



**Universidade do Minho**

*Escola de Engenharia*

*Departamento de Engenharia Civil*

## **Comportamento da ligação entre laminados multi-direccionais de CFRP e o betão**

Mário Coelho, Pedro Fernandes, José Sena Cruz, Joaquim Barros

Relatório 11-DEC/E-15

Relatório técnico desenvolvido no âmbito do projecto  
*PTDC/ECM/74337/2006.*

**Data:** Junho de 2011

**Nº de páginas:** 74

**Palavras-chave:** MDL-CFRP; MF-EBR; MF-FRP; EBR, comprimento da ligação; número e diâmetro das ancoragens; ensaios de arranque.



## ÍNDICE GERAL

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>12</b>
2.1	PROVETE E CONFIGURAÇÃO DE ENSAIO .....	12
2.2	PROGRAMA DE ENSAIOS .....	15
2.3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	19
2.4	PREPARAÇÃO DOS PROVETES .....	23
<b>3</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>27</b>
3.1	SÉRIES MF-EBR.....	28
3.1.1	Estudo da influência da metodologia de aplicação do reforço .....	28
3.1.2	Séries com uma ancoragem.....	33
3.1.3	Séries com duas ancoragens.....	36
3.1.4	Séries com três ancoragens.....	39
3.2	SÉRIES MF-FRP.....	41
3.2.1	Séries com uma ancoragem.....	41
3.2.2	Séries com duas ancoragens.....	42
3.2.3	Séries com três ancoragens.....	44
3.3	SÉRIE EBR.....	45
3.4	ANÁLISE GLOBAL DOS RESULTADOS .....	47
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>50</b>
	<b>ANEXO A – Resultados experimentais das séries MF-EBR.....</b>	<b>53</b>
	<b>ANEXO B – Resultados experimentais das séries MF-FRP .....</b>	<b>50</b>
	<b>ANEXO C – Resultados experimentais da série EBR.....</b>	<b>50</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Geometria e pormenorização da armadura dos provetes de betão. Nota: todas as dimensões estão em milímetros. ....	12
Figura 2 – Configuração do ensaio de arranque directo: (a) vista geral do pórtico de ensaio; (b) pormenor da zona de colocação do provete.....	13
Figura 3 – Modos de rotura por destacamento em sistemas de reforço à flexão com FRP's (adaptado de CNR 2004).....	13
Figura 4 – Setup de ensaio: (a) vista geral do pórtico de ensaio; (b) foto sistema de ensaio (vista lateral); (c) foto sistema de ensaio (vista frontal). ....	14
Figura 5 – Geometria, eixos, secções e dimensões dos provetes MDL para os ensaios de arranque: (a) vista em planta; (b) corte. ....	22
Figura 6 – Preparação do provete para o sistema de aplicação de reforço S2: (a) tratamento da zona de colagem nos provetes de betão com um martelo de agulhas; (b) aplicação de uma máscara com fita adesiva em torno da zona de colagem; (c) aplicação de adesivo epoxy sobre as áreas tratadas na superfície do betão e na superfície do laminado; (d) aplicação do MDL sobre a superfície do betão; (e) remoção do adesivo em excesso com a ajuda de uma espátula; (f) aspecto final do provete já reforçado.....	25
Figura 7 – Localização da instrumentação utilizada para medição dos deslizamentos na zona carregada (LVDT2) e na zona carregada corrigida (LVDT1). ....	27
Figura 8 – Relação força de arranque vs. deslizamento para os provetes da série MF-EBR: (a) M8F3S1T0; (b) M8F3S2T0; (c) M10F3S1T0; (d) M10F3S2T0. ....	28
Figura 9 – Pormenor da execução de reforço para o sistema de aplicação S2 no provete M8F3S2T0_1. ....	29
Figura 10 – Pormenor na zona da ancoragem para o provete M8F3S2T0_3.....	30
Figura 11 – Pormenor da rotura referente ao provete M8F3S1T0_2. ....	31
Figura 12 – Modos de rotura típicos obtidos para os primeiros doze provetes da série MF-EBR: (a) delaminação do MDL para o provete M10F3S2T0_1; (b) destacamento na interface adesivo/betão referente ao provete M8F3S1T0_1; (c), (d) esmagamento do laminado ao nível das ancoragens para o provete M8F3S2T0_2.....	32
Figura 13 – Fotos: (a) largura da cunha no provete M8F3S1T0_1; (b) comprimento de amarração do provete M8F3S2T0_1. ....	32
Figura 14 – Relação força de arranque vs. deslizamento para os provetes da série MF-EBR com uma ancoragem: (a) M8F1S2T0; (b) M8F1S2T1; (c) M10F1S2T0; (d) M10F1S2T1.....	33
Figura 15 – Destacamento na interface adesivo/MDL para o provete M10F1S2T0_2. ....	35
Figura 16 – Modos de rotura típicos obtidos na série MF-EBR com uma ancoragem: (a) delaminação do MDL e destacamento na interface adesivo/betão para o provete M8F1T0_1 (b) esmagamento do	



laminado ao nível das ancoragens e destacamento na interface adesivo MDL para o provete M10F1S2T1_2. .....	35
Figura 17 – Relação força de arranque vs. deslizamento para os provetes da série MF-EBR com duas ancoragens: (a) M8F2S2T0; (b) M8F2S2T1; (c) M10F2S2T0; (d) M10F2S2T1. ....	36
Figura 18 – Destacamento na interface adesivo/MDL para o provete M8F2S2T1_1. ....	38
Figura 19 – Modos de rotura típicos obtidos na série MF-EBR com duas ancoragens: (a) inter-delaminação do MDL referente ao provete M8F2S2T1_1; (b) destacamento na interface adesivo/betão referente ao provete M8F2S2T0_2. (c) destacamento na interface adesivo/MDL referente ao provete M10F2S2T1_1; (d) esmagamento do laminado ao nível das ancoragens referente ao provete M10F2S2T1_3 .....	38
Figura 20 – Relação força de arranque vs. deslizamento para os provetes da série MF-EBR com três ancoragens: (a) M8F3S2T1; (b) M10F3S2T1.....	39
Figura 21 – Modos de rotura típicos obtidos na série MF-EBR com três ancoragens: (a) delaminação do MDL para o provete M10F3S2T1_3; (b) esmagamento do laminado ao nível das ancoragens para o provete M8F3S2T1_2. ....	40
Figura 22 – Relação força de arranque vs. deslizamento para os provetes da série MF-FRP com uma ancoragem: (a) M8F1T0; (b) M8F1T1.....	41
Figura 23 – Modos de rotura típicos obtidos na série MF-FRP com uma ancoragem: (a) delaminação do MDL referente ao provete M8F1T1_1; (b) esmagamento do laminado ao nível das ancoragens para o provete M8F1T0_2.....	42
Figura 24 – Relação força de arranque vs. deslizamento para os provetes da série MF-FRP com duas ancoragens: (a) M8F2T0; (b) M8F2T1. ....	42
Figura 25 – Modos de rotura típicos obtidos na série MF-FRP com duas ancoragens: (a) delaminação do MDL referente ao provete M8F2T1_3; (b) esmagamento do laminado ao nível das ancoragens para o provete M8F2T0_1. ....	43
Figura 26 – Relação força de arranque vs. deslizamento para os provetes da série MF-FRP com três ancoragens: M8F3T1. ....	44
Figura 27 – Modos de rotura típicos obtidos na série MF-FRP com três ancoragens: (a) delaminação do MDL para o provete M8F3T1_1; (b) esmagamento do laminado ao nível das ancoragens para o provete M8F3T1_1.....	45
Figura 28 – Relação força de arranque vs. deslizamento para os provetes da série EBR. ....	45
Figura 29 – Modos de rotura típicos obtidos na série EBR: (a) destacamento ao nível da interface betão/epoxy EBR_1; (b) destacamento ao nível da interface betão/epoxy EBR_2. ....	46
Figura 30 – Evolução da força de arranque em função do número de ancoragens e aplicação de pré-esforço ou não nestas para as séries MF-EBR: (a) para o primeiro pico; (b) para o segundo pico. ....	47



Figura 31 – Evolução da força de arranque em função do número de ancoragens e aplicação de pré-esforço ou não nestas para as séries MF-FRP. ....	47
Figura 32 – Comparação em termos de força máxima de arranque para as técnicas MF-EBR e MF-FRP.....	48



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Série MF-EBR. ....	16
Tabela 2 – Série MF-FRP.....	17
Tabela 3 – Série EBR. ....	17
Tabela 4 – Geometria e configuração dos sistemas de reforço (dimensões em mm). ....	18
Tabela 5 – Resultados dos ensaios de compressão para caracterização do betão. ....	20
Tabela 6 – Propriedades do MDL-CFRP (valores médios). ....	21
Tabela 7 – Resultados das medições efectuadas ao MDL com 30 mm de largura.....	22
Tabela 8 – Resultados das medições efectuadas ao MDL com 40 mm de largura.....	23
Tabela 9 – Principais resultados obtidos nos ensaios de arranque para os doze primeiros provetes da série MF-EBR. ....	30
Tabela 10 – Principais resultados obtidos nos ensaios de arranque para a série MF-EBR com uma ancoragem.....	34
Tabela 11 – Principais resultados obtidos nos ensaios de arranque para a série MF-EBR com duas ancoragens. ....	37
Tabela 12 – Principais resultados obtidos nos ensaios de arranque para a série MF-EBR com três ancoragens. ....	39
Tabela 13 – Principais resultados obtidos nos ensaios de arranque para a série MF-FRP com uma ancoragem.....	41
Tabela 14 – Principais resultados obtidos nos ensaios de arranque para a série MF-FRP com duas ancoragens. ....	43
Tabela 15 – Principais resultados obtidos nos ensaios de arranque para a série MF-FRP com três ancoragens. ....	44
Tabela 16 – Principais resultados obtidos nos ensaios de arranque para a série EBR.....	46



## LISTA DE SÍMBOLOS

$s_l$	Deslizamento na zona carregada
$s_{l,máx}$	Deslizamento na zona carregada corresponde à força máxima
$s_l^*$	Deslizamento na zona carregada corrigido
$F_l$	Força de arranque
$F_{l,máx}$	Força de arranque máxima
$f_{cm}$	Resistência média do betão à compressão
LVDT	Transdutor de deslocamento
S1	Sistema de aplicação 1
S2	Sistema de aplicação 2
M8	Ancoragem mecânica com diâmetro de 8 mm
M10	Ancoragem mecânica com diâmetro de 10 mm



## **GLOSSÁRIO**

CFRP	Polímeros reforçados com fibras de carbono
FRP	Polímeros reforçados com fibras
MDL	Laminado multi-direccional
EBR	Externally bonded reinforcement
MDL-CFRP	Multidirectional laminate of Carbon Fibre Reinforced Polymer
MF-EBR	Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement
MF-FRP	Mechanically Fastened Fibre Reinforced Polymers
CFK	Laminado pré-fabricado unidireccional de carbono/epoxy
HS	Pré-impregnado unidireccional de carbono/epoxy





## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a aplicação de materiais compósitos no reforço e reabilitação de estruturas de betão tem sido alvo de um profundo desenvolvimento. Actualmente já existem sistemas de reforço tipo com materiais compósitos reforçados com fibras (FRP – Fiber Reinforced Polymers, na literatura técnica inglesa) e técnicas de aplicação bem definidas. As técnicas mais comuns para aplicação de FRP's são, em geral, baseadas na utilização de laminados unidireccionais através da: (i) aplicação de mantas (sistemas curados *in situ*) ou laminados (sistemas pré-fabricados) colados externamente sobre a superfície do elemento estrutural a reforçar (EBR – *Externally Bonded Reinforcement*, na literatura técnica inglesa); (ii) inserção de laminados (ou varões) em ranhuras abertas no betão de recobrimento (NSM – *Near-Surface Mounted*, na literatura técnica inglesa). A ligação entre os FRP's e o betão é normalmente assegurada por adesivos epoxy (ACI, 2008; CNR, 2004).

A aplicação de reforço com recurso à técnica EBR exige um conjunto de trabalhos diferenciados, como a necessidade da preparação da superfície de betão, que consiste em conferir uma certa rugosidade e regularidade à camada superficial de betão de modo a obter uma resistência da ligação adequada entre os FRP's e o betão de recobrimento. Desta forma o desempenho do reforço está fortemente dependente da resistência da camada de betão superficial que, normalmente, é a região mais degradada do betão numa estrutura, devido à sua maior exposição às condições ambientais e, conseqüentemente, a agentes de deterioração, resultando numa diminuição do seu desempenho mecânico. Como resultado, a rotura precoce do reforço com FRP pode ocorrer e, geralmente, a capacidade mecânica deste não é mobilizada na sua totalidade, principalmente quando se adopta a técnica EBR. Os principais inconvenientes desta técnica durante a fase de aplicação do reforço são o facto da superfície de betão ter de estar totalmente seca (livre de humidade) na fase de aplicação do reforço, o que na realidade devido às condições ambientais e climatéricas pode tornar-se difícil em alguns casos e tipicamente este tipo de sistema de reforço requer um tempo de cura mínimo (até sete dias) para que a estrutura reforçada possa obter a sua resistência na totalidade e possa entrar em serviço (Hag-Elsafi *et al.*, 2001)

Na tentativa de solucionar este problema, têm sido aplicados alguns complementos às técnicas de reforço anteriormente mencionadas, como sejam a aplicação de sistemas de ancoragem compostos por chapas de aço aparafusadas nas extremidades do reforço, ou o uso de cintas em manta de FRP. Para além da concentração de tensões que este



tipo de intervenção localizada introduz nos elementos a reforçar, são necessários trabalhos de preparação diferenciados e morosos que podem comprometer a competitividade destas técnicas.

Recentemente foi desenvolvido um sistema alternativo à técnica de reforço EBR, que consiste na utilização de laminados de FRP apenas ancorados ao betão através de ancoragens mecânicas (MF-FRP - *Mechanically Fastened*, na literatura técnica inglesa). O conceito MF-FRP não é novo, uma vez que a sua génese está associada ao reforço de estruturas de betão armado utilizando chapas de aço. Na técnica MF-FRP os laminados de FRP substituem as chapas de aço.

De acordo com a informação apurada pelos autores, o conceito MF-FRP foi inicialmente explorado na Universidade de Wisconsin sob a supervisão de Lawrence Bank, em 1998 (Bank, 2004). Na última década, mais de 10 trabalhos foram publicados em revistas científicas, abordando algumas aplicações com recurso a esta técnica “reinventada”, por exemplo, em betão armado, madeira e estruturas de alvenaria, e vários benefícios têm sido apontados, nomeadamente, a rápida instalação com ferramentas manuais simples, sem necessidade de recorrer a mão-de-obra especializada, não necessitando da preparação da superfície sendo que, imediatamente após o reforço da estrutura, esta pode ser utilizada (Lamanna *et al.*, 2001; Lamanna *et al.*, 2004; Quattlebaum *et al.*, 2005; Aidoo *et al.*, 2006; Dempsey e Scott, 2006; Ekenel *et al.*, 2006; Bank e Arora, 2007; Martin e Lamanna, 2008; Elsayed *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2009).

Recentemente foi proposta uma técnica de reforço designada MF-EBR (*Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement*). Esta técnica de reforço utiliza laminados multi-direccionais de CFRP (MDL-CFRP). Estes laminados são simultaneamente colados e fixados mecanicamente através de ancoragens. A técnica MF-EBR procura explorar os pontos fortes das técnicas MF-FRP e EBR, procurando superar o descolamento prematuro observado na técnica EBR e as falhas locais registadas na técnica MF-FRP (Sena-Cruz *et al.*, 2010).

Relativamente à técnica MF-EBR já existem trabalhos com aplicação desta técnica. Os parâmetros avaliados neste trabalho foram o número de ancoragens e o nível de pré-esforço aplicado nestas. Segundo os autores (Sena-Cruz *et al.*, 2010) quando comparada a técnica EBR com a técnica MF-EBR, a utilização de ancoragens conduz a aumentos que variam entre os 20% (para uma única ancoragem) e 60% (para duas ancoragens). Por outro lado a aplicação de pré-esforço às ancoragens não conduziu a aumentos significativos da capacidade de carga comparativamente ao uso de ancoragens sem pré-



esforço. Contudo foi observado um aumento da resistência pós-pico (acréscimo de cerca de 60%).

A eficiência das técnicas de reforço NSM, EBR, e MF-EBR foram recentemente comparadas através de ensaios de flexão em quatro pontos de carga em vigas de betão armado sob carregamento monotónico e fadiga (Sena-Cruz *et al.*, 2011). Quando comparada com a técnica EBR, a técnica MF-EBR conduz a um incremento importante não só em termos de capacidade de carga (até cerca de 40%), mas também na resposta em termos de ductilidade (até cerca de 140%).

Com o objectivo de estudar e caracterizar o comportamento da ligação entre laminados multi-direccionais de CFRP e o betão, foi realizada um programa experimental de ensaios de arranque directo. Os principais parâmetros analisados foram o comprimento da ligação, o diâmetro e o número de ancoragens e o nível de pré-esforço aplicado nestas, bem como a eficácia das diferentes técnicas de reforço aplicadas (EBR, MF-FRP e MF-EBR).

## 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desenvolvido teve como objectivo a caracterização do comportamento da ligação entre laminados multi-direccionais de CFRP e o betão.

As seguintes secções detalham o programa experimental, incluindo a geometria do provete, a configuração do ensaio, o programa de ensaios, a caracterização dos materiais e a preparação dos provetes.

### 2.1 Provede e configuração de ensaio

Os provetes de betão armado utilizados na presente campanha de ensaios foram betonados em moldes metálicos com as dimensões pretendidas. A geometria do provete, as quantidades e disposição de armaduras são as apresentadas na Figura 1. A partir desta Figura é possível concluir que o provete apresenta forma prismática com dimensões de  $600 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ .

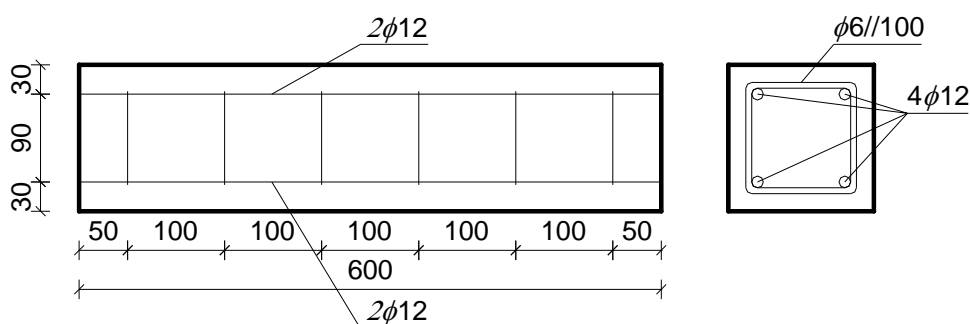


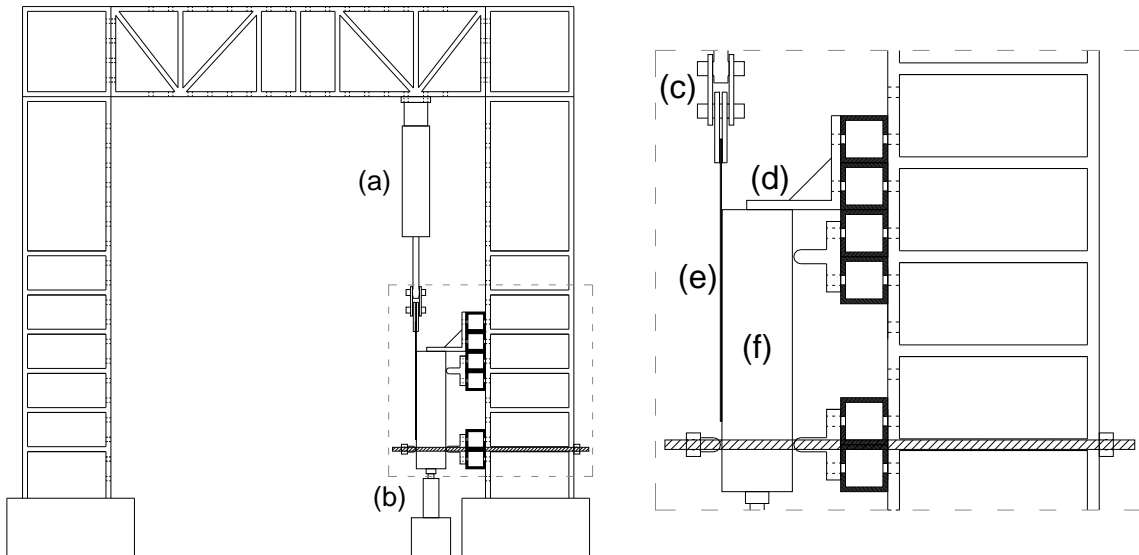
Figura 1 – Geometria e pormenorização da armadura dos provetes de betão. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

Tendo em consideração as diferentes configurações de reforço que eram pretendidas realizar, foram betonados 40 provetes de betão armado e foi produzido MDL de acordo com a campanha de ensaios de arranque definida nas secções que se seguem.

