

## **Efeito da Pré-fendilhação do Betão no Comportamento à Flexão de Faixas de Laje Reforçadas com Sistemas Compósitos de CFRP**

Salvador J. E. Dias<sup>1, †</sup>

*Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil  
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal*

Luís F. P. Juvandes<sup>2</sup>, Joaquim A. Figueiras<sup>3</sup>

*Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil  
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal*

### RESUMO

Reforçar ou reabilitar estruturas existentes envolve, frequentemente, a presença de betões em estado fendilhado. Nesse sentido, o comportamento da recente técnica de reforço à flexão por adição de sistemas compósitos de fibras de carbono unidireccional (CFRP) é avaliado numa campanha de ensaios experimentais de faixas de laje executadas em betão armado, com e sem fendilhação inicial do betão. Nessa campanha, dez faixas de laje de betão armado são ensaiadas à flexão, em quatro pontos, sendo duas simplesmente armadas (referência) e oito reforçadas com sistemas compósitos de CFRP. Destas últimas, quatro são reforçadas com o sistema curado “in situ” (manta flexível) e as restantes são reforçadas com o sistema pré-fabricado (laminado semir-rígido). Em cada um dos dois grupos reforçados, duas faixas de laje são, previamente à colagem do reforço, solicitadas de tal forma a atingirem um estado de fendilhação estabilizada. Neste trabalho, os ensaios efectuados são descritos e os resultados obtidos são analisados e interpretados.

### 1. INTRODUÇÃO

A reparação e o reforço de estruturas de engenharia civil tem adquirido uma importância cada vez maior nos últimos anos. Com efeito, a deterioração de edifícios, pontes e viadutos resultante do envelhecimento, do projecto e/ou construção deficiente, da falta de manutenção e de causas acidentais (fogo, sismos) tem levado a uma degradação crescente das estruturas. Para fazer face a este cenário, torna-se necessário o desenvolvimento de técnicas de reforço em que a aplicação seja rápida e simples, que minimizem os efeitos na arquitectura e onde os materiais usados apresentem elevadas características do ponto de vista mecânico e da durabilidade. Assim, a colagem de sistemas compósitos reforçados com fibras de carbono,

---

<sup>†</sup> Autor para quem a correspondência deverá ser enviada ([sdias@civil.uminho.pt](mailto:sdias@civil.uminho.pt))

<sup>1</sup> Assistente

<sup>2</sup> Professor Auxiliar

<sup>3</sup> Professor Catedrático

de sigla CFRP, aparece como uma solução que se enquadra nas premissas que se acabam de referir, (ACI Committee 440 2000, FIB-Bulletin14 2001 e CCC2001 2001).

Os materiais compósitos de CFRP apresentam propriedades como: elevada rigidez e resistência à tracção, baixo peso específico, bom comportamento à fadiga e excelente resistência a factores ambientais. O reduzido peso específico dos compósitos de CFRP proporciona uma facilidade de transporte e de manuseamento. A disponibilização destes materiais com dimensões quase ilimitadas em termos de comprimento, ao contrário do que acontece com as chapas de aço, elimina a necessidade de emendas do reforço. A elevada resistência à corrosão dos compósitos de FRP permite a sua utilização em ambientes agressivos como, por exemplo, nas zonas costeiras. As enormes potencialidades dos materiais compósitos em termos mecânicos proporcionam soluções de reforço que poucas alterações introduzem na arquitectura inicial das estruturas, pois consegue-se obter consideráveis aumentos da capacidade resistente dos elementos estruturais através de pequenas quantidades de reforço. A técnica da colagem externa de compósitos de CFRP é simples e rápida de executar, mesmo em zonas de difícil acesso, quer pela especificidade da obra (condicionalismos de altura, túneis, etc.) quer pela localização da obra (por exemplo, manter o trânsito enquanto se procede à operação de reforço).

É neste contexto que no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LABEST) se têm realizado vários programas experimentais sobre esta técnica de reforço de estruturas de betão (Figueiras et al. 2001, Dias et al. 2002 e Juvandes et al. 2003), destacando-se neste trabalho um que visa avaliar o desempenho do reforço à flexão de faixas de laje de betão armado com compósitos de CFRP unidireccionais, com e sem fendilhação do betão. Deste modo pretendeu-se avaliar experimentalmente a técnica de reforço em análise aplicada a estruturas de betão, em que este se encontra fendilhado, situação que normalmente está associada a uma operação de reabilitação ou reforço.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1. Concepção dos modelos

O programa experimental realizado baseou-se numa campanha de ensaios à flexão de três séries de faixas de laje de betão armado, com dimensões médias de 45 cm de largura, 8 cm de espessura e 180 cm de comprimento. A primeira designada por série MIN, contém dois modelos com 3 $\phi$ 6 na face traccionada. As restantes duas séries contêm modelos com a mesma armadura que os da série MIN estando reforçadas à flexão com dois sistemas compósitos de CFRP, a manta flexível curada “in situ” Replark 20 (série M) e o laminado pré-fabricado CarboDur S512 (série L). Para cada um dos sistemas de reforço adoptados, dois dos modelos ensaiados foram, previamente à colagem do reforço, solicitados de tal forma a atingirem um estado de fendilhação estabilizada.

A geometria do reforço das faixas de laje das séries M e L foi determinada de forma a que os modelos destas séries tenham o dobro da capacidade resistente dos modelos da série MIN. Para tal, baseado no critério proposto por Rostasy (Nr. Z-36.12-29, DIBt, 1997), limitou-se a extensão máxima no CFRP a 8 % ( $\leq 50$  % do valor característico da extensão de rotura do CFRP) de forma a considerar a hipótese de ocorrência de ruínas prematuras e evitar que o aço plastifique em serviço. As larguras da secção transversal dos reforços adoptadas traduziram-se, para o caso da manta flexível, em duas faixas constituídas por sobreposição de duas camadas com largura de 7.5 cm e 6.5 cm. Para o caso dos laminados optou-se por considerar duas tiras com 1.6 cm de largura. Na Figura 1 e na Tabela 1 apresentam-se as informações gerais sobre os diversos modelos ensaiados (Juvandes 1999 e Dias 2001).

