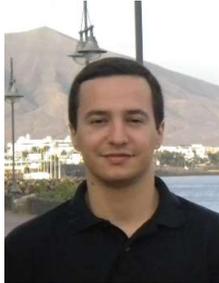


Lei Constitutiva para a Simulação da Ligação de Sistemas NSM FRP no Betão



Mário Coelho¹



Antonio Caggiano²



José Sena-Cruz³



Luís Neves⁴

Resumo

Nos últimos anos, a técnica de reforço NSM (*Near-Surface Mounted*) tem sido utilizada para aumentar a capacidade de carga de estruturas de betão. Esta técnica consiste na inserção de polímeros reforçados com fibras (FRP) no betão de recobrimento dos elementos estruturais. Normalmente, utilizam-se adesivos epóxicos como material de ligação entre o betão existente e o FRP a adicionar. Para estudar o comportamento da ligação em sistemas NSM FRP inseridos no betão é necessário ter em conta, não só o comportamento dos três materiais envolvidos (betão, FRP e o adesivo que os liga), mas também as duas interfaces existentes (FRP/adesivo e adesivo/betão).

No caso dos três materiais envolvidos existem já leis constitutivas bastante robustas para modelar o seu comportamento. Contrariamente, ainda são escassas as leis constitutivas disponíveis para a modelação do comportamento das interfaces. Como consequência disso, a grande maioria dos trabalhos numéricos que existem na literatura ou consideram aderência perfeita entre materiais, não modelando por isso as interfaces, ou recorrem ao uso de leis “*bond-slip*” (definidas *a priori* e fisicamente questionáveis) para modelar as interfaces. Em alternativa, neste trabalho apresenta-se uma lei constitutiva baseada na teoria clássica da plasticidade com escoamento. Neste tipo de lei, o comportamento local da ligação é obtido *a posteriori* através do ajuste de um conjunto de parâmetros numéricos com significado físico bem definido.

A lei referida foi implementada no software de elementos finitos FEMIX 4.0. As suas principais mais-valias prendem-se com a consideração dos modos de fratura I e II e ainda com a possibilidade de realizar modelações 2D ou 3D. A lei apresentada foi validada através da modelação de um ensaio de arranque direto em elementos de betão reforçados com sistemas NSM FRP. Os resultados obtidos mostram que a lei desenvolvida é adequada para a simulação das interfaces existentes nestes sistemas.

Palavras-chave: FRP, NSM, interface, MEF, plasticidade

¹ ISISE, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal; e-mail: mcoelho@civil.uminho.pt

² CONICET e Universidade de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina; e-mail: acaggiano@fi.uba.ar

³ ISISE, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal; e-mail: jsena@civil.uminho.pt

⁴ NTEC, Universidade de Nottingham, Nottingham, Reino Unido; e-mail: luis.neves@nottingham.ac.uk

1. INTRODUÇÃO

Uma das técnicas mais efetivas no reforço de estruturas de betão consiste na inserção de um material de reforço em entalhes abertos na superfície do elemento a reforçar. Esta técnica é conhecida por NSM (*Near-Surface Mounted* na literatura inglesa). Em termos de material de reforço, recentemente tem-se utilizado polímeros reforçados com fibras (FRP) devido às várias vantagens que apresentam em relação ao aço [1].

Considerando o comportamento local da ligação em sistemas NSM FRP, cinco modos de rotura podem ser identificados: dois são de natureza coesiva e podem ocorrer (i) no adesivo que liga o FRP ao betão ou (ii) no próprio betão; outros dois são de natureza adesiva e podem ocorrer nas interfaces entre (iii) FRP e o adesivo ou (iv) entre o adesivo e o betão; finalmente, se nenhum dos anteriores ocorrer, então ocorrerá a (v) rotura do FRP [2].

No contexto do presente trabalho, o comportamento da ligação em sistemas NSM FRP é discutido do ponto de vista da sua simulação numérica de ensaios de arranque com recurso ao método dos elementos finitos (MEF). Para simular numericamente o comportamento da ligação em sistemas NSM FRP inseridos no betão é necessário ter em conta, não só o comportamento dos três materiais envolvidos (betão, FRP e o adesivo que os liga), mas também as duas interfaces existentes (FRP/adesivo e adesivo/betão).

No caso dos três materiais envolvidos existem já leis constitutivas bastante robustas para modelar o seu comportamento [3,4]. Contrariamente, ainda são escassas as leis constitutivas disponíveis para a modelação do comportamento das interfaces referidas anteriormente. Como consequência disso, a grande maioria dos trabalhos numéricos que existem na literatura ou consideram aderência perfeita entre materiais, não modelando por isso as interfaces, ou recorrem ao uso de leis “*bond-slip*” (definidas *a priori* e fisicamente questionáveis) para modelar as interfaces [5-8]. Em alternativa, neste trabalho apresenta-se uma lei constitutiva baseada na teoria clássica da plasticidade com escoamento. Neste tipo de lei, o comportamento local da ligação é obtido *a posteriori* através do ajuste de um conjunto de parâmetros numéricos com significado físico bem definido.

