

## MICROESTRUTURA E PERMEABILIDADE DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL PRODUZIDO EM MISTURAS BINÁRIAS E TERNÁRIA DE CINZAS VOLANTES E FÍLER CALCÁRIO



P. R. da Silva

Assistente  
ISEL  
Lisboa  
silvapm@dec.isel.pt



J. de Brito

Prof. Catedrático  
IST  
Lisboa  
jb@civil.ist.utl.pt

### SUMÁRIO

O betão auto-compactável (BAC) é cada vez mais utilizado como forma de melhorar alguns aspectos específicos ou pontuais da construção, sendo espectável que num futuro próximo venha a substituir o betão convencional (BC) devido às suas inúmeras vantagens tanto técnicas como de produtividade. As suas principais características no estado fresco são conseguidas essencialmente com alterações de dosagem dos diversos constituintes, nomeadamente o aumento do volume de argamassa (mais material ultra fino do tipo cimento e adições). No entanto, a utilização de volumes demasiadamente elevados de adições como cinzas volantes (CV) e/ou fíler calcário (FC) pode afectar substancialmente a estrutura porosa do betão e, conseqüentemente, a sua durabilidade. Nesse sentido, foi realizado um programa experimental para avaliar o efeito das CV e do FC em misturas binárias e ternárias de BAC na sua microestrutura. Com os resultados obtidos, chegou-se a conclusões relativas à durabilidade dos BAC em termos da sua permeabilidade e da microestrutura da estrutura porosa.

**Palavras-chave:** betão auto-compactável (BAC), durabilidade, microestrutura, permeabilidade, porosidade.

## 1. INTRODUÇÃO

As propriedades do betão auto-compactável (BAC) no estado fresco são o factor que mais os distingue de um betão convencional (BC).

No entanto, e devido às diferenças quanto às quantidades dos materiais constituintes e ao processo de colocação, a durabilidade do BAC é diferente da apresentada por um BC.

As diferenças referidas assentam na diminuição da relação entre as quantidades de agregado grosso e de argamassa com o conseqüente aumento do volume de pasta através da utilização de maiores volumes de material ultra fino (cimento + adições) e adjuvantes (tipo superplastificantes e/ou moduladores de viscosidade) e no adequado controlo da máxima dimensão de agregado. Existem razões, tanto de carácter técnico e económico como até ecológicas (utilização dos recursos de modo a garantir um crescimento sustentável), para a utilização de maiores quantidades de adições. No entanto, se estas forem demasiadamente elevadas, tal pode afectar substancialmente a durabilidade do BAC, em particular a sua permeabilidade, a qual é fortemente influenciada pela sua estrutura porosa, ou seja, pela sua porosidade.

Considerando que as condições de transporte dos agentes de degradação do betão dependem fortemente da sua estrutura porosa, importa estudar em particular o comportamento de BAC produzidos com recurso a diversas combinações de adições, nomeadamente cinzas volantes (CV) e fíler calcário (FC), relativamente à permeabilidade da referida estrutura.

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.

A avaliação das propriedades de microestrutura e permeabilidade dos betões produzidos foi feita através dos ensaios de determinação da profundidade de penetração de água sob pressão, determinação da absorção de água por imersão (à pressão atmosférica), determinação da absorção de água por capilaridade, porosimetria por intrusão de mercúrio e interpretação de imagens obtidas por análise com microscópio electrónico de varrimento em lâminas delgadas e em superfícies de fractura.

## 2. MATERIAIS 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: 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 de acordo com as normas NP EN 450-1 e NP EN 450-2, com massa volúmica de 2300 kg/m<sup>3</sup> e FC de acordo com a especificação LNEC E 466, com massa volúmica de 2720

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>,  $D_{max}$  de 11 mm e absorção de água de 1,46%, e uma brita 2 com massa volúmica de 2640 kg/m<sup>3</sup>,  $D_{max}$  de 20 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 as NP EN 934-1 e NP EN 934-2 (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 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, que são apresentadas no Quadro 1.

As quantidades de amassadura utilizadas foram obtidas de acordo com o método apresentado por Nepomuceno [1], já utilizado em diversas aplicações [2]. Resumidamente, o método propõe uma nova metodologia de cálculo das quantidades de amassadura de BAC baseada nos métodos de Okamura et al. [3] e da JSCE [4] 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. Este método encontra-se devidamente explicado na tese de doutoramento do primeiro autor [1], existindo também diversas aplicações práticas do mesmo, nomeadamente, a verificação da sua aplicabilidade no trabalho apresentado por Silva e Brito [2].

Relativamente ao estabelecimento das quantidades de amassadura apresentadas no Quadro 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 compacidade 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 dependeu 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 apresentado por Nepomuceno e Oliveira [5] e por Silva e Brito [2; 6].

Quadro 1. Quantidade de amassadura e propriedades básicas.

