

MITIGAÇÃO DAS REACÇÕES EXPANSIVAS NO BETÃO: AVALIAÇÃO DO EFEITO DO USO DE ADIÇÕES MINERAIS EM SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO

A. Santos Silva Investigador Auxiliar LNEC Lisboa ssilva@lnec.pt	D. Soares Bolsista FCT dsoares@lnec.pt	L. Matos Bolsista FCT lpmatos@lnec.pt
M. Salta Investigadora Coordenadora LNEC Lisboa msalta@lnec.pt	A. Bettencourt Ribeiro Investigador Principal LNEC Lisboa bribeiro@lnec.pt	A. Gonçalves Investigador Coordenador LNEC Lisboa arlindo@lnec.pt

SUMÁRIO

As adições minerais têm mostrado resultados contraditórios na mitigação das reacções expansivas de origem interna. No LNEC, e com co-financiamento do projecto FCT EXREACT, estão em curso estudos a longo prazo que visam o estudo e a aplicabilidade destes materiais na mitigação das reacções expansivas de origem interna.

Palavras-chave: DEF, RAS, adições minerais, reacções expansivas

1. INTRODUÇÃO

A degradação de estruturas de betão devido a reacções expansivas de origem interna (REOI) é um problema que afecta actualmente um número cada vez maior de estruturas de betão em todo o mundo. A deterioração e degradação do betão resultam na alteração das suas propriedades mecânicas, físicas e químicas, acompanhada, na maioria dos casos, de sintomas visuais como fissuração, destacamento e desagregação do material. Acresce que as REOI são difíceis de detectar precocemente exigindo meios de diagnóstico caros e de elevada especialização.

As REOI são assim designadas porque as suas causas estão relacionadas com os constituintes internos do betão (álcalis e sulfatos, essencialmente), e devem-se a dois mecanismos distintos: Reacção Álcalis-Sílica (RAS) e Formação de Etringite Retardada (DEF), que nalguns casos poderão ocorrer em simultâneo.

A descoberta nos últimos anos em Portugal de diferentes estruturas de betão (pontes e barragens) degradadas por REOI, motivou a necessidade de se estudarem formas preventivas destinadas a evitar a sua ocorrência nas novas construções. A utilização de adições minerais em substituição de uma parte do cimento poderá ser uma medida

mitigadora eficaz. Pensa-se que as adições ao reagirem com o Ca(OH)_2 , para formarem compostos hidratados similares aos da hidratação do cimento, como os silicatos de cálcio hidratados (CSH), reduzam a alcalinidade do meio evitando a formação de produtos expansivos.

As adições podem ser 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). Actualmente é já conhecido que as adições minerais do tipo II podem, em substituição parcial do cimento no betão e em quantidade suficiente, mitigar os efeitos destas reacções, embora a sua acção dependa da composição e reactividade pozolânica.

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

Esta comunicação tem como objectivo divulgar os resultados que têm vindo a ser obtidos sobre o efeito a médio/longo prazo das adições minerais na inibição das REOI, apresentando-se resultados de ensaios de expansão e de evolução da microestrutura de betões fabricados com diversos tipos de adições minerais e diferentes teores de substituição.

2. ESTUDO EXPERIMENTAL

2.1 Condições de Ensaio. Materiais

Para estudar o efeito das adições minerais nas REOI empregaram-se métodos específicos 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 fabricadas argamassas utilizando um cimento CEM I 42,5R (CEM a) e um agregado reactivo de referência (0,30% ao 14 dias de acordo com o método ASTM C 1260). De forma a avaliar-se o efeito do tipo de adição mineral realizaram-se misturas, em que parte do cimento foi substituído (% em massa) por diferentes teores de adição mineral, avaliando-se o efeito na inibição da expansão por comparação relativamente à composição de referência.

No estudo da DEF foram produzidos provetes de betão cilíndricos e testados de acordo com o método acelerado LPC nº 59 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) quartzítico não reactivo.

Foram testadas, através dos métodos acima referidos, 9 adições minerais, 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 (CB 1).

A composição química dos materiais obtida por FRX, e o índice de actividade das adições [4] usadas são apresentadas no Quadro 1.

