

## **Degradação da aderência entre compósitos de GFRP e betão devido a condições ambientais severas**



**M. A. Gonçalves da Silva**<sup>1</sup>



**Hugo E.C. Biscaia**<sup>2</sup>



**Carlos Chastre**<sup>3</sup>

### **RESUMO**

A degradação da ligação entre compósitos de matriz polimérica reforçada por fibras (FRP) e o betão é uma das principais causas de possível rotura das vigas e lajes de betão armado reforçadas externamente por compósitos de FRP. Desde há mais de 10 anos que se estuda, por isso, na UNL o comportamento dessa ligação, integrado em programa mais alargado de estudo da durabilidade deste tipo de reforço, especialmente quando sujeito a condições ambientais severas que se simulam por processos artificialmente acelerados no laboratório. Em particular a degradação da aderência e o possível descolamento precoce do reforço têm sido modelados física e computacionalmente com principal incidência no uso de fibras de vidro (GFRP) e resina epoxídica. Nesta comunicação mostram-se resultados obtidos em termos de capacidade de carga, força transmitida ao reforço e tensões de aderência após envelhecimentos de pequenas vigas de betão armado (BA) por ciclos de nevoeiro salino, ciclos seco/molhado em solução salina, ciclos de temperatura entre +7,5°C e +47,5°C e gelo-degelo de -10°C a +30°C. Faz-se recomendação quanto à extensão máxima para diferentes envelhecimentos. Apresenta-se comparação entre resultados de modelação numérica e experimental.

**Palavras-chave:** Envelhecimento acelerado; Degradação; Aderência; Betão; GFRP.

### **1. INTRODUÇÃO**

O reforço de estruturas por compósitos de FRP é uma técnica que pode ser economicamente viável, mas que enfrenta incertezas de durabilidade que justificam investigação adicional à que tem sido feita. Em particular, a ligação entre os compósitos FRP e o betão, durante o tempo de serviço da estrutura reforçada, merece estudo que permita estimar a degradação da aderência FRP-betão, em termos de modos de rotura e de capacidade de carga.

---

<sup>1</sup> UNIC, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829 516 Caparica, Portugal.  
[mgs@fct.unl.pt](mailto:mgs@fct.unl.pt)

<sup>2</sup> UNIC, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829 516 Caparica, Portugal.  
[hb@fct.unl.pt](mailto:hb@fct.unl.pt)

<sup>3</sup> UNIC, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829 516 Caparica, Portugal.  
[chastre@fct.unl.pt](mailto:chastre@fct.unl.pt)

A ligação entre o compósito de FRP e o betão faz-se através de um adesivo e a resistência dessa ligação é melhorada por adequado tratamento da superfície de colagem. No caso do compósito reforçar a zona traccionada da viga ou laje, o crescimento da sollicitação externa ou/e a degradação daquele reforço podem conduzir a rotura coesiva na camada de betão adjacente à interface ou adesiva na interface, aqui entendida como incluindo o adesivo e as superfícies de betão e FRP com que contacta. O descolamento iniciado desde a extremidade do compósito é devida à formação e rápida propagação de fenda interfacial, associada a concentração de tensões entre a viga e o compósito naquela área e o estudo dessas tensões tem sido feito. Esse critério de prever o descolamento a partir das tensões na interface, inicialmente adoptado, foi seguido de critérios baseados na mecânica da fractura não linear (NLFM) em que se postula uma fenda e se determina a taxa de energia libertada para comparar com a energia de fractura do material da superfície. A NLFM inclui cálculo de tensões e de fractura e repete-se para fissuras de diferente dimensão. Mais recentemente, pela modelação da *zona coesiva* [2], conceito já antigo, diversos autores têm modelado o problema para a rotura de tipo II. Um número especial da revista *Advances in Structural Engineering*, vol. 9. N. 6 de 2006 sobre o comportamento da aderência em estruturas com compósitos de FRP proporciona uma visão global complementar destes métodos e de resultados obtidos. Apesar destas publicações, no entanto, a análise de efeitos ambientais sobre a aderência é escassa.

As publicações sobre efeitos ambientais têm-se multiplicado, mas a atenção tem incidido mais sobre alterações de capacidade de carga, ataque à ligação entre fibras e resina, aspectos macroscópicos das roturas do que à aderência, como por exemplo [4-8]. Em termos de degradação ambiental de aderência de EBR podem citar-se [9-11] em que o estudo se centra no possível descolamento do reforço por efeitos de humidade e temperatura. Dentro do referido programa da UNL originaram-se vários artigos, citando-se [12-15]. Esta nota refere parte deste trabalho e do que está em curso sobre a degradação da aderência entre compósitos de GFRP e betão considerando diversos agentes ambientais.

