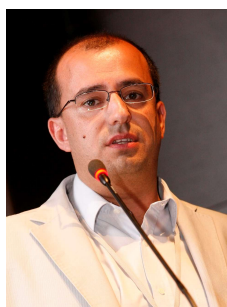


Avaliação da durabilidade de betões auto-compactáveis produzidos com agregados reciclados provenientes da indústria de pré-fabricação



Sara Santos¹



Pedro Silva²



Jorge de Brito³

RESUMO

Este artigo apresenta os resultados de uma campanha experimental desenvolvida com o objectivo de avaliar a influência, nas propriedades de durabilidade de betão auto-compactável, da incorporação de agregados reciclados finos (AFR) e grossos (AGR), obtidos a partir de elementos pré-fabricados triturados. O principal objectivo desta investigação foi o de proporcionar à indústria de pré-fabricação uma forma inovadora de eliminação e recuperação de resíduos autogerados, minimizando o consumo de recursos naturais e, consequentemente, reduzindo significativamente o impacte ambiental associado à produção de betão.

Nesse sentido, foram produzidas duas famílias de betão, correspondentes a duas classes de resistência à compressão do betão de origem dos agregados reciclados (45 MPa e 65 MPa), com as seguintes proporções de incorporação por família (AFR / AGR%): 0/0 %; 25/25%; 50/50%; 0/100%; 100/0%. Para avaliar a durabilidade do betão auto-compactável produzido, foram realizados os seguintes ensaios no estado endurecido: absorção de água por imersão e capilaridade; resistência à penetração de cloretos e resistência à carbonatação.

Os resultados mostram que as misturas de betão com incorporação de agregados reciclados apresentaram um pior desempenho do que as misturas de referência. No entanto, tendo em consideração todas as propriedades estudadas, é possível concluir que agregados reciclados a partir de elementos de betão pré-fabricado são de muito boa qualidade e podem ser incorporados na produção de betão auto-compactável. É ainda enfatizado o potencial demonstrado pelo uso conjunto de agregados finos e grossos reciclados.

Palavras-chave: betão auto-compactável; agregados reciclados finos; agregados reciclados grossos; durabilidade.

¹Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, DECivil, Lisboa, Portugal. sara.a.santos@tecnico.ulisboa.pt

²CERIS, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, IPL, ADEC, Lisboa, Portugal. silvapm@dec.isel.pt

³CERIS, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, DECivil, Lisboa, Portugal. jb@civil.ist.utl.pt

1. INTRODUÇÃO

A exploração dos recursos naturais do Planeta é fundamental para a sobrevivência do ser humano. No entanto, o aumento da população, o desenvolvimento tecnológico, a industrialização e o desejo de melhoria da qualidade de vida levaram à exploração destes recursos de uma forma excessiva. Apesar de serem aparentemente muito abundantes, estes materiais são limitados e, se consumidos de forma abusiva como se tem vindo a verificar ao longo dos anos, irão eventualmente esgotar-se.

A indústria da Construção consome mais matérias-primas do que qualquer outra actividade económica a nível mundial (aproximadamente 3000 Mt/ano, quase 50% em massa), revelando-se um sector com problemas a nível da sustentabilidade [1]. Este sector de actividade tem grande responsabilidade no que respeita ao impacto ambiental negativo que provoca, não apenas na sua fase de operação (utilização dos edifícios) mas considerando também a fase de obra (construção propriamente dita). De entre os vários impactes, salienta-se os seguintes: produção de resíduos, consumo de energia, emissões de CO₂ e consumo de recursos naturais. De acordo com a “Agenda 21 para a Construção Sustentável” [2], são consumidos durante a fase de construção cerca de 50% dos recursos naturais, produzidos mais de 50% dos resíduos, consumida mais de 40% da energia (média de consumo nos países industrializados - em Portugal, este valor ronda 20%) e produzidas cerca de 30% das emissões de CO₂.

O consumo de recursos naturais, principalmente de agregados naturais, bem como a produção de resíduos de construção e demolição (RCD), têm vindo a crescer nas últimas décadas. Em Portugal, a reciclagem de RCD está ainda pouco desenvolvida, tendo sido publicada a primeira legislação para regular a produção e gestão de RCD apenas em 2008. Segundo a QUERCUS [3], em 2007, cerca de 95% dos RCD gerados tiveram como destino final o depósito em aterro ou foram recolhidos por empresas não licenciadas com destino final em depósitos ilegais, dando origem a vazadouros de outro tipo de resíduos (orgânicos, plásticos, vidro, madeira, etc.), constituindo um problema de saúde pública, degradação da paisagem e contaminação.

