

Propriedades mecânicas e retração de BAC produzido em misturas binárias e ternárias de cinzas volantes e fíler calcário



Pedro Silva ¹



Jorge de Brito ²

RESUMO

A necessidade de redução do consumo de cimento, motivada pela crescente preocupação com as emissões de CO₂ associadas ao seu processo de fabrico, tem provocado um aumento significativo da utilização de adições na obtenção de cimentos compostos e na produção do próprio betão. O BAC, devido essencialmente à sua necessidade de incorporar quantidades significativas de material ultrafino (cimento e adições), apresenta um grande potencial para a utilização destes subprodutos, como, por exemplo, cinzas volantes (CV) e fíler calcário (FC), em substituição parcial do cimento. No entanto, o recurso a quantidades significativas de adições, com o conseqüente aumento do volume de pasta e diminuição do agregado grosso, vai alterar a estrutura dos poros capilares do BAC o que provocará uma mudança na retração. Sendo a retração, por secagem, um dos principais factores de deterioração das estruturas de betão, inclusive de BAC, há todo o interesse em discutir o tema.

Desse modo, foi realizada uma campanha experimental para avaliar o efeito na resistência mecânica e na retração da utilização de quantidades elevadas de CV e FC em misturas binárias e ternárias de BAC. O presente estudo centrou-se essencialmente na avaliação da resistência à compressão uniaxial, do módulo de elasticidade secante e da extensão total de retração.

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.

Palavras-chave: betão auto-compactável; retração; resistência mecânica; cinzas volantes; fíler calcário.

¹ Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, Área Departamental de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal. silvapm@dec.isel.ipl.pt

² Instituto superior Técnico, Universidade de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos Lisboa, Portugal. jb@civil.ist.utl.pt

1. INTRODUÇÃO

A utilização de BAC pode constituir um contributo importante no sentido de atingir um maior desenvolvimento sustentável, nomeadamente pela incorporação de quantidades significativas de subprodutos de outras indústrias (como adições) e pelo potencial aumento da durabilidade das estruturas que conduzirá a maiores ciclos de vida com uma diminuição tanto dos custos globais das estruturas como dos materiais associados às demolições.

A necessidade específica de auto-compactação do BAC, isto é, de atingir uma elevada capacidade de escoamento, de preenchimento, de deformabilidade, de passagem, bem como uma elevada resistência à segregação, obriga necessariamente à diminuição do volume de agregado grosso e ao aumento do volume de finos e de adjuvantes (essencialmente superplastificantes).

O referido aumento do volume de material fino, conseguido exclusivamente à custa de cimento, teria como principais consequências o aumento significativo do custo global do BAC, do seu calor de hidratação e possíveis consequências em propriedades como a fissuração e a retracção. Em consequência, são habitualmente incorporadas quantidades significativas de adições, em substituição de parte do cimento, para melhorar as propriedades de trabalhabilidade, reduzir a produção de calor de hidratação e diminuir o seu custo global.

Nesse sentido, considera-se existir ainda a possibilidade de aumentar as quantidades de adições utilizadas, quer em misturas binárias de cimento e adição, quer em composições ternárias com a mistura de cimento e duas adições. É, deste modo, possível combinar a necessidade de maior volume de material fino dos BAC com a urgência em diminuir o consumo global de cimento devido às elevadas emissões de CO₂ associadas à sua produção que, no curto prazo, poderá ser efectivada pela substituição do clínquer (cimentos compostos) e/ou do próprio cimento por outros materiais como por exemplo o filler calcário (FC) e as cinzas volantes (CV). É, no entanto, essencial demonstrar a sua aplicabilidade em quantidades mais elevadas (tanto em misturas binárias como ternárias), principalmente devido às limitações regulamentares existentes relativas à sua aplicação, quer em cimentos compostos quer em substituição directa de cimento no fabrico do betão (misturas).

