

**Caracterização experimental da ligação de laminados
de CFRP inseridos no betão de recobrimento**

José Manuel Sena Cruz
Joaquim António Oliveira de Barros

Relatório 02-DEC/E-15

*Relatório técnico desenvolvido no âmbito do programa
de Doutoramento de José Manuel de Sena Cruz*

Data: Setembro de 2002

Nº de páginas: 54

Palavras-chave: Laminado de CFRP, reforço, aderência, ensaios de arrancamento,
deslizamento, tensão de corte



Escola de
Engenharia



Departamento de
Engenharia Civil



Universidade
do Minho

Índice

1 INTRODUÇÃO.....	3
2 ESTADO DO CONHECIMENTO.....	4
2.1 Reforço de estruturas com sistemas de CFRP	4
2.2 Ensaio de aderência.....	7
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	10
3.1 Configuração de ensaio.....	10
3.2 Instrumentação.....	11
3.3 Campanha de ensaios.....	12
4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	14
4.1 Betão	14
4.1.1 Agregados	14
4.1.2 Fibras de aço	15
4.1.3 Composições utilizadas.....	15
4.1.4 Confeção dos betões.....	15
4.1.5 Ensaio de compressão e tracção em flexão	16
4.2 Laminado de CFRP.....	17
4.2.1 Características geométricas dos laminados.....	18
4.2.2 Características mecânicas dos laminados	19
4.3 Adesivo	22
4.3.1 Ensaio de flexão	23
5 CAMPANHA DE ENSAIOS	25
5.1 Considerações gerais	25
5.2 Aplicação do laminado	26
5.2.1 Realização das ranhuras	26
5.2.2 Preparação do laminado	26
5.2.3 Preparação do adesivo.....	27
5.2.4 Aplicação do laminado.....	27
5.3 Resultados.....	29
5.3.1 Força no laminado.....	31
5.3.2 Deslizamentos LVDT1 e LVDT2	32
5.3.3 Deslizamento <i>versus</i> força no laminado	33
5.3.4 Deslizamento <i>versus</i> tensão média de corte.....	33
5.4 Discussão dos resultados	36
6 CONCLUSÕES.....	41
7 AGRADECIMENTOS	42
8 REFERÊNCIAS	43
ANEXO I.....	46
ANEXO II	49
ANEXO III.....	52

1 Introdução

O reforço e reparação de estruturas de betão com recurso a técnicas que utilizam materiais de matriz polimérica reforçados com fibras de carbono – CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) têm emergido como alternativa às tradicionais técnicas, como sejam, a utilização de chapas de aço, o aumento da secção ou a aplicação de pré-esforço exterior. Quando comparados com os materiais utilizados nas técnicas de reforço tradicionais, os CFRP's apresentam vantagens significativas, destacando-se a maior resistência mecânica, durabilidade, resistência à corrosão e facilidade de aplicação (ACI COMMITTEE 440, 2000).

De entre as técnicas de reforço que recorrem a materiais de matriz polimérica, destaca-se a baseada na fixação externa dos sistemas de CFRP às faces do elemento a reforçar. Nos últimos anos tem sido estudada uma técnica de reforço baseada na fixação de laminados de CFRP em ranhuras efectuadas no betão de recobrimento dos elementos a reforçar, tendo-se revelado promissora. Estes laminados têm secção transversal de aproximadamente $10.0 \times 1.5 \text{mm}^2$ e são fixos ao betão por intermédio de um adesivo epoxídico.

Comparativamente com as técnicas de reforço que recorrem à fixação externa do laminado de CFRP, esta técnica apresenta como principais vantagens a maior mobilização da resistência à tracção destes materiais compósitos, maior protecção ao fogo, ao meio ambiente, a acções mecânicas e a actos de vandalismo, maior facilidade e rapidez de execução (Blaschko et al., 1999; Ferreira, 2001; Fortes et al., 2002).

A justificação do bom desempenho desta técnica passa pela detecção e interpretação dos mecanismos de transferência de forças do laminado para o betão envolvente. Com vista à caracterização da ligação laminado-adesivo-betão procedeu-se à realização de uma campanha de ensaios de aderência no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

O presente relatório técnico não só procura dar a conhecer a investigação experimental efectuada, mas também, apresenta uma revisão do estado do conhecimento em relação a esta técnica de reforço.

2 Estado do conhecimento

Tal como na anterior secção foi referido, a técnica de reforço em estudo consiste na introdução de laminados de CFRP com secção transversal aproximada de $1.5 \times 10 \text{ mm}^2$ numa ranhura de 5mm de largura e 15mm de profundidade, realizada no betão de recobrimento, sendo a ligação do laminado ao betão efectuada por intermédio de um adesivo epoxy, como se ilustra na Figura 1.

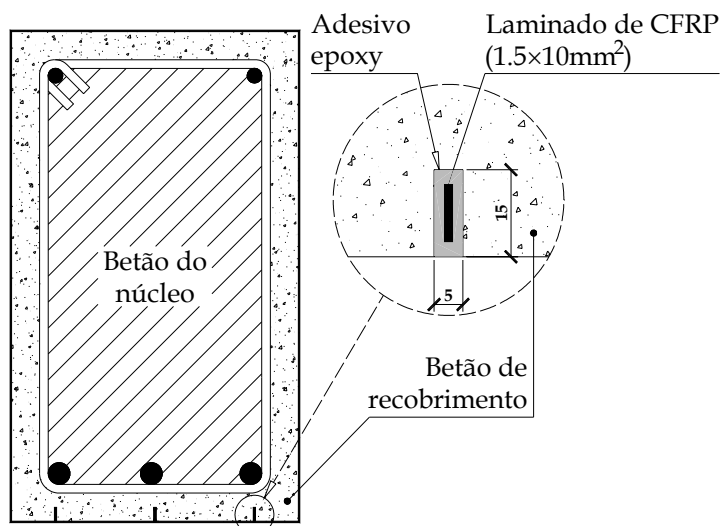


Figura 1 – Técnica de reforço sobre o qual incide o presente estudo.

Neste Capítulo, numa primeira parte apresenta-se um resumo das publicações que abordam o tema do reforço de estruturas com sistemas de CFRP inseridos no betão de recobrimento, tendo como base a pesquisa bibliográfica realizada. Numa segunda parte procura dar-se a conhecer o estado do conhecimento na área da caracterização do comportamento da ligação laminado-adesivo-betão.

2.1 Reforço de estruturas com sistemas de CFRP

Apesar da aplicação de laminados de CFRP em ranhuras do betão de recobrimento ser uma técnica muito recente – a primeira publicação encontrada data de 1999 (Blaschko et al., 1999) – já nos anos 50 surgia uma publicação em que fazia referência à aplicação de varões de aço no betão de recobrimento (Asplund, 1949).

Nos últimos anos tem sido testada a aplicação de varões de CFRP no betão de recobrimento de diferentes estruturas. Alguns desses exemplos podem ser observados na Figura 2.

Durante os anos de 1997 e 1998 uma laje estrutural do “Myriad Convention Center” em Oklahoma nos Estados Unidos da América (EUA) (Hogue et al., 1999) foi reforçada por intermédio da aplicação de um sistema combinado de reforço exterior com recurso a chapas metálicas e mantas de CFRP, e varões de CFRP inseridos no betão para o reforço ao corte (posicionados verticalmente) como se ilustra na Figura 2-a.



Figura 2 – Exemplos de reforço de estruturas com recurso a varões de CFRP inseridos no betão de recobrimento.

Em 1998 foi reforçada a Estação Naval de San Diego, Califórnia (EUA) (Warren, 1998). Varões de CFRP foram usados para aumentar a capacidade de carga da laje de cobertura na região de momentos negativos (Figura 2-b).

Em Agosto de 1998 a ponte J-857, localizada na estrada 72 em Phelps County, Missouri (EUA) foi reforçada (Alkhrdaji et al., 1999). Para aumentar a resistência à flexão de dois pilares, varões de CFRP foram usados (ver Figura 2-c) nas duas faces opostas, sendo ancorados à fundação.

Em 1999 foi levado a cabo um programa de reforço e ensaio do antigo Hospital Malcolm Bliss em St. Louis, Missouri (EUA) (Tumialan et al., 1999). No edifício de cinco pisos foram realizados ensaios estáticos em paredes de alvenaria reforçadas com varões de FRP como se ilustra na Figura 2-d.

Um estudo comparativo entre a técnica que utiliza laminado de CFRP fixado exteriormente (técnica tradicional) e a técnica que utiliza o laminado inserido em ranhuras, quer em elementos laminares quer em vigas, foi realizado por Blaschko et al. (1999). Para tal utilizou mesma quantidade de material (dois laminados de CFRP de 25mm de largura e 1.2mm de espessura) em ambas as técnicas. As ranhuras tinham 26mm de profundidade e 3mm de largura. Foi utilizado um betão da classe C20/25 e o laminado de CFRP apresentava uma resistência última de 2600MPa. A partir dos ensaios efectuados verificou-se que a capacidade de carga dos modelos aumentou sensivelmente para o dobro quando estes eram reforçados com os laminados inseridos no betão, como se ilustra na Figura 3. Não se verificou alterações significativas na rigidez dos modelos.

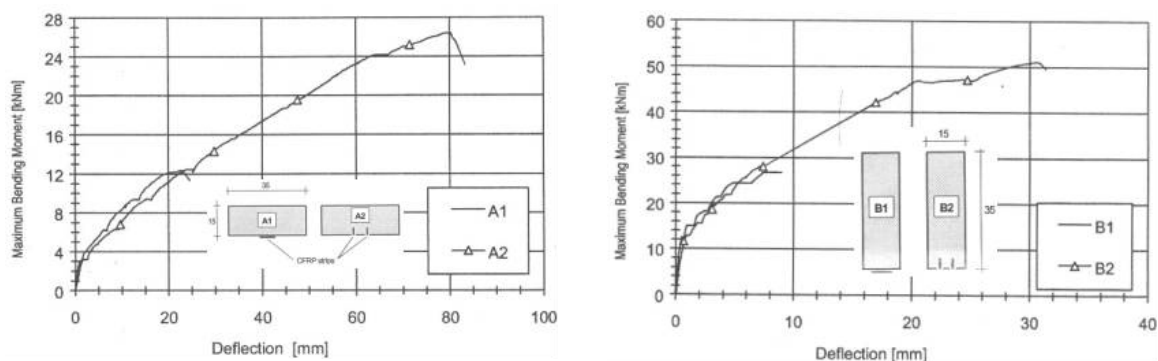


Figura 3 – Análise comparativa entre o método tradicional e o método em que o laminado é inserido nas ranhuras (Blaschko et al., 1999).

Ferreira (2001) apresentou um estudo relativo ao desenvolvimento, aplicação e caracterização da técnica baseada na fixação de laminados de CFRP em ranhuras efectuadas no betão de recobrimento. Para tal efectuou ensaios cíclicos em pilares pré- e pós-reforçados segundo esta técnica. Os laminados de CFRP de secção transversal $9.55 \times 1.46 \text{ mm}^2$ eram embutidos em ranhuras de $15 \times 5 \text{ mm}^2$ como se ilustra na Figura 4. A fixação dos laminados ao pilar era realizada com uma resina epoxy. Os laminados eram fixos à sapata por intermédio da execução de orifícios na sapata e seu preenchimento com argamassa epoxy.

Os pilares sob esforço axial constante de compressão foram sujeitos a deslocamentos transversais cíclicos. Na Figura 5 é possível observar a instrumentação utilizada e na Figura 6 apresenta-se um aspecto geral da configuração de ensaio utilizada.

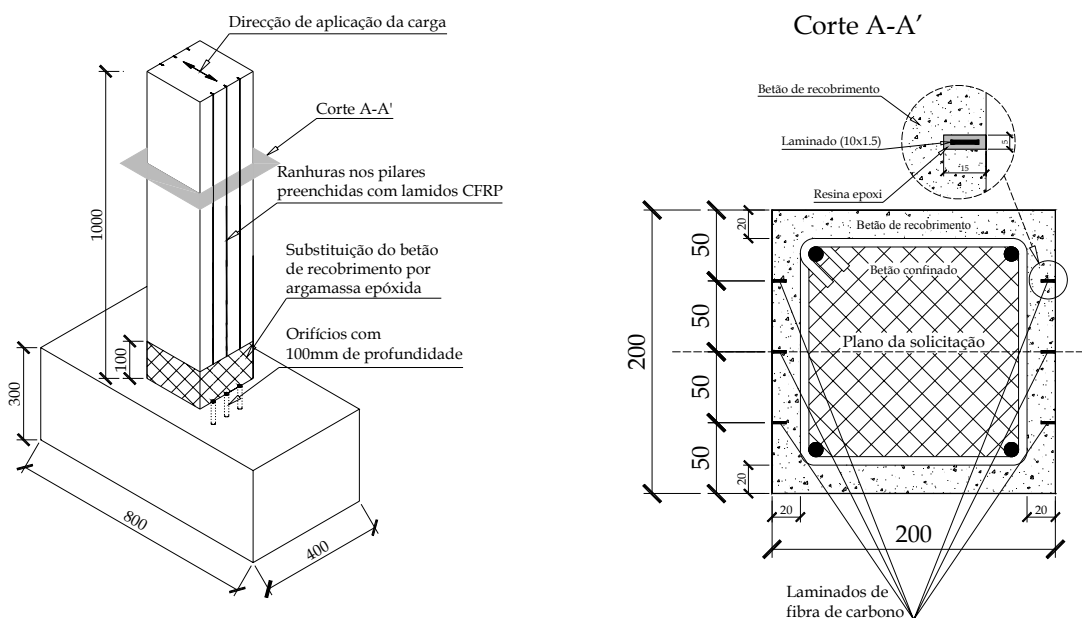


Figura 4 – Reforço de pilares com laminados de CFRP inseridos em ranhuras (Ferreira, 2001).

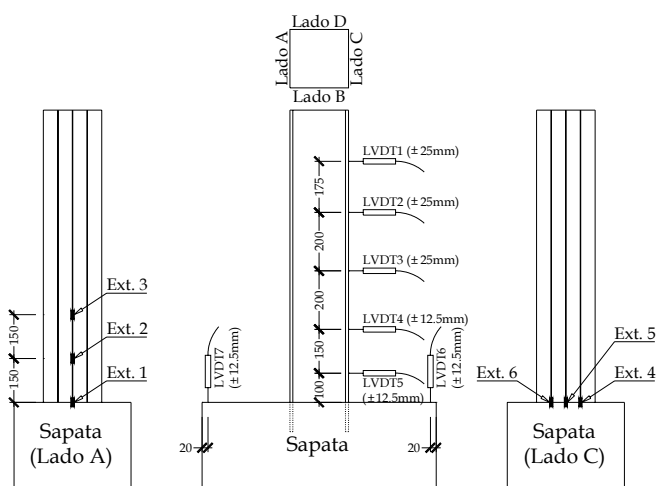


Figura 5 – Instrumentação utilizada (Ferreira, 2001).



Figura 6 – Configuração do ensaio (Ferreira, 2001).

A partir da campanha de ensaios efectuada foi possível concluir que a técnica de reforço associa os benefícios da rapidez de execução do reforço à economia de material. Na rotura dos pilares reforçados, os níveis de tensão observados foram próximos da resistência dos CFRP utilizados, pelo que a presente técnica permitiu mobilizar o potencial de reforço destes materiais. Também se verificou um aumento significativo da capacidade de carga dos pilares reforçados revelando, por isso, que esta técnica é apropriada ao reforço de pilares sujeitos a cargas cíclicas em flexão.

Recentemente, Fortes et al. (2002) apresentaram um trabalho experimental em que procuraram avaliar a eficiência da técnica baseada na inserção dos laminados de CFRP em vigas de modo a aumentar a capacidade de carga em flexão. As características de geometria, armadura convencional e reforços aplicados encontram-se sintetizados na Figura 7.

Para instrumentar as vigas foram utilizados extensómetros (colados ao longo do laminado), LVDT's e célula de carga, dispostos de acordo com o indicado na Figura 8.

Através dos ensaios efectuados foi possível concluir que houve maior resistência à ocorrência do fenómeno de *peeling*. Verificou-se que o tempo despendido na preparação da superfície diminuiu. A carga de rotura das vigas foi de aproximadamente o dobro das correspondentes vigas sem reforço. A rotura foi alcançada para níveis de deformação elevados, pelo que a ductilidade foi assegurada. Constatou-se que as vigas reforçadas romperam pelo betão do banzo traccionado, tendo-se registado nos laminados extensões próximas da correspondente à rotura do laminado.

2.2 Ensaios de aderência

Com a realização de ensaios de aderência pretende-se, fundamentalmente, determinar a lei constitutiva da interface definida, geralmente, em termos de tensão de corte *versus* deslizamento. A tensão de corte é definida como a força instalada no laminado por unidade de área de contacto com o adesivo, enquanto que o deslizamento é definido como o deslocamento relativo do laminado em relação ao betão.

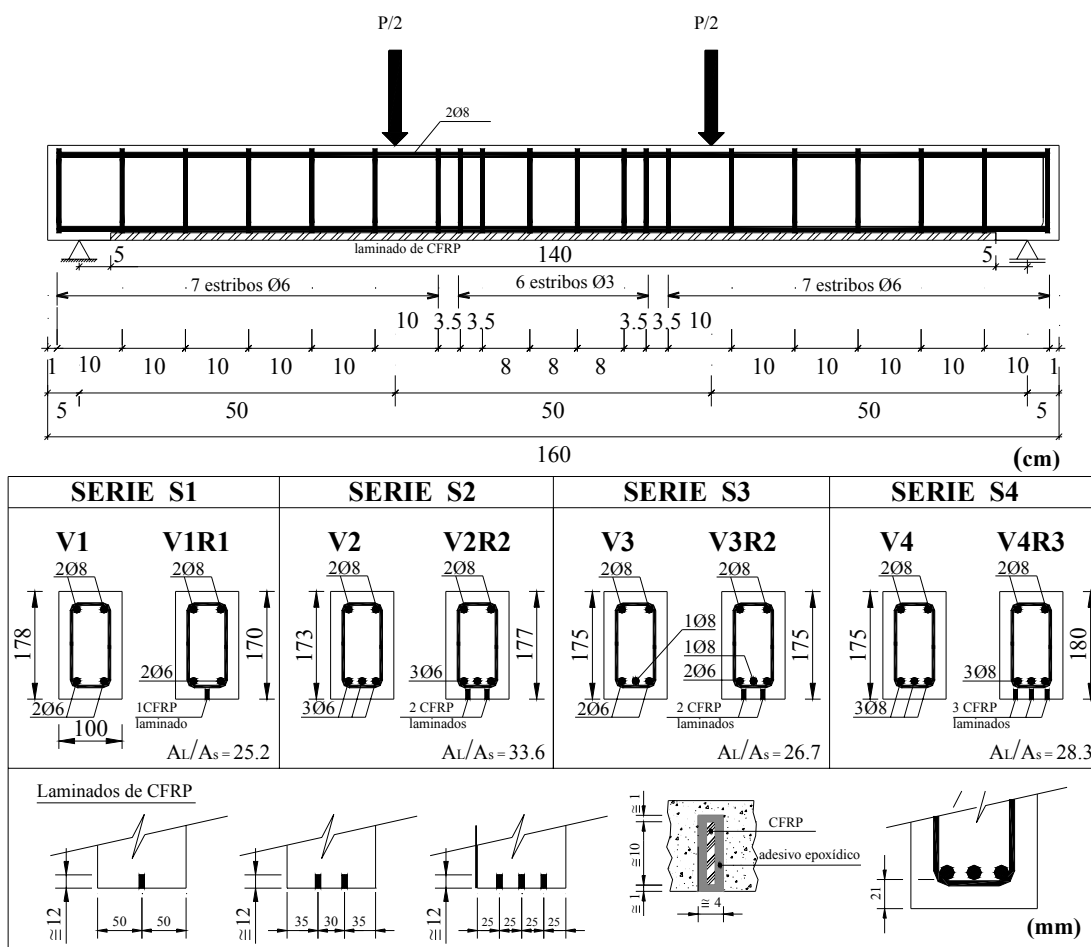


Figura 7 – Geometria, armaduras e reforço das vigas (Fortes et al., 2002).

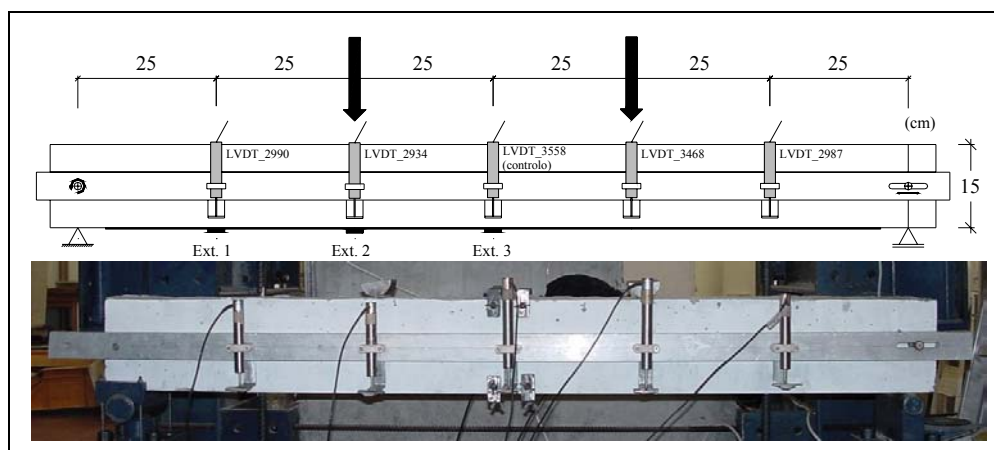


Figura 8 – Instrumentação utilizada nos ensaios (Fortes et al., 2002).