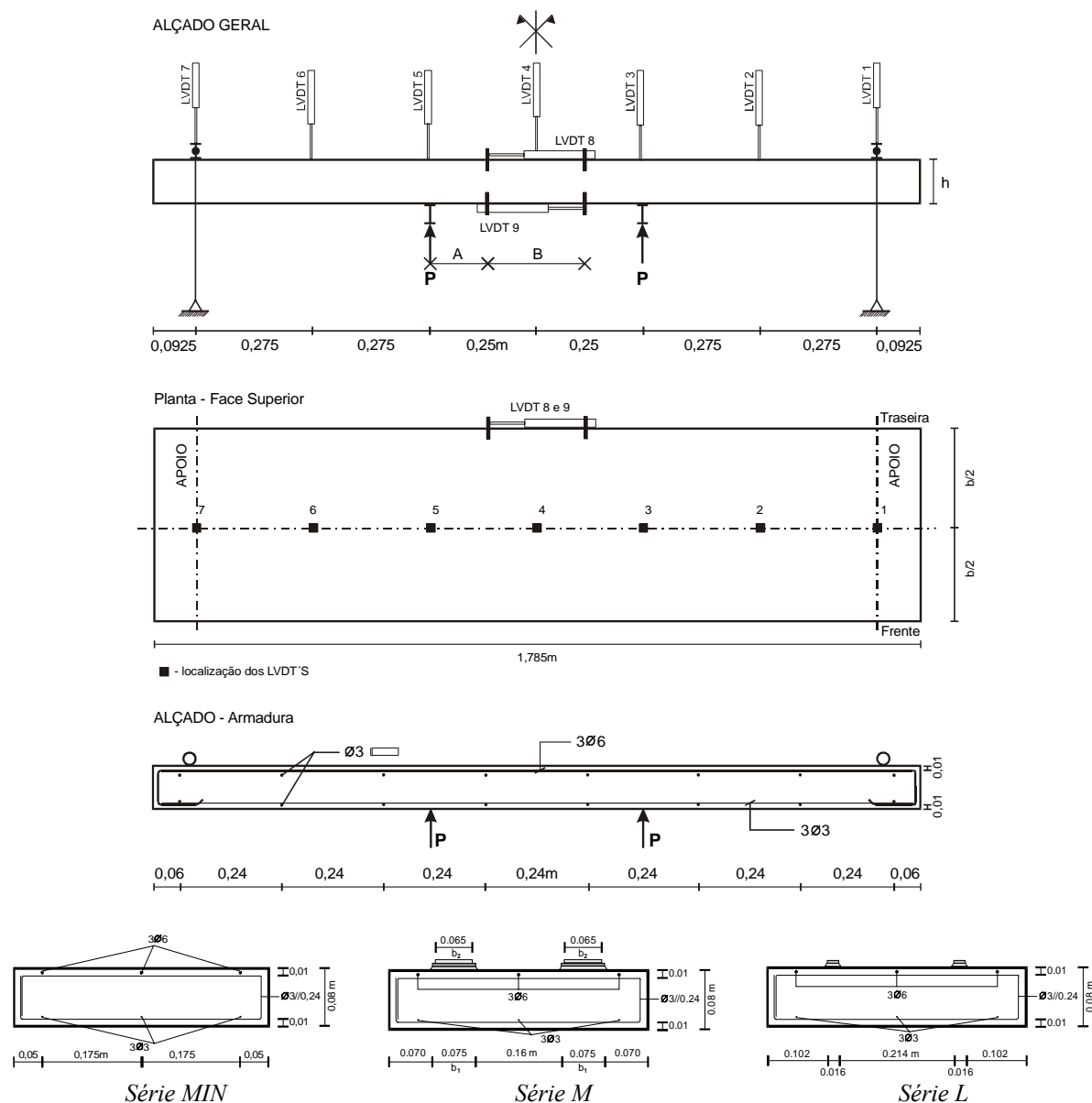


Figura 1 – Informações gerais sobre os modelos ensaiados.

Tabela 1 – Informações gerais sobre os modelos.

Faixas de laje		$\rho_s$ (%) <sup>*</sup>	Reforço ( $\rho_{CFRP}$ ) <sup>**</sup>	Observações
Série	Modelo			
MIN	LA1M	0.25	-	Betão armado (3 $\phi$ 6)
	LA2M			
M manta	LA3R	0.25	Replark 20 (0.09)	Pré-fendilhação antes do reforço
	LC3R			Modelos reforçados
	LC4R			
L laminado	LA4S	0.25	CarboDur S512 (0.11)	Pré-fendilhação antes do reforço
	LB2S			Modelos reforçados
	LC1S LC2S			

<sup>\*</sup>  $\rho_s = A_{s, 3\phi 6} / A_c$ ; <sup>\*\*</sup>  $\rho_{CFRP} = A_{CFRP} / A_c$  (%).

## 2.2. Caracterização dos materiais

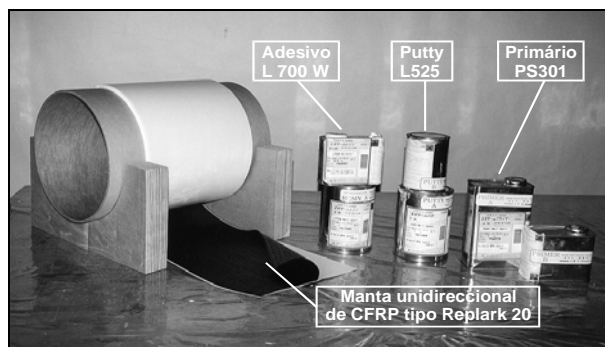
A avaliação da resistência à tracção, do módulo de elasticidade e da resistência à compressão do betão, aos 28 dias de idade, foi efectuada experimentalmente segundo o estipulado na NP-ENV206 (1993). Para tal, efectuaram-se ensaios de flexão em prismas de  $15 \times 15 \times 52.5 \text{ cm}^3$  e ensaios de compressão uniaxial em cilindros, de 30 cm de altura e 15 cm de diâmetro, e cubos de 15 cm de aresta. A caracterização do betão para as datas de ensaio das faixas de laje foi efectuada considerando as propriedades do betão aos 28 dias e recorrendo às expressões propostas pelo Modelo Código 1990 (CEB-FIP 1993). Os modelos ensaiados contêm aço de 3 mm e 6 mm e as suas características mecânicas foram avaliadas através de ensaios de tracção uniaxial em três provetes. A caracterização da ligação betão-adesivo-CFRP foi efectuada através da realização de ensaios de arrancamento por tracção “pull-off”, à data do ensaio das faixas de laje, recorrendo para o efeito ao equipamento da SETA de “Bond-test”. Na Tabela 2 apresentam-se, resumidamente, os valores médios das principais propriedades do betão (aos 28 dias de idade e à data do ensaio das faixas de laje), da ligação betão-adesivo-CFRP e do aço.

