

COMPORTAMENTO À TRACÇÃO DIRECTA DE ELEMENTOS LAMINARES DE BETÃO ARMADO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO



V.M.C.F. CUNHA

Eng.º Civil
DEC-UM
Guimarães



J.A.O. BARROS

Prof. Associado
DEC-UM
Guimarães

SUMÁRIO

Quando comparado com o betão simples, o betão reforçado com fibras de aço, BRFA, apresenta melhor comportamento à fendilhação e maior capacidade de absorção de energia. Em consequência, a utilização de BRFA, em determinadas aplicações, pode ser uma mais valia em termos técnicos e económicos. O presente trabalho tem como principal objectivo avaliar a influência das fibras de aço no comportamento à tracção de elementos laminares de betão armado. Os principais resultados experimentais e numéricos são apresentados e discutidos.

1. INTRODUÇÃO

O betão simples é um material com comportamento frágil em tracção. Para evitar este tipo de roturas, o betão é reforçado com armaduras ordinárias e/ou de pré-esforço. Para percentagens de fibras correntemente utilizadas, a resistência pós-fendilhação é a propriedade mais beneficiada pela adição de fibras ao betão, pelo que a ductilidade deste é significativamente melhorada. Quando a fendilhação se inicia, as fibras “cosem” as micro-fendas, mitigando dessa forma a propagação da fendilhação. Adicionalmente, tem-se verificado que da adição de fibras resulta uma maior efectividade na transferência de tensões entre as armaduras e o betão envolvente [1]. As fibras encontram-se dispostas de uma forma aleatória na matriz cimentícia, contrariamente às armaduras que, se possível, são dispostas segundo a direcção da tensão principal de tracção, pelo que na maior parte das aplicações estruturais, por razões económicas e funcionais as fibras não devem substituir, integralmente, as armaduras convencionais. No

entanto, a aplicação conjunta de armaduras e fibras pode melhorar significativamente o comportamento de um elemento estrutural submetido, principalmente, a tensões de tracção [2]. Pelas razões anteriormente enunciadas, a utilização do betão reforçado com fibras de aço, BRFA, em determinadas aplicações, pode ser uma mais valia em termos técnicos e económicos.

No presente trabalho apresentam-se os resultados experimentais dos ensaios de tracção directa com elementos laminares de betão armado reforçado com fibras de aço. Adicionalmente, foram realizados ensaios complementares, em compressão uniaxial e em tracção por flexão, estes últimos, efectuados segundo o TC 162-TDF da RILEM [3]. Com as curvas experimentais força – flecha, $F-\delta$, obtidas nos ensaios de flexão obtiveram-se, por intermédio de análise inversa, os parâmetros que definem o modo I de fractura da lei constitutiva da fenda. Os ensaios de tracção directa foram simulados recorrendo a um modelo de fendilhação distribuída, MFD, suportado no método dos elementos finitos, tendo-se para tal utilizado a lei da fenda obtida por análise inversa na simulação dos ensaios de flexão.

2. COMPOSIÇÕES E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Na composição do betão foram utilizados quatro tipos de agregados, de forma a se conseguir um melhor ajuste à curva de referência do método de Faury. O cimento utilizado em todas as composições foi o Portland, Tipo I, classe 42,5R. Para se obter um BRFA de adequada trabalhabilidade, com baixo valor da relação A/C, utilizou-se o superplastificante RHEOBUILD[®] 1000. Neste programa experimental foram utilizadas fibras metálicas com a designação comercial DRAMIX[®] RC-80/60-BC, em que o valor 60 corresponde ao comprimento da fibra, l_f , e o valor 80 corresponde à sua esbelteza (l_f/d_f), sendo d_f o diâmetro da fibra. A tensão de cedência do aço destas fibras é aproximadamente de 1100 MPa.

Na Tabela 1 apresentam-se as quantidades, por m³ de betão, das componentes das misturas de betão produzidas. As duas composições efectuadas somente diferem na quantidade de fibras adicionadas ao betão: 0 e 60 kg/m³ designadas, respectivamente, de $Q_{f,0}$ e $Q_{f,60}$.

2.1 Ensaios à compressão uniaxial

Com o intuito de caracterizar o comportamento à compressão uniaxial foram efectuados dois tipos de ensaios, utilizando-se para o devido efeito provetes cilíndricos de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. O primeiro tipo de ensaio efectuado tinha o objectivo de determinar o módulo de elasticidade do betão, tendo sido efectuado segundo a especificação do LNEC E-397 [4]. No segundo tipo de ensaio o provete foi carregado até apresentar capacidade marginal de carga. Neste último ensaio, para além da determinação da

Tabela 1 – Composição do betão utilizado na campanha experimental.

