

## COMPORTAMENTO MECÂNICO DE BETÕES AUTO-COMPACTÁVEIS PRODUZIDOS COM CINZAS DE FUNDO DA QUEIMA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

BRUNO LOURENÇO<sup>1</sup>, JOEL LEITÃO<sup>1</sup>, PEDRO RAPOSEIRO DA SILVA<sup>2\*</sup>, RUI SILVA<sup>3</sup>

1: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa  
R. Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-001 Lisboa, Portugal  
brunofilipe@outlook.com, joelcavaco11@gmail.com

2: CERIS-ICIST, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa  
R. Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-001 Lisboa, Portugal  
silvapm@dec.isel.pt

3: CERIS-ICIST, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa  
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal  
rui.v.silva@tecnico.ulisboa.pt

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

**Resumo** *Actualmente, a crescente preocupação com as alterações climáticas, provocadas sobretudo pelos gases com efeito estufa emitidos pelas indústrias, levam-nos a repensar os processos de produção e a estudar soluções alternativas. Sendo a indústria da construção uma das mais poluentes e responsável pela emissão de dióxido de carbono, nomeadamente através da produção de cimento, torna-se imperativa uma mudança neste sector.*

*Tendo presente que o Betão auto-compactável (BAC) tem necessidades particulares de trabalhabilidade, uma vez que não necessita de ser vibrado, o que implica um maior volume de finos na mistura, pode permitir um caminho para a diminuição considerável do consumo de cimento, sendo substituído por outras adições e, deste modo, diminuir os impactes ambientais da sua produção.*

*Seguindo esta linha de raciocínio, este artigo pretende avaliar a viabilidade de produção de BAC com a substituição de parte do cimento por cinzas de fundo resultantes da queima de resíduos sólidos urbanos (CFRSU). Nesse sentido, foram avaliadas as propriedades mecânicas do BAC com incorporação de CFRSU em misturas binárias (cimento (C) + CFRSU) e ternárias (C + CFRSU + cinzas volantes provenientes das centrais termoeléctricas (CV)). A intenção foi avaliar a capacidade de produção de BAC com um desempenho mínimo em termos de resistência mecânica, incorporando diferentes percentagens de C, CFRSU e CV, nomeadamente: 9 misturas, incluindo 1 de referência – (C / CFRSU / CV) 70/0/30%; 80/20/0%; 70/30/0%; 60/40/0%; 50/50/0%; 70/20/10%; 70/10/20%; 40/20/40% e 40/40/20%.*

*O principal objectivo desta investigação foi proporcionar à indústria uma forma inovadora de eliminação e recuperação das CFRSU, minimizando o consumo dos recursos naturais associados à produção de cimento e, conseqüentemente, reduzindo significativamente seu impacto ambiental. Além dos aspectos ambientais, há também aspectos económicos associados, já que este procedimento reduz os custos de tratamento das CFRSU.*

*Os resultados permitiram estabelecer conclusões sobre os BAC produzidos com CFRSU, com base nas suas propriedades mecânicas. As propriedades estudadas são fortemente afectadas pela quantidade de CFRSU. É enfatizado o potencial demonstrado, principalmente no estado endurecido, pelo uso conjunto de CFRSU e CV.*

## 1. INTRODUÇÃO

O sector da construção sempre soube, ao longo dos anos, adaptar-se às mudanças que os diferentes contextos socioeconómicos lhe exigiram, quer através de novas soluções construtivas, quer pela introdução de novos materiais. Actualmente, o grande foco de mudança na indústria da construção deriva das preocupações ambientais e da sustentabilidade. Com o betão a atingir grandes níveis de produção e sendo o cimento (C) um dos seus constituintes e o maior responsável pelas emissões de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) da produção de betão, cerca de 74-81% do total, é evidente a necessidade de redução deste componente [1].

A par da problemática das emissões de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera, também se perspectiva que a produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) irá aumentar cerca de 2,2 bilhões de toneladas por ano até 2025 [2], o que levará conseqüentemente a um aumento dos subprodutos resultantes da sua combustão. Na queima dos RSU, um dos subprodutos mais importantes são as cinzas de fundo, que representam cerca de 85% a 95% do total de subprodutos resultantes [3], havendo assim a necessidade de dar uma nova vida a estes resíduos.

Neste contexto, surge a possibilidade de substituir parte do cimento existente na composição do betão auto-compactável (BAC) por cinzas de fundo da queima de resíduos sólidos urbanos (CFRSU), provenientes da empresa Valorsul, S.A.. Deste modo, é possível não só reduzir as emissões de  $\text{CO}_2$  provocadas pela produção exaustiva de cimento, bem como reduzir a extracção de matérias-primas não renováveis necessárias para o seu fabrico. Além de garantir a reutilização de um subproduto industrial, que teria como destino final o aterro.

Considerando esta alternativa. É então fundamental demonstrar a viabilidade da sua utilização, através da caracterização do comportamento dos betões onde é aplicada.

A campanha experimental realizada teve como finalidade de analisar as propriedades dos BAC, produzidos em misturas binárias (C + CFRSU) e ternárias (C + CFRSU + cinzas volantes provenientes das centrais termoeléctricas (CV)), no estado endurecido (comportamento mecânico). Para tal foram produzidas 9 misturas, incluindo 1 de referência – (C / CFRSU / CV) 70/0/30%; 80/20/0%; 70/30/0%; 60/40/0%; 50/50/0%; 70/20/10%; 70/10/20%; 40/20/40% e 40/40/20%.

