

## Factores que influenciam o desempenho da ligação GFRP/betão



David Lucas<sup>1</sup>



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



M. A. Gonçalves  
da Silva<sup>3</sup>



Carlos Chastre<sup>4</sup>

### RESUMO

Os compósitos de FRP podem descolar prematuramente da superfície de betão, isto é, antes de esgotada a sua resistência elástica. Esta situação é mais provável se não forem tidos em conta factores como o tipo de preparação da superfície, a exposição a acção ambiental severa, e a resistência do próprio betão. Com o objectivo de analisar a influência de parte destes factores no desempenho da ligação compósito de fibra de vidro (GFRP) e betão, empreendeu-se uma campanha experimental baseada em ensaios de corte duplo. Os resultados permitiram determinar e comparar as forças máximas transmitidas ao GFRP e tensões de aderência máxima para diferentes tratamentos de superfície e condições de envelhecimento. Foram também determinadas aproximações para curvas de tensão de aderência vs. deslizamento (*bond-slip*). Os resultados obtidos são contrastados com resultados obtidos por modelação numérica.

**Palavras-chave:** Aderência, GFRP, tratamento de superfície, reforço de vigas, corte duplo.

### 1. INTRODUÇÃO

A aplicação de compósitos de FRP no reforço e reabilitação de estruturas de betão armado tem merecido numerosos estudos, e.g. [1-8], mas poucos são os trabalhos que se debruçam sobre os factores que condicionam e afectam o desempenho da ligação. Distinguem-se os seguintes factores que influenciam o desempenho da ligação FRP/betão:

- (i) Comprimento de colagem do GFRP;
- (ii) Tipo de preparação da superfície de colagem;
- (iii) Resistência à tracção do betão;

---

<sup>1</sup> Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829 516 Caparica, Portugal.  
[djplucas@gmail.com](mailto:djplucas@gmail.com)

<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.  
[mgs@fct.unl.pt](mailto:mgs@fct.unl.pt)

<sup>4</sup> UNIC, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829 516 Caparica, Portugal.  
[chastre@fct.unl.pt](mailto:chastre@fct.unl.pt)

- (iv) Exposição a agentes ambientais agressivos;
- (v) Campo de tensões gerado na interface e vizinhança.

Um comprimento de colagem insuficiente tem como consequência a limitação da força máxima transmitida ao FRP. Por outro lado, um comprimento de colagem excessivo não acresce à força máxima transmissível que corresponde a um comprimento de colagem dito efectivo a partir do qual não se consegue transmitir mais força ao FRP ( $L_{ef}$ ).

O betão desempenha um papel importante porque a resistência dos sistemas FRP/betão, frequentemente, é coesiva por rotura do betão à tracção no estrato adjacente à interface, ou depende da distribuição e valor máximo das tensões de aderência que estão dependentes da superfície do betão em que se efectua a colagem.

O campo de tensões gerado e/ou imposto na ligação é também determinante da resistência alcançada como se vai referir.

## 2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Efectuou-se uma campanha de ensaios de corte duplo em sistema GFRP/betão com o objectivo de analisar a capacidade e o modo de rotura da ligação GFRP/betão, para diferentes condições impostas nos ensaios. Fez-se variar: (i) o tipo de tratamento de superfície, considerando jacto de areia seca (com 4bar de pressão), rebarbadora e ausência de tratamento; (ii) usados diferentes comprimentos de colagem ( $L_b$ ) de 60, 75, 100, 150 e 200mm; (iii) para provetes com  $L_b=150$ mm, aplicado pressão uniforme externa ( $\sigma$ ), para valores  $\sigma=0, 0,5$  e  $1,0$ MPa; e (iv) quatro tipos de betão.

Na Fig. 1 mostram-se as diferentes superfícies de betão analisadas. Realce-se que para o jacto de areia se adoptou 2 situações distintas: (i) aplicação normal (retirando apenas a camada superficial do betão); e (ii) aplicação exagerada (expondo em demasia os agregados).

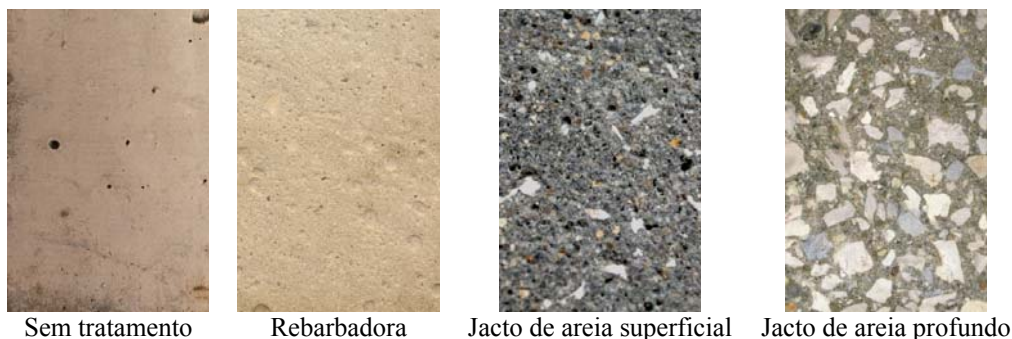


Figura 1. Tratamentos de superfície efectuados.