Em trabalhos anteriores (Coelho, 2010) haviam sido detectadas falhas no sistema de ensaio utilizado pelo que desta vez foi utilizado um *setup* de ensaio diferente. Na Figura 2 é apresentada a configuração do sistema de ensaio de arranque directo adoptado na presente campanha de ensaios.

As principais alterações entre este e o sistema anteriormente utilizado surgem ao nível das dimensões dos provetes e dos pontos de apoio. Os provetes passaram de cubos com 200 mm de aresta para prismas com  $150 \times 150 \times 600 \text{ mm}^3$ . Com esta

alteração pretendeu-se anular a rotação não negligenciável que ocorria nos provetes durante o ensaio de arrancamento directo.



Legenda:

- (a) Actuador
- (b) Macaco hidráulico
- (c) Amarra rotulada
- (d) Apoio
- (e) Laminado MDL-CFRP
- (f) Provede de betão armado

(a)

(b)

Figura 2 – Configuração do ensaio de arranque directo: (a) vista geral do pórtico de ensaio; (b) pormenor da zona de colocação do provede.

A face superior deixou de estar totalmente apoiada, passando a estar apenas travada em 2/3 da sua largura. Com esta mudança pretendeu-se representar, o mais próximo possível, do comportamento real de um elemento de betão armado reforçado à flexão e a funcionar em regime fendilhado, como exemplifica a Figura 3.

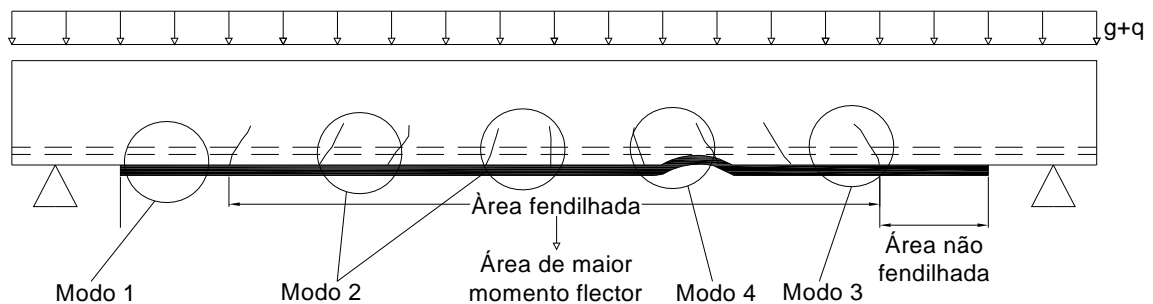


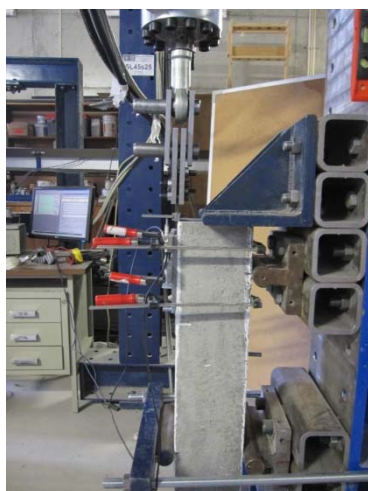
Figura 3 – Modos de rotura por destacamento em sistemas de reforço à flexão com FRP's (adaptado de CNR 2004).

Os ensaios de arranque foram realizados num pórtico equipado com um actuador servo-controlado com uma célula de carga de 200 kN de capacidade (ver Figura 4). A instrumentação utilizada consistiu em dois transdutores de deslocamento (LVDT's) colocados numa peça metálica desenvolvida para o efeito, conforme se pode ver na Figura 4c. O LVDT1 tem como função registar o deslizamento do MDL na zona da face superior do provete, enquanto o LVDT2 regista o escorregamento do MDL na extremidade superior da zona colada (zona carregada – *loaded end slip*).

Um terceiro LVDT foi acoplado ao actuador de modo a permitir realizar o ensaio em controlo de deslocamento com uma velocidade de  $4 \mu\text{m/s}$  para as séries MF-EBR,  $1 \mu\text{m/seg}$  para a série EBR e  $1 \text{ mm/min}$  para as séries MF-FRP (ver secção 2.2).



(a)



(b)



(c)

Figura 4 – Setup de ensaio: (a) vista geral do pórtico de ensaio; (b) foto sistema de ensaio (vista lateral); (c) foto sistema de ensaio (vista frontal).



## 2.2 Programa de ensaios

A campanha experimental foi dividida em três séries distintas. A primeira série de provetes foi reforçada de acordo com a técnica MF-EBR, a segunda série foi reforçada de acordo com a técnica MF-FRP e uma última série com provetes reforçados com recurso à técnica EBR.

A primeira série, doravante designada de série MF-EBR, foi dividida em dois conjuntos principais. O primeiro conjunto, composto por doze provetes, tinha por objectivo estudar a influência da metodologia da aplicação de reforço (com a técnica MF-EBR). Assim, foram estudados dois sistemas de aplicação distintos (S1 e S2), sendo que para ambos os sistemas não era aplicado pré-esforço nas ancoragens. Depois de avaliado as duas metodologias de aplicação, através de uma análise cuidada aos resultados dos primeiros doze provetes foi seleccionado o melhor sistema para que este fosse aplicado no segundo conjunto de provetes (no que diz respeito à técnica MF-EBR). O sistema de aplicação adoptado para o reforço do segundo conjunto de provetes da série MF-EBR foi o sistema de aplicação (S2) pois trata-se do sistema mais simples e rápido e, tal como será explicado no capítulo dos resultados, produz resultados similares ao sistema de aplicação S1. Nesta fase foram avaliados os restantes parâmetros com interesse neste estudo, nomeadamente a influência na resistência da ligação do número de ancoragens, o diâmetro das ancoragens e do pré-esforço aplicado nestas. O pré-esforço aplicado nas ancoragens foi conseguido através da aplicação de um momento de aperto de 40 Nxm com recurso a uma chave dinamométrica.

Os provetes utilizados na série MF-EBR, foram identificados de acordo com a sigla  $MiFjSkTx_n$ , em que:

- $Mi$  – Diâmetro das ancoragens, podendo o índice  $i$  ser 8 ou 10, respectivamente, para as ancoragens M8 e M10;
- $Fj$  – Quantidade de ancoragens aplicadas, correspondendo o índice  $j$  ao número de ancoragens, podendo este ser igual a 1, 2 ou 3;
- $Sk$  – Sistema de aplicação de reforço, podendo o índice  $k$  ser 1 ou 2, respectivamente sistema S1 e S2;
- $Tx$  – Valor do pré-esforço aplicado nas ancoragens, traduzido pelo índice  $x$  que pode tomar os valores de 1 ou 0, quando é aplicado pré-esforço às ancoragens (T1) e sem pré-esforço aplicado às ancoragens (T0), respectivamente;
- $n$  – Número de ordem do provete.



Na Tabela 1 apresenta-se as diferentes séries estudadas, bem como os parâmetros de ensaio adoptados para a série MF-EBR.

Tabela 1 – Série MF-EBR.

Designação	Ancoragem		Sistema de aplicação	Momento de aperto	Área colada	
	Diâmetro [mm]	Quantidade			Largura [mm]	Comprimento [mm]
M8F3S1T0	8	3	S1	T0	30	300
M8F3S2T0			S2	T0		
M10F3S1T0	10	3	S1	T0	40	
M10F3S2T0			S2	T0		
M8F1S2T0	8	1	S2	T0	30	100
M8F1S2T1			S2	T1		
M8F2S2T0	8	2	S2	T0	30	200
M8F2S2T1			S2	T1		
M8F3S2T1			3	S2		
M10F1S2T0	10	1	S2	T0	40	100
M10F1S2T1			S2	T1		
M10F2S2T0			2	S2		
M10F2S2T1	S2	T1				
M10F3S2T1	10	3	S2	T1	40	300

Nota: para cada conjunto de parâmetros (mini-série) foram realizados três provetes.

A série de provetes reforçados com recurso à técnica MF-FRP, doravante designada de série MF-FRP, foi efectuada com vista a comparação directa com a série MF-EBR. Assim, apenas para os provetes com ancoragens M8, foi replicada a série MF-EBR, desta vez sem o adesivo epoxy.

Os provetes utilizados na série MF-FRP, foram identificados de acordo com a sigla  $M8F_jT_k_n$ , em que:

- $M8$  – Diâmetro das ancoragens, que no presente caso se refere apenas a ancoragens M8;
- $F_j$  – Quantidade de ancoragens aplicadas, correspondendo o índice  $j$  ao número de ancoragens, podendo este ser igual a 1, 2 ou 3;
- $T_k$  – Valor do pré-esforço aplicado nas ancoragens, traduzido pelo índice  $k$  que pode tomar os valores de 1 ou 0, quando é aplicado pré-esforço às ancoragens (T1) e sem pré-esforço aplicado às ancoragens (T0), respectivamente;
- $n$  – Número de ordem do provete.





Na Tabela 2 apresenta-se as diferentes séries estudadas, bem como os parâmetros que definiram a série MF-FRP.

Tabela 2 – Série MF-FRP.

Designação	Ancoragem		Momento de aperto	Nº Provetes	Área do reforço	
	Diâmetro [mm]	Quantidade			Largura [mm]	Comprimento [mm]
M8F1T0	8	1	T0	3	30	100
M8F1T1			T1			
M8F2T0	8	2	T0	3	30	200
M8F2T1			T1			
M8F3T1	8	3	T1	3	30	300

Nota: para cada conjunto de parâmetros (mini-série) foram realizados três provetes.

A série de provetes reforçados com recurso à técnica EBR, doravante designada de série EBR, tem por objectivo complementar a comparação realizada com as séries MF-EBR e MF-FRP, reflectindo agora o comportamento da ligação apenas colada. Esta série apenas se realizou com laminados de 30 mm de largura e 550 mm de comprimento, sendo admissível a extrapolação linear dos resultados para provetes com os outros dois comprimentos em estudo (350 mm e 450 mm).

Os provetes utilizados na série EBR, foram identificados de acordo com a sigla *EBR<sub>n</sub>*, em que:

- *n* – Número de ordem do provete.

Na Tabela 3 apresenta-se os parâmetros que definiram a série EBR.

Tabela 3 – Série EBR.

Designação	Nº Provetes	Área colada	
		Largura [mm]	Comprimento [mm]
EBR	3	30	300

Como complemento à informação das tabelas anteriores, na Tabela 4 é apresentado de forma esquemática a geometria e configuração dos sistemas de reforço existentes na campanha de ensaios. No caso da série MF-FRP, a configuração de reforço é semelhante à série MF-EBR com a diferença da não existência de zona colada. Para a série MF-EBR existe também uma configuração de reforço igual à ilustrada na Tabela 4 mas com um MDL de 40 mm de largura.

Tabela 4 – Geometria e configuração dos sistemas de reforço (dimensões em mm).

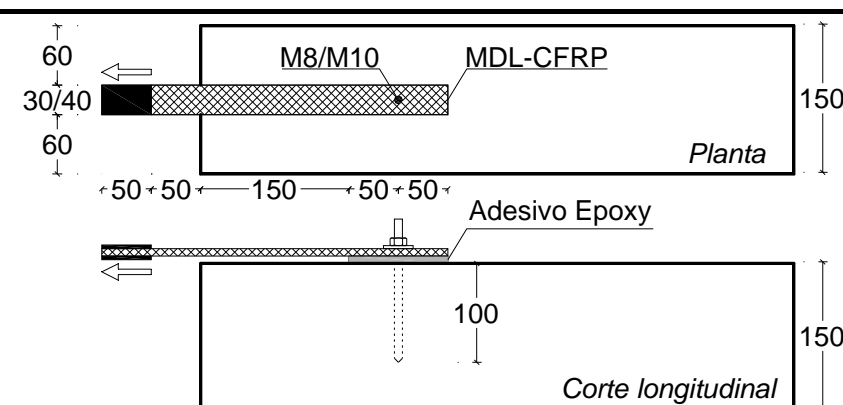
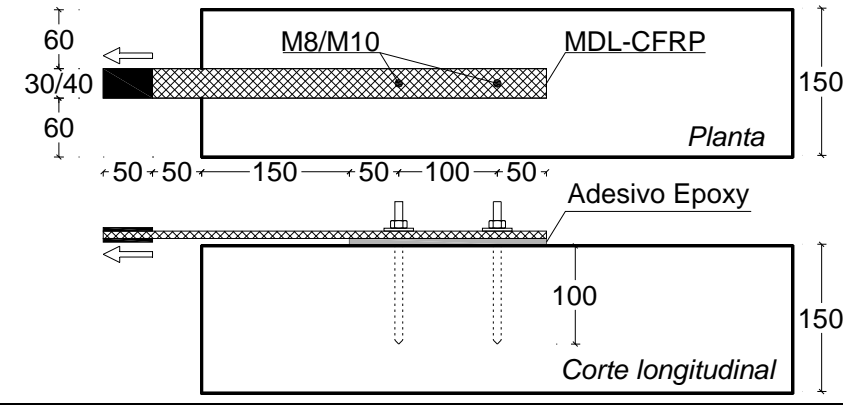
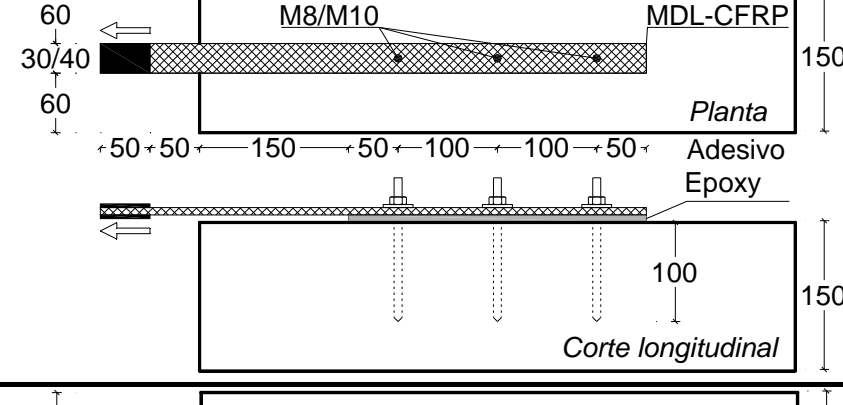
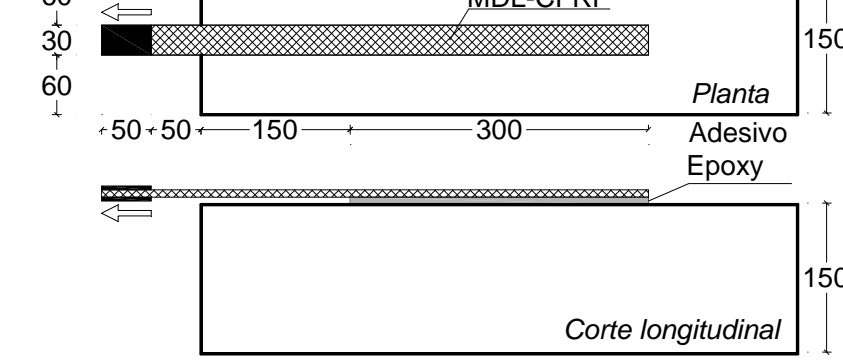
Série	Número de ancoragens	Configuração de reforço
MF-EBR	1	
	2	
	3	
EBR	-	

Tabela 4 (Continuação) – Geometria e configuração dos sistemas de reforço (dimensões em mm).

Série	Número de ancoragens	Configuração de reforço
MF-FRP	1	<p>Planta</p>
		<p>Corte longitudinal</p>
	2	<p>Planta</p>
		<p>Corte longitudinal</p>
	3	<p>Planta</p>
		<p>Corte longitudinal</p>

### 2.3 Caracterização dos materiais

Devido à dimensão do programa experimental de ensaios desenvolvido, a betonagem dos provetes de betão foi realizada em duas fases diferentes, resultando daí duas amassaduras de betão.

A primeira amassadura foi destinada ao primeiro conjunto de provetes da série MF-EBR na qual se pretendia seleccionar o processo de aplicação do reforço. Assim sendo, na primeira amassadura betonaram-se 12 provetes e na segunda os restantes 28 provetes.

A caracterização mecânica do betão à compressão foi efectuada à data de realização dos ensaios de arranque. Assim, à data da caracterização do betão e da realização dos ensaios de arranque, o primeiro betão tinha 150 dias de idade enquanto o segundo tinha apenas 100 dias.

Na Tabela 5 apresenta-se os resultados dos ensaios de caracterização mecânica do betão à compressão realizados em cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura que haviam sido betonados aquando da betonagem dos provetes. Esta caracterização foi efectuada de acordo com a NP EN 12390-3:2009.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de compressão para caracterização do betão.

	Provete	$h$ [mm]	$F_c$ [kN]	$f_c$ [MPa]
Primeira amassadura	Cilindro 1	292.0	733.0	41.5
	Cilindro 2	293.0	735.0	41.6
	Média	292.5	734.0	41.5
	Desvio Padrão	0.71	1.41	0.08
	CoV (%)	0.24	0.19	0.19
Segunda amassadura	Cilindro 1	296.0	1048.0	59.3
	Cilindro 2	292.0	1062.0	60.1
	Cilindro 3	291.0	1066.0	60.3
	Cilindro 4	294.0	886.0	50.1
	Cilindro 5	294.0	1006.0	56.9
	Cilindro 6	295.0	875.0	49.5
	Média	293.7	990.5	56.1
	Desvio Padrão	1.86	87.89	4.97
	CoV (%)	0.63	8.87	8.87
	T-Student	291.7	898.3	50.8

Foi obtido um valor médio de resistência à compressão ( $f_{cm}$ ) igual a 41.54 MPa e 56.05 MPa para a primeira e segunda amassadura, respectivamente.

A armadura utilizada nos provetes de betão foi da classe A400NR (NP EN 1992-1-1:2010). Dado que, por um lado este tipo de material apresenta pouca variabilidade, e por outro nos ensaios em causa não se pretendia explorar a capacidade destes pós-cedência, optou-se por os não caracterizar mecanicamente.



O laminado multi-direccional de CFRP (MDL-CFRP), utilizado no reforço da presente campanha de ensaios foi concebido e produzido no âmbito do presente projecto de investigação. Todos os dados relativos ao seu desenvolvimento e caracterização podem ser consultados numa outra publicação (Sena Cruz *et al.*, 2010). Na Tabela 6 resumem-se as principais propriedades do MDL-CFRP.