Da pesquisa bibliográfica efectuada na área da caracterização da ligação de sistemas de CFRP-adesivo-betão apenas foi possível recolher informação de De Lorenzis et al. (2000-c, 2001 e 2002) envolvendo ensaios de aderência em varões de CFRP inseridos no betão de recobrimento. Os autores destes trabalhos efectuaram ensaios de arrancamento em flexão, tendo utilizado para tal uma configuração de ensaio que se ilustra na Figura 9. Esta configuração permite estudar a influência do comprimento de ancoragem do FRP, dado que num dos dois blocos que constituem o provete, o FRP pode ser fixo ao betão utilizando diferentes comprimentos. Foram testados diferentes tipos de varões (CFRP e GFRP),

diferentes configurações da superfície dos varões, diferentes diâmetros dos varões, diferentes comprimentos de amarração e diferentes dimensões da ranhura. Foi utilizada sempre a mesma classe de betão e sempre o mesmo adesivo (do tipo epoxy).

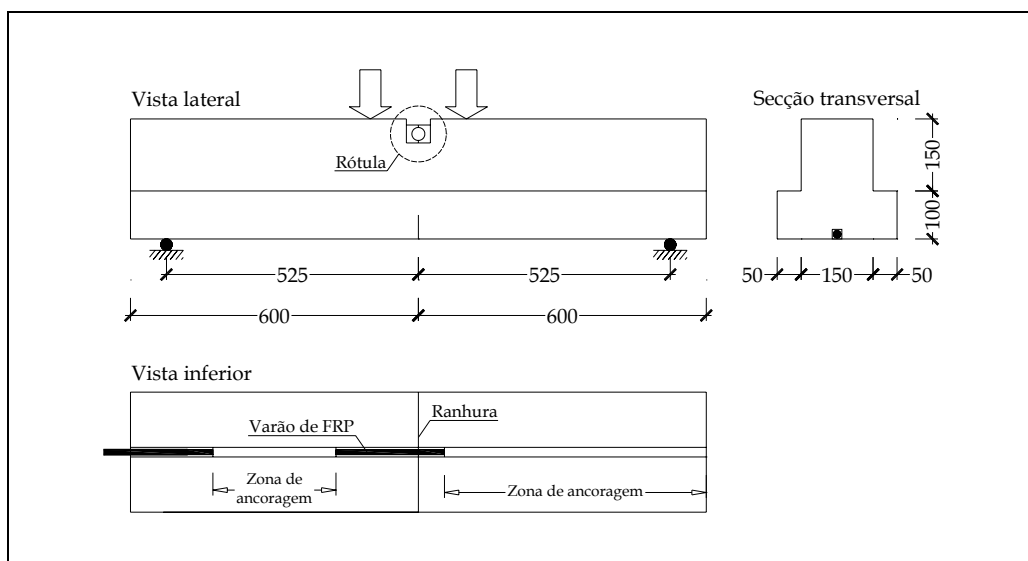


Figura 9 – Configuração de ensaio utilizada por De Lorenzis et al. (2000-c, 2001 e 2002).

A instrumentação dos varões foi efectuada com recurso a LVDT's e extensómetros, sendo grande parte posicionados na zona de ancoragem. Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento. Através desta campanha experimental foi possível concluir que:

- três modos diferentes de rotura foram observados, nomeadamente o destacamento do adesivo (*splitting*), a rotura do betão envolvente (*concrete cracking*) e o arrancamento do varão (*pullout*) – ver Figura 10. Em alguns casos também foi observada a combinação destes diferentes modos de rotura;
- a distribuição de tensões ao longo do comprimento de ancoragem é não uniforme (ver Figura 11);
- o tipo de superfície do varão influencia a resistência última. Superfícies rugosas são mais eficientes que superfícies lisas;
- quando a rotura é controlada pelo destacamento do adesivo a tensão de corte aumenta com o aumento das dimensões da ranhura;
- quando a rotura ocorre por destacamento do adesivo ou por arrancamento do varão, a capacidade de carga parece ser independente das características mecânicas do betão.

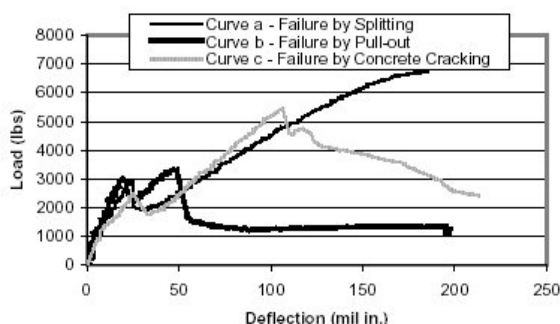


Figura 10 – Relação deslocamento a meio vão versus carga, De Lorenzis et al. (2000-c, 2001 e 2002).

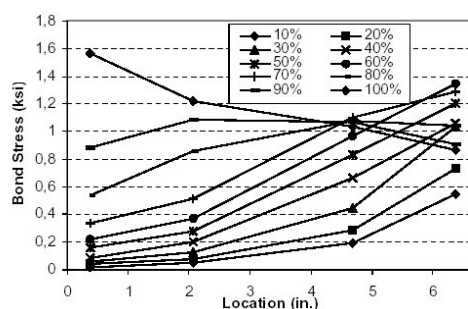


Figura 11 – Evolução das tensões na zona de ancoragem ao longo do ensaio, De Lorenzis et al. (2000-c, 2001 e 2002).

3 Programa experimental

3.1 Configuração de ensaio

A configuração de ensaio adoptada teve como base a proposta pela RILEM para a caracterização da ligação de armaduras convencionais ao betão (RILEM, 1982).

Na Figura 12 apresenta-se a configuração de ensaio adoptada para a campanha de ensaios experimentais efectuada. É possível observar que os blocos A e B encontram-se ligados entre si, a meio vão da viga, por intermédio de uma rótula metálica na parte superior, e pelo laminado, na parte inferior. As dimensões da rótula metálica encontram-se indicadas na Figura 13.

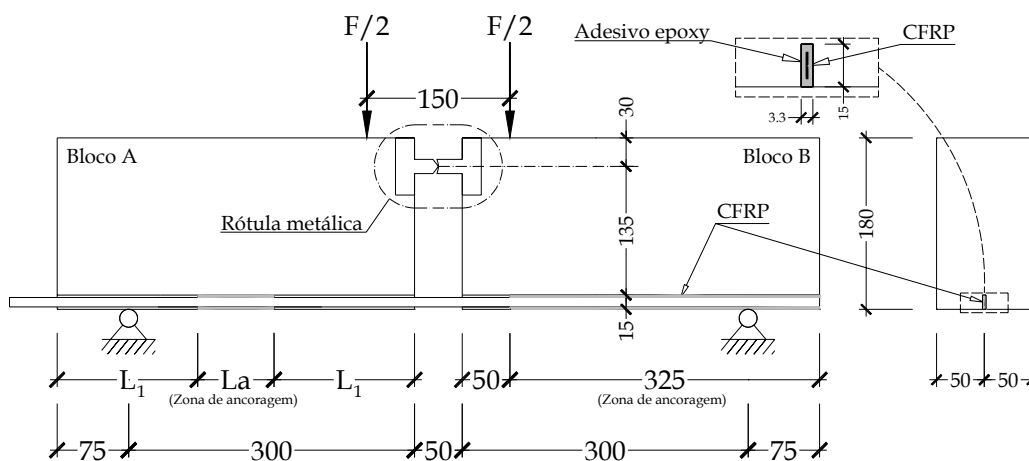


Figura 12 – Configuração do ensaio.

Adoptaram-se diferentes comprimentos de ancoragem nos dois blocos por forma a concentrar o deslizamento entre o laminado e o betão no bloco A. Assim, neste bloco fez-se variar o comprimento de ancoragem L_a , enquanto que no bloco B o comprimento de ancoragem manteve-se fixo, igual a 325mm.

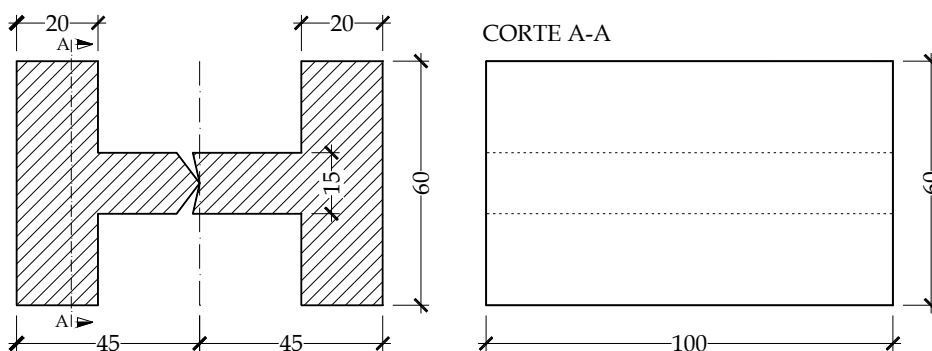


Figura 13 – Rótula metálica.

3.2 Instrumentação

Para medir o deslocamento do laminado em relação ao betão (deslizamento) utilizaram-se dois transdutores de deslocamento, LVDT1 e LVDT2, dispostos segundo o indicado na Figura 14. Assim, com os valores registados no transdutor LVDT1 é possível definir o deslizamento no final da zona de ancoragem (zona livre). Com as leituras efectuadas no transdutor LVDT2 é possível definir o deslizamento no início da zona ancoragem (zona carregada).

Ao longo deste trabalho designar-se-à por deslizamentos LVDT1 e LVDT2 os deslocamentos relativos do laminado em relação ao betão no final e início da zona de ancoragem, medidos por intermédio dos LVDT1 e LVDT2, respectivamente.

A força aplicada foi determinada com recurso a duas células de carga posicionadas no sistema de apoio. Para medir a deformação observada no laminado, a meio vão da viga, foi utilizado um extensómetro BFLA-5-8 da série BL da TML (<http://www.tokyosokki.co.jp/e/index.html>, 2002-07-09). Na Tabela 1 referem-se as principais características técnicas dos instrumentos de medida.

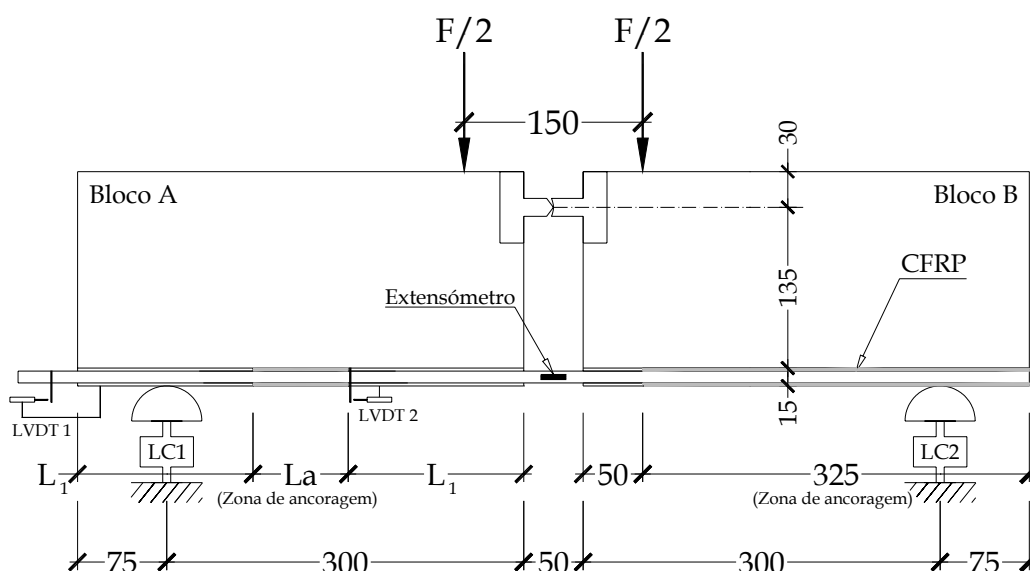


Figura 14 – Instrumentação utilizada.

Os ensaios foram efectuados sob controlo de deslocamentos à velocidade de $5\mu\text{m/s}$, tendo-se utilizado para tal o transdutor LVDT2.

Tabela 1 – Características técnicas dos instrumentos de medida.

Instrumento	Campo de medida	Linearidade (% do campo de medida)
LVDT1	$\pm 2.5\text{mm}$	0.10
LVDT2	$\pm 2.5\text{mm}$	0.05
LC1	50kN (Tração/compressão)	0.50
LC2	50kN (Tração/compressão)	0.50

A partir da Figura 15 é possível observar o aspecto geral da configuração de ensaio adoptada.

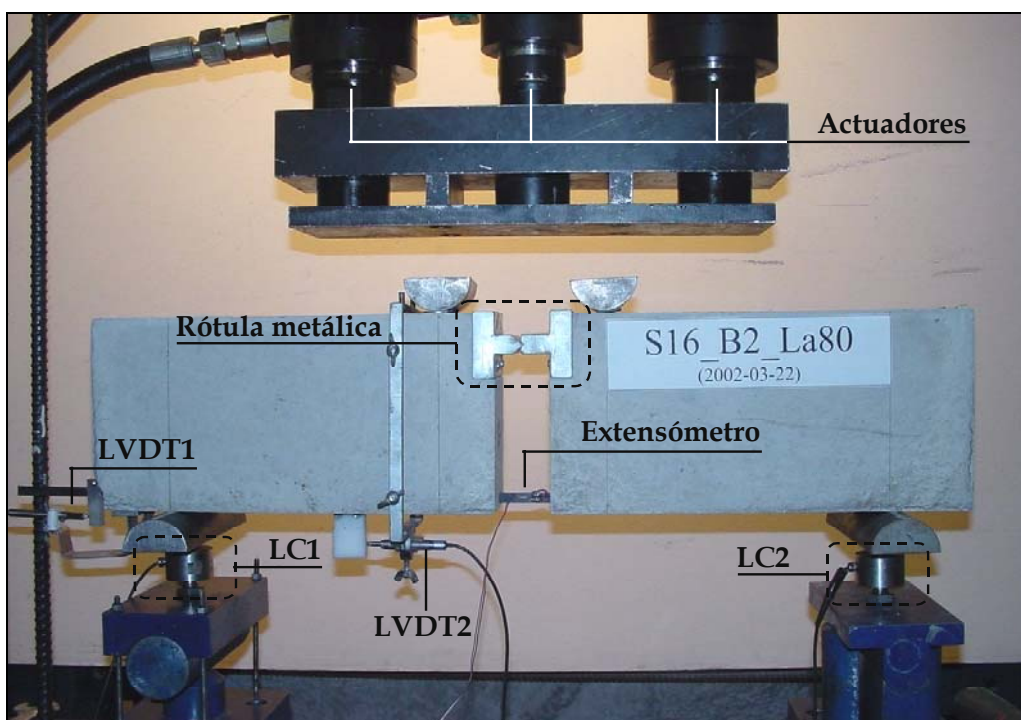


Figura 15 – Configuração adoptada para os ensaios.

3.3 Campanha de ensaios

Ensaio efectuados em laminados de CFRP colados exteriormente ao betão têm demonstrado que o comportamento da ligação betão *versus* laminado depende de vários parâmetros, destacando-se as propriedades do CFRP, do adesivo e do betão, o tipo de carregamento e o espaçamento entre fendas (FIB, 2001). A estes parâmetros acrescem os associados à especificidade da técnica de reforço em estudo, nomeadamente, a largura e a profundidade das ranhuras.

No presente trabalho pretendem-se estudar a influência do comprimento de ancoragem e a resistência do betão no comportamento da ligação betão-laminado. Para tal utilizaram-se diferentes classes de betões e diferentes comprimentos de ancoragem. Nos parágrafos que se seguem apontam-se os critérios adoptados para a fixação destes parâmetros.

Admitindo como ponto de partida que esta técnica de reforço seja aplicada em estruturas de betão que apresentem resistências entre os 30 e os 50MPa (resistências correntes em estruturas com alguns anos e sem danos severos), consideraram-se, para este estudo, duas classes de resistência próximas dos extremos deste intervalo, designadamente, as classes de resistência de 35 e 45MPa. Uma terceira classe foi considerada (70MPa) por forma a avaliar a influência da resistência do betão.

O comportamento da ligação de laminado de CFRP ao betão por intermédio de adesivo epoxy tem sido amplamente investigado, sendo possível encontrar num trabalho de

Juvandes (1999) um resumo dos principais trabalhos realizados nesta área. De acordo com vários trabalhos publicados (Concrete Society, 2000; Rostasy, 1998; German Institute of Construction Technology, 1997) o comprimento de ancoragem que conduz à força máxima promovida pelo reforço é dado por:

$$l_{f,max} = 0.7 \times \sqrt{\frac{E_f \times t_f}{f_t}}, \quad (1)$$

em que E_f e t_f são o módulo de elasticidade (expresso em MPa) e a espessura (expressa em mm) do laminado, respectivamente. A resistência de tracção por arrancamento do betão de recobrimento (expressa em MPa), f_t , pode ser determinada por intermédio de ensaios de arrancamento (Juvandes, 1999).

Considerando que $E_f = 160\,000\text{MPa}$, $t_f = 1.4\text{mm}$ e $f_t = 3\text{MPa}$, e admitindo que para a técnica de reforço em estudo se necessita de metade do comprimento de ancoragem indicado em (1), tem-se que:

$$l'_{f,max} = 0.7 \times \sqrt{\frac{160\,000 \times 1.4}{3.0}} \times 0.5 = 95\text{mm}. \quad (2)$$

Estando o estudo centrado na caracterização do comportamento da ligação betão-adesivo-laminado, utilizaram-se comprimentos de ancoragem inferiores ao que conduz à “rotura” do laminado. Assim, consideram-se três comprimentos de ancoragem distintos: 80mm como sendo o limite superior; por razões de aplicabilidade, fixou-se o valor de 40mm como limite inferior; o terceiro comprimento é o intermédio aos dois anteriores (60mm).

Na Tabela 2 apresentam-se sintetizadas todas as séries ensaiadas, assim como, as diferentes designações adoptadas.

Tabela 2 – Séries ensaiadas.

Comprimento de ancoragem (mm)	Classe de resistência (MPa)		
	35	45	70
40	fcm35_La40	fcm45_La40	fcm70_La40
60	fcm35_La60	fcm45_La60	fcm70_La60
80	fcm35_La80	fcm45_La80	fcm70_La80

4 Caracterização dos materiais

4.1 Betão

4.1.1 Agregados

Na confecção dos betões utilizaram-se três agregados distintos, designados ao longo deste texto por areia fina, areia grossa e brita. Na Tabela 3 e Figura 16 apresentam-se os resultados, expressos em percentagem de material retido e acumulado, resultantes da análise granulométrica dos agregados, executada em conformidade com o exigido na NP 1379 (1976).

Tabela 3 – Análise granulométrica dos agregados.

Peneiros		Percentagem de material retido e acumulado		
Série ASTM	mm	Areia Fina	Areia média	Brita
1/2"	12.7	0.00	0.00	6.82
3/8"	9.52	0.00	0.00	49.35
4	4.76	0.25	9.82	98.88
8	2.38	4.93	68.32	99.18
16	1.19	27.39	87.80	99.20
30	0.595	70.53	93.95	99.22
50	0.297	94.21	96.51	99.29
100	0.149	98.45	97.84	99.43
200	0.075	99.13	98.65	99.62

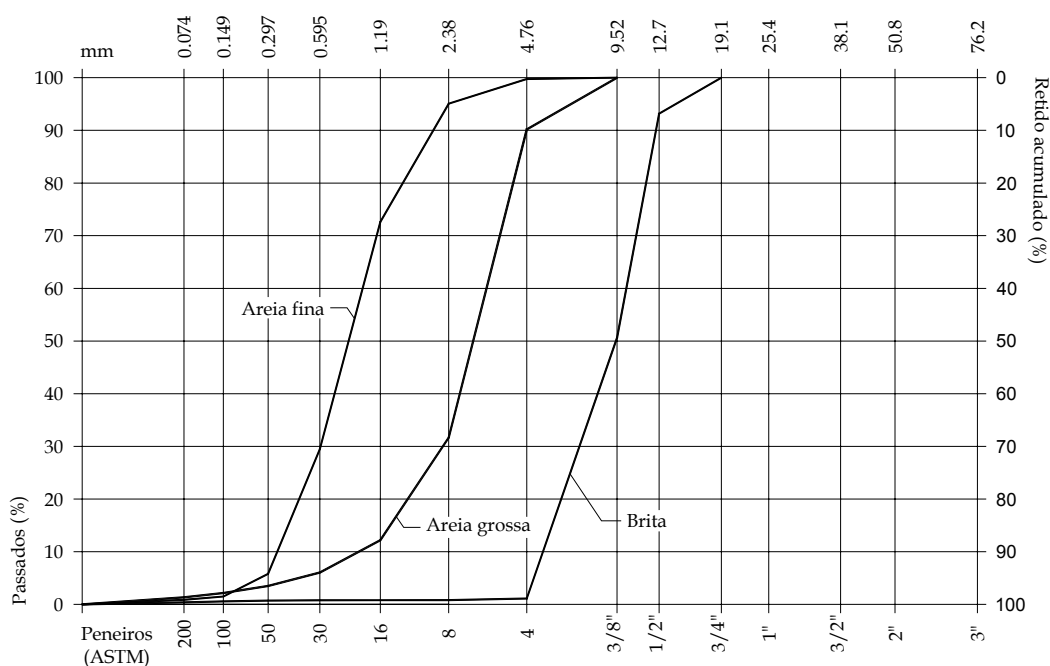


Figura 16 – Curva granulométrica dos agregados.