Actualmente, os cimentos mais correntemente utilizados na Europa são os do tipo: CEM I, contendo até 5% de constituintes adicionais minoritários, dos quais poderá fazer parte o calcário; CEM II/A-L e CEM II/B-L, ambos designados de cimento Portland calcário, contendo respectivamente de 6 a 20% e de 21 a 35% de calcário (os mais utilizados); CEM IV/A (V) e CEM IV/B (V), ambos designados de cimento pozolânico, contendo respectivamente de 11 a 35% e de 36 a 55% de cinza volante siliciosa. Estes últimos são de uso menos corrente [1].

Relativamente às misturas, é apenas possível combinar cimento CEM I ou CEM II/A, da classe de resistência 42.5 ou superior, com adições aptas ao uso como constituintes de betão, de acordo com os documentos de referência, NP EN 206-1, isto é, adições quase inertes de origem calcária, ou adições pozolânicas ou hidráulicas latentes. No entanto, a composição de qualquer mistura realizada com os referidos materiais terá sempre de se enquadrar nos limites de composição de um dos 27 tipos de cimento apresentados no Quadro 1 da NP EN 197-1.

De acordo com o referido, é portanto essencial investigar e demonstrar a aplicabilidade destas adições, mais comuns e enquadradas na normalização europeia em vigor, em quantidades superiores às mencionadas no fabrico de betão. 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. As referidas misturas foram avaliadas essencialmente em termos da resistência à compressão uniaxial, do módulo de elasticidade secante e da extensão total de retracção.

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^3); duas adições: CV de acordo com as normas NP EN 450-1 e NP EN 450-2, com massa volúmica de 2300 kg/m^3 e FC de acordo com a especificação LNEC E 466, com massa volúmica de 2720 kg/m^3 ; duas britas calcárias de acordo com a NP EN 12620, uma brita 1, com massa volúmica de 2590 kg/m^3 , D_{\max} de 11 mm e absorção de água de 1,46%, e uma brita 2 com massa volúmica de 2640 kg/m^3 , 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^3 , 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^3 , 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^3); 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 e Oliveira [2], já utilizado em diversas aplicações [3].

Quadro 1. Quantidades de amassadura e propriedades no estado fresco

| Quantidades de amassadura [kg/m ³] | BAC1 | BAC2 | BAC2 | BAC2 | BAC3 | BAC3 | BAC3 | BAC4 | BAC4 | BAC5 | BAC5 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|----------|----------|----------|----------|
| | 100C | 30FC | 60FC | 70FC | 30CV | 60CV | 70CV | 10CV20FC | 20CV10FC | 20CV40FC | 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 |

2.3 Descrição dos ensaios e preparação dos provetes

2.3.1 Compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-3 em provetes cúbicos com 150 x 150 x 150 mm de aresta, sujeitos ao processo de cura húmida por imersão em água a $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ até à idade de ensaio. Por cada referência de BAC, foram moldados provetes em número suficiente para ensaiar três provetes em cada uma das quatro idades (7, 28, 91 e 182 dias).

2.3.2 Módulo de elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade secante foi realizada de acordo com a especificação LNEC E 397 em provetes cilíndricos com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, sujeitos ao processo de cura húmida por imersão em água a 20 ± 2 °C até à idade de ensaio. Por cada referência de BAC, foram moldados provetes em número suficiente para ensaiar três provetes em cada uma de duas idades (28 e 91 dias). O procedimento de ensaio implicou, numa primeira fase, que os provetes fossem centrados nas placas da prensa, de modo a que, após um ciclo de carga - descarga, a variação da extensão, medida nos dois extensómetros, não diferísse mais de 10%. Após a referida verificação, procedeu-se à determinação do módulo de elasticidade secante, através da aplicação de ciclos de carga - descarga onde a tensão variou entre 0,5 a 1 MPa e 1/3 da tensão de rotura, tendo-se registado as extensões iniciais e finais obtidas.