Quantidades de amassadura [kg/m <sup>3</sup> ]	BAC 1 100C	BAC 2 30FC	BAC 2 60FC	BAC 2 70FC	BAC 3 30CV	BAC 3 60CV	BAC 3 70CV	BAC 4 10CV20FC	BAC 4 20CV10FC	BAC 5 20CV40FC	BAC 5 40CV20FC
CEM I 42,5 R	707	512	297	222	503	290	218	506	506	297	293
Cinzas volantes (CV)	---	---	---	---	158	318	373	53	106	109	215
Fíler calcário (FC)	---	190	386	449	---	---	---	125	63	257	127
Superplastificante ( $S_p$ )	7,4	4,6	2,9	2,7	4,6	3,5	3,4	4,6	4,6	3,2	3,0
Água	189	175	168	170	183	180	178	180	180	168	175
Areia ( $0,6A_{F0/1} + 0,4A_{G0/4}$ )	723	747	758	756	735	741	743	740	740	759	748
Brita ( $0,6B_1 + 0,4B_2$ )	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700
W/C	0,27	0,34	0,57	0,76	0,36	0,62	0,82	0,36	0,36	0,57	0,60
W/MC	0,27	0,34	0,57	0,76	0,28	0,30	0,30	0,32	0,29	0,41	0,35
W/MF	0,27	0,25	0,25	0,25	0,28	0,30	0,30	0,26	0,27	0,25	0,28
Síntese das propriedades básicas											
Espalhamento [mm]	770	675	678	620	648	613	595	775	738	685	645
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
$f_{cm,7d}$ [MPa]	64,6	66,7	38,5	26,4	58,8	34,4	21,6	60,7	62,7	32,6	31,6
$f_{cm,28d}$ [MPa]	83,6	70,1	42,3	30,5	68,4	54,0	35,3	63,4	70,9	47,8	49,1
$f_{cm,91d}$ [MPa]	85,5	70,0	42,8	32,6	71,7	62,5	48,9	70,4	75,8	57,9	56,9
$f_{cm,182d}$ [MPa]	88,2	74,1	49,2	35,5	69,5	59,9	49,6	71,1	74,7	59,9	55,9

### 2.3 Descrição dos ensaios e preparação de provetes

Permeabilidade:

Os coeficientes de permeabilidade foram determinados com recurso à expressão de *Valenta* [7], utilizando os valores de penetração de água sob pressão determinados de acordo com a NP EN 12390-8, aos 91 dias de idade. Para cada mistura em estudo, foram utilizados 3 provetes cúbicos com 150 x 150 x 150 mm, saturados, onde foi aplicada água a 5 bar de pres-

são durante  $72 \pm 2$  horas. No final, os provetes foram seccionados em duas metades, a frente de penetração de água foi marcada e a máxima penetração de água foi medida.

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. Este ensaio foi realizado aos 28, 91 e 182 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 são acondicionados numa estufa a uma temperatura de  $40 \pm 5$  °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 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).

$$A(t) = S \times t^{0.5} \quad (1)$$

Absorção de água por imersão:

A absorção de água (volume total de poros acessíveis ou porosidade “aberta”) foi determinada de acordo com o procedimento descrito na especificação LNEC E 394, aos 91 dias de idade, em 3 provetes cúbicos com 100 x 100 x 100 mm. Os referidos valores foram obtidos com recurso a três pesagens, nomeadamente: massa do provete na água (pesagem hidrostática) saturado por imersão em água até massa constante (variação inferior a 0,1%), massa do provete saturado e massa do provete seco em estufa a  $105 \pm 5$  °C até massa constante (variação inferior a 0,5%).

MEV:

A microscopia electrónica de varrimento em modo de electrões retrodifundidos de amostras em superfície polida permite a diferenciação dos poros e das partículas de cimento anidro das restantes fases através das diferenças de brilho entre as mesmas. Utilizando o software *Image J*, foi possível obter para cada amostra um histograma de níveis de cinzento de onde se determinou a porosidade através do estabelecimento de um limite arbitrado dos poros, correspondente à intersecção da tangente à porção superior da fase OPH (produtos indiferenciados de hidratação) e a tangente inicial do histograma de níveis de cinzento [8] (apresenta-se, na

Figura 1, um exemplo do referido processo de determinação do limite da porosidade, aplicado no histograma da mistura BAC2.30FC). Este ensaio foi realizado aos 91 dias.

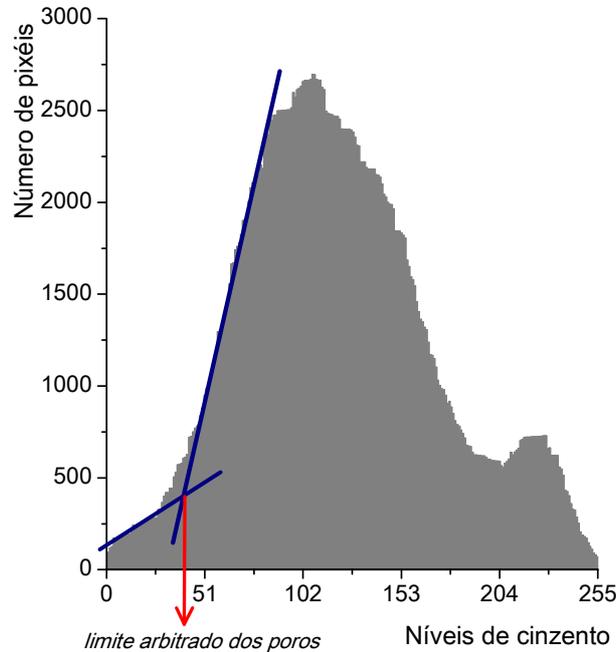


Figura 1. Histograma de níveis de cinzento referente à mistura BAC2.30FC.

