

MODELAÇÃO ANALÍTICA DA INFLUÊNCIA DA IDADE DE BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO NO SEU COMPORTAMENTO À COMPRESSÃO



V. M. C. F. Cunha
Aluno Doutorado
DEC UM
Guimarães



J. A. O. Barros
Prof. Associado
DEC UM
Guimarães



J. M. Sena Cruz
Prof. Auxiliar
DEC UM
Guimarães

SUMÁRIO

Neste artigo são apresentados os resultados de ensaios à compressão uniaxial em provetes de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço, BACRFA. A influência da idade nas propriedades mecânicas do BACRFA é aferida. Adicionalmente, propõem-se relações tensão-extensão para modelar o comportamento à compressão do BACRFA, e recomendam-se expressões analíticas para determinar as principais propriedades mecânicas deste compósito.

Palavras-chave: Betão auto-compactável, fibras de aço, compressão, idade, formulação analítica.

1. INTRODUÇÃO

O uso de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço, BACRFA, provavelmente, aumentará significativamente nos próximos tempos, visto que da aplicação deste material compósito advêm inúmeras vantagens ao nível da tecnologia do betão. O BACRFA, combina os benefícios da tecnologia do betão auto-compactável com os inerentes à adição de fibras de aço a um material frágil de matriz cimentícia. A capacidade de absorção de energia destes materiais e a sua resistência ao impacto são das propriedades mais beneficiadas pela adição de fibras [1,2]. Outras propriedades tais como a resistência ao corte [3] e o comportamento sob temperatura elevadas [4] são também beneficiadas pelos mecanismos que as fibras de aço podem proporcionar.

Actualmente, a maioria das expressões propostas para simular o comportamento uniaxial à compressão do betão, $\sigma_c(\epsilon_c)$, foram desenvolvidas para betão simples [5,6]. Apesar de escassos, existem ainda alguns trabalhos no âmbito da modelação $\sigma_c(\epsilon_c)$ de betão convencional reforçado com fibras, à idade de 28 dias [7,8]. No entanto, segundo conhecimento dos autores, a modelação analítica do comportamento à compressão uniaxial do BACRFA desde poucas horas de idade até aos 28 dias é relativamente escassa. Todavia, o conhecimento da relação tensão-extensão a idades jovens desempenha um papel fundamental na determinação da idade do betão para a qual é possível remover os elementos de suporte provisórios das estruturas, bem como, na determinação das tensões devidas à retracção e restantes fenómenos que se manifestam durante a fase de endurecimento do betão. Na indústria da pré-fabricação, desmoldar os elementos o mais rapidamente possível é um requisito importante em termos económicos, de gestão de espaços e de rentabilidade de fabrico. Para que o processo de desmoldagem se efectue de forma segura, a influência da idade no comportamento à compressão do BACRFA deverá ser conhecida.

Com este intuito, foram realizados ensaios em provetes com 12 e 24 horas e 3, 7 e 28 dias, por forma a avaliar a influência da idade na resistência à compressão, na extensão de pico, no módulo de elasticidade e na energia volumétrica dissipada. O programa experimental foi decomposto em duas séries com diferentes percentagens volumétricas de fibras, uma com 0,38% e outra com 0,57%. De modo a aplicar os resultados obtidos no projecto de estruturas constituídas pelo BACRFA desenvolvido, a influência da idade no comportamento à compressão directa deste material foi modelada. Neste artigo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos. Adicionalmente, são propostas relações tensão-extensão para modelar o comportamento à compressão uniaxial das 12 horas aos 28 dias de idade do material estudado. Finalmente, são propostas expressões analíticas para determinar o valor das propriedades mecânicas do BACRFA investigadas.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental apresentado no presente artigo foi definido com o intuito de se avaliar a influência da idade e da quantidade de fibras no comportamento uniaxial do BACRFA. Para isso, foram definidas duas séries com quantidades distintas de fibras: uma com 30 kg/m^3 (percentagem de volume de fibras, V_f , de 0,38%) designada de *Cf30* e, outra, com 45 kg/m^3 ($V_f= 0,57\%$) designada de *Cf45*. Cada uma destas séries foi composta por sub-séries ensaiadas às 12 e 24 horas, 3, 7 e 28 dias. Dos ensaios de compressão realizados obteve-se a relação tensão-extensão, assim como as seguintes propriedades mecânicas do BACRFA: resistência à compressão, f_{cm} , módulo de elasticidade, E_{ci} , extensão de pico, ϵ_{c1} , e energia volumétrica dissipada, G_c .

2.1 Composição do betão

Os materiais utilizados na composição do BACRFA foram: cimento (C) CEM-I-42.5R, filler calcário (FC), superplastificante (SP) de terceira geração (Glenium® 77SCC), água (A), três tipos de agregados (areia fina de rio (AF), areia grossa do rio (AG) e brita 5-12 mm (B)), e fibras

Dramix RC-80/60-BN com 60 mm comprimento, 0,75 mm de diâmetro (d_f), factor de forma (l_f / d_f) de 80 e tensão de cedência de 1100 MPa.

A descrição detalhada da metodologia adoptada na determinação das composições dos BACRFA concebidos pode ser encontrada em [9]. Na Tabela 1 indicam-se as composições, para ambas as séries, que melhor garantiram os requisitos de auto-compatibilidade. Note-se que, na Tabela 1, AS é a parcela de água necessária para saturar os agregados e A/C é a razão água / cimento, a qual inclui a parcela de água que o superplastificante contém. Não foi verificado qualquer sinal de segregação e foi obtido um espalhamento de 700 mm (aquando dos ensaios, o cone de Abrams foi sempre utilizado na posição invertida).

