

AVALIAÇÃO DE MODELOS DE DIMENSIONAMENTO PARA O REFORÇO À FLEXÃO COM CFRP (FIB VS ACI)

Azevedo, D.M.M.¹; Juvandes, L.F.P.²; Henriques, A.A.R.²

¹LABEST, Laboratório de Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural, DEC, FEUP

²LABEST, Laboratório de Tecnologia do Betão e do Comportamento Estrutural, DEC, FEUP



RESUMO

Este artigo tem como objectivos principais a apreciação dos métodos de cálculo expostos nas propostas normativas da FIB Bulletin 14 (2001) e ACI 440.2R-02 (2002) para a verificação da segurança à flexão de estruturas de betão armado reforçadas com sistemas compostos de CFRP e a relevância de alguns parâmetros para o dimensionamento. Pretende-se avaliar se, para uma dada base de dados de ensaios experimentais, os resultados obtidos respeitam as condições de segurança em relação ao estado limite último (ELU) segundo as normas referidas e identificar, entre os diversos métodos propostos, os que melhor se adequam a este tipo de estruturas. Para a análise comparativa e paramétrica que é feita, recorreu-se a uma vasta gama de modelos experimentais seleccionados com base nos três critérios seguintes: (i) Tipo de elemento estrutural: Laje e Viga; (ii) Técnica de reforço: EBR e NSM; (iii) Sistema de reforço: pré-fabricado (laminado ou varão) e moldado in situ (manta).

1- INTRODUÇÃO

As características dos polímeros reforçados com fibras (FRP), as particularidades do comportamento de elementos reforçados com sistemas de FRP e as questões respeitantes à utilização da técnica de colagem tornam urgente estabelecer regras específicas para a aplicação destes sistemas de reforço na construção civil. Foram publicados manuais com o objectivo principal de definir disposições para dimensionamento de reforços com FRP de acordo com o formato actual de cálculo de estruturas de betão armado e pré-esforçado. Entre essas publicações, podem-se referir o bulletin 14 da FIB (FIB, 2001) e a do ACI 440.2R-02 (ACI, 2002).

Este trabalho tem como objectivos avaliar os princípios de cálculo sugeridos nestes manuais, para a aplicação da técnica de reforço estrutural por colagem exterior de sistemas unidireccionais de FRP (EBR - Externally Bonded Reinforcement), assim como aferir da sua adequabilidade a uma técnica de reforço mais recente que consiste na inserção dos elementos de reforço na camada de recobrimento (NSM - Near Surface Mounted). Neste artigo, é apresentada uma análise comparativa entre os resultados de uma gama de campanhas experimentais e os esperados por via analítica, obedecendo estes aos critérios propostos. A investigação foi levada a cabo no LABEST do Departamento de Engenharia Civil da FEUP (Azevedo 2008).

2- REFORÇO À FLEXÃO COM FRP

2.1 - Considerações gerais

O cálculo é baseado em modelos analíticos ou semi-empíricos e como hipóteses de base considera-se que: i) é válido o princípio de Euler-Bernoulli; ii) admite-se a perfeita compatibilidade de deformações entre materiais, impondo um diagrama de extensões lineares ao longo de toda a secção reforçada; iii) em qualquer instante é satisfeito o princípio de equilíbrio de forças na secção; iv) a resistência à tracção do betão é desprezável; v) o FRP apresenta um comportamento linear elástico até à rotura. Partindo destes princípios e considerando o estado inicial de tensão e de deformação do elemento antes da aplicação do reforço, assim como as leis constitutivas dos materiais, será possível prever o comportamento de uma estrutura de betão reforçada à flexão com FRP em relação aos estados limite relevantes nesta situação (último - ELU e serviço - ELS). Nesta exposição, considera-se somente a análise ao estado limite último (ELU) e assegura-se a não existência de rotura por esforço transversal. Neste caso, o momento resistente M_{Rd} é traduzido nas Eq. (1) e (2) para a FIB (2001) e ACI (2002) respectivamente.

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{syd} \cdot (d - \frac{\lambda}{2} \cdot x) + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot (h - \frac{\lambda}{2} \cdot x) \quad (1)$$

$$M_{Rd} = A_s \cdot f_{syd} \cdot (d - \frac{\beta_1}{2} \cdot x) + \psi_f \cdot A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot (h - \frac{\beta_1}{2} \cdot x) \quad (2)$$

com λ e β_1 iguais a 0.80.

O ACI introduz um parâmetro “ ψ_f ”, como coeficiente de minoração da contribuição do FRP na resistência à flexão, por se tratar de uma técnica recente.

2.2 - Modos de ruína

O colapso de uma estrutura reforçada à flexão com FRP pode ocorrer por: (i) esmagamento do betão antes da cedência da armadura; (ii) cedência da armadura seguida da rotura do FRP; (iii) cedência da armadura com esmagamento do betão; (iv) esmagamento do betão coincidente com

cedência da armadura e rotura do FRP; (v) delaminação do substrato de betão por corte/tracção; (vi) rotura nas interfaces betão-adesivo ou adesivo-FRP. Os casos i) a iv), constituem o grupo dos modos onde a secção apresenta perfeita ligação do compósito ao betão até à ruína (ruínas clássicas - RC) e, os restantes, definem o grupo das ruínas por destacamento prematuro do FRP (ruínas prematuras - RP) (Juvandes, 1999).

Impondo um dos modos de ruína do primeiro grupo, através da limitação da extensão no material condicionante, é possível determinar por equilíbrio a posição do eixo neutro e obter a extensão efectiva no compósito, as extensões e as tensões na armadura interna e no FRP. No entanto, no cálculo é necessário considerar a hipótese de ocorrência de ruínas prematuras características em estruturas reforçadas à flexão por EBR. Devido à dificuldade em detectá-las, a informação actual sobre o estabelecimento de critérios de verificação de segurança é ainda reduzida. Uma das hipóteses consiste na limitação da deformação do FRP.

2.3 - Deformação máxima do FRP

Antes de se proceder à análise comparativa e paramétrica entre os resultados experimentais e os estimados pelos documentos da FIB (2001) e ACI (2002), torna-se oportuno expor o modo como cada um desses documentos trata o problema dos modos de ruína por perda de aderência, na análise ao ELU. De um modo geral, a literatura actual aconselha sobretudo o controlo do nível de deformação do CFRP na secção crítica, para além de outras verificações de segurança pontuais como a zona de amarração, o espaçamento entre fendas e a tensão máxima de corte na interface betão/compósito.

