



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Civil

**Determinação da resistência ao esmagamento de laminados multidirecionais de
CFRP por via experimental**

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

Relatório 11-DEC/E-29

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

Data: Novembro de 2011

Nº de páginas: 19

Palavras-chave: Resistência ao esmagamento; MD-CFRP



ÍNDICE GERAL

1	INTRODUÇÃO	5
2	PROGRAMA EXPERIMENTAL	5
2.1	PROVETE E CONFIGURAÇÃO DE ENSAIO	5
2.2	PROGRAMA DE ENSAIOS	8
2.3	CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DOS LAMINADOS MDL-CFRP	8
3	RESULTADOS	11
4	CONCLUSÕES	18
5	AGRADECIMENTOS	19



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Geometria, eixos e dimensões dos provetes para os ensaios de esmagamento.	6
Figura 2 – Setup dos ensaios de esmagamento: (a) fotografia; (b) esquema da instrumentação na zona do furo.	7
Figura 3 – Posição dos extensómetros.	7
Figura 4 – Resultados dos ensaios de esmagamento: (a) Série M8; (b) Série M10.....	14
Figura 5 – Evolução da tensão de esmagamento máxima em função do pré-esforço aplicado nos parafusos: (a) M8; (b) M10.	17
Figura 6 – Modos de rotura obtidos nos ensaios de esmagamento: (a) vista global de todos os provetes; (b) provete sem aplicação de pré-esforço; (c) provete com aplicação de pré-esforço.....	17



ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Programa experimental.	8
Tabela 2 – Medições efetuadas aos provetes de esmagamento para parafuso M8.	9
Tabela 3 – Medições efetuadas aos provetes de esmagamento para parafuso M10.	9
Tabela 4 – Medições efetuadas aos provetes de esmagamento na zona dos furos para parafuso M8.	10
Tabela 5 – Medições efetuadas aos provetes de esmagamento na zona dos furos para parafuso M10.	10
Tabela 6 – Resultados dos ensaios de esmagamento em provetes de MDL para parafuso M8.	12
Tabela 7 – Resultados dos ensaios de esmagamento em provetes de MDL para parafuso M10.	13
Tabela 8 - Variação das extensões ao longo dos ensaios para as séries M8 e M10.	15



1 INTRODUÇÃO

Na sequência dos trabalhos anteriores em que se caracterizou o laminado multidirecional (MDL) de CFRP produzido no INEGI e o comportamento da ligação entre este e o betão, surgiram alguns pontos de partida para o presente trabalho, nomeadamente, o alargamento das campanhas de caracterização da resistência ao esmagamento do MDL, através da variação do diâmetro do furo e dos níveis de pré-esforço aplicado neste.

O presente relatório descreve os ensaios adicionais de caracterização mecânica do MDL, realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (LEST).

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi desenvolvido tendo como objetivo a determinação da resistência ao esmagamento de laminados multidireccionais de CFRP. Para tal foram realizados ensaios de esmagamento foram divididos em dois grupos de três séries. Os grupos dependiam do diâmetro do furo nos provetes MDL, podendo estes ser 8 ou 10 mm, para um parafuso M8 e M10, respetivamente. Para cada grupo foram realizadas três séries, em que variava o valor de pré-esforço aplicado nos parafusos.

2.1 Proverte e configuração de ensaio

A caracterização da resistência ao esmagamento do MDL foi realizada de acordo com as prescrições incluídas na norma ASTM D5961 – 05 (2005).

A furação do laminado foi realizada com recurso a broca normal de madeira com a dimensão final do furo, máquina de furação de base fixa e suporte dos provetes no meio de duas placas de acrílico. A furação foi realizada de forma gradual de modo a que o desperdício originado pudesse ir saindo da zona do furo em vez de ficar acumulado neste. As placas de acrílico têm como objetivo diminuir a delaminação provocada pela entrada (em cima) e pela saída (em baixo) da broca. Foram usadas placas de acrílico transparente de modo a se poder localizar a marcação do furo.

Na Figura 1 apresenta-se um esquema tipo dos provetes usados nos ensaios de esmagamento com indicação das dimensões relevantes.

