

# Durabilidade de um adesivo epóxi e um laminado de CFRP expostos a distintas condições ambientais

Pedro Fernandes <sup>1</sup>, Patrícia Silva <sup>2</sup>, Luís Correia <sup>3</sup> e José Sena-Cruz <sup>4</sup>

<sup>1</sup> ISISE/Universidade do Minho, Guimarães, [pfernandes@civil.uminho.pt](mailto:pfernandes@civil.uminho.pt)

<sup>2</sup> ISISE/Universidade do Minho, Guimarães, [patricia.silva@civil.uminho.pt](mailto:patricia.silva@civil.uminho.pt)

<sup>3</sup> ISISE/Universidade do Minho, Guimarães, [lcorreia@civil.uminho.pt](mailto:lcorreia@civil.uminho.pt)

<sup>4</sup> ISISE/Universidade do Minho, Guimarães, [jsena@civil.uminho.pt](mailto:jsena@civil.uminho.pt)

**Palavras-chave:** Adesivo epóxi; laminado de CFRP; durabilidade; ensaios de envelhecimento acelerado; ações ambientais.

## RESUMO

*No contexto das estruturas reforçadas, os polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) são normalmente colados aos elementos a reforçar através de adesivos epóxicos. Nas duas últimas décadas tem sido desenvolvida significativa investigação, dedicada principalmente ao comportamento estrutural a curto prazo de estruturas reforçadas e raramente foi considerado a avaliação do tempo de vida útil da estrutura. A previsão do tempo de vida útil de uma estrutura requiere a avaliação da durabilidade dos materiais envolvidos. O presente trabalho tem como objetivo contribuir para o conhecimento de dois materiais específicos, um laminado de CFRP e um adesivo epoxídico, amplamente utilizados neste contexto. Para esse efeito, foi desenvolvido um programa experimental para avaliar a degradação das propriedades mecânicas em tração destes materiais devido ao efeito de cinco ações ambientais distintas: (i) ciclos térmicos; (ii) ciclos de gelo-degelo; (iii) imersão em água pura; (iv) imersão em água com cloretos; e, (v) ciclos de molhagem-secagem em água com cloretos. Os resultados obtidos indicam que a imersão em água pura foi o ambiente mais crítico para as amostras de epóxi, verificando-se uma redução da resistência máxima de 38% após dois anos de exposição. Os resultados também mostraram que os provetes de CFRP não apresentaram alterações significativas nas suas propriedades à tração, sendo o máximo decréscimo de 7% na tensão máxima.*

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a utilização de polímeros reforçados com fibras (FRP) no reforço de estruturas existentes constitui uma alternativa viável quando comparados com os materiais convencionais como o aço e o betão, sobretudo devido às vantagens que apresentam em relação a estes. Em geral, estes materiais podem ser designados de acordo com o tipo de fibras (carbono, vidro, aramida e basalto), da forma (laminados, mantas ou varões) e o sistema (pré-fabricados, curados *in situ* e *prepeg*). Os sistemas pré-fabricados são produzidos por pultrusão ou laminação e pré-curados sendo aplicados diretamente no elemento a reforçar, enquanto que os sistemas curados *in situ* são sistemas constituídos por mantas ou tecidos de fibras que podem ser aplicados em superfícies retas e convexas devido à sua flexibilidade, e em várias direções. Os sistemas *prepeg* são mantas ou tecidos unidirecionais ou multidirecionais pré-impregnados na fase de produção e parcialmente polimerizados com resina [1].

Várias técnicas de reforço com FRP têm sido desenvolvidas ao longo das últimas três décadas, sendo as técnicas mais comuns: (i) a EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) em que os FRP são colados externamente sobre a superfície do elemento estrutural a reforçar; e (ii) a NSM (*Near-Surface Mounted*) em que os laminados (ou varões) são inseridos em ranhuras abertas no betão de recobrimento. Devido à

sua baixa densidade, elevada resistência à tração e rigidez o FRP de carbono (CFRP) é o FRP mais usado para o caso de estruturas de betão. A ligação entre os FRP e a superfície de betão é um fator importante para o sucesso e eficiência da técnica de reforço. Normalmente a ligação é feita através de adesivos estruturais. Vários estudos mostram que CFRP colados com adesivo epóxi podem aumentar a capacidade máxima de carga e melhorar o comportamento em serviço das estruturas de betão armado [2, 3, 4].