Tabela 6 – Propriedades do MDL-CFRP (valores médios).

Propriedade	MDL-CFRP
Resistência à tracção [MPa]	1866
Módulo de elasticidade [GPa]	118
Extensão na rotura [%]	1.58
Resistência ao esmagamento sem pré-esforço [MPa]	365
Resistência ao esmagamento com pré-esforço [MPa]	604
Espessura [mm]	2.07

A colagem dos laminados aos provetes de betão foi efectuada com recurso a um adesivo epoxy, com a designação comercial “S&P Resin 220 epoxy adhesive®”. De acordo com a ficha técnica do fabricante, o valor médio da resistência à tracção em flexão, a resistência à compressão e a tensão de aderência betão/laminado deste adesivo é de igual a 30 MPa, 90 MPa e 3 MPa, respectivamente. Após aplicação do adesivo epoxy foi respeitado o tempo de cura de 7 dias.

Para ancorar mecanicamente o laminado aos provetes de betão foi adoptado um sistema de ancoragens químicas Hilti®. O sistema de ancoragem era constituído pelo químico HIT-HY 150, varões roscados M8 e M10 de classe 5.8 e anilhas de aba larga DIN 9021.

Para obtenção das propriedades geométricas do MDL, foram efectuadas as medições das grandezas apresentadas na Figura 5, nomeadamente a largura  $b$  e a espessura  $h$ , em três secções  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  representadas na mesma figura. As medições apresentadas foram efectuadas em dois provetes para cada comprimento  $L$  do laminado, i.e. 350 mm, 450 mm e 550 mm. Todas as dimensões foram efectuadas com paquímetro digital, com leitura em [mm] e resolução de 0.01 mm. Na Tabela 7 apresentam-se os resultados das medições efectuadas nos provetes MDL de largura 30 mm, enquanto que na Tabela 8 apresentam-se os resultados das medições efectuadas nos provetes MDL de largura 40 mm.

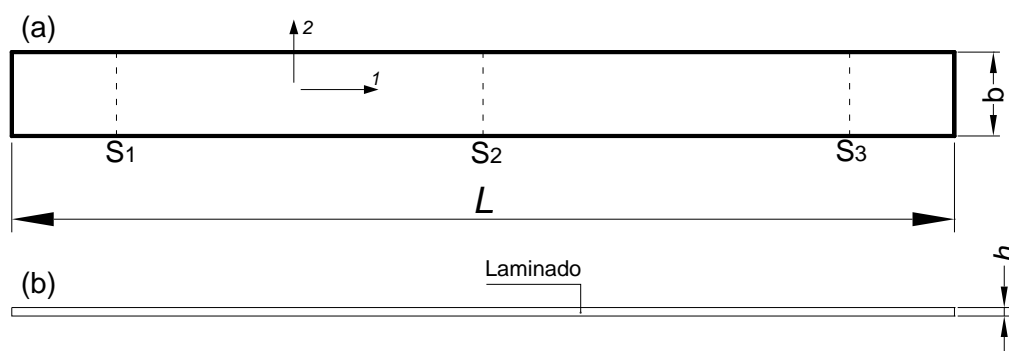


Figura 5 – Geometria, eixos, secções e dimensões dos provetes MDL para os ensaios de arranque: (a) vista em planta; (b) corte.

Tabela 7 – Resultados das medições efectuadas ao MDL com 30 mm de largura

Provete	Secção S <sub>1</sub>		Secção S <sub>2</sub>		Secção S <sub>3</sub>		Dimensões médias		
	L [mm]	b <sub>1</sub> [mm]	h <sub>1</sub> [mm]	b <sub>2</sub> [mm]	h <sub>2</sub> [mm]	b <sub>3</sub> [mm]	h <sub>3</sub> [mm]	b <sub>m</sub> [mm]	h <sub>m</sub> [mm]
1	350	29.90	2.04	29.95	2.07	29.99	2.06	29.95 (0.0%)	2.06 (0.01%)
2		30.15	2.03	29.94	2.07	29.89	2.06	29.99 (0.0%)	2.05 (0.01%)
3	450	29.89	2.05	30.00	2.03	30.01	2.03	29.97 (0.0%)	2.04 (0.01%)
4		30.00	2.02	29.93	2.04	29.98	2.06	29.97 (0.0%)	2.04 (0.01%)
5	550	29.96	2.04	29.99	2.01	29.99	2.00	29.98 (0.0%)	2.02 (0.01%)
6		29.98	2.04	29.85	1.96	2.00	2.04	29.90 (0.0%)	2.00 (0.02%)

Nota: os valores dentro de parêntesis correspondem aos respectivos coeficientes de variação.

Tendo em conta os valores das medições apresentados nas tabelas anteriores, obtém-se uma largura e uma espessura médias para os provetes de MDL com 30 mm e 40 mm de largura de  $b_m = 29.96$  (CoV=0.0%),  $h_m = 2.03$  (CoV=0.01%) e  $b_m = 39.86$  (CoV=0.0%) e  $h_m = 1.99$  (CoV=0.01%), respectivamente. No que se segue deste trabalho esses valores médios serão considerados como representativos daquelas grandezas.



Tabela 8 – Resultados das medições efectuadas ao MDL com 40 mm de largura.

Provete	Secção S <sub>1</sub>			Secção S <sub>2</sub>		Secção S <sub>3</sub>		Dimensões médias	
	L [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]
1	350	39.77	2.02	39.82	2.00	39.83	1.97	39.81 (0.0%)	2.00 (0.01%)
2		40.33	1.96	39.77	1.98	39.98	2.00	39.93 (0.0%)	1.98 (0.01%)
3	450	39.95	1.99	39.84	2.00	39.98	2.01	39.92 (0.0%)	2.00 (0.01%)
4		39.76	1.99	39.86	1.96	39.97	2.00	39.86 (0.0%)	1.98 (0.01%)
5	550	39.61	2.01	39.87	2.00	40.14	2.01	39.87 (0.01%)	2.01 (0.0%)
6		39.95	1.93	39.76	1.98	39.59	1.97	39.77 (0.0%)	1.96 (0.01%)

Nota: os valores dentro de parêntesis correspondem aos respectivos coeficientes de variação.

## 2.4 Preparação dos provetes

Os procedimentos para a preparação dos provetes estão detalhados nos parágrafos seguintes. O procedimento adoptado para todas as técnicas de reforço (MF-EBR, MF-FRP e EBR) é muito similar, contudo devido à especificidade de cada técnica de reforço foram realizadas algumas adaptações.

Para a série MF-EBR foram realizados dois procedimentos de reforço distintos.

Num primeiro procedimento, designado de “Sistema de Aplicação 1” (S1), as etapas de aplicação do reforço foram as seguintes:

- (i) Marcação, na superfície do betão, da zona onde o MDL seria colado;
- (ii) Marcação dos furos e furação dos mesmos com 10 mm e 12 mm de diâmetro para as séries M8 e M10 respectivamente, com a profundidade de 100 mm com recurso a caroteadora com coluna de estabilização de modo a garantir a verticalidade dos furos;
- (iii) Tratamento da zona de colagem nos provetes de betão com um martelo de agulhas de modo a criar alguma rugosidade e facilitar a aderência;
- (iv) Limpeza da superfície tratada e dos furos com ar comprimido e escova de aço, para remover os resíduos gerados;
- (v) Aplicação das ancoragens. Os furos foram preenchidos com adesivo epoxy e, em seguida, as ancoragens foram inseridos neles até à profundidade de 100 mm. O químico aplicado necessitou de pelo menos duas horas de cura;



(vi) Marcação dos furos no MDL, em função da posição final dos furos no betão. A marcação foi realizada com auxílio de uma placa de acrílico transparente onde foram marcados no acrílico as ancoragens para posterior furação do MDL. A furação do MDL foi realizada numa máquina de furação de base fixa de modo a garantir o seu posicionamento “exacto” bem como o diâmetro. Após a furação, o MDL foi lixado na zona de colagem ao betão de modo a criar alguma rugosidade nessa zona. No final destas etapas o laminado foi limpo com acetona;

(vii) Aplicação de uma máscara com fita adesiva em torno da zona de colagem de modo a garantir que a área de colagem fosse a pretendida. Este procedimento realizou-se no betão e no MDL;

(viii) Aplicação de adesivo epoxy sobre as áreas tratadas na superfície do betão e na superfície do laminado que estaria em contacto com este. No MDL houve especial cuidado para não obstruir os furos;

(ix) Aplicação do MDL sobre a superfície do betão, pressionando-o contra este para criar uma espessura uniforme de adesivo de 1 a 2 mm;

(x) Remoção do adesivo em excesso com a ajuda de uma espátula. Limpeza das ancoragens de qualquer adesivo que pudesse ter entrado em contacto com estes no momento da colocação do MDL.

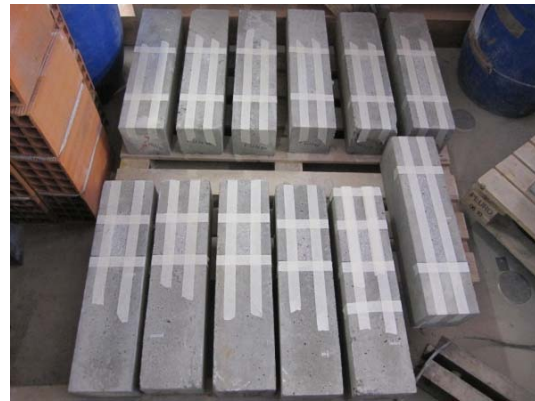
Num segundo procedimento, designado de “Sistema de Aplicação 2” (S2), a principal diferença quando comparada com o S1 foi que a fixação do MDL ao betão com adesivo epoxy era feita antes da furação no betão. Desta forma para o procedimento de reforço S2 as etapas seguidas foram: (i), (iii), (iv – superfície tratada), (vii), (viii), (ix), (x – remoção do adesivo em excesso), (ii – a furação foi realizada a três tempos. Primeiro, recorrendo a uma broca de 6 mm de aço, efectuou-se um furo no conjunto MDL/adesivo. Este procedimento teve como objectivo garantir a localização “exacta” do furo. De seguida, com uma broca de betão de 6 mm foi executado o furo até à profundidade pretendida e posteriormente com uma broca de 12 mm (ancoragens M10) ou uma broca de 10 mm (ancoragens M8) para se obter o diâmetro final exigido. Durante a furação tentou-se garantir a verticalidade do furo.), (iv – furos) e (v).

Na Figura 6 podem ser observadas algumas das etapas efectuadas no procedimento S2, bem como o aspecto final de um dos provetes reforçados.





(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 6 – Preparação do provete para o sistema de aplicação de reforço S2: (a) tratamento da zona de colagem nos provetes de betão com um martelo de agulhas; (b) aplicação de uma máscara com fita adesiva em torno da zona de colagem; (c) aplicação de adesivo epoxy sobre as áreas tratadas na superfície do betão e na superfície do laminado; (d) aplicação do MDL sobre a superfície do betão; (e) remoção do adesivo em excesso com a ajuda de uma espátula; (f) aspecto final do provete já reforçado.

O estudo da influência da metodologia da aplicação de reforço com a técnica MF-EBR prendeu-se com o desejo de simplificar o processo de aplicação do reforço.



A principal diferença entre os dois sistemas de reforço S1 e S2 verifica-se no diâmetro do furo no MDL, enquanto para S1 o diâmetro dos furos no MDL são de 8 mm e 10 mm para as séries M8 e M10 respectivamente, para S2 os diâmetros dos furos no MDL são de 10 mm e 12 mm para as séries M8 e M10 respectivamente. Este facto é explicado pela sequência das etapas realizadas para cada procedimento de reforço. Para S1 quando se realizam os furos no MDL as ancoragens já estão colocadas, daí o diâmetro nos furos no MDL corresponderem aos diâmetros das ancoragens. Enquanto para S2, tal não é possível pois, estando já o MDL colado, a furação do conjunto tem de ser efectuada com o diâmetro final necessário para a colocação da ancoragem.

Para a série EBR a preparação dos provetes compreendeu as seguintes etapas: (i), (iii), (iv – superfície tratada), (vii), (viii), (ix) e (x – remoção do adesivo em excesso).

Para a série MF-FRP a preparação dos provetes consistiu nas seguintes etapas principais: (i), (ii – a marcação dos furos no provete foi realizada através do negativo dos furos do MDL que tinha sido previamente furado numa máquina de furação de base fixa), (iv – furos), (v) e (ix – sem adesivo epoxy).

### 3 RESULTADOS

Nas seguintes secções são apresentados e abordados os principais resultados obtidos nas três séries de ensaios de arranque realizadas (MF-EBR, MF-FRP e EBR).

Os resultados são apresentados por série e em função do número de ancoragens utilizadas no reforço, quando aplicável.

Para todos os provetes de cada série, foram apresentadas as curvas que traduzem a relação entre a força de arranque ( $F_I$ ) registada na célula de carga e o deslizamento na zona carregada ( $s_I$ ) através da colocação de um transdutor de deslocamento LVDT2 como mostra a Figura 7. Adicionalmente, foram analisados vários parâmetros, nomeadamente os modos de rotura, a força máxima, os valores da força de arranque e deslizamento na zona carregada, correspondentes ao primeiro e segundo pico de cada curva  $F_I-s_I$  quando estes fossem perceptíveis.

Em anexo são apresentadas para cada provete as curvas da relação entre a força de arranque e o deslizamento, na zona carregada e na zona carregada corrigido ( $F_I-s_I$  e  $F_I-s_I^*$ , respectivamente) em que o deslizamento na zona carregada corrigido corresponde ao deslizamento na zona carregada calculado com base no deslizamento na secção onde está colocado o LVDT1 (ver Figura 7). O deslizamento na zona carregada corrigido corresponde ao deslizamento da zona livre (LVDT1) descontado da deformação elástica que se verifica entre os dois pontos de leitura (zona carregada e zona livre). Assim sendo, o deslizamento na zona carregada corrigido é definido de acordo com a seguinte expressão:

$$s_I^* = s_{I,LVDT1} - \frac{F_I \times L}{E \times A}$$

sendo,

$s_{I,LVDT1}$	Deslizamento no MDL, na secção onde está colocado o LVDT1;
$F_I$	Força de arranque
$L$	Comprimento entre o LVDT1 e LVDT2
$E$	Módulo de elasticidade médio do MDL
$A$	Área média da secção transversal do MDL

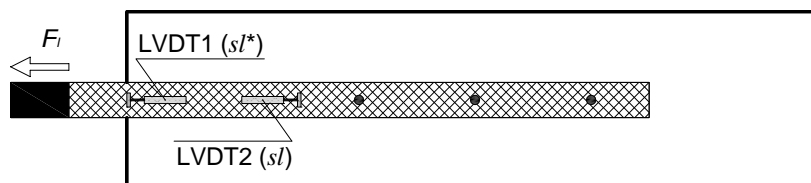


Figura 7 – Localização da instrumentação utilizada para medição dos deslizamentos na zona carregada (LVDT2) e na zona carregada corrigida (LVDT1).

Para cada série são apresentados os modos de rotura típicos e em anexo, como informação adicional, é possível observar os modos de rotura individualizados de cada provete. Posteriormente serão avaliadas e comparadas as principais diferenças das técnicas de reforço aplicadas, bem como a análise dos principais parâmetros adoptados, como a influência do número e diâmetro das ancoragens e a aplicação de pré-esforço nas mesmas.

### 3.1 Séries MF-EBR

#### 3.1.1 Estudo da influência da metodologia de aplicação do reforço

Na Figura 8 são apresentadas por mini-série, as curvas  $F_i-s_i$  dos doze primeiros provetes da série MF-EBR.

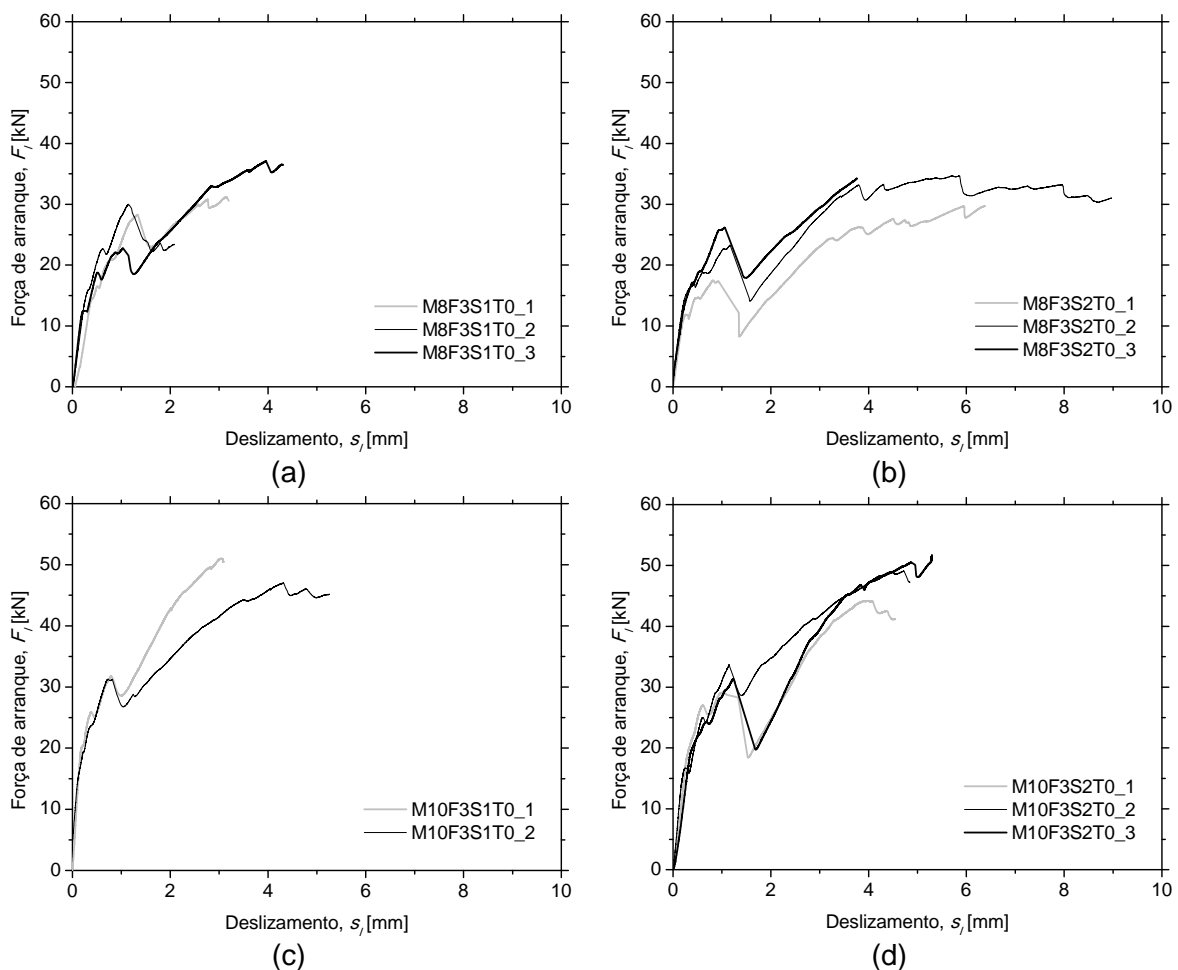


Figura 8 – Relação força de arranque vs. deslizamento para os provetes da série MF-EBR: (a) M8F3S1T0; (b) M8F3S2T0; (c) M10F3S1T0; (d) M10F3S2T0.

O objectivo do primeiro conjunto de provetes foi estudar a influência da metodologia de aplicação de reforço, avaliando as diferenças de comportamento para os dois sistemas de aplicação e, por consequência, a selecção do sistema mais adequado para que este fosse aplicado no restante programa de ensaios relativos à técnica MF-EBR.

