

BE2008 – Encontro Nacional de Betão Estrutural 2008  
Guimarães – 5, 6, 7 de Novembro de 2008

## Novas perspectivas para o desenvolvimento de modelos de dimensionamento ao corte de vigas de betão armado reforçadas com FRP colado externamente



João Lima<sup>1</sup>



Joaquim Barros<sup>2</sup>

### RESUMO

Com o presente artigo pretende-se apresentar uma base de dados (BD) contendo os registos relativos a mais de 250 vigas reforçadas ao corte com materiais poliméricos reforçados com fibras (FRP) e ensaiadas em diversos programas experimentais conduzidos por diferentes autores.

O desempenho dos modelos de dimensionamento propostos pelo *fib*, ACI, e pelas Norma Italiana CNR-DT200 e Norma Australiana CIDAR é aferido comparando o comportamento observado experimentalmente com as previsões obtidas por via analítica. Tendo por base os resultados registados na BD, foi efectuado um estudo paramétrico com o objectivo de avaliar a influência no desempenho dos modelos de dimensionamento de diversos factores não explicitamente considerados nas formulações analíticas que os suportam.

Os resultados são analisados, interpretados e apontadas as limitações encontradas nos modelos de dimensionamento em estudo

### PALAVRAS-CHAVE

Dimensionamento, Reforço, Corte, FRP, Base de Dados

<sup>1</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. [joalima@civil.uminho.pt](mailto:joalima@civil.uminho.pt)

<sup>2</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. [barros@civil.uminho.pt](mailto:barros@civil.uminho.pt)

## **1. INTRODUÇÃO**

O reforço ao corte de vigas de betão armado com FRP tem vindo a ser amplamente estudado nos últimos anos, existindo um conjunto alargado de registos experimentais que atestam a eficácia desta técnica de reforço. Apesar de os resultados obtidos serem de uma forma geral animadores, a aplicação sistematizada desta técnica de reforço depende fundamentalmente de dois factores que poderão condicionar a sua aplicação prática em obras correntes, nomeadamente: *i)* a competitividade económica da técnica de reforço face às metodologias tradicionais de reforço; *ii)* o conhecimento e a confiança dos engenheiros projectistas para conceber, definir e dimensionar sistemas reforço baseados na aplicação de FRP, em detrimento das técnicas de reforço convencionais, já amplamente testadas e implementadas com sucesso. Qualquer um dos dois factores referidos está intimamente relacionado com a existência de manuais de dimensionamento, de natureza prescritiva, que enquadrem o projecto de reforço com FRP. No que diz respeito à competitividade económica da técnica, afigura-se como necessário que os modelos analíticos propostos nos manuais de dimensionamento se encontrem devidamente calibrados e conduzam a dimensionamentos com factores globais de segurança adequados, uma vez que um ligeiro sobredimensionamento do FRP conduz a um elevado incremento no custo global do sistema de reforço. Relativamente à conquista da confiança e da pré-disposição da generalidade dos engenheiros projectistas para conceberem sistemas de reforço baseados na aplicação dos FRP é absolutamente necessário que os modelos de dimensionamento a adoptar se encontrem estabilizados, conduzam a resultados que se encontrem garantidamente pelo lado da segurança, que sejam de aplicação simples e que os mecanismos intervenientes sejam dotados de um significado físico facilmente quantificável.

Actualmente encontram-se disponíveis quatro manuais de dimensionamento com enquadramento regulamentar para o apoio à concepção e dimensionamento de sistemas de reforço ao corte com FRP, designadamente, o “Bulletin 14” emitido pela “*fédération internationale du béton - fib*” [1], o ACI 440.2R-02 [2] emitido pelo “*American Concrete Institute*”, a norma Italiana CNR-DT200 [3], e a proposta de norma Australiana desenvolvida pelo centro de estudos para a inspecção, diagnóstico e reabilitação de infra-estruturas da Universidade de Adelaide - CIDAR [4]. Os dois primeiros constituem documentos de referência no domínio da aplicação dos materiais compósitos no reforço de estruturas de betão armado, com maior divulgação e aplicação prática, tendo sido desenvolvidos com base nas formulações analíticas introduzidas por Triantafyllou [5] e Khalifa *et al.* [6], respectivamente. O DT-200 e o CIDAR são documentos de divulgação e aplicação ainda limitada, mas que contém as formulações analíticas mais recentes, Monti & Liotta [7] e Chen & Teng [8], respectivamente, afigurando-se como oportuno, nesta fase, suscitar a comparação entre os resultados obtidos com cada um dos modelos de dimensionamento propostos.