4.1.2 Fibras de aço

Nos ensaios preliminares realizados observou-se a rotura precoce por corte do provete (ver Figura 17) devida à ausência de armadura de esforço transverso. As reduzidas dimensões da secção transversal do provete inviabilizaram a opção pela utilização de armadura convencional de esforço transverso no Laboratório de Engenharia Civil. Assim, foi necessário procurar alternativas por forma a evitar a rotura por corte.

O aumento da capacidade resistente do betão com recurso a fibras de aço tem sido amplamente estudado por diversos investigadores (Casanova, 1996; Barros, 1995; Swamy et al., 1993; Tan et al., 1992; Al-Ta'an et al., 1990).

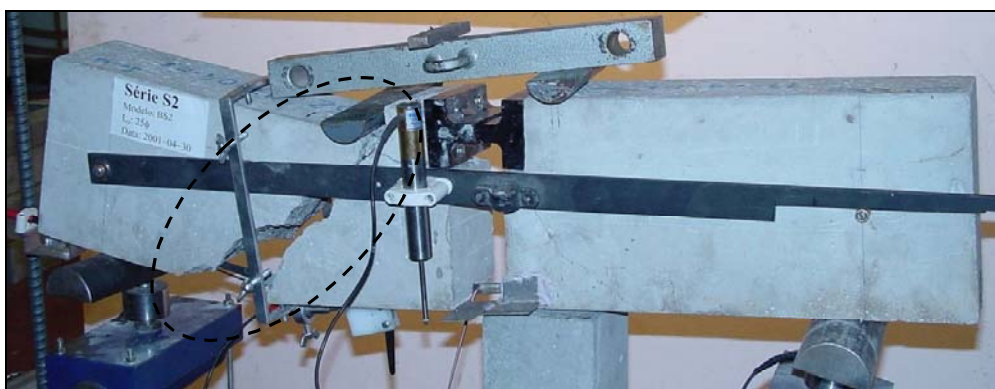


Figura 17 – Rotura precoce por corte do provete.

Assim, para evitar a rotura por corte dos provetes utilizou-se 60kg de fibras de aço do tipo Dramix® ZP305 (1998) por metro cúbico de betão em todas as amassaduras efectuadas, tendo por base os trabalhos experimentais realizados por Cruz (1998) e Barros (1995).

4.1.3 Composições utilizadas

No intuito de obter betões de resistência média à compressão de 35, 45 e 70MPa à data do ensaio realizaram-se três composições de betão distintas, designadas por composição tipo I, II e III, respectivamente, encontrando-se indicadas na Tabela 4 as correspondentes quantidades de cimento, agregados, água e aditivos.

Tabela 4 – Composição dos betões utilizados (por m³ de betão).

Composição Tipo	Cimento ⁽¹⁾ (kg)	Areia fina (kg)	Areia grossa (kg)	Brita (kg)	Água (l)	Aditivo ⁽²⁾ (l)
I	350.0	744.7	–	942.7	210.0	–
II	400.0	627.2	–	1048.8	200.0	–
III	500.0	427.1	418.5	847.5	150.0	7.8

⁽¹⁾ Cimento SECIL, classe 42.5 tipo I; ⁽²⁾ Rheobuild 1000 (<http://www.bettor-mbt.es/>, 2002-08-09).

4.1.4 Confeção dos betões

Os betões foram confeccionados numa betoneira de eixo vertical e de acordo com o seguinte procedimento:

- a. com a betoneira em movimento introduzia-se cada um dos agregados de forma gradual, dos mais grossos até aos mais finos com intervalos de um minuto entre eles;
- b. o cimento era adicionado após ter passado um minuto da introdução do último agregado;
- c. um minuto após a introdução do cimento, a água era adicionada. A amassadura prosseguia durante mais dois minutos;
- d. a amassadura era interrompida, durante o tempo indispensável, de forma a proceder-se à realização do *VB Test* e do *Slump Test*;
- e. em seguida prosseguia-se a amassadura com a introdução gradual das fibras de aço por forma a evitar a concentração e criação de “novelos” de fibras e em seguida. Após a utilização das fibras a mistura era amassada durante mais dois minutos;
- f. realização do *VB Test* e do *Slump Test*.

A introdução do aditivo, nas séries *fcm70*, efectuou-se um minuto após a adição da água. Tendo a amassadura prosseguido durante mais dois minutos. Nestas séries o passo *d* não foi realizado.

Para avaliar a trabalhabilidade dos betões confeccionados efectuaram-se os ensaios *Slump Test* e *VB Test*. Estes ensaios realizaram-se para o betão sem e com a adição de fibras, figurando na Tabela 5 os resultados obtidos.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios de avaliação da trabalhabilidade dos betões confeccionados.

Série	Slump Test (cm)		VB test (s)	
	Antes da adição das fibras	Após da adição das fibras	Antes da adição das fibras	Após da adição das fibras
fcm35_La40	8.0	2.5	3.0	4.0
fcm35_La60	7.0	1.5	2.0	5.0
fcm35_La80	6.5	2.0	2.0	4.5
fcm45_La40	9.5	1.5	2.0	5.0
fcm45_La60	12.0	2.0	2.0	6.0
fcm45_La80	2.0	1.0	4.0	7.0
fcm70_La40	-	15.0	-	5.0
fcm70_La60	-	>20.0	-	1.0
fcm70_La80	-	13.0	-	5.0

Nas séries em que não se utilizou aditivo verificou-se que os valores do *slump* eram muito baixos, devido à ausência de uma areia intermédia que assegurasse uma granulometria mais contínua. A partir dos resultados do *VB test* é possível concluir que o betão com fibras sob vibração possui boa trabalhabilidade, característica já observada em trabalhos anteriores (Cruz, 1998).

O preenchimento dos moldes realizou-se em duas camadas de proporções idênticas, sendo cada uma delas vibrada durante 10 segundos numa mesa vibradora.

4.1.5 Ensaios de compressão e tracção em flexão

A caracterização mecânica do betão foi efectuada por intermédio de ensaios de compressão e ensaios de tracção em flexão com três pontos de carga. Nos parágrafos que se seguem os ensaios realizados são descritos e os resultados obtidos são apresentados.

Ensaio de compressão

Os ensaios de compressão foram efectuados em cilindros de 150mm de diâmetro e 300mm de altura à velocidade de 10kN/s. As principais características dos provetes e correspondentes resultados encontram-se na Tabela I. 1 (Anexo I) e resumidos na Tabela 6.

Com base nos resultados obtidos verifica-se que os valores médios registados alcançaram os valores pretendidos, a menos de um erro de valor aceitável, tendo-se em conta o facto de durante a campanha de amassaduras a proveniência dos agregados não ter sido a mesma.

Ensaio de tracção em flexão

Para efectuar os ensaios de flexão em três pontos carga utilizaram-se provetes prismáticos de 100×100×850mm². Os ensaios realizaram-se sob controlo de deslocamentos à velocidade de 5µm/s até a uma flecha de 5.0mm. Mais detalhes sobre este tipo de ensaio poderão ser encontrados em (Barros et al., 2001; Barros, 1995). Na Tabela I. 2 (Anexo I) referem-se as principais características dos provetes e os resultados dos ensaios, resumidos na Tabela 6.

A partir dos resultados obtidos verifica-se que nem sempre existe uma correspondência entre os valores em compressão e os de tracção em flexão. Tal deve-se ao facto da resistência à compressão ser marginalmente afectada pela presença das fibras, enquanto a resistência à tracção em flexão depende significativamente do número e da disposição das fibras que atravessam a superfície de fractura do provete de flexão (Barros et al. 2002).

Tabela 6 – Características mecânicas do betão.

Série	f_{cm} (MPa)	$f_{ctmax,fl}$ (MPa)
fcm35_La40	34.5 (c.v. 6.94%)	5.2 (c.v. 15.1%)
fcm35_La60	33.0 (c.v. 4.24%)	5.5 (c.v. 2.2%)
fcm35_La80	37.2 (c.v. 1.50%)	7.1 (c.v. 17.6%)
fcm45_La40	46.2 (c.v. 0.53%)	5.1 (c.v. 11.4%)
fcm45_La60	41.4 (c.v. 2.32%)	7.4 (c.v. 3.9%)
fcm45_La80	47.1 (c.v. 1.65%)	4.5 (c.v. 1.1%)
fcm70_La40	69.9 (c.v. 0.87%)	9.3 (c.v. 7.4%)
fcm70_La60	70.3 (c.v. 8.24%)	7.7 (c.v. 15.6%)
fcm70_La80	69.2 (c.v. 7.47%)	9.5 (c.v. 8.7%)

f_{cm} – valor médio da tensão de rotura do betão à compressão; $f_{ctmax,fl}$ – valor médio da tensão máxima do betão à tracção em flexão; c.v. – coeficiente de variação.

4.2 Laminado de CFRP

O laminado utilizado nos ensaios efectuados tem a designação comercial de *Mbrace Laminado LM*, sendo constituído por fibras de carbono orientadas unidireccionalmente, aglutinadas por uma epoxy. As principais características encontram-se indicadas nas fichas técnicas da Bettor MBT Portugal (Bettor MBT, 1999), resumidas na Tabela 7.

Tabela 7 – Resumo das principais propriedades dos laminados *Mbrace Laminado LM*.

Largura do compósito (mm)	10.0
Espessura do compósito (mm)	1.4
Resistência à tracção característica (MPa)	> 2200
Módulo de elasticidade característico (GPa)	150
Deformação última à tracção (%)	1.4

Para o presente estudo foi solicitado ao fornecedor que o laminado tivesse 10.0mm de largura. Assim, este procedeu ao seu corte longitudinal tendo sido fornecido em rolo (ver Figura 18).



Figura 18 – Aspecto geral dos laminados de CFRP.

Após a recepção do laminado de CFRP procedeu-se à determinação de algumas das suas características geométricas e mecânicas, descritas nas secções seguintes.

4.2.1 Características geométricas dos laminados

Para determinar as características geométricas da secção transversal do laminado realizaram-se 20 medições na espessura e na largura, tendo-se obtido os valores de $1.385 \pm 0.003 \text{mm}$ e $9.339 \pm 0.094 \text{mm}$, respectivamente. Assim, para todas as análises que se apresentam neste trabalho os valores adoptados para a espessura, t_f , e para a largura, w_f , do laminado foram os seguintes:

$$t_f = 1.39 \text{mm} \quad (3)$$

e

$$w_f = 9.34\text{mm} \quad (4)$$

4.2.2 Características mecânicas dos laminados

Num dos laboratórios do CEMACOM foram realizados ensaios nos laminados utilizados, com o objectivo de se obter as características fundamentais do laminado, a serem utilizadas nas análises a serem efectuadas no âmbito do presente trabalho. Estes valores serão ainda utilizados para confrontar os indicados pelo fornecedor, indicados na Tabela 7. Para tal efectuaram-se três ensaios de tracção uniaxial de acordo com as recomendações prescritas na norma ISO 527-5 (1997) e que em seguida se descreve.

Geometria dos provetes

Na Figura 19 representa-se, de forma esquemática, a geometria geral dos provetes, na qual é possível observar que os provetes apresentam um comprimento total de 250mm. As extremidades são reforçadas em ambas as faces utilizando, para tal, o mesmo material.

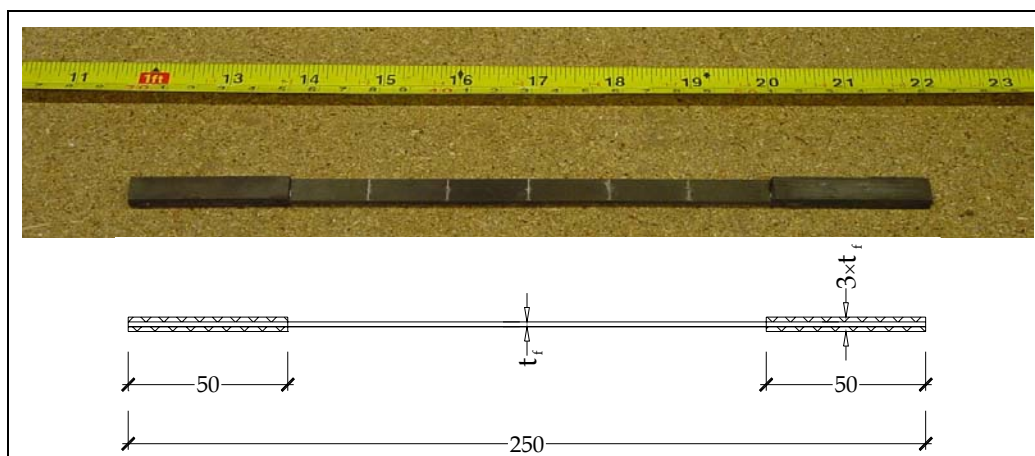


Figura 19 – Geometria geral dos provetes.

Sistema de ensaio

Na realização dos ensaios utilizou-se uma prensa Instron 4208 (Figura 20), tendo-se utilizado uma distância entre amarras de 150mm (Figura 21). O ensaio foi realizado sob controlo de deslocamentos à velocidade de 2mm por minuto. Para a medição das deformações ocorridas nos provetes utilizou-se, numa primeira fase, um “clip gauge” com 50mm de campo e, numa segunda fase, o transdutor de deslocamento interno da prensa. Para o registo das forças recorreu-se a uma célula de carga com uma capacidade máxima de carga de 100kN e uma linearidade de 0.44%.



Figura 20 – Prensa Instron 4208.

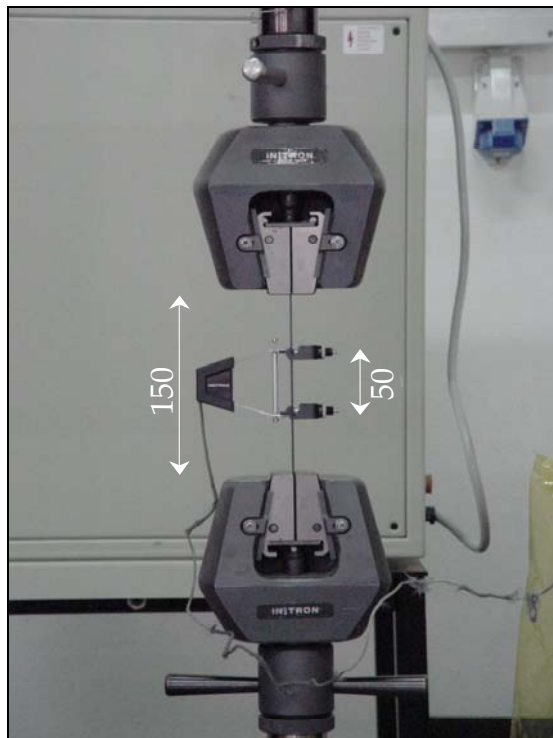


Figura 21 – Distância (50mm) entre pontos de medida do “clip gauge”.

Resultados obtidos

Em qualquer um dos ensaios efectuados verificou-se que a ruína do laminado foi precedida por uma sequência de sons crepitantes, devidos à rotura e delaminação sucessiva das fibras de carbono, tendo ocorrido um ruído forte e brusco na rotura. Foi possível observar que o início da delaminação ocorreu para um nível de tensão de aproximadamente 75% da capacidade última do laminado. Na Figura 22 apresenta-se o aspecto final dos provetes ensaiados.



Figura 22 – Aspecto final dos provetes após terem sido ensaiados.

Na Figura 23 representam-se as respostas obtidas em termos de relação tensão *versus* deformação. A partir destas é possível concluir que o laminado exhibe um comportamento essencialmente linear até à rotura. Todavia, é possível observar que, quer na fase inicial, quer na fase final existem pequenas perturbações.

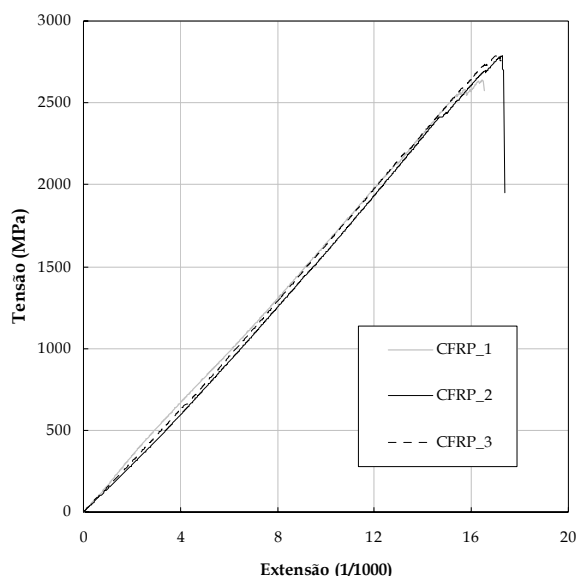


Figura 23 – Tensão *versus* deformação nos laminados.

Com base nas curvas de tensão *versus* deformação determinaram-se os valores do módulo de elasticidade, da tensão de rotura e da extensão na rotura, que se indicam na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades dos laminados de CFRP ensaiados.

Provete	Tensão de rotura (MPa)	Deformação na rotura (1/1000)	Módulo de elasticidade ⁽¹⁾ (GPa)	Módulo de elasticidade ⁽²⁾ (GPa)
CFRP_1	2789.4	17.3	145.5	159.7
CFRP_2	2640.6	16.5	174.6	155.8
CFRP_3	2788.4	17.1	154.7	160.8
Valor médio	2739.5 (c.v. 3.1%)	17.0 (c.v. 2.4%)	158.3 (c.v. 9.4%)	158.8 (c.v. 1.6%)

⁽¹⁾ Módulo de elasticidade calculado de acordo com a recomendação da norma ISO 527-5.

⁽²⁾ Módulo de elasticidade calculado de acordo com a recomendação do ACI.

A partir da Tabela 8 verifica-se que o módulo de elasticidade calculado de acordo com a norma ISO 527-5, conduz a um coeficiente de variação significativamente superior ao que se obtém quando se utiliza a recomendação do ACI (2000).

Para as análises que se seguem consideraram-se para tensão de rotura, $\sigma_{f\text{um}}$, deformação na rotura, $\varepsilon_{f\text{um}}$, e módulo de elasticidade, E_f , do laminado os seguintes valores:

$$\sigma_{f\text{um}} = 2740\text{MPa} , \quad (5)$$

$$\varepsilon_{f\text{um}} = 17.0 \% , \quad (6)$$

e

$$E_f = 160.0 \text{ GPa} . \quad (7)$$

Utilizando os critérios do ACI para a determinação dos valores característicos da tensão de rotura, σ_{fuk} , e da extensão na rotura, ε_{fum} , obtêm-se os valores de 2482MPa e 15.8%, respectivamente.

Por último, será de referir que os valores obtidos nos ensaios efectuados foram sempre superiores aos referidos nas fichas técnicas, indicados na Tabela 7.

4.3 Adesivo

O adesivo utilizado na ligação do laminado ao betão é uma cola epoxy de dois componentes (A e B), tixotrópica e isenta de solventes, designada comercialmente por *MBrace Adesivo Laminado* (Bettor MBT, 2000). O *MBrace Adesivo Laminado* é fornecido em conjuntos de 6kg (ver Figura 24). As principais características encontram-se indicadas nas fichas técnicas, resumidas na Tabela 9.



Figura 24 – Adesivo: componente A e B.

Tabela 9 – Características técnicas do adesivo *MBrace Adesivo Laminado*.

Densidade (g/cm ³)	Componente A	1.9
	Componente B	2.1
Tensão de rotura à compressão (MPa)		90
Tensão de rotura à flexão (MPa)		30
Módulo de elasticidade (MPa)		8150
Aderência ao betão (MPa)		> 3.5
Pot-life (min)		80
Tempo de cura total (dias)		3
Temperatura de aplicação (°C)		[5,20]
Relação da mistura (A:B)	Em peso	2:1
	Em volume	2:0.9

4.3.1 Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão em provetes de adesivo epoxy foram efectuados com base nas recomendações da NP 196-1 (1990). Contudo, procedeu-se à modificação de alguns parâmetros incluídos na norma de forma a ter em conta a especificidade do material utilizado.

O fabrico dos provetes de adesivo, de dimensões $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^2$, envolveu as seguintes tarefas: preparação, moldagem e cura do adesivo.

A fase inicial da preparação do adesivo, era constituída pela homogeneização dos dois componentes, separadamente. Em seguida o componente B era adicionado ao componente A misturando-os com recurso a um misturador mecânico a 1800 r.p.m. durante 2 minutos. Depois de ter decorrido o referido período de tempo, o processo de mistura mecânica era interrompido para que, com recurso a uma colher, se procurasse misturar porções de cada componente ainda não misturadas. De seguida, a mistura mecânica prosseguia durante mais 2 minutos. Com este processo de homogeneização do adesivo verificou-se que este adquiria cor cinzenta uniforme e sem estrias.

O preenchimento dos moldes foi efectuado por intermédio de duas camadas, sendo cada uma delas compactada com 120 pancadas.

A cura dos provetes ocorreu numa câmara climatizada a 20°C de temperatura e 50% de humidade relativa até à data dos ensaios.

Os ensaios de tracção em flexão sob três pontos de carga, distanciados entre si de 50mm, foram efectuados sob controlo de força à velocidade de 50N/s. Na Figura 25 apresenta-se o padrão de fendilhação dos provetes ensaiados bem como a sua superfície de fractura. Apesar dos cuidados tidos durante o processo de fabrico dos mesmos, é possível observar a existência de vazios de dimensões consideráveis em alguns dos provetes, aspecto já anteriormente observado por Cruz et al. (2001).