Tabela 2 – Principais propriedades do betão e do aço.

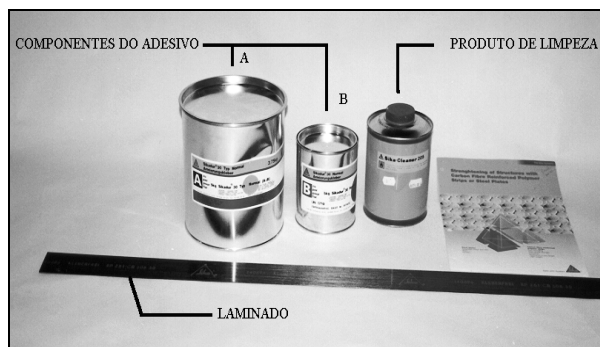
Faixas de laje	Betão							Aço
	28 dias			Data do ensaio das lajes				$\phi$
	$f_{cm}^{cil}$ (MPa)	$E_{cm}$ (GPa)	$f_{ctm}$ (MPa)	$f_{cm}^{cil}$ (MPa)	$E_{cm}$ (GPa)	$f_{ctm}$ (MPa)	$f_{ctm,p}^{**}$ (MPa)	$f_{sym}$ $f_{sum}$ (MPa)
LA1M				59.5	44.5	4.2	-	
LA2M				59.5	44.5	4.2	-	
LA3R	50.3 (C45/55)*	40.9	3.5	60.2	44.7	4.2	3.82	$\phi 3$
LA4S				60.3	44.8	4.2	3.72	330.3
LB1R				61.6	40.3	4.3	3.96	464.6
LB2S	51.6 (C45/55)*	36.9	3.6	61.8	40.4	4.3	3.93	
LC1S				65.6	39.7	4.5	3.8	$\phi 6$
LC2S				65.7	39.7	4.5	3.9	635.6
LC3R	56.3 (C50/60)*	36.8	3.8	65.8	39.8	4.5	3.4	684.9
LC4R				65.5	39.7	4.5	3.3	

\* Classe de resistência do betão; \*\* Valores médios da aderência obtidos nos ensaios de “pull-off”.

O reforço das faixas de laje foi executado com dois sistemas compósitos de CFRP unidireccionais (Figura 2), a manta flexível curada “in situ” (Replark 20) e o laminado semi-rígido pré-fabricado (CarboDur S512). As características dos materiais que constituem cada um dos sistemas de CFRP adoptados foram obtidas nas fichas técnicas disponibilizadas pelos respectivos fabricantes e encontram-se resumidas na Tabela 3 (Replark 1997 e Sika 1998).



Sistema Replark 20



Sistema CarboDur S512

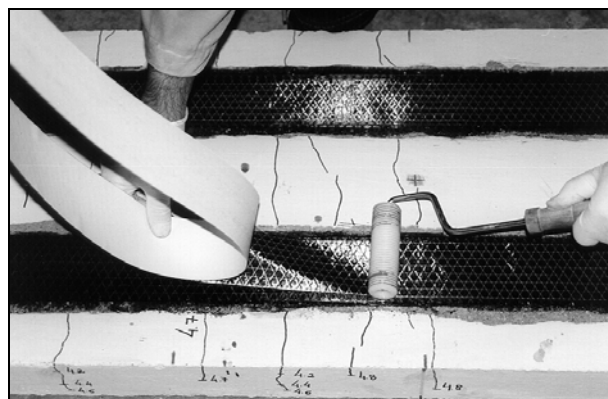
Figura 2 – Informações gerais sobre os modelos ensaiados.

Tabela 3 – Propriedades dos constituintes dos CFRP.

Sistemas de CFRP		Principais propriedades			
Tipo	Materiais	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Extensão na rotura (%)	Espessura (mm)
Replark 20	Primário	-	-	-	-
	Resina	29.4	-	-	-
	Manta	3400	230	15	0.111
CarboDur S512	Adesivo	20-30	8-12.5	30-60	2-3
	Laminado	3100	160	20	1.2

### 2.3. Técnica de aplicação do reforço

A aplicação dos sistemas compósitos de CFRP envolveu essencialmente três tarefas: i) a preparação da superfície de forma a garantir que a base tenha boas condições de aderência; ii) a colagem propriamente dita do reforço; iii) o controlo de qualidade da técnica de reforço antes, durante e após a aplicação. Na Figura 3 ilustra-se um dos modelos reforçado com o sistema Replark 20 (manta) e outro reforçado com o sistema CarboDur S512 (laminado). As fases de aplicação destes dois sistemas de reforço encontram-se detalhadamente descritas nos trabalhos de Juvandes (1999) e de Dias (2001).



Aplicação do Sistema Replark 20



Modelo após a aplicação do Sistema CarboDur S512

Figura 3 – Sistemas curado “in situ” e pré-fabricado.

## 2.4. Descrição dos ensaios e apresentação dos resultados

No presente programa experimental efectuaram-se dois tipos de ensaios à flexão em quatro pontos. O primeiro (tipo I) correspondente ao carregamento de faixas de laje, previamente à aplicação do reforço, de modo a atingirem um determinado padrão de fendilhação (modelos LA3R, LB1R, LA4S e LA2S). No segundo (tipo II) solicitaram-se os modelos até à rotura (todos os modelos). Refira-se que para se observar e registar facilmente o desenvolvimento da fendilhação e dos modos de ruína do compósito de CFRP, as faixas de laje foram carregadas de baixo para cima.

Em ambos os ensaios (tipo I e II) utilizou-se o mesmo pórtico constituído por perfis metálicos. A aplicação das cargas foi efectuada através de dois macacos comandados por uma bomba hidráulica, sendo aquelas lidas através de duas células de carga com capacidade máxima de 50 kN. Os deslocamentos verticais ao longo de várias secções dos modelos, assim como as deformações das faces, superior e inferior, do modelo (na zona de meio vão), foram recolhidos através de transdutores de deslocamentos do tipo “Linear Variable Differential Transformer” (LVDT) com curso de  $\pm 25$  mm (alçado geral e planta da Figura 1). Afim de avaliar o estado de deformação (e de tensão) no CFRP, manta ou laminado, aplicaram-se ao longo do sistema de reforço extensómetros eléctricos.

