

AVALIAÇÃO DA ADEQUABILIDADE DAS LEIS PROPOSTAS PELA RILEM PARA CARACTERIZAR O COMPORTAMENTO FENDILHADO DO BETÃO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

Alberto Ribeiro¹, Vítor Cunha¹, Joaquim Barros², Alexandre Antunes¹

¹ Aluno de Mestrado do Departamento de Eng.^a Civil da Escola de Eng.^a da Universidade do Minho

² Prof. Auxiliar do Departamento de Eng.^a Civil da Escola de Eng.^a da Universidade do Minho

RESUMO: Nos últimos dois anos têm sido efectuados ensaios de flexão, segundo as recomendações do grupo de trabalho TC 162-TDF da RILEM, para caracterizar o comportamento à flexão do betão reforçado com fibras de aço (BRFA). Os resultados obtidos foram utilizados, em conjunto com um modelo numérico desenvolvido, por forma a avaliar o desempenho das leis constitutivas recomendadas pelo referido grupo. Foi dada especial ênfase à modelação do comportamento do BRFA fendilhado, quer por intermédio de lei tensão-extensão (σ - ϵ), que por meio de lei tensão abertura de fenda (σ - w). A investigação numérica efectuada é descrita e os principais resultados obtidos são apresentados e comentados.

1 - INTRODUÇÃO

Num número significativo de aplicações, a participação de fibras de aço na composição do betão tem-se revelado oportuna do ponto de vista técnico e económico, dado ser possível conceber soluções mais económicas e de segurança estrutural mais elevada. No entanto, a utilização de betão reforçado com fibras de aço (BRFA) em aplicações estruturais tem sido reduzida, dado que os principais benefícios proporcionados pela adição de fibras ao betão têm sido avaliados por distintos procedimentos, sendo propostos diversos parâmetros e formulações, que na maior parte dos casos atribuem diferentes graus de desempenho à propriedade que pretendem representar (ASTM C1018-89, 1991; JSCE-SF4, 1984; ACI 544.1R-96, 1997; RILEM 2000a). Além disto, esses benefícios não têm sido formulados no quadro de recomendações de projecto de elevada divulgação, pelo que os projectistas sentem fundamentadas dificuldades no dimensionamento de estruturas de BRFA. Para tentar alterar este estado, a RILEM designou o grupo de trabalho TC 162-TDF que tem vindo a publicar documentos no âmbito da caracterização experimental, da análise e do dimensionamento de estruturas de BRFA. Em 2000 este grupo de trabalho publicou (RILEM 2000b) um documento onde é sugerido um modelo para análise e dimensionamento de estruturas de BRFA, em que a principal alteração aos modelos tradicionais resume-se na consideração da resistência à tracção do BRFA, após a sua fendilhação. Para tal propõem uma lei tensão-extensão definida com base em parâmetros que, por sua vez, reproduzem a capacidade de absorção de energia, ou a tensão residual do BRFA para determinadas flechas. Mais recentemente (RILEM 2002a), o mesmo grupo de trabalho sugere a utilização da mecânica da fractura não linear (Karihaloo, 1995) para simular o comportamento fendilhado deste compósito.

No presente trabalho foi desenvolvido um modelo numérico com o objectivo de se aferir o grau de rigor da simulação permitida pelas leis propostas pelo TC 162-TDF. Para tal utilizaram-se os resultados obtidos numa extensa campanha de ensaios experimentais (Alexandre e Barros, 2002), efectuados segundo as recomendações deste comité (RILEM

2002b). A estratégia numérica desenvolvida é descrita e são apresentados e analisados os principais resultados obtidos.

2 - MATERIAIS

A investigação em curso foi iniciada com o desenvolvimento de BRFA de custo competitivo, com propriedades apropriadas para pavimentos de edifícios industriais, cumprindo as seguintes condições (Barros *et al.*, 2002): resistência característica à compressão superior a 25 MPa aos 28 dias; quantidade de ligante (cimento + cinzas volantes) igual a 300 Kg/m³; abaixamento (*slump*) superior a 150 mm; recurso a agregados disponíveis na região Norte de Portugal. Foram utilizadas fibras de aço Dramix®, comercialmente designadas por RC-65/60-BN (Dramix, 1998). Esta fibra tem 60 mm de comprimento, 0.92 mm de diâmetro e 65 de esbelteza (razão entre comprimento e diâmetro), tensão de cedência da ordem dos 1100 MPa e foram realizadas amassaduras com 0, 15, 25, 35 e 45 Kg de fibras por m³ de betão. Na Tabela 1 estão descritas as composições dos BRFA produzidos (Antunes e Barros, 2002).

Tabela 1 - Composições dos BRFA produzidos.

Componente	Kg/m ³		
Cimento I 42.5R	300	262.5	225
Cinzas Volantes	0 (0%)	37.5 (12.5%)	75 (25%)
Areia Fina	173.5	165.5	152.3
Areia britada	871.0	875.5	869.1
Brita 5/15	315.7	319.1	319.1
Brita 15/25	468.2	470.6	467
Água	163.8	158.8	153.8
Rheobuild® 1000		7.5	
Fibras Dramix® 65/60-BN (% em volume)	15 (0.19); 25 (0.32); 35 (0.45); 45 (0.57)		

Designação: F_wQ_fC_vi_ld_k - w - tipo fibra; j - quantidade fibras (Kg/m³); i - quantidade cinzas volantes (%); k - idade (dias)

3 - ENSAIO DE FLEXÃO E CONCEITO DE RESISTÊNCIA RESIDUAL EM FLEXÃO

Nas Figuras 1 e 2 representa-se a geometria, carregamento e disposição dos transdutores de medição da flecha (LVDT) e da abertura de fenda (“clip-gauge”). As características, quer da estrutura de reacção utilizada nos ensaios, quer dos aparelhos que registaram os deslocamentos e as forças, estão descritas em outro trabalho (Barros *et al.*, 2002).

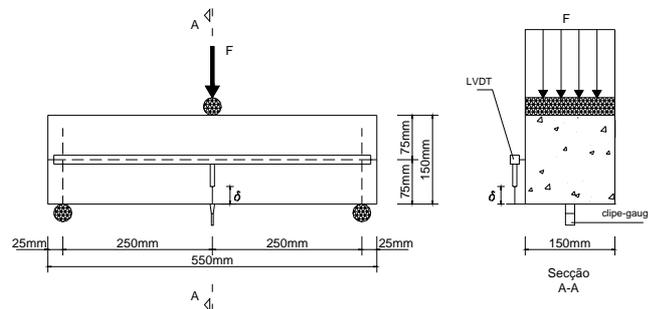
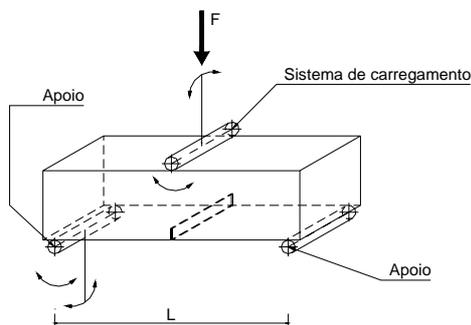


Figura 1 – Esquema de suporte e de aplicação da carga. Figura 2 – Disposição dos sistemas de leitura.