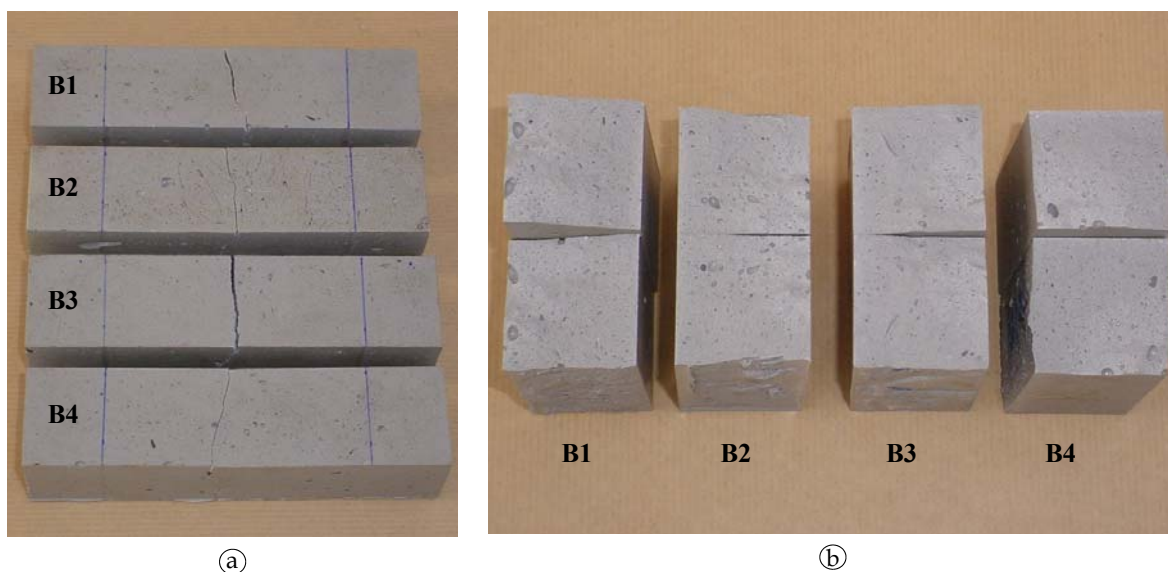


Figura 25 – Modos de rotura obtidos nos ensaios dos provetes de adesivo: (a) forma da fenda; (b) superfície de fractura.

Na Tabela 10 apresentam-se os valores obtidos da tensão de rotura nos provetes ensaiados.

Tabela 10 – Resultados obtidos nos ensaios de tracção em flexão do adesivo epoxy.

Provete	Tensão de rotura (MPa)
B1	27.1
B2	27.4
B3	25.9
B4	22.9
Valor médio	25.8 (c.v. 8.00%)

É de referir que o valor médio dos resultados obtidos nos ensaios efetuados (25.8MPa) é inferior ao valor apresentado pelo fabricante (ver Tabela 9).

5 Campanha de ensaios

5.1 Considerações gerais

Na Figura 26 representam-se os passos seguidos na realização dos provetes utilizados nos ensaios de arrancamento em flexão. Após a betonagem os provetes eram colocados na câmara húmida. No dia seguinte eram descofrados e imersos em água, permanecendo aí até à data da realização das ranhuras. Após esta etapa os provetes eram sujeitos ao processo de secagem a temperatura ambiente. Em seguida aplicava-se o laminado, sendo necessário aguardar alguns dias até à realização dos ensaios. Na Tabela 11 indica-se as idades que os provetes tinham quando se realizaram alguns dos procedimentos anteriormente enumerados.

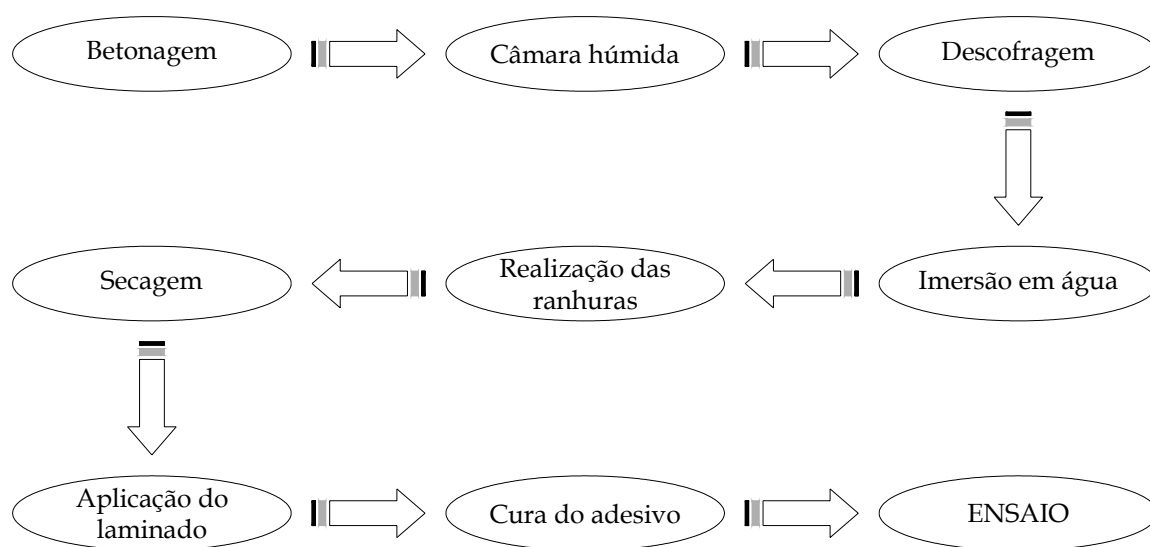


Figura 26 – Diferentes etapas pelas quais os protótipos passaram até serem ensaiados.

Tabela 11 – Idade dos provetes à data da realização das ranhuras, aplicação do adesivo e realização dos ensaios.

Série	T ₁ (dias)	ΔT ₁ (dias)	ΔT ₂ (dias)	T ₂ (dias)
fcm35_La40	28	9	5	42
fcm35_La60	28	9	5	42
fcm35_La80	28	9	5	42
fcm45_La40	47	13	3	63
fcm45_La60	47	27	3	77
fcm45_La80	47	13	3	63
fcm70_La40	28	9	5	42
fcm70_La60	28	9	5	42
fcm70_La80	28	9	5	42

T₁ - Idade dos provetes à data da realização das ranhuras; ΔT₁ - Tempo que decorreu entre a realização das ranhuras e a aplicação do adesivo; ΔT₂ - Tempo que decorreu entre a aplicação do adesivo e o ensaio; T₂ - Idade dos provetes à data do ensaio

Apesar das fichas técnicas apontarem para períodos mínimos de cura de três dias (utilizados nas séries fcm45), nas restantes séries optou-se por aumentar este período para cinco dias devido às temperaturas baixas observadas no laboratório.

5.2 Aplicação do laminado

A aplicação de sistemas compósitos de CFRP a estruturas de betão envolve fundamentalmente três etapas, a saber (Dias, 2001; Juvandes, 1999): i) tratamento das superfícies de forma a garantir boas condições de aderência; ii) colagem do reforço; iii) controlo de qualidade da colagem antes, durante e após a aplicação. Assim, tendo como base estas premissas, desenvolveu-se uma técnica de aplicação do laminado que é descrita nas próximas secções.

5.2.1 Realização das ranhuras

Numa primeira fase procedeu-se à realização das ranhuras com recurso a uma máquina de corte adaptada para tal (ver Figura 27), por forma a garantir a menor variação possível da profundidade e largura da ranhura. Assim, foi possível obter ranhuras com uma profundidade de 15mm e uma largura de 3.3mm (Figura 28).



Figura 27 – Realização das ranhuras.



Figura 28 – Aspecto final dos provetes após a realização das ranhuras.

5.2.2 Preparação do laminado

O laminado era inicialmente limpo com um solvente, realizando-se de seguida a colagem da extensometria. Seguidamente era colado um pequeno segmento de laminado com 30mm de comprimento junto à zona de ancoragem, de modo a permitir a fixação do dispositivo necessário ao controlo do ensaio, como se ilustra na Figura 29. Com vista a garantir o comprimento de ancoragem, L_a , o laminado era envolvido com recurso a material plástico nas suas zonas limites (ver Figura 29). Por último, procedia-se novamente à limpeza do laminado.

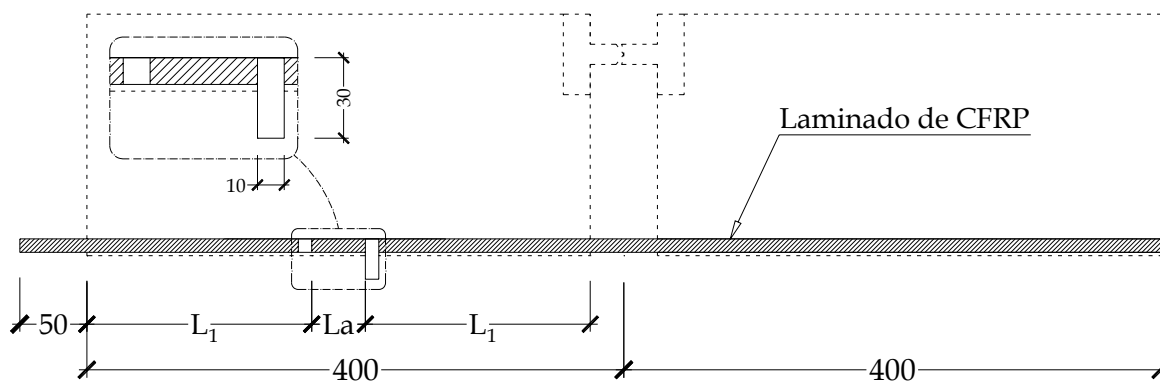


Figura 29 – Laminado de CFRP: geometria geral, extensometria e acessórios.

5.2.3 Preparação do adesivo

A preparação do adesivo foi efectuada em conformidade com a ficha técnica facultada pelo fornecedor do adesivo (Bettor MBT, 2000). Assim, numa fase inicial procedia-se a uma homogeneização dos dois componentes, separadamente. Em seguida adicionava-se o componente B ao componente A (ver Figura 30) misturando-os bem até adquirir uma cor cinzenta uniforme e sem estrias.



Figura 30 – Adesivo: componente A e componente B.

5.2.4 Aplicação do laminado

Após a preparação do adesivo e atendendo ao respectivo *Pot-life*, especificado na ficha técnica, aplicou-se o adesivo nas ranhuras e em seguida no laminado, o qual foi introduzido nas ranhuras de forma suave, retirando-se o adesivo em excesso. Nas Figura 31 a Figura 33 ilustram-se os aspectos referidos no último parágrafo.



Figura 31 – Aplicação do adesivo nas ranhuras.



Figura 32 – Aplicação do adesivo no laminado.



Figura 33 – Aspecto final dos provetes após a aplicação do laminado.

5.3 Resultados

Após a realização de cada ensaio efectuou-se uma inspecção visual ao provete por forma a extrair a maior quantidade de informação possível, nomeadamente, o modo de rotura, a ocorrência de delaminação, as dimensões reais da ranhura, e o posicionamento do laminado na zona de ancoragem. Contudo, no presente relatório apenas dá-se a conhecer os resultados observados em ensaios preliminares.

Assim, para os ensaios preliminares efectuados, nunca se observou fendilhação do betão, tendo a rotura ocorrido sempre na interface betão-adesivo e/ou interface adesivo-laminado. Através de uma análise microscópica (ver Figura 34 e Figura 35) foi possível observar o mecanismo de rotura associado.

A ocorrência deste tipo de rotura poderá ser explicada com recurso ao esquema representado na Figura 36. Assim, devido ao aparecimento de tensões de corte, τ_c , quer na interface betão-adesivo, quer na interface adesivo-laminado, formam-se mecanismos do tipo escora-tirante, desenvolvendo-se no adesivo bielas de compressão, F_c , e bielas de tracção, F_t . Quando estas últimas introduzem tensões de tracção iguais à que o adesivo suporta, surgem fendas com o padrão ilustrado na Figura 35.

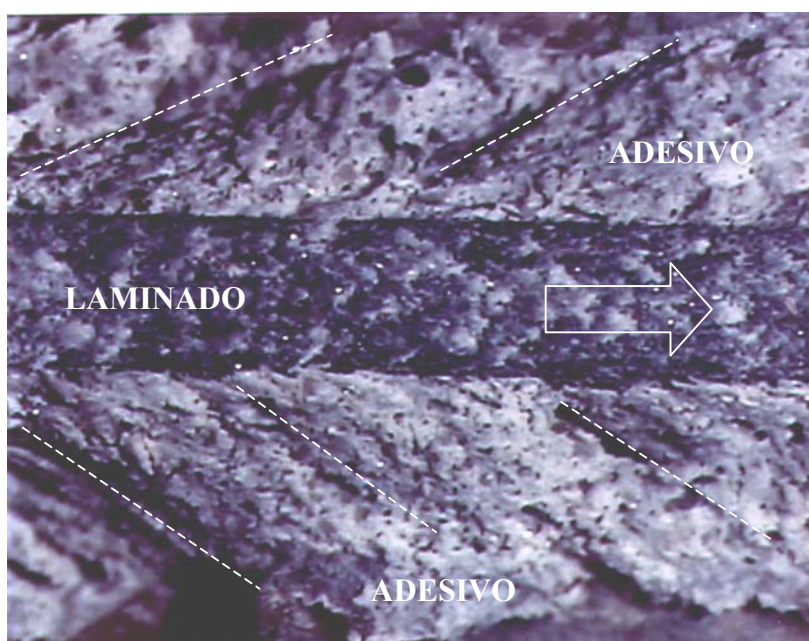


Figura 34 – Mecanismo de rotura do adesivo.

Com base na instrumentação utilizada foi possível medir diversas grandezas, que se descrevem nas secções seguintes. Nas diferentes análises efectuadas consideram-se desprezáveis alguns efeitos face à sua grandeza, nomeadamente:

- a secção do laminado no início da zona de ancoragem, inicialmente plana, pode eventualmente não se manter plana durante o ensaio (ver Figura 37);
- eventuais movimentos do dispositivo que se fixava ao laminado para controlo do ensaio (ver Figura 29);
- a deformação do provete poder induzir deformações no sistema de suporte do LVDT de controlo;
- as imperfeições geométricas dos provetes;

- possíveis flutuações no comprimento de ancoragem;
- possíveis imperfeições na qualidade da ligação efectuada com recurso ao epoxy.



Figura 35 - Rotura de uma biela de adesivo.

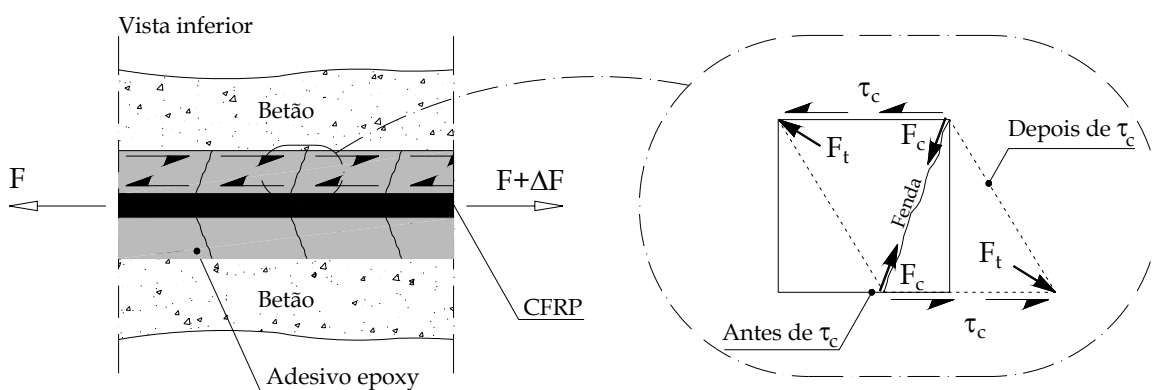


Figura 36 - Mecanismo de rotura do adesivo.

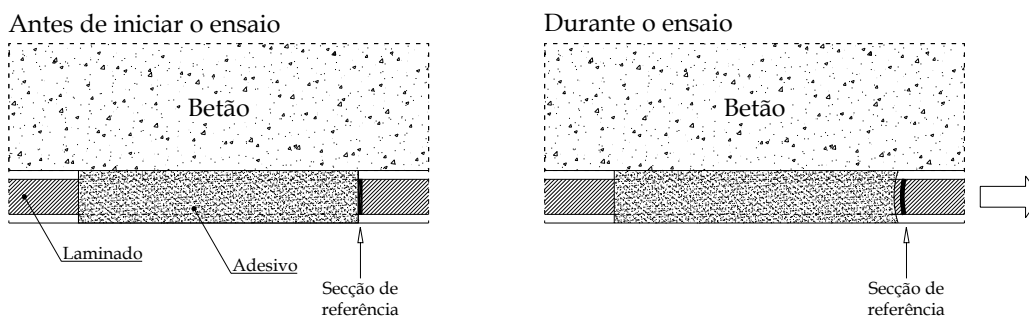


Figura 37 - Comportamento da secção do laminado no início da zona de ancoragem.

5.3.1 Força no laminado

De acordo com a instrumentação utilizada (ver secção 3.2) é possível determinar a força instalada no laminado (no início da zona de ancoragem), F_f , por intermédio dos dois procedimentos seguintes:

- leituras registadas nas células de carga, F_{LC1} e F_{LC2} (ver Figura 14), considerando 145mm como sendo o valor do braço do binário a meio da viga, pelo que:

$$F_f = (F_{LC1} + F_{LC2}) / 2 \times (250 / 145);$$
- registo da deformação no laminado por intermédio da extensometria, ε_f , e utilizando os valores de 160GPa e 12.9826mm^2 para módulo de elasticidade longitudinal e para área da secção transversal do laminado, respectivamente, verifica-se que:

$$F_f = \varepsilon_f \times 160000 \times 12.9826.$$

A título ilustrativo apresenta-se na Figura 38 a evolução da tensão no laminado ao longo do tempo para o provete B3_fcm45_La80. Os diagramas de todos os provetes encontram-se representados no Anexo II. A força no laminado foi calculada pelos dois métodos anteriormente descritos.

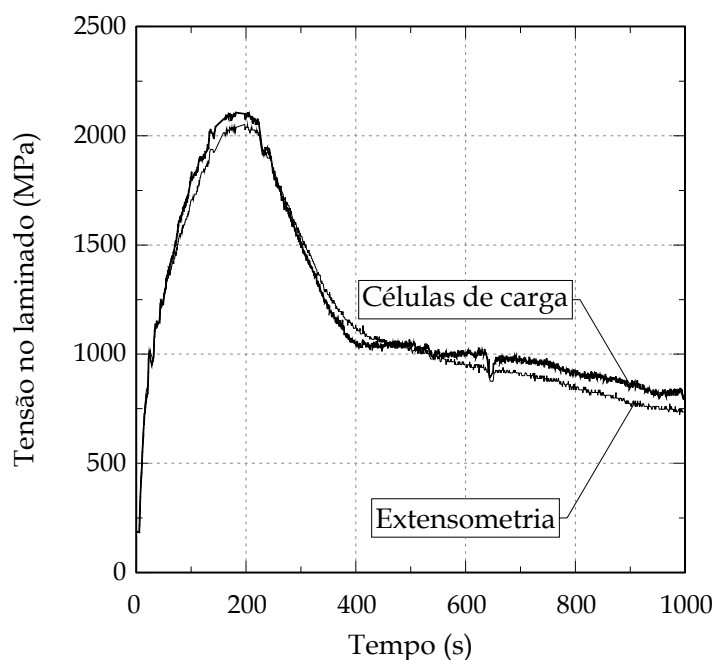


Figura 38 – Tensão instalada no laminado *versus* tempo para o provete B3_fcm45_La80.

Apenas para a série fcm45_La40 não foi possível calcular a tensão no laminado por intermédio do segundo método devido a deficiente funcionamento da extensometria.

De uma forma geral, pode dizer-se que existe uma concordância muito razoável dos valores determinados pelos dois métodos, com a excepção de dois dos três provetes da série fcm35_La80 onde um desfasamento considerável foi registado.

Assim, com vista às diferentes análises efectuadas considerou-se que a força instalada no laminado era determinada de acordo com o procedimento *b*. Nas séries fcm35_La80 e fcm45_La40 utilizou-se o procedimento *a*.

5.3.2 Deslizamentos LVDT1 e LVDT2

Em conformidade com a configuração de ensaio descrita nas secções 3.1 e 3.2 obtiveram-se os deslocamentos relativos do laminado em relação ao betão no final e início da zona de ancoragem, LVDT1 e LVDT2, respectivamente (ver Figura 14). Na Figura 39 apresentam-se os valores obtidos para os deslizamentos LVDT1 e LVDT2 ao longo do tempo, resultado típico observado nos ensaios efectuados. Nestes diagramas é possível distinguir quatro estados distintos, a saber:

- Estado I: correspondente ao troço AB em que apenas existe o deslizamento LVDT2, isto é, apenas se verifica deslizamento ao longo da zona de ancoragem sem contudo ser atingida a zona livre;
- Estado II: correspondente ao troço BC, sendo caracterizado pela ocorrência de deslizamento ao longo de toda a zona de ancoragem. Todavia, a variação de deslizamento registada na zona carregada é superior à registada na zona livre;
- Estado III: correspondente ao troço CD em que as variações de deslizamentos na zona carregada são inferiores às obtidas na zona livre;
- Estado IV: ao qual corresponde o troço DE em que as variações de deslizamentos LVDT1 e LVDT2 são praticamente iguais.

