



ANAIIS DO 47º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2005

Setembro / 2005 ISBN 85-98576-07-7
Volume V - Inovações Tecnológicas para o Concreto
Trabalho 47CBCO141 - p. V1009-1024
© 2005 IBRACON.

**PAINÉIS ALIGEIRADOS EM BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO**

*LIGHTWEIGHT PANELS OF STEEL FIBER REINFORCED SELF-COMPACTABLE
CONCRETE*

E.B. Pereira (1); J.A.O. Barros (2); S.P.F. Santos (3); P.A.A.V. Queirós (4)

(1) *Assistente Estagiário, Dep. Eng^a Civil, Universidade do Minho, Portugal*
email: epereira@civil.uminho.pt

(2) *Prof. Associado, Dep. Eng^a Civil, Universidade do Minho, Portugal*
email: barros@civil.uminho.pt

(3) *Engenheiro, Civitest – pesquisa de novos materiais para a Engenharia Civil, Lda, Portugal*
email: simaopfsantos@civil.uminho.pt

(3) *Engenheiro, Prégaia – Sociedade de Pré-Fabricação, S.A., Portugal*
email: pqueiros@pregaia.com

Resumo

No presente artigo, é descrito um método de concepção para betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) de custo competitivo, a ser usado na indústria de pré-fabricação. Uma das questões mais importantes na indústria da pré-fabricação é a da descofragem dos elementos, que deve ser feita com a maior brevidade possível. Deste modo, foi levado a cabo um programa experimental para estimar a influência da idade na resistência e na ductilidade do BACRFA desenvolvido. A relação tensão-abertura de fenda foi determinada com base na relação força-flecha obtida em ensaios realizados segundo as recomendações da RILEM (TC 162-TDF). Foi analisada a influência da idade do BACRFA nos parâmetros de fractura deste material. Foi analisada a influência da idade do BACRFA nos parâmetros de fractura deste material.

Palavras-Chave: Betão Auto-compactável; fibras de aço; comportamento pós-pico.

Abstract

A method to design cost competitive steel fiber reinforced self-compacting concrete (SFRSCC) for precasting industrial applications is described in this paper. Since demolding the elements as soon as possible is an important requirement in this industry, the influence of the age on the resistance and toughness of the designed SFRSCC was assessed carrying out an experimental program. Based on the force-deflection relationship obtained in the three point bending notched beam tests performed according to the RILEM TC 162-TDF recommendations, the stress-crack opening relationship of the SFRSCC was determined. The influence of the SFRSCC age on the fracture parameters of this material was analyzed.

Keywords: Self-compacting concrete; steel fibers; post-cracking behavior.

1 Introdução

A indústria da pré-fabricação é, frequentemente, confrontada com a produção de elementos estruturais de alguma complexidade geométrica. Os condicionalismos geométricos traduzem-se, geralmente, em gastos significativos com a montagem e colocação das armaduras. Além disso, quando é usada percentagem elevada de armadura, existem dificuldades em garantir a qualidade de betonagem desejada, resultando deficiências que podem comprometer, quer o comportamento da estrutura quer a sua aparência final.

O betão auto-compactável pode ser definido como sendo um material capaz de fluir no interior da cofragem e de passar através da armadura, unicamente sob acção do seu peso próprio, ou seja, sem vibração. Conjugando as vantagens do betão auto-compactável com as que advêm da adição de fibras a materiais de matriz cimentícia, obtém-se um material com desempenho elevado, designado de betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA).

O presente trabalho faz parte de um programa de investigação que visa desenvolver painéis aligeirados de BACRFA para a indústria de pré-fabricação. As exigências estabelecidas para o BACRFA foram as seguintes: resistência média à compressão às 24 horas superior a 20 MPa; tensão equivalente de tracção em flexão [1] superior a 2 MPa, para a mesma idade; quantidade de cimento não superior a 400 kg/m³; o cimento deverá ser o componente mais caro da pasta ligante. A estratégia utilizada na concepção do BACRFA é, resumidamente, descrita no presente artigo.

Na indústria da pré-fabricação, uma das exigências mais importantes prende-se com a descofragem dos elementos, que deve ser realizada o mais rapidamente possível. Para garantir a segurança deste processo, deve ser conhecida a influência da idade do BACRFA nas resistências à flexão e à compressão do mesmo. Para este fim, foi levado a cabo um programa experimental com provetes às idades seguintes: 12 horas, 24 horas, 3, 7 e 28 dias. Foi dado especial enfoque à avaliação do comportamento pós-fendilhado do BACRFA [2], tendo-se determinado a lei tensão-abertura de fenda para estes materiais, com base nas relações força-flecha obtidas nos ensaios de flexão e recorrendo a um modelo de fendas discretas capaz de simular o fenómeno de iniciação e de propagação de fendas em elementos de betão [3].

O programa experimental realizado é descrito no presente trabalho, e os resultados são apresentados e analisados. A influência da idade do BACRFA nos parâmetros de fractura deste material é discutida.

2 Método de concepção do BACRFA

Os materiais usados no presente programa experimental foram os seguintes: cimento (C) CEM I 42.5R; filler calcárico (FC); superplastificante (SP) de terceira geração baseado em policarboxilatos (Glenium[®] 77SCC); água (A); três tipos de agregados (areia fina, meia areia e brita granítica (5-12 mm)); fibras de aço DRAMIX[®] RC-80/60-BN. Esta fibra tem comprimento (l_f) de 60 mm, diâmetro (d_f) de 0.75 mm, relação comprimento/diâmetro (l_f/d_f) de 80 e tensão de cedência de 1100 MPa.

O método desenvolvido no presente trabalho é constituído por três fases: i) afinação da composição da pasta ligante; ii) determinação da composição do esqueleto sólido, em que as percentagens relativas de cada um dos constituintes são obtidas; iii) obtenção da

percentagem de pasta por m³ de BACRFA que resulta numa mistura com as características de auto-compactabilidade requeridas, ou seja, espalhamento suficientemente elevado, velocidade de escoamento correcta, adequada capacidade de se adaptar e ultrapassar obstáculos e resistência aos fenómenos de segregação e exsudação.

Na primeira fase do procedimento, foi executada uma série de amassaduras para determinar a composição óptima da pasta ligante. Para definir a percentagem óptima de filler calcárico na composição final, foram executadas várias misturas de filler, cimento e água. As proporções de cada componente foram definidas em termos de volume: a quantidade de água foi de 66% do volume de cimento e a percentagem de filler calcárico variou entre 0% e 125% do volume de cimento. Para promover a desfloculação das partículas finas em suspensão foi, também, adicionada à mistura uma pequena quantidade de superplastificante que se manteve constante em toda esta fase. Para cada mistura determinaram-se o espalhamento relativo com o mini-cone, o tempo de escoamento com o cone de Marsh e a resistência à compressão aos sete dias em cubos de 5 cm de aresta. Uma percentagem de filler calcárico semelhante à do cimento resultou num bom compromisso entre a resistência e a trabalhabilidade e a resistência da pasta endurecida, o que permitiu que a quantidade final de cimento se mantivesse na ordem dos 350 kg/m³.

