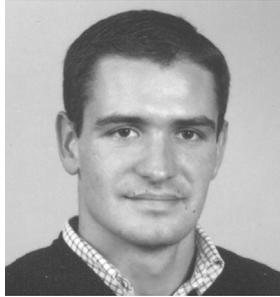


## PAINÉIS ALIGEIRADOS EM BETÃO AUTOCOMPACTÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO



**E. N. B. PEREIRA**

Ass. Estagiário  
Univ. do Minho  
Guimarães



**J. A. O. BARROS**

Prof. Auxiliar  
Univ. do Minho  
Guimarães



**A. F. F. A. CAMÕES**

Prof. Auxiliar  
Univ. do Minho  
Guimarães

### SUMÁRIO

O Betão auto-compactável reforçado com fibras de aço é um material que alia as vantagens inerentes à adição de fibras na sua composição (incremento da sua ductilidade), com as que resultam do facto de se tratar de um material que possui elevados níveis de trabalhabilidade. Trata-se, deste modo, de um material extremamente versátil, para o qual se apresenta o método de concepção e a caracterização mecânica de uma composição formulada.

### 1. INTRODUÇÃO

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

Para o estudo do comportamento reológico, o betão fresco pode ser entendido como uma concentração de partículas com elevado grau de variedade dimensional em suspensão num meio líquido, exibindo um comportamento semelhante ao de um fluido. Atendendo a este pressuposto, avaliar o comportamento reológico do betão fresco não se afigura uma tarefa fácil devido à complexidade fenomenológica que deriva do facto das composições incorporarem um número elevado de diferentes constituintes, com propriedades físicas e mecânicas distintas (vários tipos de agregados, cimento, adjuvantes e adições) e que interagem entre si. Infelizmente, não é ainda possível prever o comportamento reológico dos betões a partir do conhecimento 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 imensa 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 auto-compactabilidade e ductilidade, e que, por outro, se revelem económica e ambientalmente sustentáveis.

Neste contexto, foi desenvolvida uma metodologia experimental de definição de composição de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA). Esta metodologia e a sua aplicabilidade ao fabrico de elementos estruturais pré-fabricados são aqui apresentadas. Para tal, pretende-se definir uma composição com uma resistência à compressão superior a 20 MPa às 24 horas, de forma a permitir a execução eficiente e segura de todas as operações de desmoldagem e armazenamento dos elementos pré-fabricados. De modo a assegurar a sua competitividade económica e eficiência ambiental, o BACRFA deve ser fabricado com uma dosagem de cimento inferior a 400 kg/m<sup>3</sup>, e recorrendo apenas a um tipo de filler.

## 2. METODOLOGIA DE DEFINIÇÃO DA COMPOSIÇÃO

O método que neste trabalho se utiliza para formular a composição é constituído por três fases distintas: a primeira consiste na afinação da composição da pasta ligante; a segunda destina-se a determinar a composição do esqueleto sólido; na terceira fase procede-se à 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 auto-compactabilidade 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.

Esta metodologia baseia-se no facto de se poder considerar que, enquanto no estado fresco, o betão é constituído por duas fases distintas: fase sólida, que inclui todas as partículas de agregados 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.

Em relação à fase sólida, o objectivo principal é o de conseguir 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].

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. Esta é constituída por um número elevado de componentes (cimento, adjuvantes, adições e água), resultando complexa a definição da sua composição e, para além disso, a natureza destes é tão diversa que acaba por se tornar menos evidente a relação que se estabelece entre cada um deles, no seio da mistura fluida [2].

Para o fabrico das composições de BACRFA seleccionaram-se materiais correntes disponíveis no mercado. Utilizou-se cimento (C) CEM I 42.5R fornecido pela Secil, filer calcário (FC) Micro 100 AB da Comital, 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 fibras de aço DRAMIX® RC-80/60-BN. Da aplicação destes método resultou a composição incluída na Tabela 1. Para uma descrição mais detalhada da metodologia de definição da composição do BACRFA remete-se o leitor para outros trabalhos [3, 4]

Tabela 1: Composição do BACRFA (por m<sup>3</sup> de betão)

| Cimento (Kg) | Água (Kg) | SP (dm <sup>3</sup> ) | FC (Kg) | Areia fina (Kg) | Meia areia (Kg) | Brita (Kg) | Fibras (Kg) |
|--------------|-----------|-----------------------|---------|-----------------|-----------------|------------|-------------|
| 364.28       | 93.67     | 6.94                  | 312.24  | 108.59          | 723.96          | 669.28     | 30.00       |

