

# Betão Autocompactável com Fibras de Aço

## Método de concepção e propriedades mecânicas

**PALAVRAS-CHAVE:** Betão autocompactável, fibras de aço, cinzas volantes, filer cal

### Resumo

*O betão autocompactável pode ser definido como um betão capaz de fluir qu colocado num molde, escoando por entre as armaduras, envolvendo-as e preench o respectivo molde, apenas sob o efeito do seu peso próprio, dispensando o u equipamentos externos de vibração. Adicionando os benefícios associados à compactabilidade com os proporcionados pela incorporação de fibras de aço, é po obter um material dotado de características de elevado desempenho: o betão compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA). No entanto, a metodolo implementar para quantificar a dosagem dos materiais constituintes deste tipo de é, forçosamente, mais complexa do que a necessária para um betão convencional, vez que as exigências no estado fresco são substancialmente mais restritivas, o nú de componentes é mais elevado (adjuvantes e adições em maior número) e a sensibil de uns à presença dos outros é elevada. Neste sentido, é imperiosa a formulação a método de composição racional que, de uma forma simples, seja sensível aos fac envolvidos e que seja eficaz na concepção de misturas com bom desempenho, tan estado fresco como endurecido, contemplando, se possível, aspectos relacionados a necessária sustentabilidade económica e ambiental, reduzindo o mais possi consumo de cimento. O presente trabalho insere-se neste contexto, descrevendo metodologia de composição racional, aplicável a BACRFA. A validade deste tip metodologia é aferida determinando experimentalmente uma composição de um BA e procedendo à sua caracterização reológica e mecânica, por intermédio da aval do seu comportamento tanto no estado fresco como, quando endurecido, à compr e à flexão.*

### 1. Introdução

O betão autocompactável resulta da evolução do betão convencional e perspectiva horizontes para a aplicabilidade de um material que, na sua vertente clássica, se tem versátil e eficaz. A principal preocupação que tem motivado o desenvolvimento tecnol do betão como material estrutural, tem-se centrado no aperfeiçoamento das características mecânicas e, nas últimas décadas, nos aspectos relacionados com durabilidade. No entanto, as mais recentes evoluções na tecnologia dos adjuva sobretudo dos agentes superplastificantes, estão a influenciar notoriamente o tr evolutivo do betão, acrescentando-lhe uma nova dimensão, que é a do seu comportan como material fluido, enquanto no estado fresco.

Para o estudo do comportamento reológico, o betão fresco pode ser entendido com concentração de partículas com elevado grau de variedade dimensional em suspensão meio líquido, exibindo um comportamento semelhante ao de um fluido. Atendendo pressuposto, avaliar o comportamento reológico do betão fresco não se afigura uma l fácil devido à complexidade da sua composição que incorpora um número eleva diferentes materiais, com propriedades físicas e mecânicas distintas (vários tip agregados, cimento, adjuvantes e adições) e que interagem entre si. Infelizmente, ainda possível prever o comportamento reológico dos betões a partir do conhecin

Eng. Eduardo Nuno Borges Pereira



Assistente Estagiário do Dep. de Eng. Civil da Escola de Eng.<sup>a</sup> da Universidade do Minho

Eng. Joaquim António O. de Barros



Prof. Auxiliar do Dep. de Eng. Civil da Escola de Eng.<sup>a</sup> da Universidade do Minho

Eng. Aires Camões



Prof. Auxiliar do Dep. de Eng. Civil da Escola de Eng.<sup>a</sup> da Universidade do Minho

Fig. 1 - Variação do espalhamento relativo com a variação da percentagem de cinzas volantes

