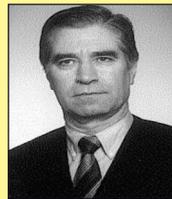
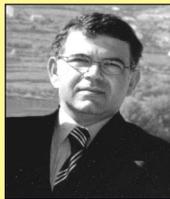


Strengthening of reinforced concrete structures in bending with CFRP systems

Estruturas de betão armado reforçadas à flexão
com sistemas de CFRP



S. DIAS^a
sdias@civil.uminho.pt

L. JUVANDES^b
juvandes@fe.up.pt

J. FIGUEIRAS^c
jafig@fe.up.pt

Abstract

Experimental research regarding the flexural strengthening of RC structures with externally bonded unidirectional carbon-fiber-reinforced systems (CFRP) has been carried out in the Structural Laboratory (LABEST) of Faculty of Civil Engineering of Porto University (FEUP). The paper presents two works, one refers to RC slabs specimens and other to RC beams specimens. The results are described, analyzed and discussed in order to obtain conclusions about the behaviour of RC structures strengthened with CFRP composite systems. These tests confirmed that the load capacity of RC structures can be significantly increased by applying externally bonded CFRP systems.

Keywords: reinforced concrete, bending strengthening, CFRP systems, external end anchorage systems.

Resumo

No Laboratório de Estruturas (LABEST) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto foram realizados vários programas experimentais sobre o reforço à flexão de estruturas de betão armado por intermédio da colagem externa de sistemas compósitos de CFRP (polímeros reforçados com fibras de carbono) unidireccionais. Neste trabalho serão apresentados dois, um realizado sobre faixas de laje e o outro sobre vigas. Os resultados obtidos são analisados e interpretados, referindo-se as principais conclusões sobre o comportamento dos elementos estruturais ensaiados tendo em vista avaliar a viabilidade do reforço com CFRP de elementos de betão armado à flexão. Estes estudos asseguram que a colagem de CFRP permite aumentos significativos na capacidade resistente de elementos de betão armado à flexão.

Palavras-chave: betão armado, reforço à flexão, sistemas de CFRP, mecanismos exteriores de fixação.

^a School of Engineering of Minho University, sdias@civil.uminho.pt, 4800-058, Guimarães, Portugal

^b LABEST, Faculty of Engineering at University of Porto, juvandes@fe.up.pt, Rua Dr. Roberto Frias 4200-465 Porto, Portugal

^c LABEST, Faculty of Engineering at University of Porto, jafig@fe.up.pt, Rua Dr. Roberto Frias 4200-465 Porto, Portugal

1 Introdução

As estruturas de betão são projectadas para um determinado período de vida útil, durante o qual devem exibir níveis adequados de segurança, funcionalidade e durabilidade. Verifica-se no entanto, com frequência, que os níveis de segurança podem não ser satisfatórios por ocorrerem falhas, quer ao nível da concepção/projecto, da construção ou da utilização, que originem o aparecimento de avarias provocando uma diminuição do desempenho das referidas estruturas. Existem, também, situações em que se pretende adaptar a estrutura a novas funções que introduzem maiores esforços, como também, os códigos de dimensionamento têm introduzido disposições mais severas para fazer face a determinados efeitos das acções que não tinham sido obviamente considerados. A segurança de uma estrutura pode também ser posta em causa devido à ocorrência de acções acidentais (ex.: fogo e sismos) ou ao envelhecimento dos materiais.

É neste contexto que a reparação e o reforço de estruturas de betão (edifícios, pontes, viadutos, túneis, etc) têm desempenhado um papel relevante nos últimos anos, tornando-se numa parcela significativa na actividade da indústria da construção civil (Bakis et al. [1]). Para fazer face a este cenário, tornou-se necessário o desenvolvimento de técnicas de reforço cuja aplicação seja rápida e simples, que minimizem os efeitos na arquitectura das construções e onde os materiais utilizados sejam leves e apresentem elevadas características mecânicas e de durabilidade. A colagem externa de sistemas compósitos de CFRP aparece como uma solução que se enquadra nas premissas que se acabam de referir (Meier [2], ACI [3] e FIB [4]).

Os compósitos de FRP foram desenvolvidos no decurso do século XX com o objectivo de criar materiais capazes de colmatar as lacunas verificadas na utilização dos materiais tradicionais. Resultam de um princípio de heterogeneidade e são constituídos por duas componentes. Uma delas apresenta elevada resistência, elevado módulo de elasticidade e tem a forma de filamentos de pequeno diâmetro – as fibras. A segunda componente é macia e tem características sinérgicas – a matriz. Esta última, sendo relativamente dúctil, envolve completamente a primeira componente, permitindo boa transferência de tensões entre as fibras interlaminares e no plano (conceito de sinergia). Da conjugação das duas componentes anteriormente referidas (fibras+matriz) surgem os materiais compósitos reforçados com fibras. Estes materiais apresentam propriedades com interesse para a engenharia como a elevada resistência e elevada rigidez, o seu baixo peso específico, a excelente resistência à corrosão, bem como a possibilidade em admitir propriedades direccionais a nível estrutural variáveis de acordo com a conveniência (Juvandes [5]).

Das várias fibras disponíveis no mercado, os sistemas reforçados com fibras de carbono (CFRP) apresentam as características que melhor se ajustam aos compromissos exigidos pelo reforço de estruturas de betão. No caso mais geral, um sistema compósito de CFRP, utilizado na técnica da colagem externa é constituído por três componen-

tes principais, ou seja, o compósito propriamente dito, o adesivo de ligação betão-CFRP e as resinas de preparação de superfície (primário e "putty"). As formas comerciais dos sistemas de CFRP podem ser classificadas em dois grupos principais, os sistemas pré-fabricados (laminados e varões) e os sistemas curados "in situ" e estes, ainda em sistemas unidireccionais (mantas) e multidireccionais (tecidos) devido à disposição das fibras no compósito. A unidireccionalidade das fibras concentra numa só direcção as potencialidades do CFRP, maximizando as propriedades mecânicas que um CFRP pode oferecer. Os primeiros sistemas (laminados e varões) são fornecidos sob a forma de perfis pré-fabricados e têm as características mecânicas e físicas garantidas pelos seus produtores. O agente adesivo é um material distinto do compósito sendo, geralmente, do tipo epoxídico. Os segundos sistemas (mantas ou tecidos) consistem na aplicação de feixes de fibras contínuas em estado seco ou pré-impregnado, sobre um adesivo epoxídico previamente espalhado na superfície a reforçar. O adesivo (resina de saturação) tem as funções de impregnar o grupo de fibras, proporcionar a polimerização do conjunto num compósito de CFRP e, por fim desenvolver propriedades de aderência na ligação CFRP-betão.

O objectivo fundamental deste trabalho é expor a linha de investigação experimental realizada no Laboratório de Estruturas (LABEST) da FEUP (Porto, Portugal) com vista a avaliar o comportamento estrutural de elementos de betão armado à flexão (lajes e vigas) reforçados por intermédio da colagem externa de sistemas compósitos de CFRP unidireccionais, nomeadamente o sistema curado "in situ" (a manta) e o sistema pré-fabricado (o laminado). Serão apresentados dois estudos por intermédio dos quais se avaliou: o comportamento dos modelos sob o ponto de vista dos estados limites (serviço e últimos); o desempenho de mecanismos exteriores de fixação do reforço de CFRP; as vantagens e inconvenientes dos produtos e técnicas utilizadas (Juvandes [6] e Dias [7]).

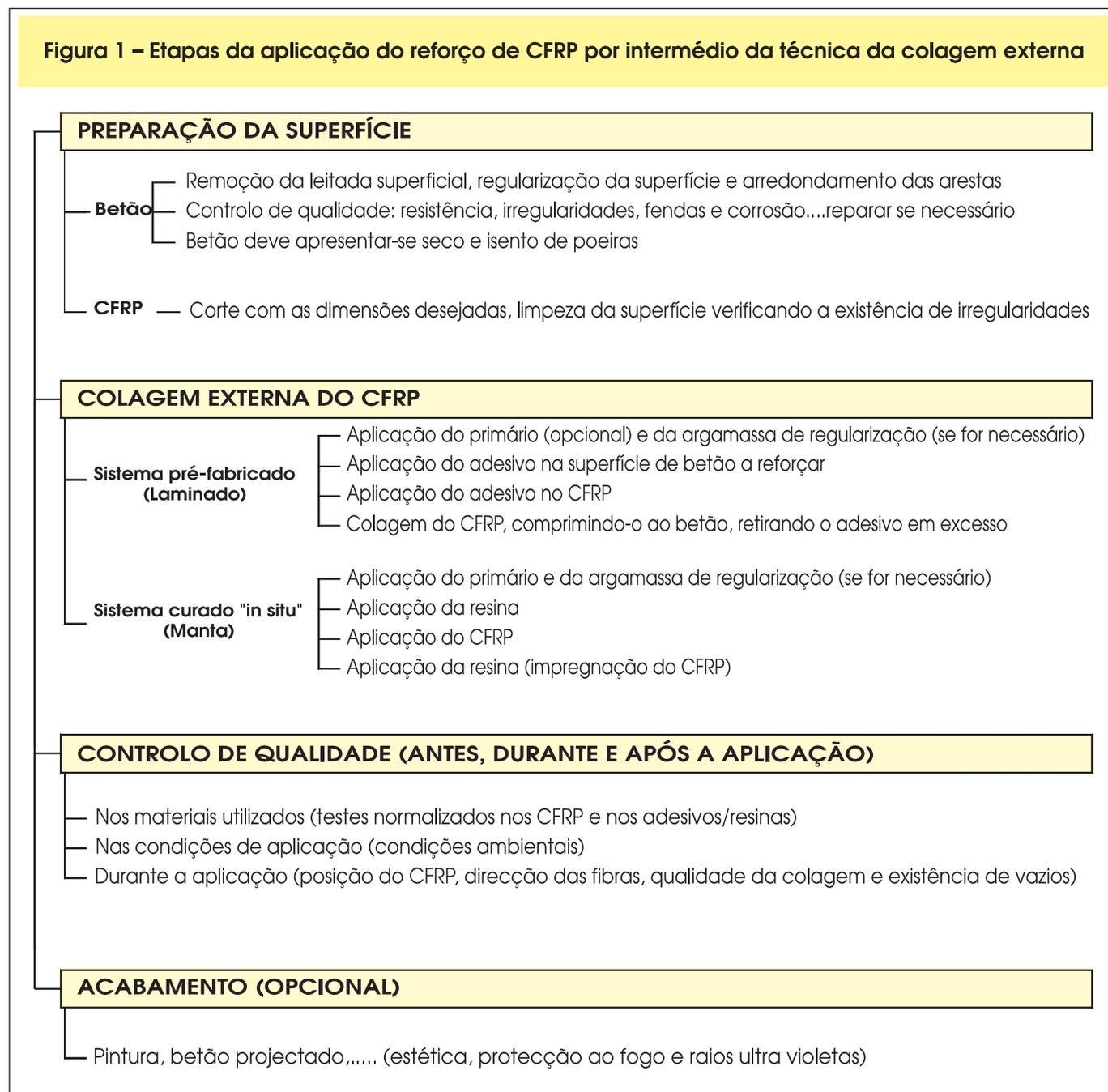
2 Descrição da técnica de reforço

A aplicação do reforço por colagem externa de sistemas compósitos de CFRP requer 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 1 apresentam-se os princípios gerais da técnica da colagem externa de compósitos de CFRP para o reforço de estruturas de betão, resumidas no documento da FIB [4].

3 Programa experimental sobre faixas de laje

O primeiro estudo surge na sequência de uma solicitação da Junta Autónoma das Estradas (JAE) para se analisar a viabilidade do reforço da laje superior do tabuleiro da "Ponte de Nossa Senhora da Guia" situada na vila de Ponte de Lima no Norte de Portugal (Costeira Silva et al. [8]).

Figura 1 – Etapas da aplicação do reforço de CFRP por intermédio da técnica da colagem externa



Este pretexto conduziu à realização de um programa experimental para avaliar a eficiência do reforço de faixas de laje de betão armado, correspondentes a modelos reduzidos da referida estrutura, à escala 1/2.5, usando sistemas compósitos de CFRP unidireccionais.

O programa experimental realizado baseou-se numa campanha de ensaios à flexão de quatro séries de faixas de laje comparando-se o comportamento estrutural de modelos de betão armado de referência, contendo armadura mínima (série MIN) ou o dobro desta (série N), com modelos reforçados, pré-fendilhados ou não, por intermédio

da colagem de dois sistemas de compósitos de CFRP unidireccionais. Um sistema é do tipo curado "in situ", a manta flexível (série M), e o outro é do tipo pré-fabricado, o laminado semi-rígido (série L). Foram utilizados dois tipos de manta: Replark 20 (série M(1)) e MBrace Manta C1-20 (série M(2)). Foram utilizados três tipos de laminado: CarboDur S512 (série L(3)), MBrace Laminado LM (série L(4)) e INEGI (série L(5)). Os modelos das séries reforçadas (séries M e L) foram concebidos de forma a terem uma capacidade resistente similar à dos modelos de referência da série N.

