

## PROPRIEDADES DE DURABILIDADE DE BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS PRODUZIDOS COM CINZAS DE FUNDO DA QUEIMA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Joel Leitão<sup>1</sup>, Bruno Lourenço<sup>1</sup>, Pedro Raposeiro da Silva<sup>2\*</sup> e Rui Silva<sup>3</sup>

1: Área Departamental de Engenharia Civil  
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa  
Instituto Politécnico de Lisboa

e-mail: joelcavaco11@gmail.com, brunofilipelourenco@hotmail.com

2: CERIS-ICIST; Área Departamental de Engenharia Civil  
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa  
Instituto Politécnico de Lisboa

e-mail: silvapm@dec.isel.pt

3: CERIS-ICIST

Instituto Superior Técnico

Universidade de Lisboa

e-mail: rui.v.silva@tecnico.ulisboa.pt

**Palavras-chave:** Betão Auto-Compactável (BAC), Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), Cinzas de Fundo da Queima de Resíduos Sólidos Urbanos (CFRSU), Durabilidade

**Resumo.** *O betão é um dos materiais mais amplamente utilizados no sector da construção e um dos que mais contribui para o seu impacte ambiental. Este contributo deve-se em grande parte ao cimento utilizado na sua constituição, que por sua vez é produzido com elevados consumos de energia e emissões de CO<sub>2</sub>. O Betão auto-compactável (BAC) apresenta necessidades particulares de trabalhabilidade, associadas à ausência de vibração, o que pode implicar um maior volume de finos na mistura. No entanto, a possibilidade de substituição de parte do cimento por adições abre caminho para a diminuição considerável do seu consumo e, deste modo, para a redução dos impactes ambientais associados à sua produção. Nesse sentido, o presente trabalho pretende verificar a possibilidade de se utilizarem cinzas de fundo da queima de resíduos sólidos urbanos (CFRSU) em detrimento do cimento, conseguindo desse modo reduzir o impacte inerente ao uso do betão como material de construção e em simultâneo dar uma solução de eliminação e de recuperação mais económica às referidas cinzas.*

*Nesse sentido, foram avaliadas as propriedades de durabilidade do BAC com incorporação de CFRSU em misturas binárias (cimento (C) + CFRSU) e ternárias (C + CFRSU + cinzas volantes provenientes das centrais termoeléctricas (CV)). A intenção foi avaliar a capacidade de produção de BAC com um desempenho mínimo em termos de durabilidade, incorporando diferentes percentagens de C, CFRSU e CV, nomeadamente: 9 misturas, incluindo 1 de referência – (C / CFRSU / CV) 70/0/30%; 80/20/0%; 70/30/0%; 60/40/0%; 50/50/0%; 70/20/10%; 70/10/20%; 40/20/40% e 40/40/20%.*

*Os resultados obtidos permitiram estabelecer conclusões sobre os BAC produzidos com CFRSU, com base nas suas propriedades de durabilidade. Verifica-se que a utilização de CFRSU contribuiu para o decréscimo das propriedades do BAC. Ainda assim, os resultados obtidos demonstram indicadores promissores no que respeita à durabilidade de algumas das misturas estudadas.*

## 1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito do projecto de investigação científica do Instituto Politécnico de Lisboa (ref: IPL/2017/ECONCrete/ISEL) “*Produção de betão auto-compactável (BAC) com cinzas da queima de resíduos sólidos urbanos*”, com a finalidade de avaliar a viabilidade da produção de BAC de menor impacto ambiental, recorrendo à substituição de cimento por cinzas de fundo resultantes da incineração de resíduos sólidos urbanos (CFRSU). Para tal foi avaliado o desempenho de BAC onde uma parte relevante do ligante tradicional (cimento Portland) é substituída por CFRSU, validando a utilização deste tipo de adições e em simultâneo fornecendo indicadores de desempenho.

Apesar das vantagens apresentadas pelos BAC, estes continuam a recorrer ao cimento como ligante que apresenta uma produção anual de aproximadamente 2,8 mil milhões de toneladas e é expectável que este valor venha a ultrapassar as 4 mil milhões de toneladas [1]. Considerando ainda o facto de que para a produção de uma tonelada de cimento ser necessário consumir entre 1,5 t e 1,7 t de recursos naturais como calcário, argila, areias de sílica, bauxite, gesso, etc. e 0,11 t a 0,15 t de carvão ou outro combustível como petróleo, óleo combustível pesado e gás natural gerando emissões de CO<sub>2</sub> na ordem de 0,7 t a 1,0 t [2], é importante encontrar uma solução que agregue a necessidade que os BAC têm de um maior volume de finos com as crescentes preocupações ambientais, nomeadamente a redução do consumo dos recursos naturais e das emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção de cimento, recorrendo para tal, a curto prazo, à substituição do clínquer e/ou do próprio cimento por outros materiais.