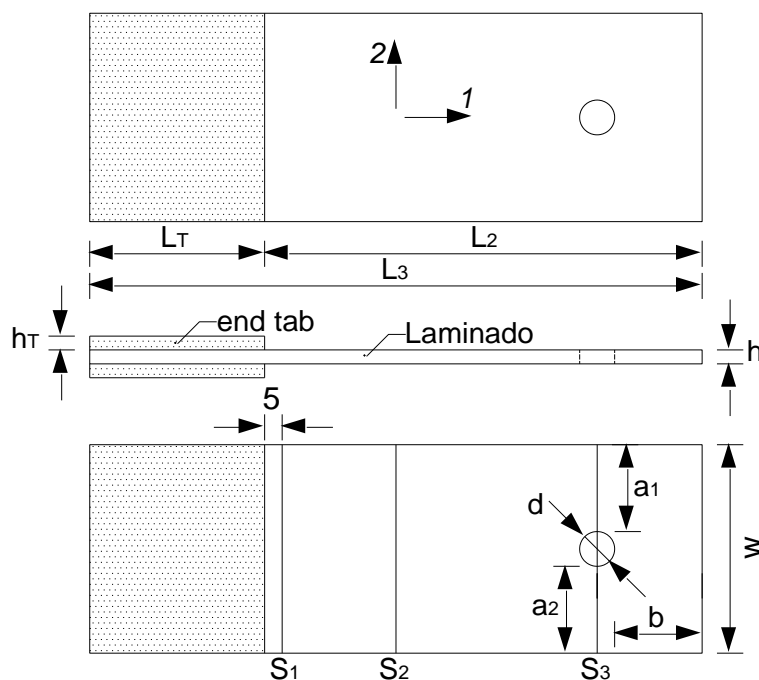


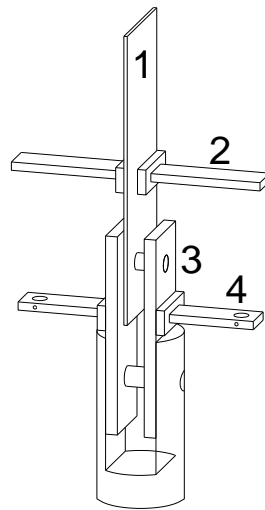
Figura 1 – Geometria, eixos e dimensões dos provetes para os ensaios de esmagamento.

Os ensaios de esmagamento foram realizados num servo-atuador de tração/compressão com uma célula de carga de 300 kN. Para estes ensaios foi necessário desenvolver um conjunto de peças metálicas que permitissem a amarração dos provetes e outro que permitisse a colocação dos transdutores para se efetuar a aquisição de dados. Na Figura 2 apresenta-se a configuração do ensaio utilizado onde se pode identificar o sistema de aquisição, nomeadamente, as peças onde estão fixos os transdutores que leem o deslocamento relativo na zona do furo e as peças que estão fixas ao provete e servem de batente para os transdutores. Pode-se ainda ver o sistema de amarras rotuladas que faz a ligação do provete ao atuador na zona dos “end tabs”.

O controlo dos ensaios foi efetuado por um transdutor externo (precisão 1.0 μm) acoplado ao equipamento. A velocidade de ensaio utilizada e recomendada na norma é de 2.0 mm/min. As variáveis de aquisição adotadas foram o deslocamento interno do atuador e a força medida por este, o deslocamento do transdutor externo que havia sido acoplado ao atuador e ainda os deslocamentos medidos pelos dois transdutores colocados na zona do furo.



(a)



(b)

- Legenda:
1 – Laminado
2 – Batentes dos LVDTs
3 – Parafuso M8/M10
4 – Peças que suportam os LVDTs

Figura 2 – Setup dos ensaios de esmagamento: (a) fotografia; (b) esquema da instrumentação na zona do furo.

Na Figura 3 apresenta-se um esquema da instrumentação utilizada nos ensaios de esmagamento.



Figura 3 – Posição dos extensómetros.



2.2 Programa de ensaios

Tal como foi dito anteriormente os ensaios de esmagamento foram divididos em dois grupos de três séries.

Os provetes utilizados para determinação da resistência ao esmagamento, foram identificados de acordo com a sigla $MDLi_BSj_n$, em que:

- i – Diâmetro do furo nos provetes MDL podendo o índice i ser 8 ou 10, respetivamente, para os parafusos M8 e M10;
- j – Valor do pré-esforço aplicado nos parafusos;
- n – Número de ordem do provete.

O pré-esforço aplicado nas ancoragens foi conseguido através da aplicação de um momento de aperto com recurso a uma chave dinamométrica.

Na Tabela 1 apresenta-se o programa experimental realizado.

Tabela 1 – Programa experimental.

Designação	Diâmetro do furo [mm]	Nº de provetes	Momento de aperto [Nxm]
MDL8_BS0_n	8	3	0
MDL8_BS25_n	8	3	25
MDL8_BS50_n	8	3	50
MDL10_BS0_n	10	3	0
MDL10_BS40_n	10	3	40
MDL10_BS80_n	10	3	80

2.3 Caracterização geométrica dos laminados MDL-CFRP

Na Tabela 2 e na Tabela 3 apresentam-se os resultados das medições efetuadas aos provetes de MDL nas secções S_1 , S_2 e S_3 , acima definidas (ver Figura 1), com um paquímetro digital com 0.01 mm de resolução, para um parafuso com diâmetro de 8 mm (M8) e para um parafuso com diâmetro de 10 mm (M10), respetivamente.

Na Tabela 4 e na Tabela 5 são apresentadas as restantes medições efetuadas (ver Figura 1), nomeadamente, os valores de a_1 , a_2 e b , que permitem definir a localização do furo, e ainda d_m que é o valor médio do diâmetro do furo, para um parafuso com diâmetro de 8 mm (M8) e para um parafuso com diâmetro de 10 mm (M10), respetivamente.