2.3.3 Retracção

A determinação da extensão total de retracção foi realizada de acordo com a especificação LNEC E 398. Os resultados apresentados referem-se à média das medições relativas a dois provetes prismáticos com 150 x 150 x 550 mm, ensaiados durante 182 dias. O ensaio iniciou-se imediatamente após desmoldagem, às 24 horas, tendo-se mantido os provetes a uma temperatura ambiente de 20 ± 2 °C e a uma humidade relativa de 50 ± 5 % durante todo o tempo em que decorreu o ensaio. A medição da extensão total de retracção foi realizada com recurso a um deflectómetro comparador de 20 cm, com uma precisão de 1 µm e um curso total de 12,5 mm. O referido equipamento permitiu registar a variação de comprimento entre os dois pinos metálicos colados na superfície do provete, por comparação com a barra padrão fornecida com o deflectómetro comparador. Os pinos metálicos foram colados na superfície do provete imediatamente a seguir à sua desmoldagem

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

3.1 Compressão uniaxial

Na Fig. 1, são apresentadas as curvas de evolução da resistência à compressão com a idade e com a percentagem de substituição pelas adições (f_{ad}), para todos os BAC produzidos. Da análise da referida figura, é possível verificar um crescimento mais acentuado da resistência à compressão nas primeiras idades (7 dias) para as misturas binárias com FC. Já as misturas binárias com CV apresentam uma evolução da resistência à compressão mais gradual e continuamente crescente para além das primeiras idades. As variações referidas são de igual modo verificadas nas misturas ternárias, onde as de f_{ad} igual a 60% apresentam um crescimento mais gradual e contínuo com a idade face ao crescimento mais acentuado das de f_{ad} igual a 30%. As misturas com 100% de cimento, como seria expectável, apresentam um comportamento distinto das restantes, crescendo acentuadamente até aos 28 dias de idade e estabilizando a partir dessa data até à última idade de ensaio (182 dias).

A família BAC1.100C, correspondente aos BAC sem adições, é a que apresenta valores superiores de resistência à compressão, atingindo 90 MPa aos 182 dias. A família BAC2 (com FC) apresenta, logo aos 7 dias, valores superiores aos verificados para a família BAC3 (com CV). No entanto, as resistências à compressão das misturas da família BAC2 (com FC) tendem a estabilizar aos 28 dias, enquanto as da família BAC3 (com CV) ainda apresentam alguma evolução até aos 91 dias, vindo inclusivamente a estabilizar, aos 182 dias, em valores superiores aos da família BAC2 (com FC).

Nas misturas, tanto binárias como ternárias, constata-se uma diminuição da resistência à compressão com o aumento da percentagem de substituição de cimento por adições devido principalmente ao efeito de diluição relacionado com a redução do teor de cimento. No caso particular das CV, é ainda possível observar uma evolução mais lenta da resistência à compressão, principalmente nas primeiras idades, para níveis de f_{ad} superiores, estabilizando aos 91 dias. Os valores de resistência à compressão apresentados pelas misturas com CV (BAC3) face aos valores do BAC sem adições (BAC1.100C) estão de acordo com o expectável. Considerando uma evolução inicial mais lenta destes BAC com CV, será expectável que, nas idades mais avançadas e para níveis de f_{ad} inferiores a aproximadamente

30%, a resistência evolua de modo mais significativo, podendo, em alguns casos, atingir valores iguais ou até superiores aos correspondentes em BAC com 100% de cimento. Essa evolução deve-se essencialmente ao efeito retardador do comportamento pozolânico das CV, ficando, nas idades iniciais, o seu contributo para a resistência mecânica relegado ao seu efeito de fíler. Esse comportamento é referido por diversos autores também para BC, nomeadamente que as dosagens óptimas de substituição de CV por cimento são inferiores a 20-30% [4, 5]. Nesse sentido, Cyr et al. [6] referem que, a partir de uma dada dosagem (crescente com o teor de cimento), as CV deixam de funcionar como adição, mas apenas como agregado fino, o que pode, de algum modo, justificar a diminuição da resistência de forma gradual com o aumento do f_{ad} , face à do BAC1.100C.

