

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELAÇÃO NUMÉRICA DA LIGAÇÃO GFRP/BETÃO

Biscaia, H.E.C.¹; Silva, M.G.²; Chastre, C.³

¹Aluno de Doutoramento, ²Prof. Catedrático, ³Prof. Auxiliar
Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa



RESUMO

Analisa-se e caracteriza-se por via experimental a ligação entre elementos de betão armado e materiais compósitos, nomeadamente com base nas fibras de vidro. Fabricaram-se vigas de betão armado que foram exteriormente reforçadas com GFRP. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com os resultados conseguidos por intermédio de modelação computacional, recorrendo-se ao programa de cálculo ATENA 2D. Para melhor modelação de elementos de interface, foram realizados ensaios de corte tendo-se obtido valores que permitiram caracterizar a lei de rotura de Mohr-Coulomb. Os parâmetros estudados foram a evolução das forças máximas absorvidas pelo reforço; as tensões de aderência máximas; a distribuição das tensões de aderência.

1 - INTRODUÇÃO

O reforço de elementos estruturais de betão armado com compósitos de FRP tem vindo a emergir como um método com grande potencialidade para eliminar os problemas de resistência deficiente desses elementos. Diversos autores [Pham (2006); Sena Cruz (2006); Camata (2006); Neale (2005)] concluíram que o dimensionamento através de uma modelação recorrendo a programas de cálculo automático comerciais correntes resultam em boas aproximações quando comparados com ensaios experimentais.

O mecanismo de ligação entre o FRP e o betão é complexo e afectado por várias variáveis, incluindo mas não as limitando às dimensões do FRP e do betão e às propriedades do betão e do adesivo. Os estudos que pretendem simular uma possível descolagem prematura de uma

ligação entre o FRP e o betão utilizam a energia de fractura e fazem consequente previsão da abertura de fendas com base em dois critérios de modos de fractura: Modo I e Modo II [Pham (2006)]. No presente trabalho uma análise com ambos os modos foi considerada através do programa de cálculo ATENA 2D.

A modelação da ligação GFRP/betão teve por base elementos finitos de interface utilizando a teoria de rotura de Mohr-Coulomb pelo que, parâmetros como a coesão e o ângulo de atrito da ligação foram obtidos experimentalmente. Outros parâmetros como a rigidez normal e tangencial foram considerados iguais a, respectivamente, 3×10^8 MN/m³ e 3×10^4 MN/m³ e foram obtidos tendo por base ensaios experimentais de vigas de betão armado submetidas à flexão [Biscaia (2006)].

2 - MATERIAIS

2.1 - Betão

Os ensaios de cubos de betão foram realizados em conformidade com a especificação do LNEC E226 tendo-se obtido uma resistência à compressão média aos 28 dias de 34,87 MPa. Na Tabela 1 apresenta-se uma síntese da caracterização do betão aos 28 dias.

Tabela 1- Síntese da caracterização do betão aos 28 dias valores com base em correlações do EC2 [EN 1992-1-1, 2004]

$f_{cm,cub}$ (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{ctm}^* (MPa)	E_{cm}^* (GPa)
43,58	34,87	2,69	32,00

Atendendo a que todos os provetes são do mesmo tipo de betão, a evolução da resistência à compressão do betão, f_c , em função do tempo, t , foi obtida por regressão através de ensaios de compressão realizados em cubos:

$$f_c(t) = 30,852 \cdot t^{0,036} \quad (1)$$

Constata-se que o incremento da resistência à compressão do betão para as datas de realização dos ensaios foi pouco significativo não proporcionando, por conseguinte, uma influência relevante nos resultados finais.

2.2 - Compósito (GFRP)

O tecido de fibra de vidro unidireccional utilizado foi fornecido pela empresa Fyfe. O compósito de GFRP é composto pelo tecido de fibra de vidro e pela resina epoxídica Tyfo[®] S Epoxy.

Foram realizados ensaios de tracção em provetes planos com duas camadas de GFRP. A espessura considerada para cada camada foi de 1,27mm. A velocidade do ensaio de 2 mm/min e os restantes procedimentos dos ensaios foram efectuados de acordo com as normas ASTM D3039/D 3039M.

Os provetes ensaiados têm um comportamento linear elástico até à rotura. No gráfico da Figura 1 representam-se os

valores das tensões e extensões de rotura destes provetes onde se adicionou uma linha de tendência linear representativa de todos os ensaios definida pela Expressão 2 onde f_f a tensão no GFRP e ε_f é a correspondente extensão.

$$f_f = 200,78 \cdot \varepsilon_f \quad (2)$$

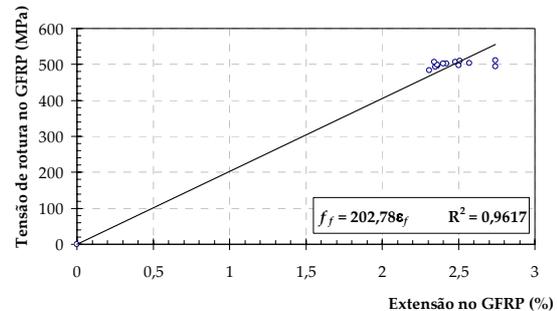


Fig 1 - Gráfico tensão-extensão dos provetes de GFRP

A tensão média de rotura do GFRP foi de 500,19 MPa e a correspondente extensão média foi de 2,46% e o módulo de elasticidade obtido foi de 20,39 GPa.

