

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PERFIS PULTRUDIDOS DE FIBRA DE VIDRO (GFRP) E DAS SUAS LIGAÇÕES

Correia, J. R.¹; Branco, F.A.²; Ferreira, J.G.³

¹Assistente, ²Professor Catedrático, ³Professor Auxiliar
Secção da Construção, DECivil, Instituto Superior Técnico, Lisboa - Portugal



RESUMO

Os problemas de durabilidade dos materiais tradicionais e a exigência de velocidades de construção crescentes têm impulsionado o desenvolvimento de novos materiais e soluções estruturais. Os materiais plásticos reforçados com fibras em geral, e os perfis pultrudidos de fibra de vidro (GFRP) em particular, começam a desempenhar um papel cada vez mais importante nesse domínio devido à sua elevada resistência, reduzido peso próprio e elevada durabilidade. Neste artigo descrevem-se as principais características dos perfis de GFRP e apresentam-se os resultados obtidos numa campanha de ensaios realizada no Instituto Superior Técnico, em que foi estudado o comportamento mecânico do material e o comportamento de diferentes tipos de ligações entre perfis de GFRP.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos os custos de manutenção e reparação das estruturas construídas com materiais tradicionais (sobretudo betão armado, aço e ferro) aumentaram consideravelmente. Só nos E.U.A., estima-se que 42% das cerca de 575.000 pontes da rede de estradas necessitem de reparação, sobretudo devido a problemas de corrosão dos tabuleiros (Keller, 2003). Os problemas de durabilidade dos materiais tradicionais e as exigências de ritmos de construção crescentes têm tido um efeito impulsionador no desenvolvimento e na utilização de novos materiais estruturais, mais leves, com menores exigências de manutenção e menos sujeitos à degradação causada pelos agentes ambientais.

Até recentemente o campo de aplicação dos materiais plásticos reforçados com fibras (FRP ou *Fibre Reinforced Polymer*) esteve limitado a estruturas com elevados requisitos de desempenho, como as das indústrias aeroespacial e naval. No entanto, nos últimos anos, as exigências da indústria da construção acima referidas e o próprio desenvolvimento da indústria dos FRP permitiram a expansão destes novos materiais ao sector da construção.

No caso particular dos perfis pultrudidos de fibra de vidro, ou perfis de GFRP (*Glass Fibre Reinforced Polymer*), o campo de aplicação tem sido muito diversificado. Numa fase inicial, foram utilizados quase exclusivamente em elementos não estruturais ou em estruturas secundárias, como escadas isolantes, painéis de fachada e

plataformas de trabalho de indústrias com requisitos específicos de durabilidade, como a indústria petroquímica ou a do saneamento básico. No entanto, nos últimos anos começou a surgir um número crescente de aplicações em elementos estruturais de coberturas, edifícios e mesmo em pontes pedonais (Fig. 1) e rodoviárias, construídos apenas por perfis de GFRP (Keller, 2002a; Sobrino e Pulido 2002).



Fig. 1 – Ponte de Lérida (Sobrino e Pulido, 2002).

Os perfis de GFRP possuem um grande potencial de utilização na construção, apresentando como principais vantagens face aos materiais tradicionais, as elevadas relações resistência/peso próprio e rigidez/peso próprio, a leveza, a durabilidade em ambientes agressivos, a resistência à fadiga, a transparência electromagnética e a possibilidade de produzir qualquer forma (Keller, 2002b; Karbhari e Seible, 1999). Os obstáculos à generalização da sua utilização prendem-se com o elevado custo de produção (ainda pouco competitivo na maior parte das situações), com a inexistência de regulamentação específica e com dificuldades de dimensionamento associadas à tecnologia das ligações, à deformabilidade e à susceptibilidade a fenómenos de instabilidade.

Neste artigo descrevem-se as principais características dos perfis de GFRP (a sua constituição, o processo de fabrico, as formas estruturais e as principais propriedades mecânicas e físicas) e apresentam-se os principais resultados obtidos numa campanha experimental realizada no Instituto Superior Técnico, em que foi estudado o comportamento mecânico do material e o comportamento dos principais tipos de ligações entre perfis de GFRP.

2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS PERFIS DE GFRP

Os materiais plásticos reforçados com fibras, em que se integram os perfis de GFRP, são materiais compósitos constituídos por duas fases: as fibras de reforço, que são responsáveis pelo desempenho mecânico do material, garantindo a maior parte da resistência e da rigidez; e a matriz polimérica, que funciona como a “cola” do compósito, garantindo a transferência de cargas entre as fibras e entre o compósito e as cargas aplicadas, e que protege as fibras dos agentes de degradação ambientais. Em geral, a matriz polimérica resulta da mistura de uma resina com material de enchimento (*filler*) e aditivos, que permitem melhorar certas propriedades específicas, como por exemplo, a resistência ao fogo.

Os perfis de GFRP são produzidos por pultrusão utilizando, na maior parte dos casos, fibras de vidro E, combinando filamentos contínuos longitudinais aglomerados em mechas (*rovings*) e mantas com fios em várias direcções (*mats*), embebidos numa matriz de poliéster, viniléster ou epóxi. O processo de pultrusão engloba duas fases: numa primeira fase dá-se a impregnação das fibras de reforço e a aquisição da forma final num molde aquecido, enquanto a matriz se encontra no estado líquido. Numa segunda fase ocorre a solidificação da matriz no molde, obtendo-se um perfil com a forma e as dimensões desejadas.