As máximas deformações dos diferentes materiais (betão, aço e FRP) condicionam a rotura e, terminantemente, o valor do momento flector resistente de

um elemento estrutural. O ACI (2002) recomenda um critério de cálculo através do qual sugere a limitação da extensão máxima no compósito (ϵ_{fd}), pela adopção de um coeficiente k_m , como se pode observar na Eq. (3). A Eq. (4) evidencia que k_m é função da espessura (t_f), do módulo de elasticidade (E_f), e do número de camadas do compósito.

$$\epsilon_{fd} = k_m \cdot \epsilon_{fk} \quad (3)$$

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60 \cdot \epsilon_{fk}} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot E_f \cdot t_f}{360000}\right) \leq 0.90 & \text{se } n \cdot E_f \cdot t_f \leq 180000 \\ \frac{1}{60 \cdot \epsilon_{fk}} \cdot \left(1 - \frac{90000}{n \cdot E_f \cdot t_f}\right) \leq 0.90 & \text{se } n \cdot E_f \cdot t_f > 180000 \end{cases} \quad (4)$$

O documento da FIB (2001), por seu lado, não impõe uma restrição específica à deformação do compósito, mas um conjunto de condições mais complexas para controlo das ruínas prematuras (proposta de 3 modelos de análise), embora reconheça que o FRP deva obedecer, na secção crítica das zonas afastadas da ancoragem, à Eq. (5):

$$\epsilon_{f \min} \leq \epsilon_f \leq \epsilon_{fd} \quad (5)$$

em que ($\epsilon_{f \min}$) depende de critérios de ductilidade.

Refira-se, ainda, o estudo de Rostasy et al. (1998) que recomenda a limitação do valor máximo da extensão no compósito ao menor valor das condições expressas na Eq. (6). Como geralmente é a última equação a condicionante, admite-se neste trabalho que a condição se reduz à expressão indicada na Eq. (7), com a introdução do coeficiente (k) de valor igual a (0.50). Para simplificar, ao longo deste artigo, este critério será mencionado como “critério de Rostasy” (sigla R).

$$\epsilon_{fd} = \text{mínimo} \begin{cases} \epsilon_{fd} \leq 5 \cdot \epsilon_{sy} \\ \epsilon_{fd} \leq 0.50 \cdot \epsilon_{fk} \end{cases} \quad (6)$$

Admite-se que:

$$\epsilon_{fd} \leq k \cdot \epsilon_{fk} \quad (7)$$

Qualquer uma destas propostas simples tem carácter empírico, não contempla informações específicas do substrato a que o reforço adere e resultam de calibrações de bases de dados experimentais.

De forma a perceber-se a importância dos parâmetros (k_m) e (k) neste estudo, na Fig. 1 ilustram-se as curvas de variação dos mesmos (curvas ACI e R) com a rigidez unitária do reforço ($n_f \cdot t_f \cdot E_f$), por unidade de largura do FRP, para três hipóteses de compósitos (tipo manta ou laminado), um com extensão última (ϵ_{fk}) de 10‰, outro de 15‰ e um último de 20‰ (procuram traduzir a envolvente possível dos sistemas FRP comerciais mais correntes). Para qualquer outro compósito com extensão compreendida entre os valores anteriores (10‰ a 20‰), o correspondente parâmetro (k_m) estará na zona a tracejado do gráfico, identificada como critério do ACI.

Em oposição, o parâmetro (k) do critério Rostasy (R) permanece constante e igual a (0.50), independentemente do tipo de FRP (a menos das condicionantes descritas na Eq. (6)). As curvas de variação da extensão máxima do FRP (ϵ_{fd}) para os três compósitos tipo, segundo as recomendações do ACI (curvas ACI) e do critério de Rostasy (curvas R), estão representadas na Fig. 1.

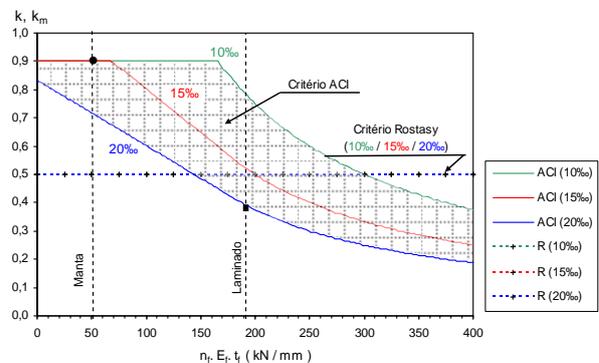


Fig. 1 - Variação dos parâmetros k_m e k segundo o ACI e Rostasy (R)

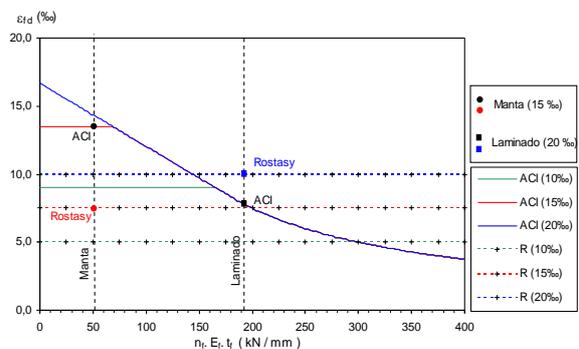


Fig. 2 - Variação da extensão máxima (ϵ_{fd}) admissível do FRP, segundo o ACI e Rostasy (R)

Da análise da Fig. 1, verifica-se que o aumento da rigidez unitária de um compósito provoca uma diminuição do valor do (k_m) na sua curva de referência, com efeito mais agravado quanto maior for o valor da extensão última do FRP (caso da curva que traduz o compósito com $\epsilon_{fk} = 20\%$). Consequentemente, há uma diminuição da extensão eficaz de cálculo (ϵ_{fd}) do FRP (ilustrado na Fig. 2). Em contrapartida, o critério de Rostasy propõe, no cálculo ao ELU, o mesmo valor de rendimento máximo para qualquer dos três casos de CFRP, isto é, o valor $0.50 \cdot \epsilon_{fk}$.

3- PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para a análise comparativa e paramétrica feita neste trabalho, recorreu-se a 61 modelos experimentais (Azevedo, 2008) seleccionados com base nos três critérios seguintes:

- (i) Tipo de elemento estrutural: Laje e Viga
- (ii) Técnica de reforço: EBR e NSM
- (iii) Sistema de reforço: pré-fabricado (Laminado ou Varão) e moldado *in situ* (Manta).