### 2.1 Materiais

O betão utilizado nos provetes de corte duplo foi caracterizado e pertencia a quatro classes de resistência, designadamente, C12/15, C25/30, C30/37 e C45/55 [9]. As propriedades do compósito de GFRP foram obtidas a partir de ensaios de tracção realizados numa máquina de tracção universal Zwick. A extensão ( $\epsilon_{fm}$ ) e a tensão ( $f_{fm}$ ) na ruptura média do GFRP obtidas foram, respectivamente, 2,20% e 513,9MPa com um coeficiente de variação (CV) inferior a 5,0%. O módulo de elasticidade do compósito de GFRP foi calculado valendo  $E_f=23,49$ GPa.

### 2.2 Ensaios de corte duplo

O ensaio de corte duplo consistiu na aplicação de uma força de arrancamento através de um cilindro hidráulico que pressiona uma peça semi-circular de betão e teve a força de reacção na base do cilindro medida por célula de carga colocada na parte de trás do cilindro. A Fig. 2 mostra o esquema de ensaio

adoptado. Nos casos em que se impôs uma tensão de compressão à ligação GFRP/betão o esquema de ensaio foi ligeiramente alterado [1].

Os provetes sujeitos a corte duplo são compostos por cubos ou prismas de betão com arestas nunca inferiores a 150mm e em que se colou, após tratamento de superfície, uma faixa de GFRP unidireccional com 80mm de largura, com 2 camadas (1,27mm por camada) de espessura, como mostrado na Fig. 2.

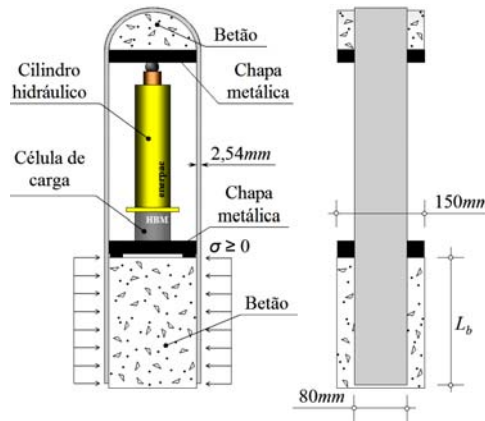


Figura 2. Esquema do ensaio de corte duplo.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 Forças máximas

A Fig. 3 mostra os gráficos das forças máximas vs. comprimento de colagem organizados de acordo com o tipo de tratamento de superfície adoptado. Os resultados evidenciam uma forte dispersão, mas alguns indícios podem ser identificados. Por exemplo, verifica-se que para o betão de classe C30/37 o tratamento por jacto de areia é aquele que obtém um melhor desempenho. O mesmo não se verifica para o betão C25/30 para o qual não se pode concluir qual o melhor tratamento a adoptar, verificando-se em algumas situações (75 e 150mm) que os provetes sem tratamento têm uma carga de ruptura superior. Este facto diverge do observado por Li *et al.* [2] que verificaram melhor comportamento para superfícies tratadas por agulhas metálicas em cerca de 11,2% em relação a ausência de tratamento. Esses autores referem que este facto se deve a uma pior ligação à pasta de cimento, comparada com a superfície incluindo agregados pós-tratamento.

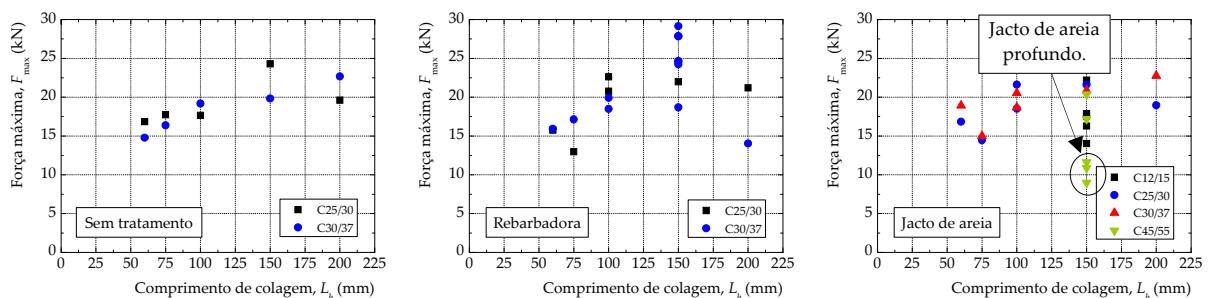


Figura 3. Forças máximas transmitidas ao composto de GFRP - diferentes superfícies.