Tabela 1 – Características das faixas de laje

	Faixas de laje		ρ_s^{\min} (%)*	Critério de reforço		Observações
	Série	Modelo		Material	ρ (%)**	
	MIN	LA1M	0.25	Sem reforço		Betão armado 3 ϕ 6
		LA2M				
		LE1M				
		LE2M				
	N	LB3N	0.25	Adicionar 3 ϕ 6	0.25	Betão armado 6 ϕ 6
		LB4N				
M (manta)	M(1) - fend.	LA3R	0.25	Replark 20	0.09	Pré-fendilhação antes do reforço Modelos reforçados
		LB1R				
	M(1)	LC3R				
		LC4R				
M(2)	LD1BM	0.09	MBrace C1-20	0.09	Modelos reforçados	
	LD2BM					
L (Laminado)	L(3) - fend.	LA4S	0.25	CarboDur S512	0.11	Pré-fendilhação antes do reforço Modelos reforçados
		LB2S				
	L(3)	LC1S				
		LC2S				
	L(4)	LD3BL		0.13	MBrace LM	
LD4BL						
L(5)	LE3I	0.13	INEGI	0.13	Modelos reforçados	
LE4I						

$$*\rho_s^{\min} = A_{s,3\phi6} / A_c; **\rho_s = A_{s,3\phi6} / A_c \text{ e } \rho_{CFRP} = A_{CFRP} / A_c (\%)$$

Figura 2 – Características das faixas de laje

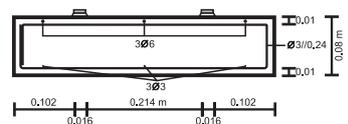
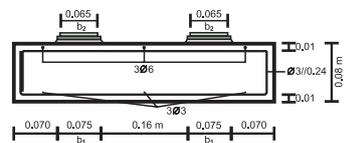
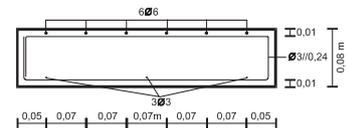
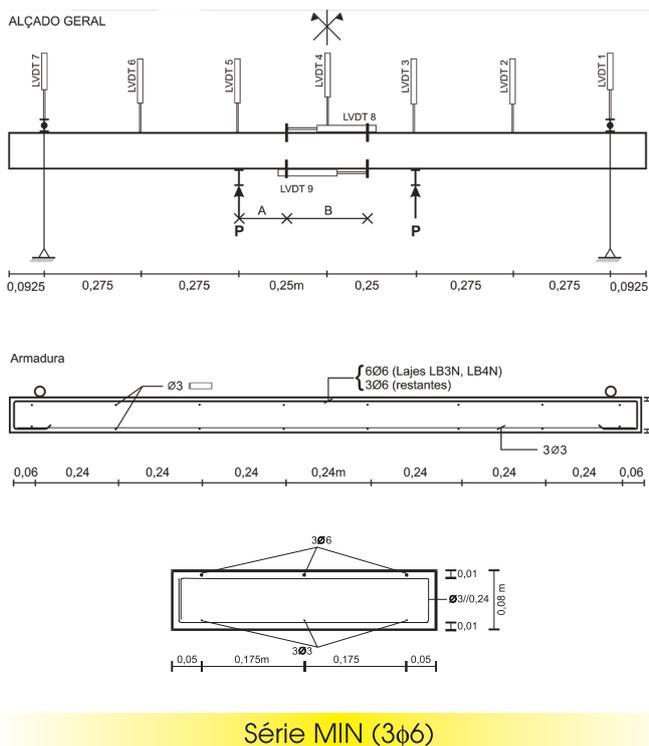


Tabela 2 – Propriedades do betão e do aço

Faixas de laje	Betão							Aço ϕ f_{sym} f_{sum} (MPa)		
	28 dias			Data do ensaio das lajes						
	f_{cm}^{cil} (MPa)	E_{cm} (GPa)	f_{ctm} (MPa)	f_{cm}^{cil} (MPa)	E_{cm} (GPa)	f_{ctm} (MPa)	$f_{ctm,p}$ (MPa)			
Betongem A	LA1M	50.3 (C45/55)	40.9	3.5	59.5	44.5	4.2	-	$\phi 3$ 330.3 464.6	
	LA2M				59.5	44.5	4.2	-		
	LA3R				60.2	44.7	4.2	3.8		
	LA4S				60.3	44.8	4.2	3.7		
Betongem B	LB1R	51.6 (C45/55)	36.9	3.6	61.6	40.3	4.3	4.0		
	LB2S				61.8	40.4	4.3	3.9		
	LB3N				58.0	44.7	4.1	-		
	LB4N				60.0	44.8	4.2	-		
Betongem C	LC1S	56.3 (C50/60)	36.8	3.8	65.6	39.7	4.5	3.8		$\phi 6$ 635.6 684.9
	LC2S				65.7	39.7	4.5	3.9		
	LC3R				65.8	39.8	4.5	3.7*		
	LC4R				65.5	39.7	4.5	3.5*		
Betongem D	LD1BM	45.0 (C40/50)	34.4	3.6	49.0	35.9	3.9	3.2		
	LD2BM				49.3	36.0	3.9	3.4		
	LD3BL				49.2	36.0	3.9	4.2		
	LD4BL				49.0	35.9	3.9	4.1		
Betongem E	LE1M	45.2 (C40/50)	36.5	3.6	47.9	37.9	3.8	-	$\phi 6$ 555.0 602.0	
	LE2M				47.9	37.6	3.8	-		
	LE3I				50.2	38.5	4.0	4.0		
	LE4I				50.2	38.5	4.0	4.0		

(valor) - classe de resistência do betão. * Sem pré-caroteamento.

3.1 Concepção dos modelos

As faixas de laje de betão armado tinham 45 cm de largura, 8 cm de espessura e 180 cm de comprimento. Nos modelos da série MIN a armadura de flexão é constituída por 3 $\phi 6$ de aço A500, que corresponde a uma percentagem de armadura equivalente à percentagem de armadura de flexão instalada na laje do tabuleiro ($\rho_s \cong 0.20\% \div 0.25\%$). Contudo, a análise da envolvente de esforços na secção transversal da pon-

te, resultante da combinação de acções consagradas no RSA [9], conclui ser necessário aumentar a capacidade resistente para o dobro da disponível actualmente (Oliveira e Figueiras [10]). Assim, os modelos da série N pretendem simular a situação desejável em betão armado, apresentando, para o efeito uma armadura de flexão de 6 $\phi 6$.

A secção transversal do reforço de CFRP das faixas de laje das séries M e L foi determinada de forma a que os modelos destas séries tenham a mesma capacidade resis-

Tabela 3 – Propriedades dos CFRP

Sistemas de CFRP		Principais propriedades			
Tipo	Materiais	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Extensão na rotura (%)	Espessura (mm)
Replark 20 (14)	Primário	-	-	-	-
	Resina	29.4	-	-	-
	Manta	3400	230	15	0.111
MBrace Manta C1-20 (15)	Primário	12	0.7	30	-
	Resina	50	3	25	-
	Manta	3700	240	15	0.111
CarboDur S512 (16)	Adesivo	20-30	8-12.5	30-60	2-3
	Laminado	2800	160	17	1.2
MBrace Laminado LM (15)	Primário	12	0.7	30	-
	Adesivo	-	7	-	-
	Laminado	2200	150	14	1.4
Laminado INEGI (17)	Primário	80	3.4	-	-
	Adesivo	22.8	5.1	-	-
	Laminado	2400	160	15	1.4

Figura 3 – Ensaio de “pull-off”

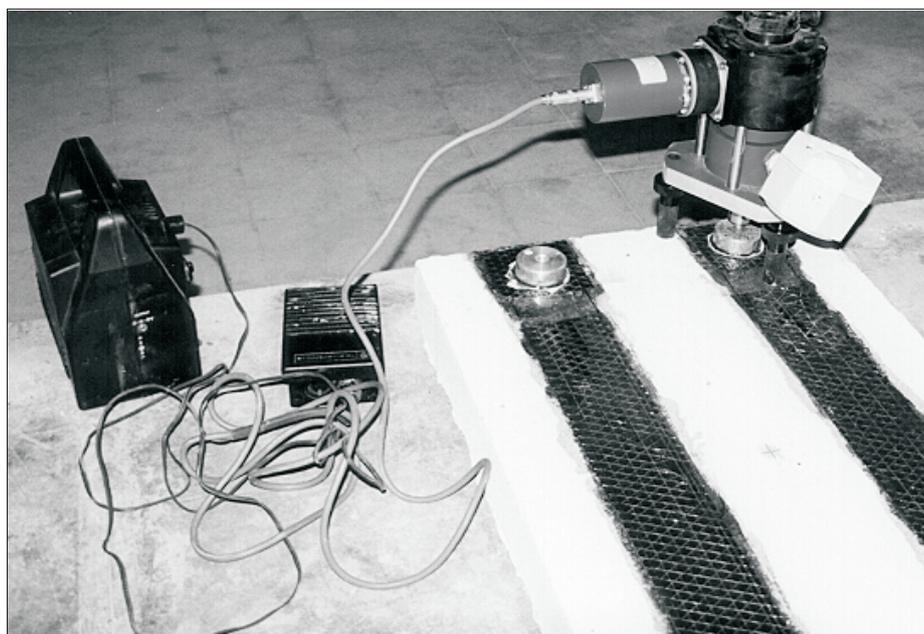
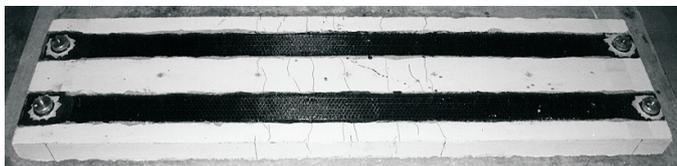
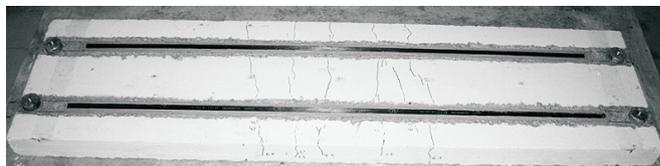


Figura 4 – Reforço à flexão por intermédio da colagem externa de sistemas de CFRP

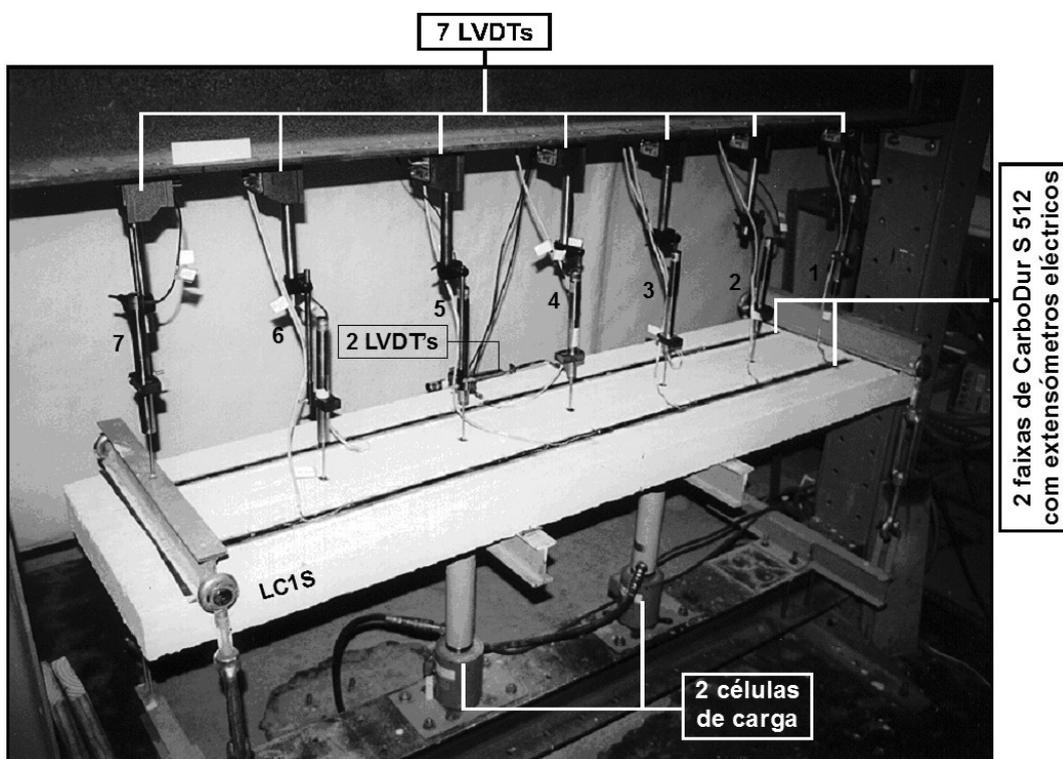


Aspecto final da faixa de laje após a execução do reforço (sistema curado "in situ")



Aspecto final da faixa de laje após a execução do reforço (sistema pré-fabricado)

Figura 5 – Esquema geral do ensaio das faixas de laje



te dos modelos da série N. Para tal, baseado no critério proposto por Rostasy (descrito na publicação de Juvandes [6]), limitou-se a extensão máxima no CFRP a 8‰ de forma a considerar a hipótese de ocorrência de roturas prematuras e a condicionar a deformação do aço em estado limite de utilização. Em cada uma das séries de modelos reforçados com CFRP (séries M e L) incluíram-se dois modelos cuja colagem do reforço foi efectuada após a introdução no betão de um estado de pré-fendilhação. Na Figura 2 e na Tabela 1 apresentam-se as informações gerais sobre os modelos de faixas de laje ensaiadas (Juvandes [6] e Dias [7]).