Tabela 2 – Medições efetuadas aos provetes de esmagamento para parafuso M8.

Provete	Secção S ₁		Secção S ₂		Secção S ₃		Dimensões médias			
	L ₂ [mm]	L ₃ [mm]	w [mm]	h [mm]	w [mm]	h [mm]	w [mm]	h [mm]	w [mm]	h [mm]
MDL8_BS0_1	114.5	164.5	47.75	2.03	47.80	2.05	47.82	2.08	47.79 (0.0%)	2.05 (0.0%)
MDL8_BS0_2	113.5	163.5	46.79	2.05	46.72	2.11	46.73	2.10	46.75 (0.0%)	2.09 (0.0%)
MDL8_BS0_3	115.0	165.0	47.84	2.13	47.82	2.11	47.83	2.08	47.83 (0.0%)	2.11 (0.0%)
MDL8_BS25_1	114.5	164.5	47.89	2.09	47.94	2.11	47.88	2.06	47.90 (0.0%)	2.09 (0.0%)
MDL8_BS25_2	115.0	165.0	47.88	2.08	47.90	2.08	47.85	2.05	47.88 (0.0%)	2.07 (0.0%)
MDL8_BS25_3	114.5	164.5	47.85	2.10	47.89	2.06	48.03	2.05	47.92 (0.0%)	2.07 (0.0%)
MDL8_BS50_1	115.0	165.0	48.86	2.13	48.88	2.11	48.81	2.13	48.85 (0.0%)	2.12 (0.0%)
MDL8_BS50_2	115.0	165.0	47.86	2.15	47.83	2.16	47.90	2.14	47.86 (0.0%)	2.15 (0.0%)
MDL8_BS50_3	114.5	164.5	47.71	2.14	47.78	2.15	47.71	2.11	47.73 (0.0%)	2.13 (0.0%)

Nota: Os valores dentro de parênteses correspondem ao coeficiente de variação.

Tabela 3 – Medições efetuadas aos provetes de esmagamento para parafuso M10.

Provete	Secção S ₁		Secção S ₂		Secção S ₃		Dimensões médias			
	L ₂ [mm]	L ₃ [mm]	w [mm]	h [mm]	w [mm]	h [mm]	w [mm]	h [mm]	w [mm]	h [mm]
MDL10_BS0_1	124.5	174.5	59.89	2.13	59.92	2.10	59.85	2.07	59.89 (0.0%)	2.10 (0.0%)
MDL10_BS0_2	124.0	174.0	59.67	2.10	59.67	2.08	59.65	2.11	59.66 (0.0%)	2.10 (0.0%)
MDL10_BS0_3	124.5	174.5	59.75	2.14	59.79	2.13	59.72	2.15	59.75 (0.0%)	2.14 (0.0%)
MDL10_BS40_1	124.5	174.5	59.72	2.10	59.77	2.10	59.80	2.06	59.76 (0.0%)	2.09 (0.0%)
MDL10_BS40_2	124.5	174.5	59.84	2.12	59.82	2.10	59.83	2.10	59.83 (0.0%)	2.11 (0.0%)
MDL10_BS40_3	124.5	174.5	59.68	2.14	59.67	2.15	59.67	2.13	59.67 (0.0%)	2.14 (0.0%)
MDL10_BS80_1	123.5	173.5	59.74	2.16	59.78	2.15	59.82	2.13	59.78 (0.0%)	2.15 (0.0%)
MDL10_BS80_2	125.0	175.0	59.76	2.10	59.74	2.10	59.75	2.10	59.75 (0.0%)	2.10 (0.0%)
MDL10_BS80_3	124.0	174.0	59.76	2.12	59.77	2.12	59.76	2.12	59.76 (0.0%)	2.12 (0.0%)

Nota: Os valores dentro de parênteses correspondem ao coeficiente de variação.



Conforme se pode constatar nas tabelas apresentadas, o processo de corte por jacto de água foi bastante eficiente, uma vez que os coeficientes de variação das medidas apresentadas são nulos. Em relação à furação dos laminados, registam-se variações mais expressivas nos provetes M8 comparativamente com os M10. Este será um aspeto a ter em conta em futuras campanhas experimentais. Contudo verifica-se que o diâmetro do furo (d_m) foi ligeiramente abaixo do diâmetro do parafuso, quer para o M8 e para o M10. Assim garante-se desde logo que o parafuso está em contacto com o laminado desde os primeiros instantes do ensaio.

Tabela 4 – Medições efetuadas aos provetes de esmagamento na zona dos furos para parafuso M8.

