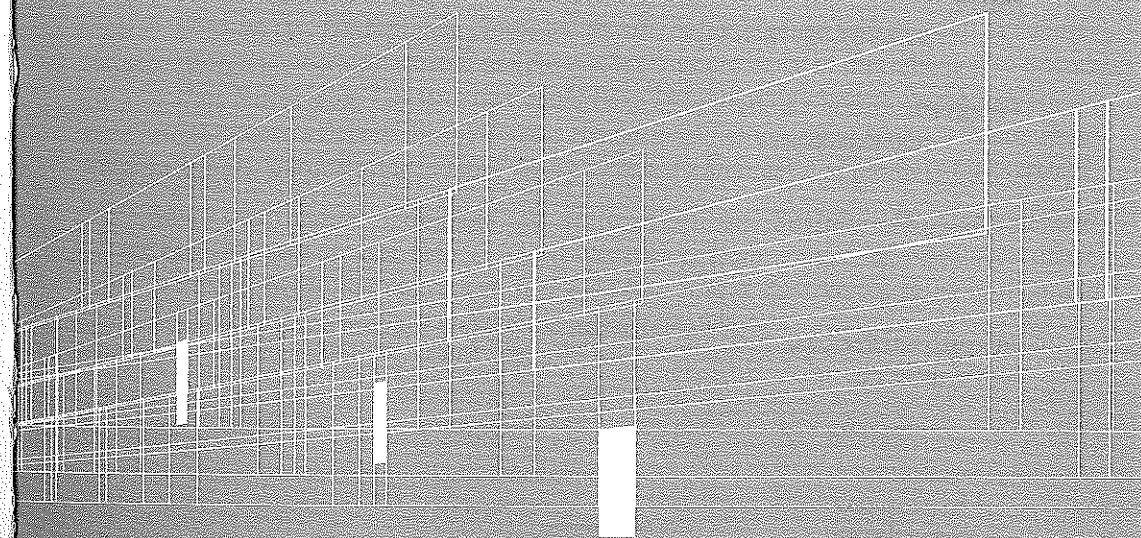




Congresso de Inovação na
Construção Sustentável
Congress of Innovation on Sustainable Construction

Inovação na Construção Sustentável
Innovation on Sustainable Construction



Ficha Técnica:

Título:

Inovação na Construção Sustentável
Innovation on Sustainable Construction

Propriedade e Edição:

Plataforma para a Construção Sustentável
Curia Tecnoparque, 3780-544 Tamengos
www.centrohabitat.net
centrohabitat@centrohabitat.net

Coordenação Editorial:

Victor M. Ferreira
Luis Bragança
António Baio Dias
Armando Silva Afonso
Jorge de Brito

Capa

José Luis Fernandes - CTCV

Depósito legal:

318 111/10

ISBN:

978-989-95978-1-5

Tiragem:

500 exemplares

Impresso em Portugal,
com o apoio de:



Co-financiamento:

mais
CENTRO

QR
EN
QUADRO
DE REFERÊNCIA
ESTRATÉGICO
NACIONAL



A **Plataforma para a Construção Sustentável** (www.centrohabitat.net) é hoje uma rede que congrega empresas, centros de I&D, autarquias e outros agentes comprometidos com este tema da sustentabilidade e em usá-lo como mote para a inovação. O seu interesse abrange toda a fileira do Habitat e tem como objectivo principal concentrar recursos para valorizar empresarial e socialmente o conhecimento sobre a sustentabilidade do ambiente construído.

De modo a concretizar este objectivo, entende a Plataforma promover um evento internacional dirigido às empresas, centros de I&D, autarquias e demais entidades interessadas em divulgar o que fazem nesta área e discutir o papel que a Construção Sustentável pode ter sobre a Inovação, particularmente, no cluster Habitat Sustentável, de que é a entidade gestora a nível nacional.

Assim surgiu o **Congresso de Inovação na Construção Sustentável (CINCOS'10)** realizado na Curia (Portugal) de 4 a 6 de Novembro de 2010 e a partir do qual se elaborou este livro, repositório de conhecimentos que se pretende útil para a Inovação e Competitividade do cluster Habitat e sua sustentabilidade.

*The Portuguese **Sustainable Construction Platform** (www.centrohabitat.net) is a network linking companies, research centres, municipalities and other agents concerned with the theme of Sustainability and in using it as a driving force for Innovation. The Platform aims to concentrate resources in order to value technology and knowledge transfer to companies and local governance, namely, about sustainability of the built environment.*

In order to do so, this Platform has promoted an international event addressed to the above-mentioned organizations interested to inform what they are doing in this area and to discuss the role that Sustainable Construction could have in promoting Innovation, particularly, in the Habitat cluster, in which the Platform is the national management entity. A forum where different agents, participating in innovation processes, can meet and promote partnerships.