3.2 Caracterização dos materiais e da ligação betão-adesivo-CFRP

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 [11]. 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

Figura 6 – Critério de pré-fendilhação

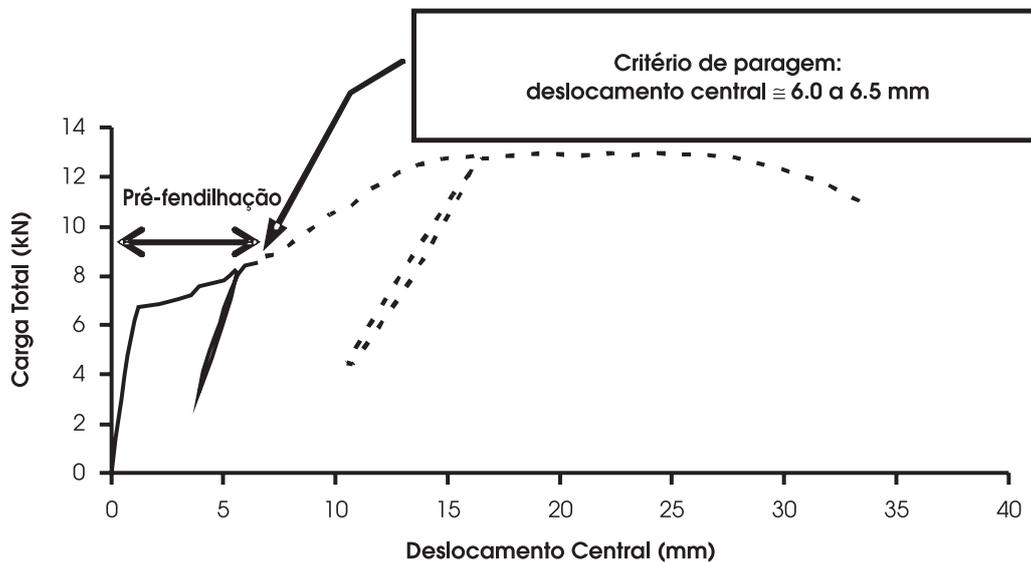


Tabela 4 – Resultados da pré-fendilhação

Modelos		Início da fendilhação		Fendilhação estabilizada		
		F_{fend} (kN)	δ_{fend} (mm)	F_{fest} (kN)	δ_{fest} (mm)	s_m (cm)
M(1) - fend.	LA3R	6.33	1.07	7.96	6.51	10.3
	LB1R	8.07	1.23	10.22	6.45	11.8
L(3) - fend.	LA4S	7.80	1.17	10.06	6.10	13.6
	LB2S	10.27	1.33	11.50	6.40	11.2

às expressões propostas pelo Modelo Código 1990 [12]. Os modelos de faixas de laje ensaiados continham aço de 3 mm (liso) e 6 mm (nervurado) e as suas características mecânicas foram avaliadas por intermédio de ensaios de tracção uniaxial. Na Tabela 2 apresentam-se, resumidamente, os valores médios das principais propriedades do betão e do aço.

As características dos materiais constituintes de cada um dos sistemas de CFRP utilizados foram obtidas nas fichas técnicas disponibilizadas pelos respectivos fabricantes e encontram-se resumidas na Tabela 3.

A caracterização da ligação betão-adesivo-CFRP foi efectuada por intermédio da realização de ensaios de arrancamento por tracção ("pull-off"), conforme representado na Figura 3 (Juvandes [6] e Dias [7]). O ensaio "pull-off" consiste no registo da força de tracção necessária para o arrancamento de pastilhas metálicas, de secção circular com 50 mm de diâmetro, coladas à superfície de betão, conforme representa-

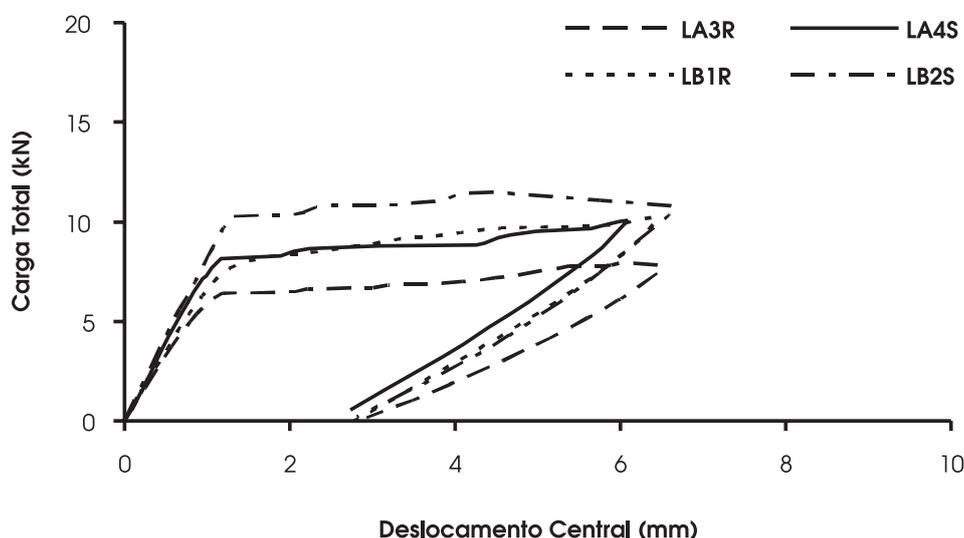
do na Figura 4. O valor da tensão de tracção, $f_{d,p}$, obtém-se dividindo o esforço de tracção na rotura pela secção da pastilha. De forma a circunscrever a tensão de aderência à área real de colagem da pastilha efectuou-se o pré-caroteamento no perímetro da pastilha. Os valores médios da aderência ($f_{cm,p}$) obtidos estão registados na Tabela 2, verificando-se que são superiores ao valor mínimo estabelecido para aplicar a técnica da colagem externa de compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão, que deve ser de 1.4 MPa (ACI Committee 440 [13]).

3.3 Aplicação dos sistemas de reforço

3.3.1 Mantas de CFRP

O tratamento da superfície consistiu na passagem de um esmeril nas zonas de colagem do CFRP, com o objectivo

Figura 7 – Curvas carga total vs deslocamento central do ensaio de pré-fendilhação (tipo I)



de remover a leitada superficial, aplicando-se, de seguida, jactos de ar a fim de eliminar as sujidades.

Uma camada de primário foi aplicada em toda a extensão de reforço, de forma a garantir a melhor aderência possível da manta à base. Posteriormente, procedeu-se à colagem das duas faixas (com duas camadas cada) de manta de CFRP (Juvandes [6] e Dias [7]).

3.3.2 Laminados de CFRP

O tratamento da superfície foi feito recorrendo ao martelo de agulhas e ao jacto de ar, tendo-se de seguida aplicado uma camada de primário (excepto no caso do sistema CarboDur S512). Posteriormente, procedeu-se à colagem das duas tiras de laminado de CFRP (Juvandes [6] e Dias [7]). Na Figura 4 apresenta-se o aspecto final de dois modelos após a execução do reforço (modelos pré-fendilhados).

3.4 Descrição dos ensaios e apresentação dos resultados

Neste programa experimental efectuaram-se dois tipos de ensaios à flexão em quatro pontos. O primeiro (tipo I) correspondente ao carregamento dos modelos, previamente à aplicação do reforço, de modo a atingirem um determinado padrão de fendilhação (modelos LA3R, LB1R, LA4S e LB2S). 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 rotura do compósito de CFRP, as faixas de laje foram carregadas de baixo para cima. A Figura 5 ilustra o aspecto geral do ensaio à flexão realizado sob as faixas de laje de betão armado, onde se identificam os transdutores utilizados para medir forças (células

de carga), deslocamentos (LVDT's) e extensões no CFRP (extensómetros eléctricos).

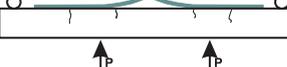
3.4.1 Ensaio de pré-fendilhação (tipo I)

Reforçar ou reabilitar estruturas existentes envolve, frequentemente, a presença de betões em estado fendilhado. Nesse sentido, os modelos LA3R, LB1R, LA4S e LB2S foram, previamente à aplicação do reforço, solicitados de tal forma a atingirem um estado de fendilhação estabilizada (Dias [7]). 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 6), 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). O carregamento imposto nos quatro modelos pré-fendilhados provocou, essencialmente, o aparecimento de fendas na zona central das faixas de laje. Na Tabela 4 apresentam-se, para cada um dos modelos pré-fendilhados, a carga total (F) e o deslocamento central (δ), aquando do início de fendilhação e da situação de fendilhação estabilizada, assim como o valor do afastamento médio entre fendas verificado no final do ensaio tipo I. Após a realização do ensaio de pré-fendilhação descarregaram-se os modelos, conforme se pode observar na Figura 7, e procedeu-se à operação de reforço (Figura 4). Posteriormente cada um dos modelos foi carregado até esgotar a sua capacidade resistente (ensaio tipo II).

3.4.2 Ensaio de rotura (tipo II)

Na Tabela 5 apresentam-se, para todos os modelos submetidos à rotura, os principais resultados em termos de esta-

Tabela 5 – Principais resultados de cada um modelos ensaiados

Faixas de laje			Serviço				Último		Modos de Rotura
Série	Reforço	Modelo	F_{fend} (kN)	s_m (I) (cm)	F_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	s_{um} (II) (cm)		
MIN	-	LA1M	6.74	-	13.02	20.9	9.9		
		LA2M	7.20	-	13.40	20.0	9.7		
		LE1M	6.66	-	12.51	18.3	8.5		
		LE2M	6.78	-	12.49	25.6	8.7		
N	3φ6	LB3N	7.30	-	29.20	22.7	6.8	Rotura da armadura (aço)	
		LB4N	7.60	-	28.60	22.6	6.2		
M	M(1)	LC3R	10.60	-	39.10	39.3	6.3		
		LC4R	10.60	-	31.30	32.3	6.4		
	M(1) - fend.	LA3R	*	10.3	31.78	39.1	6.6		
		LB1R	*	11.8	36.26	36.5	6.8		
	M(2)	LD1BM	8.04	-	28.22	32.1	6.4		
		LD2BM	8.59	-	27.03	24.9	7.3		
L	L(3)	LC1S	11.00	-	34.10	31.9	6.4		
		LC2S	11.40	-	37.70	30.6	6.3		
	L(3) - fend.	LA4S	*	13.6	30.60	29.3	6.7		
		LB2S	*	11.2	33.46	25.1	6.6		
	L(4)	LD3BL	8.79	-	33.13	35.5	7.5		
		LD4BL	8.02	-	32.33	41.4	7.9		
	L(5)	LE3I	7.59	-	30.76	31.0	6.7		
		LE4I	7.29	-	31.95	38.6	6.9		

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

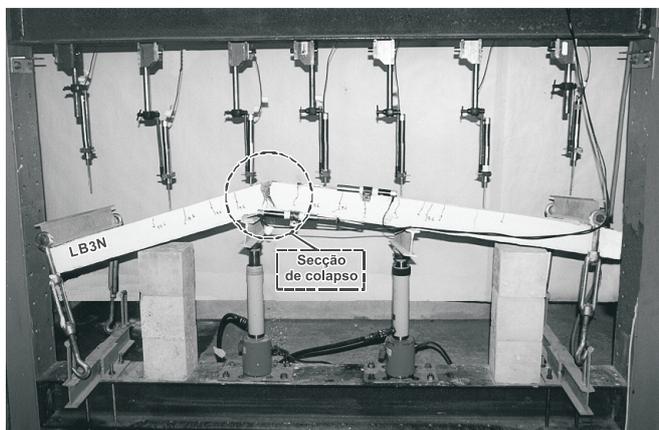
dos limites (serviço e últimos). Nomeadamente, estão registados os valores da carga de início de fendilhação (F_{fend}), da carga total máxima (F_{max}) e da respectiva flecha central (δ_{max}), do afastamento médio entre fendas no final do ensaio (ao ensaio tipo I corresponde s_m e ao ensaio tipo II corresponde s_{um}), assim como o modo de rotura verificado.