Relativamente aos ensaios com betão C12/15, verifica-se que para o comprimento de colagem de 150mm as forças máximas foram semelhantes àsquelas determinadas nos ensaios com comprimento de colagem inferior a 100mm (betões C25/30 e C30/37) evidenciando a influência da classe de resistência à compressão do betão no desempenho da ligação GFRP/betão. Comparando os tratamentos por jacto de areia, verifica-se que se obtém forças máximas inferiores para um tratamento que foi excessivo

causado pela formação de muitos vazios após a aplicação do adesivo nas regiões de betão com rugosidade mais acentuada, vazios que debilitaram a resistência da ligação.

### 3.2 Comprimento efectivo

O comprimento efectivo da ligação GFRP/betão ( $L_{ef}$ ) pode ser estimado em função dos gráficos da Fig. 3, através da identificação do comprimento a partir do qual a força máxima transmitida ao compósito de GFRP não aumenta. A diferenciação entre os tipos de tratamento de superfície não permitiu identificar grandes diferenças e, por conseguinte, mais ensaios terão que ser feitos. No entanto, com base nestes dados pode constatar-se que os comprimentos efectivos para cada uma das situações situa-se entre os 100mm e os 150mm. De notar que outras formas para determinar o comprimento efectivo podem ser encontradas na literatura, e.g. [1, 10], nomeadamente através do conhecimento das distribuições das tensões de aderência ou/e das extensões no FRP ao longo do comprimento de colagem.

### 3.3 Tensões de aderência

A determinação das tensões de aderência máximas foi feita de acordo com a metodologia apresentada por Biscaia *et al.* [1] que não exige a colagem de extensómetros no compósito de FRP. A expressão da tensão de aderência máxima ( $\tau_{max}$ ) obtém-se a partir da tensão de aderência média ( $\tau_{med}$ ) em função dos comprimentos de colagem e efectivo da ligação aplicando a expressão:

$$\frac{\tau_{max}}{\tau_{med}} = \frac{\pi}{2} \cdot L_b \cdot \sqrt{\frac{c_2 \cdot f_{ctm}}{E_f \cdot t_f}} \cdot \coth \left( \frac{\pi}{2} \cdot L_b \cdot \sqrt{\frac{c_2 \cdot f_{ctm}}{E_f \cdot t_f}} \right) \quad (1)$$

onde  $E_f$  e  $t_f$  são, respectivamente, o módulo de elasticidade e a espessura do GFRP,  $f_{ctm}$  é a resistência média à tracção do betão,  $c_2=0,8$  (no caso do GFRP [1]) e a tensão de aderência média ( $\tau_{med}$ ) é determinada pela expressão:

$$\tau_{med} = \frac{F}{b_f \cdot L_b} \quad (2)$$

onde  $b_f$  é a largura do compósito de FRP. O Quadro 1 mostra a média das tensões de aderência máximas calculadas para as quatro classes de resistência do betão. Apesar de se ter alguma dispersão nos resultados (com  $8,5\% \leq CV \leq 31,6\%$ ), estes indiciam que o tratamento da superfície de betões mais "fracos" através do jacto de areia conduz a um desenvolvimento de tensões de aderência máximas na ligação maiores do que para betões de classe superior. Realce-se, no entanto, a importância que o tratamento da superfície de betão para qualquer classe de resistência e que é traduzida pelo aumento das tensões máximas de aderência na ligação comparadas com a situação de superfície não tratada. Verifica-se ainda que o aumento da classe de resistência do betão proporciona um aumento nas tensões máximas de aderência na ligação.

Quadro 1. Média das tensões de aderência máxima nos provetes sujeitos a jacto de areia.

| Betão  | Trat. <sup>mento</sup> de superfície | T. de ader. máx., $\tau_{max}$ [MPa] | CV [%] |
|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------|
| C12/15 | Jacto de areia                       | 2,02                                 | 15,2   |
| C25/30 | Sem tratamento                       | 3,02                                 | 24,6   |
| C25/30 | Jacto de areia                       | 3,48                                 | 20,1   |
| C25/30 | Rebarbadora                          | 3,12                                 | 17,3   |
| C30/37 | Sem tratamento                       | 3,17                                 | 31,6   |
| C30/37 | Jacto de areia                       | 3,37                                 | 20,7   |
| C30/37 | Rebarbadora                          | 3,39                                 | 25,8   |
| C45/55 | Jacto de areia exagerado             | 1,53                                 | 10,6   |
| C45/55 | Jacto de areia                       | 2,74                                 | 8,5    |

