

Modelo analítico não linear para analisar as ligações CFRP/betão



Hugo Biscaia¹



Carlos Chastre²



Noel Franco³



João Cardoso⁴

Resumo

Desde que o reforço estrutural começou a utilizar materiais de matriz polimérica reforçada com fibras (FRP) que o fenómeno do descolamento prematuro dos compósitos de FRP da superfície colada tem merecido especial atenção de vários autores. O conhecimento do processo de descolamento completo da ligação CFRP/betão ganhou assim, algum destaque nos últimos anos. Na generalidade, as ligações CFRP/betão têm sido analisadas com recurso a métodos analíticos e numéricos sendo que, nos primeiros, se tem vindo a adoptar leis de aderência muito simplificadas das observadas experimentalmente. Apesar das simplificações adoptadas nas simulações analíticas, a obtenção de expressões é muito importante já que apresenta grande potencial para serem adoptadas em códigos ou normas nacionais e/ou internacionais. Por outro lado, e apesar de adoptarem leis de aderência mais refinadas, as análises numéricas permitem apenas a obtenção de expressões empíricas que podem não contemplar a generalidade dos casos estudados. Neste sentido, este trabalho apresenta um conjunto de soluções analíticas com base numa lei de aderência exponencial capaz de representar todas as não-linearidades envolvidas no descolamento da ligação CFRP/betão. Os resultados analíticos são confrontados com ensaios experimentais em que a técnica de colagem EBR foi utilizada. Contudo, o modelo analítico proposto pode ser também utilizado quando a técnica *Near Surface Mounted* (NSM) é adoptada. Adicionalmente, são apresentadas soluções analíticas para o caso em que o deslocamento relativo entre o CFRP e o betão é restringido por, e.g., um dispositivo de amarração mecânico instalado na extremidade oposta à aplicação de carga.

¹ FSE, UNIDEMI, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil, Portugal; e-mail: hb@fct.unl.pt

² CERIS, ICIST, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil; e-mail: chastre@fct.unl.pt

³ Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil, Portugal; e-mail: ni.franco@campus.fct.unl.pt

⁴ FSE, UNIDEMI, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial; e-mail: jbc@fct.unl.pt

1. INTRODUÇÃO

A reabilitação ou reforço de estruturas existentes por meio de Polímeros Reforçados com Fibras (FRP) tem sido uma técnica amplamente utilizada em estruturas de betão armado. Apesar de se reconhecerem muitas vantagens pela aplicação por colagem dos compósitos de FRP em estruturas de betão armado, reconhecem-se igualmente algumas desvantagens que têm bloqueado a sua utilização mais generalizada. Neste domínio, a eficiência da ligação colada FRP/betão é fundamental e o seu sucesso fica garantido por uma boa transferência de tensões entre materiais colados. Neste contexto, alguns trabalhos têm sido desenvolvidos, e.g. [1-3], com o objectivo de analisar, experimentalmente ou numericamente, o desempenho interfacial de ligações coladas entre compósitos de carbono (CFRP) e o betão. A dificuldade em obter soluções por uma via analítica que considerem as não linearidades do problema do descolamento dos compósitos de FRP do betão tem também contribuído para a dificuldade em reunir consensos nos modelos a adoptar pela comunidade científica. Nesse seguimento, o trabalho agora desenvolvido, tem como objectivo desenvolver um método analítico não linear capaz de estimar de forma precisa o descolamento da ligação entre um compósito de FRP e o betão. Com este propósito, é de realçar que a abordagem aqui desenvolvida tem dois aspectos importantes: (i) fornece soluções analíticas que ajudam à compreensão rigorosa das respostas força vs. deslizamento de qualquer ligação colada FRP/betão quer sejam, ou não, doptadas de um sistema adicional de amarração; e (ii) fornece um método para a identificação dos diferentes estados de tensão interfacial envolvidos no processo de descolamento da ligação com base na resposta experimental força vs. deslizamento. Em ambos os casos, o modelo teórico proposto é uma ferramenta útil para a modelação dimensionamento correctos de interfaces FRP/betão, fornecendo resultados viáveis para a estimativa da resistência destas interfaces coladas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Equação diferencial equilíbrio

