

DESEMPENHO DE MODELOS ANALÍTICOS DE PREVISÃO DA CONTRIBUIÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS NO REFORÇO AO CORTE DE VIGAS DE BETÃO ARMADO



J. L. T. Lima
Bols. Investigação
DEC-UM
Guimarães



J. A. O. Barros
Prof. Ass. c/ Agreg.
DEC-UM
Guimarães

SUMÁRIO

Na presente comunicação são apresentados alguns modelos analíticos para previsão da contribuição de materiais compósitos no reforço ao corte de vigas de betão armado recentemente introduzidos nos códigos de dimensionamento, sendo o seu desempenho aferido por comparação entre os valores estimados pelas formulações analíticas com os registados numa base de dados contendo informação referente a mais de 200 programas experimentais.

Palavras-chave: Dimensionamento, Reforço Estrutural, Corte, FRP, Colagem Superficial.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais poliméricos reforçados com fibras (FRP) na reabilitação e reforço estrutural tem aumentado continuamente nos últimos anos, contribuindo para este facto o elevado número de estudos experimentais que demonstram a sua eficácia e a crescente produção de documentos de apoio à concepção e dimensionamento dos sistemas de reforço com FRP.

No caso do reforço ao corte de vigas de betão armado, têm-se verificado que a colagem superficial externa (EBR) de mantas ou laminados de FRP dispostos transversalmente ao eixo da peça ou segundo a normal à potencial fenda crítica de corte (FCC), permite um aumento significativo da capacidade resistente, apresentando-se na Fig.1 as configurações correntemente adoptadas para este tipo de sistema de reforço, designadamente, (a) o envolvimento total da secção, (b) o envolvimento parcial da secção, (c) a colagem nas faces

laterais, (d,e) adopção de mecanismos especiais de ancoragem como medida para evitar ruínas prematuras nas configurações (b) e (c).

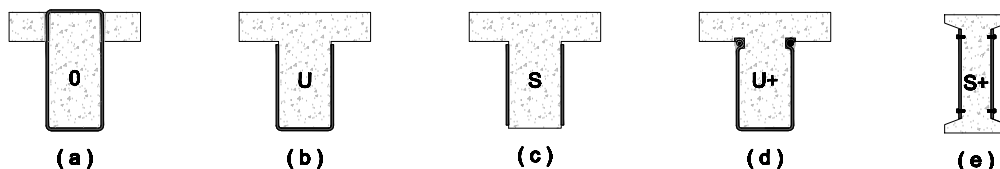


Figura 1: Configurações possíveis no reforço ao corte com FRP colado externamente

Cada uma das configurações referidas pode ainda ser implementada em diversos formatos, no que se refere à distribuição do reforço (discreto ou contínuo), à orientação das fibras e à sobreposição de camadas em diferentes orientações, de acordo com o representado na Fig. 2.

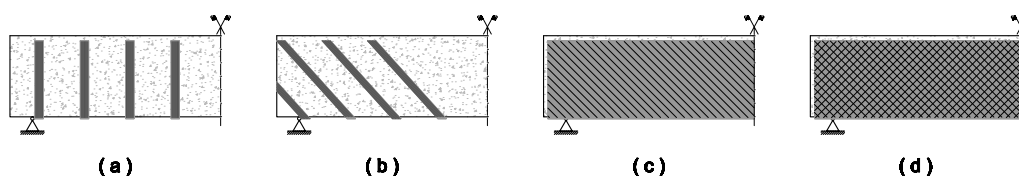


Figura 2: Formas de aplicação do FRP colado externamente

2. MODELOS ANALÍTICOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO REFORÇADAS COM FRP COLADO EXTERNAMENTE

As recentes propostas de dimensionamento apresentadas pelos documentos de referência relativos ao reforço de estruturas mediante a colagem externa de FRP estabelecem que a resistência ao corte de uma secção de betão armado reforçada, V_r , poderá ser obtida adicionando às parcelas relativas à contribuição da capacidade resistente do betão, V_c , e dos estribos, V_s , a que deriva do contributo do FRP, V_f , pelo que:

$$V_r = V_c + V_s + V_f \quad (1)$$

em V_c e V_s são quantificados, de forma independente ao problema de reforço com FRP, recorrendo aos modelos de cálculo referidos nos diferentes códigos de betão armado, podendo V_f ser estimado recorrendo aos modelos analíticos que se apresentam nas secções seguintes.

2.1 Proposta da fib

O "Bulletin 14" emitido pela "fédération internationale du béton - fib" é um relatório técnico de referência elaborado no âmbito do grupo de trabalho TG9.3 relativo ao reforço de estruturas por colagem externa de materiais compósitos [1]. Este documento pretende estabelecer algumas directrizes relativas ao dimensionamento dos sistemas de reforço com FRP, sua aplicação e controlo de qualidade. Para o caso do reforço ao corte de vigas de betão armado, este

documento estabelece que o valor de cálculo da contribuição do elemento de reforço externo, V_{fd} , poderá ser estimado de acordo com:

$$V_{fd} = 0.9 \cdot \varepsilon_{fed} \cdot E_f \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \sin \beta \quad (2)$$

em que b_w , d , θ e β assumem o significado representado na Fig.3, E_f é o módulo de elasticidade do material de reforço e ρ_f representa a taxa geométrica do reforço externo, determinada a partir das Eq. (3) e (4) no caso do reforço discreto ou contínuo, respectivamente:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot w_f}{b_w \cdot s_f} \quad (3)$$

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot \sin \beta}{b_w} \quad (4)$$

