras para superfícies polidas e lâminas delgadas foram impregnadas a vácuo com uma resina epoxi à qual foi adicionado um corante verde (fluoresceína). As lâminas foram polidas com abrasivo de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, com granulometria de 15µm e 9µm respectivamente. As amostras para observação ao MEV

foram ainda sujeitas a um polimento final com pastas de diamante com granulometrias decrescentes de 6; 3 e 1µm, respectivamente.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Acção mitigadora das adições na RAS

No quadro 4 apresentam-se os resultados de expansão obtidos no ensaio ASTM C 1260 referentes às diferentes composições ensaiadas.

Quadro 4. Resultados da influência do tipo e teor de adição mineral (substituição, % massa) na inibição da RAS em ensaios de argamassa ASTM C 1260.

	idade	14 dias	28 dias
<b>limite de expansão do ensaio para agregados reactivos</b>		> 0,10 %	> 0,20 %
<b>expansão do agregado reactivo</b>		0,30 %	0,51 %
<b>Adições</b>	<b>% substituição em massa</b>		
<i>Cinzas volantes</i>	20	0,03%	0,07%
<i>Metacaulino</i>	10	0,05%	0,12%
	20	0,03%	0,07%
<i>Escória granulada de alto-forno</i>	30	0,12%	0,21%
	40	0,08%	0,15%
<i>Fíler calcário</i>	20	0,21%	0,35%
	30	0,18%	0,30%
<i>Diatomite</i>	20	0,05%	0,12%
<i>Pozolana dos Açores</i>	20	0,10%	0,16%
<i>Lamas residuais de extração de minério</i>	20	0,12%	0,18%
	30	0,04%	0,07%
<i>Cinzas de biomassa</i>	20	0,19%	0,32%
	30	0,17%	0,28%
<i>Cinzas de biomassa + Metacaulino</i>	20 + 10	0,06%	0,14%

Os resultados obtidos mostram que, com excepção das cinzas de biomassa, todas as adições minerais do tipo II são efectivas na mitigação da expansão devida à RAS, e que essa acção depende do tipo e teor de adição mineral empregue.

As cinzas volantes (CV) a par do metacaulino (MK) foram as adições que mostraram melhor desempenho na inibição da expansão, tendo-se verificado que 10% de substituição de cimento portland por MK é já suficiente nesse objectivo (expansão aos 14 dias < 0,10%). Os resultados obtidos com o MK são comparáveis com os dos ensaios com 20% de diatomite (DT) ou 30% de lamas de minério (LM), o que mostra que a eficiência das adições minerais na mitigação depende da sua reactividade pozolânica (quadro 1).

Constata-se ainda que para não ultrapassar o limite de expansão de 0,10% aos 14 dias foi necessário no caso das escórias granulada de alto-forno (ES) um teor de 40%, ou de pelo menos 20% de pozolana dos Açores (PZA).

Verifica-se para as cinzas de biomassa (CB) que uma taxa de substituição até 30% não é efectiva na inibição da RAS. De assinalar que de todas as adições as CB foram aquelas que apresentaram o maior teor de Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> (quadro1), facto que pode explicar a sua pouca eficácia na inibição da RAS. Contudo

verifica-se que as CB quando usadas em conjunto com uma adição muito pozolânica, como o MK, conseguem apresentar um comportamento menos expansivo e inibidor da RAS. Este resultado indicia um comportamento típico de um geopolímero, materiais que se sabe podem ter uma acção inibidora da expansão decorrente da RAS [8, 9].

### 3.2 Acção mitigadora das adições na RSI

No quadro 5 apresentam-se os resultados de expansão obtidos no ensaio MLPC nº 66 referentes às diferentes composições de betão ensaiadas [10].

Quadro 5. Resultados da influência do tipo e teor de adição mineral (substituição, % massa) na inibição da RAS em ensaios de betão MLPC nº 66.

		idade	1 ano	4 anos
<b>limite de expansão no ensaio</b>			0,04%	-
<b>expansão da composição de referência</b>			0,43%	0,51%
Adições	% substituição em massa			
<i>Cinzas volantes</i>	10		0,21%	0,41%
	15		0,03%	0,06%
	20		0,02%	0,06%
	30		0,01%	0,03%
<i>Metacaulino</i>	5		0,08%	0,18%
	10		0,04%	0,08%
	15		0,02%	0,04%
	20		0,02%	0,03%
<i>Escória granulada de alto-forno</i>	10		0,52%	1,08%
	15		0,29%	0,62%
	20		0,08%	0,23%
	40		0,00%	0,01%
<i>Fíler calcário</i>	10		0,88%	1,10%
	15		0,88%	1,04%
	20		0,88%	0,98%
	30		0,98%	1,04%

Os resultados obtidos evidenciam, com excepção das composições contendo fíler calcário, que há claramente um efeito positivo das adições minerais na inibição da expansão devida à RSI. Consta-se ainda que o FC não só não inibe a expansão devida à DEF, como ainda duplica os valores de expansão em relação à composição de referência, isto é, apenas com cimento portland.