A segunda fase do procedimento consistiu na afinação da composição do esqueleto sólido. Para o efeito, realizaram-se várias misturas de meia areia e brita em percentagens relativas diferentes. Estas percentagens foram definidas em termos de volume. Para cada mistura mediu-se o peso para um volume de 5 dm³. Assumiu-se que a mistura mais pesada corresponde à mistura mais compacta, considerada a mistura óptima. Em todas as misturas foi adicionada uma quantidade de fibras equivalente a 30 kg por m³ de betão. Inicialmente, foram misturados dois dos três tipos de agregados; depois de encontrada a relação óptima entre estes dois, foi adicionado o terceiro tipo de agregado em diferentes percentagens de volume, mantendo constante a relação entre os dois primeiros. Verificou-se que o esqueleto sólido deveria ser composto, em percentagem de volume, pelos seguintes tipos de agregados: 49.5% de meia-areia, 40.5% de brita e 10% de areia fina.

A terceira fase foi dedicada à avaliação da percentagem de pasta ligante no volume total de betão. Para determinar a quantidade óptima de pasta foram efectuadas algumas amassaduras, fazendo variar a percentagem de pasta ligante em relação ao volume total de betão. A água adicionada em cada uma delas teve em conta o grau de saturação dos agregados. O processo de amassadura foi sempre o mesmo, tendo-se realizado, para cada uma delas, o ensaio de *slump flow*. Os parâmetros medidos foram o espalhamento total e o tempo que o betão demorou a atingir um espalhamento de 500 mm, T₅₀. Na Tabela 1 apresenta-se a composição da mistura que apresentou as melhores características de auto-compactabilidade. Não foram detectados sinais de segregação, obteve-se um espalhamento total de 725 mm e a mistura mostrou sempre boa homogeneidade e coesão, mesmo à passagem pelo pequeno orifício do Cone de Abrams (estes ensaios foram efectuados com o cone de Abrams em posição invertida). O valor de T₅₀ foi de 4,6 segundos.

Tabela 1: Composição final para 1 m³ de BACRFA com 30 kg de fibras

Pasta/Volume total (%)	Cimento (kg)	FC (kg)	Água (dm ³)	SP (dm ³)	Areia Fina (kg)	Meia Areia (kg)	Brita (kg)
0.34	364.28	312.24	93.67	6.94	108.59	723.96	669.28

3 Propriedades mecânicas do BACRFA

O programa experimental foi composto por ensaios de compressão directa em provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura e ensaios de flexão em provetes prismáticos de 600×150×150 mm³. Ambos os tipos de provetes foram betonados sem qualquer tipo de compactação. Para avaliar a influência da idade do BACRFA no comportamento à compressão e à flexão foram levados a cabo ensaios em provetes com 0.5, 1, 3, 7 e 28 dias de idade.

3.1 Compressão

Os ensaios de compressão directa foram realizados num equipamento servo-controlado com capacidade máxima de carga de 3000 kN. Os ensaios foram efectuados por controlo de deslocamentos do transdutor interno do actuador, à velocidade de 5 µm/s. Em torno do provete foram colocados três transdutores, efectuando entre si um ângulo de 120°, registando-se os deslocamentos entre os pratos de carga do equipamento (ver Figura 1). Esta disposição evita que a deformação do equipamento de ensaio seja adicionada aos valores lidos pelos LVDTs.

Com base nos valores registados pelos transdutores em cada leitura, determinou-se o correspondente deslocamento no eixo do provete [4], a partir do qual se obteve a extensão de compressão, dividindo este deslocamento pela altura inicial do provete. A relação tensão-extensão de compressão, $\sigma_c - \varepsilon_c$, para cada idade está representada na Figura 2. Cada curva representa a média dos valores obtidos para três provetes. Como seria de esperar, a perda de capacidade de carga, na fase pós-pico, foi tão mais acentuada quanto maior foi a resistência do material. Isto revela que o material se torna mais frágil com a idade. Contudo, esta queda não é tão pronunciada como seria de esperar para betão simples.

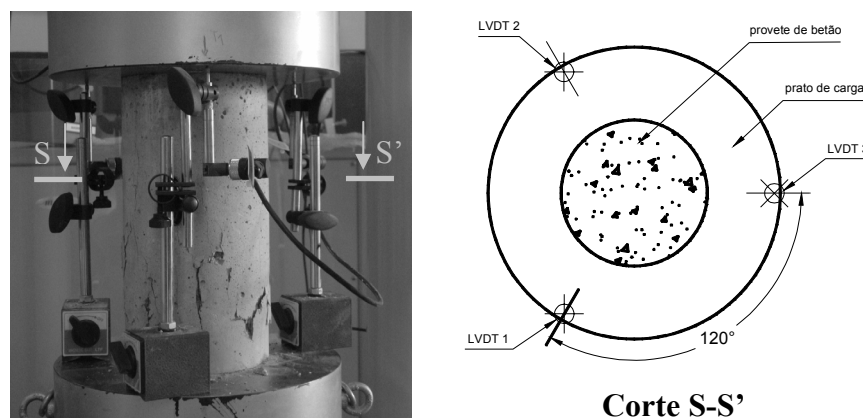


Figura 1 – Configuração do ensaio de compressão

Da interpretação da figura 3 pode-se inferir que as expressões $\sigma_c - \varepsilon_c$ propostas pelo CEB-FIP 1993 [5] para simular o comportamento do betão simples à compressão uniaxial são aplicáveis na simulação do comportamento em compressão do BACRFA até ao ponto correspondente à resistência do material. No entanto, na fase de amolecimento, essas expressões prevêm uma queda de carga superior à registada experimentalmente.

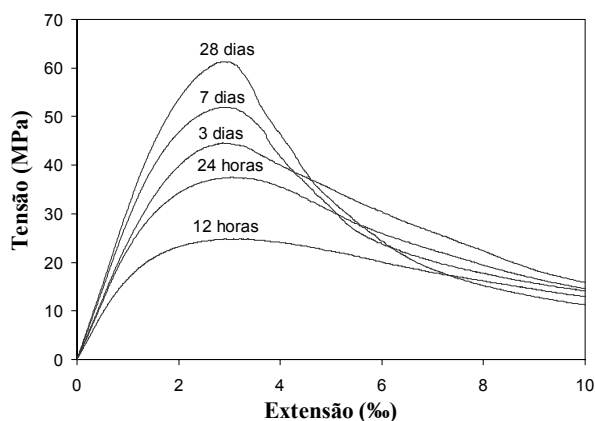


Figura 2. Curvas tensão-extensão para cilindros de BACRFA de várias idades.

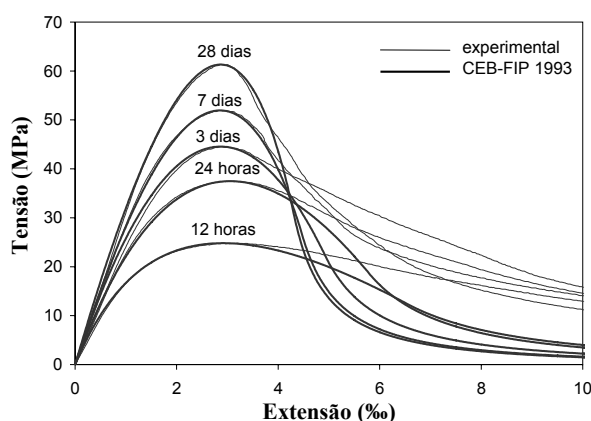


Figura 3. Avaliação da aplicabilidade das expressões do CEB-FIP 1993 para simular o comportamento do BACRFA à compressão uniaxial.

