

## RESISTIVIDADE ELÉCTRICA E PERMEABILIDADE DE BAC COM INCORPORAÇÃO DE CINZAS VOLANTES E FÍLER CALCÁRIO

Pedro M. S. Raposeiro da Silva<sup>1\*</sup>, Jorge M. C. Lopes de Brito<sup>2</sup>

1: Departamento de Engenharia Civil  
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa  
Instituto Politécnico de Lisboa  
Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-007 Lisboa  
e-mail: silvapm@dec.isel.ipl.pt, web: <http://www.isel.pt>

2: Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura  
Instituto Superior Técnico  
Universidade Técnica de Lisboa  
Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa  
e-mail: [jb@civil.ist.utl.pt](mailto:jb@civil.ist.utl.pt), web: <http://www.ist.utl.pt>

**Palavras-chave:** betão auto-compactável, resistividade eléctrica, permeabilidade, porosidade, durabilidade, adições.

**Resumo.** *A resistividade eléctrica é uma propriedade associada tanto a características físicas como químicas do betão, permitindo avaliar a maior ou menor dificuldade de penetração dos agentes agressivos no seu interior antes de iniciado o processo de despassivação e consequente corrosão das armaduras.*

*Este trabalho aborda as propriedades de permeabilidade, correlacionando-as com a resistividade eléctrica, de betão auto-compactável (BAC) com diferentes tipos e quantidades de adições. Para esse efeito, foram produzidas misturas binárias e ternárias de BAC com recurso a cinzas volantes (CV) e fíler calcário (FC).*

*Produziu-se um total de 11 misturas auto-compactáveis: uma só com cimento (C); três com C+CV em 30, 60 e 70% de substituição; três com C+FC em 30, 60 e 70% de substituição; quatro com C+CV+FC em combinações de 10-20, 20-10, 20-40 e 40-20% de substituição respectivamente; e, por fim, quatro misturas de acordo com as especificações LNEC E 464 em referência à norma NP EN 206-1.*

*A avaliação da permeabilidade dos betões produzidos foi feita através do ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade de acordo com a especificação LNEC E 393. A resistividade eléctrica foi avaliada recorrendo à proposta de norma europeia apresentada pelo EU-Project CHLORTEST (EU funded research Project under 5FP GROWTH programme) e com base na recomendação técnica RILEM TC-154 EMC.*

*Os resultados obtidos indicam que as propriedades de permeabilidade do BAC são fortemente condicionadas pelo tipo e pela quantidade de adições utilizadas, constatando-se que a adição de CV melhora significativamente algumas das propriedades estudadas principalmente em idades mais avançadas.*

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo e conseqüente desenvolvimento do betão auto-compactável (BAC), que se tem vindo a verificar um pouco por todo o mundo, teve o seu início no Japão na década de 80 do século XX. A principal motivação para o estudo deste tipo de betão está associada às preocupações relativas à falta de homogeneidade e conseqüente falta de durabilidade das estruturas de betão armado que se começaram a verificar no Japão. Com a redução de trabalhadores especializados na construção civil e considerando que a correcta colocação do betão convencional (BC) nos moldes depende, entre outros aspectos, de uma compactação adequada, sentiu-se a necessidade de ter um betão que, independentemente do grau de especialização da mão-de-obra, permitisse uma correcta aplicação sem comprometer a durabilidade das estruturas. Iniciam-se assim os estudos para a obtenção de um BAC que conseguisse dar resposta às características exigidas [1].

Actualmente, as suas principais características, tanto no estado fresco como endurecido, bem como as suas potencialidades económicas, melhorando tanto o próprio processo construtivo como inclusivamente as condições de trabalho, fazem com que a utilização deste material. esteja a começar a ter alguma expressão, tanto na indústria da pré-fabricação como na do betão pronto.

Devido às alterações necessárias à obtenção da referida auto-compactabilidade (aumento / melhoria da trabalhabilidade, capacidade de passagem e resistência à segregação), isto é, necessárias à eliminação do processo de compactação, o impacte da utilização de BAC está essencialmente relacionado com o processo de produção, com a colocação do betão em obra e com as alterações relacionadas com os materiais constituintes, nomeadamente:

- diminuição da relação entre as quantidades de agregado grosso e de argamassa;
- conseqüente aumento do volume de argamassa (mais material. ultrafino tipo cimento Portland (CP) e adições);
- adequado controlo da dimensão máxima do agregado;
- utilização de adjuvantes do tipo superplastificantes e/ou moduladores de viscosidade.

Apesar das exigências em termos de propriedades no estado endurecido dos BAC serem as mesmas de um BC, as quantidades de amassadura utilizadas bem como as proporções nas quais os diversos componentes se combinam são diferentes. Nesse sentido, pode afirmar-se que as suas propriedades no estado endurecido relativamente à durabilidade podem variar e são ainda um pouco incertas [2] [3].

A utilização de quantidades superiores, tanto de adjuvantes como de material. ultrafino, implica necessariamente um maior custo do BAC por  $m^3$  quando comparado com um BC, sendo esse custo em inúmeras aplicações apenas compensado pela redução dos custos com a mão-de-obra [4]. No entanto, a utilização de adições tais como FC, CV, entre outras, em substituição parcial. de CP pode contribuir para uma redução dos referidos custos do BAC, bem como para uma melhoria do seu comportamento, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

Existem inúmeros estudos sobre a utilização de adições no BAC com indicações / propostas para as percentagens de substituição ( $f_{ad}$ ) óptimas / recomendadas, sendo hoje comum apresentar valores de  $f_{ad}$  superiores a 30% e em alguns casos chegando a atingir 70 a 80% [5] [6] [7] [8].