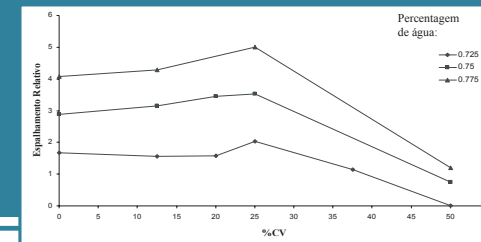
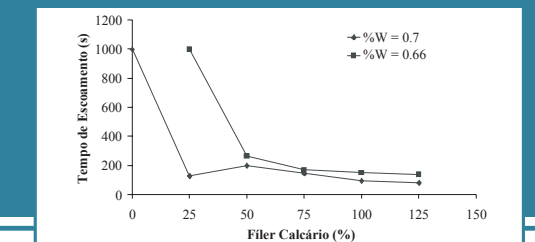


Fig. 2 - Sensibilidade do tempo de escoamento no cone de Marsh à percentagem de filer calcário (FC)



das propriedades dos seus constituintes. A variedade e a quantidade de ensaios que seriam necessários para avaliar o efeito de todas as interações entre os constituintes da mistura seria imenso e, conseqüentemente, impraticável. Nestas circunstâncias, torna-se premente a necessidade de desenvolver um método de composição que seja prático e eficaz na prossecução do objectivo essencial, que reside na concepção de misturas de betão reforçado com fibras de aço (BRFA) que, por um lado, demonstrem cumprir as exigências de autocompactabilidade e ductilidade, e que, por outro, se revelem económica e ambientalmente sustentáveis.

Neste contexto, foi desenvolvida uma metodologia experimental para a definição da composição de betões autocompactáveis reforçados com fibras de aço (BACRFA). Esta metodologia e a sua aplicabilidade ao fabrico de elementos estruturais pré-fabricados são aqui apresentados. Para tal, pretende-se definir uma composição com uma resistência à compressão superior a 50 MPa aos sete dias de idade. De modo a assegurar a sua competitividade económica, limitou-se a dosagem de cimento do BACRFA em 410 kg/m<sup>3</sup> e foi preferida a incorporação de sílica de fumo.

## 2. O Betão no estado fresco

Quando no estado fresco, o betão pode ser encarado como sendo constituído por duas fases distintas: fase sólida, que inclui todas as partículas de agregado cujo diâmetro equivalente seja superior a 150 µm e que constitui o esqueleto sólido; fase fluida (pasta ligante), que é constituída pelas partículas sólidas de diâmetro inferior a 150 µm (cimento e adições), pela água e pelos adjuvantes (superplastificantes, controladores de viscosidade e introdutores de ar), que preenchem os espaços vazios entre as partículas do esqueleto sólido. O processo de determinação da composição do betão pode ser baseado na optimização separada da constituição do esqueleto sólido, da pasta ligante e, posteriormente, do conjunto. Este processo não deverá ser dissociado do desempenho requerido ao betão, quer no estado fresco, quer após ter atingido o estado endurecido.

Em relação à fase sólida, o objectivo principal consiste em obter um esqueleto granular com a maior compacidade possível, sendo para isso necessário dispor de um número suficiente de agregados para assegurar uma gradação contínua da curva granulométrica [1, 2]. Para o efeito, pode-se determinar a percentagem de cada tipo de agregado na mistura final procedendo ao ajuste por curvas de referência (Faury, Bolomey, etc.). No entanto, factores como a forma e a configuração superficial dos agregados só poderão ser tidos em consideração recorrendo a métodos de cariz experimental.

Estas metodologias aparentam ser mais adequadas ao caso do BRFA, já que no momento em que se afina a composição do esqueleto sólido é fundamental ter em conta a influência da presença das fibras de aço. Desta forma, o ajuste recorrendo a curvas granulométricas de referência obriga a admitir um diâmetro equivalente para as fibras de aço, o que, por serem elementos extremamente esbeltos, torna a simplificação demasiado grosseira.

A fase fluida, por seu turno, terá a função de servir como “veículo de transporte” das partículas que constituem o esqueleto sólido, da forma mais estável e coesa possível. A maior parte da complexidade que representa a definição de uma mistura autocompactável reside na fase fluida, ou seja, na definição da composição da pasta ligante que é constituída por um número elevado de componentes (cimento, adjuvantes, adições e água). Mas, mais importante ainda é o facto da natureza dos seus componentes ser tão diversa, que acaba por se tornar menos evidente a relação que se estabelece entre cada um deles no seio da mistura fluida.