O trabalho aqui apresentado foi desenvolvido no FEMIX 4.0 [9], um *software* de análise estrutural baseada no MEF. Em particular, o modelo constitutivo a seguir apresentado foi desenvolvido de modo a ser possível utilizá-lo com os elementos de interface de linha 2D de 4 ou 6 nós e os elementos de superfície de 8 ou 16 nós (Fig. 1).

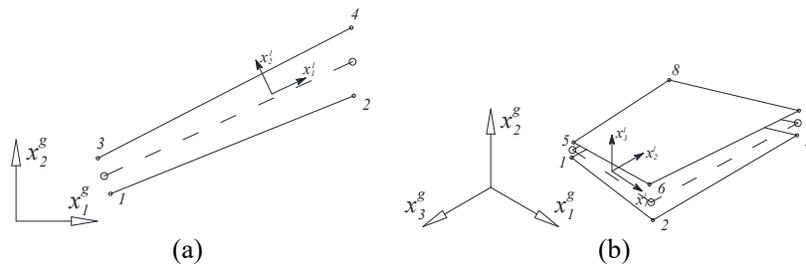


Figura 1. Elementos de interface existentes no FEMIX usados neste trabalho: (a) linha 2D de 4 nós; (b) superfície 3D de 8 nós.

2. LEI CONSTITUTIVA DE INTERFACE

A Fig. 2 apresenta um exemplo de um ensaio de arranque direto num elemento de betão reforçado com NSM FRP. Nesta é possível ver o FRP a mover-se simultaneamente nas direções x_1^g e x_2^g , estando os modos de fratura associados a cada movimento também identificados.

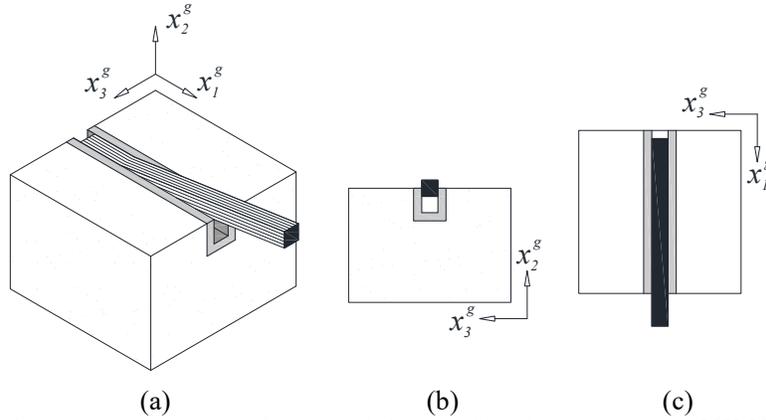


Figura 2. Modos de fratura existentes em elementos de betão reforçados com sistemas NSM FRP: (a) vista 3D; (b) abertura (modo de fratura I); (c) deslizamento (modo de fratura II).

A lei constitutiva implementada tem 3 módulos individuais para a realização de análises 2D e 3D, considerando apenas o modo de fratura II ou os modos I e II em simultâneo:

- O primeiro módulo (Módulo II) permite análises MEF 2D e 3D considerando apenas o modo de fratura II (desenvolvido em [10]). Neste modelo apenas é permitido comportamento elasto-plástico na direção longitudinal, sendo o comportamento linear elástico nas restantes direções;
- O segundo módulo (Módulo I/II_2D) permite análises MEF 2D considerando ambos os modos de fratura I e II (ver em [11]);
- O terceiro módulo (Módulo I/II_3D) permite análises MEF 3D considerando comportamento elasto-plástico em todas as direções (proposto por [12]).

Por uma questão de brevidade, neste artigo apenas se referem as duas equações chave na formulação da lei constitutiva desenvolvida. A formulação completa poderá ser encontrada em [13]. No âmbito da teoria clássica da plasticidade com escoamento, admite-se que o vetor incremental dos deslocamentos relativos (daqui em diante designados deslizamentos), $\Delta \underline{s}$, pode ser decomposto nas suas componentes elástica, $\Delta \underline{s}^e$, e plástica, $\Delta \underline{s}^p$, conforme ilustrado na Eq. (1). Como consequência disso, a matriz constitutiva, $\underline{\underline{D}}$, que relaciona o vetor incremental das tensões, $\Delta \underline{\sigma}$, com os deslizamentos será diferente em função de o incremento em causa ser efetuado em regime elástico ou plástico (ver Eq. (2)).

$$\Delta \underline{s} = \Delta \underline{s}^e + \Delta \underline{s}^p \quad (1)$$

$$\Delta \underline{\sigma} = \underline{\underline{D}} \Delta \underline{s} \Rightarrow \underline{\underline{D}} = \begin{cases} \underline{\underline{D}}^e & \text{se carga/descarga/recarga (elástica)} \\ \underline{\underline{D}}^p & \text{se carga (plástica)} \end{cases} \quad (2)$$

Para utilizar cada um dos módulos da lei constitutiva implementada é necessário definir o conjunto de parâmetros que se exemplifica no Quadro 1. De notar que estes correspondem aos utilizados nas simulações numéricas que se apresentam nos próximos capítulos.