*The event was named **Congress of Innovation on Sustainable Construction (CINCOS'10)**, and it was held in Curia (Portugal), from 4 to 6 of November 2010, from which this book was made and, it is expected that it contributes to Innovation and Competitiveness of the Habitat cluster and its sustainability.*

Mitigação da RAS e DEF pela utilização de resíduos de minas de tungsténio

S. Sousa¹, A. Santos Silva², A. Velosa³, F. Rocha¹

¹Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro 3810-193, Aveiro, Portugal, (sofiasousa@ua.pt; Tavares.rocha@ua.pt)

²INEC, Departamento de Materiais, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Brasil 101, 1700-066, Lisboa, Portugal. ssilva@lnec.pt

³Departamento de Engenharia Civil, Geobiotec, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal. avelosa@civil.ua.pt

Resumo

Os danos causados pelas reacções expansivas de origem interna (REOI), que envolvem a reacção álcalis-sílica (RAS) e a reacção sulfática interna (RSI), assumem grande importância na durabilidade e desempenho das estruturas de betão. Estas reacções afectam várias estruturas em todo o mundo, sendo necessário encontrar formas de prevenir/inibir a ocorrência das REOI nas novas estruturas de betão.

Este trabalho pretende avaliar o efeito da utilização de lamas residuais de uma mina de tungsténio na mitigação das reacções expansivas de origem interna (REOI).

Para este efeito, foram fabricadas diferentes composições de argamassas, utilizando-se um cimento CEM I 42,5R, um agregado silicioso reactivo e diferentes teores de lamas residuais em substituição do cimento portland.

Neste artigo apresentam-se os resultados de ensaios de expansibilidade aos álcalis e de evolução da microestrutura das argamassas estudadas.

Os resultados obtidos apontam para que uma substituição de pelo menos 30% de lamas residuais por cimento portland seja eficaz na mitigação das RAS.

Palavras-Chave: betão, construção sustentável, mitigação, RAS, resíduos de minas.

Introdução

A nível mundial, Portugal é um dos maiores produtores de tungsténio [1-2] cuja exploração resultam milhões de toneladas de lamas residuais, que ao longo dos anos têm sido depositadas em aterros superficiais, produzindo um impacto visual e ambiental considerável. O aproveitamento, bem como a possível valorização, desses resíduos pode ser inserido na temática da construção sustentável.

A incorporação de resíduos na indústria do betão permitirá reduzir o impacto ambiental resultante da deposição de materiais em aterros, com a inerente redução de emissão de gases na produção de cimento portland e a minimização do consumo de recursos não renováveis.

As reacções expansivas de origem interna (REOI), que podem ser do tipo álcalis-sílica (RAS) e sulfáticas internas (RSI), são uma das causas de degradação de estruturas de betão. Uma forma de inibir/prevenir estas reacções é através da incorporação de materiais com características pozolânicas no betão, como adição ou em substituição parcial no cimento portland.

O presente trabalho insere-se num estudo mais alargado sobre o efeito das adições minerais na mitigação das REOI, tendo-se neste caso empregue lamas residuais da extracção duma mina de tungsténio, antes e após activação térmica [3] com o objectivo de verificar a sua eficiência na mitigação das REOI. Os resultados das composições com lamas são avaliados por comparação com uma composição de referência sem lamas.

Parte experimental

Materiais:

Utilizaram-se lamas residuais duma mina de tungsténio na granulometria $<75\mu\text{m}$, tendo num dos casos sido usadas após um tratamento térmico (calcinação durante 2h e a uma temperatura de 950°C), com o objectivo de aumentar a sua reactividade pozolânica [3]. Estas duas amostras de lamas, antes e após tratamento térmico, foram designadas de LM e LMC, respectivamente. Na Tabela 1 apresenta-se a composição química do cimento e lamas usadas.

Prepararam-se com estes materiais argamassas usando um cimento CEM I 42,5R e um agregado silicioso reactivo aos álcalis – Tabela 2. Na preparação das argamassas utilizaram-se as condições da norma de ensaio ASTM C 1260 [4] para o estudo da reactividade aos álcalis de agregado para betão (Tabela 2).