## **2. BASE DE DADOS COM REGISTOS EXPERIMENTAIS**

No caso do reforço com FRP colado externamente (EBR), a quantidade considerável de artigos científicos publicados permitiu compilar uma base de dados (BD) com registos relativos a mais de 250 vigas ensaiadas em diversos programas experimentais conduzidos por diferentes autores. A utilização de bases de dados (BD) associadas às modernas ferramentas de análise estatística e *data mining* (DM) constitui uma poderosa ferramenta 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 inter-institucional. 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. Procurando avaliar o desempenho das diferentes propostas de dimensionamento apresentadas na secção anterior foi compilada uma ampla base de dados, “*Frp Shear dataBase (FSB)*”, contendo informação relativa a um número alargado de programas experimentais realizados por diversos autores no âmbito da caracterização do comportamento de vigas de betão armado reforçadas com FRP, complementando e ampliando os conjuntos de resultados já colectados por [9] e [10].

A FSB foi concebida de forma a constituir uma ferramenta de trabalho no âmbito da aferição do desempenho das formulações analíticas e dos modelos de dimensionamento de sistemas do reforço ao corte de vigas de betão armado com FRP. Neste contexto, a utilização da FSB permite analisar o comportamento ao corte de vigas de betão armado reforçadas com FRP, considerando uma multiplicidade de factores que condicionam a eficácia dos sistemas de reforço, bem como avaliar, de forma independente, o desempenho de diferentes modelos de dimensionamento propostos, a partir de um amplo conjunto de ensaios já realizados. Complementarmente, o alargado conjunto de resultados experimentais registado estabelece a FSB como suporte privilegiado para um vasto conjunto de análises paramétricas nos domínios da caracterização do comportamento ao corte de vigas de betão armado reforçadas com FRP, a partir de ensaios experimentais já realizados, permitindo que correlações anteriormente estabelecidas sejam ajustadas e/ou validadas. Informação detalhada sobre a informação coligida, principais características da BD e resultados obtidos das análises realizadas pode ser consultada em [11].

Na recolha de dados efectuada procurou-se retratar da forma mais abrangente possível a multiplicidade de situações possíveis no universo do reforço ao corte de vigas de betão armado com FRP, nomeadamente no que diz respeito à geometria da secção reforçada, características do betão, densidade de armadura longitudinal, densidade da armadura específica de esforço transversal, propriedades do FRP e configurações do sistema de reforço. A Fig.1 resume algumas das características principais das vigas constantes da FSB no que diz respeito à secção transversal, configuração e distribuição do sistema de reforço.

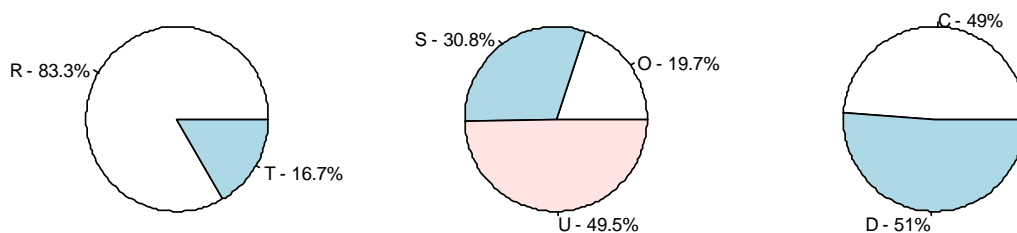


Figura 1. Características gerais da BD: R – secção rectangular ; T – secção em T ; S – FRP nas faces laterais ; U – envolvimento parcial com FRP ; O – envolvimento total com FRP ; C- aplicação de manta contínua; D – aplicação de faixas discretas.

### 3. DESEMPENHO DOS MODELOS DE DIMENSIONAMENTO

O desempenho dos modelos de dimensionamento fib, ACI, CNR e CIDAR (C&T) é avaliado com base nos dados coligidos na FSB, comparando o valor registado experimentalmente para a contribuição do FRP na resistência ao corte da viga reforçada,  $V_{f,exp}$ , com as previsões obtidas por via analítica,  $V_{fd}$ , utilizando os códigos de dimensionamento referidos. Para cada um dos modelos em análise, os valores experimentalmente obtidos,  $V_{f,exp}$ , são comparados com os valores de cálculo determinados,  $V_{fd}$ , calculando-se para cada viga um factor de correlação,  $\chi$ , correspondente à razão  $V_{f,exp} / V_{fd}$ . O valor de  $V_{f,exp}$  é calculado a partir da resistência última da viga reforçada com FRP,  $V_R$ , deduzindo uma parcela equivalente à da resistência última obtido com a viga de referência, a qual estará associada à contribuição do betão,  $V_c$ , e do aço,  $V_s$ , na capacidade resistente global, assumindo a aplicabilidade da sobreposição de efeitos para a contribuição dos mecanismos resistentes:

$$V_{R,ref.} = V_c + V_s ; V_{R,teste} = V_c + V_s + V_f \therefore V_f = V_{R,teste} - V_{R,ref.} \quad (1)$$

Na análise de desempenho efectuada, os resultados calculados com os modelos analíticos referem-se ao valor de cálculo da contribuição do FRP,  $V_{fd}$ , encontrando-se desta forma afectados pelos

respectivos coeficientes parciais de segurança propostos por cada um dos modelos analíticos considerados. Com esta abordagem procura-se aferir, do ponto de vista da aplicação em projecto, o desempenho das formulações apresentadas, o seu grau de fiabilidade, e segurança associada. De forma a permitir uma comparação directa entre as diferentes formulações, foi considerado em todos os cálculos efectuados que  $\theta = 45^\circ$ . De forma a detectar e minorar a influência de resultados inconsistentes na base de dados, foram realizadas diversas análises considerando a totalidade dos resultados e considerando diferentes subconjuntos de dados retirados da FSB, tendo-se verificado que os resultados obtidos seguem a mesma tendência, não havendo uma alteração qualitativa da sua posição relativa [12].

Na Fig.2 representam-se os diagramas de dispersão, DSP, obtidos para cada um dos modelos de dimensionamento em análise, relacionando graficamente  $V_{f,exp}$  com  $V_{fd}$ , os histogramas da frequência relativa de  $\chi$  e os diagramas “box and whisker plots” (DBP) relativos a este parâmetro. O DBP apresenta-se sob a forma de uma caixa cujos limites são o 1º e o 3º quartis (Q1, Q3), 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:  $\chi \notin [Q_1 - 1.5 \cdot (Q_3 - Q_1); 1.5 \cdot (Q_3 - Q_1)] \Rightarrow \text{outlier}$ . Para cada DSP é traçada uma linha a  $45^\circ$ ,  $\chi = 1$ , 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 considerado como ideal. A nuvem de pontos obtidos é ajustada através de uma regressão linear, representada pela recta a tracejado que evidencia a tendência observada, sendo a qualidade do ajuste realizado medida pelo coeficiente de determinação  $R^2$ , apresentado nas figuras.

Da análise aos DSP salienta-se a elevada dispersão encontrada em todos os modelos de dimensionamento, principalmente no intervalo  $0 < V_{f,exp} < 100\text{kN}$ , que corresponde ao grupo de ensaios em que o incremento de carga devido à introdução do reforço é menor. Apesar dispersão verificada, a recta de regressão ajustada permite estabelecer considerações de carácter qualitativo relativamente ao desempenho dos modelos em análise, nomeadamente que os modelos de dimensionamento propostos pelo *fib* e C&T são aqueles proporcionam resultados mais compatíveis com o comportamento teórico admitido com ideal. No caso do modelo de dimensionamento proposto pelo *fib* a recta de regressão (RR) obtida é aproximadamente paralela à de  $\chi = 1.5$ , apresentando no entanto uma tendência de comportamento que é desfavorável à segurança. No modelo C&T observa-se uma menor dispersão de resultados, ( $R^2 = 0.729$ ), apresentando este modelo uma linha de tendência praticamente sobreposta à admitida como ideal. Os modelos de dimensionamento propostos pelo ACI e CNR mostram tendências de comportamento semelhantes, com uma maior dispersão de resultados em torno da RR, e divergindo do comportamento ideal para valores de  $V_{f,exp}$  crescentes.

Uma avaliação de desempenho de carácter quantitativo pode ser feita recorrendo às medidas de estatística descritiva referentes do parâmetro  $\chi$ , apresentadas no Quadro 1. Destas, a média (MED) pode ser tomada 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 FSB.

$\chi$	MIN	1ºQ	MDN	MED	3ºQ	MAX	DVP	COV
<i>fib</i>	0.071	0.868	1.347	1.352	1.745	3.278	0.616	0.456
ACI	0.337	1.197	2.081	2.128	2.831	5.463	1.092	0.513
CNR	0.380	1.658	2.397	2.794	3.654	8.931	1.705	0.610
C&T	0.177	1.010	1.443	1.609	2.011	5.454	0.808	0.502

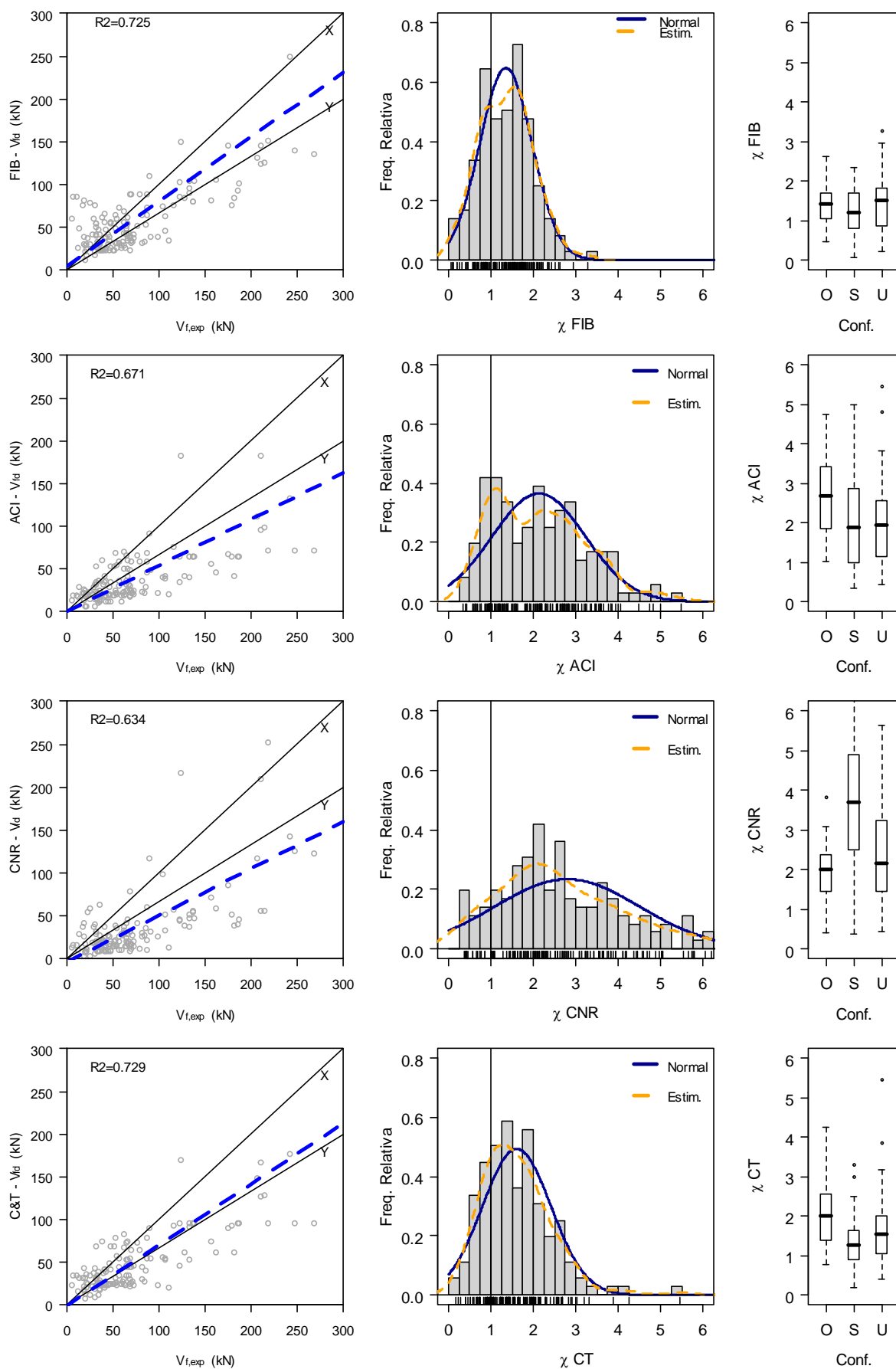


Figura 2. Desempenho dos modelos de dimensionamento com base na FSB

*Novas perspectivas para o desenvolvimento de modelos de dimensionamento ao corte de vigas de betão armado reforçadas com FRP colado externamente*

As análises realizadas com base nas medidas de estatística descritiva (Quadro 1) mostram que o modelo de dimensionamento C&T poderá ser considerado aquele que apresenta melhor desempenho, com o valor de  $\chi$  mais próximo do valor ideal 1.5, e um coeficiente de variação muito próximo do mínimo obtido com as quatro formulações estudadas.

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  $\chi = 2.0$ , facto que as medidas de estatística descritiva não têm em conta. O sistema de classificação implementado baseia-se no proposto por [13], em que um valor de penalização (PEN) é atribuído a cada  $\chi$  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.

Quadro 2 Avaliação de desempenho com base na segurança estrutural - Critérios de penalização.

$\chi = V_{fd} / V_{f,exp}$	Classificação	Penalização
$< 0.75$	Extremamente. Perigoso	10
[0.75-1.00[	Perigoso	5
[1.00-1.25[	Segurança Reduzida	2
[1.25-1.75[	Seguro	0
[1.75-3.00[	Conservativo	1
$\geq 3.00$	Extremamente. Conservativo	2

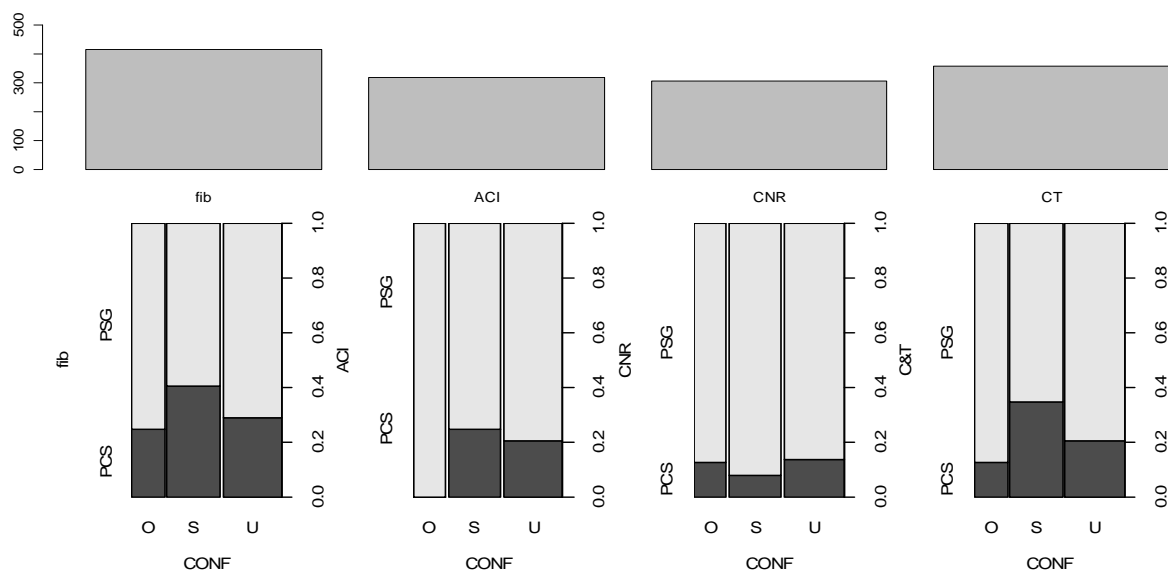


Figura 3. Análise desempenho com base em critérios de fiabilidade estrutural.

Com base nos resultados obtidos é possível observar na Fig. 3 que o modelo de dimensionamento proposto pelo *fib* é o que manifesta o pior desempenho, dado ser o que apresenta maior número de pontos de penalização atribuídos e o maior número de previsões contra a segurança (PCS). Em oposição, modelo de dimensionamento proposto pelo CNR apresenta, com base exclusivamente nos critérios de fiabilidade estrutural, o melhor desempenho, com o menor número de penalizações atribuídas e o menor número de previsões contra a segurança. Observa-se contudo que o número de penalizações atribuídas ao modelo CNR é apenas marginalmente inferior às atribuídas ao modelo ACI, verificando-se também que o número de previsões contra a segurança obtidas com o modelo CNR é significativamente inferior ao obtido com o modelo ACI. Este facto evidencia que o modelo CNR é penalizado pelo elevado número de resultados excessivamente conservativos que apresenta, em particular no caso dos sistemas de reforço do tipo S. O modelo de dimensionamento proposto pelo ACI pode ser considerado como aquele que apresenta o segundo melhor desempenho, com resultados

muito próximos do CNR quanto ao número de penalizações atribuídas. De todos os modelos de dimensionamento estudados é o único que consegue apresentar previsões exclusivamente pelo lado da segurança para sistemas de reforço do tipo O. A proposta de dimensionamento C&T apresenta critérios de desempenho compreendidos entre os do modelo *fib* e os do modelo ACI, podendo ser classificada como aquela que apresenta o 3º melhor desempenho.

#### 4. FACTORES QUE CONDICIONAM O DESEMPENHO – ESTUDO PARAMÉTRICO

Com base nos resultados obtidos na secção anterior será possível estabelecer que os modelos de dimensionamento analisados no presente estudo não prevêm, com rigor suficiente, a contribuição dos FRP no reforço ao corte de vigas de betão armado quando estes são colados externamente, de acordo com a técnica EBR. De uma forma geral, os modelos de dimensionamento não se afiguram ainda suficientemente robustos para uma aplicação generalizada atendendo ao elevado número de previsões de  $\chi$  manifestamente contra a segurança. O fraco desempenho observado em todos os modelos de dimensionamento em análise indicia que o peso relativo dos parâmetros considerados nas formulações analíticas se encontra deficientemente calibrado, e que a influência de outros factores, não explicitamente considerados na quantificação da capacidade resistente da viga reforçada, não possa ser desprezada, em particular os mecanismos de interacção entre as armaduras convencionais e os sistemas de reforço com FRP. Os dados registados na FSB permitem estabelecer relações entre parâmetros, de forma a identificar e relacionar mecanismos e interacções que afectem o desempenho dos modelos de dimensionamento analisados.

A configuração do reforço e sua forma de aplicação é um dos factores que maior influência têm na eficácia dos sistemas de reforço ao corte com FRP quando aplicados segundo a técnica EBR. De facto, verifica-se que cada um dos códigos de dimensionamento em análise trata de forma diferenciada a influência da configuração do sistema de reforço na quantificação da parcela  $V_f$ .

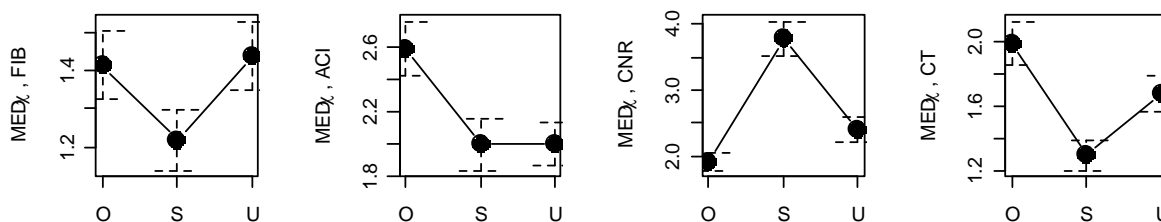
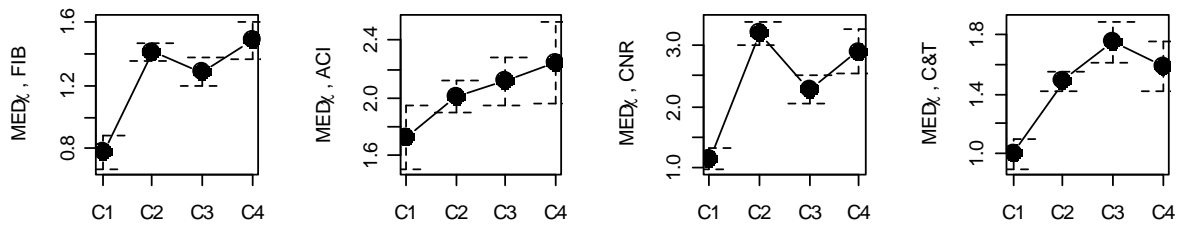


Figura 4. Variação do parâmetro  $\chi$  em função da configuração do sistema de reforço.

Na Fig. 4 observa-se que no caso do modelo de dimensionamento *fib* as vigas reforçadas com sistemas do tipo S manifestam um desempenho francamente inferior ao obtido em vigas reforçadas com sistemas do tipo O ou U. Este tipo de comportamento indicia que na quantificação de  $\varepsilon_{fe}$  deve ser considerado explicitamente o caso em que o sistema de reforço é do tipo S, porquanto o comprimento efectivo de aderência do FRP será necessariamente diferente daquele obtido considerando um sistema de reforço U. No caso do modelo de dimensionamento proposto pelo ACI observa-se na figura que as vigas reforçadas com sistemas do tipo O apresentam um valor médio do parâmetro  $\chi$  significativamente superior ao obtido no casos dos sistemas de reforço U e S. Este comportamento indicia que a limitação da extensão efectiva imposta pelo ACI em que  $\varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75\varepsilon_{fu}$  poderá ser demasiado severa conduzindo a resultados excessivamente pelo lado da segurança. O modelo de dimensionamento proposto pelo CNR para sistemas de reforço do tipo S não se afigura bem ajustado aos resultados experimentalmente observados, conduzindo a resultados excessivamente pelo lado da segurança, com valores médios de  $\chi$  francamente superiores aqueles que se obtêm nas vigas reforçadas com sistemas do tipo O e U. O modelo de dimensionamento C&T apresenta o pior desempenho nos sistemas de reforço do tipo S. O comportamento observado sugere a possibilidade de se melhorar o modelo proposto através de um ajuste na quantificação do parâmetro  $L_{max}$  correspondente ao máximo comprimento de amarração disponível na viga a reforçar.

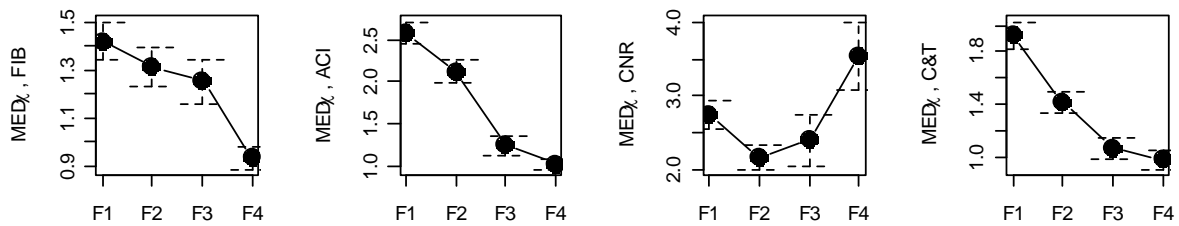
Novas perspectivas para o desenvolvimento de modelos de dimensionamento ao corte de vigas de betão armado reforçadas com FRP colado externamente



C1 se  $f_{ck} \in [10,20[$ ; C2 se  $f_{ck} \in [20,30[$ ; C3 se  $f_{ck} \in [30,50[$ ; C4 se  $f_{ck} > 50$  (MPa)

Figura 5. Variação do parâmetro  $\chi$  em função da configuração da classe de resistência do betão

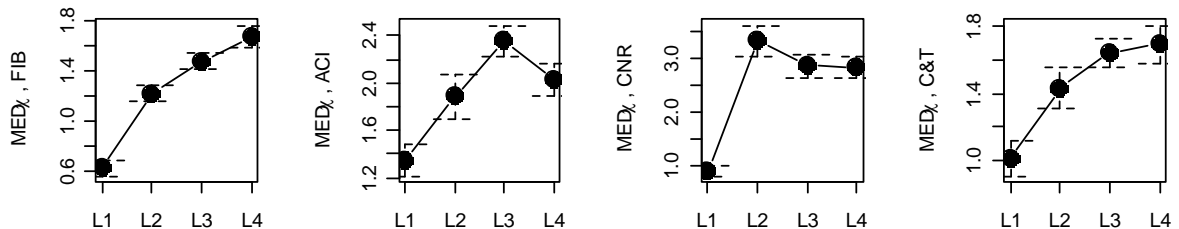
A Fig. 5 representa a variação do valor médio de  $\chi$  em função das classes de resistência do betão C1 a C4 definidas. De uma forma geral, observa-se que todos os modelos de dimensionamento em estudo apresentam uma melhoria do desempenho com o aumento  $f_{ck}$ , sendo a proposta do ACI aquela que apresenta uma correlação mais pronunciada entre o aumento da classe de resistência do betão e a melhoria do desempenho do modelo de dimensionamento. Os restantes modelos de dimensionamento apresentam comportamentos semelhantes entre si, com um desempenho muito fraco em betões com baixas resistências (C1:  $f_{ck} \in [10,20[$ ), melhorando com o aumento da resistência à compressão do betão. Este tipo de comportamento indicia que os modelos *fib*, CNR e C&T não se encontram devidamente calibrados para o reforço com FRP colado externamente em vigas cujo betão apresente uma resistência à compressão inferior a 20 MPa.



F1 se  $\rho_f < 0.001$ ; F2 se  $\rho_f \in [0.001,0.002[$ ; F3 se  $\rho_f \in [0.002,0.004[$ ; F4 se  $\rho_f > 0.004$

Figura 6. Variação do parâmetro  $\chi$  em função da percentagem de reforço com FRP

Na Fig. 6 representa-se a variação do valor médio de  $\chi$  em função da percentagem de reforço com FRP,  $\rho_f$ . Apesar de todos os modelos de dimensionamento em análise considerarem a influência de  $\rho_f$  na quantificação da contribuição do reforço na resistência ao corte da viga reforçada, verifica-se que o desempenho observado não é independente deste parâmetro. De uma forma geral, os modelos de dimensionamento *fib*, ACI e C&T apresentam uma tendência para a redução do parâmetro  $\chi$  com o aumento de  $\rho_f$ .



L1 se  $\rho_{sl} < \frac{1}{3}\rho_{sl,max}$ ; L2 se  $\rho_{sl} \in [\frac{1}{3}, \frac{2}{3}]\rho_{sl,max}$ ; L3 se  $\rho_{sl} \in [\frac{2}{3}, 1]\rho_{sl,max}$ ; L4 se  $\rho_{sl} > \rho_{sl,max}$ ;  $\rho_{sl,max} = 0.04$ ;

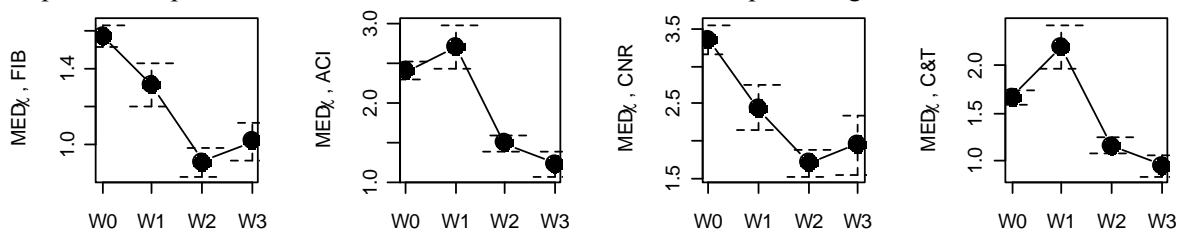
Figura 7. Variação do parâmetro  $\chi$  em função da percentagem de armadura longitudinal

A Fig. 7 mostra a influência da densidade de armadura longitudinal no desempenho dos modelos analíticos considerados. Apesar de nenhuma das formulações analíticas em estudo considerar explicitamente a influência de  $\rho_{sl}$  na quantificação de  $V_f$ , os resultados obtidos sugerem que tal



parâmetro não possa ser desprezado, observando-se na figura uma tendência generalizada para o parâmetro  $\chi$  apresentar valores mais elevados em vigas com densidades superiores de armadura longitudinal.

A influência da armadura específica de esforço transversal no desempenho dos modelos de dimensionamento em análise é representada na Fig. 8, verificando-se uma tendência generalizada para um pior desempenho dos modelos analíticos com o aumento da percentagem de estribos.



W0 se  $\rho_{sw} = 0$ ; W1 se  $\rho_{sw} \in ]0, \rho_{sw, \min}]$ ; W2 se  $\rho_{sw} \in [1, 4[\rho_{sw, \min}]$ ; W3 se  $\rho_{sw} \geq 4 \times \rho_{sw, \min}$ ;  $\rho_{sw, \min} = (0.08\sqrt{f_{ck}}) / f_{yk}$

Figura 8. Variação do parâmetro  $\chi$  em função da percentagem de armadura transversal

O fraco desempenho observado nas vigas dotadas de armadura de esforço transversal, em particular quando  $\rho_{sw} > \rho_{sw, \min}$  poder-se-á dever ao facto de a grande maioria dos ensaios que serviram de base à calibração das formulações analíticas terem sido realizados em vigas sem estribos ou com armadura transversal inferior à mínima. Por outro lado, os resultados dos programas experimentais registados na FSB evidenciam que a orientação da fenda crítica de corte,  $\theta_{cr}$ , poderá ser diferente do valor de referência sugerido nas formulações analisadas,  $45^\circ$ , e que  $\theta_{cr}$  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 interacção entre as armaduras convencionais de esforço transversal e a eficácia dos sistemas de reforço com FRP têm vindo a ser estudada por diversos autores, quer a nível do reforço à flexão, quer ao nível do reforço ao corte, sendo possível estabelecer que condiciona de forma significativa a eficácia da técnica de reforço com FRP, pelo que a influência deste parâmetro deverá ser considerada nas formulações analíticas. Acresce que os modelos de dimensionamento em análise determinam a capacidade resistente da viga reforçada com base num simples princípio de sobreposição de efeitos, em que  $V_r = V_c + V_s + V_f$ , admitindo que a presença do FRP não interfere com a contribuição de cada uma das parcelas  $V_c$  e  $V_s$  avaliadas de forma independente e somadas. No caso das vigas reforçadas com FRP, o comportamento frágil que este sistema de reforço manifesta não é, em muitos casos, compatível com a deformação tangencial necessária para mobilizar a plastificação dos estribos, pelo que a contribuição de  $V_s$  numa viga reforçada com FRP colado externamente poderá ser significativamente inferior àquela que se verifica na mesma viga apenas dotada de armadura convencional.

## 5. CONCLUSÕES

Na sequência de uma extensa revisão bibliográfica relativa ao reforço ao corte de vigas de betão armado com FRP colado externamente foi compilada uma base de dados contendo mais de 250 registos experimentais publicados por diversos autores. Os dados coligidos permitiram desenvolver diferentes tipos de análises de desempenho aos modelos de dimensionamento actualmente disponíveis, verificando-se que nenhum destes prevê com rigor suficiente a contribuição do FRP na capacidade resistente da viga reforçada. Os resultados obtidos evidenciam que nenhum dos modelos em estudo se encontra ainda devidamente calibrado para a aplicação generalizada em projecto, atendendo ao elevado número de previsões de  $V_{fd}$  manifestamente contra a segurança. A influência de alguns parâmetros não explicitamente considerados nos modelos analíticos foi avaliada, demonstrando-se que o desempenho dos modelos de dimensionamento é condicionado por factores como a percentagem de

armaduras longitudinais ou a existência de armadura específica de esforço transversal. O estudo paramétrico desenvolvido permitiu ainda estabelecer algumas limitações na aplicabilidade dos modelos de dimensionamento propostos e verificar que existem parâmetros que não se encontram devidamente calibrados e que conduzem a um deficiente desempenho na previsão da contribuição de FRP na resistência ao corte de vigas de betão armado.

## **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.

## **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 - Reported by ACI Committee 440, 2002.
- [3] CNR-DT200 - Guidelines for design, execution and control of strengthening interventions by means of fibre reinforced composites". National Research Council, CNR, 2004.
- [4] CIDAR - Design guideline for RC structures retrofitted with FRP and metal plates: beams and slabs". Draft 3 - Submitted to Standards Australia, The University of Adelaide - 2006.
- [5] Triantafillou, T. (1998). - Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites." *ACI Structural Journal*, 95(2), 107-115.
- [6] Khalifa, A. [et al.] (1998) - Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of RC flexural members." *Journal of Composites for Construction*, 2(4), 195-202.
- [7] Monti, G.; Liotta, M.A. (2007). "Tests and design equations for FRP-strengthening in shear." *Construction and Building Materials*, 21, 799-809.
- [8] Chen, J.; Teng, J. (2003) - Shear capacity of fibre-reinforced polymer-strengthened reinforced concrete beams: fibre reinforced polymer rupture. *Journal of Structural Engineering*, 129(5), 615-625.
- [9] Bousselham, A.; Chaallal, O. - Shear strengthening reinforced concrete beams with fiber reinforced polymer: Assessment of influencing parameters and required research. *ACI Structural Journal*, 101(2):219-227, 2004.
- [10] Aprile, A., Benedetti, A. - Coupled flexural-shear design of R/C beams strengthened with FRP". - *Composites Part B: Engineering*, 35(1):1-73, 2004.
- [11] Research Group on Composite Materials for Structural Strengthening and Fiber Reinforced Concrete Webpage – disponível em <URL:<http://www.civil.uminho.pt/composites/frpsheardatabase>>.
- [12] Lima, J.; Barros, J. - Design models for shear strengthening of RC beams with externally bonded FRP composites: A statistical versus reliability approach. *Proceedings of the FRPRCS-8*, 2007.
- [13] Collins, M.P. - Evaluation of shear design procedures for concrete structures: A Report prepared for the CSA technical committee on reinforced concrete design. Technical report, CSA, 2001.