3. VALIDAÇÃO DA LEI CONSTITUTIVA – APRESENTAÇÃO DOS ENSAIOS

A lei constitutiva implementada foi validada através da simulação de ensaios de arranque direto em elementos de betão reforçados com NSM FRP descritos em [14]. A Fig. 3a apresenta a geometria dos provetes que consistem em cubos com 200 mm de aresta. Num dos lados foi feito um entalhe ($5 \times 15 \text{ mm}^2$) no qual foi inserido um laminado de carbono, CFRP ($1.4 \times 10 \text{ mm}^2$), colado com um adesivo epóxi. No topo do betão foi colocada uma placa de aço fixa à base através de varões roscados. Nestes foi aplicado um momento de aperto de $30 \text{ N} \times \text{m}$, o que induzia no betão um estado de compressão inicial

de cerca de 2 MPa. Os ensaios foram realizados com controle de deslocamentos medidos pelo LVDT que registava o deslocamento relativo (deslizamento) entre o CFRP e o betão (ver Fig. 3a).

Quadro 1. Parâmetros necessários em cada módulo.

<i>Símbolo</i>	<i>Unidade</i>	<i>Módulo II</i>	<i>Módulo I/II 2D</i>	<i>Módulo I/II 3D</i>
χ	[MPa]	-	19.0	19.0
c	[MPa]	20.0	20.5	20.5
c_g	[MPa]	-	-	15.0
σ_{dil}	[MPa]	-	2.0	-
$\tan \phi$	[-]	-	0.8	0.8
$\tan \phi_g$	[-]	-	-	0.05
$\tan \phi_r$	[-]	-	0.5	0.1
$\tan \beta$	[-]	-	0.05	-
α_χ	[-]	-	0.0	0.0
α_c	[-]	0.0	0.0	0.0
$\alpha_{\tan \phi}$	[-]	-	0.0	0.0
G_f^I	[N/mm]	-	25.0	15.0
G_f^{II}	[N/mm]	30.0	35.0	25.0
k_1^e	[MPa/mm]	145.0	145.0	140.0
k_2^e	[MPa/mm]	1×10^6	100.0	100.0
k_3^e	[MPa/mm]	1×10^6 *	-	100.0

onde: χ - resistência à tração; c , c_g - coesão nas funções de cedência e potencial plástico, respectivamente; σ_{dil} - tensão normal para a qual a dilatância; $\tan \phi$, $\tan \phi_g$ - ângulo de atrito nas funções de cedência e potencial plástico, respectivamente; $\tan \phi_r$ - ângulo de atrito residual; $\tan \beta$ - ângulo de dilatância; α_χ , α_c , $\alpha_{\tan \phi}$ - parâmetros de amolecimento da resistência à tração, coesão e ângulo de atrito, respectivamente; G_f^I , G_f^{II} - energia de fratura em modos I e II, respectivamente; k_1^e , k_2^e , k_3^e - rigidez elástica tangencial nas direções locais l_1 , l_2 e l_3 , respectivamente.

Nota: *apenas necessário em análises 3D.

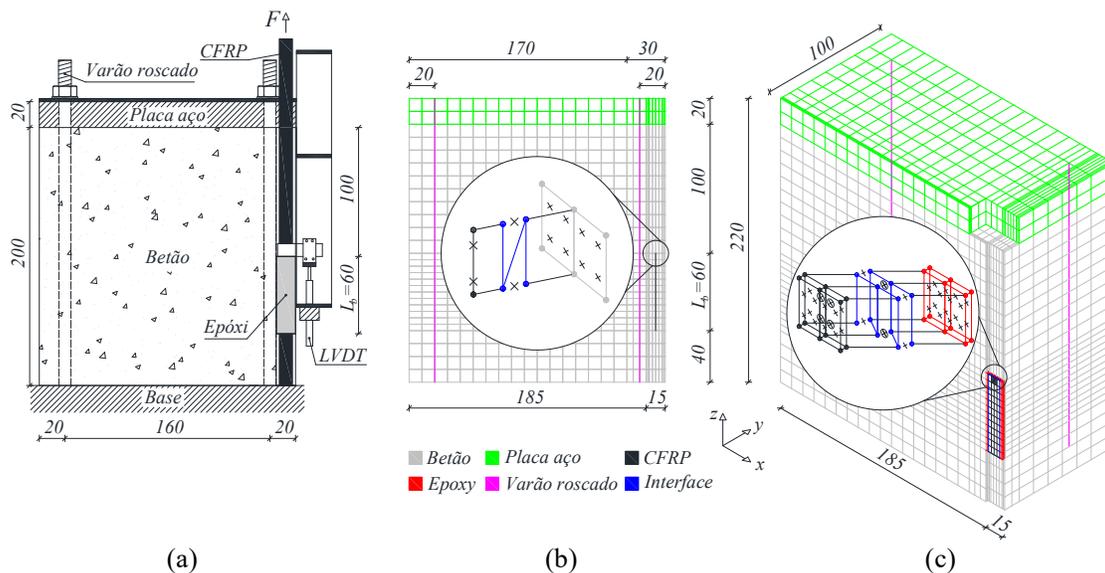


Figura 3. Ensaio de arranque direto: (a) geometria e configuração de ensaio; malha de elementos finitos para as análises com elementos de interface de linha (b) e superfície (c).