MIP:

O ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP - *Mercury intrusion porosimetry*) é feito com recurso ao porosímetro *AutoPore IV 9500 (Micrometrics)* com duas câmaras de baixa pressão e uma de alta, capaz de produzir pressões até 33x10<sup>3</sup> psia. A interpretação dos resultados recorre à aplicação de um modelo de poros cilíndricos que, através da equação de *Washburn* (2) [9], permitiu estimar o diâmetro dos poros, cilíndricos, por intrusão de Hg a cada patamar de pressão aplicada. Este ensaio foi realizado aos 91 dias, em amostras produzidas especificamente para esse afeito, isto é, sem a mistura de agregado grosso.

$$D = \frac{-4\gamma \cos \phi}{p} \quad (2)$$

Em que: D = diâmetro do poro cilíndrico intrudido;  $\gamma$  = tensão superficial do Hg;  $\phi$  = ângulo de contacto do Hg com a amostra; P = pressão aplicada.

### 3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

#### 3.1 Absorção de água por imersão

Analisando os resultados apresentados na Figura 2, verifica-se que a absorção de água por imersão aumenta de forma significativa com o aumento do valor da  $f_{ad}$  (percentagem unitária

de substituição do cimento pela adição) e, conseqüentemente, com o aumento da razão W/C. Verifica-se igualmente que o referido aumento da absorção com o valor da  $f_{ad}$  é independente do tipo de adição utilizada. Por comparação dos valores obtidos, para uma mesma  $f_{ad}$ , entre as misturas binárias (FC e CV) e misturas ternárias, verifica-se diferenças perfeitamente negligenciáveis.

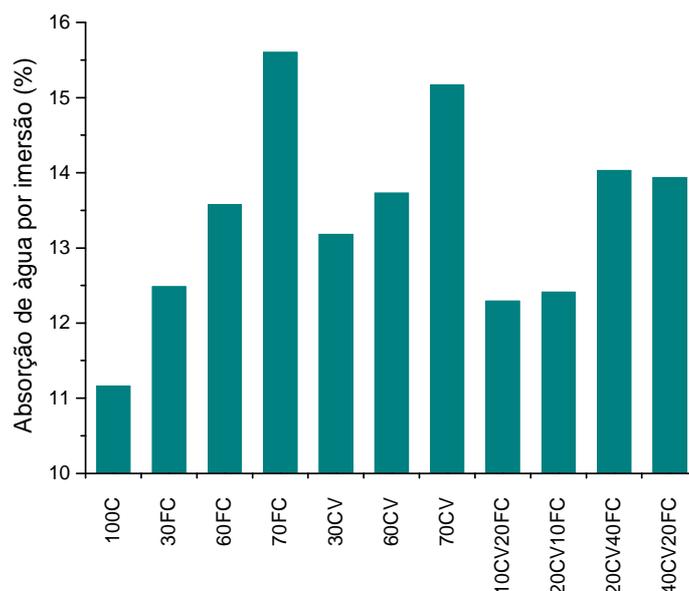


Figura 2. Resultados do ensaio de absorção de água por imersão (91 dias).

Da análise da Figura 2 e do Quando 1, é possível afirmar que a razão W/C exerce uma influência significativa na variação da absorção de água por imersão (volume total de poros acessíveis), confirmado pelos resultados semelhantes entre as misturas binárias com FC e CV. A mesma analogia poderá ser feita entre os resultados apresentados pelas misturas binárias e ternárias. No mesmo sentido, Assié [10] refere que a porosidade aberta do betão, avaliada pela absorção de água por imersão, é um parâmetro directamente ligado à resistência mecânica do betão e necessariamente à sua razão W/C. Esta influência poderá estar associada ao facto de a porosidade do betão aumentar com o acréscimo da razão W/C, ou seja, quanto maior for a razão W/C maior será o volume de poros da matriz cementícia, aumentando necessariamente o volume de poros acessíveis.

Resultados semelhantes aos do presente trabalho foram obtidos por Dinakar et al. [11] em misturas binárias com percentagens de substituição de cimento por CV até 70%. Isto ocorre apesar de o procedimento de ensaio utilizado ser ligeiramente diferente (está de acordo com a norma ASTM C 642) e, portanto, os valores apresentados pelos autores serem referentes a absorções após 72 horas de imersão e não até massa constante. Estes autores salientam o aumento da absorção de água por imersão com o aumento da percentagem de substituição de cimento por adições.

### 3.2 MEV em modo de electrões retrodifundidos

A avaliação da porosidade com recurso à análise de imagens considera, além da porosidade aberta, os poros fechados. Comparando a porosidade determinada por imersão em água e a obtida por análise de imagens, verifica-se que esta última apresenta de forma consistente valores inferiores aos da imersão. Esta diferença pode ser explicada pelo facto de o método referente à análise de imagens apenas avaliar uma gama relativamente reduzida de diâmetro de poros. Este método mede essencialmente a porosidade relativa a poros de dimensão superior a 0,2  $\mu\text{m}$ , podendo deixar de parte igualmente poros de maior dimensão devido, em muitos casos, a uma amostragem desadequada à ampliação utilizada. Já o método de imersão em água abrange uma gama mais alargada de diâmetros de poros, incluindo desde micróporos até vazios com milímetros, apesar das conhecidas limitações associadas à dificuldade da penetração da água à pressão atmosférica em amostras de betão com uma microestrutura mais densa e compacta.

Com a análise dos resultados apresentados na Figura 3, é possível verificar que a porosidade aumenta com a  $f_{ad}$  e, conseqüentemente, com a razão W/C. Verifica-se que as misturas binárias com FC apresentam valores ligeiramente inferiores aos obtidos pelas binárias com CV. Como é possível constatar na Figura 3, a variação da porosidade é praticamente linear com o aumento da  $f_{ad}$ . No entanto, é de salientar o valor referente às misturas BAC3.70CV, que apresentam uma variação significativa relativamente às restantes misturas com CV, bem como às misturas com FC.