As referidas misturas foram avaliadas essencialmente em termos da resistência à compressão uniaxial em cubos e cilindros e do módulo de elasticidade secante.

## 2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1. Materiais utilizados

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

- um tipo de cimento de acordo com a NP EN 197-1 [4] (CEM tipo I-42,5 R, com massa volúmica de  $3140 \text{ kg/m}^3$ ); duas adições: CV (provenientes das centrais termoeléctricas) de acordo com a norma NP EN 450-1 [5], com massa volúmica de  $2300 \text{ kg/m}^3$  e CFRSU com massa volúmica de  $2500 \text{ kg/m}^3$ ;
- duas britas calcárias de acordo com a NP EN 12620 [6], uma brita 1, com massa volúmica de  $2590 \text{ kg/m}^3$ ,  $D_{\text{max}}$  de 11 mm e absorção de água de 1,46%, e uma brita 2 com massa volúmica de  $2640 \text{ kg/m}^3$ ,  $D_{\text{max}}$  de 22,4 mm e absorção de água de 0,78%; duas areias siliciosas de acordo com a NP EN 12620 [6], uma areia grossa (0/4) com massa volúmica de  $2550 \text{ kg/m}^3$ , módulo de finura de 3,70 e absorção de água de 1,10% e uma areia fina (0/1) com massa volúmica de  $2580 \text{ kg/m}^3$ , 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 a NP EN 934-1 [7] (uma combinação de policarboxilatos modificados, em solução aquosa com massa volúmica de  $1070 \text{ kg/m}^3$ ); água da rede pública de acordo com a NP EN 1008 [8].

## 2.2. Caracterização química das CFRSU

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

A presença de elementos metálicos como Pb, Cu, Zn, Cd, Cr e Ni é igualmente habitual. Ao reagirem, os metais produzem hidróxidos que provocam a expansão das CFRSU [33]. Dou et al [33] realçam também a possibilidade de as CFRSU apresentarem, quando se verifique uma elevada concentração de cálcio, um comportamento hidráulico similar ao do cimento.

## 2.3. Quantidades de amassadura

Com o objectivo de abranger as diferentes variações de quantidades de amassadura e respectiva avaliação das misturas binárias e ternárias de C, CV e CFRSU, foram produzidas 9 amassaduras de BAC de acordo com a NP EN 206-9 [16], que são apresentadas na Tabela 1. As quantidades de amassadura utilizadas foram obtidas segundo o método apresentado por Nepomuceno e Oliveira [9] e por Nepomuceno et al. [10], já utilizado em diversas aplicações [11 - 13].

Tabela 1. Quantidades de amassadura e propriedades no estado fresco.

| Quantidades de amassadura<br>[kg/m <sup>3</sup> ]    | REF  | Misturas binárias |      |      |      | Misturas ternárias |           |           |           |
|--|------|-------------------|------|------|------|--------------------|-----------|-----------|-----------|
|  |      | B20               | B30  | B40  | B50  | B10CV20CF          | B20CV10CF | B20CV40CF | B40CV20CF |
| CEM I 42,5 R   | 482  | 496               | 452  | 387  | 323  | 467                | 467       | 267       | 267       |
| Cinzas volantes (CV)                                 | 151  | ---               | ---  | ---  | ---  | 49                 | 98        | 98        | 195       |
| Cinzas de fundo de RSU (CFRSU)                       | ---  | 99                | 154  | 206  | 257  | 106                | 53        | 212       | 106       |
| Superplastificante (S <sub>p</sub> )                 | 5    | 6                 | 6    | 6    | 6    | 5,6                | 5,6       | 5,2       | 5,1       |
| Água   | 176  | 197               | 206  | 206  | 206  | 191                | 191       | 191       | 191       |
| Areia (0,5A <sub>F0/1</sub> + 0,5A <sub>G0/4</sub> ) | 704  | 632               | 659  | 659  | 659  | 680                | 680       | 680       | 680       |
| Brita (0,5B <sub>1</sub> + 0,5B <sub>2</sub> )       | 775  | 846               | 775  | 775  | 775  | 775                | 775       | 775       | 775       |
| W/C  | 0.36 | 0.40              | 0.46 | 0.53 | 0.64 | 0.41               | 0.41      | 0.72      | 0.72      |
| W/MC   | 0.28 | 0.40              | 0.46 | 0.53 | 0.64 | 0.37               | 0.34      | 0.52      | 0.41      |
| W/MF   | 0.28 | 0.33              | 0.34 | 0.35 | 0.36 | 0.31               | 0.31      | 0.33      | 0.34      |
| <b>Síntese das propriedades básicas</b>              |      |                   |      |      |      |                    |           |           |           |
| t <sub>500</sub> [s]                                 | 2.7  | 2.7               | 2.9  | 3.4  | 3.7  | 2.8                | 2.7       | 2.2       | 3.1       |
| Espalhamento [mm]                                    | 680  | 600               | 645  | 560  | 550  | 685                | 620       | 585       | 625       |
| Funil V [s]  | 5.6  | 3.6               | 2.7  | 2.5  | 2.2  | 4.9                | 4.8       | 2.8       | 3.5       |
| Caixa L  | 0.9  | 0.8               | 0.9  | 1.0  | 0.8  | 1.0                | 0.8       | 0.8       | 0.9       |

## 2.4. Descrição dos ensaios e preparação dos provetes

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado de acordo com a norma NP EN 12390-3 [14] em provetes cúbicos com 150 x 150 x 150 mm de aresta e 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 das três idades em cubos (7, 28 e 91 dias) e duas em cilindros (28 e 91 dias).