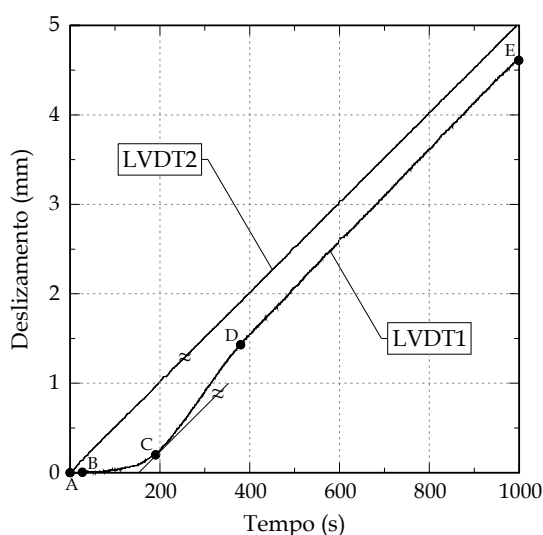


Figura 39 – Deslizamentos LVDT1 e LVDT2 para o provete B3_fcm45_La80.

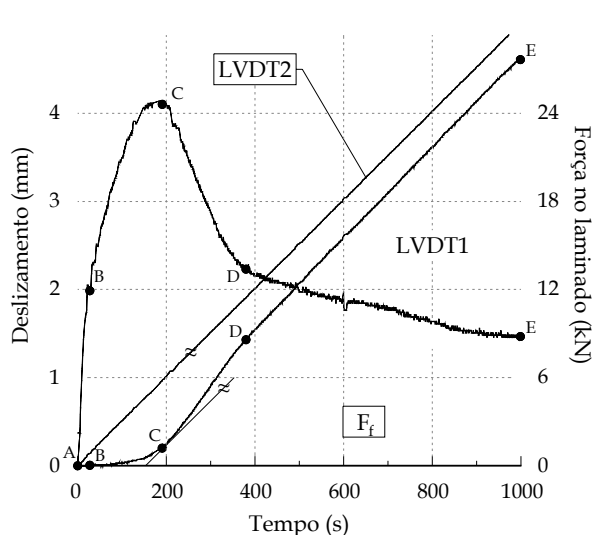


Figura 40 – Deslizamentos LVDT1 e LVDT2 e força no laminado para o provete B3_fcm45_La80.

O comportamento observado no LVDT1 ao longo do ensaio pode ser explicado mais facilmente com recurso ao gráfico da Figura 40 que inclui o deslizamento LVDT1 e LVDT2 e a força instalada no laminado em função do tempo. Nele incluem-se os pontos (A, B, C, D e E) delimitadores dos diferentes estados, quer para o deslizamento LVDT1, quer para a força no laminado.

Assim, observa-se que o início do deslizamento LVDT1 (ponto B) ocorre para uma força instalada no laminado de valor considerável. A diferença máxima entre deslizamento LVDT1 e LVDT2 ocorre no ponto C ao qual está associada a força máxima instalada no laminado. A partir deste ponto (C) a força no laminado diminui verificando-se que a variação de deslizamento LVDT1 é superior ao LVDT2. Este fenómeno ocorre porque a recuperação da deformação elástica do laminado, na zona de ancoragem, durante a fase inicial pós-pico, tem um valor não desprezável. Assim, à medida que a força diminui (entre

C e D) no LVDT1 regista-se não só o deslocamento relativo do laminado em relação ao betão, mas também a recuperação da deformação elástica por parte do laminado. A partir do ponto D verifica-se que a variação do deslizamento LVDT1 é semelhante ao LVDT2, sendo este facto indicador de que a deformação elástica do laminado ocorrida na zona de ancoragem, deixou de ter influência na resposta.

No Anexo III apresentam-se os diagramas tempo *versus* deslizamento LVDT1 e LVDT2 e força instalada no laminado para todos os provetes ensaiados.

Em alguns modelos é possível observar que na fase final do ensaio o deslizamento LVDT1 é superior ao LVDT2. Tal ocorrência só pode ser justificada devido a movimentos parasitas do sistema de suporte para leitura dos transdutores de deslocamentos.

5.3.3 Deslizamento *versus* força no laminado

A partir dos diagramas tempo *versus* deslizamento e tempo *versus* força no laminado foi possível obter as relações deslizamento LVDT2 *versus* força no laminado que encontram representadas da Figura 41 à Figura 43.

Da análise das curvas obtidas verifica-se que após uma curta fase em regime elástico linear, ocorre um comportamento eminentemente não linear, ditado pela resposta não linear do adesivo. Após a carga de pico, a força no laminado diminui para deslizamento crescente, comportamento típico da fase designada por amolecimento, (“softening” na nomenclatura Inglesa). Na fase inicial do amolecimento ocorre uma acentuada queda da força, muito provavelmente consequência da perda de aderência entre o laminado e o adesivo e entre este e o betão. Segue-se uma fase com reduzida perda de resistência residual ao corte, devido ao atrito entre o laminado e o adesivo e entre este e o betão envolvente.

De um forma geral os provetes que constituem cada série apresentam comportamento semelhante. A exceção verifica-se para os provetes B2_fcm70_La60 e B2_fcm70_La80, nos quais foi observada uma rigidez inicial muito elevada. Tal ocorrência deve estar associada a um deficiente comportamento do controlador, que, nestes casos, deve ter aplicado uma velocidade de deformação significativamente superior à ocorrida nas restantes séries.

5.3.4 Deslizamento *versus* tensão média de corte

Com base nas relações deslizamento *versus* força no laminado foi possível determinar as relações deslizamento *versus* tensão média de corte (ver Figura 43 à Figura 46). A tensão média de corte foi definida pelo cociente entre a força no laminado, F_f , e a área de contacto do laminado com o adesivo, isto é, $F_f/(2 \times (w_f + t_f) \times L_a)$.

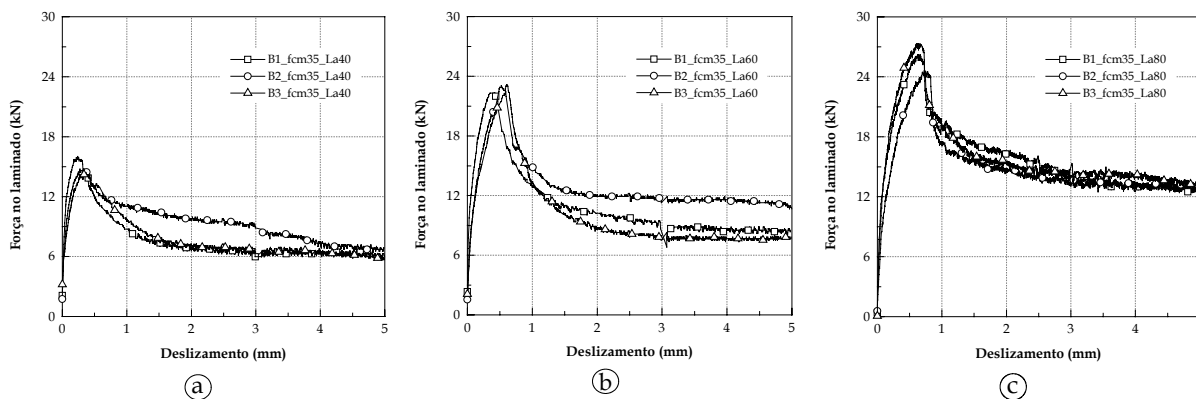


Figura 41 – Relação deslizamento *versus* força no laminado para as séries fcm35_La40 (a), fcm35_La60 (b) e fcm35_La80 (c).

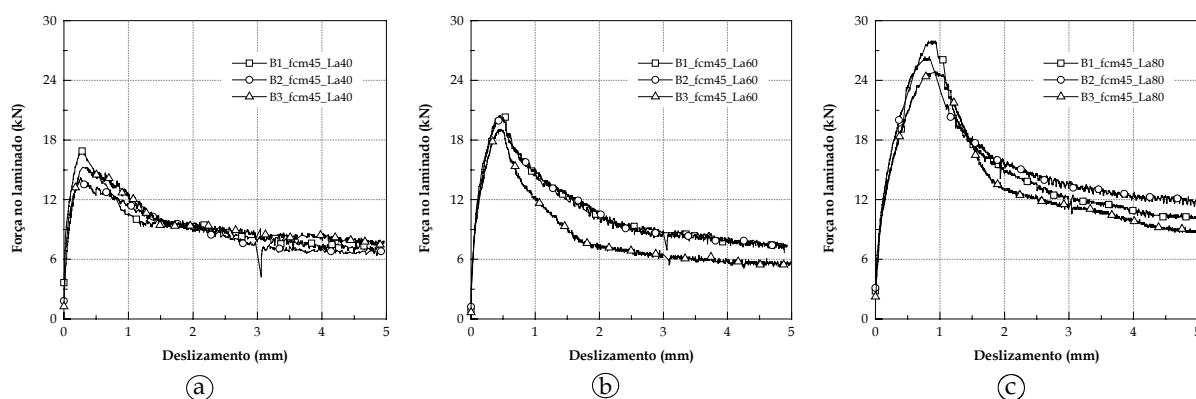


Figura 42 – Relação deslizamento *versus* força no laminado para as séries fcm45_La40 (a), fcm45_La60 (b) e fcm45_La80 (c).

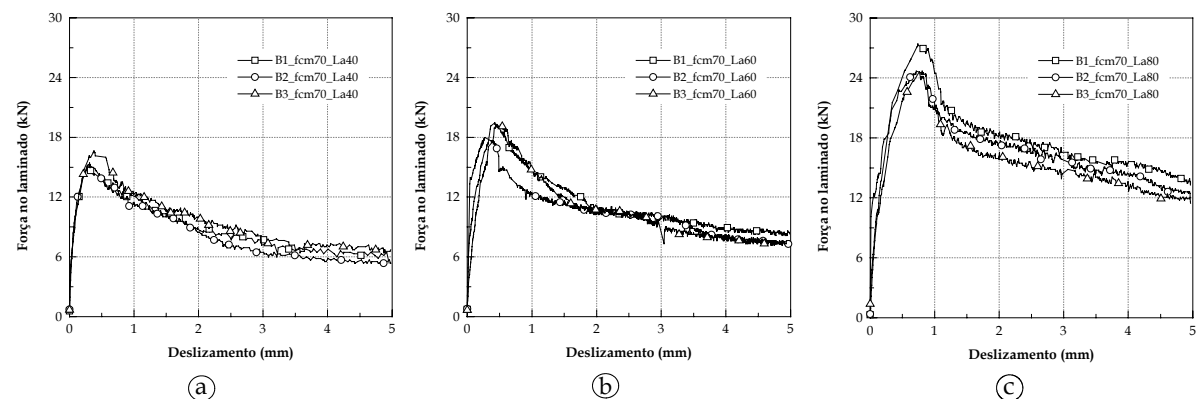


Figura 43 – Relação deslizamento *versus* força no laminado para as séries fcm70_La40 (a), fcm70_La60 (b) e fcm70_La80 (c).

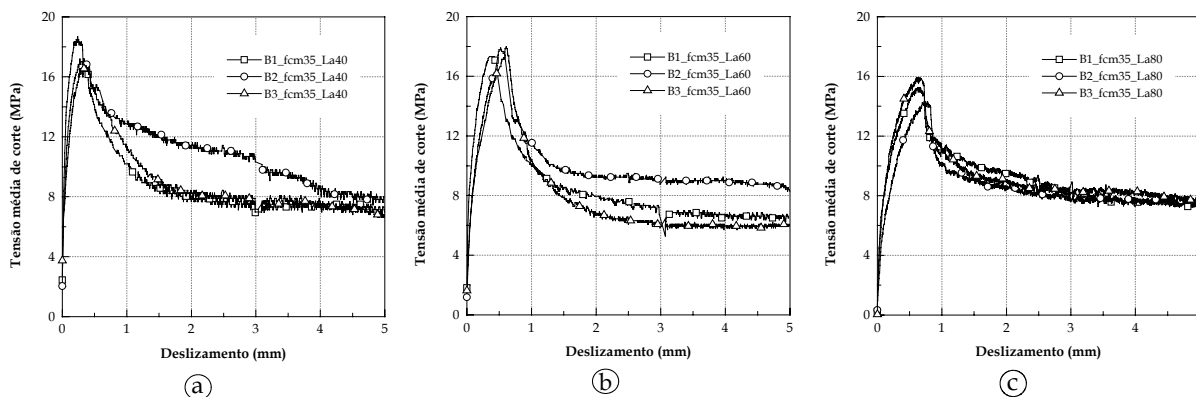


Figura 44 – Relação deslizamento *versus* tensão de corte para as séries fcm35_La40 (a), fcm35_La60 (b) e fcm35_La80 (c).

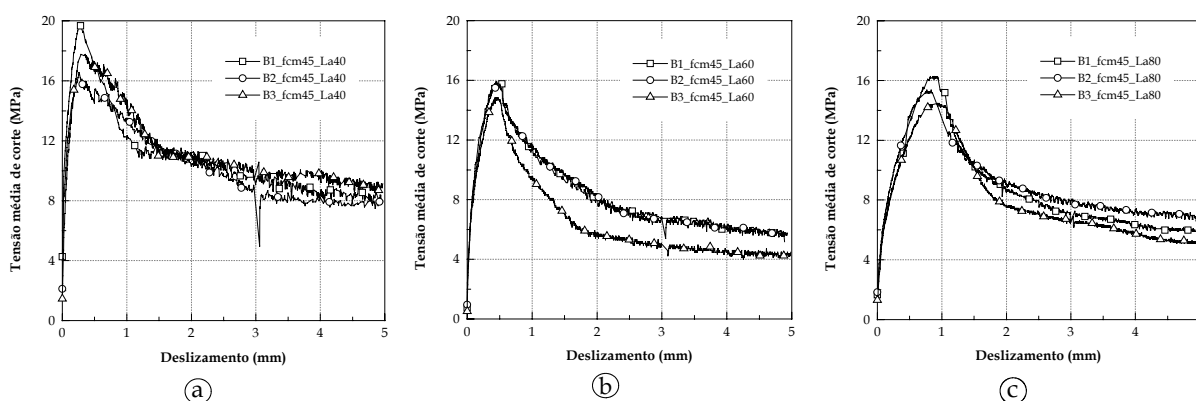


Figura 45 – Relação deslizamento *versus* tensão de corte para as séries fcm45_La40 (a), fcm45_La60 (b) e fcm45_La80 (c).

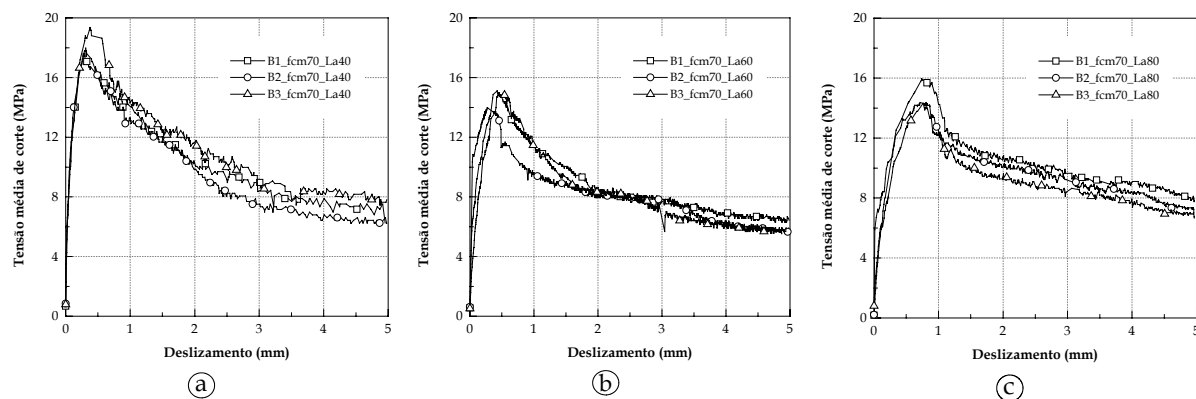


Figura 46 – Relação deslizamento *versus* tensão de corte para as séries fcm70_La40 (a), fcm70_La60 (b) e fcm70_La80 (c).

5.4 Discussão dos resultados

Com base nos diagramas que figuram no Anexo III elaborou-se a Tabela 12 onde figuram os valores médios obtidos em cada série da relação F/F_{\max} para os pontos B, C e D (ver secção 5.3.2). F_{\max} designa o valor da força máxima no laminado obtida em cada ensaio efectuado, e F representa a força no laminado obtida no ponto B, C ou D. Os valores da relação F/F_{\max} encontram-se expressos em percentagem.

Tabela 12 – Valores médios da relação F/F_{\max} para os pontos B, C e D (ver Figuras 38 e 39).

Relação F/F_{\max}	La40			La60			La80		
	fcm35	fcm45	fcm70	fcm35	fcm45	fcm70	fcm35	fcm45	fcm70
B	56.3	81.7	76.7	66.2	65.4	65.7	67.7	70.5	66.9
(%)	(30.0%)	(6.0%)	(5.3%)	(12.0%)	(24.3%)	(23.3%)	(9.0%)	(18.8%)	(31.9%)
C	97.8	99.1	98.7	99.6	98.7	94.2	97.1	98.1	99.0
(%)	(0.7%)	(1.0%)	(1.4%)	(0.7%)	(1.0%)	(9.0%)	(0.9%)	(2.0%)	(0.9%)
D	80.5	60.1	66.3	79.8	66.1	58.4	73.0	75.9	70.8
(%)	(2.9%)	(9.3%)	(6.4%)	(11.2%)	(7.0%)	(7.0%)	(7.4%)	(2.2%)	(5.8%)

Nota: os valores que figuram entre parêntesis correspondem ao coeficiente de variação da série.

Verifica-se que o ponto B (início do Estado II), isto é o ponto que marca o início do deslizamento na extremidade livre do comprimento de ancoragem, ocorre para uma força instalada no laminado compreendida entre 55% e 82% da força máxima. Contudo, não se observa uma tendência função do comprimento de ancoragem. Existe uma dispersão considerável de valores. Com base nos valores registados observa-se que o ponto C – maior distância entre os LVDT1 e LVDT2 – ocorre para a força máxima instalada no laminado. O ponto D (início do Estado IV) ocorre para uma tensão instalada no laminado entre 58% e 81% da força máxima. Neste caso também se verifica elevada dispersão de valores.

Com base nos diagramas apresentados na secção anterior definiram-se os principais parâmetros a serem estudados: força máxima no laminado, F_{\max} ; tensão média de corte, τ_{\max} ; energia dissipada, G_f , definida pela área dos diagramas deslizamento *versus* tensão média de corte; rendimento do reforço, medido pela relação entre a tensão máxima, $\sigma_{f_{\max}}$, e a tensão resistente, σ_{f_u} , do laminado; deslocamento correspondente à força máxima, $\delta_{f_{\max}}$. Na Tabela 13 apresentam-se os valores médios dos referidos parâmetros, resultantes dos três ensaios efectuados para cada série.

A partir dos valores indicados na Tabela 13 verifica-se que, de uma forma geral, existe uma baixa dispersão dos valores obtidos. As excepções ocorrem para a energia dissipada e para o deslocamento correspondente à força máxima, em algumas das séries.

Verificou-se que a série fcm35_La60 apresentou um melhor comportamento face às outras séries que têm o mesmo comprimento de ancoragem (fcm45_La60 e fcm70_La60). Apesar de não se ter detectado a razão para tal facto, a discrepância observada pode estar relacionada com um comprimento de ancoragem ligeiramente superior ao estabelecido, o que seria motivo para aumentar a carga de pico e, conseqüentemente, as alterações nos valores dos restantes parâmetros.

Tabela 13 – Valores médios dos principais parâmetros estudados.

Parâmetro	La40			La60			La80		
	fcm35	fcm45	fcm70	fcm35	fcm45	fcm70	fcm35	fcm45	fcm70
F_{max} (kN)	15.0 (5.8%)	15.5 (8.7%)	15.7 (5.0%)	22.8 (2.0%)	19.9 (3.7%)	18.9 (4.2%)	26.2 (5.2%)	26.4 (5.8%)	25.6 (6.2%)
τ_{max} (MPa)	17.5	18.1	18.3	17.7	15.5	14.7	15.2	15.4	14.9
G_f (MN/mm)	48.3 (11.4%)	53.9 (4.8%)	51.5 (7.1%)	43.9 (12.6%)	38.4 (12.7%)	41.9 (3.9%)	45.4 (3.9%)	43.0 (6.3%)	48.4 (6.7%)
$\sigma_{fmax}/\sigma_{fu}$ (%)	42.1	43.3	44.1	64.0	55.8	52.9	72.9	73.9	71.6
δ_{fmax} (mm)	0.29 (21.5%)	0.27 (5.8%)	0.32 (16.0%)	0.49 (26.8%)	0.46 (8.8%)	0.40 (30.6%)	0.66 (9.3%)	0.84 (10.0%)	0.74 (3.0%)

A influência do comprimento de ancoragem e da classe de resistência do betão nos valores assumidos pelos parâmetros analisados está representada nas Figura 47 a Figura 51. Por intermédio da análise destes diagramas verifica-se que:

- a classe do betão tem pouca influência no comportamento da ligação;
- a força máxima no laminado cresce proporcionalmente com o comprimento de ancoragem e, conseqüentemente, verifica-se o mesmo para o rendimento do laminado;
- a tensão média de corte apresenta tendência assintótica, diminuindo com o aumento do comprimento de ancoragem;
- o deslizamento LVDT2 cresce de forma não linear com o aumento do comprimento de ancoragem;
- a série fcm35_La60 apresenta um comportamento diferente das restantes séries, aspecto já anteriormente referido.