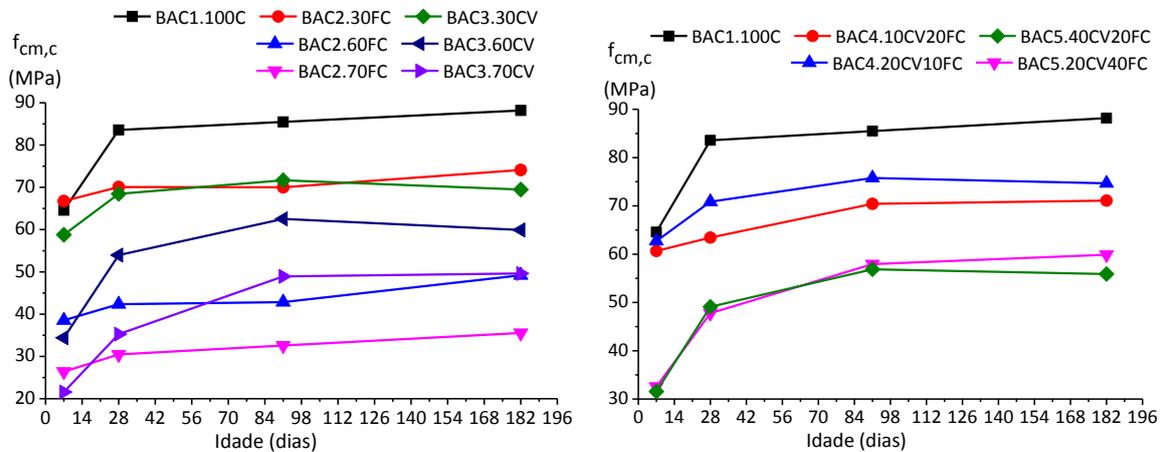


Figura 1. Resistência à compressão das misturas binárias e ternárias aos 7, 28, 91 e 182 dias.

3.2 Módulo de elasticidade

Analisando a Fig. 2, verifica-se que os valores médios do módulo de elasticidade secante (E_{cm}) variam entre 23,38 e 42,10 GPa para os 28 dias e entre 28,34 e 44,38 GPa para os 91 dias. Com exceção das misturas BAC2.30FC e BAC2.60FC, o E_{cm} das misturas produzidas aumenta com a idade e diminui com o aumento do valor de f_{ad} . Ao contrário do que sucede com a resistência à compressão, na qual as diferenças entre as misturas binárias com FC e CV são mais significativas, no caso do E_{cm} , essa diferença é menos acentuada.

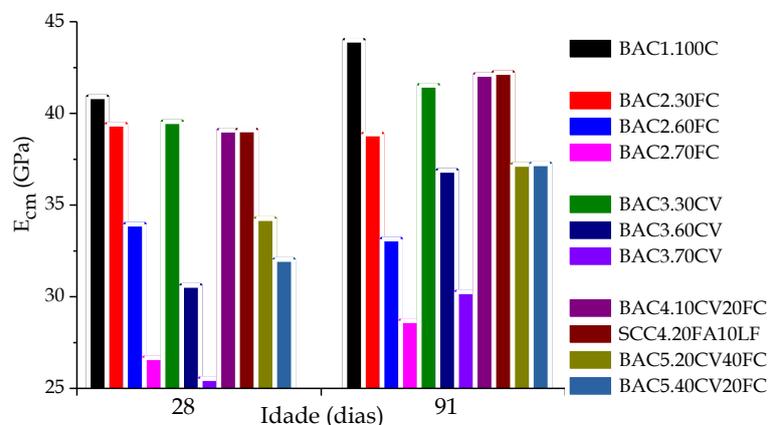


Figura 2. Módulo de elasticidade das misturas binárias e ternárias aos 28 e 91 dias.