Até há pouco tempo as formas estruturais foram copiadas da construção metálica, produzindo-se sobretudo secções de parede fina aberta (Fig. 2). Mais recentemente, têm sido desenvolvidas diferentes secções multicelulares fechadas que, ligadas entre si por colagem, permitem formar sistemas estruturais para lajes, que têm sido utilizados sobretudo em tabuleiros de pontes (Fig. 3).

No Quadro 1 apresentam-se intervalos de variação típicos para os valores das propriedades mecânicas e físicas dos perfis de GFRP produzidos pelos principais fabricantes. Os valores das propriedades dependem essencialmente do tipo de fibras de re-

forço e matriz polimérica, da orientação e teor das fibras e, ainda, da interacção entre as fibras e a matriz.

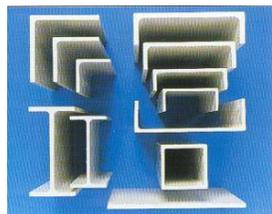


Fig. 2 – Seções transversais típicas (Fiberline, 1995).

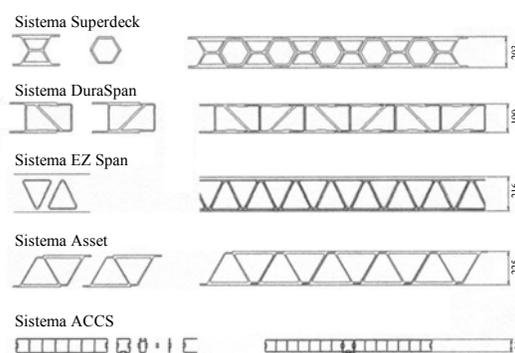


Fig. 3 – Novos sistemas estruturais para lajes (Keller, 2002b).

Quadro 1 – Valores típicos das propriedades mecânicas e físicas dos perfis de GFRP produzidos pelos principais fabricantes (adaptado de Keller, 2003; Fibeline Composites, 1995; e Creative Pultrusions, 1999).

Propriedade	Direção paralela às fibras (x)	Direção transversal às fibras (y)
Resistência à tracção (MPa)	200 – 400	50 – 60
Resistência à compressão (MPa)	200 – 400	70 – 140
Resistência ao corte (MPa)	25 – 30	
Módulo de elasticidade (GPa)	20 – 40	5 – 9
Módulo de distorção (GPa)	3 – 4	
Teor em fibras em massa (%)	50 – 70	
Densidade	1.5 – 2.0	
Coefficiente de dilatação térmica ($K^{-1} \times 10^{-6}$)	8 – 14	16 – 22
Coefficiente de condutibilidade térmica (W/K.m)	0.20 – 0.58	

3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO EXPERIMENTAL REALIZADO

Os resultados apresentados neste artigo inserem-se num estudo mais abrangente, realizado no Instituto Superior Técnico (Correia, 2004), em que foi analisada a viabilidade da utilização de perfis de GFRP na construção com funções estruturais.

Esse estudo incluiu uma campanha experimental, em que foram utilizados perfis de GFRP com secção transversal em I (200 mm x 100 mm x 10 mm), produzidos pela empresa TopGlass, que combinam fibras de vidro-E embebidas numa matriz de poliéster isoftálico.

Foram realizados ensaios para caracterizar o material em diversas vertentes: (i) ensaios de caracterização mecânica em provetes, para determinação das constantes elásticas e resistência; (ii) ensaios de envelhecimento acelerado em provetes, para investigar os efeitos dos principais agentes ambientais de degradação (água, temperatu-

ra e radiação UV) dos perfis de GFRP (Correia *et al*, 2005a) (iii) ensaios em elementos estruturais, a funcionar como vigas (Fig. 4) ou colunas (Correia *et al*, 2004); e (iv) ensaios em diferentes tipos de ligações entre provetes de perfis de GFRP.

Noutra vertente desse estudo procurou-se ainda analisar a viabilidade da ligação de perfis de GFRP a elementos de betão, em elementos estruturais híbridos GFRP-betão (Correia *et al*, 2005b). Foram realizados ensaios de conexão de corte e ensaios à flexão em vigas híbridas GFRP-betão (Fig. 5).



Fig. 4 – Ensaio à flexão de um perfil de GFRP.

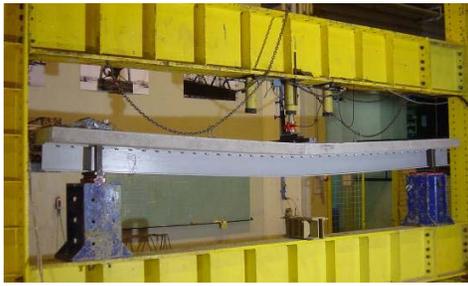


Fig. 5 – Ensaio à flexão de uma viga híbrida GFRP-betão.

Neste artigo apresentam-se os resultados dos ensaios de caracterização do material e os resultados dos ensaios em ligações entre perfis de GFRP.

4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

A caracterização de um material que é ortotrópico implica a determinação das suas constantes elásticas e resistência, quando submetido a diferentes solicitações e em diferentes direcções. Essa caracterização pode ser efectuada com base na teoria clássica dos compósitos laminados (Jones, 1999) ou, em alternativa, através de ensaios experimentais. Adoptou-se esta última abordagem, tendo sido realizados os seguintes ensaios experimentais: (i) determinação do teor em fibra de vidro; (ii) corte interlaminar; (iii) flexão; (iv) tracção; e (v) compressão.