A indústria da pré-fabricação é um ramo da Construção em franca expansão a nível mundial, uma vez que permite uma aceleração dos processos construtivos, garantindo níveis de qualidade superiores nos elementos executados, tanto em termos da qualidade dos materiais empregues, como da fiabilidade das peças produzidas. O rigoroso controlo de qualidade desta indústria leva a significativas quantidades de elementos de betão rejeitados e, conseqüentemente, a elevados desperdícios. Estas peças possuem um grande potencial de reciclagem, dada a qualidade do betão empregue. Ao envolver um elevado consumo de materiais, esta indústria contribui também para a produção de um volume significativo de resíduos que se estima em cerca de 2,5% da produção total, no caso de Portugal aproximadamente 4 milhões m³, segundo a CPCI [4]. Aos problemas ambientais que tais resíduos acarretam acrescem os custos com o transporte e depósito a vazadouro, bem como a logística para armazenamento ou tratamento desses mesmos resíduos [5]. O sector da Construção é potencialmente um grande consumidor de resíduos provenientes de outras indústrias. Resíduos como a escória granulada de alto-forno e a cinza volante são incorporados frequentemente como adições na formulação de betões. A utilização de agregados reciclados, nomeadamente provenientes de resíduos da indústria de pré-fabricação, perfila-se como uma solução interessante e de elevado potencial para o fabrico de novos betões. Permite não só resolver os problemas relacionados com o armazenamento, transporte e depósito a vazadouro das peças pré-fabricadas rejeitadas, como contribuir para a sustentabilidade do meio ambiente ao valorizar os referidos resíduos e, conseqüentemente, reduzir a extracção de matérias-primas, preservando os recursos naturais limitados [5]. Os betões pré-fabricados possuem, habitualmente, elevada resistência mecânica e baixa porosidade, comparativamente aos betões correntes, o que potencia a reutilização dos seus resíduos como agregados no fabrico de novos betões. Para além disto, os resíduos originados pelos elementos de betão pré-fabricados não possuem qualquer tipo de contaminantes, ao contrário dos RCD.

Deste modo, com os resultados obtidos nesta investigação, poder-se-á comprovar a possibilidade de utilização de taxas de substituição dos agregados superiores às previstas nos regulamentos existentes, desde que seja demonstrada a qualidade dos agregados reciclados (AR). Pretende-se que a investigação possa contribuir para uma utilização mais abrangente dos AR, resultando numa diminuição dos impactes ambientais associados à prática construtiva.

2. MATERIAIS UTILIZADOS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

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: cimento segundo a NP EN 197-1 (CEM tipo I-42,5 R, com massa volúmica de 3140 kg/m³); duas adições: cinzas volantes (CV) segundo as normas NP EN 450-1 e NP EN 450-2, com massa volúmica de 2300 kg/m³ e filer calcário (FC) segundo a especificação LNEC E 466, com massa volúmica de 2720 kg/m³; duas britas calcárias segundo a NP EN 12620, brita 1, com massa volúmica de 2640 kg/m³, D_{max} de 11,2 mm e absorção de água de 1,60%, e brita 2 com massa volúmica de 2690 kg/m³, D_{max} de 22,4 mm e absorção de água de 0,80%; duas areias siliciosas segundo a NP EN 12620, areia grossa (0/4) com massa volúmica de 2670 kg/m³, módulo de finura de 3,28 e absorção de água de 0,40% e areia fina (0/2) com massa volúmica de 2670 kg/m³, módulo de finura de 2,04 e absorção de água de 0,40%; os AR são provenientes da trituração de elementos de betão pré-fabricado com duas classes de resistência (45 e 65 MPa): AGR 65, com massa volúmica de 2490 kg/m³ e uma absorção de água de 2,20%; AGR 45, com massa volúmica de 2600 kg/m³ e uma absorção de água de 1,80%, AFR 65 com massa volúmica de 2450 kg/m³ e absorção de água de 7,50% e um AFR 45 com massa volúmica de 2560 kg/m³ e uma absorção de água de 5,00%; superplastificante de elevado desempenho, forte redutor de água, segundo as NP EN 934-1 e NP EN 934-2 (uma combinação de policarboxilatos modificados, em solução aquosa com massa volúmica de 1070 kg/m³); água da rede pública segundo a NP EN 1008.

2.2 Quantidades de amassadura

Com o objectivo de abranger as diferentes variações de quantidades de amassadura e respectiva avaliação das misturas PF 45 e PF 65, foram produzidas 10 amassaduras de BAC de acordo com a NP EN 206-9, que são apresentadas no Quadro 1. As quantidades de amassadura utilizadas foram obtidas segundo o método apresentado por Nepomuceno e Oliveira [6] e por Nepomuceno et al. [7], já utilizado em diversas publicações [8, 9, 10].

2.3 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 ϕ 150 x 100 mm (foram utilizados 3 por cada referência e idade de ensaio). Após o tempo adequado de cura húmida (20 ± 2 °C e HR \geq 95%), os provetes cortados foram acondicionados numa estufa a uma temperatura de 40 ± 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 foi cheio com água até atingir um nível de 5 ± 1 mm acima da face inferior do provete. O nível foi mantido constante ao longo do ensaio. A massa do provete foi medida após 0, 3, 6, 24 e 72 horas, sendo que as 0 horas corresponderam ao momento imediatamente anterior ao do provete entrar em contacto com a água.