2.3 - Adesivo

A ligação entre o GFRP e o betão foi garantida pela resina epoxídica tipo Tyfo[®] S Epoxy utilizada na impregnação das fibras de vidro. Na Tabela 2 apresentam-se algumas características mecânicas da resina facultadas pelo fabricante onde σ_r é tensão de rotura à tracção da resina, ε_r é extensão de rotura à tracção da resina e E_r é o módulo de elasticidade da resina.

Tabela 2- Características mecânicas da resina de impregnação

Propriedade	Norma	Valor de teste típico
σ_r	ASTM	72,4 MPa
E_r	D-638	3,18 GPa
ε_r	Type 1	5,0%

3 - ENSAIOS DE FLEXÃO E CORTE

3.1 - Flexão

Os provetes concebidos para ensaiar à flexão são constituídos por dois blocos independentes de betão armado unidos

superiormente por intermédio de um sistema metálico rotulado. Inferiormente foram ligados, externamente, por um reforço de duas camadas de GFRP fabricado por *wet lay up* que, aquando da aplicação de cargas no provete, fica sujeito a tracção transmitida ao betão por aderência ou corte.

Na Figura 2 representa-se o provete tipo dos ensaios realizados cujas dimensões são $620 \times 100 \times 150 \text{ mm}^3$. O GFRP foi colado numa extensão total de 520 mm e com uma largura, de 80 mm. A espessura útil é de 2,54 mm (1,27 mm por camada).

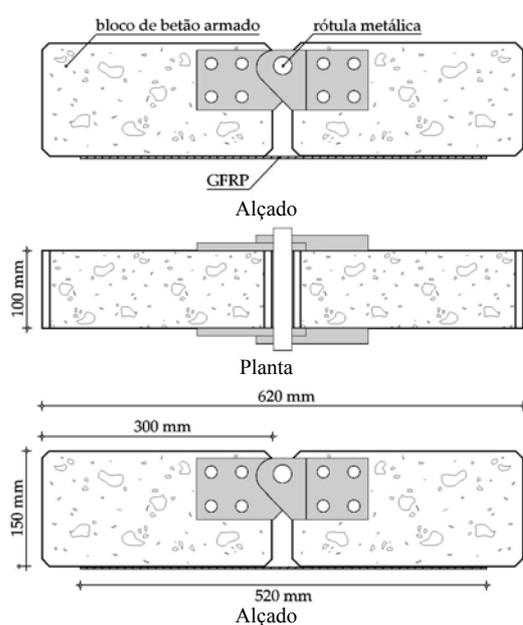


Fig 2- Provete de viga tipo

O comprimento de colagem do GFRP em cada bloco é cerca de 240 mm. Utilizando diversas expressões [Chen e Teng (2001), Seracino (2005), Matthys (2000) e *fib bulletin 14*] para os comprimentos de ancoragem verifica-se que os valores obtidos são superiores ao aplicado nos provetes utilizados neste estudo, pelo que, o comprimento de GFRP utilizado é suficiente para mobilizar a máxima força de ancoragem possível.

A armadura utilizada em cada bloco de betão consistiu em varões longitudinais e estribos com diâmetro de 3 mm de aço A500, estando os estribos espaçados de 5 cm e com um recobrimento de 1 cm.

Adoptou-se uma preparação de superfície por decapagem das vigas por jacto de água e areia por se tratar da metodologia especificada pelo prEN 1766, para o tratamento prévio de superfícies de betão [Ulrik e Ribeiro (2000)].

No sistema de ensaio utilizado (Figura 3) a carga foi aplicada através de um cilindro hidráulico de 200 kN de capacidade. A transmissão da carga ao provete foi realizada através de um dispositivo metálico que permitia carregar o provete simetricamente (Figura 4). A leitura da força aplicada foi registada através de duas células de carga colocadas ao nível dos apoios (Figura 3).

