

FIBRAS DE AÇO NO REFORÇO AO CORTE DE VIGAS DE BETÃO ARMADO

STEEL FIBRES FOR THE SHEAR RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

Joaquim Barros¹, Alberto Ribeiro², Vítor Cunha², Alexandre Antunes²

¹Prof. Auxiliar do Departamento de Eng.^a Civil da Escola de Eng.^a da Universidade do Minho

²Aluno de Mestrado do Departamento de Eng.^a Civil, da Escola de Eng.^a da Universidade do Minho

Resumo: *Investigação realizada nos últimos anos revela que as fibras de aço podem substituir, pelo menos parcialmente, estribos no reforço ao corte de peças de betão armado. No entanto, tem sido reduzido o uso de fibras de aço com esse fim, dado que as expressões que têm sido propostas são, na sua maioria, suportadas em bases semi-empíricas, desenquadradas dos formatos propostos nos documentos utilizados pelos projectistas. Recentemente a RILEM TC 162-TDF propôs uma formulação baseada no Eurocódigo 2, onde a contribuição das fibras para o reforço ao corte é materializada por intermédio de um termo adicionado aos termos que simulam a contribuição do betão e das armaduras convencionais. No presente trabalho esta formulação é apresentada, bem como algumas expressões que se têm revelado oportunas na estimativa da contribuição das fibras para a resistência ao corte de elementos de betão. Para avaliar o desempenho da formulação proposta pela RILEM foi efectuada uma campanha de ensaios de flexão em vigas. Os resultados apresentados neste trabalho dizem respeito a uma das duas séries que compõem essa campanha.*

Palavras chave: *Betão reforçado com fibras, resistência ao corte, resistência equivalente à tracção em flexão, resistência residual à tracção em flexão*

Abstract: *Research carried out in the last years shows that steel fibers have high potential for replacing, at least partially, steel stirrups as a shear reinforcement on concrete elements. The use of steel fibers in this kind of application is, however, reduced. The semi-empirical*

support of the expressions proposed can be pointed out as the main reason for this state. Recently, RILEM TC-162 TDF proposed a formulation based on the Eurocode 2 where the fiber contribution for the shear resistance is simulated adding a new term to the terms that simulate the contributions of the concrete and steel stirrups. This formulation is described in detail in the present work, and other promising approaches are also presented. To assess the performance of the RILEM formulation, an experimental program composed by two series of bending tests with reinforced concrete beams was carried out. One of these two series is analyzed in the present work.

Keywords: *Steel fiber reinforced concrete, shear resistance, equivalent flexural tensile strength, residual flexural tensile strength*

1. INTRODUÇÃO

A aplicação de estribos em peças de betão armado, principalmente nas de secção oca ou de parede delgada, mobiliza tempo apreciável de mão de obra, resultando encargos financeiros significativos. Em elementos estruturais de edifícios em zonas de risco sísmico elevado, a densidade de armadura de reforço ao corte e de confinamento do betão pode conduzir a dificuldades em assegurar a desejada qualidade de betonagem. Por estas e outras razões, a substituição de estribos por fibras de aço tem sido estudada por diversos investigadores.

Casanova (1995) constatou que as fibras de aço podem substituir percentagens significativas de estribos, principalmente quando se utiliza betão de resistência elevada, dado que nestes casos os mecanismos de reforço proporcionados pelas fibras são mais eficazmente mobilizados. Verificou ainda que a altura das vigas tinha influência no desempenho das fibras enquanto elemento resistente ao esforço transversal, tendo observado que as fibras eram menos eficazes em vigas mais altas.

Diversos têm sido os trabalhos para avaliar a eficácia das fibras no reforço ao corte de elementos de betão (Campione e Mindess 1999, Dupont and Vandewalle 2000, Barragán 2002, Rosenbusch e Teutsch 2003). Em paralelo, algumas formulações foram propostas, com o objectivo de estimar os resultados experimentais obtidos pelos respectivos investigadores. No entanto, essas expressões nunca mereceram uma aceitação generalizada, dado que a sua aplicação a campanhas de ensaios efectuados por outras equipas de investigação não permitia estimar, com rigor suficiente, os resultados obtidos. Além disto, algumas destas expressões requerem o conhecimento de parâmetros materiais de difícil determinação, como é o caso, por exemplo, da tensão desenvolvida na interface fibra-matriz.

A RILEM TC 162-TDF (2003) e o "Brite-Euram Project 97-4163, BRPR-CT98-0813" desenvolveram investigação experimental e numérica no sentido de ser elaborada uma formulação com um formato ajustado à sua utilização no projecto de estruturas de betão reforçado com fibras de aço (BRFA). Para tal foram mobilizados três laboratórios onde foi investigada a influência da percentagem de estribos, da percentagem de fibras, do vão de corte da viga, da percentagem de armadura longitudinal, da altura da viga e, no caso de vigas T, da espessura e largura do banzo de compressão. Com os resultados experimentais obtidos avaliou-se o desempenho da formulação proposta pela RILEM, a qual se baseia na proposta do Eurocódigo 2 para vigas de betão armado, sendo adicionado um termo para simular a contribuição das fibras. Por sua vez, houve a preocupação de esse termo depender de um parâmetro de simples determinação experimental, pelo que, desde que comprovada, essa formulação pode ser facilmente aplicada no projecto, sendo suficiente conhecer a tensão equivalente ou residual de tracção em flexão do BRFA utilizado (RILEM 2002).

O presente trabalho é dedicado, fundamentalmente, à descrição da formulação proposta pela RILEM, bem como à avaliação do seu desempenho, quer por intermédio de resultados experimentais disponíveis em bibliografia da especialidade, como por intermédio de ensaios

efectuados no laboratório do Subgrupo de Estruturas do Departamento de Eng^a da Escola de Eng^a da Universidade do Minho.

2. FORMULAÇÕES

2.1 Introdução

As formulações que se propõem no presente trabalho aplicam-se a vigas e a lajes contendo armaduras tradicionais de reforço à flexão. Aplicam-se também a elementos pré-esforçados e a pilares sujeitos a esforços de corte significativos.

Quando um elemento estrutural de betão não dispõe de armadura longitudinal ou nesse elemento não se desenvolve uma zona de compressão no betão, a contribuição das fibras para a resistência ao corte não deve ser tida em conta.

Varões inclinados não devem ser utilizados como armadura de resistência ao corte, a não ser em combinação com fibras de aço e/ou estribos. Neste caso, pelo menos 50% da armadura necessária para a resistência ao corte deve ser constituída por fibras de aço e/ou estribos.

Em elementos de altura constante, a zona que interessa ao esforço transversal tem uma altura igual a z e largura b_w (ver Figura 1). O braço do binário das forças interiores é calculado perpendicularmente à armadura longitudinal, ignorando-se o efeito de qualquer armadura longitudinal inclinada.

As variáveis representadas na Figura 1 têm o significado seguinte:

α : ângulo entre os estribos e a armadura longitudinal (principal) ($45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$);

θ : ângulo formado pelas bielas de betão com o eixo do elemento;

F_s : força na armadura longitudinal;

F_c : força no betão do banzo comprimido, na direcção da armadura longitudinal;

b_w : largura mínima da alma da secção ou largura mínima da secção ao longo da altura útil;

d : altura efectiva;

s : espaçamento entre estribos;

z : braço das forças interiores correspondente ao momento flector máximo no elemento de altura constante. Na análise do esforço transversal, normalmente pode utilizar-se o valor aproximado $z = 0.9 d$.

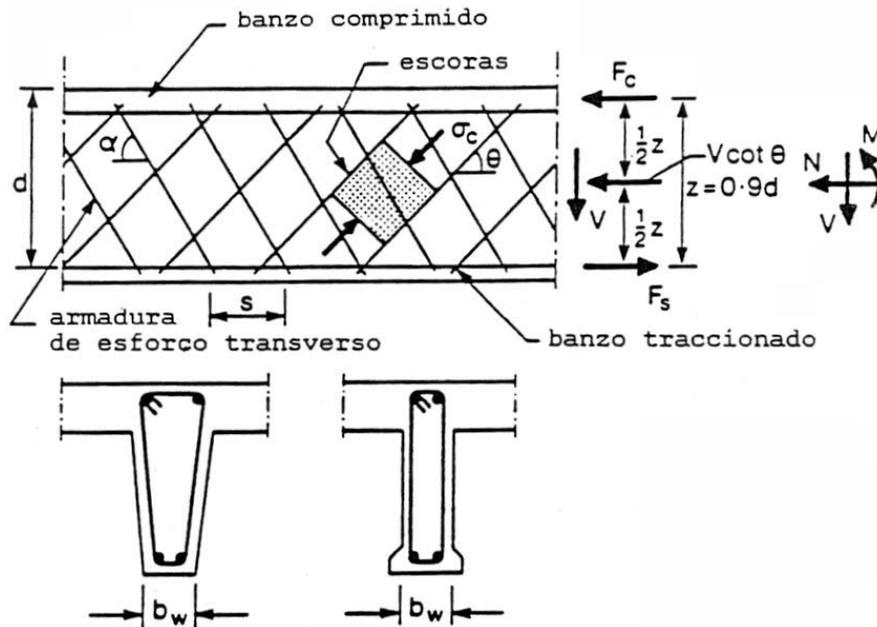


Figura 1 – Modelo de escora tirante.