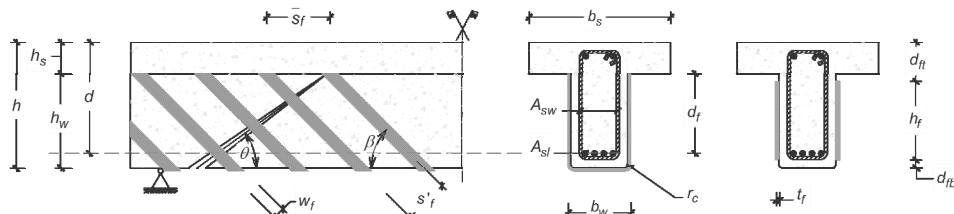


Figura 3: Notação adoptada para as características geométricas de uma viga reforçada

Na Eq. (2), ε_{fed} representa o valor de cálculo da extensão efectiva no FRP, determinada a partir do seu valor característico, ε_{fek} , afectado de um coeficiente parcial de segurança, γ_f , assumindo-se na ausência de uma rigorosa quantificação de ε_{fek} , que este valor possa ser tomado como 80% do seu valor médio, ε_{fe} , a determinar de acordo com a metodologia seguinte:

i) No caso de envolvimento total da secção (0):

$$\varepsilon_{fe} = 0.17 \cdot \left(\frac{f_{cm} \%}{E_f \cdot \rho_f / 1000} \right)^{0.30} \cdot \varepsilon_{fu} \quad (5)$$

ii) No caso de envolvimento parcial da secção (U) e (S):

$$\varepsilon_{fe} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0.65 \cdot \left(\frac{f_{cm} \%}{E_f \cdot \rho_f / 1000} \right)^{0.56} \cdot 10^{-3} \\ 0.17 \cdot \left(\frac{f_{cm} \%}{E_f \cdot \rho_f / 1000} \right)^{0.30} \cdot \varepsilon_{fu} \end{array} \right. \quad (6)$$

em que ε_{fed} é a extensão última do FRP.

Na determinação de ε_{fed} , γ_f pode assumir diferentes valores compreendidos entre 1.2 e 1.35, dependendo a sua quantificação do modo de rotura previsto e do nível de rigor adoptado nos procedimentos de aplicação de FRP de acordo com especificado no Quadro 3.1 de [1].

2.2 Proposta do ACI

Inserido numa série de publicações do “American Concrete Institute” destinadas a potenciar o desenvolvimento e a correcta aplicação de novas tecnologias na construção, o Committee 440 editou o manual de dimensionamento 440.2R-02 dedicado à concepção, dimensionamento e aplicação de sistemas de reforço para estruturas de betão mediante a aplicação de elementos de FRP colados externamente [2]. De acordo com este documento, o valor nominal da contribuição do CFRP no reforço ao corte poderá ser estimado a partir da expressão:

$$V_f = 2 \cdot t_f \cdot \frac{W_f}{S_f} \cdot f_{fe} \cdot (\sin \beta + \cos \beta) \cdot d_f \quad (7)$$

em que a passagem para valores de cálculo é obtida considerando os factores ϕ e ψ_f tal que:

$$V_{fd} = \phi \cdot \psi_f \cdot V_f \quad (8)$$

sendo $\phi = 0.85$ o coeficiente global de redução a adoptar no dimensionamento ao esforço transversal de elementos de betão armado em geral [3], e ψ_f um factor de redução adicional a adoptar no caso do reforço com FRP, sendo $\psi_f = 0.95$ no caso de envolvimento total da secção (0) e $\psi_f = 0.85$ no caso do envolvimento parcial (U e S). Na Eq. (7), f_{fe} representa a tensão efectiva no compósito, determinada de acordo com:

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad (9)$$

dependendo a quantificação de ε_{fe} do tipo de sistema de reforço adoptado, nomeadamente:

i) no caso de envolvimento total da secção (0):

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \cdot \varepsilon_{fu} \quad (10)$$

ii) no caso de envolvimento parcial da secção (U e S) :

$$\varepsilon_{fe} = k_v \cdot \varepsilon_{fu} \leq 0.004 \quad (11)$$

em que ε_{fu} é a extensão última do compósito e k_v é um factor empírico de redução da resistência da ligação colada, determinado a partir de:

$$k_v = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot L_e}{11900 \cdot \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (12)$$

Na Eq. (12) k_1 e k_2 são coeficientes de calibração dependentes, respectivamente, da resistência característica à compressão do betão em cilindros, f_{ck} , e do tipo de configuração de reforço adoptada, sendo L_e o comprimento efectivo de aderência, determinados por:

$$k_1 = \left(\frac{f_{ck}}{27} \right)^{2/3} \quad (13)$$

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_f - L_e}{d_f}, & \text{reforço em U} \\ \frac{d_f - 2L_e}{d_f}, & \text{reforço em II} \end{cases} \quad (14)$$

$$L_e = \frac{23300}{(t_f \cdot E_f)^{0.58}} \quad (15)$$

2.3 Proposta do CNR

De acordo com a norma italiana CNR-DT200 [4], a contribuição do sistema de reforço com FRP na resistência ao corte de uma viga de betão armado poderá ser contabilizada, recorrendo às expressões seguintes:

i) No caso de envolvimento total da secção:

$$V_{fd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0.9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \frac{W_f}{s_f} \quad (16)$$

onde γ_{Rd} é um coeficiente parcial de segurança inerente à incerteza do modelo de resistência adoptado, com valor proposto igual a 1.2, e f_{fed} é o valor de cálculo da tensão efectiva no FRP determinada de acordo com:

$$f_{fed} = f_{ added} \cdot \left[1 - \frac{1}{6} \cdot \frac{L_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \right] + \frac{1}{2} (\phi_R \cdot f_{fd} - f_{ added}) \cdot \underbrace{\left[1 - \frac{L_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \right]}_{\geq 0} \quad (17)$$

sendo $f_{ added}$ o valor de cálculo da tensão de destacamento, L_e o comprimento efectivo de aderência, f_{fd} o valor de cálculo da tensão de rotura do FRP, e ϕ_R um factor de redução da capacidade resistente do reforço devido à concentração de tensões nas arestas, determinado a partir da relação entre o raio de curvatura adoptado no arredondamento da aresta, r_c , e a largura da viga, b_w , tal que:

$$\phi_R = 0.2 + 1.6 \cdot \frac{r_c}{b_w}, \quad 0 \leq \frac{r_c}{b_w} \leq 0.5 \quad (18)$$