Considerando a alternativa de substituir parte do cimento por CFRSU, é então fundamental demonstrar a viabilidade da sua utilização, através da caracterização do comportamento dos betões onde é aplicada. Nesse sentido, a campanha experimental realizada teve como finalidade de analisar as propriedades dos BAC, produzidos em misturas binárias (C + CFRSU) e ternárias (C + CFRSU + cinzas volantes provenientes das centrais termoeléctricas (CV)), no estado endurecido (avaliação da durabilidade). Para tal foram produzidas 9 misturas, incluindo 1 de referência – (C / CFRSU / CV) 70/0/30%; 80/20/0%; 70/30/0%; 60/40/0%; 50/50/0%; 70/20/10%; 70/10/20%; 40/20/40% e 40/40/20%.

As referidas misturas foram avaliadas essencialmente em termos da absorção de água por capilaridade, resistência à penetração de cloretos e ensaio de carbonatação acelerada.

## 2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1. Materiais utilizados

Os materiais utilizados neste trabalho foram seleccionados tendo em consideração o betão em análise (BAC). Desse modo, foram utilizados os seguintes materiais:

- um tipo de cimento de acordo com a NP EN 197-1 (CEM tipo I-42,5 R, com massa volúmica de 3140 kg/m<sup>3</sup>); duas adições: CV (provenientes das centrais termoeléctricas) de acordo com a norma NP EN 450-1, com massa volúmica de 2300 kg/m<sup>3</sup> e CFRSU com massa volúmica de 2500 kg/m<sup>3</sup>;
- duas britas calcárias de acordo com a NP EN 12620, uma brita 1, com massa volúmica de 2590 kg/m<sup>3</sup>, D<sub>max</sub> de 11 mm e absorção de água de 1,46%, e uma brita 2 com massa volúmica de 2640 kg/m<sup>3</sup>, D<sub>max</sub> de 22,4 mm e absorção de água de 0,78%; duas areias siliciosas de acordo com a NP EN 12620, uma areia grossa (0/4) com massa volúmica de 2550 kg/m<sup>3</sup>, módulo de finura de 3,70 e absorção de água de 1,10% e uma areia fina (0/1) com massa volúmica de 2580 kg/m<sup>3</sup>, módulo de finura de 2,03 e absorção de água de 0,70%;
- um superplastificante de elevado desempenho, forte redutor de água, de acordo com a NP EN 934-1 (uma combinação de policarboxilatos modificados, em solução aquosa com massa volúmica de 1070 kg/m<sup>3</sup>); água da rede pública de acordo com a NP EN 1008.

## 2.2. Caracterização química das CFRSU

Como elementos mais comuns na composição química das CFRSU temos o Si, Al, Fe, Mg, Ca, K, Na, e o Cl. A oxidação destes elementos, quanto sujeitos a um ambiente alcalino, produz os respectivos óxidos que, por sua vez, representam aproximadamente 80% a 90% do peso das CFRSU.

A presença de elementos metálicos como Pb, Cu, Zn, Cd, Cr e Ni é igualmente habitual. Ao reagirem, os metais produzem hidróxidos que provocam a expansão das CFRSU [3]. Dou et al [3] realçam também a possibilidade de as CFRSU apresentarem, quando se verifique uma elevada concentração de cálcio, um comportamento hidráulico similar ao do cimento.

## 2.3. Quantidades de amassadura

Com o objectivo de abranger as diferentes variações de quantidades de amassadura e respectiva avaliação das misturas binárias e ternárias de C, CV e CFRSU, foram produzidas 9 amassaduras de BAC de acordo com a NP EN 206-9, que são apresentadas na Tabela 1. As quantidades de amassadura utilizadas foram obtidas segundo o método apresentado por Nepomuceno e Oliveira [4] e já utilizado em diversas aplicações [5; 6].