Em termos de serviço, regista-se que a carga de início de fendilhação (F_{fend}) apresenta valores mais elevados nas faixas de laje reforçadas sem pré-fendilhação diminuindo progressivamente para as faixas de laje das séries N e MIN. 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 que as faixas de laje apresentaram, permite concluir que o afasta-

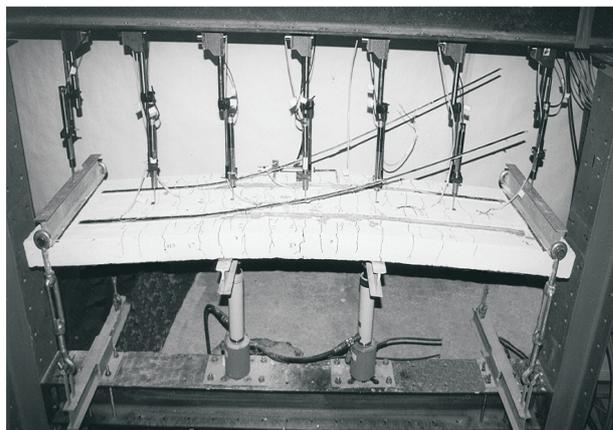
mento médio entre fendas s_{um} atinge valores máximos para os modelos da série MIN, verificando-se que para os modelos das séries N, M e L, aquele apresenta valores semelhantes.

Em estado limite último e em relação aos modelos da série MIN, os modelos reforçados com CFRP apresentam maior carga total máxima (superior ao dobro) e maior flecha central. Relativamente aos modos de rotura, se nos modelos reforçados com laminado foi único (o destacamento precoce do reforço de CFRP), para os modelos reforçados com manta ocorreram dois tipos de modos de rotura (a rotura do CFRP e a rotura prematura por destacamento do reforço de CFRP). Os modelos de betão armado (séries MIN e N) romperam pela rotura da armadura de aço. Na Figura 8 apresentam-se os modos de rotura verificados nos modelos ensaiados.

Figura 8 – Modos de rotura dos modelos ensaiados



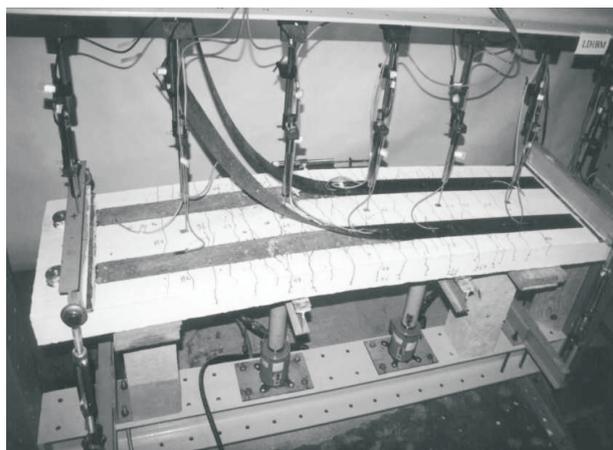
Série MIN e N – Rotura da armadura



Série L – Destacamento do CFRP



Série M – Rotura do CFRP



Série M – Destacamento do CFRP

Tabela 6 – Comparação do comportamento último (valores médios)

Séries	F_{max} (kN)	$F_{max} / F_{max, MIN}$	$F_{max} / F_{max, N}$	δ_{max} (mm)	δ_{max}/l	s_{um} (cm)
MIN	14.2	1.00	0.49	29.7	1/54	9.2
N	28.9	2.04	1.00	27.7	1/58	6.5
M(1)	34.5	2.43	1.19	35.8	1/45	6.4
M(2)	29.8	2.10	1.03	28.5	1/56	6.9
L(3)	33.4	2.35	1.16	31.3	1/51	6.4
L(4)	34.9	2.46	1.21	38.5	1/42	7.7
L(5)	33.8	2.38	1.17	34.8	1/46	6.8

Figura 9 – Curvas médias carga total vs deslocamento central das quatro séries de faixas de laje

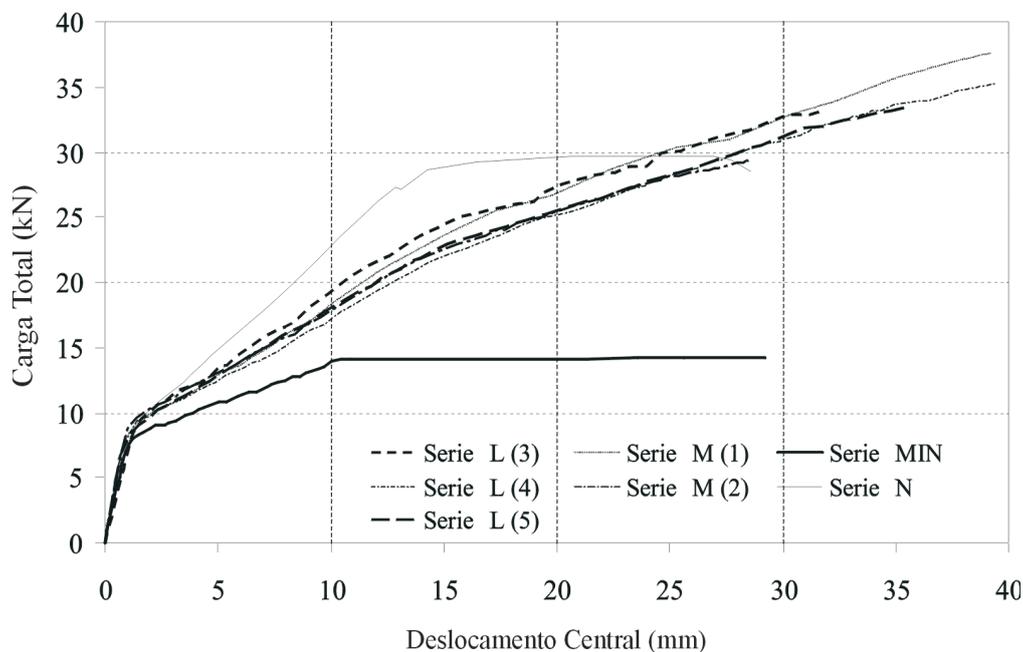


Tabela 7 – Comportamento último (valores médios): efeito da pré-fendilhação do betão

Séries	F_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	s_{um} (cm)
M(1)	34.5	35.8	6.4
M(1) - fend.	35.5	37.8	6.7
L(3)	33.4	31.3	6.4
L(3) - fend.	32.0	27.2	6.6

3.5 Análise de resultados

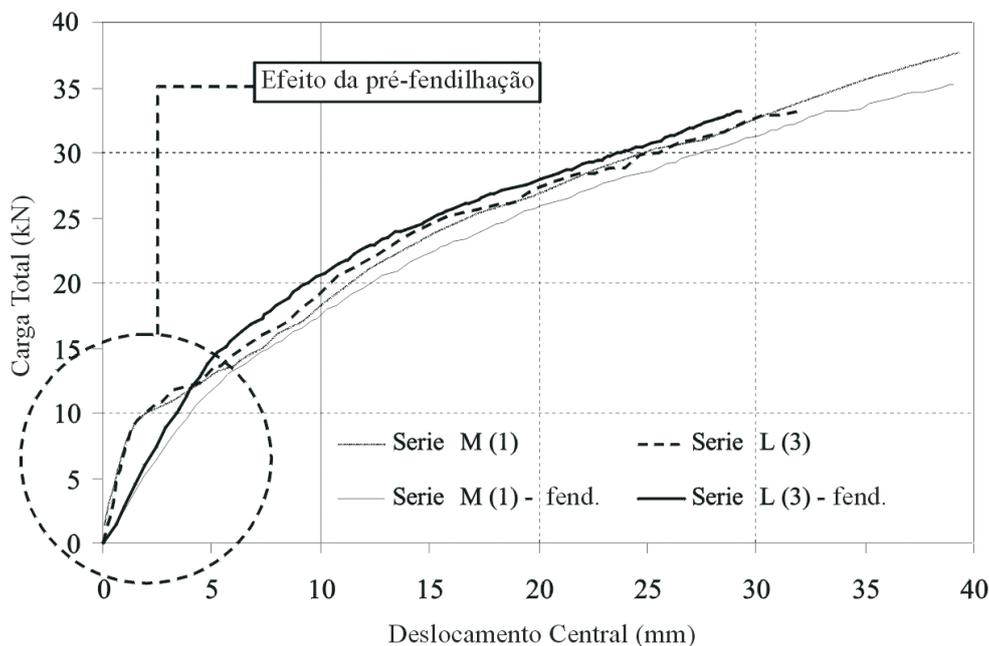
De forma a efectuar uma análise comparativa mais directa das séries de faixas de laje ensaiadas, através do diagrama de comportamento carga total vs deslocamento central, considerou-se o efeito da variação de parâmetros como a geometria e o tipo de betão dos diversos modelos ensaiados, normalizando-se as forças (Juvandes [6] e Dias [7]). 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, N, M (M (1) e M (2)) e L (L (3), L (4) e L (5)) como se ilustram na Figura 9.

Da Figura 9 observa-se que os modelos reforçados exteriormente com material compósito evidenciam três estados principais de comportamento, 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 (séries MIN e N). 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 e um ganho significativo de rigidez e de flecha na rotura.

Na Tabela 6 aparecem os parâmetros utilizados para quantificar os ganhos registados em termos de capacidade resistente última e ductilidade que se acabaram de referir. Em

Figura 10 – Curvas médias carga total vs deslocamento central (efeito da pré-fendilhação do betão)



termos médios os modelos reforçados com CFRP apresentam uma carga máxima (F_{\max}) de 2.34 vezes superior e uma flecha máxima (δ_{\max}) de 1.14 vezes mais do que os modelos da série MIN. No caso particular da série M(2) o ganho de resistência foi um pouco mais baixo que os restantes modelos reforçados, pois surgiu um modo de rotura não desejável (destacamento na interface betão-primário) devido a uma deficiente preparação da superfície do betão.

As séries M e L apresentam, em termos médios, uma carga máxima de 1.15 vezes superior e uma deformação máxima de 1.22 vezes mais que as correspondentes da série N de betão armado (Tabela 6). Conclui-se da Figura 9 que esses modelos, além de terem uma maior resistência última e uma maior flecha na rotura do que os modelos da série N, registam, face a estes, uma menor rigidez em serviço.

A Figura 10 ilustra a diferença da curva de comportamento dos modelos, com (séries M(1)-fend. e L(3)-fend.) e sem (séries M(1) e L(3)) pré-fendilhação do betão. 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.

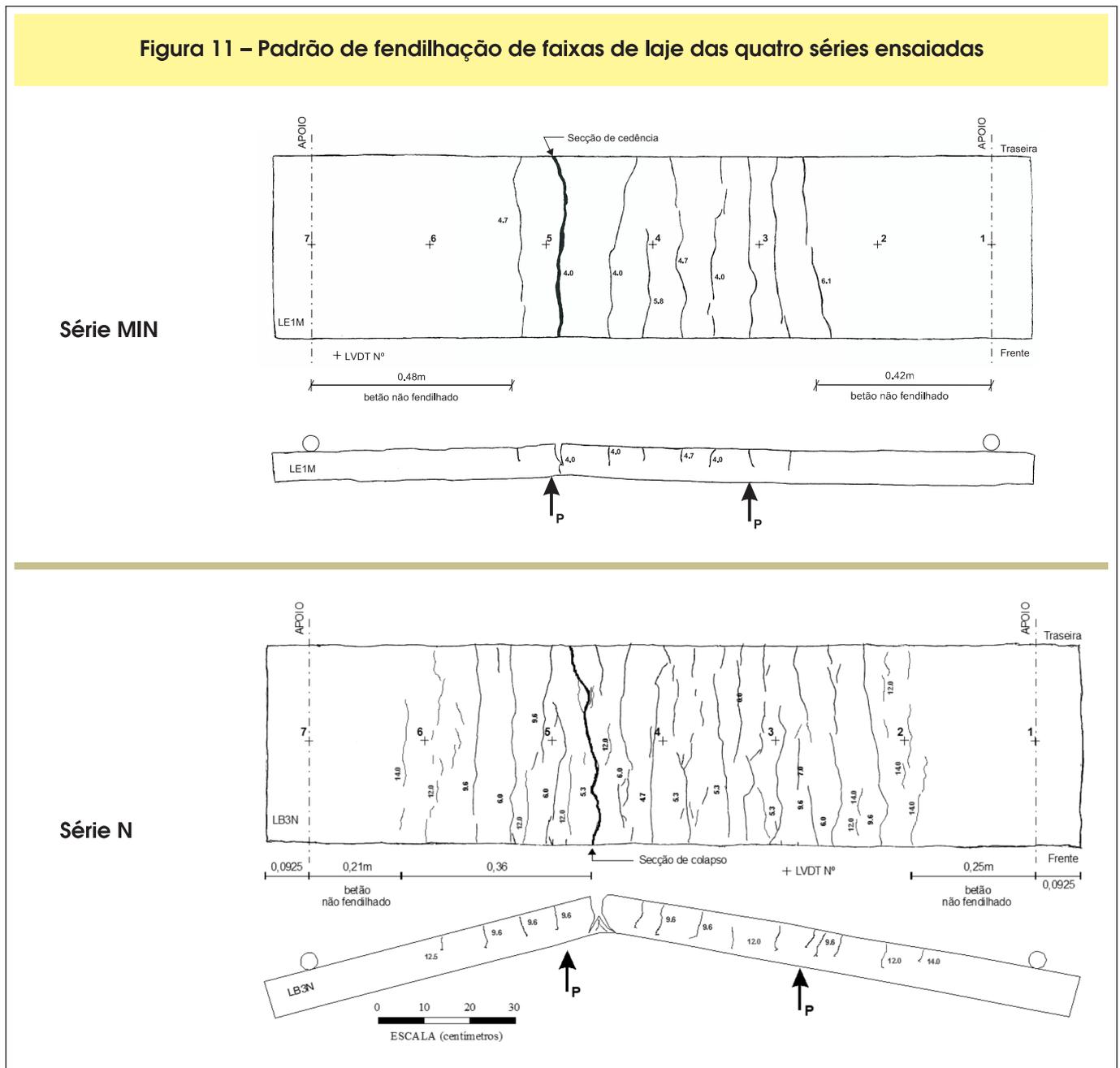
Na Tabela 7 resumem-se, para estes modelos, os valores médios da carga máxima (F_{\max}), da flecha máxima em plena resistência (δ_{\max}) e do afastamento médio entre fendas registado no final do ensaio (s_{um}). Verifica-se que, independentemente do tipo de sistema de CFRP, o facto de existir

uma pré-fendilhação do betão não conduziu a variações significativas das grandezas anteriormente referidas.