### 3.4 Leis *bond-slip*

A determinação das leis *bond-slip* pode ser feita de duas formas: (i) directamente através da leitura realizada a partir de extensómetros colados no compósito de FRP e ao longo do comprimento de colagem; e (ii) indirectamente através da relação entre a extensão imposta ao compósito de FRP e o *slip* último ( $s_{ult}$ ) da ligação. Como apenas se colaram extensómetros no compósito de GFRP nos provetes com betão das classes, C25/30 e C30/37, optou-se pela segunda forma de determinação da curva *bond-slip* recorrendo ao modelo proposto por Ueda e Dai [3]. A Fig. 4 mostra as curvas *bond-slip* assim obtidas. Os resultados mostram que o jacto de areia não introduz grandes variações na curva *bond-slip*, contrastando com o tratamento de superfície por rebarbadora que apresenta algumas alterações ao nível da tensão de aderência ( $\tau$ ). Os deslizamentos máximos ( $s_{max}$ ) em cada tipo de betão são praticamente iguais, ou seja, no tratamento da superfície de betão por jacto de areia  $s_{max}=0,056\text{mm}$  e no tratamento por rebarbadora  $s_{max}=0,068\text{mm}$ . O Quadro 2 apresenta os parâmetros necessários para definir as leis *bond-slip* de acordo com [3] e onde  $B$  é um parâmetro definido experimentalmente e  $G_F$  é a energia de fractura da ligação calculada pela expressão:

$$G_F = \frac{\varepsilon_{max}^2 \cdot E_f \cdot t_f}{2} \quad (2)$$

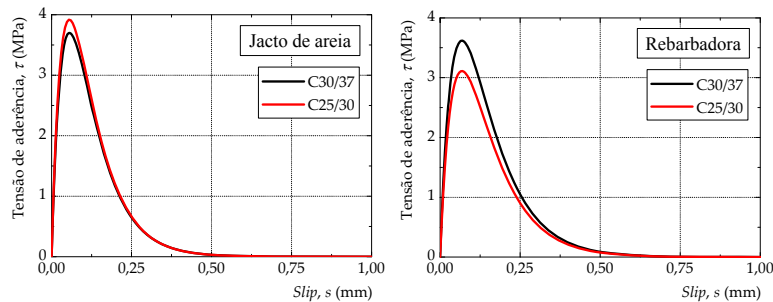


Figura 4. Comparação da curvas *bond-slip* para os betões de classe C25/30 e C30/37.

Quadro 2. Características das leis *bond-slip* de acordo com o modelo proposto por [3].

| Betão  | Trat.mento de superfície | $B$ [ $\text{mm}^{-1}$ ] | $G_F$ [ $\text{N/mm}$ ] | $\tau_{max}$ [ $\text{MPa}$ ] | $s_{max}$ [ $\text{mm}$ ] |
|--------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| C25/30 | Jacto de areia           | 12,5                     | 0,627                   | 3,92                          | 0,055                     |
| C30/37 | Jacto de areia           | 12,3                     | 0,600                   | 3,70                          | 0,056                     |
| C25/30 | Rebarbadora              | 10,2                     | 0,612                   | 3,11                          | 0,068                     |
| C30/37 | Rebarbadora              | 10,2                     | 0,712                   | 3,62                          | 0,068                     |

### 3.5 Superfícies de ruptura

A Fig. 5 mostra algumas superfícies de ruptura de provetes com comprimento de colagem de 75mm para o betão da classe C25/30. No caso dos provetes com 75mm, verifica-se que as superfícies de ruptura caracterizaram-se pelo destacamento de menores quantidades de betão no caso da superfície não tratada, seguida pelo tratamento com jacto de areia normal e por último pelo tratamento com rebarbadora.

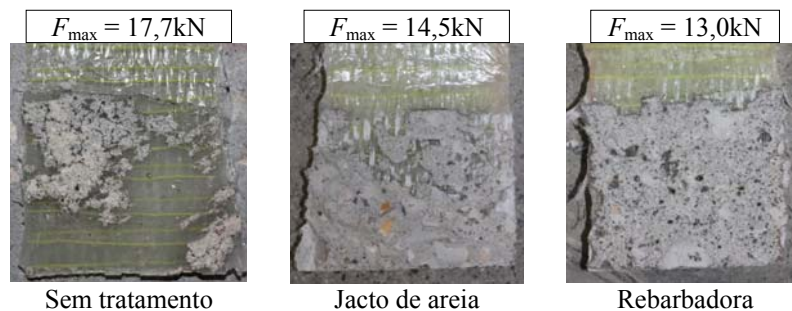


Figura 5. Superfícies de ruptura no compósito de GFRP ( $L_b=75\text{mm}$ ).

A obtenção de um maior destacamento de betão no tratamento por rebarbadora significa que a aderência entre o laminado e o betão foi conseguida de forma mais eficiente, proporcionando uma ruptura coesiva pelo betão.

#### 4. MODELAÇÃO NUMÉRICA

A equação diferencial que traduz o equilíbrio estático da ligação FRP/betão é [3-8]:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \frac{\tau(s)}{E_f \cdot t_f} = 0 \quad (3)$$

e cuja solução depende da lei *bond-slip* que melhor traduz o comportamento da ligação e das condições de contorno. A introdução de leis *bond-slip* não lineares na Eq. (3) exige a aplicação de métodos numéricos para resolver o problema. Desenvolveu-se uma rotina de cálculo baseada no método das diferenças finitas (MDF) sendo o resultante sistema de equações não lineares resolvido através do método de Newton-Raphson. É-se conduzido a:

$$\{s_i\}_{j+1} = \{s_i\}_j - [J(s_i)]^{-1} \cdot \{f_i(s_i)\} \quad (4)$$

onde  $\{s_i\}_j$  é o *slip* da ligação na  $j$ -ésima iteração,  $[J(s_i)]^{-1}$  é a inversa da matriz Jacobiana definida por:

$$[J(s_0, s_1, s_2, \dots, s_N)] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_0(s_0, s_1)}{\partial s_0} & \frac{\partial f_0(s_0, s_1)}{\partial s_1} & \frac{\partial f_0(s_0, s_1)}{\partial s_2} & \dots & \frac{\partial f_0(s_0, s_1)}{\partial s_N} \\ \frac{\partial f_1(s_0, s_1, s_2)}{\partial s_0} & \frac{\partial f_1(s_0, s_1, s_2)}{\partial s_1} & \frac{\partial f_1(s_0, s_1, s_2)}{\partial s_2} & \dots & \frac{\partial f_1(s_0, s_1, s_2)}{\partial s_N} \\ \frac{\partial f_2(s_1, s_2, s_3)}{\partial s_0} & \frac{\partial f_2(s_1, s_2, s_3)}{\partial s_1} & \frac{\partial f_2(s_1, s_2, s_3)}{\partial s_2} & \dots & \frac{\partial f_2(s_1, s_2, s_3)}{\partial s_N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_N(s_{N-1}, s_N)}{\partial s_0} & \frac{\partial f_N(s_{N-1}, s_N)}{\partial s_1} & \frac{\partial f_N(s_{N-1}, s_N)}{\partial s_2} & \dots & \frac{\partial f_N(s_{N-1}, s_N)}{\partial s_N} \end{bmatrix} \quad (5)$$

e  $\{f_N(s_i)\}$  corresponde ao primeiro membro da Eq. (3) no ponto  $i$ . As diferenças finitas são geradas a partir de aproximação parabólica:

$$\frac{ds}{dx}(x_i) = \frac{s_{i+1} - s_{i-1}}{2h}, \quad \frac{d^2s}{dx^2}(x_i) = \frac{s_{i+1} - 2s_i + s_{i-1}}{h^2} \quad \text{com } i = 0, 1, \dots, N \quad (6)$$

A discretização do passo é  $h=L_b/N$  em que  $L_b$  é o comprimento de colagem. As condições de fronteira do problema são [1]:

$$\frac{ds}{dx} = \varepsilon_{f|x=0} = -\frac{F}{A_f \cdot E_f} \quad \text{e} \quad \frac{ds}{dx} = \varepsilon_{f|x=L_b} = 0 \quad (7)$$

A convergência do sistema foi definida de acordo com:

$$\{s_i\}_{j+1} - \{s_i\}_j \approx 0 \quad (8)$$

independentemente do número de iterações necessárias para resolver o sistema não linear de equações definidas em (4).



A Fig. 6 mostra, para a força máxima transmitida ao GFRP, as distribuições dos deslizamentos, das tensões de aderência, das extensões no compósito de GFRP assumindo as leis *bond-slip* definidas na subsecção 3.4 bem como as curvas força vs. *slip* e força vs. comprimento de colagem.

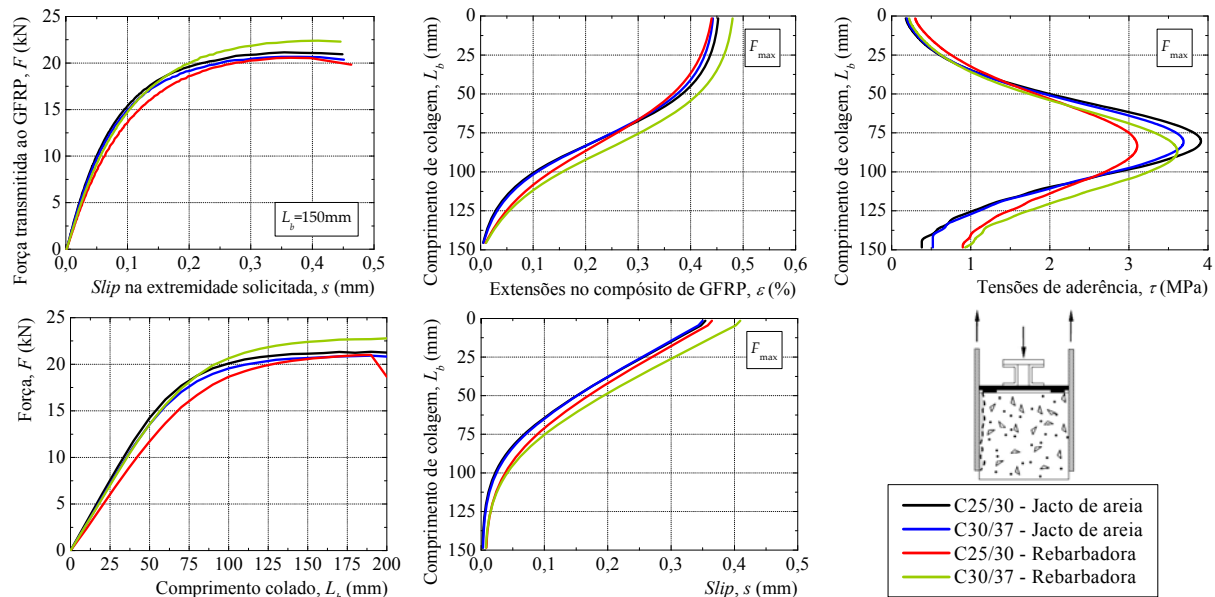


Figura 6. Desempenho da ligação GFRP/betão para os betões de classe C25/30 e C30/37 sujeitos aos tratamentos de superfície por jacto de areia e rebarbadora.