Tabela 1 – Composição química dos materiais obtida por FRX

Análise Química	CEM I 42.5R	LM	LMC
SiO ₂	18,81	60,78	62,57
Al ₂ O ₃	5,15	18,26	18,62
Fe ₂ O ₃	3,18	9,46	9,99
CaO	63,7	—	—
MgO	1,5	2,16	2,15
MnO	—	0,12	0,13
SO ₃	2,69	—	—
TiO ₂	—	0,86	0,86
P ₂ O ₅	—	0,25	0,24
K ₂ O	1,02	3,93	4,01
Na ₂ O	0,19	0,46	0,45
Na ₂ O eq	0,86	3,05	3,09
LOI	3,18	3,12	0,34

Tabela 2 – Composição das argamassas

Tipo de agregado	Razão A/C	Composição (% massa, em substituição do cimento)		
		Referência	LM	LMC
Silicioso	0,47	0	30	30

Ensaio

Avaliação da reactividade pozolânica das lamas

Estes ensaios consistem essencialmente na avaliação do grau de combinação das lamas com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), o que permite aferir o grau de reactividade pozolânica do material. Dado existirem diferentes métodos para a avaliação desta propriedade [5], e com o objectivo de se inferir sobre a sua eventual correlação, usaram-se vários métodos, nomeadamente: índice de actividade de acordo com a norma NP EN 450-1 [6], ensaio de Frattini de acordo com a norma NP EN 196-5 [7], ensaio Modificado de Chapelle [8] e de Maropoulou e Ahmadi [9-10], este dois últimos consistindo na determinação do consumo de Ca(OH)₂ por via química ou por análise térmica, respectivamente.

Índice de actividade

(método baseado na determinação da tensão de ruptura em argamassas)

Este método foi realizado de acordo com a norma NP EN 450-1:2005 [6] sendo o índice de actividade determinado pela razão entre as resistências à compressão duma argamassa preparada com 75% de cimento e 25 % de lamas (% de substituição em massa) e da argamassa de referência só com cimento nas mesmas condições, respectivamente às idades de 28 e 90 dias.

Ensaio de Frattini

A actividade pozolânica do material é avaliada por comparação da quantidade de Ca(OH)₂ em milimol CaO/l presente na fase líquida da pasta de ligante hidratado (cimento+lamas) relativamente a uma solução só de cimento e água destilada (NP EN 196-5:2006) [7]. Os resultados são apresentados num gráfico CaOmm/l (ião cálcio) vs [OH⁻] mm/l.

Se os resultados se apresentarem abaixo da curva de saturação do Ca(OH)₂ as amostras satisfazem o ensaio de pozolanidade, isto é, ocorre remoção de Ca²⁺ que é um indicativo de actividade pozolânica. As amostras depois de colocadas em estufa termostatizada, durante 8 e 15 dias, são filtradas e é determinada a concentração por titulação em iões hidróxido [OH⁻] e [Ca²⁺]. Ensaíram-se duas misturas, uma de 80% de cimento e 20% de lamas e outra com 70% de cimento e 30% de lamas.

Ensaio Modificado de Chapelle

Neste ensaio a pozolanidade do material é determinada pela capacidade do material fixar hidróxido de cálcio quando mantido em solução aquosa de óxido de cálcio [8]. O material é considerado pozolânico quando apresenta um consumo mínimo de 330 mg de CaO/g de amostra.

Ensaio de Maropoulou e Ahmadi

O método consiste em estudar o grau de combinação de misturas da adição com o Ca(OH)₂ por análise termogravimétrica (ATG), [9-10]. A determinação do teor de Ca(OH)₂ é efectuada a partir da perda de massa no intervalo entre 400 e 550°C , que corresponde à desidroxilação do hidróxido de cálcio.

Neste método prepararam-se misturas de CaO e lamas na razão de 1:2 (em massa) e com uma razão água/mistura de 2:1 (em massa). A pasta é curada em recipientes de vidro fechados que são colocados num banho-maria à temperatura de 60°C.

Antes do ensaio, a amostra é retirada dos recipientes e a hidratação parada por imersão em acetona.

O teor (em %) de Ca(OH)_2 fixado pela reacção pozolânica é calculado por análise termogravimétrica (ATG) às idades de 1, 3, 7, 14 e 28 dias. A ATG foi efectuada com uma velocidade de aquecimento de 10°C/min, desde a temperatura ambiente até 1000°C, em atmosfera de gás inerte.

Ensaio de expansibilidade aos álcalis para betão

Os ensaios foram realizados de acordo com a Norma ASTM C 1260 [4], tendo sido produzidas 3 barras de argamassas por cada composição.

As argamassas depois de amassadas são colocadas em câmara de humidade e temperatura controladas a $23 \pm 2^\circ \text{C}$ e HR superior a 95%, aí permanecendo durante 24 horas. Terminado o período de condicionamento de $24 \pm 2 \text{ h}$, as barras de argamassa são desmoldadas, procedendo-se à leitura do comprimento inicial de cada barra com um deflectómetro digital. Após esta leitura, as barras são colocadas num contentor com água à temperatura ambiente, para que fiquem totalmente imersas, o qual depois é colocado numa estufa a $80 \pm 2^\circ \text{C}$ durante 24 h. Após este período, retiram-se as barras de argamassa da água, secando-se com um pano a sua superfície, e procede-se de imediato à leitura do seu comprimento no deflectómetro. As barras são depois introduzidas num contentor contendo uma solução de hidróxido de sódio 1N a $80 \pm 1^\circ \text{C}$, sendo efectuadas pelo menos 3 leituras intermédias até ao período de 14 dias de imersão em solução alcalina, e pelo menos 1 leitura por semana após os 14 dias, se os ensaios se prolongarem até aos 28 dias.