Componente	kg/m ³
Cimento (C) I 42.5 R	300
Cinzas Volantes (% Cv)	60 (16.6)
Areia Fina	175.5
Areia Britada	825.8
Brita 5/15	359.8
Brita 15/25	450.9
Água	155.7
Rheobuild [®] 1000	7.5
Fibras DRAMIX [®] 80/60-BN	0 60

resistência à compressão foi registada a resposta deformacional do provete. Na Tabela 2 apresenta-se o valor médio do módulo de elasticidade, E_c , e da resistência à compressão, f_{cm} , para as séries $Q_{f,0}$ e $Q_{f,60}$. A resistência à compressão e o módulo de elasticidade aumentaram significativamente com a adição de fibras, contrariamente, ao que seria de esperar, tendo base resultados obtidos por outros investigadores [5-7].

Na Figura 2 apresentam-se as curvas médias tensão-extensão obtidas nos ensaios de compressão das séries $Q_{f,0}$ e $Q_{f,60}$. Para além do aumento de E_c e de f_{cm} , constata-se um ligeiro aumento da extensão correspondente à tensão de pico (ver interior Figura 2) e, sobretudo, um aumento significativo da resistência residual.

Tabela 2 – Propriedades do betão.

Série	E_c [GPa]	cv [%]	f_{cm} [MPa]	cv [%]
$Q_{f,0}$	28.5	4.1	34.5	0.7
$Q_{f,60}$	35.6	3.0	59.0	4.3

2.2 Ensaio de tracção em flexão

Os ensaios de tracção em flexão foram efectuados segundo as recomendações do TC 162-TDF da RILEM [3]. Na Figura 3 apresentam-se as curvas força – flecha, $F-\delta$, obtidas nos seis provetes da série $Q_{f,60}$. De um modo geral, após o início da fendilhação observou-se um endurecimento considerável até ser atingida a carga de pico, tendo-se, depois, verificado uma ligeira diminuição da capacidade de carga. É, ainda, de salientar, a significativa variabilidade observada nas respostas experimentais.

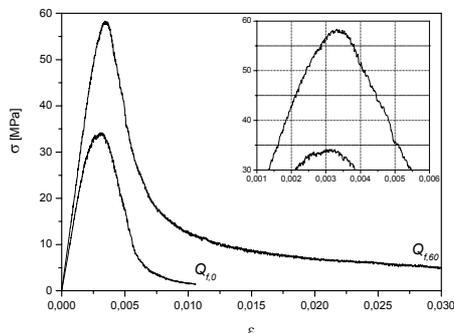


Figura 2: Curvas médias σ - ϵ obtidas no ensaio de compressão uniaxial.

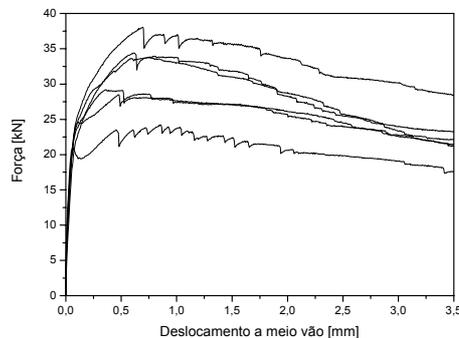


Figura 3: Curvas F - δ registadas nos ensaios de flexão.

Com base nas respostas F - δ , apresentadas na Figura 3, podem ser determinados vários parâmetros indicadores do comportamento do BRFA fissurado. Dos parâmetros propostos pelo grupo de trabalho TC 162-TDF da RILEM [3], apresentam-se na Tabela 3 os valores médios de f_{R1} e $f_{eq,2}$, f_{R4} e $f_{eq,3}$, por estarem associados, respectivamente, às verificações dos estados limites de utilização e estados limites últimos.

Tabela 3 – Principais parâmetros obtidos nos ensaios por flexão.