Quando o sistema de reforço está exposto a diferentes condições ambientais, a evolução e variação das propriedades dos materiais envolvidos, bem como o sistema CFRP/epóxi/betão devem ser conhecidas, uma vez que desempenham um papel fundamental na viabilidade e tempo de vida útil da solução de reforço. Contudo, poucos trabalhos podem ser encontrados na literatura que abordem este tópico, e.g. [5, 6, 7].

A presente comunicação tem como objetivo contribuir para o conhecimento existente na durabilidade de dois materiais, nomeadamente laminado de CFRP e um adesivo epóxi. Para este efeito, com recurso a ensaios de envelhecimento acelerado, um extenso programa experimental de ensaios de tração realizados com laminados de CFRP e um adesivo epóxi, em provetes previamente expostos às seguintes condições ambientais: (i) ciclos térmicos; (ii) ciclos de gelo-degelo; (iii) imersão em água pura; (iv) imersão em água com 3.5% de cloretos; e, (v) ciclos de molhagem-secagem em água com 3.5% de cloretos. Adicionalmente, provetes de referência (ambiente de laboratório), sem qualquer tipo de ação de envelhecimento foram também testados. Dependendo da condição ambiental o período de exposição variou entre 120 e 720 dias.

## **2. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **2.1. Adesivo epóxi e laminado de CFRP**

O presente trabalho detalha o programa experimental, realizado com o objetivo de identificar e avaliar a influência de várias condições ambientais nas propriedades mecânicas do laminado de CFRP e um adesivo epoxídico amplamente utilizados pela indústria no reforço e reabilitação estrutural.

Os laminados de CFRP utilizados no presente trabalho, com secção transversal de 1.4 mm de espessura e 10 mm de largura, designação comercial *CFK 150/2000*, foram produzidos pela empresa S&P® Clever Reinforcement Ibérica e fornecido em rolos de 50 - 100 metros cada. Este laminado é constituído por fibras de carbono unidireccionais (percentagem em peso de cerca de 70%) solidarizadas através de uma matriz de *vinylester*, e apresenta uma superfície lisa. De acordo com o fabricante, o módulo de elasticidade e a resistência à tração devem ser superiores a 165 GPa e 2000 MPa, respetivamente [8].

O adesivo epoxídico usado neste trabalho foi também fornecido pela mesma empresa, com a denominação comercial *S&P Resin 220*. Trata-se de um adesivo epóxi bicomponente sem solventes, tixotrópico, que foi especialmente desenvolvido para colagem de laminados de fibra de carbono (S&P laminates CFK). De acordo com a ficha técnica do fabricante, o módulo de elasticidade é superior a 7.1 GPa; os valores médios da resistência à tração em flexão, a resistência à compressão e a tensão de aderência betão/laminado deste adesivo são respetivamente iguais a 30 MPa, 90 MPa e 3 MPa [9].

### **2.2. Descrição do programa experimental**

O programa experimental foi composto por 72 amostras de adesivo epóxi (*dog bone geometry*) e 60 provetes de laminado de CFRP. Os provetes foram agrupados em 6 séries como mostra a Tabela 1. Cada série, composta por 6 provetes, foi submetida a diferentes ações ambientais por um período de tempo que variou de 120 a 720 dias de exposição.