Na Figura 3 apresenta-se uma resposta típica que se obtém neste ensaio. Com base na relação força-flecha determinam-se dois parâmetros que se designam de resistências residuais em flexão, f_{R1} e f_{R4} , representando a tensão para a flecha de $\delta_{R,1}=0.46$ mm e $\delta_{R,4}=3.0$ mm,

respectivamente. As expressões que permitem determinar f_{R1} e f_{R4} estão incluídas na Figura 3, sendo h_{sp} ($=125$ mm) e b ($=150$ mm) a altura e a largura da secção de fractura, respectivamente, e L ($=500$ mm) o vão do provete.

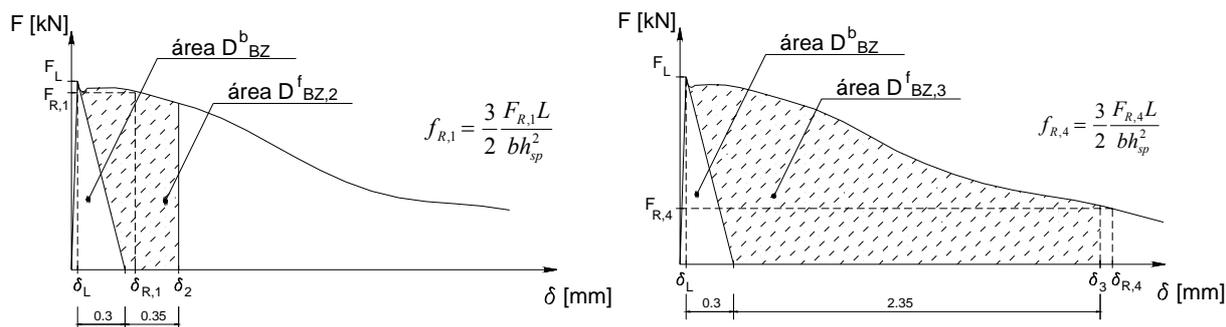


Figura 3 – Resistências residuais em flexão f_{R1} , f_{R4} ($\delta_L=0.05$ mm).

4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS RELEVANTES

Para avaliar a influência da percentagem de fibras, da percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes (Cv) e da idade (Id) dos provetes na resistência à compressão, foram efectuados ensaios com cubos de 150 mm de aresta. Na Tabela 2 apresenta-se o valor médio da resistência à compressão, f_{cm} , e o respectivo desvio padrão, s_p , para cada uma das séries ensaiadas. Constata-se que a influência da percentagem de fibras é marginal e que a diminuição da resistência com a substituição de cimento por Cv só foi significativa nos provetes com sete dias de idade.

Tabela 2 – Valores médios da resistência à compressão.

Idade	Q_f (Kg/m ³)	Percentagem de cinzas volantes															
		0			12.5			25			0			12.5			25
7	f_{cm} (MPa)	34.7	32.3	27.9	34.9	31.9	27.5	31.2	33.6	29.5	40.1	35.6	26.7				
	s_p (MPa)	4.7	0.4	1.0	0.03	1.7	0.4	1.5	3.0	0.5	1.3	0.4	1.2				
	f_{cm} (MPa)	41.3	38.9	38.4	44.1	39.0	36.7	38.9	45.3	38.0	46.2	41.6	38.8				
28	s_p (MPa)	3.0	1.3	1.8	0.8	2.9	1.8	0.8	3.9	1.2	1.8	1.2	1.4				
	f_{cm} (MPa)	45.5	44.3	46.2	49.9	47.2	47.8	42.6	49.5	41.1	49.5	43.6	40.6				
90	s_p (MPa)	2.5	0.4	1.0	1.4	2.6	2.0	2.5	4.3	4.3	2.5	4.6	0.4				

Os valores médios de f_{R1} e f_{R4} e os correspondente valores de desvio padrão estão indicados, na Tabela 3 (apenas para Cv=0, por limitação de espaço).

Tabela 3 – Resistências f_{R1} e f_{R4} para 0% de cinzas volantes.

	Idade	Quantidade de fibras (Kg/m ³)														
		15				25				35				45		
f_{Ri} (MPa)	7	f_{R1}				f_{R4}										
s_p		2.182	2.726	3.313	5.061	1.915	2.965	2.442	5.303	0.25	0.11	0.33	0.82	0.33	0.11	0.39
f_{Ri} (MPa)	28	f_{R1}				f_{R4}										
s_p		2.635	3.838	4.086	5.822	2.365	3.748	3.194	5.380	0.56	0.58	0.40	0.73	0.56	0.18	0.34
f_{Ri} (MPa)	90	f_{R1}				f_{R4}										
s_p		3.078	3.154	3.840	4.954	2.529	3.174	3.018	4.300	0.44	0.70	0.42	1.91	0.52	0.50	0.59

A variação de f_{R1} e f_{R4} com a quantidade de fibras (Qf) está representada na Figura 4 para Cv=0, onde se constata uma tendência de aumento com Qf.

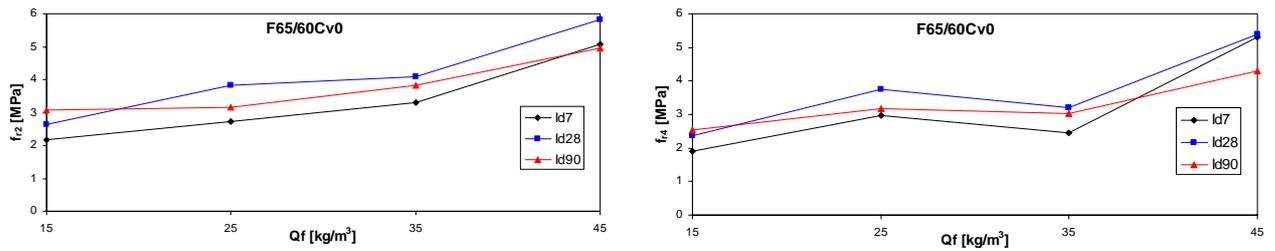


Figura 4 – Influência da quantidade de fibras nos valores de f_{R1} e f_{R4} .

