

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO DE LAMINADOS DE CFRP INSERIDOS NO BETÃO



José M. Sena Cruz
Aluno de Doutoramento
Dep. Eng^a Civil
Escola de Eng^a
Universidade do Minho
Guimarães



Joaquim A. O. BARROS
Prof. Auxiliar
Dep. Eng^a Civil
Escola de Eng^a
Universidade do Minho
Guimarães

SUMÁRIO

Com o objectivo de avaliar a influência da classe do betão e do comprimento de ancoragem do laminado de fibras de carbono (CFRP), no comportamento da ligação, com adesivo epoxídico, entre laminado e betão, foram efectuadas campanhas de ensaios com três classes de betão e três comprimentos de amarração. No presente trabalho, os ensaios de arranque em flexão efectuados são descritos e os resultados obtidos são apresentados e analisados.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos têm sido investigada uma técnica de reforço baseada na fixação de laminados de CFRP em ranhuras efectuadas no betão de recobrimento dos elementos a reforçar. 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 [1], esta técnica apresenta as seguintes principais vantagens: maior mobilização da resistência à tracção destes materiais compósitos; maior protecção ao fogo e a actos de vandalismo; maior facilidade e rapidez de execução.

Esta técnica já foi aplicada no reforço à flexão de elementos de pilar [2] e de viga [3], e no reforço de elementos de casca de alvenaria [4] tendo-se verificado que a presente técnica permite mobilizar tensões de tracção mais elevadas nos laminados de CFRP, que nas “convencionais”.

Além disto, foi obtido um aumento significativo de rigidez, quer para cargas de serviço, quer para cargas de rotura, tendo-se assegurado elevado nível de ductilidade [3].

A justificação do bom desempenho desta técnica passa pela detecção e interpretação dos mecanismos de fixação do laminado ao betão [5]. A conversão desses mecanismos em leis constitutivas que simulem o comportamento desta interface permitirá desenvolver modelos que permitam traçar, com maior rigor, a resposta de estruturas reforçadas segundo esta técnica [6]. Para tal, foi efectuada uma campanha de ensaios de arranque em flexão, com o objectivo de se avaliar a influência do comprimento de ancoragem do laminado e da classe de resistência do betão, nos seguintes parâmetros: carga máxima, tensão máxima de corte, energia de fractura, extensão máxima no laminado e deslocamento na carga de pico. A relação entre a tensão de corte e o deslizamento pode ser utilizada na formulação de elementos finitos de interface, objectivo a perseguir no âmbito da presente investigação. No presente trabalho os principais resultados obtidos são apresentados e analisados.

2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

2.1 Betão

Para avaliar a influência da qualidade do betão foram realizados provetes de três classes distintas de resistência à compressão, 35 MPa, 45 MPa e 70 MPa, cujas correspondentes composições se incluem no Quadro 1. Cada uma destas três séries era composta por três séries, correspondentes a provetes com diferente comprimento de ancoragem, 40 mm, 60 mm e 80 mm, resultando um total de nove séries, com designação fcmXX_LaYY, em que XX representa a classe de resistência à compressão do betão, em MPa, e YY o comprimento de ancoragem do laminado, em mm.

Em ensaios preliminares de arranque em flexão com provetes de betão simples [7] constatou-se a ocorrência de rotura por corte do betão antes de se alcançar a capacidade máxima de carga do provete. Para evitar esta rotura, o betão de todos os provetes foi reforçado com 60 kg/m³ de fibras de aço Dramix® ZP305 [8].

Quadro 1: Composição e resistência à compressão do betão das series ensaiadas.