A Figura 4 ilustra o aspecto geral do ensaio à flexão realizado sob as faixas de laje de betão armado.

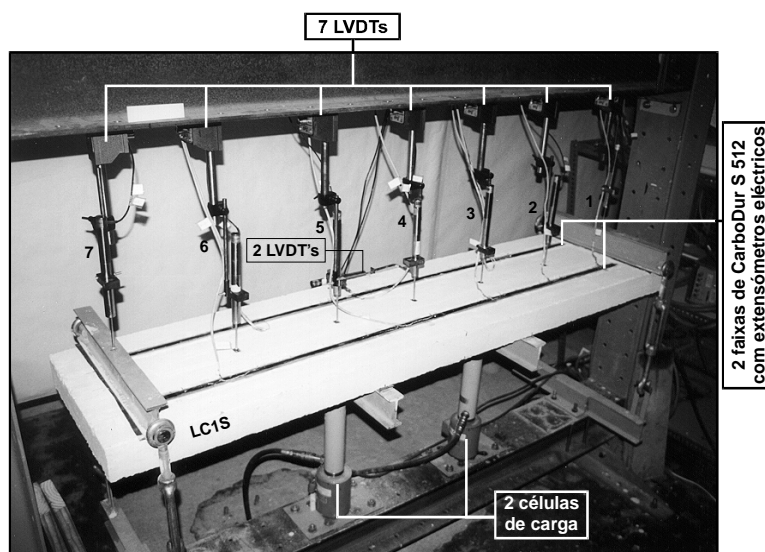


Figura 4 – Esquema geral dos ensaios das faixas de laje.

### 2.4.1. Ensaio de pré-fendilhação (tipo I)

Os modelos LA3R, LB1R, LA4S e LB2S foram, previamente à aplicação do reforço, solicitados de tal forma a atingirem um estado de fendilhação estabilizada. Estabeleceu-se como critério de paragem do ensaio de pré-fendilhação, tendo como base a curva de comportamento carga total vs deslocamento central da faixa de laje LA1M (Figura 5), o valor da carga correspondente a um deslocamento máximo a meio vão compreendido entre 6.0 a 6.5 mm (cerca de cinco vezes o valor da flecha correspondente ao início de fendilhação do betão) (Dias 2001). A Figura 5 ilustra, também, o padrão de fendilhação instalado na face traccionada dos modelos após a realização de um ensaio tipo I.

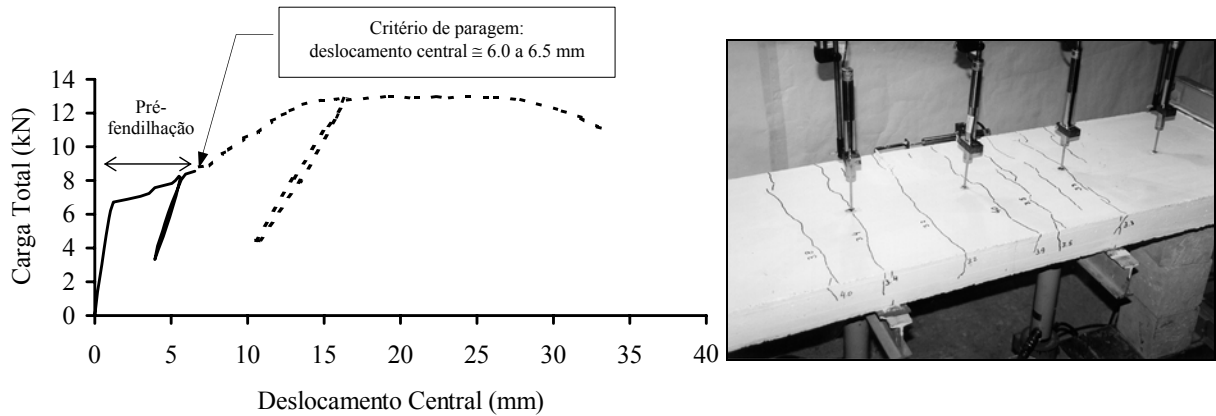


Figura 5 – Critério de pré-fendilhação (tipo I) e aspecto do padrão de pré-fendilhação.

O carregamento que foi imposto nos quatro modelos pré-fendilhados provocou, essencialmente, o aparecimento de fendas na zona central dos modelos (ver Figura 5). Registou-se um afastamento médio ( $s_m$ ) entre fendas da ordem dos 11.7 cm. Na Tabela 4 apresentam-se, para cada um dos modelos pré-fendilhados, a carga total ( $F$ ) e o deslocamento central ( $\delta$ ), aquando do início de fendilhação (primeira fenda no betão) e da situação de fendilhação estabilizada. A Figura 6 ilustra as curvas de comportamento carga total vs deslocamento central obtidas nos modelos pré-fendilhados.

Após a realização do ensaio de pré-fendilhação descarregaram-se os modelos, conforme se pode verificar na Figura 6, e procedeu-se à operação de reforço. Posteriormente, cada um dos modelos foi carregado até esgotar a sua capacidade máxima resistente (ensaio tipo II).

Tabela 4 – Resultados do ensaio do tipo I.

Modelos		Início da fendilhação		Fendilhação estabilizada		
		$F_{fend}$ (kN)	$\delta_{fend}$ (mm)	$F$ (kN)	$\delta$ (mm)	$s_m$ (cm)
Série M	LA3R	6.33	1.07	7.96	6.51	10.3
	LB1R	8.07	1.23	10.22	6.45	11.8
Série L	LA4S	7.80	1.17	10.06	6.10	13.6
	LB2S	10.27	1.33	11.50	6.40	11.2

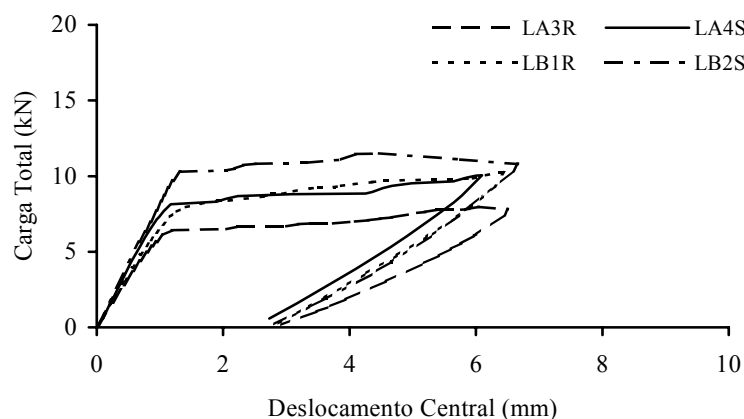

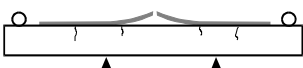
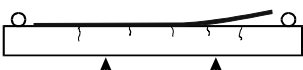


Figura 6 – Curvas carga total vs deslocamento central do ensaio de pré-fendilhação (tipo I).

