

INFLUÊNCIA DA IDADE NOS PARÂMETROS DE FRACTURA DO BETÃO AUTO-COMPACTÁVEL REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

A. RIBEIRO

Engenheiro Civil - Universidade do Minho - Guimarães - alberto@civil.uminho.pt

J. BARROS

Professor Auxiliar - Universidade do Minho - Guimarães - barros@civil.uminho.pt

E. PEREIRA

Assistente Estagiário - Universidade do Minho - Guimarães - epereira@civil.uminho.pt

J. ANTUNES

Engenheiro Civil - Civitest - Braga - jantunes@civitest.pt

SUMÁRIO

No presente trabalho apresenta-se a estratégia numérica desenvolvida para a determinação das propriedades de fractura do betão auto-compactável reforçado com fibras de aço de distintas idades. Para tal foram utilizados resultados obtidos num programa experimental e um software de análise não linear material baseado nas técnicas dos elementos finitos, sendo a fendilhação simulada por intermédio de um modelo de fendas discretas.

1. INTRODUÇÃO

No âmbito de um projecto de investigação foi desenvolvido um betão auto-compactável reforçado com fibras de aço, BACRFA, para aplicação em painéis aligeirados pré-fabricados. Neste tipo de aplicação é necessário proceder ao desmolde, transporte e armazenagem de peças de elevado porte, com o menor tempo de cura possível, de forma a economizar custos de produção. Para que tal possa ser efectuado sem que ocorram fendas de abertura superior ao admissível, é necessário conhecer o comportamento em tracção, principalmente após fendilhação, do BACRFA em distintas idades. Com este propósito, foram efectuados ensaios de compressão e de flexão com provetes de BACRFA às 12 horas, 24 horas, 3 dias, 7 dias e 28 dias. Utilizando os resultados obtidos nos ensaios de flexão e procedendo a análise inversa com um software de análise não linear material baseado nas técnicas dos elementos finitos, determinaram-se os parâmetros de fractura do BACRFA para as diferentes idades.

2. MATERIAL E ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A composição do BACRFA está indicada em outro trabalho [1], tendo sido obtida por intermédio do método desenvolvido por Pereira *et al.* [2]. Para avaliar a influência da idade no

comportamento à compressão e à flexão do BACRFA concebido, foram efectuados ensaios de compressão e de flexão às 12 e 24 horas e aos 3, 7 e 28 dias. As características do equipamento, os procedimentos de ensaio, os resultados obtidos e sua interpretação encontram-se em outros trabalhos [1, 2]. Os valores obtidos nos ensaios de compressão e as respostas de força-flecha, $F - \delta$, registadas nos ensaios de flexão foram utilizadas na análise inversa efectuada no presente trabalho, por forma a avaliar-se a influência da idade nos parâmetros de fractura do BACRFA concebido.

3. MODELO NUMÉRICO

Na simulação numérica do ensaio de flexão foi empregue a malha de elementos finitos apresentada na Figura 1. O entalhe realizado na secção a meio vão induz a iniciação e progressão da fenda ao longo desta secção, simulada por elementos de interface de seis nós. O restante volume do provete foi simulado por elementos Serendipity de oito nós em estado plano de tensão, com comportamento linear e elástico. A componente da lei constitutiva do elemento de interface correspondente ao modo I de fractura é simulada pelo diagrama tensão abertura de fenda, $\sigma - w$, representado na Figura 2. A formulação do elemento de interface encontra-se descrita em outro trabalho [3].

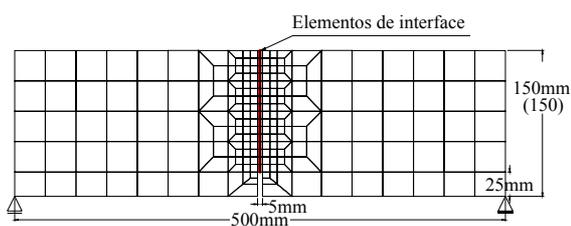


Figura 1 : Malha de elementos finitos adoptada na simulação numérica.