Série	Composição (kg/m ³)					f _{cm} (MPa) (aos 28 dias)
	AF	AG	B	C	A	
fcm35_La40	-	745	943	350	210	34.5 (c.v. 6.94%)
fcm35_La60						33.0 (c.v. 4.24%)
fcm35_La80						37.2 (c.v. 1.50%)
fcm45_La40	-	627	1049	400	200	46.2 (c.v. 0.53%)
fcm45_La60						41.4 (c.v. 2.32%)
fcm45_La80						47.1 (c.v. 1.65%)
fcm70_La40	427	419	848	500	150	69.9 (c.v. 0.87%)
fcm70_La60						70.3 (c.v. 8.24%)
fcm70_La80						69.2 (c.v. 7.47%)

Obs.: AF – Areia fina (0-3mm); AG – Areia grossa (0-5mm); B – Brita (0-15mm); C – Cimento Secil 42.5 tipo I; A – Água; nas séries “fcm70” utilizou-se 7.8 l/m³ de Rheobuild1000; c.v. – coeficiente de variação.

2.2 Laminado de CFRP

O comportamento à tracção dos laminados de CFRP foi avaliado por intermédio de ensaios de tracção uniaxial efectuados segundo as recomendações da norma ISO 527-5, em provetes com secção transversal igual a 9.339 ± 0.094 mm de largura e 1.385 ± 0.003 mm de espessura, tendo-se obtido $2739.5 \text{ MPa} \pm 85.7 \text{ MPa}$ para tensão de rotura, $17.0\% \pm 0.4\%$ para extensão de rotura e $158.8 \text{ GPa} \pm 2.6 \text{ GPa}$ para módulo de elasticidade. Mais detalhes sobre o equipamento e procedimentos de ensaios podem ser encontrados em [7].

2.3 Adesivo epoxídico

Ensaio de tracção uniaxial sobre provetes do adesivo epoxídico utilizado para fixar os laminados de CFRP ao betão revelaram que este material tem um comportamento marcadamente não linear, com uma tensão de rotura que varia entre os 16 e os 22 MPa (o valor da tensão de rotura é bastante influenciado pela presença de vazios na secção de fractura), sendo de aproximadamente 5 GPa o seu módulo de elasticidade. Em [7] estes ensaios são descritos e os resultados são apresentados e analisados.

3. PROVETES E SISTEMA DE ENSAIO

Ao vigésimo oitavo dia de idade, os provetes eram retirados do tanque colocados dentro da câmara húmida (onde permaneceram submersos em água) para se proceder à realização dos entalhes, dentro dos quais os laminados foram fixados, por intermédio do adesivo epoxídico descrito na secção 2.3. A ranhura tinha profundidade de 15 mm e largura de 3.3 mm (ver Figura 1). A fixação dos laminados foi efectuada após os provetes terem permanecido oito dias no ambiente natural do laboratório, de forma a assegurar-se uma adequada secagem do betão. No bloco B (ver Figura 1) o laminado era fixo ao betão num comprimento total de 325 mm, enquanto no bloco A, o laminado era apenas fixo no comprimento de ancoragem (L_a). Os três comprimentos de ancoragem analisados foram determinados em ensaios preliminares [7], tendo por critério de comprimento de ancoragem, o máximo a partir do qual o laminado atingiria níveis de tensão próximos da sua rotura.

Ensaio preliminares foram efectuados sob controlo do deslocamento vertical lido num transdutor colocado no eixo de simetria do provete (ver Figura 2a). Porém, em alguns destes ensaios constatou-se que este tipo de controlo não assegurava a estabilidade do ensaio, pelo que todos os ensaios efectuados no âmbito do presente trabalho foram efectuados sob o controlo do deslocamento lido no LVDT 2 (ver Figuras 1 e 3a), à velocidade de $5 \mu\text{m/s}$, dado que desta forma foi garantida a sua estabilidade. Este LVDT registava o deslocamento na frente da zona de ancoragem do laminado, permitindo avaliar o deslizamento sofrido pelo laminado em relação ao betão envolvente. O LVDT 1, fixo à face lateral do provete de betão, media o deslizamento da extremidade livre do laminado (ver Figuras 1 e 3b), pelo que o deslizamento relativo entre a secção de início de ancoragem e a extremidade livre do laminado pode ser determinada recorrendo aos deslocamentos medidos nestes dois transdutores de deslocamento. No laminado, sob o eixo de simetria do provete, foi colado um extensómetro apropriado para este tipo de materiais, de forma a ser medida a extensão no laminado durante o carregamento. A força aplicada foi medida em transdutores de força, de 50kN de capacidade máxima de carga e 0.5% de

precisão, dispostos nos apoios do provete (LC1 e LC2 na Figura 1). A força foi também estimada com base na extensão registada no extensómetro, tendo-se concluído que os dois procedimentos conduziram a valores similares, indicador de que o sistema de ensaio funcionou correctamente. A Figura 4 inclui uma foto representativa da configuração do ensaio de arranque em flexão.