Considerando que L_b é o comprimento de colagem da ligação entre o material compósito de FRP e o substrato, quando a ligação se encontra sujeita a uma carga (F) em $x = L_b$ a outra extremidade do compósito de FRP ($x = 0$) encontra-se livre de quaisquer acções mecânicas externas. No caso de um sistema de reforço de FRP colado pelo exterior (EBR), a equação diferencial de equilíbrio é, e.g. [1, 2]:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \left(\frac{1}{E_f \cdot t_f} + \frac{b_f}{E_s \cdot b_s \cdot t_s} \right) \cdot \tau(s) = 0 \quad (1)$$

onde $\tau(s)$ representa a lei de aderência da ligação relativamente ao Modo II de fractura; s é o deslizamento da interface, i.e. deslocamento relativo entre superfícies coladas; E_f , t_f e b_f são, respectivamente, o módulo de elasticidade, a espessura e a largura do compósito de FRP; e E_s , t_s e b_s são, respectivamente, o módulo de elasticidade, a espessura e a largura do substrato. No caso da ligação entre um compósito de FRP e um substrato de betão, a correspondente lei de aderência pode ser expressa por um exponencial ficando a Eq. (1) definida por:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \frac{2B \cdot G_F}{t_f} \cdot \left(\frac{1}{E_f} + \frac{b_f \cdot t_f}{E_s \cdot t_s \cdot b_s} \right) \cdot (e^{-B \cdot s} - e^{-2B \cdot s}) = 0 \quad (2)$$

onde G_F é a energia de fractura da ligação (área delimitada pela lei de aderência); e B é um índice de rigidez obtido experimentalmente a partir da aproximação da curva exponencial teórica

$$\varepsilon_f(s) = \sqrt{\frac{2G_F}{E_f \cdot t_f}} \cdot (1 - e^{-B \cdot s}) \quad (3)$$

à curva obtida experimentalmente. As secções seguintes apresentam duas soluções analíticas da Eq. (2) tendo em consideração os casos em que a extremidade não carregada (em $x = 0$) está: (i) livre de

qualquer restrição de deslizamento; e (ii) encontra-se impossibilitada de deslizar devido, e.g., a um dispositivo mecânico de amarração ou a um outro qualquer tipo de amarração do compósito de FRP.

2.2. Solução do problema de aderência sem amarração

Antes de se proceder à solução da Eq. (2), começa-se por reconhecer que [2]:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{ds}{dx} \right) = \frac{d}{ds} \left(\frac{ds}{dx} \right) \frac{ds}{dx} = \frac{1}{2} \cdot \frac{d}{ds} \left(\frac{ds}{dx} \right)^2 \quad (4)$$

e que:

$$2B \cdot (e^{-B \cdot s} - e^{-2B \cdot s}) = \frac{d}{ds} (1 - e^{-B \cdot s})^2 \quad (5)$$

A solução da Eq. (2) conduz então a:

$$\frac{ds}{dx} = \sqrt{\frac{2G_F}{t_f} \cdot \left(\frac{1}{E_f} + \frac{b_f \cdot t_f}{E_s \cdot t_s \cdot b_s} \right) \cdot (1 - e^{-B \cdot s})^2 + C_1} \quad (6)$$

onde C_1 é uma constante de integração que pode ser obtida a partir das condições de fronteira do problema em $x = 0$:

$$\varepsilon(x = 0) = \frac{ds(x = 0)}{dx} = 0 \quad (7a)$$

e

$$s(x = 0) = s_0 \quad (7b)$$

conduzindo a:

$$C_1 = -D^2 \cdot (1 - e^{-B \cdot s_0})^2 \quad (8)$$

onde

$$D = \sqrt{\frac{2G_F}{t_f} \cdot \left(\frac{1}{E_f} + \frac{b_f \cdot t_f}{E_s \cdot t_s \cdot b_s} \right)} \quad (9)$$