2.2 RILEM TC 162-TDF

2.2.1 Método standard

Segundo este método (RILEM 2003) o ângulo formado pelas bielas de betão com o eixo do elemento, θ , é de 45° . A resistência ao corte de uma secção de um elemento de viga de betão armado com estribos, fibras de aço e varões longitudinais determina-se segundo a expressão:

$$V_{Rd3} = V_{cd} + V_{fd} + V_{wd} \quad (1)$$

em que V_{cd} representa a contribuição do betão para a resistência ao corte,

$$V_{cd} = \left[0.12 k (100 \rho_\ell f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0.15 \sigma_{cp} \right] b_w d \text{ [N]} \quad (2)$$

com

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \quad (d \text{ em mm}) \text{ e } k \leq 2, \quad (3)$$

e

$$\rho_\ell = \frac{A_{s\ell}}{b_w d} \leq 2\%, \quad (4)$$

sendo $A_{s\ell}$ [mm²] a área da armadura de tracção prolongando-se não menos do que $d+l_{b,net}$ para além da secção considerada (ver Figura 2), b_w [mm] a largura mínima da secção ao longo da altura útil d e,

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{sd}}{A_c} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (5)$$

em que N_{sd} [N] é o esforço axial na secção devido às cargas aplicadas ou ao pré-esforço (compressão positiva). No caso do pré-esforço o d em (2) deve ser substituído por h .

Por sua vez, o termo V_{fd} em (1) representa a contribuição das fibras para a resistência ao corte, sendo determinado segundo a expressão

$$V_{fd} = 0.7 k_f k_t \tau_{fd} b_w d \text{ [N]} \quad (6)$$

em que k_f é um factor que tem em conta a contribuição dos banzos das secções em T,

$$k_f = 1 + n \left(\frac{h_f}{b_w} \right) \left(\frac{h_f}{d} \right) \text{ e } k_f \leq 1.5 \quad (7)$$

sendo h_f [mm] e b_f [mm] a altura e a largura do banzo, respectivamente,

$$n = \frac{b_f - b_w}{h_f} \text{ em que } n \leq \frac{3 b_w}{h_f}, \quad (8)$$

e

$$k_l = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \quad (d \text{ em mm}) \text{ e } k_l \leq 2. \quad (9)$$

A contribuição das fibras na resistência ao corte é simulada por τ_{fd} , sendo determinada por meio da seguinte expressão

$$\tau_{fd} = 0.12 f_{eqk,3} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (10.a)$$

ou

$$\tau_{fd} = 0.12 f_{Rk,4} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (10.b)$$

em que $f_{eqk,3}$ e $f_{Rk,4}$ representam os valores característicos da resistência equivalente e residual à tracção em flexão, respectivamente, determinados segundo as recomendações do RILEM TC 162-TDF (2002). Resultados experimentais indicam que, para correntes percentagens de fibras, $f_{eqk,3} \approx f_{Rk,4}$ (Barros e Antunes 2003, Rosenbusch e Teutsch 2003).

Em (1), V_{wd} representa a contribuição de armaduras tais como os estribos ou varões inclinados,

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} 0.9 d f_{ywd} (1 + \cot g\alpha) \sin \alpha \text{ [N]} \quad (11)$$

em que s [mm] é o espaçamento entre armaduras de reforço ao corte, medido ao longo do eixo longitudinal da peça, α é o ângulo que a armadura de resistência ao corte faz com o eixo do elemento e f_{ywd} [N/mm²] é o valor de cálculo da tensão de cedência da armadura de resistência ao corte.

Para verificar a ocorrência de esmagamento do betão utiliza-se a seguinte expressão:

$$V_{Rd2} = \frac{1}{2} v f_{cd} b_w 0.9 d (1 + \cot g\alpha) \text{ [N]} \quad (12)$$

em que

$$v = 0.7 - \frac{f_{ck}}{200} \geq 0.5 \quad (f_{ck} \text{ [N/mm}^2\text{]}) \quad (13)$$

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (14)$$

sendo f_{ck} e f_{cd} a resistência característica e de cálculo à compressão e γ_c o factor de segurança parcial para o BRFA em compressão, ao qual geralmente se atribui o valor de 1.35.

Para estribos verticais ou para estribos verticais combinados com varões inclinados, $\cotg \alpha$ assume o valor nulo.

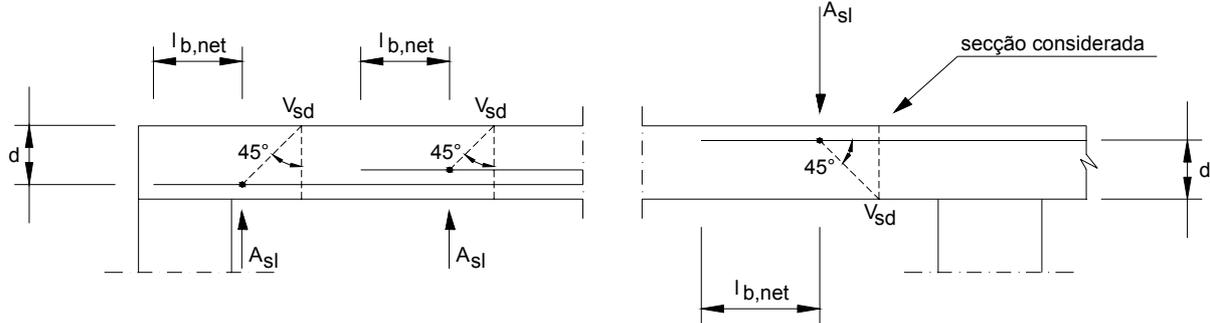


Figura 2 – Percentagem de armadura longitudinal que contribui para o V_{cd} .

2.2.2 Armadura mínima de reforço ao corte em vigas

Segundo a RILEM (2003), em elementos de BRFA não é necessário assegurar uma percentagem mínima de armadura de esforço transversal. No entanto, deve-se assegurar que as fibras tenham uma influência significativa na resistência ao corte do elemento. Assim, recomenda-se que o tipo e quantidade de fibras a aplicar garanta um valor superior a 1.0 MPa a $f_{eqk,3}$ e $f_{Rk,4}$.

2.3 Formulação de Casanova e Rossi

A formulação de Casanova (1995) e Casanova e Rossi (1997) distingue-se da proposta pela RILEM TC 162-TDF na forma como se determina o termo associado à contribuição das fibras para a resistência ao corte, V_{fd} . Assim, segundo estes autores,

$$V_{fd} = b_w d \bar{\sigma}_{pd}(w_m) \quad (15)$$

em que $\bar{\sigma}_{pd}(w_m)$ é o valor médio da tensão residual de tracção para uma abertura de fenda w_m , sendo obtido por intermédio da seguinte expressão (ver Figura 3),

$$\bar{\sigma}_{pd}(w_m) = \frac{1}{w_m} \int_0^{w_m} \sigma_{wd}(w) dw. \quad (16)$$

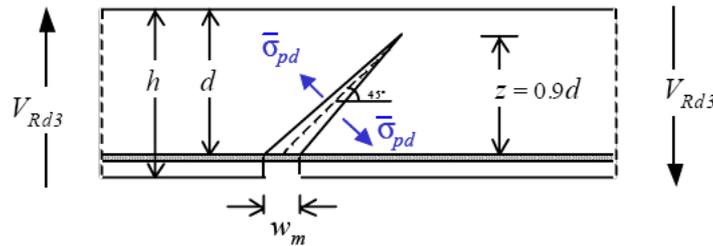


Figura 3 – Geometria da fenda assumida no modelo proposto por Casanova e Rossi (1997).

Para determinar w_m , Casanova e Rossi propõem a expressão

$$w_m = \varepsilon_s z \quad (17)$$

em que ε_s é a extensão na armadura longitudinal junto à intercepção da fenda de corte com a armadura (ver Figura 3) e $z = 0.9d$ é o braço interno. Quando não avaliada, estes autores recomendam para ε_s o valor de 1%, pelo que,

$$w_m = 0.009d. \quad (18)$$

Para estender a presente formulação a vigas T, estes autores sugerem para avaliação da contribuição das fibras a seguinte expressão

$$V_{fd} = b_w (d - h_f) \bar{\sigma}_{pd} (w_m). \quad (19)$$

em que h_f é a altura do banzo de compressão.

2.4 Formulação de Barragán

Barragán (2002) constatou que a aplicação da expressão (19) a vigas T, ensaiadas experimentalmente no âmbito da sua tese de doutoramento, conduzia a valores de resistência ao esforço transversal significativamente inferiores aos registados nos ensaios, pelo que propôs a adição de mais um termo, V_{dsd} , à expressão (1) para ter em conta o facto de que, neste tipo de vigas, quando $h_f > 0.2d$, a fenda de rotura por corte desenvolve-se na interface alma-banzo (ver Figura 4). Este termo determina-se por intermédio da seguinte expressão

$$V_{dsd} = b_w h_f \tau_{res,d} (s_m), \quad \text{para } h_f > 0.2d \quad (20)$$

em que $\tau_{res,d}(s_m)$ é a tensão residual de corte obtida em ensaio de corte directo para um deslizamento de $s_m = 2$ mm. Para os BRFA utilizados no seu programa experimental, Barragán obteve $\tau_{res,d}(s_m) = 1.85$ MPa.