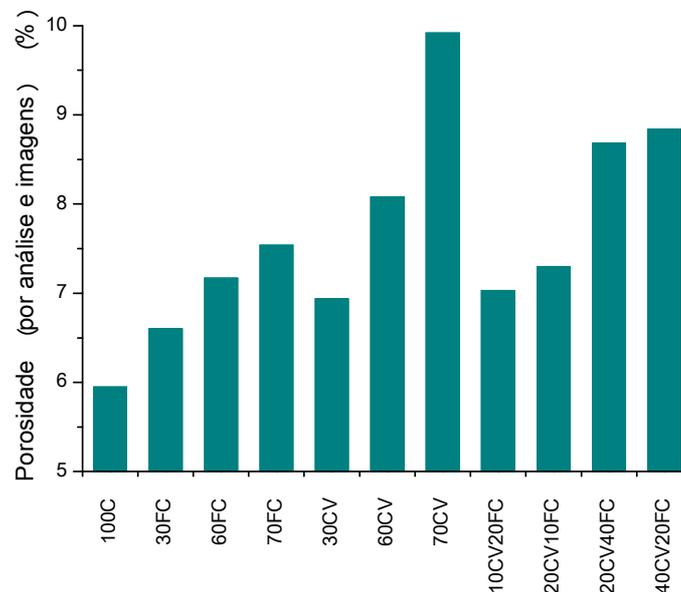


Figura 3. Resultados da porosidade por análise de imagens obtidas em modo de electrões retrodifundidos (91 dias).

Verifica-se que as misturas ternárias com  $f_{ad}$  global de 30% apresentam valores de porosidade perfeitamente enquadrados com os obtidos nas misturas binárias com  $f_{ad}$  equivalente. No entanto, as misturas ternárias com  $f_{ad}$  global de 60% apresentam valores superiores aos relativos às misturas binárias com  $f_{ad}$  equivalente.

### 3.3 Absorção de água por capilaridade

São apresentados, nas Figuras 4, 5 e 6, os valores médios dos resultados obtidos para a absorção capilar para as três idades estudadas (28, 91 e 182 dias). Com os valores da absorção capilar, foram determinados os respectivos coeficientes de absorção, cujos valores são apresentados na Figura 7.

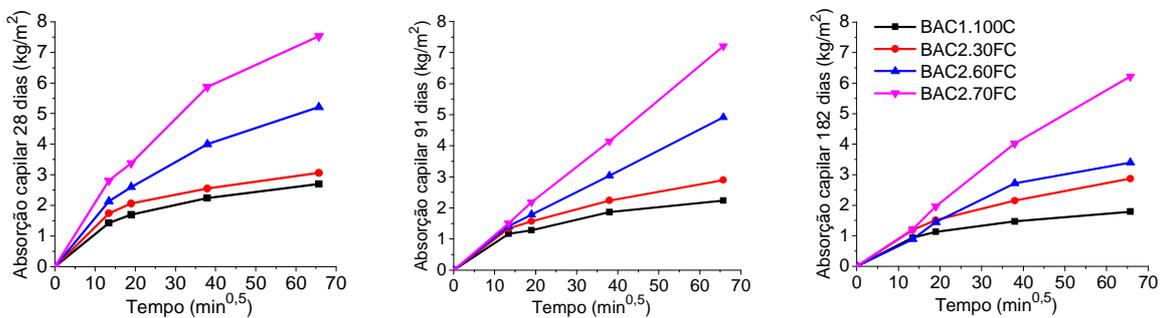


Figura 4. Capilaridade aos 28, 91 e 182 dias para as misturas binárias com FC.

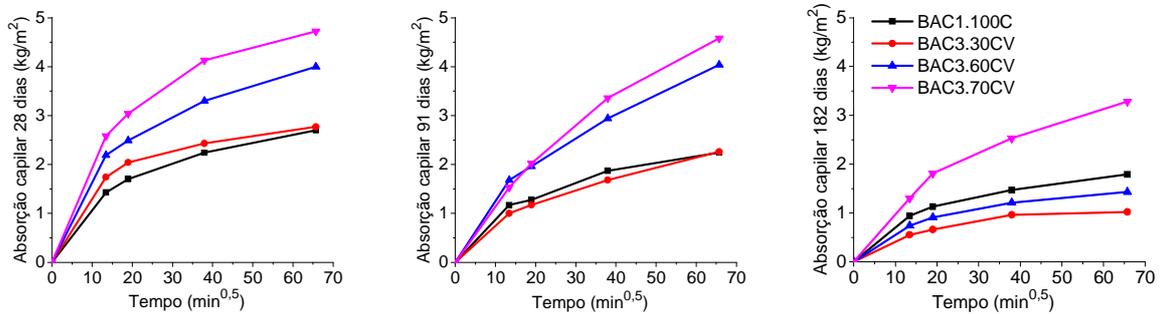


Figura 5. Capilaridade aos 28, 91 e 182 dias para as misturas binárias com CV.