A expansão é calculada a partir da média da variação dimensional das 3 barras de argamassa a cada idade, sendo a mistura ensaiada considerada não reactiva aos álcalis, ou a adição considerada eficaz na mitigação da RAS, se o resultado da expansão aos 14 dias for inferior a 0,10%.

Observação da microestrutura das argamassas

A microscopia é uma técnica de caracterização dos diferentes constituintes da argamassa, permitindo nomeadamente avaliar o tipo de agregados, o estado de alteração dos mesmos, a existência e distribuição de vazios e identificar os diferentes produtos de reacção formados.

Com o objectivo de avaliar em particular o efeito mitigador das lamas na RAS, utilizaram-se as técnicas das microscopias óptica (MO) e electrónica de varrimento (MEV). Para tal preparam-se lâminas delgadas e superfícies polidas de fragmentos das argamassas após os ensaios de expansibilidade aos álcalis de acordo com a norma ASTM C 1260. As amostras foram previamente impregnadas em vácuo com uma resina epoxi,

tendo no caso da preparação das lâminas sido adicionado um pigmento (fluoresceína) com o objectivo de contrastar as zonas de maior porosidade. As amostras depois de impregnadas foram polidas com diferentes abrasivos de diferentes granulometrias. As lâminas delgadas e as superfícies polidas foram polidas com óxido de alumínio (Al_2O_3) de granulometria 15 μm , tendo-se no caso das superfícies polidas usado no final o polimento com pastas de diamante de decrescentes granulometrias, respectivamente de 6, 3 e 1 μm .

Na MO usou-se um microscópio óptico Olympus BX60 com luz polarizada e luz fluorescente, e na MEV um microscópio electrónico de varrimento JEOL JSM-6400 com sistema acoplado de raios X por dispersão de energia (EDS) da Oxford.

Resultados e discussão

Avaliação da reactividade pozolânica das lamas

Nas Tabela 3, Tabela 5 e na Figura 1 apresentam-se os resultados dos ensaios de avaliação da reactividade pozolânica das lamas.

Tabela 3 – Valores do índice de actividade das lamas

Composição	Índice de Actividade (%)	
	28 dias	90 dias
Cimento	--	--
LM	69	67
LMC	74	85

Tabela 4 – Resultados do ensaio de Frattini [7]

Composição	Resultados
cimento 80% + 20% LMC	não satisfaz aos 8 dias
	não satisfaz aos 15 dias
cimento 70% + 30% LMC	não satisfaz aos 8 dias
	satisfaz aos 15 dias

Tabela 5 – Resultado ensaio modificado de Chapelle [8]

Amostra	mg de Ca(OH)_2
LMC	358,8

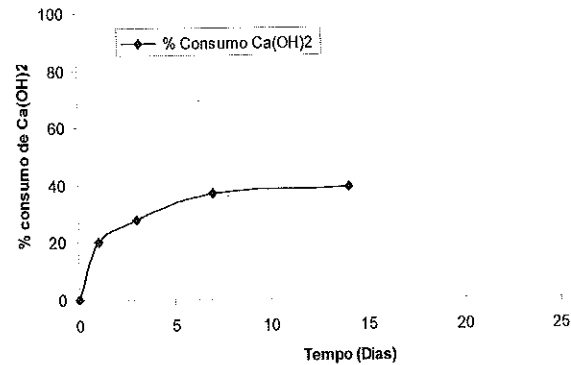


Figura 1 – consumo de hidróxido de cálcio vs tempo [9-10]

De uma maneira geral, os resultados de avaliação da reactividade pozolânica das lamas mostram que o material apresenta moderadas características pozolânicas, nomeadamente quando comparadas com a sílica de fumo ou zeólitos naturais [10], as quais são melhoradas após o tratamento térmico efectuado. Outra conclusão que é possível extrair é que a reactividade das argamassas com lamas é incrementada quando se aumenta o teor de substituição de cimento de 20% para 30% de lamas calcinadas.

Ensaio de expansibilidade aos álcalis para betão

Na Figura 2 apresentam-se os resultados do ensaio ASTM C 1260 até à idade dos 28 dias de imersão em solução de NaOH a 1M a 80°C.

É possível verificar que a menor expansão foi obtida no ensaio com 30% de LMC e que, considerando os limites do ensaio, um teor de pelo menos 30% de substituição do cimento por LMC é eficaz na redução do valor da expansão para um valor inferior a 0,10%, ou seja, é eficaz em inibir a RAS.