A Figura 11 ilustra o padrão de fendilhação final tipo registado em faixas de laje das quatro séries ensaiadas (Juvandes [6] e Dias [7]). Observa-se que nos modelos das séries N, M e L, aquele é bastante repartido e semelhante, tendo-se verificado afastamentos médios entre fendas de 6.4 cm a 7.7 cm (Tabela 6). Por outro lado, os modelos da série MIN registam um padrão de fendilhação menos extenso do que o obtido nas outras séries, traduzido no maior valor do afastamento médio entre fendas verificado (Tabela 6).

A Tabela 8 expõe os níveis de desempenho dos compósitos de CFRP (séries M e L) em termos de valores médios máximos obtidos para as extensões ($\epsilon_{\max}^{\text{CFRP}}$), para as tensões normais ($\sigma_{\max}^{\text{CFRP}}$) e para as tensões de corte na interface betão-adesivo-CFRP ($\tau_{\max}^{\text{interface}}$). A ocorrência de roturas prematuras verificadas nos modelos reforçados com laminados de CFRP está directamente relacionada com o esgotamento da capacidade de aderência do betão ($\tau_{\max}^{\text{interface}} \cong f_{ctm,p}$). Tal facto, traduz-se num baixo rendimento do compósito que em média foi de 62%. Nos modelos reforçados com manta de CFRP, com a excepção dos modelos M(2) (deficiente aplicação do reforço), ocorreu a rotura do compósito, embora para valores máximos medidos da extensão inferiores ao valor indicado pelo fornecedor (o máximo dos $\epsilon_{\max}^{\text{CFRP}} < 15\%$). Apesar disso, o nível médio de rendimento destes modelos (na ordem de 74%) é superior ao verificado para os modelos reforçados com laminados de CFRP.

Figura 11 – Padrão de fendilhação de faixas de laje das quatro séries ensaiadas



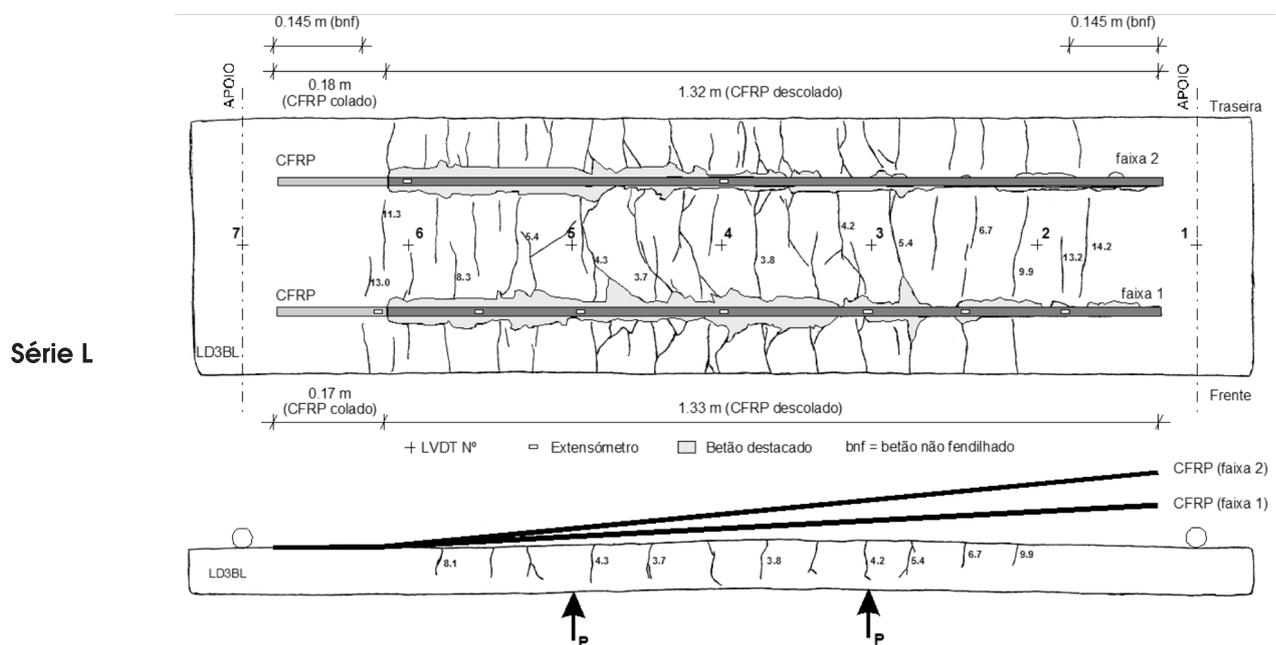
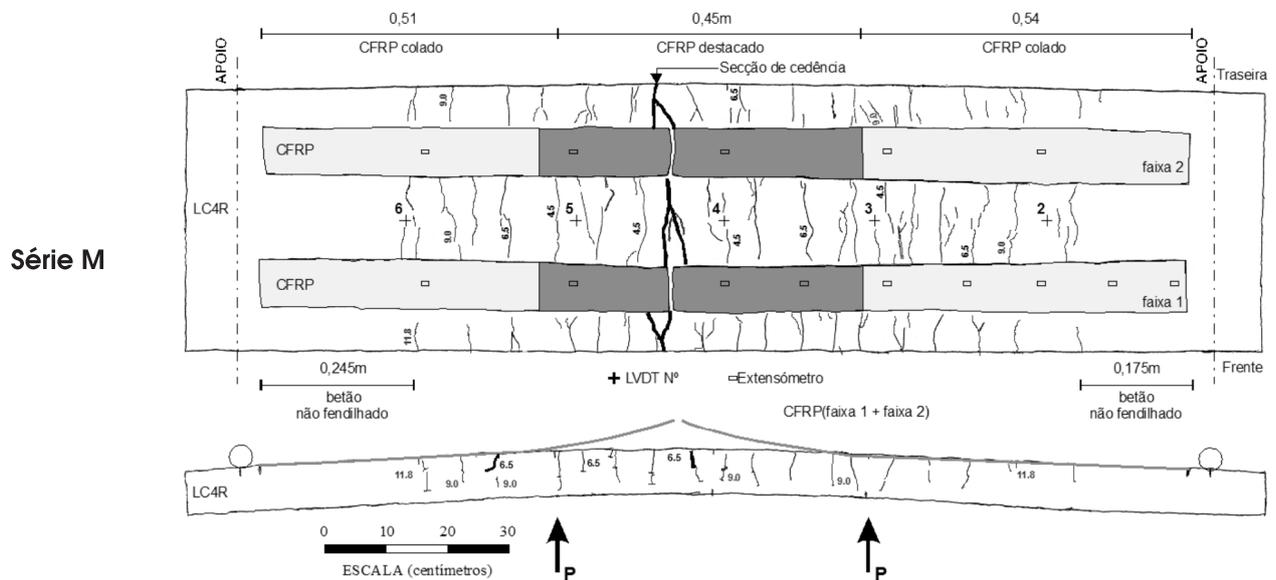
4 Programa experimental sobre modelos de vigas

Em diversos estudos já efectuados tem-se verificado que é difícil obter o total aproveitamento do reforço de CFRP, isto é, atingir a rotura do compósito em simultâneo com o esmagamento do betão. Tal deve-se ao facto de se verificar a ocorrência de roturas prematuras intercalares, ao longo da junta de ligação betão-adesivo-CFRP, que culminam no destacamento antecipado do reforço.

A secção de interrupção de um reforço cria, por si, uma descontinuidade estrutural que envolve alguns meca-

nismos desfavoráveis de transferência de esforços na junta (concentração de tensões de tracção e de corte), abrangendo uma região designada por zona de ancoragem (Costeira Silva [18]). A experiência de vários autores (Neubauer e Rostasy [19]) conclui que a referida zona deve merecer especial atenção. Por exemplo, em vigas de betão armado reforçadas por adição de chapas metálicas, aponta-se a conveniência do uso de sistemas de ancoragem mecânica das chapas, de modo a prevenir o fenómeno de destacamento frágil da extremidade (efeito "peeling") e, simultaneamente, incrementar a ductilidade e a capacidade de carga última

Figura 11 – Padrão de fendilhação de faixas de laje das quatro séries ensaiadas (cont.)



da viga. A adição destes mecanismos de fixação cria forças de compressão normais ao plano da ligação com efeitos benéficos, frente aos mecanismos de delaminação e "peeling" que se formam na junta de ligação por efeito da solicitação.

O segundo estudo desenvolvido no LABEST apresenta um trabalho experimental que visou comparar o com-

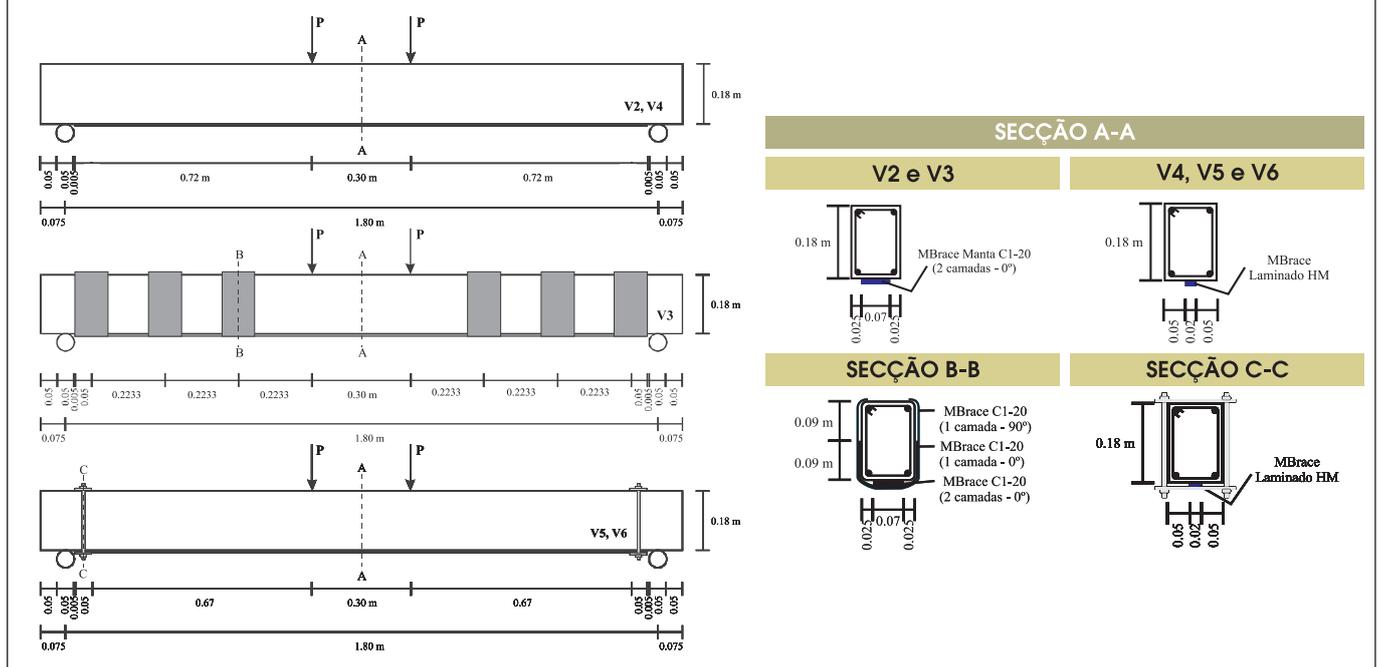
portamento à flexão de dois grupos de vigas de betão armado. Um correspondente a uma viga simplesmente armada (tomada como referência) e outro englobando cinco vigas reforçadas, para capacidades resistentes semelhantes, através da colagem externa de dois sistemas compósitos de CFRP unidireccionais, o curado "in situ" MBrace Manta C1-20 (manta flexível) e o

Tabela 8 – Desempenho do CFRP e da interface betão-adesivo-CFRP

Séries	$\varepsilon_{\text{max}}^{\text{CFRP}}$ (‰)	$\sigma_{\text{max}}^{\text{CFRP}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{max}}^{\text{CFRP}} / \sigma_u^*$ (%)	$\tau_{\text{ligação max}}$ (MPa)	$f_{\text{ctm,p}}$ (MPa)
M (1)	10.2	2352.0	69.2	1.8	3.6
M (1) - fend.	11.6	2661.1	78.3	1.7	3.9
M (2) **	7.3	1748.4	47.3	1.3	3.3
L (3)	10.8	1731.0	61.8	4.2	3.9
L (3) - fend.	9.4	1508.0	53.9	2.8	3.8
L (4)	10.0	1499.3	68.1	3.5	4.2
L (5)	9.4	1505.6	62.7	3.3	4.0

* Tensão σ_u - ver Tabela 3; ** Excluído da análise.