Na Eq. (17), f_{fd} é determinado a partir da relação entre a rigidez do compósito e o valor característico da energia de fractura da ligação colada, G_{fk} , de acordo com:

$$f_{fd} = \frac{0.80}{\gamma_{fd}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot G_{fk}}{t_f}} \quad (19)$$

$$G_{fk} = 0.03 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}} \quad (20)$$

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - w_f / s_f'}{1 + b_f / 400}} \geq 1 \quad (21)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ctm}}} \quad (22)$$

ii) Envolvimento parcial da secção (U)

A quantificação de V_{fd} poderá ser estimada recorrendo à Eq. (16), sendo f_{fed} determinada a partir da Eq.(23), adoptando-se no cálculo de f_{fd} e L_e o procedimento apresentado nas Eq. (19) a (22).

$$f_{fed} = f_{fd} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{L_e \cdot \sin \beta}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \right] \quad (23)$$

iii) Colagem nas faces laterais (S)

Nos casos em que o sistema de reforço é aplicado exclusivamente nas faces laterais, [4] refere que o modelo de comportamento ao corte já não poderá ser idealizado em analogia com a treliça de Morsch, devendo para o efeito ser adoptado um modelo de atravessamento de fissuras, remetendo-se para [5] o detalhe da respectiva formulação. Segundo [4] V_{fd} poderá ser determinado recorrendo às expressões seguintes:

$$V_{fd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot \min\{0.9 \cdot d, h_w\} \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot \frac{\sin \beta}{\sin \theta} \cdot \frac{w_f}{s_f'} \quad (24)$$

$$f_{fed} = f_{fd} \cdot \frac{z_{red,eq}}{\min\{0.9 \cdot d, h_w\}} \cdot \left(1 - 0.6 \cdot \sqrt{\frac{L_{eq}}{z_{red,eq}}} \right)^2 \quad (25)$$

$$z_{red,eq} = z_{red} + L_{eq}, \quad z_{red} = \min\{0.9 \cdot d, h_w\} - L_e \cdot \sin \beta, \quad L_{eq} = \frac{s_{uf}}{f_{fd} / E_f} \cdot \sin \beta \quad (26)$$

em que s_{uf} é deslizamento na interface da ligação colada aquando do destacamento total do FRP, podendo ser adoptado o valor 0.2 mm na ausência de uma rigorosa caracterização da lei local $\tau(s)$.

2.3 Proposta do CIDAR

O centro de estudos para a inspecção, diagnóstico e reabilitação de infra-estruturas da Universidade de Adelaide, CIDAR, constituiu um grupo de trabalho que tem contribuído activamente para a elaboração da Norma Australiana relativa ao reforço de estruturas por aplicação externa de chapas de aço ou materiais compósitos [6]. O documento é dotado de um conjunto de princípios de dimensionamento e de comentários às formulações apresentadas, tendo sido a sua 3ª versão provisória submetida à “Australian Standards” como proposta de norma. No capítulo referente ao reforço ao corte, a filosofia de dimensionamento apresentada é baseada numa formulação proposta em [7-8], na qual V_{fd} poderá ser estimado a partir de:

$$V_{fd} = 2 \cdot f_{fed} \cdot t_f \cdot \frac{W_f}{S_f} \cdot h_{fe} \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \sin \beta \quad (27)$$

admitindo a formação de uma FCC segundo um plano com orientação $\theta = 45^\circ$ relativamente ao eixo da viga. Na Eq. (27) h_{fe} representa o comprimento efectivo do reforço (ver Fig.1) determinado a partir de:

$$h_{fe} = z_b - z_t \quad (28)$$

$$z_b = 0.9 \cdot d - d_{fb} \quad (29)$$

$$z_t = d_{ft} \quad (30)$$

em que d_{ft} e d_{fb} são as distâncias do elemento de reforço à fibra superior e inferior da secção, respectivamente. Considerando que em estado limite último o perfil de tensões no FRP ao longo da fissura é não uniforme, a tensão efectiva no reforço vem dada por:

$$f_{fed} = D_f \cdot f_{fd,max} \quad (31)$$

onde $f_{fd,max}$ é o valor de cálculo da máxima tensão admissível no compósito e D_f é um factor de distribuição das tensões, dependendo cada uma destas grandezas do modo de rotura idealizado, nomeadamente:

i) Rotura por esgotamento da capacidade resistente do compósito (0)

$$D_f = 0.5 \cdot \left(1 + \frac{z_t}{z_b} \right) \quad (32)$$

$$f_{fd,max} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_f} \cdot \phi_R \cdot f_{fu} & \text{se } \varepsilon_f \leq \varepsilon_{max} \\ \frac{1}{\gamma_f} \cdot \phi_R \cdot E_f \cdot \varepsilon_f & \text{se } \varepsilon_f > \varepsilon_{max} \end{cases} \quad (33)$$

em que ε_{max} assume o carácter de extensão máxima admissível no FRP, imposta para controlar uma eventual abertura excessiva da FCC, com valor recomendado de 15 ‰, f_{fu} é o

valor da tensão de rotura do FRP, γ_f é um factor parcial de segurança para a resistência à tracção do compósito e ϕ_R é um factor de redução da capacidade resistente devido a efeitos não quantificados no modelo de cálculo como é o caso da concentração de tensões na zona da aresta. Segundo [7] γ_f e ϕ_R assumem valores 1.25 e 0.8, respectivamente.