4.1 Determinação do teor em fibra de vidro

O teor em fibra de vidro, em massa, foi estimado através do procedimento experimental indicado na norma ISO 1172 (ISO, 1996). O princípio do ensaio consiste em determinar a relação entre as massas do material antes e após a calcinação a uma temperatura suficientemente elevada para provocar a combustão do material orgânico.

Foram utilizados 4 provetes de ensaio para a determinação do teor em fibra de vidro, quer da alma (2), quer do banzo (2), obtidos por corte do perfil, com dimensões 9.8 mm (altura) x 12.8 mm (largura) x 38.5 mm (comprimento), que foram colocados

no interior de uma mufla regulada para uma temperatura de 625°C (Fig. 6).

Foram realizadas pesagens antes e após a calcinação (sucessivas até ser atingida massa constante), numa balança com uma precisão de 0.01 mg.



Fig. 6 – Provetes no interior da mufla há 72 horas.

Com base nas medições realizadas, foram estimados valores para o teor em fibra de vidro da alma (63.1%), do banzo (61.3%) e do perfil em geral (62.2%).

4.2 Ensaio de corte interlaminar

O objectivo deste ensaio é a determinação da resistência ao corte interlaminar, que é uma medida da resistência ao corte da camada matricial entre as fibras de reforço.

O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento experimental indicado na norma ASTM D 2344 (ASTM, 2000) que consiste na aplicação de uma carga concentrada a meio vão de provetes com o eixo coincidente com a direcção das fibras de reforço. Se o vão dos provetes for suficientemente curto em relação à altura da secção, a rotura ocorre na secção de meio vão, por corte, sob a forma de delaminação das camadas.

O valor da resistência ao corte interlaminar (F_{sbs}) pode ser obtido pela teoria da elasticidade através da seguinte expressão,

$$F_{sbs} = \frac{3}{4} \times \frac{F_u}{b \times h} \quad (1)$$

em que,

- F_u – carga de rotura;
- h – altura do provete;
- b – largura do provete.

Foram ensaiados 10 provetes, obtidos por corte do perfil na direcção longitudinal, quer da alma (CIAL1 a CIAL5), quer do banzo (CIBL1 a CIBL5), com as dimensões 9.8 mm x 20.0 mm x 60.0 mm, num vão de 45.0 mm.

A carga foi aplicada aos provetes através de uma prensa hidráulica com uma capacidade de 200 kN e a medição dos deslocamentos correspondentes à secção de aplicação da carga foi realizada com um deflectómetro eléctrico, com um curso de 25 mm e uma precisão de 0.01 mm. O registo dos valores dos aparelhos de medida foi realizado em PC, através de uma unidade de aquisição de dados.

Cada um dos provetes foi carregado monotonicamente até à rotura, tendo-se conduzido o ensaio em controlo de deslocamentos, à velocidade de carga preconizada na norma de ensaio (1 mm/min).

Em todos os ensaios a rotura ocorreu por corte interlaminar (Fig. 7).



Fig. 7 – Rotura por corte interlaminar.

Apresentam-se na Fig. 8 os diagramas força-deslocamento obtidos para os provetes do banzo.

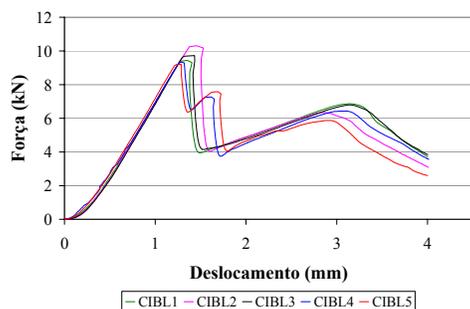


Fig. 8 – Ensaio de corte interlaminar - diagramas força-deslocamento dos provetes do banzo.

A análise dos diagramas força-deslocamento permite concluir que o comportamento observado é praticamente linear até se verificar o primeiro deslizamento entre camadas, correspondente à rotura por corte interlaminar. A parte inicial dos diagramas não é linear, o que se deve aos ajustes iniciais do sistema de aplicação da carga. A partir do primeiro deslizamento ainda se verifica alguma capacidade resistente, que se manifesta no diagrama força-deslocamento através da recuperação da força aplicada, que aumenta até ao deslizamento seguinte entre camadas. A rotura final ocorreu por tracção em flexão das fibras inferiores da camada inferior do provete.

A carga de rotura obtida em cada en-saio foi utilizada para determinar a resistência ao corte interlaminar através da expressão (1), apresentando-se no Quadro 2 os valores obtidos para a média e o desvio padrão do conjunto de provetes ensaiado.

Quadro 2 – Valores da média e do desvio padrão da resistência ao corte interlaminar.

Provetes	F_{sbs} (MPa)
Alma	33.1 ± 4.7
Banzo	37.0 ± 1.6
Global	35.0 ± 3.9

4.3 Ensaio de flexão

O objectivo deste ensaio é a caracterização do comportamento à flexão de provetes extraídos da alma e do banzo do perfil em estudo, com o eixo coincidente com a direcção das fibras de reforço (x), em particular a determinação da resistência à tracção em flexão ($\sigma_{fu,x}$), o módulo de elasticidade à flexão ($E_{f,x}$) e outros parâmetros da relação tensão-extensão, como a extensão na rotura ($\epsilon_{fu,x}$).

O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento experimental indicado na norma ISO 14125 (ISO, 1998) e consistiu na aplicação de uma carga concentrada a meio vão dos provetes, até ocorrer a rotura por tracção em flexão das suas fibras inferiores. Adoptando-se uma relação sufi-

cientemente grande entre o vão e a altura da secção garante-se, por um lado, a não ocorrência de rotura por corte interlaminar e, por outro lado, minimiza-se o efeito da deformabilidade por corte.