A série S0 foi usada como ambiente de referência (ADH\_REF720, FRP\_REF), i.e. os provetes foram mantidos em ambiente de laboratório durante dois anos a uma média de 20 °C de temperatura e 56% de humidade relativa. No caso do epóxi, foi considerada uma série adicional (ADH\_REF) que foi ensaiada

no início do programa experimental. O efeito das ações térmicas foi estudado através das séries S1 e S2, através de ciclos térmicos (TC) e ciclos de gelo/degelo (FT). Para estas ações, duas subséries foram definidas: provetes envelhecidos durante 120 e 240 dias, (TC120 e FT120) e (TC120 e TC240), respetivamente. Para ambos os casos, cada ciclo teve uma duração de 24 horas. Para a série S1, o ciclo térmico foi definido com base na norma EN 13687-3:2002 [10], tendo uma variação de temperaturas entre  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$  (com patamares de 12.5 e 10 horas para as duas temperaturas extremas). Os ciclos de gelo/degelo foram efetuados entre  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  de acordo com a norma CEN/TS 12390-9:2006 [11] e imersos em água no período do ciclo em que as temperaturas eram positivas. Para além das ações ambientais atrás referidas, como mostra a Tabela 1, foram consideradas mais três ações ambientais: provetes imersos em água pura a  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  (série S3 - PW); provetes imersos em água a  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  com 3.5% de cloretos (série S4 - CW); e provetes submetidos a ciclos de molhagem-secagem com água a  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  e com 3.5% de cloretos (série S5 - WD). Para estas séries metade dos provetes foram submetidos a estas ações durante 360 dias, enquanto que a outra metade continuou nas condições de envelhecimento até aos 720 dias.

Para cada série foi atribuída a denominação genérica: X\_YZ, em que X representa o tipo de material (ADH – adesivo epóxi; FRP – laminado de CFRP), Y indica a ação ambiental a que os provetes foram sujeitos (REF – ambiente de laboratório - referência, TC – ciclos térmicos, FT – ciclos de gelo/degelo, PW – água pura, CW – água com cloretos, WD – molhagem/secagem em água com cloretos) e Z é o número de dias que os provetes foram submetidos à correspondente ação ambiental.

**Tabela 1:** Programa experimental.

Séries	Ação ambiental	Adesivo epóxi	Laminado de CFRP
S0	Ambiente de laboratório (referência)	ADH_REF ADH_REF720	FRP_REF
S1	Ciclos térmicos	ADH_TC120 ADH_TC240	FRP_TC120 FRP_TC240
S2	Ciclos de gelo/degelo	ADH_FT120 ADH_FT240	FRP_FT120 FRP_FT240
S3	Imersão em água pura a $22^{\circ}\text{C}$	ADH_PW360 ADH_PW720	FRP_PW360 FRP_PW720
S4	Imersão em água a $22^{\circ}\text{C}$ com 3.5% de cloretos	ADH_CW360 ADH_CW720	FRP_CW360 FRP_CW720
S5	Ciclos de molhagem/secagem com água a $22^{\circ}\text{C}$ com 3.5% de cloretos	ADH_WD360 ADH_WD720	FRP_WD360 FRP_WD720

### 2.3. Geometria dos provetes e configuração de ensaio

As propriedades mecânicas, nomeadamente à tração, do adesivo epóxi e do laminado de CFRP foram avaliadas de acordo com as normas ISO 527-2:1993 [12] e ISO 527-5:1997 [13], respetivamente, depois de serem submetidos às ações de envelhecimento. No caso do adesivo epóxi foram usados uns moldes especiais para preparar os provetes, enquanto que no caso dos laminados de CFRP foram cortados diretamente do rolo com as dimensões exigidas.

As amostras de epóxi foram ensaiadas numa máquina universal, em controlo deslocamento à velocidade de  $1\text{ mm/min}$ . Foi utilizada uma célula de carga com capacidade máxima de  $50\text{ kN}$  (precisão de  $1/1000 \pm 0.5\%$ ) para medir as forças aplicadas. Para avaliar o módulo de elasticidade e as extensões foi utilizado um clip gauge de  $50\text{ mm}$  de comprimento na região central do provete ou através de um extensómetro (TML BFLA-5-3-3L) (ver Figura 1a). Os laminados de CFRP foram também ensaiados numa máquina universal em controlo deslocamento à velocidade de  $2\text{ mm/min}$ . Nos provetes de CFRP a força aplicada foi medida com uma célula de  $200\text{ kN}$  de capacidade máxima e as extensões foram medidas através de um clip gauge de  $50\text{ mm}$  de comprimento na região central do provete (ver Figura 1b).