### 3. COMPORTAMENTO DO BACRFA EM COMPRESSÃO

#### 3.1 Procedimentos de ensaio e sistema de aquisição de dados

Para avaliar o comportamento à compressão do BACRFA concebido moldaram-se 18 provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Desses 18 provetes, 12 foram ensaiados às 12 h, 24 h e 3 dias (4 por cada idade), tendo os restantes 6 provetes sido ensaiados aos 7 dias e 28 dias (3 por cada idade). Esta distinção prende-se com o facto de que, para os provetes com 12 h, 24 h e 3 dias, a determinação do módulo de elasticidade longitudinal do betão,  $E_c$ , [8] ter exigido dispor de mais um provete por forma a avaliar-se, com o rigor necessário, a resistência do material naquelas idades,  $f_{ce}$ . O ensaio para determinação de  $f_{ce}$  foi efectuado sob controlo de deslocamento do pistão do actuador, à velocidade de 5  $\mu\text{m/s}$ .

Os valores de  $E_c$  para as distintas idades foram obtidos por intermédio da aplicação do procedimento esquematicamente representado na Figura 1. Em cada um dos ciclos de carga - constituídos por uma rampa de carga, um patamar de carga constante durante 90 s e uma rampa de descarga - a tensão variou entre 0.5 MPa ( $f_{ci}$ ) e  $1/3$  de  $f_{ce}$ . Os ramos de carga e de descarga foram realizados sob controlo de força à velocidade de 0.5 MPa/s.

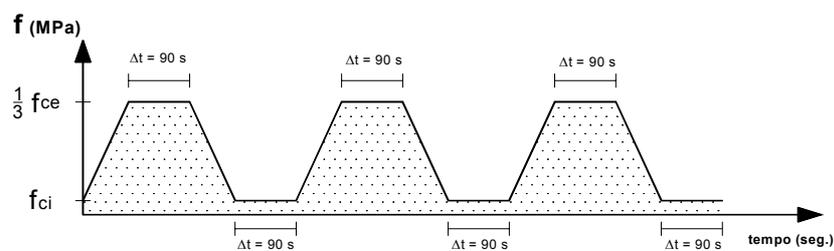


Figura 1: História do carregamento adoptado na determinação do Módulo de Elasticidade .

Após a determinação dos valores de  $E_c$ , os provetes foram ensaiados até à sua completa rotura, tendo-se para tal executado os ensaios sob controlo de deslocamento do pistão do actuador à velocidade de 5  $\mu\text{m/s}$ . A deformação do provete foi avaliada entre pratos de carga, por intermédio da colocação de LVDT's em três pontos distintos, dispostos a uma distância de 148 mm do eixo do provete, e fazendo entre si um ângulo de 120° (Figura 2). Esta disposição dos LVDT's permite eliminar a perturbação que a deformação de todo o sistema de reacção e carregamento provoca na obtenção da deformação axial do provete.

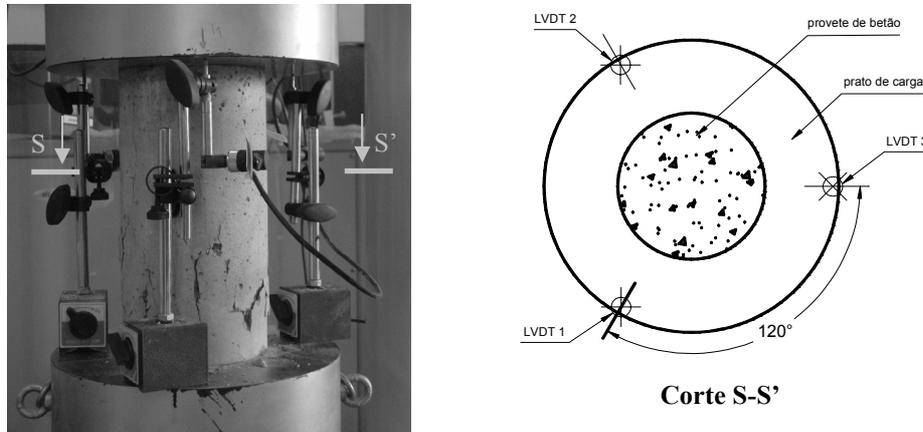


Figura 2: Disposição dos LVDT's nos ensaios de compressão .