A medição do deslocamento a meio vão e da força aplicada permite estimar as propriedades acima referidas, pela aplicação das seguintes expressões da teoria da elasticidade,

$$\sigma_{fu,x} = \frac{3 \times F_u \times L}{2 \times b \times h^2} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{fu,x} = \frac{6 \times h \times \delta_u}{L^2} \quad (3)$$

$$E_{f,x} = \frac{L^3}{4 \times b \times h^3} \times \left(\frac{\Delta F}{\Delta s} \right) \quad (4)$$

em:

- L – vão;
- δ_u – deslocamento na rotura;
- $\Delta F/\Delta s$ – declive da curva força-deslocamento.

Foram ensaiados 14 provetes, obtidos por corte do perfil na direcção longitudinal, quer da alma (FA1 a FA7), quer do banzo (FB1 a FB7), com as dimensões 9.8 mm x 15.0 mm x 300.0 mm, num vão de 200.0 mm.

A carga foi aplicada aos provetes através de uma prensa hidráulica com uma capacidade de 10 kN e os deslocamentos da secção da aplicação da carga foram medidos com um deflectómetro eléctrico, com um curso de 50 mm e uma precisão de 0.01 mm. O registo dos valores dos aparelhos de medida foi realizado em PC, através de uma unidade de aquisição de dados.

Cada um dos provetes foi carregado monotonicamente até à rotura, tendo-se conduzido o ensaio em controlo de deslocamentos, à velocidade de carga preconizada na norma de ensaio (4 mm/min).

Em todos os ensaios, a rotura ocorreu por tracção em flexão das fibras inferiores (Fig. 9).

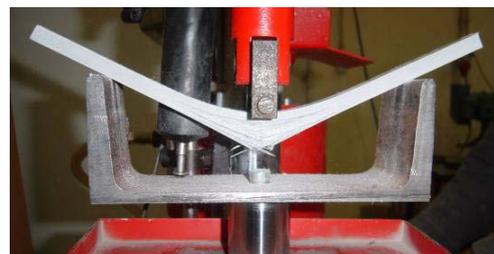


Fig. 9 – Rotura por tracção em flexão.

Apresentam-se na Fig. 10 os diagramas tensão-extensão obtidos para os provetes da alma, sendo de referir que o comportamento evidenciado pelos provetes do banzo foi muito semelhante. No Quadro 3 apresentam-se os valores da média e do desvio padrão obtidos para as propriedades em flexão.

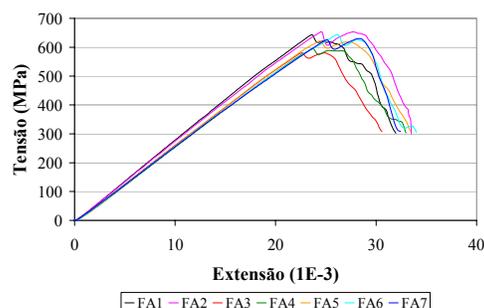


Fig. 10 – Ensaio de flexão - diagramas tensão-extensão axial dos provetes da alma.

Quadro 3 – Valores da média e do desvio padrão das propriedades em flexão.

Provetes	$\sigma_{fu,x}$ (MPa)	$\varepsilon_{fu,x}$ (1E-3)	$E_{f,x}$ (GPa)
Alma	623.8 ± 27.1	25.1 ± 1.7	25.4 ± 1.4
Banzo	625.4 ± 33.0	24.8 ± 0.8	24.7 ± 1.8
Global	624.6 ± 29.0	24.9 ± 1.3	25.0 ± 1.6

Os provetes evidenciaram um comportamento elástico-linear até à rotura. Por outro lado, verificou-se uma recuperação muito significativa da deformação após a rotura. Este comportamento deve-se ao facto de as fibras que não romperam continuarem a trabalhar em regime elástico.

4.4 Ensaio de tracção

O objectivo deste ensaio é a caracterização do comportamento à tracção de provetes, com o eixo coincidente com as fibras de reforço, obtidos a partir da alma e do banzo do perfil em estudo. Em particular, pretende-se determinar a resistência à tracção ($\sigma_{tu,x}$), a extensão na rotura ($\varepsilon_{tu,x}$), o módulo de elasticidade ($E_{t,x}$) e o coeficiente de Poisson (ν_{xy}).

O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento experimental indicado na norma ISO 527-1 e 4 (ISO, 1997) e consistiu na aplicação de uma força de tracção nas extremidades de um provete de secção rectangular até à rotura.

A medição da força aplicada, da extensão média do provete entre dois pontos de referência alinhados com as fibras de reforço (ε_x) e da extensão média na direcção transversal (ε_y), permite determinar as propriedades acima referidas, através das seguintes expressões:

$$\sigma_{tu,x} = \frac{F_u}{b \times h} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{tu,x} = \left(\frac{\Delta L}{L_0} \right)_u \quad (6)$$

$$E_{t,x} = \left(\frac{\Delta \sigma_x}{\Delta \varepsilon_x} \right) \quad (7)$$

$$\nu_{xy} = - \left(\frac{\Delta \varepsilon_y}{\Delta \varepsilon_x} \right) \quad (8)$$

em que:

- $(\Delta L/L_0)_u$ – variação relativa do comprimento de referência do provete na rotura;
- $\Delta \sigma_x / \Delta \varepsilon_x$ – declive da curva tensão longitudinal – extensão longitudinal;
- $\Delta \varepsilon_y / \Delta \varepsilon_x$ – declive da curva extensão transversal – extensão longitudinal.