## 2.4.2. Ensaio de rotura (tipo II)

Na Tabela 5 apresentam-se, para todos os modelos submetidos à rotura, os principais resultados em termos de estados limites (serviço e últimos). Nomeadamente, estão registados os valores da carga de início de fendilhação ( $F_{fend}$ ), da carga total máxima ( $F_{max}$ ) e da respectiva flecha central ( $\delta_{max}$ ), do afastamento médio entre fendas no final do ensaio (tipo I -  $s_m$  e tipo II -  $s_{um}$ ), assim como o modo de ruína verificado.

Tabela 5 – Principais resultados dos modelos ensaiados até à rotura.

Faixas de laje		Serviço					Último	
Série	Reforço	Modelo	$F_{fend}$ (kN)	$s_m$ (cm)	$F_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)	$s_{um}$ (cm)	Modos de Ruína
MIN	-	LA1M	6.74	-	13.02	20.9	9.9	 Ruína da armadura (aço)
		LA2M	7.20	-	13.40	20.0	9.7	
M	Manta	LC3R	10.60	-	39.10	39.3	6.3	 Rotura do CFRP
		LC4R	10.60	-	31.30	32.3	6.4	
	Manta (pré-fendilhados)	LA3R	*	10.3	31.78	39.1	6.6	
		LB1R	*	11.8	36.26	36.5	6.8	
L	Laminado	LC1S	11.00	-	34.10	31.9	6.4	 Destacamento do CFRP
		LC2S	11.40	-	37.70	30.6	6.3	
	Laminado (pré-fendilhados)	LA4S	*	13.6	30.60	29.3	6.7	
		LB1S	*	11.2	33.46	25.1	6.6	

\*- Modelos em que as fendas, devidas à realização do ensaio tipo I, reabrem com o início do carregamento do ensaio tipo II.

Em termos de serviço, regista-se que a carga de início de fendilhação ( $F_{fend}$ ) apresenta valores mais elevados nos modelos reforçados sem pré-fendilhação do que nos modelos da série MIN (não reforçados).

Em todas as faixas de laje ensaiadas verificou-se que as primeiras fendas surgiram na zona de flexão pura e que à medida que o carregamento ia aumentando, as fendas começaram a surgir nas zonas dos vãos de corte. O padrão de fendilhação final inscrito na face traccionada das faixas de laje permite concluir que o afastamento médio entre fendas ( $s_{um}$ ) atinge valores máximos para os modelos da série MIN (9.8 cm). Nos modelos das séries M e L o padrão de fendilhação é mais repartido e o afastamento médio entre fendas apresenta valores semelhantes (entre 6.3 cm e 6.8 cm).

Quanto aos modos de ruína (Figura 7), os modelos reforçados com o sistema pré-fabricado ruíram por destacamento precoce do CFRP, em oposição os modelos reforçados com o sistema curado “in situ” apresentaram rotura do CFRP. Nos modelos da série MIN o modo de rotura observado foi o esgotamento da capacidade resistente da armadura de aço.

Em estado limite último e em relação aos modelos da série MIN, os modelos reforçados apresentam maior carga total máxima (superior ao dobro) e maior flecha central.