5 - MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO EM FLEXÃO DO BRFA SEGUNDO O TC 162-TDF

5.1 - Compressão

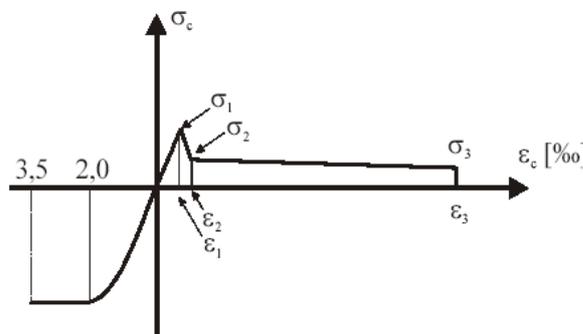
Dado que na simulação do comportamento à flexão dos provetes ensaiados a extensão por compressão será inferior à extensão correspondente à resistência à compressão do material, a influência da participação das fibras é insignificante (Barros 1995). Assim, O TC 162-TDF propõe um diagrama linear parábola seguido de uma patamar após a extensão correspondente à resistência à compressão. No presente trabalho a simulação do comportamento à compressão uniaxial do BRFA foi efectuada por intermédio da lei proposta pelo CEB-FIP (1993).

5.2 – Tracção

Tendo em conta o facto de a percentagem volumétrica de fibras utilizada na campanha experimental ter sido inferior a 0.57, a influência das fibras no comportamento à tracção uniaxial até à resistência à tracção do material é marginal, pelo que foi adoptada uma relação linear entre a tensão e a extensão de tracção para essa fase do comportamento do material.

5.2.1 – Pós pico em termos de tensão-extensão

A Figura 5 representa a lei σ - ε proposta pelo TC 162-TDF para modelar o comportamento em flexão do BRFA. Os parâmetros que caracterizam o pós-pico em tracção são indicados, verificando-se que são função de f_{R1} e f_{R4} , bem com de um factor, κ_h , que tem em conta a dimensão da estrutura a dimensionar (ver Figura 6). A tensão de tracção de pico σ_1 para betão reforçado exclusivamente com fibras é relacionada somente com a tensão de tracção média em flexão, $f_{cm,fl}$, isto é, o factor (1.6-d) somente é usado em estruturas com reforço híbrido (armaduras convencionais mais fibras).



$$\sigma_1 = 0.7 f_{cm,fl} (1.6-d); \sigma_2 = 0.45 f_{R1} \kappa_h; \sigma_3 = 0.37 f_{R4} \kappa_h; E_c = 9500 (f_{cm})^{1/3}; \varepsilon_1 = \sigma_1 / E_c; \varepsilon_2 = \varepsilon_1 + 0.1\%; \varepsilon_3 = 25 \%$$

Figura 5 – Lei constitutiva, σ - ε , para o BRFA, segundo o TC 162-TDF.

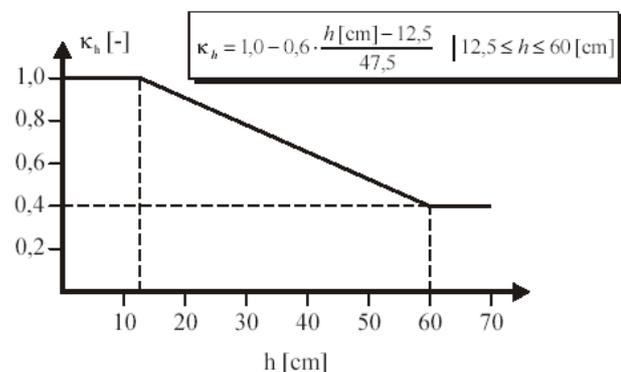


Figura 6 – Parâmetro para simular o efeito de escala, κ_h .

5.2.2 – Pós pico em termos de tensão-abertura de fenda

Tendo em conta a sua simplicidade formal e o rigor de simulação que permite (Barros, 1995), o diagrama constituído por três ramos lineares (designado por diagrama trilinear), representado na Figura 7, foi utilizado no presente trabalho para simular o comportamento pós-pico em tracção do BRFA. Outros tipos de diagramas são propostos em (RILEM 2002a).

6 - MODELO NUMÉRICO

Para simular a resposta força-flecha registada nos ensaios experimentais efectuados, o provete foi discretizado em três blocos (ver Figura 8): central, designado por rótula não linear, onde todos os fenómenos de não linearidade do material são processados; laterais, em que se admite que o material se encontra em regime linear e elástico. Adoptando a recomendação do TC 162-TDF (2002a) adoptou-se para dimensão da rótula não linear, metade da altura da secção de fractura ($s=h_{sp}/2$).

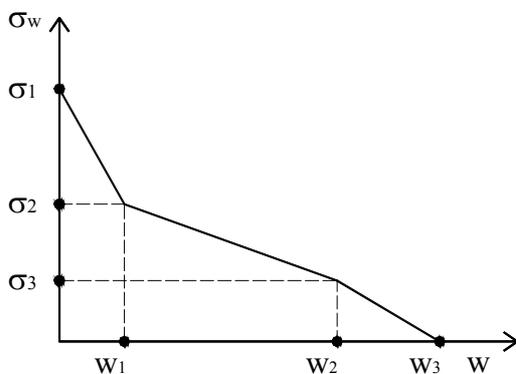


Figura 7 – Diagrama σ - w utilizado no presente trabalho.

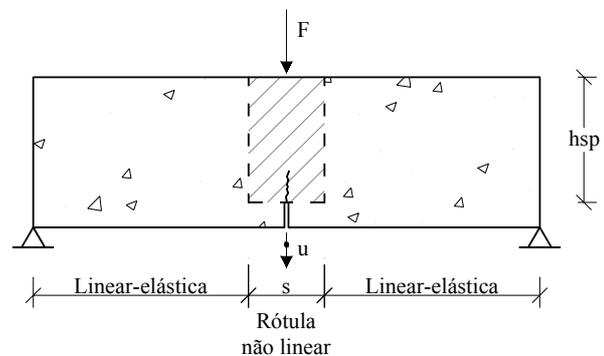


Figura 8 – Modelo assumido na simulação numérica do provete tipo ensaiado experimentalmente.

A relação força-flecha, F - u , do provete foi obtida por recurso a um modelo que permite determinar a relação momento-curvatura de uma secção (M - χ), que é discretizada em camadas. O modelo baseia-se nas equações de equilíbrio, de compatibilidade de deformações e atende às leis constitutivas dos materiais intervenientes (Barros e Figueiras, 1999). O modelo é incremental e iterativo. Para cada incremento de extensão, determina-se a posição do eixo neutro, x_o , a profundidade da progressão da fenda, a , a curvatura média, χ_m , a rotação das faces da rótula plástica, φ , e, para cada uma das camadas que discretizam a parte não fendilhada da secção, obtém-se a extensão e a respectiva tensão. Caso se utilize uma lei σ - ε para modelar o comportamento fendilhado do BRFA, será determinada a extensão em cada uma das camadas fendilhadas da secção e, recorrendo ao diagrama trilinear σ - ε obtém-se a respectiva tensão. Caso se opte por uma lei σ - w para simular o comportamento fendilhado do BRFA, a progressão da fenda é modelada segundo os princípios subjacentes ao modelo de fenda fictícia proposto por Hillerborg *et al.* (1976), esquematicamente descrito na Figura 9. A resistência residual para determinada abertura de fenda, $\sigma_w(w)$, depende dos mecanismos de reforço proporcionados pelas fibras que atravessam a fenda e do imbricamento entre as faces da fenda. Assim, para cada uma das camadas que discretizam a parte fendilhada da secção, obtém-se a abertura de fenda e a respectiva tensão (ver Figura 10).