A utilização de adições tais como FC e CV na produção de BAC tem aumentado significativamente nos últimos anos sendo previsível que continue a aumentar, apresentando inúmeras vantagens não só em termos económicos mas também no comportamento do BAC no estado fresco e endurecido.

O interesse em conhecer adequadamente o efeito das adições utilizadas no BAC é de extrema importância, principalmente quando se adoptam de forma corrente percentagens de substituição elevadas. Importa conhecer o comportamento desses BAC cuja aplicação em ambientes mais agressivos requer, tal. como acontece com um BC, um controlo adequado das suas propriedades físicas e químicas de modo a garantir a resistência à penetração, no seu interior, de agentes agressivos (água pura ou com iões agressivos,  $CO_2$  e oxigénio, como elemento regulador de todas as

reações de corrosão do aço embebido no betão).

A penetração dos referidos agentes agressivos é um processo complexo que envolve diversos fenómenos tais como a difusão, a capilaridade e a permeação (que poderão ocorrer isoladamente ou em simultâneo). Pode ainda ocorrer o fenómeno de migração iónica no caso da penetração de cloretos.

A permeabilidade do BAC em ambientes agressivos influencia fortemente os mecanismos de degradação, existindo uma correlação entre: estrutura porosa; mecanismos de transporte e mecanismos de degradação. A estrutura porosa é um dos factores mais condicionantes da permeabilidade do BAC.

Desse modo, o estudo da durabilidade do betão, nomeadamente do efeito da sua estrutura porosa na permeabilidade do mesmo, apresenta uma importância acrescida, não só do ponto de vista das condições de serviço das estruturas de betão através dos respectivos custos de manutenção e reparação mas também do ponto de vista do dimensionamento e capacidade de previsão do seu tempo de vida útil face à acção dos agentes agressivos.

De acordo com o exposto, pretende-se, neste trabalho, abordar as propriedades de permeabilidade, correlacionando-as com a resistividade eléctrica de BAC com diferentes tipos de adições, Para esse efeito, produziu-se um total de 11 misturas auto-compactáveis: uma só com cimento (C); três com C+CV em 30, 60 e 70% de substituição; três com C+FC em 30, 60 e 70% de substituição; quatro com C+CV+FC em combinações de 10-20, 20-10, 20-40 e 40-20% de substituição respectivamente; e, por fim, quatro misturas de acordo com a especificação LNEC E 464: 2007 em referência à norma NP EN 206-1: 2007.

## **2. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO**

### **2.1. Materiais utilizados**

Os materiais utilizados neste trabalho foram seleccionados de acordo com a sua disponibilidade em Portugal. e 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: 2001 / A3, 2008 (CPN tipo I-42,5 R, com massa volúmica de 3,14 kg/dm<sup>3</sup>); duas adições: CV de acordo com as NP EN 450-1: 2005 / A1, 2008 e NP EN 450-2: 2006, com massa volúmica de 2,30 kg/dm<sup>3</sup> e FC de acordo com a especificação LNEC E 466: 2005, com massa volúmica de 2,72 kg/dm<sup>3</sup>; duas britas calcárias de acordo com a NP EN 12620: 2002 / A1, 2010, uma brita 1, com massa volúmica de 2,59 kg/dm<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 2,64 kg/dm<sup>3</sup>, D<sub>max</sub> de 20 mm e absorção de água de 0,78%; duas areias siliciosas de acordo com a NP EN 12620: 2002 / A1, 2010, uma areia grossa (0/4) com massa volúmica de 2,55 kg/dm<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 2,58 kg/dm<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 as NP EN 934-1: 2008 e NP EN 934-2: 2009 (uma combinação de policarboxilatos modificados, em solução aquosa com massa volúmica de 1,07 kg/dm<sup>3</sup>); água da rede pública de acordo com a NP EN 1008: 2003.

### **2.2. Quantidades de amassadura**

Com o objectivo de abranger as diferentes variações de quantidades de amassadura e respectiva avaliação das misturas binárias e ternárias de CV e FC, foram produzidas 11 amassaduras de BAC de acordo com a NP EN 206-9: 2010 e duas de betão de referência de acordo com a NP EN 206-1: 2007, que são apresentadas na Tabela 1.

As quantidades de amassadura utilizadas foram obtidas de acordo com o método apresentado por Nepomuceno [9] e já utilizado em diversas aplicações [10]. Resumidamente, o referido método propõe uma nova metodologia de cálculo das quantidades de amassadura de BAC baseada nos métodos de *Okamura et al.* [1] e da *JSCE* [11] através da introdução de novos parâmetros que melhor

se adequam ao controlo, não só da resistência mecânica do BAC mas também de outras propriedades no estado fresco. O referido método encontra-se devidamente explicado na tese de doutoramento do primeiro autor [9], existindo também diversas aplicações práticas do mesmo, nomeadamente, a verificação da sua aplicabilidade no trabalho apresentado por Silva e Brito [10].

Tabela 1. Quantidades de amassadura e propriedades básicas.