Tal como se havia verificado para a RAS, o efeito de inibição das adições minerais tipo II na expansão devida à RSI ocorre a partir de um determinado teor de substituição e que é função da composição química da adição.

Os teores a partir dos quais se verificou a inibição da DEF são de 15% para as CV (redução de ~ 93%, a 1 ano), 10% para MK (redução de ~ 91%, a 1 ano) e 40% para as ES (redução de 100%, a 1 ano). Em todos estes casos a expansão apresentada é muito baixa, em comparação com a composição de referência, verificando-se ainda que para idades superiores a 1 ano há uma tendência de estabilização da expansão.

As diferenças no comportamento expansivo das várias adições poderão estar relacionadas com a sua eficácia no controlo da alcalinidade (controlo do teor de portlandite e de álcalis) da solução intersticial da pasta de ligante, pois é um dos factores que é apontado na literatura como sendo importante na reacção de formação de etringite [11].

Nas figuras 1 e 2 apresentam-se os resultados a várias idades da evolução do teor de portlandite (hidróxido de cálcio) e álcalis (expresso na forma de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq.}}$ ), respectivamente, para as composições de betão com e sem adições minerais. Os teores de portlandite foram obtidos por termogravimetria, a partir da perda de massa entre 400 e 500° C, enquanto os teores de álcalis foram determinados por espectrofotometria de absorção atómica após a sua solubilização de acordo com o método proposto por Bérubé et al. [12].

Em termos da evolução do teor de portlandite no betão (figura 1), verifica-se que as composições com MK, seguidas das de CV, são as que registaram um maior consumo. No caso das composições com ES verifica-se que a composição com 40% foi aquela onde se registou o maior consumo de portlandite. Com base nestes resultados pode-se inferir que há uma boa correlação entre a redução da expansão devida à RSI e o maior consumo de portlandite.

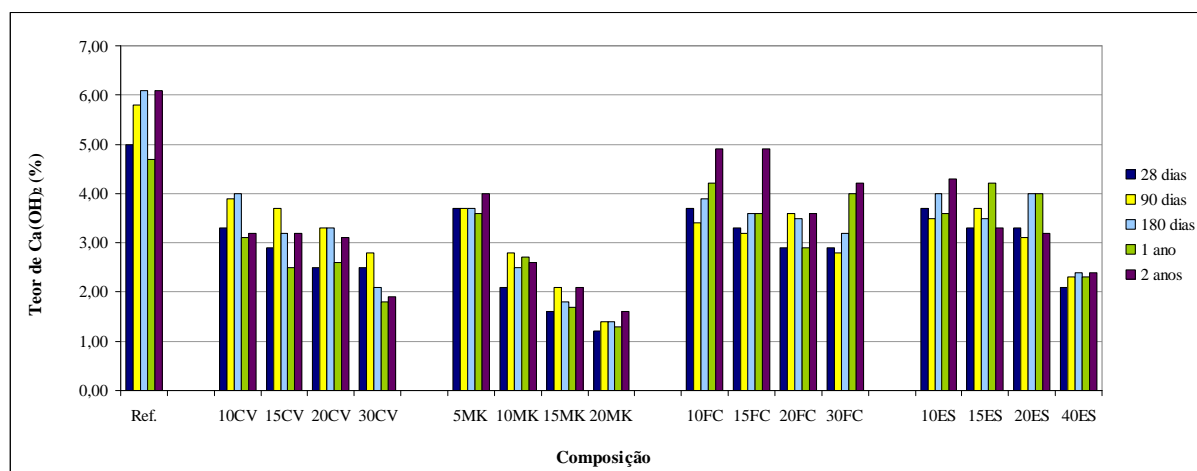


Figura 1. Evolução do teor de hidróxido de cálcio ao longo do tempo para diferentes composições de betão, com e sem adição mineral, ensaiadas de acordo com o método MLPC nº 66.