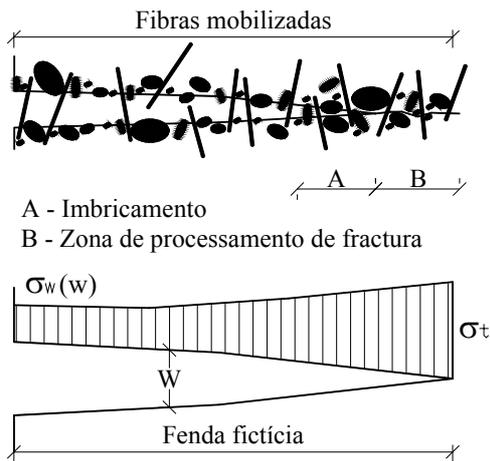


Figura 9 – Aspectos essenciais na progressão de uma fenda no BRFA.

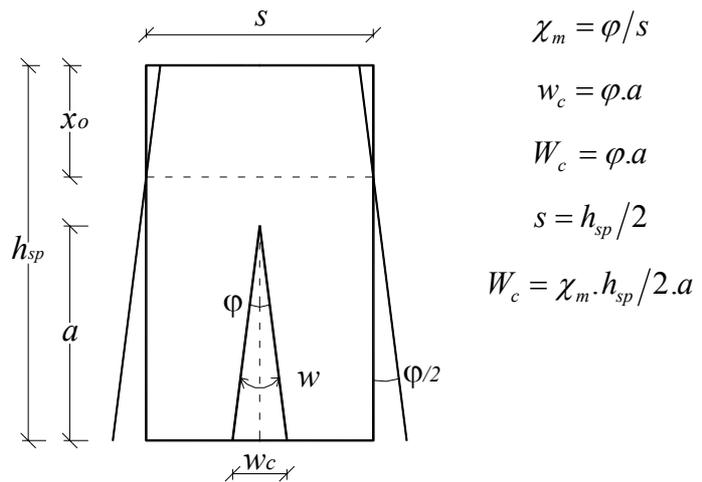


Figura 10 – Progressão da fenda na zona da rótula não linear.

7 - SIMULAÇÃO UTILIZANDO LEIS DE TENSÃO-EXTENSÃO

7.1 – Leis propostas pelo TC 162-TDF

Com o intuito de verificar a adequabilidade da lei pós pico, σ - ε , proposta pela RILEM para o BRFA, as respostas F - u de todas as séries de provetes ensaiados foram simuladas (cada série é constituída por três provetes), utilizando-se para tal os valores de f_{RI} e f_{RA} obtidos experimentalmente e apresentados na Tabela 3, que substituídos nas expressões indicadas na Figura 5, permitiram definir a lei pós pico, σ - ε , para cada série de provetes. Por limitação de espaço apenas se apresenta a simulação nas séries Qf(i)Cv0Id7, Qf(i)Cv0Id28, ver Figura 11. Contudo, a deficiente simulação registada nestas séries foi também observada em todas as restantes séries. Consta-se que a carga de pico numérica é geralmente superior à experimental. Verifica-se ainda que, para quantidades de fibras inferiores a 45 Kg/m^3 , após a carga de pico ter sido atingida, a curva numérica cai muito abruptamente, quando comparada com a curva experimental. Finalmente, para deformações inferiores a 2 mm a resistência residual prevista numericamente é significativamente superior à registada experimentalmente. Para flechas superiores a 2 mm ocorre uma queda abrupta na curva numérica, não observado experimentalmente.

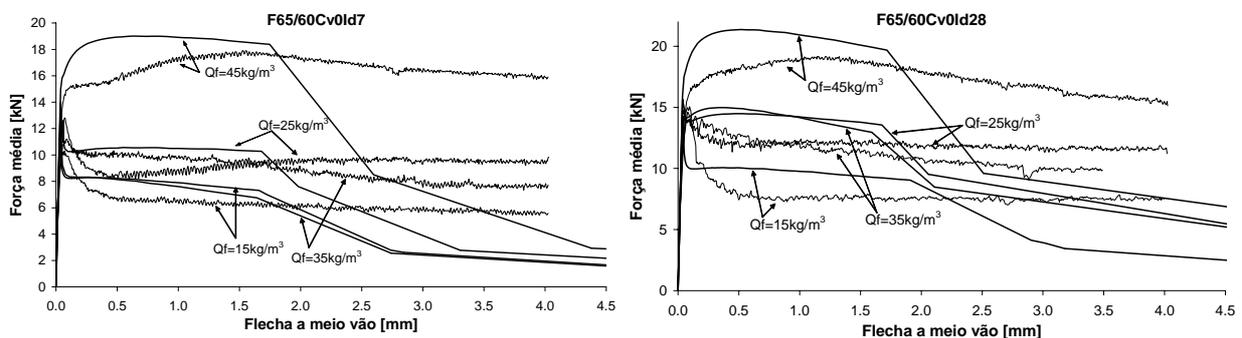


Figura 11 – Curvas experimentais e respectivas simulações numéricas com a lei σ - ε proposta pela RILEM.

7.2 - Otimização dos parâmetros da lei constitutiva

Nesta secção os parâmetros que caracterizam o diagrama trilinear pós pico (σ_1 , σ_2 , σ_3 , ε_1 , ε_2 , ε_3) serão determinados por forma a que a curva numérica se aproxime com o menor erro possível da curva experimental. O erro considerado está esquematicamente representado na

Figura 12, sendo o cociente entre a diferença de áreas experimental e numérica (Δ_{Area} em valor absoluto), e a área experimental (A_{Exp}).

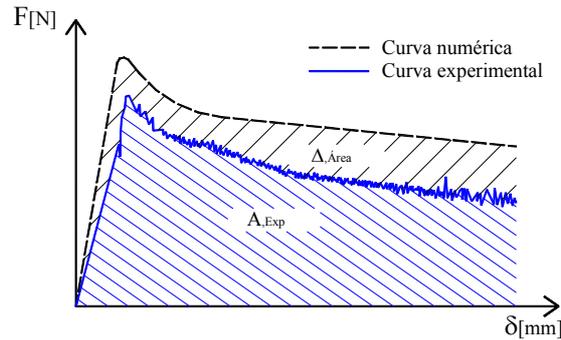


Figura 12 – Avaliação do erro no processo de otimização dos parâmetros da lei de simulação do BRFA fendilhado.