Quantidades de amassadura		BAC1.100C	BAC2.30LF			BAC3.30FA			BAC4.10FA20LF		BAC5.20FA40LF		BR.XC1&2		BR.XS1&2			
CEMI 42,5 R	[kg/m <sup>3</sup> ]	707	512	297	222	503	290	218	506	506	297	293	240	280	256	272		
Cinzas volantes	[kg/m <sup>3</sup> ]	---	---	---	---	158	318	373	53	106	109	215	---	---	64	68		
Fíler calcário	[kg/m <sup>3</sup> ]	---	190	386	449	---	---	---	125	63	257	127	---	---	---	---		
Superplastificante	[kg/m <sup>3</sup> ]	7,4	4,6	2,9	2,7	4,6	3,5	3,4	4,6	4,6	3,2	3,0	1,0	1,5	1,9	2,3		
Água	[l/m <sup>3</sup> ]	189	175	168	170	183	180	178	180	180	168	175	156	168	176	153		
Areia 0/1	[kg/m <sup>3</sup> ]	436	450	457	456	443	447	448	446	446	457	451	593	572	549	562		
Areia 0/4	[kg/m <sup>3</sup> ]	287	297	301	300	292	294	295	294	294	301	297	390	377	362	370		
Brita 1	[kg/m <sup>3</sup> ]	417	417	417	417	417	417	417	417	417	417	417	551	532	511	523		
Brita 2	[kg/m <sup>3</sup> ]	283	283	283	283	283	283	283	283	283	283	283	374	361	347	355		
W/C	[-]	0,27	0,34	0,57	0,76	0,36	0,62	0,82	0,36	0,36	0,57	0,60	0,65	0,60	0,69	0,56		
W/MC	[-]	0,27	0,34	0,57	0,76	0,28	0,30	0,30	0,32	0,29	0,41	0,35	0,65	0,60	0,55	0,45		
W/MF	[-]	0,27	0,25	0,25	0,25	0,28	0,30	0,30	0,26	0,27	0,25	0,28	0,65	0,60	0,55	0,45		
Síntese das propriedades básicas															abaixamento		abaixamento	
Espalhamento	[mm]	770	675	678	620	648	613	595	775	738	685	645	140	180	210	200		
Funil V	[s]	9,3	10,3	9,1	9,9	7,3	8,4	8,6	9,3	10,8	9,1	10,0	---	---	---	---		
Caixa L	[-]	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	---	---	---	---		
Teor em ar	[%]	2,5	2,9	4,0	4,4	3,0	4,6	4,6	2,4	2,4	2,6	2,7	---	---	---	---		
f <sub>cm,7d</sub>	[MPa]	64,6	66,7	38,5	26,4	58,8	34,4	21,6	60,7	62,7	32,6	31,6	---	---	---	---		
f <sub>cm,28d</sub>	[MPa]	83,6	70,1	42,3	30,5	68,4	54,0	35,3	63,4	70,9	47,8	49,1	33,7	41,6	47,0	49,6		
f <sub>cm,91d</sub>	[MPa]	85,5	70,0	42,8	32,6	71,7	62,5	48,9	70,4	75,8	57,9	56,9	---	---	---	---		
f <sub>cm,182d</sub>	[MPa]	88,2	74,1	49,2	35,5	69,5	59,9	49,6	71,1	74,7	59,9	55,9	---	---	---	---		

Relativamente ao estabelecimento das quantidades de amassadura apresentadas na Tabela 1 é de mencionar o procedimento para a determinação das proporções entre os agregados utilizados, bem como o estabelecimento dos diversos parâmetros de mistura considerados.

Desse modo, as proporções entre as britas (brita 1 + brita 2) e entre as areias (areia 0/1 + areia 0/4) foram fixadas de modo a obter a máxima compactidade possível através da análise de misturas de referência bem como dos módulos de finura correspondentes. Pretendeu-se, dessa forma, minimizar os espaços vazios entre as partículas e otimizar as proporções entre as mesmas.

Já a fixação dos parâmetros de composição das misturas em estudo de modo a poder avaliar unicamente a variação das percentagens unitárias de substituição do cimento pelas adições dependeram das seguintes condições: manteve-se constante a razão, em volume absoluto, entre a

quantidade total de argamassa e de agregado grosso na mistura ( $V_m/V_g = 2,625$ ), bem como os volumes absolutos tanto de agregado grosso ( $V_g = 0,268 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) como de argamassa ( $V_m = 0,702 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ); considerou-se, para efeito de cálculo, um valor constante do volume de vazios ( $V_v = 0,03\text{m}^3/\text{m}^3$ ); manteve-se constante a razão, em volume absoluto, entre as quantidades totais de materiais finos (cimento e adições) e de agregados finos na mistura ( $V_p/V_s = 0,80$ ); a razão, em volume absoluto, entre as quantidades totais de água e de materiais finos ( $V_w/V_p$ ), bem como a razão percentual, em massa entre as quantidades totais de superplastificante ( $S_p$ ) e de materiais finos na mistura variaram em função da necessidade de água e  $S_p$  de cada mistura de modo a obter os parâmetros de auto-compactabilidade (espalhamento, funil-V e caixa-L).

O estabelecimento dos parâmetros  $V_w/V_p$  e  $S_p/p\%$  é feito através de amassaduras experimentais em argamassas auto-compactáveis segundo o apresentado por Nepomuceno [20] e por Silva e Brito [10].

É apresentada, na Tabela 1, com as referências BR.XC1&2, BR.XC3&4, BR.XS1&2 e BR.XS3, a composição de quatro misturas definidas de acordo com o especificado na E 464: 2007. Com as duas composições mínimas apresentadas e prescritas de acordo com a referida especificação, pretende-se verificar o enquadramento das restantes composições de BAC estudadas face às classes de exposição ambiental, nomeadamente no caso da acção dos cloretos, bem como avaliar a adequabilidade dos parâmetros de composição apresentados na E 464: 2007, para o caso particular dos BAC e de modo a cumprir os tempos de vida útil de projecto de 50 anos.

As composições de referência foram estabelecidas de acordo com o Quadro 7 da E 464: 2007, nomeadamente em termos de máxima razão W/C, mínima dosagem de cimento e classe mínima de resistência. O cálculo das quantidades de amassadura seguiu, dentro do possível, a mesma metodologia utilizada para as restantes misturas, tendo-se mantido as proporções entre agregados. O cimento tipo I 42,5 R foi utilizado conforme fornecido pelo fabricante, enquanto que o tipo IV/A para as misturas de referência foi combinado na fase de amassadura, respeitando o prescrito na NP EN 197-1: 2001 / A3, 2008, de acordo com as seguintes percentagens em massa: 80% CEM I 42,5 R + 20% CV.