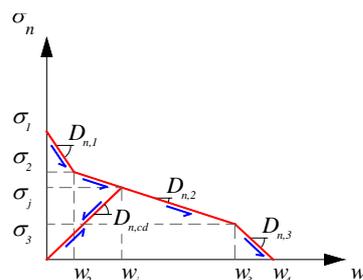


Figura 2 : Diagrama $\sigma - w$ trilinear.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Da aplicação do processo de análise inversa, descrito em [3], às curvas de resposta $F - \delta$ registadas nos ensaios de flexão, obtiveram-se os parâmetros que definem o diagrama trilinear de $\sigma - w$ para as diferentes idades do BACRFA. Na Figura 3 comparam-se as respostas $F - \delta$ registadas experimentalmente com as obtidas por intermédio da análise inversa com o modelo numérico, de onde se conclui que a estratégia adoptada permite simular com elevado rigor os ensaios efectuados. Revela ainda que o diagrama $\sigma - w$ representado na Figura 2 permite simular adequadamente o comportamento pós pico do BACRFA.

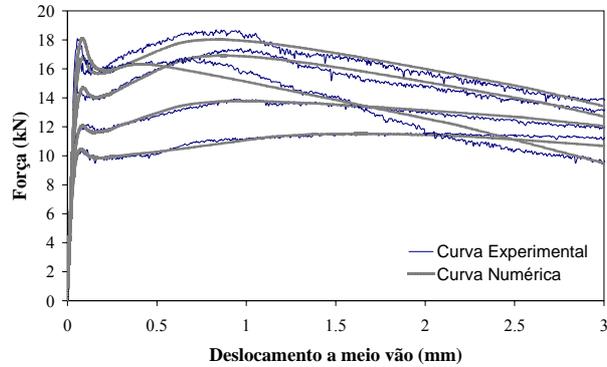


Figura 3 : Curvas $F - \delta$ registadas experimentalmente vs as curvas numéricas obtidas na simulação.

4.1 Parâmetros de tensão e abertura de fenda

Na Tabela 1 estão indicados os parâmetros de fractura obtidos por análise inversa, estando na Figura 4 representados os correspondentes diagramas $\sigma - w$.

Tabela 1 - Parâmetros do diagrama trilinear $\sigma - w$ obtidos na análise inversa.

Idade	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_3 (MPa)	w_2 (mm)	w_3 (mm)	w_4 (mm)
12 Horas	1.52	1.07	1.30	0.06	1.0	9.00
24 Horas	1.80	1.26	1.58	0.06	0.5	8.00
3 Dias	2.25	1.52	1.97	0.06	0.5	5.00
7 Dias	2.60	1.69	2.08	0.06	0.5	5.00
28 Dias	2.92	1.68	1.83	0.06	0.25	4.00

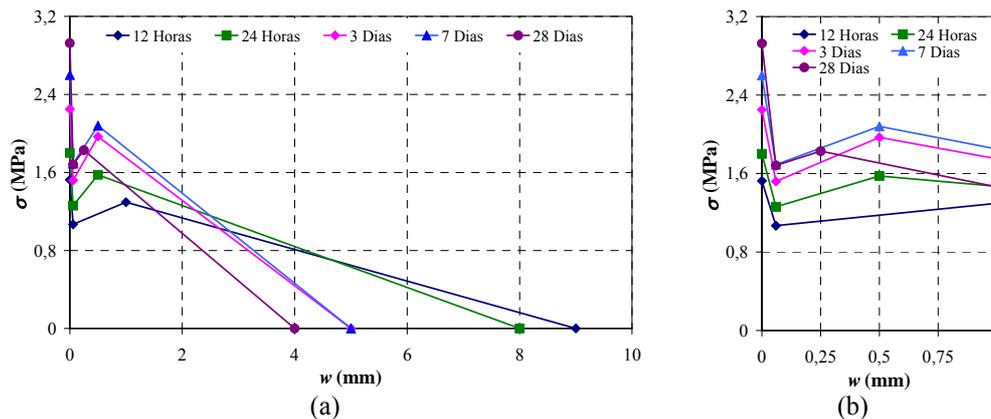


Figura 4 : Diagrama de $\sigma - w$ determinado por análise inversa para as distintas idades: (a) até 10 mm; (b) até 1 mm.