## **2. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

Foram concebidos vários tipos de acções ambientais aceleradas, reportando-se no seguimento os efeitos de ciclos de 24h (i) de nevoeiro salino (8h sob nevoeiro, 16h de secagem a 35°C); (ii) de seco/molhado (tipo marés) em água salina, 50g de NaCl por litro de água; (iii) de temperatura com 12h a +7,5°C e 12h a +47,5°C; e (iv) de gelo e degelo com 12h a -10°C e 12h a +30°C. Consideraram-se dois estágios de envelhecimento às 3000h e às 10000h para ensaiar os provetes e analisar a evolução das propriedades mecânicas e modos de rotura desde o início do envelhecimento (0h) momento em que se fizeram ensaios para referência.

Foram fabricadas e envelhecidas vigas de secção rectangular exteriormente reforçadas com compósitos de GFRP como se descreve abaixo. Os materiais utilizados foram caracterizados mecanicamente no Laboratório de Estruturas do DEC/FCT/UNL. As armaduras de aço consistiram em varões nervurados de diâmetro 4mm e da classe A500 endurecido a frio, ensaiados de acordo com as normas [16]. Os valores médios obtidos para a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% ( $f_{0,2m}$ ), tensão de ruptura à tracção ( $f_{tm}$ ), módulo de elasticidade ( $E_{sm}$ ) e extensão na ruptura ( $\epsilon_{srm}$ ) foram 406MPa, 649MPa, 203GPa e 1,3%, respectivamente. Constata-se baixa extensão na ruptura conferindo uma baixa ductilidade às vigas de BA.

O betão utilizado resultou de uma única betonagem na qual se produziram cubos e cilindros para a caracterização do betão aos vinte e oito dias e 21 vigas de secção rectangular (620×150×100mm<sup>3</sup>). A resistência característica à compressão do betão ( $f_{ck}$ ) de acordo com a norma EN 206 [17], aos vinte e oito dias, determinando que o betão utilizado é da classe C12/15. Os valores obtidos para a tensão à compressão média em cubos de betão ( $f_{cm,cub}$ ) e em cilindros ( $f_{cm}$ ) foram, respectivamente, 18,6MPa e 16,9MPa. A tensão à média de tracção ( $f_{ctm}$ ) e o módulo de elasticidade médio ( $E_{cm}$ ) no betão foram calculados em conformidade com o EC2 [18] obtendo-se 1,65MPa e 23,18GPa.

A caracterização do compósito de GFRP (Tyfo SEH51A com resina Tyfo S) foi feita a partir de provetes planos com as dimensões médias de 25×150mm e espessura de 2,54mm, ensaiados numa máquina de tracção universal *Zwick* de capacidade 50kN. A velocidade dos ensaios foi de 2mm/min e

os restantes procedimentos de acordo com as normas ASTM D3039/D3039M [19]. A curva tensão-deformação dos provetes planos de GFRP é linear e de ruptura frágil. O Quadro 1 mostra os valores registados no decorrer dos ensaios de tracção dos provetes planos de GFRP, podendo comparar-se com os valores às 0 horas em que se teve extensão média ( $\epsilon_{fm}$ ) 2,20%, tensão média na ruptura ( $f_{fm}$ ) 513,9MPa e módulo de elasticidade ( $E_{fm}$ ) igual a 23,49GPa. Observa-se diminuição sensível de  $\epsilon_{fm}$  para nevoeiro salino, e menos acentuada para ciclos de seco/molhado, às 10000h. A tensão de rotura diminui também para os ciclos de nevoeiro salino e de modo pouco significativo para os restantes envelhecimentos. Em termos de módulo de elasticidade o abaixamento é generalizado, sem grandes discrepâncias entre os tipos de ciclos com um máximo de 16% para os ciclos de seco/molhado.

Quadro 1. Caracterização dos provetes planos de GFRP.

Tipo de envelhecimento	Nº horas	$\epsilon_{fm}$ [%]	$f_{fm}$ [MPa]	$E_{fm}$ [MPa]
Referência	0	2,20	513,9	23,49
Ciclos de nevoeiro salino	3000	1,59	363,8	23,13
	5000	1,76	366,7	20,85
	10000	1,76	361,3	20,53
Ciclos de seco/molhado	3000	2,24	444,1	19,79
	5000	2,09	431,4	20,77
	10000	2,05	400,9	19,67
Ciclos de temperatura de +7,5°C a +47,5°C	3000	2,55	490,1	19,24
	5000	2,02	438,3	22,10
	10000	2,30	494,1	21,53
Ciclos de temperatura de -10°C a +30°C	3000	2,60	513,0	19,76
	5000	2,03	419,7	21,35
	10000	2,21	485,7	21,33

A carga nos ensaios à flexão de três pontos foi aplicada por um cilindro hidráulico que faz reacção num pórtico metálico. Um dos apoios da viga é fixo e o outro deslizante e o vão entre apoios foi de 570mm. A Fig.1.(a) mostra o esquema de ensaio e a instrumentação utilizada. A armadura das vigas consistiu em 4 varões longitudinais e estribos afastados de 50mm sendo o recobrimento utilizado de 1cm, Fig.1.(b).