A determinação do módulo de elasticidade secante foi realizada segundo a especificação LNEC E 397 [15] 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 amassadura de BAC, foram moldados três provetes para cada uma de duas idades de ensaio (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 diferisse 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.

### 3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

#### 3.1. Comportamento no estado fresco

Os ensaios no estado fresco foram realizados de modo a verificar a conformidade dos parâmetros obtidos com os exigidos pela NP EN 206-9 [16] para BAC. Os referidos parâmetros de comportamento no estado fresco foram fixos *á priori* através do seu ajuste em composições de argamassas auto-compactáveis (os resultados obtidos no estado fresco são apresentados de forma resumida na Tabela 1).

Concluiu-se que todas as misturas atingiram os parâmetros de trabalhabilidade, pelo que possuem as características necessárias para serem classificadas como BAC de acordo com o exigido pela NP EN 206-9 [16].

#### 3.2. Compressão uniaxial em provetes cúbicos – misturas binárias

Na Figura 1, são apresentadas as curvas de evolução da resistência à compressão uniaxial, das diferentes misturas binárias de BAC, em função da idade de ensaio.

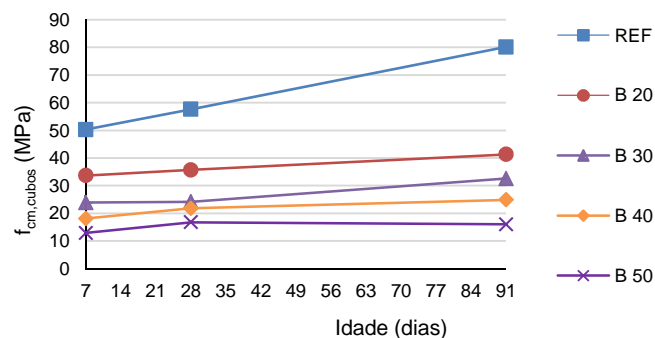


Figura 1. Resistência à compressão uniaxial de provetes cúbicos, para todas as misturas binárias de BAC.

Observando os resultados obtidos, verifica-se que a mistura REF alcança valores elevados de resistência mecânica aos 7 dias de idade, correspondendo a 63% do valor final aos 91 dias, evoluindo continuamente ao longo do tempo. As restantes misturas têm igualmente o maior incremento da resistência até aos 7 dias de idade, alcançando valores que variam entre 73% e 82% da resistência aos 91 dias. Da mesma forma, conclui-se facilmente que a utilização de CFRSU como adição, reduz a resistência do BAC produzido quando comparado com a mistura REF, sendo a diferença ampliada com o aumento da percentagem de substituição e da idade do ensaio.

A evolução verificada para as misturas com CFRSU, assemelha-se à observada por Silva e Brito [17]. Os autores produziram amassaduras de BAC com incorporação de FC que, tal como no presente trabalho (uma vez que as CFRSU são constituídas por calcite), apresentam o maior aumento da resistência nos primeiros dias (7 dias), não apresentando daí em diante uma evolução significativa. Paralelamente a esta evolução, verifica-se ainda que, quanto maior a percentagem de substituição menor o valor da resistência à compressão da amassadura produzida.

Zajac et al. [18] indicam que esta redução da resistência à compressão se deve ao facto de o calcário, constituinte do fíler, em particular a calcite, poder provocar a diluição do cimento durante o seu processo de hidratação (ao substituir parte do cimento). Assim, este comportamento poderá ter-se verificado nas misturas produzidas, reduzindo a resistência do betão, devido essencialmente aos altos níveis de calcite presente nas CFRSU, conforme verificado através do ensaio de difracção por raio X (ensaio não incluído no âmbito do presente artigo).

A mesma tendência de redução da resistência à compressão com o aumento da percentagem de substituição foi observada por Cheng [19]. Este estudou o efeito da substituição de cimento por CFRSU na produção de argamassas, tendo para tal, produzido amassaduras com diferentes percentagens de substituição (0%, 10%, 20%, 30% e 40%). O autor sugere que a redução do valor de resistência à compressão deve-se também ao facto da utilização desta adição enfraquecer a ligação na interface da zona de transição agregado/pasta.

Pokorný et al. [20], apresentam também resultados relevantes no que respeita à sua resistência à compressão, que diminui com o aumento da quantidade de zinco.

Desta forma, a eventual presença de zinco (tal como referido na secção 2.2), como elemento ou óxido, na constituição das CFRSU, pode igualmente contribuir não só para o retardamento do processo de cura verificado no presente trabalho, particularmente notório nas misturas com maior percentagem de substituição, B 40 e B 50 (aproximadamente 48 horas), mas também para a redução do valor de resistência à compressão.