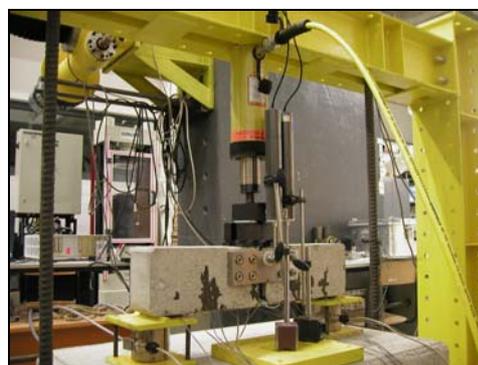


Fig 3- Esquema de ensaio

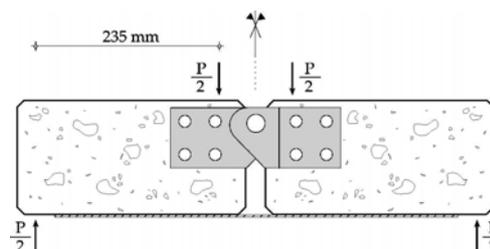


Fig 4 - Transmissão das cargas à viga

Das medições realizadas ao longo do reforço constatou-se que durante o ensaio o pico das tensões de aderência entre o GFRP e o betão começaram por ocorrer na zona central da viga. Verificou-se ainda que para cargas mais próximas da carga de rotura este pico de tensões de aderência tende a distribuir-se ao longo do comprimento de colagem, ficando a distribuição de tensões quase uniforme. Esta característica confirma o descrito no boletim 14 da *fib* para uma ligação entre o betão e o CFRP com uma espessura de 1,2 mm e um

comprimento de colagem de 250 mm x 50 mm de largura. Situação idêntica verificou-se num outro estudo realizado com CFRP em condições semelhantes às estudadas neste trabalho [Marreiros (2005)].

As tensões axiais no GFRP são baixas e simétricas para níveis de carga baixos. À medida que se incrementa a carga vertical as tensões axiais no GFRP também aumentam, só que deixam de ser simétricas. Junto às extremidades de colagem estas tensões não se desenvolvem significativamente com o aumento do carregamento. Esta característica foi igualmente constatada em compósitos de CFRP [Marreiros (2005)].

As tensões de aderência, τ_{ader} , mostram valores positivos ou negativos consoante o desenvolvimento das tensões axiais no compósito de GFRP estejam, respectivamente, a crescer ou a decrescer ao longo do comprimento de colagem. As tensões de aderência negativas no FRP podem ser justificadas pelo aparecimento de fissuras no betão. Quando as tensões axiais no reforço, σ_s , ou forças no reforço, F_s , se mantêm constantes em leituras consecutivas significa que as tensões de aderência tomam um valor nulo, facto que é traduzido pela descolagem localizada do elemento de reforço [Rodrigues (1993)], conforme se pode verificar na Figura 5.

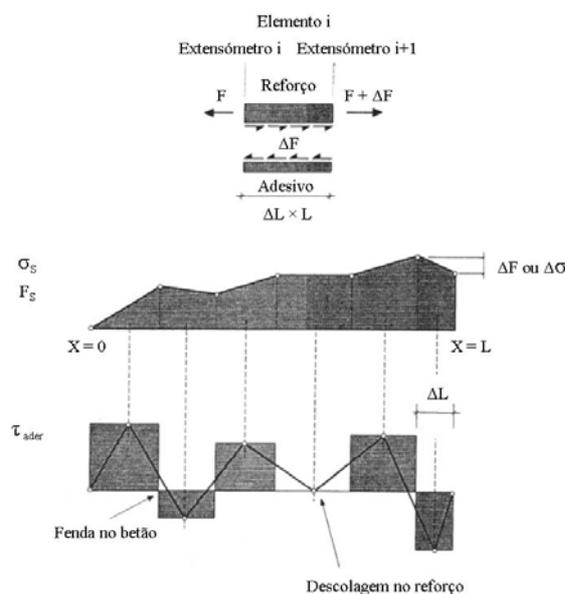


Fig 5 - Tensões de aderência numa ligação entre um reforço e o betão [Rodrigues (1993)]

Dado o comportamento linear do reforço, as tensões de aderência são calculadas a partir da Expressão 3 [Rodrigues (1993)] onde τ_{ader} é a tensão de aderência na fibra, t_f é a espessura da fibra, $\Delta\varepsilon$ é a variação da extensão na fibra entre extensómetros consecutivos e ΔL é a distância entre extensómetros consecutivos.

$$\tau_{ader} = \frac{\Delta\varepsilon \cdot E_f \cdot t_f}{\Delta L} \quad (3)$$

Como se pode observar na Figura 6, os provetes ensaiados atingiram cargas de rotura muito semelhantes, sendo que para o provete GR-REF-1 a carga de rotura foi a mais elevada ($P_{rot} = 29,85$ kN), enquanto o provete GR-REF-4 foi aquele que apresentou a deformação na rotura mais baixa ($\delta_{max} = 3,208$ mm).