Provete	Zona do Furo			
	a_1 [mm]	a_2 [mm]	b [mm]	d_m [mm]
MDL8_BS0_1	21.06	18.82	26.14	7.97
MDL8_BS0_2	20.63	18.28	26.17	7.92
MDL8_BS0_3	21.04	18.85	24.99	7.96
MDL8_BS25_1	21.08	18.85	24.96	7.91
MDL8_BS25_2	21.00	19.07	24.83	7.93
MDL8_BS25_3	21.05	19.01	24.96	7.93
MDL8_BS50_1	21.08	21.00	25.60	7.85
MDL8_BS50_2	20.90	19.07	24.88	7.90
MDL8_BS50_3	20.93	19.10	26.16	7.86

Tabela 5 – Medições efetuadas aos provetes de esmagamento na zona dos furos para parafuso M10.

Provete	Zona do Furo			
	a_1 [mm]	a_2 [mm]	b [mm]	d_m [mm]
MDL10_BS0_1	24.60	25.58	25.63	9.82
MDL10_BS0_2	24.90	25.06	25.50	9.88
MDL10_BS0_3	25.06	25.08	25.79	9.87
MDL10_BS40_1	24.74	25.28	25.79	9.87
MDL10_BS40_2	24.53	25.41	25.65	9.83
MDL10_BS40_3	24.68	25.14	25.60	9.85
MDL10_BS80_1	25.38	25.09	25.77	9.78
MDL10_BS80_2	24.91	25.00	25.89	9.89
MDL10_BS80_3	25.42	24.73	25.92	9.86



3 RESULTADOS

Na Tabela 6 apresentam-se os resultados das três séries com parafusos M8 e na Tabela 7 apresentam-se os resultados das séries com parafusos M10.

Para cada caso apresentam-se os valores de força e tensão de esmagamento máxima e ainda o valor da extensão de esmagamento correspondente ao ponto de ocorrência desta última.

O valor da força máxima, $F_{f,max}$, foi obtido por leitura direta do valor máximo da força registada ao longo de cada ensaio. Os restantes parâmetros foram calculados de acordo com as indicações da norma na qual os ensaios se basearam, nomeadamente, a ASTM D5961 – 05 (2005).

A tensão de esmagamento máxima, $f_{f,bru}$, corresponde ao máximo valor da tensão, $f_{f,br}$, calculado da seguinte forma:

$$f_{f,br} = P/kDt \quad (3.1)$$

sendo,

P – Força registada pelo atuador em cada instante;

k – Fator que entra em conta com o número de parafusos utilizados no ensaio, sendo $k=1.0$ se for usado um parafuso e $k=2.0$ no caso de serem utilizados dois parafusos;

D – Diâmetro do furo;

t – Espessura do provete.

A extensão correspondente ao valor da máxima tensão, $\varepsilon_{f,fbu}$, corresponde ao valor da extensão, $\varepsilon_{f,ibr}$, calculada para o mesmo instante em que $f_{f,bru}$ ocorre. Essa extensão foi calculada da seguinte forma, tendo em consideração o facto de a leitura dos LVDTs não ser realizada na zona do furo:

$$\varepsilon_{f,ibr} = \left[(\delta_1 + \delta_2)/2 - \frac{F \times L_{ref}}{E_f \times A} \right] / kD \quad (3.2)$$

sendo,



δ – Deslocamento medido pelos transdutores 1 e 2 colocados nas faces laterais do provete na zona do parafuso;

F - Força registada ao longo do ensaio;

L_{ref} - Distancia entre o centro do furo e o ponto em que os LVDTs estão a ler;

E_f - Módulo de elasticidade do MDL;

A - Secção transversal do provete;

k – Fator que entra em conta com o número de parafusos utilizados no ensaio, sendo $k=1,0$ se for usado um parafuso e $k=2,0$ no caso de serem utilizados dois parafusos;

D – Diâmetro do furo.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de esmagamento em provetes de MDL para parafuso M8.

Provete	$F_{f,max}$ [kN]	$f_{f,bru}$ [MPa]	$\varepsilon_{f,f,max}$ [%]
MDL8_BS0_1	7.42	453.55	0.256
MDL8_BS0_2	8.15	493.15	0.209
MDL8_BS0_3	7.06	421.28	0.169
Média	7.54	455.99	0.212
Desvio Padrão	0.56	36.00	0.043
CoV (%)	7.36	7.89	20.55
T-Student	6.16	366.56	0.104
MDL8_BS25_1	10.24	620.40	0.129
MDL8_BS25_2	11.39	693.87	0.155
MDL8_BS25_3	11.45	697.31	0.109
Média	11.03	670.53	0.131
Desvio Padrão	0.68	43.45	0.023
CoV (%)	6.18	6.48	17.52
T-Student	9.33	562.59	0.074
MDL8_BS50_1	12.58	754.73	0.146
MDL8_BS50_2	14.59	858.99	0.252
MDL8_BS50_3	13.95	831.94	0.110
Média	13.71	815.22	0.169
Desvio Padrão	1.03	54.10	0.074
CoV (%)	7.49	6.64	43.550
T-Student	11.16	680.81	-0.014



Tabela 7 – Resultados dos ensaios de esmagamento em provetes de MDL para parafuso M10.