### 3.2 Resultados

Com base nos deslocamentos lidos nos LVDT's, calculou-se o deslocamento relativo ocorrido no eixo do provete. Para tal assumiu-se que os deslocamentos nos 3 LVDT's traduzem o movimento do plano constituído pela face inferior da rótula que transfere a carga do actuador para o provete. A extensão axial do provete foi assim obtida dividindo o deslocamento relativo axial do provete pela altura deste. As relações tensão-extensão,  $\sigma_c - \varepsilon_c$ , obtidas para as distintas idades estão representadas na Figura 3.

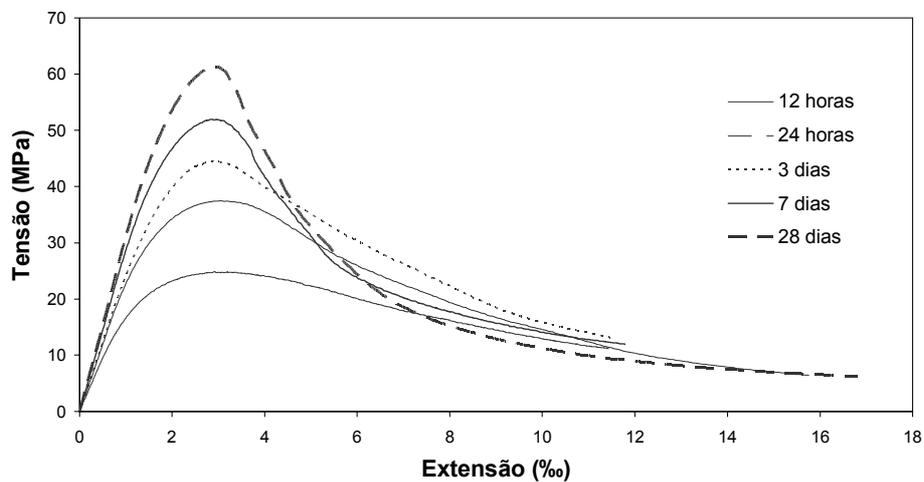


Figura 3: Relação tensão-extensão em compressão para distintas idades.

Da análise da figura 3 verifica-se que o material apresenta um comportamento à compressão bastante dúctil, e a perda de resistência depois do pico dá-se de uma forma bastante gradual e

suave. A tensão de compressão residual é também relativamente elevada (aprox. 10 MPa), independentemente da idade do betão. À medida que aumenta a idade, devido ao aumento da resistência à compressão e da perda de carga após pico, as curvas  $\sigma_c - \varepsilon_c$  assumem uma configuração “afunilada” que se acentua com a idade e que fisicamente traduz um aumento da fragilidade do material. Este efeito é particularmente evidente na transição dos 3 dias para os 7 dias. Nota-se inclusivamente que o tramo pós-pico das curvas relativas aos 7 e 28 dias intersecta a curva relativa aos 3 dias (ou até as curvas relativas às 12 e 24 horas), pelo que a resistência à compressão do betão para extensões mais elevadas é inferior para idades maiores, o que permite concluir que existe uma perda de ductilidade com o aumento da idade. No entanto, esta perda é bastante menos acentuada do que a que ocorre nos provetes de betão simples.

Nas Figuras 4 e 5 apresenta-se a variação do  $E_c$  e do valor médio da resistência à compressão ( $f_{cm}$ ) com a idade.

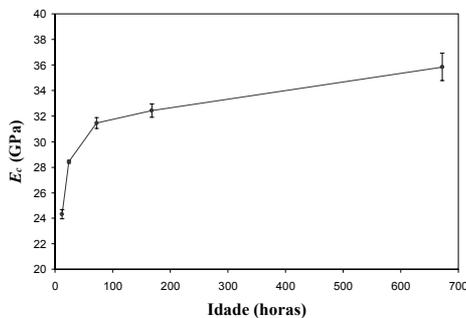


Figura 4: Variação de  $E_c$  com a idade.