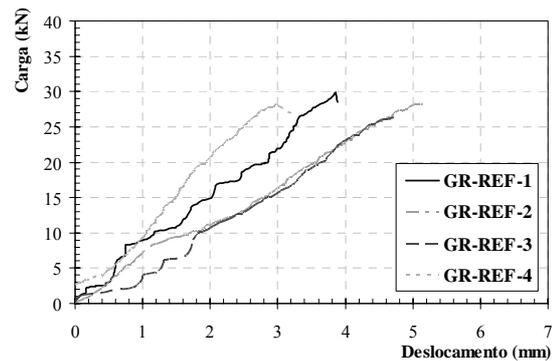


Fig 6 - Gráfico carga-deslocamento dos provetes à flexão

A rotura dos provetes ocorreu por rotura da ligação do GFRP ao betão. As roturas ocorreram por arrancamento do betão de uma forma regular. Verificou-se igualmente o destacamento do betão na zona do bloco por onde se deu o arrancamento, deixando visíveis as armaduras utilizadas (Figura 7).



Fig 7 - Superfícies de rotura dos provetes ensaiados à flexão

3.2 - Ensaios de corte

Por forma a modelar o comportamento não linear da ligação GFRP/betão com o software ATENA 2D foram realizados ensaios de corte para a obtenção dos dados necessários para a modelação computacional. Com efeito, o software utilizado permite modelar uma ligação baseada na teoria de rotura de Mohr-Coulomb, sendo para tal necessário os valores da coesão e do ângulo de atrito interno da ligação GFRP/betão.

Os provetes foram concebidos utilizando cubos de betão de 15 cm de lado, tendo-se colado duas camadas de GFRP com uma largura de 8 cm em duas das faces do cubo com um comprimento de ancoragem médio de 14 cm. Na Figura 8 mostra-se o sistema de ensaio concebido para o ensaio de corte com compressão lateral da ligação GFRP/betão.



Fig 8 - Ensaio de corte com compressão lateral da ligação GFRP/betão

No total, foram realizados quatro ensaios distintos: sem compressão lateral da ligação (ensaio de corte simples) e com compressão lateral, σ_{comp} , da ligação com tensões de 0,5 MPa, 1,0 MPa e 2,0 MPa. Obtiveram-se assim os valores de 2,8 MPa para a coesão, c , (ensaio de corte simples) e de 62° para o ângulo de atrito interno da ligação, φ . O ângulo de atrito interno da ligação foi obtido a partir da Expressão 4 [Cervenka (2006)].

$$\tau = c + \varphi \cdot \sigma \quad (4)$$

No gráfico da Figura 9 mostram-se as curvas força-deslocamento correspondentes aos ensaios de corte com e sem compressão lateral da ligação GFRP/betão.

Na Tabela 3 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos nos ensaios de corte.

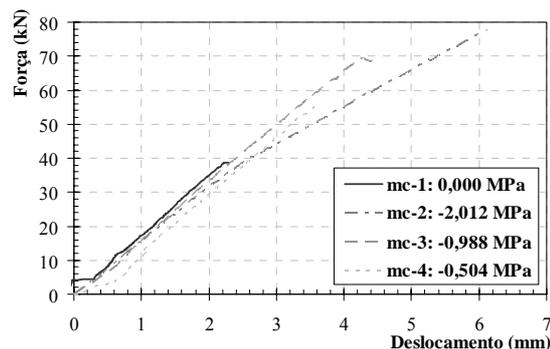


Fig 9 - Gráfico força-deslocamento dos ensaios de corte com e sem compressão lateral da ligação GFRP/betão

Tabela 3 - Características da ligação GFRP/betão

Ensaio	F_{max}	σ_{comp}	τ_{ader}	φ	δ_{max}
	kN	MPa	MPa	-	mm
mc-1	38,8	0	2,80	0	2,25
mc-2	77,6	2,01	5,20	1,28	6,11
mc-3	70,0	0,99	4,69	2,04	4,49
mc-4	55,2	0,50	3,69	2,24	3,56

4 - MODELAÇÃO NUMÉRICA

No modelo numérico considerou-se a geometria dos provetes, as dimensões e a área de ancoragem do GFRP iguais às dos provetes ensaiados. As propriedades dos materiais, foram consideradas através das leis constitutivas baseadas em resultados dos ensaios experimentais.

A modelação do comportamento dos provetes foi realizada através de uma análise plana não linear utilizando o software comercial desenvolvido na Universidade de Praga (ATENA 2D).

Apesar da simetria dos provetes ensaiados à flexão, considerou-se no modelo numérico todo o provete pelo facto das armaduras não terem ficado com uma disposição perfeitamente simétrica. A malha de elementos finitos foi gerada automaticamente com elementos finitos triangulares e rectangulares com cerca de 10 mm de lado refinando-se esta malha junto à ligação GFRP/betão com elementos finitos de 2 mm de lado. O carre-

gamento foi simulado por incrementos constantes de deformação vertical de 0,02 mm, aplicados aos pontos de aplicação das cargas de acordo com os ensaios experimentais e representam a aplicação da carga de modo estático. Um critério similar foi também adoptado para a simulação dos ensaios de corte.