O procedimento de ensaio utilizado para a determinação da absorção de água por imersão foi o apresentado na especificação LNEC E 394. Este ensaio foi realizado aos 28 e 91 dias para todas as misturas. Para esse efeito, foram utilizados provetes cúbicos com 100 mm de aresta (foram utilizados 3 por cada referência e idade de ensaio). Colocaram-se os provetes num recipiente com água, imergindo progressivamente 1/3 da sua altura em intervalos de uma hora: instante do início do ensaio – adicionou-se água até 1/3 da altura; ao fim de uma hora – adicionou-se água até 2/3 da altura; ao fim de duas horas – adicionou-se água até que se situe 25 ± 5 mm acima do topo dos provetes. Avaliou-se a massa do provete saturado ao ar (m_1) e a massa hidrostática (m_2). Até que o provete se apresenta-se saturado (quando a diferença entre as massas obtidas em duas pesagens consecutivas, intervaladas de, pelo menos, 24 h, for inferior a 0,1% da média das duas leituras), altura em que se colocou o provete

na estufa a 105 ± 5 °C para secagem até massa constante (m_3). A absorção de água por imersão (em %) foi calculada através da expressão (1):

$$A_i = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (1)$$

Quadro 1. Quantidades de amassadura e síntese das propriedades básicas

Quantidades de amassadura [kg/m ³]	PF 45					PF 65				
	100% AN	25% AR	50% AR	100% AGR	100% AFR	100% AN	25% AR	50% AR	100% AGR	100% AFR
CEM I 42.5 R			270					437		
Cinzas volantes			247					148		
Fíler calcário			59					29		
Superplastificante			3					4		
Água			187					188		
Areia 0/2 (AFN)	350	262	175	350	---	348	261	174	348	---
Areia 0/4 (AFN)	348	261	174	348	---	347	260	173	347	---
AFR	---	167	333	---	667	---	156	312	---	624
Brita 1	389	292	195	---	389	389	292	195	---	389
Brita 2	398	299	199	---	398	398	299	199	---	398
AGR	---	193	385	770	---	---	184	369	737	---
W/C			0,69					0,43		
W/MC			0,36					0,32		
W/MF			0,32					0,31		
<i>Síntese das propriedades básicas no estado fresco</i>										
Espalhamento (SF) [mm]	733	690	688	698	685	765	760	700	718	683
T500 [s]	2,5	2,5	2,5	3,0	2,5	2,0	2,5	2,5	3,0	2,5
Funil V (T) [s]	7,5	9,0	8,0	7,0	7,0	9,0	9,0	8,0	9,0	11,0
Caixa-L (PL) [-]	0,80	0,80	0,80	0,83	0,80	0,81	0,84	0,90	0,80	0,80
<i>Síntese das propriedades básicas no estado endurecido – Comportamento mecânico</i>										
f _{cm,c,7d} [MPa]	28,6	26,5	26,3	24,8	20,6	65,7	61,6	59,8	59,2	56,4
f _{cm,c,28d} [MPa]	42,9	38,9	37,0	34,0	29,1	78,7	77,6	75,6	74,2	69,3
f _{cm,c,91d} [MPa]	48,5	46,6	44,7	44,3	39,3	89,1	87,7	87,0	84,6	78,6

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 cortou 3 provetes com $\phi 100 \times 50$ mm (anulando aproximadamente 20 a 25 mm de cada extremidade - foram utilizados 3 por cada referência e idade de ensaio). Após o tempo de cura húmida adequado (a $20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ e $HR \geq 90\%$), os provetes cortados foram acondicionados em vácuo e imersos numa solução saturada de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) em água destilada. Posteriormente, os provetes $\phi 100 \times 50$ mm foram 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 manga, com o provete devidamente selado foi 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 aplicou-se um potencial eléctrico (de acordo com o especificado no *ponto 6.4.4* da especificação LNEC E 463) que forçou, por migração, o transporte dos iões cloretos através do provete. Após determinado período de ensaio, partiu-se o provete, comprimindo-o diametralmente e pulverizou-se as secções rectangulares obtidas com uma solução de nitrato de prata (AgNO_3 0,1 N). A partir do precipitado branco visível de cloreto de prata, mediou-se a profundidade de penetração. Com base na medição da profundidade de penetração realizada bem como de outros parâmetros, foi possível calcular o coeficiente de difusão de cloretos (D_{nssm}) em regime não estacionário.