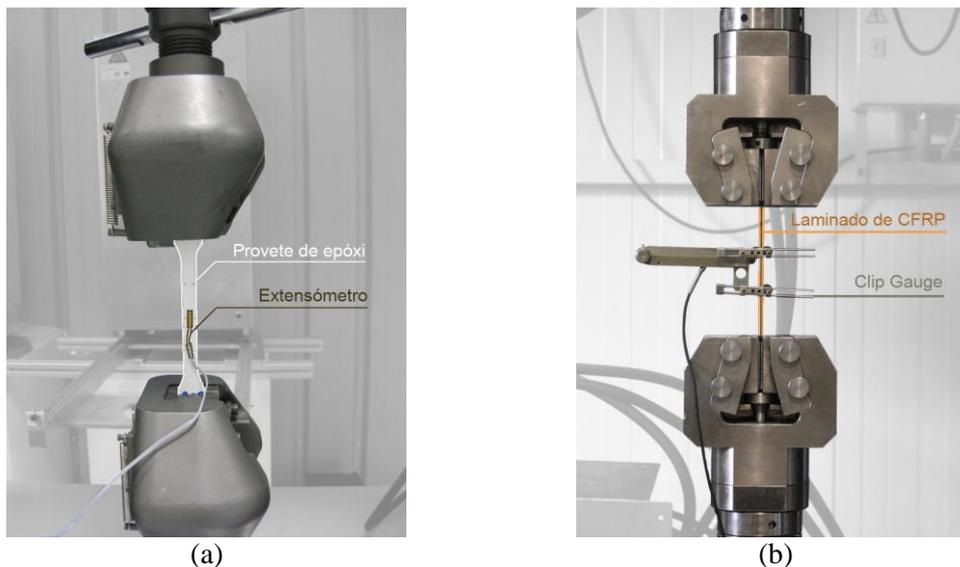


Figura 1: Configuração de ensaio adotada: (a) adesivo epóxi; (b) laminado de CFRP.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Adesivo epóxi

Figura 2a apresenta um exemplo típico da relação tensão *versus* extensão obtida nos ensaios de tração realizados no adesivo epóxi. Na Tabela 2 são apresentadas os valores médios e respetivos coeficientes de variação (CoV) relativos às propriedades mecânicas do adesivo epóxi obtidos a partir de 6 amostras por série, submetidos às diferentes condições ambientais consideradas (ver secção 2). As propriedades avaliadas foram: resistência à tração ( $f_{ult}$ ), módulo de elasticidade ( $E_{adh}$ ) e extensão corresponde à tensão máxima ( $\epsilon_{ult}$ ). A partir dos resultados as principais conclusões podem ser retiradas: (i) um aumento da tensão máxima e do módulo de elasticidade para as séries ADH\_TC120 e ADH\_TC240; (ii) um decréscimo na tensão máxima e no módulo de elasticidade para os provetes sujeitos a ciclos de gelo-degelo; e, por último, (iii) um decréscimo generalizado da tensão máxima e do módulo de elasticidade para as séries S3, S4 e S5.