Na Figura 10 apresenta-se a malha de elementos finitos considerada para ambos os tipos de ensaios realizados.

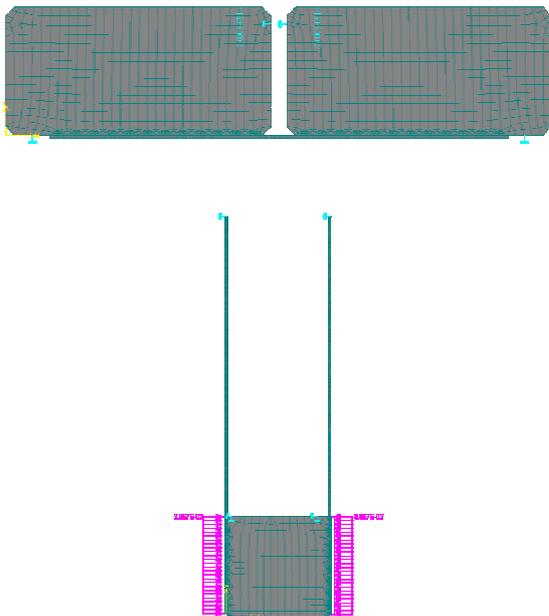


Fig 10 - Malha de elementos finitos dos modelos numéricos à flexão (em cima) e de corte (em baixo)

4.1 - Apresentação de resultados

Os resultados que se obtêm no ATENA 2D derivam da aplicação do método de Newton-Raphson fazendo iterações sucessivas, passo a passo, por incrementos de deslocamento, na solução das equações não lineares [Cervenka (2006)].

Mostra-se na Figura 11 a deformada dos modelos de ensaio à flexão e ao corte aumentada 5 vezes bem como a respectiva fendilhação no betão. A força total aplicada no modelo à flexão corresponde a 26,8 kN, sendo 13,4 kN por cada bloco de betão à distância de 50 mm do eixo central do modelo. No caso do modelo de corte, a força máxima corresponde a 55,1 kN sendo de 27,55 kN por cada ligação ao cubo de betão.

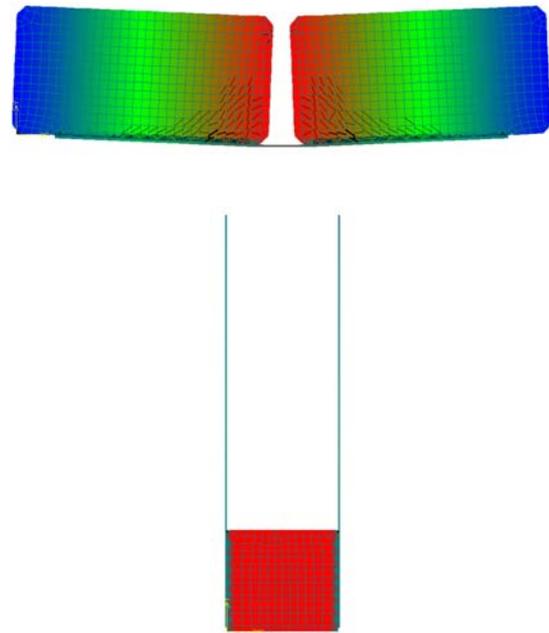


Fig 11 - Deformada dos modelos numéricos à flexão (em cima) e de corte (em baixo) aumentada em 5 vezes

4.1.1 - Modelo à flexão

Do estudo paramétrico dos provetes à flexão constata-se, relativamente às tensões principais, que:

i. no betão, as compressões máximas ocorrem junto à rótula metálica tendo-se atingido uma tensão de 24,9 MPa (inferior à tensão de rotura à compressão do betão);

ii. no GFRP, a tensão máxima foi de 130,8 MPa (inferior à tensão de rotura do GFRP) na zona livre do reforço pelo que, a rotura não se deu pelo reforço;

iii. na resina, a tensão máxima no modelo nunca atingiu a tensão de rotura da resina de 72,4 MPa pelo que, a rotura não se deu pela resina.

4.1.2 - Modelos de corte

Dos ensaios experimentais de corte realizados obtiveram-se as curvas força-deslocamento que se apresentam no gráfico da Figura 9. Da análise deste gráfico pode constatar-se que a rigidez da ligação GFRP/betão teve um comportamento praticamente linear exceptuando o ensaio do provete com tensão de compressão de 2,0 MPa.

A resposta máxima neste provete foi de 77,6 kN. Contudo, admitindo uma resposta

linear, o valor espectável seria aproximadamente de 100 kN, atendendo a que incrementos na tensão de compressão, σ_{comp} , de 0,5 MPa correspondiam a incrementos de força máxima, F_{max} , de 15 kN. O facto deste valor não ter sido atingido pode ter ficado a dever-se ao ligeiro aumento na tensão de compressão registado pelas células de carga numa fase mais avançada do ensaio. Aliás, o varão de aço roscado responsável pela compressão da ligação não foi ensaiado pelo que se julga que possa ter entrado em cedência e tenha aliviado a deformação imediatamente antes da rotura provocando a rotura prematura da ligação (ver Figuras 9 e 12).