$f_{eq,2}$ [MPa]	cv [%]	$f_{eq,3}$ [MPa]	cv [%]	f_{R1} [MPa]	cv [%]	f_{R4} [MPa]	cv [%]
9.84	16.1	9.15	15.6	9.29	12.5	7.16	8.6

3. Parâmetros de fractura (Modo I)

Na Figura 4 representa-se a lei da fenda para simular o modo I de fractura. Para o betão simples, os parâmetros que definem esta lei foram determinados segundo o modelo código do CEB-FIP de 1993 [8]. Por sua vez, para a série reforçada com fibras de aço, os parâmetros foram determinados por análise inversa, por intermédio da simulação dos ensaios de tracção em flexão. A análise inversa, AI, foi efectuada, para a série $Q_{f,60}$, de modo a se obter os valores de $\sigma_{n,i}^{cr}$ e $\varepsilon_{n,i}^{cr}$ da lei pós-pico em tracção que permitisse uma aproximação aos resultados experimentais com um erro aceitável. Na Figura 5 representa-se a estratégia adoptada, sendo a área a sombreado a variável a minimizar. Na Figura 6 apresenta-se a simulação numérica da curva média dos ensaios de flexão obtida por análise inversa. Na Tabela 4 indicam-se os valores dos parâmetros da lei constitutiva da fenda, para as séries $Q_{f,0}$ e $Q_{f,60}$.

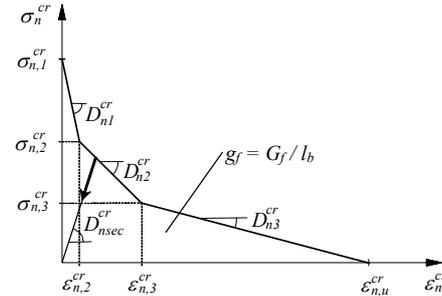


Figura 4: Lei do modo I de fractura do BRFA.

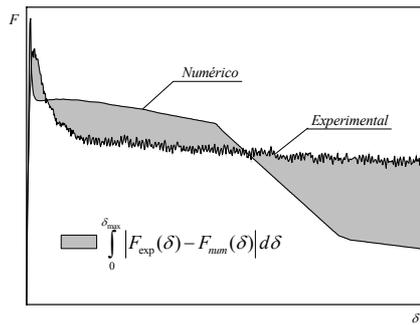


Figura 5: Estratégia adoptada na análise inversa.

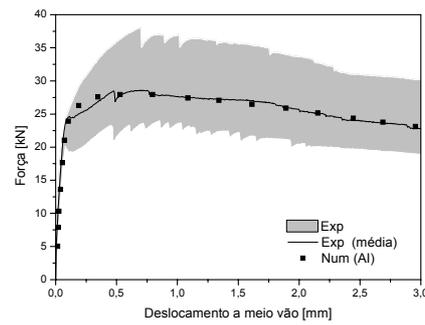


Figura 6: Simulação numérica obtida por análise inversa.

Tabela 4 – Parâmetros da lei do modo I de fractura.

Série	$\sigma_{n,1}^{cr}$ [MPa]	$\sigma_{n,2}^{cr}$ [MPa]	$\sigma_{n,3}^{cr}$ [MPa]	$\varepsilon_{n,2}^{cr} / \varepsilon_{n,u}^{cr}$	$\varepsilon_{n,3}^{cr} / \varepsilon_{n,u}^{cr}$	G_f [N/mm]
$Q_{f,0}$	2.63	0.39	0	0.17	1.0	0.087
$Q_{f,60}$	4.54	3.27	2.81	0.004	0.15	10

4. ENSAIOS DE TRACÇÃO DIRECTA

Na Figura 7 encontra-se representado o esquema adoptado para o ensaio de tracção directa, bem como o sistema de amarras utilizado no presente ensaio. Os provetes laminares ensaiados possuíam uma secção transversal de $300 \times 80 \text{ mm}^2$ e um comprimento de 650 mm. Para reforço longitudinal dos protótipos adoptou-se quatro varões de aço de superfície lisa de 5 mm de diâmetro ($A_s = 78.5 \text{ mm}^2$). A percentagem de armadura efectiva, ρ_{ef} , dos provetes ensaiados,

segundo o código modelo do CEB-FIP [8], é de 0.5. No caso de se usar uma percentagem efectiva de armadura, ρ_{ef} , inferior a um valor designado de percentagem efectiva de armadura de estabilização, ρ_{ef}^{est} , a fendilhação não é estável, pelo que a fenda abre até que o aço retenha a força de tracção libertada pelo betão. Caso contrário, a armadura que atravessa a fenda sustém a carga, com um nível de tensão na armadura inferior à de cedência, permitindo acréscimos de carga que são acompanhados por abertura de novas fendas [2]. Para os provetes de betão simples $\rho_{ef} / \rho_{ef}^{est} = 0.2$. Como este valor é significativamente inferior à unidade não se obterá uma fendilhação estabilizada. De modo a se obter uma relação de 1 é necessário adicionar-se 60 kg/m^3 de fibras [2]. Com o intuito de evitar roturas locais nas zonas, de fixação dos provetes, motivadas por concentração de tensões nessas zonas, foi disposta armadura adicional.