Na tabela 4 encontram-se os valores otimizados dos parâmetros da lei constitutiva de tracção para os provetes sem Cv. Também se faz referência ao erro para o qual foram encontrados os respectivos parâmetros óptimos. Na Figura 13 encontram-se as curvas experimentais e as numéricas optimizadas, verificando-se uma boa aproximação, extensiva às séries não apresentadas neste trabalho, por falta de espaço.

Tabela 5 – Parâmetros otimizados da lei constitutiva de tracção

Série	Id	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	σ_3 [MPa]	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	Erro [%]
Qf15Cv0	7	1.520	0.745	0.441	0.000049	0.0022	0.083	1.5
	28	2.267	0.839	0.793	0.000069	0.0021	0.083	1.6
	90	2.329	0.978	0.675	0.000069	0.0022	0.082	1.9
Qf25Cv0	7	1.539	0.965	1.211	0.000066	0.0013	0.079	2.3
	28	2.244	1.358	1.124	0.000070	0.0013	0.098	0.9
	90	2.846	1.114	1.041	0.000052	0.0014	0.084	1.3
Qf35Cv0	7	1.791	1.182	0.197	0.000060	0.0010	0.096	1.7
	28	1.954	1.114	0.997	0.000061	0.0013	0.097	2.7
	90	1.967	1.180	0.551	0.000059	0.0011	0.083	1.5
Qf45Cv0	7	3.141	1.947	1.508	0.000097	0.0002	0.145	2.6
	28	3.422	2.293	0.479	0.000100	0.0001	0.110	2.1
	90	3.297	1.780	0.330	0.000095	0.0004	0.132	1.0

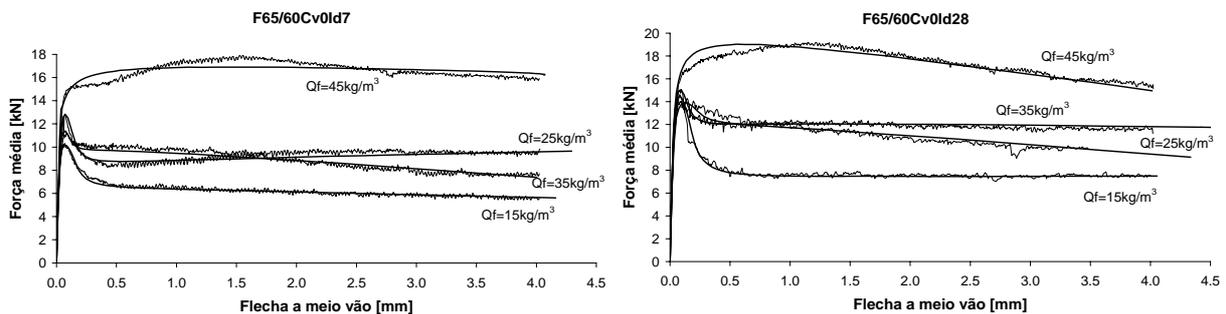
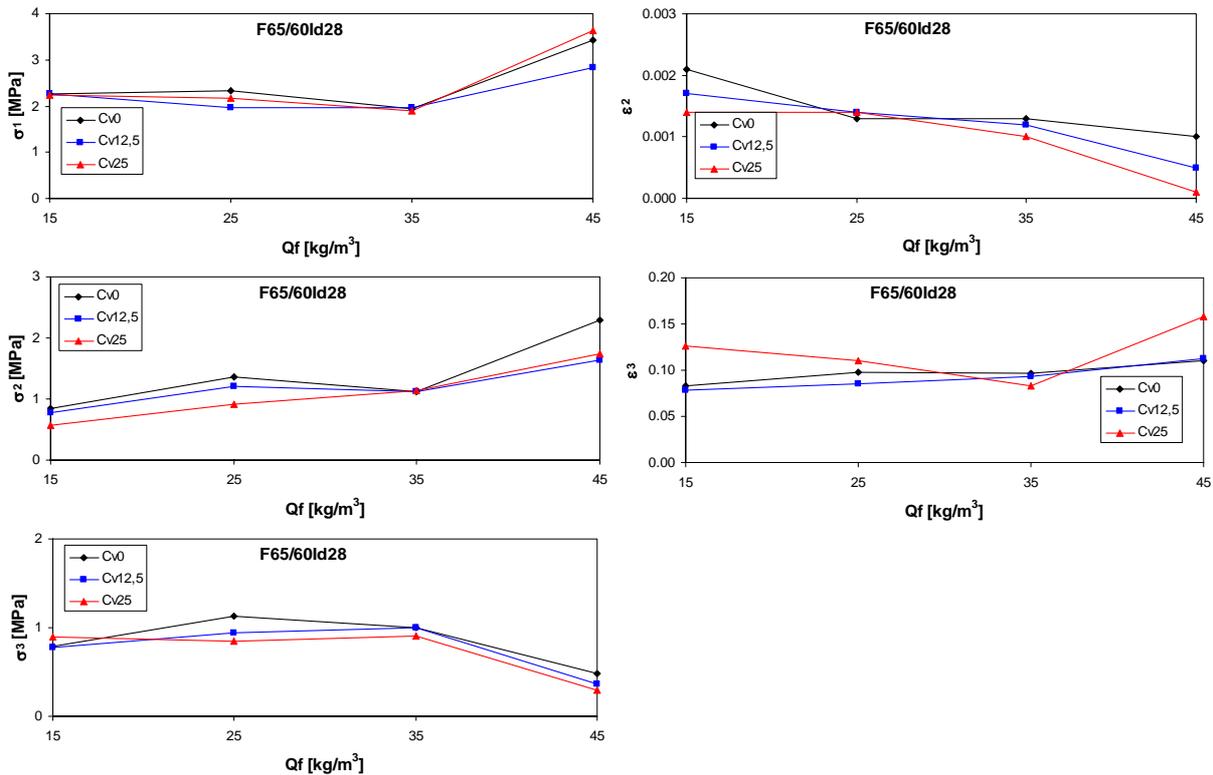


Figura 13 – Curvas experimentais e respectivas simulações numéricas com a lei σ - ϵ optimizada.