ii) Rotura por destacamento prematuro do reforço (S e U)

O destacamento superficial do reforço em FRP é o modo de rotura predominante em vigas com reforço do tipo S e U, sendo o factor de distribuição de tensões determinado a partir de:

$$D_f = \begin{cases} \frac{2}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \lambda\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \lambda\right)}, & \text{se } \lambda \leq 1 \\ 1 - \frac{\pi - 2}{\pi \cdot \lambda}, & \text{se } \lambda > 1 \end{cases} \quad (34)$$

em que λ é o comprimento de ancoragem normalizado, obtido a partir da razão entre L_{\max} e L_e , sendo:

$$L_{\max} = \max(L_b) = \begin{cases} \frac{h_{fe}}{\sin \beta}, & \text{reforço em U} \\ \frac{h_{fe}}{2 \cdot \sin \beta}, & \text{reforço em I I} \end{cases} \quad (35)$$

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{\sqrt{f_{ck}}}} \quad (36)$$

O valor de cálculo da tensão máxima mobilizável no FRP, $f_{fd,\max}$, poderá ser estimado recorrendo à expressão:

$$f_{fd,\max} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\gamma_f} \cdot \phi_R \cdot f_{tu} \\ \frac{1}{\gamma_f} \cdot \alpha_1 \cdot \beta_L \cdot \beta_w \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot \sqrt{f_{ck}}}{t_f}} \end{array} \right. \quad (37)$$

em que α_1 é uma constante de calibração que assume o valor 0.35, β_L é um factor redutor da capacidade resistente da ligação colada e β_w um factor de comportamento devido aos efeitos de escala determinados de acordo com:

$$\beta_L = \begin{cases} \lambda & \text{se } \lambda \leq 1 \\ 1 & \text{se } \lambda > 1 \end{cases} \quad (38)$$

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - w_f / (s_f \cdot \sin \beta)}{1 + w_f / (s_f \cdot \sin \beta)}} \quad (39)$$

3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MODELOS ANALÍTICOS

A utilização de bases de dados associada às modernas ferramentas de análise estatística e “data mining” constitui uma ferramenta poderosíssima para a descoberta de conhecimento por intermédio do registo, partilha e manipulação de resultados provenientes de diversos programas experimentais, permitindo novas formas de investigação e cooperação interinstitucional. Este tipo de abordagem assume particular interesse no estudo de fenómenos de elevada complexidade, como é o caso do comportamento ao corte de elementos de betão armado reforçados com FRP, em que o número de parâmetros envolvido é elevado e a sua importância relativa não se encontra ainda devidamente quantificada. Neste contexto, procurando avaliar o comportamento dos modelos de dimensionamento descritos, foi compilada uma base de dados (BD) com mais de 200 registos contendo resultados experimentais obtidos por diversos autores, sendo o desempenho dos modelos determinado por comparação entre os valores previstos, V_{fd} , e os registados experimentalmente, $V_{f,exp}$. Uma descrição detalhada da BD e seus atributos poderá ser encontrada em [8].

Na análise de desempenho efectuada, V_{fd} é valor de cálculo, encontrando-se desta forma afectado pelos coeficientes parciais de segurança propostos pelos modelos analíticos considerados. De forma a permitir uma comparação directa entre as diferentes formulações foi considerado que o plano da FCC faz um ângulo de 45° para todos os modelos de cálculo em apreço, apesar de estudos anteriores [10] terem mostrado uma melhoria de desempenho no modelo CNR quando considerados valores de θ diferentes de 45°. Na quantificação de V_{fd} para as vigas em que o sistema de reforço é composto por fibras em diversas orientações (UX, SX, UX) foi apenas considerada a contribuição das fibras dispostas segundo a direcção mais favorável, enquanto nos casos em que o sistema de reforço é dotado de mecanismos especiais de ancoragem (U+) a sua contribuição foi desprezada. Com o objectivo de minorar a influência de dados inconsistentes provenientes das observações experimentais, foram realizadas duas análises de desempenho aos modelos de dimensionamento em estudo, uma considerando a base de dados integral (BDI) e outra considerando uma base de dados condicionada (BDC) sendo os critérios de redução da amostra apresentados nas secções seguintes.

3.1 Apresentação dos resultados obtidos para a BDI

Para cada modelo de dimensionamento descrito, os valores obtidos, V_{fd} , são comparados com $V_{f,exp}$, calculando-se para cada viga um factor de correlação χ correspondente à razão $V_{f,exp}/V_{fd}$. Nas Fig. 4 a 7 apresentam-se os digramas de dispersão (DSP) da relação V_{fd} vs $V_{f,exp}$ e os diagramas “box and whisker plots” (DBP) do parâmetro χ . No diagrama DSP é traçada uma linha a 45° que estabelece a separação entre o domínio da segurança (triângulo inferior) e o das previsões não seguras. Complementarmente, é representada uma recta correspondente a $\chi = 1.5$ como indicador de um comportamento tomado como ideal. O DBP apresenta-se sob a forma de uma caixa cujos limites são o 1º e o 3º quartis (Q_1 , Q_3), sendo esta dividida por uma linha que representa a mediana (MDN). Complementarmente, existem dois eixos que se estendem aos valores máximos e mínimos dos dados, identificando as observações que se consideram discrepantes ou outliers, de acordo com a condição: $X \notin [Q_1 - 1.5 \cdot (Q_3 - Q_1); Q_3 + 1.5 \cdot (Q_3 - Q_1)] \Rightarrow \text{outlier}$.