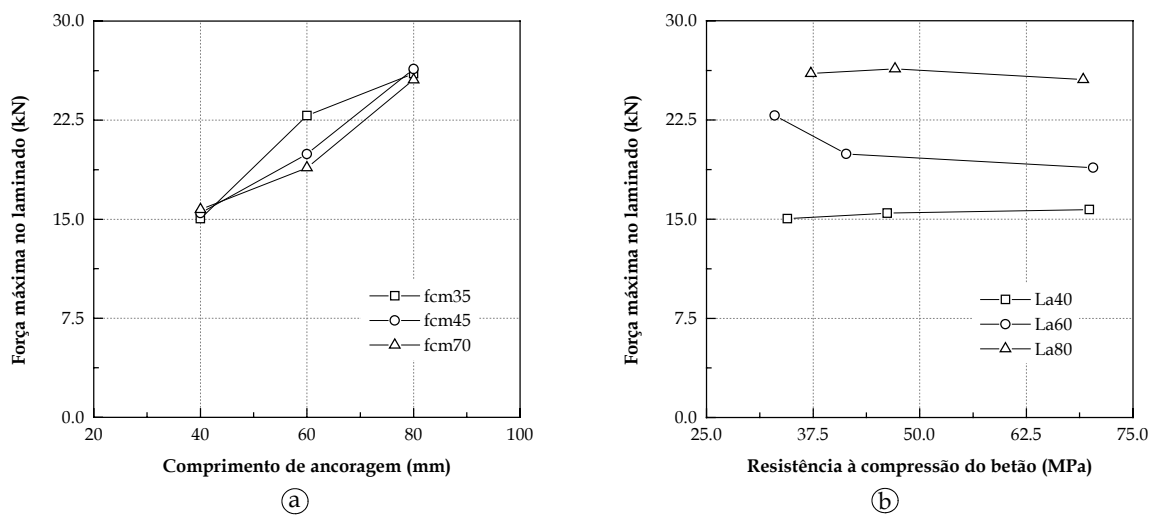


Figura 47 – Influência do comprimento de ancoragem (a) e da resistência do betão (b) na força máxima no laminado.

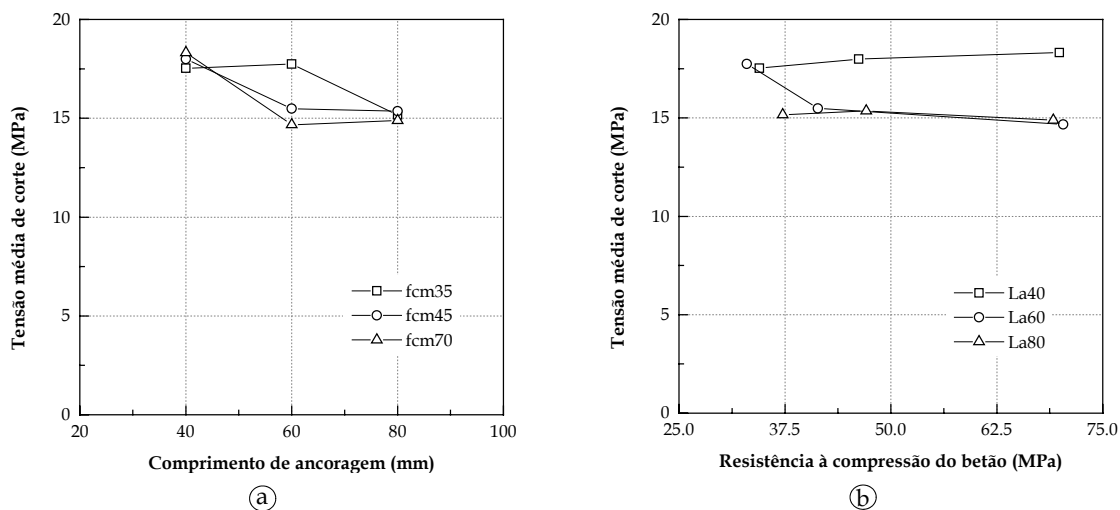


Figura 48 – Influência do comprimento de ancoragem (a) e da resistência do betão (b) na tensão média de corte.

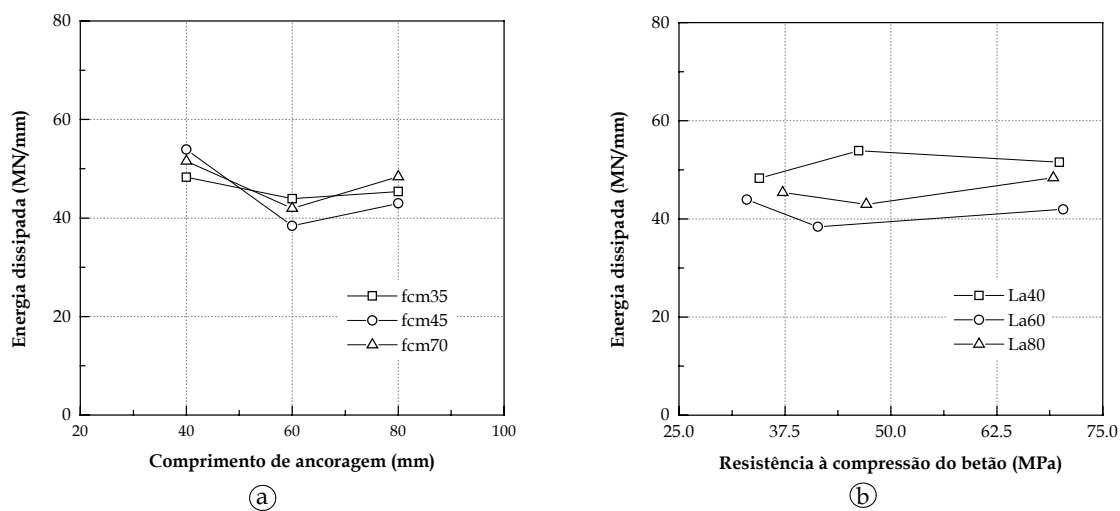


Figura 49 – Influência do comprimento de ancoragem (a) e da resistência do betão (b) na energia dissipada.

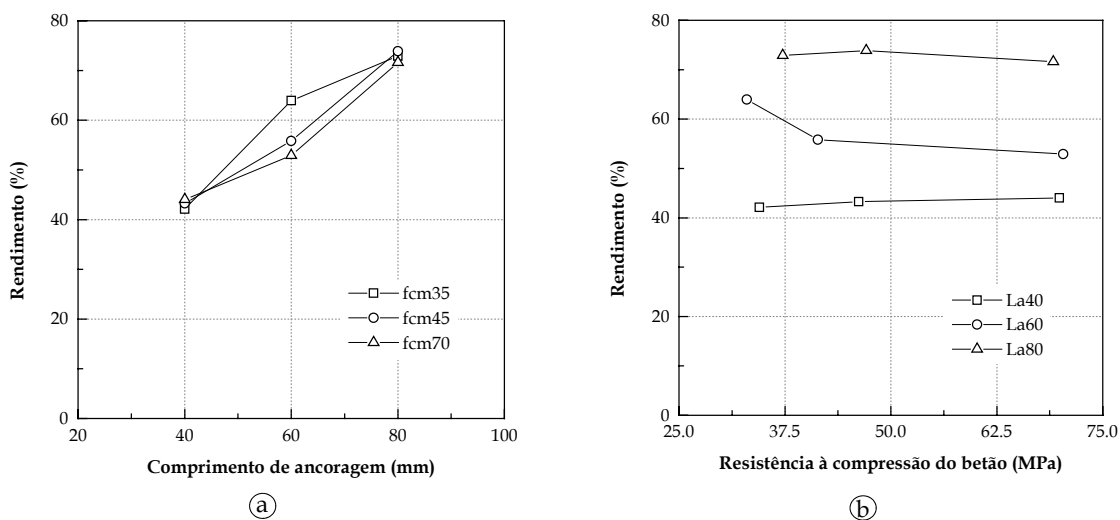


Figura 50 – Influência do comprimento de ancoragem (a) e da resistência do betão (b) no rendimento do reforço aplicado.

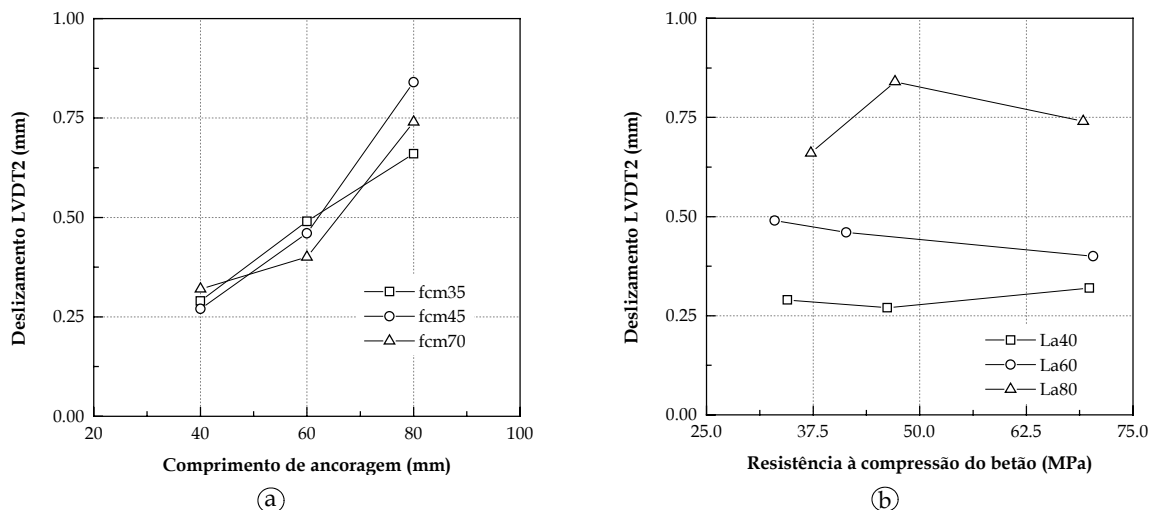


Figura 51 – Influência do comprimento de ancoragem (a) e da resistência do betão (b) no deslizamento LVDT2 correspondente à força máxima.

Na Figura 51 e Figura 52 apresentam-se as relações deslizamento *versus* força no laminado para as séries ensaiadas. Cada curva apresentada corresponde à curva média resultante dos três ensaios efectuados para cada série.

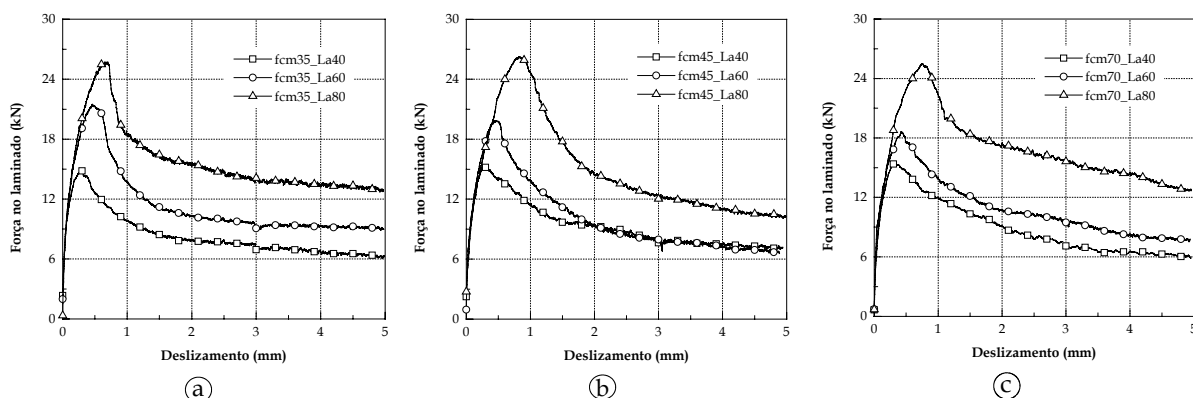


Figura 52 – Relações deslizamento *versus* força no laminado para as séries fcm35 (a) fcm45 (b) e fcm70 (c).

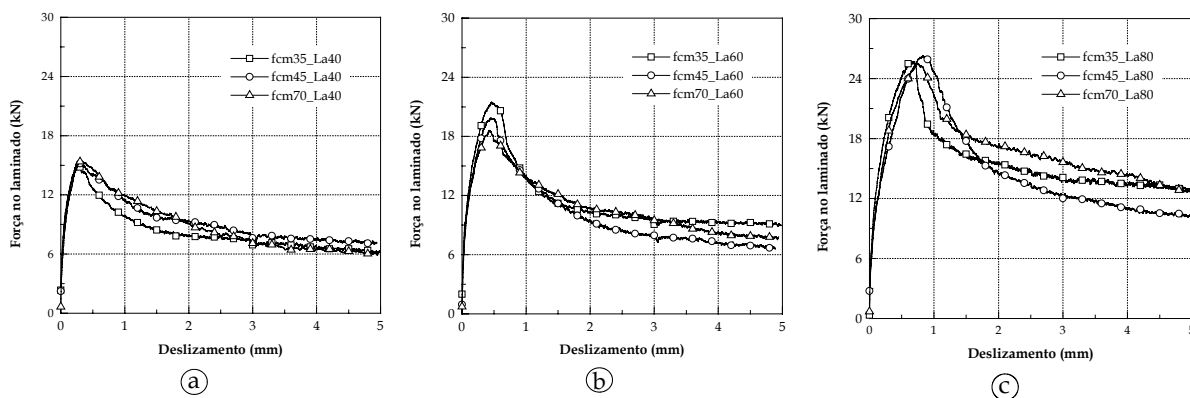


Figura 53 – Relações deslizamento *versus* força no laminado para as séries La40 (a), La60 (b) e La80 (c).

A partir das relações anteriores concluí-se que todas as séries apresentam um comportamento inicial idêntico. Com aumento do comprimento de ancoragem o valor da força máxima no laminado e correspondente deslizamento aumentam, aspecto já anteriormente referido. O pós-pico (fase de amolecimento) apresenta forma semelhante em todas as séries, excepto para a série fcm45_La40. Nesta série, após aproximadamente 2mm de deslizamento, a força residual diminui menos que o esperado, tendo em conta o comportamento observado nas restantes séries.

Com base nas curvas apresentadas na Figura 53 observa-se que a resistência do betão não altera de forma significativa o comportamento da ligação. Esta conclusão reveste-se de importância primordial, já que permite afirmar que, por um lado o modo de rotura da ligação ocorreu sempre na interface e, por outro, a utilização do betão reforçado com fibras não influenciou nas respostas observadas.

6 Conclusões

Neste trabalho deu-se a conhecer a análise experimental efectuada com vista à caracterização da ligação de laminado de CFRP inserido no betão de recobrimento. Esta ligação foi efectuada por intermédio de um adesivo epoxy.

A investigação experimental foi constituída por ensaios de arrancamento em flexão tendo-se procurado avaliar a influência do comprimento de ancoragem e da classe de resistência do betão no comportamento da ligação. Para tal, efectuaram-se campanhas de ensaios com comprimentos de ancoragem de 40, 60 e 80mm e com betões de classe de resistência à compressão de 35, 45 e 70MPa.

Nos ensaios preliminares efectuados observou-se que a rotura da ligação ocorria pelo esgotamento da capacidade resistente da interface betão-adesivo e/ou adesivo-laminado.

A resposta deslizamento *versus* tensão de corte ou força instalada no laminado é constituída por um curto ramo linear elástico, seguindo-se um ramo essencialmente não linear até pico de carga, cujo desenvolvimento é tanto maior quanto maior é o comprimento de ancoragem. Após a carga de pico, observa-se uma fase de amolecimento caracterizada por uma diminuição acentuada de carga para deslizamento crescente. Por último segue-se uma fase de reduzida perda de resistência devido ao atrito mobilizado entre o laminado e o adesivo e entre este e o betão envolvente.

De uma forma geral pode dizer-se que, com o aumento do comprimento de ancoragem aumentou a força instalada no laminado, o deslizamento correspondente à tensão máxima de corte e a energia dissipada. A classe de resistência do betão teve pouca influência no comportamento da ligação.

As máximas tensões de corte obtidas são muito superiores às registadas quando a técnica de reforço baseia-se na fixação externa do laminado.

7 Agradecimentos

O primeiro autor deste relatório manifesta o profundo agradecimento ao Professor Joaquim Barros, na elaboração, discussão e análise da campanha de ensaios efectuada, assim como, aos funcionários do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho e geral, e em particular ao Sr. António Matos.

Os autores manifestam os seus agradecimentos às empresas que gentilmente forneceram os materiais usados nesta campanha experimental, nomeadamente, à Bettor MBT Portugal, à S&P, à Secil e à Solusel. Ao CEMACOM agradece-se a colaboração prestada nos ensaios de tracção uniaxial com provetes de laminado de CFRP.

8 Referências

- ACI COMMITTEE 440 (2000), “*Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*”, July.
- Al-Ta'An, S.A.; Al-Feel, J.R. (1990), “Evaluation of Shear Strength of Fibre-Reinforced Concrete Beams”, *Cement & Concrete Composites*, Nº 12, pp. 87-94.
- Asplund, S.O. (1949), “*Strengthening bridge slabs with grouted reinforcement*”, *ACI Journal, Proceedings* V.20, Nº 6, January, pp. 397-406.
- Barros, J.A.O. (1995), “*Comportamento do betão reforçado com fibras - análise experimental e simulação numérica*”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Barros, J.A.O., Cruz, J.S. (2001), “*Fracture energy of steel fibre reinforced concrete*”, *Journal of Mechanics of Composite Materials and Structures*, January–March, Vol. 8, pp. 29–45.
- Barros, J.A.O.; Antunes, J.A.B.; Amorim, J.A.S.B.A. (2002), “*Influência da quantidade de fibras, percentagem de cinzas volantes e idade no comportamento à flexão de betão reforçado com fibras de aço Dramix RC-80/60-BN*”, Relatório 02-DEC/E-11, 87 pp, Julho.
- Bettor MBT (1999), “*Mbrace Laminados*”, Ficha Técnica, Rio de Mouro, Portugal, Fevereiro, 2 pp.
- Bettor MBT (2000), “*Mbrace Adesivo Laminado*”, Ficha Técnica, Rio de Mouro, Portugal, Março, 2 pp.
- Blaschko, M., Zilch, K. (1999) “*Rehabilitation of concrete structures with CFRP strips glued into slits*”, proceedings of the Twelfth International Conference of Composite Materials, Paris, França, Julho.
- Casanova, P. (1996), “*Bétons renforcés de fibres métalliques, du matériau à la structure*”, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Février.
- Concrete Society (2000), “*Design guidance for strengthening concrete structures using FRP composite materials*”, Technical Report No. 55, Crowthorne, Berkshire, UK.
- Cruz, J.M.S.; Barros, J.A.O.; Faria, R. (2001) “*Assessing the embedded length of epoxy-bonded carbon laminates by pull-out bending tests*”, Conference of Composites in Construction, 10 a 12 de Outubro, Porto, pp. 217-222.
- Cruz, J.M.S. (1998), “*Comportamento cíclico de estruturas porticadas de betão armado reforçadas com fibras de aço – Simulação numérica e análise experimental*”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

- De Lorenzis, L.; Nanni, A. (2001), “*Characterization of FRP rods as near-surface mounted reinforcement*”. Journal of Composites for Construction, May, pp. 114-121.
- De Lorenzis, L.; Nanni, A. (2002), “*Bond Between Near Surface Mounted FRP Rods and Concrete in Structural Strengthening*”. ACI Structures Journal, Vol. 99, Nº. 2, March-April, pp. 123-133.
- De Lorenzis, L.; Nanni, A.; La Tegola, A. (2000-a) “*Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Near Surface Mounted FRP Rods*”, International Meeting on Composite Materials, PLAST, Milan, Italy, May 9-11, 8 pp.
- De Lorenzis, L.; Nanni, A.; La Tegola, A. (2000-b), “*Flexural and Shear Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Near Surface Mounted FRP Rods*”. Proceedings of the Third International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Ottawa, Canada, J. Humar and A.G. Razaqpur, Editors, 15-18 Aug., pp. 521-528.
- De Lorenzis, L.; Nanni, A.; La Tegola, A. (2000-c), “*Bond of Near Surface Mounted FRP Rods in Concrete Masonry Units*”. Proceedings of the Seventh Annual International Conference on Composites Engineering (ICCE/7), Denver, Colorado, July 2-8.
- Dias, S.J.E.. (2001), “*Verificação experimental do reforço com CFRP de estruturas de betão à flexão*”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Março.
- DRAMIX (1998), “*Product data sheet*”, N.V.Bekaert S.A.
- Ferreira, D.R.S.M. (2001), “*Pilares de Betão Armado Reforçados com Laminados de Fibras de Carbono*”, Tese de Mestrado, Universidade do Minho.
- FIB (2001), “*Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*”, International Federation for Structural Concrete – Technical report.
- Fortes, A.S., Barros, J.A.O., Padaratz, I.J. (2002), “*Vigas de Betão Armado Reforçadas com Laminados de CFRP Inseridos no Betão*”. Relatório 02-DEC/E-13, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, 32 pp.
- German Institute of Construction Technology (1997), “*Strengthening of Reinforced Concrete and Prestressed Concrete with Sika Carbodur Bonded Carbon Fiber Plates*”, Authorization No.2-36.12-29, Berlin.
- Hogue, T.; Cornforth, R.C.; Nanni, A. (1999), “*Myriad Convention Center Floor System Reinforcement*”. Proceedings of the FRPRCS-4, C.W. Dolan, S. Rizkalla and A. Nanni, Editors, ACI, Baltimore, MD, pp. 1145-1161.
- ISO 527-5 (1997), “*Plastics – Determination of tensile properties – Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*”, International Organization for Standardization, Genève, Switzerland, 9 pp.