Na Tabela 1 resumem-se os modos de ruína observados, tendo em linha de conta, para a distribuição dos 61 modelos, critérios relacionados com o tipo de elemento estrutural, a técnica de reforço e a existência (c.m.f.) ou não de mecanismos

exteriores de fixação (s.m.f.).

Tabela 1 - Modos de ruína observados

Modelos Exp.		Ruína		
Tipo	Nº	Modo	Nº	Peso na Amostra (%)
Total	61	RC	17	28
		RP	44	72
Lajes (EBR)	14	RC	4	29
		RP	10	71
Vigas	47	RC	13	28
		RP	34	72
Vigas (EBR) (s.m.f.)	19	RP	14	74
Vigas (EBR) (c.m.f.)	17	RP	13	76
Vigas NSM	11	RP	7	64

s.m.f. – sem mecanismo de fixação; c.m.f. - com mecanismo de fixação.

Na Fig. 3, expõem-se os 61 modelos distribuídos com os mesmos critérios usados na Tabela 1, ilustrando-se os modos de ruína tipo (RC – Clássico e RP – Prematuro) e o nível de deformação atingido no momento da rotura. Esta figura mostra que cerca de 2/3 dos modelos apresentam ruína prematura, evidencia que os modelos de laje EBR apresentam valores de (ϵ_{exp}) maiores que os modelos de viga reforçados pela mesma técnica e que as vigas reforçadas pela técnica de NSM são aquelas em que o sistema CFRP mais se deforma antes de ruir.

Na Tabela 2, resumem-se os níveis de deformação no sistema compósito de CFRP, observados nos 61 modelos,

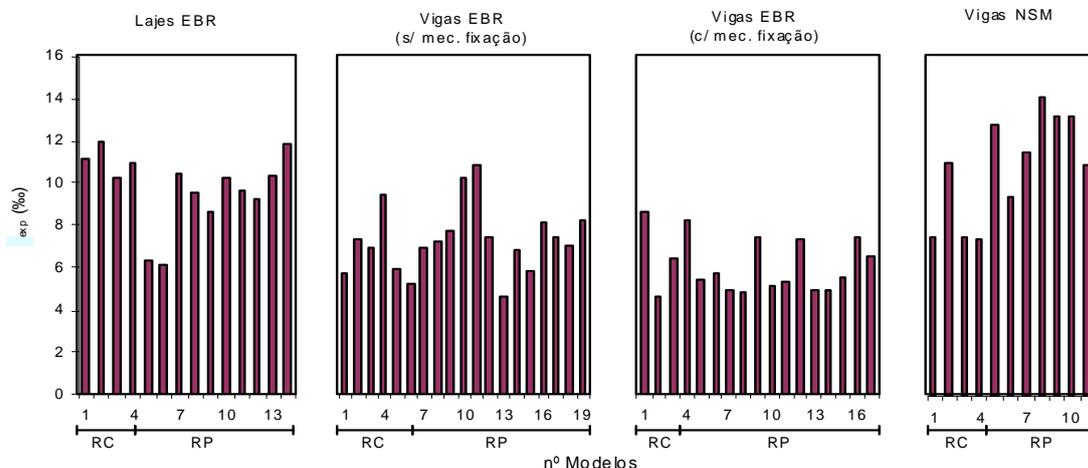


Fig. 3 – Modos de ruína e extensão última registada no FRP (61 modelos).

expostos em termos do valor médio (Média), do desvio padrão (DP) e do coeficiente de variação (CV) da extensão última (ε_{exp}), por modo de ruína tipo.

Tabela 2 - Modos de ruína e níveis de deformação nos sistemas de CFRP

Modelos Exp.		Modo de Ruína	ε_{exp}		
Tipo	Nº		Média (%)	DP (%)	CV (%)
Lajes (EBR)	14	RC	11,09	0,70	6,3
		RP	9,23	1,80	19,6
Vigas (EBR)	36	RC	6,85	1,49	21,7
		RP	6,47	1,57	24,3
Vigas (NSM)	11	RC	8,06	1,71	21,3
		RP	11,79	1,58	13,4
Vigas (EBR) (s.m.f.)	19	RC	6,87	1,43	20,8
		RP	7,24	1,64	22,7
Vigas (EBR) (c.m.f.)	17	RC	6,83	1,79	26,2
		RP	5,64	0,98	17,5

s.m.f. – sem mecanismo de fixação; c.m.f. - com mecanismo de fixação.

A análise da tabela e figura reforça a ideia de que existe grande dispersão de resultados em torno do valor médio da deformação do CFRP, traduzido pelo valor elevado do coeficiente de variação (coluna do CV) observado nesta campanha de ensaios. Este facto está visível na distribuição gráfica das deformações registadas experimentalmente (ε_{exp}) ilustrada na Fig. 3. No caso das lajes, pelo facto do efeito de corte ser pouco pronunciado nestes modelos, a deformação no CFRP apresenta valores elevados ($\varepsilon_{med} \approx 11\%$), sobretudo quando a ruína é controlada pelo modo clássico (RC). Não obstante, saliente-se os bons resultados obtidos por esses modelos ($\varepsilon_{med} \approx 9\%$), mesmo em situações de ruínas prematuras (RP).

Mais uma vez se reforça a opinião comum a vários autores (Juvandes, 1999; Matthys, 2000; Brosens, 2001; FIB, 2001; ACI, 2002; Travassos, 2005; Silva, 2009) de que nos modelos de viga se desenvolvem deformações no CFRP inferiores às das lajes, ao contrário do observado no desempenho indiferente do reforço com ou sem aplicação de mecanismos exteriores de fixação do compósito ao betão ($\varepsilon_{med} \approx 5$ a 7%). Segundo Silva (2009), modelos simples

semi-empíricos e empíricos propõem, em fase de pré-dimensionamento, para prevenir o destacamento do compósito por concentração de tensões em fendas de flexão, a limitação da extensão no FRP a um valor limite (ε_{fmax}) que se situa normalmente entre 6.5% e 8.5% .

4- VERIFICAÇÃO DE SEGURANÇA EM ELU.

4.1 - Critério

Faz-se agora o uso dos métodos de cálculo indicados nas propostas normativas da FIB (2001) e ACI (2002) para avaliar a segurança à flexão dos modelos experimentais reforçados com CFRP e para interpretar a relevância dos parâmetros anteriormente especificados no dimensionamento do reforço. Os resultados são posteriormente comparados com os obtidos na campanha experimental descrita no item anterior, com vista a antecipar alguma discussão relativamente aos critérios subjacentes a essas normas. Pretende-se avaliar se, para esta base de dados de ensaios experimentais, os resultados obtidos respeitam as condições de segurança definidas nessas publicações e identificar, entre os diversos métodos propostos, os que melhor se adequam a este tipo de estruturas.