Provete	$F_{f,max}$ [kN]	$f_{f,bru}$ [MPa]	$\varepsilon_{f,fmax}$ [%]
MDL10_BS0_1	7.98	386.87	0.372
MDL10_BS0_2	7.73	373.35	0.282
MDL10_BS0_3	7.42	351.21	0.307
Média	7.71	370.47	0.321
Desvio Padrão	0.28	18.00	0.046
CoV (%)	3.64	4.86	14.47
T-Student	7.01	325.75	0.205
MDL10_BS40_1	13.62	661.31	0.153
MDL10_BS40_2	14.81	715.35	0.129
MDL10_BS40_3	15.04	713.87	0.180
Média	14.49	696.84	0.154
Desvio Padrão	0.76	30.78	0.025
CoV (%)	5.26	4.42	16.53
T-Student	12.60	620.38	0.091
MDL10_BS80_1	15.96	760.20	0.039
MDL10_BS80_2	13.04	628.02	0.043
MDL10_BS80_3	13.67	653.97	0.064
Média	14.22	680.73	0.048
Desvio Padrão	1.54	70.04	0.013
CoV (%)	10.80	10.29	27.665
T-Student	10.41	506.73	0.015

Pela análise dos resultados vê-se que em ambos os grupos, na série sem pré-esforço o valor médio da força máxima registada é muito semelhante. Nas séries com pré-esforço regista-se um aumento da força média com o aumento do valor do pré-esforço no grupo M8 e no primeiro incremento do grupo M10. Neste último, quando se aumenta o pré-esforço de 40 Nxm para 80 Nxm verifica-se que a força máxima se mantém praticamente igual. A explicação para esta situação prende-se com o comportamento do MDL nesta série de ensaios. Como o pré-esforço instalado é excessivamente elevado o MDL “incha” e as camadas de HS destacam-se da camada de CFK em ambas as faces. Assim, a partir desse instante a secção efetiva resistente coincide com a camada de CFK apenas.

Em relação aos valores de extensão por esmagamento verificam-se coeficientes de variação muito elevados, o que se explica pela dificuldade de garantir a verticalidade do sistema de ensaio. Ainda assim apresentam-se os valores como indicação da ordem de grandeza deste parâmetro.

Na Figura 4 apresentam-se as curvas que traduzem a relação entre a força e o deslocamento no transdutor de controlo para as três séries de ensaios.

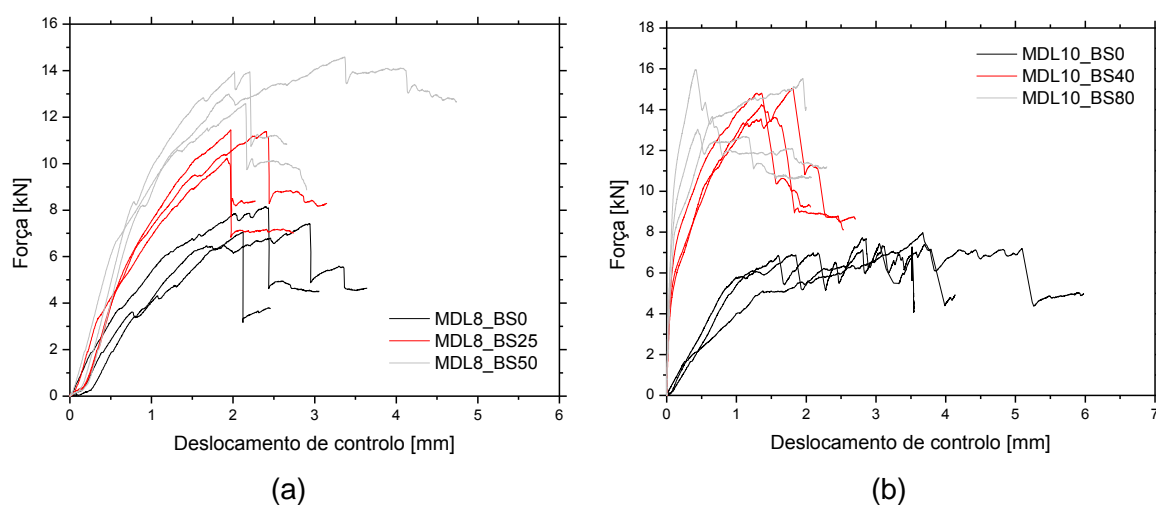


Figura 4 – Resultados dos ensaios de esmagamento: (a) Série M8; (b) Série M10



Na Tabela 8 apresentam-se os resultados obtidos pelos extensómetros para as séries com parafusos M8 e M10, respetivamente.

Tabela 4 - Variação das extensões ao longo dos ensaios para as séries M8 e M10.