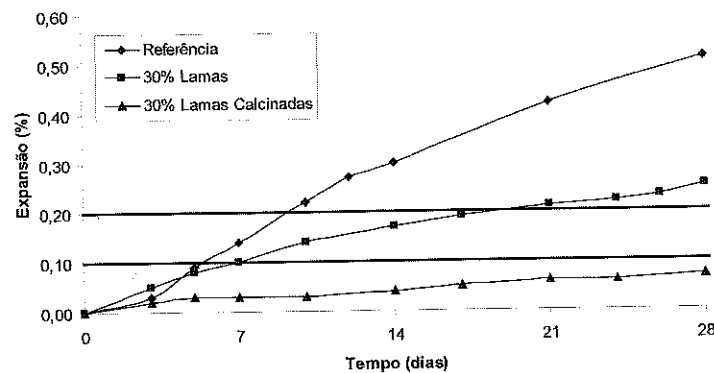


Figura 2 – Gráfico de expansão vs tempo onde se avalia a influência da substituição parcial (% em massa) de cimento por lamas na redução da expansão devida à RAS.

Observação da microestrutura das argamassas

Nas Figura 3, Figura 4 e Figura 5 apresentam-se aspectos observados ao MO nas diferentes argamassas ensaiadas no ensaio ASTM C 1260, após 28 dias, e que ilustram a presença de geles da RAS e a microporosidade associada. Constatou-se que a argamassa sem lamas (referência) é a que apresentou maior quantidade de geles RAS, em interfaces agregado/pasta, em vazios e em microfissuras nos agregados (Figura 3).

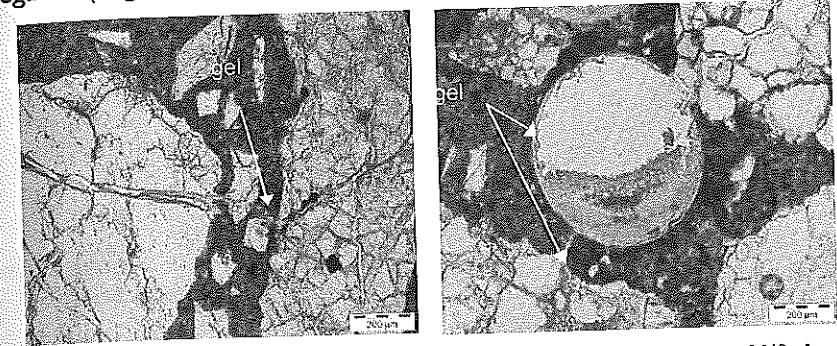


Figura 3 – Imagem ao MO em lâmina delgada (10x, polarizadores paralelos - N//) da argamassa de referência, onde é visível a presença de gel RAS nos agregados e em vazios.

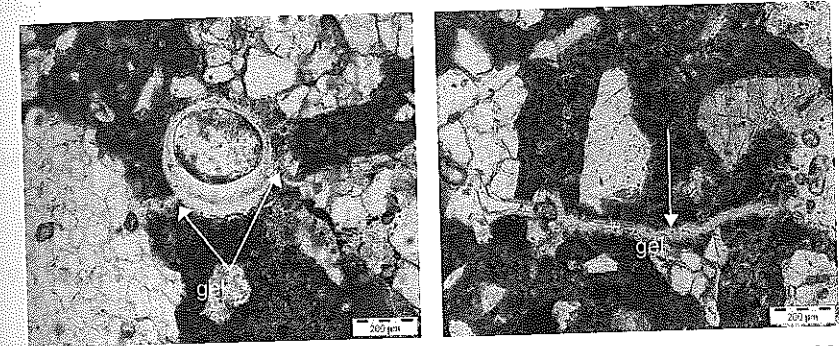


Figura 4 – Imagem ao MO em lâmina delgada (10x, N//) da argamassa com 30% de LM, onde é visível a presença de gel RAS nos vazios e nos agregados.

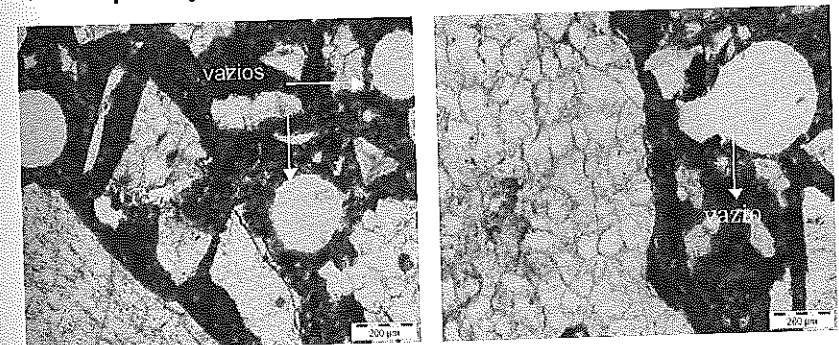


Figura 5 – Imagem ao MO em lâmina delgada (10x, N//) da argamassa 30% de LMC, onde é visível a presença de microfissuras e vazios.