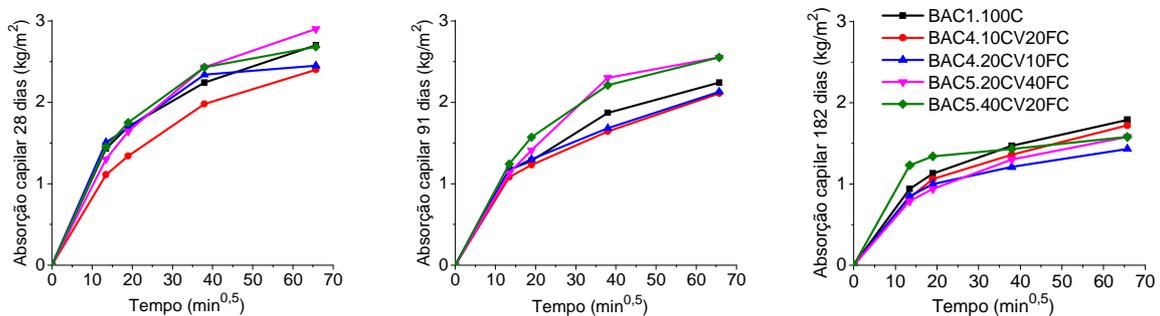


Figura 6. Capilaridade aos 28, 91 e 182 dias para as misturas ternárias.

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. Tal pode ser

observado na ordem de grandeza dos valores inferiores, dos BAC com CV, quando comparados com os BAC 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 nas 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.

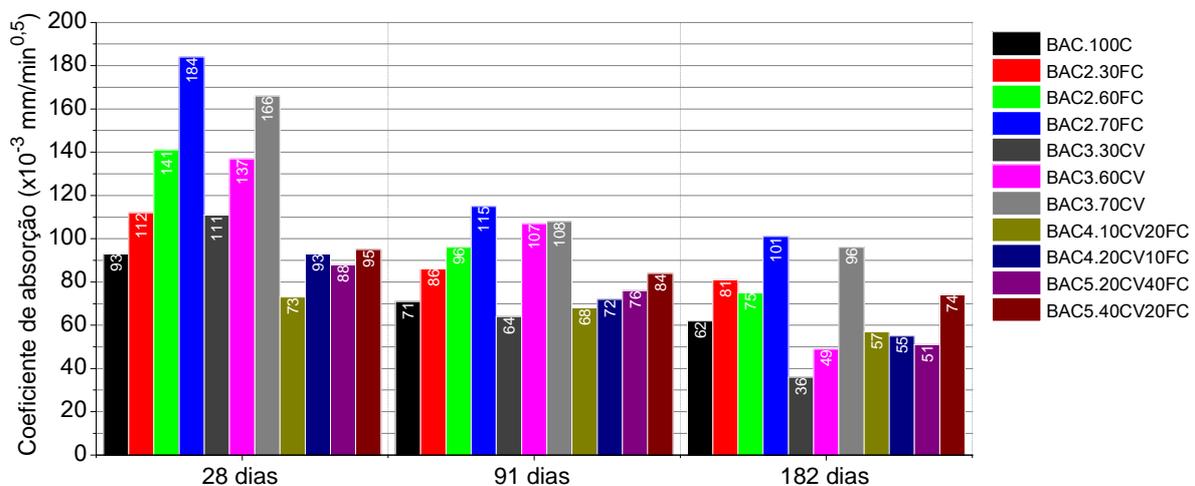


Figura 7. Coeficiente de absorção por capilaridade para todas as misturas.

Salienta-se, de igual modo, o comportamento, para períodos de cura mais prolongados (182 dias), das misturas binárias BAC3 (com CV), em especial para  $f_{ad}$  de 30% e 60% que, inclusivamente, apresentam absorções capilares inferiores às obtidas pelas misturas BAC1.100C (só com cimento). Todavia, as misturas ternárias apresentam o referido bom comportamento logo nas primeiras idades (28 dias).

O principal motivo para os resultados apresentados pelas misturas ternárias é, provavelmente, o efeito de sinergia entre as CV e o FC e o consequente refinamento da microestrutura ou, como referido por Mounanga et al. [12], a substituição de CV por FC, que acelera o processo de hidratação. Os resultados obtidos por Mounanga et al. [12], no seu trabalho sobre a melhoria da reactividade, nas primeiras idades, de sistemas cimentícios com CV e escórias de alto-forno utilizando FC, confirmam os referidos valores, isto é, a utilização de cimento com FC e CV torna possível a obtenção de misturas ternárias com desempenhos melhorados por comparação, por exemplo, com as misturas binárias contendo apenas CV. A melhor reactividade das misturas ternárias BAC4 e BAC5, face às binárias BAC3 (com CV), pode ser explicada principalmente pela aceleração do processo de hidratação do cimento, relacionada com o efeito de nucleação das partículas de FC. Mounanga et al. [12] afirmam

que esta aceleração da hidratação envolve uma produção mais rápida de  $\text{Ca(OH)}_2$  e, desse modo, um aumento das reacções pozolânicas.

Nas misturas com FC, os resultados apresentados confirmam os obtidos, por exemplo, por Ramezani pour et al. [13]. Estes 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 [15] 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 os BAC com CV apresentarem resultados ligeiramente mais favoráveis.

### 3.4 Penetração de água sob pressão

Da análise da Figura 8, verifica-se que os valores inferiores do coeficiente de permeabilidade são obtidos para as misturas BAC1.100C, BAC2.30FC, BAC3.30CV e todas as ternárias, com resultados sempre inferiores a  $10^{-13}$  m/s. As restantes misturas apresentam coeficientes de permeabilidade superiores aos referidos mas ainda assim com valores globais muito reduzidos, sempre inferiores a  $10^{-12}$  m/s. Os resultados apresentados indicam uma compacidade elevada da matriz da pasta e um sistema de poros pouco interligado. Em geral, verifica-se que os resultados de permeabilidade à água vão ao encontro dos resultados tanto da absorção de água por imersão como do coeficiente de capilaridade e, tal como observado para a capilaridade, as misturas ternárias apresentam resultados de permeabilidade extremamente favoráveis. Considerando os critérios de qualidade do betão em função da sua permeabilidade apresentados no CEB [16], salienta-se que todas as misturas produzidas no presente trabalho podem ser consideradas de boa qualidade, isto é, apresentam coeficientes de permeabilidade inferiores a  $10^{-12}$  m/s.