De acordo com a caracterização dos materiais feita pelos autores, betão, CFRP e epóxi tinham módulos de elasticidade de 28.4 GPa, 165 GPa e 7.15 GPa, respetivamente. Uma vez que todos os ensaios romperam pela interface CFRP/epóxi, toda a não linearidade do sistema foi concentrada na interface. Assim, todos os materiais foram considerados com comportamento linear elástico usando os módulos de elasticidade indicados atrás. Adicionalmente, apenas na interface CFRP/epóxi foram usados elementos de interface, assumindo assim que todas as outras regiões de contacto entre materiais teriam aderência perfeita.

Foram desenvolvidos dois modelos MEF, um considerando análise 2D com elementos de interface de linha, L2D, (Fig. 1a) e outro para análise 3D utilizando elementos de interface de superfície, S, (Fig. 1b), que se detalham de seguida. Cada modelo foi calculado considerando apenas o modo II de fratura e ambos os modos I e II, através dos módulos correspondentes, o que resultou em quatro análises MEF.

3.1. Modelo MEF com elementos L2D

No modelo MEF com L2D foi assumido o estado plano de tensão, usando a malha apresentada na Fig. 3b. O betão e a placa de aço foram modelados com elementos de Serendipity de 4 nós (integração Gauss-Legendre 2×2). O CFRP e os varões roscados foram modelados com elementos de 2 nós de pórtico. Por último, a interface CFRP/betão foi modelada com elementos de interface L2D de 4 nós (Fig. 1a) e integração Gauss-Lobatto 2×1 .

As condições de apoio foram simuladas através do bloqueio dos deslocamentos verticais ao nível da base. O efeito do aperto dos varões roscados foi simulado através da aplicação nestes de uma variação uniforme de temperatura equivalente ao momento de aperto aplicado nos ensaios. O carregamento consistiu num deslocamento prescrito na direção vertical (direção z na Fig. 3) no nó superior do CFRP.

3.2. Modelo MEF com elementos S

De modo a minimizar o tempo de cálculo, o modelo MEF 3D consistiu em apenas metade do provete. De facto, pode-se assumir a existência de simetria no plano xz . Betão, placa de aço, epóxi e CFRP foram modelados com elementos sólidos de 8 nós (integração Gauss-Legendre $2 \times 2 \times 2$). Os varões roscados foram simulados com elementos de pórtico 3D com 2 nós. A interface CFRP/betão foi modelada com elementos de interface de superfície de 8 nós (Fig. 1b) e integração Gauss-Lobatto 2×2 .

As condições de fronteira foram simuladas através do bloqueio dos deslocamentos verticais na base e dos deslocamentos segundo y no plano de simetria. Tal como no modelo 2D, o aperto dos varões foi simulado com uma variação uniforme de temperatura. O carregamento também foi semelhante, no entanto agora o deslocamento prescrito foi aplicado a todos os nós do topo do CFRP.

3.3. Parâmetros usados em cada módulo

Conforme se pode verificar no Quadro 1, apenas se apresentam três conjuntos de parâmetros quando se disse atrás que foram realizadas um total de quatro análises MEF. Tal prende-se com o facto de o módulo de cálculo que considera apenas modo de fratura II ser o mesmo para as análises 2D e 3D. Assim, os parâmetros apresentados para este módulo foram aplicados a ambos os modelos MEF com elementos L2D e S.

No caso dos módulos que consideram a interação entre os modos de fratura I e II, os parâmetros apresentados são ligeiramente diferentes. Essas diferenças estão associadas à influência do comportamento na direção normal na resposta global. O comportamento na direção normal no modelo MEF com elementos S é afetado pela rigidez dos materiais envolventes (epóxi e betão), o que pode ser considerado como um efeito de “confinamento” na direção normal. Tal efeito não existe nos modelos com o módulo II, uma vez que nestes o comportamento na direção normal é considerado elástico quer se usem interfaces L2D ou S.

4. VALIDAÇÃO DA LEI CONSTITUTIVA – RESULTADOS

4.1. Resultados experimentais *versus* numéricos

A Fig. 4 apresenta os resultados das quatro simulações MEF em termos da relação deslizamento tangencial *versus* força de arranque. Cada figura inclui também a envolvente dos resultados experimentais. Todas as análises captaram bem as três principais fases dos ensaios experimentais:

- A fase inicial, governada pela adesão química entre os materiais, caracterizada por um comportamento praticamente linear;
- A segunda fase, correspondente à degradação da rigidez do sistema como consequência da perda progressiva da adesão química;
- A fase pós-pico, controlada pelo atrito entre o CFRP e o epóxi à medida que o destacamento se vai desenvolvendo.

O aspeto mais relevante destes resultados ocorreu para o modelo MEF com elementos S usando ambos os modos I e II de fratura. Este foi o modelo que melhor captou a queda abrupta da força de arranque no início da fase pós-pico. Isto, uma vez mais, realça a natureza tridimensional da técnica NSM FRP e a necessidade de serem realizadas análise MEF 3D.