Para se expor de forma mais abrangente os métodos propostos pelo ACI (2002) e pela FIB (2001), foram estabelecidos dois cálculos distintos, com pressupostos de análise específicos, designados por “critério 1” e “critério 2”. O primeiro, inclui as condições mais restritivas ao desempenho do compósito ao passo que, o segundo, adopta as filosofias gerais preconizadas pelas duas publicações referidas. Os princípios de análise invocados, por cada um destes critérios, estão reunidos na Tabela 3, em termos de identificação das condições de base, das regras admitidas e das siglas atribuídas para a análise do momento último (M_u) e da deformação última do CFRP (ε_{fu}). Sublinha-se que para o ACI, o “critério 2”

Tabela 3 – Princípios estabelecidos para os “critérios” em análise.

Critério	Pressupostos		Referência		
	Condições de base	Regras adoptadas	M_u	ϵ_{fu}	
Critério 1	ACI	i) Propriedade dos materiais:	Valor médio		
		ii) Deformação do FRP:	$\epsilon_f \leq \epsilon_{fd}$ $\epsilon_{fd} = k_m \cdot \epsilon_{fk}$	ACI 1	ACI 1
		iii) Lei de comportamento do betão:	Critério do documento ACI (2002)		
		iv) Equações de equilíbrio:	Equações do documento ACI (2002) Factor de correcção do CFRP ($\psi_f = 0.85$)		
	FIB	i) Propriedade dos materiais:	Valor médio		
		ii) Deformação do FRP:	$\epsilon_f \leq \epsilon_{fd}$ Impondo o critério de Rostasy et al (1998) através de: $\epsilon_{fd} \leq 5 \cdot \epsilon_{sy}$ $\epsilon_{fd} \leq 0.50 \cdot \epsilon_{fk}$	FIB 1	FIB 1
		iii) Lei de comportamento do betão:	Critério da fib Bulletin N°14 (2001)		
		iv) Equações de equilíbrio:	Equações do documento fib Bulletin N°14 (2001)		
Critério 2	ACI	i) Propriedade dos materiais:	Valor médio		
		ii) Deformação do FRP:	$\epsilon_f \leq \epsilon_{fd}$ $\epsilon_{fd} = k_m \cdot \epsilon_{fk}$		
		iii) Lei de comportamento do betão:	Critério do documento ACI (2002)		
		iv) Equações de equilíbrio:	Equações do documento ACI (2002) Factor de correcção do CFRP ($\psi_f = 1.0$)	ACI 2	ACI 1
	FIB	i) Propriedade dos materiais:	Valor médio		
		ii) Deformação do FRP:	$\epsilon_f \leq \epsilon_{fd}$ Critério geral do fib Bulletin N°14 (2001)	FIB 2	FIB 2
		iii) Lei de comportamento do betão:	Critério da fib Bulletin N°14 (2001)		
		iv) Equações de equilíbrio:	Equações do documento fib Bulletin N°14 (2001)		

é idêntico ao “critério 1” relativamente ao modelo que interpreta a limitação da deformação máxima no compósito, razão pela qual na tabela surge a referência “ACI 1” na coluna de análise da deformação (ϵ_{fu}).

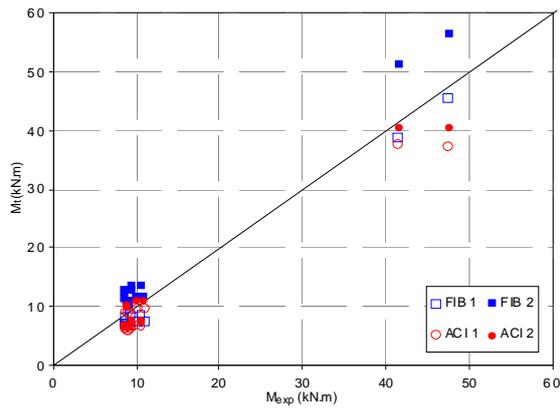
Complementarmente, recorreu-se a uma folha de cálculo automático, para se avaliar a segurança à flexão dos modelos experimentais, baseado nos pressupostos referidos na Tabela 3.

4.2 - Análise do momento resistente último

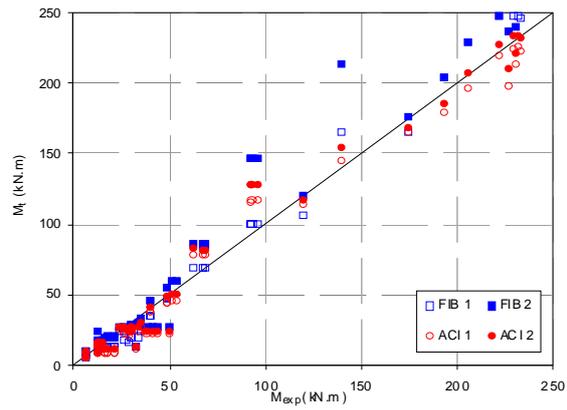
Na Fig. 4, representa-se a comparação entre os valores teóricos previstos e os resultados experimentais segundo os critérios estabelecidos pela FIB (FIB 1 e FIB 2) e pelo ACI (ACI 1 e ACI 2) para os modelos de laje e de viga reforçados pela técnica de EBR,

independentemente do modo de ruína ocorrido. A análise estatística da razão entre os momentos últimos, teóricos e experimentais, está exposta na Tabela 4, através do cálculo do valor médio (Media), do desvio padrão (DP) e do coeficiente de variação (CV em %).

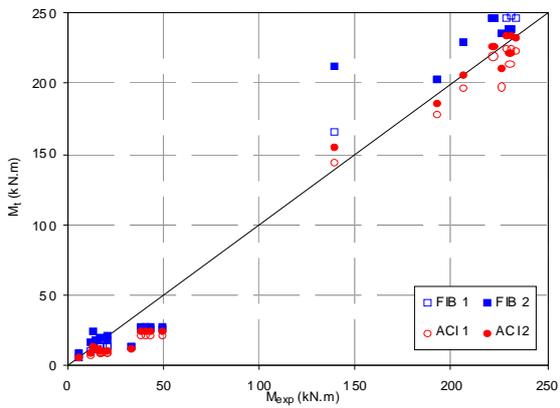
Para a “Técnica EBR” conclui-se que, em termos gerais, o modelo de previsão estabelecido como FIB 2 (sem restrição na deformação do FRP) conduz a resultados do lado da insegurança e com relativa dispersão, expresso nos valores da (Media) > 1 e do CV elevado. Por seu lado, a introdução da condição de limitação da deformação eficaz do FRP (ϵ_{fd}), segundo o modelo FIB 1 prevê momentos últimos com boa aproximação, conservadores e com pouca dispersão, traduzido por apresentarem um valor médio de [0.84 a 0.90] e um CV de [10% a 21%].