As figuras 4 e 5 representam a influência da idade do BACRFA no valor médio da resistência à compressão, f_{cm} , e no valor médio do módulo de elasticidade longitudinal inicial, E_{cm} . Para cada idade representa-se a média dos valores obtidos em três ensaios e o correspondente desvio padrão. Da análise destas figuras conclui-se que às 12 horas o valor da resistência à compressão (25 MPa) já excede o valor de 20 MPa, exigido apenas para as 24 horas, enquanto que E_{cm} atingiu um valor próximo de 24 GPa. Estes valores aumentam com a idade do BACRFA, tendo f_{cm} e E_{cm} alcançado 62 MPa e 36 GPa aos 28 dias, respectivamente. A evolução da tensão de compressão com a idade indicia que a partir dos 28 dias o aumento de f_{cm} é marginal. Este facto pode ser justificado pelo uso de uma percentagem significativa de filler de calcário na pasta, que é um material sem actividade pozolânica. A evolução do valor do módulo de elasticidade também indicia que, a partir dos 28 dias, o aumento de E_{cm} também é marginal. Este facto pode ser justificado pelo baixo valor da relação água/cimento (aproximadamente 0.28 em peso) tendo-se obtido uma matriz de compacidade elevada. Às 24 horas os valores de f_{cm} e de E_{cm} foram aproximadamente 61% e 79% dos correspondentes valores aos 28 dias. Nas primeiras horas E_{cm} aumentou de forma mais pronunciada do que f_{cm} .

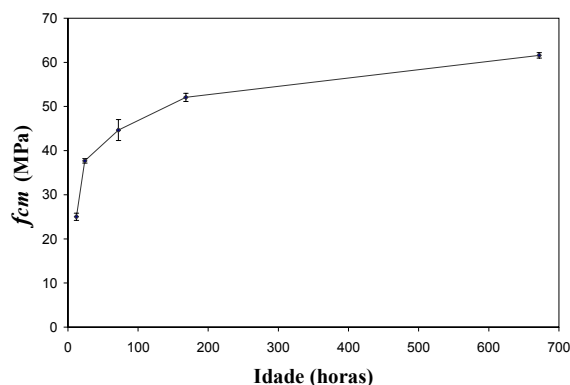


Figura 4. Variação de f_{cm} com a idade.

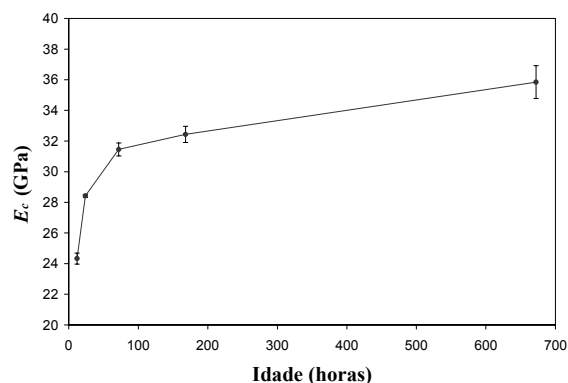


Figura 5. Variação de E_{cm} com a idade.

3.2 Flexão

Nos ensaios de flexão foram seguidas as recomendações do RILEM TC 162-TDF [1], nomeadamente no que se refere aos procedimentos de cura do betão, ao posicionamento e às dimensões do entalhe no provete, ao carregamento e condições de apoio, às características do equipamento, aos dispositivos de medida, e aos procedimentos do ensaio. O método de betonagem dos provetes proposto pelo RILEM TC 162-TDF foi adaptado, uma vez que não foi usada qualquer compactação externa.

As curvas força-flecha, $F-\delta$, obtidas estão representadas na Figura 6. Cada uma das curvas é a média da relação $F-\delta$ registada em três provetes. A influência da idade do BACRFA na força que corresponde ao limite de proporcionalidade, F_L , está representada na Figura 7. F_L é o maior valor de carga registado até uma flecha de 0.05 mm[1] e δ_L é a flecha correspondente ao valor de F_L . Esta figura mostra que F_L aumentou com a idade do BACRFA, sendo marginal o aumento após os 7 dias. Logo após δ_L ocorreu uma queda da capacidade de carga, cuja amplitude aumentou com a idade do BACRFA (ver Figura 6) uma vez que, quanto mais elevado for F_L maiores serão as forças transferidas para as fibras que atravessam a superfície de fractura. Como a quantidade de fibras permaneceu constante em todo o programa experimental, a queda de carga no início da fase de amolecimento (pós-pico) será tão mais significativa quanto maior for F_L . Esta queda de carga foi seguida de uma fase de endurecimento (*hardening branch*) até um valor de flecha que diminuiu com a idade do BACRFA. Excepto para os provetes com 28 dias, observou-se nos restantes que a carga máxima atingida foi superior ao valor de F_L . Excluindo a série de provetes de 12 horas de idade, em todas as outras a fase de endurecimento foi seguida de uma fase de amolecimento (*softening branch*). A diminuição da tensão residual na fase de amolecimento foi mais significativa na série de provetes com 28 dias. Nesta série, a maior amplitude de queda da capacidade de carga, logo após δ_L , deverá ter afectado as propriedades de aderência e a eficácia da ancoragem das fibras, conduzindo a uma diminuição da força necessária para arrancar as fibras que

atravessavam a superfície de fractura. Em resultado disto, parâmetros das tensões equivalente (f_{eq}) e residual (f_R) [1] só diminuíram entre os 7 e os 28 dias (ver Figura 8). Esta diminuição é mais pronunciada em $f_{R,4}$, uma vez que este parâmetro depende directamente da forma da curva força-flecha e é avaliado para uma flecha de 3.0 mm. Como $f_{eq,2}$ e $f_{R,1}$ têm variações similares com a idade, pode-se dizer que, para valores baixos de flecha (entre 0.46 mm e 0.7 mm), os conceitos baseados em resistência residual e em energia dissipada durante o processo de fendilhação do betão prevêm resultados idênticos.

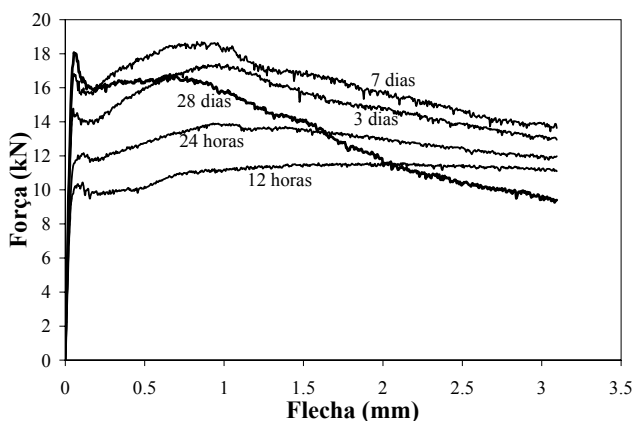


Figura 6. Curvas força-flecha para provetes de BACRFA de diferentes idades.