Quantidades de amassadura [kg/m <sup>3</sup> ]	REF	Misturas binárias				Misturas ternárias			
		B20	B30	B40	B50	B10CV20CF	B20CV10CF	B20CV40CF	B40CV20CF
CEM I 42,5 R	482	496	452	387	323	467	467	267	267
Cinzas volantes (CV)	151	---	---	---	---	49	98	98	195
Cinzas de fundo de RSU (CFRSU)	---	99	154	206	257	106	53	212	106
Superplastificante (S <sub>p</sub> )	5	6	6	6	6	5,6	5,6	5,2	5,1
Água	176	197	206	206	206	191	191	191	191
Areia (0,5A <sub>F0/1</sub> + 0,5A <sub>G0/4</sub> )	704	632	659	659	659	680	680	680	680
Brita (0,5B <sub>1</sub> + 0,5B <sub>2</sub> )	775	846	775	775	775	775	775	775	775
a/c	0,36	0,40	0,46	0,53	0,64	0,41	0,41	0,72	0,72
a/mc	0,28	0,40	0,46	0,53	0,64	0,37	0,34	0,52	0,41
a/mf	0,28	0,33	0,34	0,35	0,36	0,31	0,31	0,33	0,34
Síntese das propriedades básicas no estado fresco									
t <sub>500</sub> [s]	2,7	2,7	2,9	3,4	3,7	2,8	2,7	2,2	3,1
Espalhamento [mm]	680	600	645	560	550	685	620	585	625
Funil V [s]	5,6	3,6	2,7	2,5	2,2	4,9	4,8	2,8	3,5
Caixa L	0,9	0,8	0,9	1,0	0,8	1,0	0,8	0,8	0,9
Síntese das propriedades básicas no estado endurecido – Comportamento mecânico									
f <sub>cm,c,7d</sub> [MPa]	50,3	33,7	23,9	18,1	12,9	27,6	23,0	11,2	12,4
f <sub>cm,c,28d</sub> [MPa]	57,6	35,7	24,2	21,8	16,8	34,0	31,7	17,5	19,7
f <sub>cm,c,91d</sub> [MPa]	80,1	41,3	32,6	24,8	16,0	39,6	39,3	20,6	23,1

Tabela 1. Quantidades de amassadura e síntese das propriedades básicas.

## 2.4. Descrição dos ensaios e preparação dos provetes

O procedimento de ensaio utilizado para a determinação da absorção de água por capilaridade foi o apresentado na especificação LNEC E 393. Este ensaio foi realizado aos 28 e 91 dias para todas as

misturas. Para esse efeito, foram utilizados provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, de onde foram cortados três provetes com  $\phi$  150 x 100 mm (3 por cada referência e idade de ensaio). Após o tempo adequado de cura húmida ( $20 \pm 2$  °C e HR  $\geq$  95%), os provetes cortados foram acondicionados numa estufa a uma temperatura de  $40 \pm 5$  °C durante 14 dias até à data de ensaio. Posteriormente, os provetes foram colocados num tabuleiro, devidamente apoiados e com a superfície sujeita ao corte para baixo. O tabuleiro é cheio com água até atingir um nível de  $5 \pm 1$  mm acima da face inferior do provete. O nível é mantido constante ao longo do ensaio. A massa do provete é medida após 0, 3, 6, 24 e 72 horas, sendo que as 0 horas correspondem ao momento imediatamente anterior ao do provete entrar em contacto com a água.

O procedimento de ensaio utilizado para a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos foi o apresentado na especificação LNEC E 463. Para esse efeito, foram utilizados provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, de onde se cortaram 3 provetes com  $\phi$ 100 x 50 mm (anulando aproximadamente 20 a 25 mm de cada extremidade). Após o tempo de cura húmida adequado (climate room at 20 °C +/- 2 °C and more than 90 % RH), os provetes cortados foram pré-condicionados em vácuo e imersos numa solução saturada de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) em água destilada. Posteriormente, os provetes  $\phi$ 100 x 50 mm são acoplados a uma manga de borracha de modo a conter a solução anódica, sem cloretos, de hidróxido de sódio em água destilada (NaOH 0,3N). A referida manga de borracha, com o provete devidamente selado é inserida na solução catódica de cloreto de sódio (solução a 10 % em massa de NaCl em água da torneira). Seguidamente, através das placas de aço inox situadas entre os topos dos provetes aplica-se um potencial eléctrico (de acordo com o especificado no ponto 6.4.4 da especificação LNEC E 463 que vai forçar, por migração, o transporte dos iões cloretos através do provete. Após determinado período de ensaio, parte-se o provete, comprimindo-o diametralmente e pulverizam-se, as secções rectangulares obtidas, com uma solução de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$  0,1 N). A partir do precipitado branco visível de cloreto de prata, mede-se a profundidade de penetração. Com base na medição da profundidade de penetração realizada bem como de outros parâmetros, é possível calcular o coeficiente de difusão de cloretos ( $D_{\text{nsm}}$ ) em regime não estacionário.

A determinação da resistência à carbonatação foi realizada de acordo com a especificação LNEC E 391. Por cada referência de BAC, foi ensaiada uma amostra com 100 mm de diâmetro e aproximadamente 50 mm de espessura, em cada uma das quatro idades (14, 21, 49, 70 e 91 dias de exposição em câmara de  $\text{CO}_2$ ). Todos os provetes ensaiados foram sujeitos a um processo de cura húmida por imersão em água a  $20 \pm 2$  °C até 14 dias antes do início do ensaio, isto é, entrada na camara de carbonatação. Nessa data (14 dias), procedeu-se ao seccionamento dos provetes e à protecção dos topos com um revestimento isolante de resina acrílica, com excelente resistência à exposição ambiental. Posteriormente, os provetes foram condicionados a  $20 \pm 2$  °C e 50% de HR, até à entrada na camara de carbonatação (28 dias). Nessa data, os provetes foram colocados numa câmara com  $5 \pm 1\%$  de  $\text{CO}_2$ ,  $60 \pm 5\%$  de HR e uma temperatura de  $23 \pm 3$  °C. Decorridos os dias de exposição nas referidas condições, os provetes foram retirados da câmara, seccionados e, através de um método colorimétrico (com fenolftaleína a 0,1%), foi identificada e medida a profundidade de carbonatação.