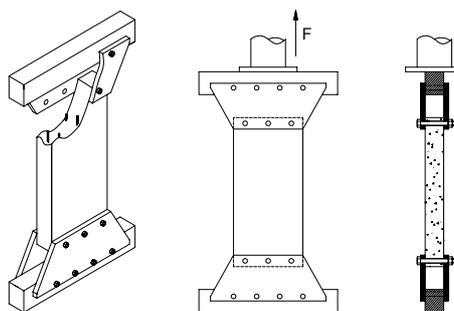


Figura 7: Esquema do ensaio de tracção directa.

4.1 Comportamento experimental

Nas Figuras 8 e 9 apresentam-se as curvas $F-\delta$ dos provetes reforçados com 0 e 60 kg/m^3 de fibras, respectivamente. Adicionalmente, indica-se a força esperada no início da fendilhação, F_{cr} , e representa-se o comportamento independente da armadura, admitindo que os varões se encontram perfeitamente aderentes ao betão.

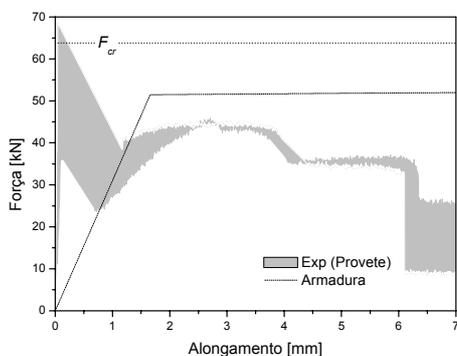


Figura 8: Curvas $F-\delta$ da série $Q_{f,0}$.

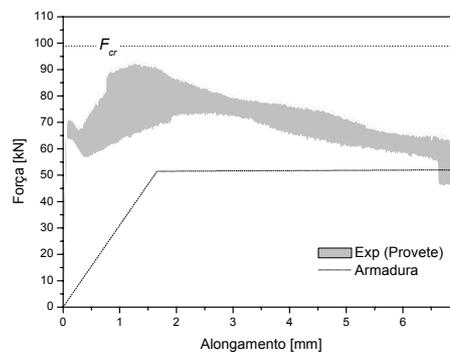


Figura 9: Curvas $F-\delta$ da série $Q_{f,60}$.

A força de fendilhação verificada experimentalmente foi significativamente inferior à força de fendilhação esperada, excepção feita a um dos provetes sem adição de fibras. Isto deveu-se, em parte, à existência de um desvio nos actuadores da máquina biaxial utilizada, o qual foi responsável pela introdução de uma excentricidade na aplicação da carga, submetendo o provete a flexão composta. Na série $Q_{f,0}$, após a carga de pico ter sido atingida ocorreu uma queda abrupta de carga, o que seria de esperar visto que, o ρ_{ef} é inferior ao necessário para se obter fendilhação estabilizada. Após a carga de pico, a curva experimental deveria acompanhar

o diagrama que traduz exclusivamente a resposta da armadura. Tal ocorrência pode ser explicada pelo tipo de armadura utilizado, dado tratar-se de varão liso, pelo que a baixa aderência dos varões à matriz envolvente deve ter promovido a ocorrência de escorregamento. No que concerne à série $Q_{f,60}$, após ter-se atingido a carga de fendilhação, esta sofreu uma ligeira queda de carga seguida de uma fase de endurecimento. Apesar de nestes provetes a percentagem total de reforço (varões mais fibras) ser igual à percentagem de estabilização de fendilhação, é visível o efeito de “tension-stiffening”. No entanto, não se detectou a ocorrência de mais do que uma fenda, provavelmente, devido ao facto de a distância média entre fendas ser superior ao comprimento de estudo do provete, para o caso de armadura de baixa aderência.