## 5. MODELAÇÃO COMPUTACIONAL

A modelação computacional foi realizada recorrendo ao programa de cálculo por elementos finitos ATENA 3D que permite modelar os elementos de betão com recurso a modelos constitutivos não lineares e em que a modelação das fissuras se baseia no conceito de fenda espalhada (*smearred crack*). Informação mais detalhada sobre o código e os procedimentos nele implementados pode ser encontrada em [11].

Os modelos de corte duplo usados tiram partido da dupla simetria dos provetes permitindo diminuir o número de elementos finitos usados o que, por sua vez, conduz a um desempenho computacional mais rápido. O betão foi discretizado por elementos sólidos de 8 nós e com lados iguais de 15mm enquanto que os elementos sólidos que serviram para modelar o compósito de GFRP têm 2,5mm de lado junto da ligação GFRP/betão e 5,0mm de comprimento na região não colada. A chapa metálica de reacção foi modelada com elementos sólidos de 4 nós. A ligação GFRP/betão foi feita através de elementos finitos de interface e usado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb [1]. A Fig. 7 mostra em (a) a malha de elementos finitos usada nos modelos com comprimento de colagem ( $L_b$ ) de 150mm, em (b) as tensões de aderência e em (c) as extensões no compósito de GFRP para a força máxima, no caso em que a ligação é feita a um betão da classe C30/37 com tratamento por jacto de areia da superfície colada.

As distribuições das tensões de aderência obtidas a partir da modelação computacional para o nível de força máxima não sofrem grandes variações ao longo da largura de colagem e ao mesmo tempo, os valores mais elevados localizam-se na região oposta à aplicação das cargas. Em termos de tensões longitudinais no compósito de GFRP, verifica-se uma distribuição uniforme ao longo da largura de colagem alcançando-se uma tensão máxima de 77,05MPa na região solicitada do compósito respectivamente.

A Fig. 8 mostra as tensões de aderência e longitudinais máximas no modelo em que se impôs uma tensão de compressão uniforme de 1,0MPa. Os resultados mostram que ambas as tensões na ruptura aumentaram significativamente. No caso das tensões de aderência verificou-se um aumento de 245,8% enquanto que as tensões longitudinais aumentaram 217,4%.

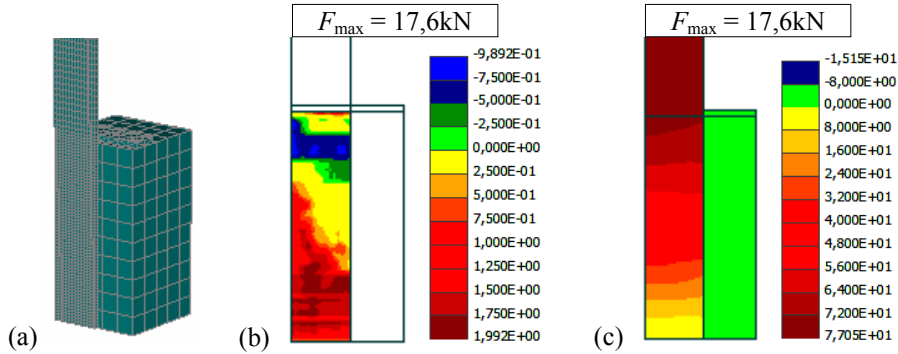


Figura 7. Modelação computacional no modelo com 150mm de comprimento de colagem: (a) malha de elementos finitos; (b) tensões de aderência; e (c) tensões longitudinais no compósito de GFRP para a força máxima (escalas em MPa).

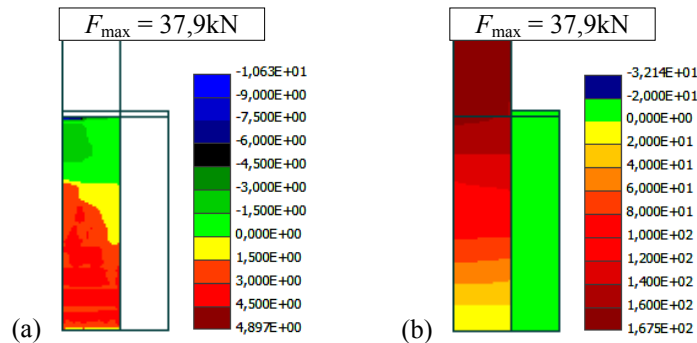


Figura 8. Modelação computacional no modelo com 1,0MPa de tensão de compressão da ligação: (a) tensões de aderência; e (b) tensões longitudinais no compósito de GFRP para a força máxima (escalas em MPa).