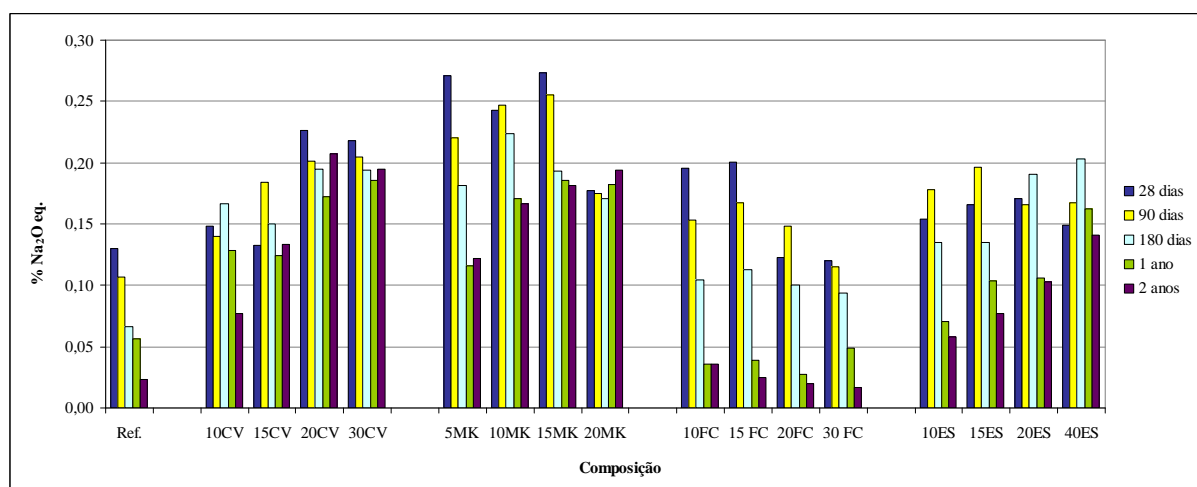


Figura 2. Evolução do teor de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq.}}$  ao longo do tempo para diferentes composições de betão, com e sem adição mineral, ensaiadas de acordo com o método MLPC nº 66.

No que se refere à evolução do teor de álcalis livres no betão verifica-se nas composições com adições minerais que quanto maior o teor de substituição maior é o teor de álcalis solúveis. Este resultado, que contraria os resultados de expansão, está em desacordo com a hipótese do mecanismo inibidor das adições minerais na RSI estar relacionado com o consumo dos álcalis [13].

### 3.3 Análise da microestrutura do betão

A análise microestrutural incidiu na comparação entre amostras de betão que apresentaram expansão e que não expandiram, para cada um dos tipos de adições estudadas.

Uma das características estudadas foi a microporosidade da pasta, quer no que diz respeito às diferenças entre as diversas composições quer na avaliação da sua evolução com o aumento da idade das amostras, averiguando a densificação ou aumento de porosidade das mesmas, bem como o seu grau de fissuração. Na figura 3 mostram-se imagens em modo de fluorescência das amostras onde é possível verificar alguma disparidade entre elas, em relação ao grau de microporosidade.