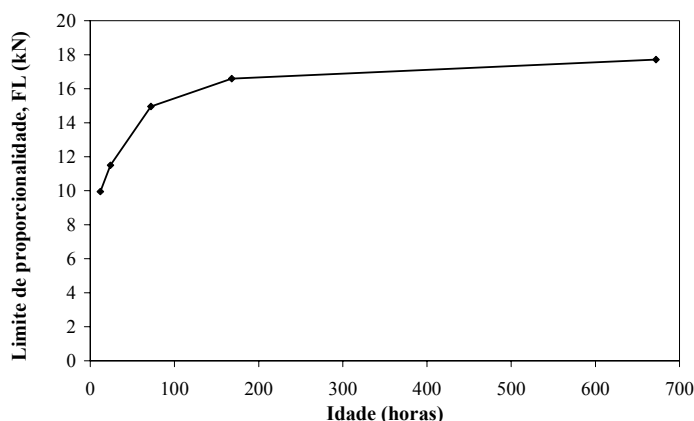


Figura 7. Influência da idade do BACRFA na força limite de proporcionalidade.

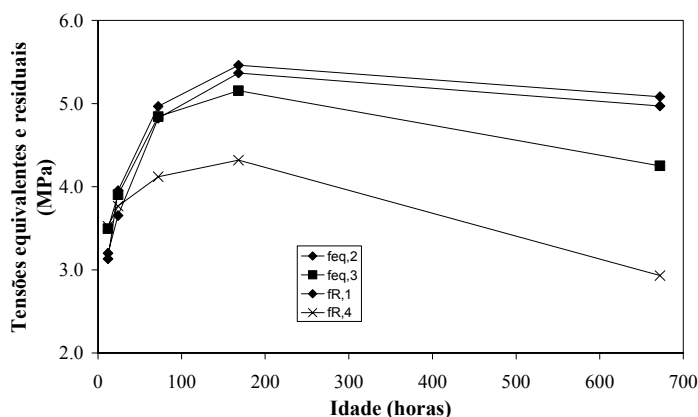


Figura 8. Influência da idade do BACRFA nos parâmetros de resistência equivalente e residual à tracção em flexão.

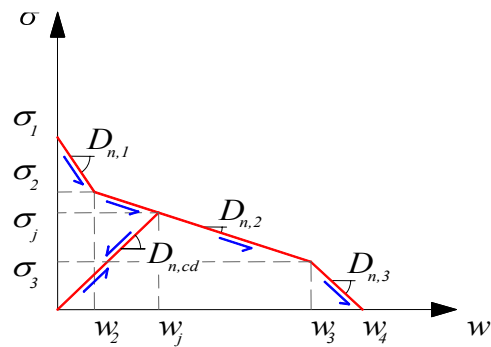


Figura 9. Diagrama tensão-abertura de fenda.

4 Parâmetros de fractura do BACRFA

Investigação anterior mostrou que o comportamento de um betão reforçado com fibras de aço (BRFA) pode ser simulado pelo diagrama trilinear tensão-abertura de fenda, $\sigma-w$, representado na Figura 9 [2,3]. Para avaliar a influenciada idade do BACRFA nos valores dos parâmetros de fractura deste material, realizou-se uma análise inversa, de modo a obter a dependência de σ_i e w_i com a idade do BACRFA. Os pares de valores σ_i-w_i definem o diagrama $\sigma-w$. Conhecendo estas dependências, a influência da idade na energia de fractura [6] pode ser directamente inferida.

A análise inversa foi realizada avaliando os valores de σ_i e w_i que melhor se ajustem à curva experimental $F-\delta$ com o menor valor do parâmetro erro,

$$err = \left| A_{F-\delta}^{\text{exp}} - A_{F-\delta}^{\text{num}} \right| / A_{F-\delta}^{\text{exp}} \quad (1)$$

em que $A_{F-\delta}^{\text{exp}}$ e $A_{F-\delta}^{\text{num}}$ são as áreas sob as curvas $F-\delta$ experimental e numérica, respectivamente. Com este propósito foi usado um programa computacional, de nome FEMIX, que dispõe de modelos de fendas discretas e distribuídas para simular o início e a propagação de fendas em materiais de matriz cimentícia [7]. Dado que o ensaio de flexão proposto pelo RILEM TC 162-TDF pode ser considerado como um problema de fractura localizada, foi usado um modelo de fendas discretas, detalhadamente descrito em [3]. A superfície de fractura acima do entalhe, coincidente com o plano de simetria do provete, foi discretizado por elementos finitos de interface 2D de seis nós (ver Figura 10). As restantes partes do provete foram discretizadas por elementos finitos de oito nós do tipo Serendipity em estado plano de tensão, considerados em regime linear e elástico. Nos elementos de interface foi utilizada a integração de Gauss-Lobatto com três pontos de integração (PI), enquanto nos elementos de 8 nós foi aplicada a integração de Gauss-Legendre com 2×2 PI. Para evitar oscilações indesejadas no campo de tensões, foi atribuído um valor de $1.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^3$ à rigidez inicial de modo I de fractura nos elementos de interface. Como o deslizamento entre as superfícies de fractura não ocorre neste tipo de problema, a análise é independente dos valores atribuídos à rigidez do modo II de fractura do elemento de interface.

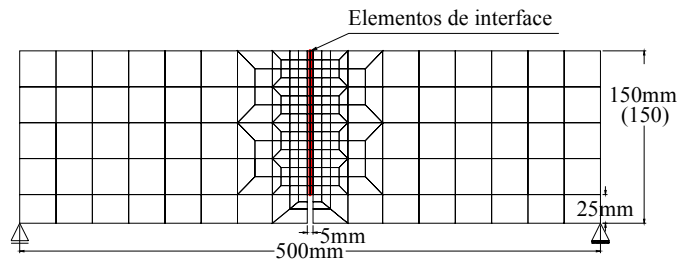


Figura 10. Malha de elementos finitos.

A adequabilidade da estratégia numérica adoptada está ilustrada na Figura 11, revelando que o diagrama trilinear $\sigma-w$ proposto é capaz de prever, com precisão suficiente, o comportamento pós-fendilhado do BACRFA ensaiado. Os valores de σ_i e w_i estão incluídos na Tabela 2 e correspondem à simulação das curvas experimentais $F-\delta$.

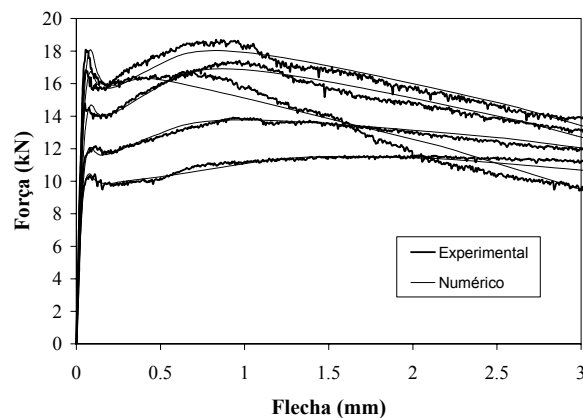


Figura 11. Curvas $F-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente.