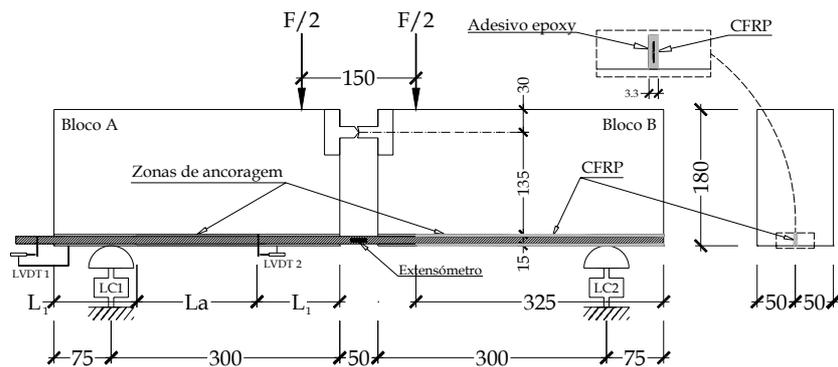


Figura 1: Provete do ensaio de arranque em flexão.

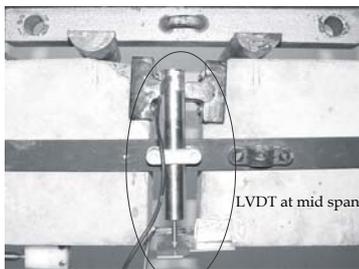


Figura 2 – LVDT de controlo utilizado nos ensaios preliminares.

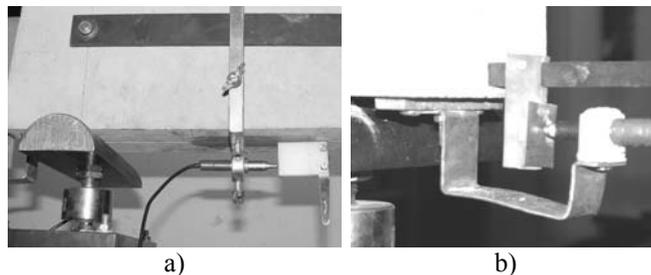


Figura 3: a) LVDT 2 de controlo do ensaio e de avaliação do deslizamento, b) LVDT 1 para registo do deslizamento relativo.



Figura 4: Ensaio de arranque em flexão.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nas Figuras 5 a 7 apresentam-se as relações entre a tensão de corte e o deslizamento, obtidas nos provetes de 35 MPa, 45 MPa e 70 MPa de classe de resistência à compressão (f_{cm}), respectivamente, para comprimentos de ancoragem do laminado de 40 mm, 60 mm e 80 mm. A tensão de corte obteve-se dividindo a força aplicada, pela área de ancoragem do laminado: $2 \times \text{altura do laminado} \times \text{comprimento de ancoragem}$ (L_a). O deslizamento é o deslocamento lido no LVDT 2 (ver Figuras 1 e 3a).