Os resultados do coeficiente de permeabilidade obtidos por Boel et al. [17] são significativamente superiores aos do presente trabalho. Os autores comparam um BC com várias misturas binárias de BAC com FC e CV e referem, por exemplo, para as misturas com CEM I 42,5 R e  $f_{ad}$  de, aproximadamente, 45%, um coeficiente de permeabilidade de  $10 \times 10^{-12}$  m/s para o BC, de  $10.5 \times 10^{-12}$  m/s para o BAC com FC e  $6.3 \times 10^{-12}$  m/s para o BAC com CV. É de salientar a reduzida diferença obtida, entre o BC e os BAC com FC, para o coeficiente de permeabilidade, relativamente ao referido por outros autores [18]. Já Reinhardt e Jooss [19] referem valores idênticos para misturas equivalentes às de Boel et al. [17] relativamente às misturas com CV. Os autores apresentam coeficientes de permeabilidade, para BAC com CV, aproximadamente 30% inferiores aos valores apresentados por BC igualmente com CV.

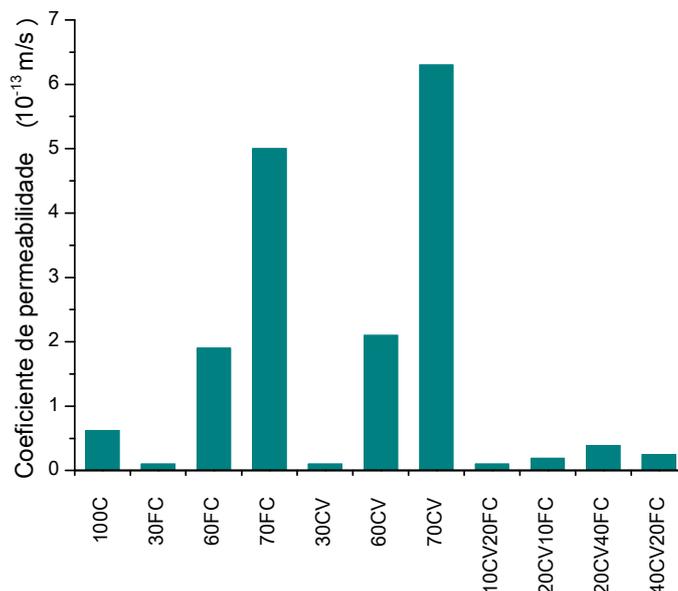


Figura 8. Coeficiente de permeabilidade para todas as misturas (91 dias).

### 3.5 Porosimetria por intrusão de mercúrio

De acordo com o expectável, é possível observar nos gráficos da Figura 9 que, com o aumento do valor de  $f_{ad}$ , se obtém de igual modo um aumento na porosidade total bem como no respectivo valor médio da dimensão dos poros, para todas as misturas estudadas.

A porosidade apresentada pelas misturas binárias com FC é inferior às correspondentes com CV. Como é possível observar, a referida diferença entre as misturas binárias acentua-se para os valores de  $f_{ad}$  superiores (iguais a 70%). Os valores de porosidade apresentados pelas misturas ternárias são coerentes com os observados nas binárias, ou seja, para cada um dos valores de  $f_{ad}$ , a porosidade das ternárias está entre os valores obtidos para as correspondentes misturas binárias.

Da análise das figuras, verifica-se que a incidência da distribuição da dimensão dos poros não segue a mesma tendência observada para a sua porosidade total. Desse modo, as misturas que apresentam os menores diâmetros são a BAC1.100C (só com cimento), as BAC3 (com CV) e a ternária BAC5.40CV20FC que apresenta a menor dimensão de poros. Já as misturas BAC2 (com FC) apresentam, para as  $f_{ad}$  de 60% e 70%, os valores máximos de diâmetro dos poros. Da análise das curvas de distribuição da dimensão dos poros (gráficos da direita), observa-se uma incidência muito acentuada numa gama relativamente estreita de diâmetros de poros que varia entre 0,01 e 0.1  $\mu\text{m}$ , para todas as misturas estudadas.