### 2.3. Descrição dos ensaios e preparação de provetes

Determinação da absorção de água por capilaridade - o procedimento de ensaio utilizado para a determinação da absorção de água por capilaridade foi o apresentado na especificação LNEC E 393: 1993. Este ensaio foi realizado aos 28, 91 e 182 dias para os BAC e aos 28 dias para os BR.

Para esse efeito, foram utilizados provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, de onde se cortaram três provetes com  $\phi 150 \times 100$  mm (3 por cada referência e idade de ensaio). Após o tempo adequado de cura húmida ( $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $\text{HR} \geq 95\%$ ), os provetes cortados são acondicionados numa estufa a uma temperatura de  $40 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 14 dias até à data de ensaio.

Posteriormente, os provetes são 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 referido 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. Com base nas pesagens efectuadas, é possível calcular o valor da absorção de água, por capilaridade, por unidade de área para cada um desses momentos, bem como o respectivo coeficiente de absorção que se considerou como corresponde à pendente da recta de regressão dos valores referentes às primeiras 6 horas de absorção de água, de acordo com a equação (1), em que: A = água absorvida por unidade de área ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ); S = coeficiente de absorção por capilaridade ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$  ou  $\text{mm}/\text{min}^{0,5}$ ); t = tempo de ensaio (s).

$$A(t) = S \times t^{0,5} \quad (1)$$

Determinação da resistividade eléctrica - os procedimentos de ensaio que serviram de base para a determinação da resistividade eléctrica foram os apresentados na proposta de norma europeia da

*EU-Project CHLORTEST (EU funded research Project under 5FP GROWTH programme)* [12] e na recomendação técnica *RILEM TC-154 EMC* [13]. Este ensaio foi realizado aos 28, 91 e 182 dias para os BAC e aos 28 dias para os BR.

Para esse efeito, foram usados provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, de onde se cortaram três provetes com  $\phi 100 \times 50$  mm por cada referência e idade de ensaio (anulando aproximadamente 20 a 25 mm de cada extremidade). Após o tempo de cura húmida adequado ( $20 \pm 2$  °C e HR  $\geq 95\%$ ), os provetes cortados foram preconditionados em vácuo e imersos em água destilada.

Posteriormente, os provetes  $\phi 100 \times 50$  mm saturados com a superfície limpa de excesso de água são acoplados entre as placas de cobre apresentadas na figura 1 com o auxílio de duas esponjas humedecidas em água e com uma massa de 2 kg a comprimir o conjunto (Figura 1).

Seguidamente, através das placas de cobre situadas entre os topos dos provetes, de acordo com representado na Figura 1, aplica-se um potencial eléctrico de 60 V (CC) e regista-se o valor da corrente eléctrica que atravessa o provete.



Figura 1. Instrumentação do ensaio de resistividade eléctrica.

Com base na medição da corrente efectuada, na diferença de potencial aplicada, nas dimensões do provete e na ponderação da resistência das esponjas, é possível calcular a resistividade eléctrica a partir da equação (2) em que:  $\rho$  = resistividade eléctrica do betão ( $\Omega \cdot m$ );  $U$  = voltagem aplicada (V);  $I$  = intensidade de corrente (A);  $A$  = área do topo do provete ( $m^2$ );  $L$  = comprimento do provete (m).

$$\rho = \frac{U}{I} \times \frac{A}{L} \quad (2)$$

### 3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

#### 3.1. Absorção de água por capilaridade

Apresentam-se, nas Figuras 2, 3, 4 e 5, os valores médios dos resultados obtidos para a absorção capilar para as 3 idades estudadas (28, 91 e 182 dias). Com os valores da absorção capilar, determinaram-se os respectivos coeficientes de absorção, cujos valores se apresentam na Figura 6.

Numa primeira análise dos resultados obtidos, é possível observar que a capilaridade é condicionada pela utilização de adições, bem como pelo seu tipo, no fabrico do BAC. O referido pode ser observado na ordem de grandeza dos valores inferiores, dos BAC3 com CV, quando comparados com os BAC2 com FC, bem como nas diferenças obtidas com o aumento da idade.

Para todas as misturas estudadas, a capilaridade diminui com o período de cura e aumenta com a  $f_{ad}$ . Como é possível observar pela leitura das figuras, não existe uma diferença significativa para as misturas com  $f_{ad}$  de 30% (tanto para as de FC como de CV) quando comparadas com o BAC sem adições. O mesmo se verifica com as misturas ternárias, sendo que neste caso o referido comportamento se estende de igual modo às misturas com  $f_{ad}$  de 60%, revelando, desse modo,

estas misturas um comportamento muito favorável em todas as idades.

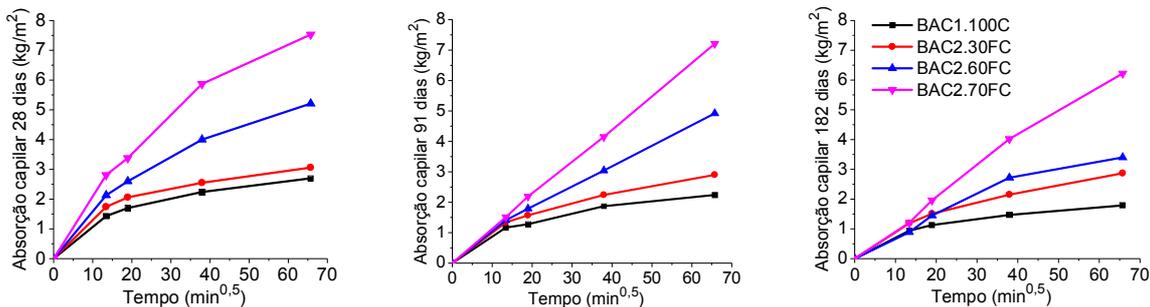


Figura 2. Capilaridade aos 28, 91 e 182 dias para as misturas binárias com FC.