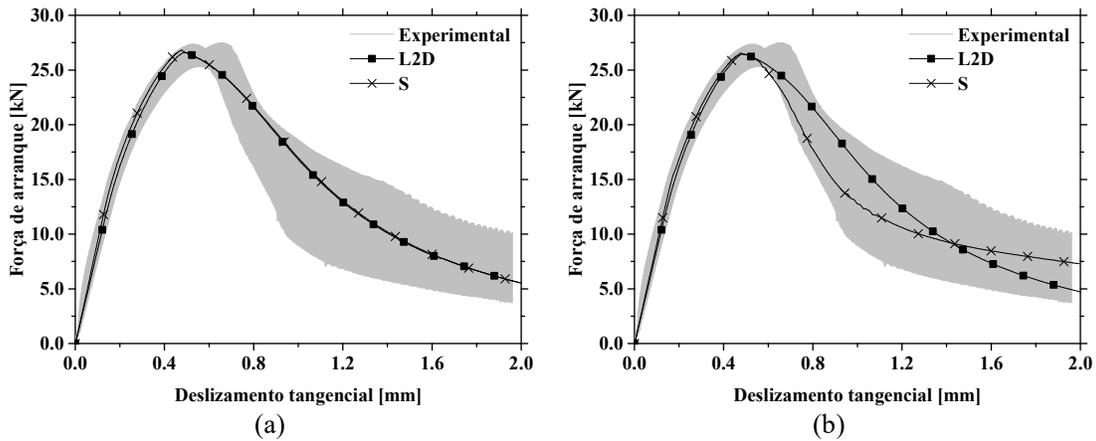


Figura 4. Deslizamento tangencial *versus* força de arranque obtidos nas análises MEF considerando modo de fratura: (a) II; (b) I e II.

4.2. Resultados considerando modo de fratura II *versus* I/II

As Figs. 5 e 6 apresentam a evolução dos deslizamentos e tensões na interface, bem como das extensões no CFRP para as quatro simulações MEF realizadas. Para facilitar a análise, estas figuras apenas incluem dois níveis de força (F) pré-pico e pós-pico, para além da força de arranque máxima ($F_{f,max}$).

Mesmo assumindo que existem diferenças em termos de integração numérica entre os modelos 2D e 3D, a primeira conclusão que se pode tirar é que os resultados considerando apenas modo de fratura II são praticamente iguais para ambos os modelos MEF usando L2D e S (Fig. 5), enquanto usando os modos de fratura I e II observam-se diferenças substanciais (Fig. 6). Isto corrobora a já referida influência do comportamento na direção normal.

Outra conclusão interessante diz respeito às curvas dos parâmetros na direção normal, apenas apresentadas para as simulações considerando os modos I e II de fratura (Figs. 6c e 6d). Usando L2D existe deslizamento normal, enquanto na simulação com elementos S este é praticamente nulo. Consequentemente, ocorre o oposto em termos de tensões normais, que são praticamente nulas usando L2D mas existem usando elementos S. Isto corrobora o também já referido efeito de “confinamento” que apenas é captado em simulações 3D.