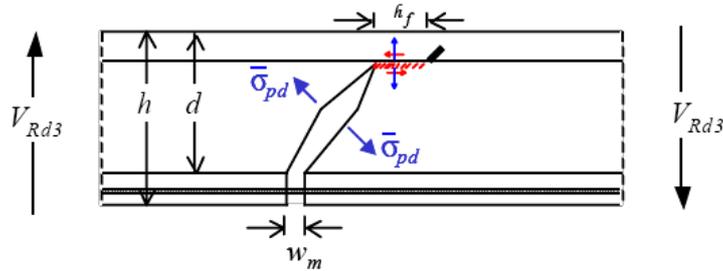


Figura 4 - Adaptação da formulação de Casanova e Rossi, proposta por Barragan (2002).

Dado o melhor resultado obtido utilizando o conceito de tensão residual, Barragán (2002) propõe a sua utilização na parcela afecta à contribuição das fibras para a resistência ao corte. Assim, nas vigas de secção rectangular propõe a seguinte relação,

$$V_{fd} = b z \bar{\tau}_{pd}(s_m), \quad \text{com } z = 0.9 d \quad (21)$$

em que $\bar{\tau}_{pd}(s_m)$ é a tensão equivalente residual de corte para um deslizamento s_m entre faces de fenda, obtida segundo a expressão,

$$\bar{\tau}_{pd}(s_m) = \frac{1}{s_m} \int_0^{s_m} \tau_{sd}(s) ds \quad (22)$$

representando o valor médio da tensão residual de corte entre o início do deslizamento ($s = 0$) e o deslizamento s_m .

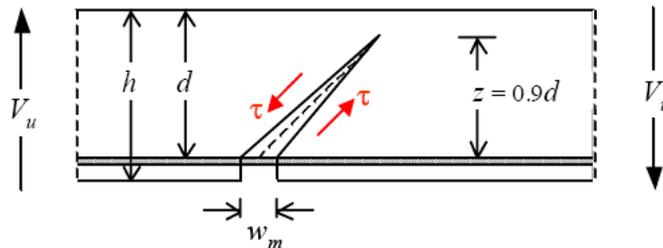


Figura 5 - Formulação proposta por Barragan para vigas de secção rectangular (2002).

2.5 Formulação de Campione e Mindess

Para simular a contribuição das fibras para a resistência última ao corte de uma dada secção, Campione e Mindess (1999) propuseram a seguinte equação empírica:

$$V_{fu} = \left\{ 2.8 \frac{d}{a} \left(0.24 f'_{spfc} + 80 \rho_\ell \frac{d}{a} \right) + 0.41 \tau_f \left(\frac{\ell_f}{d_f} \rho_{fv} b_f \right) + \frac{A_{sw} f_{ywk} d}{s} \right\} b_w h \quad (23)$$

em que f'_{spfc} é a resistência à tracção obtida em ensaio Brasileiro, τ_f é a tensão média de corte na interface fibra-matriz, ℓ_f e d_f são o comprimento e o diâmetro da fibra, ρ_{fv} é a percentagem em volume de fibras, b_f é um factor empírico para atender às propriedades de aderência da fibra (0.5 para fibras redondas, 0.75 para fibras onduladas e 1.0 para fibras indentadas), A_{sw} e f_{ywk} são a área da secção de estribos e a tensão característica de cedência do aço dos estribos. O significado das restantes variáveis foi já apresentado em secções anteriores.

3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MODELOS

No âmbito da sua tese de doutoramento, e enquadrado no "Brite Euram Project BRPR-CT98-0813" (1999), Barragán efectuou um conjunto de ensaios com vigas de secção rectangular e de secção em T. As séries de ensaios foram concebidas por forma a avaliar a influência da altura das vigas de secção rectangular, e da altura e da largura do banzo de compressão das vigas de secção em T.

Da comparação entre a carga última registada experimentalmente e a estimada pela formulação proposta pela RILEM constatou que, nas vigas de BRFA de secção rectangular, esta formulação estimou, em média, uma carga 55% inferior (nesta análise não foi considerada a viga cujo ensaio foi interrompido). Nas vigas de betão simples (BS) a formulação estimou uma capacidade de carga 40% inferior ao registado experimentalmente. Nas vigas de BRFA de secção T a carga prevista pela formulação foi 64% inferior à obtida experimentalmente, enquanto na única viga de BS de secção T a carga determinada com a formulação foi 127% inferior à registada experimentalmente. Nas vigas de secção T a dispersão de valores foi muito superior à obtida nas vigas de secção rectangular.

Assim, apesar do reduzido número de ensaios efectuados, constatou-se que a proposta da RILEM estima a resistência ao corte com um factor de segurança, em média, superior a 1.5.

Também no âmbito do "Brite Euram Project BRPR-CT98-0813", na Universidade de Braunschweig, Rosenbusch e Teutsch (2003) efectuaram uma campanha de ensaios onde foram avaliadas as influências das percentagens de estribos, armadura longitudinal e fibras, na

resistência ao corte de vigas de secção rectangular. Dos resultados obtidos verificou-se que a formulação proposta pela RILEM estimou, em média, quer para as vigas de BRFA como para as vigas de BS, uma resistência ao corte 23% inferior à registada experimentalmente, tendo a dispersão de resultados sido bastante inferior à obtida nos ensaios efectuados por Barragán.

Ainda no âmbito do "Brite Euram Project BRPR-CT98-0813" foi efectuado um programa experimental na Universidade Católica de Leuven, tendo-se avaliado as influências do vão de corte e da percentagem de fibras na resistência ao corte de vigas de secção rectangular. Dos resultados obtidos verificou-se que a formulação proposta pela RILEM estimou, em média, para as vigas de BRFA, uma resistência ao corte 15% inferior à registada experimentalmente e, para as vigas de BS, um valor médio 84% inferior ao obtido experimentalmente, tendo a dispersão de resultados sido elevada.

Quer nas vigas ensaiadas em Braunschweig quer nas ensaiadas em Leuven constatou-se haver uma tendência para uma estimativa da resistência ao corte mais próxima da observada experimentalmente, quando se aumenta a percentagem de fibras (Rosenbusch e Teutsch 2003).

4. ENSAIOS EFECTUADOS NA UNIVERSIDADE DO MINHO

4.1 Introdução

Para avaliar o desempenho da formulação proposta pela RILEM, quer em vigas de betão de moderada resistência quer em vigas de betão de elevada resistência, foram efectuadas, na Universidade do Minho (UM), duas campanhas de ensaios sob três pontos de carga. Com estas séries pretendia-se avaliar a influência da classe de resistência do betão, da percentagem de fibras e da altura da viga.

4.2 Séries de vigas

Foram realizadas as duas séries de vigas indicadas nas Tabelas 1 e 2. A primeira série, designada por S1 (ver Tabela 1), é constituída por vigas com 2 m de comprimento, $0.2 \times 0.45 \text{ m}^2$ de secção transversal e 1.8 m de vão. Nesta série utilizou-se um betão, que em fase de pré-dimensionamento se admitiu ter resistência média de compressão de 35 MPa. Esta série é constituída por cinco vigas: a primeira (S1_1) em que se previu não existir qualquer reforço ao corte, a segunda (S1_2) com estribos de 6 mm de diâmetro afastados de 0.2 m, a terceira, quarta e quinta reforçadas com 30, 45 e 60 kg/m^3 de fibras. Em ambas as séries, a quantidade de estribos foi determinada por forma a ocorrer modo de rotura por corte. Em todo o programa experimental foram utilizadas fibras de aço Dramix RC-65/60-BN que possuem 60 mm de comprimento, 0.92 mm de diâmetro e resistência à tracção de cerca de 1100 MPa. A memória de cálculo efectuada em fase de pré-dimensionamento está descrita em Anexo.