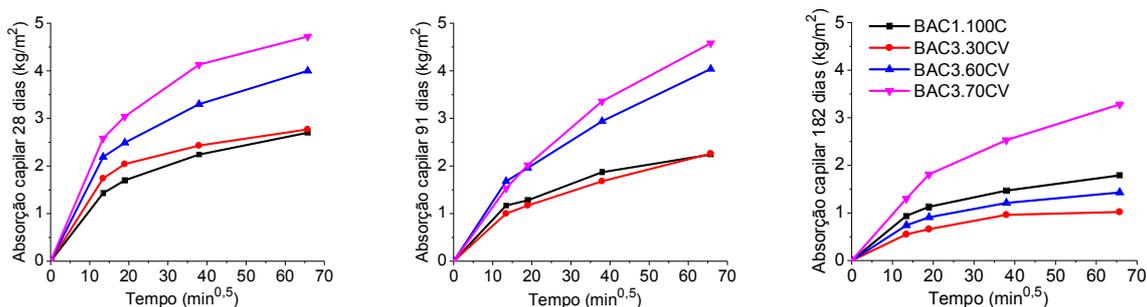


Figura 3. Capilaridade aos 28, 91 e 182 dias para as misturas binárias com CV.

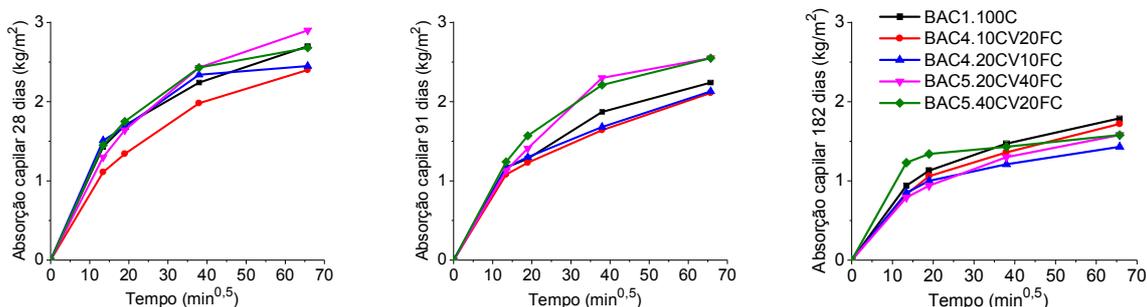


Figura 4. Capilaridade aos 28, 91 e 182 dias para as misturas ternárias.

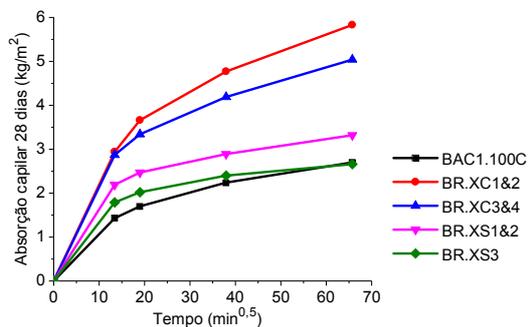


Figura 5. Capilaridade aos 28 dias para as misturas de referência.

Pode afirmar-se que os valores obtidos pelos BAC se enquadram genericamente nos dos betões correspondentes aos limites de composição estabelecidos para as classes de exposição ambiental. XS e XC da especificação LNEC E 464: 2007 em referência à NP EN 206-1: 2007 apresentados na Figura 5 e para a idade estudada (28 dias de acordo com o especificado). Não obstante, é de salientar que as misturas ternárias com  $f_{ad}$  de 30% cumprem os limites especificados e que as de  $f_{ad}$  com 60% apenas ultrapassam o valor da XS3, mas por uma diferença mínima. Já as misturas binárias com CV apresentam valores superiores quando comparados com as ternárias. Apenas o BAC3.30CV cumpre todos os limites e os BAC3.60CV e BAC.70CV apenas cumprem os limites apresentados para as classes XC. As binárias com FC apresentam valores superiores, tanto aos das binárias com CV como aos das ternárias. É de salientar o BAC2.70FC que não cumpre nenhum dos limites apresentados. O BAC2.60FC cumpre apenas os limites da classe XC1&2 e o BAC2.30FC enquadra-se em todas as classes excepto na XS3. Contudo, comparando os valores obtidos para os BAC em idades mais avançadas (91 e 182 dias) com os BR, observa-se uma redução significativa da absorção capilar, com excepção do BAC2.70FC que mantém valores sempre elevados.