Da observação das Figura 3, Figura 4 e Figura 5, pode-se concluir que a argamassa 30% de LMC é a que tem maior quantidade de vazios e onde os agregados se apresentam menos fissurados, o que se correlaciona com os resultados da expansão (Figura 2). Em termos de microporosidade, é também evidente pela Figura 6, Figura 7 e Figura 8, que a argamassa de referência é a menos microporosa, enquanto que a de 30%LMC é a mais microporosa, isto é, aquela de todas que indicia apresentar maior capacidade de acomodar os produtos expansivos.

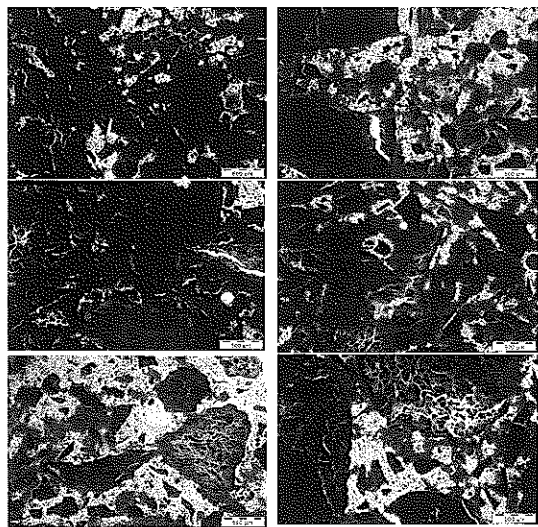


Figura 6 – Imagem ao MO da argamassa de referência em luz fluorescente, em que é visível a microporosidade da argamassa (tons mais claros nas imagens)

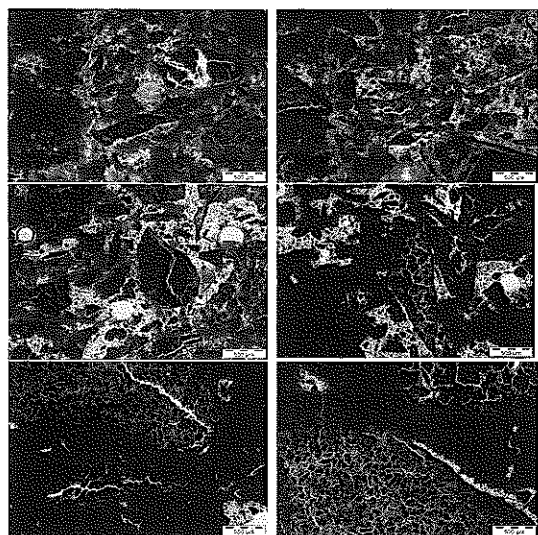


Figura 7 – Imagem ao MO da argamassa 30% de LM em luz fluorescente, em que é visível a microporosidade da argamassa (tons mais claros nas imagens)

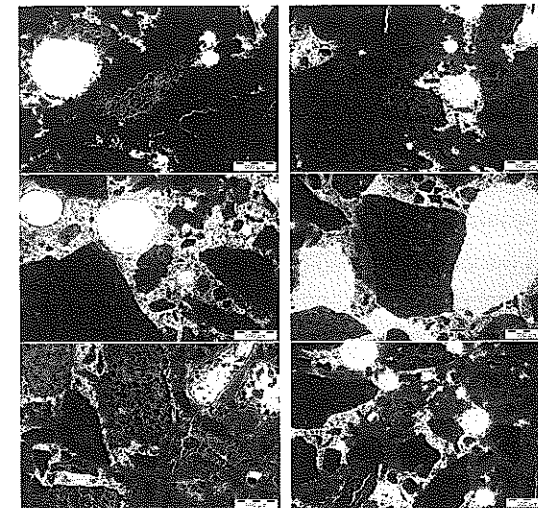


Figura 8 – Imagem ao MO da argamassa 30% LMC de referência em luz fluorescente, em que é visível a microporosidade da argamassa (tons mais claros nas imagens).

A observação ao MEV/EDS permitiu confirmar os resultados da MO, nomeadamente que a argamassa de referência é a que tem a pasta mais compacta e a com maior quantidade de gel de RAS – Figura 9 e Figura 10.