Tabela 1 - Série S1

Referência da viga	Sistema de reforço de corte
S1_1	Sem reforço
S1_2	Estribos $\phi 6@0.20m$
S1_3	$30kg/m^3$ de fibras
S1_4	$45kg/m^3$ de fibras
S1_5	$60kg/m^3$ de fibras

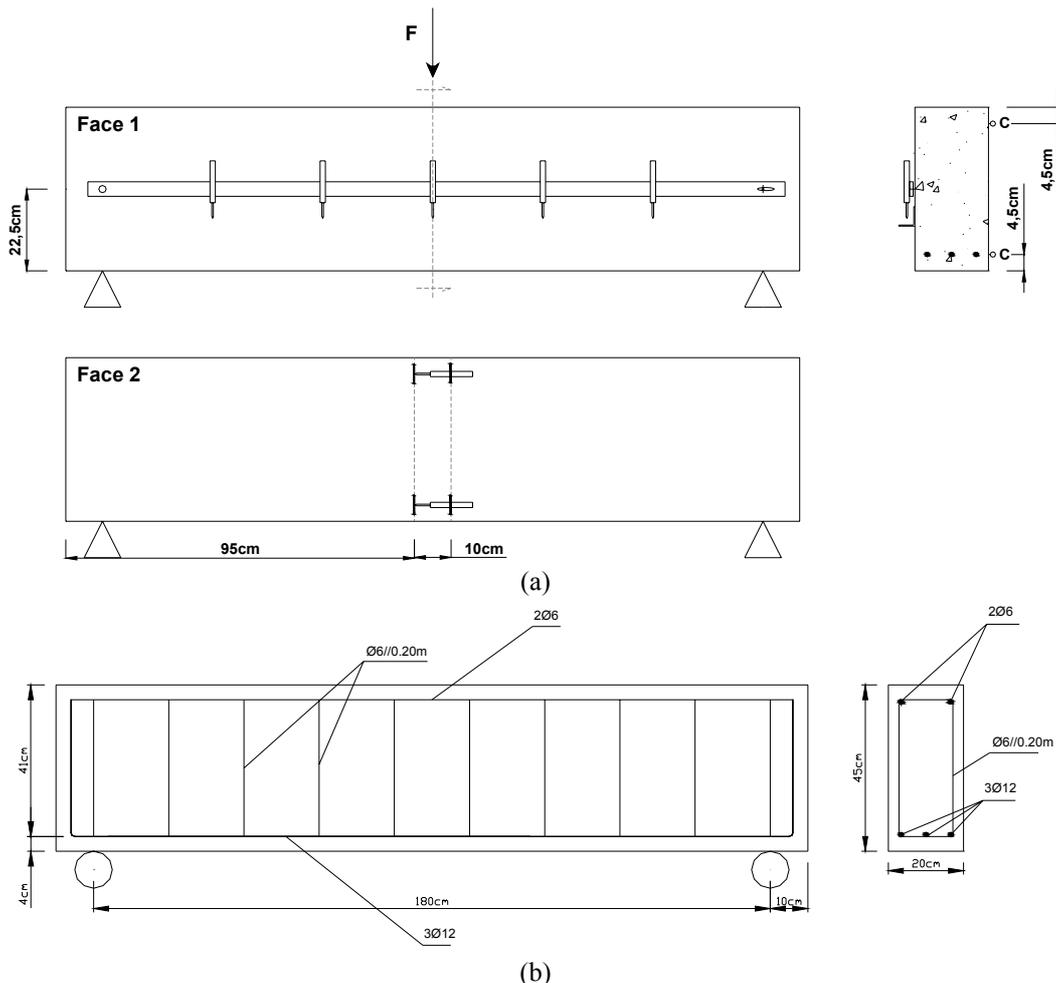


Figura 6 - (a) Geometria e carregamento das vigas da série S1 e (b) pormenor do posicionamento dos estribos na viga S1_2.

A segunda série, designada por S2 (ver Tabela 2), é constituída por vigas de 1.4 m de comprimento, $0.2 \times 0.3 \text{ m}^2$ de secção transversal e 1.2 m de vão. Nesta série utilizou-se um betão que, em fase de pré-dimensionamento, se admitiu ter resistência média de compressão de 70 MPa. Esta série era constituída por seis vigas: a primeira (S2_1) em que se previu não

existir qualquer reforço ao corte, a segunda (S2_2) com estribos de 6 mm de diâmetro afastados de 0.2 m e as quatro restantes reforçadas com 25, 35, 50 e 70 kg/m³ de fibras, respectivamente.

Tabela 2 - Série S2

Referência da viga	Sistema de reforço de corte
S2_1	Sem reforço
S2_2	Estribos $\phi 6@0.20m$
S2_3	25kg/m ³ de fibras
S2_4	35kg/m ³ de fibras
S2_5	50kg/m ³ de fibras
S2_6	70kg/m ³ de fibras

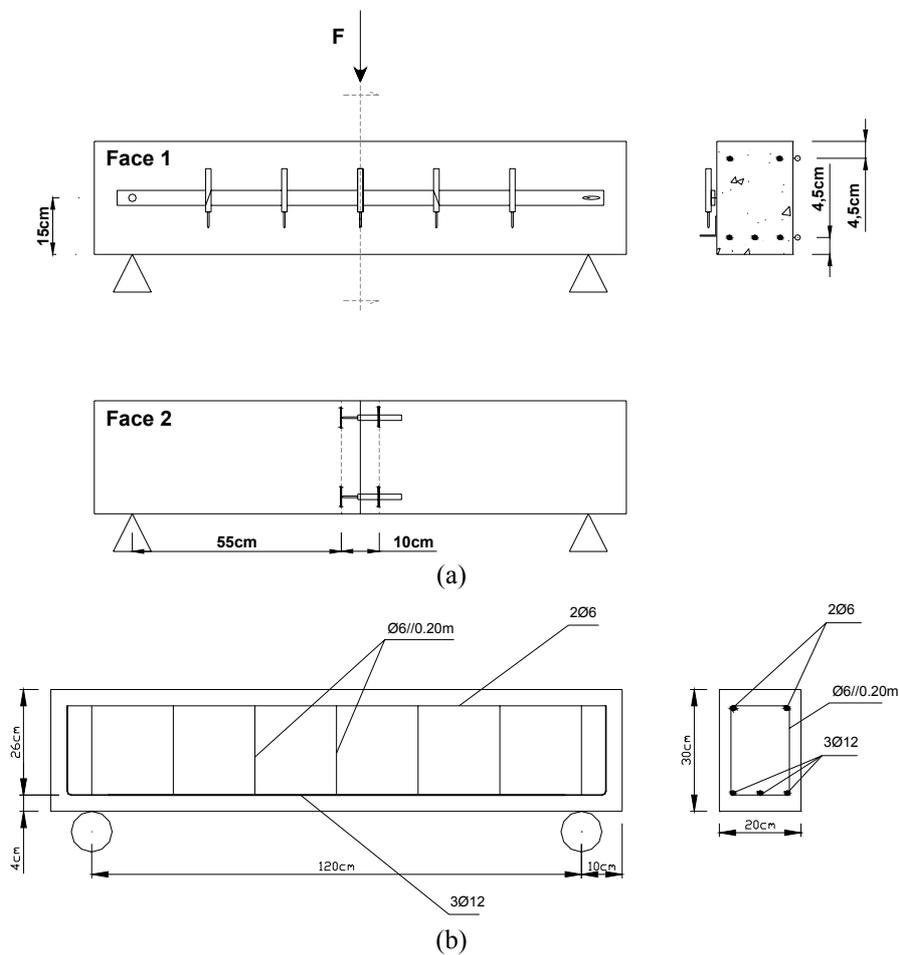


Figura 7 - (a) Geometria e carregamento das vigas da série S2 e (b) pormenor do posicionamento dos estribos na viga S2_2.

4.3 Composições e método de aplicação

Nas Tabelas 3 e 4 apresentam-se as composições adoptadas para os BRFA de moderada e elevada resistência, respectivamente. Em cada série, a composição manteve-se inalterada. Contudo, reconhece-se que para quantidades de fibras acima de 40 kg/m³ a composição deve atender à presença das fibras, por forma a activar-se mais eficazmente os mecanismos de reforço das fibras (Rossi 1998).

Tabela 3 – Composição do betão de moderada resistência (vigas da série S1).

Componente	kg/m ³
Cimento I 42.5R	280
Cinzas Volantes	42
Areia Fina	310
Areia grossa	689
Brita 5/15	252
Brita 15/25	583
Água	146
Sika ViscoCrete 3002 HE	2.97
Fibras Dramix [®] RC-65/60-BN	0, 30, 45, 60

Tabela 4 – Composição do betão de elevada resistência (vigas da série 2).

Componente	kg/m ³
Cimento I 52.5R	420
Cinzas Volantes	84
Areia Fina	74
Areia grossa	793
Brita 5/15	216
Brita 15/25	591
Água	145
Viscocrete 3002 HE	5.87 ⁽¹⁾ ; 5.34 ⁽²⁾
Fibras Dramix [®] RC-65/60-BN	0, 25, 35, 50, 70

⁽¹⁾ - Nas vigas S2_5, S2_6; ⁽²⁾ - Nas restantes vigas

No desenho das composições atendeu-se ainda ao facto de se pretender assegurar níveis de abaixamento no cone de Abrams da ordem dos 15 cm.

As vigas foram obtidas por intermédio do enchimento de moldes de madeira, tendo-se utilizado vibradores de agulha na compactação do BRFA. No entanto recomenda-se que a compactação do BRFA se faça com vibradores acoplados à cofragem, por forma a evitar deficiente distribuição das fibras no seio do betão.

A fabricação do betão e o enchimento dos moldes de madeira foram efectuados nas instalações da PréGaia. Por cada percentagem de fibras foram betonados 2 a 3 cilindros de

150 mm de diâmetro e 300 mm de altura para avaliação do comportamento em compressão e 3 prismas ($150 \times 150 \times 600 \text{ mm}^3$) para determinar o comportamento em flexão.