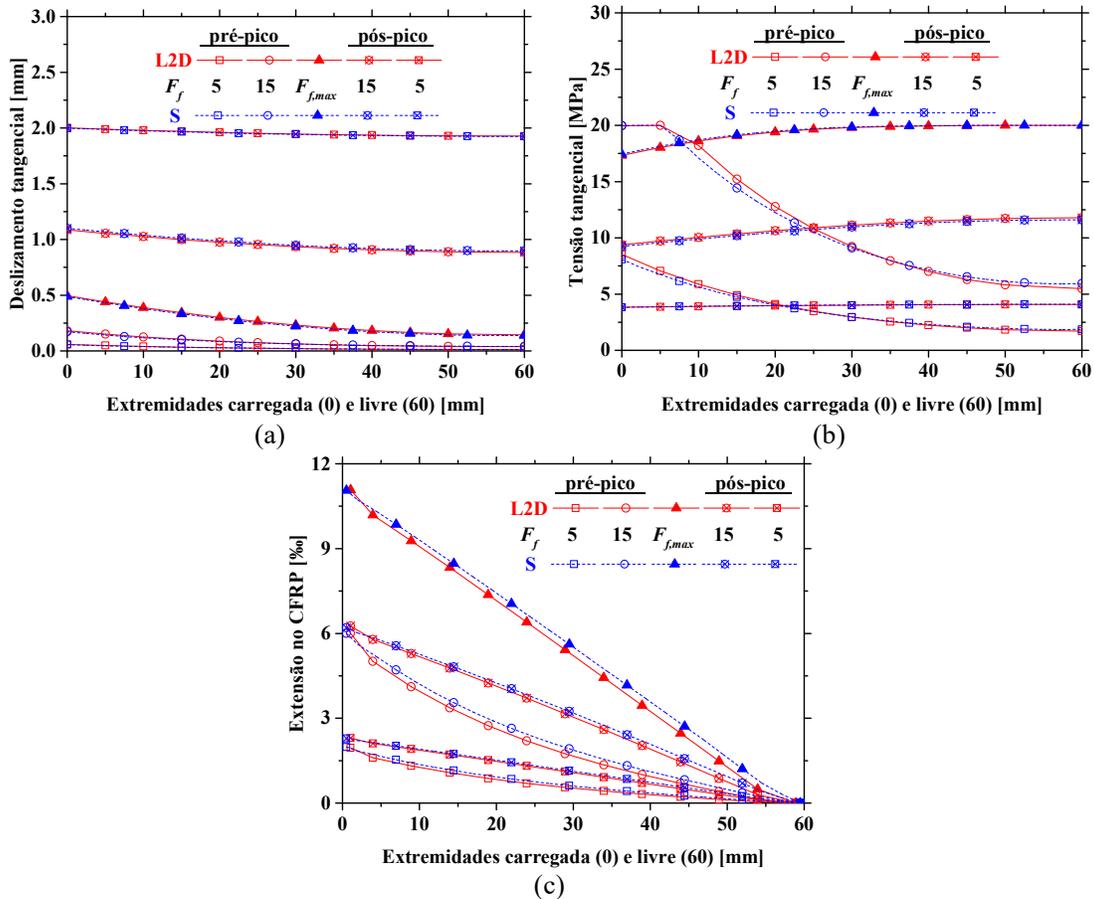


Figura 5. Resultados das análises MEF usando o módulo II: deslizamento (a) e tensão (b) na interface na direção de carregamento; (c) extensão longitudinal no CFRP.

4.3. Resultados usando elementos L2D versus S

A Fig. 7 apresenta os resultados obtidos nas duas simulações com elementos S realizadas. São apresentadas as três componentes de deslizamento e tensão obtidas nas três direções locais da interface. De referir que os resultados apresentados anteriormente nas Figs. 5 e 6 correspondem aos deslizamentos/tensões ao longo da linha vertical central em cada gráfico da Fig. 7, que coincide com a localização do CFRP e das interfaces L2D nos modelos MEF 2D. Na Fig. 7 consegue-se obter uma visão mais global do comportamento ao longo da largura da interface entre o CFRP e o epóxi.

Em primeiro lugar, a Fig. 7 mostra que o efeito da localização excêntrica do CFRP é captado pelo modelo MEF. Por exemplo, os deslizamentos na direção l_1 (primeiro gráfico nas Figs. 7b e 7c) são maiores no lado esquerdo do que no lado direito, correspondendo ao interior e exterior da ligação, respetivamente. Este efeito deverá estar associado ao movimento descendente que o bloco de betão sofre à medida que o CFRP é puxado para cima, que será menor mais junto da face externa do bloco de betão.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho apresentou-se uma lei constitutiva de interface que pode ser utilizada na simulação numérica da ligação em elementos de betão reforçados com sistemas NSM FRP. Não obstante esta lei consistir na adaptação de três outras já existentes para a simulação do comportamento de materiais quási-frágeis, a fusão destas numa única lei bem como a sua aplicação no âmbito da técnica NSM FRP são a grande mais valia deste trabalho.

Dos resultados das simulações numéricas efetuadas, verifica-se que a lei constitutiva é adequada, sendo de especial importância os bons resultados obtidos nos modelos 3D usando elementos de interface de superfície, dada a natureza intrinsecamente tridimensional da técnica NSM FRP. Nestes foi possível captar o efeito do posicionamento excêntrico do FRP em relação ao bloco de betão.

Por outro lado, a possibilidade de realizar análises numéricas considerando a interação não linear do comportamento nas direções tangencial e normal é igualmente muito valiosa já que assim se consegue simular mais corretamente o comportamento real da técnica NSM FRP.

