

Comparação entre modelos constitutivos de interface: abordagem total *versus* abordagem com plasticidade

M. Coelho¹, A. Caggiano², J. Sena-Cruz³, L. Neves⁴

¹ ISE/Universidade do Minho, Guimarães, mcoelho@civil.uminho.pt

² Universidade de Buenos Aires, Argentina, acaggiano@fi.uba.ar

³ ISE/Universidade do Minho, Guimarães, jsena@civil.uminho.pt

⁴ Universidade de Nottingham, Reino Unido, luis.neves@nottingham.ac.uk

Palavras-chave: Método dos elementos finitos; Modelos constitutivos de interface; NSM

RESUMO

Nos últimos anos, a técnica de inserção de polímeros reforçados com fibras (FRP) no recobrimento de betão tem sido cada vez mais utilizada para reforçar estruturas de betão (técnica NSM). Este artigo apresenta os resultados obtidos em simulações numéricas de ensaios de arranque direto efetuados em cubos de betão reforçados com sistemas de FRP NSM. Duas estratégias diferentes são usadas para simular a interface entre o FRP e o betão envolvente. Uma estratégia baseia-se em expressões analíticas conhecidas a priori, enquanto a outra se baseia na teoria clássica de plasticidade com escoamento. Os resultados revelaram que ambas as estratégias são capazes de simular o comportamento global obtido nos ensaios de arranque.

1. INTRODUÇÃO

No contexto do reforço das estruturas de betão, o uso de polímeros reforçados com fibras (FRP) tem surgido nas últimas décadas como uma boa alternativa aos materiais tradicionais. A sua elevada rigidez e resistência à tração, baixo peso, os procedimentos de instalação simples, alta durabilidade (sem corrosão), permeabilidade eletromagnética e a disponibilidade praticamente ilimitada em termos de geometria e tamanho são as principais vantagens dos FRP [1].

As técnicas mais utilizadas consistem em usar o FRP colado externamente (EBR) ou inserido no recobrimento (NSM) dos elementos a reforçar. Uma vez que o FRP é inserido no betão, verifica-se que a técnica NSM apresenta várias vantagens quando comparada com a EBR. Além disso, também tem sido demonstrado que os sistemas de FRP NSM constituídos por varões retangulares colados com uma resina epóxi são os mais eficientes do ponto de vista da utilização do FRP [2]. Por estas razões, neste trabalho, a técnica NSM com varões retangulares (também designados laminados) de FRP é abordada.

Um aspeto crucial em técnicas baseadas em sistemas de FRP consiste em perceber como é que as tensões são transferidas do elemento de betão para o FRP. Este fenómeno é geralmente estudado através de ensaios de arranque e complementado com simulações numéricas (por exemplo, [3]). O presente trabalho apresenta a simulação numérica, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), de ensaios de arranque com FRP NSM.

Para simular tais ensaios de arranque, é necessário considerar três materiais (betão, FRP e adesivo), e ainda as duas interfaces existentes (FRP/adesivo e adesivo/betão). Em relação aos três materiais, já existem bons modelos constitutivos disponíveis que podem ser usados para simular o comportamento quasi-frágil do betão e do adesivo, e o comportamento elástico do FRP.

Em relação às interfaces, a mesma abundância de modelos constitutivos não se verifica. Na verdade, o processo mais vulgarmente usado para simular as interfaces de sistemas de FRP NSM consiste em adotar uma expressão analítica que funciona como modelo constitutivo para as interfaces. Alguns exemplos do uso desta estratégia podem ser encontrados na literatura [3-5], que demonstram que já existem várias expressões analíticas suscetíveis de ser utilizadas para este fim. A simulação numérica consiste em, por ajuste aos resultados experimentais, calibrar os parâmetros da expressão analítica adotada.

A principal desvantagem desta estratégia reside no facto de a referida expressão analítica necessitar de ser conhecida *a priori*, quando esta deveria ser obtida no fim da simulação MEF. Além disso, esta expressão não tem significado físico direto. Na verdade, pode dizer-se que simula o comportamento estrutural total e não o comportamento local das interfaces. Por estas razões, esta estratégia é designada de abordagem total neste trabalho.