Nos dias de permanência nesta empresa, as vigas e os provetes foram diariamente humedecidos. Aos quinze dias de idade os provetes e as vigas e os provetes foram transferidos para o Laboratório de Estruturas (LEST) do Subgrupo de Estruturas do Departamento de Engenharia da Escola de Engenharia da Universidade do Minho, tendo ficado sujeitos às condições ambientais naturais do LEST.

4.4 Propriedades dos materiais

4.4.1 Ensaios de compressão no betão

Na Figura 8 apresenta-se a resposta tipo obtida nos ensaios de compressão dos provetes cilíndricos correspondentes à viga S2_6. Estes foram efectuados em prensa servo-controlada de 2500 kN de capacidade máxima de carga. As extensões foram obtidas por intermédio dos valores de deslocamento obtidos em três LVDTs dispostos em torno do provete cilíndrico, fazendo entre si um ângulo de 120 graus (ver Figura 9). A extensão foi obtida dividindo a média dos deslocamentos nos três LVDTs pela altura do provete (medida antes de efectuar o ensaio). Uns dias antes de se proceder ao seu ensaio, a face irregular dos provetes foi regularizada, por forma a ser assegurado perfeito paralelismo entre as faces do provete em contacto com os pratos da prensa. Para diminuir o efeito de confinamento introduzido pelos pratos de aço da prensa, entre o prato e a face inferior do provete foi colocada uma folha de teflon. Não se colocou folha de teflon na face superior do provete, dado que entre esta e a do piston do actuador existia um sistema rotulado.

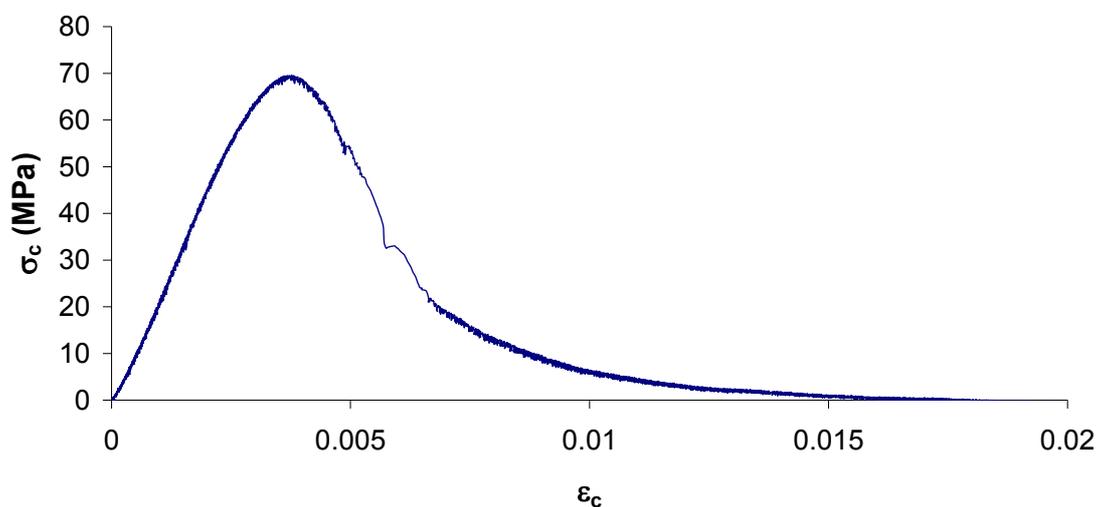


Figura 8 - Relação tensão-extensão de compressão (proвете da viga S2_6).

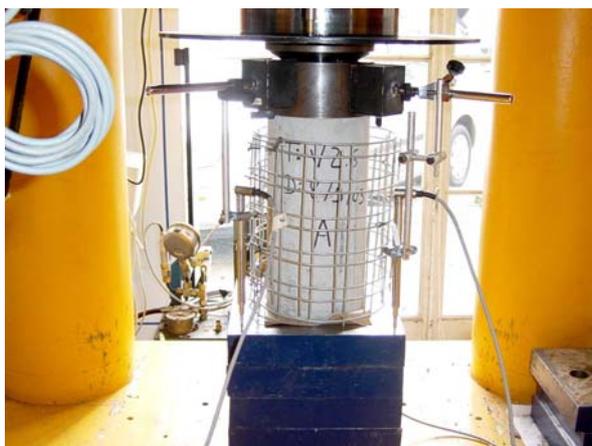


Figura 9 - Sistema de ensaio de compressão.

Na presente fase do projecto não foram ainda efectuados os ensaios de compressão dos provetes das vigas da série S1, pelo que os resultados apresentados na Tabela 5 dizem apenas respeito aos provetes das vigas da série S2.

Tabela 5 - Resistência média à compressão dos provetes das vigas da série S2.

Provetes das vigas:	f_{cm} [MPa]
S2 1 e S2 2 (2)*	58.2
S2 3 (1)*	64.0
S2 4 (2)*	58.8
S2 5 (2)*	52.8
S2 6 (2)*	64.5

* - Número de provetes ensaiados

Verifica-se que não há uma tendência clara sobre a influência das fibras no que diz respeito à resistência à compressão, dado que as tensões máximas de compressão foram obtidas em provetes reforçados com a menor e a maior quantidade de fibras. Na compressão a influência das fibras conduz a um ligeiro aumento da extensão correspondente à tensão de pico e a um significativo aumento da tensão residual pós pico (Barros 1995).

4.4.2 Ensaio de flexão no betão

Os ensaios de flexão foram efectuados segundo as recomendações da RILEM TC 162-TDF (2002). Estes ensaios foram efectuados nas instalações da Civitest, tendo-se utilizado um servo-actuador de 100 kN de capacidade máxima de carga, uma célula de carga de 50 kN de capacidade máxima de carga e um transdutor de deslocamentos de 10 mm de campo. Uns dias antes de serem ensaiados, a secção central dos provetes foi serrada de forma a efectuar-se um entalhe com 25 mm de profundidade e 5 mm de espessura, conforme as recomendações da RILEM (2002). Na Figura 10 apresentam-se os resultados obtidos nos provetes correspondentes às vigas S2_3 a S2_6.

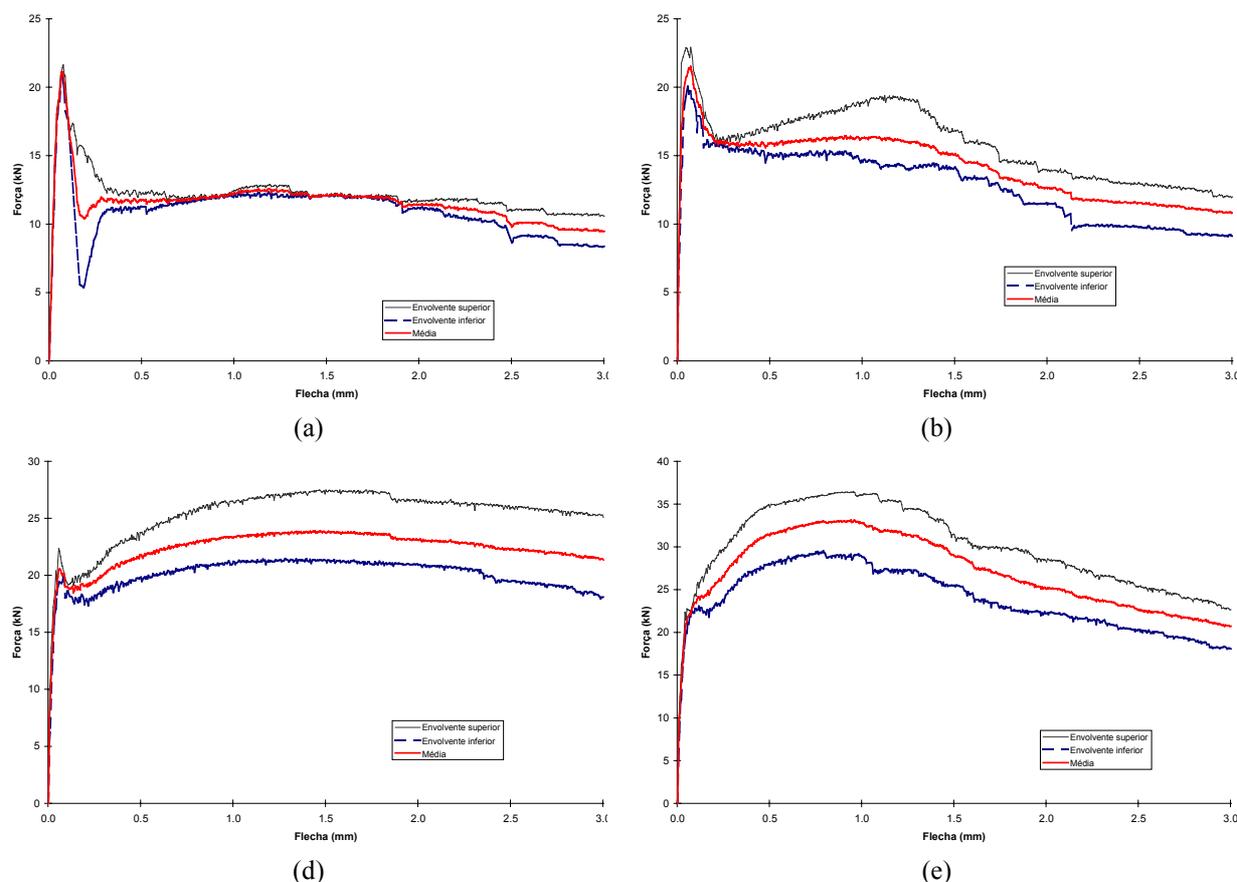


Figura 10 - Relação força-flecha nas vigas (a) S2_3, (b) S2_4, (c) S2_5, (d) S2_6.