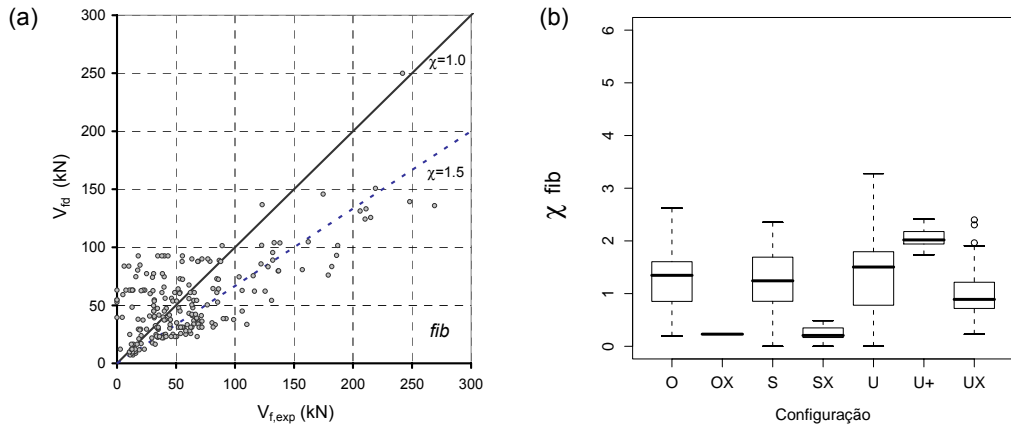


Figura 4: (a) Comparação V_{fd} vs $V_{f,exp}$ (b) Variação de χ no modelo de dimensionamento *fib*

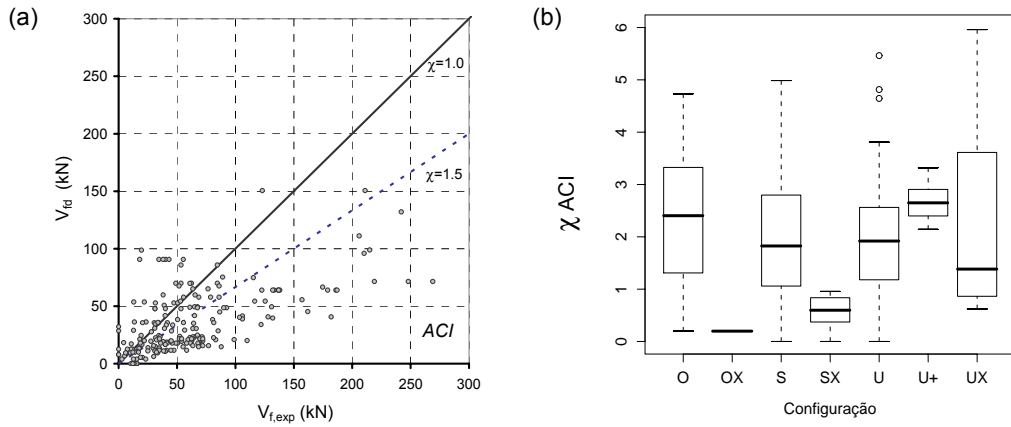


Figura 5: (a) Comparação V_{fd} vs $V_{f,exp}$ (b) Variação de χ no modelo de dimensionamento *ACI*

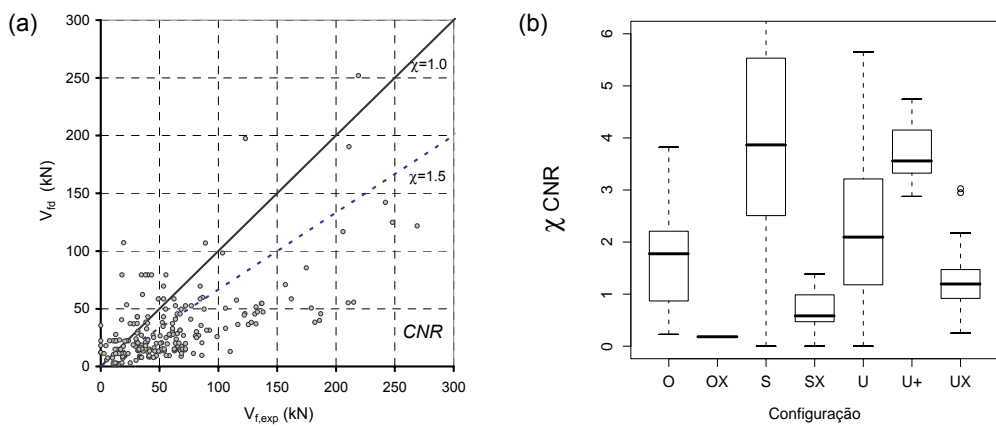


Figura 6: (a) Comparação V_{fd} vs $V_{f,exp}$ (b) Variação de χ no modelo de dimensionamento *CNR*

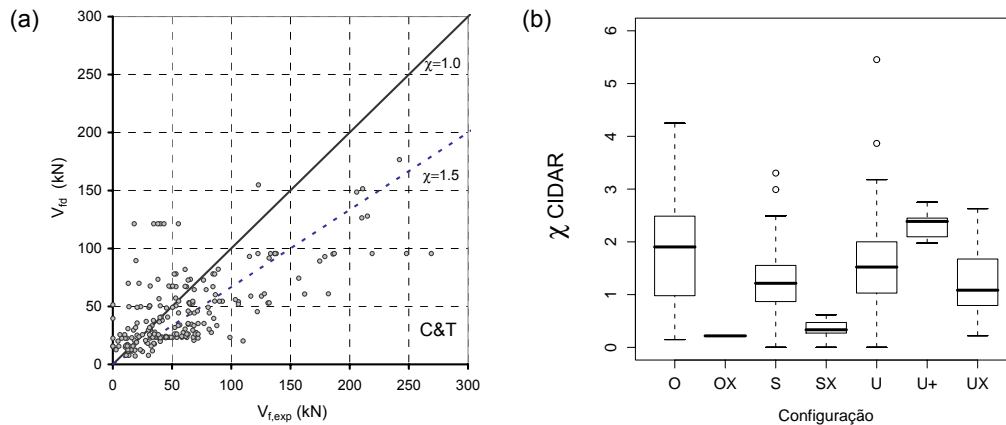


Figura 7:(a) Comparação V_{fd} vs $V_{f,exp}$ (b) Variação de χ no modelo de dimensionamento *CIDAR*