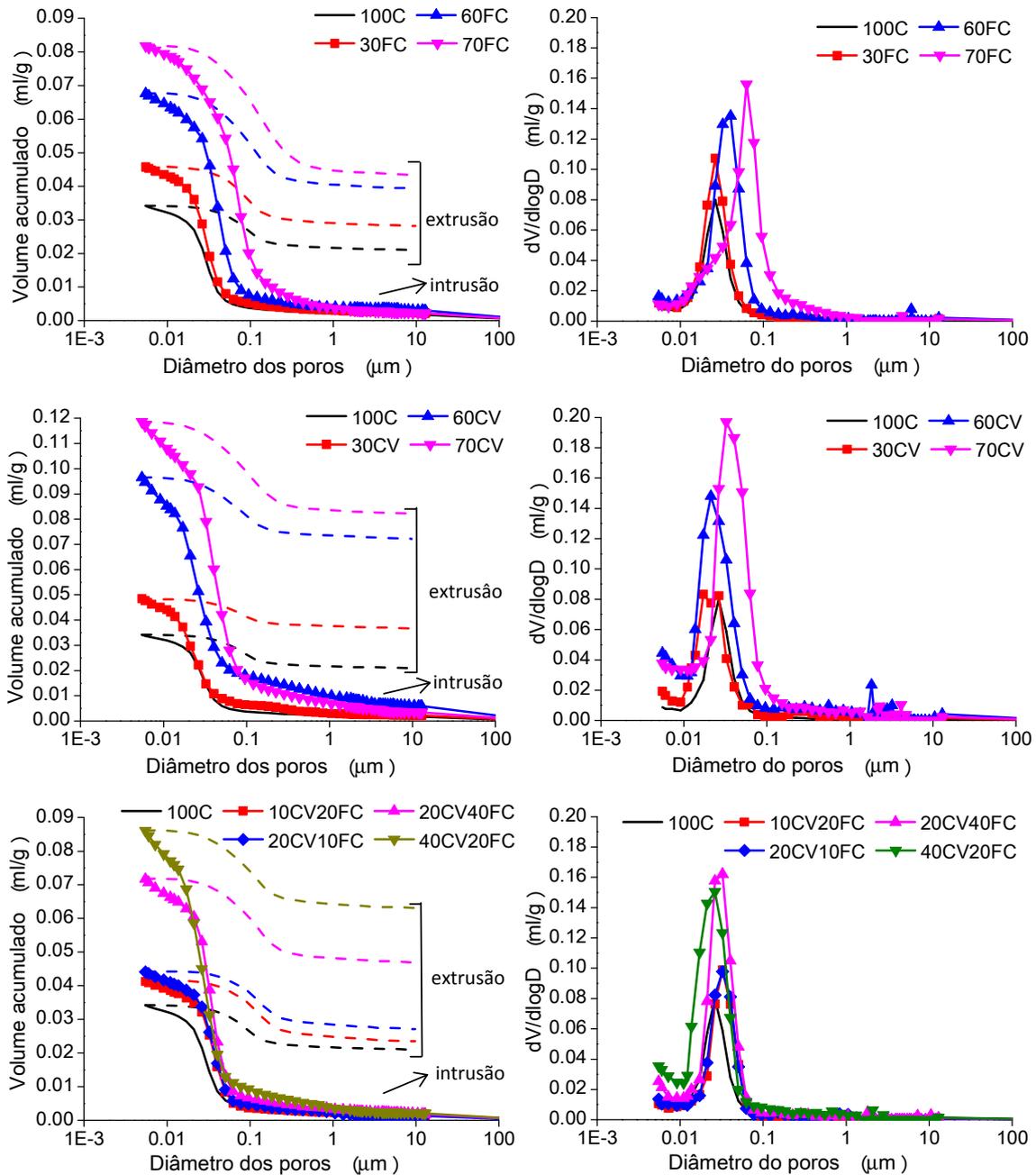


Figura 9. Esq<sup>a</sup>: volumes acumulados de intrusão e de extrusão de Hg; Dt<sup>a</sup>: Log volume diferencial de intrusão de Hg - (91 dias).

Já nos gráficos da esquerda, referentes aos volumes acumulados de intrusão e extrusão, é possível observar a existência de um volume significativo de Hg retido nas amostras após o ciclo intrusão-extrusão. Tal poderá indicar a presença de um volume mais significativo de poros de maior dimensão, em contacto com o exterior através de poros de menor dimensão (micróporos ou poros capilares). Numa situação ideal, os poros de maior dimensão seriam preenchidos com Hg a uma pressão mais reduzida, ao que empiricamente corresponderia

um diâmetro superior de poros. De modo análogo, os poros de menor dimensão seriam preenchidos com Hg a uma pressão mais elevada ao que, de acordo com o referido, corresponderia um diâmetro inferior de poros. Não obstante, estando esses poros de maior dimensão ligados ao exterior da amostra por outros de menor dimensão, não é possível que os primeiros (de maior dimensão) fiquem totalmente preenchidos por Hg sem que valores de pressão superiores ao necessário sejam atingidos, de modo a que se preencham em primeiro lugar os poros de menor dimensão. Só depois de atingidos valores mais elevados de pressão é que os poros de ambas as dimensões são preenchidos, ficando, no entanto, o seu volume total de Hg associado a pressões directamente relacionadas com diâmetros de poros inferiores aos realmente existentes na amostra.

#### 4. CONCLUSÕES

A mistura só com cimento (BAC1.100C) é a que apresenta uma microestrutura mais densa e homogénea, incluindo na zona de interface agregado-pasta, com menos vazios ou poros de maior dimensão.

As misturas binárias com FC (BAC2) apresentam uma microestrutura densa, relativamente pouco porosa, principalmente quando comparadas com as misturas BAC3. Com o aumento do valor da  $f_{ad}$ , observa-se um aumento do volume de vazios com dimensões, ainda assim, inferiores a aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ .

Nas misturas BAC3 (com CV), foi possível constatar um aumento significativo dos vazios (dimensão  $\geq 10 \mu\text{m}$ ).

As misturas ternárias apresentaram uma microestrutura semelhante ao observado nas misturas binárias com  $f_{ad}$  equivalente.