A necessidade da utilização dos superplastificantes surge na sequência da tendência que as partículas em suspensão têm para formar flocos. Estes flocos, com diâmetros equivalentes bastante superiores aos das partículas que os compõem, acabam por criar espaços maiores entre partículas, implicando tanto uma redução da fluidez da pasta como um aumento da quantidade de água necessária para preencher o espaço entre partículas. É ao superplastificante que cabe a tarefa de dispersar as partículas e evitar a formação destes flocos. Desta forma, aumenta a proximidade entre as partículas sólidas que constituem a pasta e, assim, favorece-se a interacção entre elas, resultando maior estabilidade e melhor desempenho em termos reológicos. A este nível assume também importância fundamental o grau de arrumação que se consegue atingir para o conjunto das partículas sólidas que constituem a pasta ligante. Um empacotamento superior destas partículas será vantajoso em termos de comportamento mecânico, dado que a uma maior compacidade corresponde uma maior resistência mecânica, por aumentar o número de pontos de contacto entre as partículas. Também o será em termos reológicos, dado que diminuem os espaços entre as partículas sólidas, ficando assim disponível mais água livre para lubrificar a superfície de contacto entre elas.

## 3. Metodologia e definição da composição

Para o fabrico das composições de BACRFA seleccionaram-se materiais correntes disponíveis no mercado. Utilizou-se um cimento (C) CEM I 42,5R fornecido pela Secil, cinzas volantes (CV) provenientes da central termo-eléctrica do

Pego, superplastificante (SP) de terceira geração com base em policarboxilatos (Glenium 77 SCC), água, três tipos de agregados (areia fina rolada, meia areia rolada e brita granítica 5-12) e um material fino, de dimensão inferior à do cimento e das cinzas volantes: filer calcário (FC) Micro 100 AB da Comital. Com a incorporação do filer calcário pretendeu-se aumentar quer o grau de empacotamento das partículas sólidas quer a proximidade das partículas em suspensão, de forma a promover a estabilidade da pasta e, em simultâneo, reduzir a quantidade de cimento. Utilizaram-se também fibras de aço do tipo Dramix® RC-80/60-BN, com um comprimento de 60 mm, um diâmetro de 0,75 mm, e uma tensão de cedência de 1100 MPa.

O método que neste trabalho se propõe é constituído por três fases distintas: na primeira, procede-se à afinação da composição da pasta ligante; na segunda, afina-se a composição do esqueleto sólido; na terceira, faz-se a mistura da pasta com o esqueleto sólido afinado, variando-se a percentagem em volume de pasta no volume total de betão até se obter uma mistura que apresente as características de autocompactabilidade requeridas, ou seja, apresente espalhamento suficientemente elevado, velocidade de escoamento correcta, adequada capacidade de se adaptar e ultrapassar obstáculos, e resistência aos fenómenos de segregação e exsudação.

### 3.1 Composição da pasta ligante

Nesta primeira fase do procedimento proposto, define-se a composição da pasta ligante. Para o efeito, procedeu-se à realização de várias misturas de água, cimento e cinzas volantes, fazendo-se variar a percentagem de água e de cinzas volantes. Cada uma destas percentagens foi definida em volume, tendo por base o volume de cimento utilizado. A todas as misturas também se acrescentou uma quantidade fixa de superplastificante, de forma a promover a dispersão das partículas finas em suspensão. O comportamento reológico das pastas foi avaliado por intermédio da realização de ensaios de espalhamento. Os resultados obtidos apresentam-se na figura 1.

Por observação da figura 1, pode-se inferir que a percentagem de cinzas volantes que optimiza o comportamento da pasta é 25%, uma vez que, independentemente da quantidade de água, a pasta que atingiu maior diâmetro de espalhamento foi a constituída com esta percentagem de CV.