4.2 Simulação numérica

A simulação numérica foi efectuada com um modelo de fendilhação distribuída suportado no método dos elementos finitos. O provete foi discretizado na malha representada na Figura 11. Os elementos utilizados são da família Serendipity, com 8 nós, tendo-se utilizado 3×3 pontos de integração. Para todos os elementos foi admitido comportamento não linear. Os parâmetros utilizados para definir a lei de modo I de fractura encontram-se na Tabela 4. Por razões de simetria apenas foi discretizado metade do provete. Na Figura 11 os elementos a sombreado modelam os três parafusos de aço que fizeram a transferência de cargas entre as amarras e o provete. A lei do aço utilizada na simulação numérica foi obtida através de ensaios de tracção uniaxial efectuados segundo a Norma Portuguesa NPEN 10102 [8]. Na Tabela 5 apresentam-se valores de parâmetros utilizados na modelação do comportamento da armadura.

Nas Figuras 12 e 13 apresentam-se, a linha contínua, as simulações numéricas das séries $Q_{f,0}$ e $Q_{f,60}$, respectivamente. Na curva numérica da série $Q_{f,0}$, após a carga de pico ter sido atingida verifica-se a ocorrência de uma queda abrupta da força, o que seria de esperar visto que a percentagem de armadura utilizada não é suficiente para estabilizar a fendilhação. Nas curvas experimentais a queda de carga foi mais suave. Tal facto poder-se-á dever à conjugação de dois factores: a ocorrência de deslizamento da armadura e a elevada inércia do actuador (preparado para cargas de ensaio até 2.0 MN). Na simulação numérica da série $Q_{f,0}$, após a queda de carga ocorre uma fase de recuperação de capacidade de carga muito mais acentuada que a verifica experimentalmente. Tal deve-se ao facto de na simulação numérica não se ter modelado o deslizamento das armaduras, ocorrido nos ensaios experimentais. A simulação numérica da série $Q_{f,60}$ previu uma capacidade de carga significativamente superior ao registado experimentalmente. No entanto, a forma da resposta é similar à obtida nos ensaios, indiciando que os valores de tensão que definem a lei de amolecimento utilizada na simulação numérica foram demasiado elevados.

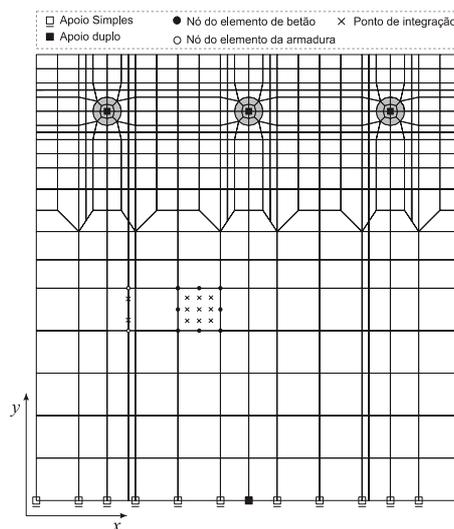


Figura 11: Malha utilizada nas simulações dos ensaios à tracção.

Tabela 5 – Parâmetros utilizados na modelação do comportamento das armaduras.

σ_v [MPa]	σ_u [MPa]	ϵ_u [%]	E_s [GPa]	ν
655	710	145	200	0.3

As propriedades do BRFA são fortemente afectadas pela orientação das fibras. Assim, enquanto nas vigas (elementos prismáticos) as fibras orientam-se predominantemente segundo a direcção das tensões principais de tracção, nos provetes laminares verifica-se que as fibras se orientam, preferencialmente, em planos paralelos ao da superfície média do provete, pelo que, neste último tipo de provetes, haverá menor percentagem de fibras orientadas segundo a direcção das tensões principais de tracção. Na Figura 14 representa-se, a linha tracejada, a simulação numérica da série $Q_{f,60}$, com os parâmetros de fractura modificados. Tendo em consideração recomendações de outros trabalhos [9,10], os valores da energia de fractura e das tensões pós-pico que definem a lei de amolecimento, obtidos pela análise inversa (ver Tabela 4), foram divididos por 2 com o intuito de ter em conta a menor percentagem de fibras orientadas segundo a direcção das tensões principais de tracção. A qualidade da simulação numérica, apresentada na Figura 14, melhorou significativamente pela adopção deste procedimento. Tal como outros trabalhos [9,10], também este aponta para o facto de que os parâmetros da lei da fenda, obtidos por análise inversa na simulação do ensaio de flexão, são sobrestimados.