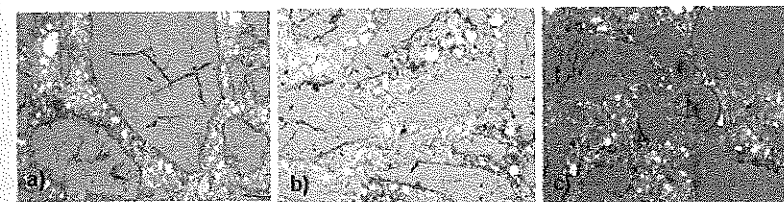


Figura 9 – Imagens ao MEV das argamassas; a) referência, b) 30%LM, c) 30%LMC

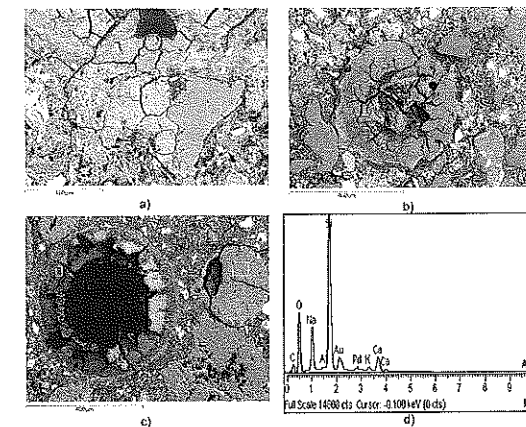


Figura 10 – Imagens ao MEV/EDS que evidenciam gels da RAS em poros na pasta: a) argamassa de referência; b) argamassa 30%LM; c) argamassa 30% LMC; d) Espectro EDS do gel de RAS.

De forma a avaliar a modificação da composição do gel CSH da pasta em resultado da incorporação das lamas, nomeadamente em termos da razão Ca/Si e do teor de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, realizaram-se análises por EDS de zonas da pasta com gel CSH. As zonas de gel CSH analisadas foram seleccionadas pela observação no modo de electrões retrodifundidos [11], tendo-se realizado uma média de 10 análises para cada composição para que os resultados fossem representativos.

É já reconhecido que a introdução de adições minerais no betão fazem alterar a razão Ca/Si do gel CSH, normalmente baixando-a. A questão da fixação de álcalis no gel CSH tem sido nos últimos anos muito investigada [12-13-14-15-16], e parece estar relacionada com a razão cálcio/silício (Ca/Si) do gel, aumentando com a diminuição desta razão. É também conhecido que adições ricas em alumina, como cinzas volantes e metacaulino, podem causar uma maior modificação da composição química do gel CSH devido à incorporação de uma maior quantidade de alumínio.

Tendo estes factos em consideração, procedeu-se à análise por MEV/EDS da composição química do gel CSH, nomeadamente de avaliação da evolução da razão atómica Ca/Si e do teor em $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, em resultado do efeito da substituição de lamas - Figura 11.

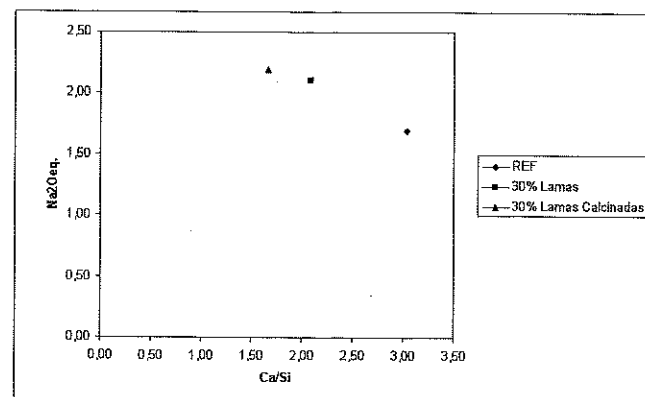


Figura 11 – Imagem da razão entre Na_2O vs Ca/Si existente na pasta das diferentes composições das argamassas

Os resultados da evolução da razão atómica Ca/Si do gel CSH (Figura 11) mostram que nas composições com lamas, comparativamente à composição de referência, há uma diminuição desta razão. Isto pode ficar a dever-se a que na composição de referência predomina, como se viu, o efeito da RAS, e que está relacionado com o aumento da solubilização da sílica dos agregados e o consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na reacção, enquanto nas composições com lamas predomina o efeito pozolânico relacionado com o consumo de hidróxido de cálcio.

Relativamente à evolução do teor de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ do gel CSH (Figura 11) verifica-se que há uma tendência para o seu aumento nas composições com lamas, o que indicia uma maior capacidade de fixação de álcalis pelos geles CSH formados nas composições com lamas, o que está de acordo com alguns autores que referem que este é um dos mecanismos principais na inibição da RAS pelas adições minerais [12-13-14-15-16].

Na Figura 12 comprova-se a boa correlação que existe entre a expansão aos 28 dias no ensaio ASTM C 1260 e a relação Ca/Si do gel CSH da pasta.