Sabendo as percentagens relativas de cimento e de cinzas volantes, passou-se à determinação da quantidade óptima de filer calcário, mantendo constante a percentagem de cinzas volantes determinada (25%), e variando a percentagem em volume de filer calcário nas várias misturas realizadas. Esta

percentagem foi definida do mesmo modo que para as cinzas volantes. Também se acrescentou, em todas as misturas, uma quantidade constante de superplastificante mas, desta feita, definida relativamente ao volume de materiais finos (MF=C+CV+FC), e não relativamente ao peso, que foi o efectuado na primeira campanha. A quantidade utilizada foi de 0,035 dm<sup>3</sup>/dm<sup>3</sup> de material fino. Para todas as misturas efectuadas, realizou-se o ensaio de espalhamento e o ensaio de escoamento no cone de Marsh. Mediu-se ainda a resistência à compressão aos sete dias em cubos de 5 cm de aresta. Os resultados encontram-se representados nas figuras 2, 3 e 4.

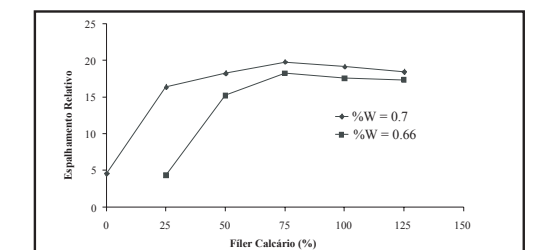


Fig. 3 - Sensibilidade do espalhamento relativo à percentagem de filer calcário (FC)

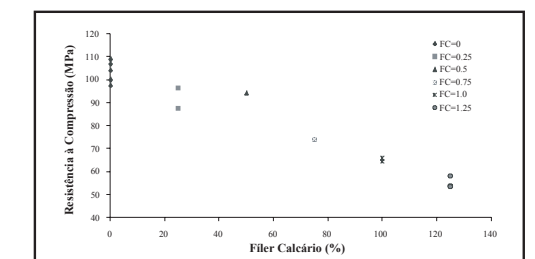


Fig. 4 - Resistência à compressão dos provetes cúbicos de pastas com várias percentagens de filer calcário (FC)

Dos resultados obtidos, pode-se concluir que quanto maior é a percentagem de filer calcário presente na mistura, menor é a resistência à compressão obtida aos 7 dias, maior é o diâmetro de espalhamento e menor o tempo de escoamento. Desta forma, concluiu-se que a mistura que apresentava melhor compromisso entre todos estes factores seria a que possuía uma percentagem volúmica de filer calcário relativamente ao volume de cimento de 50%.

Seguidamente, com o intuito de determinar a percentagem óptima de superplastificante na mistura, procedeu-se à elaboração de várias misturas com distintas percentagens de superplastificante, mantendo fixos os restantes componentes. Para cada mistura, determinou-se o

espalhamento relativo, o tempo de escoamento no cone de Marsh e a resistência à compressão aos sete dias em cubos de 5 cm de aresta (figuras 5 e 6).

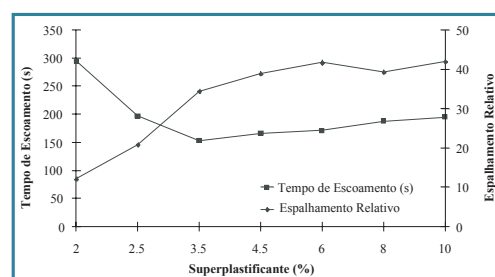


Fig. 5 - Resultados dos ensaios de espalhamento de escoamento para diferentes percentagens de superplastificante

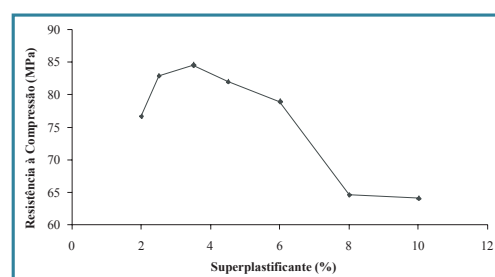


Fig. 6 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão em cubos de 5 cm de aresta, para diferentes percentagens de superplastificante