### 3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

#### 3.1. Absorção de água por capilaridade – misturas binárias

Na Figura 1, são apresentadas as curvas de absorção capilar das diferentes misturas de BAC produzidas, para as idades de 28 e 91 dias, respectivamente.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se uma redução da absorção de água por capilaridade com o aumento da idade do betão. Observa-se ainda que a maior variação de absorção de água por capilaridade ocorre, em ambas as idades, nas primeiras 6 horas, onde se atinge aproximadamente 50% do valor de absorção final às 72 horas.

No que respeita à evolução desta propriedade, verifica-se um comportamento semelhante entre todas

as misturas, mas com valores de absorção distintos, aos 28 dias, entre as misturas REF e B 20 e as restantes, com uma diferença média de aproximadamente 37% entre o primeiro (REF e B 20) e segundo (restantes) conjunto de misturas. Aos 91 dias esta diferença é reduzida para 19%, podendo este comportamento dever-se facto da porosidade do betão ter tendência a diminuir com a idade.

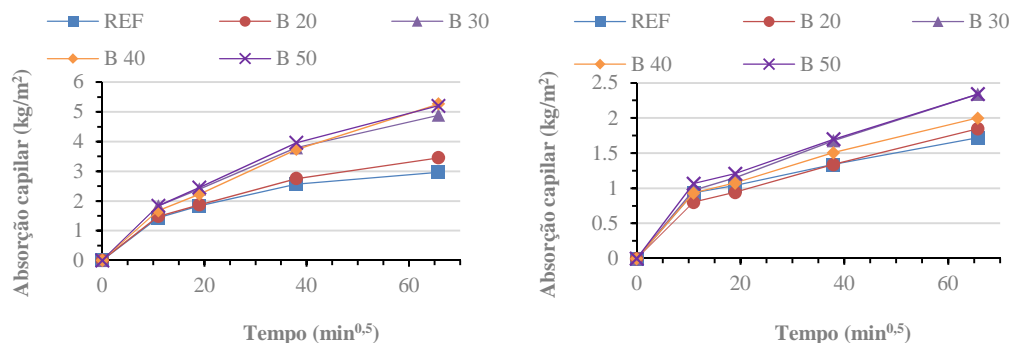


Figura 1 - Curvas de absorção capilar aos 28 (fig. esq) e aos 91 (fig. dt<sup>a</sup>) dias

Lin [7] verifica um comportamento similar ao avaliaie pastas de cimento com substituição de cimento (0%, 10%, 20% e 40%) por cinzas resultantes da incineração de resíduos sólidos urbanos e escórias obtidas a partir da vitrificação das referidas cinzas (incineração das cinzas a uma temperatura superior a 1300 °C com posterior extinção em água ou arrefecimento ao ar). Observando os resultados apresentados, verifica-se que tanto na primeira adição como na segunda, a mistura de referência (0% de substituição) e as misturas com 20% de substituição apresentam uma porosidade semelhante para os 28 e 91 dias. As misturas com 40% de substituição, por sua vez, aos 28 dias têm uma porosidade superior à mistura de referência, aproximadamente 20%, diferença que aos 91 dias de idade é praticamente anulada passando as referidas misturas a apresentar uma porosidade semelhante.

### 3.3. Penetração de cloretos - misturas binárias

Na Figura 2, é apresentada a evolução do coeficiente de difusão de cloretos para os 28 e 91 dias, em função das misturas de BAC produzidas.

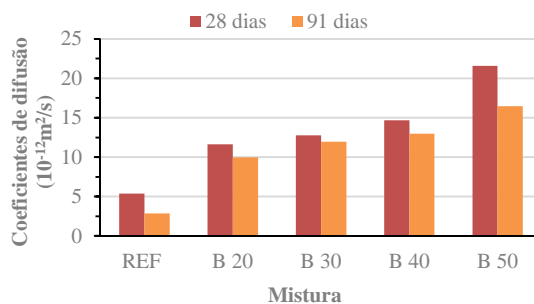


Figura 2 - Coeficientes de difusão de cloretos

Com a análise dos resultados obtidos, fica patente a redução do coeficiente de difusão de cloretos com a idade do betão e o seu aumento com a utilização de CFRSU e incremento da razão a/c. Quando comparada com as restantes amassaduras a mistura REF apresenta valores significativamente inferiores, sendo a mistura B 50 a que apresenta piores valores, em média 79% superiores à misturas REF. Por sua vez a variação do coeficiente de difusão de cloretos entre as restantes misturas (B 20, B 30 e B 40) é mais reduzida, aumentando aproximadamente 10% por patamar de substituição.