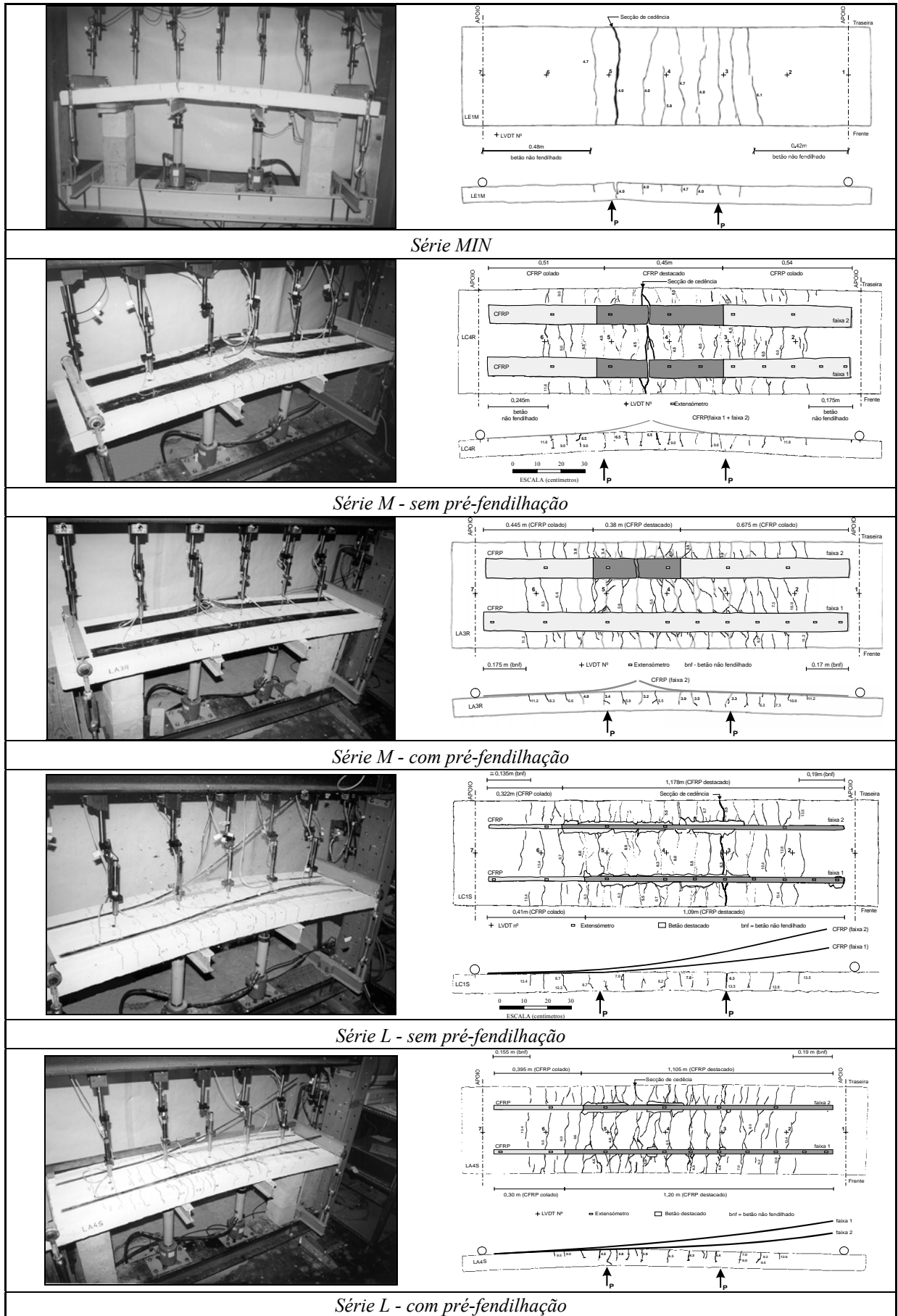


Figura 7 – Modo de ruína e padrão de fendilhação final (Juvandes 1999 e Dias 2001).

### 3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.1. Efeito do reforço

De forma a efectuar-se uma análise comparativa mais directa das séries de faixas de laje, através do diagrama de comportamento carga total vs deslocamento central, considerou-se o efeito da variação de parâmetros como a geometria e o tipo de betão dos diversos modelos ensaiados, normalizando-se as forças (Juvandes 1999 e Dias 2001). Posteriormente, para a geometria inicialmente desejável ( $b= 0.45\text{m}$  e  $h= 0.08\text{m}$ ) e para um betão da classe C45/55, traçaram-se as curvas médias carga total vs deslocamento central das séries MIN, M (com e sem pré-fendilhação) e L (com e sem pré-fendilhação) como se ilustram na Figura 8.

Da Figura 8 observa-se que os modelos reforçados exteriormente com material compósito sem pré-fendilhação evidenciam três estados principais de comportamento (Juvandes 1999), isto é, a fase de betão não fendilhado, a fase de betão fendilhado com aço não plastificado e a fase de betão fendilhado após a plastificação do aço. Regista-se que, após a cedência da armadura apenas o compósito contribui para o aumento da capacidade resistente. Tal justifica o aparecimento do troço recto ascendente que se verifica na parte final das curvas das faixas de laje reforçadas (comportamento linear dos compósitos de CFRP), o que não acontece nos modelos simplesmente armados (série MIN). Relativamente aos modelos reforçados com pré-fendilhação verifica-se a inexistência do primeiro estado referido anteriormente.

Genericamente, comparando as séries MIN, M e L, regista-se que, a par de um aumento da capacidade resistente última, o reforço permitiu um aumento da carga de início de fendilhação (apenas nos modelos reforçados sem pré-fendilhação) e um ganho significativo quer em termos de rigidez quer em termos de flecha na rotura. A Figura 8 ilustra, também, a diferença da curva de comportamento dos modelos reforçados, com e sem pré-fendilhação. Conclui-se que a principal diferença reside numa perda natural de rigidez inicial nos modelos pré-fendilhados, até ao nível de carga de pré-fendilhação. Após este patamar de carga, as curvas dos modelos pré-fendilhados vão, progressivamente, para níveis próximos dos verificados nas curvas dos modelos não pré-fendilhados.

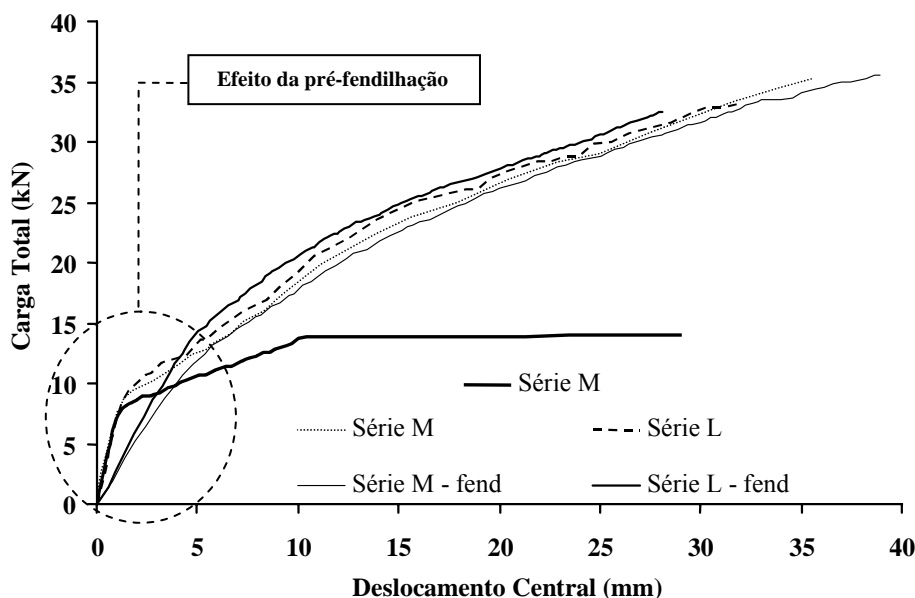


Figura 8 – Curvas médias carga total vs deslocamento central das séries de modelos ensaiadas (tipo II).

Na Tabela 6, além do valor do espaçamento médio entre fendas no final do ensaio ( $s_{um}$ ) de cada uma das séries de modelos ensaiados, aparecem os parâmetros utilizados para quantificar os ganhos registados nos modelos reforçados em relação às faixas de laje da série MIN, em termos de capacidade resistente última e ductilidade (relação entre a flecha máxima,  $\delta_{max}$ , e o vão dos modelos,  $l$ ). Em termos médios os modelos reforçados com CFRP apresentam uma carga máxima ( $F_{max}$ ) de 2.38 vezes superior e uma flecha máxima ( $\delta_{max}$ ) de 1.11 vezes mais do que os modelos da série MIN. Independentemente do tipo de sistema de CFRP verifica-se que a existência de pré-fendilhação do betão não conduziu a variações significativas das grandezas avaliadas.

Tabela 6 – Comparação do comportamento último (valores médios).