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

	CEM a	CEM b	CV	MK	ES	FC	DT	PZA	LM	CB1
Análise química (%)										
SiO ₂	18,81	19,74	53,22	54,66	38,09	0,09	69,13	53,99	60,78	31,0
Al ₂ O ₃	5,15	4,14	23,20	37,98	9,38	0,04	12,75	16,37	18,26	8,5
Fe ₂ O ₃	3,18	2,69	5,85	1,22	0,89	0,06	3,74	4,67	9,46	3,0
CaO	63,70	63,54	5,36	0,01	36,24	55,66	0,11	1,46	0,61	24,0
MgO	1,50	2,42	1,63	0,46	7,40	0,10	0,41	0,19	2,16	4,8
SO ₃	2,69	3,11	1,00	0,01	0,27	0,02	-	0,11	-	-
K ₂ O	1,02	0,64	1,42	3,09	0,52	0,04	1,26	4,63	3,93	2,7
Na ₂ O	0,19	0,08	0,44	0,00	0,25	0,02	0,28	-	0,46	6,6
Na ₂ Oeq.	0,86	0,50	1,37	2,03	0,59	0,05	1,11	3,05	3,05	8,38
Perda ao rubro	3,18	3,13	5,16	0,94	2,66	43,23	11,7	-	3,12	13,5
Índice de Actividade Pozolânica (%)										
28 dias	-	-	87	118	88	76	-	-	74	-
90 dias	-	-	101	119	94	72	-	-	-	-
Composição Potencial de Bogue (%)										
C ₃ S	51,0	62,7								
C ₂ S	15,0	9,3								
C ₃ A	8,0	6,4								
C ₄ AF	10,0	8,2								

2.2 Medidas de expansão no ensaio acelerado de barra de argamassa

Para o estudo da RAS apresentam-se no Quadro 2 as composições ensaiadas. O método de ensaio consistiu no acompanhamento da variação de comprimento de provetes prismáticos de argamassa (25 mm x 25 mm x 285 mm), confeccionados com uma razão água/cimento de 0,47. Os prismas assim confeccionados foram, após desmoldagem, colocados em água a 23° C e introduzidos numa estufa a 80° C durante 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].

Quadro 2. Composições das argamassas estudadas.

	Referência	CV	MK	ES	FC	DT	PZA	LM	CB1
Teor de substituição (% massa)	0	20	10	30	20	20	20	20	20
		-	20	40	30	-	-	30	30

2.3 Medidas de expansão em betão

Para o estudo da RSI usaram-se provetes de betão, que foram fabricados utilizando 440 kg/m³ de ligante, com razão água/ligante de 0,45 e um teor de Na₂Oeq de 5,50 kg/m³ de betão. As composições usadas são apresentadas no Quadro 3.

A fim de promover a formação de DEF, imediatamente após a amassadura os betões foram sujeitos a um tratamento térmico, que 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. O betão atinge uma temperatura máxima de 80°C após 15 horas e é mantido a temperaturas acima de 70° C durante 3 dias. O programa de temperaturas foi modelado pelo método dos elementos finitos no módulo Texo do programa de cálculo CESAR-LCPC [7]. Após o final do ciclo térmico, os provetes de betão (cilindros com 220 mm de comprimento e 110 mm de diâmetro) 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 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 ficaram guardados definitivamente. As medidas de expansão e variação de massa foram realizadas periodicamente [3].

Quadro 3. Composições de betão usadas.

	Referência	CV	MK	ES	FC
Teor de substituição (% massa)	0	10	5	10	10
		15	10	15	15
		20	15	20	20
		30	20	40	30

2.4 Análise microestrutural das amostras de betão

A microscopia é a única técnica capaz de identificar claramente as características microestruturais dos betões associadas à formação das REOI, nomeadamente a morfologia cristalina ou amorfa dos produtos de reacção, o padrão de microfissuração e a presença de produtos nas zonas de interface agregado/pasta, em vazios ou mesmo disseminados na pasta de cimento. 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 epoxy à qual foi adicionado um corante (fluoresceína). As lâminas foram polidas com abrasivo de Al₂O₃ de 15µm e 9µm de granulometria. As superfícies polidas para observação ao MEV foram ainda sujeitas a um polimento mais fino com pastas de diamante com granulometrias decrescentes de 6; 3 e 1µm, respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Efeito das adições na RAS