Para resolver estes problemas, neste trabalho, é adotada uma estratégia diferente, utilizando um modelo constitutivo disponível na literatura. Embora este modelo tenha sido inicialmente desenvolvido para materiais frágeis, este também já foi adaptado no passado para simular elementos de betão reforçados com laminados de FRP, utilizando a técnica EBR [6]. Os resultados aí obtidos foram muito bons pelo que se tentou agora utilizar esse mesmo modelo no contexto da técnica NSM. Uma vez que o modelo é baseado na teoria clássica da plasticidade com escoamento, esta estratégia foi designada de abordagem com plasticidade. Os seguintes parágrafos detalham ambos os tipos de abordagens e os resultados obtidos através das simulações MEF realizadas.

2. MODELOS DE INTERFACE

O modelo utilizado na abordagem total é descrito pela equação (1). Nesta equação, τ_m e s_m são a resistência da ligação e o correspondente deslizamento, respetivamente; α e α' definem a forma da lei de aderência nos tramos pré e pós-pico, respetivamente. Assim, esta equação traduz a evolução da tensão tangencial com o deslizamento tangencial na interface.

$$\tau(s) = \begin{cases} \tau_m \left(\frac{s}{s_m} \right)^\alpha & \text{if } s \leq s_m \\ \tau_m \left(\frac{s}{s_m} \right)^{-\alpha'} & \text{if } s > s_m \end{cases} \quad (1)$$

O modelo com plasticidade é formulado no contexto da teoria clássica da plasticidade com escoamento. Por uma questão de brevidade, aqui apenas se apresentam a função de cedência ($f(\tau, W)$) na equação (2) e a lei de amolecimento adotada para a tensão tangencial (3). O modelo é formulado em termos da relação entre o trabalho, W , e a energia de fratura disponível em modo de fratura II, G_f'' . Em particular, a evolução do amolecimento pós-pico é por sua vez formulada por meio do parâmetro adimensional apresentado na equação (4). Nas equações abaixo, τ_m é a tensão tangencial, $\tau_{m,0}$ a resistência da ligação e α é um parâmetro de forma da lei de amolecimento.

$$f(\tau, \kappa) = \tau^2 - \tau_m^2 \leq 0 \quad (2)$$

$$\tau_m = \tau_{m,0} \left[1 - \frac{e^{-\alpha} \xi}{1 + (e^{-\alpha} - 1) \xi} \right] \quad (3)$$

$$\xi = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{\pi W}{G_f''} \right) \right] & \text{if } 0 \leq W \leq G_f'' \\ 1 & \text{if } W > G_f'' \end{cases} \quad (4)$$

O trabalho apresentado neste artigo foi desenvolvido no software de análise estrutural FEMIX 4.0 [7]. O modelo da abordagem total já foi implementado no software e validado em vários trabalhos anteriores (por exemplo, [3]). Contrariamente, o modelo da abordagem com plasticidade foi apenas recentemente implementado, assim, a sua implementação e validação serão apresentadas em primeiro lugar.

3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Para avaliar o desempenho de ambas as abordagens, foram realizadas simulações MEF de ensaios de arranque direto (DPT). Os ensaios são similares aos descritos em [8]. A Figura 1a mostra um provete genérico, que consiste num cubo de betão simples com 200 milímetros de aresta. Num dos lados do provete foi feito um entalhe e um laminado de CFRP foi colado no seu interior utilizando um adesivo epóxi. O entalhe foi cortado ao longo da altura desse lado com 15 mm de profundidade e 5 mm de largura. O laminado era de 1.4 mm de espessura, 10 mm de largura e 400 mm de comprimento de modo a alcançar a amarra da máquina de ensaio. No topo do cubo de betão foi colocada uma chapa de aço com 20 mm de espessura. Esta foi fixa à base por quatro varões roscados de aço. Nos varões foi aplicado um momento de aperto de 30 N×m.