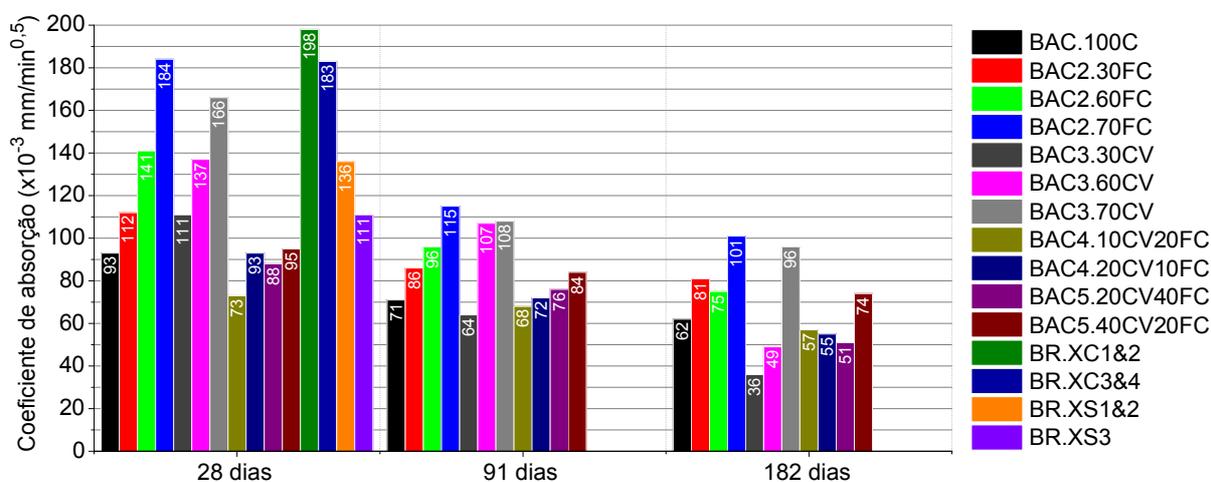


Figura 6. Coeficientes de absorção por capilaridade para todas as misturas.

Para as misturas com FC, os resultados apresentados confirmam os obtidos, por exemplo, por *Ramezaniapour et al.* [6]. Os autores afirmam que, no caso específico da utilização de FC, o mesmo só será competitivo em termos de permeabilidade para valores de  $f_{ad}$  reduzidos, na ordem de 10 a 20%. Resultados semelhantes podem ser observados no trabalho de *Assié et al.* [14], que comparam BAC e BC com diversas resistências mecânicas e diferentes valores de  $f_{ad}$ . Já *Zhu e Bartos* [2] apresentam um estudo comparativo onde utilizaram CV e FC na produção de BAC e BC para as classes de resistência mecânica (40 e 60 MPa), onde se pode observar que, tal, como no presente trabalho, os BAC com adições apresentam valores de absorção por capilaridade ligeiramente inferiores ao seu equivalente em BC e que as diferenças entre os BAC com CV e os BAC com FC são mínimas, apesar de, no entanto, os BAC com CV apresentarem resultados ligeiramente mais favoráveis.

### 3.2. Resistividade eléctrica

Os valores médios dos resultados obtidos no ensaio de resistividade eléctrica para as idades estudadas são os apresentados na Figura 7. Ao contrário do observado na capilaridade, as misturas binárias apresentam um comportamento significativamente distinto, não só pela comparação dos resultados entre ambos, como também na sua evolução com o tempo de cura. A utilização de CV é notoriamente favorável ao aumento da resistividade eléctrica do BAC, o que pode ser confirmado tanto nas misturas binárias como nas ternárias.

Analisando os resultados obtidos, é possível verificar que tanto o BAC1.100C como os BAC com FC são os que apresentam valores de resistividade eléctrica inferiores e sem uma evolução significativa com o aumento do tempo de cura. Pelo contrário, os BAC com CV apresentam uma evolução muito significativa com o tempo de cura. Por exemplo, a resistividade eléctrica do BAC3.30CV aumentou 9,92 vezes entre os 28 e os 182 dias. Ainda relativamente aos BAC com CV, aos 28 dias os diferentes  $f_{ad}$  apresentam-se praticamente constantes, enquanto que, com o aumento do tempo de cura, se observa uma clara diferenciação entre os mesmos, com o aumento da resistividade eléctrica em função da diminuição do valor de  $f_{ad}$ .

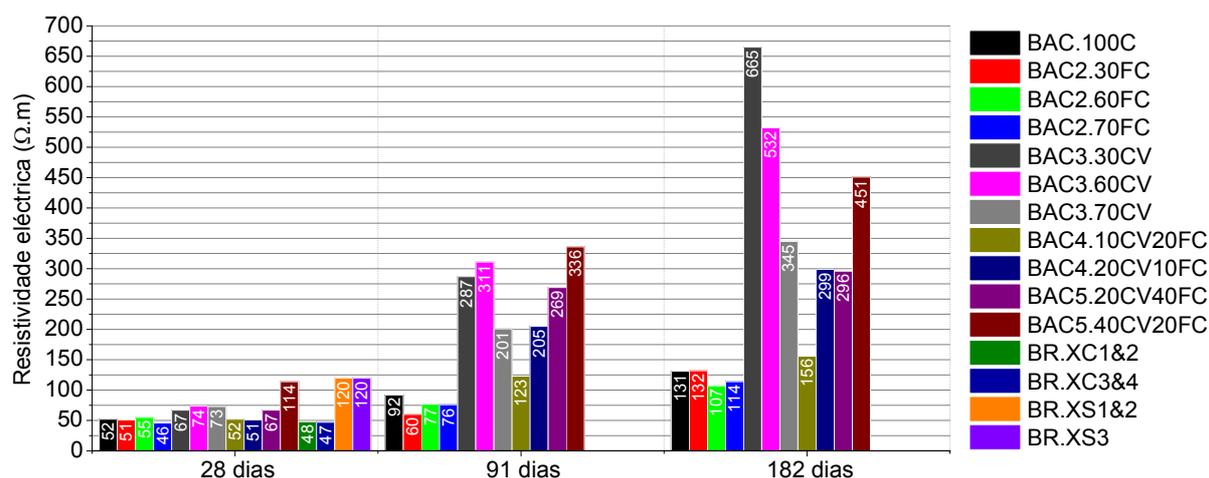


Figura 7. Resistividade eléctrica para todas as misturas.

As misturas ternárias apresentam uma evolução mais constante não só em função do tempo de cura mas também das diversas  $f_{ad}$ . É possível verificar que o BAC5,40CV20FC ( $f_{ad}$  total. de 60%) apresenta um excelente compromisso entre a evolução da resistividade eléctrica e o valor logo nas idades iniciais. Analisando os resultados das misturas ternárias, pode observar-se que o valor da resistividade eléctrica aparece também fortemente condicionado pela adição de CV. A presença de FC nestas misturas é praticamente inconsequente quando se compara, por exemplo, o BAC4.20CV10FC com o BAC5.20CV40FC. Relativamente aos BR, é igualmente notória a diferença entre os BR.XC (sem CV) e os BR.XS (com CV).