O método ASTM C 1260 (ou uma sua variante o método ASTM C 1567) tem vindo a ser utilizado, a nível internacional, como método de determinação do teor mínimo de adição mineral a empregar com agregados reactivos para o controlo da RAS. No entanto, existe ainda bastante relutância em adoptar este método como forma de avaliar o desempenho das adições, essencialmente devido às questões relacionadas com o não completo esclarecimento do mecanismo de actuação das adições na RAS. Uma das hipóteses que é atribuída ao efeito das adições é o da redução da alcalinidade da solução intersticial, situação que neste ensaio é contrariada pelo fornecimento contínuo de hidróxido de sódio. No entanto, os trabalhos dirigidos por Berra e Bérubé [8, 9] mostraram que mesmo nessas condições de ensaio as adições minerais podem ser eficazmente avaliadas, se a duração do ensaio for de 14 dias.

Os resultados obtidos neste estudo apresentam-se nas Figs. 1 e 2.

Os gráficos de expansão mostram que há uma diminuição da expansão com a incorporação das adições minerais, e que essa diminuição depende do teor de substituição empregue. Essa diminuição depende da natureza da adição e do seu índice de actividade pozolânico. Em geral, verifica-se que quanto maior o índice de actividade pozolânica maior é a eficiência da adição na mitigação da RAS. Esta relação apenas não se verifica para o FC, que é uma adição considerada inerte.

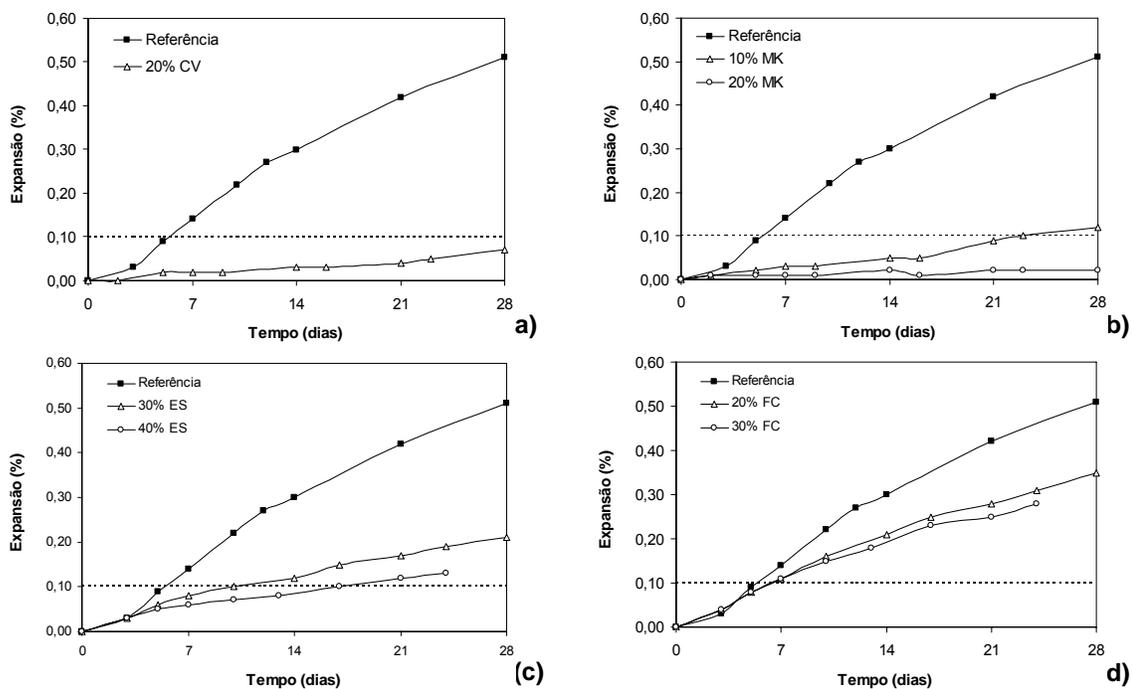


Figura 1. Gráficos de expansão vs tempo, que avaliam para a RAS a influência do teor de substituição (% massa) de composições de argamassa com: (a) CV, (b) MK, (c) ES e (d) FC.