Dos gráficos representados, concluiu-se que a quantidade de superplastificante ótima é de  $0,035 \text{ dm}^3/\text{dm}^3$  de material fino, visto que foi com este valor que se atingiu a maior resistência à compressão da pasta. Para quantidades de superplastificante superiores a este valor, o espalhamento e o tempo de escoamento não melhoram significativamente. Com este último passo concluiu-se a primeira fase do procedimento que permitiu determinar que a mistura final deve incluir um volume de cinzas volantes igual a 25% do volume de cimento, um volume de fíler calcário igual a 50% do volume de cimento, e uma quantidade de superplastificante igual a  $0,035 \text{ dm}^3/\text{dm}^3$  de material fino.

### 3.2 Composição do esqueleto sólido

Na segunda fase do procedimento, afinou-se a composição do esqueleto sólido. Para o efeito, realizaram-se várias misturas de meia areia e brita em percentagens relativas diferentes. Mais uma vez, estas percentagens foram definidas

em termos volumétricos. Para cada mistura registou-se o peso correspondente a um volume de  $5 \text{ dm}^3$  e, ao representar graficamente os resultados obtidos, concluiu-se que existe um ponto ótimo na curva, que coincide com a mistura que atinge maior peso e, conseqüentemente, apresenta um grau de empacotamento superior, pelo que com compactidade mais elevada (ver figura 7).

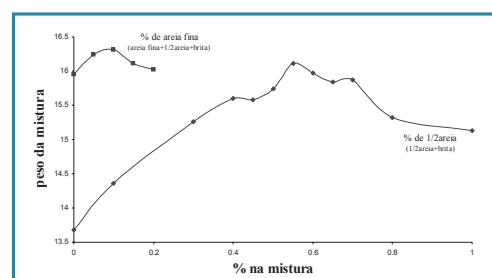


Fig. 7 - Peso das misturas dos vários agregados

Ao ponto ótimo correspondem as percentagens relativas de meia areia e brita na composição final de, respectivamente, 55% e 45%. Posteriormente, introduziu-se na mistura a areia fina. Desta feita, fez-se variar a percentagem relativa, em volume, de areia fina no volume total de agregados, mantendo constante as percentagens relativas de meia areia e brita, resultantes do passo anterior. Da representação gráfica dos pontos que se obtêm medindo o peso de um volume fixo de  $5 \text{ dm}^3$  de cada uma desta última série de misturas, resulta um ponto ótimo que conduz à composição final do esqueleto sólido. Ao ponto ótimo desta última composição corresponde uma percentagem, em volume, de areia fina de 10%, sendo o volume restante composto pelos 55% de meia areia e 45% de brita anteriormente determinados.

Convém salientar que em todas as misturas acima referidas se acrescentou o volume correspondente a 30 kg de fibras de aço por  $\text{m}^3$  de betão. Desta forma, a composição do esqueleto sólido foi afinada tendo em conta a perturbação que a presença das fibras introduz no empacotamento das partículas.

### 3.3 Quantidade de pasta ligante

Definida a composição do esqueleto sólido e da pasta ligante, passou-se então à execução da última fase do procedimento, que consiste na determinação da quantidade de pasta ligante a incluir na mistura. Durante esta fase, testou-se uma primeira mistura de betão, constituída por uma percentagem de pasta ligante de 38%, em relação ao volume total de betão. Na composição da pasta, por sua vez, admitiu-se uma percentagem volumétrica de água de 70%. A quantidade