### 3.3. Compressão uniaxial em provetes cilíndricos – misturas binárias

Os provetes cilíndricos ao serem retirados da câmara de cura foram utilizados para determinar o módulo de elasticidade secante e só de seguida ensaiados à compressão para verificar a sua resistência à compressão uniaxial

Quando analisados individualmente, os provetes cilíndricos, têm igualmente uma tendência para a redução da resistência à compressão com o aumento da percentagem de substituição de CFRSU, sendo a redução mais evidente quando se compara a mistura REF com qualquer uma das restantes. O aumento da idade de ensaio conduz naturalmente ao aumento do valor da resistência à compressão em todas as misturas, ainda que pouco significativo nas misturas com adição de CFRSU. Desta forma, podemos transpor as considerações feitas ao comportamento do BAC nos provetes cúbicos para os cilindros.

Na Figura 2, é possível verificar a relação entre a resistência à compressão média em provetes cilíndricos e cúbicos para todas as misturas de BAC produzidas.

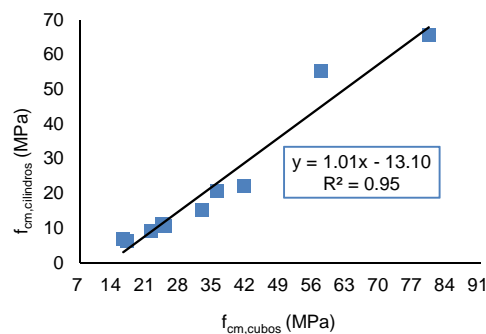


Figura 2. Relação entre a resistência à compressão média em provetes cilíndricos e cúbicos para todas as misturas binárias de BAC.

Ao analisar os dados apresentados, verifica-se pouca dispersão dos dados com um coeficiente de correlação linear associado à regressão linear elevado de  $R^2 = 0,95$ . Apesar da boa interdependência

verificada, quando se compara o factor de conversão conseguido a partir dos valores apresentados no Quadro 7 da norma NP EN 206-1 [21], aproximadamente 80%, com os factores de conversão obtidos no presente trabalho, é visível que os últimos, ficam aquém do que seria desejado, sendo notório, ainda assim, que quanto menor a percentagem de substituição de cimento, maior o valor do respectivo factor de conversão.

### 3.4. Módulo de elasticidade secante – misturas binárias

A variação do módulo de elasticidade secante, para idades de ensaio, em função das misturas binárias de BAC produzidas é apresentada na Figura 3.

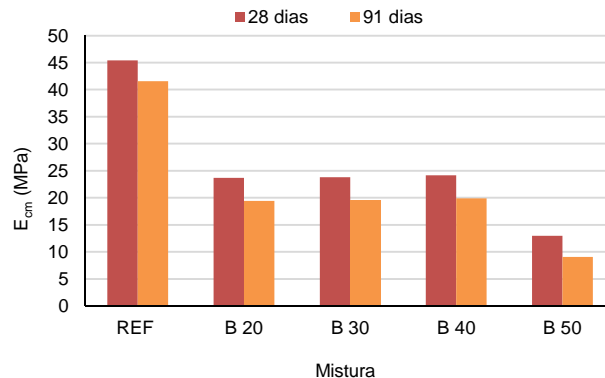


Figura 3. Variação do módulo de elasticidade para todas as misturas binárias de BAC.

Ao analisar os resultados obtidos verifica-se, tal como na resistência à compressão uniaxial, um decaimento das características do BAC entre as misturas com substituição de cimento e a de referência (entre 48% e 72%). No entanto, entre amassaduras que contêm CFRSU só são observáveis variações significativas no comportamento a partir de um nível de substituição de 40% (B 40), até este ponto, a variação é praticamente inexistente, tomando valores não superiores a 3%.

Relativamente à diminuição do valor com a idade, não se encontrou uma explicação plausível para este comportamento. No entanto, dado que a evolução é uniforme entre todas as misturas, esta variação poderá ter resultado da dificuldade que se teve em calibrar a curva de tensão/extensão para o patamar de ensaio.

Ravasan [22] ao estudar a produção de betões com substituição de agregado fino por CFRSU, para valores que vão dos 5% aos 80%, verifica igualmente uma redução, ainda que menos significativa, no valor do módulo de elasticidade entre estas misturas e a de referência (sem qualquer tipo de adição).

Analisando os resultados de Pokorný et al. [20], verifica-se que a introdução de zinco reduz, tal como a resistência à compressão, o módulo de elasticidade do betão. Desta forma, é possível que a diferença verificada entre a mistura de referência e as restantes se deva à eventual presença deste nas CFRSU.

A possibilidade de existirem metais nas CFRSU deve ser considerada quando se analisa o módulo de elasticidade dos BAC produzidos. Bertolini et al [23], estudaram a produção de betões com substituição do cimento por CFRSU e verificaram que o betão apresentava uma elevada expansão (ainda nos moldes), comportamento que os autores atribuem à libertação de hidrogénio que ocorre por corrosão dos metais presentes na adição quando sujeitos a um ambiente alcalino.

O presente trabalho apresentou uma expansão semelhante em todas as misturas produzidas, desta forma, é possível que as mesmas reacções tenham ocorrido nos betões estudados, afectando o módulo de elasticidade.

### 3.5. Compressão uniaxial em provetes cúbicos – misturas ternárias

A Figura 4 representa as curvas de evolução da resistência à compressão em função da idade, para todas as misturas ternárias de BAC estudadas.