A resistência à carbonatação foi determinada 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 CO₂). Todos os provetes ensaiados foram sujeitos a um processo de cura húmida por imersão em água a 20 ± 2 °C até 14 dias antes do início do ensaio, isto é, entrada na câmara de carbonatação. Nessa data (14 dias), procedeu-se ao seccionamento dos provetes (~ φ100 x 50 mm) 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 ± 2 °C e 50% de HR, até à entrada na câmara de carbonatação (28 dias). Nessa data, os provetes foram colocados numa câmara com 5 ± 1% de CO₂, 60±5% de HR e uma temperatura de 23 ± 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 imersão

Nas Figuras 1 e 2, são apresentados os resultados obtidos, para ambas as famílias de BAC. Optou-se por não apresentar tanto os desvios padrão como os coeficientes de variação dado que os mesmos apresentaram valores aceitáveis, mostrando uma dispersão muito reduzida. Verifica-se que o BAC com 100% AFR registou maior absorção de água por imersão. Na família PF 65, a variação, em relação ao BAC de referência, foi aproximadamente igual a 42%, em todas as idades. Na família PF 45, registou-se variações de 18, 25 e 28%, aos 28, 91 e 182 dias, respectivamente.

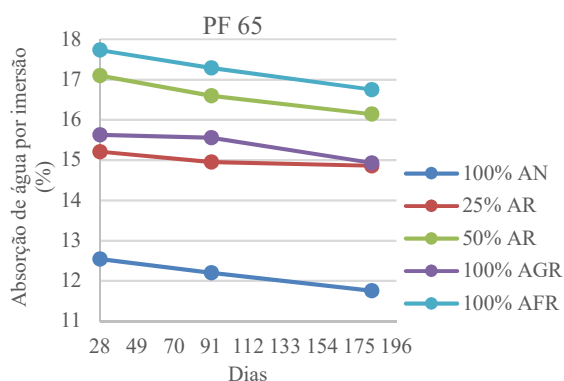


Figura 1 - Absorção de água por imersão aos 28, 91 e 182 dias (PF 65)

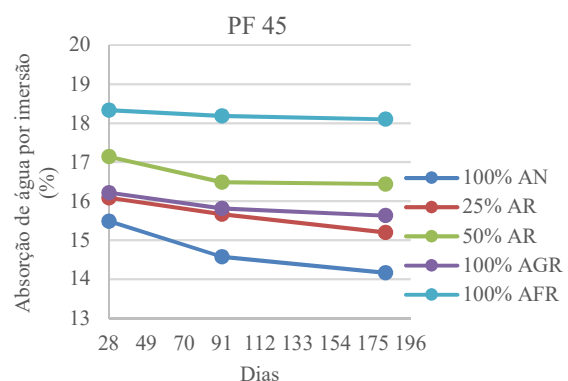


Figura 2 - Absorção de água por imersão aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)

A reduzida variação desta propriedade leva a concluir que os poros abertos, acessíveis ao exterior e responsáveis pela absorção de água por imersão, não sofrem grande alteração com a idade do betão. Constata-se ainda que os BAC com 100% AGR (substituição por AR apenas ao nível dos grossos) apresentam menores valores de absorção do que os BAC com 50% AR (substituição ao nível dos finos e grossos), o que se deve ao facto de os AGR possuírem valores de absorção de água muito inferiores aos AFR, que são condicionantes nesta propriedade.

Grdic et al. [11] verificaram um aumento de cerca de 67% na amassadura com 100% de AGR. Os autores justificaram esta tendência pela maior absorção do agregado reciclado relativamente ao agregado natural e pelo aumento gradual da relação a/c das amassaduras produzidas (0,41 para o BAC com 100% AN e 0,45 para o BAC com 100% AGR). Gómez-Soberón [12] refere que a presença de argamassa antiga aderida aos AR é responsável pela maior porosidade e absorção dos agregados reciclados, o que condiciona significativamente a porosidade aberta dos betões com AR.

3.2 Absorção de água por capilaridade

Nas Figuras 3 e 4, são apresentados os resultados obtidos, para ambas as famílias de BAC. Optou-se por apresentar graficamente apenas os resultados obtidos aos 28 dias, uma vez que as tendências observadas aos 28, 91 e 182 dias foram muito semelhantes. Optou-se ainda por não apresentar tanto os desvios padrão como os coeficientes de variação dado que os mesmos apresentaram valores aceitáveis, indicando uma reduzida variabilidade de todas as amostragens. Analisando as Figuras 3 e 4, verifica-se que a absorção de água por capilaridade ocorre de forma mais intensa nas primeiras horas (maior declive do primeiro troço dos gráficos), como esperado.