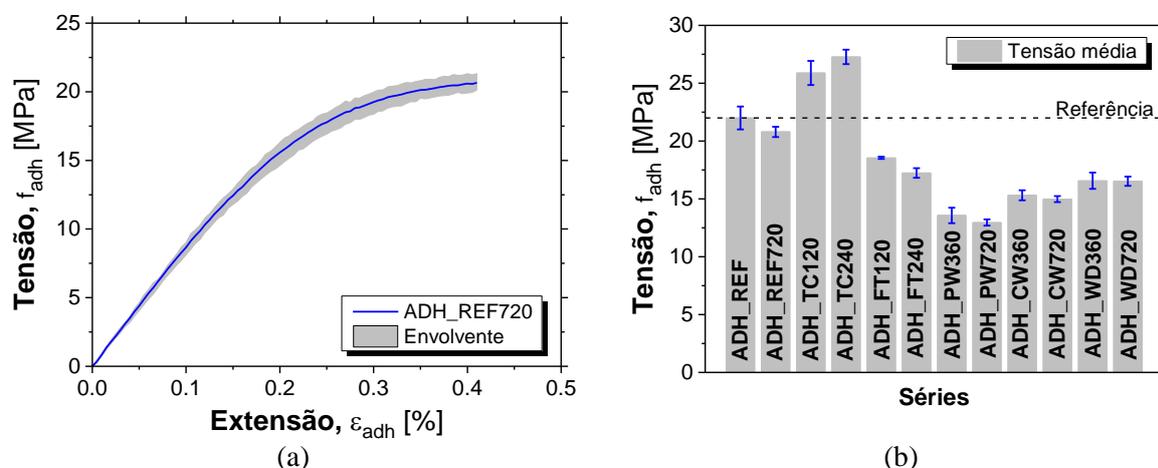


Figura 2: Adesivo epóxi: (a) curva típica tensão *versus* extensão; (b) resistência à tração obtida para cada série.

A resistência à tração aumentou 18% e 24% para as subséries ADH\_TC120 e ADH\_TC240 (séries S1), respetivamente, quando comparadas com a série de referência ADH\_REF (ver Figura 2b). A ficha técnica do adesivo epóxi não disponibiliza qualquer informação sobre o processo de cura e pós-cura do material. Contudo Moussa *et al.* [14] reportam que, dependendo do tipo de resina, é comum a existência

de uma fase pós-cura, que melhora as propriedades mecânicas do epóxi. Este processo começa quando o material é exposto a temperaturas superiores à temperatura da primeira cura.

Para as séries S2 (ciclos de gelo-degelo) a tendência esperada foi observada, i.e. verificou-se uma degradação das propriedades mecânicas devido ao envelhecimento. Para os provetes sujeitos a 120 e 240 ciclos (FT120 e FT240) verificou-se uma diminuição de cerca de 15% e 21% da resistência à tração do adesivo, respetivamente. O efeito da duração da ação ambiental, também representa um fator importante na variação das propriedades mecânicas, sendo maior para os provetes envelhecidos para períodos de exposição mais longos. Finalmente, deve ser referido que para estas séries a fase de pós-cura não ocorreu uma vez que as temperaturas aplicadas variaram entre  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Tabela 2:** Resistência à tração, módulo de elasticidade e extensão última obtida nos ensaios à tração no adesivo epóxi (valores médios).

Séries	$f_{Adh}$ [MPa]	$E_{Adh}$ [GPa]	$\epsilon_{Adh}$ [%]
ADH_REF	22.00 (4.52%)	7.15 (3.71%)	0.36 (15.22%)
ADH_REF720	20.79 (2.16%)	6.66 (3.41%)	0.43 (6.10%)
ADH_TC120	25.88 (4.02%)	7.50 (3.15%)	0.39 (10.76%)
ADH_TC240	27.27 (2.28%)	7.64 (4.66%)	0.43 (5.27%)
ADH_FT120	18.55 (0.55%)	5.93 (1.36%)	0.48 (6.12%)
ADH_FT240	17.24 (2.45%)	5.54 (1.75%)	0.45 (11.78%)
ADH_PW360	13.57 (4.89%)	4.10 (3.01%)	0.55 (23.78%)
ADH_PW720	12.96 (2.06%)	3.52 (3.31%)	0.75 (14.07%)
ADH_CW360	15.31 (2.86%)	4.72 (3.47%)	0.50 (10.57%)
ADH_CW720	14.99 (1.73%)	4.36 (1.45%)	0.68 (11.39%)
ADH_WD360	16.57 (4.24%)	5.43 (2.76%)	0.39 (18.20%)
ADH_WD720	16.53 (2.45%)	5.20 (3.24%)	0.51 (13.55%)

Note: Os valores entre parêntesis são os correspondentes coeficientes de variação (CoV).