Tabela 2. Parâmetros de fractura do BACRFA com diferentes idades

Idade (dias)	σ_1 (MPa)	w_2 (mm)	σ_2/σ_1	w_3 (mm)	σ_3/σ_1	w_4 (mm)	G_f (N/mm)
0.5	1.52	0.06	0.7	1	0.85	9	6.37
1	1.80	0.06	0.7	0.5	0.88	8	6.62
3	2.25	0.06	0.68	0.5	0.88	5	5.31
7	2.60	0.06	0.65	0.5	0.80	5	5.64
28	2.92	0.06	0.58	0.25	0.62	4	3.90

Como mostra a Figura 12, σ_i aumenta até aos 7 dias. Depois desta idade, σ_1 continua a aumentar, σ_2 mantém-se praticamente constante e σ_3 diminui. A Figura 13 mostra que a idade tem tendência para reduzir os valores de w_3 e w_4 , enquanto que w_2 não é afectado pela idade do provete. Isto significa que a inclinação do primeiro ramo de amolecimento do diagrama $\sigma-w$, $D_{n,1}$, aumenta com a idade (ver Figuras 9 e 14). É observada uma tendência similar para $D_{n,3}$ (ver Figuras 9 e 16), mas o aumento depois de 3 dias é marginal. A variação de $D_{n,2}$ com a idade está representada na Figura 15, reflectindo o efeito do endurecimento de valor crescente até aos 3 dias, seguido por um ligeiro decréscimo depois desta idade (ver Figura 6).

A grande inclinação dos ramos de amolecimento e a pequena amplitude do ramo de endurecimento do diagrama $\sigma-w$ dos provetes com 28 dias, reflecte o carácter mais frágil da resposta $F-\delta$ registada nestes provetes.

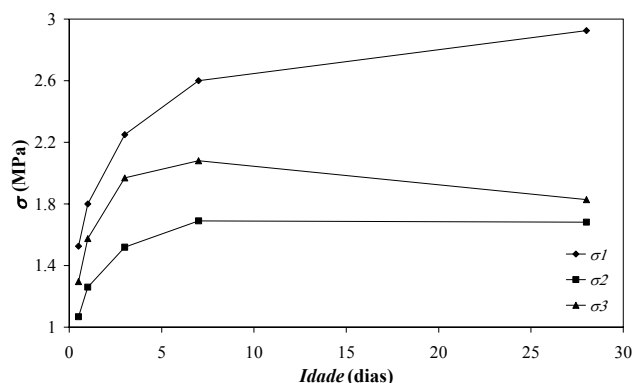


Figure 12. Influência da idade do BACRFA em σ_i

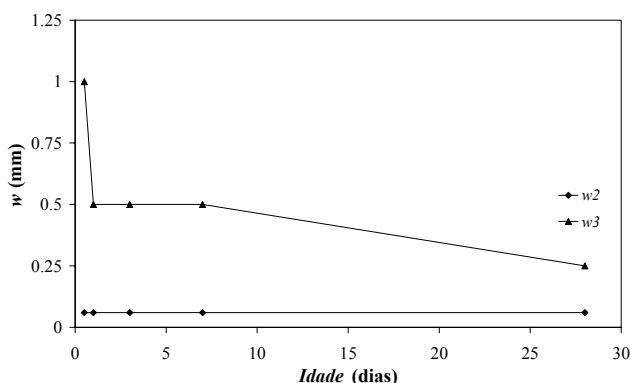


Figure 13. Influência da idade do BACRFA em w_i .

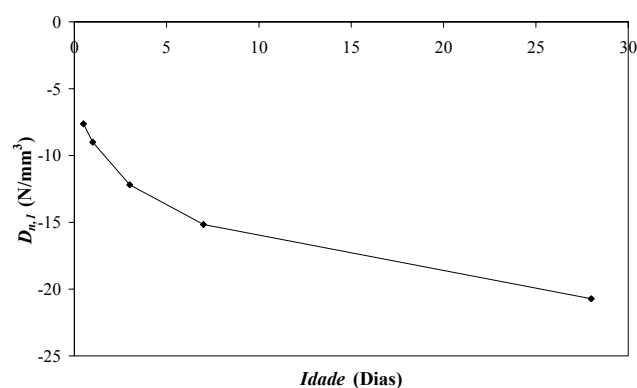


Figura 14. Influência da idade no parâmetro $D_{n,1}$

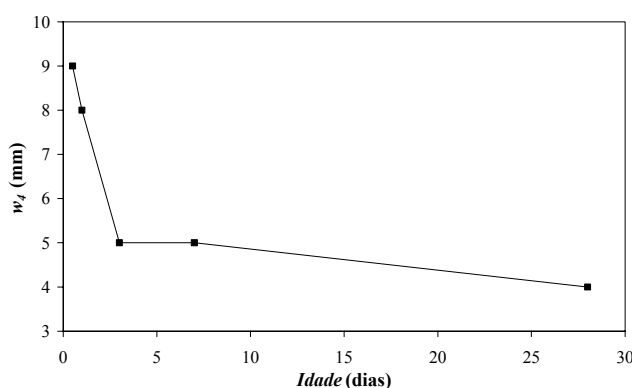


Figure 15. Influência da idade no parâmetro $D_{n,2}$.

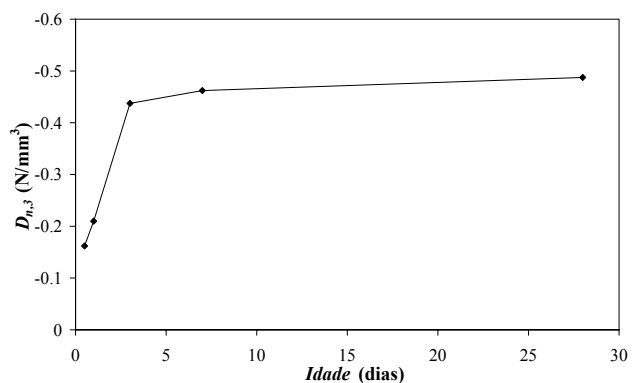


Figure 16. Influência da idade no parâmetro $D_{n,3}$.

Para modelar a contribuição do reforço das fibras, o TC 162-TDF recomenda o uso de $f_{R,4}$ para a análise aos estados limites últimos [1]. O valor de $f_{R,4}$ corresponde à tensão determinada para uma flecha de 3.0 mm. Assim, do ponto de vista da análise estrutural, apenas tem interesse conhecer a energia de fractura dissipada até este valor de flecha, $G_{f,3mm}$. A influência da idade do BACRFA na evolução de $G_{f,3mm}$ está representada na Figura 16, de onde se pode concluir que $G_{f,3mm}$ aumenta até aos 7 dias, seguindo-se um decréscimo significativo depois desta idade. Isto significa que os mecanismos de reforço das fibras não foram suficientemente beneficiados pelo aumento da resistência da matriz com a idade, de forma a assegurar a tendência observada nos provetes até aos 7 dias. Para evitar o decréscimo de $G_{f,3mm}$ depois dos 7 dias, será necessário utilizar uma quantidade superior de fibras.

A Figura 17 mostra que existe correlação elevada entre σ_1 e $f_{ctk,min}$, tendo $f_{ctk,min}$ sido determinada de acordo com as recomendações do CEB-FIP (1993).

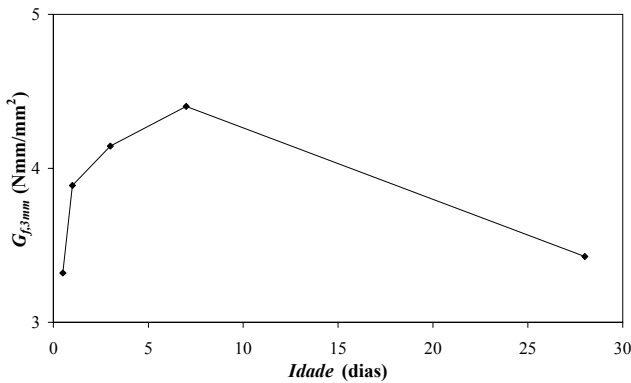


Figura 17. Influência da idade do BACRFA no $G_{f,3mm}$.