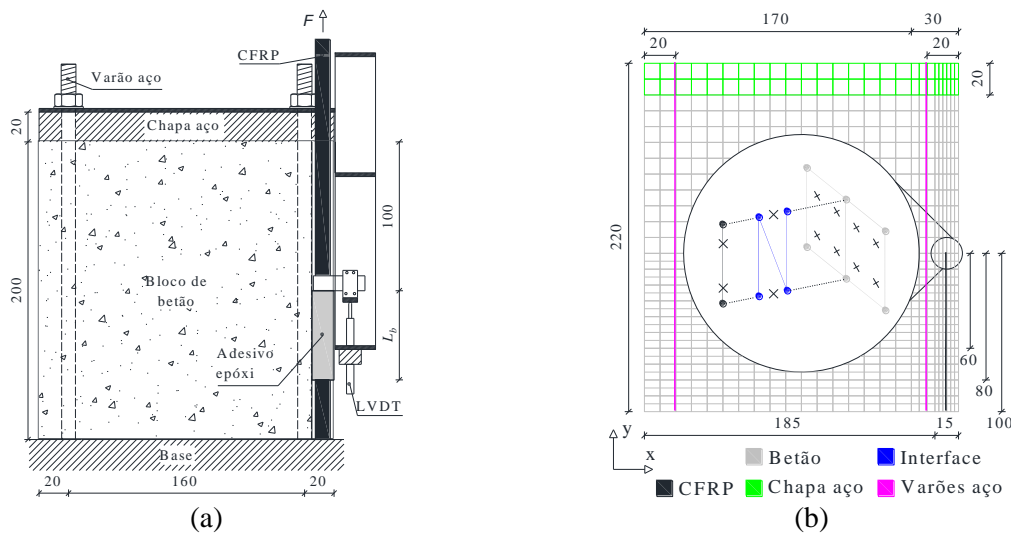


Figura 1: Ensaios de arranque direto: (a) geometria e configuração de ensaio; (b) malha de elementos finitos adotada. Nota: as dimensões são em milímetros.

Para evitar a rotura prematura do provete devido à formação de um cone de betão perto do topo, o comprimento de amarração, L_b , foi iniciada a 100 mm do topo do provete, prolongando-se para baixo. Foram ensaiadas três séries diferentes, sendo a única diferença entre elas o comprimento de amarração L_b . Este foi definido como 60, 80 e 100 mm. Cada série continha três exemplares iguais.

Um transdutor de deslocamento (LVDT) registou os deslocamentos relativos entre o CFRP e o betão, enquanto a força aplicada F foi registada por uma célula de carga.

A partir da caracterização dos materiais realizada foram obtidos os módulos de elasticidade de 28.4 GPa e 165.0 GPa para o betão e o CFRP, respetivamente. Em relação aos resultados dos ensaios DPT, na Tabela 1 apresentam-se os valores da máxima força de arranque obtida em cada série. Enquanto na série

com L_b 60 a rotura ocorreu por deslizamento na interface entre o laminado de CFRP e o adesivo epóxi, nas outras duas séries a rotura ocorreu por tração no laminado de CFRP.

Uma vez que no DPT não foi verificado dano no adesivo e/ou no betão, e devido ao facto de o laminado de CFRP ter um comportamento elástico linear, nas simulações MEF, todos os materiais foram simulados com comportamento linear elástico usando os módulos de elasticidade referidos acima.

Neste trabalho apenas são apresentadas simulações MEF 2D, assim, o adesivo não foi explicitamente simulado. Em alternativa, o seu comportamento foi considerado em conjunto com o comportamento de ambas as interfaces existentes (CFRP/adesivo e adesivo/betão). Assim, toda a não-linearidade verificada na resposta experimental foi simulada por meio do modelo constitutivo adotado para a interface entre o laminado de CFRP e o substrato de betão.

A Figura 1b apresenta a malha MEF adotada. Os ensaios experimentais foram simulados como um problema em estado plano de tensão, assim, apenas a superfície média do provete foi simulada, sendo a totalidade do volume representada pelos diferentes valores de espessura atribuídos a cada parte da malha. Ambos, bloco de betão e chapa de aço, foram modelados com elementos de Serendipity de 4 nós (com esquema de integração de Gauss-Legendre 2×2). O laminado de CFRP e os varões de aço foram modelados com elementos de 2 nós de cabo e pórtico 2D, respetivamente, ambos com 2 pontos de integração de Gauss-Legendre. Por último, os elementos de interface foram modeladas com elementos de interface de linha de 4 nós e dois pontos de integração de Gauss-Lobatto. A única diferença entre as malhas adotadas nas três séries analisadas, encontra-se no comprimento de amarração, ou seja, no número de pares de elementos de interface/CFRP que foram usados.