Van Dr Wegen et al. [8] produziram três amassaduras de betão com o objectivo de estudar o seu comportamento face à utilização de CFRSU. A primeira amassadura produzida funcionou como

mistura de referência (sem qualquer adição), para a segunda mistura, o agregado grosso foi substituído em 20% por CFRSU e na terceira substituiu-se 20% do agregado fino e 20% de agregado grosso. No que respeita à propriedade em análise, os autores verificaram que, tal como no presente trabalho, quanto maior a quantidade de CFRSU utilizada, mais elevado é o coeficiente de difusão, sendo o valor da mistura de referência, em média, 26% inferior às restantes.

### 3.4. Carbonatação acelerada - misturas binárias

Na Figura 3, é apresentada a evolução da profundidade de carbonatação, das diferentes misturas de BAC, em função da idade de ensaio.

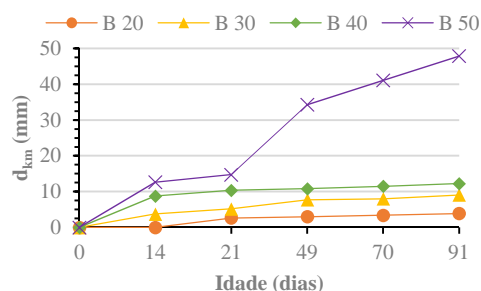


Figura 3 - Profundidade de carbonatação

Considerando os resultados obtidos, verifica-se que a profundidade de carbonatação aumenta com a percentagem de substituição. No entanto, a mistura B 50 a partir dos 21 dias de idade (onde se verifica uma profundidade de carbonatação correspondente a aproximadamente 30% do valor final (91 dias)) tem claramente um comportamento distinto das restantes, aumentando significativamente a profundidade de carbonatação até ao ponto em que o provee fica praticamente carbonatado na sua totalidade. As restantes amassaduras têm um comportamento semelhante entre elas, aos 21 dias atingem em média 70% do valor final de carbonatação, tendo uma evolução gradual até aos 91 dias.

Ao analisar os resultados apresentados por Silva [9] verifica-se uma tendência semelhante, ainda que para valores de carbonatação inferiores, com o incremento da percentagem de substituição de cimento a implicar o aumento da carbonatação do betão.

Este comportamento poderá dever-se ao facto de a variação da percentagem de substituição conduzir a um acréscimo da razão  $a/c$  que por sua vez provoca o aumento da porosidade do betão, facilitando a propagação do  $CO_2$ .

### 3.6. Absorção de água por capilaridade – misturas ternárias

Na Figura 4, são apresentados os coeficientes de absorção capilar para todas as misturas em estudo, obtidos a partir do declive da reta que correlaciona a absorção de água por capilaridade e a raiz quadrada do tempo.

Pela análise da Figura 4, verifica-se que aos 28 dias a mistura B10CV20CF é a única que apresenta um coeficiente de absorção capilar ligeiramente superior à referência, enquanto que todas as outras registam valores mais baixos. Aos 91 dias, constata-se que o coeficiente de absorção desce para todas as misturas relativamente aos 28 dias. Tal decréscimo é mais acentuado nas misturas B10CV20CF e B40CV20CF com valores mais baixos em 76% e 49%, ambas com 20% de incorporação de CFRSU.

Os valores apresentados dos 28 para os 91 dias poderão estar relacionados não só com as reacções mais lentas provocadas pelas CV, mas também com o possível retardamento da hidratação do cimento provocado pelas CFRSU e referido em 2.2. Segundo Behfarnia et al. [10], é possível que o efeito do zinco no betão perdure mesmo depois dos 28 dias, levando a que as reacções de hidratação ocorram mais tardiamente, ocupando os poros existentes.

Relativamente ao betão de referência, para os 91 dias, destaca-se a mistura B10CV20CF com um decréscimo do coeficiente de absorção capilar na ordem dos 55%. De facto, esta mistura apresenta o valor de Coeficiente de absorção mais baixo, com  $0,023 \text{ mm}/\text{min}^{0,5}$ .