Tabela 1: Composição final para 1 m³ de BACRFA.

Cf	Pasta / Vol.	C	FC	A	AS	SP	AF	AG	B	A/C
[kg]	total [%]	[kg]	[kg]	[dm ³]	[dm ³]	[dm ³]	[kg]	[kg]	[kg]	
30	0,34	359,4	312,2	96,9	64,7	6,9	108,2	709,4	665,2	0,29
45	0,38	401,7	344,3	108,4	60,8	7,6	101,7	666,4	624,8	0,29

2.2 Configuração dos ensaios

Os ensaios realizados para obter o módulo de elasticidade e relação tensão – extensão foram efectuados num equipamento servo-controlado com capacidade de carga máxima de 3000 kN. Para cada uma das séries foram ensaiados seis provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. A determinação do módulo de elasticidade foi efectuada segundo as recomendações da norma do LNEC E397 [10]. Por sua vez, para obter a relação tensão – extensão, foram dispostos três LVDT's em torno do provete, tendo sido de 120°, o ângulo formado entre LVDTs consecutivos. Esta disposição permite que a deformação do equipamento não seja incluída nas leituras. Além disto, possibilita a determinação da deformação do provete segundo o seu eixo longitudinal. A velocidade de deformação adoptada neste ensaio foi de 10µm/s até uma deformação de 5 mm e de 30 µm/s para deformações superiores.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 Relação tensão-extensão

Na Figura 1 apresentam-se as curvas médias tensão-extensão, $\sigma_c - \varepsilon_c$, para as séries Cf30 e Cf45. Na fase correspondente ao pré-pico, para provetes com 12 e 24 horas, foi observado um comportamento não-linear mais pronunciado, comparativamente aos provetes com 3, 7 e 28 dias. Este comportamento pode ser atribuído à relativa fraca aderência entre pasta e agregados para estas idades. Durante o carregamento do provete, a estrutura porosa da interface agregados / pasta é gradualmente convertida em micro-fendas descontínuas, que posteriormente serão convertidas numa macro-fenda. Tendo em linha de conta que a rigidez da pasta é relativamente pequena para idades recentes, o processo evolutivo de dano é muito

mais estável comparativamente com o ocorrido em provetes de idades mais avançadas. Consequentemente, um decréscimo mais suave da resistência residual foi observado na fase de amolecimento dos provetes com 12 horas. Para esta idade, a energia dissipada no arrancamento das fibras, após o início da fendilhação, é menor do que a energia que pode ser dissipada para betões de idades mais avançadas, devido à resistência de aderência entre fibra / pasta ser relativamente baixa para estas idades.

Visto que as fibras que “cosiam” as fendas não romperam, tendo a ancoragem da fibra sido mobilizada completamente, a capacidade de energia absorvida pelo betão deveria ter aumentado com a quantidade de fibras. Contudo, no presente programa experimental tal não ocorreu. Isto poderá ser justificado com o decréscimo de resistência à compressão observado na série *Cf45*, a qual conduziu a um decréscimo na resistência de aderência entre a fibra e a pasta e, consequentemente, na energia dissipada durante o processo de arrancamento das fibras. A diminuição da resistência à compressão da série *Cf30* para *Cf45* poderá ser justificada com a maior percentagem de FC, bem como, com a menor quantidade de brita na composição da mistura da série *Cf45* (ver Tabela 1). Adicionalmente, em trabalho prévio [9] observou-se que a resistência da pasta diminui com o aumento de FC.

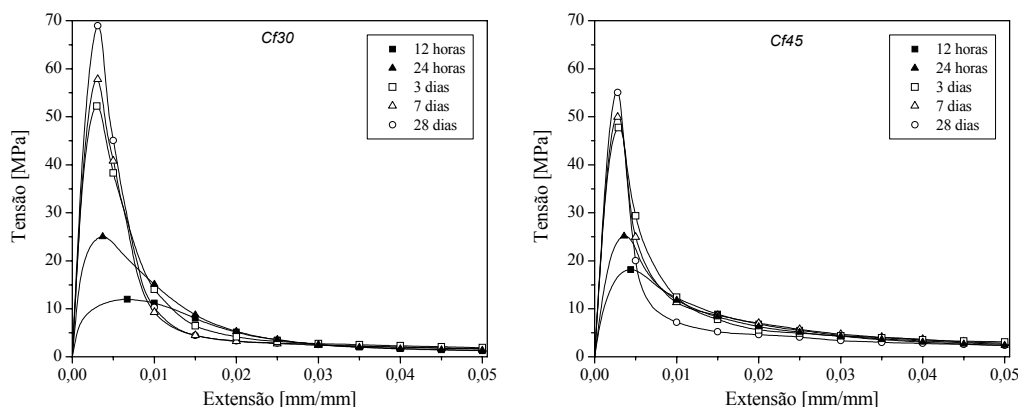


Figura 1: Curvas experimentais médias tensão-extensão.