Foram ensaiados 10 provetes, obtidos por corte do perfil na direcção longitudinal, quer da alma (TA1 a TA5), quer do banzo (TB1 a TB5), com as dimensões 9.8 mm x 25.0 mm x 350.0 mm.

A carga foi aplicada aos provetes através de uma prensa hidráulica com uma ca-

pacidade de 200 kN e com um sistema de garras de cunha com 75 mm de altura, em que a pressão de aperto varia em função da carga aplicada. Adoptou-se uma distância entre garras de 150.0 mm. Para a medição das extensões longitudinais foi utilizado um extensómetro eléctrico com uma base de medida de 50 mm. Num dos provetes foi colado um extensómetro na direcção transversal, com uma base de medida de 10 mm, para permitir determinar o coeficiente de Poisson. O registo dos valores dos aparelhos de medida foi realizado em PC, através de uma unidade de aquisição de dados.

Cada um dos provetes foi carregado monotonicamente até à rotura. O ensaio foi conduzido em controlo de deslocamentos e a carga foi aplicada a uma velocidade de 0.178 mm/s.

Em todos os ensaios, a rotura ocorreu por tracção, numa zona relativamente afastada das garras (Fig. 11).

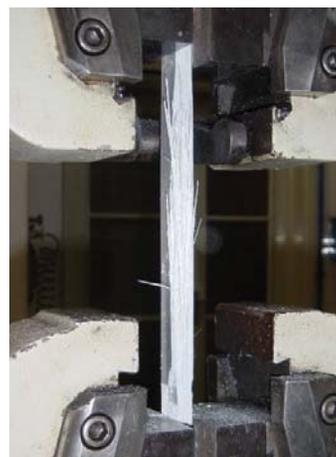


Fig. 11 – Rotura por tracção.

Apresentam-se na Fig. 12 os diagramas tensão-extensão axial obtidos para os provetes da alma.

À semelhança do que se registou no ensaio de flexão, os provetes evidenciaram um comportamento elástico-linear até à rotura e, por outro lado, o comportamento dos provetes do banzo foi muito semelhante ao dos da alma.

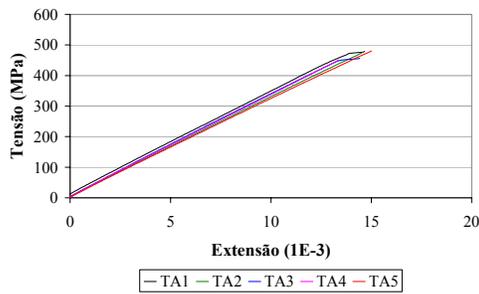


Fig. 12 – Ensaio de tracção - diagramas tensão-extensão axial dos provetes da alma.

Apresentam-se no Quadro 4 os valores da média e do desvio padrão obtidos para as propriedades em tracção.

Neste ensaio foi ainda determinado um valor de 0.28 para o coeficiente de Poisson ν_{xy} .

Quadro 4 – Valores da média e do desvio padrão das propriedades em tracção.

Provetes	$\sigma_{tu,x}$ (MPa)	$\epsilon_{tu,x}$ (1E-3)	$E_{t,x}$ (GPa)
Alma	469.6 ± 12.0	14.4 ± 0.6	33.0 ± 0.7
Banzo	481.5 ± 35.0	16.4 ± 1.5	32.7 ± 1.4
Global	475.5 ± 25.5	15.4 ± 1.5	32.8 ± 0.9

4.5 Ensaio de compressão

O objectivo deste ensaio é a caracterização do comportamento à compressão de provetes, com o eixo paralelo (x) ou perpendicular (y) à direcção das fibras de reforço, obtidos a partir da alma e do banzo do perfil em estudo. Em particular, pretende-se determinar a resistência à compressão ($\sigma_{cu,x}$ e $\sigma_{cu,y}$), a extensão na rotura ($\epsilon_{cu,x}$ e $\epsilon_{cu,y}$) e o módulo de elasticidade ($E_{c,x}$ e $E_{c,y}$).

O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento experimental indicado na norma ASTM D695 (ASTM, 2002) e consistiu na aplicação de uma força de compressão a provetes de secção rectangular até à rotura.

Foram ensaiados 3 conjuntos de 12

provetes, obtidos a partir do banzo do perfil na direcção longitudinal (CBL1 a CBL12) e da alma do perfil nas direcções longitudinal (CAL1 a CAL12) e transversal (CAT1 a CAT12). Adoptaram-se as seguintes dimensões para os provetes: 9.8 mm (espessura) x 12.7 mm (largura) x 39.0 mm (altura). As faces dos provetes foram rectificadas com uma fresadora para evitar o desenvolvimento de esforços adicionais devido a eventuais excentricidades da carga.

A carga foi aplicada aos provetes através de uma prensa hidráulica com uma capacidade de 200 kN. A medição dos deslocamentos foi realizada com um deflectómetro eléctrico com um curso de 25 mm e uma precisão de 0.01 mm. O registo dos valores dos aparelhos de medida foi realizado em PC, através de uma unidade de aquisição de dados. Cada um dos provetes foi carregado monotonicamente até à rotura. O ensaio foi conduzido em controlo de deslocamentos e a carga foi aplicada a uma velocidade de 1.3 mm/min.