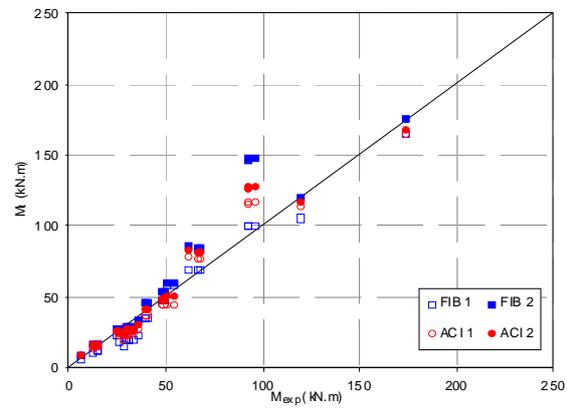
a) Lajes EBR (14 modelos).



b) Vigas EBR (53 modelos).



c) Vigas EBR Laminados (25 modelos).



d) Vigas EBR Mantas (28 modelos).

Fig. 4 - Verificação dos critérios da FIB e do ACI: (M_t / M_{exp}) de modelos EBR

Nestas mesmas circunstâncias, os modelos de previsão do ACI (critérios 1 e 2) conduzem a resultados também seguros, mas mais conservativos (exceção para o ACI 2) e dispersos que da FIB 1, como o demonstram os valores médio de [0.82 a 0.88] e um CV de [17% a 27%]. Algumas destas constatações estão em consonância com os trabalhos de Pham et al. (2004), Toutanji et al. (2005) e Colotti et al.(2004).

Comparando os resultados entre “Lajes e Vigas”, a análise parece indicar

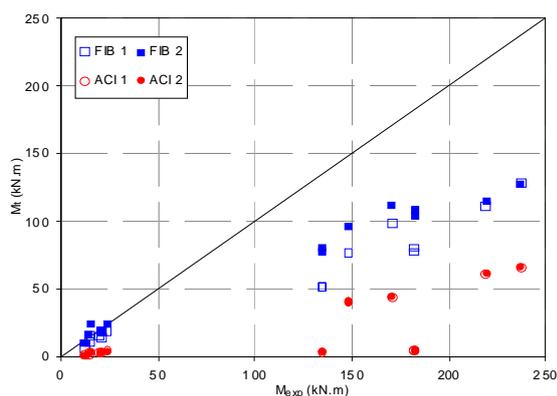
que os segundos são previstos com mais aproximação ao valor experimental, independentemente dos critérios da FIB ou do ACI, expresso na razão M_t / M_{exp} mais próxima de 1.

Relativamente às “Vigas”, o comportamento último dos modelos reforçados com “Mantas” é previsto com muito boa aproximação ($M_t / M_{exp} \approx 1$) e baixa dispersão ($CV \approx 18\%$) pelos critérios do ACI. Em contrapartida, os modelos

Tabela 4 - Tratamento estatístico da razão (M_t / M_{exp}): modelos EBR

Modelos	M_t / M_{exp} (teórico/experimental)											
	FIB 1			FIB 2			ACI 1			ACI 2		
	Media	DP	CV(%)	Media	DP	CV(%)	Media	DP	CV(%)	Media	DP	CV(%)
Lajes EBR	0,84	0,09	10,24	1,28	0,12	9,58	0,82	0,14	17,18	0,90	0,16	18,31
Vigas EBR	0,90	0,19	21,18	1,14	0,28	24,65	0,88	0,24	26,74	0,95	0,25	26,10
Vigas EBR (Laminados)	0,90	0,22	23,81	1,10	0,33	30,53	0,75	0,22	29,32	0,80	0,22	26,88
Vigas EBR (Mantas)	0,90	0,17	18,97	1,18	0,22	18,79	1,00	0,18	18,22	1,08	0,20	18,18

reforçados com “Laminados” conduzem a momentos últimos mais conservativos ($M_t / M_{exp} \leq 0,8$) e dispersos ($CV \approx 29\%$). Em alternativa, o critério FIB 1 parece não distinguir o reforço com “Mantas” do reforço com “Laminados”, prevendo resultados semelhantes para ambos, pelo lado da segurança, embora pese favoravelmente a menor dispersão de resultados obtido no caso das mantas (CV mais baixo).



Vigas NSM (14 modelos)

Fig. 5 - Verificação dos critérios da FIB e do ACI: (M_t / M_{exp}) de modelos NSM

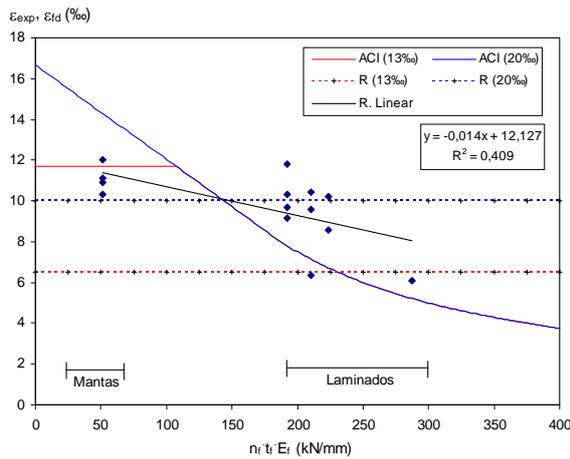
A hipótese de se avaliar a generalização dos critérios propostos pela FIB (2001) e ACI (2002) à situação da técnica de reforço por NSM é improvável, como se prova dos resultados da comparação entre os valores teóricos e os experimentais relativos ao momento último resistente ilustrados na Fig. 5 e da sua análise estatística, para os modelos de “Viga” (Azevedo, 2008). Constata-se que as propostas da FIB1 e do ACI não se ajustam à verificação de segurança porque os pontos ilustrados na figura divergem significativamente da recta diagonal, no sentido conservativo. Contudo, ao contrário do que se constatou na análise das vigas EBR, neste caso cria-se alguma expectativa sobre o critério FIB 2 porque apresenta uma previsão média de (M_t / M_{exp}) $\approx 0,9$, embora com muita dispersão ($CV \approx 39\%$), por não se impor restrição à deformação do FRP, excepto por rotura do material. Este critério parece estar mais próximo da realidade.