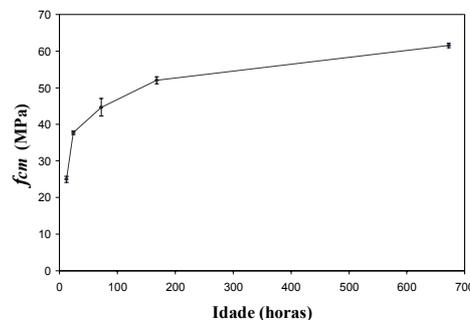


Figura 5: Variação de  $f_{cm}$  com a idade

O primeiro facto a ressaltar destes dois gráficos é a elevada resistência à compressão que o BACRFA demonstra logo a partir das 12 horas (aprox. 25 MPa para as 12 horas, valor superior ao mínimo exigido de 20 MPa para as 24 horas), tendo atingido 62 MPa aos 28 dias, o que são valores bastante elevados, atendendo à quantidade de cimento utilizada na composição. A forma da evolução da  $f_{cm}$  com a idade do BACRFA indicia que acima dos 28 dias o aumento de  $f_{cm}$  será marginal. Tal justifica-se pelo facto de se ter utilizado adições sem propriedades pozolânicas e pelo motivo de se ter limitado a quantidade de cimento a um valor inferior a 400 Kg/m<sup>3</sup>. A evolução do  $E_c$  com a idade parece ter a mesma tendência que a obtida para  $f_{cm}$ , observando-se valores bastante elevados para todas as idades. A justificação para tal reside no facto de a composição do betão concebido possuir uma relação água/cimento muito baixa (aprox. 0,28 em peso), o que contribui para a formação de uma matriz cimentícia extremamente compacta, com bom desempenho em termos de resistência à compressão, e com menor deformabilidade, ou seja, com um módulo de elasticidade mais elevado.

#### 4. COMPORTAMENTO DO BACRFA EM FLEXÃO

##### 3.1 Procedimentos de ensaio e sistema de aquisição de dados

Para proceder à caracterização do comportamento em flexão do BACRFA, moldaram-se 20 provetes prismáticos (150×150×600mm). À excepção do procedimento de enchimento dos

moldes dos provetes e da velocidade de deformação no controlo do ensaio de flexão, os restantes procedimentos adoptados na preparação do provete e na execução dos ensaios foram os que a RILEM TC 162-TDF recomenda [7]. De facto, dado tratar-se de um betão autocompactável, os provetes foram betonados sem qualquer acto de compactação. No que respeita à velocidade de deformação do ensaio, a RILEM TC 162-TDF recomenda uma velocidade constante de  $3 \mu\text{m/s}$ . No entanto, para aumentar a estabilidade do ensaio na sua fase inicial, este foi executado com uma velocidade de  $1 \mu\text{m/s}$  até à flecha de  $0.1 \text{ mm}$ , e de  $3 \mu\text{m/s}$  a partir desta flecha.

### 3.2 Resultados

Na Figura 6 representa-se a relação entre a força e a flecha ( $F - \delta$ ) registada nos provetes com distinta idade. Cada uma das destas curvas corresponde à média das resposas registadas em 4 provetes.

Como se pode constatar, todos os prismas ensaiados apresentam elevada ductilidade em termos de comportamento à flexão, verificando-se que, de uma forma geral, uma força residual elevada é mantida até ao final do ensaio. No instante correspondente à transição da fase não fendilhada para a fase fendilhada do betão, coincidente com o 1º pico das curvas (instante em que se atinge a força que a RILEM TC 162-TDF designa por limite de proporcionalidade,  $F_L$ ), parte significativa da força instalada no betão é transferida para as fibras que atravessam a superfície de fractura. Verifica-se que a parcela de força transferida é tanto mais acentuada quanto maior é o tempo de cura do betão, pelo que a capacidade resistente do prisma sofre uma queda, cuja amplitude se acentua com a idade. Neste instante, os mecanismos de aderência, ancoragem e atrito, mobilizados durante a fase de arranque das fibras, conduzem à ocorrência de uma fase de endurecimento, seguindo-se um ramo de amolecimento de reduzida perda de carga.