Nas séries com ancoragens M10 os dois sistemas de reforço conduzem a resultados muito similares. Por outro lado, nas séries com ancoragens M8 são visíveis diferenças mais pronunciadas, tendo por base a informação relativa ao primeiro pico de carga, sendo o sistema S2 aquele que apresenta menores valores em termos de força máxima. Este comportamento poderá ser explicado por erros de execução no sistema de aplicação S2, nomeadamente o caso da colocação de uma das ancoragens no provete M8F3S2T0\_1, em que é visível que esta não se encontra localizada no eixo do MDL, situação que pode ter influenciado a resistência da ligação. Pois, na zona desta ancoragem a secção útil é muito reduzida num dos lados (ver Figura 9) fazendo com que o comportamento resistente por *bearing* seja deficiente. Desta forma assume-se que respeitando todas as etapas de execução do sistema S2 os resultados deste são semelhantes ao sistema S1 como foi provado para as séries com ancoragens M10.



Figura 9 – Pormenor da execução de reforço para o sistema de aplicação S2 no provete M8F3S2T0\_1.

Em todos os provetes é possível de se observar uma resposta  $F_T-s_i$  essencialmente não linear. Esta é caracterizada por dois picos de carga, sendo o último relativo à máxima capacidade de carga. Até ao primeiro pico de carga verifica-se que a capacidade resistente é dada pela acção resistente simultânea das ancoragens e do adesivo. A quebra de resistência de carga após o primeiro pico de carga é explicada pelo total destacamento do laminado em relação ao betão (*debonding*). A partir deste momento observa-se uma quebra significativa da rigidez em virtude da capacidade resistente passar a ser essencialmente garantida pelas ancoragens (*bearing strength*). Adicionalmente, o atrito adesivo/betão nas vizinhanças das ancoragens também permite alguma capacidade resistente.

Em todos os provetes com o sistema de aplicação S2 verificou-se que a camada de adesivo químico que ficou a preencher o furo se manteve no final. Isto evidencia que o adesivo é suficientemente rígido para fazer com que o esmagamento inicie de imediato (ausência de espaço livre entre a ancoragem e o MDL) (Ver Figura 10).



Figura 10 – Pormenor na zona da ancoragem para o provete M8F3S2T0\_3.

Na Tabela 9 sintetizam-se os principais resultados obtidos a partir dos ensaios de arranque efectuados aos primeiros doze provetes da série MF-EBR. Assim para cada provete são apresentados os valores da força de arranque e deslizamento na zona carregada, correspondentes ao primeiro e segundo pico de cada curva  $F_I-s_I$  e ainda os modos de rotura observados.

Tabela 9 – Principais resultados obtidos nos ensaios de arranque para os doze primeiros provetes da série MF-EBR.

Série	Provete	1º Pico de carga		2º Pico de carga		Modo de rotura
		$s_I$ [mm]	$F_I$ [kN]	$s_I$ [mm]	$F_I$ [kN]	
MF-EBR	M8F3S1T0_1	1.34	28.29	3.15	31.20	I+D+E
	M8F3S1T0_2	1.15	30.02	-	-	I+D+E
	M8F3S1T0_3	1.03	22.82	3.96	37.08	I+D+E
	Média	1.17 (13.11%)	27.04 (13.90%)	3.55 (16.03%)	34.14 (12.18%)	-
	M8F3S2T0_1	0.81	17.49	6.38	29.74	I+D+E
	M8F3S2T0_2	1.17	23.28	5.71	34.70	I+D+E
	M8F3S2T0_3	1.06	26.17	3.76	34.24	I+D+E
	Média	1.01 (17.78%)	22.31 (19.81%)	5.28 (25.81%)	32.89 (8.33%)	-
	M10F3S1T0_1	0.79	31.84	3.03	50.99	I+E
	M10F3S1T0_2	0.73	31.28	4.30	46.99	I+D+E
	Média	0.76 (5.70%)	31.56 (1.25%)	3.67 (24.49%)	48.99 (5.77%)	-
	M10F3S2T0_1	1.02	29.14	3.97	44.20	I+D+E
M10F3S2T0_2	1.14	33.68	4.72	49.08	I+D+E	
M10F3S2T0_3	1.23	31.33	5.30	51.65	I+D+E	
Média	1.13 (9.26%)	31.38 (7.23%)	4.66 (14.22%)	48.31 (7.83%)	-	

Notas: os valores dentro de parêntesis correspondem aos respectivos coeficientes de variação; I=Destacamento na interface adesivo/betão; D=Delaminação do MDL; E=Esmagamento do laminado ao nível das ancoragens.

Nas curvas  $F_t-s_t$ , a distância entre o primeiro pico de carga e a rotura varia de provete para provete e está relacionado com a dimensão do espaço livre entre o MDL e as ancoragens na zona dos furos. Durante este período, esses espaços vão sendo progressivamente diminuídos até que, instantes antes da rotura, estes são nulos e as três ancoragens estão a induzir esmagamento no MDL.

Em alguns provetes com o sistema de aplicação S1 verificou-se claramente que havia furos com esmagamento superior aos restantes. Isto indica que espaço entre o MDL e a ancoragem na zona do furo era diferente de furo para furo. Nos provetes com o sistema de aplicação S2 esta disparidade não era visualmente detectável, pelo que se assume que não tenha sequer ocorrido.

No instante da rotura verifica-se o comportamento típico já identificado para este laminado específico aquando da realização dos ensaios de caracterização do seu comportamento ao esmagamento (Sena Cruz *et al.* 2010), nomeadamente, a rotura por delaminação entre a camada nuclear CFK e as camadas periféricas HS com formação de uma cunha na camada de CFK de largura próxima ao diâmetro da ancoragem que promove o esmagamento (ver Figura 11).



Figura 11 – Pormenor da rotura referente ao provete M8F3S1T0\_2.

Na Figura 12 apresenta-se fotos elucidativas dos modos de rotura típicos observados nos doze primeiros provetes da série MF-EBR, nomeadamente, destacamento na interface adesivo/betão, delaminação do MDL e esmagamento do laminado ao nível das ancoragens. No Anexo A.1 é possível observar o modo de rotura ocorrido para cada provete.

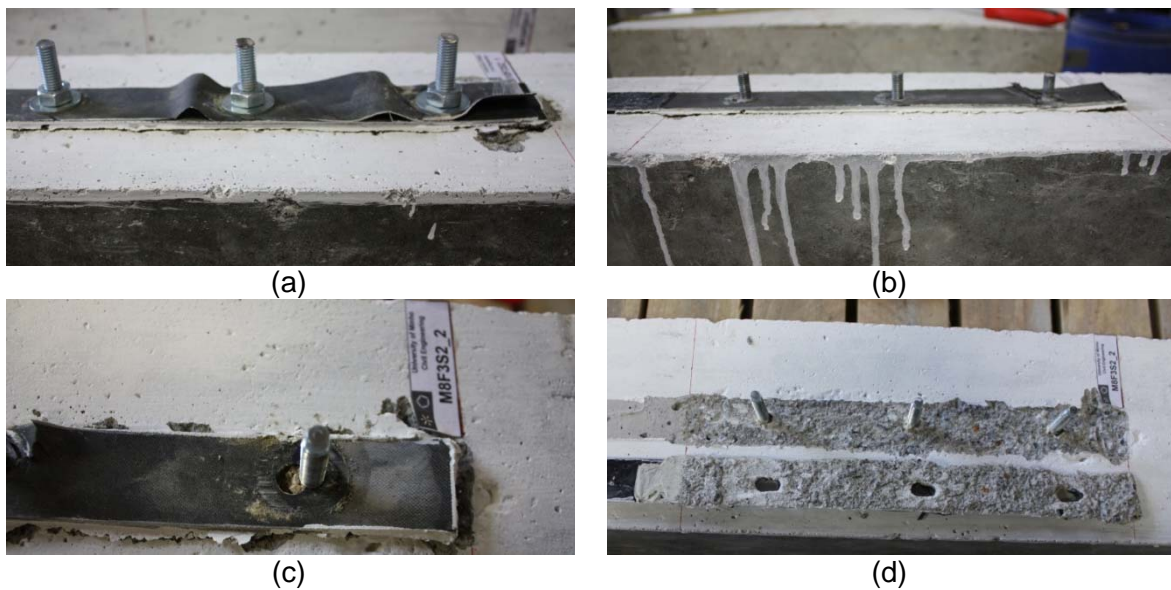


Figura 12 – Modos de rotura típicos obtidos para os primeiros doze provetes da série MF-EBR: (a) delaminação do MDL para o provete M10F3S2T0\_1; (b) destacamento na interface adesivo/betão referente ao provete M8F3S1T0\_1; (c), (d) esmagamento do laminado ao nível das ancoragens para o provete M8F3S2T0\_2.

Em todos os provetes foi verificado, após retirar o MDL do provete, que o comprimento de amarração previsto foi respeitado (Figura 13b) e quando identificável foi medida a largura da cunha (Figura 13a).



Figura 13 – Fotos: (a) largura da cunha no provete M8F3S1T0\_1; (b) comprimento de amarração do provete M8F3S2T0\_1.



### 3.1.2 Séries com uma ancoragem

Na Figura 14 são apresentadas por série, as curvas  $F_T-s_f$  dos provetes da série MF-EBR com uma ancoragem.

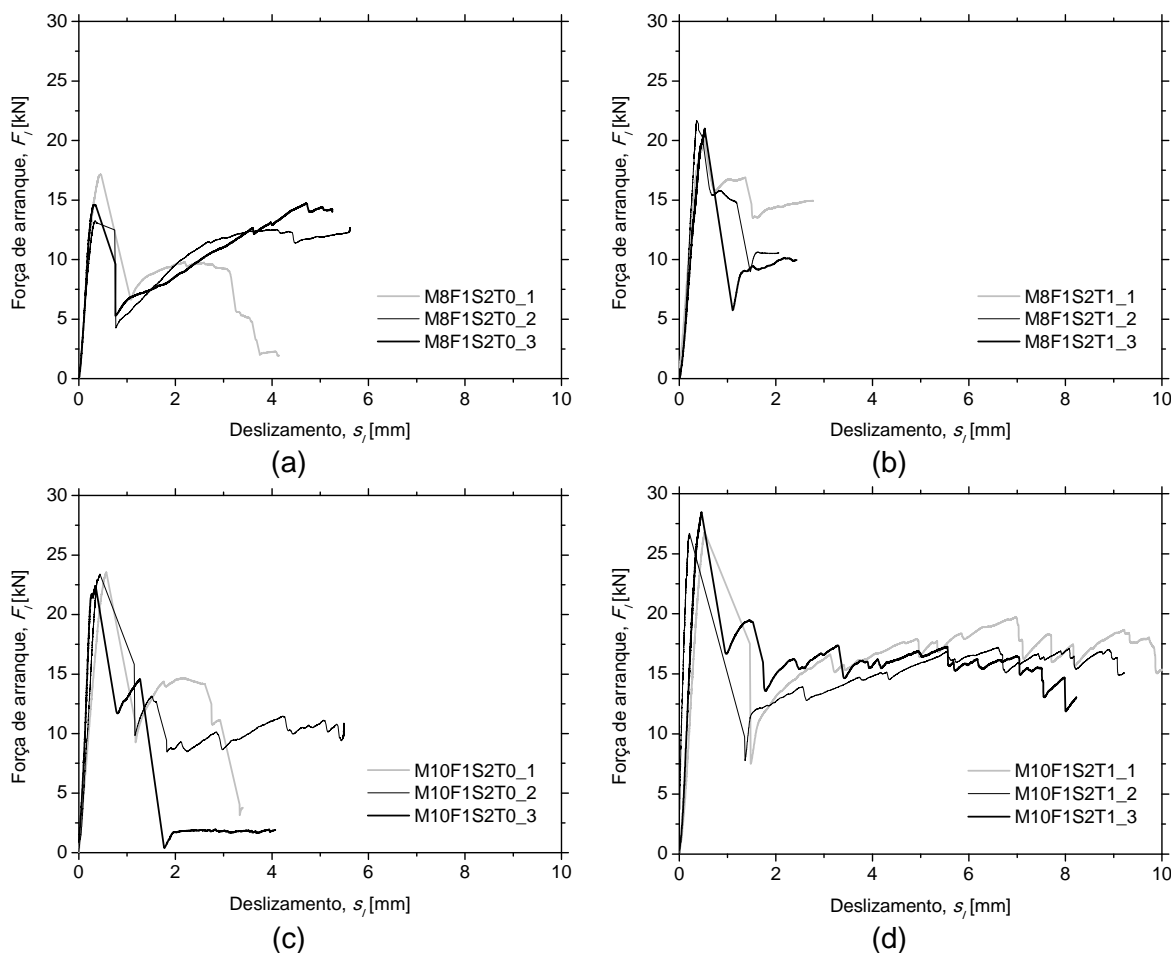


Figura 14 – Relação força de arranque vs. deslizamento para os provetes da série MF-EBR com uma ancoragem: (a) M8F1S2T0; (b) M8F1S2T1; (c) M10F1S2T0; (d) M10F1S2T1.

Como seria de esperar, a força de arranque aumenta com o aumento do diâmetro da ancoragem e com a aplicação do pré-esforço. Adicionalmente observa-se que o deslizamento para  $F_{l,máx}$  é menor quanto maior for o diâmetro da ancoragem como da aplicação do pré-esforço.

Em termos de comportamento pós-pico, a análise desta série não permite identificar nenhuma tendência.

Na Tabela 10 estão resumidos os principais resultados obtidos a partir dos ensaios de arranque efectuados aos provetes da série MF-EBR com uma ancoragem. Assim para cada provete são apresentados os valores da força de arranque e deslizamento na zona



carregada, correspondentes ao primeiro e segundo pico de cada curva  $F_l-s_l$  e ainda os modos de rotura observados.

Tabela 10 – Principais resultados obtidos nos ensaios de arranque para a série MF-EBR com uma ancoragem.

Série	Provete	1º Pico de carga		1º Pico de carga		Modo de rotura
		$s_l$ [mm]	$F_l$ [kN]	$s_l$ [mm]	$F_l$ [kN]	
MF-EBR	M8F1S2T0_1	0.45	17.16	2.20	9.81	I+D+E
	M8F1S2T0_2	0.33	13.24	5.62	12.65	I+D+E
	M8F1S2T0_3	0.31	14.60	4.70	14.72	I+D+E
	Média	0.36 (20.88%)	15.00 (13.27%)	4.17 (42.43%)	12.39 (19.89%)	-
	M8F1S2T1_1	0.51	20.18	1.37	16.89	L+E
	M8F1S2T1_2	0.36	21.67	0.83	15.79	L+E
	M8F1S2T1_3	0.53	20.99	2.17	10.15	L+E
	Média	0.47 (19.30%)	20.95 (3.56%)	1.46 (46.52%)	14.28 (25.33%)	-
	M10F1S2T0_1	0.57	23.54	2.18	14.67	I+D+E
	M10F1S2T0_2	0.44	23.40	1.51	13.13	L+E
	M10F1S2T0_3	0.34	22.41	1.27	14.57	I+D+E
	Média	0.45 (24.94%)	23.12 (2.66%)	1.65 (28.73%)	14.12 (6.10%)	-
	M10F1S2T1_1	0.53	26.81	6.97	19.74	L+E
	M10F1S2T1_2	0.21	26.69	6.60	17.21	L+E
	M10F1S2T1_3	0.46	28.46	1.45	19.45	L+E
	Média	0.40 (41.88%)	27.32 (3.62%)	5.01 (61.59%)	18.80 (7.36%)	-

Notas: os valores dentro de parêntesis correspondem aos respectivos coeficientes de variação; I=Destacamento na interface adesivo/betão; L=Destacamento na interface adesivo/MDL; D=Delaminação do MDL; E=Esmagamento do laminado ao nível das ancoragens.

De um modo geral o modo de rotura verificado na série MF-EBR com uma ancoragem foi similar ao verificado nos doze primeiros ensaios da série MF-EBR (ver secção 3.1.1).

A principal diferença foi que para os provetes sem pré-esforço aplicado nas ancoragens se verificou a formação de cunha no CFK aquando do levantamento da ponta do MDL, com excepção do provete M10F1S2T0\_2 (ver Figura 15) em que não se verificou a formação da cunha porque o MDL localizado entre, a ancoragem e o bordo, escorregou do adesivo epoxy (S&P220), enquanto que nas séries em que foi aplicado pré-esforço (M8F1S2T1 e M10F1S2T1) não houve formação de cunha pois o

destacamento da ponta ocorreu na interface adesivo/MDL e não na interface adesivo/betão.



Figura 15 – Destacamento na interface adesivo/MDL para o provete M10F1S2T0\_2.

Na Figura 16 apresentam-se fotos representativas dos modos de rotura típicos observados na série MF-EBR com uma ancoragem.

No Anexo A.2 é possível observar o modo de rotura ocorrido para cada provete.



(a)



(b)

Figura 16 – Modos de rotura típicos obtidos na série MF-EBR com uma ancoragem: (a) delaminação do MDL e destacamento na interface adesivo/betão para o provete M8F1T0\_1 (b) esmagamento do laminado ao nível das ancoragens e destacamento na interface adesivo MDL para o provete M10F1S2T1\_2.

### 3.1.3 Séries com duas ancoragens

Na Figura 17 são apresentadas por série, as curvas  $F_T-s_i$  dos provetes da série MF-EBR com duas ancoragens.

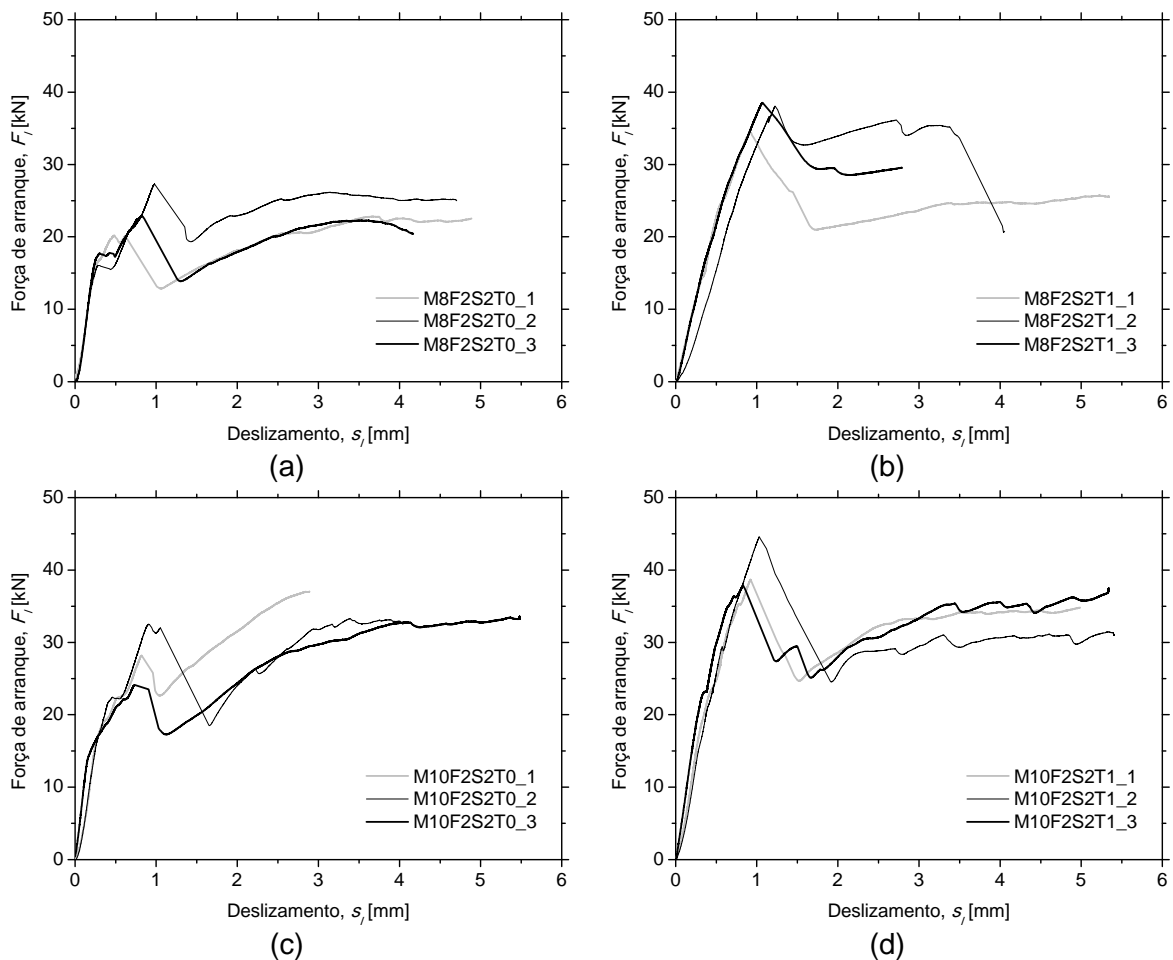


Figura 17 – Relação força de arranque vs. deslizamento para os provetes da série MF-EBR com duas ancoragens: (a) M8F2S2T0; (b) M8F2S2T1; (c) M10F2S2T0; (d) M10F2S2T1.

Tal como se tinha verificado para a série anterior, que apenas diferem no número de ancoragens utilizadas, o aumento do diâmetro da ancoragem e a aplicação do pré-esforço nas ancoragens, conduz a um aumento da força de arranque máxima ( $F_{i,máx}$ ) e a diminuição do deslizamento correspondente à força máxima ( $s_{i,máx}$ ).

Para os casos dos provetes sem pré-esforço os picos relativos à entrada em funcionamento das duas ancoragens são facilmente identificáveis nas curvas. Já no caso dos provetes com pré-esforço estas quebras não são tão pronunciadas.

Na Tabela 11 estão resumidos os principais resultados obtidos a partir dos ensaios de arranque efectuados aos provetes da série MF-EBR com duas ancoragens. Assim para cada provete são apresentados os valores da força de arranque e deslizamento na zona carregada, correspondentes ao primeiro e segundo pico de cada curva  $F_I-s_I$  e ainda os modos de rotura observados.

Tabela 11 – Principais resultados obtidos nos ensaios de arranque para a série MF-EBR com duas ancoragens.

Série	Provete	1º Pico de carga		1º Pico de carga		Modo de rotura
		$s_I$ [mm]	$F_I$ [kN]	$s_I$ [mm]	$F_I$ [kN]	
MF-EBR	M8F2S2T0_1	0.48	20.20	3.66	22.83	I+D+E
	M8F2S2T0_2	0.98	27.31	3.14	26.17	I+D+E
	M8F2S2T0_3	0.82	22.93	3.50	22.29	I+D+E
	Média	0.76 (33.44%)	23.48 (15.28%)	3.43 (7.72%)	23.76 (8.84%)	-
	M8F2S2T1_1	0.92	34.45	5.21	25.71	L+D+E
	M8F2S2T1_2	1.22	38.05	2.72	36.16	D+E
	M8F2S2T1_3	1.07	38.54	-	-	D+E
	Média	1.07 (14.05%)	37.01 (6.03%)	3.97 (44.51%)	30.94 (23.89%)	-
	M10F2S2T0_1	0.82	28.20	2.85	37.02	I+D+E
	M10F2S2T0_2	0.91	32.53	3.39	33.29	I+D+E
	M10F2S2T0_3	0.73	24.13	5.48	33.56	I+D+E
	Média	0.82 (10.68%)	28.29 (14.85%)	3.90 (35.67%)	34.62 (6.01%)	-
	M10F2S2T1_1	0.92	38.67	4.98	34.82	L+D+E
	M10F2S2T1_2	1.03	44.57	5.33	31.45	L+D+E
	M10F2S2T1_3	0.83	37.90	5.34	37.47	L+D+E
Média	0.93 (10.73%)	40.38 (9.04%)	5.22 (3.88%)	34.58 (8.73%)	-	

Notas: os valores dentro de parêntesis correspondem aos respectivos coeficientes de variação; I=Destacamento na interface adesivo/betão; L=Destacamento na interface adesivo/MDL; D=Delaminação do MDL; E=Esmagamento do laminado ao nível das ancoragens.

Os modos de rotura obtidos para esta série são idênticos aos das séries anteriores. Nos provetes em que não se formou cunha ocorreu destacamento entre a última ancoragem e a extremidade livre do MDL na interface adesivo/MDL (ver Figura 18).



Figura 18 – Destacamento na interface adesivo/MDL para o provete M8F2S2T1\_1.

Na Figura 19 apresentam-se fotos representativas dos modos de rotura típicos observados na série MF-EBR com duas ancoragens. No Anexo A.3 é possível observar o modo de rotura ocorrido para cada provete.

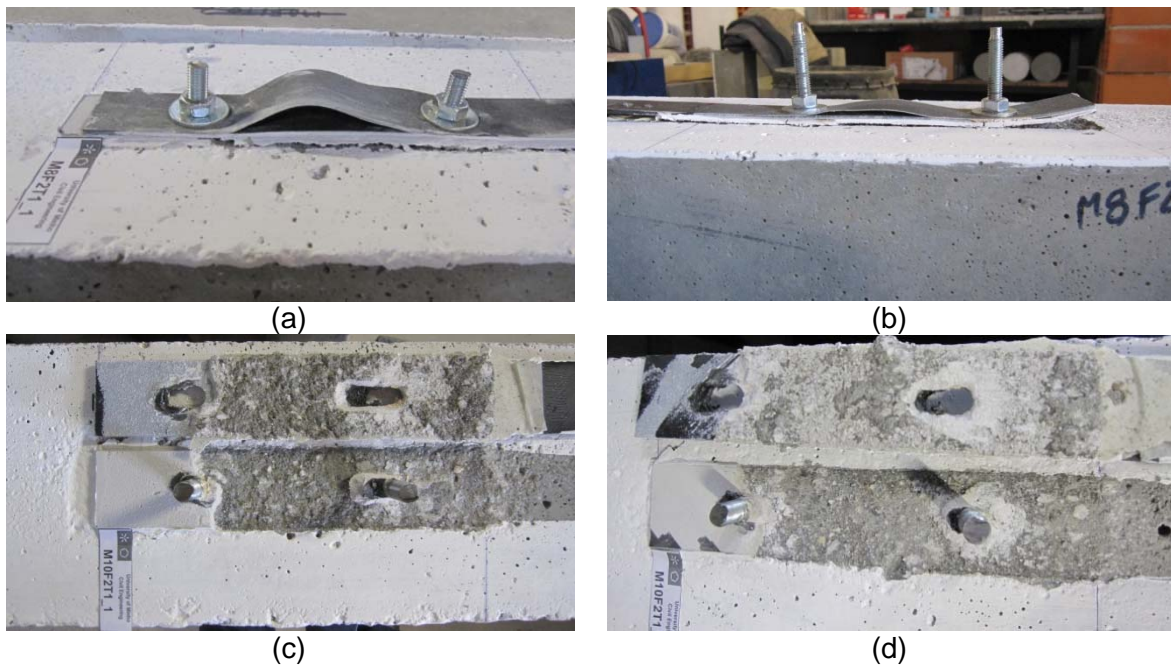


Figura 19 – Modos de rotura típicos obtidos na série MF-EBR com duas ancoragens: (a) inter-delaminação do MDL referente ao provete M8F2S2T1\_1; (b) destacamento na interface adesivo/betão referente ao provete M8F2S2T0\_2. (c) destacamento na interface adesivo/MDL referente ao provete M10F2S2T1\_1; (d) esmagamento do laminado ao nível das ancoragens referente ao provete M10F2S2T1\_3

### 3.1.4 Séries com três ancoragens

Na Figura 20 são apresentadas por série, as curvas  $F_I$ - $s$ , dos provetes da série MF-EBR com três ancoragens.

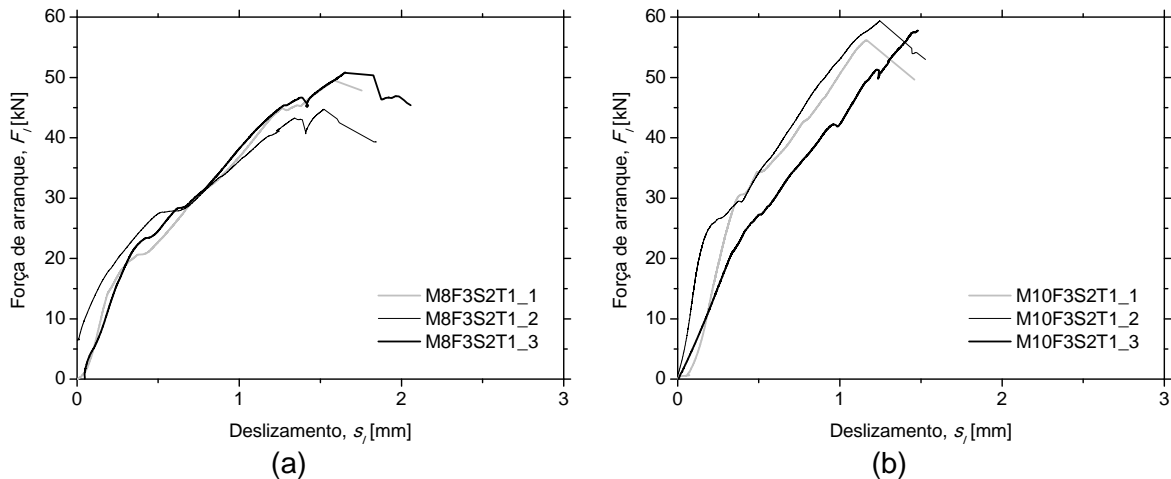


Figura 20 – Relação força de arranque vs. deslizamento para os provetes da série MF-EBR com três ancoragens: (a) M8F3S2T1; (b) M10F3S2T1.

Na Tabela 12 estão resumidos os principais resultados obtidos a partir dos ensaios de arranque efectuados aos provetes da série MF-EBR com três ancoragens. Assim para cada provete é apresentado o valor máximo da força de arranque ( $F_{I,máx}$ ) registado no ensaio e o deslizamento correspondente à força máxima ( $s_{I,máx}$ ) e ainda os modos de rotura observados.

Tabela 12 – Principais resultados obtidos nos ensaios de arranque para a série MF-EBR com três ancoragens.

Série	Provete	$s_{I,máx}$ [mm]	$F_{I,máx}$ [kN]	Modo de rotura
MF-EBR	M8F3S2T1_1	1.58	49.50	D+E
	M8F3S2T1_2	1.52	44.71	D+E
	M8F3S2T1_3	1.65	50.83	D+E
	Média	1.59 (4.18%)	48.35 (6.66%)	-
	M10F3S2T1_1	1.16	56.14	D+E
	M10F3S2T1_2	1.25	59.39	D+E
	M10F3S2T1_3	1.48	57.76	D+E
Média	1.29 (12.76%)	57.76 (2.81%)	-	

Notas: os valores dentro de parêntesis correspondem aos respectivos coeficientes de variação; D=Delaminação do MDL; E=Esmagamento do laminado ao nível das ancoragens.

Na Figura 21 apresentam-se fotos representativas dos modos de rotura típicos observados na série MF-EBR com três ancoragens. No Anexo A.4 é possível observar o modo de rotura ocorrido para cada provete.



Figura 21 – Modos de rotura típicos obtidos na série MF-EBR com três ancoragens: (a) delaminação do MDL para o provete M10F3S2T1\_3; (b) esmagamento do laminado ao nível das ancoragens para o provete M8F3S2T1\_2.



## 3.2 Séries MF-FRP

### 3.2.1 Séries com uma ancoragem

Na Figura 22 são apresentadas por mini-série, as curvas  $F_T-s_i$  dos provetes da série MF-FRP com uma ancoragem.

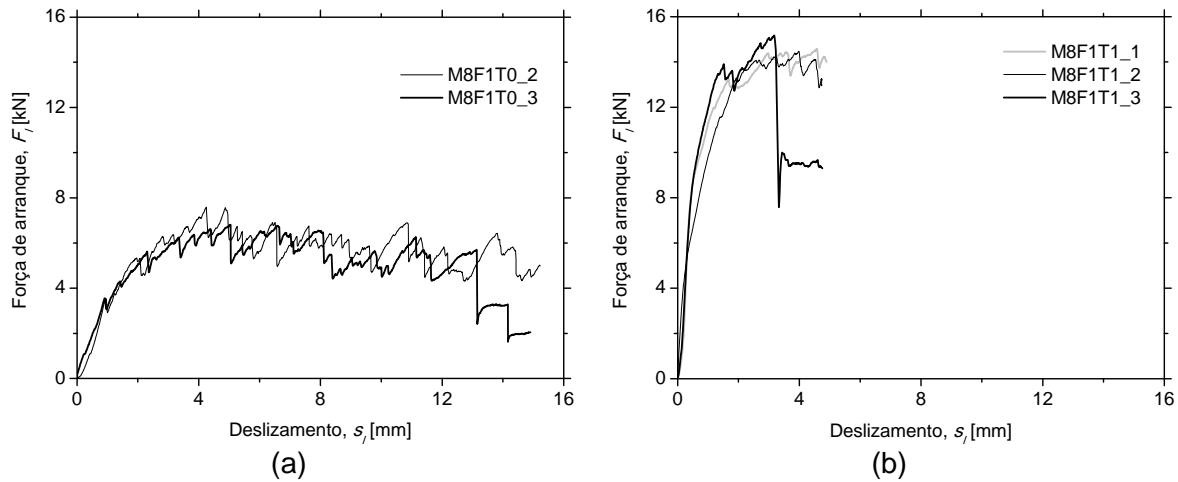


Figura 22 – Relação força de arranque vs. deslizamento para os provetes da série MF-FRP com uma ancoragem: (a) M8F1T0; (b) M8F1T1.

Na Tabela 13 estão resumidos os principais resultados obtidos a partir dos ensaios de arranque efectuados aos provetes da série MF-FRP com uma ancoragem. Assim para cada provete é apresentado o valor máximo da força de arranque ( $F_{i,máx}$ ) registado no ensaio e o deslizamento correspondente à força máxima ( $s_{i,máx}$ ) e ainda os modos de rotura observados.

Tabela 13 – Principais resultados obtidos nos ensaios de arranque para a série MF-FRP com uma ancoragem.

Série	Provete	$s_{i,máx}$ [mm]	$F_{i,máx}$ [kN]	Modo de rotura
MF-FRP	M8F1T0_2	4.25	7.59	E
	M8F1T0_3	5.02	6.81	E
	Média	4.63 (11.75%)	7.2 (7.66%)	-
	M8F1T1_1	4.59	14.58	D+E
	M8F1T1_2	3.98	14.47	D+E
	M8F1T1_3	3.17	15.17	D+E
	Média	3.91 (18.19%)	14.74 (2.55%)	-

Notas: os valores dentro de parêntesis correspondem aos respectivos coeficientes de variação; D=Delaminação do MDL; E=Esmagamento do laminado ao nível das ancoragens.

Na Figura 23 são apresentadas fotos representativas dos modos de rotura típicos observados na série MF-FRP com uma ancoragem, nomeadamente a delaminação do MDL e esmagamento do laminado ao nível da ancoragem. No Anexo B.1 é possível observar o modo de rotura ocorrido para cada provete.

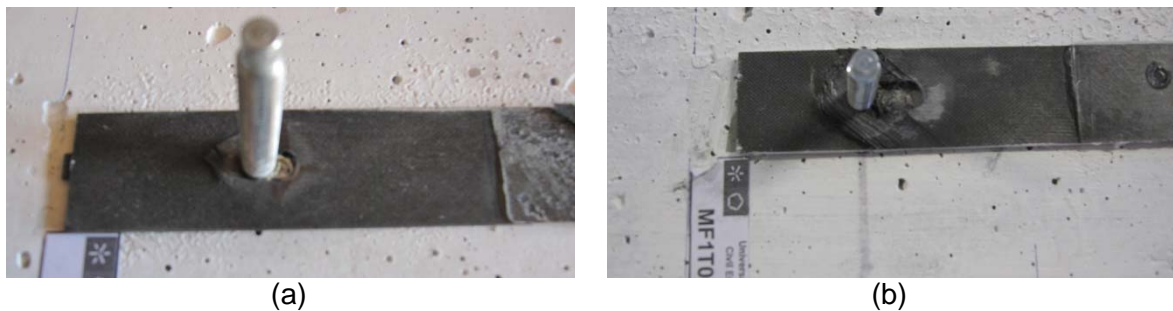


Figura 23 – Modos de rotura típicos obtidos na série MF-FRP com uma ancoragem: (a) delaminação do MDL referente ao provete M8F1T1\_1; (b) esmagamento do laminado ao nível das ancoragens para o provete M8F1T0\_2

De uma forma geral observa-se que a relação  $F_l$  cresce com  $s_l$  até determinado ponto, a partir do qual, a força de arranque permanece constante. Este início do patamar coincide com o esmagamento do laminado na zona de ancoragem. Tal comportamento é constatado nos ensaios com ancoragens com e sem pré-esforço.

### 3.2.2 Séries com duas ancoragens

Na Figura 24 são apresentadas por mini-série, as curvas  $F_l-s_l$  dos provetes da série MF-FRP com duas ancoragens.

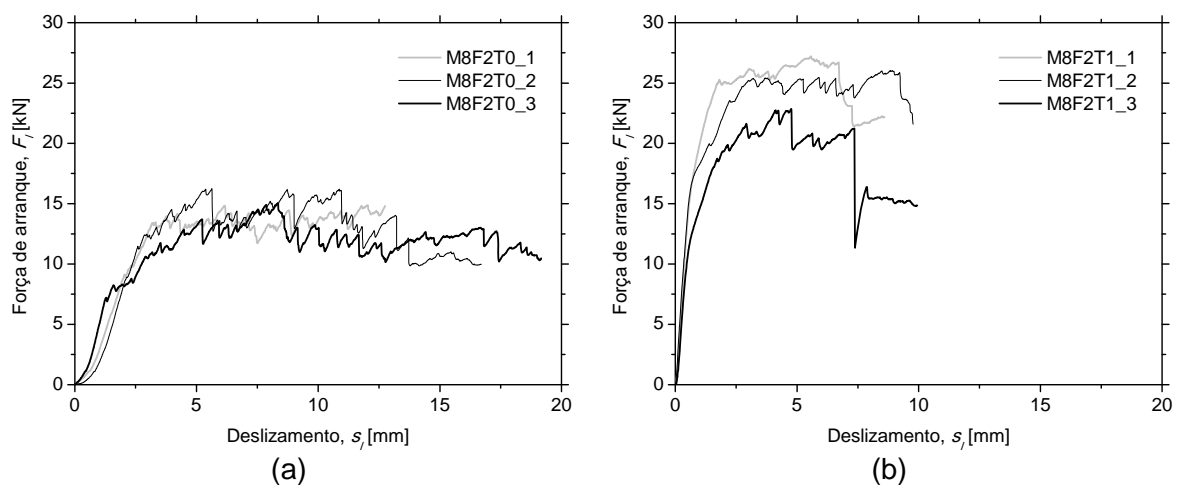


Figura 24 – Relação força de arranque vs. deslizamento para os provetes da série MF-FRP com duas ancoragens: (a) M8F2T0; (b) M8F2T1.

Na Tabela 14 estão resumidos os principais resultados obtidos a partir dos ensaios de arranque efectuados aos provetes da série MF-FRP com duas ancoragens. Assim para cada provete é apresentado o valor máximo da força de arranque ( $F_{l,máx}$ ) registado no ensaio e o deslizamento correspondente à força máxima ( $s_{l,máx}$ ) e ainda os modos de rotura observados.

Tabela 14 – Principais resultados obtidos nos ensaios de arranque para a série MF-FRP com duas ancoragens.

Série	Provete	$s_{l,máx}$ [mm]	$F_{l,máx}$ [kN]	Modo de rotura
MF-FRP	M8F2T0_1	12.02	14.87	D+E
	M8F2T0_2	5.63	16.24	D+E
	M8F2T0_3	8.35	15.06	D+E
	Média	8.67 (36.98%)	15.39 (4.82%)	-
	M8F2T1_1	5.58	27.22	D+E
	M8F2T1_2	8.83	26.06	D+E
	M8F2T1_3	4.76	22.85	D+E
	Média	6.39 (33.67%)	25.38 (8.92%)	-

Notas: os valores dentro de parêntesis correspondem aos respectivos coeficientes de variação; D=Delaminação do MDL; E=Esmagamento do laminado ao nível das ancoragens.

Na Figura 25 são apresentadas fotos representativas dos modos de rotura típicos observados na série MF-FRP com duas ancoragens. No Anexo B.2 é possível observar o modo de rotura ocorrido para cada provete.

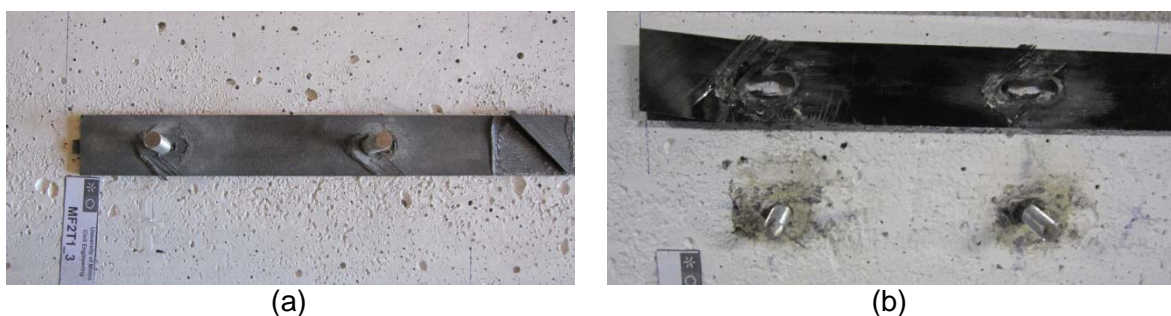


Figura 25 – Modos de rotura típicos obtidos na série MF-FRP com duas ancoragens: (a) delaminação do MDL referente ao provete M8F2T1\_3; (b) esmagamento do laminado ao nível das ancoragens para o provete M8F2T0\_1.

De uma forma geral, nesta série, observa-se um comportamento similar da relação  $F_l-s_l$  à da série anterior. Contudo, neste caso, a ordem de grandeza das forças máximas ( $F_{l,máx}$ ) é cerca do dobro das da série anterior.

### 3.2.3 Séries com três ancoragens

Na Figura 26 são apresentadas as curvas  $F_l$ - $s_l$  dos provetes da série MF-FRP com três ancoragens.

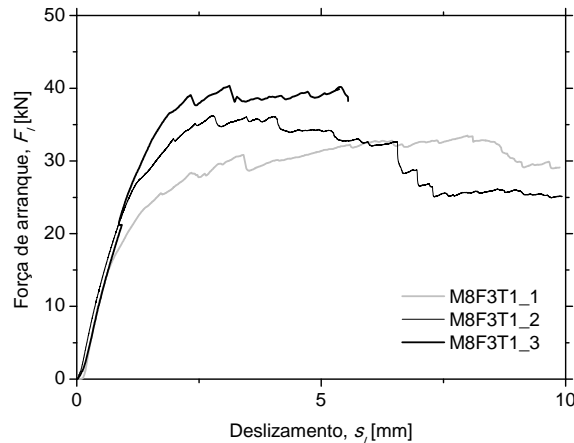


Figura 26 – Relação força de arranque vs. deslizamento para os provetes da série MF-FRP com três ancoragens: M8F3T1.

Na Tabela 15 estão resumidos os principais resultados obtidos a partir dos ensaios de arranque efectuados aos provetes da série MF-FRP com três ancoragens. Assim para cada provete é apresentado o valor máximo da força de arranque ( $F_{l,máx}$ ) registado no ensaio e o deslizamento correspondente à força máxima ( $s_{l,máx}$ ) e ainda os modos de rotura observados.

Tabela 15 – Principais resultados obtidos nos ensaios de arranque para a série MF-FRP com três ancoragens.

Série	Provete	$s_{l,máx}$ [mm]	$F_{l,máx}$ [kN]	Modo de rotura
MF-FRP	M8F3T1_1	7.99	33.50	D+E
	M8F3T1_2	2.77	36.23	D+E
	M8F3T1_3	3.13	40.34	D+E
	Média	4.63 (63.08%)	36.69 (9.38%)	

Notas: os valores dentro de parêntesis correspondem aos respectivos coeficientes de variação; D=Delaminação do MDL; E=Esmagamento do laminado ao nível das ancoragens.

Na Figura 27 são apresentadas fotos representativas dos modos de rotura típicos observados na série MF-FRP com três ancoragens. No Anexo B.3 é possível observar o modo de rotura ocorrido para cada provete.



Figura 27 – Modos de rotura típicos obtidos na série MF-FRP com três ancoragens: (a) delaminação do MDL para o provete M8F3T1\_1; (b) esmagamento do laminado ao nível das ancoragens para o provete M8F3T1\_1.

### 3.3 Série EBR

Na Figura 28 são apresentadas as relações  $F_T-s_l$  dos provetes da série EBR.

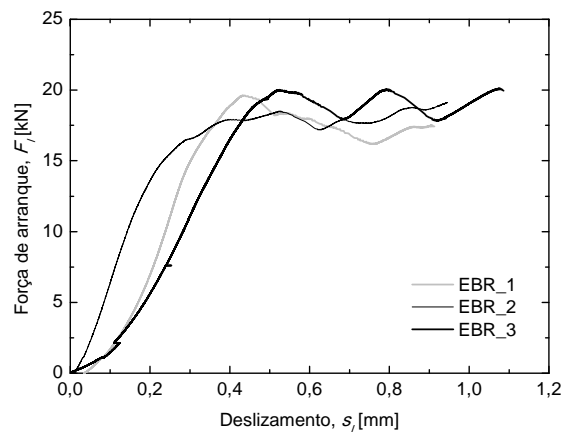


Figura 28 – Relação força de arranque vs. deslizamento para os provetes da série EBR.

De uma forma geral, observa-se o comportamento relatado na bibliografia da especialidade, i.e., um crescimento da carga com o deslizamento até determinado valor a partir do qual o reforço esgota a sua capacidade resistente.

Na Tabela 16 estão sintetizados os principais resultados obtidos a partir dos ensaios de arranque efectuados aos provetes da série EBR. Assim para cada provete é apresentado o valor máximo da força de arranque ( $F_{l,máx}$ ) registado no ensaio e o deslizamento correspondente à força máxima ( $s_{l,máx}$ ) e ainda os modos de rotura observados.

Tabela 16 – Principais resultados obtidos nos ensaios de arranque para a série EBR.

Série	Provete	$s_{l,máx}$ [mm]	$F_{l,máx}$ [kN]	Modo de rotura
EBR	EBR_1	0.43	19.62	I
	EBR_2	0.95	19.12	I
	EBR_3	0.86	20.12	I
	Média	0.75 (36.72%)	19.62 (2.55%)	-

Notas: os valores dentro de parêntesis correspondem aos respectivos coeficientes de variação; I=Destacamento na interface adesivo/betão.

Na Figura 29 são apresentadas fotos representativas dos modos de rotura típicos observados na série EBR, nomeadamente destacamento ao nível da interface betão/epoxy. No Anexo C.1 é possível observar o modo de rotura ocorrido para cada provete.

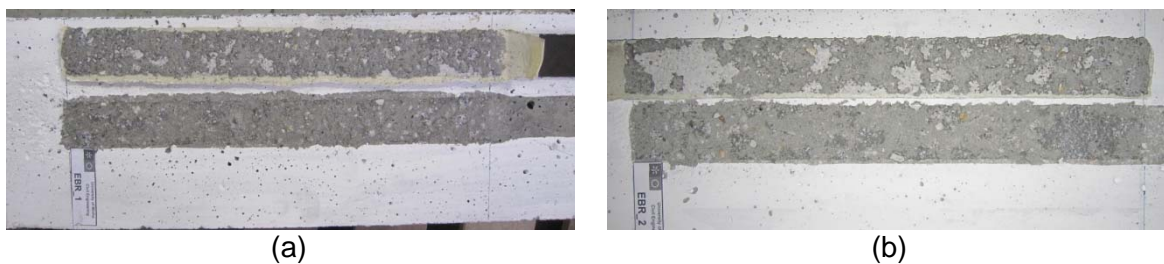


Figura 29 – Modos de rotura típicos obtidos na série EBR: (a) destacamento ao nível da interface betão/epoxy EBR\_1; (b) destacamento ao nível da interface betão/epoxy EBR\_2.

### 3.4 Análise global dos resultados

Na Figura 30 é representada a evolução da força de arranque em função do número de ancoragens e da aplicação de pré-esforço nestas para as séries MF-EBR.

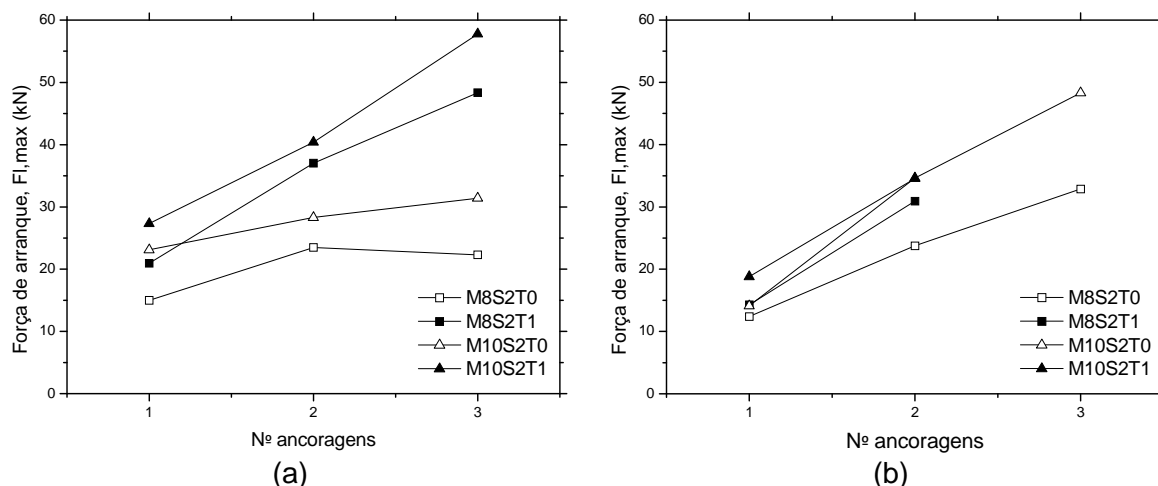


Figura 30 – Evolução da força de arranque em função do número de ancoragens e aplicação de pré-esforço ou não nestas para as séries MF-EBR: (a) para o primeiro pico; (b) para o segundo pico.

Tal como se tinha verificado nas secções anteriores, para as séries MF-EBR, a influência do aumento do número de ancoragens, o aumento do diâmetro da ancoragem e, para o mesmo diâmetro mas com pré-esforço aplicado nas ancoragens, verifica-se o crescimento da força de arranque máxima ( $F_{l,máx}$ ).

Observa-se também que os ganhos de resistência são significativos com a aplicação de pré-esforço nas ancoragens.

Na Figura 31 é representada a evolução da força de arranque em função do número de ancoragens e da aplicação de pré-esforço nestas para as séries MF-FRP.

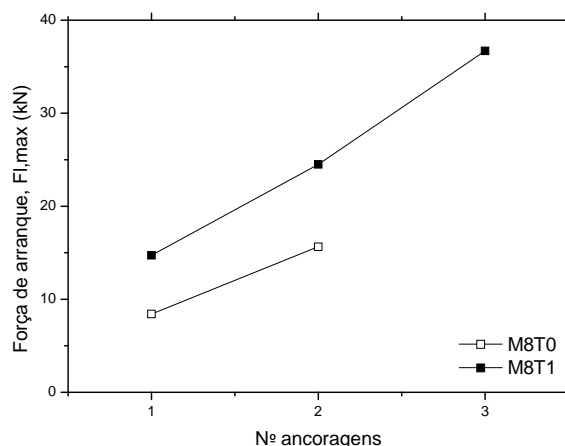


Figura 31 – Evolução da força de arranque em função do número de ancoragens e aplicação de pré-esforço ou não nestas para as séries MF-FRP.

Da mesma forma, para as séries MF-FRP verifica-se o crescimento da força de arranque máxima ( $F_{l,máx}$ ) com o aumento do número de ancoragens e a aplicação de pré-esforço nestas. Este crescimento é praticamente linear com o número de ancoragens.

Na Figura 32 é representada a comparação em termos de força máxima (primeiro pico) entre as técnicas de reforço MF-EBR e MF-FRP.

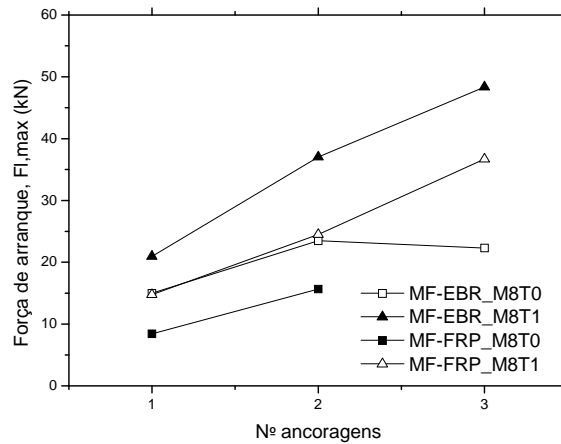


Figura 32 – Comparação em termos de força máxima de arranque para as técnicas MF-EBR e MF-FRP.

Tal como seria de esperar a técnica MF-EBR conduziu a valores significativamente superiores quando comparados com a técnica MF-FRP. Tal situação ocorre quer com e sem aplicação de pré-esforço.





## 4 CONCLUSÕES

O programa experimental realizado teve como objectivo principal a caracterização do comportamento da ligação entre laminados multi-direccionais de CFRP e o betão para diferentes técnicas de reforço. Para tal foram efectuadas três séries distintas. A primeira série de provetes foi reforçada de acordo com a técnica MF-EBR, a segunda série foi reforçada de acordo com a técnica MF-FRP e uma última série com provetes reforçados com recurso à técnica EBR.

Tal como seria de esperar, o aumento do número de ancoragens e o aumento do diâmetro da ancoragem conduz a um acréscimo da capacidade de carga do sistema de reforço quer para a técnica MF-EBR como para a técnica MF-FRP. Por outro para o mesmo diâmetro mas com pré-esforço aplicado nas ancoragens, verifica-se o crescimento da força de arranque máxima ( $F_{l,máx}$ ) e em alguns casos verifica-se a diminuição do deslizamento correspondente à força máxima ( $s_{l,máx}$ ).

Os modos de rotura típicos observados para os provetes MF-EBR foram o destacamento na interface adesivo/betão, destacamento na interface adesivo/MDL, delaminação do MDL e esmagamento do laminado ao nível das ancoragens.

Para os provetes MF-FRP os modos de rotura típicos observados foram a delaminação do MDL seguindo-se o esmagamento do laminado ao nível das ancoragens.

O modo de rotura verificado para os provetes EBR foi o destacamento na interface betão/epoxy.

## 5 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi financiado pelos programas COMPETE e FEDER, projecto PTDC/ECM/74337/ 2006 da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia. Os autores manifestam os seus agradecimentos às empresas que gentilmente forneceram os materiais, nomeadamente, à Hilti Portugal – Produtos e Serviços Lda., à S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda. e à SECIL.



## 6 REFERÊNCIAS

- American Concrete Institute (ACI), (2008). "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures." Report ACI 440.2R-08 by ACI Committee 440, Farmington Hills, USA, 80 pp.
- Aidoo, J, Harries, K.A., Petrou, M.F., (2006). "Full-Scale Experimental Investigation of Repair of Reinforced Concrete Interstate Bridge Using CFRP Materials." *Journal of Bridge Engineering*, 11(3), 350-358.
- Bank, L.C. (2004). "Mechanically Fastened FRP (MF-FRP) Strips for Strengthening RC Structures – A Viable Alternative", *Proceedings of CICE 2004, 2nd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, December 8-10, Adelaide, Australia, 12 pp.
- CNR-DT 200 (2004). "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures." National Research Council, Rome, 157 pp.
- Coelho, M.R.F. (2010). "Comportamento da ligação de laminados multi-direccionais colados e ancorados ao betão." *Dissertação de Mestrado*, Universidade do Minho, 115 pp.
- Dempsey, D.D., Scott, D.W., (2006). "Wood Members Strengthened with Mechanically Fastened FRP Strips." *Journal of Composites for Construction*, 10(5), 392-398.
- Elsayed, W., Neale, K., Ebead, U., (2009). "Mechanically Fastened FRP-Strengthened Two-Way Concrete Slabs with and without Cutouts." *Journal of Composites for Construction*, 13(3), 198-207.
- Elsayed, W., Neale, K., Ebead, U., (2009). "Studies on Mechanically Fastened Fiber-Reinforced Polymer Strengthening Systems." *ACI Structural Journal*, 106(1), 49-59.
- Hag-Elsafi O, Alampalli S, Kunin J. (2001). "Application of FRP laminates for strengthening of a reinforced concrete T-beam bridge structure." *Composite Structures*, 52:453–66 pp.
- Lamanna, A.J., Bank, L.C., Scott, D.W., (2001). "Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Fasteners and Fiber-Reinforced Polymer Strips." *ACI Structural Journal*, 98(3), 368-376.



- Lamanna, A.J., Bank, L.C., Scott, D.W., (2004). "Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Mechanically Attaching Fiber-Reinforced Polymer Strips." *Journal of Composites for Construction*, 8(3), 204-209.
- Lee, J.H., Lopez, M.M., Bakis, C.E., (2009). "Slip effects in reinforced concrete beams with mechanically fastened FRP strip." *Journal of Cement & Concrete Composites*, 31, 496–504.
- Martin, J.A., Lamanna, A.J., (2008). "Performance of Mechanically Fastened FRP Strengthened Concrete Beams in Flexure." *Journal of Composites for Construction*, 12(3), 257-265.
- Quattlebaum, J.B., Harries, K.A., Petrou, M.F., (2005). "Comparison of Three Flexural Retrofit Systems under Monotonic and Fatigue Loads." *Journal of Bridge Engineering*, 10(6), 731-740.
- Sena Cruz, J.M., Barros, J.A.O., Coelho, M. (2010). "Bond Between Concrete and Multi-Directional CFRP Laminates." *Advanced Materials Research - Structural Analysis of Historic Constructions*, Vols. 133-134, 917-922.  
[doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.917]
- Sena-Cruz, J.M., Barros, J.A.O., Coelho, M.R.F., (2011) in: CDCC'2011 - Fourth International Conference on Durability & Sustainability of Fibre Reinforced Polymer Composites for Construction and Rehabilitation, edited by B. Benmokrane, E. El-Salakawy, E. Ahmed (2011) , p. 253-261.



# **ANEXO A**

---

**Resultados Experimentais das séries MF-EBR**

## ANEXO A.1 – Estudo da influência da metodologia de aplicação do reforço

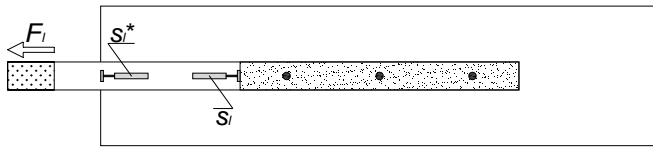


Figura A.1.1 – Localização da instrumentação utilizada para medição dos deslocamentos na zona carregada ( $s_i$ ) e na zona carregada corrigida ( $s_i^*$ ).

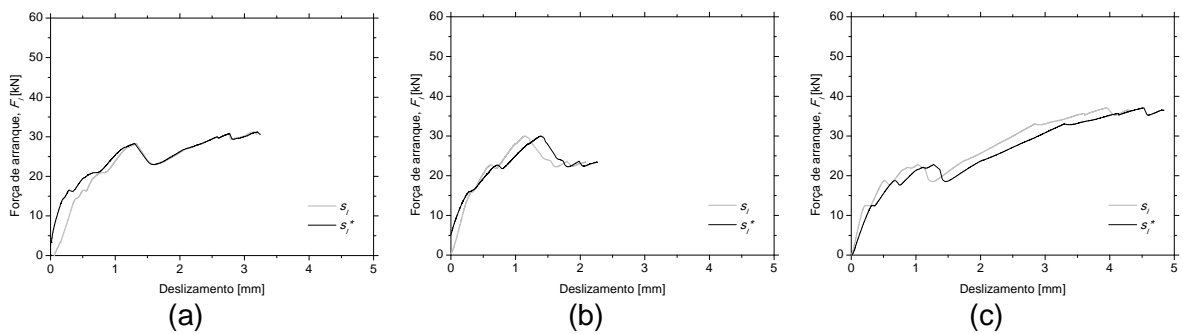


Figura A.1.2 – Relação força de arranque vs deslocamentos na zona carregada: (a) M8F3S1T0\_1; (b) M8F3S1T0\_2; (c) M8F3S1T0\_3.

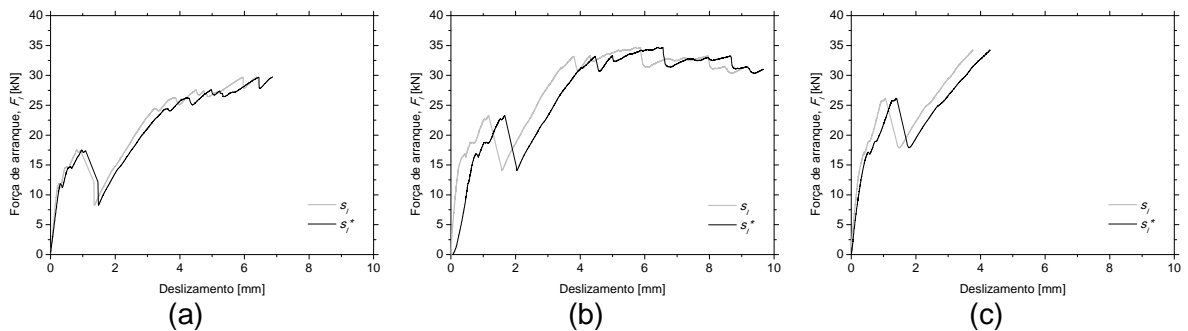


Figura A.1.3 – Relação força de arranque vs deslocamentos na zona carregada: (a) M8F3S2T0\_1; (b) M8F3S2T0\_2; (c) M8F3S2T0\_3.

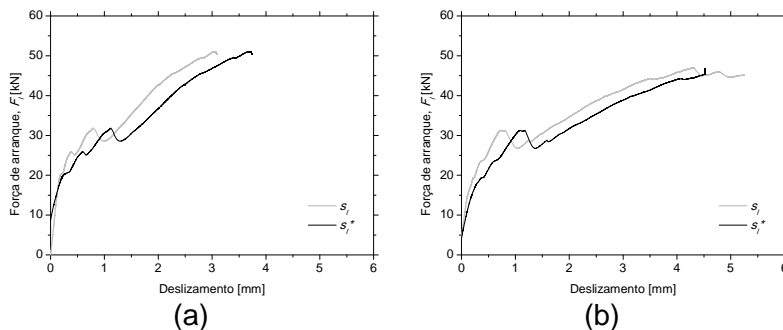


Figura A.1.4 – Relação força de arranque vs deslocamentos na zona carregada: (a) M10F3S1T0\_1; (b) M10F3S1T0\_2.

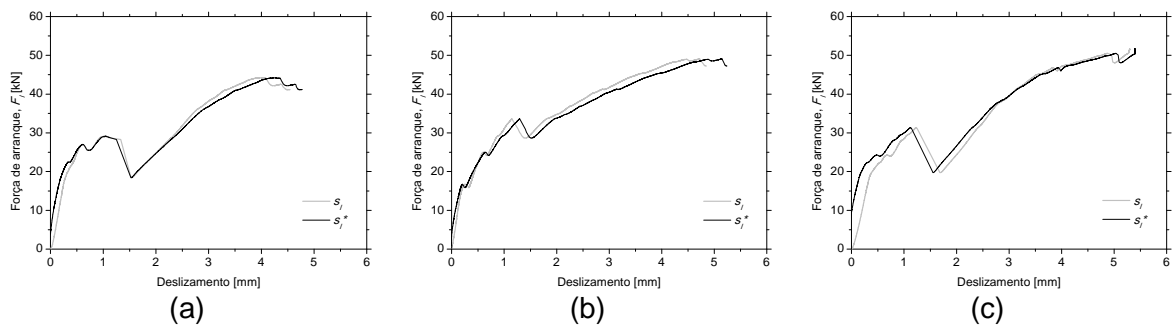













Figura A.1.5 – Relação força de arranque vs deslocamentos na zona carregada:  
(a) M10F3S2T0\_1; (b) M10F3S2T0\_2; (c) M10F3S2T0\_3.

Tabela A.1.1 – Modos de rotura dos primeiros doze provetes da Série MF-EBR.

Provete		Modo de Rotura
M8F3S1T0_1	I+D+E (12 mm)	
M8F3S1T0_2	I+D+E (10 mm)	
M8F3S1T0_3	I+D+E (11 mm)	
M8F3S2T0_1	I+D+E (não identificável)	
M8F3S2T0_2	I, D, E (não identificável)	



M8F3S2T0_3	I+D+E (12 mm)	
M10F3S1T0_1	I+E (não ocorreu delaminação visível)	
M10F3S1T0_2	I+D+E (11 mm)	
M10F3S2T0_1	I+D+E (14 mm)	
M10F3S2T0_2	I+D+E (13 mm)	
M10F3S2T0_3	I+D+E (13 mm)	

I - Destacamento na interface adesivo/betão; D - Delaminação do MDL; E - Esmagamento do laminado ao nível das ancoragens.

Nota: Os valores entre parêntesis correspondem à largura da cunha quando esta é identificável.



## ANEXO A.2 – Séries MF-EBR com uma ancoragem

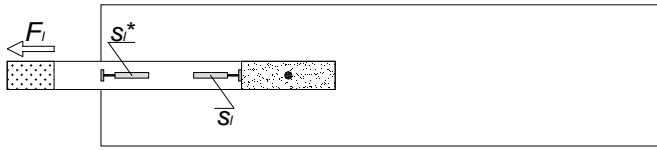


Figura A.2.1 – Localização da instrumentação utilizada para medição dos deslizamentos na zona carregada ( $s_i$ ) e na zona carregada corrigida ( $s_i^*$ ).

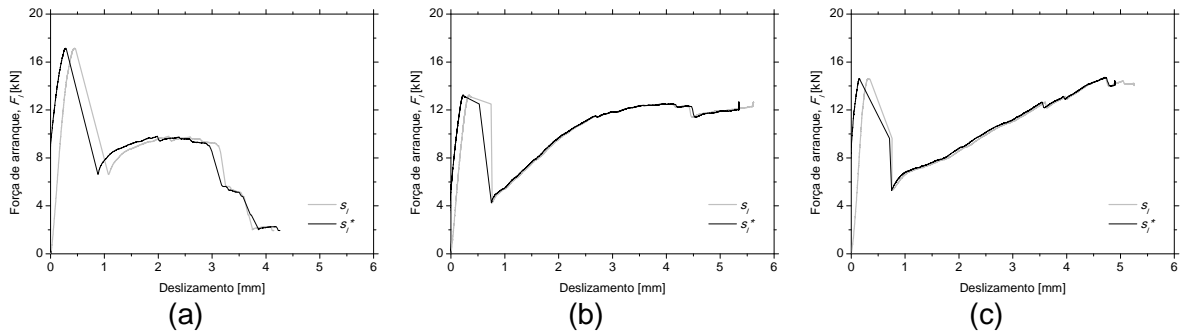


Figura A.2.2 – Relação força de arranque vs deslizamentos na zona carregada: (a) M8F1S2T0\_1; (b) M8F1S2T0\_2; (c) M8F1S2T0\_3.

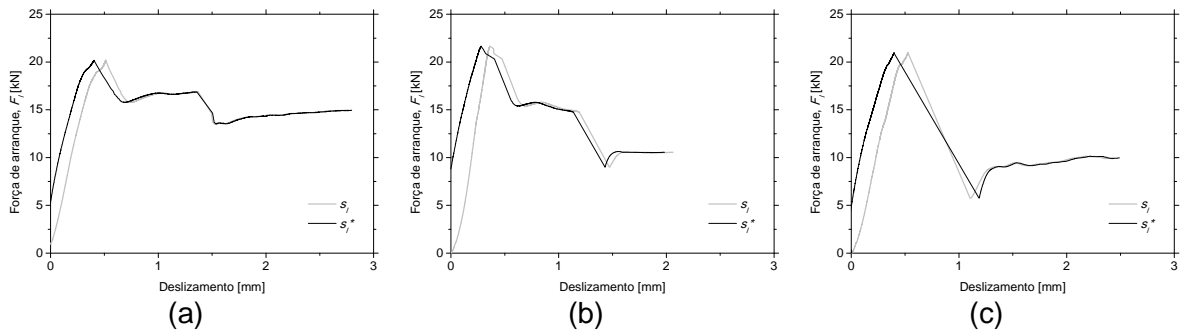


Figura A.2.3 – Relação força de arranque vs deslizamentos na zona carregada: (a) M8F1S2T1\_1; (b) M8F1S2T1\_2; (c) M8F1S2T1\_3.

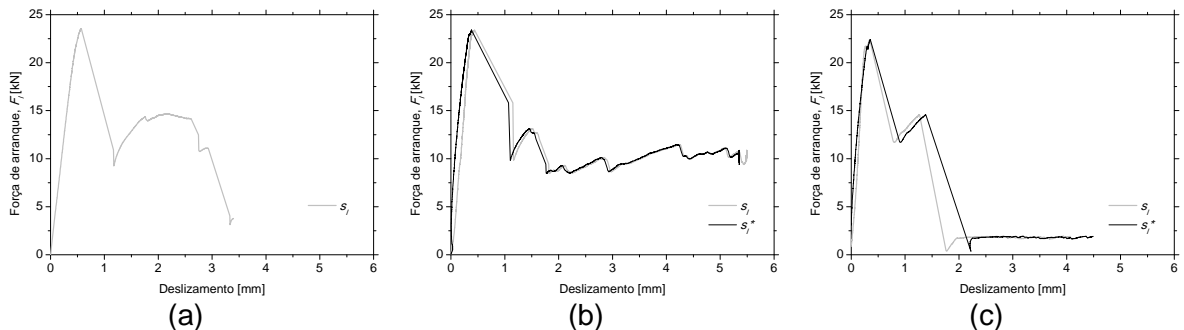


Figura A.2.4 – Relação força de arranque vs deslizamentos na zona carregada: (a) M10F1S2T0\_1; (b) M10F1S2T0\_2; (c) M10F1S2T0\_3.

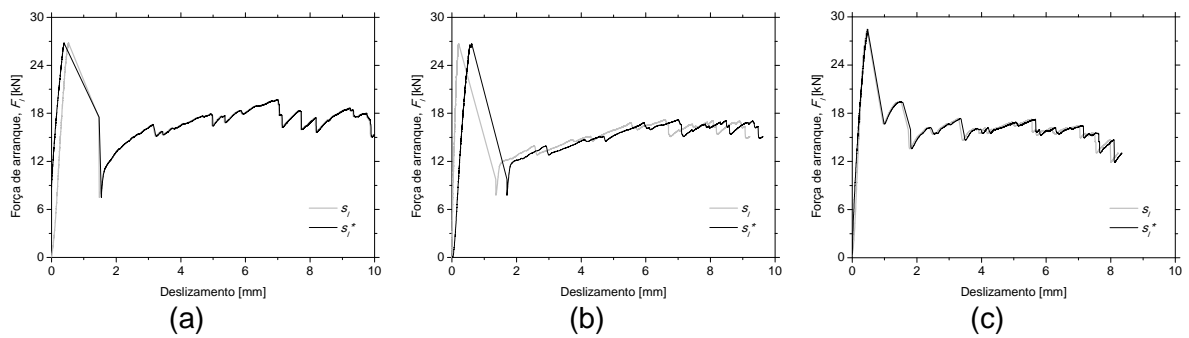









Figura A.2.5 – Relação força de arranque vs deslocamentos na zona carregada:  
(a) M10F1S2T1\_1; (b) M10F1S2T1\_2; (c) M10F1S2T1\_3.

Tabela A.2.1 – Modos de rotura dos provetes da série MF-EBR com uma ancoragem.

Provete	Modo de Rotura
M8F1S2T0_1	I+D+E (9 mm)
M8F1S2T0_2	I+D+E (8 mm)
M8F1S2T0_3	I+D+E (6 mm)
M8F1S2T1_1	L+E (não formou cunha)
M8F1S2T1_2	L+E (não formou cunha)





M8F1S2T1_3	L+E (não formou cunha)	
M10F1S2T0_1	I+D+E (10 mm)	
M10F1S2T0_2	L+E (*)	
M10F1S2T0_3	I+D+E (11 mm)	
M10F1S2T1_1	L+E (não formou cunha)	
M10F1S2T1_2	L+E (não formou cunha)	
M10F1S2T1_3	L+E (não formou cunha)	

I - Destacamento na interface adesivo/betão; L – Destacamento na interface adesivo/MDL;  
D - Delaminação do MDL; E - Esmagamento do laminado ao nível das ancoragens. (\*) Não formou



cunha porque houve escorregamento entre o MDL, desde o furo ao bordo e o adesivo epoxy (S&P220). Nota: Os valores entre parêntesis correspondem à largura da cunha quando esta é identificável.

### ANEXO A.3 – Séries MF-EBR com duas ancoragens

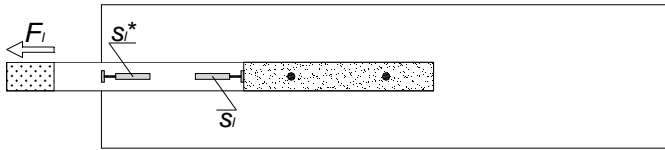


Figura A.3.1 – Localização da instrumentação utilizada para medição dos deslizamentos na zona carregada ( $s_i$ ) e na zona carregada corrigida ( $s_i^*$ ).

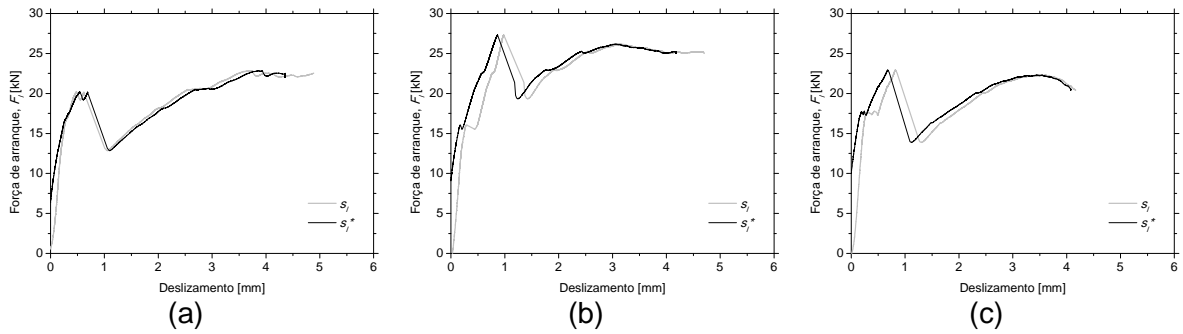


Figura A.3.2 – Relação força de arranque vs deslizamentos na zona carregada: (a) M8F2S2T0\_1; (b) M8F2S2T0\_2; (b) M8F2S2T0\_3.

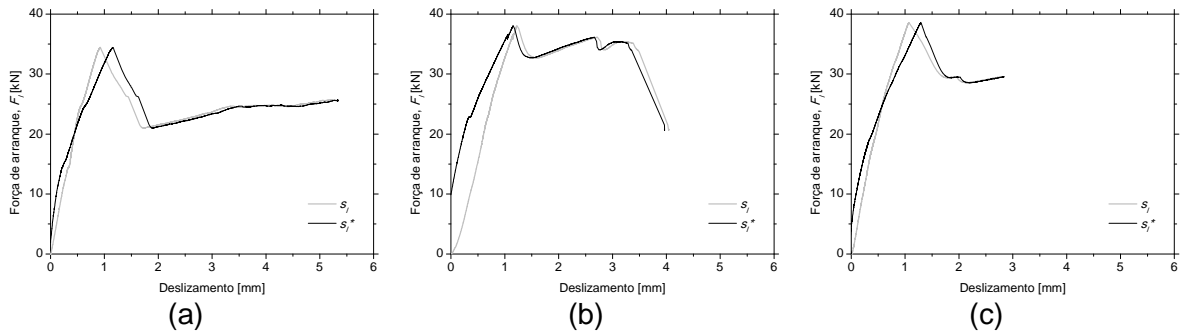


Figura A.3.3 – Relação força de arranque vs deslizamentos na zona carregada: (a) M8F2S2T1\_1; (b) M8F2S2T1\_2; (b) M8F2S2T1\_3.

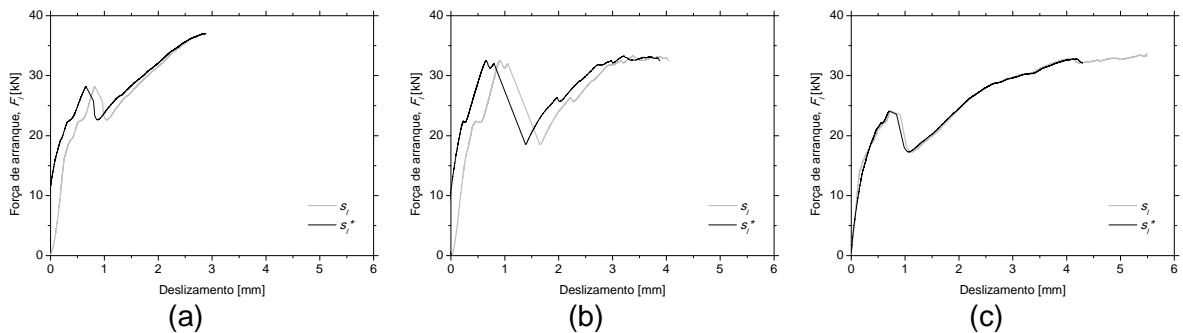


Figura A.3.4 – Relação força de arranque vs deslizamentos na zona carregada: (a) M10F2S2T0\_1; (b) M10F2S2T0\_2; (b) M10F2S2T0\_3.

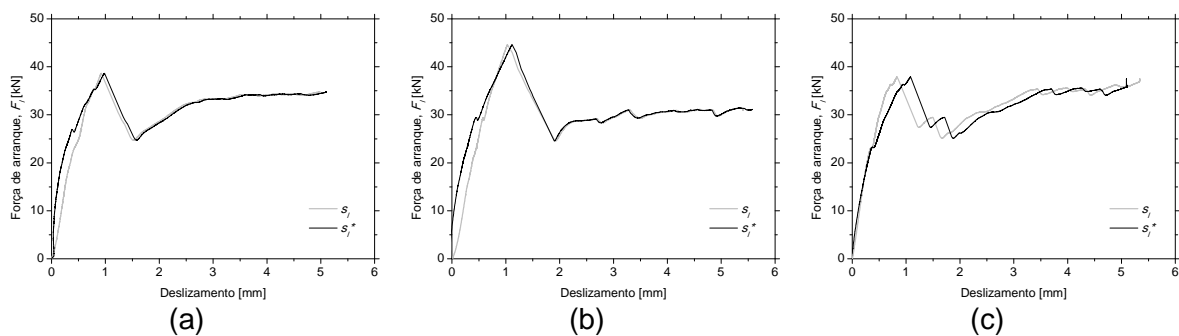


Figura A.3.5 – Relação força de arranque vs deslocamentos na zona carregada:  
(a) M10F2S2T1\_1; (b) M10F2S2T1\_2; (c) M10F2S2T1\_3.

Tabela A.3.1 – Modos de rotura dos provetes da série MF-EBR com duas ancoragens.

Provete	Modo de Rotura
M8F2S2T0_1	I+D+E (não formou cunha)
M8F2S2T0_2	I+D+E (não formou cunha)
M8F2S2T0_3	I+D+E (10 mm)
M8F2S2T1_1	L+D+E (não formou cunha)



M8F2S2T1_2	D+E (não formou cunha)	
M8F2S2T1_3	D+E (9 mm)	
M10F2S2T0_1	I+D+E (12 mm)	
M10F2S2T0_2	I+D+E (12 mm)	
M10F2S2T0_3	I+D+E (13 mm)	
M10F2S2T1_1	L+D+E (8 mm)	



M10F2S2T1\_2

L+D+E (11 mm)



M10F2S2T1\_3

L+D+E (12 mm)



I - Destacamento na interface adesivo/betão; L – Destacamento na interface adesivo/MDL;  
D - Delaminação do MDL; E - Esmagamento do laminado ao nível das ancoragens.  
Nota: Os valores entre parêntesis correspondem à largura da cunha quando esta é identificável.



## ANEXO A.4 – Séries MF-EBR com três ancoragens

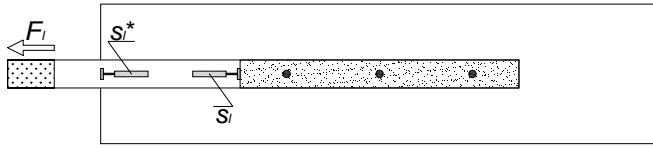


Figura A.4.1 – Localização da instrumentação utilizada para medição dos deslizamentos na zona carregada ( $s_i$ ) e na zona carregada corrigida ( $s_i^*$ ).

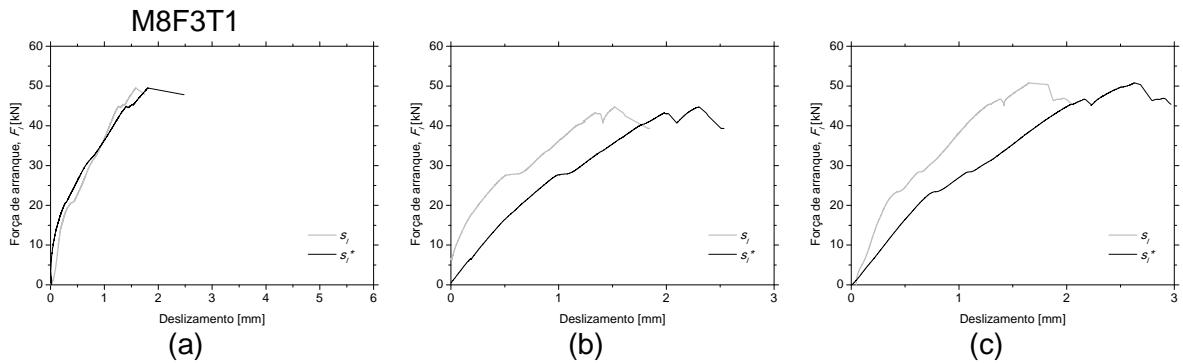


Figura A.4.2 – Relação força de arranque vs deslizamentos na zona carregada: (a) M8F3S2T1\_1; (b) M8F3S2T1\_2; (c) M8F3S2T1\_3.

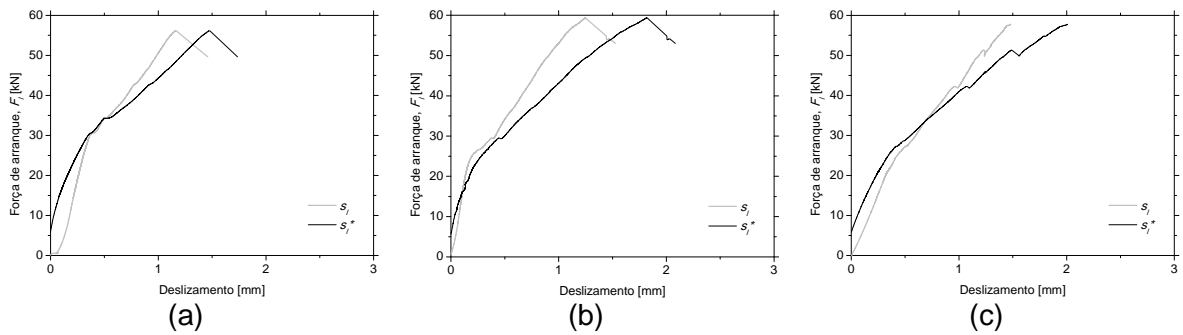








Figura A.4.3 – Relação força de arranque vs deslizamentos na zona carregada: (a) M10F3S2T1\_1; (b) M10F3S2T1\_2; (c) M10F3S2T1\_3.

Tabela A.4.1 – Modos de rotura dos provetes da Série MF-EBR com três ancoragens.

Designação	Modo de Rotura
M8F3S2T1_1	D+E (11 mm)





M8F3S2T1_2	D+E (14 mm)	
M8F3S2T1_3	D+E (13 mm)	
M10F3S2T1_1	D+E (12 mm)	
M10F3S2T1_2	D+E (14 mm)	
M10F3S2T1_3	D+E (13 mm)	

D – Delaminação do MDL; E – Esmagamento do laminado ao nível das ancoragens. Nota: Os valores entre parêntesis correspondem à largura da cunha quando esta é identificável.

## **ANEXO B**

---

**Resultados Experimentais das séries MF-FRP**

## ANEXO B.1 – Séries MF-FRP com uma ancoragem

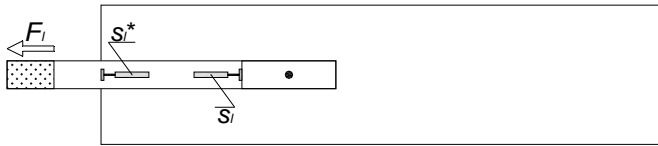


Figura B.1.1 – Localização da instrumentação utilizada para medição dos deslizamentos na zona carregada ( $s_i$ ) e na zona carregada corrigida ( $s_i^*$ ).

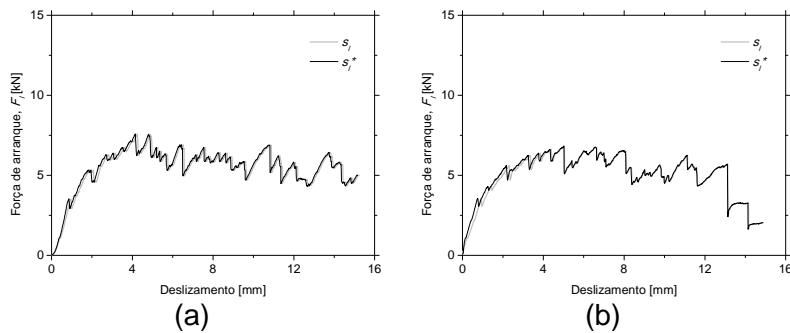


Figura B.1.2 – Relação força de arranque vs deslizamentos na zona carregada:  
(a) M8F1T0\_2; (b) M8F1T0\_3.

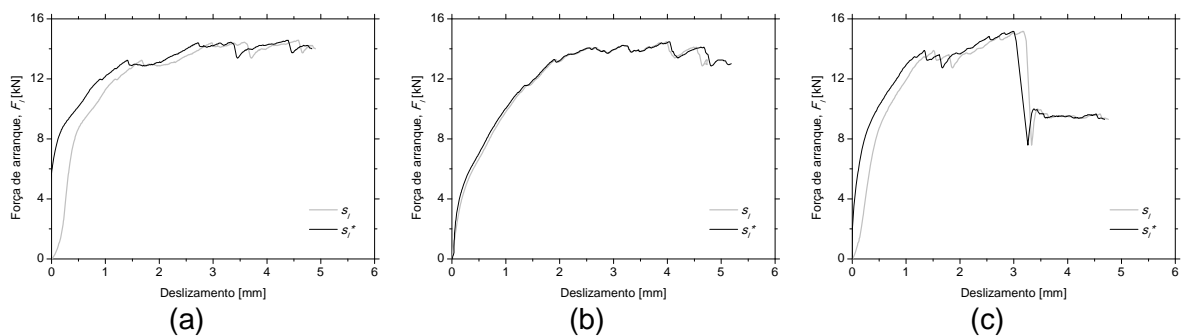







Figura B.1.3 – Relação força de arranque vs deslizamentos na zona carregada:  
(a) M8F1T1\_1 (b) M8F1T1\_2; (b) M8F1T1\_3.



Tabela B.1.1 – Modos de rotura dos provetes da série MF-FRP com uma ancoragem.

Provete	Modo de Rotura
M8F1T0_2      E (não formou cunha)	
M8F1T0_3      E (não formou cunha)	
M8F1T1_1      D+E (6 mm)	
M8F1T1_2      D+E (8 mm)	
M8F1T1_3      D+E (6 mm)	

D – Delaminação do MDL; E – Esmagamento do laminado ao nível das ancoragens.  
Nota: Os valores entre parêntesis correspondem à largura da cunha quando esta é identificável.

## ANEXO B.2 – Séries MF-EBR com duas ancoragens

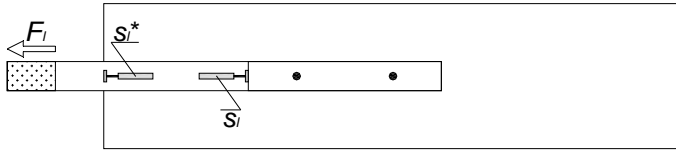


Figura B.2.1 – Localização da instrumentação utilizada para medição dos deslizamentos na zona carregada ( $s_i$ ) e na zona carregada corrigida ( $s_i^*$ ).

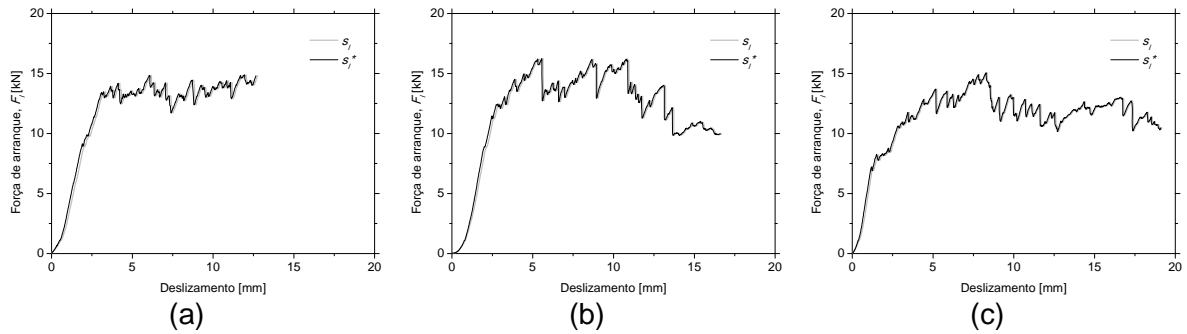


Figura B.2.2 – Relação força de arranque vs deslizamentos na zona carregada: (a) M8F2T0\_1 (b) M8F2T0\_2; (b) M8F2T0\_3.

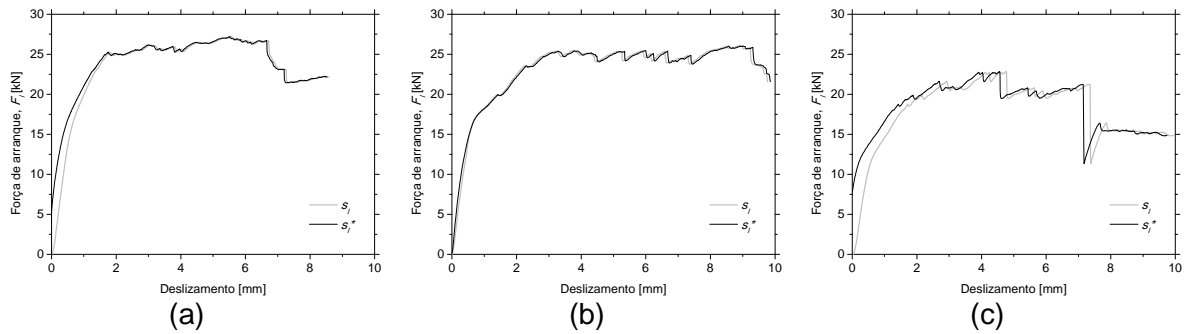


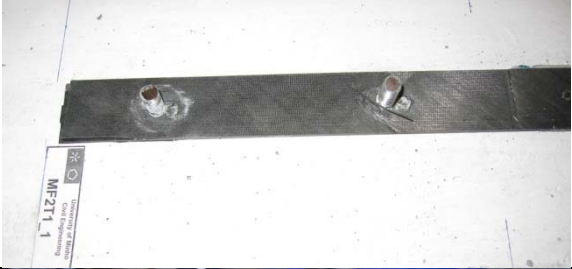




Figura B.2.3 - Relação força de arranque vs deslizamentos na zona carregada: (a) M8F2T1\_1 (b) M8F2T1\_2; (b) M8F2T1\_3.

Tabela B.2.1 – Modos de rotura dos provetes da Série MF-FRP com duas ancoragens.

Provete	Modo de Rotura
M8F2T0_1	D+E (não formou cunha) 



M8F2T0_2	D+E (não formou cunha)	
M8F2T0_3	D+E (não formou cunha)	
M8F2T1_1	D+E (8 mm)	
M8F2T1_2	D+E (7 mm)	
M8F2T1_3	D+E (7 mm)	

D – Delaminação do MDL; E – Esmagamento do laminado ao nível das ancoragens.

Nota: Os valores entre parêntesis correspondem à largura da cunha quando esta é identificável.

### ANEXO B.3 – Séries MF-EBR com três ancoragens

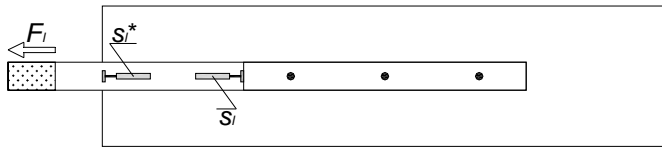


Figura B.3.1 – Localização da instrumentação utilizada para medição dos deslizamentos na zona carregada ( $s_i$ ) e na zona carregada corrigida ( $s_i^*$ ).

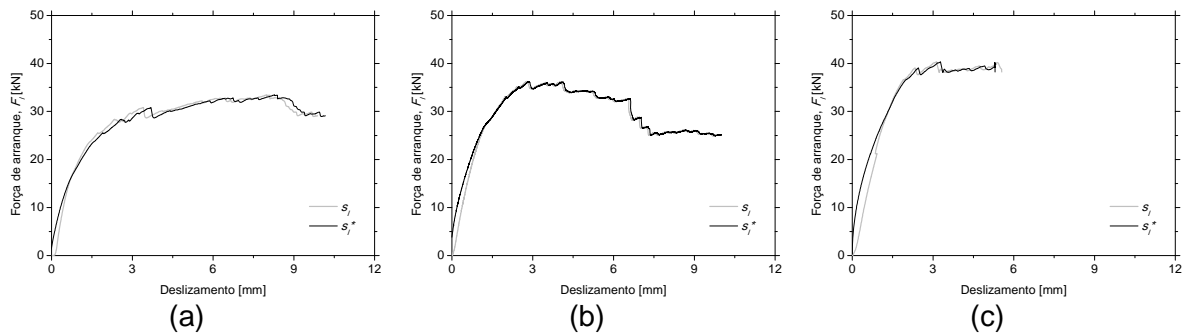


Figura B.3.2 – Relação força de arranque vs deslizamentos na zona carregada: (a) M8F3T1\_1 (b) M8F3T1\_2; (c) M8F3T1\_3.

Tabela B.3.1 – Modos de rotura dos provetes da Série MF-FRP com três ancoragens.

Provete	Modo de Rotura
M8F3T1_1	D+E (5 mm)
M8F3T1_2	D+E (7 mm)
M8F3T1_3	D+E (não formou cunha)

D – Delaminação do MDL; E – Esmagamento do laminado ao nível das ancoragens.

Nota: Os valores entre parêntesis correspondem à largura da cunha quando esta é identificável.



# **ANEXO C**

---

**Resultados Experimentais da série EBR**

## ANEXO C.1 – Séries EBR

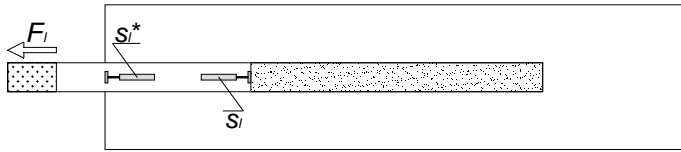


Figura C.1.1 – Localização da instrumentação utilizada para medição dos deslizamentos na zona carregada ( $s_l$ ) e na zona carregada corrigida ( $s_l^*$ ).

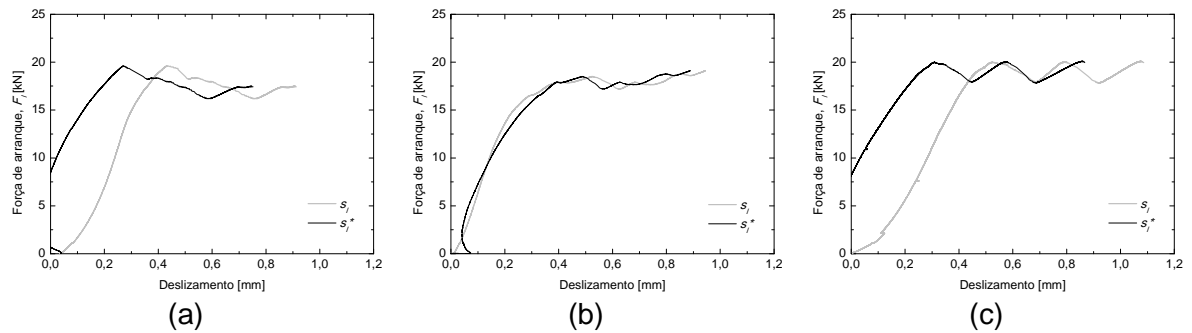


Figura C.1.2 – Relação força de arranque vs deslizamentos na zona carregada: (a) EBR\_1 (b) EBR\_2; (c) EBR\_3.

Tabela C.1.1 – Modos de rotura dos provetes da Série EBR.

Provete	Modo de Rotura
EBR_1	I
EBR_2	I
EBR_3	I

I – Destacamento ao nível da interface adesivo/betão.