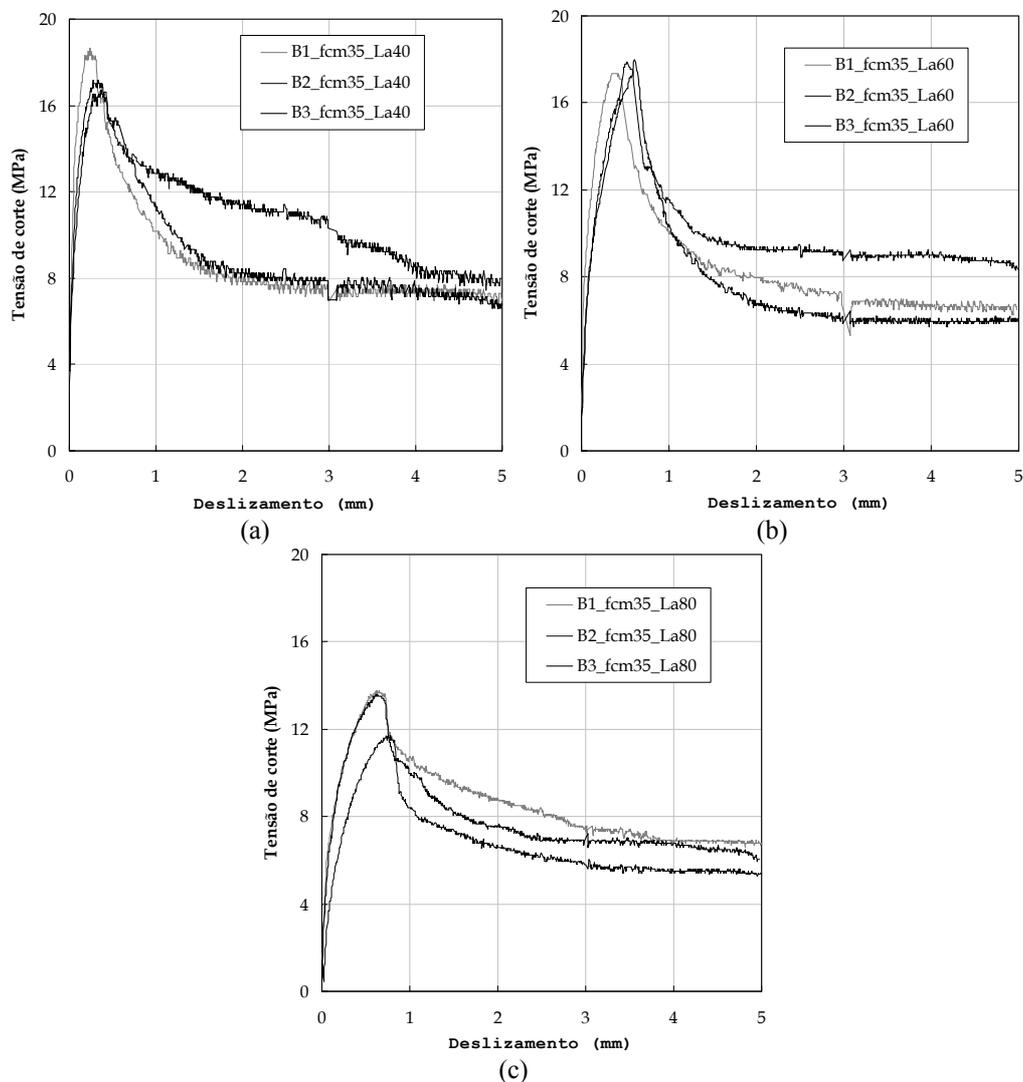


Figura 5: Provetes de betão da classe de resistência à compressão (f_{cm}) de 35 MPa e com comprimentos de ancoragem (L_a) de 40 mm (a), 60 mm (b) e 80 mm (c).

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 epoxídico [7], até um deslizamento que varia entre 0.3 mm a 0.8 mm. Após a carga de pico, a tensão de corte diminui para deslizamento crescente, comportamento típico da fase designada por amolecimento, (“softening” na nomenclatura Inglesa). Na fase inicial do amolecimento ocorre uma acentuada queda de tensão de corte, 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.