Relativamente às composições com as adições DT, PZA, LM e CB1 verifica-se a partir de um teor de substituição entre 20% e 30% que apenas o diatomito, a pozolana dos Açores e as lamas residuais de extracção de minério calcinadas são eficazes na mitigação da RAS. As cinzas de biomassa, até cerca de 30% de substituição de cimento, não evidenciaram serem eficazes na mitigação da RAS para o agregado reactivo seleccionado. Este comportamento negativo das cinzas de biomassa pode estar relacionado com o seu elevado teor em álcalis.

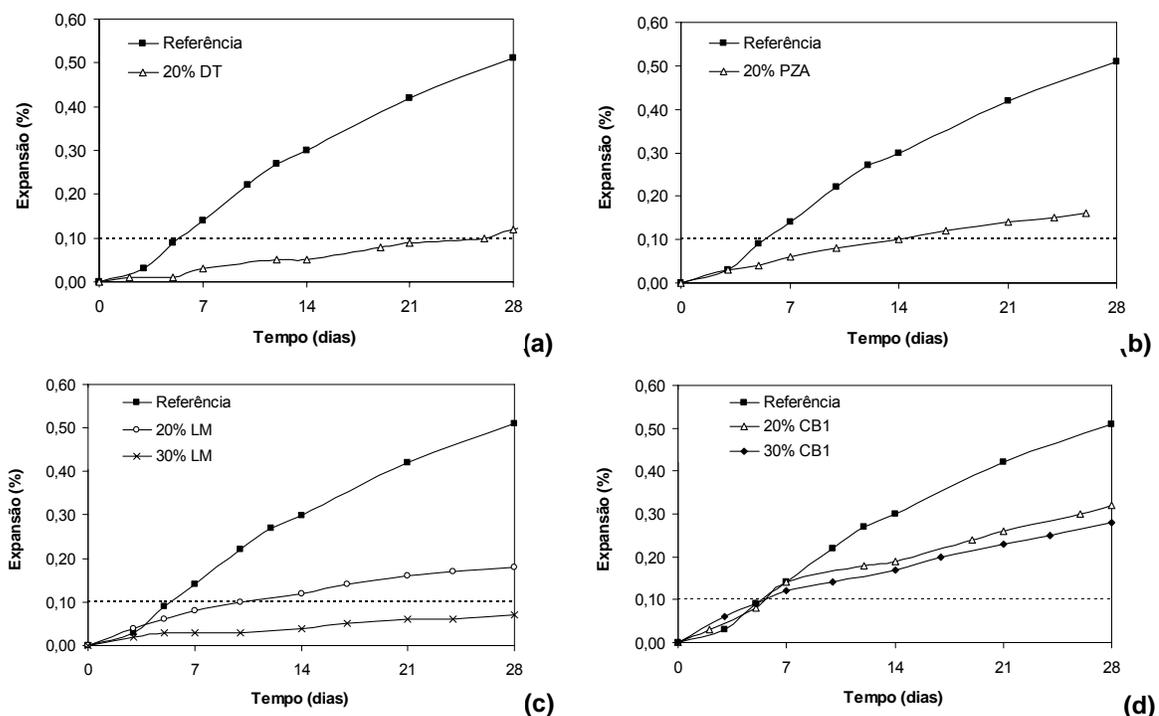


Figura 2. Gráficos de expansão vs tempo que avaliam para a RAS a influência do teor de substituição (% massa) para composições de argamassa com: (a) DT, (b) PZA, (c) LM e (d) CB1.

3.2 Efeito das adições na RSI

Na Fig. 3 apresentam-se as curvas de expansão das várias composições de betão com adições minerais, comparativamente com a composição de referência, para o estudo da RSI. Os resultados mostram claramente que, com excepção das composições com filer calcário, no geral, as adições têm elevado efeito na inibição da expansão devida à DEF. O filer calcário não inibe a formação de DEF, duplicando mesmo os valores de expansão em relação à composição de referência.