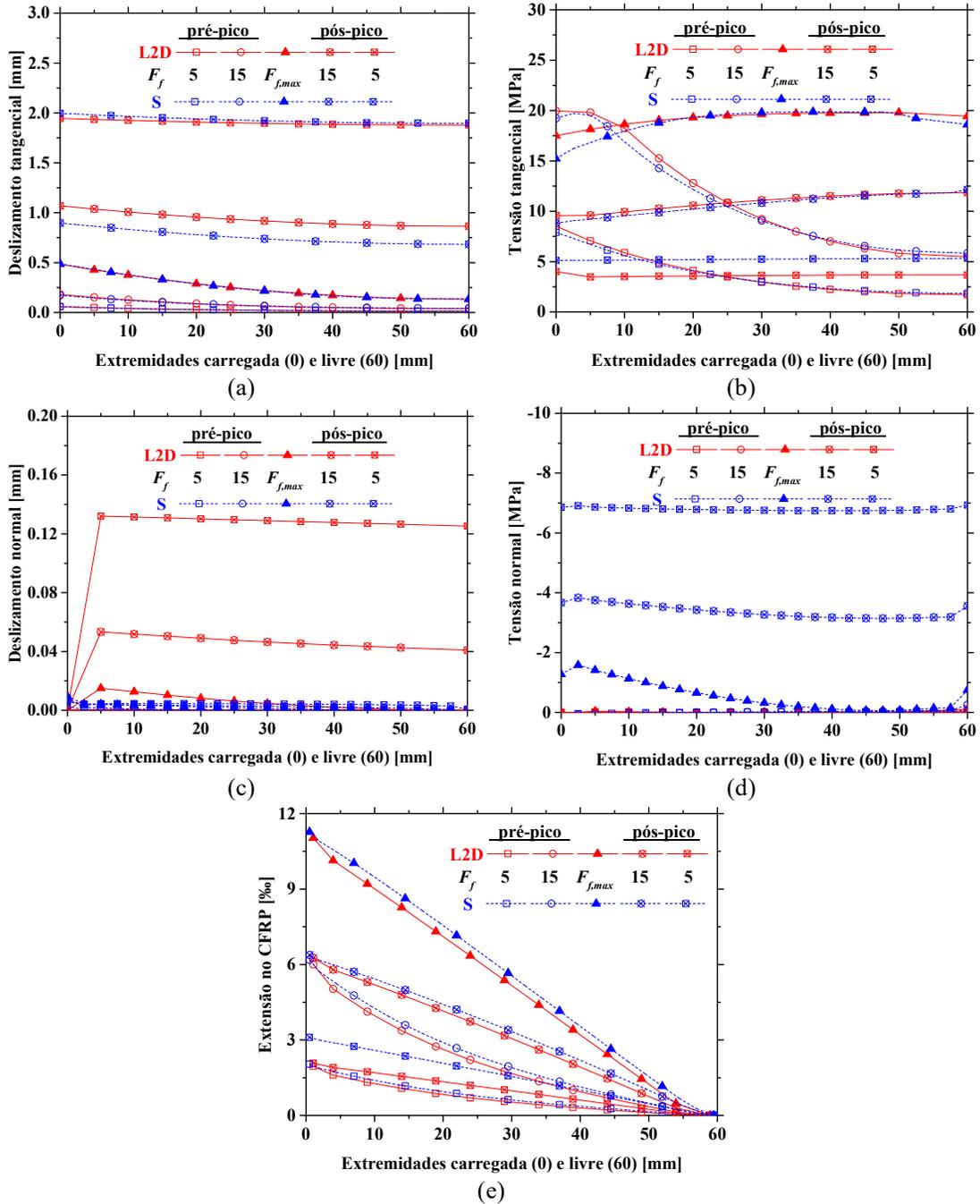


Figura 6. Resultados das análises MEF considerando os modos de fratura I e II: deslizamento (a) e tensão (b) na interface na direção de carregamento; deslizamento (c) e tensão (d) na interface na direção normal; (e) extensão longitudinal no CFRP.