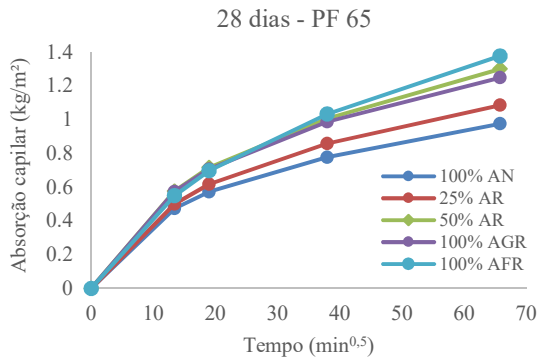


Figura 3 - Absorção de água por capilaridade aos 28 dias (PF 65)

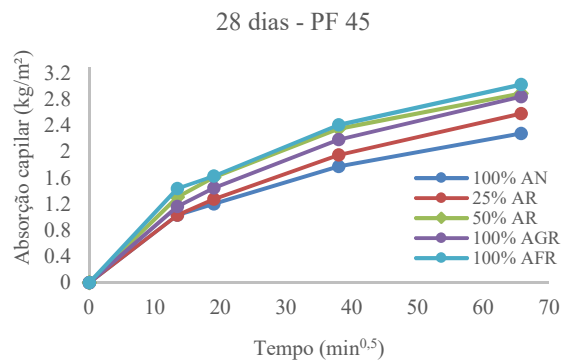


Figura 4 - Absorção de água por capilaridade aos 28 dias (PF 45)

Da análise dos resultados obtidos verifica-se que ocorre uma diminuição da absorção de água por capilaridade com a idade do betão, o que é explicado pela diminuição dos poros capilares. A introdução de cinzas volantes do betão provoca um aumento da dimensão média dos poros nas idades mais jovens; no entanto, para idades mais avançadas, existe uma tendência de diminuição do volume dos poros, reduzindo a possibilidade de penetração. Verifica-se que o BAC com 100% AFR registou maior absorção de água por capilaridade. A variação em relação ao BAC de referência, aos 28 dias, foi de 41% na família PF 65 e 33% na família PF 45. Modani e Mohitkar [13] verificaram a mesma tendência, obtendo um aumento de 41% para a amassadura com 100% AGR (28 dias). Os resultados podem ser explicados pela maior porosidade dos AR em comparação com os AN, devido à argamassa antiga aderida aos primeiros. Wirquin et al. [14] referem que a presença de AR no betão é responsável pela formação de mais e maiores poros capilares. Constata-se ainda que, à semelhança do que ocorreu no ensaio de absorção de água por imersão, o BAC com 100% AGR apresenta menores valores de absorção do que o BAC com 50% AR, o que se deve ao facto de os AGR possuírem valores de absorção de água muito inferiores aos AFR, que são condicionantes nesta propriedade.

As Figuras 5 e 6 mostram a relação entre a absorção de água por capilaridade e a absorção por imersão e resistência à compressão, respectivamente. Optou-se por apresentar graficamente apenas os resultados obtidos na família PF 45. Verifica-se a existência de uma forte correlação entre a absorção de água por capilaridade e a resistência do betão à compressão, que variam inversamente: a absorção de água por capilaridade aumenta com a diminuição da qualidade do betão (traduzida pela redução da resistência à compressão).

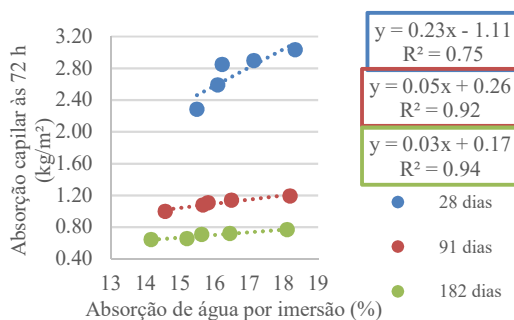


Figura 5 - Relação entre a absorção por imersão e capilar (72 horas) aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)

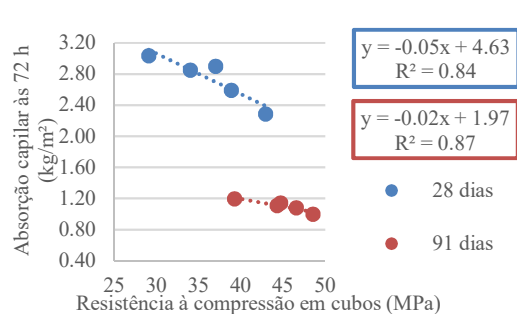


Figura 6 - Relação entre a absorção capilar (72 horas) e a resistência à compressão aos 28 e 91 dias (PF 45)

3.3 Penetração de cloretos

Nas Figuras 7 e 8, são apresentados os resultados obtidos, para ambas as famílias de BAC. Optou-se por não apresentar tanto os desvios padrão como os coeficientes de variação dado que, a respeito da variabilidade dos resultados dos ensaios, os mesmos exibem valores perfeitamente aceitáveis, independentemente do tipo de mistura e da idade de ensaio. Através da análise das Figuras 7 e 8, verifica-se que a resistência à penetração de cloretos aumenta com a idade do betão e diminui com a incorporação de AFR. A maior penetração de iões cloreto ocorre nas amassaduras com 100% AFR, com um aumento de 69% (PF 65) e 42% (PF 45) em relação ao BAC de referência, aos 28 dias. Tal é explicado pela pior qualidade da pasta do BAC (devido à substituição de areia por AFR), uma vez que o transporte de iões é feito preferencialmente nesse meio.