Fig. 8 - Amostra de betão depois de espalhada com o cone de Abrams



Fig. 10 - Amostra de betão depois de espalhada com o cone de Abrams

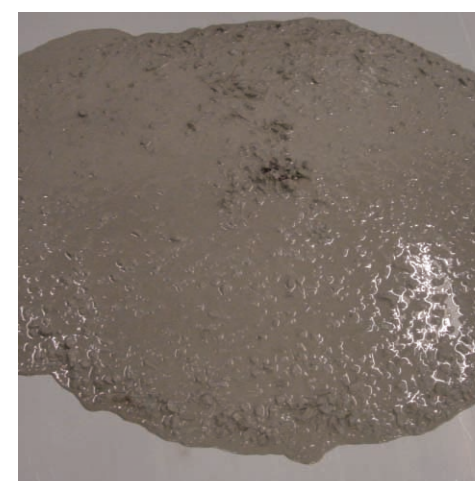


Fig. 9 - Pormenor da fronteira do círculo de betão espalhado



Fig. 11 - Pormenor da fronteira do círculo de betão espalhado



de cimento incluída no betão era, para esta composição, de aproximadamente  $400 \text{ kg/m}^3$  de betão.

Tal como se pode observar nas figuras 8 e 9, o resultado do ensaio *Slump flow*, realizado com o cone de Abrams invertido, não foi satisfatório. A segregação dos componentes foi evidente, a pasta evidenciava fluidez excessiva e não se mostrou capaz de "arrastar" as fibras de aço e os agregados maiores até à fronteira do círculo de betão espalhado. Por outro lado, foi notório um excesso de quantidade de pasta.

Numa segunda tentativa, reduziu-se a percentagem volumétrica de pasta na mistura de 38% para 36%, e diminuiu-se a percentagem volumétrica de água na composição da pasta de 70% para 60%. Desta forma, a quantidade de cimento incluído no betão manteve-se próxima dos  $400 \text{ kg/m}^3$  de betão.

Mais uma vez os resultados obtidos no ensaio de espalhamento com o cone de Abrams invertido (*slump*

*flow*) não foram satisfatórios, continuando a ser evidentes os sinais de segregação. No entanto, tal como se pode observar nas figuras 10 e 11, constatou-se uma melhoria evidente entre a primeira e a segunda composição. Desta forma, numa terceira tentativa decidiu-se reduzir novamente a percentagem volumétrica de pasta ligante (de 36% para 34%) e a percentagem volumétrica de água na pasta (de 60% para 50%). A quantidade de cimento incluída no betão continuou próxima de  $400 \text{ kg/m}^3$ .

Desta feita os resultados obtidos no ensaio de espalhamento (*slump flow*) foram aceitáveis, apresentando-se a mistura com coesão adequada e sem sinais aparentes de segregação (figuras 12 e 13). O espalhamento total foi registado, bem como o tempo necessário para atingir um espalhamento de 500 mm de diâmetro (T50). O diâmetro médio de espalhamento foi de 775 mm e T50 atingiu o valor de 4.6s. Assim, a composição final de BACRFA é a que se apresenta na tabela 1.

Volume de pasta (%)	C (Kg)	CV (Kg)	Água (Kg)	SP ( $\text{dm}^3$ )	FC (Kg)	Areia fina (Kg)	Meia areia (Kg)	Brita (Kg)
0.34	408.00	76.50	97.35	8.05	183.94	123.82	753.33	675.47

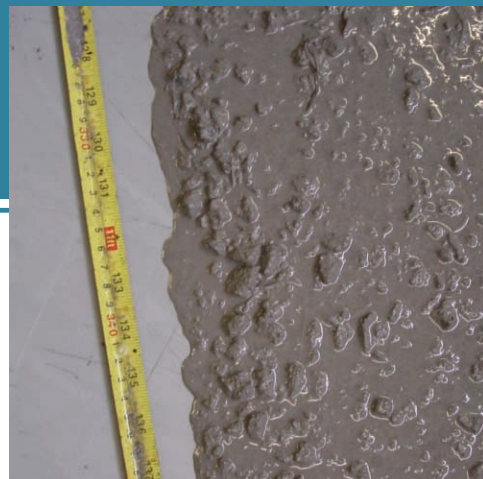
Tabela 1 – Composição final para  $1 \text{ m}^3$  de betão auto-compactável fabricado com  $30 \text{ kg/m}^3$  de fibras de aço