As variações do E_{cm} apresentadas na Fig. 2 podem ser confirmadas em diversos trabalhos. Holschemacher and Klug [7] referem que o BAC poderá apresentar um E_{cm} até 20% inferior ao de um BC com a mesma resistência mecânica. Trabalhos mais recentes salientam a importância das adições na referida diferença entre os E_{cm} . Turk et al. [8] apresenta valores de E_{cm} , para misturas com 40% de CV aos 28 dias, com aproximadamente 95% do valor correspondente da mistura sem adições. Do

mesmo modo, Kuder et al. [9] afirmam que, para idades mais avançadas e valores de f_{ad} mais elevados, o módulo de elasticidade é menos sensível à substituição de cimento por adições do que a resistência à compressão. Os autores referem ainda que tal facto pode ser devido à baixa porosidade resultante da formação de C-S-H por reacção pozolânica, principalmente para idades mais avançadas, dado que o módulo de elasticidade pode ser afectado de forma significativa pela porosidade do betão, principalmente na zona de transição agregado-pasta (menos porosidade implica um módulo de elasticidade maior).

3.3 Retracção

São apresentadas, nas Fig. 4 e 5, as curvas da extensão total de retracção dos BAC produzidos, bem como dos valores referentes à expressão do Eurocódigo 2 para BC. De modo a facilitar a leitura, apresentam-se nas figuras apenas os valores correspondentes aos valores mínimos e máximos de resistência à compressão, relativa aos BAC produzidos, correspondente aos provetes cilíndricos com 28 dias e calculado com um $f_{cm,cil} / f_{cm,c} = 0,82$. Da análise das figuras, é possível verificar que a extensão total de retracção se caracteriza por uma evolução inicial mais acentuada, atingindo aproximadamente 50% do valor final medido (aos 182 dias) entre os 14 e os 28 dias, para a maioria das misturas. A partir dos 28 dias, a extensão total de retracção apresenta uma evolução mais gradual, atingindo, aos 91 dias, entre 80 e 90% do valor final medido aos 182 dias.

Da análise das Fig. 4 e 5, é possível observar que a influência tanto do FC como das CV na extensão total de retracção revela algumas diferenças. No caso das misturas binárias com FC, a retracção aumenta ligeiramente até f_{ad} de 30%, diminuindo significativamente para f_{ad} de 70%. Nas misturas binárias com CV, a retracção diminui ligeiramente até f_{ad} de 60% (valor mínimo), atingindo os valores máximos para f_{ad} de 70%. Por seu lado, os valores mínimos de retracção para as misturas binárias com FC referem-se às f_{ad} de 70% e os máximos às f_{ad} de 30%. A diminuição da retracção das misturas com CV até f_{ad} de 60% pode ser explicada pelo facto de, com o aumento do volume de CV, ser provável obter um grau de hidratação inferior, o que provocará um maior volume de material não hidratado, levando as CV a funcionarem mais como um micro agregado favorável para a diminuição da retracção. Já o acréscimo da retracção observado para as misturas com CV e f_{ad} de 70% pode ser provocado pelas reacções de hidratação de tal forma lentas que conduzem a uma estrutura porosa mais aberta nos primeiros dias, aumentando a secagem e provocando uma maior retracção.

As misturas ternárias seguem uma tendência semelhante às binárias com CV, ou seja, uma diminuição da retracção com o aumento da f_{ad} . Portanto, apresentam valores de retracção para as misturas com f_{ad} de 30% superiores aos referentes às misturas com f_{ad} de 60%. Estas misturas (ternárias) com uma f_{ad} global de 60% apresentam valores de retracção aos 182 dias muito satisfatórios, quando comparados com os valores das misturas binárias, com diferenças de apenas cerca de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ para as misturas BAC2.70FC e BAC3.60CV.