O efeito catalisador do filer calcário na DEF, poderá estar relacionado com o seu papel nas reacções de hidratação do cimento portland. Segundo *Ye et al.* [10], as partículas de filer são inertes, não participando por isso nas reacção de hidratação, embora por outro lado possam funcionar como núcleos de reacção para a hidratação do C_3S e C_2S , o que levará a

uma maior rapidez de hidratação das partículas em redor dos núcleos de fíler. Este autor considera que o fíler pode ser também um participante activo nas reacções de hidratação, já que ao acelerar o processo de hidratação há produção de maior calor de hidratação que promove a formação mais rápida da etringite, e a consequente fissuração precoce dos betões com fíler calcário. Outros autores, *Poppe and Schutter* [11], baseiam-se no princípio de que o fíler não é inerte, isto é, não só actua como activador de algumas reacções como faz também parte das reacções de hidratação do cimento. Para estes autores, a formação de etringite é acelerada pela presença do fíler, e consequentemente a sua conversão em monossulfoaluminato é retardada ou até mesmo parada.

A hipótese de que o fíler não é inerte parece ser a mais consensual, pois medições efectuadas da quantidade de CaCO_3 em betões com fíler verificaram que o seu teor é inferior ao valor teórico esperado, o que se atribuiu ao seu consumo.

Para as adições tipo II, verifica-se o efeito de inibição na expansão a partir de um determinado teor de adição. Os teores a partir dos quais se verificou a inibição da DEF são de 15% para cinzas volantes, 10% para metacaulino e 40% para as escórias granuladas de alto-forno. As diferenças que se obtêm nestes teores para as várias adições parecem poder estar relacionadas com o grau de consumo de hidróxido de cálcio ou índice de actividade. Em todos estes casos a expansão apresentada é muito baixa, em comparação com a composição de referência.

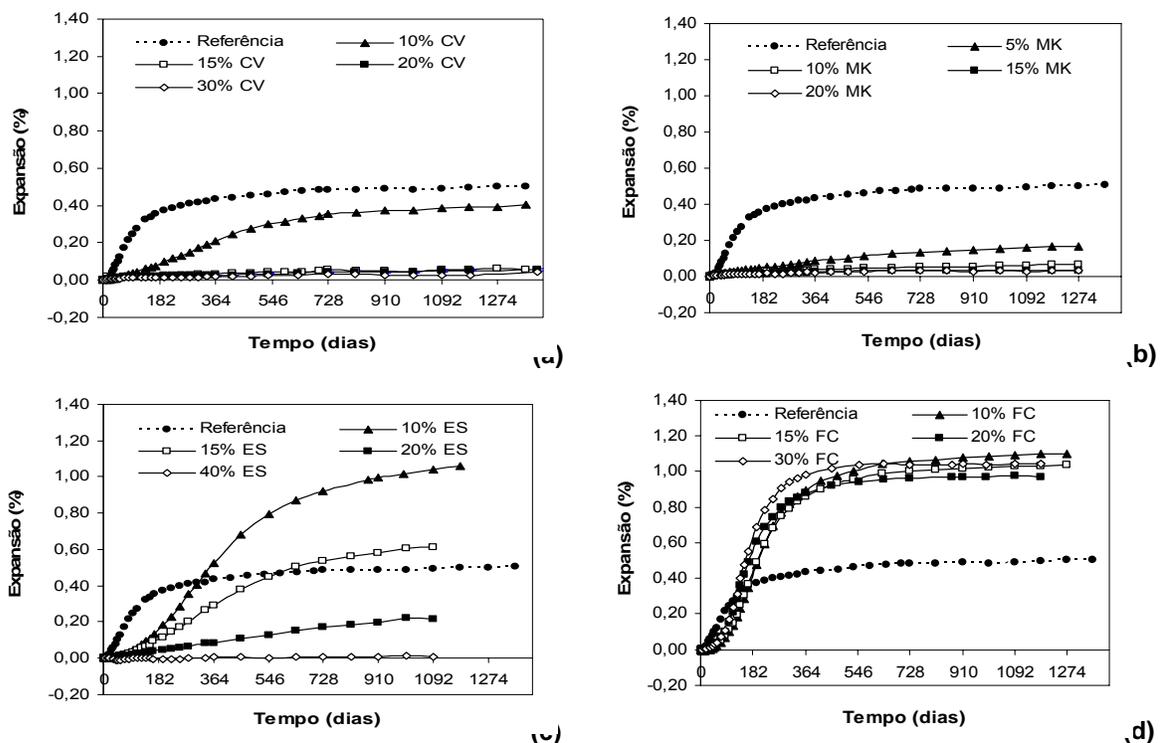


Figura 3. Gráficos de expansão vs tempo que avaliam para a RSI a influência do nível de substituição (% massa) para as composições de betão com: (a) CV, (b) MK, (c) ES e (d) LF.