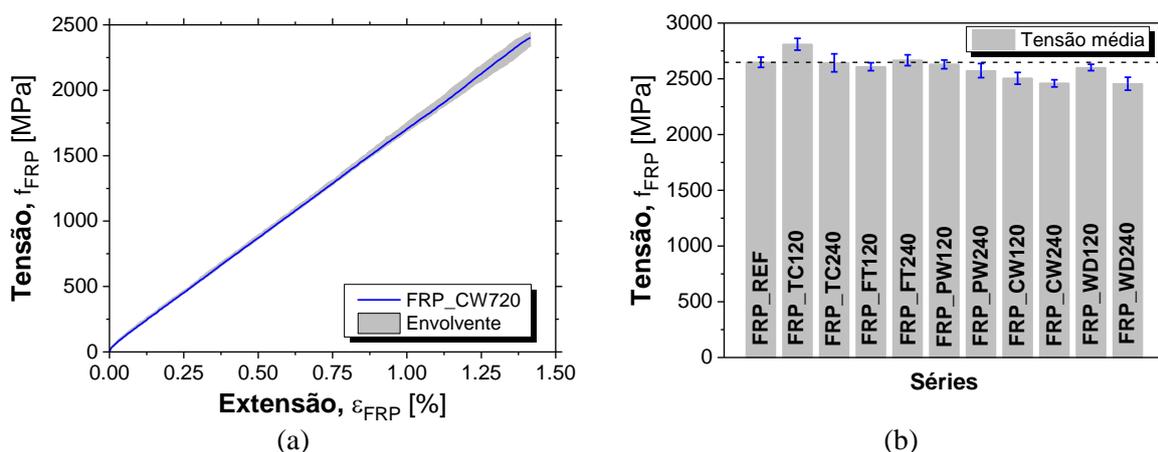
As restantes séries (S3, S4 e S5) apresentaram rácios de degradação mais elevados, quando comparadas com as séries S1 e S2. Como foi referido anteriormente, o tempo pode ser um fator importante na evolução das propriedades mecânicas. Assim, para estes provetes que foram envelhecidos por períodos de tempo mais longos, todas as comparações foram feitas em relação a ADH\_REF720 (provetes mantidos em ambiente de laboratório durante 720 dias). Os resultados mostram que nos provetes imersos em água pura (série S3) tiveram a maior taxa de degradação (-34% e -38% para as subséries ADH\_PW360 e ADH\_PW720, respetivamente).

Os adesivos epoxídicos absorvem água (humidade) e, como consequência ocorre a plasticização, aumentando o seu volume, provocando a degradação e correspondente diminuição das suas propriedades mecânicas, nomeadamente: a rigidez, resistência à tração e a diminuição da temperatura de transição vítrea [15, 16]. El Yagoubi *et al.* [16] explicam que o fenómeno de hidrólise observado quando este tipo de materiais são sujeitos a ciclos de molhagem e secagem, é caracterizado por reações químicas ao nível molecular que provocam a rotura das cadeias poliméricas. As séries S4 e S5 apresentam um menor rácio de degradação em comparação com os provetes imersos em água pura (série S3). Este facto pode estar relacionado com a presença dos cloretos, que não penetram no epóxi, e ao mesmo tempo desenvolvem uma membrana semipermeável. Como consequência, o processo de degradação ocorre de uma forma mais lenta [17].

Em resumo, as propriedades mecânicas do adesivo epóxi diminuem devido à presença da água. Por outro lado, para a série S1, devido à pós-cura que ocorreu devido à gama de temperaturas aplicadas, provocou um aumento das propriedades mecânicas.