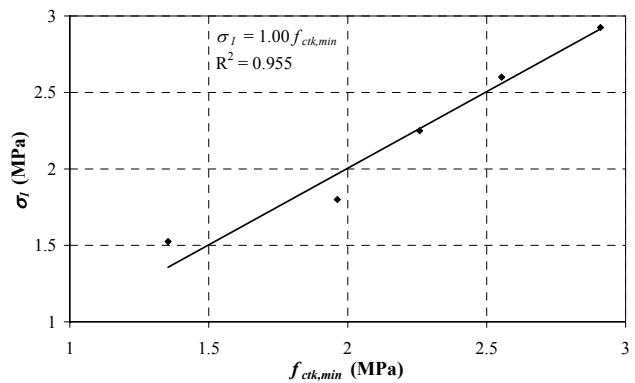


Figura 18. Relação entre σ_1 e $f_{ctk,min}$.

De acordo com o TC 162-TDF, σ_2 é linearmente dependente de $f_{eq,2}$ ou $f_{R,1}$, enquanto que σ_3 é linearmente dependente de $f_{eq,3}$ ou $f_{R,4}$. As relações de dependência σ_2 - $f_{eq,2}$, σ_2 - $f_{R,1}$ e σ_3 - $f_{eq,3}$ estão confirmadas nas figuras 19 a 22, mas a Figura 22 indica que a relação de dependência de σ_3 - $f_{R,4}$ não foi revelada com segurança. Os parâmetros de proporcionalidade entre σ_2 e $f_{eq,2}$ e entre σ_3 e $f_{eq,3}$ são, contudo, diferentes dos propostos pelo RILEM TC 162-TDF para o betão convencional reforçado com fibras de aço (0.45 and 0.37, respectivamente, enquanto que para o BACRFA foram obtidos 0.32 and 0.40, respectivamente).

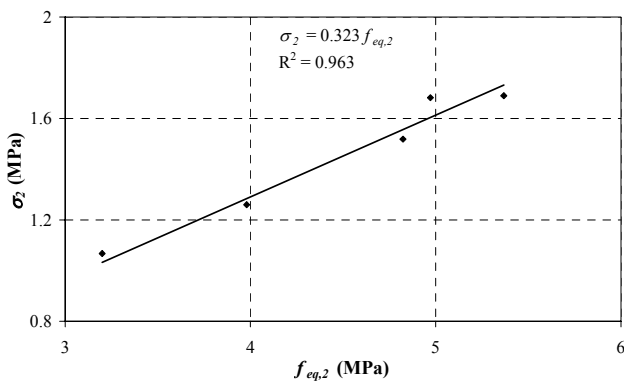


Figura 19. Relação entre σ_2 e $f_{eq,2}$.

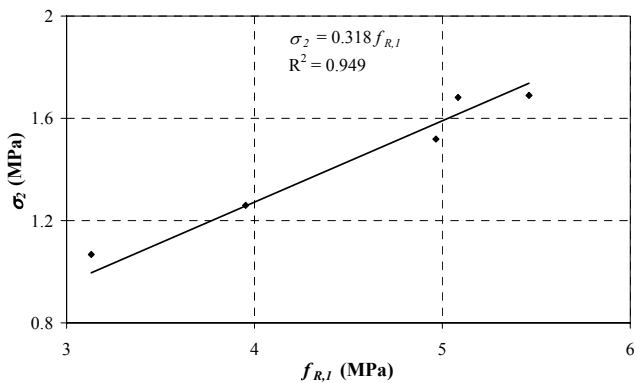


Figura 20 Relação entre σ_2 e $f_{R,1}$.

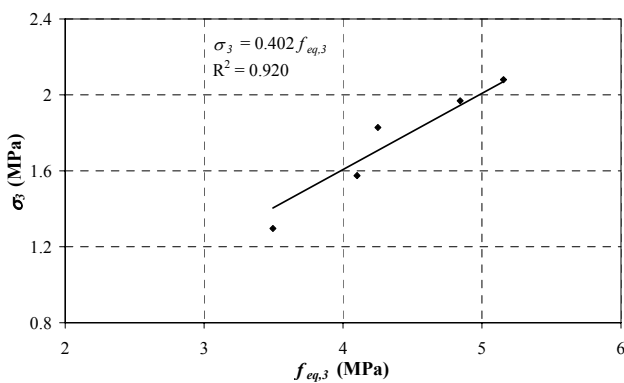


Figura 21. Relação entre σ_3 e $f_{eq,3}$.

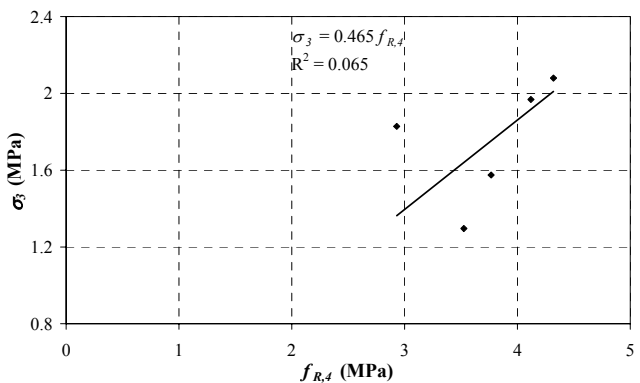


Figura 22. Relação entre σ_3 e $f_{R,4}$.

5 Ensaio em protótipos de painéis aligeirados

5.1 Flexão

Por norma, os painéis aplicados em fachadas de edifícios, tais como os apresentados na Figura 23, têm um número de apoios suficiente que lhes confere alguma capacidade de distribuição de esforços, caso ocorra fendilhação do betão que os constitui.



Figura 23 – Exemplos de aplicação de painéis de betão reforçado com fibras de vidro.

A configuração geométrica do painel aligeirado desenvolvido no presente projecto de investigação está representada na Figura 24. As zonas de aligeiramento são constituídas por blocos $300 \times 300 \times 80 \text{ mm}^3$ de polistireno, com uma camada de 30 mm de espessura de BACRFA que fica virada para o exterior do edifício. Resta uma grelha em BACRFA cujas barras possuem 100 mm de largura e com a espessura total do painel (110 mm). O projecto abrange o estudo de outras soluções geométricas, não abordadas no presente trabalho.