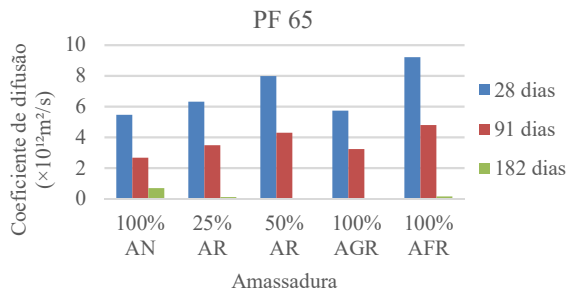


Figura 7 - Coeficiente de difusão de cloretos aos 28, 91 e 182 dias (PF 65)

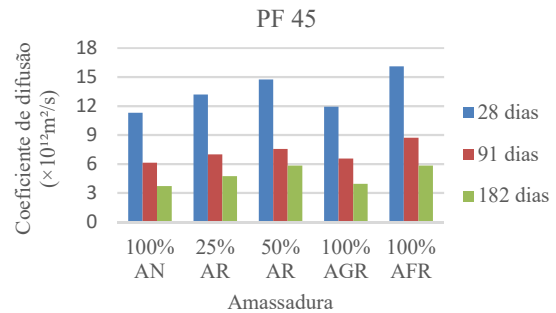


Figura 8 - Coeficiente de difusão de cloretos aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)

Tuyan et al. [15] verificaram a mesma tendência no seu estudo, em que a resistência à penetração de iões cloreto diminuiu com o teor de AGR, ou seja, a penetração de iões cloreto aumentou com a percentagem de AGR. Tal é justificado pelos autores com a maior porosidade dos AGR em comparação com os AGN. Através das Figuras 9 e 10, é possível observar a existência de correlação entre a penetração de cloretos e a absorção de água por imersão e por capilaridade (apresenta-se as relações apenas para a família PF 45).

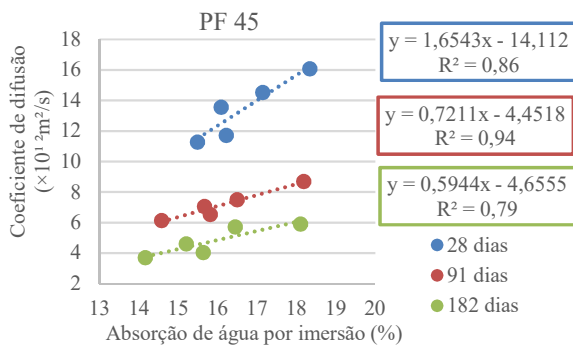


Figura 9 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos e a absorção de água por imersão aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)

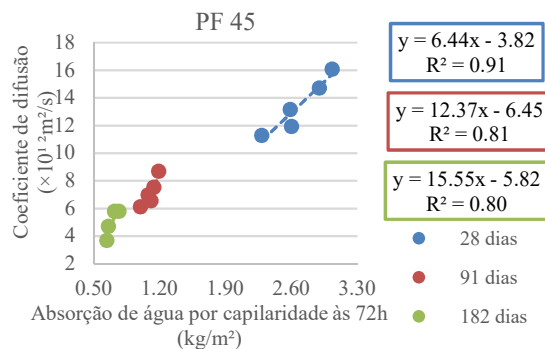


Figura 10 - Relação entre a resistência à penetração de cloretos e a absorção de água por capilaridade aos 28, 91 e 182 dias (PF 45)

3.4 Carbonatação acelerada

Nas Figuras 11 e 12, são apresentados os resultados obtidos, para ambas as famílias de BAC. Optou-se por não apresentar tanto os desvios padrão como os coeficientes de variação dado que, os valores de dispersão dos resultados analisados podem ser considerados aceitáveis, tendo em consideração a grandeza em análise. Verifica-se que, nos BAC da família PF 65, a carbonatação nas primeiras idades (7 e 28 dias) é praticamente inexistente (valores até 1 mm) em todas as amassaduras. Aos 91 dias, a máxima profundidade de carbonatação, correspondente à amassadura 100% AFR, é inferior a 3 mm, não ultrapassando 9 mm aos 182 dias. As reduzidas profundidades de carbonatação são justificadas

pela reduzida relação a/c (0,43). Siddique [16] apresenta profundidades de carbonatação inferiores a 2 mm, para 90 dias de exposição ao dióxido de carbono, em misturas de BAC (sem AR) com uma relação a/c de 0,44. Na família PF 45, ocorrem profundidades de carbonatação mais elevadas dada a sua maior relação a/c (0,69).

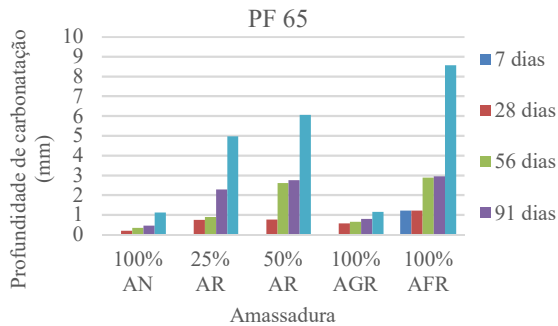


Figura 11 - Profundidade de carbonatação aos 7, 28, 56, 91 e 182 dias (PF 65)

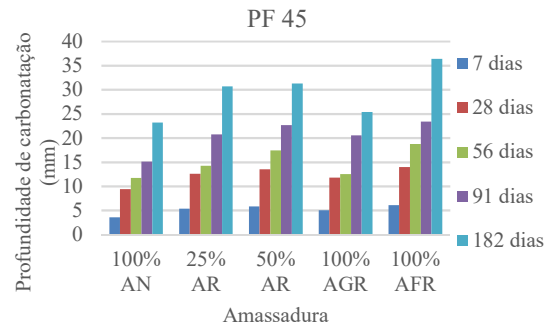


Figura 12 - Profundidade de carbonatação aos 7, 28, 56, 91 e 182 dias (PF 45)

Os valores da profundidade de carbonatação tendem a aumentar com o aumento da taxa de substituição de AN por AR ao nível dos finos. As amassaduras com 100% AGR (substituição apenas ao nível dos grossos) apresentam profundidades de carbonatação inferiores às das amassaduras com 25% AR (substituição ao nível dos finos e grossos), pelo que se conclui que a alteração da pasta é mais relevante para a propagação da carbonatação no interior do betão do que a alteração do agregado. Esta situação era expectável, uma vez que a absorção de água (por imersão e por capilaridade) apresentou uma tendência idêntica. Para os BAC com 100% AFR, a profundidade de carbonatação aumentou 560% (PF 65) e 55% (PF 45) aos 91 dias. Uma justificação para a maior profundidade de carbonatação nos BAC com AR está relacionada com a maior porosidade destes betões, onde se verifica que o volume total e o diâmetro médio dos poros aumentam com a incorporação de AR [17].

No Quadro 2, apresenta-se os valores dos coeficientes de carbonatação. Como seria expectável, a maior variação em relação ao BAC de referência foi verificada nas amassaduras 100% AFR (667% para a família PF 65 e 56% para a família PF 45).

Amassadura	Coefficiente de carbonatação (mm/dia ^{0,5})	R ²	$\Delta_{100\%AN}$ (%)
PF 65	100% AN	0,063	0
	25% AR	0,273	337
	50% AR	0,361	477
	100% AGR	0,085	36
	100% AFR	0,480	667
PF 45	100% AN	1,659	0
	25% AR	2,196	32
	50% AR	2,351	42
	100% AGR	1,946	17
	100% AFR	2,595	56

É possível constatar uma relação linear entre a carbonatação e as propriedades de absorção de água por imersão (Figura 13) e por capilaridade (Figura 14), dados os valores dos coeficientes de determinação ($R^2 = 0,87$ e $R^2 = 0,90$, respectivamente). São apresentados os resultados apenas para a família PF 45.

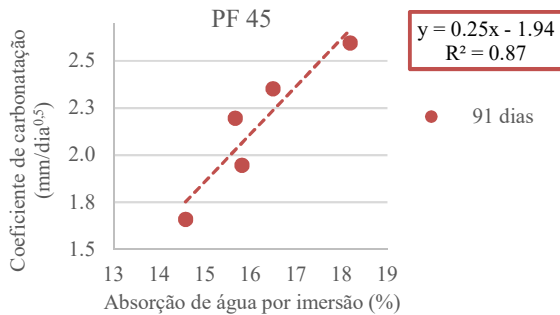


Figura 13 - Relação entre o coeficiente de carbonatação e a absorção de água por imersão aos 91 dias (PF 45)

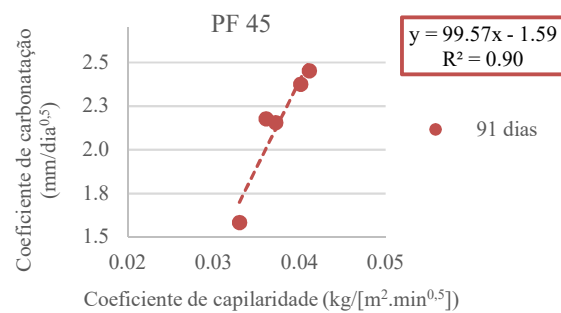


Figura 14 - Relação entre os coeficientes de carbonatação e de capilaridade aos 91 dias (PF 45)