Analisando a Figura 4 é possível verificar que todas as misturas com CFRSU atingem grande parte da resistência até aos 7 dias, com destaque para o B10CV20CF, com 70% da resistência em relação aos 91 dias. As restantes misturas atingem 58% (B20CV10CF), 55% (B20CV40CF) e 53% (B40CV20CF). Entre os 28 dias e os 91 dias os betões incorporando CFRSU tendem a estabilizar os valores de resistência, apresentando uma evolução muito reduzida. Quanto à mistura de referência, esta segue a tendência das restantes misturas no desenvolvimento rápido de resistência até aos 7 dias, com 63% da resistência em relação aos 91 dias. No entanto, e ao contrário das misturas com CFRSU, apresenta uma evolução significativa da resistência dos 28 dias para os 91 dias.

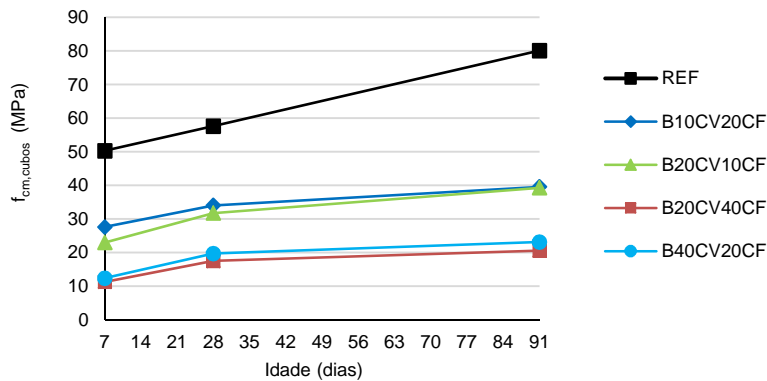


Figura 4. Resistência à compressão uniaxial de provetes cúbicos, para todas as misturas ternárias de BAC.

Pela observação da Figura 4, é notória uma quebra da resistência, para todas as idades, nas misturas com CFRSU relativamente ao betão REF, que se acentua com o aumento da idade de ensaio e com o aumento da percentagem de substituição ( $f_{ad}$ ). Para os 91 dias, os resultados obtidos demonstram que no patamar de 30 % de  $f_{ad}$ , a redução foi de 51% nas duas misturas (B10CV20CF e B20CV10CF). Enquanto que para a mesma idade, no patamar de 60% de  $f_{ad}$ , a redução foi de 74% e 71%, B20CV40CF e B40CV20CF, respetivamente.

A mesma tendência de redução de resistência foi verificada por Amat et al. [24] com misturas binárias de CFRSU e  $f_{ad}$  até 30%. Também para misturas binárias, com  $f_{ad}$  até 40%, Jurič et al. [25], Lin e Lin [26] e Cheng [19] obtiveram um decréscimo da resistência com o aumento de CFRSU na mistura. Li et al. [27] estudaram misturas ternárias (CFRSU e CV) obtendo o mesmo comportamento, com decréscimo médio aos 28 dias de 25% e 34%, para  $f_{ad}= 30%$  e  $f_{ad}= 40%$ , respetivamente. No entanto, todos os autores utilizam como base de comparação um betão com 100% de cimento.

Segundo Zajac et al. [28] para adições mais elevadas de filler calcário, o efeito de diluição do cimento por parte da adição leva a uma diminuição da resistência à compressão. Sendo a calcite o principal mineral constituinte do filler calcário, quando esta se encontra em excesso, em detrimento do cimento, promove o efeito diluidor [29]. Deste modo, a redução da resistência à compressão verificada no presente trabalho, poderá dever-se aos altos níveis de calcite presente nas CFRSU, conforme verificado através do ensaio de difracção por raio X (ensaio não incluído no âmbito do presente artigo).

Devido à forte presença de calcite nas CFRSU, torna-se importante comparar os resultados obtidos com a influência do FC em misturas ternárias. Apesar da tendência de evolução das misturas ternárias (CV e FC) de Silva e Brito [30] serem idênticas para os mesmos pares de substituição, os valores obtidos foram, em média, 35 MPa mais elevados do que os valores das quatro misturas deste trabalho.

Por outro lado, registou-se um retardamento da presa na mistura B20CV40CF, tendo sido realizada a sua desmoldagem apenas às 48 horas por não estarem garantidas as condições de endurecimento. Quanto às restantes misturas com CFRSU, não foi possível quantificar o provável retardamento de presa uma vez que, às 24 horas, todos os provetes foram desmoldados. Contudo, o retardamento de presa poderá ter igualmente acontecido, mas em menor escala do que o verificado na B20CV40CF, devido à diferença de percentagens de CFRSU entre estas misturas.

### 3.6. Compressão uniaxial em provetes cilíndricos – misturas ternárias

Na Figura 5, são apresentadas para os 28 dias e 91 dias, as linhas de tendência da comparação direta entre a resistência à compressão de cilindros e cubos.

Observando os resultados obtidos, verifica-se que a resistência à compressão aumentou com idade para todas as misturas. No entanto, a quebra de resistência conforme o aumento de  $f_{ad}$ , verificada nos cubos, ocorreu de novo nos cilindros. Tal redução pode ser justificada pelo mesmo motivo referido nos cubos.