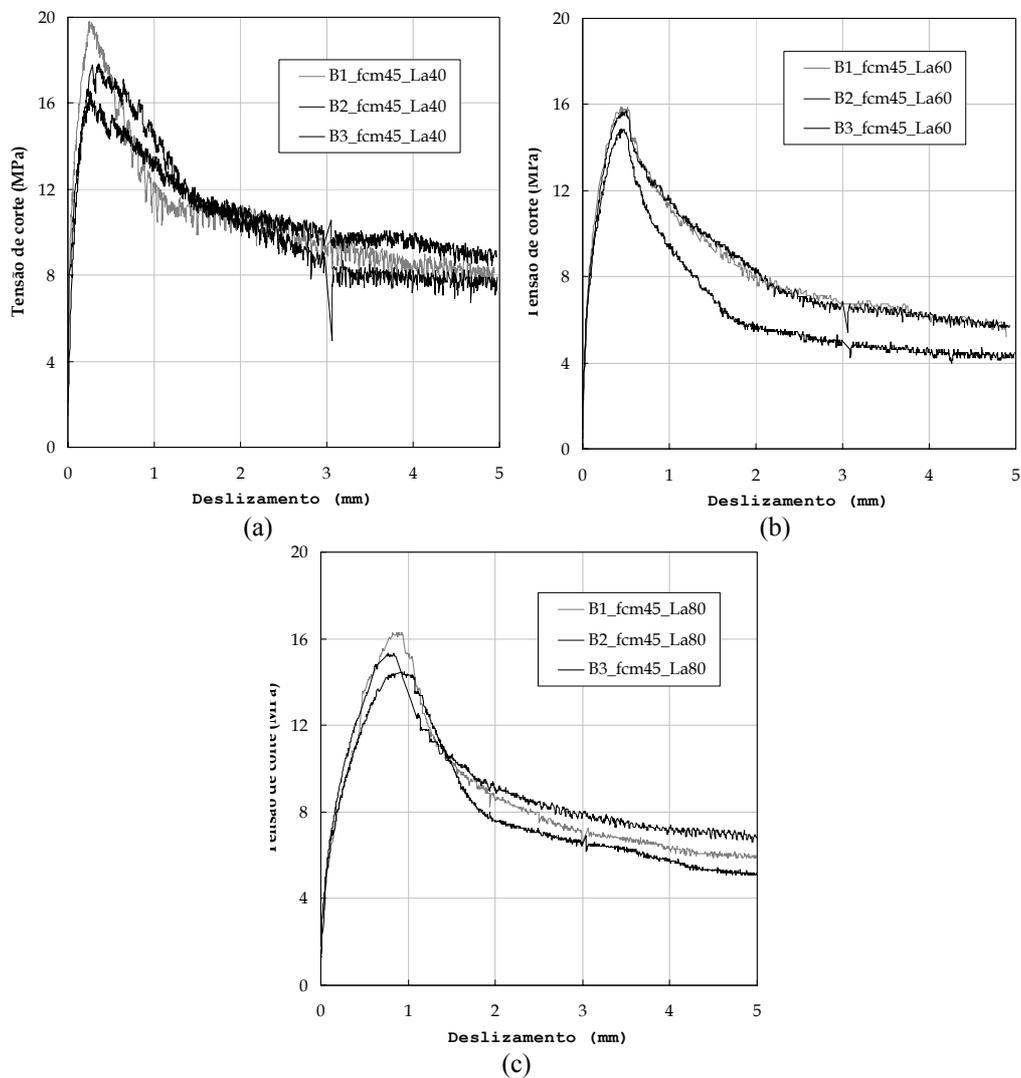


Figura 6: Provetes de betão da classe de resistência à compressão (f_{cm}) de 45 MPa e com comprimentos de ancoragem (L_a) de 40 mm (a), 60 mm (b) e 80 mm (c).