- 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, Porto, Setembro.
- NP 1379 (1976), “*Inertes para argamassas e betões - análise granulométrica*”, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, Agosto, pp. 3.
- NP 196-1 (1990), “*Métodos de ensaio de cimentos*”, Instituto Português da Qualidade, Lisboa, Junho, 29 pp.
- RILEM (1982), “*Bond test for reinforcement steel. 1. Beam test*”. TC9-RC.
- Rostasy, F.S.; Neubauer, U. (1997), “*Bond behaviour of CFRP-Laminates for the strengthening of concrete members*”, Composite Construction Conventional Innovative, IABSE, September, pp. 717-722.
- Rostasy, F.S. (1998), “*Assessment of S&P CRP structural strengthening system*”, Expert Opinion No. 98/0322, Scherer & Partners Construction System, Brunnen, Switzerland.
- Swamy, R.N.; Jones, R.; Chiam, A.T.P. (1993), “*Influence of Steel Fibers on the Shear Resistance of Lightweight Concrete I-Beams*”, ACI Structural Journal, Vol. 90, Nº 1, January-February, pp. 103-114.
- Tan, K.H.; Murugappan, K.; Paramasivam, P. (1992), “*Shear Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams*”, ACI Structural Journal, Vol. 89, Nº 6, November-December, pp. 3-11.
- Tumialan, G.; Tinazzi, D.; Myers, J.; and Nanni, A. (1999), “*Field Evaluation of Masonry Walls Strengthened With FRP Composites at the Malcolm Bliss Hospital*”, Report CIES 99-8, University of Missouri-Rolla, Rolla, MO.
- Warren, G.E. (1998), “*Waterfront repair and upgrade - Advanced technology demonstration. Site No. 2: Pier 12*”, NAVSTA San Diego, Site Specific Report SSR-2419-SHR, Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, CA.

Anexo I

Tabela I. 1 – Cilindros de betão: altura, massa e tensão de rotura.

Série	Cilindro	Altura (mm)	Massa (kg)	Tensão de rotura (MPa)
fcm35_La40	1	294.5	12.077	35.5
	2	295.5	12.107	35.4
	3	295.0	12.096	36.1
	4	297.5	12.056	35.2
	5	295.0	11.975	30.2
fcm35_La60	1	297.0	12.153	34.8
	2	293.0	11.986	31.6
	3	298.5	12.248	32.3
	4	297.5	12.290	33.1
fcm35_La80	1	294.0	12.135	37.3
	2	294.0	12.103	37.8
	3	296.0	12.114	37.5
	4	295.0	12.119	36.5
fcm45_La40	1	298.0	12.397	46.0
	2	298.5	12.431	45.9
	3	296.5	12.438	46.4
	4	298.5	12.446	46.5
	5	297.5	12.339	46.0
fcm45_La60	1	297.5	12.486	41.7
	2	295.3	12.308	41.8
	3	297.0	12.381	39.9
	4	297.0	12.502	41.1
	5	297.5	12.500	42.5
fcm45_La80	1	298.0	12.362	46.7
	2	294.0	12.351	48.3
	3	297.0	12.461	46.8
	4	297.5	12.402	46.7
fcm70_La40	1	298.5	12.723	69.9
	2	297.5	12.761	70.7
	3	297.5	12.766	69.8
	4	296.0	12.629	70.1
	5	298.0	12.705	69.0
fcm70_La60	1	297.0	12.645	65.9
	2	298.0	12.721	68.2
	3	297.5	12.667	76.9
fcm70_La80	1	298.0	12.794	73.8
	2	298.0	12.840	71.8
	3	299.0	12.761	72.9
	4	297.0	12.727	65.0
	5	297.5	12.743	62.3

Tabela I. 2 – Prisma de betão: massa, tensão de rotura, energia de fractura e tensão residual.

Série	Prisma	Massa (kg)	Tensão Máxima (MPa)	Desl. corresp. à tensão máx. (mm)	Energia de fractura (N/mm)	Tensão residual (MPa)
fcm35_La40	1	19.812	4.38	0.33	20481.8	4.07
	2	19.984	5.21	0.30	20919.8	4.05
	3	19.730	5.94	3.02	27664.9	5.53
fcm35_La60	1	19.843	5.66	0.27	25152.2	5.03
	2	19.928	5.46	0.17	20375.9	3.57
	3	19.980	5.43	0.12	24063.6	4.86
fcm35_La80	1	20.064	7.95	2.11	36170.0	6.79
	2	19.670	7.57	3.04	35007.6	6.72
	3	20.084	5.64	0.74	26145.5	5.01
fcm45_La40	1	20.521	4.55	0.17	17616.3	3.52
	2	20.380	5.71	1.90	26131.7	4.91
	3	20.162	5.03	0.14	18692.1	3.67
fcm45_La60	1	20.358	7.62	0.62	32718.2	5.86
	2	20.246	7.47	2.98	34812.8	6.99
	3	20.534	7.07	0.25	31177.9	5.96
fcm45_La80	1	20.391	4.40	0.13	17806.3	3.57
	2	20.282	4.45	2.40	20455.5	3.67
	3	20.400	4.50	0.16	16635.86	3.07
fcm70_La40	1	21.124	8.88	1.03	37271.1	6.72
	2	21.084	10.06	0.91	40685.9	6.54
	3	21.088	8.88	0.64	34263.5	5.53
fcm70_La60	1	20.771	6.72	0.87	24308.7	3.15
	2	20.716	9.01	0.51	28106.8	2.67
	3	20.477	7.27	0.27	23964.2	2.87
fcm70_La80	1	20.663	9.71	1.25	41168.1	6.92
	2	20.885	10.21	0.78	42422.5	7.50
	3	21.026	8.60	0.49	32034.2	4.63

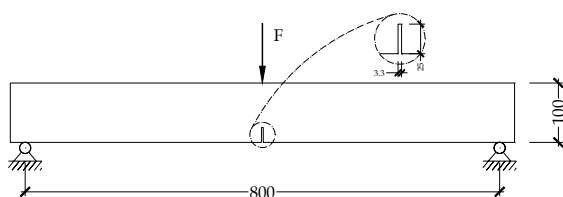


Figura I. 1 – Geometria geral dos provetes.

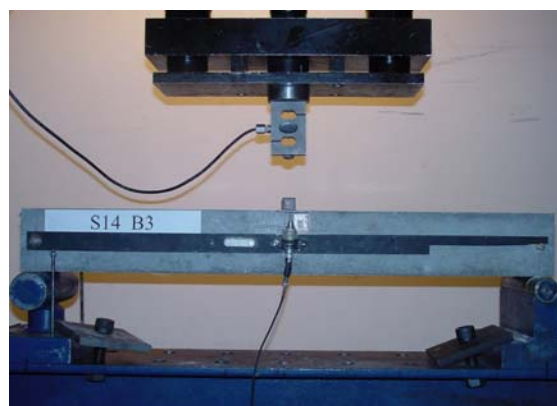


Figura I. 2 – Configuração geral dos ensaios.

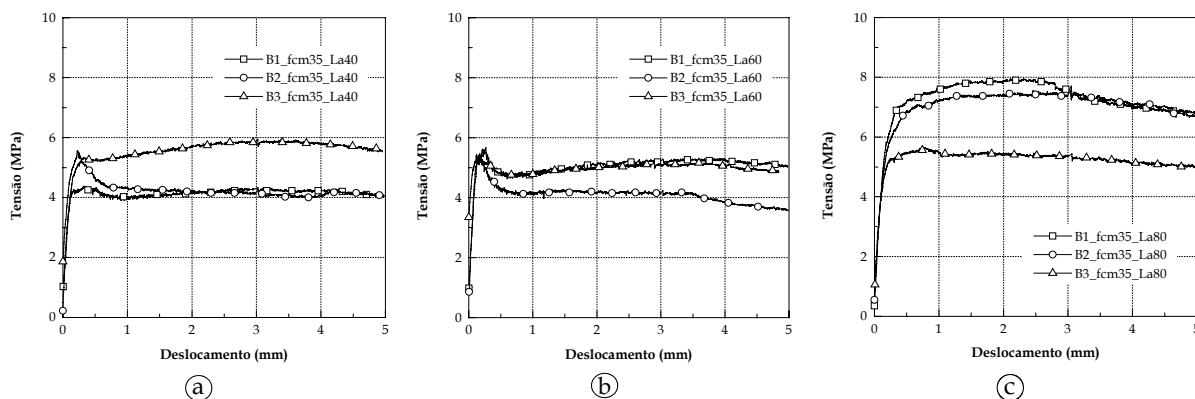


Figura I. 3 – Diagrama deslocamento *versus* tensão para os provetes com entalhe para a série fcm35_La40 (a), fcm35_La60 (b) e fcm35_La80 (c).

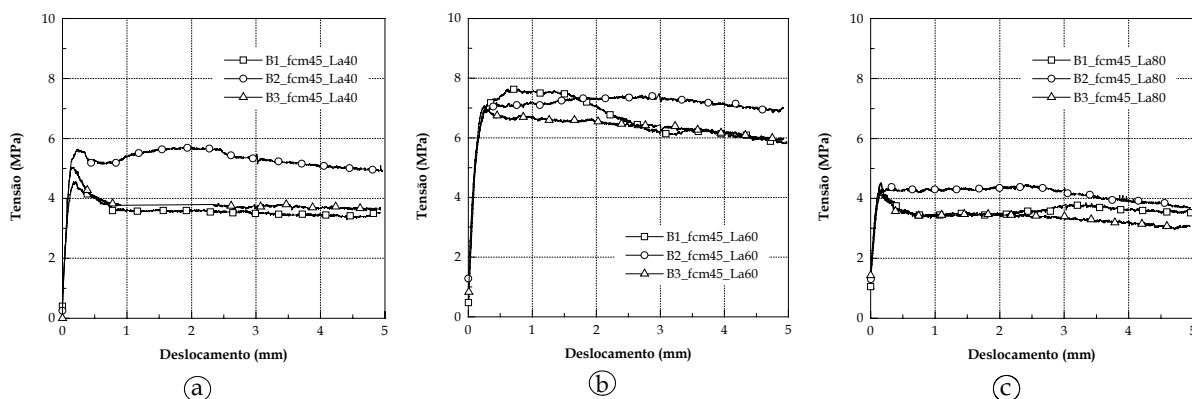


Figura I. 4 – Diagrama deslocamento *versus* tensão para os provetes com entalhe para a série fcm45_La40 (a), fcm45_La60 (b) e fcm45_La80 (c).

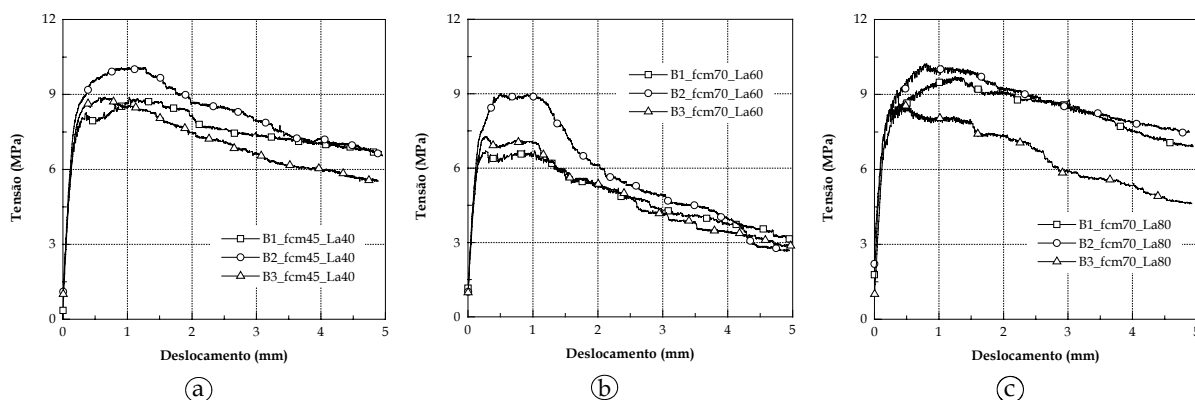


Figura I. 5 – Diagrama deslocamento *versus* tensão para os provetes com entalhe para a série fcm70_La40 (a), fcm70_La60 (b) e fcm70_La80 (c).

Anexo II

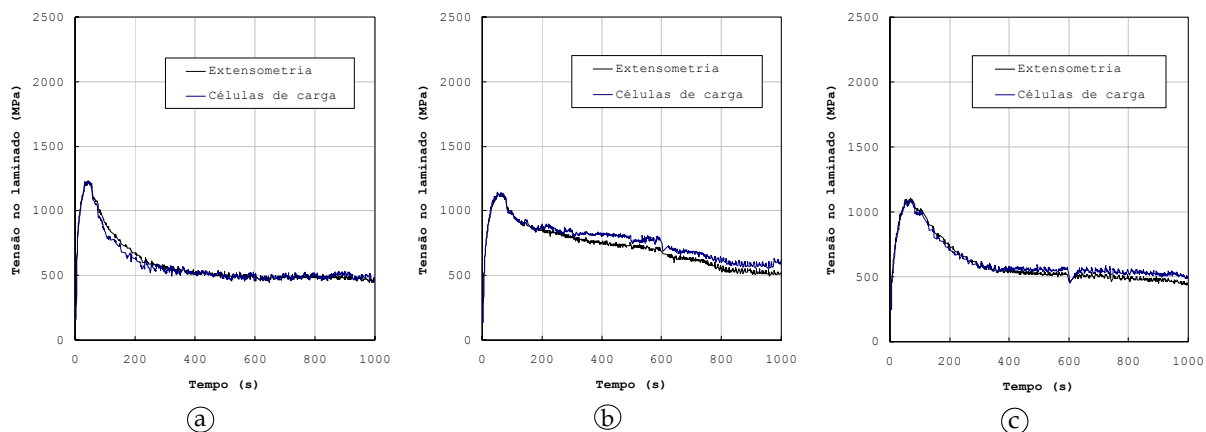


Figura II. 1 – Diagrama tempo *versus* tensão no laminado para os provetes B1_fcm35_La40 (a), B2_fcm35_La40 (b) e B3_fcm35_La40 (c).

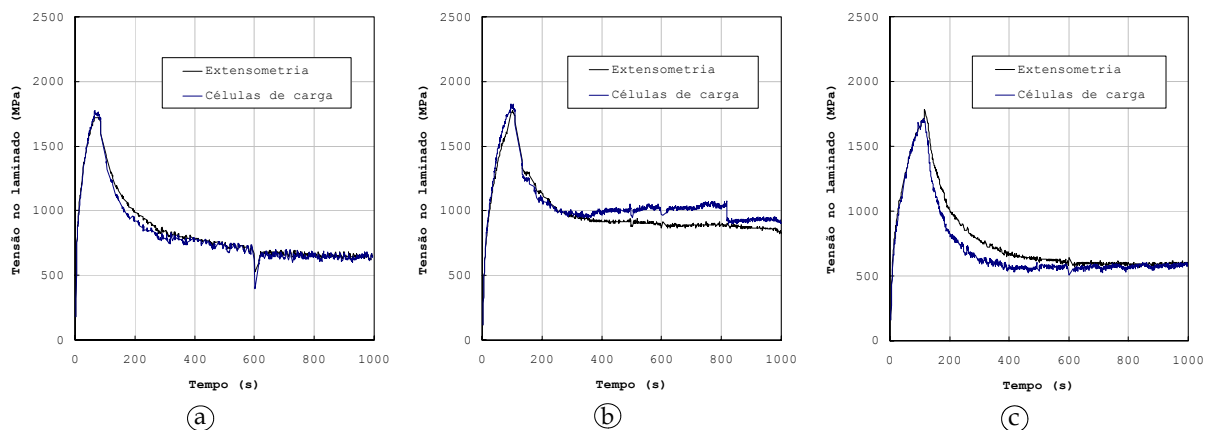


Figura II. 2 – Diagrama tempo *versus* tensão no laminado para os provetes B1_fcm35_La60 (a), B2_fcm35_La60 (b) e B3_fcm35_La60 (c).

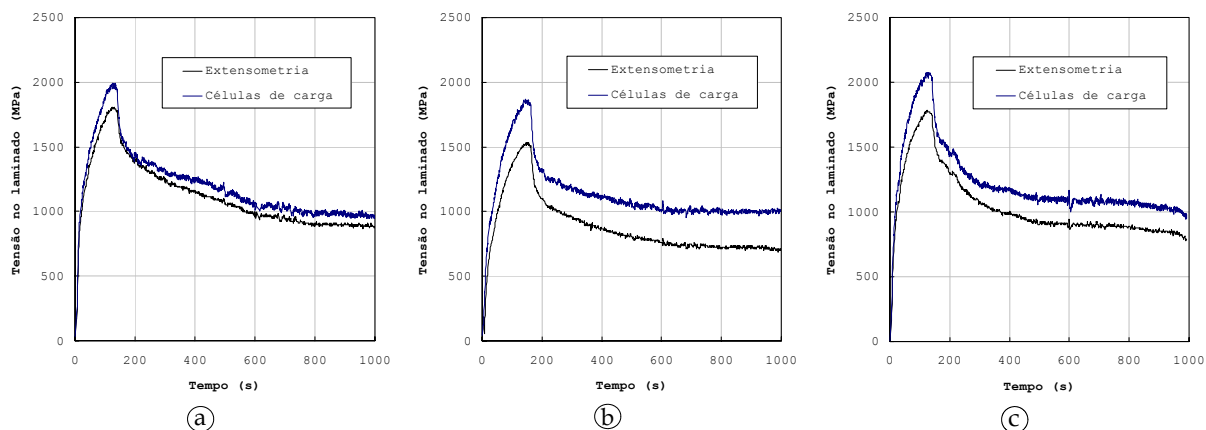


Figura II. 3 – Diagrama tempo *versus* tensão no laminado para os provetes B1_fcm35_La80 (a), B2_fcm35_La80 (b) e B3_fcm35_La80 (c).

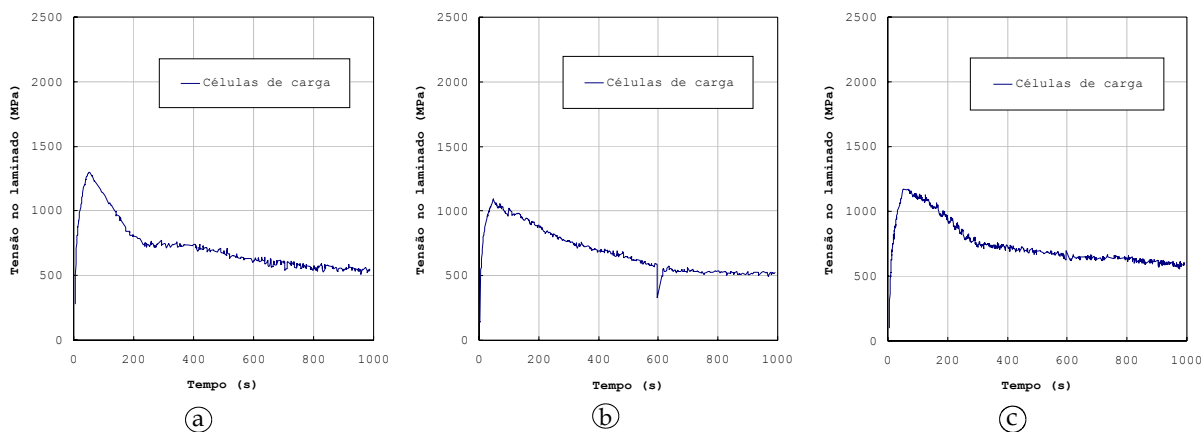


Figura II. 4 – Diagrama tempo *versus* tensão no laminado para os provetes B1_fcm45_La40 (a), B2_fcm45_La40 (b) e B3_fcm45_La40 (c).

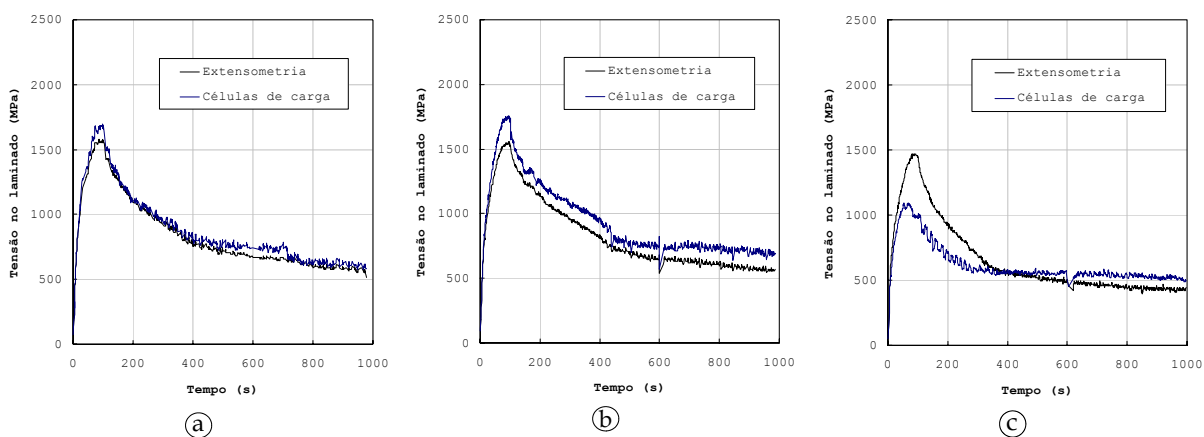


Figura II. 5 – Diagrama tempo *versus* tensão no laminado para os provetes B1_fcm45_La60 (a), B2_fcm45_La60 (b) e B3_fcm45_La60 (c).