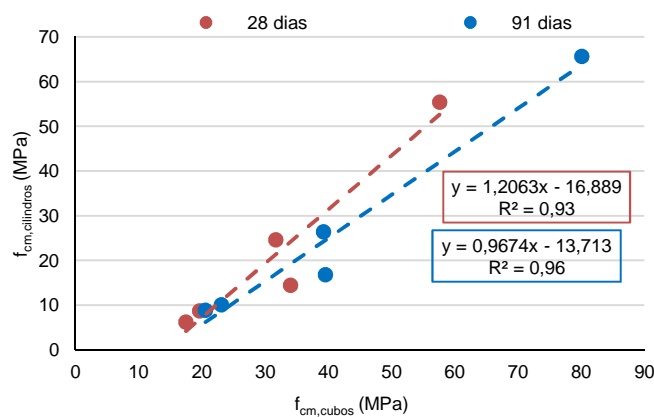


Figura 5. Relação entre a resistência à compressão média em provetes cilíndricos e cúbicos para todas as misturas ternárias de BAC.

Da análise da Figura 5, é possível observar que a correlação entre provetes cilíndricos e cúbicos é elevada, tanto para os 28 dias ( $R^2=0,93$ ) como para os 91 dias ( $R^2 = 0,96$ ). No entanto, a relação  $f_{cm,cil} / f_{cm,c}$  baixa consideravelmente nas quatro misturas em estudo relativamente à mistura de referência. Os valores da resistência em cilindros são muito mais baixos dos que os obtidos nos cubos para todas as amassaduras, com exceção da mistura de referência. De facto, os valores de  $f_{cm,cil} / f_{cm,c}$  para a referência estão de acordo com os apresentados no Quadro 7 da NP EN 206-1 [21], que variam entre 0,80 (classe C16/20) e 0,82 (classe C70/85). Já a relação  $f_{cm,cil} / f_{cm,c}$  das restantes misturas apresenta valores muito abaixo do que seria suposto, destacando-se aos 91 dias, o B10CV20CF (0,42), o B20CV40CF (0,43) e o B40CV20CF (0,43).

Os resultados obtidos para a relação  $f_{cm,cil} / f_{cm,c}$  poderão estar relacionados com a tendência de decréscimo da resistência à compressão [31]. De facto, as diferenças entre cubos e cilindros são originadas pelo atrito gerado entre os pratos da prensa e as faces do provete, que cria um efeito de confinamento lateral, restringindo a deformação transversal do provete. Como o cubo apresenta uma maior área de contacto com a prensa do que o cilindro, este efeito é maior, conduzindo a uma resistência à compressão mais elevada [31]. Sendo o coeficiente de Poisson o principal regulador das deformações transversais ocorridas no provete quando sujeito a cargas axiais, é possível que este apresente um valor alterado, decorrente do comportamento desigual nas duas direções do provete cilíndrico.

### 3.7. Módulo de elasticidade secante – misturas ternárias

Analisando a Figura 6, verifica-se que o valor de  $E_{cm}$  aumenta dos 28 para os 91 dias apenas nas misturas com  $f_{ad}=60\%$ , enquanto que nas restantes misturas os valores decrescem, incluindo o betão de referência. Este decréscimo pode estar relacionado com algum fator externo, provavelmente derivado à calibração do equipamento de ensaio.

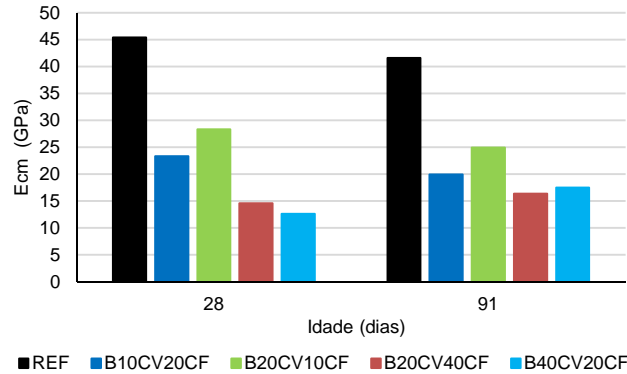


Figura 6. Variação do módulo de elasticidade para todas as misturas ternárias de BAC.

Tal como nos restantes ensaios de resistência mecânica, é possível observar uma redução considerável dos valores obtidos nas misturas com adição de CFRSU relativamente à mistura de referência, redução essa que se acentua com o aumento de  $f_{ad}$ . Aos 28 dias, o módulo de elasticidade das misturas com  $f_{ad}=60\%$  apresenta uma redução de cerca de 70% relativamente à referência. Enquanto que para a mesma idade, o valor do B10CV20CF é reduzido em 49% e o B20CV10CF em 38%. Para os 91 dias, as reduções de  $E_{cm}$  relativamente ao BAC de referência acentuam-se no patamar de substituição de 30%, com variações de 52% e 40%, respetivamente para B10CV20CF e B20CV10CF. No patamar de 60% de substituição, a redução relativamente ao betão de referência apresentou-se menos acentuada dos 28 dias para os 91 dias, no entanto os valores obtidos continuam a apresentar uma redução significativa em cerca de 60%. Constata-se assim, que os valores reduzidos de  $E_{cm}$  obtidos nas quatro misturas em estudo estão fora do normal, indiciando um efeito negativo das CFRSU nesta propriedade do BAC.

Lynn et al. [32] obtiveram reduções de 56% para o betão de referência, aos 28 dias, justificando-as com a expansão do betão devido à presença de alumínio (Al) nas CFRSU. No entanto, o estudo incidiu na incorporação de 85% de CFRSU como agregado, tendo como referência um betão com 100% de agregados naturais. Também Bertolini et al. [23] registaram uma expansão do betão, provocada pela formação de hidrogénio decorrente do processo de corrosão do Al presente nas CFRSU. As pequenas bolhas de hidrogénio ficam encurraladas na restante pasta produzindo um aumento de volume. Já Pokorný et al. [20] obtiveram uma redução do valor do módulo de elasticidade para uma maior adição de Zn na mistura, bem como referiram o efeito do hidrogénio, proveniente da corrosão do Zn, no aumento de volume das amostras.