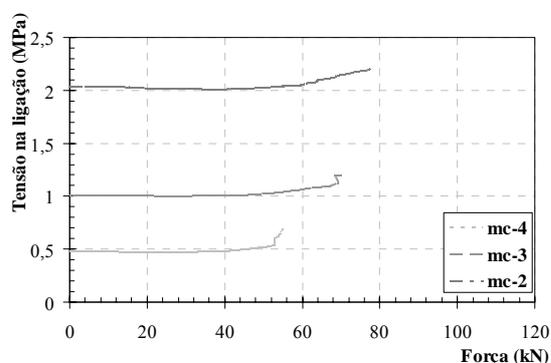


Fig 12 - Gráfico força-tensão de compressão na ligação dos provetes ensaiados ao corte

4.2 - Comparação dos resultados com os ensaios experimentais

4.2.1 - Modelo à flexão

Com a análise computacional constatou-se que, em termos médios, os resultados obtidos foram bastante razoáveis com excepção do valor da tensão de aderência máxima com um erro de 33,93% e para o deslocamento vertical a meio vão com um erro de 80% como se pode ver pela Tabela 4.

O andamento do ensaio representado por um gráfico carga-deslocamento (ver Figura 13) mostra deslocamentos bastante menores do que os medidos experimentalmente, apresentando também um andamento diferente no que diz respeito à linearidade das curvas. Admite-se que as medições feitas no ensaio incluíam deslocamentos devidos a

Tabela 4 - Comparação entre os valores médios obtidos experimentalmente e os valores obtidos pelo ATENA 2D

Valor médio experimental	ATENA 2D	Erro cometido
Carga na rotura (kN)		
28,14	26,79	5,06%
Deslocamento na rotura (mm)		
4,30	2,39	79,95%
Força no GFRP (kN)		
25,39	24,37	4,18%
Tensões de aderência máx. (MPa)		
3,71	2,77	33,93%
Extensões máx. (%)		
0,597	0,588	1,53%
Tensões normais máx. (MPa)		
121,75	119,95	1,50%

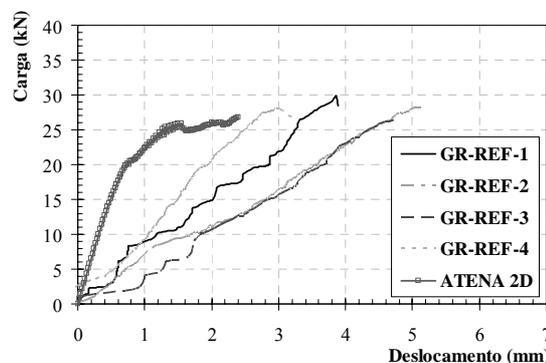


Fig 13 - Gráfico carga-deslocamento do modelo numérico à flexão relativamente ao obtido experimentalmente

pequenas rotações nos apoios e a rectificação de curvatura no GFRP na zona livre do provete, aspectos não esperados à priori e que podem ter introduzido deslocamentos não atribuíveis ao comportamento modelado.

4.2.2 - Modelo de corte

Com a análise realizada através do ATENA 2D chegaram-se a valores satisfatórios. Dada a grande proximidade entre os resultados obtidos experimentalmente e computacionalmente, apresentam-se os gráficos força-deslocamento em figuras distintas (ver Figuras 14 a 17) para melhor compreensão dos resultados finais.

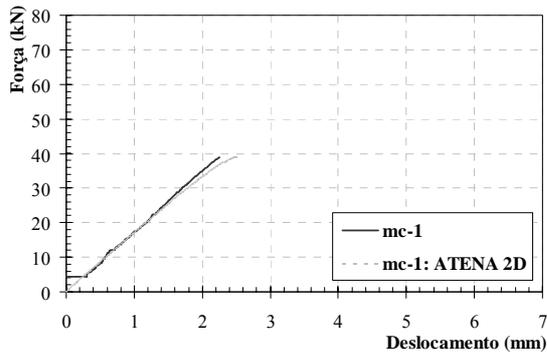


Fig 14 - Gráfico força-deslocamento do modelo numérico ao corte mc-1 relativamente ao obtido experimentalmente