Da análise aos DSP salienta-se a elevada dispersão encontrada em todos os modelos de dimensionamento, principalmente no intervalo $0 < V_{f,exp} < 100$ kN, que corresponde ao grupo de ensaios em que incremento de carga devido à introdução do reforço é menor. Os DBP permitem avaliar a variação de χ para cada um dos tipos de reforço adoptado salientando-se a elevada amplitude de valores encontrada no modelo CNR, em particular para o tipo de reforço aplicado nas faces laterais (S). No Quadro 1 encontram-se resumidas as principais medidas de estatística descritiva referentes ao parâmetro χ que permitem inferir o comportamento das formulações analíticas em apreço. Destes, o valor médio (MED) de χ pode ser tomado como um indicador global de segurança, enquanto o desvio padrão (DVP) e o coeficiente de variação (COV) podem ser tomados como medidas de dispersão, úteis para medir em termos relativos o grau de concentração das amostras em torno da média.

Quadro 1: Medidas de estatística descritiva para a BDI								
χ	MIN	1ºQ	MDN	MED	3ºQ	MAX	DVP	COV
FIB	0	0.73	1.198	1.22	1.718	3.278	0.666	0.546
ACI	0	0.98	1.903	2.017	2.831	5.961	1.255	0.622
CNR	0	1.126	2.108	2.528	3.541	9.261	1.846	0.730
C&T	0	0.875	1.37	1.431	1.962	5.454	0.826	0.577

Dos resultados obtidos observa-se que o modelo de dimensionamento da FIB apresenta, em média, o factor de segurança mais reduzido enquanto que o mais elevado é conseguido pelo CNR. O modelo que apresenta uma melhor correlação entre os valores previstos e os valores experimentais é o FIB com menor COV, enquanto que a maior dispersão é obtida pelo modelo CNR. O modelo C&T, apresentando um χ muito próximo do valor de referência $\chi = 1.5$ e com um COV próximo do mínimo obtido, poderá ser considerado, com base na análise efectuada através das medidas de estatística descritiva, como o que apresenta melhor desempenho. No entanto, na perspectiva da segurança estrutural uma análise baseada exclusivamente nas medidas de estatística descritiva poderá não ser suficientemente esclarecedora. Um sistema de classificação por penalizações afigura-se como mais adequado porquanto se entende que do

ponto de vista da segurança $\chi = 0.5$ é mais gravoso do que $\chi = 2$, facto que não é retratado através das medidas de estatística descritiva. O sistema de classificação implementado baseia-se no proposto por [11], em que um valor de penalização (PEN) é atribuído a cada χ calculado, de acordo com os critérios de classificação referidos no Quadro 2, permitindo desta forma uma aferição do desempenho de cada modelo de dimensionamento na perspectiva da segurança estrutural por somatório das penalizações obtidas. Com este tipo de análise observa-se que o modelo de dimensionamento proposto pela FIB apresenta o pior desempenho, com o maior número de previsões contra a segurança (PCS) (40%), enquanto que o melhor desempenho é obtido pela proposta da CNR com o menor número de PCS (20%); o segundo melhor desempenho é obtido pela formulação ACI com 26% de PCS, observando-se que este modelo apresenta um menor número de resultados excessivamente conservativos quando comparado com a formulação com melhor desempenho.

Quadro 2: Análise de desempenho baseada na segurança estrutural – BDI

χ	Classificação	PEN	FIB	ACI	CNR	C&T
< 0.75	Extr. Perigoso	10	55	32	28	45
0.75 - 1.00	Perigoso	5	30	22	15	23
1.00 - 1.25	Seg. Reduzida	2	26	18	16	30
1.25 - 1.75	Seguro	0	53	26	27	43
1.75 - 3.00	Conservativo	1	47	65	58	65
> 3.00	Extr. Conservativo	2	1	42	68	6
		Σ PEN	801	615	581	702

3.2 Resultados obtidos com uma BDC

A grande dispersão encontrada na análise efectuada sobre uma base de dados com 212 vigas de características quaisquer, evidencia que nenhum dos modelos de dimensionamento em estudo simula com rigor suficiente o comportamento genérico de vigas de betão armado quando reforçadas ao corte com FRP colado externamente. Observa-se ainda que todas as propostas de dimensionamento apresentam um elevado número de previsões de V_f contra a segurança, podendo este facto ficar em parte a dever-se à existência de um número significativo de resultados experimentais em que, sem justificação aparente, o incremento introduzido pelo reforço é nulo ou muito reduzido, perturbando o desempenho de todos os modelos analíticos em estudo.

Atendendo às considerações expostas no ponto anterior, procurou-se aferir a consistência dos resultados obtidos com a BDI retirando da amostra aquelas observações que se entende conduzirem a resultados inconsistentes, adoptando-se como critério de selecção a verificação de uma das condições seguintes: *i)* outliers; *ii)* vigas reforçadas com fibras dispostas sobre duas direcções *iii)* sistemas de reforço dotados de mecanismos especiais de ancoragem U+; *iv)* vigas que apresentam um mau desempenho para todos os modelos de cálculo ($\chi < 0.25$). Com esta operação a BDC representa uma amostra de 130 vigas retiradas da BDI. Os resultados obtidos são apresentados nas Fig. 8 a 11, sob a forma de DSP e de histogramas da frequência relativa de χ sobrepondo-se a estes a curva da distribuição normal da amostra.