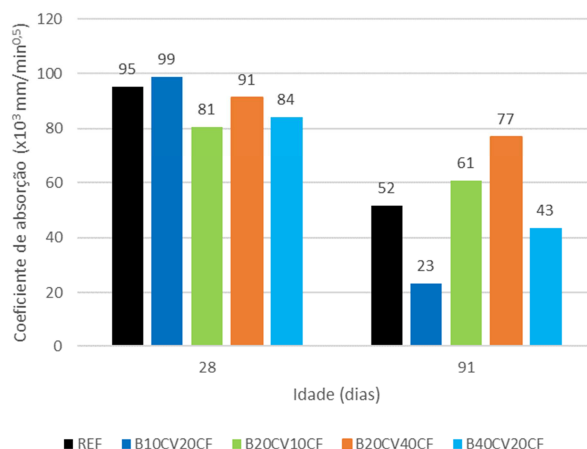


Figura 4 - Coeficientes de absorção capilar, aos 28 e 91 dias

Lin [7] obteve um decréscimo dos poros capilares com a idade de ensaio, no entanto, registou uma tendência de aumento dos poros com o aumento da percentagem de substituição ( $f_{ad}$ ). O estudo incidiu na substituição de parte do cimento por cinzas da queima de RSU, com  $f_{ad}$  de 10%, 20% e 40%.

Os valores obtidos por Silva e Brito [11] para misturas ternárias com CV e FC, demonstraram uma tendência de decréscimo do coeficiente de absorção com a idade de ensaio e de aumento com a percentagem de substituição. Contudo, os valores de coeficiente de absorção capilar obtidos no presente trabalho foram mais baixos aos 91 dias, para todas as misturas, relativamente aos registados por Silva e Brito [11]. Os coeficientes das misturas com CV e CFRSU, aos 91 dias, variaram entre  $0,023$  e  $0,077 \text{ mm}/\text{min}^{0,5}$ , enquanto que as misturas com CV e FC variaram entre  $0,068$  e  $0,084 \text{ mm}/\text{min}^{0,5}$ .

### 3.7. Penetração de cloretos – misturas ternárias

Numa primeira análise aos resultados obtidos na Figura 5, verifica-se que os coeficientes de difusão descem dos 28 para os 91 dias, em média, 34% para  $f_{ad}=30\%$  e 48% para  $f_{ad}=60\%$ . Apesar disso, a incorporação de CFRSU na mistura provocou um aumento do coeficiente de difusão relativamente à mistura de referência. Esse aumento foi mais evidente nas misturas com maior percentagem de CFRSU (B10CV20CF e B20CV40CF), com valores superiores nas duas idades de ensaio. Constata-se assim, que a diminuição de CV na mistura e, conseqüente aumento de CFRSU, provocou um acréscimo no coeficiente de difusão de cloretos.

Van Dr Wegen et al. [8], obtiveram a mesma tendência de aumento do coeficiente de difusão de cloretos com a incorporação de CFRSU. No entanto, o estudo incidiu na substituição de agregado fino e grosso por cinza de fundo lavada.

As misturas ternárias com CV e FC estudadas por Silva [9], obtiveram a mesma tendência de aumento do coeficiente de difusão com a diminuição de CV na mistura. O autor justifica a dificuldade de penetração dos iões cloretos nas misturas com maior percentagem de CV, com o facto das suas partículas mais arredondadas contribuírem para uma maior compactidade do betão. Contudo, para os mesmos pares de substituição de Silva [9], os coeficientes de difusão obtidos no presente trabalho foram mais elevados, verificando-se um efeito mais negativo das CFRSU do que o FC.

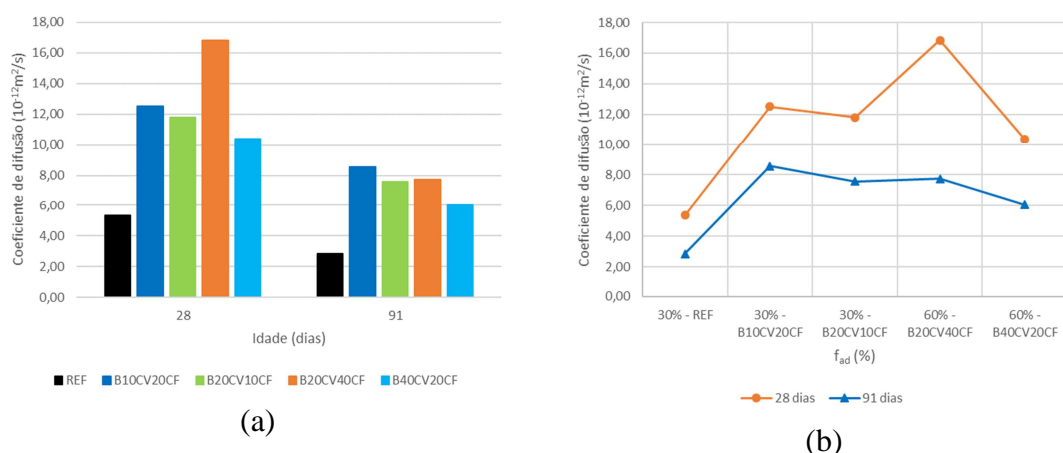


Figura 5 - Variação do coeficiente de difusão com a idade (a) e com  $f_{ad}$  (b)