7.2.1 - Influência da quantidade de fibras nos parâmetros da lei constitutiva

Da análise da Figura 14 e dos valores incluídos na Tabela 5 verifica-se que, em termos gerais, as tensões σ_1 e σ_2 aumentam com a quantidade de fibras (Qf), sendo menos significativo o aumento de σ_1 . Esta tendência foi observada em todas as séries simuladas. Quanto à tensão σ_3 não se apurou nenhuma relação com Qf, para qualquer das idades. Quanto à variação dos

valores de ε_2 e ε_3 com a quantidade de fibras (ver Figura 15) constata-se que ε_2 denota uma tendência para diminuir com Qf, enquanto ε_3 não revela tendência que mereça ser referida.



fluência da quantidade de fibras nos parâmetros σ_1 , σ_2 e σ_3 aos 28 dias. influência da quantidade de fibras nos parâmetros ε_2 e ε_3 aos 28 dias.

Com o objectivo de comparar os parâmetros otimizados, σ_i^{Opt} e ε_i^{Opt} , com os sugeridos pela RILEM, σ_i^{Rilem} e ε_i^{Rilem} , procedeu-se à análise da variação de $\sigma_i^{Opt}/\sigma_i^{Rilem}$ e $\varepsilon_i^{Opt}/\varepsilon_i^{Rilem}$ com a quantidade de fibras. Da análise da Figura 16 constata-se que, para as diferentes quantidades de fibras, as relações $\sigma_1^{Opt}/\sigma_1^{Rilem}$ e $\sigma_2^{Opt}/\sigma_2^{Rilem}$ mantêm-se inferiores à unidade e praticamente constantes. Assim, é recomendável que os valores de σ_1 e σ_2 sugeridos pela RILEM sejam diminuídos. Por outro lado, a constância das relações $\sigma_1^{Opt}/\sigma_1^{Rilem}$ e $\sigma_2^{Opt}/\sigma_2^{Rilem}$ para diferentes quantidades de fibras, infere que $f_{cm,fl}$ e f_{Rl} englobam, de maneira satisfatória, a influência das fibras ao nível do comportamento do material. Quanto a $\sigma_3^{Opt}/\sigma_3^{Rilem}$ os valores desta relação mantêm-se geralmente inferiores à unidade. No que se refere à variação de $\varepsilon_2^{Opt}/\varepsilon_2^{Rilem}$ e $\varepsilon_3^{Opt}/\varepsilon_3^{Rilem}$ com Qf, representada na Figura 17, constata-se que, na sua generalidade, os valores das relações são muito superiores à unidade. Significa isto que os valores de ε_2 e ε_3 sugeridos pela RILEM são manifestamente inferiores aos necessários para obter uma simulação aceitável. Todas as séries simuladas revelarem tendências similares às acabas de descrever.

8 - SIMULAÇÃO EM TERMOS DE TENSÃO-ABERTURA DE FENDA

Nesta secção os parâmetros que caracterizam o diagrama $\sigma-w$ representado na Figura 7 (σ_1 , σ_1 , σ_3 , w_1 , w_2 , w_3 ,) são determinados por forma a que a curva numérica se aproxime com o menor erro possível da curva experimental, em similitude com o efectuado na secção 7.2. Na Tabela 6 representam-se os valores obtidos para as séries com 0% de Cv, estando as correspondentes simulações representadas na Figura 16, donde se conclui ser possível simular o comportamento de progressão da fenda em flexão, com a lei trilinear proposta. Na

simulação da resposta força-flecha das restantes séries foi registado rigor semelhante do observado nas séries apresentadas.

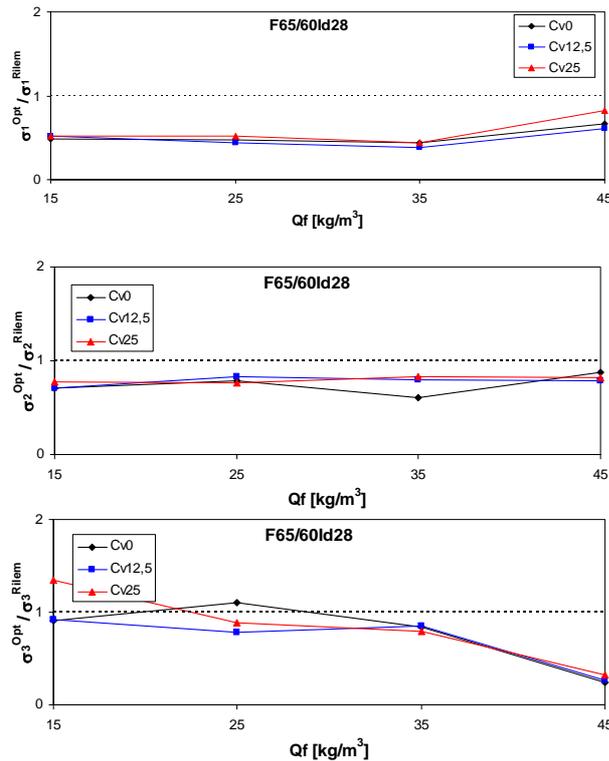


Figura 14 – Influência da quantidade de fibras nos parâmetros $\sigma_i^{Opt}/\sigma_i^{Rilem}$, aos 28 dias

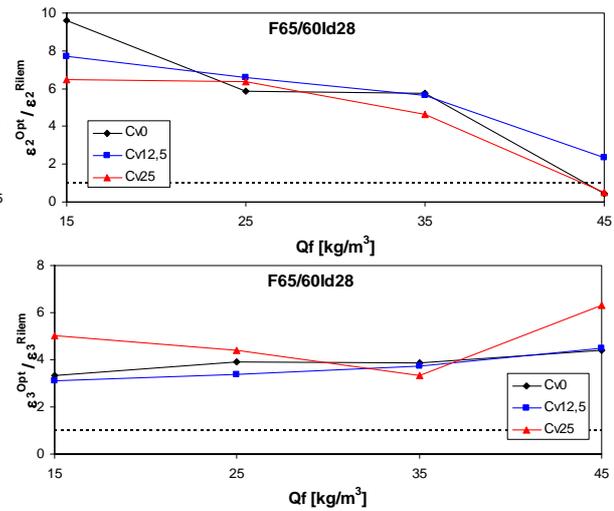


Figura 15 – Influência da quantidade de fibras nos parâmetros $\epsilon_i^{Opt}/\epsilon_i^{Rilem}$, aos 28 dias.

Tabela 6 – Parâmetros otimizados da lei trilinear $\sigma-w$ para Cv (0%).