Fig. 12 - Amostra de betão depois de espalhada com o cone de Abrams



Fig. 13 - Pormenor da fronteira do círculo de betão espalhado



#### 4. Comportamento em compressão e em flexão

Definida a composição de betão a testar, foram moldados dez provetes cilíndricos (com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura) e oito provetes prismáticos com 600x150x150 mm<sup>3</sup>, tendo em vista, respectivamente, a avaliação do comportamento em compressão e em flexão. Os provetes foram conservados em câmara húmida a uma temperatura de 20 °C e 80% de humidade relativa durante um dia, após o qual se procedeu à respectiva desmoldagem e imersão em água (mantendo-os à temperatura de 20 °C) até à data de realização dos ensaios.

##### 4.1 Comportamento em compressão

O comportamento em compressão do BACRFA produzido foi avaliado aos sete dias de idade por intermédio da realização de ensaios em prensa servo-controlada de 3000 kN de capacidade máxima de carga. Foi obtida uma resistência média à compressão de 56.45 MPa com um desvio padrão de 2.5 MPa. Para uma quantidade de cimento de 408 kg/m<sup>3</sup> e para a idade de sete dias, o valor da resistência à compressão obtido é elevado [3] e amplamente suficiente para a maioria das aplicações estruturais.

##### 4.2 Comportamento em flexão

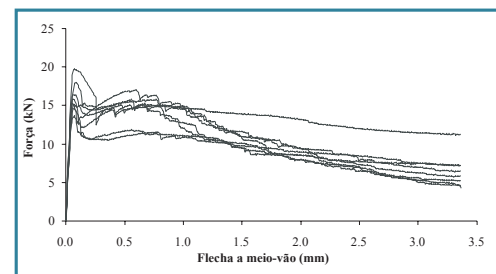
Para a caracterização do comportamento em flexão do BACRFA produzido foram realizados ensaios sob três pontos de carga segundo as recomendações e os procedimentos de

ensaio preconizados pela RILEM TC 162-TDF [4, 5], excepto no que concerne à moldagem dos provetes, onde foi dispensada a operação de compactação externa.

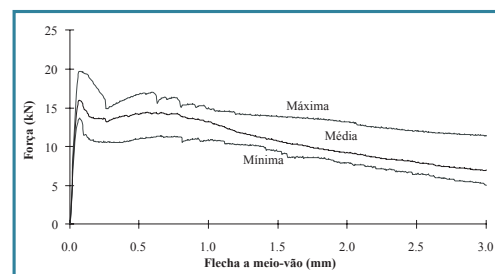
Na figura 14a apresentam-se as relações força-flecha, F-δ, obtidas. A envolvente e as curvas F-δ médias estão representadas na figura 14b.

Os ensaios realizados permitiram obter os resultados apresentados na tabela 2. Nesta tabela,  $f_{ct,L}$  representa a tensão correspondente à força  $F_L$  (força máxima registada para um valor de flecha de 0.05 mm) e  $E_{c,f}$  é do módulo de elasticidade em flexão, avaliado de acordo com o sugerido por Petersson [6]. Foram ainda determinadas as resistências equivalentes em flexão,  $f_{eq,2}$  e  $f_{eq,3}$  e as resistências residuais em flexão,  $f_{R,1}$  e  $f_{R,4}$ , que são os parâmetros que a RILEM TC 162-TDF recomenda para caracterizar a ductilidade do BRFA [4, 5].

Recorrendo ao valor da resistência à compressão obtida e às recomendações do CEB-FIP 1993 [7], é possível estimar a resistência à tracção axial média,  $f_{ctm,ax}$ , a resistência à tracção em flexão média,  $f_{ctm,f}$ , e o módulo de elasticidade em compressão,  $E_{ci}$ . Os valores estimados foram de 4.0 MPa, 6.3 MPa e 38.28 GPa, respectivamente. O valor de  $f_{ct,L}$  superou o da  $f_{ctm,ax}$ , uma vez que a fendilhação iniciou-se antes da força  $F_L$  ter sido atingida. Como a força máxima foi obtida para um deslocamento superior a 0.05 mm, i.e., a força máxima atingiu um valor superior a  $F_L$ ,  $f_{ct,L}$  foi inferior a  $f_{ctm,f}$ . Para os provetes de BACRFA ensaiados, a aproximação proposta por Petersson originou a obtenção de valores do módulo de elasticidade inferiores a  $E_{ci}$ .