Da observação da Figura 4 verifica-se que para todas as idades o diagrama $\sigma - w$ é constituído por dois ramos de amolecimento (1º e 3º) e um ramo de endurecimento (2º).

Na Figura 5 apresenta-se a relação entre a tensão de início de fendilhação, σ_I , e o valor da tensão característica mínima, $f_{ctk,min}$, obtida segundo as recomendações do código modelo CEB-FIP [4] de onde se conclui que $\sigma_I \approx f_{ctk,min}$ para qualquer das idades analisadas.

A evolução do valor dos parâmetros de tensão com a idade está apresentada na Figura 6, constatando-se que todos eles aumentam até aos sete dias de idade do BACRFA. Após esta idade observa-se evoluções distintas para os diferentes pontos de tensão. Assim, σ_1 aumenta após os 7 dias, enquanto que σ_2 permanece constante e σ_3 diminui ligeiramente. Observa-se ainda que σ_3 apresenta valores superiores a σ_2 como consequência do endurecimento registado no segundo tramo.

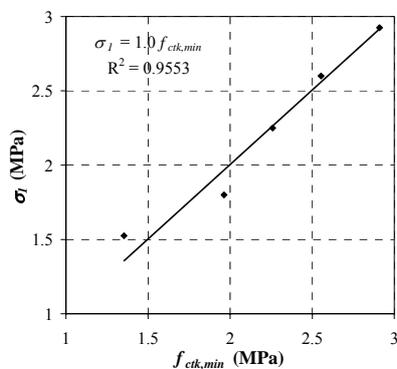


Figura 5 : Relação entre $f_{ctk,min}$ e σ_I .

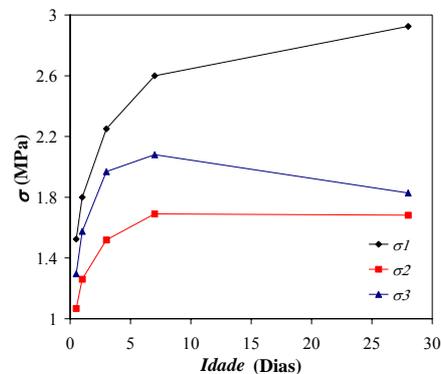


Figura 6 : Influência da idade nos parâmetros de tensão.

Nas Figuras 7 e 8 representa-se a influência da idade do BACRFA nos parâmetros de fractura de abertura de fenda. À excepção de w_2 cujo valor permanece constante, nos dois restantes verifica-se uma diminuição com a idade.

Nas Figuras 9, 10 e 11 representa-se a influência da idade nos valores obtidos para os módulos (inclinações) de rigidez correspondentes aos tramos do diagrama $\sigma - w$ ($D_{n,1}$, $D_{n,2}$ e $D_{n,3}$). Observa-se que, em valor absoluto, os módulos $D_{n,1}$ e $D_{n,3}$ aumentam com a idade, enquanto $D_{n,2}$ apenas aumenta até aos 3 dias. Após esta idade observa-se um ligeiro decréscimo do valor de $D_{n,2}$ e uma tendência para estabilizar o valor de $D_{n,3}$.

O aumento da inclinação do primeiro tramo do diagrama trilinear com a idade é indicativo da maior fragilidade do material, resultando da maior amplitude do comportamento de amolecimento registado após a carga de pico da curva $F - \delta$ (Figura 3).

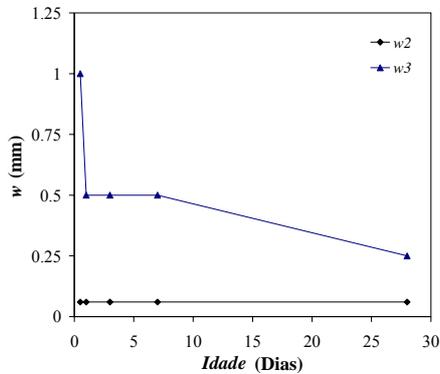


Figura 7 : Influência da idade nos parâmetros de abertura de fenda w_2 e w_3 .