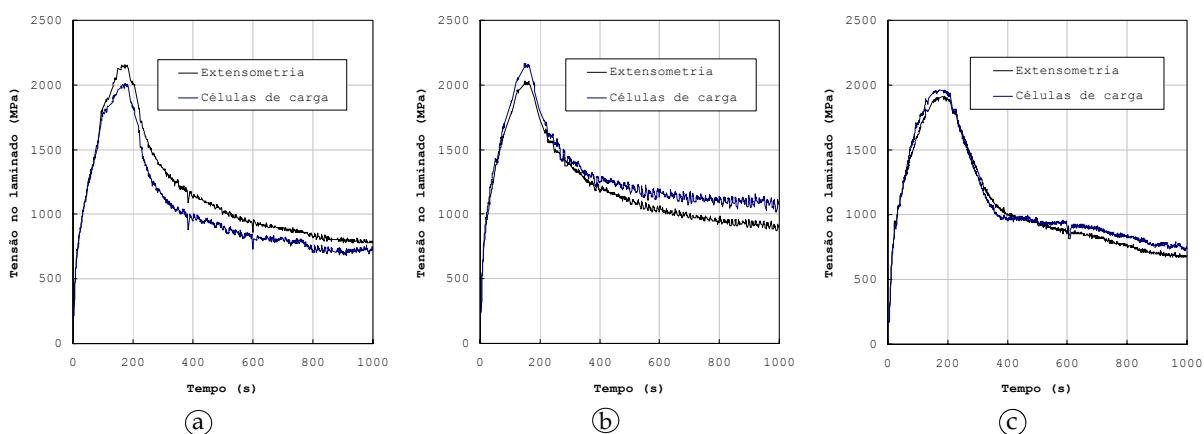


Figura II. 6 – Diagrama tempo *versus* tensão no laminado para os provetes B1_fcm45_La80 (a), B2_fcm45_La80 (b) e B3_fcm45_La80 (c).

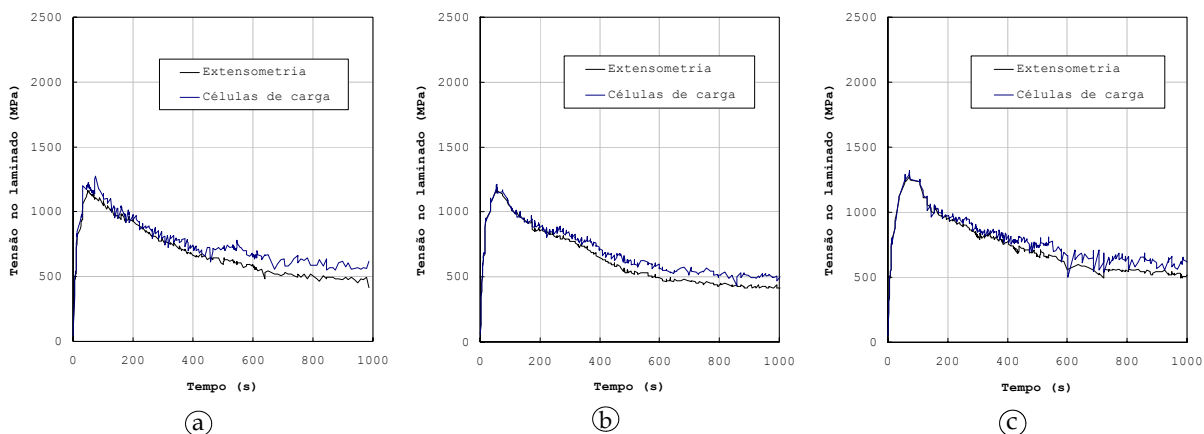


Figura II. 7 – Diagrama tempo *versus* tensão no laminado para os provetes B1_fcm70_La40 (a), B2_fcm70_La40 (b) e B3_fcm70_La40 (c).

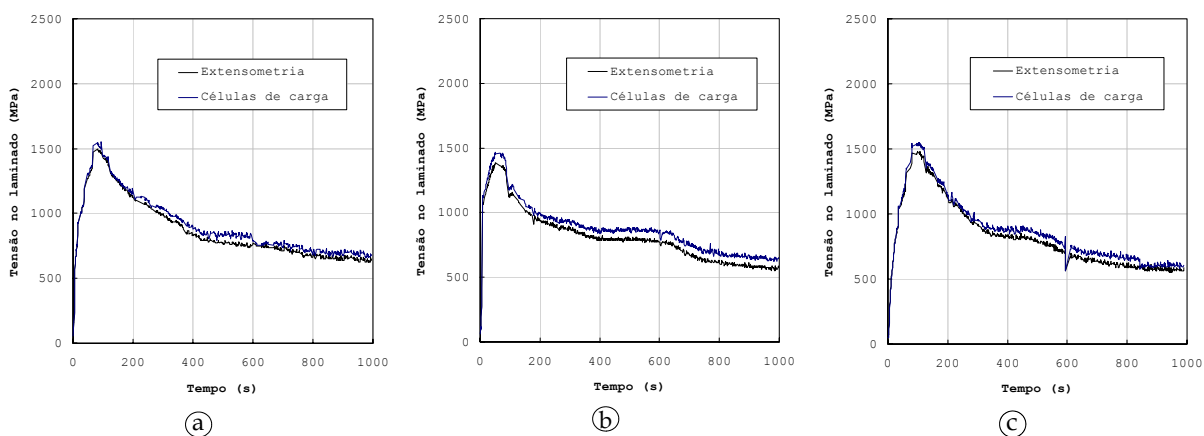


Figura II. 8 – Diagrama tempo *versus* tensão no laminado para os provetes B1_fcm70_La60 (a), B2_fcm70_La60 (b) e B3_fcm70_La60 (c).

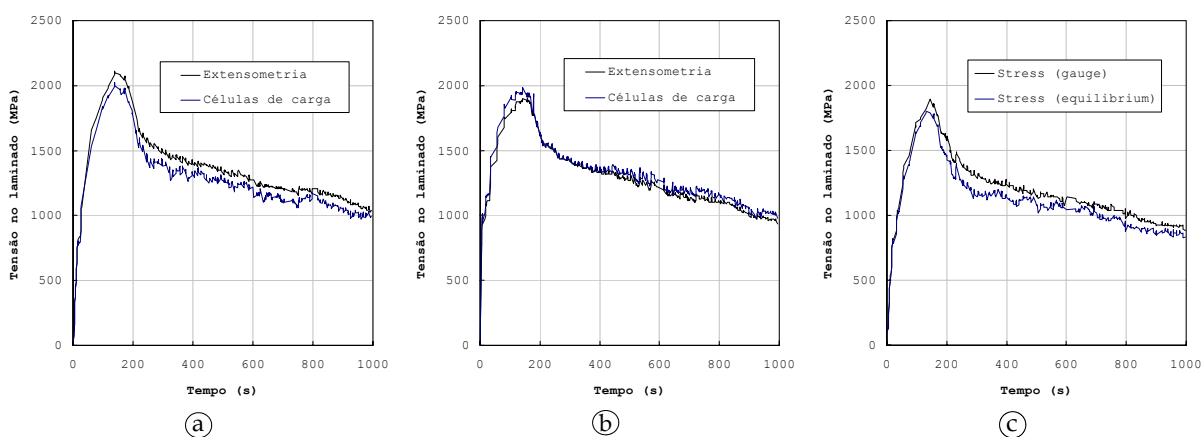


Figura II. 9 – Diagrama tempo *versus* tensão no laminado para os provetes B1_fcm70_La80 (a), B2_fcm70_La80 (b) e B3_fcm70_La80 (c).

Anexo III

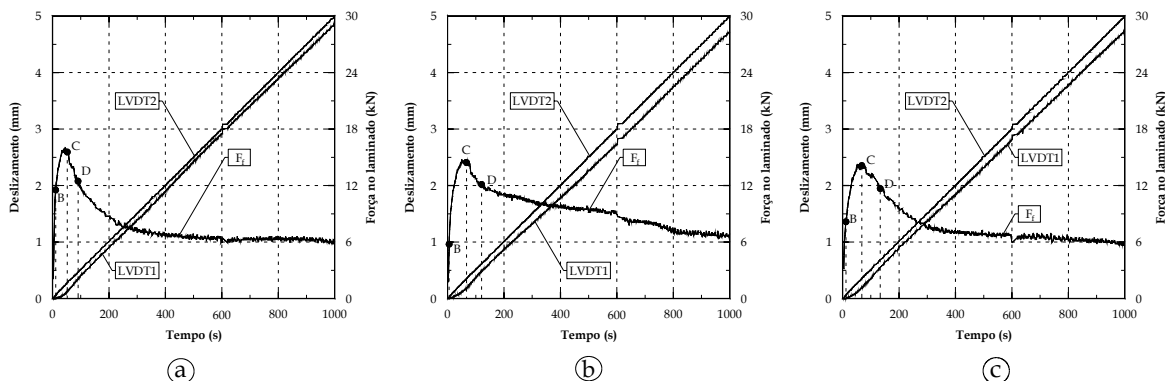


Figura III. 1 – Diagrama tempo versus deslizamento e força no laminado para os provetes B1_fcm35_La40 (a), B2_fcm35_La40 (b) e B3_fcm35_La40 (c).

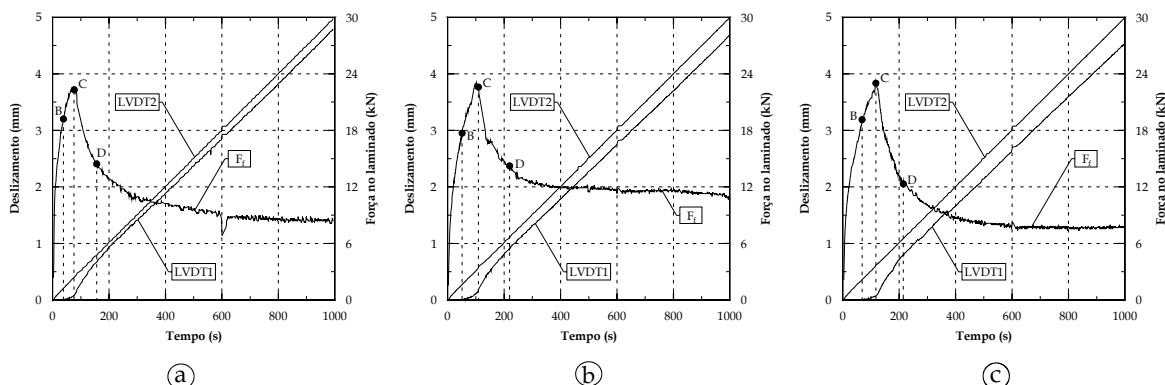


Figura III. 2 – Diagrama tempo versus deslizamento e força no laminado para os provetes B1_fcm35_La60 (a), B2_fcm35_La60 (b) e B3_fcm35_La60 (c).

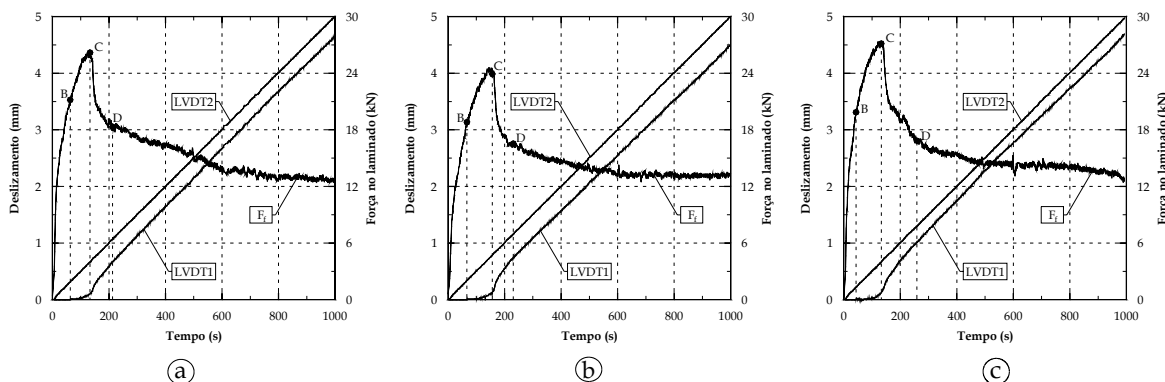


Figura III. 3 – Diagrama tempo versus deslizamento e força no laminado para os provetes B1_fcm35_La80 (a), B2_fcm35_La80 (b) e B3_fcm35_La80 (c).

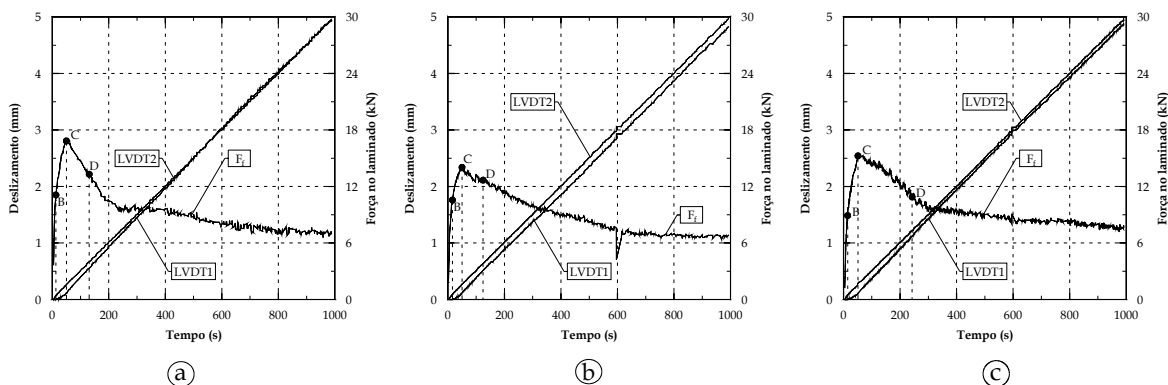


Figura III. 4 – Diagrama tempo *versus* deslizamento e força no laminado para os provetes B1_fcm45_La40 (a), B2_fcm45_La40 (b) e B3_fcm45_La40 (c).

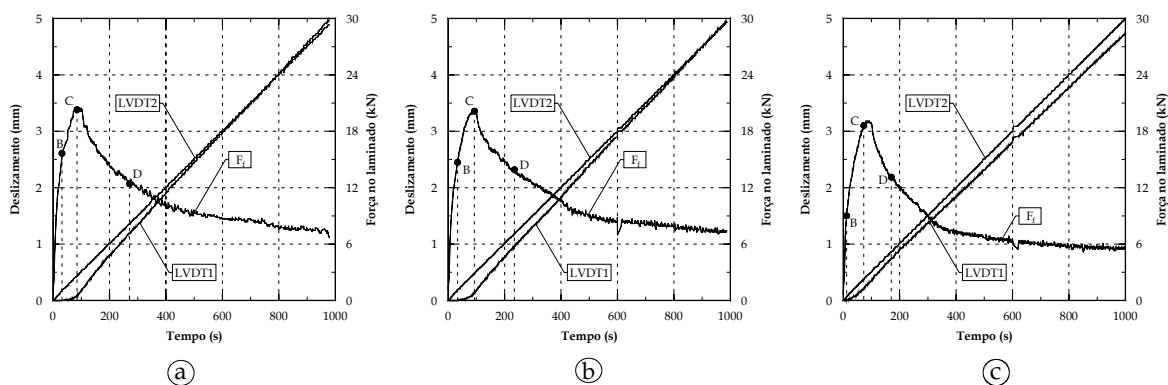


Figura III. 5 – Diagrama tempo *versus* deslizamento e força no laminado para os provetes B1_fcm45_La60 (a), B2_fcm45_La60 (b) e B3_fcm45_La60 (c).

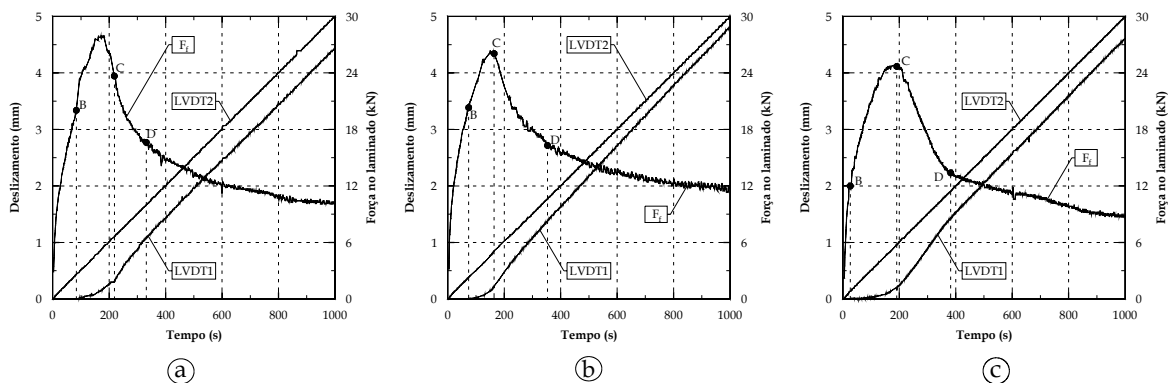


Figura III. 6 – Diagrama tempo *versus* deslizamento e força no laminado para os provetes B1_fcm45_La80 (a), B2_fcm45_La80 (b) e B3_fcm45_La80 (c).

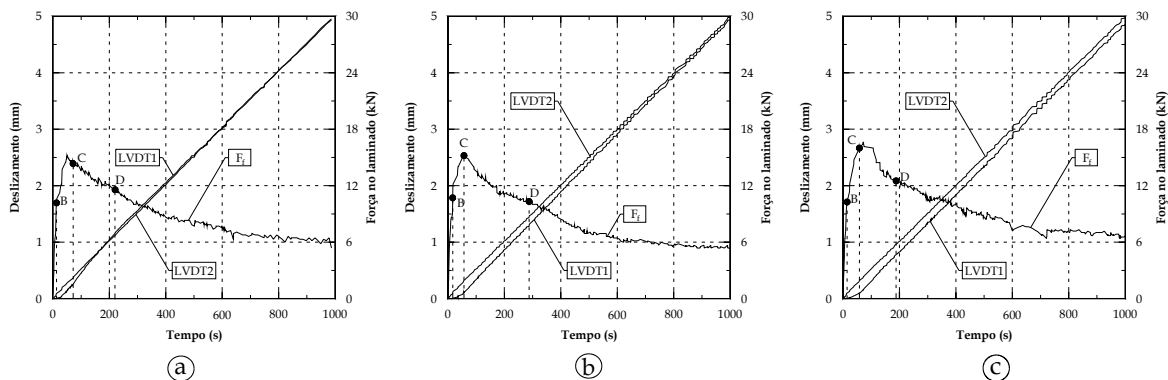


Figura III. 7 – Diagrama tempo *versus* deslizamento e força no laminado para os provetes B1_fcm70_La40 (a), B2_fcm70_La40 (b) e B3_fcm70_La40 (c).

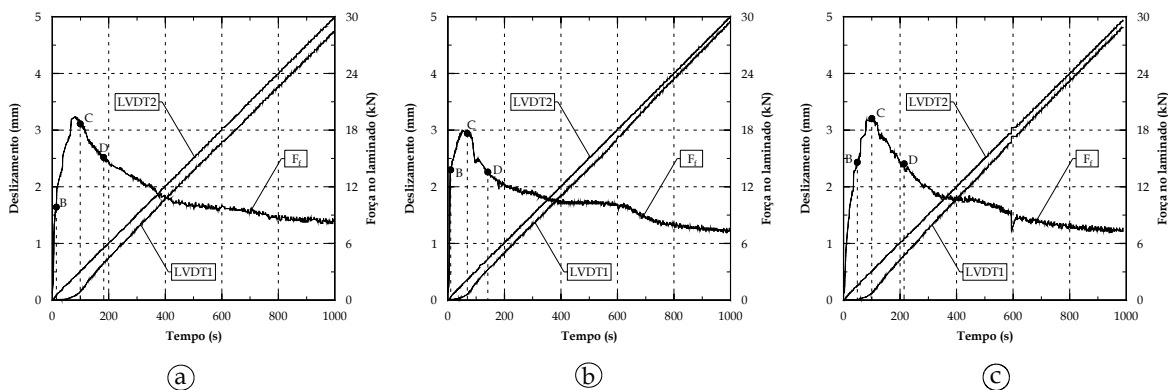


Figura III. 8 – Diagrama tempo *versus* deslizamento e força no laminado para os provetes B1_fcm70_La60 (a), B2_fcm70_La60 (b) e B3_fcm70_La60 (c).

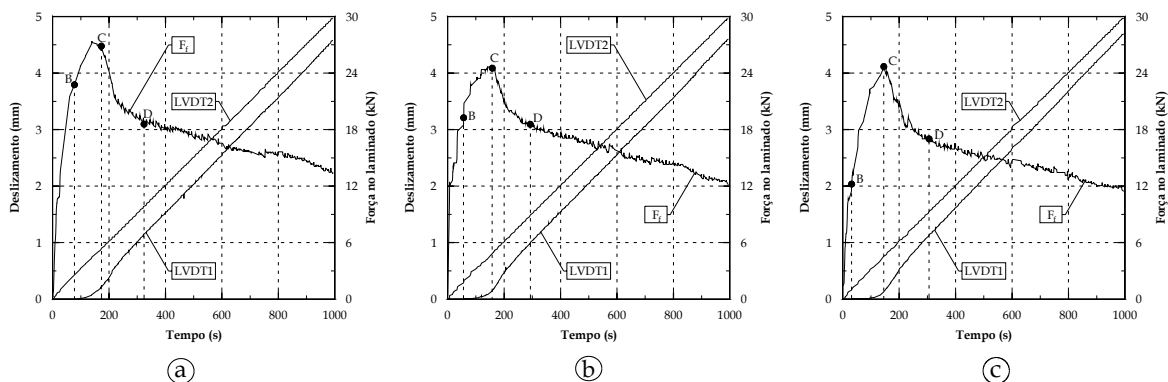


Figura III. 9 – Diagrama tempo *versus* deslizamento e força no laminado para os provetes B1_fcm70_La80 (a), B2_fcm70_La80 (b) e B3_fcm70_La80 (c).