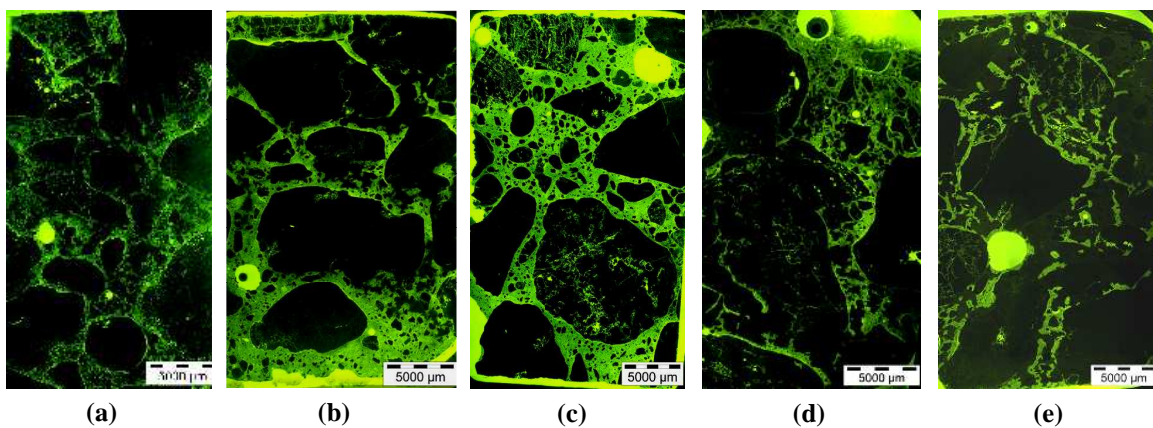


Figura 3. Imagens ao microscópio óptico de polarização, em modo de fluorescência, de amostras de betão de igual razão água/ligante (0,45), após 28 dias de ensaio MLPC n° 66: (a) Referência; (b) 10ES; (c) 10FC; (d) 10CV; (e) 5MK.

Conforme é visível na figura 3, as amostras são muito heterogêneas em termos de microporosidade, apresentando na mesma amostra zonas mais compactas do que outras. As composições que apresentam maior porosidade são a 10ES e 10FC, aquelas onde seria de esperar menor reactividade pozolânica. A heterogeneidade de microporosidade da pasta atenua-se com o aumento da idade de ensaio, como se pode verificar pela figura 4.

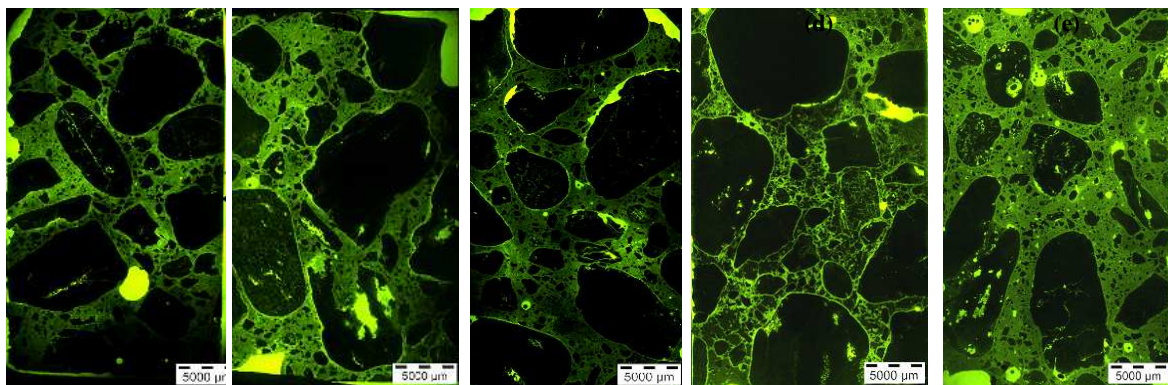


Figura 4. Imagens ao microscópio óptico de polarização, em modo de fluorescência, de amostras de betão de igual razão água/ligante (0,45), após 1 ano de ensaio MPLC n° 66: (a) Referência; (b) 10ES; (c) 10FC; (d) 10CV; (e) 5MK.



Outra característica avaliada ao microscópio foi a presença e localização da etringite. Verificou-se ao fim de um ano de ensaio em todas as composições que expandiram, que a etringite ocorre em grande quantidade e com espessura considerável. A etringite é visível em interfaces agregado/pasta e na forma de veios ao longo da pasta (figuras 5a a 5e), com morfologia típica de etringite retardada, que cristalizou em locais sem espaço suficiente, com microfissuração que se estendeu por toda a pasta com consequente expansão do betão. Nas composições que não expandiram, por exemplo a composição 40ES (Figs. 5f), a etringite está presente mas em menor quantidade e essencialmente localizada em vazios.