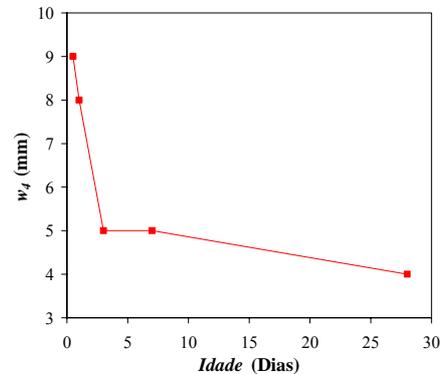


Figura 8 : Influência da idade no parâmetro de abertura de fenda w_4 .

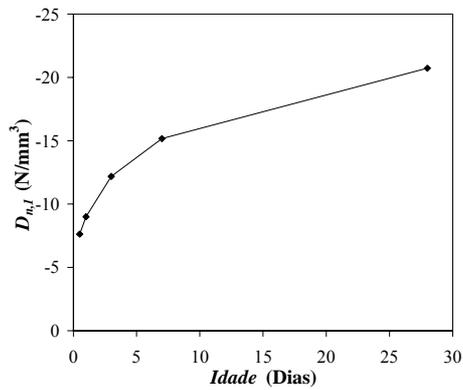


Figura 9 : Influência da idade no parâmetro $D_{n,1}$.

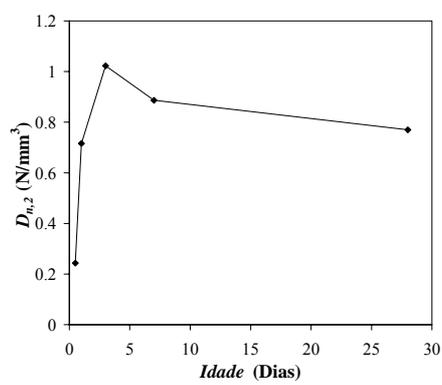


Figura 10 : Influência da idade no parâmetro $D_{n,2}$.

4.2 Energia de fractura

O ensaio de flexão proposto pelo comité técnico 162-TDF da RILEM [5] para caracterizar o comportamento em flexão do BRFA, utilizado na campanha experimental subjacente ao presente trabalho, determina a relação $F - \delta$ até uma flecha de 3.1 mm. Com base nesta relação obtém-se a resistência residual à tracção em flexão 1 e 4, $f_{R,1}$ e $f_{R,4}$, respectivamente, sendo a primeira obtida para uma flecha de 0.46 mm e a segunda para 3.0 mm. Segundo aquele comité, $f_{R,1}$ e $f_{R,4}$ são utilizadas para simular a contribuição das fibras na verificação aos estados limites de utilização e últimos, respectivamente [6]. Assim, a energia dissipada durante o processo de fractura do material até à flecha de 3.0 mm é a que tem impacto no processo de dimensionamento do BRFA. Por este facto, com base na análise inversa determinou-se esta parcela de energia, a que se designou $G_{f,num}$, estando a sua evolução com a idade do BACRFA representada na Figura 12. Constata-se que $G_{f,num}$ aumenta até aos 7 dias, diminuindo a partir desta idade. Com a idade o aumento da resistência da matriz torna o material cada vez mais frágil. Por seu lado, a ductilidade introduzida pelas fibras deve-se, fundamentalmente, aos

mecanismos de resistência ao arranque mobilizados durante o processo de abertura e propagação das fendas. Dado que aos 28 dias de idade o BACRFA apresentou uma resistência à compressão de 62 MPa e uma resistência à tracção em flexão de 5.7 MPa, os mecanismos de reforço proporcionados pelos 30 Kg/m³ de fibras não foram suficientes para sustentar a energia libertada no momento da fendilhação da matriz. Para desenvolver níveis de capacidade de energia similares aos observados aos 7 dias será necessário empregar uma percentagem mais elevada de fibras.

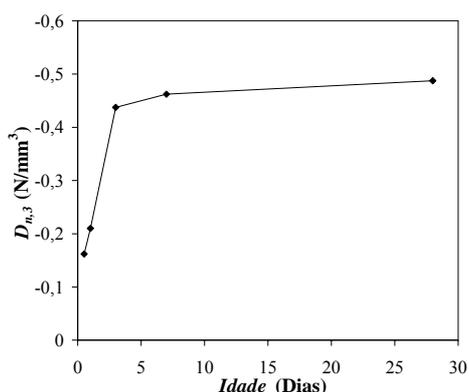


Figura 11 : Influência da idade no parâmetro $D_{n,3}$.