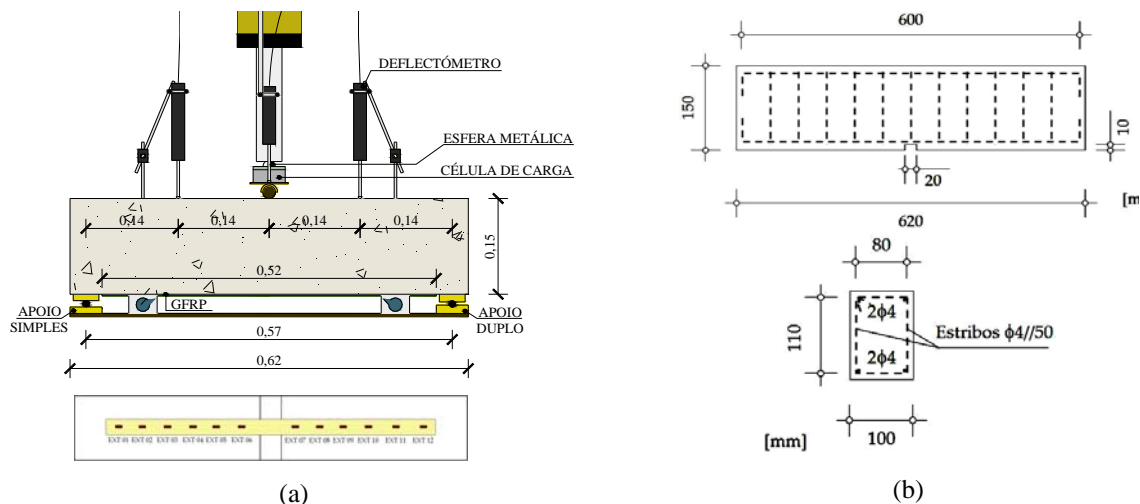


Figura 1. Ensaio de flexão. (a) Esquema de ensaio; (b) Pormenor das armaduras

O compósito de GFRP foi colado na face traccionada da viga e tem as dimensões 20×2,54×250 mm (largura×espessura de duas camadas×comprimento).

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 Capacidade de carga e deformação na rotura

Os ensaios das vigas sujeitas aos ciclos de envelhecimento foram feitos após 3000 e 10000 horas de exposição. Às 0 horas foram ensaiadas três vigas de referência sem envelhecimento. O Quadro 2 apresenta um resumo dos principais resultados obtidos, sendo  $P_{max}$  a carga externa na rotura.

Quadro 2. Síntese dos resultados experimentais das vigas (valores médios).

Tipo de envelhecimento	Nº horas	$P_{max}$ [kN]	$\epsilon_{max}$ [%]
Referência	0	22,7	0,98
Ciclos de nevoeiro salino	3000	22,0	1,01
	10000	26,5	0,96
Ciclos de seco/molhado	3000	23,7	0,99
	10000	24,4	0,86
Ciclos de temperatura (+7,5;+47.5)°C	3000	20,9	0,92
	10000	24,2	0,66
Ciclos de temperatura (-10;+30)°C	3000	24,3	1,20
	10000	25,3	0,88

O desenvolvimento das tensões de aderência nas vigas evidenciou, por inversão de sinal, o aparecimento de uma fissura ao longo do comprimento de colagem iniciada a cerca de 50mm do meio vão.

Os resultados dos ensaios das vigas submetidas a 3000 horas e 10000 horas de ciclos de nevoeiro salino mostram que um aumento de capacidade às 10000 horas para o valor médio de 26,5kN (cerca de 16,6% superior ao valor de referência). Complementarmente, a Fig. 2 permite observar que a carga relativa ao início da fendilhação das vigas reforçadas com compósito de GFRP aumentou de 6,7kN às 0 horas para 9,9kN às 10000 horas de envelhecimento. Este aumento da média da força na fendilhação das vigas envelhecidas pode ser explicado pelo facto do nevoeiro salino ter causado uma melhoria, ao longo do tempo, das propriedades do betão.