Figura 12 – Vigas reforçadas com CFRP



pré-fabricado MBrace Laminado HM (laminado semi-rígido). Para cada sistema testado analisaram-se duas soluções de reforço à flexão, diferenciadas pela adição ou ausência de mecanismos exteriores de fixação nas zonas de ancoragem do compósito. Com este estudo pretende-se avaliar o desempenho das vigas reforçadas comparando-o com o da viga de referência e, em particular, analisar a eficiência da utilização de mecanismos exteriores de fixação, em termos de estados

limites (serviço e último), modos de rotura e níveis de aproveitamento do material de reforço.

4.1 Conceção dos modelos

O programa experimental envolveu a concepção de seis modelos de vigas designados por V1 a V6. Um modelo é de referência (viga V1), dois são reforçados com mantas (vigas V2 e V3) e os restantes três são reforçados com

Figura 13 – Mecanismos exteriores de fixação adoptados

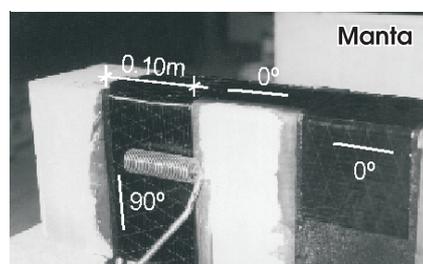
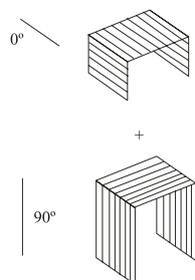


Tabela 9 – Propriedades dos materiais

Beião					
Idade	f_{cm}^{cub} (MPa)	f_{cm}^{cil} (MPa)	E_{cm} (GPa)	f_{ctm} (MPa)	$f_{ctm,p}$ (MPa)
28 dias	41,4	36,7	28,5	2,9	-
200 dias	47,7	41,0	31,1	4,2	4,0
Aço					
Diâmetro	f_{sym} (MPa)		f_{sum} (MPa)		
φ6	555		602		
φ8	533		543		
CFRP					
Tipo	Material	Resistência à tracção (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Extensão Última (‰)	Espessura (mm)
MBrace	Primário	12	0,7	30	-
Manta C1-20 (15)	Resina Manta	50 3700	3 240	25 15	- 0,111
MBrace Laminado HM (15)	Adesivo Laminado	- 2200	7 200	- 11	- 1,4

laminados (vigas V4, V5 e V6). As vigas apresentam uma secção transversal de 0,12x0,18 m² estando armadas longitudinalmente com 2φ8 na face inferior e 2φ6 na face superior. A possibilidade de rotura prematura por corte foi prevenida por intermédio da colocação de estribos verticais φ6 afastados de 0,10 m.

A quantificação do reforço de CFRP foi obtida de forma a que as vigas reforçadas apresentassem, aproximadamente, uma capacidade resistente 50% superior à da viga de referência (viga não reforçada). O pré-dimensionamento das secções transversais dos reforços foi efectuado tendo em consideração a hipótese de ocorrência de roturas pre-

maturas e a necessidade de evitar que a armadura plastifique em serviço. Para tal, recorrendo ao critério proposto por Rostasy (descrito em Juvandes [6]) e às recomendações do fabricante (Bettor MBT Portugal [15]), limitou-se a deformação máxima no compósito a 7,5‰ no caso da manta e a 5,5‰ no caso do laminado. A largura da secção transversal dos reforços adoptados traduziu-se, para o caso da manta flexível, em duas camadas sobrepostas com largura de 7 cm, e, para o caso do laminado, numa tira com 2 cm de largura. Na Figura 12 apresentam-se informações gerais sobre os modelos que foram reforçados (Dias [7]).

Figura 14 – Ensaio de “pull-off”

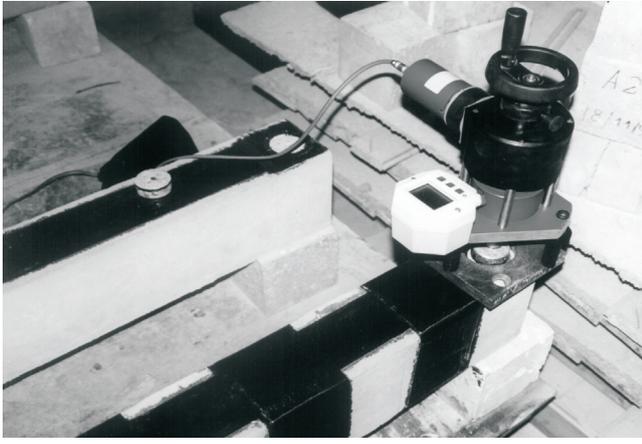
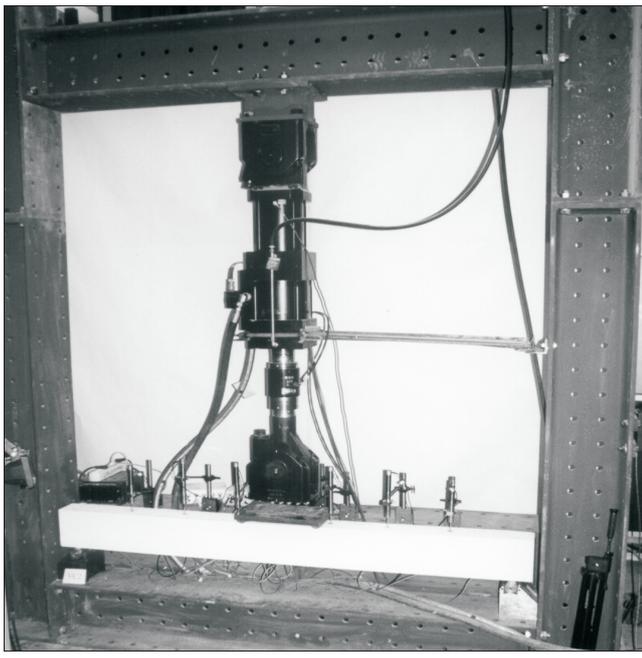


Figura 15 – Esquema geral do ensaio das vigas



Relativamente aos mecanismos exteriores de fixação do compósito longitudinal, no caso da viga reforçada com o sistema manta (viga V3) recorreu-se a presilhas executadas com mantas de CFRP. Primeiro aplicou-se uma camada de manta com 30 cm de comprimento e 10 cm de largura, com as fibras orientadas a 0° (a mesma orientação que a do reforço longitudinal). De seguida, colocou-se outra camada de manta com 52 cm de comprimento e 10 cm de largura mas, com as fibras orientadas a 90° . A Figura 13 ilustra a solução adoptada para as presilhas executadas com mantas de

CFRP. Embora não houvesse a preocupação de reforço ao corte, o posicionamento do reforço transversal foi avaliado com base no modelo da treliça, tendo a sua quantificação sido avançada com base no alargamento da área de colagem. No caso das vigas reforçadas com o sistema laminado aplicaram-se (vigas V5 e V6), baseado no trabalho experimental de Deuring [20], presilhas de aço colocadas nas extremidades daquele compósito. A Figura 13 apresenta um pormenor desse mecanismo exterior de fixação.

4.2 Caracterização dos materiais e da ligação betão-adesivo-CFRP

Na Tabela 9 apresentam-se, resumidamente, os valores médios das principais propriedades do betão (aos 28 dias de idade e à data do ensaio das vigas: 200 dias de idade), do aço e dos constituintes dos sistemas de CFRP utilizados: MBrace Manta C1-20 e MBrace Laminado HM. Os valores das propriedades do betão e do aço foram obtidos experimentalmente de acordo com o descrito na secção 3.2.

A caracterização da ligação betão-adesivo-CFRP foi efectuada através da realização de ensaios de arrancamento por tracção (“pull-off”). Na Figura 14 ilustra-se, a título de exemplo, a realização deste tipo de ensaio, arrancando-se uma pastilha colada numa viga reforçada com o sistema curado “in situ” (V3). Estes ensaios conduziram a um valor médio da tensão de tracção $f_{ctm,p}$ (tensão de aderência) de 4.0 MPa (Tabela 9), ou seja, a um valor da aderência superior ao mínimo estabelecido para aplicar a técnica da colagem externa de compósitos de CFRP no reforço de estruturas de betão, que deve ser de 1.4 MPa (ACI Committee 440 [13]).

4.3 Aplicação dos sistemas de reforço

O procedimento da aplicação do reforço de CFRP (manta e laminado) foi o mesmo que o descrito na secção 3.3, tendo-se considerado os princípios da Figura 1 (Dias [7]).

4.4 Sistema de ensaio

O tipo de carregamento usado consistiu em submeter os modelos à flexão sob quatro pontos. A distância entre apoios considerada foi de 1.80 m e os pontos de carga foram colocados, em relação ao centro das vigas, em secções afastadas 15 cm para cada lado (Figura 12). O esquema geral dos ensaios à flexão das vigas é apresentado na Figura 15.

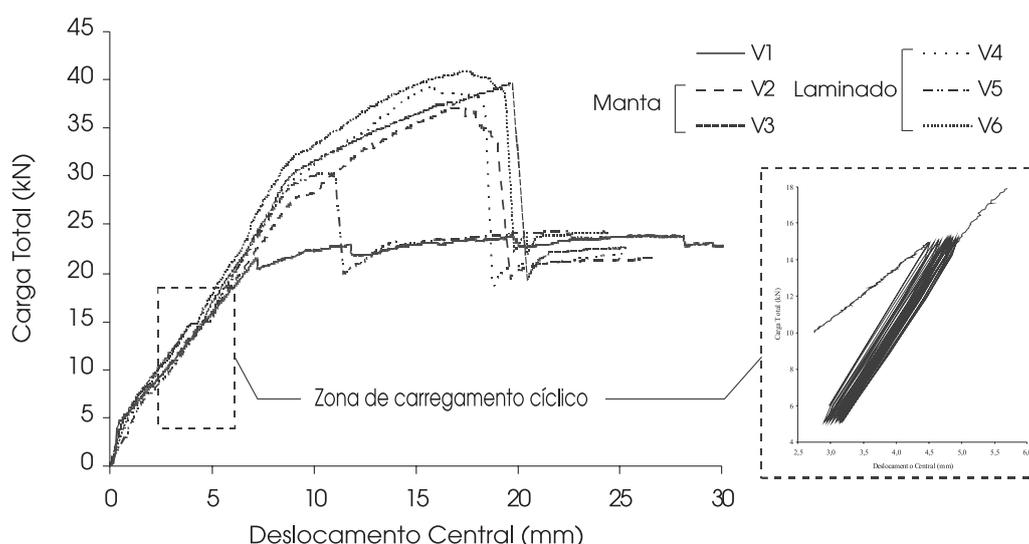
A viga de referência (V1) foi solicitada até à rotura através de um carregamento monotónico crescente, com uma velocidade de deformação de 0.6 milímetros por minuto. As vigas reforçadas foram inicialmente solicitadas até aos 15 kN com uma velocidade de 0.025 kN por segundo. A partir daí, foi imposto um carregamento repetido através de 60 ciclos de carga e descarga, com uma frequência de 1 Hz. Em cada ciclo, o limite inferior da carga aplicada foi de 5 kN e o limite superior foi de 15 kN. Estes limites correspondem, respectivamente,

Tabela 10 – Principais resultados de cada um dos modelos ensaiados

Propriedades	Vigas					
	V1	Manta			Laminado	
		V2	V3**	V4	V5**	V6**
F_{fend} (kN)	4,47	5,0	5,36	4,20	5,75	6,40
$F_{fend} / F_{fend, V1}$	1,0	1,12	1,20	0,94	1,29	1,43
F_{sy} (kN)	21,18	28,39	29,8	28,75	29,38	31,0
$F_{sy} / F_{sy, V1}$	1,0	1,34	1,41	1,36	1,39	1,46
α_{sy} (mm)	7,2	9,2	8,8	9,0	9,1	8,6
$\alpha_{sy} / \alpha_{sy, V1}$	1,0	1,28	1,22	1,25	1,26	1,19
F_{max} (kN)	23,87	37,19	39,64	39,22	30,33	40,81
$F_{max} / F_{max, V1}$	1,0	1,56	1,66	1,64	1,27	1,71
δ_{max} (mm)*	41,37	17,16	19,74	15,62	10,69	17,35
$\delta_{max} / \delta_{max, V1}$	1,0	0,41	0,48	0,38	0,26	0,42
Modos de rotura	Esmagamento do betão	Destacamento do CFRP na interface com o betão	Rotura do CFRP	Destacamento do CFRP pelo adesivo e pelo betão	Destacamento do CFRP pela ligação adesivo/CFRP e perda de ancoragem	Destacamento do CFRP pelo adesivo, pelo betão e perda de ancoragem

* Para a viga V1 corresponde à carga de rotura; ** Modelos com mecanismos exteriores de fixação do CFRP.