As condições de suporte dos ensaios foram simuladas bloqueando o deslocamento vertical na base do bloco de betão, uma vez que foi verificado experimentalmente que o deslocamento vertical do bloco era negligenciável. Além disso, o efeito do pré-esforço nos varões de aço foi simulado através da aplicação de uma variação de temperatura uniforme equivalente ao momento de aperto aplicado nos ensaios.

A força de arranque foi aplicada por meio de um deslocamento prescrito no nó superior do elemento de CFRP.

4. RESULTADOS

Uma vez que apenas na série L_b 60 o modo de rotura ocorreu por mecanismos de descolagem, as simulações começaram por esta série, a fim de calibrar os parâmetros de cada tipo de modelo de interface. No final, os parâmetros obtidos para o modelo de abordagem total foram: 0.3 mm, 23.0 MPa, 0.6 e 0.7 para s_m , τ_m , e α e α' , respetivamente. Na abordagem com plasticidade os parâmetros obtidos foram: 20.0 MPa, 0, 30.0 N/mm e 145.0 N·mm para $\tau_{m,0}$, α , G_f e rigidez tangencial elástica, respetivamente. O comportamento na direção normal foi considerado elástico em ambas as abordagens. Isto foi conseguido através da atribuição de um valor elevado para a rigidez normal em ambos os modelos de interface. No entanto, vale a pena ressaltar que se os valores da rigidez normal forem demasiado elevados podem criar problemas no cálculo da matriz de rigidez global.

Em seguida, utilizando os conjuntos de parâmetros de entrada encontrados para os modelos de interface, as outras duas séries foram simuladas. Assim, a única diferença entre as simulações das três séries residia no comprimento de amarração, tudo o resto permaneceu exatamente igual.

A Tabela 1 resume os resultados obtidos nas simulações numéricas realizadas. A Figura 2a-c apresenta a resposta completa obtida em cada série de DPT. São apresentadas ambas as envolventes, experimental e MEF, com as abordagens total e com plasticidade. Os deslizamentos MEF foram lidos no ponto de integração do elemento de interface mais perto da extremidade carregada, enquanto a força de arranque foi lida no nó de CFRP onde o deslocamento prescrito foi aplicado.

Nesta mesma figura, a lei local tensão-deslizamento tangenciais adotada por cada abordagem é apresentada (Figura 2d). De notar que, enquanto para a abordagem total esta lei era conhecida desde o princípio, na abordagem com plasticidade esta só foi obtida no final da simulação MEF analisando os deslizamentos e tensões no ponto de integração do elemento de interface mais perto da extremidade carregada.

Tabela 1: Resultados dos DPT (em kN).

Série	Força de arranque máxima		
	Experimental ^a	Abordagem total ^b	Abordagem com plasticidade ^b
L_b 60	26.72 (3.67%)	26.55 (0.65%)	26.58 (0.54%)
L_b 80	36.52 (1.71%)	32.40 (11.3%)	33.78 (7.50%)
L_b 100	36.60 (2.43%)	^c	^c

^a valor em parêntesis é o coeficiente de variação em cada série; ^b valor em parêntesis é a diferença para o valor experimental correspondente; ^c pode ser considerado igual ao valor experimental (ver explicação no texto principal acima).