### 3.2. Laminado de CFRP

A relação típica da tensão *versus* extensão obtida nos ensaios de tração dos laminados de CFRP é apresentada na Figura 3a (série FRP\_CW720), enquanto que a Tabela 3 inclui as propriedades mecânicas em termos de valores médios, nomeadamente tensão última ( $f_{FRP}$ ), módulo de elasticidade ( $E_{FRP}$ ) e extensão última, correspondente à tensão máxima ( $\epsilon_{FRP}$ ), determinados a partir de 6 amostras por subsérie, para todos os provetes ensaiados. De uma maneira geral, os laminados de CFRP parecem suportar as ações de envelhecimento a que foram expostos, sem grandes perdas das suas propriedades mecânicas (ver Figura 3b). O máximo decréscimo (7%) da resistência à tração ocorreu para as séries FRP\_CW720 e FRP\_WD720, quando comparadas com a série de referência FRP\_REF. Para os mesmos provetes observou-se uma redução de 5% a 6% na extensão última. Os provetes imersos em água pura durante 720 dias tiveram uma redução de 3% da resistência à tração. Os provetes expostos aos ciclos térmicos e gelo-degelo mantiveram as suas propriedades originais. Apesar da ligeira diminuição de 7% nas series S4 e S5 poder-se considerar desprezável, este resultado indica que a exposição aos cloretos (completamente imersos ou exposto a ciclos de molhagem/secagem) pode ser prejudicial ao sistema de reforço com laminados de CFRP.



**Figura 3:** Laminado de CFRP: (a) curva típica tensão *versus* extensão; (b) resistência à tração obtida para cada série.

**Tabela 3:** Resistência à tração, módulo de elasticidade e extensão última obtida nos ensaios à tração no laminado de CFRP (valores médios).

Séries	$f_{FRP}$ [MPa]	$E_{FRP}$ [GPa]	$\epsilon_{FRP,u}$ [%]
FRP_REF	2648.26 (1.76%)	169.48 (2.50%)	1.563 (1.80%)
FRP_TC120	2809.86 (1.89%)	169.56 (2.62%)	1.648 (3.54%)
FRP_TC240	2642.79 (3.04%)	169.42 (2.37%)	1.560 (2.03%)
FRP_FT120	2609.14 (1.37%)	166.05 (1.79%)	1.572 (2.64%)
FRP_FT240	2666.74 (1.82%)	169.66 (2.08%)	1.573 (3.56%)
FRP_PW360	2629.58 (1.48%)	166.48 (2.87%)	1.582 (2.65%)
FRP_PW720	2573.58 (2.46%)	165.44 (2.46%)	1.557 (4.20%)
FRP_CW360	2504.52 (2.13%)	170.13 (2.69%)	1.482 (3.53%)
FRP_CW720	2459.38 (1.31%)	167.30 (0.68%)	1.467 (1.19%)
FRP_WD360	2601.36 (1.12%)	165.08 (5.05%)	1.580 (6.25%)
FRP_WD720	2455.77 (2.34%)	166.12 (0.82%)	1.479 (2.97%)

Note: Os valores entre parêntesis são os correspondentes coeficientes de variação (CoV).

## 4. CONCLUSÕES

Foi realizado um programa experimental para avaliar a durabilidade de dois materiais comuns, utilizados no reforço de estruturas de betão armado: um adesivo epoxídico e um laminado de CFRP. Para tal, os materiais, foram expostos a diferentes condições ambientais. De acordo com os resultados obtidos as principais conclusões podem ser retiradas: (i) os provetes de CFRP apresentam perdas desprezáveis nas

propriedades mecânicas; (ii) os ciclos térmicos causaram uma pós-cura do epóxi que explica o aumento da resistência e rigidez; (iii) redução da tensão máxima e do módulo de elasticidade do epóxi devido à presença da água, nas séries S3, S4 e S5; e finalmente, (iv) o adesivo epóxi estudado parece ser mais suscetível à degradação quando imerso em água pura.

### **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho foi apoiado por fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade - COMPETE e fundos nacionais, através da FCT - Fundação Português de Ciência e Tecnologia no âmbito do projecto FRPreDur - PTDC/ECM-EST/2424/2012. O primeiro, segundo e terceiro autores agradecem também as bolsas SFRH/BD/80338/2011, SFRH/BD/89768/2012 e SFRH/BD/98309/2013, respetivamente, financiadas pela FCT. Os autores deste trabalho querem também agradecer a todas as empresas que apoiaram e contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, nomeadamente, à S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda., Casais – Engenharia & Construção S.A., Artercanter - Indústria de Transformação de Granitos, Lda., Tecnipor - Gomes & Taveira Lda., Vialam – Indústrias Metalúrgicas e Metalomecânicas, Lda., Hilti Portugal-Produtos e Serviços, Lda., Novo Modelo Europa, S.A., Sika Portugal - Produtos Construção e Indústria, S.A., Cachapuz - Equipamentos para Pesagem, Lda.