Comparando os resultados aqui apresentados referentes às misturas binárias de CV com os obtidos por *Dinakar et al.* [15] (em misturas com 30, 50 e 70 % de CV), é possível observar uma dispersão semelhante de resultados, apesar das diferenças em termos de ordem de grandeza. Já a evolução da resistividade eléctrica com o tempo de cura, nas misturas binárias com CV, é confirmada, por exemplo, no trabalho de *Sengul e Gjorv* [16].

Os resultados obtidos, em misturas binárias (com 20, 40 e 60% de CV) por *Gesoglu et al.* [17] aos 90 dias de cura, apresentam uma dispersão menor e uma ordem de grandeza inferior não só quando comparados com o presente trabalho mas também com os resultados obtidos por *Dinakar et al.* [15]. As principais diferenças observadas estão associadas à evolução da resistividade eléctrica com a variação da  $f_{ad}$  nas misturas binárias com CV para tempos de cura mais longos, nomeadamente 182 dias). Enquanto que no presente trabalho as misturas binárias de CV aos 182 dias apresentam um valor máximo de resistividade eléctrica para  $f_{ad}$  de 30%, observa-se nos autores consultados um aumento do referido valor com o aumento da  $f_{ad}$ , atingindo os valores máximos para  $f_{ad}$  superiores. As diferenças apresentadas podem ser explicadas por dois factores: estabelecimento das quantidades de amassadura e procedimento de ensaio. No presente trabalho, consideraram-se constantes os parâmetros  $V_p/V_s$  e  $V_m/V_g$ , o que provoca uma diminuição da razão W/C com o aumento da  $f_{ad}$ . O

procedimento de pré-condicionamento dos provetes, nomeadamente, a solução utilizada na saturação dos mesmos é diferente em praticamente todos os autores consultados. É frequente, por exemplo, alguns autores aproveitarem o processo de pré-condicionamento do ensaio de penetração de cloretos (solução saturada de hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  em água destilada) para avaliarem, nesses mesmos provetes, a resistividade eléctrica inicial ou utilizarem outras soluções, bem como diferentes pressões de contacto, o que produz resultados distintos dos obtidos com pré-condicionamento, neste caso, em água destilada e uma pressão de contacto correspondente a uma massa de 2 kg. As referidas diferenças podem ser verificadas no trabalho de *Newlands et al.* [18].

Para as misturas binárias com FC, é de referir o trabalho de *Ramezaniapour et al.* [6] que estuda diversas  $f_{ad}$ , com diferentes W/MC em 3 idades (28, 90 e 180 dias). Confirma-se que nestes BAC a resistividade eléctrica aumenta ligeiramente com o tempo de cura e que não varia de forma significativa com  $f_{ad}$ . A principal condicionante nestas misturas é a razão W/MC. A resistividade eléctrica diminui com o aumento da razão W/MC. Nas misturas com W/MC superior (na ordem de 0,55), a variação da resistividade eléctrica com o tempo de cura é ainda inferior às restantes misturas com W/MC inferior.

Não se encontraram resultados de misturas ternárias de CV e FC que permitissem a aferição dos resultados obtidos. No entanto, *Gesoglu et al.* [17] produziram misturas binárias ternárias e quaternárias de CV, sílica de fumo e escória de alto-forno e, tal como no presente trabalho, as misturas ternárias apresentam um comportamento muito satisfatório relativamente à resistividade eléctrica.

### 3.3. Análise geral

As principais diferenças encontradas nos resultados obtidos podem muito provavelmente ser explicadas pela diferença entre a estrutura porosa dos BAC incorporando diferentes tipos de adições (nomeadamente CV e FC) e respectivas percentagens de substituição, dado que, um maior volume de poros abertos implica uma maior capacidade de absorção de água.

Segundo o referido no ponto 2.2, a consideração como constantes dos parâmetros  $V_p/V_s$  e  $V_m/V_g$ , em volume absoluto implica que, com o aumento do volume de adições, aumente a razão W/C pela diminuição do cimento. Com o aumento da  $f_{ad}$  e conseqüente aumento da razão W/C, será expectável obter um BAC com uma estrutura porosa mais acessível e uma maior capacidade de absorção de água.

No caso dos BAC com CV e considerando a não aplicação de pressão no ensaio de absorção por capilaridade, é possível que a menor interligação entre o sistema de poros, nestes BAC, tenha influência de modo a diminuir a respectiva absorção de água porque, se o sistema de poros menores (de diâmetro inferior) estivesse mais interligado, ocorreria uma maior absorção devido às forças capilares que, nestes poros, são maiores.

A diferença na dispersão de resultados encontrada entre os dois ensaios analisados e o facto de não se encontrar uma correlação directa entre ambos para todos as idades e valores de  $f_{ad}$ , poderá estar relacionado com o pré-condicionamento utilizado para cada um dos ensaios. Sem, no entanto, excluir as diferenças entre os fenómenos de transporte envolvidos (absorção de água por capilaridade vs. transporte de electrões através de um electrólito embebido na estrutura porosa do betão), é de referir que, enquanto no caso da capilaridade os provetes são secos em estufa antes do início do ensaio e o mesmo é realizado sem o recurso a pressão exterior (a absorção dá-se exclusivamente por forças capilares), no ensaio de resistividade eléctrica os provetes são saturados com recurso a vácuo. Este último procedimento provocará provavelmente uma maior saturação da estrutura porosa tornando a mesma relativamente menos significativa para o fenómeno em estudo quando comparado com a capilaridade e obtendo-se, conseqüentemente, uma menor dispersão de resultados.