## 6. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS

Relativamente à influência do tratamento de superfície na definição do comprimento efectivo, os resultados parecem evidenciar que os provetes sujeitos a tratamento de superfície por rebarbadora têm comprimentos efectivos superiores ao tratamento de superfície por jacto de areia. Estes resultados podem ser justificados pela menor rugosidade da superfície tratada com rebarbadora que leva a uma menor tensão de aderência e maior *slip* da ligação.

A análise do comprimento efectivo pode ser efectuada com base na distribuição das extensões ao longo dos provetes ou mesmo das tensões de aderência (veja-se a Fig. 6). Parte dos provetes foram instrumentados com esse objectivo, assim como o de avaliar a força no GFRP. Analisando dois dos provetes ensaiados com 200mm de comprimento de ligação, e em termos de tensões de aderência, verifica-se que o comprimento efectivo ( $L_{ef}$ ) é cerca de 150mm. Porém, da modelação numérica, os resultados evidenciam que o comprimento efectivo da ligação deve ser ligeiramente superior a 150mm.

A análise numérica estimou, com boa precisão, as forças máximas transmitidas ao compósito de GFRP. Por exemplo, no caso em que  $L_b=150$ mm, os erros não foram superiores a 6,5% conforme se mostra no Quadro 3.

O desenvolvimento de tensões normais de compressão na ligação proporcionou um aumento substancial da força máxima transmitida ao compósito bem como da tensão de aderência máxima e que pode ser explicado pelo aumento da energia de fractura ( $G_F$ ) da ligação. A análise computacional permitiu verificar que com aumento da energia de fractura e tensão de aderência máxima também proporcionou o aumento dos *slips* da ligação pelo que, o comprimento efectivo ( $L_{ef}$ ) da ligação também varia.



Comparando os resultados experimentais com os códigos ou normas verifica-se uma melhor aproximação em termos de forças máximas transmitidas ao compósito de GFRP e de tensões de aderência máximas ao 2º modelo do CIDAR [12] sendo o código italiano (CNR-DT [13]) aquele que mais se afasta dos resultados experimentais obtidos (veja-se a Fig. 9).

Quadro 3. Comparação das forças máximas transmitidas ao compósito de GFRP ( $L_b=150\text{mm}$ ).

| Betão  | Trat. <sup>mento</sup><br>de superfície | Experimental    |                 | Análise numérica |          |
|--------|---|-----------------|-----------------|------------------|----------|
|        |   | $F_{\max}$ [kN] | $F_{\max}$ [kN] | $F_{\max}$ [kN]  | Erro [%] |
| C25/30 | Jacto de areia                          | 21,6            | 21,1            | 21,1             | -2,3     |
| C30/37 | Jacto de areia                          | 20,9            | 20,7            | 20,7             | -1,0     |
| C25/30 | Rebarbadora                             | 22,0            | 20,6            | 20,6             | -6,4     |
| C30/37 | Rebarbadora                             | 21,1            | 22,4            | 22,4             | 6,2      |

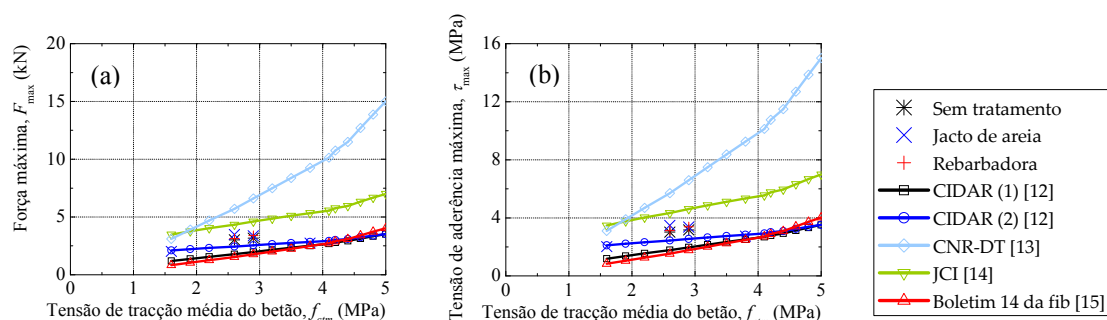


Figura 9. Comparação com os códigos ou normas: (a) forças máximas transmitidas ao compósito de GFRP; e (b) tensões de aderência máximas.