4.3 - Análise da deformação máxima do compósito

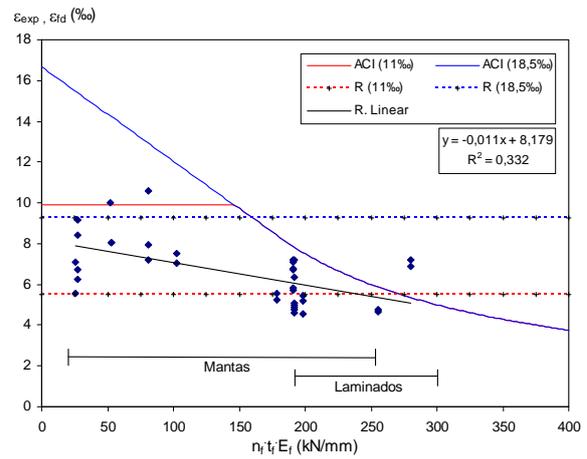
De seguida, procura-se avaliar de que forma os critérios de limitação máxima da extensão no CFRP, definidos pelo ACI e pelo caso particular de Rostasy (R), têm expressão na campanha experimental. Sobre a base dos resultados das lajes e vigas reforçadas por EBR, acrescida da informação relativa aos limites do valor da extensão última (ϵ_{fk}) dos CFRP usados nos modelos (lajes: $13\% < \epsilon_{fk} < 20\%$; vigas: $11\% < \epsilon_{fk} < 18,5\%$), foi possível construir as curvas limites dos critérios ACI e Rostasy apresentadas na Fig. 6, para as lajes (a) e vigas (b).

De um modo geral, os gráficos ilustrados sugerem uma grande dispersão dos resultados experimentais relativamente às curvas de previsão das propostas em discussão. Contudo, o ACI aponta, relativamente à deformação do compósito obtida experimentalmente, restrições conservativas na gama da “rigidez dos Laminados” (L) e, especialmente, por excesso na região observada como “rigidez das Mantas” (M). Este excesso é evidenciado pelo facto da representação da recta de regressão linear (R. Linear) dos valores experimentais estar sempre abaixo das curvas de previsão do ACI mais conservativas (caso do CFRP com $\epsilon_{fk} = 11\%$, nas vigas e o caso com $\epsilon_{fk} = 13\%$, nas lajes). Esta discrepância entre as curvas e a recta é menos acentuada nas vigas reforçadas com laminados. Estes factos podem ajudar a compreender as conclusões obtidas na previsão dos M_u pelo ACI.

Por seu lado, as curvas do critério de Rostasy (R), por serem rectas de valor constante, não acompanham a tendência experimental da deformação do CFRP demonstrada pelas rectas de regressão linear dos modelos EBR e apresentam valores conservativos relativamente aos resultados observados nas lajes e mais próximos comparativamente aos registados nas vigas.



a) Lajes EBR (14 modelos)



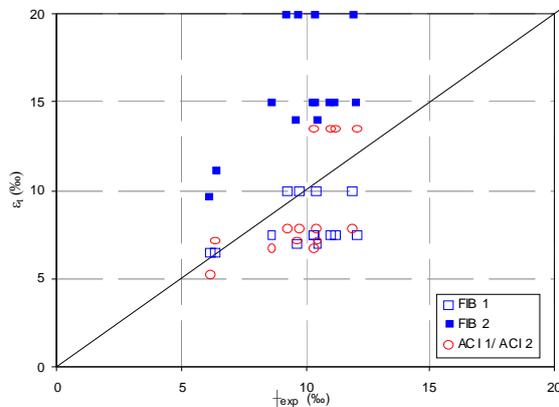
b) Vigas EBR (36 modelos)

Fig. 6 - Critérios do ACI e Rostasy no diagrama ϵ_{exp} vs Rigidez do CFRP (laje e vigas)

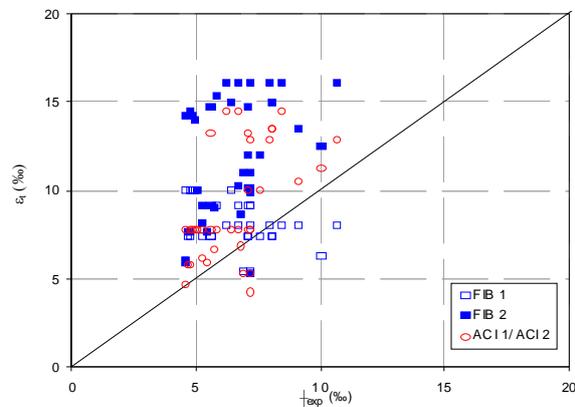
Face à amostragem admitida neste trabalho, qualquer um dos dois critérios representa melhor a deformação eficaz do compósito nos modelos de “Lajes” do que nos modelos de “Vigas”, principalmente se forem reforçados por “Laminados”.

Na Fig. 7, representa-se a comparação entre os valores teóricos e os resultados experimentais da deformação última no compósito, segundo os critérios estabelecidos pela FIB (FIB 1 e FIB 2) e pelo ACI (ACI 1 e ACI 2), para os mesmos modelos. A análise estatística da razão entre as deformações últimas, teóricas e experimentais ($\epsilon_t / \epsilon_{exp}$), está exposta na Tabela 5, através do cálculo do valor médio (Media), do desvio padrão (DP) e do coeficiente de variação (CV em %).

Em termos gerais, conclui-se que, os critérios de previsão da deformação última do compósito nos modelos “Viga” conduziram a valores (teóricos) superiores aos que se registaram nos ensaios (experimentais), justificado pelos autores destes como consequência da ocorrência de ruína prematuras mais cedo do que previsto, como o demonstram os valores da (Media) > 1 [1.3 a 1.9] e do CV elevado [28.9% a 31.7%]. Nas “Lajes”, pelo contrário, os modelos de previsão do FIB 1 e ACI determinam deformações últimas com boa aproximação, conservadoras e com razoável dispersão relativamente à realidade, traduzido por apresentarem um valor médio de [0.84 a 0.91] e um CV de [19.9% a 25.5%]. Realça-se, uma vez mais, que o critério estabelecido como a FIB 2 (sem restrição na deformação do



a) Lajes EBR (14 modelos).



b) Vigas EBR (36 modelos).