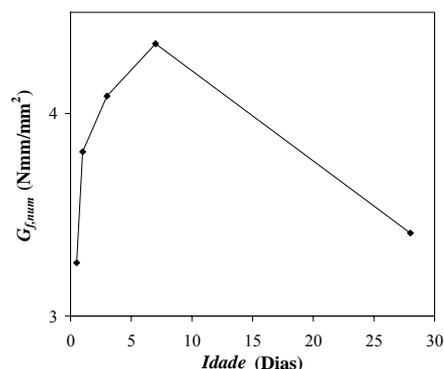


Figura 12 : Influência da idade em $G_{f,num}$ até a flecha de 3 mm.

5. PAINEL ALIGEIRADO

Na Figura 13 representa-se a secção de um painel a ser construído em BACRFA segundo a técnica da pré-fabricação. De forma a aligeirar o painel, são empregues placas de poliestireno de 300×300×50 mm³ a meia altura do painel, transformando o painel numa grelha de nervuras maciças de 100 mm de largura, ligadas por módulos constituídos por três camadas, as externas de 30 mm de espessura em BACRFA e a central em poliestireno de 50 mm de espessura. A viabilidade económica deste tipo de estruturas também passa pela minimização do tempo necessário ao seu processo de cura. Com base nos valores das propriedades dos materiais obtidos, quer experimentalmente quer por análise inversa, para distintas idades do BACRFA, procedeu-se à determinação do coeficiente de segurança, CS, associado ao processo de levantamento do painel e seu transporte para a área de armazenamento. Este factor representa o múltiplo do peso próprio do painel que conduz ao início da fendilhação. Para determinar o momento de início da fendilhação do painel utilizou-se o código computacional FEMIX [7] que permite analisar o comportamento não linear material de estruturas tipo casca. O modelo elasto-plástico de multifendas fixas distribuídas, empregue na presente simulação, está descrito com detalhe em outro trabalho [8]. A teoria de Reissner-Mindlin utilizada na modelação por elementos finitos do presente painel, encontra-se descrita em [9]. As lâminas externas do painel foram discretizadas, cada uma, por três camadas de 10 mm de espessura. Nas nervuras, os restantes 50 mm de espessura foram discretizados em duas camadas de 25 mm de espessura. A malha de elementos finitos adoptada está representada na Figura 14, sendo constituída por elementos Serendipity de oito nós, com integração de Gauss-Legendre de 2×2. Os pontos de

levantamento do painel encontram-se indicados nesta Figura. Os valores dos parâmetros materiais do modelo constitutivo foram obtidos por intermédio dos resultados registados nos ensaios experimentais e na análise inversa. Dado tratar-se de um modelo de fendilhação distribuída, os parâmetros de abertura de fenda, w , da lei de amolecimento do material foram convertidos em extensão normal à fenda por intermédio da sua divisão por um comprimento que, para tornar a simulação independente do grau de refinamento da malha, considerou-se ser igual à raiz quadrada da área do ponto de integração do elemento finito [9].

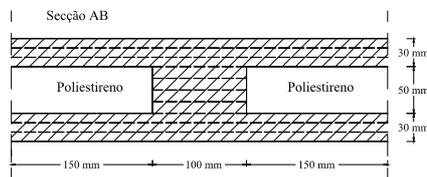


Figura 13 : Secção representativa do painel de BACRFA.

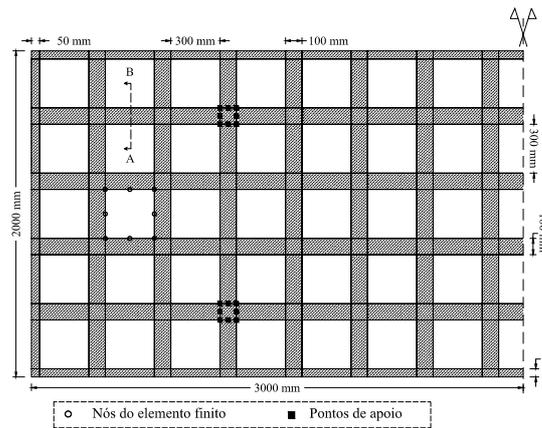


Figura 14 : Malha de elementos finitos de meio painel.