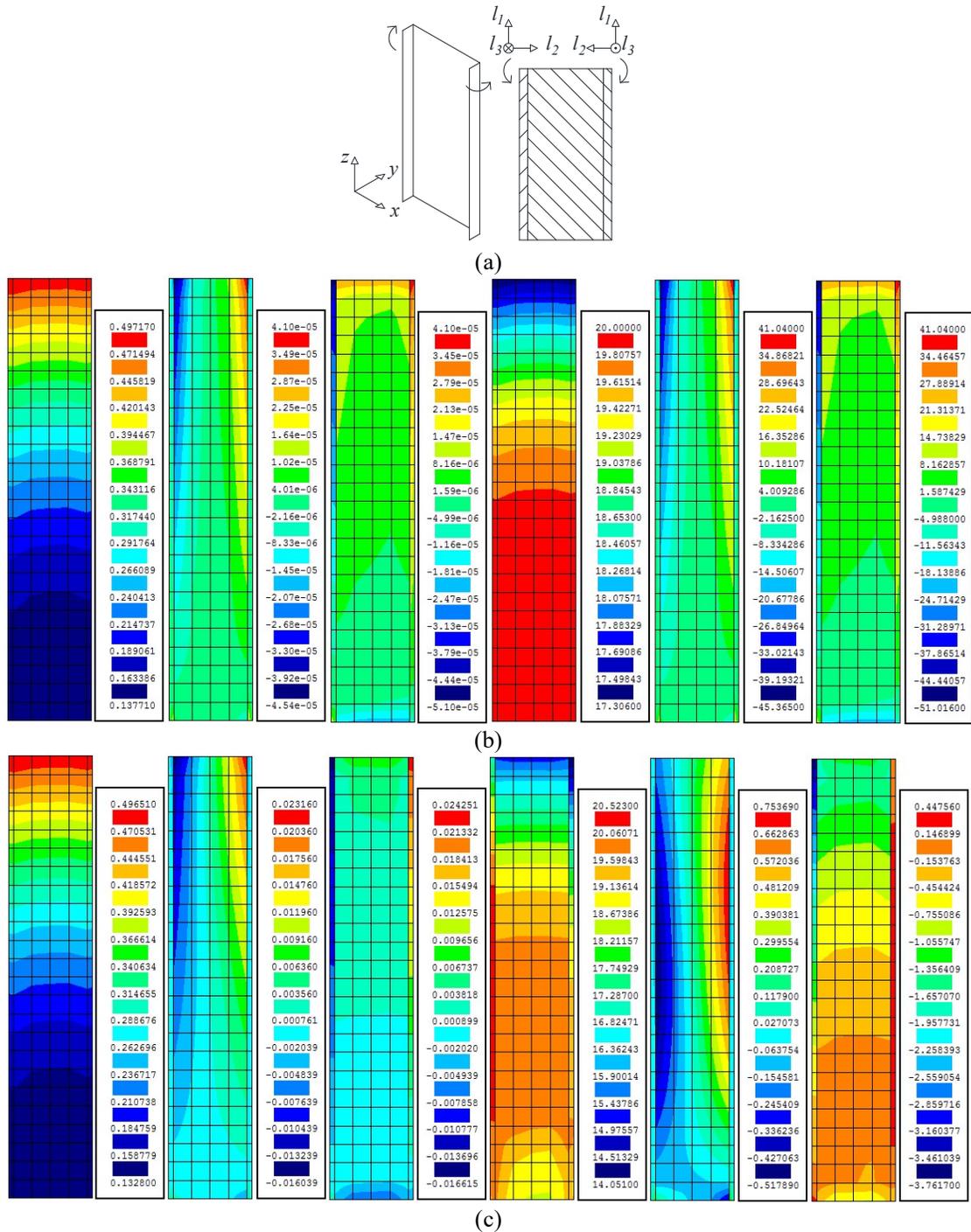


Figura 7. Resultados obtidos nas simulações com elementos S para $F_{f,max}$: (a) esquema; resultados considerando os modos de fratura (b) II; (c) I e II. Nota: os deslizamentos estão em mm e as tensões em MPa.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado por fundos nacionais através da FCT e cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional Fatores de Competitividade e internacionalização (POCI) e do Programa Regional de Lisboa no âmbito dos projetos FRPLongDur POCI-01-0145-FEDER-016900 (PTDC/ECM-EST/1282/2014) e POCI-01-0145-FEDER-007633. O

primeiro autor gostaria também de agradecer a bolsa de doutoramento número SFRH/BD/87443/2012 concedida pela FCT e a bolsa de mobilidade concedida pelo projeto “EnCoRe” (FP7-PEOPLE-2011-IRSES No. 295283; www.encore-fp7.unisa.it) financiado pela união europeia.

REFERÊNCIAS

- [1] Bakis C et al. (2002) Fiber-reinforced polymer composites for construction – State-of-the-art review. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 6(2), pp. 73–87.
- [2] Coelho M; Sena-Cruz J; Neves L. (2015) A review on the bond behavior of FRP NSM systems in concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 93, pp. 1157–69.
- [3] Sena-Cruz, J.; Barros, J.; Azevedo, A. (2004) Elasto plastic multi fixed smeared crack model for concrete. *Technical Report 04-DEC/E-05*. Civil Engineering Department, University of Minho.
- [4] Ventura, A.; Barros, J.; Azevedo, A.; Sena-Cruz, J. (2008) Multi-fixed smeared 3D crack model to simulate the behavior of fiber reinforced concrete structures. *In: CCC2008 – Challenges for civil construction*, Porto, Portugal: FEUP.
- [5] Sena-Cruz J; Barros J; Gettu R; Azevedo A. (2006) Bond behavior of near-surface mounted CFRP laminate strips under monotonic and cyclic loading. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 10(4), pp. 295–303.
- [6] Ceroni F; Barros J; Pecce M; Ianniciello M. (2013) Assessment of nonlinear bond laws for near-surface-mounted systems in concrete elements. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 45(1), pp. 666–81.
- [7] Sharaky, I.; Barros, J.; Torres, L. (2013) FEM-based modelling of NSM-FRP bond behaviour. *In: FRPRCS-11*. Guimarães, Portugal.
- [8] Echeverria M, Perera R. (2013) Three dimensional nonlinear model of beam tests for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 54, pp. 112–24.
- [9] Sena-Cruz, J.; Barros J.; Azevedo A.; Gouveia A. (2007) Numerical simulation of the nonlinear behavior of RC beams strengthened with NSM CFRP strips. *In CNME 2007 – Congress on numerical methods in engineering and XXVIII CILAMCE – Iberian Latin American congress on computational methods in engineering*, Porto, Portugal: FEUP.
- [10] Caggiano A, Martinelli E. (2013) A fracture-based interface model for simulating the bond behaviour of FRP strips glued to a brittle substrate. *Composites Structures*, Vol. 99, pp. 397–403.
- [11] Caggiano, A.; Martinelli, E. (2012) Fracture-based model for mixed mode cracking of FRP strips glued on concrete. *In: Bond in concrete 2012*. Brescia, Italy.
- [12] Caballero A, Willam K, Carol I. (2008) Consistent tangent formulation for 3D interface modeling of cracking/fracture in quasi-brittle materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 197(33–40), pp. 2804–22.
- [13] Coelho M, Caggiano A, Sena-Cruz J, Neves L. (2016) Fracture-based interface model for NSM FRP systems in concrete. *Composite Structures*, Vol. 152, pp. 816-828.
- [14] Fernandes P, Silva P, Sena-Cruz J. (2015) Bond and flexural behavior of concrete elements strengthened with NSM CFRP laminate strips under fatigue loading. *Engineering Structures*, Vol. 84, pp. 350–61.