Fig. 7 - Verificação dos critérios da FIB e do ACI: $(\epsilon_t / \epsilon_{exp})$ de modelos EBR

FRP) conduz a resultados, do lado da insegurança, a evitar.

Tabela 5 - Tratamento estatístico da razão($\epsilon_t/\epsilon_{exp}$): modelos NSM vs EBR

Modelos	$\epsilon_t / \epsilon_{exp}$ (teórico/experimental)								
	FIB 1			FIB 2			ACI 1 = ACI 2		
	Media	DP	CV (%)	Media	DP	CV (%)	Media	DP	CV (%)
Lajes (EBR)	0,84	0,17	19,95	1,62	0,29	17,80	0,91	0,23	25,59
Vigas (EBR)	1,30	0,41	31,76	1,90	0,57	30,12	1,40	0,41	28,91
Vigas (EBR) (L)	1,50	0,45	30,13	1,91	0,72	37,90	1,20	0,32	26,71
Vigas (EBR) (M)	1,11	0,26	23,84	1,88	0,38	20,41	1,60	0,39	24,17

Embora nenhum dos modelos de previsão tenha proporcionado valores pelo lado da segurança para as “Vigas”, constata-se que o critério da FIB 1 aproxima-se mais dos resultados dos modelos reforçados com “Mantas” (Média = 1.11) do que com “Laminados” (Média = 1.50), ao contrário do que sucede com o critério do ACI.

4.4 - Análise paramétrica

Pretendeu-se analisar a influência que os cinco parâmetros (Classe de betão, % de armadura ordinária, % de reforço, razão vão-espessura e rigidez unitária do FRP) na resposta ao momento flector (M_u) e deformação (ϵ_{fu}) últimos, segundo os critérios em análise.

Esta análise é realizada através da interpretação dos gráficos de comparação entre os resultados teóricos/experimentais desses parâmetros, representados por

linhas de tendência (Azevedo, 2008).

Neste artigo, expõem-se apenas os gráficos relativos ao parâmetro “rigidez unitária do FRP” para modelos de laje EBR (ver Fig. 8).

Observa-se que em termos globais, o critério FIB 1 fornece valores menos conservativos à medida que a rigidez do CFRP aumenta (as rectas de tendência revelam-se crescentes) para momentos e para deformações no FRP.

Pelo contrário, o critério ACI 1 proporciona valores mais conservativos à medida que a rigidez do CFRP aumenta (rectas de tendência decrescentes), quer em termos de momentos quer em termos de deformação do compósito.

5- CONCLUSÕES

O desenvolvimento de uma solução de reforço por colagem de compósitos de FRP deve garantir um nível de segurança aceitável. Este aspecto relaciona-se, em certa medida, com o grau de confiança que existe nas actuais propostas “regulamentares”. Ao longo deste trabalho procurou-se dar mais um contributo na avaliação do “grau de confiança” quanto aos documentos da FIB (2001) e do ACI (2002), relativo à interpretação da verificação de segurança à flexão de uma campanha experimental reunida para este efeito, expresso através de uma análise comparativa e paramétrica de resultados.

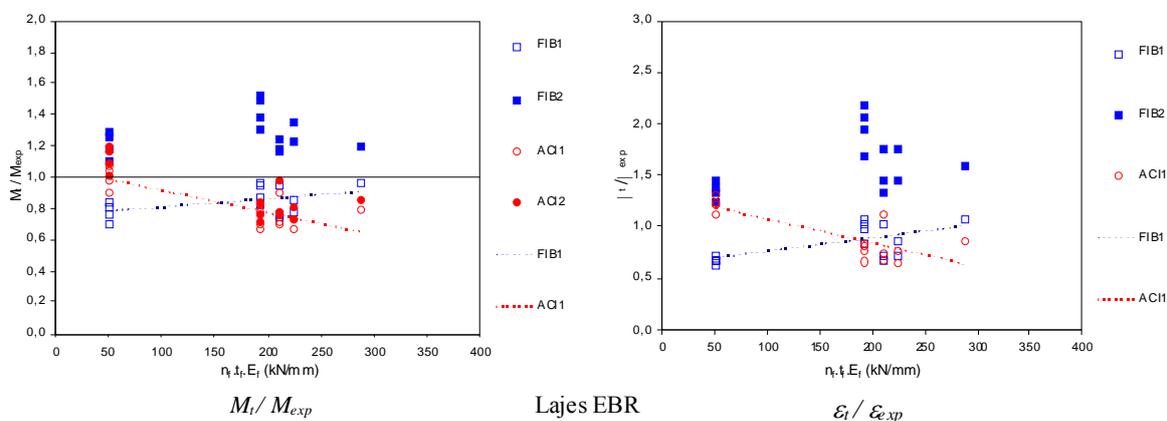


Fig. 8 - Variação de M_t / M_{exp} e $\epsilon_t / \epsilon_{exp}$ com a “rigidez unitária” ($n_f \cdot t_f \cdot E_f$)

Dessa amostra experimental retém-se a ideia de que cerca de 2/3 dos modelos apresentam ruína prematura, evidencia-se que os modelos de laje EBR apresentam valores de deformação máxima no compósito ($\epsilon_{exp} = 9$ a 11%) maiores que os modelos de viga ($\epsilon_{exp} = 5$ a 7%) reforçados pela mesma técnica e que, as vigas reforçadas pela técnica de NSM são aquelas em que o sistema CFRP mais se deforma, antes de ruir ($\epsilon_{exp} = 8$ a 11%). Estes valores apontam, em média, para o intervalo de valores propostos pelos modelos empíricos ($\epsilon_{fmax} = 6.5$ a 8.5%), para fase de pré-dimensionamento.

Constata-se que o critério do ACI é menos limitativo para aplicações com “Mantas” do que para reforços com “Laminados”, devido à menor rigidez apresentada geralmente pelos primeiros, face à indiferença exposta na análise pelo critério de Rostasy (proposto pela FIB). A diferença entre estes dois critérios é acentuada na zona de baixa rigidez unitária, situação comum em reforços constituídos com “Mantas” onde o (k) é mais restritivo. Pelo contrário, em reforços com “Laminados”, que apresentam maior valor de rigidez unitária, os valores dos parâmetros (k_m) e (k) são semelhantes, desta vez com o ACI a apresentar-se mais restritivo. Este facto, poderá justificar a conclusão de que o ACI prevê com mais aproximação o momento resistente último dos modelos reforçados com mantas relativamente aos modelos reforçados com laminados, apesar da menor reserva de segurança porque ($M_t / M_{exp} \approx 1$).

Nos modelos de laje reforçados com laminados colados exteriormente (EBR) observou-se que o “Critério 1” associado às propostas do ACI e da FIB fornece valores semelhantes e próximos dos experimentais em termos de extensões no FRP. No entanto a previsão do momento na rotura (M_t) é bastante conservativa segundo estas filosofias, sendo que a proposta ACI 1 mostrou-se mais conservativa ainda que a FIB 1.

Nos modelos de laje reforçados com “Mantas” observou-se que apenas a proposta FIB 1 se mantinha conservativa, quer em termos de deformação no FRP quer em termos de capacidade resistente à flexão (M_t). Aplicando $\psi_f = 0.85$ à filosofia do ACI (critério ACI 1) obtêm-se valores de M_t bastante aproximados dos valores experimentais (M_{exp}), demonstrando a utilidade desse coeficiente de segurança.

Nos modelos de viga reforçados com “Laminados”, observou-se que os critérios ACI 2 e FIB 1 fornecem valores pelo lado da segurança, mas próximos dos resultados experimentais, quer em termos de deformação no FRP como em termos de momento na rotura. Aplicando $\psi_f = 0.85$ na filosofia do ACI (critério ACI 1), os valores obtidos da capacidade resistente (M_t) tornam-se demasiado conservativos, isto é, este coeficiente de segurança mostra-se mais adequado no caso de modelos reforçados com mantas.

Nos modelos de viga reforçados com “Mantas” observou-se que a filosofia do ACI com $\psi_f = 1$ (critério ACI 2) fornece valores ligeiramente inferiores aos obtidos pelo critério FIB 2, sendo os resultados em termos de deformação no FRP e momento na rotura não conservativos quando comparados com os observados experimentalmente. Adoptando o critério limitador de ϵ_{fd} à filosofia da FIB (critério FIB 1) e $\psi_f = 0.85$ à filosofia do ACI (critério ACI 1), os resultados previstos analiticamente passam a ser conservativos ou muito próximos dos experimentais.

Em termos gerais, a análise da verificação de segurança a nível da interpretação do momento último (M_t), próximo da ruína dos modelos, permite concluir que os critérios sugeridos como FIB 1 e ACI 1 prevêm, com segurança, esse valor para o caso dos modelos reforçados com a técnica EBR. Salienta-se, contudo, que, se por um lado, o critério ACI 1 é geralmente mais conservador do que o FIB 1, ambos parecem traduzir melhor o comportamento de lajes do que

de vigas, sobretudo se estas são reforçadas com o sistema tipo laminado.

O modelo de previsão estabelecido como FIB 2 (sem restrição na deformação do FRP) conduz a resultados do lado da insegurança, o que corrobora a opinião da comunidade científica de que há um limite máximo eficaz de mobilização da deformação do compósito na técnica EBR.

A generalização dos critérios propostos pela FIB (2001) e ACI (2002) à técnica NSM é desajustada em consequência de conduzirem a previsões de momentos resistentes (M_t) divergentes da realidade e demasiado conservativas. Contudo, a análise da deformação última do compósito (ϵ_{exp}) permite antecipar que os critérios de restrição da extensão no FRP (FIB 1 e ACI 1) não devem ser praticados nesta técnica, como também não se deve permitir o esgotamento da deformação axial última do FRP (FIB 2). Fica a ideia de que, na técnica NSM é importante estabelecer um novo critério de restrição da ϵ_{fd} , menos conservativo que os actuais da FIB 1 e ACI.

Confirma-se que, nos modelos reforçados pela técnica EBR, o desempenho do compósito fica aquém da sua capacidade resistente axial, resultando na ideia generalizada de ser aconselhável limitar a deformação eficaz (ϵ_{fd}) nos modelos de previsão. Actualmente, embora se tratem de critérios simples e empíricos, as sugestões FIB 1 e ACI determinam, para as lajes, deformações últimas com boa aproximação e conservativas. Relativamente às vigas, esses critérios merecem alguma revisão porque conduzem a deformações eficazes de FRP superiores aos que se registam nos ensaios experimentais EBR (Azevedo, 2008). Sublinhe-se que o método apresentado no documento do ACI, tem em linha de conta a rigidez do reforço através do coeficiente k_m . Nenhum outro critério tem isso em atenção.

6- REFERÊNCIAS

- ACI 2002. ACI 440.2R-02 - Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, USA.
- Azevedo, D.M.M. 2008 - Reforço de estruturas de betão com colagem de sistemas compósitos de CFRP – Recomendações para Dimensionamento - Tese de Mest., FEUP, Porto, 230 pp.
- Brosens, K. 2001 - Anchorage of externally bonded steel plates and CFRP laminates for the strengthening of concrete elements - Tese de Dout., Leuven, Bélgica, 225 pp.
- Colotti, V., et al. 2004 - Structural model to predict the failure behaviour of plated reinforced concrete beams - Journal of Composites for Construction, ASCE, vol. 8, No. 2, April 1st, pp. 104 121.
- Fib 2001. FIB Bulletin 14 - Externally Bonded FRP Reinforcement for RC - Technical report, FIB, Lausanne, Julho.
- Juvandes, L.F.P. 1999. Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP, Tese de Dout., FEUP, Porto, 300 pp.
- Matthys, S. 2000 - Structural behaviour and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement - Tese de Dout., Ghent University, Ghent.
- Pham, H. and Al-Mahaidi, R. 2004 - Assessment of Available Prediction Models for the Strength of FRP Retrofitted RC Beams - Composite Structures, vol. 66, May, Elsevier.
- Rostasy, F.S. and Neubauer, U. 1998 - S&P Clever Reinforcement Company - Expert Opinion N°. 98/0322".
- Silva, P.C. 2009 - Comportamento de Estruturas de Betão Reforçadas por Colagem Exterior de Sistemas de CFRP - Tese de Dout., FEUP, Porto, 350 pp.
- Toutanji, H. and Zhao, L. 2005 - Review of design equations of beams externally strengthened with FRP composites - International Workshop on Innovations in Material and Design of Civil Infrastructure, Cairo, Egypt, 28 - 29 December.
- Travassos, N. A. C., 2005, Caracterização do comportamento da ligação CFRP-betão, Dissertação de Mestrado, IST, Lisboa.