Da análise das Fig. 4 e 5, verifica-se que, em geral, o modelo de previsão proposto pelo Eurocódigo 2 para BC tende a subestimar a extensão por retracção dos BAC estudados. A excepção são as misturas binárias com FC (f_{ad} de 30%), que apresentam valores, aos 182 dias, na ordem de 115%, relativamente ao previsto pelo modelo do Eurocódigo 2 para níveis de resistência mecânica equivalentes. As misturas BAC1.100C apresentam valores, aos 182 dias, ligeiramente inferiores mas muito próximos dos determinados pelo método do Eurocódigo 2, correspondendo a aproximadamente 96% desse valor. Já as misturas BAC2.60FC, BAC3.30CV e BAC3.70CV apresentam valores, aos 182 dias, próximos de 90% relativamente ao proposto pelo Eurocódigo 2. Os restantes resultados situam-se entre 66 e 88% dos valores correspondentes determinados pelo Eurocódigo 2. São de salientar os valores da extensão total por retracção obtidos pelas misturas com FC e f_{ad} de 70%, que apresentam valores de cerca de 58% relativamente ao proposto pelo Eurocódigo 2 para níveis de resistência mecânica equivalentes.

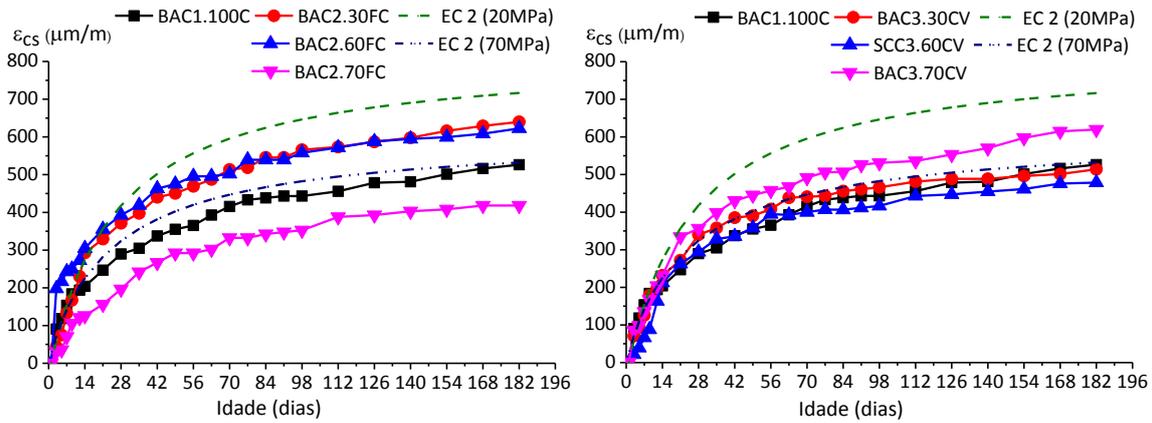


Figura 3. Extensão total de retracção das misturas binárias.

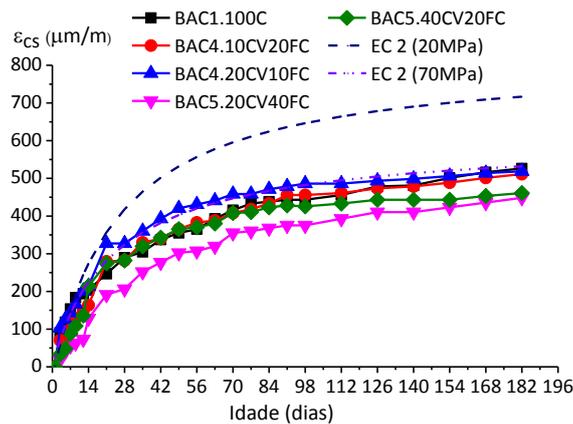


Figura 4. Extensão total de retracção das misturas ternárias.

CONCLUSÕES

A utilização de FC na produção de BAC, em misturas binárias e para os valores de f_{ad} utilizados no presente trabalho, revelou menos vantagens, em termos de comportamento mecânico, relativamente às restantes misturas. No entanto, são de salientar: o aumento da resistência mecânica nas idades iniciais; valores de E_{dm} superiores, em idades iniciais e para f_{ad} de 60 e 70%; valores de retracção total inferiores, nas misturas com f_{ad} de 70%.