Efetivamente, verificou-se não só a presença Al e Zn (de acordo com o referido na secção 2.2) na composição das CFRSU, como também se registou um aumento do volume dos provetes ainda dentro do molde (expansão), agravado pelo aumento da percentagem de CFRSU nas misturas. Desta forma, é provável que a presença destes elementos tenha afectado as propriedades mecânicas dos BAC com CFRSU.

Com os mesmos pares de substituição e utilizando FC no lugar das CFRSU, Silva e Brito [30] obtiveram valores semelhantes entre o betão com 30% de CV e as misturas ternárias com  $f_{ad}=30\%$ , tanto aos 28 como aos 91 dias. Para  $f_{ad}=60\%$ , verificou-se uma redução do módulo de elasticidade de 10% relativamente à mistura com 30% de CV.

#### 4. CONCLUSÕES

No estado fresco, foram avaliados o tempo e o diâmetro de espalhamento, o tempo de escoamento no funil V e a capacidade de passagem na caixa L, de modo a cumprir os critérios definidos na NP EN 206-9 [16] para os parâmetros de trabalhabilidade no BAC.

Foi possível verificar que todas as amassaduras cumpriram os requisitos, constatando-se que os BAC produzidos apresentaram fluidez, viscosidade e capacidade de passagem de acordo com o exigido.

Relativamente à resistência à compressão das misturas binárias de BAC, esta diminui com a introdução de CFRSU, tendo-se verificado que este comportamento é devido à variação da percentagem de substituição e da razão W/C. A resistência das misturas aumentou com a idade, tendo-se desenvolvido maioritariamente até aos 7 dias e evoluindo de forma pouco significativa a partir desta idade. O decréscimo verificado nesta propriedade poderá dever-se ao facto da calcite assim como o zinco e o alumínio (presentes nas CFRSU) poderem afectar, cada um de sua maneira, o processo de cura do betão reduzindo a resistência do BAC.

Globalmente os provetes cilíndricos apresentam uma boa interdependência com os provetes cúbicos, apresentando um coeficiente de correlação de  $R^2 = 0,95$  e reduzida dispersão de resultados.

A introdução de CFRSU nas misturas binárias de BAC reduz o valor de módulo de elasticidade secante face à mistura REF, comportamento que poderá dever-se ao retardamento do processo de cura do betão por parte do zinco ou à expansão que resulta da libertação de hidrogénio por parte dos metais constituintes das CFRSU ao serem corroídos. O módulo de elasticidade secante apresenta por sua vez, uma correlação satisfatória com a resistência à compressão uniaxial com  $R^2 = 0,83$ .

No que diz respeito à resistência à compressão das misturas ternárias de BAC, concluiu-se que a incorporação de CFRSU afectou negativamente o desempenho desta propriedade, possivelmente devido à calcite verificada nas CFRSU e à presença de zinco na sua composição. O aumento da percentagem de CFRSU na mistura provocou uma diminuição da resistência mecânica, sendo a amassadura B20CV40CF a que obteve o pior desempenho (20,58 MPa em cubos e 8,79 MPa em cilindros, aos 91 dias).

Verificou-se que o módulo de elasticidade diminuiu consideravelmente com o aumento da percentagem de CFRSU nas misturas ternárias de BAC e com o aumento da  $f_{ad}$ , possivelmente devido à expansão verificada nos provetes, justificada pela presença de alumínio nas CFRSU.

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

- quanto às propriedades mecânicas a mistura binária B 20 apresenta-se como a melhor das misturas com introdução de CFRSU, as restantes misturas demonstram perdas consideravelmente superiores de qualidade, particularmente as misturas B 40 e B 50 que não apresentam uma resistência à compressão uniaxial que possibilite a sua aplicação numa situação real;
- as propriedades físicas e químicas das CFRSU podem estar na origem da degradação das propriedades do betão, carecendo de análise mais aprofundada para confirmar as hipóteses referidas por outros autores;
- apesar da degradação da generalidade das propriedades mecânicas do BAC verificada em todas as misturas ternárias com CFRSU, o patamar de  $f_{ad}=30\%$  (B10CV20CF e B20CV10CF) poderá ser passível de obter melhorias com um tratamento adequado às CFRSU para eliminação de metais pesados.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Instituto Politécnico de Lisboa (IPL) através do financiamento do projecto de investigação científica "ECONcrete - Produção de betão autocompactável (BAC) com

cinzas de fundo da queima de resíduos sólidos urbanos (IPL/2017/ECONCrete/ISEL)”. Agradece-se de igual modo o apoio do centro de investigação CERIS - ICIST.