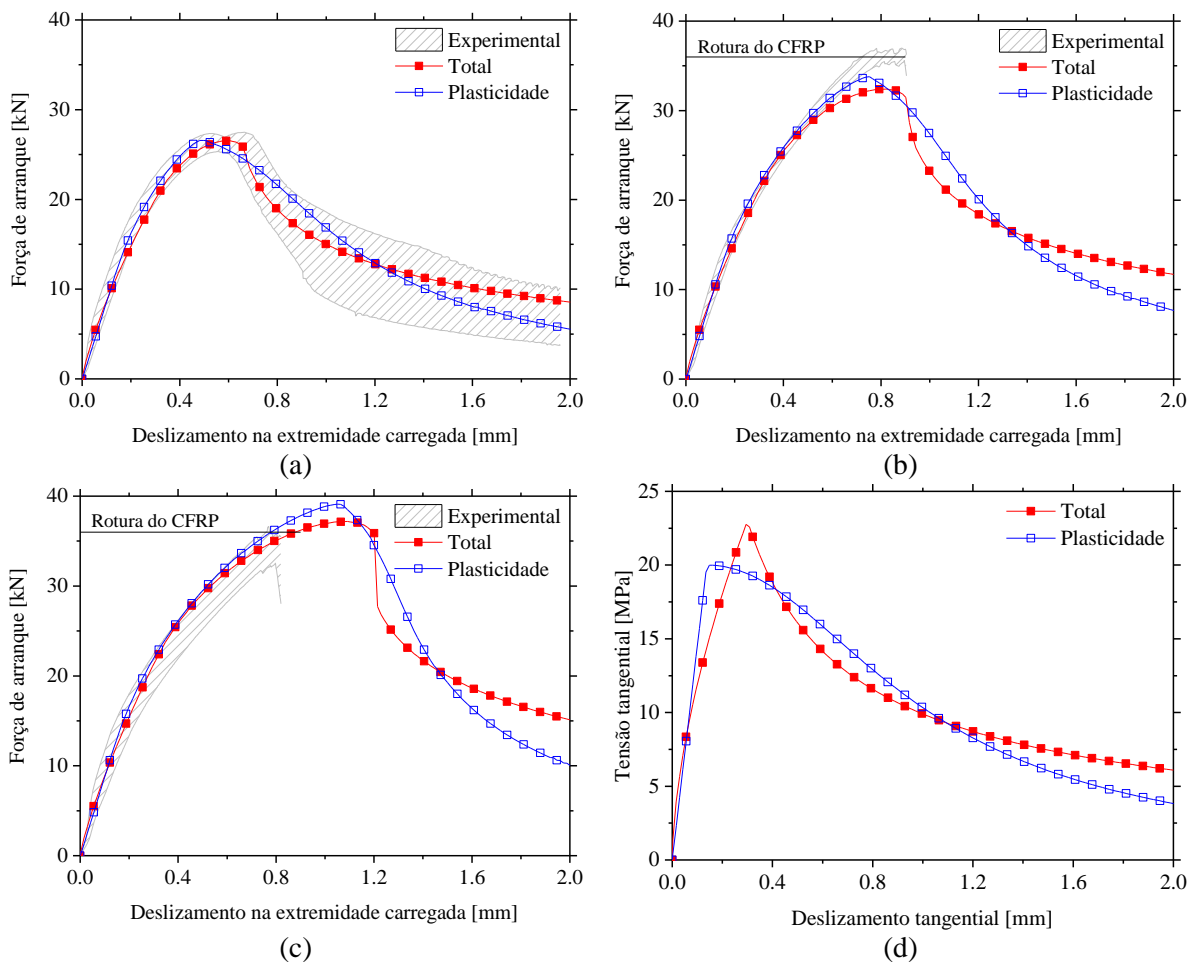


Figura 1: Resultados das simulações MEF para as séries: (a) L_b 60; (b) L_b 80; (c) L_b 100; (d) leis tensão-deslizamento locais.

Tendo em conta que ambos os modelos de interface foram calibrados para a série L_b 60, os resultados desta série estão, naturalmente, muito próximos dos experimentais. No entanto, verifica-se uma diferença importante em termos de resistência da ligação. Esta precisa de ser maior no modelo com a abordagem total de modo a ser capaz de simular a mesma relação deslizamento *versus* força de arranque.

Tendo em conta que este é um parâmetro importante nas normas existentes para o projeto de sistemas de FRP NSM [2], esta diferença é ainda mais relevante.

Analisando a série L_b 80, verificou-se que ambas as abordagens atingiram uma força de arranque máxima mais baixa do que a obtida nos ensaios experimentais. Analisando em pormenor a Figura 2b pode ver-se que, até ao deslizamento de 0.4 mm, ambas as abordagens têm um comportamento idêntico. A partir deste ponto e até o valor de pico, a abordagem com plasticidade reproduz os resultados experimentais melhor do que a abordagem total, tanto em termos de rigidez como de força de arranque máxima. Uma vez que o CFRP foi simulado com comportamento elástico linear e não foi utilizado mais nenhum outro critério para limitar a sua resposta (por exemplo, limite da resistência à tração), ambas as simulações MEF apresentam um tramo pós-pico que não existia nos ensaios experimentais.