## CONCLUSÕES

Os ensaios realizados, e apesar da dispersão dos resultados, permitem concluir que na sua generalidade:

- as superfícies de betão tratada por rebarbadora e sem tratamento são as que conduziram às maiores forças na ruptura e para um betão de resistência inferior, os métodos de tratamento que induziram menor rugosidade à superfície proporcionam uma ligação GFRP/betão mais eficiente;
- os comprimentos efectivos da ligação GFRP/betão ( $L_{ef}$ ) cujo tratamento de superfície de betão foi feito por rebarbadora são maiores do que numa superfície sujeita a tratamento por jacto de areia.
- quando se procedeu ao tratamento da superfície de betão, as superfícies de ruptura obtidas foram essencialmente coesivas pelo betão. Nos provetes sem tratamento de superfície as superfícies de ruptura evidenciam algumas partes da ligação cuja ruptura foi mais do tipo adesivo (pela interface).
- as leis *bond-slip* para nos provetes sujeitos ao jacto de areia não sofreram variações significativas com a classe de resistência do betão ao invés, no tratamento por rebarbadora evidenciaram um aumento da tensão de aderência máxima ( $\tau_{\max}$ ) e do *slip* máximo ( $s_{\max}$ ). A curva *bond-slip* para o tratamento por jacto de areia tem um andamento pós-pico mais acentuado comparativamente ao tratamento por rebarbadora. Este facto comprova o aumento do comprimento efectivo verificado na análise numérica no caso do tratamento de superfície por rebarbadora;
- a análise numérica desenvolvida permitiu estimar com grande precisão as forças máximas transmitidas ao compósito de GFRP ( $F_{\max}$ );
- a análise computacional da ligação GFRP/betão recorrendo a elementos finitos de interface baseados no critério de ruptura de Mohr-Coulomb permitiu modelar e obter resultados que estimam com rigor a capacidade última da ligação;
- o desenvolvimento de tensões normais de compressão na ligação FRP/betão permite transmitir ao FRP forças maiores tirando-se, por conseguinte, melhor partido das resistências mecânicas do FRP.
- as normas ou códigos em vigor apresentam uma grande variedade nos resultados em termos de forças e tensões de aderência máximas. A 2ª proposta apresentada no CIDAR (2) [12] é a que mais se aproxima dos resultados experimentais.

## AGRADECIMENTOS

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

## REFERÊNCIAS

- [1] Biscaia, H.C.; Chastre, C. and Silva M.A.G. (2012). Double shear tests to evaluate the bond strength between GFRP/concrete elements, *Composite Structures*, Vol. 94, N. 2, 2012, pp. 681-694.
- [2] Li, W.; Yan, Z.; Cao, Z. and Pan, J. (2007). Effect of concrete surface roughness on the bonding performance between CFRP and concrete, *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, Vol. 24, N. 1, pp. 13-17.
- [3] Ueda, T. and Dai, J.G (2004). New shear bond model for FRP-concrete interface – from modelling to application. FRP Composites in Civil Engineering – CICE 2004, Adelaide, Australia, December, pp. 69-81.
- [4] Faella, C.; Martinelli, E. and Nigro, E.: “*Interface behaviour in FRP Plates bonded to concrete: Experimental tests and theoretical analyses*”, ECI Conference on Advance Materials for Construction of bridges, buildings, and Other Structures III, Davos, Switzerland, 2003.
- [5] Ferracuti, B (2006). Strengthening of RC structures by FRP: Experimental analyses and numerical modelling. Università degli Studi di Bologna, Italy, Tese de doutoramento.
- [6] Yuan, H.; Teng, J.G.; Seracino, R.; Wu, Z.S. and Yao, J. (2004). Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints, *Engineering Structures*, Vol. 26, pp. 553-565.
- [7] Teng, J.G.; Yuan, H. and Chen, J.F. (2006). FRP-to-concrete interfaces between two adjacent cracks: Theoretical model for debonding failure, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, pp. 5750-5778.
- [8] Chen, J.F.; Yuan, H. and Teng, J.G. (2005). Analysis of debonding failure along a softening FRP-to-concrete interface between two adjacent cracks”, Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, BBFS, 2<sup>nd</sup> ed. John Chen and Teng.
- [9] Eurocode 2 (EC2). 2004, Design of concrete structures - General rules and rules for buildings, EN 1992-1-1, December.
- [10] Ouezdou, M.B.; Belarbi, A. and Bae, S.W.: “*Effective bond length of FRP sheets externally bonded to concrete*”, International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol. 3, No. 2, December, 2009, pp. 127-131.
- [11] Cervenka, V.; Jendele, L. and Cervenka, J.: “*ATENA program documentation – Part 1 – Theory*”, Cervenka Consulting, Prague, August, 2007.
- [12] Centre for Infrastructures Diagnosis Assessment and Rehabilitation (CIDAR). 2006, Design Guidelines for RC structures retrofitted with FRP and metal plates: beams and slabs. University of Adelaide.
- [13] National Research Council, CNR - Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction. 2004, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. Rome: CNR-DT 200/2004.
- [14] Japanese Concrete Institute (2003). Technical report of technical committee on retrofit technology. Kyoto, Japan: JCI.
- [15] Fédération Internationale du Béton (FIB): Bulletin d'information n. 14 (2001). Externally bonded FRP reinforcement for RC structures.