O problema fica assim definido a partir do incremento de deslizamentos no ponto $x = 0$ (s_0). Resolvendo a Eq. (6), e considerando que no campo dos deslizamentos da ligação entre um compósito de FRP e o betão se pode adoptar a aproximação:

$$(1 - e^{-B \cdot s})^2 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2 \approx (1 - e^{-B \cdot s})^2 \quad (10)$$

os deslizamentos da ligação FRP/betão ao longo do comprimento colado são:

$$s(x) = \frac{1}{B} \cdot \ln \left[\frac{e^{(D \cdot x + C_2) \cdot (B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2})} + 2 + 2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2}}{2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} + 2 \cdot [1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2]} \right] \quad (11)$$

onde C_2 é uma constante de integração que fica definida quando se considera a condição de fronteira definida em (7b):

$$C_2 = \frac{\ln \left[e^{B \cdot s_0} \cdot \left(2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} + 2 \cdot (1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2) \right) - 2 - 2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} \right]}{B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2}} \quad (12)$$

Uma vez que as extensões no betão são muito inferiores às extensões no compósito de FRP, estas podem ser determinadas de acordo com:

$$\frac{ds}{dx} = \varepsilon(x) = D \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} + 2 \cdot [1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2]}{e^{(D \cdot x + C_2) \cdot (B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2})} + 2 + 2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2}} \right)^2 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} \quad (13)$$

As tensões de aderência ao longo do comprimento colado podem ser determinadas introduzindo na lei de aderência exponencial usada na Eq. (2) os deslizamentos definidos pela Eq. (11) pelo que:

$$\tau(x) = 2B \cdot G_F \cdot \left[\frac{2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} + 2 \cdot [1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2]}{e^{(D \cdot x + C_2) \cdot (B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2})} + 2 + 2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2}} - \left(\frac{2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} + 2 \cdot [1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2]}{e^{(D \cdot x + C_2) \cdot (B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2})} + 2 + 2 \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2}} \right)^2 \right] \quad (14)$$

2.3. Solução do problema de aderência com amarração

No caso em que a extremidade do FRP não carregada está amarrada, a Eq. (6) mantém-se. Contudo, as condições de fronteira do problema assumidas neste caso são diferentes daquelas já expressas em (7a) e (7b). Assim, considera-se que:

$$\varepsilon(x=0) = \frac{ds(x=0)}{dx} = \varepsilon_0 \quad (15a)$$

e

$$s(x=0) = 0 \quad (15b)$$

pelo que, a constante de integração C_1 fica agora definida por:

$$C_1 = \varepsilon_0^2 \quad (16)$$

O problema fica agora exposto em função da extensão em $x=0$, ou seja, o processo de descolamento da ligação fica em função dos acréscimos de extensão ε_0 . Continuando a resolver a Eq. (6), os deslizamentos da ligação FRP/betão com amarração são dados por:

$$s(x) = \frac{1}{B} \cdot \ln \left[\frac{\sinh \left((D \cdot x + C_3) \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1} \right) + \frac{D}{\varepsilon_0}}{\frac{\varepsilon_0}{D} + \frac{D}{\varepsilon_0}} \right] \quad (17)$$

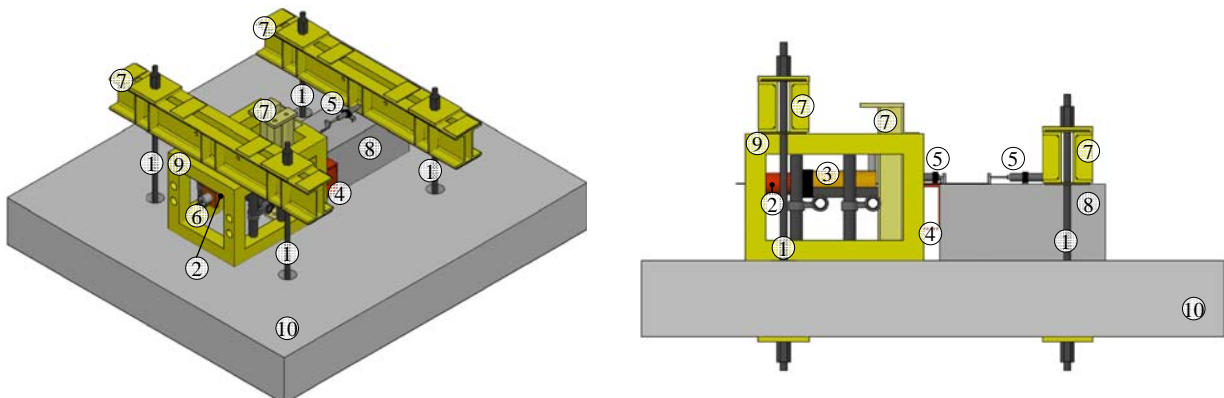
onde C_3 é uma constante de integração que pode ser obtida a partir da condição de fronteira do problema definido em (15b):