Na Tabela 6 apresentam-se os valores médios de algumas das propriedades registadas, designadamente (RILEM 2002): tensão de limite de proporcionalidade, $f_{fcm,L}$, resistências equivalentes ($f_{eqm,2}$ e $f_{eqm,3}$) e residuais ($f_{Rm,1}$ e $f_{Rm,4}$). Constata-se que a tensão limite de proporcionalidade não é afectada significativamente pela presença das fibras, enquanto que f_{eqm} e f_{Rm} aumentam consideravelmente com a percentagem de fibras.

Tabela 6 – Resultados obtidos nos ensaios de flexão.

Provetes das vigas:	$f_{fcm,L}$ [MPa]	$f_{eqm,2}$ [MPa]	$f_{eqm,3}$ [MPa]	$f_{Rm,1}$ [MPa]	$f_{Rm,4}$ [MPa]
S2 3 (2)*	6.10	3.36	3.64	3.79	3.00
S2 4 (3)*	6.70	4.86	4.54	5.10	3.46
S2 5 (3)*	6.37	6.71	7.27	6.88	6.83
S2 6 (3)*	6.90	9.85	9.06	9.95	6.63

* - Número de provetes ensaiados

Verifica-se ainda que f_{Rm} dependente bastante da forma da curva força-flecha registada nos ensaios experimentais, enquanto f_{eq} traduz de forma mais representativa o efeito das fibras, dado que é directamente dependente da energia dissipada até determinada flecha (RILEM 2002). Assim, na opinião dos autores do presente trabalho, o efeito das fibras deve ser representado por f_{eq} em detrimento de f_R , tal como outros autores também advogam (Rosenbusch and Teutsch, 2003).

4.4.3 Ensaios de tracção nas armaduras

O comportamento em tracção das armaduras que reforçam as vigas foi determinado por intermédio de ensaios de tracção uniaxial efectuados segundo as recomendações da norma "EN 10 002-1 – Tensile Testing, 1990, Part 1: method of test (EN 10002-1 1990)". Para tal foi usado um equipamento universal de 600 kN de capacidade máxima de carga.

Na Tabela 7 apresentam-se os valores médios das propriedades avaliadas nos ensaios, em que σ_y é a tensão de cedência, ε_{sh} é a extensão onde finaliza o patamar de cedência, σ_u é a tensão última e ε_u é extensão última.

Tabela 7 – Resultados obtidos nos ensaios de tracção uniaxial com provetes de varão de aço.

	Valor médio	Desvio Padrão	Valor médio	Desvio Padrão
Diâmetro	$\phi 12$		$\phi 6$	
σ_y [MPa]	555	4	677	11
ε_{sh}	0.028	0.002	-	-
σ_u [MPa]	646	5	715	13
ε_u	0.098	0.003	0.042	0.015

4.5 Resposta das vigas

Na Figura 11 apresenta-se a resposta força-flecha registada nas vigas da série S2. Verifica-se que a capacidade de carga aumentou com a percentagem de fibras. Mesmo para a viga reforçada com 25 kg/m³ de fibras, a carga máxima foi superior à viga reforçada com estribos. No entanto, ocorreram duas situações não esperadas. A primeira refere-se ao comportamento dúctil observado na resposta da viga S2_1. Após inspecção das superfícies de fractura desta viga, constatou-se existirem algumas fibras no betão, o que só pode ser justificado pelo facto desta viga ter sido betonada após terem sido betonadas as vigas de BRFA, devendo ter ficado no fundo da misturadora algumas fibras que se incorporaram durante a amassadura do betão da viga S2_1. A percentagem de fibras existente na viga S2_1 será em breve determinada. No entanto, os resultados indiciam que, para betões de elevada resistência e para vigas de moderada/reduzida altura a presença de fibras na composição tem um efeito bastante favorável em termos de resistência ao corte. A segunda situação anómala tem a haver com o comportamento da viga S2_5, reforçada com 50 kg/m³ de fibras. Nesta viga previa-se uma

carga de rotura superior à obtida na viga S2_4, o que não ocorreu. Até uma flecha próxima dos 2.5 mm as duas vigas tiveram comportamento similar, mas alcançada esta flecha, a viga S2_5 sofreu uma queda na sua capacidade de carga, motivada pela formação de uma fenda de corte. De seguida esta viga recuperou alguma capacidade de carga, para níveis similares ao da viga S2_3, mas atingida uma flecha próximo de 4 mm voltou a sofrer uma queda na sua capacidade de carga, agora devido à progressão descontrolada da fenda de corte. Estas situações indicam ser necessário avaliar a percentagem de fibras efectivamente aplicado nas vigas, dado indiciar que o tipo de misturadora utilizado não assegurou um rigoroso controlo da percentagem de fibras introduzida nas vigas confeccionadas.

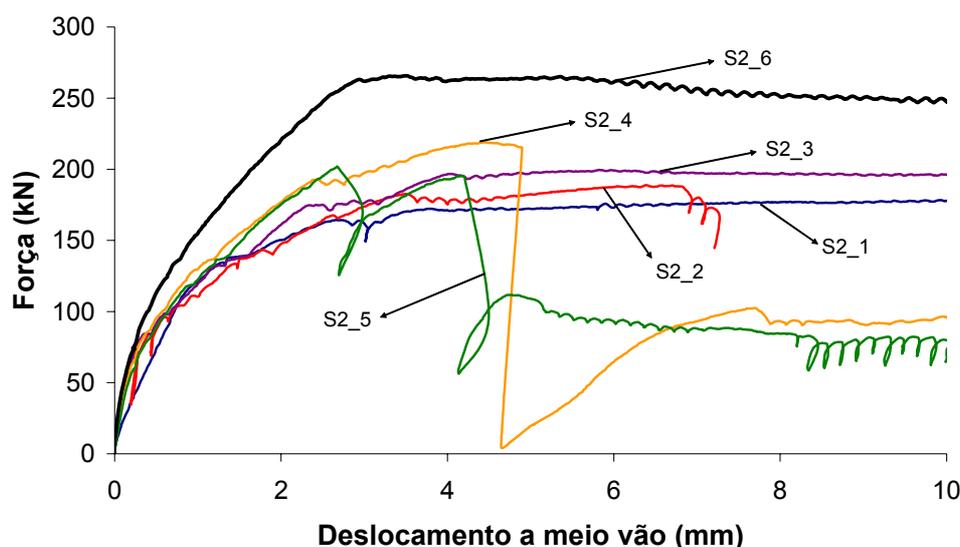


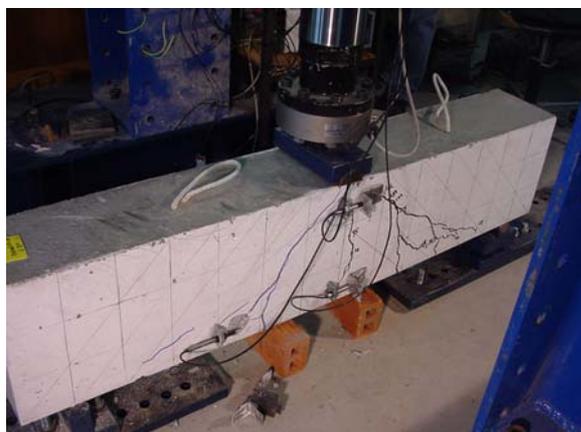
Figura 11 - Relação força-flecha nas vigas da série S2.

Na Tabela 8 apresentam-se as forças de serviço, F_{serv} , (para flecha de $L/400$ [mm]) e máximas, F_{max} , registadas nas vigas ensaiadas. Verifica-se que, à excepção do caso anómalo da viga S2_5, nas restantes vigas, F_{serv} e F_{max} aumentaram com a percentagem de fibras. Relembre-se que, de facto, a viga S2_1 tem alguma percentagem de vigas, pelo que não pode ser considerada como sendo de betão simples.

Tabela 8 - Relação força-flecha nas vigas da série S2.

Designação da viga	F_{serv} (3mm) [kN]	F_{max} [kN]
S2_1	161.6	185.4
S2_2	173.8	188.8
S2_3	176.4	199.5
S2_4	197.4	219.0
S2_5	165.3	201.7
S2_6	262.0	265.6

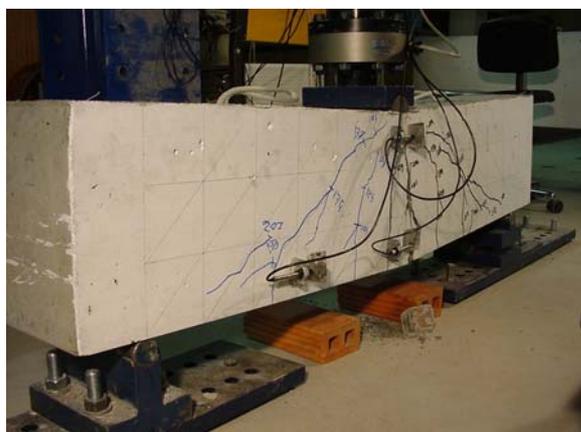
Na Figura 12 apresentam-se os modos de rotura observados nas vigas ensaiadas.