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos de CS para distintas idades, estando estes representados na Figura 15. Para as 12 horas CS já apresenta um valor positivo, sendo este, crescente até os 28 dias. Se os pontos de levantamento e de transporte do painel forem os considerados nas presentes análises, ao fim de 24 horas de cura do painel este poderá ser desmoldado, levantado e transportado sem a ocorrência de fendilhação, desde que os efeitos dinâmicos que sempre ocorrem neste processo não ultrapassem os 60% do peso próprio do painel.

Tabela 2 - CS para o peso próprio.

Idade	CS
12 Horas	1.25
24 Horas	1.625
3 Dias	2.125
7 Dias	2.5
28 Dias	2.75

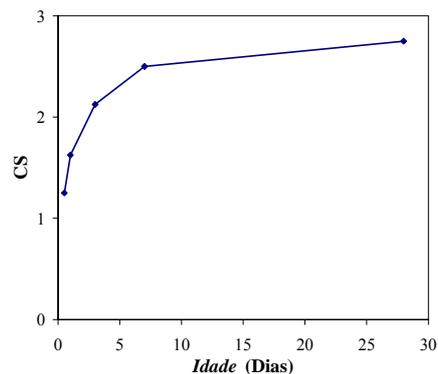


Figura 5 : Influência da idade em CS.

6. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi apresentada a estratégia numérica empregue na determinação dos parâmetros de fractura do BACRFA para diferentes idades, que se revelou adequada na simulação do comportamento experimental observado.

A caracterização experimental e os parâmetros de fractura aferidos permitiram a modelação do comportamento de um painel aligeirado de forma a determinar o início da fendilhação devido ao processo de desmolde e transporte. Esta estratégia revelou que para as 24 horas o painel apresentará fendas se no processo de transporte os efeitos dinâmicos superarem em 60% o peso próprio do painel.

7. AGRADECIMENTOS

Este estudo foi efectuado no âmbito do projecto "PABERFIA - *Painéis sandwich prefabricados de betão reforçado com fibras*" financiado pelo FEDER e FCT, no âmbito da ADI, 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 utilizados no BACRFA.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Barros, J.A.O.; Pereira, E.B.; Ribeiro, A.F.; Antunes J.A.B., "Self-compacting steel fibre reinforced concrete for precasted sandwich panels - experimental and numerical research", aceite para publicação no Workshop do 6th RILEM Symposium on fibre reinforced concrete (FRC) BEFIB 2004, 24-25 de Setembro, 2004.
- [2] Pereira, E., Barros, J., Ribeiro, A. & Camões, A. 2004. "Post-cracking behaviour of self-compacting steel fibre reinforced concrete", aceite para publicação no BEFIB; Proc. Intern. Symp., Varenna, Italy, 20-22 Setembro, 2004.
- [3] Ribeiro, A.F. – *Modelos de fenda discreta na simulação do comportamento em flexão de betão reforçado com fibras de aço*, Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Julho, 2004.
- [4] CEB-FIP – *CEB-FIP Model Code 1990, Design Code*, , Bulletin d'Information CEB Lausanne, 1993.
- [5] Vandewalle, L. et al. 2002. "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - Final Recommendation", em *Materials and Structures*, Vol.35, Nº253, p. 579-582.
- [6] Vandewalle, L. et al. 2003. "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – σ - ϵ design method - Final Recommendation" em *Materials and Structures*, Vol. 36. Nº262, p. 560-567.
- [7] Azevedo, A.F.M.; Barros, J.A.O.; Sena-Cruz, J.M.; Gouveia, A.V., "Software no ensino e no projecto de estruturas", III Congresso Luso Moçambicano de Engenharia, pp. 81-92, 19-21 Agosto 2003.
- [8] Sena, J.M. *et al* – "Elasto-plastic multi-fixed smeared crack model for concrete", *Relatório técnico 04-DEC/E-05*, , Dep. De Engenharia Civil, Universidade do Minho, Junho, 2004.
- [9] Barros, J.A.O., "Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica", Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pp. 502, Dezembro 1995.