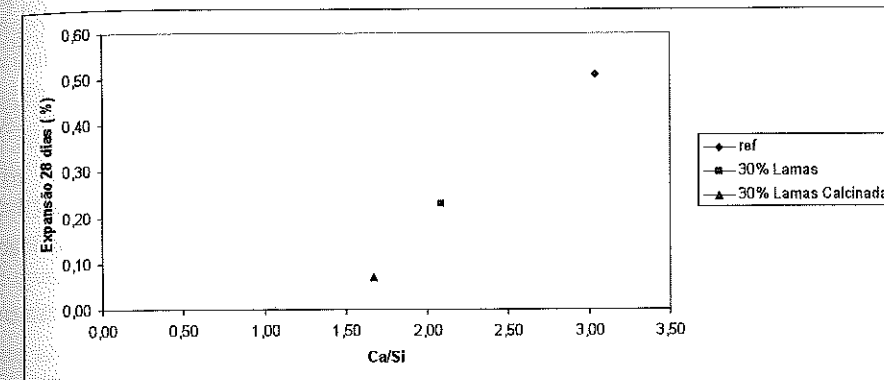


Figura 12 – Expansão aos 28 dias no ensaio ASTM C 1260 vs razão Ca/Si do gel CSH da pasta, das diferentes composições de argamassa estudadas, com e sem lamas.

Conclusões

Este trabalho mostrou que o emprego dum subproduto da indústria extractiva, nomeadamente lamas residuais de uma mina de tungsténio, pode ser efectivo como adição no betão para a mitigação da RAS. Constatou-se que a reactividade pozolânica deste material pode ser melhorada por via da activação térmica.

Os resultados evidenciaram que uma substituição de 30% de cimento portland por lamas calcinadas é efectiva na mitigação da RAS. O mecanismo actuante das lamas está essencialmente relacionado com a sua capacidade de fixação da alcalinidade da pasta, por via do consumo de hidróxido de cálcio e dos iões alcalinos.

Encontram-se ensaios em curso com o objectivo de avaliar o efeito das lamas na mitigação da DEF.

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 Área Network) do Programa Operacional Espaço Atlântico 2007-2013, co-financiado pelo FEDER.

Bibliografia

1. Barriga, Fernando, J.A.S., Recursos minerais em Portugal: Situação e Perspectivas, <http://geologia.fc.ul.pt/Aulas/Recursos%20Minerais/RecMinPort-SituPerspectivas-Total2001.pdf>
2. Fernandes, Fernando, J. Palero; "La mina de Volfrâmio de Panasqueira (Portugal)"; http://www.uclm.es/cr/EUP-ALMADEN/aaaeupa/boletin_informativo/pdf/boletines/9/14.PANASQUEIRA-TEXTO.pdf
3. Torgal, F. Pacheco, *Desenvolvimento de ligantes obtidos por activação alcalina de lamas residuais das minas da Panasqueira*. Tese de Doutoramento, Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura da Universidade da Beira Interior, (2006).
4. ASTM C 1260, 2001, "Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method)", ASTM International, West Conshohocken, United States, p. 5.
5. Donatello, S; Tyree.M; Cheeseman.C.R. ; *Comparison of test methods to assess pozzolanic activity; Cement & Concrete Composites; volume 32 (2010) 121-127.*
6. NP EN 450-1:2005, Cinzas Volantes para betão. Parte 1: Definição, especificações e critérios de conformidade.
7. NP EN 196-5:2006, Métodos de ensaio de cimentos. Parte 5: Ensaio de pozolanicidade dos cimentos pozolânicos.
8. NF P 18-513:2010, Ensaio Modificado de Chapelle "Pozzolanic Addition For Concrete - Metakaolin - Definitions, Specifications And Conformity Criteria"
9. Moropoulou, Antónia; Bakolas, Asterios; Aggelakopoulou; *Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis*, *Thermochimica Acta* 420 (2004) 135-140.
10. Ahmadi, Babak; Shekarchi Mohammad; *Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material; Cement and Concrete Composites*, Vol. 32, Issue 2, February 2010, Pages 134-141.
11. 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).
12. Hong, S.Y. and Glasser, F.P., 1999, "Alkali binding in cement pastes. Part I. The C-S-H phase"; *Cement and concrete Research*, vol. 29, 12, p. 1893-1903.
13. Hong, S.Y. and Glasser, F.P., 2002, "Alkali sorption by C-S-H and C-S-A-H gels. Part II. Role of alumina"; *Cement and concrete Research*, vol. 32, 7, p. 1101-1111.
14. 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.
15. Shehata, M.H. and Thomas, M.D.A., 2002, "Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali-silica reaction in concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 32, 3, p. 341-349.
16. Ke-wei, Y., Cai-wen, Z., Zhi-gang, L., Cong, N., 2004, "A study on alkali-fixation ability of C-S-H gel", *Proceedings of the 12th International conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Beijing, China, p. 221-225.