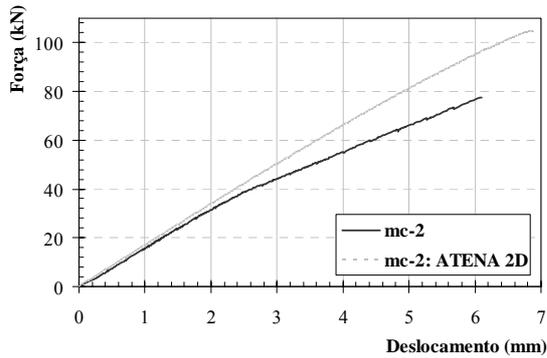


Fig 15 - Gráfico força-deslocamento do modelo numérico ao corte mc-2 relativamente ao obtido experimentalmente

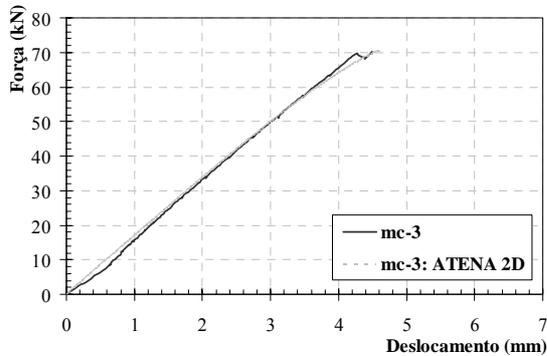


Fig 16 - Gráfico força-deslocamento do modelo numérico ao corte mc-3 relativamente ao obtido experimentalmente

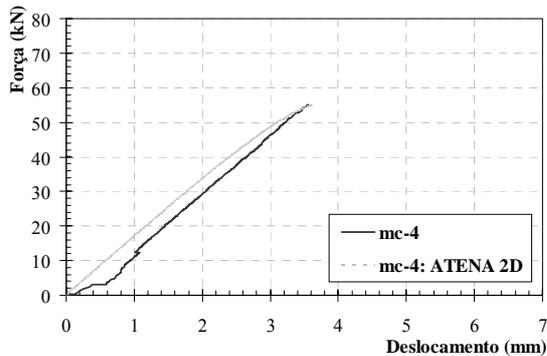


Fig 17 - Gráfico força-deslocamento do modelo numérico ao corte mc-4 relativamente ao obtido experimentalmente

Na Figura 18 apresentam-se os gráficos das curvas força-tensão na ligação dos diferentes ensaios experimentais associados ao andamento verificado na análise paramétrica. Constata-se da análise deste gráfico que os desenvolvimentos das tensões de compressão na ligação são mais dispersos por vários motivos: i. no ensaio mc-2 pelas razões apresentadas em 4.1.2; ii. no ensaio mc-3 por se ter considerado, à semelhança do ensaio mc-4, os resultados de apenas um elemento finito junto à ligação sensivelmente a meio do comprimento de ancoragem do GFRP.

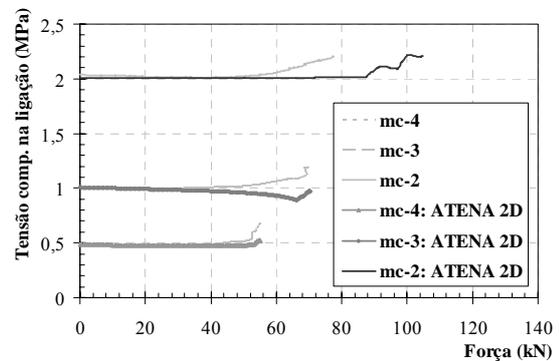


Fig 18 - Gráfico força-tensão na ligação do modelo numérico ao corte relativamente ao obtido experimentalmente

Tabela 5 - Comparação entre os valores médios obtidos experimentalmente e os valores obtidos pelo ATENA 2D

Ensaio	Valor médio experimental	ATENA 2D	Erro cometido
Força máxima na ligação (kN)			
mc-1	19,40	19,47	0,37%
mc-2	38,82	52,40	34,99%
mc-3	35,04	35,09	0,02%
mc-4	27,56	27,53	0,10%
Deslocamento máximo (mm)			
mc-1	2,25	2,52	12,10%
mc-2	6,11	6,88	12,70%
mc-3	4,49	4,60	2,57%
mc-4	3,56	3,68	3,39%
Extensão máxima no GFRP (%)			
mc-1*	-	-	-
mc-2	0,85	1,28	33,59%
mc-3	0,76	0,86	11,60%
mc-4	0,63	0,68	8,04%

* Não houve leitura de extensómetros.

Na Tabela 5 comparam-se os valores obtidos para os dois tipos de análise efectuados. Da comparação dos resultados, observa-se que, uma vez mais, o modelo mc-2 foi aquele que se afastou mais do ensaio experimental. A força máxima na ligação revelou ser um parâmetro com uma precisão excepcional tendo-se atingido um erro mínimo de 0,02% no modelo mc-3. Este modelo foi aquele que evidenciou também menor erro no deslocamento máximo (2,57%). No modelo mc-4, obteve-se o menor erro para a extensão máxima no GFRP que foi de 8,04%.