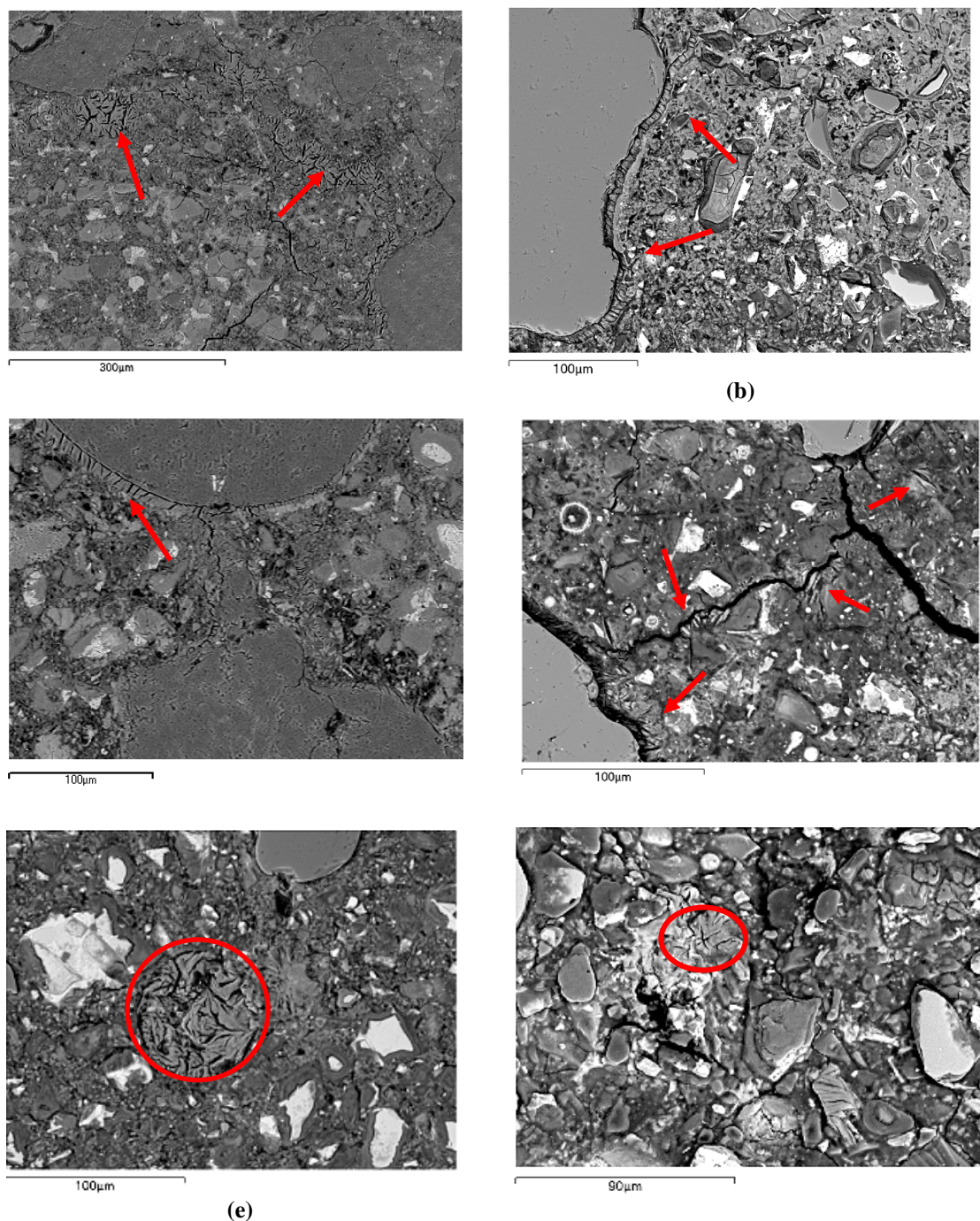


Figura 5. Imagens ao MEV de amostras de betão de igual razão água/ligante (0,45), após 1 ano de ensaio MLPC nº 66, evidenciando a presença de etringite: (a) Referência; (b) 10ES; (c) 10FC; (d) 10CV; (e) 5MK; (f) 40ES.

A observação das amostras ao MEV-EDS permitiu ainda a avaliação da quantidade de grãos de clínquer portland anidros na pasta, bem como do grau de homogeneidade da pasta em termos de microporosidade. Neste sentido foi possível corroborar a heterogeneidade das amostras conforme observado na microscopia óptica.

#### **4. CONCLUSÕES**

Os resultados obtidos apontam para a existência de uma relação entre a eficiência das adições minerais na inibição das REOI e o tipo de adição mineral, sendo que apenas as adições do tipo II são efectivas. Neste estudo, e para os tipos de agregados usados, verifica-se ser suficiente uma substituição (% massa) na ordem de 15-20% CV, 10-20% MK e > 40% ES.

Em relação às adições minerais do tipo diatomito, pozolana dos Açores, lamas de mineração e cinzas de biomassa, os resultados obtidos mostram que, no geral, estes materiais são eficazes, embora dependente da sua reactividade e teor de álcalis.