5. CONCLUSÕES

Nos ensaios de tracção directa verificou-se que a carga experimental correspondente ao início de fendilhação ficou muito aquém da carga teórica, motivado pela existência de um desalinhamento entre as amarras superior e inferior do eixo de carga existente à data dos ensaios. Após a carga de pico, a capacidade resistente dos provetes da série $Q_{f,0}$ foi inferior à esperada, dado ter sido significativamente inferior à carga de plastificação das armaduras convencionais. Tal deveu-se a ter ocorrido escorregamento significativo dos varões, ao que não é alheio o facto destes varões serem de aço macio. Na série $Q_{f,60}$ foi bastante visível a eficácia das fibras, dado que, após a plastificação das armaduras a capacidade de carga continuou a aumentar, só possível devido à capacidade de transferência de tensões entre as faces das fendas

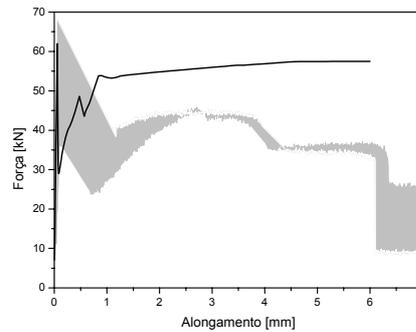


Figura 12: Simulação numérica da série $Q_{f,0}$.

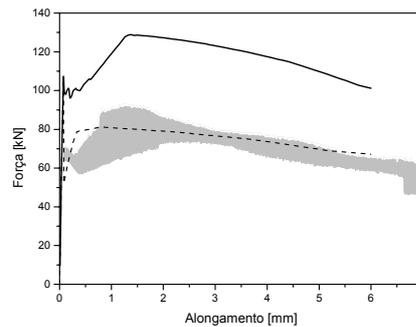


Figura 13: Simulação numérica da série $Q_{f,60}$.

permitida pelos mecanismos de reforço das fibras que atravessam essas fendas, mesmo para níveis consideráveis de abertura de fenda.

Nas simulações dos ensaios de tracção directa, após a cedência das armaduras, a força obtida nas simulações numéricas foi superior à observada nas curvas experimentais. Para a série sem fibras tal discrepância deveu-se à não simulação do escorregamento das armaduras. Por sua vez, na série $Q_{f,60}$ o escorregamento da armadura não foi tão significativo, pelo que esta diferença entre a força numérica e experimental deveu-se à sobreavaliação dos parâmetros de fractura do BRFA obtidos pela análise inversa dos ensaios de flexão. A aplicação de um factor de redução do valor dos parâmetros obtidos por análise inversa permite uma melhoria significativa da qualidade da simulação dos ensaios de tracção directa com provetes reforçados com fibras.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores do presente trabalho agradecem o financiamento concedido pela FCT ao projecto “Paberfia – Painéis sandwich prefabricados de betão reforçado com fibras”, financiado pelo POCTI, POSI e ADI, à Civitest pela colaboração prestada ao nível de equipamento de laboratório e à Secil, pelo fornecimento do cimento utilizado na confecção do betão.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Ezeldin, A.; Balaguru, P., “Bond behavior of normal and high-strength fiber reinforced concrete”, *ACI Materials Journal*, Vol. 86, N. 7, 1989, pp. 515-524.
- [2] Cunha, V.M.C.F., “Investigação experimental e numérica do comportamento à tracção de betão reforçado com fibras de aço”, *Tese de Mestrado*, Universidade do Minho, 2004.
- [3] RILEM TC 162-TDF, “Test and design methods for steel fiber reinforced concrete – Bending test (Final Recommendation)”, *Materials and Structures*, Vol.35, November, 2002, pp. 579-582.
- [4] E-397, “Betões – determinação do módulo de elasticidade em compressão”, Documentação normativa, especificação LNEC, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, Lisboa, 1993, pp. 2.
- [5] Hsu, L.S.; Hsu, C.-T.T., “Stress-strain behaviour of steel-fiber high-strength concrete under compression.”, *ACI Structural Journal*, Vol. 91, N. 4, 1994, pp. 448-457.
- [6] 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, 1995.
- [7] CEB-FIP Model Code 1990, “Design Code”, *Comité Euro-International du Bétón*, 1993.
- [8] NP-EN 10002-1, “Materiais Metálicos - Ensaio de tracção: Parte 1, Método de ensaio (à temperatura ambiente).”, *IPQ – Instituto Português da Qualidade*, 1992.
- [9] Barrágan, B.E., “Failure and toughness of steel fibre reinforced concrete under tension and shear”, *Doctoral Thesis*, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2002.
- [10] Massicotte, B., “Design of SFRC members in flexure: Application to a building floor”, *Seminário sobre Dimensionamento de estruturas de betão reforçado com fibras de aço*, Eds. J. Barros, P. Rossi e B. Massicotte, 2003.