Isto também ocorreu nas simulações da série L_b 100. No entanto, nesses casos, a simulação MEF deve apenas ser considerada até ao ponto em que a força de arranque atinge a resistência à tração do CFRP. Esse valor máximo foi identificado como cerca de 36.5 kN nas séries em que a rotura ocorreu pelo CFRP (séries L_b 80 e 100). Assim, considerando este valor como o final das simulações MEF, pode dizer-se que ambas as abordagens foram capazes de simular a série L_b 100.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados dois tipos de modelos constitutivos de interface para a simulação do comportamento das interfaces existentes em ensaios de arranque direto com sistemas FRP NSM. Como referência foi utilizado um modelo tradicionalmente adotado, baseado numa expressão analítica conhecida *a priori* (designada “abordagem total”). Em alternativa, foi proposto um modelo baseado na teoria clássica da plasticidade com escoamento (designada “abordagem com plasticidade”). Os resultados mostraram que ambas as abordagens são adequadas uma vez que ambas conseguiram captar o comportamento global dos ensaios de arranque.

Nos exemplos simulados apenas foi considerado o deslizamento ao longo da interface na direção tangencial (modo de fratura II puro). No entanto, no âmbito da técnica NSM ambos deslizamento e abertura (modos de fratura II e I, respetivamente) são relevantes. A explicação para se ter considerado apenas o deslizamento está relacionada com a abordagem total. Para se considerar diferentes comportamentos em diferentes direções com tais modelos, teriam de ser definidas diferentes expressões para cada direção. Isso é muito difícil de realizar, não tendo sido encontrado qualquer trabalho em que tal procedimento seja adotado. Normalmente, os modelos de abordagem total apenas consideram a componente de deslizamento, sendo o comportamento nas outras direções considerado elástico (tal como aqui se fez).

Para que a análise aqui apresentada fosse rigorosa, apenas se considerou deslizamento também na abordagem com plasticidade. No entanto, ressalta-se que os modelos com plasticidade, pela sua natureza, são fáceis de adaptar para simular os dois modos de fratura, em análises MEF 2D ou 3D. De facto, este aspeto está já a ser tido em conta e será apresentado em futuros trabalhos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi suportado por fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade - COMPETE e fundos nacionais, através da FCT - Fundação Português de Ciência e Tecnologia no âmbito do projeto FRPreDur - PTDC/ECM-EST/2424/2012. O primeiro autor gostaria ainda de agradecer a bolsa de doutoramento SFRH/BD/87443/2012 financiada pela FCT e a bolsa de mobilidade providenciada pelo projeto “EnCoRe” Project (FP7-PEOPLE-2011-IRSES nº 295283; www.encore-fp7.unisa.it) financiado pela União Europeia no âmbito do FP7.

REFERÊNCIAS

- [1] Bakis C, Bank L, Brown V, Cosenza E, Davalos J, Lesko J, et al. Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review. *Journal of Composites for Construction*. 2002;6(2):73-87.
- [2] Coelho M, Sena Cruz J, Neves L. A review on the bond behavior of FRP NSM systems in concrete. *Construction and Building Materials* (accepted). 2015.
- [3] Sena Cruz J, Barros J, Gettu R, Azevedo Á. Bond Behavior of Near-Surface Mounted CFRP Laminate Strips under Monotonic and Cyclic Loading. *Journal of Composites for Construction*. 2006;10(4):295-303.
- [4] Ceroni F, Barros JAO, Pecce M, Ianniciello M. Assessment of nonlinear bond laws for near-surface-mounted systems in concrete elements. *Composites Part B: Engineering*. 2013;45(1):666-81.
- [5] Sharaky IA, Barros JAO, Torres L. FEM-based Modelling of NSM-FRP Bond Behaviour. FRPRCS-11. Guimarães, Portugal. 2013. p. 10.
- [6] Caggiano A, Martinelli E, Faella C. A zero-thickness interface model for simulating the bond behaviour of FRP-strips glued on concrete. CICE 2012. Rome, Italy. 2012. p. 8.
- [7] Sena-Cruz JM, Barros JAO, Azevedo A, Gouveia AV. Numerical simulation of the nonlinear behavior of RC beams strengthened with NSM CFRP strips. CNME 2007-Congress on Numerical Methods in Engineering and XXVIII CILAMCE – Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering. FEUP, Porto. 2007. p. 20.
- [8] Fernandes PMG, Silva PM, Sena-Cruz J. Bond and flexural behavior of concrete elements strengthened with NSM CFRP laminate strips under fatigue loading. *Engineering Structures*. 2015;84(0):350-61.