Figura 16 – Curvas médias carga total vs deslocamento central das vigas ensaiadas



a 15% e 45% da carga previsível de rotura das vigas reforçadas. Na última fase do ensaio, as vigas foram solicitadas monotonicamente até à rotura com uma velocidade de deformação de 0.6 milímetros por minuto.

Para instrumentação dos modelos recorreu-se a uma célula de carga, a transdutores de deslocamentos (LVDT) e a extensómetros eléctricos colados ao longo do CFRP.

Tabela 11 – Desempenho do CFRP e da interface betão-adesivo-CFRP

Vigas		$\varepsilon_{\text{max}}^{\text{CFRP}}$ (‰)	$\sigma_{\text{max}}^{\text{CFRP}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{max}}^{\text{CFRP}} / \sigma_u^*$ (%)	$\tau_{\text{max}}^{\text{ligação}}$ (MPa)	$f_{\text{ctm,p}}$ (MPa)
V2	Manta	8.1	1936.8	52.3	1.1	3.6
V3		8.7	2088.0	56.4 - 100	1.6	3.6
V4	Laminado	6.9	1374.0	62.5	2.5	4.4
V5		4.1	812.0	36.9	1.1	4.4
V6		7.2	1442.0	65.5	2.7	-

* Tensão σ_u - ver Tabela 9.

4.5 Apresentação e análise dos resultados

Na Tabela 10 apresentam-se, para cada um dos modelos ensaiados, os principais resultados em termos de carga de início de fendilhação (F_{fend}), da carga de cedência do aço (F_{sy}) e da respectiva flecha (a_{sy}), da carga máxima (F_{max}) e respectiva flecha (δ_{max}). Apresentam-se, também, as relações das vigas reforçadas com a viga de referência (V1), em termos das grandezas anteriormente referidas. A Figura 16 apresenta a curva de comportamento das seis vigas ensaiadas.

Em serviço regista-se que a carga de início de fendilhação apresenta valores mais altos nos modelos reforçados, com a excepção da viga V4. A presença de uma armadura adicional nas vigas reforçadas provocou um aumento médio de 39% da carga correspondente à cedência do aço, face à registada na viga de referência. O carregamento repetido nas vigas reforçadas pode ter contribuído para que a flecha correspondente à cedência do aço seja maior nessas do que a registada na viga não reforçada (ver pormenor da Figura 16).

Em termos médios, verifica-se que as vigas reforçadas (V2 a V6) apresentam uma carga máxima 1.57 vezes superior à da viga não reforçada. Quando se usam mecanismos exteriores de fixação (V3, V5 e V6) a capacidade máxima resistente é ligeiramente maior, com a excepção da viga V5, onde ocorreu o tipo de rotura mais penalizante no desempenho do reforço (destacamento do laminado pela ligação deste ao adesivo). O reforço das vigas com compósitos de CFRP introduziu uma menor deformação máxima em relação à viga não reforçada, conforme se pode verificar nos valores da Tabela 10, relativamente à flecha δ_{max} .

A Figura 17 ilustra o padrão de fendilhação final registado nas vigas ensaiadas. Em termos de modos de rotura (ver Tabela 10), a rotura da viga V1 (sem reforço) deu-se pelo esmagamento do betão, enquanto que as vigas reforçadas, com a excepção da viga V3 onde se verificou o esgotamento do CFRP, alcançaram

a sua capacidade resistente máxima quando se deu o destacamento do CFRP. Nas vigas V2, V4 e V6 este destacamento deu-se com arrancamento de betão. Tal não se verificou na viga V5 onde o destacamento do CFRP se deu pela ligação adesivo-CFRP (deficiente ligação entre o laminado e o adesivo devido a deficiente aplicação do reforço), o que foi muito penalizador para a capacidade resistente da viga. A Figura 18 ilustra os modos de rotura das vigas ensaiadas (ver também Figura 17).

A Tabela 11 apresenta, para cada viga reforçada, o valor da extensão máxima registada no CFRP ($\varepsilon_{\text{max}}^{\text{CFRP}}$) e o nível de aproveitamento do CFRP. Apresentam-se, também, os valores máximos obtidos para as tensões de corte na interface betão-adesivo-CFRP ($\tau_{\text{max}}^{\text{ligação}}$), confrontando-os com os valores médios da tensão de aderência ($f_{\text{ctm,p}}$) determinados através de ensaios de "pull-off". Verifica-se que em todas as vigas reforçadas, com a excepção da viga V5, o compósito longitudinal teve um rendimento superior aos 50%.

Apesar do número reduzido de ensaios, os resultados obtidos sugerem que a aplicação de mecanismos exteriores de fixação do reforço à flexão conduz a um funcionamento do CFRP até mais tarde e um pequeno aumento da capacidade resistente, conforme se pode observar na Figura 16. Na viga reforçada com o sistema manta (V3) o critério de fixação do reforço longitudinal usado proporcionou a rotura do compósito com o valor da extensão máxima registada no CFRP de 8.7‰ (a extensão última indicada pelo fornecedor é de 15.0‰ - ver Tabela 9). O mesmo não aconteceu com o mecanismo de fixação das extremidades do sistema pré-fabricado (V5 e V6), uma vez que permitiu o escorregamento do laminado nas duas vigas, impossibilitando o total aproveitamento do CFRP. Neste caso, conclui-se que é necessário implementar um mecanismo que incida não só na extremidade do reforço, mas também, discretamente ao longo do comprimento efectivo de ancoragem do CFRP ao betão.

Figura 17 – Padrão de fendilhação final das vigas ensaiadas (vigas V1 a V6)

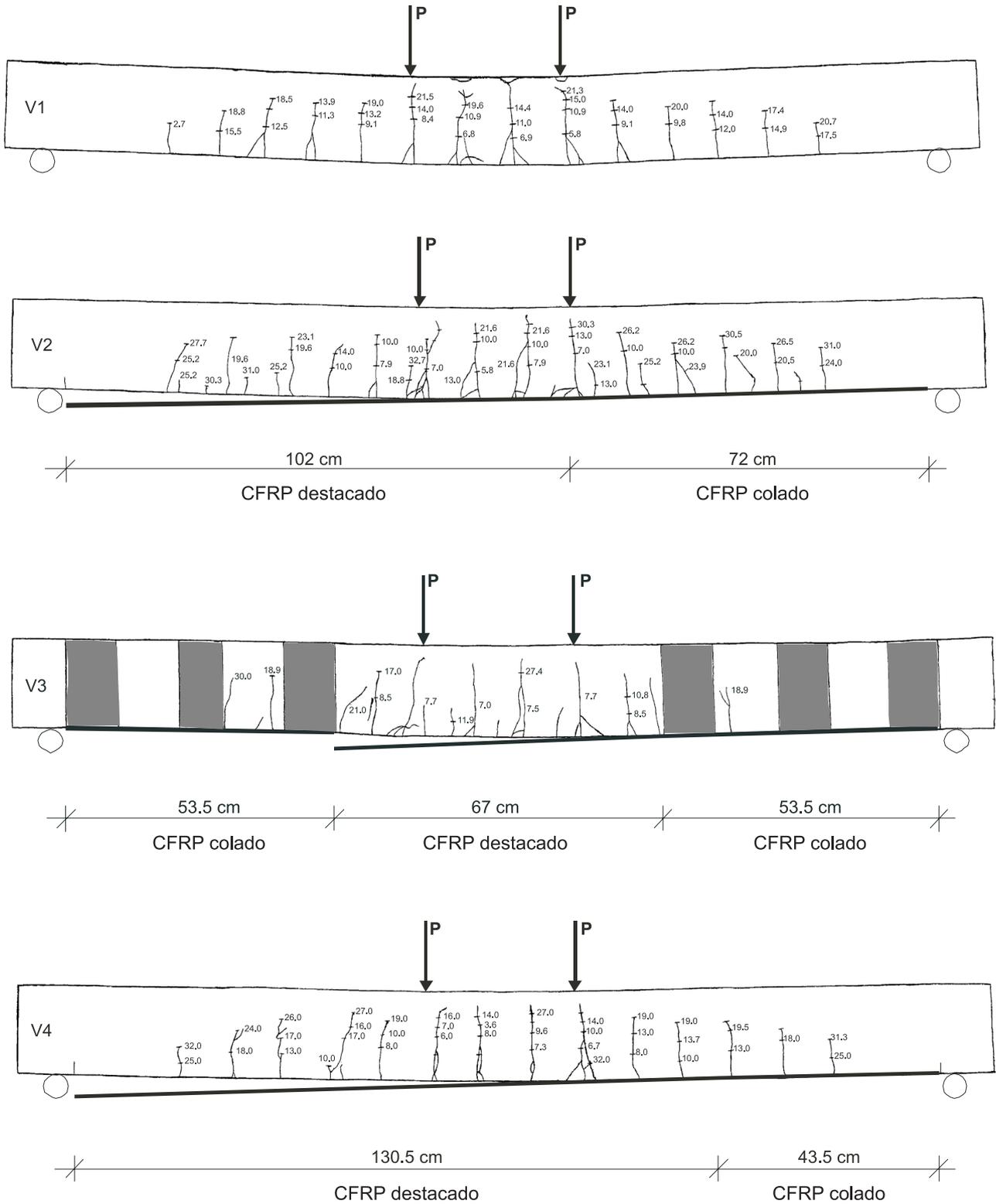
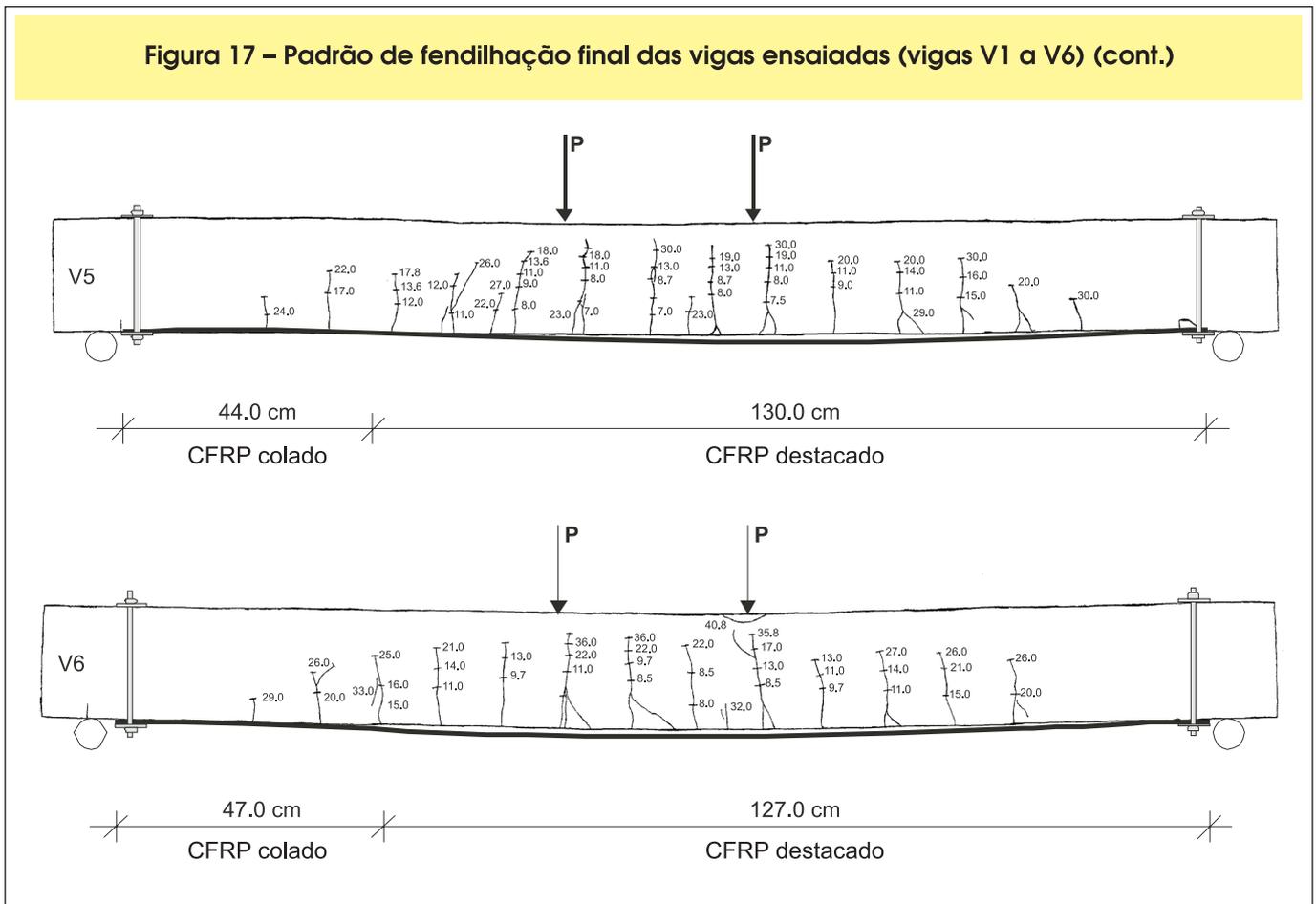


Figura 17 – Padrão de fendilhação final das vigas ensaiadas (vigas V1 a V6) (cont.)