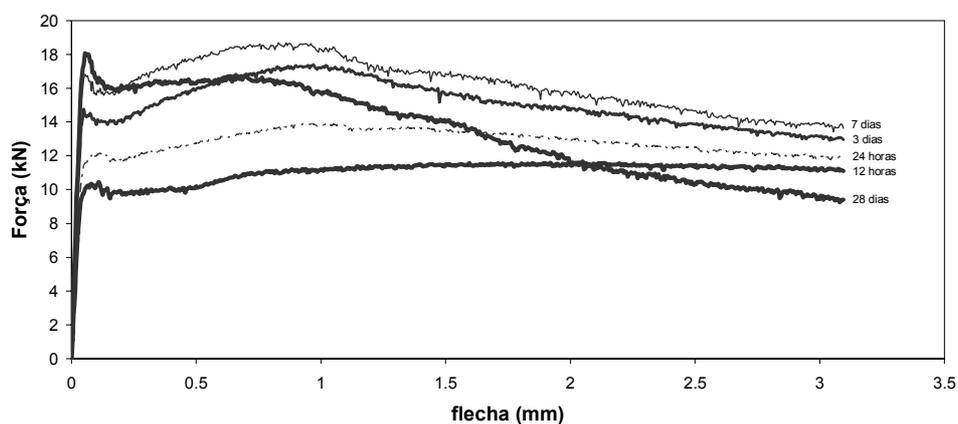


Figura 6: Relação força-flecha em flexão para distintas idades.

Durante a fase de endurecimento, à excepção dos provetes com 28 dias de idade, verifica-se que a força chega a ultrapassar  $F_L$ . Os danos ocorridos nos mecanismos de reforço provocados pela amplitude da queda de carga nos provetes com 28 dias de idade, logo após a flecha

correspondente a  $F_L$ , estão na base da sua menor eficácia durante a fase fendilhada destes provetes, tendo estes apresentado a menor força residual acima de uma flecha próxima dos 2 mm.

Nas Figuras 7 e 8 representa-se a influência da idade no valor da força correspondente ao limite de proporcionalidade,  $F_L$ , e da correspondente tensão,  $f_{ct,L}$ . Da análise destas figuras verifica-se que a partir dos 7 dias  $F_L$  e  $f_{ct,L}$  não aumentam significativamente. É no entanto apreciável a resistência à tracção em flexão às 12 h, dado que excede os 3 MPa.

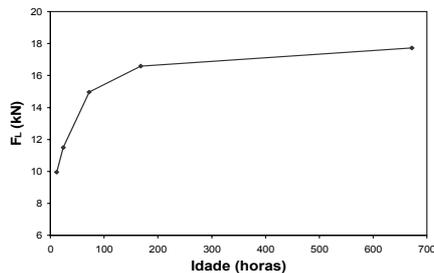


Figura 7: Variação de  $F_L$  com a idade

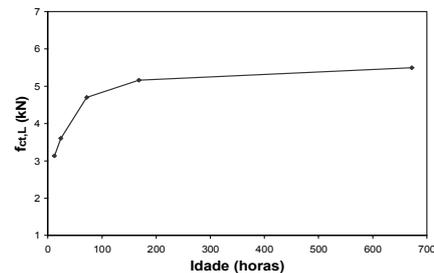


Figura 8: Variação de  $f_{ct,L}$  com a idade

Para caracterizar a capacidade de absorção de energia e de resistência residual de um determinado BRFA, a RILEM TC 162-TDF propôs o conceito de resistência equivalente,  $f_{eq}$ , e de resistência residual,  $f_R$ , cujos parâmetros (dois para cada conceito) são determinados com base na relação  $F - \delta$  obtida nos ensaios de flexão. No caso de  $f_{eq,2}$  e  $f_{eq,3}$ , esta tensão está relacionada com a área do diagrama força-flecha, até uma flecha de 0.65 mm e 2.65 mm, respectivamente, ao passo que  $f_{R,1}$  e  $f_{R,4}$  estão relacionados com a força resistente observada para flechas de 0.5 mm e 3.5 mm, respectivamente. Na Figura 9 representa-se a influência da idade no valor destes parâmetros.