Qf [kg/m ³]	Idade [dias]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	σ_3 [MPa]	w_1 [mm]	w_2 [mm]	w_3 [mm]	Erro [%]
15	7	1.450	0.725	0.363	0.1825	9.0	10.0	1.48
	28	2.221	0.833	0.777	0.1600	9.0	10.0	1.54
	90	2.301	0.978	0.518	0.1700	9.0	10.0	1.89
25	7	2.037	0.968	1.120	0.0950	3.0	10.0	1.72
	28	2.243	1.346	1.121	0.1300	9.0	10.0	1.08
	90	1.796	1.122	0.988	0.1050	7.0	10.0	1.28
35	7	1.675	1.173	0.503	0.1000	5.0	10.0	1.61
	28	1.896	1.327	0.901	0.3800	4.0	10.0	2.66
	90	1.854	1.205	0.324	0.4200	9.0	10.0	1.64
45	7	2.988	1.942	1.942	0.0000	2.0	10.0	2.13
	28	3.079	2.155	2.155	0.0000	1.0	10.0	1.08
	90	3.000	1.800	1.350	0.0350	3.0	10.0	1.12

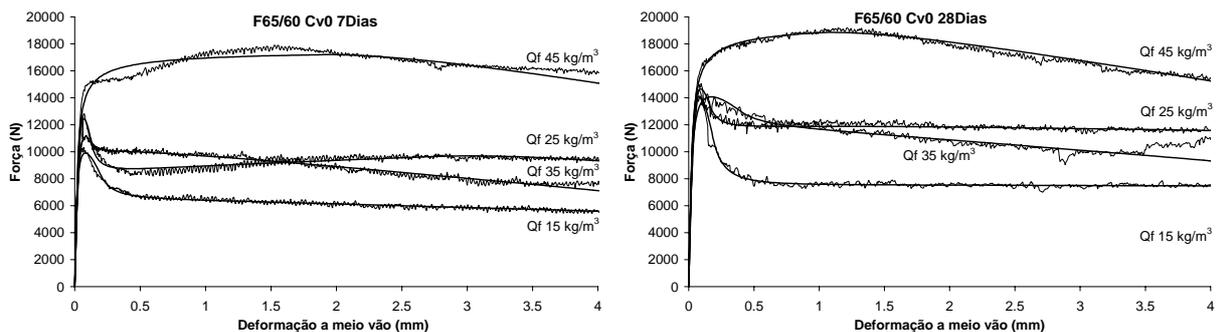


Figura 16 – Curvas experimentais e respectivas simulações numéricas com lei $\sigma-w$ otimizada.

8.1 - Influência da quantidade de fibras nos parâmetros da lei constitutiva σ - w

A Figura 17 representa a variação de σ_1 , σ_2 e σ_3 com Q_f , nas séries de provetes com 28 dias de idade. Para as restantes idades observou-se tendência similares. Da análise da Figura 17 verifica-se que σ_2 denota uma tendência para aumentar de forma aproximadamente linear com Q_f , que o aumento de σ_1 só é significativo para $Q_f > 35 \text{ Kg/m}^3$ e que σ_3 não é afectada significativamente por Q_f , para as quantidades de fibras consideradas. Na Figura 18 representa-se a variação de w_1 e w_2 com Q_f , nas séries de provetes com 28 dias de idade. Constata-se uma tendência para uma diminuição destes parâmetros com Q_f , havendo contudo larga dispersão de valores. O valor de w_3 não é determinante nas simulações efectuadas, dado ter sido raro os casos em que a abertura de fenda ultrapassou o valor correspondente a w_2 .

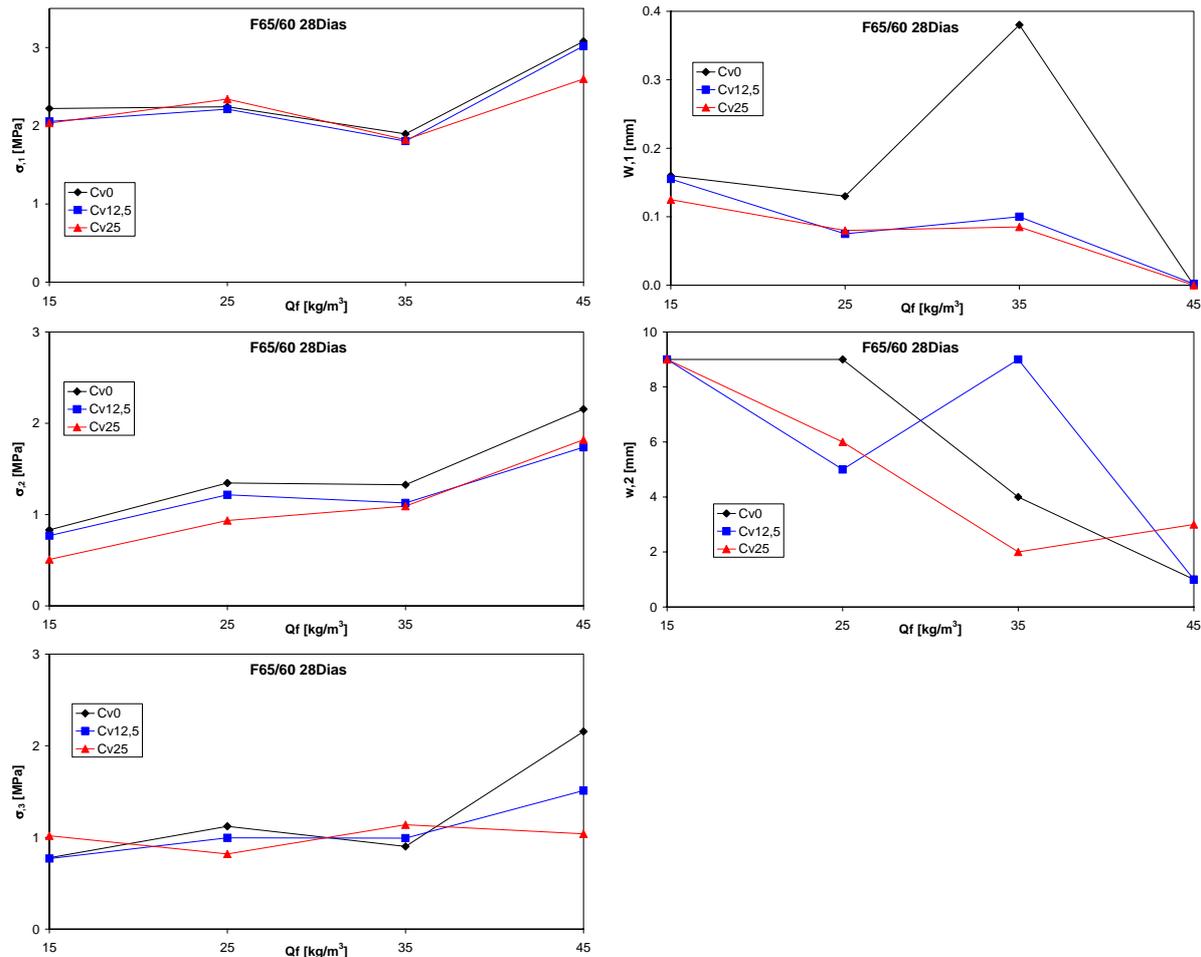


Figura 17 – Influência da quantidade de fibras nos parâmetros de tensão.