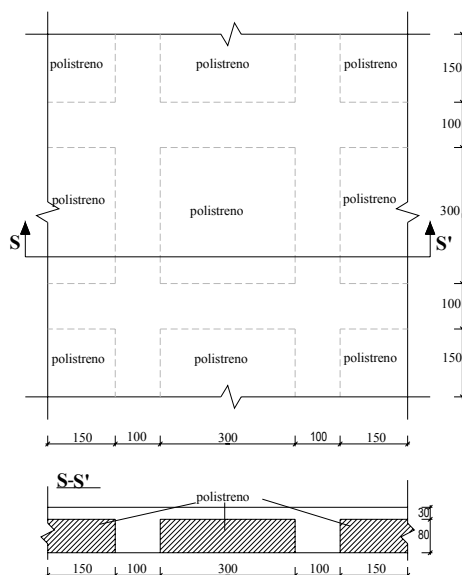


Figura 24. Configuração geométrica do painel em desenvolvimento

Para identificar a capacidade de redistribuição de esforços dos painéis de BACRFA em estudo, foi desenvolvido o protótipo representado na figura 25. Foi colocado um LVDT de 50 mm sob cada um dos pontos de carga (ver figura 26) e utilizou-se uma célula de carga de 500 kN de capacidade máxima. O ensaio foi realizado sob controlo de deslocamento do transdutor interno do actuador, à velocidade de $5 \mu\text{m/s}$. Na Figura 27 apresenta-se uma perspectiva da configuração geral do ensaio.

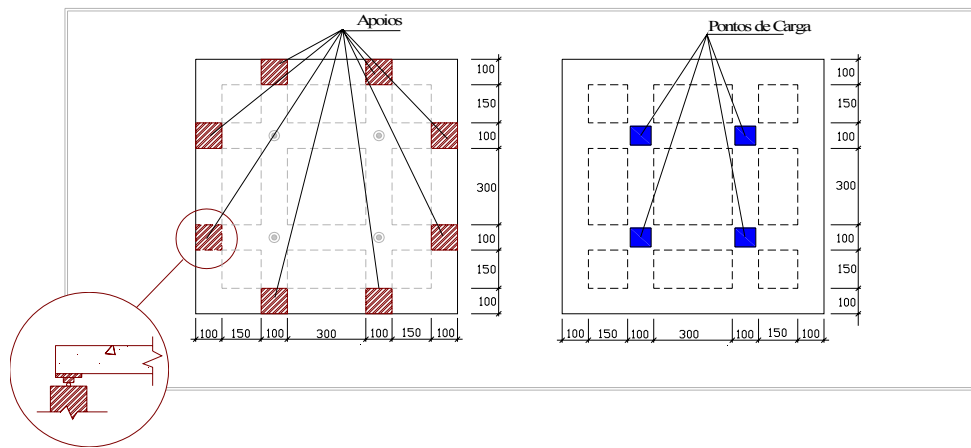


Figura 25. Configuração geométrica do protótipo de painel para ensaio de flexão, apoios e carregamento

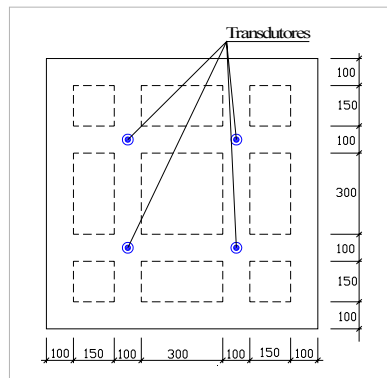


Figura 26. Posicionamento dos transdutores para medição da deformação do protótipo.

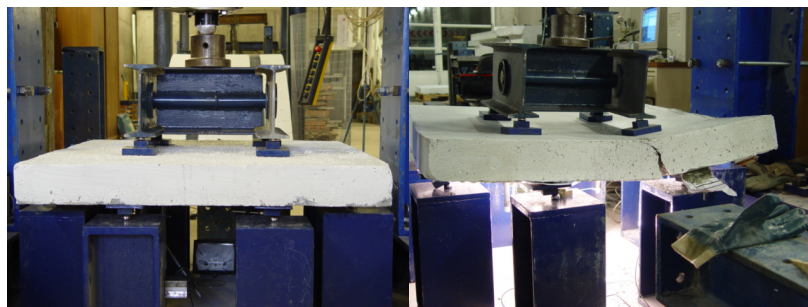


Figura 27. Ensaio de flexão de protótipo de painel

Na figura 28 apresenta-se a relação entre a força e os deslocamentos registados nos quatro LVDTs. Constata-se que após a carga de pico, a queda de capacidade de carga ocorre de forma suave e gradual, sendo este um comportamento típico de estruturas constituídas por materiais que desenvolvem elevada capacidade de absorção de energia durante o processo de fendilhação.

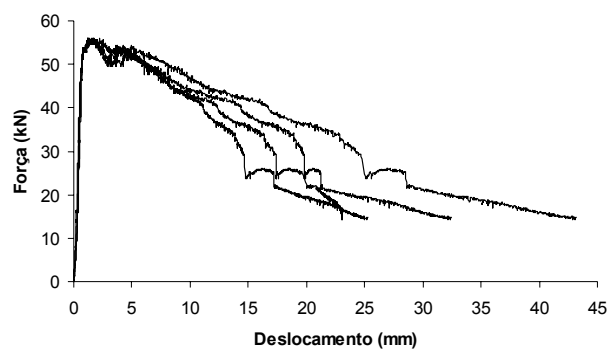


Figura 28. Relações força-flecha registadas nos LVDTs

Na figura 29 pode-se observar o padrão de fendilhação do painel após o seu ensaio. Verifica-se uma tendência para as superfícies de rotura se localizarem junto aos nós da “grelha”, dada a concentração de tensões nessas zonas.



Figura 29. Padrão de fendilhação do painel no final do ensaio de flexão

5.2 Punçamento

Nas partes aligeiradas do painel, a espessura do betão é de apenas 30 mm (ver figura 24). Deste modo, se os painéis são submetidos a cargas concentradas de valor suficientemente elevado, a rotura por punçamento pode ser condicionante. Com o intuito de estimar a resistência ao punçamento das zonas aligeiradas dos painéis, o protótipo de painel representado na Figura 30 foi ensaiado segundo a configuração de ensaio também representada nesta figura. O painel está simplesmente apoiado, em todo o seu contorno, num cilindro de aço. O ensaio foi realizado sob controlo de deslocamento do transdutor interno do actuador, à velocidade de deslocamento de 25 $\mu\text{m/s}$. A força do actuador, medida por intermédio de uma célula de carga de 300 kN de capacidade, era distribuída numa placa de aço de $100 \times 100 \times 10 \text{ mm}^3$.

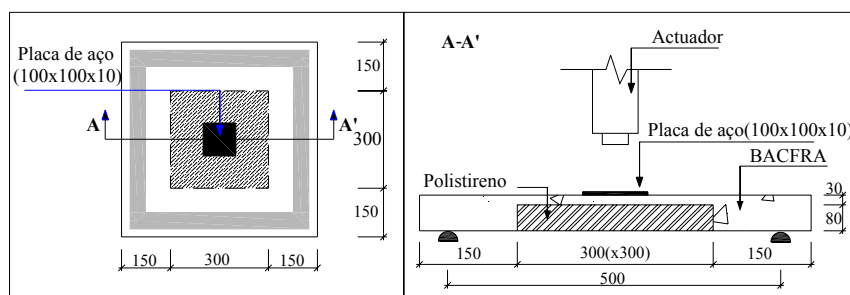


Figura 30. Configuração do protótipo do painel e do sistema de ensaio para ensaio de punçamento

Na Figura 31 apresenta-se a relação entre a força aplicada e o deslocamento no LVDT que mediu a penetração da placa de aço na camada de 30 mm de BACRFA. Constata-se que, ao atingir a carga de 40 kN por volta dos 1.3 mm, a capacidade de carga é retida até uma penetração da placa da ordem dos 3 mm, o que revela que o BACRFA tem ductilidade suficiente para sustentar níveis elevados de carga até perfurações da ordem dos 10% da espessura da camada do painel.