## 4. CONCLUSÕES

A permeabilidade do BAC bem como a sua resistividade eléctrica estão fortemente condicionada

pelos poros capilares e pela sua interligação.

Uma estrutura de poros capilares mais reduzida e com menor interligação contribui significativamente para a diminuição das propriedades de transporte de agentes agressivos, aumentando a durabilidade do BAC.

O aumento da resistividade eléctrica do BAC dificulta o movimento de electrões de zonas anódicas para zonas catódicas, diminuindo, conseqüentemente, a evolução prematura de processos de corrosão do aço.

A utilização de CV em vez de FC pode melhorar as referidas propriedades de transporte principalmente em idades mais avançadas. A mistura com resultados mais favoráveis é a BAC3.30CV. As misturas ternárias apresentaram resultados interessantes, principalmente na relação entre os valores elevados logo nas primeiras idades e os valores mais modestos mas ainda assim significativos em idades mais avançadas. As misturas com FC apresentaram resultados nas primeiras idades da mesma ordem de grandeza das misturas com CV. No entanto, aos 182 dias as diferenças apresentadas são significativas.

Com excepção dos BAC 60CV, 70CV, 60FC e 70FC, todos os BAC produzidos apresentaram coeficientes de capilaridade inferiores a todos os betões de referência produzidos de acordo com a especificação LNEC E 464. Os BAC 60CV, 70CV, 60FC e 70FC verificam apenas os valores correspondentes aos betões de referência das classes de exposição ambiental. XC.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Instituto Politécnico de Lisboa e do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa através do Programa de apoio à formação avançada de docentes do Ensino Superior Politécnico (PROTEC) concretizado pela atribuição da bolsa de Doutoramento com a referência SFRH/PROTEC/67426/2010. Agradece-se de igual modo o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e do centro de investigação - Instituto de Engenharia de Estruturas, Território e Construção (ICIST).

## REFERÊNCIAS

- [1] H. Okamura, K. Ozawa, M. Ouchi, Self-Compacting Concrete, fib Structural. Concrete, Vol. 1, Number 1, pp. 3-17, (2000).
- [2] W. Zhu, J.M. Bartos, Permeation properties of self-compacting concrete, Cement and Concrete Research Vol. 33, Issue 6, pp. 921-926, (2003).
- [3] V. Boel, K. Audenaert, G. Schutter, G. Heirman, L. Vandewalle, B. Desmet, J. Vantomme, Transport properties of self-compacting concrete with limestone filler or fly ash, Materials and structures Vol. 40, number 5, pp. 507-516, (2007).
- [4] P.M. Silva, J. de Brito, J. M. Costa, Utilização de betão auto-compactável (BAC) - uma análise de viabilidade económica, BE2008 - Encontro Nacional de Betão Estrutural. 2008, Guimarães - 5, 6 e 7 de Novembro (2008).
- [5] J.M. Khatib, Performance of self-compacting concrete containing fly ash, Construction and Building Materials, Vol. 22, Issue 9, pp. 1963-1971, (2008).
- [6] A. Ramezani-pour, E. Ghiasvand, I. Nickseresht, M. Mahdikhani, F. Moodi, Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes, Cement & Concrete Composites, Vol. 31, Issue 10, pp. 715-720 (2009).
- [7] M.I.A. Khokhar, E. Roziere, P. Turcry, F. Grondin, A. Loukili, Mix design of concrete with high content of mineral. additions: Optimisation to improve early age strength, Cement & Concrete Composites, Vol. 32, Issue 5, pp. 377-385 (2010).
- [8] G.C. Isaia, P. Furquim, A.L.G. Gastaldini, A statistical approach of binary and ternary concrete mixtures with mineral additions, Construction and Building Materials, Vol. 36, pp. 597-603, (2012).
- [9] M. Nepomuceno, Metodologia para a composição de betões auto-compactáveis, Tese de

- Doutoramento em Engenharia Civil na Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal. (2005), 734 p.
- [10] P. M. Silva, J. de Brito, J. M. Costa, Viability of two new mix design methodologies for SCC, *ACI Materials Journal*, Vol. 108, Number 6, pp. 579-588, (2011).
  - [11] P. Domone, Mix Design (Background Document) in *Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art Report*, RILEM Technical. Committee 174-SCC, RILEM Publications S.A.R.L. (2000), pp. 49-65.
  - [12] T. Luping, Guidelines for practical use of methods for testing the resistance of concrete to chloride ingress, EU-Project CHLORTEST (EU funded research Project under 5FP GROWTH programme), SP Swedish National. Testing and Research Institute, Boras, Sweden (2005), 271 p.
  - [13] R. Polder, Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete, RILEM TC 154-EMC: electrochemical techniques for measuring metallic corrosion, *Materials and Structures*, Vol. 33, pp. 603-611, (2000).
  - [14] S. Assié, G. Escadeillas, V. Waller, Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability, *Construction and Building Materials*, Vol. 21, issue 10, pp. 1909-1917, (2007).
  - [15] P. Dinakar, K.G. Babu, M. Santhanam, Durability properties of high volume fly ash self-compacting concretes, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, Issue 10, pp. 880-886, (2008).
  - [16] O. Sengul, O.E. Gjør, Electrical. Resistivity measurements for quality control during concrete construction, *ACI Materials Journal*, Vol. 105, Number 6, pp. 541-547, (2008).
  - [17] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, E. Özbay, Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, issue 5, pp. 1847-1854, (2009).
  - [18] M.D. Newlands, M.R. Jones, S. Kandasami, T.A. Harrison, Sensitivity of electrode contact solutions and contact pressure in assessing electrical. resistivity of concrete, *Materials and Structures*, Vol. 41, number 4, pp. 621-632, (2008).