5 Conclusões

Os dois programas experimentais sobre o reforço à flexão de estruturas de betão armado por intermédio da colagem externa de sistemas compósitos de CFRP unidireccionais descritos neste trabalho conduzem às considerações seguintes:

i) Desempenho estrutural do reforço de CFRP

A aplicação da técnica de reforço utilizando a colagem de compósitos de CFRP (mantas ou laminados) em elementos de betão armado (lajes e vigas) proporcionou, em relação ao verificado nos modelos não reforçados, um aumento da carga de início de fendilhação, da rigidez em serviço e da resistência última. O mesmo se passou em termos de flecha central última, unicamente, para o caso das faixas de laje. Os modelos reforçados com CFRP registaram, em comparação com modelos em betão armado de resistência equivalente, um acréscimo da carga de início de fendilhação, uma diminuição da rigidez em serviço e um acréscimo da resistência e da flecha última.

A pré-fendilhação nos modelos reforçados proporcionou 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 pré-fendilhados vão, progressivamente, para níveis próximos

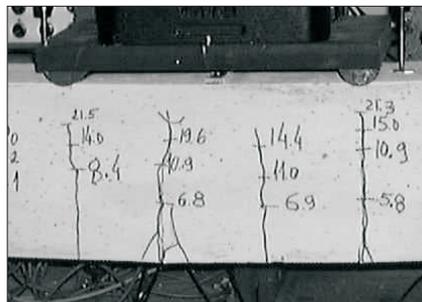
dos verificados nas curvas dos modelos não pré-fendilhados. Em termos de estados limites últimos constatou-se que o comportamento dos modelos reforçados com compósitos de CFRP foi semelhante independentemente do betão estar ou não pré-fendilhado. O espaçamento médio final entre fendas foi similar para os modelos reforçados com CFRP, com e sem pré-fendilhação, e bastante inferior ao verificado pelos modelos não reforçados.

Genericamente, qualquer dos sistemas de reforço de CFRP usados tiveram bom desempenho. Os laminados conduziram ao esgotamento da capacidade de aderência do betão, proporcionando as roturas prematuras (destacamento do CFRP). As mantas, apesar de terem experimentado algumas situações de destacamento prematuro, conduziram, noutros casos, ao esgotamento da sua capacidade (rotura do CFRP) repercutindo-se num melhor rendimento destas face aos laminados.

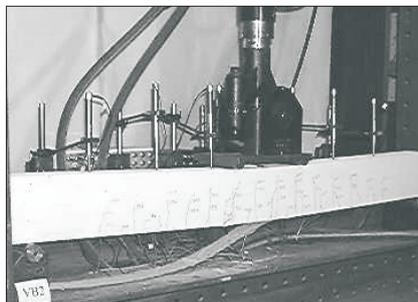
ii) Importância dos mecanismos de fixação do CFRP

O facto de existirem roturas prematuras origina um desaproveitamento das potencialidades dos CFRP, pois não são solicitados até à sua capacidade máxima resistente. Assim, torna-se recomendável a aplicação de mecanismos exteriores de fixação do reforço longitudinal de CFRP. Para os mecanismos de fixação analisados neste trabalho verificou-se que proporcionaram um acréscimo de deformação e um

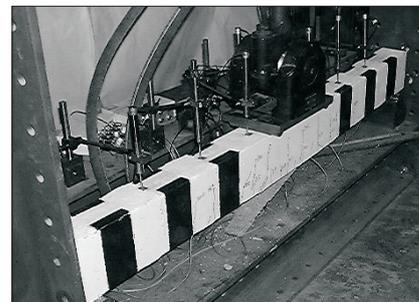
Figura 18 – Modos de rotura das vigas ensaiadas



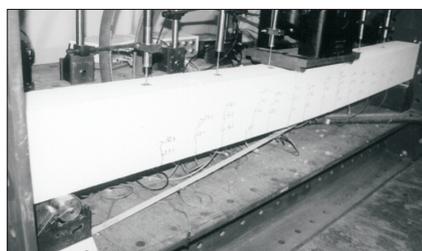
Viga V1



Viga V2



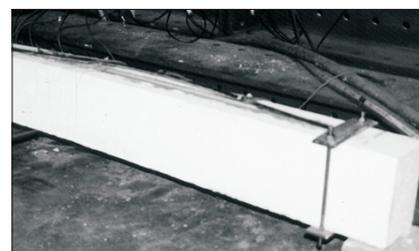
Viga V3



Viga V4



Viga V5



Viga V6

pequeno aumento da capacidade resistente. Em particular, a adopção de presilhas de CFRP como mecanismo exterior de fixação para o reforço da viga V3 (manta), concebidas através de duas camadas de manta (uma com as fibras orientadas a 0° e outra com as fibras orientadas a 90°) aplicadas discretamente ao longo do vão da viga, proporcionou a rotura do CFRP junto à presilha. Este facto indicia a existência de um fenómeno de concentração de tensões que originou a rotura do CFRP. O tipo de fixação usado com o sistema laminado mostrou-se pouco eficiente (falta de rigidez e aperto adequado), pois não impediu o destacamento do CFRP. Neste âmbito, salientam-se os mecanismos de fixação desenvolvidos recentemente no LABEST e publicados no trabalho de Dimande [21].

iii) Controlo de qualidade

Uma deficiente aplicação do CFRP pode originar uma quase ineficácia deste, conforme se verificou quer nas faixas de laje como nas vigas. No primeiro caso, procedeu-se à colagem do reforço numa superfície de betão com elevado teor de humidade que impossibilitou uma aderência perfeita entre o betão e o primário e, conseqüentemente, a perda de eficiência de todo o reforço. No caso das vigas, o uso de um desengordurante (sem acetona) não específico do sistema de reforço seleccionado não garantiu a extracção de todas as impurezas do CFRP provocando uma precária ligação do adesivo ao laminado. Estes casos sublinham a necessidade de realizar-se um rigoroso controlo da qualidade da aplicação de todos os componentes do sistema de reforço de CFRP, procedimentos estes que devem estar consagrados nas fichas técnicas dos sistemas de FRP comerciais.

iv) Justificação de um critério de pré-dimensionamento

O pré-dimensionamento do CFRP, baseado na limitação do valor da extensão máxima do CFRP ao menor dos valores dados por cinco vezes a extensão de cedência da armadura (de forma a condicionar a deformação do aço em estado limite de utilização) e 50% da extensão de rotura do compósito (para considerar a hipótese de ocorrência de roturas prematuras) traduziu-se num critério satisfatório, tanto nas faixas de laje como nas vigas. As várias faixas de laje reforçadas com CFRP registaram capacidades de carga semelhantes entre si e superiores ao dobro da registada nas lajes não reforçadas. No reforço de vigas, com a excepção da viga V5, atingiram-se cargas máximas de pelo menos 1.5 vezes superior à verificada na viga não reforçada. Com efeito, verificou-se que as quantidades de reforço adoptadas proporcionaram a concretização dos objectivos pretendidos. Contudo, a análise do critério de pré-dimensionamento merece um maior desenvolvimento no futuro, aspecto este, já evidenciado nos conteúdos dos documentos do ACI Committee 440 [13] e da FIB [4].

A consequência imediata das conclusões aqui descritas a partir dos dois trabalhos desenvolvidos no LABEST, sobretudo do primeiro, conduziu à aprovação da viabilidade do reforço da laje superior do tabuleiro da "Ponte de Nossa Senhora da Guia" por intermédio da colagem externa de qualquer dos sistemas de CFRP testado, porque garantem a duplicação da capacidade resistente actual. Posteriormente, foi elaborado um projecto prévio de reforço com CFRP e executado um troço experimental de reforço do tabuleiro com vista a ser monitorizado o seu comportamento durante três anos. Os

resultados destes trabalhos de monitorização confirmaram as conclusões expostas nesta secção (Costeira et al. [22]).

6 Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e a colaboração prestada pela empresa MotaEngil Engenharia e Construção, S.A. (betonagem dos modelos) e pelas empresas Degussa Construction Chemicals Portugal, S.A.; INEGI; Sika Portugal, S.A. e STAP - Reparação, Consolidação e Modificação de Estruturas, S.A. (colaboração e fornecimento dos sistemas compósitos de CFRP utilizados).

7 Referências bibliográficas

- [01] Bakis, C.E., Bank, L.C., Brown, V.L., Cosenza, E., Davalos, J.F., Lesko, J.J., Machida, A., Riskalla, S.H. and Triantafyllou, T.C., 2002, "Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction – State-of-the-art Review", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 6, Nº2, May, pp. 73-87.
- [02] Meier, U., 1992, "Carbon fiber-reinforced polymers: Modern materials in bridge engineering", *IABSE, Structural Eng. International*, Vol. 2(1), Zurich, pp. 7-12.
- [03] ACI Committee 440, 1996, "State of the art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures" (Reapproved 2002), *American Concrete Institute*, 68 pp.
- [04] 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.
- [05] Juvandes, L., Marques, A.T. e Figueiras, J.A., 1996, "Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão", *Relatório Técnico*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), DECivil, Porto, Março, 112 pp.
- [06] Juvandes, L., 1999, "Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de CFRP", *Tese de Doutoramento*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), DECivil, Setembro, 400 pp.
- [07] Dias, S., 2001, "Verificação experimental do reforço com CFRP de estruturas de betão à flexão", *Tese de Mestrado*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), DECivil, Março, 203 pp.
- [08] Costeira Silva, P., Juvandes, L. e Figueiras, J.A., 2003, "Reforço do tabuleiro da Ponte Nossa Senhora da Guia - Memória descritiva e justificativa de Estudo Prévio", *Relatório Técnico*, edição do LABEST, Dep. de Eng. Civil (DECivil), Fac. de Engenharia da U.P. (FEUP), Janeiro, Porto, 30 pp.
- [09] RSA, 1983, "Regulamento de segurança e acções para edifícios e pontes", *Decreto-Lei nº 253/83 de 31 de Maio*.
- [10] Oliveira, L.P.F.A. e Figueiras, J.A., 1999, "Análise de esforços e deformações transversais do tabuleiro da Ponte da Senhora da Guia em Ponte de Lima", *Relatório Técnico*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), DECivil, Julho, 37 pp.
- [11] NP-ENV 206, 1993, "Betão - Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade", *Norma Portuguesa*, IPQ, Outubro.
- [12] CEB-FIP, 1993, *Comité Euro-International du Béton CEB-FIP Model Code 1990 - Design code*, editado por Thomas Telford.
- [13] ACI Committee 440, 2002, "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures", *American Concrete Institute*, 118 pp.
- [14] Replark System Procedure Instruction, 1997, "Revitalizing concrete structures - Replark technical datasheet - Replark systems guideline", *Mitsubishi Chemical Corporation*, 81 pp.
- [15] Bettor MBT Portugal, 1999, "Sistema Compósito MBrace" – *Fichas técnicas*, Lisboa.
- [16] Sika, 1998, "Prontuário de fichas técnicas - Construir com segurança", *Sika, Indústria Química S.A.*, edição nº2, Janeiro, pp. 344.
- [17] Esteves, J. L. e Marques, A. T., 2001, "The rehabilitation and reinforcement of a concrete bridge with a CFRP composite system", *proceedings of the 22nd SAMPE Europe International Conference*, Paris, França, Março.
- [18] Costeira Silva, P., 1999, "Modelação e análise de estruturas de betão reforçadas com CFRP", *Tese de Mestrado*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Junho, 254 pp.
- [19] Neubauer, U e Rostásy, F.S, 1997, "Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP-plates". *Int. Conf. on Structural Faults & Repair-97*, Edinburgh, pp. 109-118.
- [20] Deuring, M., "Verstärken von Stahlbeton mit gespannten Faserverbundwerkstoffen", 1993, *ETH, Eidgenössischen Technischen Hochschule*, Diss. ETH nº 10199, Zurich, 279 pp.
- [21] Dimande, A. O., 2003, "Influência da interface no reforço à flexão de estruturas de betão com sistemas FRP", *Tese de Mestrado em Estruturas de Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, FEUP, Dezembro, Porto, 200 pp.
- [22] Costeira Silva, P., Juvandes, L., Félix, C. e Figueiras, J.A., 2003, "Monitorização do Comportamento do Reforço Experimental do Tabuleiro da Ponte N. S. Guia", *Relatório técnico*, edição do LABEST, Dep. de Eng. Civil (DECivil), Fac. de Engenharia da U.P (FEUP), Dezembro, Porto, 100 pp.