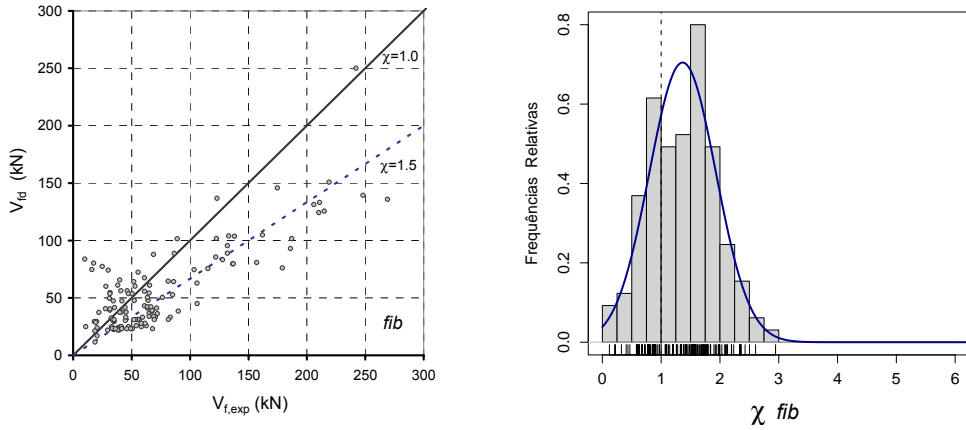


Figura 8: Representação gráfica dos resultados obtidos pelo modelo *fib* aplicado à BDC

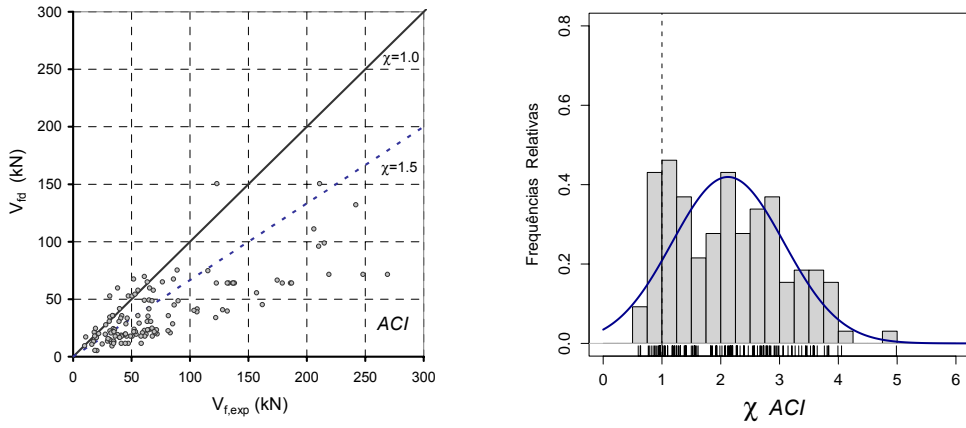


Figura 9: Representação gráfica dos resultados obtidos pelo modelo *ACI* aplicado à BDC

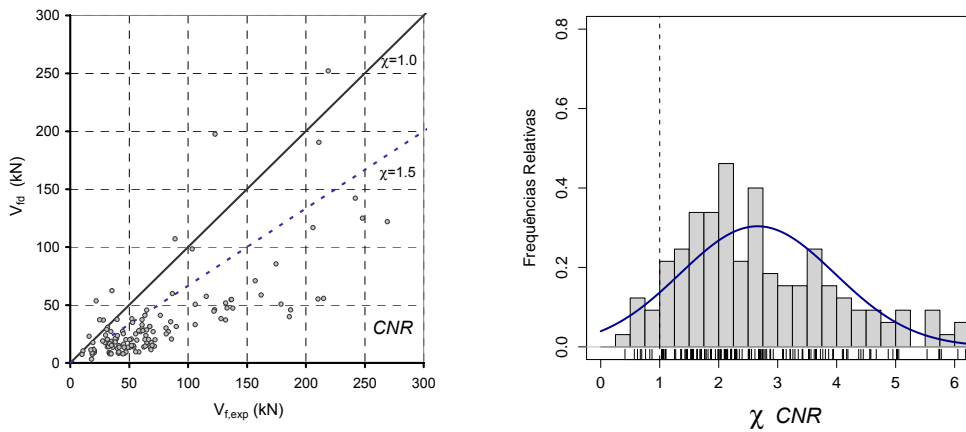


Figura 10: Representação gráfica dos resultados obtidos pelo modelo *CNR* aplicado à BDC

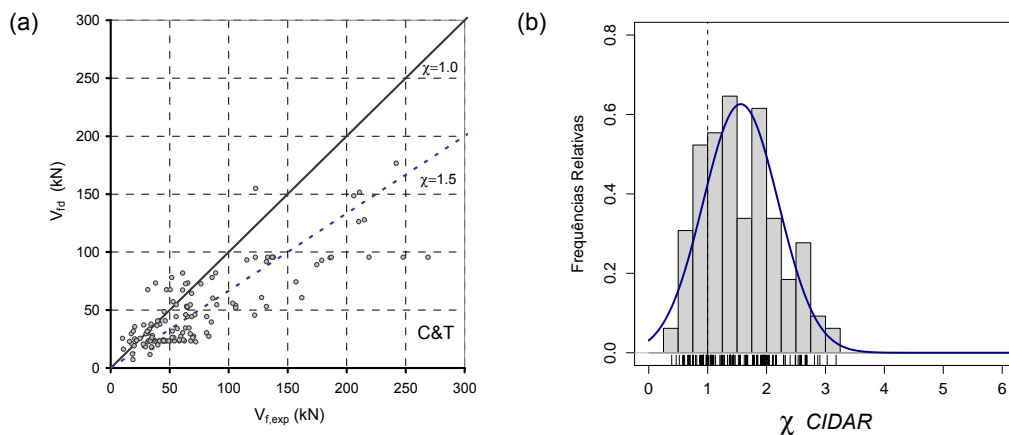


Figura 11: Representação gráfica dos resultados obtidos pelo modelo *CIDAR* aplicado à BDC