Em todos os ensaios, a rotura ocorreu por compressão, com delaminação das camadas (Fig. 13). No entanto, na maior parte dos provetes, foi evidente a ocorrência de esmagamento das faces carregadas dos provetes.

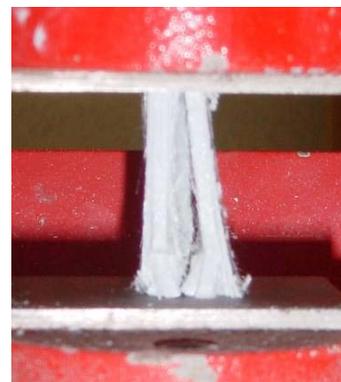


Fig. 13 – Rotura por compressão.

Apresenta-se na Fig. 14, um conjunto de diagramas força-deslocamento obtidos para provetes do banzo com o eixo orientado com a direcção das fibras de reforço.

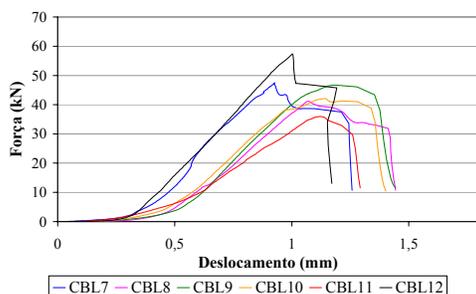


Fig. 14 – Ensaio de compressão - diagramas força-deslocamento axial dos provetes do banzo.

Nestes ensaios o comportamento do material foi menos elástico-linear do que nos ensaios de tracção e flexão. Na parte inicial das curvas tal facto correspondeu ao assentamento ou alinhamento dos provetes, o que não representa uma propriedade do material. Na parte restante das curvas, a não linearidade deveu-se ao fenómeno de esmagamento das extremidades carregadas, que foi bastante acentuado em alguns provetes.

Apresentam-se no Quadro 5 os valores da média e do desvio padrão obtidos para as propriedades em compressão.

Quadro 5 – Valores da média e do desvio padrão das propriedades em compressão.

Provetes	σ_{cu} (MPa)	ϵ_{cu} (1E-3)	E_c (GPa)
Alma	122.0	21.5	7.4
Transv.	± 15.4	± 1.7	± 54.1
Alma	342.7	15.7	26.7
Longit.	± 60.9	± 1.8	± 2.0
Banzo	402.2	18.4	26.0
Longit.	± 54.1	± 2.6	± 2.0
Global	375.8	17.0	26.4
Longit.	± 67.9	± 2.5	± 1.9

4.6 Resumo dos ensaios de caracterização do material

Em resumo, apresentam-se no Quadro 6 os valores médios obtidos para as diferentes propriedades/solicitações: tensão de rotura (σ_u), módulo de elasticidade (E), extensão na rotura (ϵ_u), coeficiente de Poisson (ν_{xy}), resistência ao corte interlaminar (F_{sbs}) e teor em fibra de vidro (TFV).

Quadro 6 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização do material.

Prop.	Flexão Long.	Tracção Long.	Compr. Long.	Compr. Transv.
σ_u (MPa)	475.5	624.6	375.8	122.0
E (GPa)	32.8	26.9	26.4	7.4
ϵ_u (1E-3)	15.4	25.0	17.0	21.5
ν_{xy}	0.28			
$F_{sbs} = 35.0$ MPa				
TFV = 62.2%				

5. ENSAIOS EM LIGAÇÕES

As ligações entre perfis de GFRP com maior utilização têm sido as aparafusadas, copiando, na maior parte dos casos, as disposições construtivas da construção metálica, embora existam diferenças significativas entre o comportamento dos dois materiais. As ligações coladas, que à partida seriam melhor adaptadas às características específicas dos perfis de GFRP, são menos utilizadas devido às dificuldades associadas à sua análise e dimensionamento e às dúvidas que ainda subsistem quanto ao seu comportamento a longo prazo ou em situação de incêndio.

De entre os estudos anteriormente realizados neste domínio são de salientar os trabalhos publicados por Erki (1995), Mottram e Turvey (1998) e Turvey (2000), relativos ao comportamento de ligações aparafusadas, e os trabalhos de Keller e Vallée (2004; 2005), relativos ao comportamento de ligações coladas.

Os ensaios em ligações tiveram como objectivo o estudo do comportamento dos três tipos de ligações mais utilizados entre perfis de GFRP: aparafusadas, coladas e aparafusadas e coladas.

Para qualquer um dos tipos de ligações foram ensaiados 5 provetes com a geometria representada na Fig. 15, correspondente a um esquema de ligação por sobreposição dupla com cobrejunta.

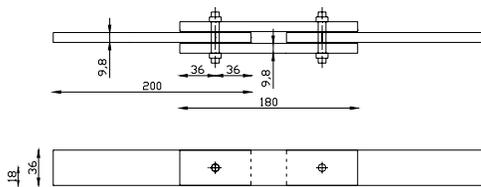


Fig. 15 – Geometria das ligações ensaiadas: em corte (cima); em planta (baixo) - em mm.

Nas ligações aparafusadas (provetes LP1 a LP5) foram utilizados parafusos em aço inox da classe A4 ($\tau_u = 480$ MPa) com 8 mm de diâmetro colocados em furos com 8,5 mm de diâmetro. O aperto foi realizado manualmente e foram aplicadas anilhas metálicas com 24 mm de diâmetro. Nas ligações coladas (provetes LC1 a LC5) foi utilizada uma cola estrutural bicomponente, à base de resina epóxi, da marca Bostik, modelo 7201 A+B, cujas propriedades, fornecidas pelo fabricante, são apresentadas no Quadro 7. Nas ligações aparafusadas e coladas (LPC1 a LPC5) foram utilizados ambos os elementos de ligação referidos.