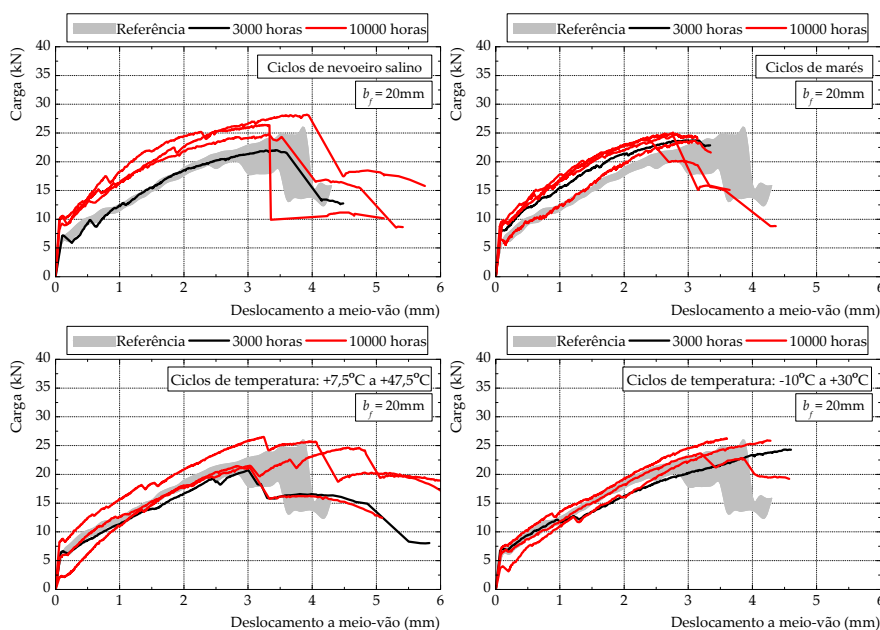


Figura 2. Evolução das curvas força vs. deslocamento a meio-vão nas vigas sujeitas a ciclos de envelhecimento.

Os ciclos de seco/molhado evidenciaram, em termos de carga máxima, valores ligeiramente superiores aos verificados nas vigas de referência. Por exemplo, o maior incremento de carga foi verificado às

10000 horas e a média calculada para a carga máxima foi de 24,4kN, ou seja, cerca de 7,5% superior à das vigas homólogas de referência. Na Fig. 2, pode observar-se que às 10000 horas de envelhecimento, o aumento da força na fendilhação das vigas foi menos acentuado do que para ciclos de nevoeiro salino e que às 10000 horas de envelhecimento com ciclos de seco/molhado, a média da força correspondente à fendilhação foi de 8,8kN.

A carga máxima às 3000 horas nas vigas sujeitas a ciclos (+7,5; +47,5)°C foi de 20,9kN (i.e. uma redução de 7,9% quando comparado com as vigas de referência). Porém, a média calculada para as vigas sujeitas a 10000 horas de envelhecimento foi de 24,2kN o que corresponde a um incremento de 16,2% relativamente às vigas de referência. A Fig. 2 permite ainda observar que, após a imposição dos ciclos de temperatura, em média, a força correspondente à fendilhação da viga e a fase pós fendilhada da viga não sofreram significativas variações relativamente às vigas de referência.

Os ciclos de gelo-degelo causaram um aumento na carga máxima em ambos os estágios de envelhecimento sendo o último estágio aquele que evidenciou o maior aumento (cerca de 14,2%). Comparando os diagramas carga externa vs. deslocamento a meio-vão das vigas de referência com as vigas sujeitas aos ciclos de gelo-degelo, observa-se que a fase pós fendilhada das vigas envelhecidas apresentam uma pequena diminuição de *rigidez*. Verifica-se ainda que a força média correspondente à fendilhação não se alterou com os envelhecimentos. Estes resultados mostram que os ciclos de temperatura gelo-degelo impostos às vigas degradaram ligeiramente as propriedades iniciais.

### 3.2 Tensões de aderência

As tensões de aderência nas vigas sujeitas a ciclos de nevoeiro salino foram diminuindo com os estágios de envelhecimento. No primeiro estágio de envelhecimento a tensão de aderência diminuiu cerca de 6,9% às 3000 horas e cerca de 10,9% às 10000 horas relativamente às vigas de referência. Comparando e analisando apenas as regiões não fendilhadas das vigas (mais junto aos apoios), a evolução das tensões de aderência ao longo do comprimento de colagem permitiu verificar que, para a mesma carga de 20kN, as tensões de aderência máximas nas vigas envelhecidas situam-se predominantemente numa região da viga mais próxima do meio-vão, Fig. 3.

As tensões de aderência máximas nas vigas sujeitas a ciclos seco/molhado tiveram, em média, uma redução de 39,9% às 3000 horas e de 29,5% às 10000 horas de exposição. A Fig. 4 permite verificar que, para a mesma carga  $P=20\text{kN}$ , os resultados são semelhantes aos obtidos nos ciclos de nevoeiro salino, isto é, a localização das tensões de aderência máxima nas regiões não fendilhadas das vigas é mais próxima do meio-vão nas vigas envelhecidas do que nas vigas de referência.

As tensões de aderência nas vigas sujeitas aos ciclos de temperatura entre +7,5°C e 47,5°C sofreram uma redução com o número de horas de envelhecimento. Às 3000 horas, a tensão de aderência máxima determinada foi de 5,20MPa o que traduz uma redução de 16,0% da média dos provetes de referência e sendo que às 10000 horas, a média das tensões de aderência máximas foi de 4,60MPa o que corresponde uma redução relativamente às vigas de referência em cerca de 25,6%. A Fig. 4 permite observar que as tensões de aderência máxima localizam-se, na sua generalidade, nas mesmas regiões de tensões de aderência máxima das vigas de referência, permitindo constatar que a distribuição destas tensões ao longo do comprimento de colagem ( $L_b$ ) não é afectada por este tipo de ciclos de temperatura.