Séries	$F_{max}$ (kN)	$F_{max}/F_{max, MIN}$	$\delta_{max}$ (mm)	$\delta_{max}/l$	$s_{um}$ (cm)
MIN	14.2	1.00	29.7	1/54	9.8
M	34.5	2.43	35.8	1/45	6.4
M – fend.	35.5	2.50	37.8	1/42	6.7
L	33.4	2.35	31.3	1/51	6.4
L – fend.	32.0	2.25	27.2	1/59	6.6

### 3.2. Interface betão-adesivo-CFRP

Na Figura 9 mostra-se o diagrama tipo de distribuição das extensões do CFRP ao longo de metade do seu comprimento, para vários níveis de carga e para dois dos modelos testados, um com e outro sem pré-fendilhação. A partir do conhecimento do diagrama das extensões no CFRP, é possível obter o diagrama em escada das tensões tangenciais (tensões de aderência) resultantes da transferência de forças entre o compósito e o betão. Estas tensões são calculados em termos médios,  $\tau_{med}$ , entre posições de extensómetros consecutivos e pela expressão seguinte:

$$\tau_{med} = \frac{\Delta F}{\Delta L \times b_2} \text{ (kPa)}$$

onde,

$\Delta F$  - variação do esforço axial no CFRP:  $\Delta F$  (kN) =  $E_{CFRP} \times \Delta \varepsilon \times t_{CFRP} \times b_{CFRP} \times 10^{-6}$ , em que  $t_{CFRP}$  (m),  $b_{CFRP}$ (m) e  $E_{CFRP}$  (kPa) são, respectivamente, a espessura, a largura e o módulo de elasticidade do compósito de CFRP e  $\Delta \varepsilon$  é a variação da deformação do compósito entre dois extensómetros consecutivos (microstrains);

$\Delta L$  - afastamento (m) entre os extensómetros em análise;

$b_2$  - largura média (m) da faixa de interface adesivo-betão.

A distribuição das tensões médias de corte na interface, para os modelos cujas extensões no CFRP estão representadas na Figura 9 (para os mesmos comprimento de interface e níveis de carga), está exposta na Figura 10. A análise das Figuras 9 e 10 permite constatar que o tipo de desenvolvimento ao longo do carregamento, quer das extensões no CFRP assim como as tensões médias de corte na interface, é similar para modelos analisados, independentemente de existir ou não pré-fendilhação. Observa-se, também, que as forças de corte transferidas do compósito para o betão vão aumentando do centro para a extremidade do reforço, à medida que os níveis de carga progredem. Isto deve-se à formação sucessiva de

fendas de corte no adesivo e de destacamentos parciais entre fendas na interface betão-adesivo, até surgir o modo de ruína já descrito.

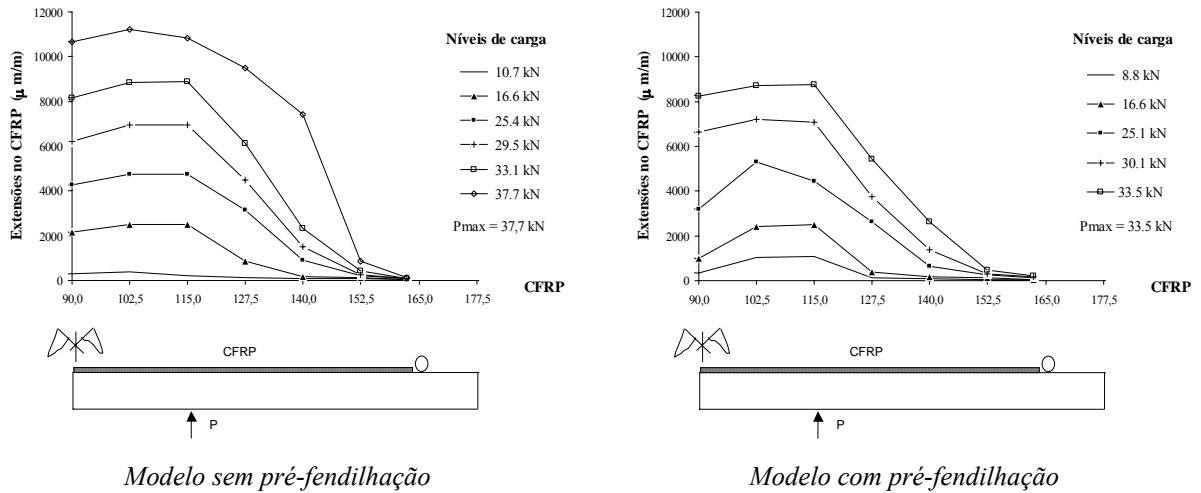


Figura 9 – Extensões no CFRP.

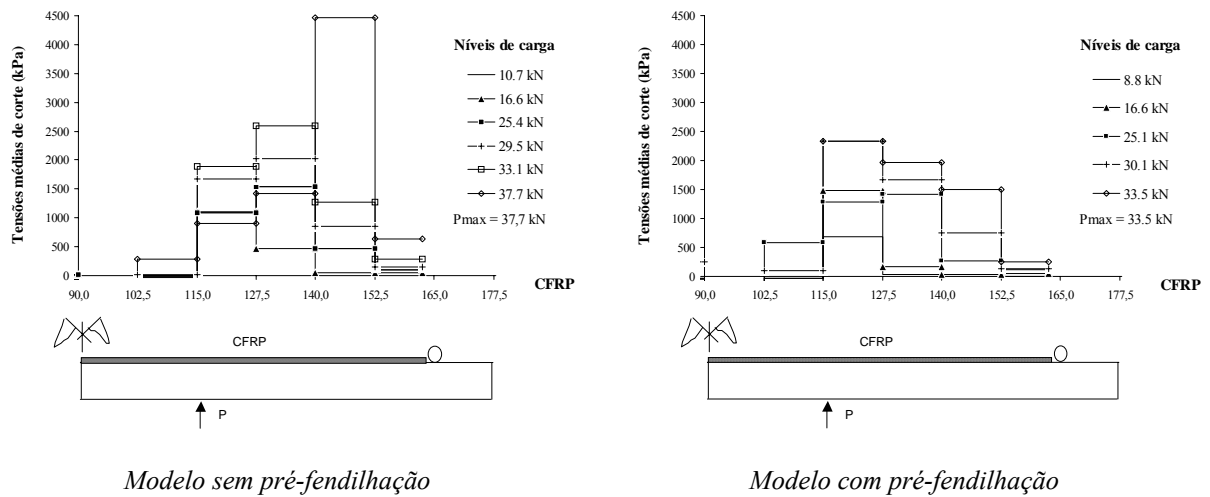


Figura 10 – Tensões médias de corte na interface.