(a)



(b)

Fig. 14 - Curvas força-flecha obtidas nos ensaios de flexão (a) e correspondentes envolventes e curva média (b)

	$f_{ct,L}$ (MPa)	$E_{c,f}$ (GPa)	$f_{eq,2}$ (MPa)	$f_{eq,3}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
Valor médio	4.78	32.53	4.30	3.51	4.53	2.22
Desvio padrão	0.52	3.25	0.63	0.44	0.62	0.66
Coefficiente de Variação (%)	10.83	9.99	14.66	12.53	13.66	29.64

Tabela 2 – Resultados obtidos nos ensaios de flexão

#### 5. Conclusões

Neste trabalho propôs-se uma metodologia racional e de fácil implementação para a definição da composição de BACRFA incluindo uma quantidade de cimento próxima dos 410 kg/m<sup>3</sup> e capazes de atingir uma resistência à compressão superior a 50 MPa aos sete dias de idade. De modo a assegurar os requisitos de autocompactabilidade, recorreu-se à incorporação de cinzas volantes, fíler calcário e de um superplastificante de terceira geração. A metodologia de composição proposta baseia-se na realização de três fases experimentais distintas: definição da composição da pasta ligante; definição do esqueleto sólido granular onde as fibras de aço são consideradas; definição da quantidade de pasta ligante a incluir na composição de betão.

Do trabalho experimental realizado, pode-se concluir que é possível conceber composições de BACRFA sem que para isso o custo ambiental e económico da solução alcançada seja irremediavelmente sacrificado. Os resultados obtidos com base na aplicação do método proposto, abrem boas perspectivas para um material que parece conseguir potenciar as qualidades dos ingredientes que o compõem, e que desta forma aparenta poder ser um bom compromisso de qualidade/custo. Também fica demonstrada a versatilidade de um material que escoo com muita facilidade, e que se adapta satisfatoriamente às mais exigentes formas e volumes, dispensando a operação de compactação e sem, no entanto, apresentar sinais aparentes de segregação ou degradação das suas propriedades.

#### Agradecimentos

Este estudo foi efectuado no âmbito do projecto "PABERFIA - Painéis sandwich prefabricados de betão reforçado com fibras" financiado pela FEDER, MCT e Universidade do Minho, no qual estão envolvidos as empresas Pregia e Civitest. Agradece-se o apoio e disponibilidade das Empresas Secil, Bettor MBT, Bekaert e Comital, que contribuíram com os materiais que foram utilizados na elaboração das composições testadas. O segundo autor agradece a bolsa SFRH/BSAB/291/2002-POCTI concedida pela FCT e FSE.

#### Referências

- [1] Neville, A.M., 'Properties of concrete', 4th edition, Longman Group Limited, England, (1995) 844 pgs.
- [2] Dewar, J. D., 'Computer Modelling of Concrete Mixtures', E & Spon, (1999).
- [3] Gomes, P.C.C., 'Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete', PhD thesis, UPC, Barcelona, Spain, (2002) 139 pgs.
- [4] Barros, J.A.O., "Caracterização experimental do betão reforçado com fibras – propostas recentes", BETÃO, Revista da Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto, Ano III, Nº 6, pp. 31-7, Julho 2001.
- [5] Vandewalle, L. et al., "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - Final Recommendation", Materials and Structures, 35(253), Nov. (2002) 579-582.
- [6] Petersson, P.-E., 'Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials', Lund Institute of Technology, Division of building materials, Report TVBM-1006 (1981).
- [7] CEB-FIP Model Code, Comité Euro-International du Beton, Bulletin d'Information nº 213/214 (1993).