### 3.8. Carbonatação acelerada – misturas ternárias

Pela análise da Figura 6, observa-se que a mistura de referência não apresentou qualquer efeito de carbonatação durante os 91 dias de ensaio. As restantes misturas demonstram uma tendência de aumento da profundidade de carbonatação com o período de exposição e com o aumento de  $f_{ad}$ . As misturas com incorporação de CFRSU e  $f_{ad}$  de 30%, apresentam um comportamento muito semelhante em todas as idades de exposição, enquanto que as misturas com  $f_{ad}$  de 60% registam valores de carbonatação muito mais elevados que as restantes, em todas as idades. Esta tendência de aumento da profundidade de carbonatação está relacionada com a relação a/c, que para as misturas com  $f_{ad}=30\%$  é de 0,41 e para  $f_{ad}=60\%$  aumenta para 0,72. De salientar ainda que a mistura B20CV40CF estabiliza os valores de carbonatação, dos 70 para os 91 dias, enquanto que o BAC B40CV20CF mantém uma tendência de subida no referido intervalo, atingindo praticamente a totalidade de carbonatação do provete aos 91 dias.

Silva e Brito [5] verificam a mesma tendência de aumento da carbonatação com o aumento da relação a/c, no estudo de misturas ternárias com CV e FC. No entanto, as relações a/c registadas foram 0,36 ( $f_{ad}=30\%$ ), 0,57 e 0,60 ( $f_{ad}=60\%$ ), o que provocou uma menor profundidade de carbonatação relativamente aos mesmos pares de substituição deste trabalho.

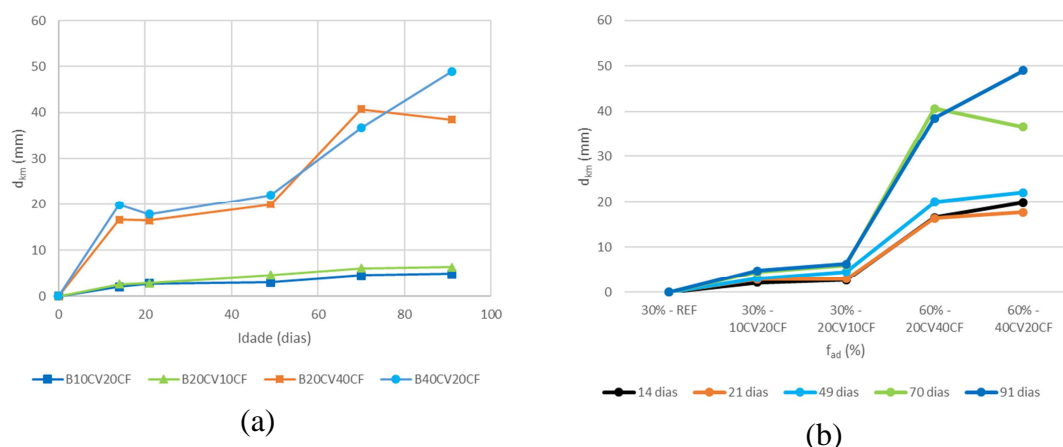


Figura 6 - Variação da profundidade de carbonatação com a idade (a) e com  $f_{ad}$  (b)

#### 4. CONCLUSÕES

Para avaliar a durabilidade dos BAC produzidos foram realizados ensaios de absorção de água por capilaridade, difusão de cloretos e carbonatação.

##### **Misturas binárias**

Relativamente à absorção de água por capilaridade, fica patente que esta diminui com a idade do betão e é afectada de forma negativa pela introdução de CFRSU. Ainda assim, a mistura B 20 apresenta um comportamento muito semelhante à mistura REF, com diferenças pouco significativas de aproximadamente 14% e 7% para os 28 e 91 dias, respectivamente.

O coeficiente de difusão de cloretos diminui com a idade do betão aumentado com a substituição de cimento por CFRSU e com a razão a/c.

No que respeita à carbonatação, esta propriedade evolui da mesma forma que as restantes, aumentando com a percentagem de substituição de cimento e com a razão a/c. Todavia, é importante ressaltar que para percentagens de substituição superiores a 40% a qualidade do betão poderá ficar comprometida, situação que poderá dever-se a uma degradação da microestrutura do betão a partir desta gama de valores.

##### **Misturas ternárias**

Na absorção de água por capilaridade, os resultados demonstraram uma menor absorção para todas as misturas aos 91 dias, relativamente aos 28 dias, destacando-se a mistura B10CV20CF com um decréscimo do coeficiente de absorção capilar de 76%. Este efeito pode estar relacionado com a combinação do efeito das CV com o atraso na hidratação do cimento devido ao zinco presente nas CFRSU, que preencheu os poros existentes mais tardiamente.