S2_1



S2_2



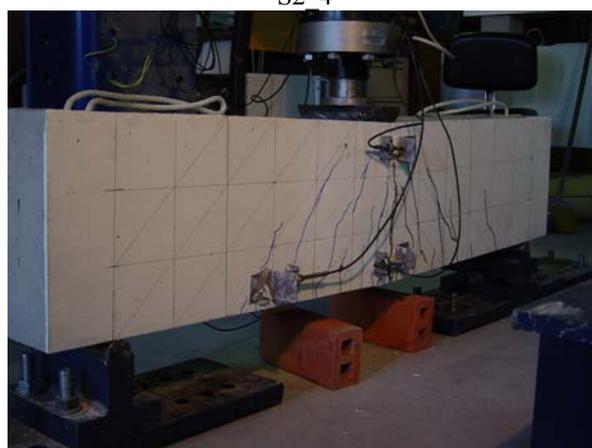
S2_3



S2_4



S2_5



S2_6

Figura 12 - Modo de rotura das vigas da série S2.

Na Figura 13a apresenta-se a viga S2_6 após a sua rotura. Nesta viga apenas se formaram fendas de flexão, tendo a rotura ocorrido na secção central acompanhada pela rotura das armaduras longitudinais. A Figura 13.b ilustra a superfície de fractura onde é visível o elevado número de fibras que contribuíram para a elevada capacidade de transferência de tensões entre as faces da fenda.



Figura 13 - (a) Aspecto da viga S2_6 na rotura e (b) distribuição das fibras na secção de fractura.

4.6 Aplicação da formulação da RILEM às vigas ensaiadas na UM

Às vigas ensaiadas na UM aplicou-se a formulação proposta pela RILEM. Para tal utilizaram-se os resultados obtidos nos ensaios de compressão e de flexão com os provetes das vigas da série S2. No caso da viga reforçada com estribos, S2_2, a parcela de V_{wd} foi calculada para f_{ywd} obtida por intermédio dos valores sugeridos na regulamentação Portuguesa, considerando ainda a tensão de cedência registada nos ensaios experimentais com a adopção de um coeficiente de segurança de 1.15. Os resultados obtidos estão na Tabela 9.

Tabela 9 - Aplicação da formulação da RILEM às vigas da série S2 ensaiadas na UM.

Designação	Cálculo da resistência de corte - Rilem				$F_{\max,RILEM,d}$ [kN]	$F_{\max,Exp}$ [kN]	$\frac{F_{\max,Exp}}{F_{\max,RILEM,d}}$ [kN]
	V_{cd} [kN]	V_{wd} [kN]	V_{fd} [kN]	V_{rd} [kN]			
S2_1	37.49	-	-	37.49	74.98	185.4	2.47
S2_2	37.49	23.02	-	60.51	121.02	188.8	1.56
		38.95*	-	76.44*	152.87		1.24
S2_3	38.86	-	29.85	68.71	137.42	199.5	1.45
S2_4	37.62	-	36.50	74.13	148.26	219.0	1.48
S2_5	36.08	-	59.61	95.68	191.36	201.7	1.05
S2_6	38.99	-	74.26	113.25	226.5	265.6	1.17

* Utilizando os valores para f_{ywd} do aço obtidos experimentalmente.

Constata-se que, no caso das vigas de BRFA o factor de segurança varia de 1.05 a 1.48. O valor mínimo foi registado na viga S2_5, a qual, conforme foi já referido, teve um comportamento não esperado. Na viga S2_1 o factor foi demasiado elevado, provavelmente pela razão já apontada, de que, contrariamente ao esperado, foram observadas fibras na superfície de fractura desta viga.

5 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foi descrita a formulação proposta pela RILEM para determinar a resistência ao corte de vigas de betão reforçado com fibras de aço. O desempenho desta formulação foi avaliado por intermédio de resultados apresentados na bibliografia da especialidade, bem como por meio de resultados obtidos em ensaios efectuados no Laboratório de Estruturas do Depart. de Eng^a Civil da Escola de Eng^a da Universidade do Minho. Dos resultados obtidos nos ensaios efectuados na UM verificou-se que a formulação proposta pela RILEM estima valores de cálculo de resistência ao corte da ordem dos 68% a 85% dos valores registados nos ensaios, intervalo este que se insere nos obtidos por outros investigadores. Tal como nas vigas ensaiadas em Braunschweig e em Leuven, nas ensaiadas na UM também se constatou haver uma tendência para uma estimativa da resistência ao corte mais próxima da observada experimentalmente quando a percentagem de fibras aumenta.

6 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento concedido 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 na campanha experimental, nomeadamente, PréGaia e Bekaert. Também agradecem a colaboração prestada pela Civitest, pelo equipamento laboratorial disponibilizado e pelos ensaios efectuados nas suas instalações. O primeiro autor agradece a bolsa SFRH/BD/3259/2000 concedida pela FCT e FSE.

BIBLIOGRAFIA

- Barragán, B.E., “Failure and toughness of steel fiber reinforced concrete under tension and shear“, PhD Thesis, UPC, Barcelona, March 2002.
- Barros, J.A.O., “Caracterização do comportamento em flexão por intermédio de ensaios experimentais“, Actas do Seminário sobre Dimensionamento de estruturas de betão reforçado com fibras de aço, Eds. J.Barros, P.Rossi e B. Massicotte, Capítulo 2, 28 Novembro de 2003.
- Barros, J.A.O., “Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica“, Tese de Doutoramento, FEUP, Dezembro de 1995.
- Brite-Euram Project 97-4163, BRPR-CT98-0813 “Test and design methods for steel fibre

reinforced concrete“, March 1999 - March 2002.

- Campione, G.; Mindess, S. “Fibers as shear reinforcement for high strength reinforced concrete beams containing stirrups“, Proceedings International Workshop on High Performance Cement Composites, HPRCC3, Mainz, Germany (Eds. H.W. Reinhardt and A.E. Naaman) RILEM Publications S.A.R.L., Vol. 6, pp.519-529.
- Casanova, P., "Bétons de fibres métalliques: du materiau à la structure", Tese de Doutoramento, École Nationale des Ponts et Chaussées, 1995.
- Casanova, P.; Rossi, P., “Analysis and design of steel fibre reinforced concrete beams“, ACI Structural Journal, Vol. 94, No. 5, pp. 595-602, 1997.
- CEB-FIP Model Code 1990. Comité Euro-International du Béton, Bulletin d’Information n° 213/214, Ed. Thomas Telford, 1993.
- Dupont, D; Vandewalle, L., "Shear capacity of concrete beams containing longitudinal reinforcement and steel fibers", Proceedings ACI Fall Convention 2000 SP, American Concrete Institute, Detroit, USA.
- EN 10 002-1 – Tensile Testing, 1990, Part 1: method of test
- RILEM TC 162-TDF, “Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - σ - ε design method - Final Recommendation”, Materials and Structures, Vol.36, pp. 560-567, October 2003.
- RILEM TC 162-TDF, Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - Final Recommendation, Materials and Structures, Vol.35, pp. 579-582, November 2002.
- Barros, J.A.O., Antunes, J.A.B., "Experimental characterization of the flexural behaviour of steel fibre reinforced concrete according to RILEM TC 162-TDF recommendations", Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - Background and experiences, Proceedings of the RILEM TC 162-TDF Workshop, pp. 77-89, March 2003.
- Rossi, P., "Les bétons de fibres métalliques", Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1998.
- Rosenbusch, J., Teutsch, M., "Shear design with σ - ε -method", Test and design methods for steel fibre reinforced concrete - Background and experiences, Proceedings of the RILEM TC 162-TDF Workshop, pp. 77-89, March 2003.

ANEXO

Memória de cálculo do pré-dimensionamento das vigas ensaiadas na Universidade do Minho

A1. Objectivo

Esta memória reporta os cálculos realizados para a caracterização de duas vigas. Este envolve o cálculo de reforço ao corte por dois sistemas distintos, o primeiro com o recurso à armadura vertical convencional e um segundo sistema constituído pela implementação de fibras de aço no betão usado. Nesta memória de cálculo foi adoptada na formulação proposta pela RILEM TC 162-TDF.

A2. Sistema estrutural e materiais usados

O reforço foi realizado em duas vigas distintas (Figura A1), quer na sua geometria quer nas suas especificações mecânicas.