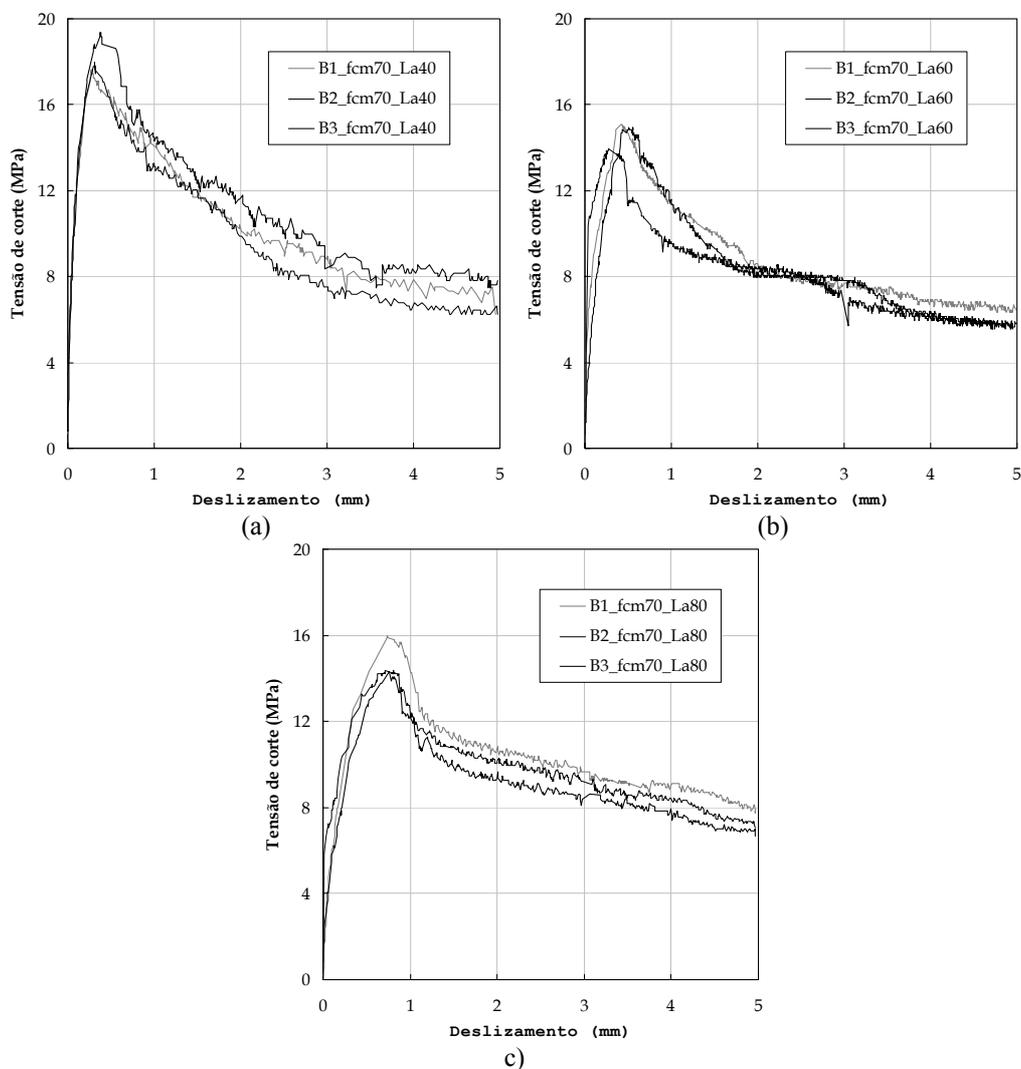


Figura 7: Provetes de betão da classe de resistência à compressão (f_{cm}) de 70 MPa e com comprimentos de ancoragem (L_a) de 40 mm (a), 60 mm (b) e 80 mm (c).

O Quadro 2 inclui os valores médios das principais propriedades avaliadas com base nos resultados obtidos nos ensaios efectuados. Neste Quadro G_f é a energia dissipada no ensaio, representada pela área sob a curva tensão de corte – deslizamento, até um deslizamento de 5 mm. Por sua vez, ε_{fmax} é a extensão máxima registada no extensómetro colado ao laminado, ε_{fi} é a sua extensão de rotura ($\approx 17\%$), e δ_{Fmax} é o deslizamento correspondente à força máxima aplicada no ensaio.