3.3 Análise microestrutural do betão

A análise microestrutural incidiu, para cada uma das adições estudadas, nas amostras de composições de betão que apresentam maior e menor expansão. Verificou-se que as composições que apresentaram maiores expansões foram aquelas onde se detectou maior quantidade de etringite na pasta e nas interfaces pasta/agregado. Por outro lado não foi observada etringite nas composições que não expandiram.

Outra característica igualmente estudada foi a evolução da microporosidade da pasta destas composições, ao longo do tempo, com o intuito de averiguar a densificação ou aumento de porosidade das mesmas, bem como o seu grau de fissuração. Constatou-se que existe uma elevada diferença de microporosidade entre as amostras (Fig. 4), sendo a composição REF a menos porosa e a FC a que apresenta maior porosidade.

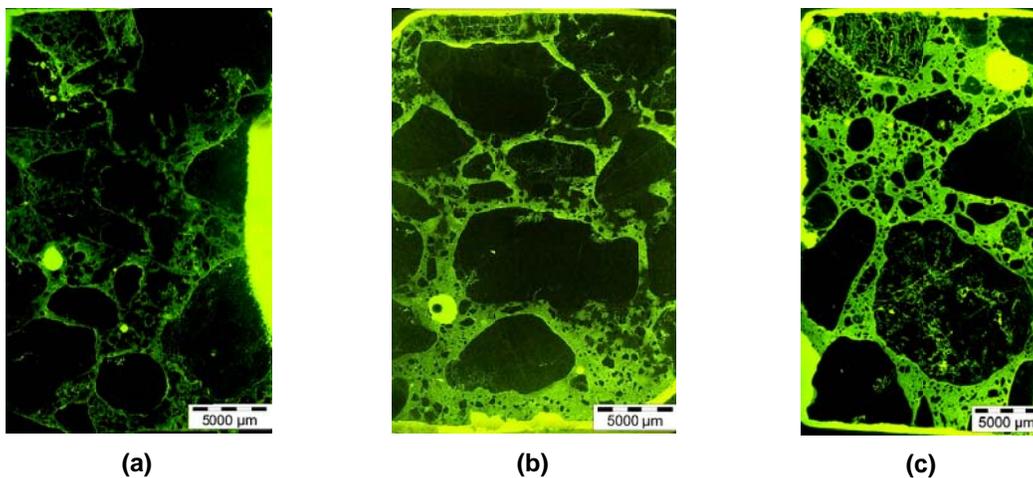


Figura 4. Imagens geral das lâminas, em modo de fluorescência, de amostras de betão com diferentes microporosidades: (a) Referência com 28 dias, (b) 10ES com 28 dias, (c) 10FC com 28 dias.

As observações das amostras ao MEV-EDS permitiram a localização e análise da composição química dos compostos expansivos formados, p.e. etringite (Fig. 5), além do grau de microporosidade e quantidade de grãos de clínquer portland anidros na pasta.

Na Fig. 6, é possível observar a diferença na microporosidade das amostras aos 28 dias de ensaio, sendo o grau de compactidade da pasta, em termos decrescentes, o seguinte: REF < 10FC < 10ES, confirmando o que se observou por petrografia. Verifica-se também, que para a idade de 28 dias, a composição com fíler calcário é a que apresenta menor quantidade de clínquer anidro, o que parece corroborar a teoria da maior velocidade de reacção do cimento portland nas composições com adição de fíler calcário.