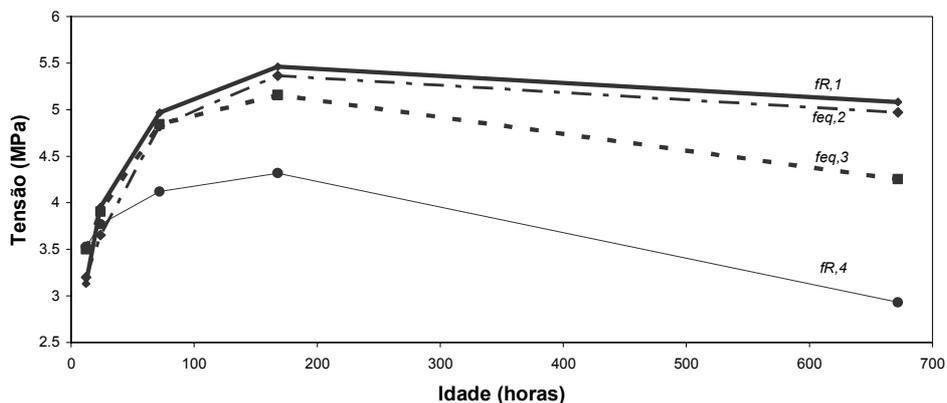


Figura 9: evolução dos parâmetros  $f_{eq,2}$ ,  $f_{eq,3}$ ,  $f_{R,1}$  e  $f_{R,4}$  com a idade

Da análise da figura 9 constata-se que o valor de todos os parâmetros aumenta com a idade, excepto na transição dos 7 dias para os 28 dias, onde se verifica um ligeiro decréscimo em  $f_{eq,2}$

e  $f_{R,1}$ , e um decréscimo mais acentuado em  $f_{eq,3}$  e  $f_{R,4}$ , o que revela uma clara perda de ductilidade do material, mais acentuada para maiores flechas. Este facto deriva dos dois seguintes efeitos conjugados: aumento da fragilidade da matriz cimentícia com a idade, associada ao aumento do módulo de elasticidade e da resistência à compressão do betão; dano nos mecanismos de reforço das fibras no momento do início da fendilhação da matriz, já anteriormente referido.

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no programa experimental permitem concluir que é possível conceber composições de BACRFA que reúnam as características necessárias à pré-fabricação de painéis-sandwich, tanto em termos de propriedades mecânicas em idades jovens ou menos jovens como em termos de trabalhabilidade e estabilidade da mistura enquanto no estado fresco, sem que para isso se tenha que recorrer a elevadas quantidades de cimento ou outros aditivos menos vantajosos em termos económicos e ambientais. Há, no entanto, a assinalar o extremo cuidado que se deve empregar na fase de formulação da composição, já que são inúmeros os factores que influenciam significativamente o desempenho deste tipo de material. Os requisitos de resistência e de ductilidade à compressão e flexão exigidos pelos painéis sandwich a serem construídos no âmbito do projecto PABERFIA foram superados, pelo que a tarefa seguinte será a sua fabricação, ensaio e simulação numérica do seu comportamento até à rotura.

## 7. AGRADECIMENTOS

Este estudo foi efectuado no âmbito do projecto "PABERFIA - *Painéis sandwich prefabricados de betão reforçado com fibras*" financiado pelo FEDER e FCT, envolvendo a UM, e as empresas Prêgaia 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.

## 8. REFERÊNCIAS

1. Dewar, J. D., 'Computer Modelling of Concrete Mixtures', E & Spon, (1999).
2. Guazelli, E., Oger, L., 'Mobile Particulate Systems', 287 – NATO ASI Series, Netherlands, (1995).
3. Pereira, E.N.B.; Barros, J.A.O.; Camões, A.F.F.L., "Betão auto-compactável reforçado com fibras de aço - método de concepção e propriedades mecânicas", Revista da APEB, N. 12, pp.25-31, Maio 2004.
4. Pereira, E.N.B.; Barros, J.A.O.; Ribeiro, A.F.; Camões, A.F.F.L., "Post-cracking behaviour of selfcompacting steel fibre reinforced concrete", aceite para publicação no 6th RILEM.
5. Gomes, P.C.C., 'Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete', PhD thesis, UPC, Barcelona, Spain, (2002) 139 pgs.
6. CEB-FIP Model Code, Comité Euro-International du Béton, Bulletin d'Information n° 213/214 (1993).
7. Vandewalle, L. *et al.*, "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - Final Recommendation", Materials and Structures, V. 35, No 253, Nov. 2002, pp. 579-582.
8. Especificação do LNEC E397-1993, 'BETOES – Determinação do Módulo de Elasticidade em Compressão', LNEC, Portugal, Maio 1993.