As tensões de aderência máxima foram também reduzidas com os ciclos de temperatura entre -10°C e +30°C. As reduções maiores foram determinadas para o primeiro estágio de envelhecimento tendo-se verificado uma redução relativamente à média das vigas homólogas de referência de 22,1%. Às 10000 horas de envelhecimento, a média calculada da tensão de aderência máxima foi de 5,64MPa e que traduz uma redução relativamente às vigas de referência de 8,9%. Comparando o desenvolvimento das tensões de aderência ao longo do comprimento de colagem nas vigas de referência e nas vigas envelhecidas por ciclos de temperatura entre -10°C e +30°C (Fig. 3), para o mesmo nível de carga de 20kN verifica-se que as tensões de aderência máxima localizam-se essencialmente nas mesmas regiões de tensões de aderência máxima nas vigas de referência. Note-se que nas vigas sujeitas a ciclos de temperatura entre +7,5°C e +47,5°C já se tinha verificado esta mesma característica. Constata-se desta

forma que, para o mesmo nível de carga, a distribuição das tensões de aderência não foi muito afectada nas vigas sujeitas para ambos os ciclos de temperatura estudados.

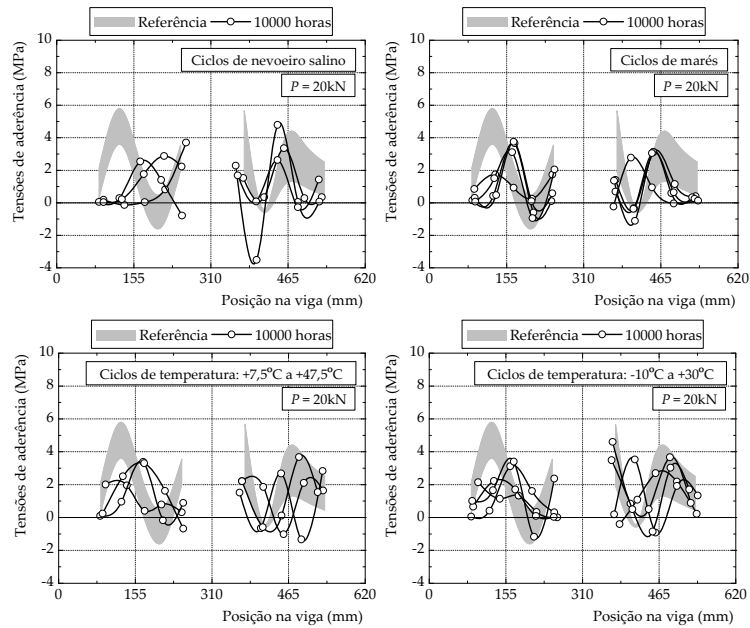


Figura 3. Evolução das tensões de aderência ao longo do comprimento de colagem para  $P=20\text{kN}$ .

### 3.3 Tensões longitudinais no compósito de GFRP

A distribuição das tensões longitudinais no compósito ao longo do comprimento de colagem nas vigas envelhecidas podem das distribuições observadas nas vigas de referência. A Fig. 4 mostra, para o patamar de carga de  $P=20\text{kN}$ , distribuições das tensões longitudinais no GFRP ao longo do comprimento de colagem para diferentes ciclos de envelhecimento permitindo a comparação com os valores de referência.

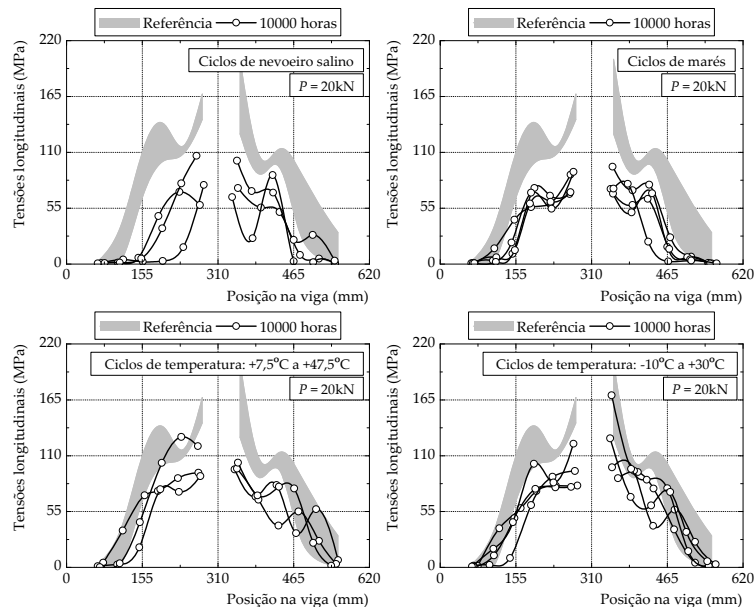


Figura 4. Evolução das tensões longitudinais no GFRP ao longo do comprimento de colagem para  $P=20\text{kN}$ .