$$C_3 = \frac{\operatorname{arcsinh}\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1}} \quad (18)$$

Conforme referido anteriormente, as extensões no betão são muito inferiores às extensões no compósito de FRP pelo que, derivando a Eq. (17) em ordem a x , obtém-se a distribuição das extensões no compósito de FRP ao longo do comprimento de colagem:

$$\frac{ds}{dx} = \varepsilon(x) = \sqrt{D^2 \cdot \left[1 - \frac{\frac{\varepsilon_0}{D} + \frac{D}{\varepsilon_0}}{\sinh \left(D \cdot x + \frac{\operatorname{arcsinh}\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1}} \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D}\right)^2 + 1} \right) + \frac{D}{\varepsilon_0}} \right]^2 + \varepsilon_0^2} \quad (19)$$

As tensões de aderência ao longo do comprimento de colagem ficam definidas, uma vez mais, ao introduzir-se a Eq. (17) na lei de aderência exponencial utilizada na Eq. (2), conduzindo a:



Legenda: 1 - Varão Dywidag; 2 - Célula de carga; 3 - Macaco hidráulico; 4 - Perfil metálico de reacção; 5 - Transdutor de deslocamento; 6 - Amarração do CFRP com cunhas metálicas; 7 - Perfil metálico; 8 - Provette de betão armado; 9 - Gaiola metálica; 10 - Laje rígida de BA.

Figura 1 - Esquema do ensaio de corte simples.

$$\tau(x) = 2B \cdot G_F \cdot \frac{\frac{\varepsilon_0}{D} + \frac{D}{\varepsilon_0}}{\sinh \left(\left(D \cdot x + \frac{\operatorname{arcsinh} \left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1}} \right) \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1} + \frac{D}{\varepsilon_0} \right)} \times$$

$$\times \left[1 - \frac{\frac{\varepsilon_0}{D} + \frac{D}{\varepsilon_0}}{\sinh \left(\left(D \cdot x + \frac{\operatorname{arcsinh} \left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)}{B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1}} \right) \cdot B \cdot \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_0}{D} \right)^2 + 1} + \frac{D}{\varepsilon_0} \right)} \right] \quad (20)$$

Realce-se, por último, que as formulações apresentadas até aqui abrangeram apenas a técnica de colagem EBR mas todas elas são ainda válidas para o caso da técnica de colagem NSM quer com laminados de secção rectangular quer com varões desde que, se tome a constante D definida na Eq. (9), no primeiro caso, com laminados de secção rectangular [2]:

$$D = \sqrt{\frac{4G_F}{t_f} \cdot \left(\frac{1}{E_f} + \frac{b_f \cdot t_f}{E_s \cdot t_s \cdot b_s} \right)} \quad (21)$$

e, no segundo caso, com varões de FRP de diâmetro ϕ_f :

$$D = \sqrt{\frac{8G_F}{\phi_f} \cdot \left(\frac{1}{E_f} + \frac{\pi \cdot \phi_f^2}{4E_s \cdot t_s \cdot b_s} \right)} \quad (22)$$

3. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS E PROGRAMA EXPERIMENTAL

O laminado de CFRP utilizado neste estudo tem secção transversal de $1,4 \times 10$ mm (espessura \times largura) e cujas propriedades mecânicas foram definidas por Carvalho *et al.* [4]: $E_f = 159$ GPa, $\varepsilon_f = 1,03\%$ e $f_f = 1638$ MPa. No caso do betão, e à data dos ensaios de corte, os ensaios realizados à compressão uniaxial de 3 cubos de betão com 150 mm de aresta permitiram obter a sua resistência média à compressão e o módulo de elasticidade de 22,74 MPa e 26,33 GPa, respectivamente. Estimou-se ainda, segundo o EC2, uma resistência à tracção média de 1,76 MPa. Como agente de colagem entre o laminado de CFRP e o betão, utilizou-se uma resina epoxídica S&P220 e cujas propriedades mecânicas foram também determinadas por Carvalho *et al.* [4]: $E_r = 0,79$ GPa, $\varepsilon_r = 3,65\%$ e $f_r = 29,0$ MPa. O programa experimental contemplou o estudo da ligação CFRP/betão quando sujeita a cargas que proporcionam, maioritariamente, o desenvolvimento de tensões interfaciais de corte na ligação. Para esse efeito, adoptou-se uma configuração do sistema de ensaio que permitiu realizar ao todo 11 ensaios de corte simples (veja-se a Fig. 1) com comprimentos de colagem diferentes: 50, 100, 150 e 300 mm. Em todos os ensaios, a técnica de colagem EBR foi assumida para colar o CFRP ao betão e considerou-se sempre que a extremidade não carregada fosse livre de qualquer sistema de amarração. A Tabela 1 mostra uma síntese dos resultados experimentais obtidos segundo a metodologia apresentada anteriormente para a obtenção da lei de aderência exponencial [1].

Note-se que a lei de aderência média assumida para a ligação CFRP/betão foi definida com base em dois provetes com comprimento de colagem de 300 mm (EBR_300_02 e EBR_300_04) e cujos valores médios são: $B = 10,88 \text{ mm}^{-1}$, $s_{\max} = 0,080 \text{ mm}$, $\tau_{\max} = 10,15 \text{ MPa}$ e $G_F = 1,874 \text{ N/mm}$.

Tabela 1 - Síntese de resultados experimentais.

Ensaio	L_b (mm)	$\varepsilon_{f\max}$ (%)	F_{\max} (kN)	B (mm^{-1})	s_{\max} (mm)	τ_{\max} (MPa)	G_F (N/mm)
EBR_300_01	300	0,26	8,19	11,92	0,058	9,13	1,532
EBR_300_02	300	0,38	8,81	11,32	0,061	9,31	1,645
EBR_300_03	300	0,50	10,51	3,30	0,091	4,10	2,483
EBR_300_04	300	0,43	8,62	10,45	0,099	10,99	2,103
EBR_150_01	150	-	7,77	-	-	-	-
EBR_150_02	150	-	9,18	-	-	-	-
EBR_150_03	150	0,37	8,32	16,04	0,080	12,48	1,556
EBR_100_01	100	0,29	6,35	12,65	0,055	8,96	0,605
EBR_100_02	100	0,31	6,88	19,79	0,071	10,52	1,063
EBR_50_01	50	0,23	5,07	12,65	0,055	3,65	0,577
EBR_50_02	50	0,26	5,87	12,65	0,055	4,90	0,775

4. SIMULAÇÃO DOS ENSAIOS DE CORTE

A validação do modelo analítico proposto é realizada pelos exemplos aqui ilustrados na Fig. 2, a qual compara os resultados experimentais entres os provetes EBR_300_02, EBR_300_04, EBR_100_01 e EBR_100_02 com as correspondentes simulações analíticas. Em particular, as extensões, os deslizamentos e as tensões de aderência na ligação CFRP/betão são mostradas na Fig. 2. Refira-se que se escolheram quatro deslizamentos diferentes em $x = L_b$ para apresentar as comparações entre os resultados experimentais e os analíticos. No caso dos provetes com $L_b = 300 \text{ mm}$ consideraram-se os deslizamentos 0,02, 0,06, 0,19 e 0,55 mm enquanto que no caso dos provetes com $L_b = 100 \text{ mm}$ consideraram-se os deslizamentos 0,01, 0,06, 0,15 e 0,29 mm por forma a que as análises contemplassem as fases elástica, pós-pico (*softening*) e descolamento da lei de aderência.