Das observações microscópicas das amostras de betão, confirmou-se que a expansão está sempre associada à formação de etringite deletéria, e que essa formação não está directamente relacionada com a maior ou menor porosidade da pasta.

O mecanismo de supressão da RAS e da DEF, e a forma como as adições minerais actuam a este nível, podem estar relacionados com a sua eficiência na redução da alcalinidade na pasta. Para esse facto, o maior contributo deve-se ao consumo de portlandite por parte das adições minerais. Neste ponto verificou-se uma boa correlação entre a redução da expansão devida à RSI e o maior consumo de portlandite, por parte das adições com maior índice de pozolanicidade.

Relativamente às adições do tipo I, nomeadamente de fíler calcário, constatou-se a sua não eficiência na mitigação das REOI. Neste caso, o mecanismo de hidratação do cimento portland é claramente influenciado pela presença desta adição, e supõe-se que tal se deva a uma aceleração da reacção de hidratação, desenvolvendo um maior calor de hidratação, com o conseqüente incremento da formação dos compostos de hidratação, em particular, portlandite e etringite, produtos responsáveis pela expansão devida às REOI.

#### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à FCT o apoio financeiro no âmbito do projecto EXREACT (PTDC/CTM/65243/2006) e ao projecto DURATINET (Durable Transport Infrastructures in the Atlantic Area Network) do Programa Operacional Espaço Atlântico 2007-2013, co-financiado pelo FEDER.

#### **REFERÊNCIAS**

- [1] ASTM C 1260, 2001, Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method), ASTM International, West Conshohocken, United States, p. 5.
- [2] RILEM Recommendations : A-TC 106-2-Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – The ultra-accelerated mortar-bar test; B-TC-106-3-Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – Method for aggregate combinations using concrete prisms, Materials and Structures, 33, 2000, 283-293.
- [3] Pavoine, A., Divet, L., Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de la réaction sulfatique interne. Essais de performance. Techniques et méthodes des LPC., Projet de méthode d'essai des lpc, vol. 59 (2003), p. 17.
- [4] NP EN 450, "Cinzas volantes para betão. Definições, exigências e controlo da qualidade", IPQ, 1995.

- [5] Santos Silva, A., Degradação do betão por reacções álcalis-sílica. Utilização de cinzas volantes e metacaulino para a sua prevenção., Tese de Doutoramento, LNEC/Universidade do Minho, 2005.
- [6] ASTM C 1567-08, 2008, Standard test method for determining the potencial alkali-silica reactivity of combinations of cementitious materials and aggregate (accelerated mortar-bar method), ASTM International, West Conshohocken, United States, p. 6.
- [7] Divet, L., Guerrier, F., Le Mestre, G., 1998. Existe-t-il un risqué de développement d'une activité sulfatique d'origine endogène dans les pièces en béton de grande masse. Le cas du pont d'Ondes (Haute-Garonne), Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 213, p. 59-72.
- [8] Torgal, F.P., Castro Gomes, J.P., Jalali, S., 2007, Ligantes obtidos por activação alcalina de lamas residuais das Minas da Panasqueira. Parte III. Influência dos agregados na resistência e microestrutura, Congresso da Construção 2007 – 3ª Congresso Nacional, Coimbra.
- [9] Torgal, F.P., Castro Gomes, J.P., Jalali, S., 2008, Investigations of tungsten mine waste geopolymeric binder: Strength and microstructure, Construct. Build. Mater. 22 (2008) 2212-2219.
- [10] Santos Silva, A., Soares D., Matos, L., Salta, M., Ribeiro Bettencourt A., Gonçalves A., Mitigação das reacções expansivas no betão: avaliação do efeito do uso de adições minerais em substituição de cimento, Proceedings of the REABILITAR 2010– Encontro Nacional Conservação e Reabilitação de Estruturas, Lisboa, Portugal, 2010, 10pp.
- [11] Divet, L., Les réactions sulfatiques internes au béton: contribution à l'étude des mécanismes de la formation différée de l'ettringite, Laboratoire Central de Ponts et Chaussées (LCPC), Paris, 2001.
- [12] Bérubé, M.A., Frenette, J., Vézina, D., Measurement of the alkali content of concrete using hot-water extraction, Proceedings of 11<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Québec, Canada, 2000.
- [13] Shehata, M.H. and Thomas, M.D.A., 2000, "The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction", Cement and Concrete Research, vol. 30, 7, p. 1063-1072.