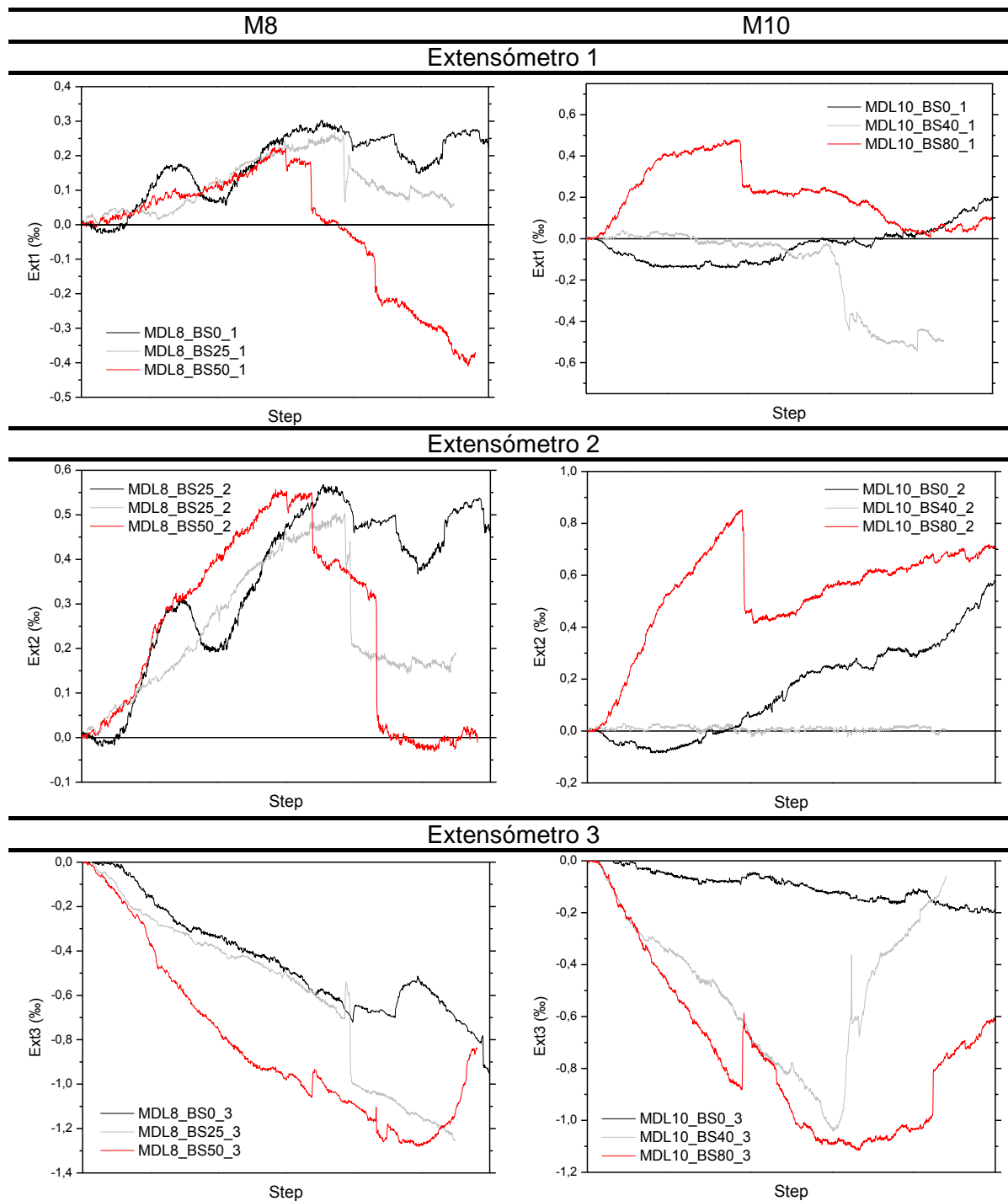
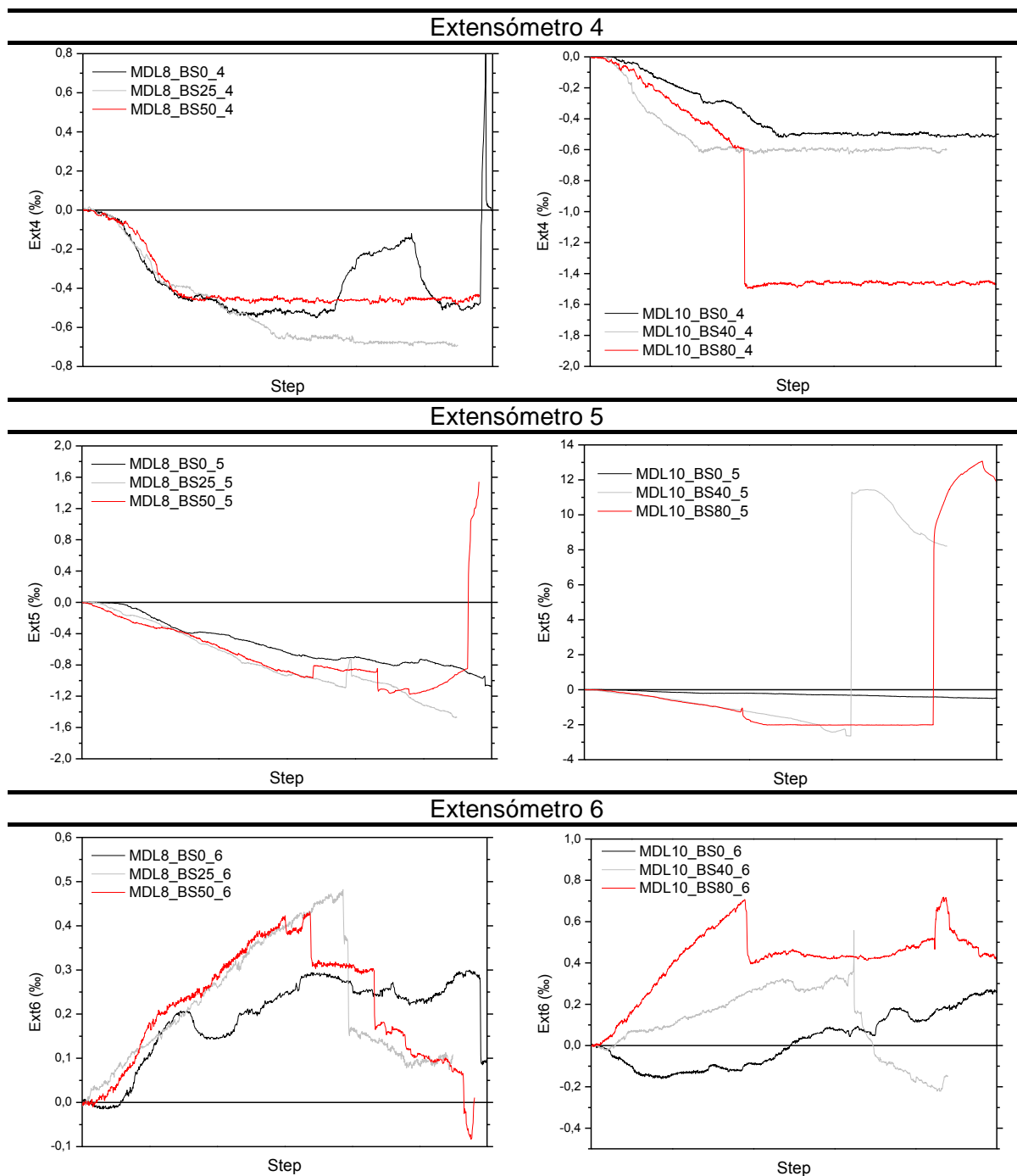