No que diz respeito à difusão de cloretos, a introdução de CFRSU afectou negativamente o BAC, aumentando o coeficiente de difusão de cloretos relativamente à REF. Este aumento estará relacionado com a degradação da qualidade da pasta com a adição de CFRSU, que permitiu a maior facilidade na penetração de cloretos. Contudo, as misturas com  $f_{ad}=60\%$  apresentam, aos 91 dias, resultados mais favoráveis do que com  $f_{ad}=30\%$ .

A resistência à carbonatação também registou uma diminuição com a incorporação de CFRSU, resultante da degradação da pasta e sobretudo do aumento da razão a/c. As misturas com  $f_{ad}=60\%$  e a/c mais elevadas, registaram valores de profundidade muito mais elevados que as misturas com  $f_{ad}=30\%$  e a/c mais baixas.

##### **Conclusões gerais**

Por último, apresentam-se as seguintes conclusões gerais, de acordo com os resultados obtidos nos ensaios realizados:

- A mistura B 20 evidencia-se, de forma clara como a mais vantajosa das misturas com incorporação de CFRSU, apresentando para a maioria das propriedades estudadas valores muito semelhantes aos da mistura REF. Já a mistura B 50, apresenta o pior comportamento de todas as misturas.
- As propriedades físicas e químicas das CFRSU podem estar na origem da degradação das propriedades do betão, carecendo de análise mais aprofundada para confirmar as hipóteses referidas por outros autores;
- Os resultados obtidos nos diversos ensaios demonstraram alguma disparidade no comportamento dos BAC, provavelmente devido à influência das CFRSU na microestrutura do betão;
- De uma forma geral, nas misturas ternárias, os valores registados na absorção capilar são bons apesar da variação demonstrada pelas misturas com CFRSU; relativamente à penetração de cloretos, os BAC com  $f_{ad}=60\%$  apresentaram valores ligeiramente favoráveis quando comparados com os restantes betões com CFRSU; enquanto que para a carbonatação as misturas B10CV20CF e B20CV10CF apresentam-se muito mais vantajosas do que o patamar de  $f_{ad}=60\%$ .

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Instituto Politécnico de Lisboa (IPL) através do financiamento do projecto de investigação científica “ECONcrete - Produção de betão autocompactável (BAC) com cinzas de fundo da queima de resíduos sólidos urbanos (IPL/2017/ECONcrete/ISEL)”. Agradece-se de igual modo o apoio do centro de investigação CERIS - ICIST.

## REFERÊNCIAS

- [1] Jani, Y., & Hogland, W., “Waste glass in the production of cement and concrete - A review”, *Journal of Environmental Chemical Engineering* (2014), 2, 1767–1775.
- [2] Zhang, T., Gao, P., Gao, P., Wei, J., & Yu, Q., “Effectiveness of novel and traditional methods to incorporate industrial wastes in cementitious materials — An overview”, *Resources, Conservation & Recycling* (2013), 74, 134–143.
- [3] Dou, X., Ren, F., Nguyen, M. Q., Ahamed, A., Yin, K., Chan, W. P., & Chang, V. W. C., “Review of MSWI bottom ash utilization from perspectives of collective characterization, treatment and existing application”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2017), 79, 24–38.
- [4] Nepomuceno M.; Oliveira L., “Parameters for self-compacting concrete mortar phase”, *ACI Materials Journal* (2008), SP-253, July, pp. 323-340.
- [5] Silva P. R. and de Brito J., “Fresh-State Properties of Self-Compacting Mortar and Concrete with Combined Use of Limestone Filler and Fly Ash”, *Materials Research, Ibero-American Journal of Materials* (2015), Vol. 18, pp. 1097-1108.
- [6] Silva P. M., de Brito J. and Costa, J. M., “Viability of two new mixture design methodologies for Self-Consolidating Concrete SCC”, *ACI Materials Journal, American Concrete Institute* (2011), Vol. 108, No. 6, pp. 579-588.
- [7] Lin, K. L., “The influence of municipal solid waste incinerator fly ash slag blended in cement pastes”, *Cement and Concrete Research* (2005), 35(5), 979–986.
- [8] Van Dr Wegen, G., Hofstra, U., & Speerstra, J., “Upgraded MSWI bottom ash as aggregate in concrete”, *Waste and Biomass Valorization* (2013), 4(4), 737–743.
- [9] Silva, P. R., “Avaliação da durabilidade de betões autocompactáveis (BAC)”, Tese apresentada para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal (2013).
- [10] Behfarnia, K., Keivan, A., & Keivan, A., “The effects of TiO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles on physical and mechanical properties of normal concrete”, *Asian Journal of Civil Engineering* (2013), 14(4), 517–531.
- [11] Silva, P., & Brito, J. de., “Resistividade eléctrica e permeabilidade de BAC com incorporação de cinzas volantes e filer calcário”, In 4º Congresso Nacional Construção, Coimbra, (2012).