5. INFLUÊNCIA DA AMARRAÇÃO: RESPOSTA FORÇA VS. DESLIZAMENTO

Para realçar as diferentes respostas força vs. deslizamento das ligações coladas CFRP/betão, a Fig. 3a compara os resultados analíticos e experimentais decorrentes dos ensaios dos provetes com comprimentos de colagem de 100 e 300 mm sem qualquer amarração. Em particular, a ligação sem qualquer amarração e com maior comprimento de colagem, evidencia maior ductilidade e mostra ainda o efeito *snap-back* na fase de pós-colapso da ligação identificado na literatura, e.g. [2, 5]. Uma vez que não foram realizados ensaios experimentais com ligações CFRP/betão com amarração, destaca-se para esse propósito na Fig. 3b, o trabalho experimental e numérico de Mazzotti et al. [3]. Refira-se que as diferenças observadas na Fig. 3b entre o modelo analítico proposto e o numérico deve-se ao facto da lei de aderência usada por Mazzotti et al. [3] se basear numa função do tipo potência. Todavia, da Fig. 3, percebe-se que o uso de um sistema adicional de amarração da ligação CFRP/betão permite evitar o descolamento prematuro do CFRP tornando a técnica de colagem EBR mais eficaz.

6. CONCLUSÕES

O estudo analítico proposto para simular a ligação FRP/betão é baseado numa curva de aderência exponencial e cuja validação foi suportada por ensaios experimentais que permitiram obter as conclusões principais que se apresentam a seguir:

- A técnica EBR livre de qualquer tipo de amarração, provou ser um sistema de colagem muito deficiente uma vez que as extensões alcançadas no laminado de CFRP foram sempre inferiores a 50% da tensão de ruptura do CFRP. Isso mostra a importância da adoção de sistemas de ancoragem adicional a fim de melhorar a performance destas interfaces coladas CFRP/betão;
- A utilização de dispositivos de fixação mecânica podem ser muito interessantes pois conseguem levar à rotura o compósito de FRP. O modelo analítico não linear proposto foi capaz de estimar, com

precisão, a resposta força vs. deslizamento de interfaces CFRP/betão com ou sem ancoragem mecânica, independentemente do comprimento de colagem da ligação;

- O modelo analítico proposto é simples de usar quer em sistemas colados pela técnica EBR quer em sistemas colados pela técnica NSM bastando considerar a constante D associada a cada caso.