3.2 Influência da idade nas propriedades mecânicas do BACRFA

3.2.1 Resistência à compressão

Na Tabela 2 são indicados os valores médios da resistência à compressão, f_{cm} , assim como os correspondentes coeficientes de variação, CoV. Para ambas as séries, como seria espectável, o f_{cm} aumentou com a idade. Até às 24 horas de idade, a resistência à compressão da série *Cf45* foi maior do que a registada na *Cf30*, contudo, a partir das 24 horas, na série *Cf30* observou-se um ganho de resistência com a idade mais pronunciado do que na série *Cf45*. A diferença da resistência à compressão entre as séries *Cf30* e *Cf45* poderá ser devida à influência do filler calcário e da temperatura de cura no processo de hidratação do cimento Portland. Convém salientar que, por motivos logísticos, as temperaturas de cura das duas

séries foram distintas. Para a série *Cf30* a temperatura de cura foi de aproximadamente 10° C, enquanto para a série *Cf45* foi de 20° C. O aumento da resistência à compressão com a idade é significativamente influenciado pela temperatura a que o betão é curado [11]. A maior resistência à compressão, para idades recentes, observada na série *Cf45* será devido à temperatura de cura mais elevada nesta série, bem como à maior percentagem de filler calcário. Apesar do filler calcário ter sido considerado como um agregado inerte, investigação recente [12], indicia que este influencia o processo de hidratação do cimento. A menor dimensão das partículas de filler calcário propiciam uma hidratação mais rápida, isto é, os cristais hidratados facilitam a conexão entre partículas sendo que a micro – estrutura é formada mais rapidamente, resultando um maior acréscimo de resistência nas idades mais jovens. Por sua vez, para os 3, 7 e 28 dias, observou-se uma maior resistência à compressão para a série *Cf30*, devido ao efeito designado na literatura inglesa de “strength cross-over” [11]. A temperatura de cura mais baixa da série *Cf30* retarda o processo de hidratação do cimento originando resistências mais baixas para idades jovens, e por sua vez uma maior resistência para idades mais avançadas. Adicionalmente, a influência da temperatura poderá ter sido, eventualmente, amplificado pela maior percentagem de filler calcário na composição da série *Cf45*.

Tabela 2: Valores médios da resistência à compressão.

Idade	Cf30		Cf45	
	f_{cm} [MPa]	CoV [%]	f_{cm} [MPa]	CoV [%]
12 horas	12,3	9,95	17,6	1,63
24 horas	24,7	8,38	25,3	1,24
3 dias	52,3	1,90	47,9	1,10
7 dias	58,2	4,32	51,0	2,61
28 dias	69,7	1,73	56,2	2,15

3.2.2 Módulo de elasticidade

Os valores médios do módulo de elasticidade, E_{ci} , bem como os correspondentes coeficientes de variação, CoV, encontram-se indicados na Tabela 3.

Tabela 3: Valores médios do módulo de elasticidade.

Idade	Cf30		Cf45	
	E_{ci} [GPa]	CoV [%]	E_{ci} [GPa]	CoV [%]
12 horas	13,6	17,86	18,8	7,10
24 horas	25,3	4,96	22,4	5,83
3 dias	37,1	4,31	31,4	2,04
7 dias	40,4	0,78	31,9	2,14
28 dias	41,5	2,31	34,5	4,33

O aumento do módulo de elasticidade com a idade seguiu, para ambas as séries, tendência similar à registada para o f_{cm} . Contudo, no que respeita à série *Cf30*, o valor de f_{cm} aumentou entre os 7 e 28 dias cerca de 20%, enquanto que o E_{ci} teve um aumento marginal durante este

período. Após os 3 dias de cura, o E_{ci} da série *Cf45* aumentou somente 3 GPa. Estes resultados realçam o facto de no BACRFA desenvolvido, a rigidez ter sido praticamente atingida para idades entre os 3 e 7 dias, devido à elevada compacidade da matriz destes betões. A diferença observada nos valores do módulo de elasticidade entre as séries *Cf30* e *Cf45* dever-se-á à influência da temperatura de cura e da percentagem de filler calcário, como explicado previamente.

3.2.3 Extensão de pico

Os valores médios da extensão de pico, ε_{c1} , encontram-se indicados na Tabela 4. Devido ao aumento de rigidez, os valores de ε_{c1} diminuíram com a idade do BACRFA, em ambas as séries. Após os 3 dias, como o aumento do E_{ci} não foi significativo, a variação de ε_{c1} foi igualmente reduzida. Em ambas as séries, para os 28 dias, o valor de ε_{c1} foi de aproximadamente 0,003. Outros autores obtiveram valores similares de ε_{c1} para betões convencionais reforçados com fibras [8,13]. O Model Code 90 [6] propõe para betões simples um valor de 0,0022. Por sua vez, a norma EN 1992-1-1 [14] sugere diferentes valores de ε_{c1} , dependendo da classe do betão. Para a resistência à compressão da série *Cf30*, o valor sugerido pela norma supra mencionada é de 0,0026, enquanto que para a resistência da série *Cf45* o valor proposto por esta é de 0,00245. As diferenças entre os valores obtidos experimentalmente e os propostos pelas referidas normas devem-se à maior capacidade de deformação proporcionada pelos mecanismos de reforço introduzidos pelas fibras que atravessam as fendas que se formam antes da carga de pico.

Tabela 4: Valores médios da extensão de pico.

Idade	Cf30		Cf45	
	ε_{c1} [‰]	CoV [%]	ε_{c1} [‰]	CoV [%]
12 horas	6,7	28,90	4,7	10,25
24 horas	3,9	7,84	3,7	5,27
3 dias	3,0	3,99	3,0	5,77
7 dias	3,1	5,14	2,9	9,55
28 dias	3,1	6,28	2,8	5,69

3.2.4 Energia dissipada em compressão

A energia dissipada em compressão por unidade de volume, G_c , foi calculada considerando a área sob o diagrama de tensão – extensão, $\sigma_c - \varepsilon_c$, i.e.:

$$G_c = \int_0^{\varepsilon_U} \sigma_c \cdot d\varepsilon \quad (1)$$

O valor de G_c foi determinado para uma deformação última, ε_U , de 0,05, para a qual a resistência residual corresponde uma pequena percentagem da resistência à compressão do provete. Na Tabela 5 indicam-se os valores médios de G_c , bem como os correspondentes

valores do CoV. Na generalidade, a energia dissipada aumentou com a idade e com a adição de fibras. Contudo, para as séries com 3 e 28 dias, a energia dissipada diminui com o aumento da percentagem de fibras, ao contrário do que seria espectável. Isto dever-se-á à menor resistência à compressão observada na série Cf45 para estas idades, da qual resulta uma menor resistência de aderência entre fibra e pasta, a qual desempenha um papel primordial nos mecanismos de reforço mobilizados durante o arrancamento da fibra. Uma análise mais detalhada para o sucedido pode ser encontrada em [15]. Quanto aos valores dos coeficientes de variação, estes são significativamente elevados quando comparados com os obtidos para as propriedades mecânicas anteriormente apresentadas. A parcela mais significativa de energia dissipada é libertada durante a fase de amolecimento, dependendo significativamente da mobilização dos mecanismos de reforço das fibras que “cosem” as fendas. A eficiência destes mecanismos de reforço depende, consideravelmente, do comprimento de amarração das fibras e orientação destas em relação ao plano da fenda, razões pelas quais não possa ser garantida a homogeneidade dos resultados, mesmo em provetes aparentemente idênticos.

Tabela 5: Valores médios da energia dissipada em compressão.

Idade	Cf30		Cf45	
	G_c [N/mm ²]	CoV [%]	G_c [N/mm ²]	CoV [%]
12 horas	0,26	19,03	0,33	12,35
24 horas	0,36	13,13	0,38	12,01
3 dias	0,48	12,70	0,46	19,73
7 dias	0,44	14,84	0,47	34,37
28 dias	0,49	10,31	0,39	18,77

4. EXPRESSÕES ANALÍTICAS

Nesta secção são propostas expressões para prever, em função da idade, as principais propriedades mecânicas em compressão do BACRFA desenvolvido. Com este intuito foi utilizado um procedimento de ajuste não-linear baseado nos gradientes conjugados, tendo, previamente, sido efectuado um tratamento estatístico dos resultados experimentais [15].

4.1 Propriedades mecânicas

4.1.1 Resistência à compressão

O Model Code 1990 (MC90) [6] sugere para determinar a resistência à compressão de betão simples para várias idades, $f_{cm}(t)$, a seguinte expressão:

$$f_{cm}(t) = f_{cm}(28) \cdot \exp \left\{ a \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^b \right] \right\} \quad (2)$$

em que $f_{cm}(28)$ é o valor médio da resistência à compressão para os 28 dias; a e b são dois parâmetros adimensionais, que segundo o MC90, $a = 0,2$ para o caso de se usar cimentos de elevada resistência e presa rápida, e b adopta um valor constante de 0,5.

Na Figura 2 encontra-se representada a função $f_{cm}(t)/f_{cm}(28)$ determinada segundo a proposta do MC90, tendo para o devido efeito sido utilizados os valores de $f_{cm}(28)$ obtidos experimentalmente para cada uma das séries. Apesar do coeficiente de correlação, R^2 , obtido ser consideravelmente alto, a resistência compressão calculada pela expressão (2) é subestimada para as idades de 3 e 7 dias, sendo isto mais notório para a série Cf45. Com o intuito de melhorar a simulação da influência da idade na resistência à compressão do BACRFA desenvolvido, os parâmetros a e b da equação (2) foram determinados recorrendo a um método de ajuste não-linear. A qualidade da simulação melhorou consideravelmente, particularmente para as idades de 3 e 7 dias. Os valores dos parâmetros da curva ajustada, bem como o valor de R^2 encontram-se indicados na Figura 6.

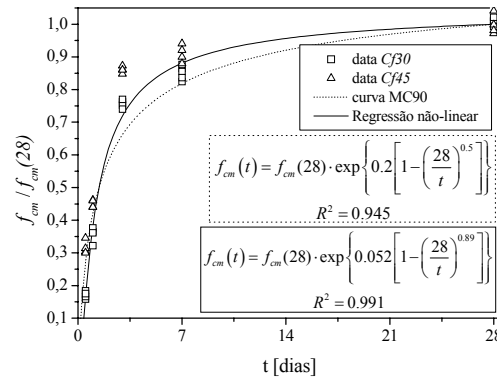


Figura 2: Simulação da influência da idade na resistência à compressão.

4.1.2 Módulo de elasticidade

À semelhança da resistência à compressão, o MC90 [6] propõe a seguinte expressão:

$$E_{ci}(t) = E_{ci}(28) \cdot \left\{ \exp \left[a \left(1 - \left(\frac{28}{t} \right)^b \right) \right] \right\}^c \quad (3)$$

para determinar o módulo de elasticidade a uma idade de t dias, $E_{ci}(t)$, em que $E_{ci}(28)$ é o módulo de elasticidade para uma idade de 28 dias; a , b e c são parâmetros adimensionais. O MC90 indica para betão simples $c = 0,5$, enquanto que os valores de a e b são idênticos aos propostos para a expressão (2). Recorrendo aos valores de $E_{ci}(28)$ obtidos experimentalmente, a função $E_{ci}(t)/E_{ci}(28)$, avaliada segundo o MC90, encontra-se indicada na Figura 3. Similarmente ao obtido para a resistência à compressão, o módulo de elasticidade é subestimado para idades com 3 e 7 dias. Ajustando os parâmetros a , b e c da equação (3), aumentou-se consideravelmente a qualidade da simulação. Os parâmetros da curva ajustada,

bem como os valores de R^2 estão indicados na Figura 3. O MC90 propõe igualmente a expressão (4) que relaciona o módulo de elasticidade, E_{ci} , com a resistência à compressão, f_{cm} , na qual, para betão simples, $E_{c0} = 21,5$ GPa, $f_{cm0} = 10$ MPa e $a = 1/3$.

$$E_{ci} = E_{c0} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)^a \quad (4)$$

A relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão determinada, quer pelo MC90 como por regressão não-linear, encontra-se representada na Figura 4. O ajuste dos parâmetros E_{c0} e a incrementou substancialmente o ajuste da equação (4) aos dados experimentais e, conseqüentemente, o coeficiente de correlação aumentou.

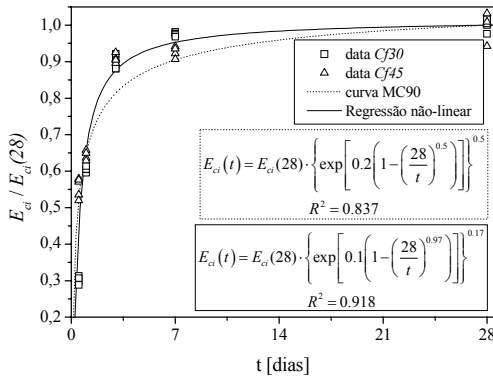


Figura 3: Simulação da influência da idade no módulo de elasticidade.

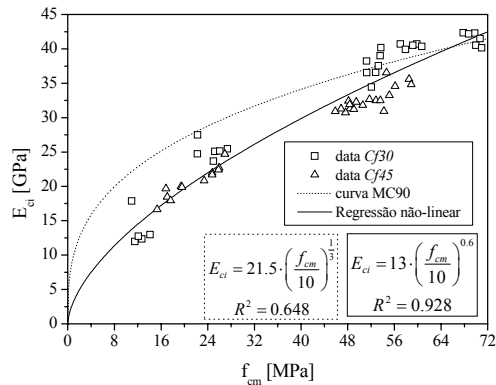


Figura 4: Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão.

4.1.3 Extensão de pico

Com o intuito de prever a evolução da extensão de pico com a idade, $\varepsilon_{c1}(t)$, foi adoptada a seguinte função hiperbólica:

$$\varepsilon_{c1}(t) = \frac{\varepsilon_{c1}(28) \cdot \frac{t}{28}}{a + \frac{t}{28}} \quad (5)$$

em que, $\varepsilon_{c1}(28)$ é a extensão de pico para a idade de 28 dias. Esta expressão foi utilizada para simular os dados experimentais, tendo-se ajustado o parâmetro adimensional a . A expressão analítica obtida por regressão linear encontra-se representada na Figura 5. A qualidade do ajuste é razoavelmente boa, não obstante do coeficiente de correlação obtido ser baixo. Tal facto deve-se, principalmente, à elevada dispersão dos valores da extensão de pico observados para as 12 horas.

4.1.4 Energia dissipada em compressão

A variação da energia dissipada em compressão com a idade, $G_c(t)$, foi ligeiramente distinta para as séries Cf30 e Cf45. Contudo, optou-se por sugerir uma expressão única para prever a energia dissipada nas duas séries:

$$G_c(t) = \frac{a \cdot t/28}{b + t/28} + \frac{c}{d + t/28} + e \cdot \frac{t}{28} \quad (6)$$

A variação de G_c com o tempo, para ambas as séries, assim como os parâmetros a , b , c e d obtidos pelo ajuste não-linear encontram-se indicados na Figura 6. Devido à elevada dispersão dos resultados experimentais, o coeficiente de correlação foi baixo, $R^2 = 0,589$.

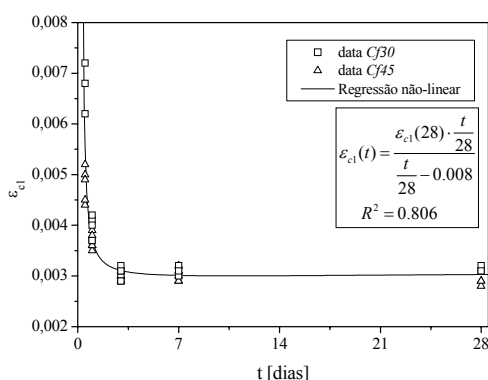


Figura 5: Simulação da influência da idade na extensão de pico.

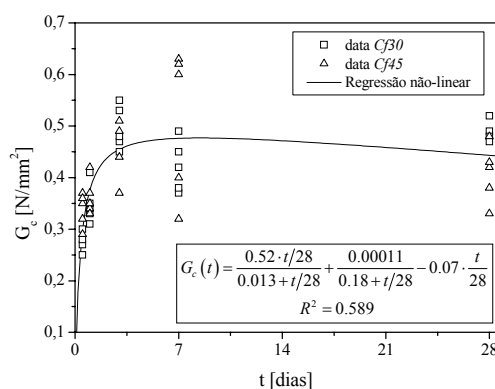


Figura 6: Simulação da influência da idade na energia dissipada.

4.2 Relação tensão – extensão

As relações $\sigma_c - \varepsilon_c$ disponíveis para modelar o comportamento à compressão do betão simples [5, 6] e para betão reforçado com fibras [7, 8] não podem ser directamente aplicadas na simulação do BACRFA, visto que a aproximação que estas proporcionam não é suficientemente boa. Tal facto está relacionado com os distintos comportamentos pós-pico observados para os betões simples e reforçados com fibras. Por este motivo é proposta uma nova abordagem para se obter uma relação analítica $\sigma_c - \varepsilon_c$ que possa modelar o comportamento à compressão registado para o BACRFA desenvolvido.

A expressão adoptada é similar à sugerida pelo Model Code 90 (MC90) [6] para o betão simples, e encontra-se esquematicamente representada na Figura 7. Na realidade, a equação que corresponde ao ramo representado por uma linha sólida (ver Figura 7) é idêntica à proposta pelo MC90:

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = \frac{\frac{E_{ci}}{E_{c1}} \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + \left(\frac{E_{ci}}{E_{c1}} - 2\right) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \cdot f_{cm} \quad \text{para } \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c,\text{lim}} \quad (7)$$

em que, E_{ci} e E_{c1} são o módulo tangente e o módulo secante da origem até à resistência de compressão, respectivamente, $E_{c1} = f_{cm}/\varepsilon_{c1}$; σ_c , ε_c são a tensão e a extensão de compressão; ε_{c1} é a extensão de pico. A extensão $\varepsilon_{c,\text{lim}}$ limita a aplicabilidade da equação (7), ver Figura 7, sendo determinada para $\sigma_{c,\text{lim}} (= \alpha \cdot f_{cm})$ pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_{c,\text{lim}} = \left[\frac{1}{2} \left[(1-\alpha) \cdot \frac{E_{ci}}{E_{c1}} + 2\alpha \right] + \left[\frac{1}{4} \left[(1-\alpha) \cdot \frac{E_{ci}}{E_{c1}} + 2\alpha \right]^2 - \alpha \right]^{0.5} \right] \varepsilon_{c1} \quad (8)$$

Para $\varepsilon_c > \varepsilon_{c,\text{lim}}$ o ramo descendente do diagrama $\sigma_c - \varepsilon_c$ (linha a tracejado na Figura 7) é definido pela seguinte função racional:

$$\sigma(\varepsilon_c) = \left[\left[\frac{1}{\frac{\varepsilon_{c,\text{lim}}}{\varepsilon_{c1}} \cdot \xi \cdot \left(\frac{1}{2\alpha}\right)^2 - \frac{1}{\left(\frac{\varepsilon_{c,\text{lim}}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2} \cdot \frac{1}{\alpha}} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2 + \left[\frac{1}{\frac{\varepsilon_{c,\text{lim}}}{\varepsilon_{c1}} \cdot \frac{2}{\alpha} - \xi \left(\frac{1}{2\alpha}\right)^2} \right] \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right] \right]^{-1} \cdot f_{cm} \quad (9)$$

com

$$\xi = \frac{4 \left[\left(\frac{\varepsilon_{c,\text{lim}}}{\varepsilon_{c1}}\right)^2 \cdot \left(\frac{E_{ci}}{E_{c1}} - 2\right) + 2 \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \frac{E_{ci}}{E_{c1}} \right]}{\left[\frac{\varepsilon_{c,\text{lim}}}{\varepsilon_{c1}} \left(\frac{E_{ci}}{E_{c1}} - 2\right) + 1 \right]^2} \quad (10)$$

Notar que as funções representadas em (7) e (9) são contínuas no ponto $\varepsilon_c = \varepsilon_{c,\text{lim}}$. De realçar ainda que, assumindo $\alpha = 0.5$, as expressões (8) e (9) resultam nas que são propostas pelo MC90

De forma a aferir a aplicabilidade das relações previamente descritas aos resultados experimentais, foram adoptados os seguintes pressupostos: a) os valores do módulo de elasticidade, resistência à compressão e extensão de pico usados na simulação analítica foram os obtidos experimentalmente para cada uma das séries; b) o parâmetro α foi determinado de forma a obter o melhor ajuste entre a curva analítica e a curva média tensão – extensão obtida experimentalmente.

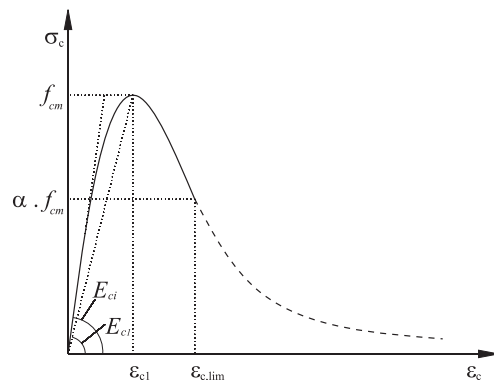


Figura 7: Diagrama tensão – extensão para compressão uniaxial.

As curvas tensão – extensão, $\sigma_c - \varepsilon_c$, obtidas pelo procedimento de ajuste não-linear que melhor se aproximam às curvas médias $\sigma_c - \varepsilon_c$ obtidas experimentalmente encontram-se representadas para as séries *Cf30* e *Cf45*, respectivamente, nas Figuras 8 e 9. Como se pode constatar a aproximação das expressões propostas aos resultados experimentais é bastante boa, mesmo para níveis de deformação significativos.

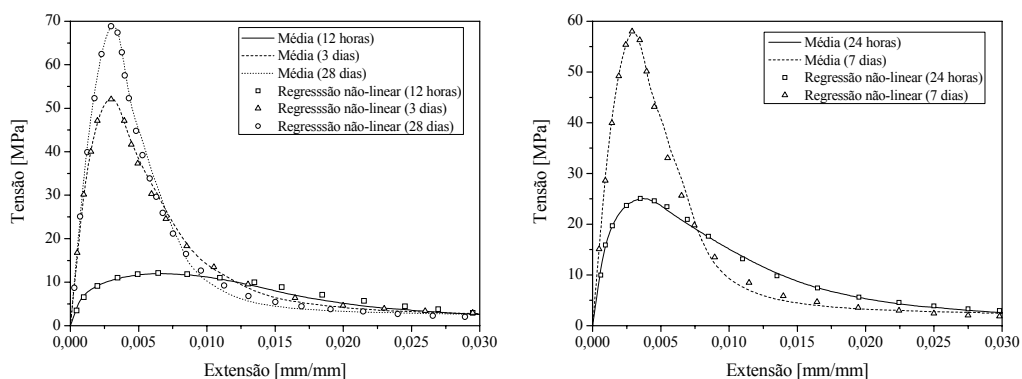


Figura 8: Curvas experimentais e analíticas para a série *Cf30*.

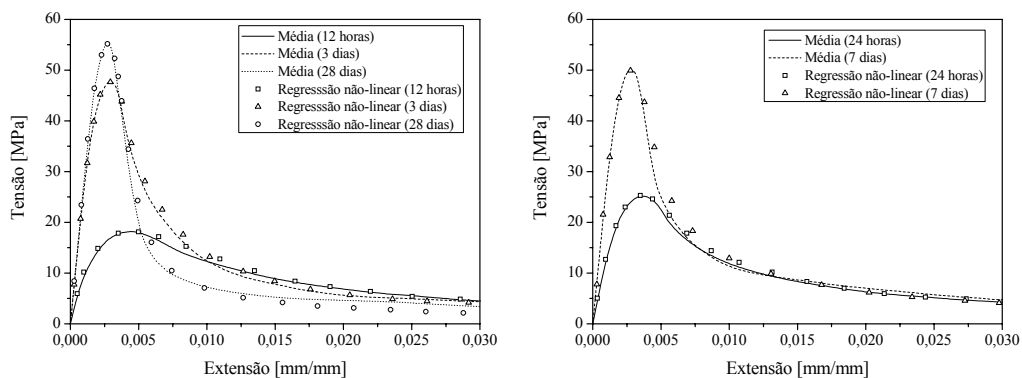


Figura 9: Curvas experimentais e analíticas para a série *Cf45*.

Na Tabela 6 indicam-se os valores do parâmetro α obtidos no procedimento de ajuste não-linear. O parâmetro α aumentou com a idade e tende para um valor limite de 0.9. Em [15] pode ser encontrada uma expressão que simula a influência de α com a idade. Não obstante, devido a se terem verificado diferentes resistências para as séries Cf30 e Cf45, em provetes da mesma idade, e tendo em consideração que a forma da curva $\sigma_c - \varepsilon_c$ é influenciada significativamente pela resistência à compressão, obtiveram-se melhores resultados relacionando o parâmetro α com a correspondente resistência à compressão. Na Figura 10 representa-se a função exponencial utilizada para estimar a evolução do parâmetro α com a resistência à compressão:

$$\alpha(f_{cm}(t)) = 0.87 \cdot \exp \left\{ 0.04 \left[1 - \left(\frac{f_{cm,28}}{f_{cm}(t)} \right)^{1.8} \right] \right\} \quad (11)$$

O coeficiente de correlação obtido foi de 0,938, significativamente maior do que o obtido caso se relacionasse o parâmetro α com a idade. Convém frisar que $f_{cm}(t)$ pode ser determinado segundo a expressão indicada na Figura 2.

Tabela 6: Valores do parâmetro α obtidos pelo procedimento de ajuste não-linear.

Idade	12 h	24 h	3 d	7 d	28 d
Cf30	0,424	0,657	0,839	0,871	0,889
Cf45	0,675	0,776	0,876	0,890	0,860

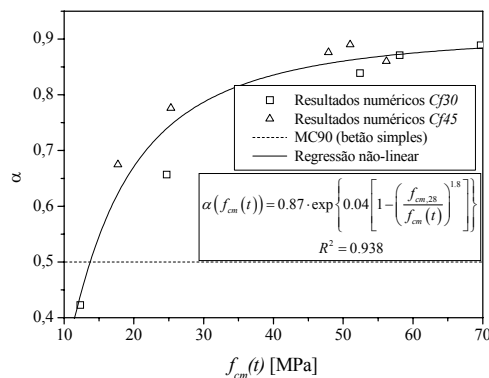


Figura 10: Relação entre o parâmetro α e a resistência à compressão.