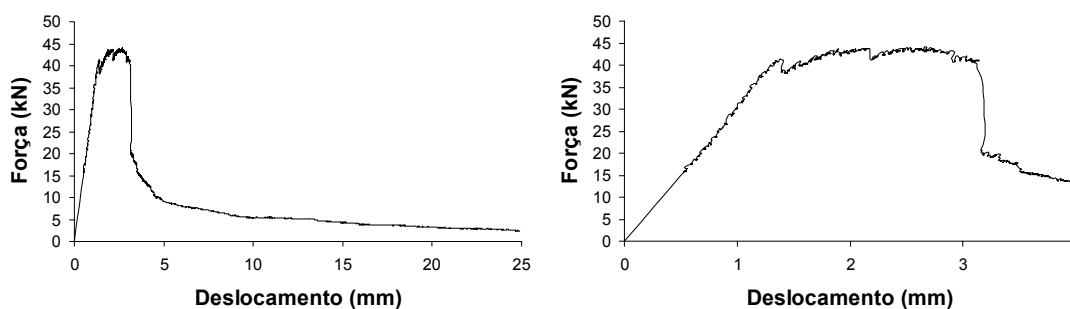


Figura 29. Relação força-deslocamento no ensaio de punçoamento

5 Conclusões

No presente trabalho foi descrito um método de concepção para betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) de custo competitivo. O BACRFA concebido atingiu todas as características de auto-compactabilidade exigidas, bem como os requisitos de resistência, nomeadamente, resistência à compressão às 24 horas superior a 20 MPa, sem que a quantidade de cimento por m^3 de betão ultrapassasse os 400 kg. O BACRFA concebido apresentou resistência à compressão de 25 MPa às 24 horas e 62 MPa aos 28 dias, com uma quantidade de cimento de cerca de $360 \text{ kg}/m^3$.

Para avaliar a influência da idade do BACRFA concebido, no comportamento à compressão e à flexão, foi realizado um programa experimental constituído por ensaios com provetes de 12 e 24 horas, 3, 7 e 28 dias de idade. Para as aplicações da indústria da pré-fabricação, onde este material previsivelmente será usado, foram excedidos os valores de ductilidade e de resistência que se exigem ao BACRFA. Foi efectuado esforço adicional de investigação de forma a avaliar a influência da idade do BACRFA nos parâmetros do modo I de fractura deste material. Assim, com base nas relações força-flecha, $F-\delta$, obtidos em ensaios sob três pontos de carga com provetes entalhados de BACRFA, determinou-se o diagrama trilinear, tensão-abertura de fenda, $\sigma-w$, que permite similar o modo I de fractura para as distintas idades estudadas.

As relações $F-\delta$ obtidas mostraram que, para manter a força residual no pós-pico até que se atinja uma flecha de 3 mm, deverá usar-se uma quantidade de fibras superior ($45 \text{ kg}/m^3$ parece um valor adequado para alcançar este objectivo). A influência da idade do BACRFA nos valores σ_i , w_i , que definem o diagrama $\sigma-w$, foi analisada. A correspondência entre os valores de σ_i , do diagrama $\sigma-w$, e os valores dos parâmetros das resistências equivalente (f_{eq}) e residual (f_R), propostos pelo RILEM TC 162-TDF, foi obtida de forma a verificar se o diagrama de simulação do comportamento em tracção, em fase fendilhada, proposto por este comité, é aplicável ao BACRFA concebido. Foi obtida uma boa correlação entre σ_i e f_{eq} mas as constantes desta correlação não são iguais às que são recomendadas pelo RILEM TC 162-TDF para betão corrente reforçado com fibras de aço. Para o BACRFA concebido foram propostos novos valores para estas constantes.

Quanto ao comportamento estrutural dos painéis concebidos em BACRFA, deu-se ênfase ao comportamento em flexão composta na tipologia associada aos painéis de maior dimensão, e ao comportamento em rotura por punçoamento associada aos painéis de menor dimensão. Tanto num caso como no outro, os resultados obtidos evidenciam um comportamento estrutural bastante dúctil, com manutenção de elevadas percentagens da capacidade resistente máxima até níveis de deformação bastante elevados. Esta característica revela a excepcional aptidão do material para aplicação em estruturas que se pretendam bastante deformáveis, ou a elevada capacidade de redistribuição de

esforços em estruturas de elevado grau de hiperstaticidade. A dissipação de energia até à rotura também é elevada, o que torna este material especialmente adequado para aplicação em elementos estruturais sujeitos a solicitações dinâmicas e de impacto, nomeadamente a acção sísmica.

Por último, resta ressaltar a distribuição e a abertura de fendas verificada, que apesar de não ter sido estudada directamente, pode-se constatar visualmente, durante a realização dos ensaios, ser bastante uniforme e apenas aparente para elevados níveis de deformação, o que indicia um elevado número de fendas abertas, uniformemente distribuídas, e com pequena abertura. Esta situação revela-se particularmente favorável na aplicação do material em painéis de fachada, elementos permanentemente sujeitos à intempérie e, conseqüentemente, inseridos em meios agressivos, que exigem precauções especiais na mitigação deste factor.

6 Agradecimentos

O estudo descrito neste artigo é parte integrante do programa de investigação "Prefabricated sandwich steel fiber reinforced panels" apoiado pelos FEDER e MCT, e promovido pela ADI (45% do montante solicitado). O terceiro autor agradece a bolsa recebida ao abrigo deste projecto de investigação. Este projecto envolve as empresas PREGAIA e CIVITEST e a Universidade do Minho. Os autores gostariam de agradecer a cedência dos materiais usados, gentilmente cedidos pela degussa (superplastificante), SECIL (cimento), Bekaert (fibras) e Comital (filler calcárico).

7 Bibliografia

1. Vandewalle, L. et al. 2002. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - Final Recommendation. *Materials and Structures* 35(253): 579-582.
2. Pereira, E.B.; Barros, J.A.O.; Ribeiro, A.F.; Camões, A.F.F.L., "Post-cracking behaviour of selfcompacting steel fibre reinforced concrete", 6th International RILEM Symposium on fibre reinforced concrete - BEFIB 2004, Vol. 2, pp. 1371-1380, Edts. M. di Prisco, R. Felicetti, G.A. Plizzari, 20-22 de Setembro, 2004.
3. Sena-Cruz, J.M., Barros, J.A.O., Fernandes, A., Azevedo, A.F.M. & Camões, A.F.F.L., "Stress-crack opening relationship of enhanced performance concrete", 9th Portuguese Conference on Fracture, Setúbal, Portugal, 18-20 February 2004.
4. Untiveros, C. M. A. 2002. Estudio experimental del comportamiento del hormigón confinado sometido a compresión, PhD Thesis, UPC, Barcelona.
5. CEB-FIP Model Code 1993. Comité Euro-International du Béton, Bulletin d'Information nº 213/214.
6. RILEM Draft Recommendation, 50-FMC Committee Fracture Mechanics of Concrete 1985. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bending tests on notched beams. *Materials and Structures* 85(85), 285-290.
7. Sena-Cruz, J.M., "Strengthening of concrete structures with near-surface mounted CFRP laminate strips", Tese de Doutoramento, Dep. Eng^a Civil, Universidade of Minho, 2004.