Tabela 7 – Desempenho do CFRP e da interface betão-adesivo-CFRP.

Séries	$\varepsilon_{max}^{CFRP}$ (%)	$\sigma_{max}^{CFRP}$ (MPa)	$\sigma_{max}^{CFRP} / \sigma_u^*$ (%)	$\tau_{max}^{ligação}$ (MPa)	$f_{ctm,p}$ (MPa)
M	10.23	2352.0	69.2	1.81	3.60
M - fend.	11.57	2661.1	78.3	1.69	3.89
L	10.82	1731.0	55.8	4.22	3.85
L - fend.	9.43	1508.0	48.6	2.84	3.83

\* - Tensão  $\sigma_u$  = resistência à tracção da manta ou laminado apresentada na Tabela 3.

Na Tabela 7 expõe-se os níveis de desempenho dos compósitos de CFRP (séries M e L) em termos de valores médios máximos obtidos para as extensões ( $\varepsilon_{max}^{CFRP}$ ) e para as tensões normais ( $\sigma_{max}^{CFRP}$ ) e as tensões de corte na interface betão-adesivo-CFRP ( $\tau_{max}^{ligação}$ ). A ocorrência de ruínas prematuras verificadas nos modelos reforçados com laminados de CFRP está directamente relacionada com o esgotamento da capacidade de aderência do betão ( $\tau_{max}^{ligação} \cong f_{ctm,p}$ ). Tal facto, traduz-se num baixo rendimento do compósito que em média foi de 52 %. Nos modelos reforçados com manta de CFRP ocorreu a rotura do compósito o que conduziu a um nível médio de rendimento elevado (superior a 74 %), quando comparado com o verificado para os modelos reforçados com laminados de CFRP.

#### 4. CONCLUSÕES

A análise dos resultados do programa experimental apresentado no presente trabalho permite tirar as seguintes conclusões:

- numa fase inicial os modelos reforçados pré-fendilhados apresentam menor rigidez em relação aos modelos reforçados sem pré-fendilhação, até ao nível de carga de pré-fendilhação. Após este patamar de carga, as curvas dos modelos reforçados pré-fendilhados vão, progressivamente, para níveis próximos dos verificados nas curvas dos modelos reforçados não pré-fendilhados;
- em termos de serviço, regista-se que a carga de início de fendilhação ( $F_{fend}$ ) apresenta valores mais elevados nos modelos reforçados sem pré-fendilhação do que nos modelos não reforçados;
- o espaçamento médio final entre fendas foi semelhante para os modelos reforçados, com e sem pré-fendilhação, e bastante inferior ao verificado pelos modelos da série MIN;
- os níveis de desempenho dos reforços foram semelhantes independentemente do betão estar ou não pré-fendilhado;
- os laminados conduziram ao esgotamento da capacidade de aderência do betão, proporcionando as ruínas prematuras ao contrário das mantas, onde o modo de ruína verificado foi a rotura do CFRP. Este facto repercutiu-se num melhor rendimento das mantas face aos laminados;
- o pré-dimensionamento do compósito, baseado na limitação do valor da extensão máxima do CFRP em 8‰ ( $\leq 50\%$  do valor característico da extensão de rotura do compósito), traduziu-se num critério satisfatório. Com efeito, verificou-se que as quantidades de reforço adoptadas neste programa experimental proporcionam a concretização dos objectivos propostos. Assim, as diferentes faixas de laje reforçadas (séries M e L), com e sem pré-fendilhação, com sistemas compósitos de CFRP registaram capacidades de carga semelhantes entre si e superiores ao dobro da registada nos modelos não reforçadas da série MIN.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam os seus agradecimentos ao apoio prestado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no projecto POCTI/36059/ECM/2000 de título “Comportamento e dimensionamento de estruturas de betão reforçadas com FRP

considerando os efeitos de envelhecimento” e às empresas SIKA e STAP que colaboraram e cederam os produtos de reforço estrutural.

## 6. REFERÊNCIAS

ACI Committee 440, 2000, “*Guide for design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*”, American Concrete Institute, ACI Committee 440, Julho, 95 pp.

CCC2001, 2001, proceedings of the “*Composites in Construction International Conference - CCC2001*”, Figueiras, Juvandes e Faria (ed.), Balkema Publishers.

CEB-FIP, 1993, Comité Euro-International du Béton - CEB-FIP Model Code 1990 - Design code, editado por Thomas Telford.

Dias, S.J.E., 2001, “*Verificação experimental do reforço com CFRP de estruturas de betão à flexão*”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Departamento de Engenharia Civil, Porto, Julho, 203 pp.

Dias, S.J.E., Juvandes, L.F.P. e Figueiras, J.A., 2002, “*Comportamento experimental de vigas de betão armado reforçadas à flexão com sistemas compósitos de CFRP do tipo MBrace*”, Relatório Técnico FEUP, Janeiro, 34 pp.

FIB - Bulletin 14, 2001, “*Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*”, technical report by Task Group 9.3 FRP (Fiber Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures, CEB-FIP, July, 130 pp.

Figueiras, J. A. e Juvandes, L.F.P., 2001, “*Reforço de pontes por colagem de sistemas de FRP - Caso da Ponte de N.S. da Guia*”, actas do Seminário “Segurança e Reabilitação das Pontes em Portugal”, FEUP, Porto, Junho, pp. 189-203.

Homologação de construção nr. Z-36.12-29, 1997, “*Verstärkungen von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen durch schubfest aufgeklebte Kohlefaserlamellen - Sika CarboDur*”, autorização de construção dada pelo Deutsches Institut Fur Bautechnik (DIBt), Berlim.

Juvandes, L.F.P., 1999, “*Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP*”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), Departamento de Engenharia Civil, Porto, Setembro, 400 pp.

Juvandes, L.F.P., Dias, S.J.E. e Figueiras, J.A., 2003, “*Eficiência do reforço de faixas de laje com sistemas compósitos de CFRP*”, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), nº 52, Setembro, pp. 33-42.

NP-ENV 206, 1993, “*Betão - Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade*”, Norma Portuguesa, IPQ, Outubro.

REPLARK System Procedure Instruction, 1997, “*Revitalizing concrete structures - Replark technical datasheet - Replark systems guideline*”, Carbon fiber prepreg sheet for construction industries, Mitsubishi Chemical Corporation, 81 pp.

SIKA, 1998, “*Prontuário de fichas técnicas - Construir com segurança*”, Sika, Indústria Química S.A., edição nº2, Janeiro, pp. 344.