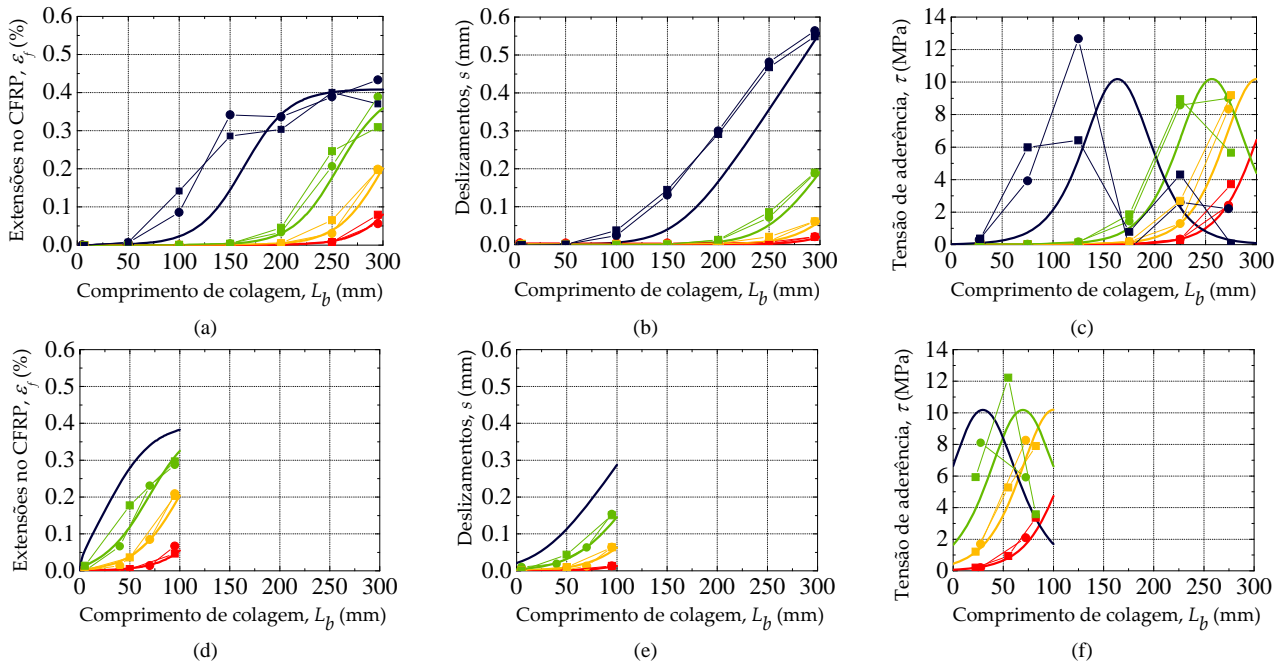


Figura 2 - Comparação entre os resultados analíticos e experimentais.

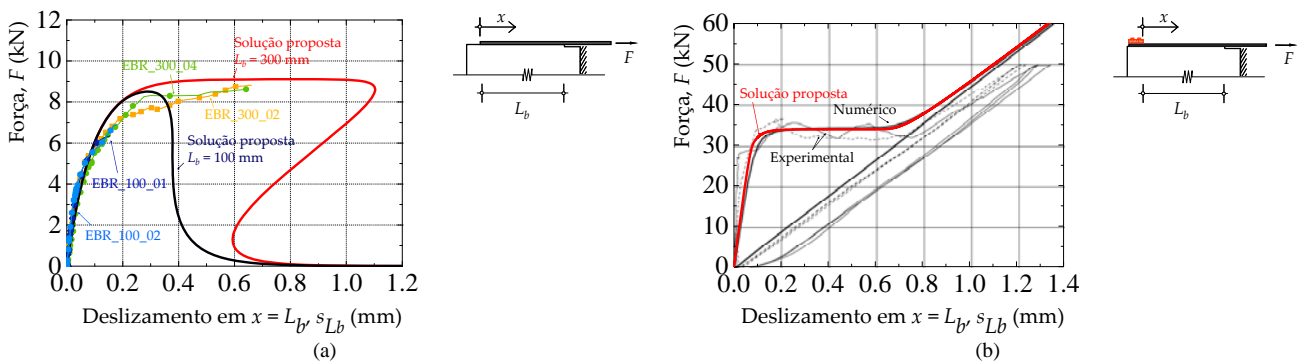


Figura 3 - Comparação entre as respostas força vs. deslizamento analíticas e experimentais obtidas: (a) nos provetes com comprimentos de colagem de 100 e 300 mm; e (b) por Mazzotti *et al.* [4].

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor deste trabalho pretende agradecer à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento parcial do trabalho através do UNIDEMI, Projeto Estratégico UID/ EMS/00667/2013 e pela bolsa SFRH/BPD/111787/2015.

REFERÊNCIAS

- [1] Biscaia, H., Chastre, C., Borba, I., Silva, C. e Cruz, D. (2015). Experimental Evaluation of Bonding between CFRP Laminates and Different Structural Materials. *Journal of Composites for Construction*, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000631, 04015070.
- [2] Biscaia, H., Borba, I., Silva, C. e Chastre, C. (2015). A nonlinear analytical model to predict the full-range debonding process of FRP-to-parent material interfaces free of any mechanical anchorage devices. *Composite Structures*, 138:52-63.
- [3] Mazzotti, C, Savoia, M and Ferracuti, B (2009). A new single-shear set-up for stable debonding of FRP-concrete joints. *Construction and Building Materials*, 23(4):1529-1537.

- [4] T. Carvalho, C. Chastre, H.C. Biscaia and R. Paula. (2010). Flexural behaviour of RC T-beams strengthened with different FRP materials. In 3rd *fib* International Congress, Washington D.C., United States of America, May 29-June 2.
- [5] Cornetti, P and Carpinteri, A. (2011). Modelling the FRP-concrete delamination by means of an exponential softening law. *Engineering Structures*, 33(6):1988-2001.