Tabela 8 (Continuação) – Variação das extensões ao longo dos ensaios para as séries M8 e M10.



Na Figura 5 pode observar-se a evolução da tensão de esmagamento máxima em função do pré-esforço aplicado nos parafusos, para M8 e M10, respetivamente.

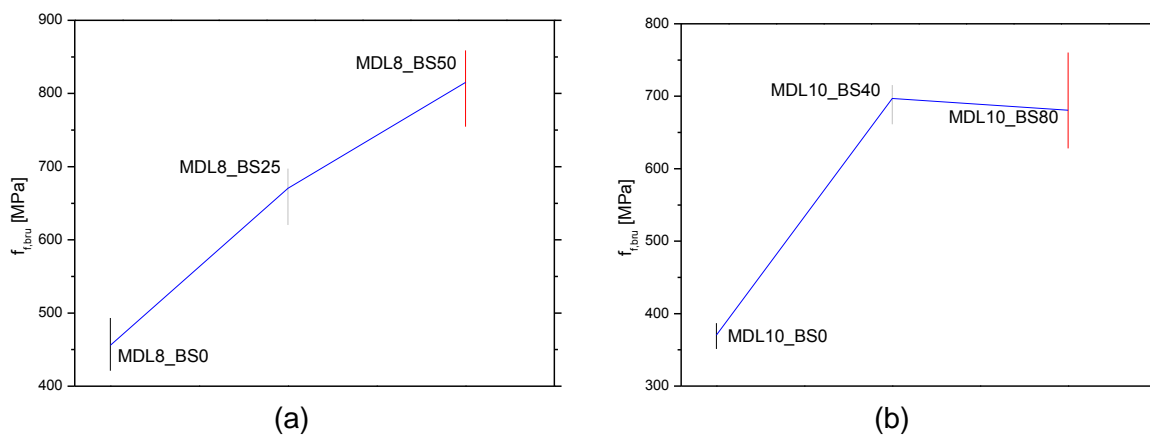


Figura 5 – Evolução da tensão de esmagamento máxima em função do pré-esforço aplicado nos parafusos: (a) M8; (b) M10.

Na Figura 6 apresentam-se os modos de rotura obtidos dos ensaios de esmagamento.