Figura 18 – Influência da quantidade de fibras nos parâmetros de abertura de fenda.

9 - INFLUÊNCIA DA PERCENTAGEM DE CINZAS VOLANTES E DA IDADE DOS PROVETES NOS PARÂMETROS DA LEI CONSTITUTIVA

Para avaliar a influência da percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes e da idade dos provetes procedeu-se de forma similar ao efectuado com a quantidade de fibras. Os parâmetros que definem, quer a lei σ - ϵ , quer a lei σ - w , são afectados pela percentagem de Cv e pela idade do BRFA de forma similar. Assim, verificou-se que os valores de σ_1 , σ_2 aumentam com a idade dos provetes, reflectindo o aumento da resistência do betão com a sua idade. Por sua vez, os valores de σ_3 , ϵ_2 , ϵ_3 , w_1 e w_2 são marginalmente afectados pela idade dos provetes. Quanto à percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes, nenhum

dos parâmetros revela tendência que mereça ser reportada, dada a elevada dispersão de valores.

10 - CONCLUSÕES

Tendo por base as simulações numéricas efectuadas com lei tensão-extensão propõe-se os parâmetros indicados na Tabela 7 para caracterizar a lei trilinear que caracteriza o comportamento do BRFA fendilhado.

Tabela 7 – Parâmetros propostos para definir a lei σ - ε que caracteriza o comportamento fendilhado do BRFA

σ_i [MPa]	s_d^*	ε_i [MPa]	s_d
$\sigma_1 = \mathbf{0.51} f_{ctm,fl} (1.6-d)$	0.10	$\varepsilon_1 = \sigma_1 / E_c$	-
$\sigma_2 = \mathbf{0.36} f_{R1} \kappa_h$	0.04	$\varepsilon_2 = \mathbf{1.2} \text{‰}$	0.6
$\sigma_3 = \mathbf{0.29} f_{R4} \kappa_h$	0.10	$\varepsilon_3 = \mathbf{100} \text{‰}$	25

* - desvio padrão

Comparativamente com os parâmetros sugeridos pela RILEM sobressaem dois aspectos: redução das constantes que relacionam σ_1 com $f_{ctm,fl}$, σ_2 com f_{R1} e σ_3 com f_{R4} ; aumento das extensões ε_2 e ε_3 .

Da determinação dos parâmetros óptimos que caracterizam a lei trilinear σ - w de simulação do comportamento fendilhado do BRFA obteve-se uma dispersão mais elevada de valores, que a registada com a lei σ - ε . Por este facto, a única relação possível de propor, é a seguinte: $\sigma_2 = 0.358 f_{R1} (\text{N/mm}^2)$, não sendo aceitável, nesta fase da investigação, propor relações para a definição dos restantes parâmetros que permitem caracterizar a lei trilinear σ - w .

A elevada dispersão de valores registados em alguns dos parâmetros que definem as leis σ - ε e σ - w , principalmente os relativos à abertura de fenda, recomenda a realização de um número mais elevado de simulações numéricas para se poder efectuar análises com maior significado estatístico.

11 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento prestado pelo programa POCTI, “POCTI/34793/99 – Cost competitive steel fibre reinforced concrete for industrial pavements”, FCT, e às empresas que gentilmente forneceram os materiais usados previamente na campanha experimental, nomeadamente, Bekaert / Bui Internacional, Bettor MBT Portugal, à central de Betão Pronto de Moreira de Cónegos, à Central Termo-Eléctrica do Pego, à Pisonort – Pavimentos Industriais SA e à SECIL – Companhia Geral de Cal e Cimento, SA. Também se agradece a colaboração prestada pela Civitest, pelo equipamento laboratorial disponibilizado. O terceiro autor agradece a bolsa SFRH/BSAB/291/2002-POCTI concedida pela FCT e FSE.

12 - REFERÊNCIAS

ACI 544.1R-96, State-of-the-Art Report on fiber reinforced concrete, ACI, 1997.

Antunes, J. A. B; Barros, J. A. O., Influência da quantidade de fibras, percentagem de cinzas volantes e idade no comportamento à flexão de betão reforçado com fibras de aço Dramix RC-65/60-BN, Relatório 02-DEC/E-17, 79 pp., Dezembro 2002.

ASTM C1018-89, Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading, Book of ASTM Standards: Part 04.02. ASTM, Philadelphia, 1991.

Barros, J. A. O.; Antunes, J. A. B; Amorim, J. A. S. B. A., Influência da quantidade de fibras, percentagem de cinzas volantes e idade no comportamento à flexão de betão reforçado com fibras de aço Dramix RC-80/60-BN, Relatório 02-DEC/E-11, 87 pags., Julho 2002.

Barros, J. A. O.; Figueiras, J. A., Flexural behavior of steel fiber reinforced concrete: testing and modelling, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 11, N° 4, pp 331-339, 1999.

Barros, J. A. O., Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica, Tese de Doutoramento, FEUP, Dezembro de 1995.

CEB-FIP Model Code, Design code, Bulletin d'Information CEB Lausanne, Switzerland, 1993.

Dramix®, Product data sheet, N.V.Bekaert S.A., 1998.

Hillerborg, A.; Modéer, M.; Petersson, P. E., Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, Cement and Concrete Research, Vol. 6, pp. 773-782, 1976.

JSCE-SF4, Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel-fiber-reinforced concrete, Concrete library of JSCE. Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Tokyo, Japan, Vol. 3, 58-61, 1984.

Karihaloo, B. L., Fracture mechanics and structural concrete, Concrete Design and Construction Series, Longman Scientific & Technical, Harlow, Essex, England, 1995.

RILEM Technical Committee TDF-162, Test and design methods for steel fiber reinforced concrete. Recommendations for bending test, (Chairlady L. Vandewalle), Mater. Struct. 33 (225), pp. 3-5, January-February 2000a.

RILEM Technical Committee TDF-162, Test and design methods for steel fiber reinforced concrete. Recommendations for σ - ε design method, (Chairlady L. Vandewalle), Mater. Struct. 33 (226) pp. 75-81, March 2000b.

RILEM Technical Committee TDF-162, Test and design methods for steel fiber reinforced concrete. Recommendations for uni-axial tension test, (Chairlady L. Vandewalle), Mater. Struct. 34 (235) pp. 3-6, , January-February 2001a.

RILEM Technical Committee TDF-162, Test and design methods for steel fiber reinforced concrete. Design of steel fibre reinforced using σ -w method: principles and applications, (Chairlady L. Vandewalle), Mater. Struct. 35, pp. 262-278, June 2002a.

Members of RILEM TC 162-TDF, Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - Final Recommendation, Materials and Structures, Vol.35, pp. 579-582, November 2002b.