Para os ciclos de nevoeiro salino e seco/molhado as distribuições destas tensões desenvolvem-se em comprimentos de colagem menores do que nas vigas de referência. Assim, para o mesmo nível de força transmitida ao compósito de GFRP, os deslizamentos nas vigas submetidas aos ciclos de nevoeiro salino e de marés são menores do que nas vigas de referência. Associado a menores

deslizamentos, para o mesmo nível de força no compósito, a tensão de aderência num determinado ponto da superfície de colagem, é sempre maior no caso da situação de referência. Por isso, acontece como se esperaria que a carga de ruptura nas vigas submetidas a ciclos de nevoeiro salino ( $P_{max}=26,5\text{kN}$  às 10000 horas) é superior à carga de ruptura obtida nas vigas de referência ( $P_{max}=22,7\text{kN}$ ).

### 3.4 Modos de rotura

Uma referência é indispensável nesta síntese ao facto do envelhecimento poder alterar os modos de rotura passando de rotura coesiva no betão a adesiva na interface. A Fig. 5 mostra o aspecto pós-rotura da superfície de compósitos de GFRP que reforçavam vigas de referência e sujeitas a 10000h de ciclos de nevoeiro salino e seco/molhado, denotando uma evolução de rotura coesiva para adesiva [12].



Figura 5. Pós-rotura de compósitos de GFRP de vigas referência e sujeitas a 10000h de ciclos de nevoeiro salino e seco/molhado (tipo marés).

## 4. MODELAÇÃO COMPUTACIONAL

A modelação computacional dos ensaios utilizou o código ATENA 3D [20] escrito para análise não linear usando elementos finitos. A fissuração no betão é baseada no conceito do *smearred crack* sendo utilizado o conceito de banda da fissura e introduzida a energia de fractura do betão.

Foi modelado apenas 1/4 da viga explorando a simetria existente. A discretização foi feita de forma a refinar adequadamente a malha do elemento de GFRP com 2,54mm de espessura. O modelo das vigas tem 3569 elementos e 5249 nós. As armaduras foram modeladas com base em elementos unidimensionais nos quais o esforço normal (de tracção ou compressão) é o único esforço suportado pelo elemento. A interface entre varões de aço e betão foi modelada recorrendo às leis *bond-slip* preconizadas no Model Code 90 [21] para varões lisos e endurecidos a frio. A ligação GFRP/betão foi representada por elementos finitos de interface e o critério de ruptura considerado foi do tipo Mohr-Coulomb [22].

Os resultados mostraram boa precisão para a carga máxima (erro relativo de 1,4%), enquanto os deslocamentos após a fendilhação, no modelo, foram inferiores aos experimentais em cerca de 31,4%. As extensões medidas experimentalmente e as obtidas do cálculo, para níveis de carga iguais, evidenciaram um desenvolvimento muito similar ao longo do comprimento de colagem.

## 5. ESTIMATIVA DA EXTENSÃO MÁXIMA

Atendendo à importância para o projectista e com base no ensaios experimentais propõe-se preliminarmente a expressão seguinte para  $\varepsilon_{f,max}$  em que os efeitos ambientais são introduzidos por  $i_{E_f}$  e  $a/a_{0,j}$  [23]:

$$\varepsilon_{f,max} = \begin{cases} \alpha_v \cdot L_{ef}^{0,5} \cdot \sqrt{\frac{a}{a_{0,j}} \cdot \frac{2}{i_{E_f} \cdot E_f \cdot t_f} \cdot \frac{G_F^{II}}{L_{ef}}} \cdot (1 + \lambda) & \text{se } \frac{s_{rm}}{L_{ef}} \geq 1 \\ \alpha_v \cdot L_{ef}^{0,5} \cdot \sqrt{\frac{a}{a_{0,j}} \cdot \frac{2}{i_{E_f} \cdot E_f \cdot t_f} \cdot \frac{G_F^{II}}{L_{ef}}} \cdot (1 + \lambda) \cdot s_{rm} \cdot \left(2 - \frac{s_{rm}}{L_{ef}}\right) & \text{se } \frac{s_{rm}}{L_{ef}} < 1 \end{cases} \quad (1)$$

onde  $\alpha_v=1,57$  no caso dos ensaios à flexão e  $\alpha_v=1,00$  no caso dos ensaios de corte;  $s_{rm}$  é o espaçamento médio entre fissuras dado pela expressão [23]:

$$s_{rm} = \frac{f_{ctm} \cdot n \cdot \phi}{4\rho_{aço} \cdot \tau_{med}^{aço} + \frac{\tau_{med}^{FRP}}{t_f} \cdot \rho_{FRP} \cdot n \cdot \phi} \quad (2)$$

em que  $n$  é o número de varões de diâmetro  $\phi$ ; a tensão de aderência média no aço vem dada por  $\tau_{med}^{aço}=1,8f_{ctm}$  [24]; a tensão de aderência média no compósito de FRP ( $\tau_{med}^{FRP}$ ) na qual se assume que é 40% a 50% da tensão de aderência máxima da ligação FRP-betão ( $\tau_{max}$ );  $\rho_{aço}$  e  $\rho_{FRP}$  são calculados de acordo com:

$$\rho_{aço} = \frac{A_{aço}}{A_{betão}} \text{ e } \rho_{FRP} = \frac{A_{FRP}}{A_{betão}} \quad (3)$$

em que  $A_{aço}$ ,  $A_{FRP}$  e  $A_{betão}$  são, respectivamente, a área da secção transversal de aço, do compósito de FRP e do betão;  $\lambda$  é a relação entre as forças transmitidas ao compósito de FRP em cada uma das fissuras determinada com base no diagrama de momentos flectores da viga;  $i_{Ef}$  é o índice de degradação do módulo de elasticidade do compósito de GFRP (obtido em ensaios de tracção de provetes planos); e  $a/a_{0,j}$  introduz o efeito dos ciclos de envelhecimento e cujos valores estão indicados no Quadro 3;  $G_F^{II}$  é a energia de fractura do Modo II obtida de acordo com a proposta apresentada em [22] e  $L_{ef}$  é o comprimento efectivo da ligação GFRP/betão dado por [24]:

$$L_{ef} = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{c_2 \cdot f_{ctm}}} \quad (4)$$

sugerindo-se  $c_2=0,8$  no caso do compósito ser GFRP [22].

Quadro 3. Valores de  $i_{Ef}$  e  $a/a_{0,j}$  relativos às 10000 horas de envelhecimento.

Tipo de envelhecimento	$i_{Ef}$ [-]	$a/a_{0,j}$ [-]
Sem envelhecimento ambiental significativo	1,00	1,00
Ciclos de nevoeiro salino	0,87	1,00
Ciclos de seco/molhado	0,84	1,11
Ciclos de temperatura(+7,5;+47,5)°C	0,92	0,84
Ciclos de temperatura (-10; +30)°C	0,91	1,03

A Fig. 6 mostra a comparação das extensões com os resultados da modelação computacional, mostrando razoável precisão principalmente para os ensaios de referência. A Eq. 1 sobreestima apenas um valor experimental nos ciclos de nevoeiro salino com erro superior a 20%. Em relação aos valores calculados computacionalmente sobreestima-os em todos os ciclos de envelhecimento.

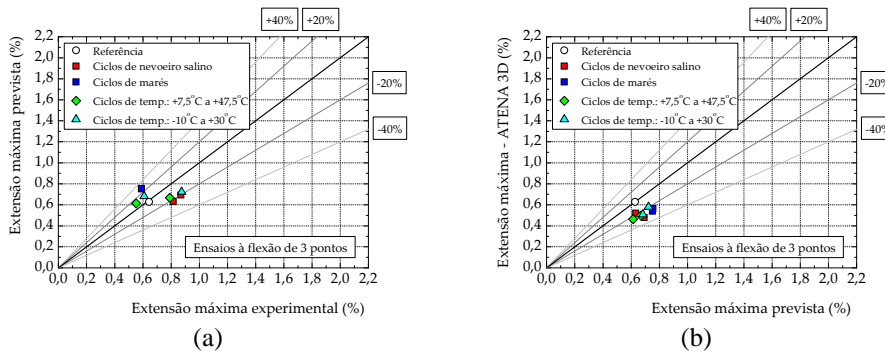


Figura 6. Comparação entre as extensões máximas prevista pela Eq. 1 e (a) obtidas experimentalmente; (b) calculadas a partir do modelo computacional.



## CONCLUSÕES

Foi exposta a importância de levar em conta a degradação da aderência entre os reforços externos com compósitos de FRP e a superfície de vigas ou lajes de betão armado assim reforçadas.

Foi referida literatura técnica existente sobre a durabilidade de estruturas reforçadas com compósitos de FRP e evidenciado o programa que vem sendo desenvolvido há cerca de 10 anos no Centro de Investigação de Engenharia de Estruturas da UNL, especialmente envolvendo compósitos de GFRP e resina epoxídica.

Ilustrou-se parte dos resultados do mencionado estudo da degradação da aderência GFRP-betão mostrando resultados obtidos num sub-programa que envolveu ensaios de 21 vigas de BA exteriormente reforçadas com compósito de GFRP (SEH 51A e epoxy S), com pequena descontinuidade de colagem a meio vão, sujeitas a ciclos de envelhecimento ambiental acelerado. Verificou-se que:

