

REFORÇO À FLEXÃO COM SISTEMAS DE FRP COMPORTAMENTO EXPERIMENTAL VS. MANUAIS ACTUAIS DE DIMENSIONAMENTO



D. AZEVEDO
Aluno de Mestrado
FEUP
Porto



L.F.P. JUVANDES
Professor Auxiliar
LABEST - FEUP
Porto



A. HENRIQUES
Professor Auxiliar
LABEST - FEUP
Porto

SUMÁRIO

Neste trabalho descrevem-se os conceitos de dimensionamento do reforço à flexão de estruturas de betão com compósitos de FRP sugeridos nos documentos publicados pela FIB [1] e pelo ACI [2]. Tendo como base dois programas de ensaios laboratoriais, um realizado na FEUP e outro realizado na UM, apresenta-se um estudo de análise comparativa entre os resultados experimentais e os previstos pelas propostas da FIB e do ACI.

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. Recentemente, 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 [1] e a do ACI Committee 440 [2].

Este trabalho tem como objectivos avaliar os princípios de cálculo sugeridos nestes manuais, para a aplicação desta técnica de reforço estrutural por colagem exterior de sistemas unidireccionais de FRP designada pela sigla EBR referente a “*externally bonded reinforcement*”, assim como aferir da sua adequabilidade a uma técnica de reforço mais recente conhecida pela sigla NSMR referente a “*near surface mounted reinforcement*”. Neste artigo, é apresentada uma análise comparativa entre os resultados de duas campanhas experimentais e os esperados por via analítica, obedecendo estes aos critérios propostos. A investigação tem sido levada a cabo no LABEST do Dep. de Eng. Civil da FEUP, onde os autores têm estudado o comportamento estrutural de modelos de betão (lajes e vigas) reforçados com sistemas compósitos unidireccionais de fibras de carbono “CFRP” (mantas e laminados). O artigo reporta-se, sobretudo, ao cálculo e ao comportamento estrutural de elementos de betão armado

reforçados à flexão realçando a importância da definição de critérios de cálculo adequados para o projecto, objecto principal da tese de mestrado em curso por Azevedo [3].

2. REFORÇO À FLEXÃO COM COMPÓSITOS DE FRP

Nos itens seguintes resume-se a filosofia principal de dimensionamento do reforço à flexão, expondo-se os princípios de cálculo e os conceitos de segurança propostos nos dois documentos em análise, FIB [1] e ACI [2].

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 limites 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 equações (1) e (2) para a FIB e ACI respectivamente.

$$M_{Rd} = \begin{cases} A_s \cdot f_{syd} \cdot (d - \frac{\lambda}{2} \cdot x) + A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot (h - \frac{\lambda}{2} \cdot x) & \text{com } \lambda = 0.80, \text{ FIB} & (1) \\ A_s \cdot f_{syd} \cdot (d - \frac{\beta_1}{2} \cdot x) + \psi_f \cdot A_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot (h - \frac{\beta_1}{2} \cdot x) & \text{com } \beta_1 = 0.80, \text{ ACI} & (2) \end{cases}$$

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

A capacidade resistente de uma secção depende do controlo do seu modo 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 e, os restantes, definem o grupo das ruínas por destacamento prematuro do FRP.

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 Nível de deformação no FRP

Neste item, procura-se expor o modo como cada um dos documentos trata o problema dos modos de ruína por perda de aderência na análise ao ELU. De um modo geral, as várias propostas aconselham sobretudo o controlo do nível de deformação do FRP na secção crítica, para além de outras verificações de segurança pontuais como a zona de amarração, o espaçamento entre fenda e a tensão máxima de corte na interface betão-compósito.

O ACI impõe um critério de cálculo para o valor da extensão máxima no compósito para condicionar as ruínas prematuras em função da sua espessura (t_f), do seu módulo de elasticidade (E_f) e do valor de cálculo da sua extensão (ε_{fd}), através das equações (3) e (4):

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

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

O documento da FIB, por seu lado, não impõe uma restrição específica à deformação do compósito, para controlo das ruínas prematuras, embora reconheça que o FRP deva obedecer, na secção crítica, à condição (5):

$$\varepsilon_{f \min} \leq \varepsilon_f \leq \varepsilon_{fd} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{f \min} = f(\text{critérios de ductilidade}) [1] \quad (6)$$

Entretanto, refira-se o estudo de Rostasy e Neubauer [4], recomendando a limitação do valor máximo da extensão no compósito ao menor valor das condições (5) e (6). Para simplificar, ao longo deste artigo, este critério será mencionado como critério de Rostasy.

$$\varepsilon_{fd} \leq 5 \cdot \varepsilon_{sy} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{fd} \leq 0.50 \cdot \varepsilon_{fk} = k \cdot \varepsilon_{fk} \quad (8)$$

Segundo a FIB, a análise dos mecanismos de ruínas prematuras pode ser realizada através de uma série de verificações específicas, que não serão abordadas neste trabalho.

As variações de k_m , k e de ε_{fd} com o produto $n \cdot E_f \cdot t_f$ (rigidez axial do reforço por unidade de largura do FRP) estão representadas na Figura 1 (a) e (b) para dois valores de ε_{fk} (15‰ e 20‰, correntes em sistemas comerciais). Verifica-se que o aumento da rigidez e da extensão última do compósito provoca uma diminuição de k_m , ou seja, uma diminuição da extensão eficaz de cálculo do FRP. Da análise da Figura 1 verifica-se, segundo o ACI, que para um laminado de

CFRP comercial ($\epsilon_{fk} \approx 20\%$) com $n.E_f.t_f = 192000$ N/mm pode admitir-se no cálculo um rendimento máximo de $0.39 \epsilon_{fk}$. Por seu lado, uma manta formada por duas camadas ($\epsilon_{fk} \approx 15\%$) e $n.E_f.t_f = 51060$ N/mm (26.6% da rigidez do laminado) conduz a um rendimento máximo de $0.90 \epsilon_{fk}$. Em contrapartida, o critério de Rostasy propõe o mesmo valor de rendimento máximo para os dois CFRP ($0.50 \epsilon_{fk}$).

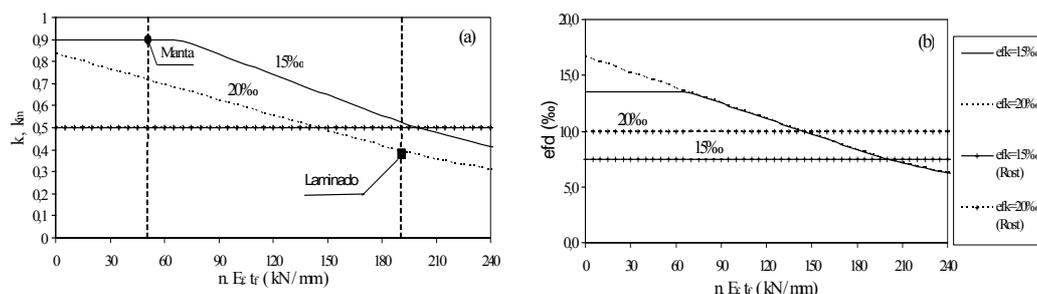


Figura 1: (a) Critérios de limitação das extensões; (b) Aplicação desses critérios

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para avaliar os princípios de cálculo sugeridos nas publicações da FIB e ACI, neste ponto apresentam-se duas campanhas experimentais sobre o reforço à flexão de estruturas de betão com CFRP através da técnica de reforço por EBR [5] e da técnica de reforço por NSMR [6].

3.1 Técnica de reforço por colagem exterior EBR

Para este trabalho destaca-se um programa experimental realizado sobre faixas de laje por Juvandes e Dias, na FEUP [5]. O programa experimental realizado baseou-se numa campanha de ensaios à flexão de quatro séries de faixas de laje de betão armado. A designação destas séries é: série N (modelos de betão armado com $6\phi 6$ na face traccionada), série M (modelos de betão armado reforçados com a manta flexível curada “in situ”) e série L (modelos de betão armado reforçados com o laminado pré-fabricado). Em cada uma das séries M e L incluíram-se dois modelos para os quais a colagem do reforço foi efectuada com o betão fendilhado.

Na Tabela 1 apresentam-se, para os modelos seleccionados para este estudo, os principais resultados em termos da extensão máxima registada no CFRP (ϵ_{fmax}), do momento flector máximo (M_{max}) assim como o modo de ruína verificado.

Tabela 1 – Principais resultados sobre as faixas de laje [5].

Faixas de laje		ϵ_{fmax} (‰)	M_{max} (kN.m)	Modo de Ruína
Série	Modelo			
M	LC3R	Replark 20	10.92	Rotura do CFRP [FR]
M – fend.*	LA3R		11.14	
L	LC2S	CarboDur S512	11.83	Destacamento do CFRP [FD]
L – fend.*	LB2S		9.18	
L	LD4BL	MBrace Laminado LM	10.42	Destacamento do CFRP [FD]
L	LE4I	Laminado INEGI	10.24	

* - Modelos pré-fendilhados antes da aplicação do reforço.

3.2 Técnica de reforço por NSMR

Neste ponto, destaca-se o trabalho realizado na Universidade do Minho por Fortes [6]. O estudo experimental consistiu no reforço à flexão de várias vigas de betão armado segundo a técnica de NSMR, através da qual são inseridos laminados de CFRP no betão de recobrimento. Oito vigas com secção transversal rectangular foram distribuídas por 4 séries de 2 exemplares, tendo cada série diferente percentagem de armadura longitudinal. Em cada uma das séries, apenas uma viga foi reforçada. O reforço foi dimensionado de forma a que a capacidade de carga das vigas reforçadas fosse aproximadamente dupla da correspondente da viga não reforçada, resultando 3 sistemas de reforço compostos por 1, 2 e 3 laminados, dependendo da percentagem de armadura longitudinal, ρ_s , de cada série.

Na Tabela 2 expõem-se, somente para os modelos reforçados, os principais resultados em termos da extensão máxima registada no CFRP (ε_{fmax}), do momento flector máximo (M_{max}) assim como o modo de ruína verificado.

Tabela 2 – Principais resultados sobre as vigas [6].

Vigas			ε_{fmax} (‰)	M_{max} (kN.m)	Modo de Ruína
Série	Modelo	Reforço			
2	V2R2	Laminado	12.8	19.73	Dstacamento do CFRP [FDel]
3	V3R2	(s/ ref ^a)	12.8	20.59	
4	V4R3	Comercial)	10.6	23.84	

4. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Os valores máximos dos momentos e das extensões no CFRP obtidos experimentalmente, são comparados com os valores previstos segundo os documentos da FIB [1] e do ACI [2].

Recorrendo a uma folha de cálculo automático, desenvolvida por Azevedo [3], foram estabelecidos dois cálculos distintos. No primeiro, designado por “crit.1” são consideradas as propriedades médias dos materiais, mas introduz-se o valor do factor de correcção afecto ao controlo do desempenho do CFRP sugerido no ACI ($\psi_f=0.85$) e, as indicações de Rostasy [4] no cálculo seguindo as recomendações da FIB. No segundo, designado por “crit.2”, consideram-se também as propriedades médias dos materiais, adoptam-se as filosofias preconizadas pelos dois documentos (permitindo que o FRP atinja a extensão limite imposta pelos mesmos) e impõe-se um valor unitário para o factor de correcção ($\psi_f=1.0$) do ACI.

4.1 Técnica de reforço por colagem exterior EBR

Na Tabela 3 registam-se os dados necessários para a estimativa do momento resistente de cada modelo experimental segundo cada uma das filosofias documentadas.

Tabela 3 - Dados sobre a geometria das vigas e propriedades mecânicas dos materiais [3]

Série	Modelo	b (cm)	h (cm)	d (cm)	A_s (cm ²)	ρ_s (%)	f_{cm} (MPa)	f_{sym} (MPa)	E_{sm} (GPa)	E_f^* (GPa)	ϵ_{fk}^* (%)	A_f (cm ²)	ρ_f (%)
M	LC3R	44.0	8.1	6.8	0.85	0.28	63.3	635.6	225.3	230	15.0	0.31	0.09
M – fend	LA3R	44.0	7.6	6.3	0.85	0.31	63.3	635.6	225.3	230	15.0	0.31	0.09
L	LC2S	44.0	8.4	7.1	0.85	0.27	63.3	635.6	225.3	160	20.0	0.38	0.10
L – fend	LB2S	44.0	8.5	7.2	0.85	0.27	63.3	635.6	225.3	160	20.0	0.38	0.10
L	LD4BL	44.0	8.1	6.8	0.85	0.28	49.7	555.0	225.3	150	14.0	0.45	0.13
L	LE4I	44.0	7.8	6.5	0.85	0.30	49.7	555.0	225.3	160	15.0	0.45	0.13

* - Valores divulgados nas fichas técnicas dos fornecedores do CFRP.

Na Tabela 4 apresentam-se e nas Figura 2 (a) e (b) ilustram-se, no que diz respeito a extensão do FRP na rotura (ϵ_{fu}), momento na rotura (M_u) e modo de ruína, os resultados experimentais observados e ainda os resultados que seriam de prever adoptando os critérios de cálculo sugeridos nas propostas regulamentares da FIB e do ACI.

Tabela 4 – Comparação dos resultados experimentais com os previstos pela FIB e ACI.

Série	Modelo	Experimentais			FIB				ACI				
		ϵ_{fu} (%)	M_u (kN.m)	Modo ruína	Crit.1		Crit.2		Modo ruína	ϵ_f (%)	Crit.1		Modo ruína
					ϵ_f (%)	M_u (kN.m)	ϵ_f (%)	M_u (kN.m)			M_u (kN.m)	M_u (kN.m)	
M	LC3R	10.92	10.75	FR	7.50	7.61	15	11.81	FR	13.5	9.80	10.92	FR
M – fend	LA3R	11.14	8.74	FR	7.50	7.09	15	11.02	FR	13.5	9.13	10.18	FR
L	LC2S	11.83	10.37	FD	10.0	8.60	20	13.54	FR	7.81	6.91	7.49	FR
L – fend	LB2S	9.18	9.20	FD	10.0	8.71	20	13.72	FR	7.81	7.00	7.59	FR
L	LD4BL	10.42	8.86	FD	7.00	6.63	14	10.30	FR	7.14	6.17	6.62	FR
L	LE4I	10.24	8.79	FD	7.50	6.86	15	10.85	FR	6.70	5.90	6.44	FR

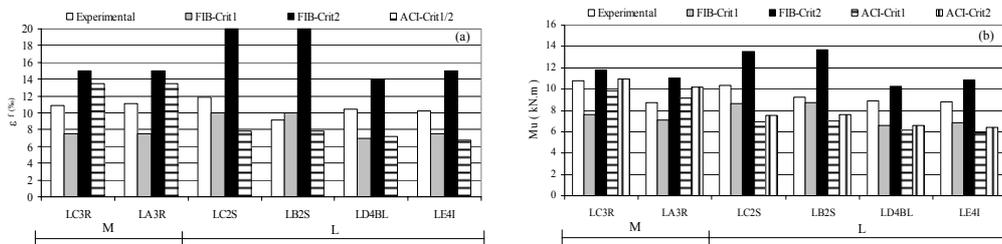


Figura 2: Comparação das ϵ_f (a) e dos M_u (b) com os previstos pela FIB e ACI.

Em termos de deformações máximas no compósito (Figura 2 (a)), verifica-se que: i) A introdução de critérios de limitação da extensão máxima do FRP no cálculo vai ao encontro do comportamento experimental; ii) A extensão máxima efectiva do FRP preconizada pelo ACI (crit.1/ crit.2) apresenta-se, comparativamente com o comportamento experimental na ruína, por defeito nos modelos com laminados e por excesso nos modelos com manta.

Em termos de capacidade resistente (Figura 2 (b)), constata-se que: i) A filosofia da FIB (crit.2) prevê valores acima dos registados experimentalmente para todos os modelos estudados, excepto se, no cálculo, introduzir o critério de Rostasy (FIB-crit.1); ii) A rotura nos modelos experimentais ocorreu antes das previsões no caso do uso de mantas (menos no

cálculo pelo critério de Rostasy (FIB-crit.1) e muito depois do previsto na situação do uso de laminados, resultados estes mais conservativos sobretudo na filosofia do ACI (crit.1/ crit.2); iii) Os modelos previamente fendilhados comportam-se de forma semelhante aos restantes, independentemente do sistema de FRP aplicado, aspecto também não contemplado nas filosofias do ACI e FIB

4.2 Técnica de reforço por NSMR

Na Tabela 5 expõem-se os dados necessários para a estimativa do momento resistente de cada modelo experimental segundo cada uma das filosofias.

Tabela 5 - Dados para o cálculo do momento resistente [3].

Modelo	b (cm)	h (cm)	d (cm)	As (cm ²)	ρ_s (%)	f_{cm} (MPa)	f_{sym} (MPa)	E_{sm} (GPa)	f'_{sym} (MPa)	E'_{sm} (GPa)	E_f^* (GPa)	ϵ_{fk}^* (%)	A_f (cm ²)	ρ_f (%)
V2R2	10.0	17.7	15.30	0.848	0.56	46.1	750	200	500	200	158	17.0	0.2781	0.16
V3R2	10.0	17.5	15.06	1.068	0.71	46.1	500	200	500	200	158	17.0	0.2781	0.16
V4R3	10.0	18.0	15.50	1.508	0.97	46.1	500	200	500	200	158	17.0	0.4172	0.23

* Valores obtidos por ensaio

Os valores da extensão do FRP na rotura (ϵ_{fu}), do momento na rotura (M_u) e a indicação do modo de ruína são apresentados na Tabela 6. Nas Figura 3 (a) e (b) ilustram-se os resultados experimentais observados e ainda os resultados que seriam de prever adoptando as filosofias de cálculo sugeridas nas propostas regulamentares da FIB e do ACI.

Tabela 6 - Comparação dos resultados experimentais com os previstos pela FIB e ACI.

Modelo	Experimentais			FIB						ACI					
	ϵ_{fu} (%)	M_u (kN.m)	Modo ruína	Crit.1			Crit.2			Crit.1			Crit.2		
				ϵ_f (%)	M_u (kN.m)	Modo ruína	ϵ_f (%)	M_u (kN.m)	Modo ruína	ϵ_f (%)	M_u (kN.m)	Modo ruína	M_u (kN.m)	Modo ruína	
V2R2	12.8	19.73	FDel	8.5	14.88	FR	15.62	19.64	CC	6.55	12.76	FR	13.44	FR	
V3R2	12.8	20.59	FDel	8.5	13.33	FR	16.23	18.47	CC	6.55	11.23	FR	11.91	FR	
V4R3	10.6	23.84	FDel	8.5	19.52	FR	13.04	24.03	CC	6.55	16.34	FR	17.38	FR	

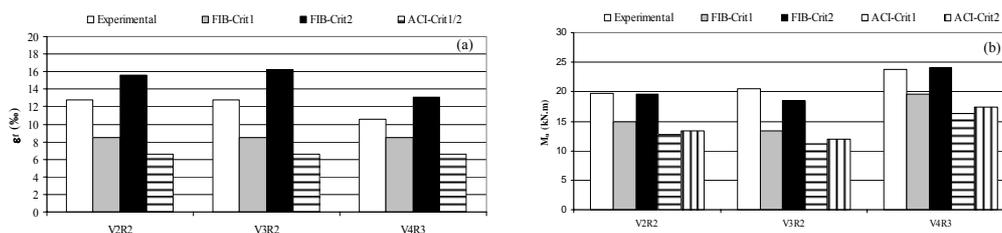


Figura 3: Comparação das ϵ_f (a) e dos M_u (b) com os previstos pela FIB e ACI [6].

Da análise da Figura 3 (a) pode-se observar o seguinte: i) Os níveis de deformação do FRP estabelecidos pela FIB na rotura (crit.2), sem impor limitação na extensão, são superiores às registadas experimentalmente, mas muito mais próximas que nos modelos reforçados por EBR;

ii) Os critérios de limitação adoptados tanto na filosofia do ACI – crit.1/ crit.2 (k_m e ψ_f) como na filosofia da FIB-crit.1, por intermédio do critério de Rostasy (k), mostram-se desadequados.

Analisando a Figura 3 (b) observamos que a previsão de momentos flectores dada pela FIB (crit.2) conduz a valores muito próximos dos experimentais, ao contrário dos cálculos impondo critérios de limitação da extensão do FRP que se apresentam demasiado conservativos.

5. CONCLUSÕES

A análise comparativa de resultados experimentais com os previstos pelo documento do ACI foi efectuada com modelos à escala reduzida, podendo existir um efeito de escala não contabilizado neste trabalho. Saliente-se a importância que poderá assumir nesta análise, o facto de que os valores das propriedades mecânicas dos compósitos de CFRP fornecidas pelos fabricantes poderem não representar correctamente os valores do material aplicado no reforço.

Segundo a técnica de reforço por EBR, nos modelos de laje reforçados com laminados observou-se que a proposta do ACI e a da FIB aplicando o critério limitador de Rostasy fornecem valores semelhantes e próximos dos experimentais em termos de extensões no FRP. No entanto a previsão do momento na rotura é bastante conservativa segundo estas filosofias, sobretudo a do ACI. Adoptando a filosofia da FIB sem qualquer critério limitador da extensão máxima no FRP, os resultados obtidos quer em termos das deformações no FRP quer da capacidade resistente à flexão distanciam-se muito dos valores obtidos experimentalmente. Nos modelos de laje reforçados com mantas observou-se que apenas a proposta da FIB com o critério de Rostasy se mantinha conservativa quer em termos de extensometria no FRP quer em termos de capacidade resistente à flexão. Aplicando a correcção (ψ_f) à filosofia do ACI obtêm-se valores de previsão da capacidade resistente bastante aproximados dos valores experimentais demonstrando a utilidade desse coeficiente de segurança. Nestes modelos, o critério da FIB sem qualquer limitação da extensão no FRP fornece valores não conservativos.

Admite-se que a introdução de critérios de limitação da extensão máxima do FRP no cálculo vai ao encontro do comportamento real das estruturas, apesar das diferenças entre os resultados acima assinalados (desajuste na quantificação dos parâmetros k_m e k).

Em termos de técnica de reforço por NSMR, sublinha-se que os critérios de limitação da deformação do FRP descritos acima, úteis na técnica EBR, mostram-se desajustados.

6. REFERÊNCIAS

- [1] CEB-FIP, “*Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*”, July, 2001.
- [2] ACI Committee 440, “*Guide for the Design and Construction of EBFPR Systems for Strengthening Concrete Structures*”, 2002.
- [3] Azevedo, D., “*Reforço de Estruturas de Betão com Colagem de Sistemas Compósitos de CFRP – Recomendações para Dimensionamento*”, tese de Mestrado, FEUP, 2004.
- [4] Neubauer, U. and F. S. Rostasy", Design aspects of concrete structures strengthened with EBCFRP-plates". 7th Int. Conference on Structural Faults and Repair, 1997.
- [5] Juvandes, L.F.P. et al., "Eficiência do reforço de faixas de laje com sistemas compósitos de CFRP", Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, nº 52, Setembro, 2003
- [6] Fortes, A. S. et al. (2002). "Vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento", UM.