### **REFERÊNCIAS**

- [1] FIB, 2001, Fib Bulletin 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Fédération internationale du béton (fib): 138 pp. Lausanne, Switzerland.
- [2] Sena-Cruz, J., J. A. O. Barros, M. R. F. Coelho, and L. F. F. T. Silva, 2012, Efficiency of different techniques in flexural strengthening of RC beams under monotonic and fatigue loading. *Construction and Building Materials*, 29, 175-182, 4.
- [3] Michels, J., J. Sena-Cruz, C. Czaderski, and M. Motavalli, 2013, Structural Strengthening with Prestressed CFRP Strips with Gradient Anchorage. *Journal of Composites for Construction*, 17, 651-661.
- [4] Correia, L., T. Teixeira, J. Sena-Cruz, and J. Michels, (2014) Flexural strengthening of RC slabs with prestressed CFRP strips using different anchorage systems, presented at the 7th International Conference on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2014), Vancouver, Canadá.
- [5] Silva, P., P. Fernandes, J. Sena-Cruz, M. Azenha, and J. Barros, 2014a, Creep behavior and durability of concrete elements strengthened with NSM CFRP strips. 7th International Conference on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2014), Vancouver, Canada.
- [6] Silva, P., P. Fernandes, J. Sena-Cruz, M. Azenha, and J. Barros, 2014a, Behaviour of concrete elements strengthened with near surface mounted CFRP strips under thermal cycles. 7th International Conference on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2014), Vancouver, Canada.
- [7] Myers, J. J., and N. P. Muncy, 2014, Long term in-situ bond behavior of externally bonded fiber reinforced polymer laminates subjected to environmental conditioning. 7th International Conference on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2014), Vancouver, Canada.
- [8] S&P, 2014, Technical Data Sheet. S&P CFRP – Laminates. S&P slot-applied laminates. S&P Clever Reinforcement: 6pp.
- [9] S&P, 2013, Technical Data Sheet. S&P Resin 220 epoxy adhesive. S&P Clever Reinforcement: 3pp.
- [10] BSI, 2002, BS EN 13687-3. Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of thermal compatibility. Thermal cycling without de-icing salt impact. British Standard Institution (BSI): 12pp. London, England.
- [11] BSI, 2006, DD CEN/TS 12390-9. Testing hardened concrete. Freeze-thaw resistance. Scaling. British Standard Institution (BSI): 12pp. London, England.
- [12] ISO, 1993, 527-2 1993. Plastics – Determination of tensile properties – Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics. International Organization for Standardization (ISO): 5pp. Genève, Switzerland.

- [13] ISO, 1997, 527-5:1997. Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites. ISO - International Organization for Standardization, Genève, 11 pp.
- [14] Moussa, O., A. P. Vassilopoulos, J. de Castro, and T. Keller, 2012, Time-temperature dependence of thermomechanical recovery of cold-curing structural adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 35, 94-101.
- [15] Cabral-Fonseca, S., J. R. Correia, M. P. Rodrigues, and F. Branco, 2012, Artificial Accelerated Ageing of GFRP Pultruded Profiles Made of Polyester and Vinylester Resins: Characterisation of Physical-Chemical and Mechanical Damage. *Strain*. 48, 162-173.
- [16] El Yagoubi, J., G. Lubineau, S. Saghir, J. Verdu, and A. Askari, 2014, Thermomechanical and hygroelastic properties of an epoxy system under humid and cold-warm cycling conditions. *Polymer Degradation and Stability*, 99, 146-155.
- [17] Jones F.R., 1999, Durability of reinforced plastics in liquid environments. *Reinforced Plastics Durability*, 70-110.