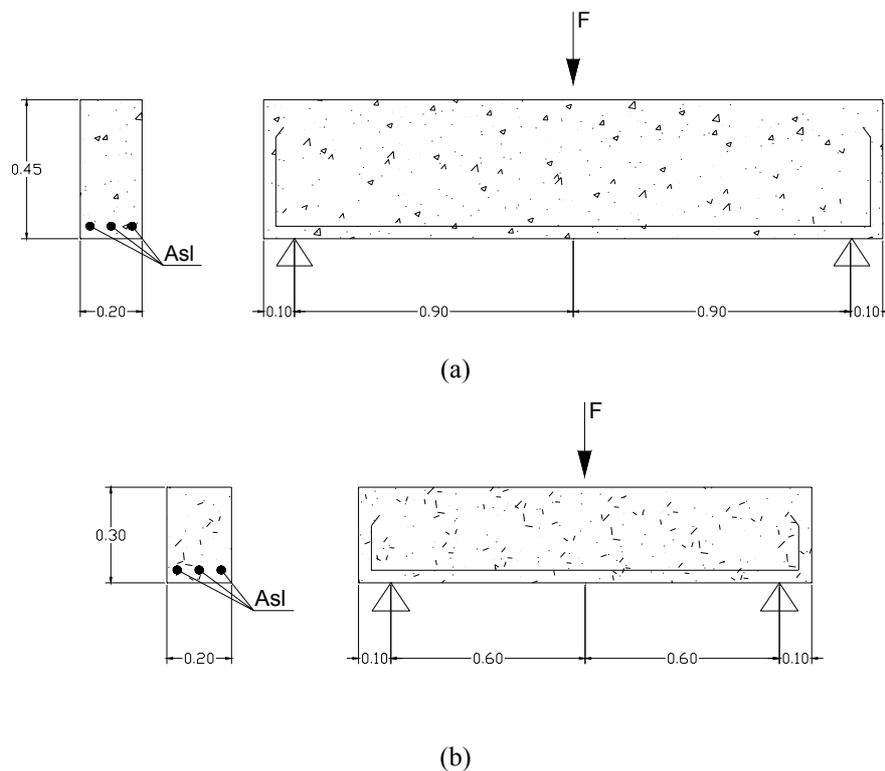


Fig. A1 – Esquema das vigas da série S1(a) e da série S2 (2).

Resistência média à compressão do betão:

7.25

Designação	f_{cm} (MPa)
S1	35
S2	70

Secção e resistência característica do aço usado:

$$A_{sl} \rightarrow 3\phi 12$$

$$f_{ywd} = 348 \text{MPa}$$

Foi utilizado também no cálculo um tipo de fibras de aço Dramix, comercialmente designado por RC-65/60-BN. A fibra RC-65/60-BN tem 60mm de comprimento, 0.92mm de diâmetro e 65 de esbelteza.

A3. Cálculos efectuados

A3.1 – Vigas da série S1

Para as condições representativas da viga esperava-se uma força F de 160kN. Com base nas expressões da formulação da RILEM obtiveram-se aos seguintes valores para a resistência ao corte do betão:

$$V_{cd} = \left[0.12k(100\rho_{\lambda}f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] b_w d = 37.36 \text{kN}.$$

Para garantir ocorrência de rotura por corte, restringiu-se o reforço ao corte a apenas 80 % do necessário. Os estribos necessários foram determinados pelas expressões seguintes:

$$V_{wd} = \frac{F}{2} - V_{cd}$$

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} 0.9df_{ywd} \Leftrightarrow \frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{wd}}{0.9df_{ywd}} \Leftrightarrow \rho_w = \frac{V_{wd}}{0.9df_{ywd}}$$

$$\rho_w' = 0.8\rho_w = 0.8 \left(\frac{(F/2 - V_{cd})}{0.9df_{ywd}} \right)$$

Utilizando-se estribos $\phi 6$:

$$s = \frac{A_{sw}}{\rho_w'} = 212.88 \text{mm}.$$

Para $s = 200\text{mm}$,

$$V_{wd, RD} = 36.31\text{kN}$$

Com o propósito de comparar os diferentes sistemas de reforço usados pretende-se obter um valor resistente para o betão reforçado com fibras (BRFA) semelhante ao encontrado para o uso de estribos. Assim,

$$V_{fd} = V_{wd, RD} \Leftrightarrow k_1 \tau_{fd} b_w d = V_{wd, RD} \Leftrightarrow \tau_{fd} = \frac{V_{wd, RD}}{k_1 b_w d}.$$

Sabendo que o acréscimo da tensão de corte está relacionado com a tensão equivalente 3 ($f_{eq,3}$) pela seguinte expressão:

$$\tau_{fd} = 0.12 f_{eq,3}$$

obteve-se então:

$$f_{eq,3} = \frac{V_{wd, RD}}{0.12 k_1 b_w d} = 3.10\text{MPa}$$

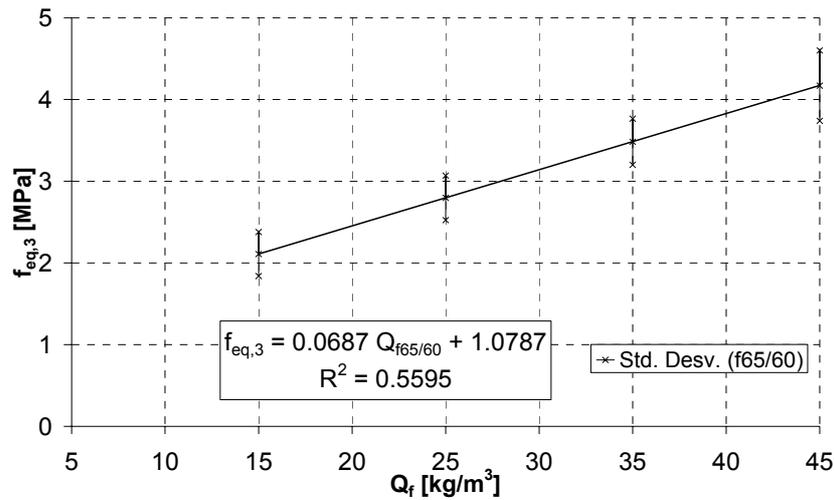
Sabendo ainda que:

$$f_{eq,3} = 0.61 f_{eqm,3}$$

resulta

$$f_{eqm,3} = 5.08\text{MPa}$$

O valor obtido para a tensão equivalente permite, através de estudos realizados anteriormente, determinar a quantidade de fibras necessária (Fig. A2) para obter um valor resistente ao corte semelhante ao obtido com o recurso a armadura convencional.


 Fig. A2 – Relação de valores médios de $f_{eq,3}$ com a quantidade de fibras (Q_f)

Estimativa da quantidade de fibras necessárias para a $f_{eq,3}$ característica e média:

$$Q_{f,k} = 29.5 \text{ kg/m}^3$$

$$Q_{f,m} = 58.3 \text{ kg/m}^3$$

A3.2 – Vigas da série S2

Para as condições representativas da viga esperava-se uma força F de 135.7kN. Com base nas expressões já indicadas obtiveram-se os seguintes valores para a resistência ao corte do betão:

$$V_{cd} = \left[0.12k(100\rho_{\lambda}f_{fck})^{\frac{1}{3}} \right] b_w d = 40.2 \text{ kN}$$

Para garantir ocorrência de rotura por corte, restringiu-se o reforço ao corte a apenas 80 % do necessário. Os estribos necessários foram determinados pelas expressões seguintes:

$$V_{wd} = \frac{F}{2} - V_{cd}$$

$$V_{wd} = \frac{A_{sw}}{s} 0.9df_{ywd} \Leftrightarrow \frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{wd}}{0.9df_{ywd}} \Leftrightarrow \rho_w = \frac{V_{wd}}{0.9df_{ywd}}$$

$$\rho_w' = 0.8\rho_w = 0.8 \left(\frac{(F/2 - V_{cd})}{0.9df_{ywd}} \right)$$

Utilizando estribos $\phi 6$:

$$s = \frac{A_{sw}}{\rho_w} = 208.37\text{mm}$$

Para $s = 200\text{mm}$,

$$V_{wd, RD} = 23.0\text{kN}$$

Com o propósito de comparar os diferentes sistemas de reforço usados pretendeu-se obter um valor resistente para o betão reforçado com fibras (BRFA) semelhante ao encontrado para o uso de estribos. Para tal,

$$V_{fd} = V_{wd, RD} \Leftrightarrow k_1 \tau_{fd} b_w d = V_{wd, RD} \Leftrightarrow \tau_{fd} = \frac{V_{wd, RD}}{k_1 b_w d}$$

Sabendo que o acréscimo da tensão de corte está relacionada com a tensão equivalente 3 ($f_{eq,3}$) pela seguinte expressão:

$$\tau_{fd} = 0.12 f_{eq,3}$$

obteve-se então:

$$f_{eq,3} = \frac{V_{wd, RD}}{0.12 k_1 b_w d} = 2.75\text{MPa}$$

$$f_{eq,3} = 4.51\text{ MPa}$$

O valor obtido para tensão equivalente permite, através de estudos realizados anteriormente, aferir a quantidade de fibras necessária (Fig. A2) para obter um valor resistente ao corte semelhante ao obtido com o recurso a armadura convencional.

Estimativa da quantidade de fibras necessárias para a $f_{eq,3}$ característica e média:

$$Q_{f,k} = 24.4\text{kg/m}^3$$

$$Q_{f,m} = 50.0\text{kg/m}^3$$