Uma análise aos DSP evidencia uma redução da dispersão assim como uma melhoria generalizada do desempenho dos modelos analíticos quando aplicados à BDC, comparativamente com o obtido com a BDI. No Quadro 2 registam-se as medidas de estatística descritiva já utilizadas na análise sobre a BDI e o total de penalizações de cada método. Consta-se que não houve alteração qualitativa na posição relativa entre os parâmetros correspondentes a cada um dos modelos de dimensionamento, quer no que diz respeito às medidas de estatística descritiva quer no que diz respeito à análise de desempenho baseada na segurança estrutural, concluindo-se que os resultados obtidos não são afectados pelo processo de condicionamento aplicado à BDI.

Quadro 2: Resultados obtidos na análise à BDC

χ	MIN	1ºQ	MDN	MED	3ºQ	MAX	DVP	COV	Σ PEN
FIB	0.119	0.889	1.389	1.387	1.76	3.278	0.592	0.427	354
ACI	0.596	1.31	2.141	2.221	2.88	5.463	1.066	0.48	233
CNR	0.411	1.734	2.503	2.886	3.69	8.931	1.653	0.573	219
C&T	0.39	1.051	1.522	1.655	2.032	5.454	0.784	0.474	294

4. CONCLUSÕES

As formulações analíticas analisadas no presente estudo não prevêem, com rigor suficiente, a contribuição dos FRP no reforço ao corte de vigas de betão armado quando estes são colados externamente (técnica EBR). Os modelos de dimensionamento não se afiguram ainda suficientemente robustos para uma aplicação generalizada atendendo ao elevado número de previsões de V_{fd} manifestamente contra a segurança. De entre os modelos estudados, o do FIB apresentou os resultados menos seguros. Este fraco desempenho poderá em parte ficar a dever-se, entre outros, ao facto de a formulação em referência não diferenciar o tipo de reforço em S do tipo de reforço em U, e à incorrecta quantificação da altura do reforço para vigas em que $d \neq d_f$ como é o caso das vigas em T. O melhor desempenho do ponto de vista da

segurança estrutural foi obtido pelo modelo proposto pelo CNR, registando-se que este método é também aquele que apresenta o maior número de resultados extremamente conservativos.

Os resultados dos programas experimentais registados na BD evidenciam que a orientação da fenda de corte poderá ser diferente de 45° (valor de referência sugerido nas formulações analisadas), e depende da percentagem de estribos existentes na viga a reforçar. Este facto tem implicações directas na contribuição dos FRP no reforço ao corte, pelo que a qualidade das previsões destas formulações não poderá ser satisfatória em muitos casos. A utilização de técnicas de “data mining” aplicadas à BD compilada poderá contribuir para evolução das formulações analíticas de previsão da capacidade resistente de vigas de betão armado reforçadas ao corte com FRP colado externamente.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam os seus agradecimentos ao apoio prestado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no projecto POCI/ECM/59033/2004. O primeiro autor agradece a bolsa UMINHO/POCI-59033/BI/05 concedida ao abrigo deste projecto.

6. REFERÊNCIAS

- [1] fib “*Bulletin 14 - Externally Bonded FRP reinforcement for RC structures*” Technical report, 2001, Task Group 9.3 FRP reinforcement for concrete structures.
- [2] ACI 440 - “*440.2R-02: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening of concrete structures*”, 2002, Reported by ACI Committee 440.
- [3] ACI 318 - “*318-02/318R-02: Building code requirements for structural concrete and commentary*”, 2002, Reported by ACI Committee 318.
- [4] CNR-DT200 - “*Guidelines for design, execution and control of strengthening interventions by means of fibre reinforced composites*”, 2004, National Research Council - advisory Committee on technical regulations for constructions, CNR.
- [5] Monti, G., e Liotta, M. - “FRP-strengthening in shear: tests and design equations”. em *7th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRP7RCS)*, 2005, ACI Symposium Publication 230.
- [6] CIDAR - “*Design guideline for RC structures retrofitted with FRP and metal plates: beams and slabs*” Draft 3 - submitted to Standards Australia, 2006, The University of Adelaide.
- [7] Chen, J.F. e Teng, J.G. - “Shear Capacity of FRP Strengthened RC Beams: FRP Rupture” *Journal of Structural Engineering*, ASCE 2003: 129(5): 615–625.
- [8] Chen, J.F. e Teng, J.G. - “Shear Capacity of FRP Strengthened RC Beams: FRP Debonding” *Construction and Building Materials* 2003: 17(1): 27– 41.
- [9] Lima, J.L.T. - “*Avaliação da extensão efectiva em laminados de FRP no reforço ao corte de vigas de betão armado*”, Dissertação de Mestrado (em preparação) 2006, Univ. Minho.
- [10] Barros *et al.* - “Efficacy of CFRP based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams” - *Cement and Concrete Composites* (aceite para publicação), 2006.
- [11] Collins, M.P. - “Evaluation of shear design procedures for concrete structures”, 2001, A Report prepared for the CSA technical committee on reinforced concrete design.