5 - CONCLUSÕES

A modelação da ligação através do ATENA 2D utilizando um elemento de interface com base na teoria de Mohr-Coulomb foi possível com recurso aos ensaios de corte aqui propostos e descritos em que se obtiveram os valores da coesão e do ângulo de atrito interno da ligação GFRP/betão. Foi com base nestes valores que a modelação da ligação GFRP/betão se revelou aceitável quer ao nível do ensaio das vigas à flexão quer ao nível dos ensaios de corte.

A modelação dos ensaios de corte revelou ser mais precisa do que a modelação dos ensaios à flexão especialmente o valor da carga máxima (com excepção ao modelo mc-2). Ao nível das extensões no GFRP os erros obtidos das modelações variaram entre os 1,5% e os 11,6% (uma vez mais, excepção feita ao modelo mc-2).

Os deslocamentos medidos a meio-vão revelaram que o sistema de ensaio adoptado poderá não ter sido o mais indicado já que, na modelação, as deformações obtidas apresentaram uma grande divergência com o resultado obtido pelo ATENA 2D.

As tensões de aderência máxima na ligação GFRP/betão obtidas por via experimental (recorrendo à metodologia referida na sub-secção 3.1) revelaram alguma desigualdade com os obtidos por via computacional apesar de se ter constatado uma razoável semelhança qualitativa do desenvolvimento das tensões

de aderência ao longo do comprimento de ancoragem.

No modelo das vigas à flexão, as tensões de rotura do GFRP ou da resina nunca foram atingidas no momento da rotura pelo que, se conclui que a rotura tenha sido pelo betão onde apareceram fissuras com a mesma direcção verificada durante os ensaios experimentais. O mesmo se verificou para os modelos de corte sendo que, a fissuração foi menos evidenciada quer em termos experimentais quer por via da modelação no ATENA 2D.

Face ao exposto, parece adequado, para estes materiais, usar-se na modelação da ligação GFRP/betão em ambiente laboratorial, uma coesão de 2,8 MPa e um ângulo de atrito de 62°.

Está prevista a realização de mais ensaios para avaliar a durabilidade de uma ligação deste tipo que permita a compreensão da evolução dos fenómenos envolvidos numa possível variação quer da coesão quer do ângulo de atrito em função da degradação imposta à ligação.

REFERÊNCIAS

- Pham, H.B.; Al-Mahaidi, R. e Saouma, V.: *“Modelling of CFRP-concrete bond using smeared and discrete cracks”*, Composite Structures, 2006
- Sena Cruz, J.M.; Barros, J.A.O.; Gettu, R. e Azevedo, A.F.M.: *“Bond behaviour of near-surface mounted CFRP laminate strips under monotonic and cyclic loading”*, Journal of Composite for Construction, ASCE, 2006, pp. 296-303
- Camata, G.; Spacone, E. e Zarnic, R.: *“Experimental and nonlinear finite element studies of RC beams strengthened with FRP plates”*, Composites Part B: engineering, 2006
- Neale, K.W.; Ebead, U.A.; Abdel Maky, H.M.; Elsayed, W.E. e Godat, A.: *“Modelling of debonding phenomena in FRP-strengthened concrete beams and slabs”*, International Institute for FRP in Construction, 2005
- Biscaia, H.E.C.: *“Rotura por perda de aderência entre reforços poliméricos com fibras de vidro e elementos estruturais de betão”*, Dissertação para obtenção do grau

- de Mestre, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2006
- Eurocode 2 (EC2), “Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings”, EN 1992-1-1, December 2004
- Teng, J.G.; Chen, J.F.; Smith, S.T. e Lam, L.: “FRP strengthened RC structures”, John Wiley and Sons Ltd. Chichester, England, 2001
- Seracino, R.; Rashid, R.S.M. e Oehlers, D.J.: “Generic IC debonding resistances of EB and NSM plates”, Journal of Composites for Construction, ASCE, 2005
- Matthys, S.: “Structural behaviour and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement”. Thesis in Fulfilment of the requirements for the Degree of Doctor of Applied Sciences, option Structural Engineering, Ghent University, Faculty of Applied Sciences Department of Structural Engineering, Academic year 1999-2000
- fib bulletin 14, “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures”, Technical Report, 2001
- FYFE Co. LLC: “Tyfo® SEH-51 composite using Tyfo® S Epoxy”, Maio de 2002
- Ulrik, E. e Ribeiro, S.: “Aderência entre compósitos reforçados com fibras de carbono e o betão”, 2000, pp. 705-712
- Marreiros, R.: “Degradação da aderência entre CFRP e betão armado devida a envelhecimento acelerado”, Dissertação para obtenção do grau de Mestre, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2005
- Rodrigues, C. C.: “Comportamento da ligação aço-resina-betão em elementos estruturais”, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 1993
- Cervenka, V.; Jendele, L. e Cervenka, J.: “ATENA - Program documentation, Part 1: Theory”, Setembro de 2006