Com os elementos apresentados, é possível afirmar que os BAC produzidos com FC são os que exibem uma porosidade total inferior mas com poros de maior dimensão, enquanto nos BAC com CV se observa o oposto, ou seja, uma porosidade superior mas com uma menor dimensão de poros. Os resultados obtidos para as misturas ternárias estão enquadrados nos obtidos para as binárias com valores de  $f_{ad}$  equivalentes mas com níveis de permeabilidade à água muito baixos, demonstrando em geral um comportamento extremamente favorável face aos mecanismos estudados.

O referido pode igualmente ser confirmado pela análise dos coeficientes de absorção capilar, onde é possível verificar que, para as misturas com coeficientes de absorção mais elevados (indicando uma absorção mais rápida), será expectável uma maior ocorrência de poros capilares com uma dimensão superior (misturas binárias com FC). Já para as misturas com coeficientes de absorção mais reduzidos (indicando uma absorção mais lenta), será expectável uma maior ocorrência de poros capilares mais finos, ou seja, tal como referido inicialmente para as misturas BAC3 (com CV), uma rede porosa caracterizada por um maior número de

macroporos ligados ao exterior e também entre si por uma rede de micróporos ou poros capilares de menor dimensão relativamente às misturas BAC2 (com FC).

## 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] Nepomuceno M. - Metodologia para a composição de betões auto-compactáveis, *Tese de Doutoramento em Engenharia Civil na Universidade da Beira Interior*, Covilhã, Portugal, 2005, 734 p.
- [2] Silva P.M.; Brito J. de; Costa J. M. - Viability of two new mix design methodologies for SCC, *ACI Materials Journal*, Vol. 108, Number 6, 2011, pp. 579-588.
- [3] Okamura H.; Ozawa K.; Ouchi M. - Self-compacting concrete, *fib. Structural Concrete*, Vol. 1, Number 1, 2000, pp. 3-17.
- [4] JSCE (Japan Society of Civil Engineers) - Recommendation for construction of self-compacting concrete, *International Workshop on Self-compacting Concrete*, Kochi, Japan, 1998, pp. 417-437.
- [5] Nepomuceno M.; Oliveira L. - Parameters for self-compacting concrete mortar phase, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, Mich., SP-253, July, 2008, pp. 323-340.
- [6] Silva, P.; Brito, J. de - Electrical resistivity and capillarity of self-compacting concrete with incorporation of fly ash and limestone filler, *Advances in Concrete Construction*, V. 1, n.º 1, Techno Press, Korea, 2013, ISSN: 2287-5301, pp. 65-84.
- [7] Valenta O. - Durability of Concrete, *2<sup>nd</sup> RILEM Symposium*, in Prague, *RILEM Bulletin, Matériaux et Constructions*, Vol. 3, Issue 5, 1970, pp. 333-345.
- [8] Wong H. S.; Buenfeld N. R.; Head M. K. - Estimating transport properties of mortars using image analysis on backscattered electron images, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, Issue 8, 2006, pp. 1556-1566.
- [9] Beaudoin J. J.; Marchand J. - Pore structure, chapter 14, in: *Handbook of analytical techniques in concrete science and technology*, Ramachandran, Beaudouin (editors), Noyes Publications, Park Ridge, ISBN 0-8155-1437-9, 2001, pp. 528-628.

- [10] Assié S. - Durabilité des bétons autoplaçants, *Thèse de doctorat*, L'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Toulouse, France, 2004, 254 p.,.
- [11] Dinakar P.; Reddy M. K.; Sharma M. - Behaviour of self-compacting concrete using Portland pozzolan cement with different levels of fly ash, *Materials and Design*, Technical report, Vol. 46, 2013, pp. 609-616.
- [12] Mounanga P.; Khokhar M. I. A.; Hachem R.; Loukili A. - Improvement of the early-age reactivity of fly ash and blast furnace slag cementitious systems using limestone filler, *Materials and Structures*, Vol. 44, Issue 2, 2011, pp. 437-453.
- [13] Ramezaniyanpour A.; Ghiasvand E.; Nickseresht I.; Mahdikhani M.; Moodi F. - Influence of various amounts of limestone powder on performance of Portland limestone cement concretes, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 31, Issue 10, 2009, pp. 715-720.
- [14] Assié S.; Escadeillas G.; Waller V. - Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability, *Construction and Building Materials*, Vol. 21, issue 10, 2007, pp. 1909–1917.
- [15] Zhu W.; Bartos J. M. - Permeation properties of self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, Issue 6, pp. 921-926, (2003).
- [16] CEB (Comité Euro-International du Béton) - Durable concrete structures (2<sup>nd</sup> ed.), *CEB Design Guide*, Edition Thomas Telford, London, UK, ISBN: 978-0-7277-3549-2, 1992, 112 p.
- [17] Boel V.; Audenaert K.; Schutter G.; Heirman G.; Vandewalle L.; Desmet B.; Vantomme J. - Transport properties of self-compacting concrete with limestone filler or fly ash, *Materials and Structures*, Vol. 40, Issue 5, 2007, pp. 507–516.
- [18] Audenaert K.; Schutter G. - Relation between vacuum water absorption and porosity of self-compacting concrete, *5<sup>th</sup> international RILEM symposium on self-compacting concrete*, Ghent, Belgium, RILEM Publications, 2007, pp. 701-706.
- [19] Reinhardt H. W.; Jooss M. - Permeability and diffusivity of self-compacting concrete as function of temperature, *3<sup>rd</sup> international RILEM symposium on self-compacting concrete*, (PRO 33), Reykjavik, Iceland, RILEM Publications, 2003, pp. 808–817.