4. CONCLUSÕES

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

No que respeita à absorção de água por imersão e capilaridade, verificou-se uma diminuição de desempenho nestas propriedades devido à introdução de AFR no betão, devido à maior porosidade do betão provocada pela argamassa antiga aderida aos AR. Os BAC com 100% AGR apresentaram melhor desempenho do que os com 50% AR, o que se deve ao facto de os AGR possuírem valores de absorção de água muito inferiores aos dos AFR. Verifica-se que o aumento da taxa de substituição de AN por AR faz aumentar a penetração de iões cloreto, o que é explicado pela degradação da qualidade da pasta do BAC (devido à substituição de areia por AFR), uma vez que o transporte de iões é feito preferencialmente nessa zona, o que explica que as amassaduras com 100% AGR registem o melhor desempenho dos BAC com AR, uma vez que não se efectua substituição de AN por AR ao nível da pasta. A profundidade de carbonatação aumenta com a substituição de AFN por AFR, pelo que se conclui que a alteração da pasta condiciona esta propriedade. Apesar das elevadas variações em relação ao BAC de referência, verificou-se que a profundidade de carbonatação é inferior a 3 mm e 24 mm, respectivamente, para as famílias PF 65 e PF 45, aos 91 dias.

Finalmente, são apresentadas as seguintes conclusões gerais, baseadas nos resultados da campanha experimental efectuada:

- os agregados utilizados, provenientes de peças de betão da indústria de pré-fabricação, são de excelente qualidade, sendo o seu desempenho superior ao reportado em grande parte das investigações consultadas, relativamente às suas diversas propriedades;
- em termos gerais, tendo em conta toda as propriedades estudadas, os AR provenientes de elementos de betão pré-fabricados são passíveis de serem incorporados no fabrico de BAC, recomendando-se as taxas de 25% AR e 100% AGR como limites;
- desta forma, considera-se que poderia existir um aumento das taxas limite de incorporação deste tipo de agregados contempladas nos regulamentos existentes, desde que comprovada a sua qualidade (como é o caso dos agregados provenientes de elementos de betão pré-fabricados).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do financiamento do projecto de investigação científica “Betão com agregados reciclados de elevado desempenho para a indústria da pré-fabricação (EXCELentSUStainableCONcrete)”. Agradece-se de igual modo o apoio do centro de investigação CERIS.

REFERÊNCIAS

- [1] Pacheco Torgal F., Jalali S. (2010). A sustentabilidade dos materiais de construção. TecMinho.
- [2] CIB (1999). Agenda 21 - on sustainable construction.
- [3] QUERCUS (2007). página da internet: <http://www.quercus.pt/comunicados/2007/abril/1526-entulhos-quercus-apresenta-uma-solucao-para-a-reutilizacao-e-reciclagem-destes-residuos>. visitada em 21/12/2014.
- [4] CPCI (2012). Production of Precast Concrete- Precast & Sustainability.
- [5] Rosa A. O., Brito J. de, Silva P. R. (2012). Betão auto-compactável com agregados reciclados provenientes da pré-fabricação. 4º Congresso Nacional Construção 2012. Universidade de Coimbra, Portugal, CD-ROM.
- [6] Nepomuceno M.; Oliveira L. (2008). Parameters for self-compacting concrete mortar phase, ACI Materials Journal, SP-253, July, pp. 323-340.
- [7] Nepomuceno, M., Oliveira, L. and Lopes, S. M. R. (2012). Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. Construction and Building Materials, 26, pp. 317-326.
- [8] Silva P. R. and de Brito J. (2015). 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, Vol. 18, pp. 1097-1108.
- [9] Silva P. M., de Brito J. and Costa, J. M. (2011). Viability of two new mixture design methodologies for Self-Consolidating Concrete SCC. ACI Materials Journal, American Concrete Institute Vol. 108, No. 6, pp. 579-588.
- [10] Bogas J., Gomes A. and M. Pereira (2012). Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate. Construction and Building Materials 35, pp. 1013-1022.
- [11] Grdic, Z. J., Toplicic-Curcic, G. a., Despotovic, I. M., Ristic, N. S. (2010). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials. Vol. 24, pp. 1129–1133.
- [12] Gómez-Soberón J. (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: an experimental study. Cement and Concrete Research, Vol. 32, N.º 8, pp. 1301–11.
- [13] Modani, P. O., Mohitkar, V. M. (2014). Self-compacting concrete with recycled aggregate: A solution for sustainable development. International Journal of Civil and Structural Engineering, Vol. 4, N.º 3, pp. 430–440.
- [14] Wirquin, E., Hadjieva-Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F. (2000). Use of water absorption by concrete as a criterion of the durability of concrete - Application to recycled aggregate concrete. Materials and Structures, Vol. 33, N.º 6, pp.403–408.
- [15] Tuyan, M., Mardani-Aghabaglou, A., Ramyar, K. (2014). Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. Materials & Design, Vol. 53, pp. 983–991.
- [16] Siddique R. (2011). Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash. Materials & Design, Vol. 32, pp. 1501-1507.
- [17] Kou, S. C., Poon, C. S. (2006). Compressive strength, pore size distribution and chloride-ion penetration of recycled aggregate concrete incorporating class-F fly ash. Journal of Wuhan University of Technology - Materials Science Editions, Vol. 21, N.º 4, pp. 130-136.