Quadro 7 – Propriedades da cola utilizada.

Solicitação	σ_u (MPa)	E (GPa)	ϵ_u (%)
Flexão	66.9	2.53	-
Tracção	57.2	-	3.9
Compressão	85.5	2.68	-

Os provetes foram submetidos a um esforço axial de tracção, aplicado monotonicamente até à rotura. Apresentam-se na Fig. 16 os diagramas força-deslocamento típicos obtidos, e no Quadro 8 os valores da média e do desvio padrão correspondentes à força máxima, à rigidez e à eficiência de cada um dos tipos de ligação, definida pela relação entre as resistências da ligação e das peças a ligar.

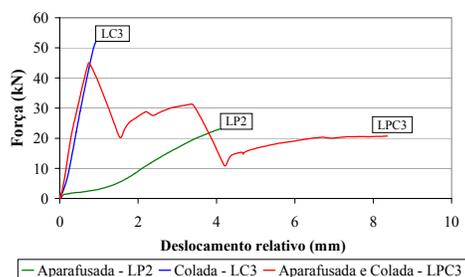


Fig. 16 – Diagramas força-deslocamento típicos de cada um dos tipos de ligação.

Quadro 8 – Valor médio e desvio padrão da força máxima ($F_{m\acute{a}x}$), rigidez (K) e eficiência (EL) de cada um dos tipos de ligações.

Tipo de ligação	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	K (KN/mm)	EL (%)
Aparafusada	24.3 ± 3.5	10.8 ± 2.9	14.5 ± 2.1
Colada	41.7 ± 6.0	54.9 ± 6.2	24.8 ± 3.6
Aparafusada e colada	39.0 ± 12.1	52.1 ± 9.4	23.3 ± 7.2

Os provetes com ligações aparafusadas apresentaram os valores mais reduzidos da resistência (e da eficiência) e, sobretudo, da rigidez, que foi medida na parte mais linear do diagrama força-deslocamento relativo, após os ajustes iniciais dos provetes (devidos ao atrito inicial e às folgas nos parafusos) terem estabilizado. Nestas ligações, apesar de a sua geometria verificar as disposições sugeridas nos manuais dos fabricantes (Fiberline, 1995; Creative Pultrusions, 1999), que garantiriam uma rotura por esmagamento (relativamente dúctil), a rotura ocorreu de forma súbita, por corte local de uma das chapas ligadas, na zona do provete adjacente a um dos parafusos, e na direcção da aplicação da carga (Fig. 17).



Fig. 17 – Rotura de uma das chapas de extremidade a ligar por corte local.

Os provetes com ligações coladas, por comparação com os provetes com ligações aparafusadas, apresentaram um aumento muito significativo da resistência (72%) e, sobretudo, da rigidez (407%). Neste tipo de ligações, o comportamento foi linear até à rotura, que ocorreu de uma forma súbita, por descolamento, na camada de extremidade de uma das peças a ligar (*fiber-tear failure*) devido a tensões de tracção normais ao plano da ligação (*peeling*) – Fig. 18.

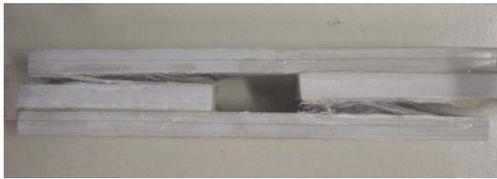


Fig. 18 – Rotura da ligação colada LC3, devido a tensões de tracção normais ao plano da ligação.

Nos provetes com ligações aparafusadas e coladas, o comportamento inicial foi muito semelhante ao apresentado pelos provetes com ligações coladas. Existe tipicamente um troço inicial do diagrama força-deslocamento que é linear, em que a carga foi suportada quase exclusivamente pela cola e ao qual correspondem valores da rigidez e da força máxima muito semelhantes aos registados nos provetes com ligações coladas. Após se dar a rotura da colagem, correspondente ao pico desse troço inicial, a carga foi transferida para os parafusos. Nessa fase, a rigidez da ligação aproximou-se da rigidez correspondente à dos provetes com ligações aparafusadas e a rotura final ocorreu por corte local, de uma de duas formas: (i) de uma só vez, numa das chapas a ligar (provetes LPC1 e LPC2); (ii) em duas fases, primeiro numa das chapas da cobrejunta e, depois, numa das chapas a ligar (provetes LPC3 a LPC5). Neste tipo de ligações, por comparação com as ligações coladas, verificou-se uma muito ligeira diminuição da resistência (6%) e da rigidez (5%). No entanto, tendo em consideração a dispersão dos resultados obtidos, tal facto não parece ter significado estatístico.

6. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentaram-se os resultados de um estudo sobre o comportamento mecânico dos perfis pultrudidos de fibra de vidro e das suas ligações.