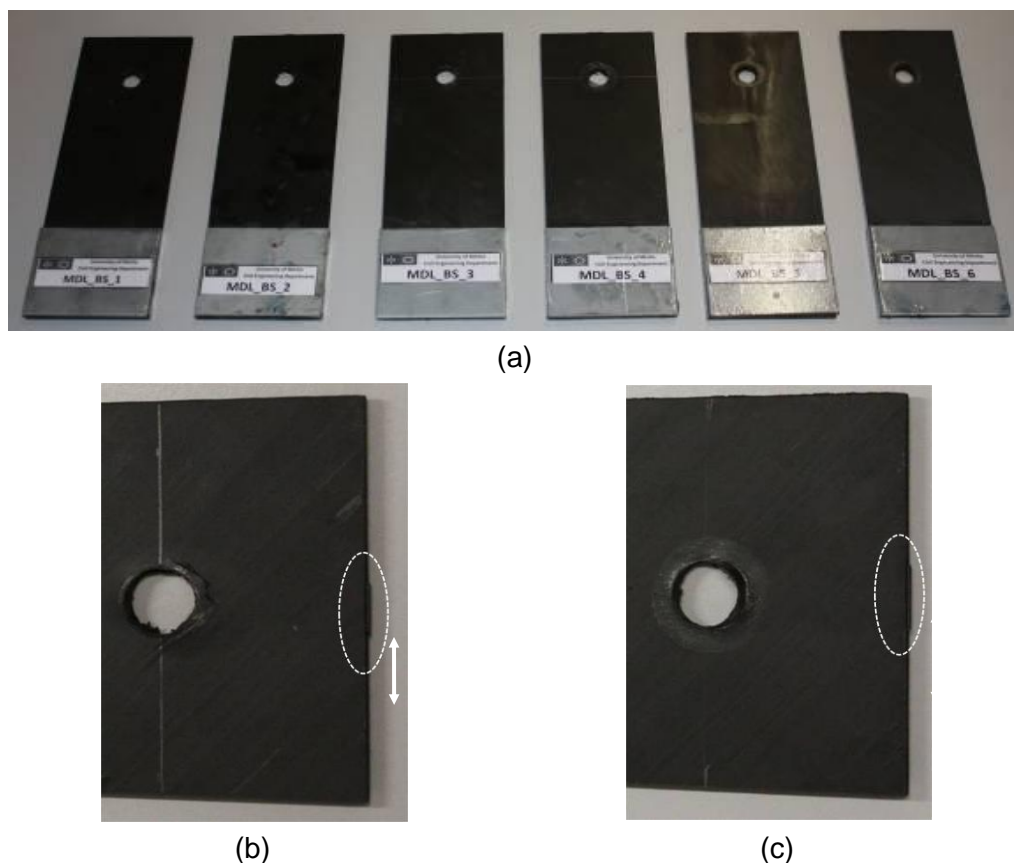


Figura 6 – Modos de rotura obtidos nos ensaios de esmagamento: (a) vista global de todos os provetes; (b) provete sem aplicação de pré-esforço; (c) provete com aplicação de pré-esforço



Em todos os ensaios efetuados ocorreu um modo de rotura misto com corte (“shearout”) e esmagamento (“bearing”). A componente de esmagamento ocorreu essencialmente nas camadas de HS, enquanto a rotura por corte se observou apenas na camada de CFK. Também se constatou que com a aplicação de pré-esforço à ancoragem, a “cunha” de rotura por corte é mais larga (ver Figura 6b e Figura 6c), corroborando os resultados numéricos obtidos.

4 CONCLUSÕES

O programa experimental realizado teve como objetivo principal a caracterização da resistência ao esmagamento do MDL, através da variação do diâmetro do furo e dos níveis de pré-esforço aplicado neste.

Analisando os resultados obtidos para os parafusos M8 verifica-se que o aumento de pré-esforço nos parafusos conduz a um incremento da resistência ao esmagamento. Contudo para as séries com parafusos M10 essa tendência não é verificada. Comparando a série MDL10_BS50 e MDL10_BS80, não se verificou um incremento na resistência ao esmagamento, pelo contrário, o que leva a concluir que existe um valor máximo de pré-esforço para o qual se verifica o aumento da resistência ao esmagamento. Este fato talvez viesse a acontecer para as séries com M8 caso se tivesse aumentado o nível de pré-esforço aplicado aos parafusos.

De acordo com as indicações da ASTM D5961 – 05 (2005) o valor da largura dos provetes de ensaio deveria ser igual ou superior a $6d$, sendo d o diâmetro do furo. Por limitações de geometria das placas iniciais de MDL-CFRP, apenas foi possível cortar provetes com 30 e 40 mm, para os diâmetros de 8 e 10 mm, respetivamente. Conforme se pode constatar, esta redução nas dimensões foi mais penalizadora no caso dos provetes com diâmetro 10 mm. Este facto poderá justificar a menor performance destes, quando comparados com os provetes de diâmetro 8mm.



5 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi financiado pelos programas COMPETE e FEDER, projeto 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 empresa S&P Clever Ibérica Lda. pelo fornecimento dos laminados unidireccionais e à TSwaterjet, Lda. pela realização do corte dos provetes a jacto de água.