Da análise dos resultados obtidos constata-se que:

- O F_{max} aumenta com o comprimento de ancoragem do laminado;

- O τ_{\max} diminui com o comprimento de ancoragem do laminado. A diminuição de τ_{\max} é mais significativa entre La40 e La60 do que entre La60 e La80, indiciando não ser eficaz aumentar significativamente o comprimento de ancoragem do laminado acima dos 80 mm. Observação similar pode ser extraída da análise dos valores correspondentes a $\varepsilon_{f\max}/\varepsilon_{fu}$. Em todo o caso, a tensão máxima de corte é significativamente superior à registada em outras configurações de ensaio de arranque [1, 9, 10];
- A energia de fractura tem uma tendência para diminuir com o comprimento de ancoragem do laminado, devido, fundamentalmente, à diminuição da tensão máxima de corte com este comprimento. Contudo, esta diminuição parece tender para uma assíntota, dado o atrito laminado-adesivo-betão garantir um nível de resistência residual elevado.

Quadro 2: Principais grandezas avaliadas (valores médios).

Grandeza	La40			La60			La80		
	fcm35	fcm45	fcm70	fcm35	fcm45	fcm70	fcm35	fcm45	fcm70
F_{\max} (kN)	15	15.5	15.7	22.8	19.9	18.9	22.4	26.4	25.6
τ_{\max} (MPa)	17.5	18.1	18.3	17.7	15.5	14.7	13.0	15.4	14.9
G_f (MPa.mm)	48.3	53.3	51.5	43.9	38.4	41.9	38.4	43.0	48.4
$\varepsilon_{f\max}/\varepsilon_{fu}$	42.1	43.5	44.0	64	55.8	52.9	62.1	73.9	71.6
$\delta_{F\max}$ (mm)	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.4	0.7	0.8	0.7

Obs.: F_{\max} – Força máxima no laminado; τ_{\max} – Tensão máxima de corte; G_f – Energia dissipada; $\varepsilon_{f\max}$ – deformação máxima atingida no laminado de CFRP; ε_{fu} – deformação na rotura do laminado de CFRP.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam os seus agradecimentos às empresas que gentilmente forneceram os materiais usados nesta campanha experimental, nomeadamente, à Bettor MBT Portugal, à Secil e à Solusel. Ao CEMACON, na pessoa do Dr. Paulo Nóvoa, agradece-se a colaboração prestada nos ensaios de tracção uniaxial com provetes de laminado de CFRP e de adesivo epoxídico.

6. REFERÊNCIAS

- [1] CEB-FIP - *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*. Technical report on the Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures, prepared by a working party of the Task Group 9.3 FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures, 2001, 130 p.
- [2] Barros, J.A.O., Ferreira, D.R.S.M., Lourenço, P.J.B. – “Comportamento de pilares de betão armado reforçados com laminados de fibras de carbono”, *Encontro Nacional de Betão Estrutural 2000*, Porto, 22-24 Novembro 2000, pp. 393-402.
- [3] Fortes, A.S., Barros, J.A.O., Padaratz, I.J. - *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, 2002, 32 p.

- [4] Fortes, A.S., Oliveira, J.T., Barros, J.A.O. - “Elementos de casca em alvenaria cerâmica reforçados com laminados de fibras de carbono” VII International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries, Setembro de 2002, Brasil.
- [5] – Fortes, A.S., Barros, J.A.O. - “Reforço à flexão de vigas de betão armado por intermédio da inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento”, Estruturas 2002, Congresso Nacional de Engenharia de Estruturas, LNEC, Julho 2002.
- [6] Barros, J.A.O., Fortes, A.S. - “Concrete beams reinforced with carbon laminates bonded into slits”, *5º Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, Madrid, 3-6 Junio 2002.
- [7] Cruz, J.M.S., Barros, J.A.O., Faria, R.M.C.M. - “Assessing the embedded length of epoxy-bonded carbon laminates by pull-out bending tests”, *International Conference Composites in Construction CCC2001*, 10-12 October 2001, pp. 217-222.
- [8] Dramix - *Product data sheet*. N.V.Bekaert S.A., 1998.
- [9] Juvandes, L.F.P. - Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Armado usando Materiais Compósitos de “CFRP”. Tese de Doutoramento, Dep. Eng^a Civil, FEUP, 1999.
- [10] Dias, S.J.E. - Verificação experimental do reforço com CFRP de estruturas de betão à flexão. Tese de Mestrado, Dep. Eng^a Civil, FEUP, 2001.