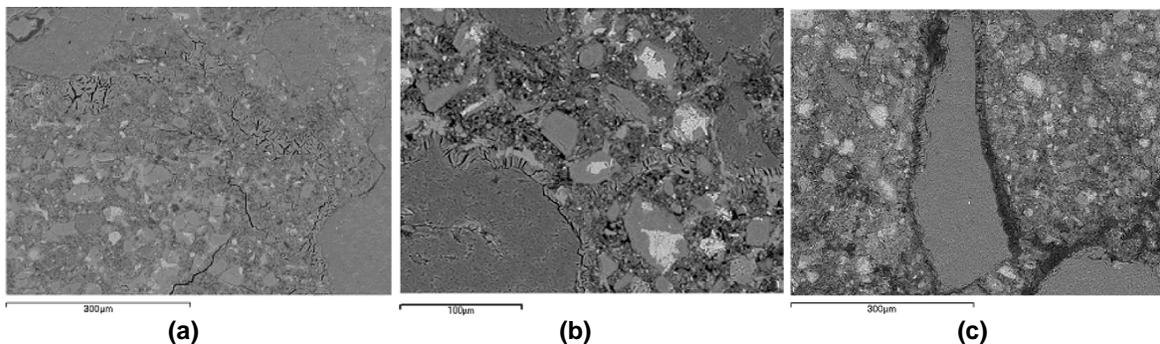


Figura 5. Imagens de MEV de amostras de betão que mostram etringite em torno dos agregados e na pasta: (a) Referência, 1 ano; (b) 10ES, 1 ano; (c) 10FC, 1 ano.

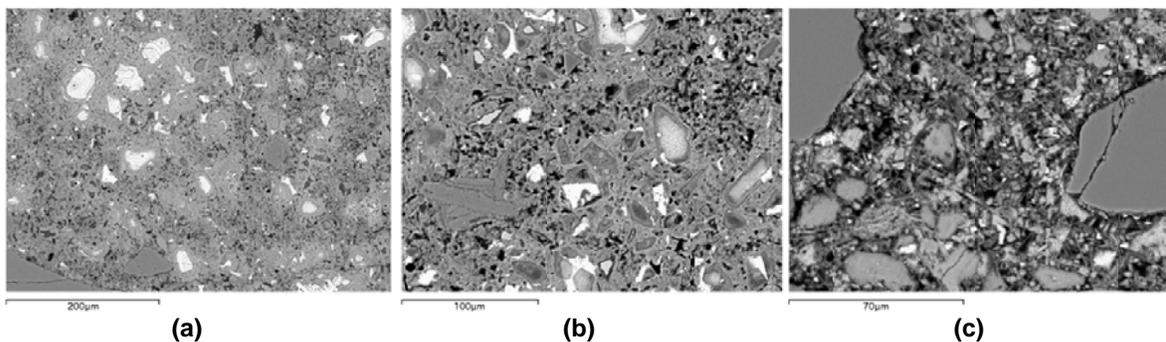


Figura 6. Imagens de MEV de amostras de betão com diferentes microporosidades: (a) Referência, 28 dias; (b) 10ES, 28 dias; (c) 10FC, 28 dias.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos sugerem que a eficiência das adições minerais na inibição das REOI depende do tipo de adição mineral, sendo que apenas as adições do tipo II são efectivas. Neste particular 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.

Relativamente ao diatomito, pozolanas dos Açores, lamas de mineração, e cinzas de biomassa, os resultados obtidos mostram que são materiais, em geral, eficazes na mitigação das REOI, embora essa eficácia dependa do teor de substituição e do seu teor de álcalis.

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, no entanto esta hipótese ainda se encontra em estudo.

Relativamente às adições do tipo I, nomeadamente de filler 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-silica. 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] Berra, M., Mangialardi, T, Paolini, A.E., 1994, Application of the NaOH bath test method for assessing the effectiveness of mineral admixtures against reaction of alkali with artificial siliceous aggregate, *Cem. Concr. Comp.* 16 (3), 207-218.
- [9] Bérubé, M.A., Duchesne, J., Chouinard, D., 1995, Why the accelerated mortar bar method ASTM C 1260 is reliable for evaluating the effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to alkali-silica reactivity, *Cem. Concr. Aggreg.* 17 (1), 26-34.
- [10] Ye, G., Liu, X., Schutter, G., Poppe, A. M., Taerwe, L., Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes, *Cem. Concr. Res.* 29 (2007) 94-102.
- [11] Poppe, A. M., Schutter, G., Cement hydration in the presence of high filler contents, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 2290-2299.