Nos ensaios de caracterização mecânica, em que foram determinados os valores das constantes elásticas e da resistência para diferentes solicitações, o material apresentou um comportamento elástico-linear até à rotura em todos os ensaios, o que constitui uma das suas principais caracterís-

ticas. Registaram-se diferenças entre as propriedades obtidas nos ensaios de tracção e flexão, que não se verificam em materiais homogêneos e isotrópicos como o aço, e que se devem à estrutura interna tipo “sandwich”, com diferentes tipos de reforços, dispostos em várias camadas. Nos ensaios de compressão são de assinalar os diferentes valores que se registam nas direcções longitudinal e transversal, associados à ortotropia do material. Finalmente, é de referir que a dispersão verificada nos resultados de cada um dos ensaios não é desprezável, sobretudo nas propriedades mais dependentes das características da matriz, em particular as resistências ao corte interlaminar e à compressão, em que se registaram coeficientes de variação de 11% e de 18%, respectivamente. Tal facto aponta para a necessidade de melhorar o controlo de qualidade no fabrico.

Nos ensaios em ligações, foi analisado o comportamento das principais técnicas de ligação entre perfis de GFRP, tendo-se demonstrado que a colagem é um método de ligação melhor adaptado aos perfis de GFRP do que o aparafusamento. Nas ligações aparafusadas verificou-se que o cumprimento das disposições sugeridas pelos fabricantes não garantiu a ocorrência de um modo de rotura por esmagamento, que é consideravelmente mais dúctil que o modo de rotura por corte, observado nos ensaios realizados. A colagem melhorou significativamente o desempenho da ligação, quer pelo aumento da resistência, quer, sobretudo, pelo aumento da rigidez. A combinação da colagem e do aparafusamento apresenta um desempenho mecânico semelhante ao das ligações coladas e a sua utilização poderá ter interesse caso se pretenda garantir, através da utilização dos parafusos, uma segurança adicional face aos efeitos de uma eventual deficiência na colagem ou deterioração da cola durante a fase de serviço. Em alternativa, poder-se-á dimensionar a ligação tirando partido da rigidez da colagem para garantir as exigências de deformabilidade, tirando partido dos parafusos para satisfazer as exigências de resistência.

7. REFERÊNCIAS

- ASTM, “ASTM D 2344: Standard Test for Short-Beam Strength of polymer Matrix Composite Materials and their Lamina-tes”, 2000.
- ASTM, “ASTM D 695-02: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics”, 2002.
- Correia, J.R., “Perfis Pultrudidos de Fibra de Vidro (GFRP). Aplicação de Vigas Mistas GFRP-Betão na Construção”, Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, 2004.
- Correia, J.R., Ferreira, J., Branco, F.A., “Utilização de Perfis Pultrudidos de Fibra de Vidro (GFRP) na Construção”, Construção 2004, Congresso Nacional da Construção, FEUP, Porto, 2004.
- Correia, J.R., Cabral-Fonseca, S., Branco, F.A., Ferreira, J., Eusébio, M.I., Rodrigues, M.P., “Durability of Glass Fibre Reinforced Polyester (GFRP) Pultruded Profiles for Construction Applications”, Composites PartB: Engineering, manus-crito submetido para publicação, 2005a.
- Correia, J.R., Branco, F.A., Ferreira, J.G., “Flexural Behaviour of GFRP-Concrete Hybrid Beams with Interlayer Slip”, Composite Structures, manuscrito sub-metido para publicação, 2005b.
- Creative Pultrusions, “The New and Improved Pultex Pultrusion Design Manual for Standard and Custom Fiber Reinforced Polymer Structural Profiles”, 1999.
- Erki, M.A., “Bolted glass-fibre-reinforced plastic joints”, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 22, 736-744, 1995.
- Fiberline Composites, “Fiberline Design Manual”, 1995.
- ISO, “ISO 527: Plastics - Determination of Tensile Properties. Part 1: General Principles; Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites”, 1997.
- ISO, “ISO 1172: Textile-glass-reinforced plastics – Prepregs, moulding compounds and laminates – Determination of the textile-glass and mineral filler content – Calcination methods”, 1996.
- ISO, “ISO 14125: Fibre-reinforced plastic composites – Determination of flexural properties”, 1998.
- Jones, R.M., “Mechanics of Composite Materials”, Taylor & Francis, Philadelphia, 336p, 1999.
- Karbhari, V., Seible, F., “Fiber-Reinforced Polymer Composites for Civil Infrastructure in the USA”, Structural Engineering International, IABSE, Vol. 9, No. 4, 274-277, 1999.
- Keller, T., “Overview of Fibre-Reinforced Polymers in Bridge Construction”, Structural Engineering International, IABSE, Vol. 12, No. 2, 66-70, 2002a.
- Keller, T., “Fibre Reinforced Polymer Materials in Bridge Construction”, Towards a Better Built Environment – Innovation, Sustainability, Information Technology, IABSE Symposium, Melbourne, Australia (CD-Rom), 2002b.
- Keller, T., “Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction”, Structural Engineering Documents, No. 7, IABSE, Zurich, 131 p, 2003.
- Keller, T., Vallée, T., “Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part I: stress-strain analysis and failure modes”, Composites PartB: Engineering, Vol. 34, No. 4: 331-340, 2005.
- Keller, T., Vallée, T., “Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part II: joint strength prediction”, Composites Part B: Engineering, Vol. 34, No. 4: 341-350, 2005.
- Mottram, J.T., Turvey, G.J. (editors), “State-of-the-art review on design, testing, analysis and applications of polymeric composite connections”, Brussels, Euro-pean Commission, 99 p., 1998.
- Sobrino, J., Pulido, M.D., “Towards Advanced Composite Materials Footbridges”, Structural Engineering International, IABSE, Vol. 12, No. 2, 84-87, 2002.
- Turvey, G.J., “Bolted connections in PFRP structures”, Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 2, 146-156, 2000.