Já a utilização de CV na produção dos BAC estudados revelou-se bastante favorável. Para valores de f_{ad} de 30%, verificou-se inclusivamente que algumas propriedades apresentam, para idades mais avançadas, valores semelhantes aos obtidos pelos BAC de controlo só com cimento (BAC1.100C). São ainda de salientar os valores obtidos para f_{ad} de 70%, com uma resistência mecânica média, aos 28 dias de idade entre 33 e 35 MPa, mas que, aos 182 dias, evoluiu para valores entre 48 e 50 MPa. Foram igualmente observadas evoluções semelhantes para os respectivos módulos de elasticidade, com valores, aos 28 dias, entre 25 e 26 GPa, mas que, aos 182 dias, variaram entre 30 e 31 GPa. Em termos de retracção, destacam-se os valores obtidos pelas misturas com 30 e 60% de f_{ad} . Já as misturas com f_{ad} de 70% apresentaram uma extensão total de retracção menos favorável mas ainda assim com valores inferiores a 650 $\mu\text{m/m}$, aos 182 dias.

Tendo em consideração a pretensão inicialmente formulada de verificar a aplicabilidade de FC e CV em misturas binárias e ternárias em volumes superiores aos previstos pela normalização em vigor, conclui-se que a possibilidade de utilizar FC em valores de f_{ad} superiores a cerca de 35% relativos aos cimentos compostos tipo CEM II/A-L e CEM II/B-L se revelou de algum modo menos eficiente do que o observado para as restantes misturas estudadas (binárias com CV e ternárias com FC e CV).

Relativamente à utilização de CV, em termos de comportamento mecânico, conclui-se que valores de f_{ad} até 60% são perfeitamente viáveis e que, para valores superiores ($f_{ad} = 70\%$), será necessário uma especial atenção à retracção. É, no entanto, de salientar, o efeito de retardamento na evolução do processo de hidratação associado à utilização de CV, com desvantagens no desenvolvimento inicial da maioria das propriedades requeridas. Com os resultados obtidos relativamente ao comportamento mecânico dos BAC produzidos em misturas ternárias (FC e CV), concluiu-se que a adição combinada de ambas pode representar um efeito benéfico quando comparada com as misturas binárias com FC ou CV.

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] K. De Weerd (2011). Blended Cement with Reduced CO₂ Emission - Utilizing the Fly Ash-Limestone Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements, PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Science and Technology Department of Structural Engineering, Norway, ISBN 978-82-471-2585-4, 171p.
- [2] Nepomuceno M.; Oliveira L. (2008). Parameters for self-compacting concrete mortar phase, *ACI Materials Journal*, SP-253, July, pp. 323-340.
- [3] Silva P.M.; Brito J. de; Costa J. M. (2011). Viability of two new mix design methodologies for SCC, *ACI Materials Journal*, Vol. 108, Number 6, pp. 579-588.
- [4] Neville A. M. (1995). Properties of concrete, fourth edition, *Pearson*, England, ISBN: 978-0-582-23070-5, 844 p.
- [5] Mehta P. K., Monteiro P. J. M. (2005). Concrete microstructure, properties and materials, *McGraw-Hill*, USA, ISBN: 0071462899, 2005, 684 p.
- [6] Cyr M., Lawrence P., Ringot E. (2006). Efficiency of mineral admixtures in mortars: quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, Issue 2, pp. 264-277.
- [7] Holschemacher K., Klug Y. (2002). A database for the evaluation of hardened properties of SCC, Leipzig University. *LACER (Leipzig Annual Civil Engineering Report)* No. 7, pp. 124-134.
- [8] Turk K., Turgut P., Karatas M. and Benli A. (2010). Mechanical properties of self-compacting concrete with silica fume/fly ash, *9th International Congress on Advances in Civil Engineering*, 27-30 September 2010 (ACE2010), Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey, 7 p.
- [9] Kuder K., Lehman D., Berman J., Hannesson G. and Shogren R. (2012). Mechanical properties of self-consolidating concrete blended with high volumes of fly ash and slag, *Construction and Building Materials*, Vol. 34, pp. 285-295.