## REFERÊNCIAS

- [1] Flower, D. J. M., & Sanjayan, J. G., 2007. Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(5), 282–288.
- [2] Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P., 2012. What a waste. A global review of solid waste management. *Urban Development Series Knowledge Papers*, 281(19), 44 doi:10.1111/febs.13058.
- [3] Chandler, A. J., Eighmy, T. T., Hjelmar, O., Kosson, D. S., Sawell, S. E., Vehlow, J., Hartlén, J., 1997. *Municipal solid waste incinerator residues (Vol. 67)*. Amsterdam: Elsevier.
- [4] NP EN 197-1, 2001 / A3, 2008. Cimento, Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes, Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- [5] NP EN 450-1, 2012. Cinzas volantes para betão, Parte 1: definição, especificações e critérios de conformidade. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- [6] NP EN 12620, 2010. Agregados para betão. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- [7] NP EN 934-1, 2008. Adjuvantes para betão, argamassa e caldas de injeção, Parte 1: Requisitos gerais, Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- [8] NP EN 1008, 2003. Água de amassadura para betão, especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- [9] Nepomuceno M.; Oliveira L., 2008. Parameters for self-compacting concrete mortar phase, *ACI Materials Journal*, SP-253, July, pp. 323-340.
- [10] Nepomuceno, M., Oliveira, L. and Lopes, S. M. R., 2012. Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders, *Construction and Building Materials*, 26, pp. 317-326..
- [11] Silva P. R. and de Brito J., 2015. Fresh-State Properties of Self-Compacting Mortar and Concrete with Combined Use of Limestone Filler and Fly Ash, *Materials Research, Ibero-American Journal of Materials*, Vol. 18, pp. 1097-1108.
- [12] Silva P. M., de Brito J. and Costa, J. M., 2011. Viability of two new mixture design methodologies for Self-Consolidating Concrete SCC, *ACI Materials Journal*, American Concrete Institute Vol. 108, No. 6, pp. 579-588.
- [13] Bogas J., Gomes A. and M. Pereira, 2012. Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate, *Construction and Building Materials* 35, pp. 1013-1022.
- [14] NP EN 12390-3, 2009. Ensaio do Betão Endurecido - Parte 3: Resistência à compressão de provetes. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- [15] LNEC E 397, 1993 - Betões, determinação do módulo de elasticidade em compressão, Lisboa, Portugal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- [16] NP EN 206-9, 2010. Betão Parte 9: Regras adicionais para betão autocompactável (BAC). Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- [17] Silva, P. R. and Brito, J. de, 2016. Experimental study of the mechanical properties and shrinkage of self-compacting concrete with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(4), 430–453.

- [18] Zajac, M., Rossberg, A., Le Saout, G., & Lothenbach, B., 2014. Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Composites*, 46, 99–108.
- [19] Cheng, A., 2012. Effect of incinerator bottom ash properties on mechanical and pore size of blended cement mortars. *Materials and Design*, 36, 859–864.
- [20] Pokorný, P., Dobiáš, D., & Čítek, D., 2016. The influence of corrosion of zinc powder on mechanical properties of concrete. *Ceramics - Silikaty*, 60(3), 195–199.
- [21] NP EN 206-1. (2007). *Betão Parte 1: especificação, desempenho, produção e conformidade, desempenho, produção e conformidade*. Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ)..
- [22] Ravasan, F. M., 2014. Characterization and mechanical properties of concrete mixtures made with sedimentary lime and industrial incinerator ash. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 26(1), 1–18.
- [23] Bertolini, L., Carsana, M., Cassago, D., Curzio, A. Q., & Collepardi, M., 2004. MSWI ashes as mineral additions in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(10), 1899–1906.
- [24] Amat, R. C., Ismail, K. N., Noor, N. M., & Ibrahim, N. M., 2017. The Effects of Bottom Ash from MSWI Used as Mineral Additions in Concrete. *MATEC Web of Conferences* 97, 01053 (2017) ETIC 2016, 1053, 6.
- [25] Jurič, B., Hanžič, L., Ilić, R., & Samec, N., 2006. Utilization of municipal solid waste bottom ash and recycled aggregate in concrete. *Waste Management*, 26(12), 1436–1442. doi:10.1016/j.wasman.2005.10.016.
- [26] Lin, K. L., & Lin, D. F., 2006. Hydration characteristics of municipal solid waste incinerator bottom ash slag as a pozzolanic material for use in cement. *Cement and Concrete Composites*, 28(9), 817–823. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.03.003.
- [27] Li, X.-G., Lv, Y., Ma, B.-G., Chen, Q.-B., Yin, X.-B., & Jian, S.-W., 2012. Utilization of municipal solid waste incineration bottom ash in blended cement. *Journal of Cleaner Production*, 32, 96–100.
- [28] Zajac, M., Rossberg, A., Le Saout, G., & Lothenbach, B. (2014). Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Composites*, 46, 99–108.
- [29] Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P., 2007. The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 551–558. doi:10.1016/j.cemconres.2006.10.013.
- [30] Silva, P., & Brito, J. de., 2015. Propriedades mecânicas e retração de BAC produzido em misturas binárias e ternárias de cinzas volantes e fíler calcário. In *IV Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável - BAC2015*. Porto.
- [31] Carminho, F., 2012. Resistência do betão à compressão em cubos vs cilindros. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia*. Consultado em Setembro de 2017 em <http://run.unl.pt/handle/10362/7853>.
- [32] Lynn, C. J., Dhir, R. K., & Ghataora, G. S., 2016. Municipal incinerated bottom ash characteristics and potential for use as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 127, 504–517.
- [33] Dou, X., Ren, F., Nguyen, M. Q., Ahamed, A., Yin, K., Chan, W. P., & Chang, V. W. C., 2017. Review of MSWI bottom ash utilization from perspectives of collective characterization, treatment and existing application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 24–38.