5. CONCLUSÕES

Uma campanha experimental foi definida e realizada com o intuito de se aferir a influência da idade e da quantidade de fibras no comportamento à compressão de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço, BACRFA.

A resistência à compressão, f_{cm} , bem como o módulo de elasticidade, E_{ci} , aumentaram com a idade, principalmente para idades mais jovens, isto é, até aos 3 dias. O incremento da quantidade de fibras de 30 kg/m^3 (série Cf30) para 45 kg/m^3 (série Cf45) conduziu, na generalidade, a um decréscimo dos valores de f_{cm} e E_{ci} . Isto, eventualmente, ter-se-á devido às diferentes temperaturas de cura para cada uma das séries e à maior percentagem de filler calcário utilizado na série com 45 kg/m^3 de fibras. Para a referida série foi necessário incorporar uma maior percentagem de partículas finas (ex. filler calcário), de forma a se garantir uma elevada fluidez e resistência à segregação. A extensão de pico diminuiu com a idade em ambas as séries Cf30 e Cf45, como consequência do aumento de rigidez da matriz com a idade. O valor obtido experimentalmente, para os 28 dias, foi similar ao obtido por outros autores para betão reforçado com fibras de aço corrente. Na generalidade, a energia dissipada em compressão, G_c , aumentou com a idade. Contudo, para idades mais avançadas, G_c não variou significativamente com o incremento da quantidade de fibras de 30 kg/m^3 para 45 kg/m^3 . Tal ocorrência poder-se-á dever à maior percentagem de filler calcário na série Cf45, o qual tornou a zona de interface entre a fibras e pasta mais frágil e, conseqüentemente, os mecanismos de reforço das fibras tornaram-se menos eficazes. Na generalidade a energia dissipada está directamente relacionada com a resistência à compressão do BACRFA.

Expressões analíticas foram sugeridas para prever as principais propriedades mecânicas para uma idade t do BACRFA desenvolvido. Uma expressão de simulação da relação tensão-extensão foi proposta para modelar o comportamento à compressão do BACRFA desde idades jovens. A referida relação foi capaz de modelar, com elevada precisão, o completo comportamento à compressão do BACRFA desenvolvido.

6. AGRADECIMENTOS

O estudo reportado neste artigo é parte integrante do programa de investigação: "Prefabricated sandwich steel fibre reinforced panels" cofinanciados pela FEDER e MCT, e promovido pela ADI. Este projecto envolve as empresas PREGAIA e CIVITEST, e a Universidade do Minho. Os autores agradecem os materiais gentilmente cedidos pela Bekaert (fibras), SECIL (cimento), Degussa (superplastificante) e Comital (filler calcário). O primeiro autor deseja, igualmente, agradecer à FCT pela bolsa concedida, SFRH/BD/18002/2004.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Balaguru, P. N.; Shah, S. P. - *Fiber Reinforced Cement Composites*. McGraw-Hill Inc, New York, 1992.
- [2] ACI 544-1R., "State-of-the-art report on fiber reinforced concrete", Technical report, *American Concrete Institute*, 1997.
- [3] J. Rosenbusch and M. Teutsch. "Shear Design with Method, Test and Design Methods for Steel Fibre reinforced Concrete - Background and Experiences", Edited by Schnutgen and Vandewalle, *RILEM publication PRO 31*, 105-118, 2003.
- [4] Kodur, V.K.R; Bisby, L.A., "Evaluation of fire endurance of concrete slabs reinforced with fibre-reinforced polymer bars", *Journal of Structural Engineering*, 131(1): 34-43, 2005.

- [5] Carreira, D. J.; Chu, K. H. "Stress-strain relationship for plain concrete in compression", *ACI Journal*, 82(6): 797-804, 1985.
- [6] CEB-FIP - *CEB-FIP Model Code 1990: Design code*. Thomas Telford, Lausanne, 1993.
- [7] Ezeldin, A. S.; Balaguru, P. N., "Normal and high strength fibre reinforced concrete under compression", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 4(4): 415-427, 1992.
- [8] Hsu, L.S.; Hsu., C. T., "Stress-strain behaviour of steel-fibre high strength concrete", *ACI Structural Journal*, 91(4): 448-457, 1994.
- [9] Pereira, E.B. *et al.*, "Compression and bending behaviour of steel fibre reinforced self-compacting concrete." *ConMat'05 and Mindess Symposium*, N. Banthia, T. Uomoto, A. Bentur and S.P. Shah (eds.), 10 p., Vancouver, 2005.
- [10] LNEC E397, "Betões – determinação do módulo de elasticidade", *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, 1993.
- [11] Schindler, A.K., "Effect of temperature on hydration of cementitious materials", *ACI Materials Journal*, 101(1): 72-81, 2004.
- [12] Poppe A.-M. ; de Schutter, G., "Cement hydration in the presence of high filler contents", *Cement and Concrete Research*, 35: 2290-2299, 2005
- [13] Kooiman, A.G., "Modelling Steel Fibre Reinforced Concrete for Structural Design", Ph.D. thesis, TU Delft, Netherlands, 2000.
- [14] EN 1992-1-1, *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, European Committee for Standardization, Brussels, 2004.
- [15] Cunha, V.M.C.F. *et al.*, "Compression behaviour of steel fibre reinforced concrete (age influence and modelling)", Relatório técnico no. 06-DEC/E-04, *Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho*, 49 pp., 2006 (www.civil.uminho.pt/composites).