- As extensões desenvolvidas no compósito na rotura das vigas foi de cerca de 50% da sua extensão de rotura em ensaios de tracção;
- Às 10000 horas, os ciclos de temperatura entre +7,5°C e +47,5°C conduziram a maior redução na extensão máxima (-38,2%) seguida das vigas sujeitas a ciclos de marés (-24,2%). Os ciclos de nevoeiro salino tiveram a menor redução na extensão máxima relativamente às 0 horas (-14,5%);
- As distribuições das tensões de aderência ao longo do comprimento de colagem foram também afectadas pelos ciclos de nevoeiro salino e de marés, e, para um mesmo nível de carga, a localização das tensões de aderência máxima ocorre em região mais central do que nas vigas de referência;
- Os ciclos de nevoeiro salino e de marés influenciaram de forma considerável a distribuição das tensões no GFRP para o mesmo nível de carga, mostrando-se sempre majoradas pelas distribuições obtidas nas vigas de referência;
- A modelação computacional "*smearred crack*" previu com grande precisão as cargas máximas da vigas. No entanto, o erro obtido para os deslocamentos na ruptura subiram consideravelmente tendo chegado a 31,4%;
- A proposta de estimativa para extensão máxima no compósito de GFRP considerando os agentes ambientais agressivos é preliminar, mas mostrou razoável precisão com erros inferiores a 20% na comparação com extensões máximas obtidas nos ensaios.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi parcialmente desenvolvido no âmbito do Projecto DUST-PTDC/ECM/100538/2008, financiado pela Fundação da Ciência e Tecnologia, apoio que os autores agradecem.

## REFERÊNCIAS

- [1] De Lorenzis, L. and Zavarise, G. (2009). Cohesive zone modeling of interfacial stresses in plated beams, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46, pp. 4181-4191.
- [2] Jiao, P.; Chen, A. and Davalos, J.F. (2012). Cohesive zone model of FRP-concrete interface under combined thermal and mechanical loading, CICE 2012, Roma.
- [3] Barenblatt, G.I. (1959). The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* (PMM), Vol. 23, pp. 434-444.

- [4] Toutanji, H.A. and Gómez, W. (1997). Durability characteristic of concrete beams externally bonded with FRP composite sheets, *Journal of Cement and Concrete Composites*, Vol. 19 , pp. 351-358.
- [5] Mukhopadhyaya, P.; Swamy, R.N. and Lynsdale, C.J. (1998). Influence of aggressive exposure conditions on the behaviour of adhesive bonded concrete-GFRP joints, *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 12, pp. 427-446.
- [6] Hamilton, H.R. and Dolan, C.W. (2000). Durability of FRP reinforcements for concrete, *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 2, No 2, pp. 139-145.
- [7] Kajorncheappunngam, S.; Gupta, R.K.. and Ganga Rao, H.V.S. (2002). Effect of Aging Environment on Degradation of Glass-Reinforced Epoxy. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 6, No. 1, pp. 61-69.
- [8] Kootsookos, A. and Mouritz, A.P. (2004). Seawater durability of glass- and carbon-polymer composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 64, pp. 1503-1511.
- [9] Au, C. and Büyüköztürk, O. (2006). Peel and shear fracture characterization of debonding in FRP plated concrete affected by moisture, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 10, No. 1, pp. 35-47.
- [10] Klamer, E.L.; Hordijk, D. and Janssen, H.J.M. (2005). The influence of temperature on the debonding of externally bonded CFRP, FRPRCS-7, Kansas City, USA, pp. 1551-1570.
- [11] Jia, J.; Boothby, T.E.; Bakis, C.E. and Brown, T.L. (2005). Durability evaluation of glass fiber reinforced-polymer-concrete bonded interfaces, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 9, No. 4, pp. 348-359.
- [12] Silva, M.A.G. and Biscaia, H. (2010). Effects of exposure to saline humidity on bond between GFRP and concrete, *Journal of Composite Structures*, Vol. 93, No. 1, pp. 216-224.
- [13] Silva, M.A.G. and Biscaia, H. (2008). Degradation of bond between FRP and RC Beams, *Journal of Composite Structures*, Vol. 85, No. 2, pp. 166-174.
- [14] Silva, M.A.G.. (2007). Aging of GFRP Laminates and Confinement of Concrete Columns, *Journal of Composite Structures*, Vol. 79, No. 1, pp. 97-106.
- [15] Silva, M.A.G.; Biscaia, H. and Chastre, C. Influence of Temperature Cycles on Bond between GFRP and Concrete, submitted to ACI Structural Journal.
- [16] NP-EN 10002-1 (1990). Materiais metálicos - Ensaio de tracção. Comité Europeu de Normalização.
- [17] NP-EN 206-1 (2007). Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade, Versão Portuguesa.
- [18] Eurocode 2 (2004). Design of concrete structures - General rules and rules for buildings, EN 1992-1-1.
- [19] ASTM-D3039/D3039M (1995). Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, Annual book of ASTM Standards.
- [20] Cervenka, V.; Jendele, L. and Cervenka, J. (2007) ATENA program documentation - Part 1 - Theory, Cervenka Consulting, Prague.
- [21] Model Code 90 (1993). Design code, CEB-FIB, Bulletin d'Information 213/214.
- [22] Biscaia, H.C.; Chastre, C. and Silva M.A.G. (2012). Double shear tests to evaluate the bond strength between GFRP/concrete elements. *Journal of Composite Structures*, Vol. 94, No. 2, pp. 681-694.
- [23] Biscaia, H.C. (2012). Relatório Interno -UNIC/FCT/UNL.
- [24] Fédération Internationale du Béton, fib (2001). Bulletin d'information n. 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures.