

MODELAÇÃO DE REFORÇO POR CFRP DE VIGAS DE BETÃO ARMADO

Rui Marreiros^{1*}, Zuzana Dimitrovová², Manuel A. G. Silva³

UNIC, Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa
2829 516 Caparica

web: <http://www.dec.fct.unl.pt/UNIC/>

e-mail: ¹ rpcm@fct.unl.pt, ² zdim@fct.unl.pt, ³ mgs@fct.unl.pt

Palavras-chave: reparação de betão armado, reforço por CFRP, interface betão-compósito, efeitos de humidade, efeitos de nevoeiro salino, simulação numérica

Resumo. *Provetes compostos por duas vigas de betão armado ligadas por rótula metálica na zona superior e por uma faixa compósita de CFRP colada na zona inferior foram ensaiados à flexão em quatro pontos, em programa dirigido à avaliação dos efeitos de envelhecimento acelerado, por ciclos de humidade e de nevoeiro salino, na aderência entre compósito e betão. Reportam-se resultados obtidos para vários patamares de carga até à rotura e para diferentes envelhecimentos. Um modelo computacional parametrizado foi desenvolvido para representar o comportamento dos provetes para características de resistência mecânica fixadas, ilustrando-se para o caso de provetes de referência.*

1. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos no reforço de estruturas de betão armado tem sido uma opção cada vez mais utilizada. Com a crescente utilização evidencia-se a necessidade de aprofundar investigações sobre temas como ruínas prematuras devido à perda da acção do compósito e durabilidade destas soluções sob a acção de agentes ambientais, apesar das várias publicações disponíveis sobre estes tópicos.

Um problema com consequências na resistência mecânica do elemento reforçado e na durabilidade é o do processo e condições de cura das resinas. A exposição a humidades relativas elevadas juntamente com temperaturas baixas tem um efeito negativo na cura, prejudicando a resposta a nível da aderência entre o betão e o compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras de carbono (CFRP) [1]. Humidades relativas elevadas ou temperaturas elevadas também prejudicam a aderência [2] enquanto a presença de pequenas quantidades de água, por exemplo água presente nos poros do betão, na mistura da resina com

o endurecedor pode ser benéfica na cura [3]. Os materiais compósitos são susceptíveis de se degradarem devido a diversos factores ambientais e.g. temperaturas ambiente elevadas, radiação ultravioleta (UV), humidade relativa elevada, ambiente marítimo e há referências a estes aspectos na literatura [4,5,6,7] ainda que a interpretação das causas e modelação matemática satisfatória sejam inexistentes.

As altas temperaturas degradam a ligação entre o betão e o CFRP, sendo que o problema começa por estar relacionado com o facto de os diversos materiais envolvidos (betão, resina e compósito) terem coeficientes de dilatação térmica de diferentes ordens de grandeza. As altas temperaturas provocam ainda a aceleração de reacções químicas. A humidade relativa provoca degradação física e química nas resinas. Na degradação física destacam-se os efeitos plastificante e de aumento de volume. Na degradação química destaca-se a hidrólise e a lixiviação [8]. A absorção de água provoca ainda uma diminuição na temperatura de transição vítrea, facto negativo no intervalo de temperaturas de operação das estruturas de engenharia civil. A exposição a ambientes marítimos é também causa de atenção especial, devido à presença de sais e de humidades relativas muito elevadas. Destaca-se ainda o facto de estes ambientes degradarem a adesão entre o betão e o adesivo [9,10].

O próprio betão armado também se degrada na presença de certos agentes ambientais pelo que o estudo tem que envolver diversos materiais e factores em simultâneo.

Neste texto aborda-se o problema dos efeitos da exposição de vigas reforçadas com CFRP a ciclos de humidade e de nevoeiro salino e faz-se um estudo preliminar de modelo computacional da aderência do compósito ao betão armado.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi desenvolvido com o objectivo de se avaliar a severidade da acção de ciclos de humidade relativa e de nevoeiro salino sobre a aderência entre o betão armado e o CFRP.

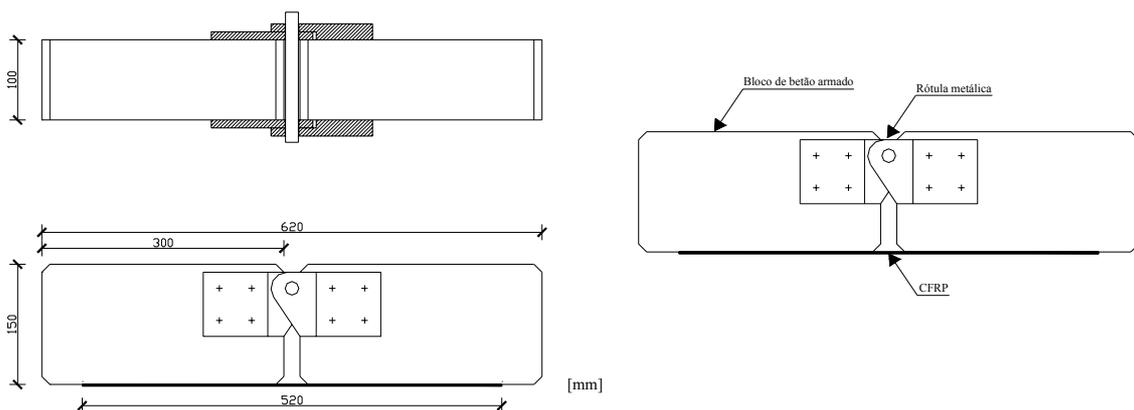


Figura 1. Modelo de viga tipo.

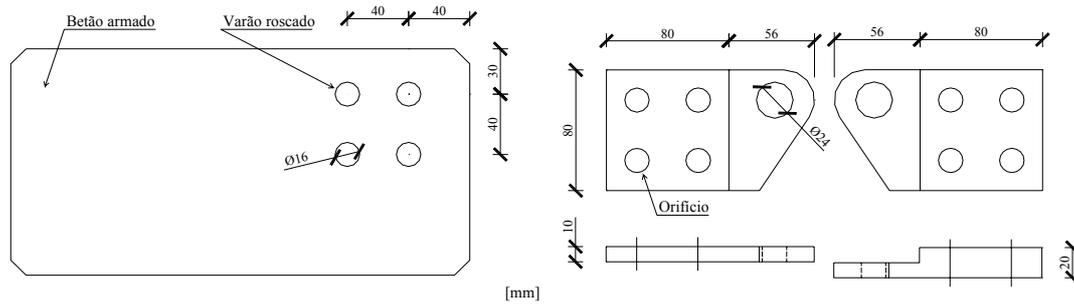


Figura 2. Pormenor da rótula metálica.

Os modelos físicos utilizados para avaliar a aderência entre o betão armado e o CFRP estão desenhados na Figura 1 e são constituídos por dois blocos de betão armado ligados superiormente por uma rótula metálica (Fig. 2) e inferiormente por CFRP. Os provetes foram dimensionados por forma a que a rotura ocorra na ligação entre o betão e o CFRP e não por rotura de tracção do compósito. As dimensões dos modelos foram condicionadas pelas dimensões das câmaras de envelhecimento.

Foi escolhido o ensaio de flexão em 4 pontos para caracterizar a resistência à flexão (Fig. 3).

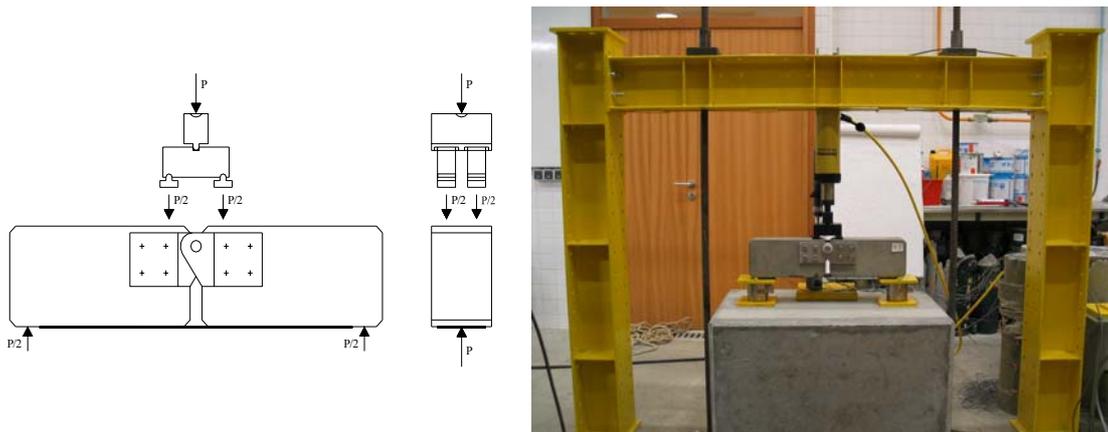


Figura 3. Sistema de ensaio.

Aos 28 dias foram ensaiados oito cubos de 150mm de lado à compressão e três cilindros de 150mm de diâmetro e 300mm de altura por compressão diametral para avaliar a resistência à tracção. Obtiveram-se $f_{cm}=26.1\text{MPa}$ e $f_{ctm}=2.1\text{MPa}$.

O compósito de fibras de carbono utilizado foi constituído por tecidos unidireccionais de fibras de carbono MBrace C1-30 e por resina epoxídica MBrace Saturante e fabricado no local. Foram realizados ensaios mecânicos de tracção em provetes de $25 \times 250\text{mm}^2$. O compósito apresentou a tensão de rotura média de $\sigma_{fm}=3937\text{MPa}$, a extensão na rotura de $\epsilon_{fm}=1.54\%$ e o módulo de Young de 241GPa.

Para recolha de informação no decorrer dos ensaios foram usadas células de carga (Fig.3), deflectómetros para medir a flecha a meio vão e extensómetros colados ao longo do CFRP

que permitiram avaliar a evolução espacial das extensões para diferentes níveis de carga. O programa de envelhecimento acelerado foi definido em câmaras climáticas para avaliar a severidade de ciclos de humidade relativa e de nevoeiro salino na ligação entre o betão armado e o CFRP. Os ciclos de humidade relativa a que se sujeitaram os modelos foram de 12 horas a 20% seguidas de 12 horas a 90% de humidade relativa, sempre a uma temperatura constante de 40°C. A câmara onde foi efectuado esse envelhecimento pode ser observada na Figura 4. Os ciclos de nevoeiro salino foram de 8 horas sob nevoeiro seguidas de 16 sem nevoeiro, sempre a uma temperatura constante de 35°C. A salinidade utilizada foi de 5% de NaCl. A câmara onde foram efectuados os envelhecimentos pode ser observada na Figura 5.



Figura 4. Câmara climática.



Figura 5. Câmara de nevoeiro salino.

Os patamares de envelhecimento que foram escolhidos para a realização dos ensaios mecânicos situam-se nas 0, 3000, 6000 e 10000 horas. Foram ensaiados 3 modelos sem envelhecimento para servirem de referência e depois 2 por patamar de envelhecimento.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os gráficos força-deslocamento, e.g. Figura 6, são compostos por três regiões distintas: o gráfico apresentado é linear até cerca dos 15kN, irregular em transição entre os 15kN e os 25kN, onde ocorre o aparecimento de fissuras e descolamentos localizados, e um terceiro trecho linear até à rotura [10]. Na Tabela 1 mostram-se as cargas de rotura de todos os modelos, onde se pode observar, comparando modelos envelhecidos com modelos de referência, que existem perdas nas cargas últimas para qualquer tipo de envelhecimento, chegando estas a atingir os 20%. Na Figura 7 pode-se observar a variação das cargas de rotura. Verifica-se para ambos os envelhecimentos uma perda inicial na carga seguida de recuperação e uma considerável dispersão de valores entre ensaios sujeitos ao mesmo envelhecimento, chegando a verificar-se diferenças de 8/9kN nos modelos envelhecidos durante 10000 horas.

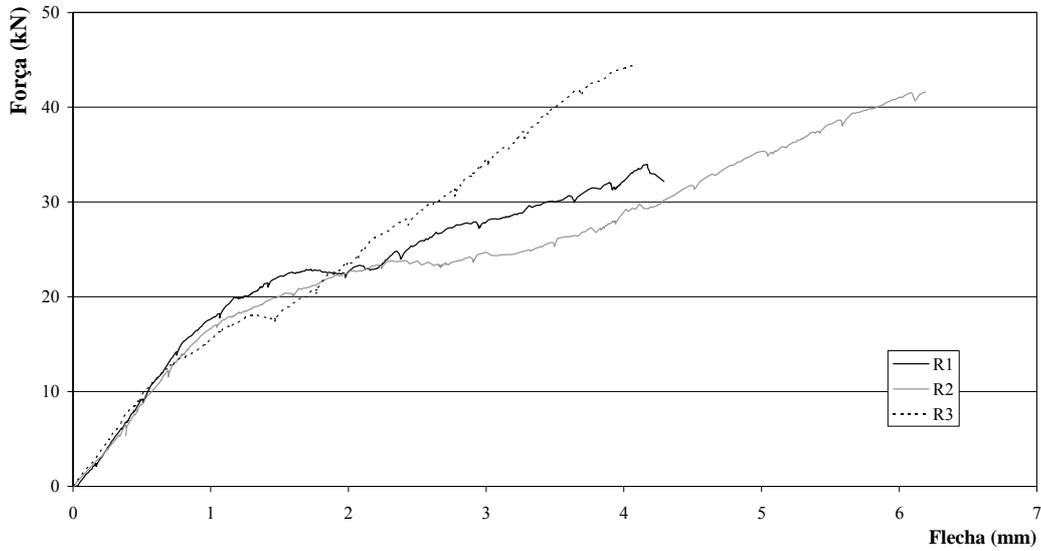


Figura 6. Gráficos força-deslocamento dos modelos de referência.

		Carga máxima (kN)	Média (kN)	Perdas (%)
Referência	R1	34,0	40,0	
	R2	41,6		
	R3	44,4		
3000H	Humidade1	31,9	31,8	20,5
	Humidade2	31,7		
	NS1	41,7	37,6	6,0
	NS2	33,4		
6000H	Humidade3	31,0	33,1	17,2
	Humidade4	35,2		
	NS3	29,2	32,2	19,4
	NS4	35,2		
10000H	Humidade5	42,7	38,8	2,9
	Humidade6	34,9		
	NS5	32,2	36,7	8,3
	NS6	41,1		

Tabela 1. Cargas de rotura e perdas.

A observação das superfícies de rotura mostra uma clara distinção entre os modelos sujeitos a diferentes exposições. No caso das superfícies de rotura dos modelos sujeitos a ciclos de humidade, a superfície de rotura é semelhante à observada nos modelos de referência, ou seja, a rotura ocorreu na ligação entre o betão e o CFRP devido à rotura do betão (Fig. 8). No caso dos modelos sujeitos a ciclos de nevoeiro salino, a superfície de rotura alterou-se claramente,

a rotura também ocorreu na ligação entre o betão e o CFRP, mas ocorreu de forma adesiva na interface entre o betão e o adesivo (Fig. 8).

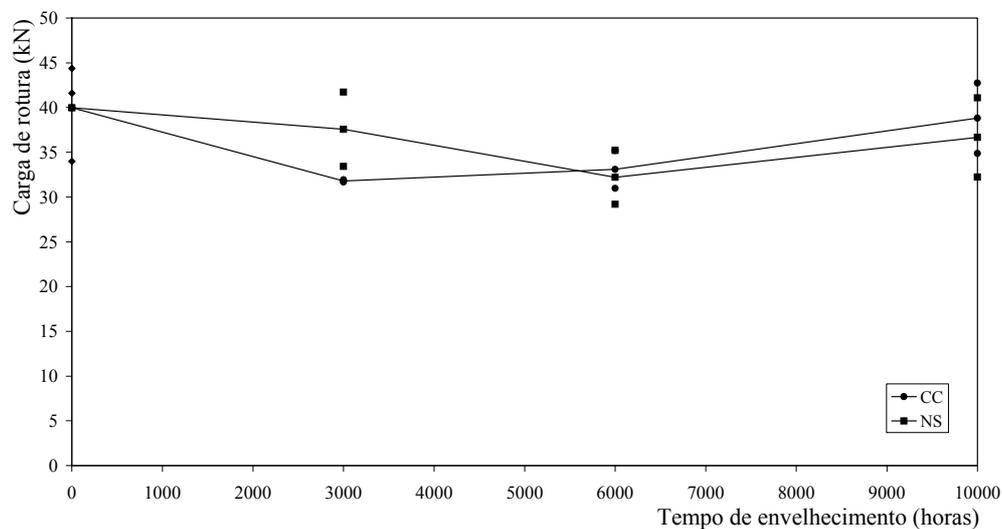


Figura 7. Evolução das cargas de rotura com as horas de envelhecimento.



Figura 8. Superfícies de rotura.

3.1. Tensões axiais e tensões de aderência

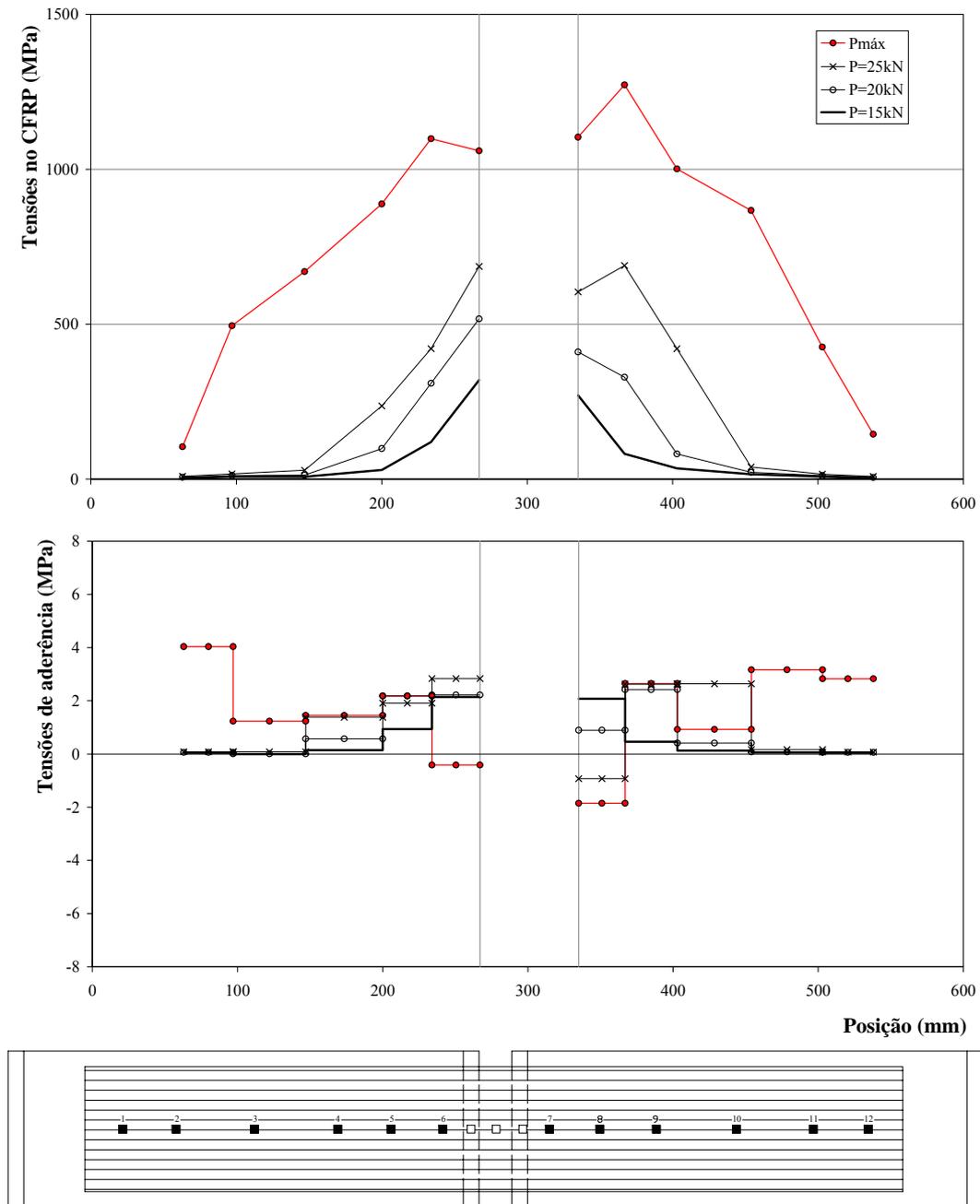


Figura 9. Diagramas tensões axiais no CFRP e tensões de aderência na ligação entre o betão e o CFRP do modelo R2.

A distribuição de tensões ao longo do CFRP assemelha-se à observada na literatura em ensaios de corte [11], ou seja, para cargas baixas as tensões concentram-se essencialmente

junto ao meio vão, indo aumentando ao longo do restante comprimento do CFRP à medida que a carga cresce. Este comportamento pode ser observado na Figura 9, onde se coloca de forma esquemática um desenho com a posição dos extensómetros alinhados com os pontos no diagrama de tensões axiais. Os diagramas dos restantes modelos podem ser consultados em [10].

As distribuições das tensões de aderência diferem entre modelos sujeitos a envelhecimentos diferentes. No caso dos modelos sujeitos a ciclos de nevoeiro salino, comparando com os modelos de referência, observou-se uma maior concentração de tensões de aderência para cargas elevadas, o que significa que se mobiliza um menor comprimento de colagem, embora as tensões observadas sejam de maior ordem de grandeza (Fig. 10). No caso dos modelos sujeitos a ciclos de humidade, comparando com os modelos de referência, pode-se concluir que existe uma mobilização parecida, ou seja, todo o comprimento de colagem é mobilizado para cargas elevadas (Fig. 11).

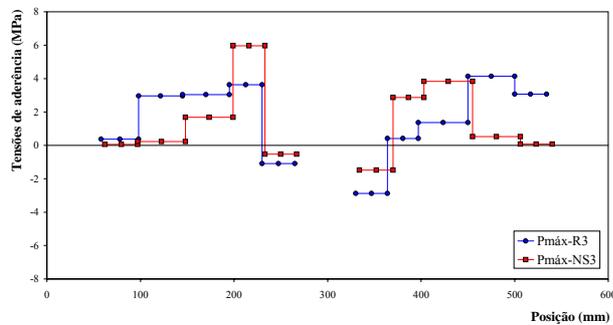


Figura 10. Comparação de τ_{ader} R3-NS3.

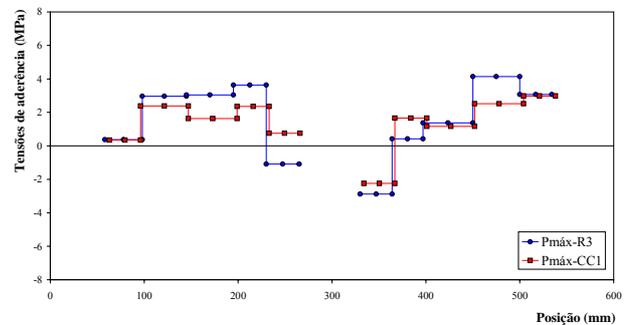


Figura 11. Comparação de τ_{ader} R3-CC1.

4. ANÁLISE NUMÉRICA

4.1. Concepção do modelo

A modelação numérica exige o conhecimento da geometria e do comportamento mecânico dos materiais que constituem o provete, dos modos de falha possíveis e das ligações entre os componentes. A dificuldade da simulação numérica resulta de que a ruína completa do provete é consequência de acumulação de dano que se inicia para cargas bastante baixas. Consequentemente é impossível representar correctamente a ruína global do provete por análise linear.

A falha dos modelos físicos ensaiados viu-se que esteve directamente ligada à degradação da aderência entre o compósito e o betão, conduzindo à separação completa entre parte da placa e o betão. A acumulação de dano nessa região de pequena espessura conduz a separação súbita e frágil, [12], [13]. Em geral, essa separação resulta ou de (i) falha adesiva em que a placa compósita surge limpa e lisa depois da separação, ou de (ii) fractura progressiva em que a placa compósita se separa com pedaços de betão aderentes. O segundo mecanismo resulta

de micro-fracturas na camada de betão adjacente.

A rotura das fibras do carbono é de excluir pelo modo como o provete foi pré-dimensionado e não é de considerar nos casos correntes. Admite-se que não há escorregamento entre a armadura de aço e o betão e que as tensões na armadura não atingem o limite de cedência. Face ao exposto, as únicas não-linearidades consideradas na modelação da ruína global do provete referem-se ao adesivo e à camada adjacente de betão. A modelação da rugosidade da superfície do betão não foi introduzida na modelação feita. A espessura do adesivo é variável, usou-se o valor sugerido pela experiência de investigadores consultados e estudou-se ainda sensibilidade dos resultados nele.

O provete analisado em [13] é comparável ao deste trabalho e não mostrou falhas adesivas, sendo certo que não foi sujeito a envelhecimento acelerado, sendo que falhas adesivas ocorreram nos provetes sujeitos ao nevoeiro salino o que poderia ser resultado de degradação do adesivo como mencionado em [12]. No entanto as cargas máximas não se mostraram significativamente inferiores às outras e como a camada superficial de betão pode ter beneficiado com o envelhecimento, não se dispõe de dados suficientes para ser conclusivo.

Examinam-se, a seguir, os modelos de elementos finitos. Além dos elementos sólidos de betão, que estão bem definidos, existem opções na modelação dos outros componentes. O modelo paramétrico em princípio inclui todas as combinações da modelação de armadura e da placa compósita, por razões de comparação e duma posterior escolha da modelação mais adequada. O adesivo pode ser modelado com elementos sólidos, elementos de ligação ou elementos de molas bi- ou tri-direccionais. Não está excluída a opção de incluir o adesivo como uma das camadas do elemento de casca multicamada. As espessuras dos materiais diferentes na zona de falha são muito pequenas, o que implica criação duma malha muito fina no caso dos elementos sólidos. Especialmente os elementos planos de 4 nós, quando muito alongados, poderão distorcer o comportamento real. O ponto crucial na fractura progressiva é o comportamento do betão. Neste caso consideraram-se duas possibilidades, quer a inclusão das microfissuras e fracturas de maneira discreta ou “smeared” (como em [12]) quer a degradação progressiva do comportamento pela utilização dum modelo de “damage” (como em [13]).

As não-linearidades na falha adesiva são incluídas nos elementos de ligação, de molas ou de sólidos. No caso dos elementos sólidos, pode-se assumir o comportamento de elasticidade linear com plasticidade quase perfeita. Neste caso a rotura pode ser expressa em valores de máxima deformação plástica equivalente, de máxima distorção ou de máximo “slip”, que representa diferença entre os deslocamentos na face inferior e superior do adesivo, ou seja implementar um modelo de “bond-slip”. Em princípio os modelos de “bond-slip” incluem no seus parâmetros os efeitos de microfrissuração no betão e não é preciso neste caso incluir a fracturação no modelo constitutivo do betão.

4.2. Estágio de comportamento fisicamente linear

Os resultados experimentais para cargas baixas foram verificados por modelo linear simples tendo sido escolhida a opção bidimensional de tensão plana e todos os componentes com modelação de elementos sólidos planos quadrilaterais. A armadura foi implementada em duas

maneiras: as partes verticais como sobreposição dos elementos de barra nos elementos de betão e as partes horizontais na forma real. Apenas metade do provete foi introduzido devido à simetria. A carga aplicada foi distribuída aos dois elementos adjacentes, para elimina os efeitos de concentração das cargas analiticamente pontuais.

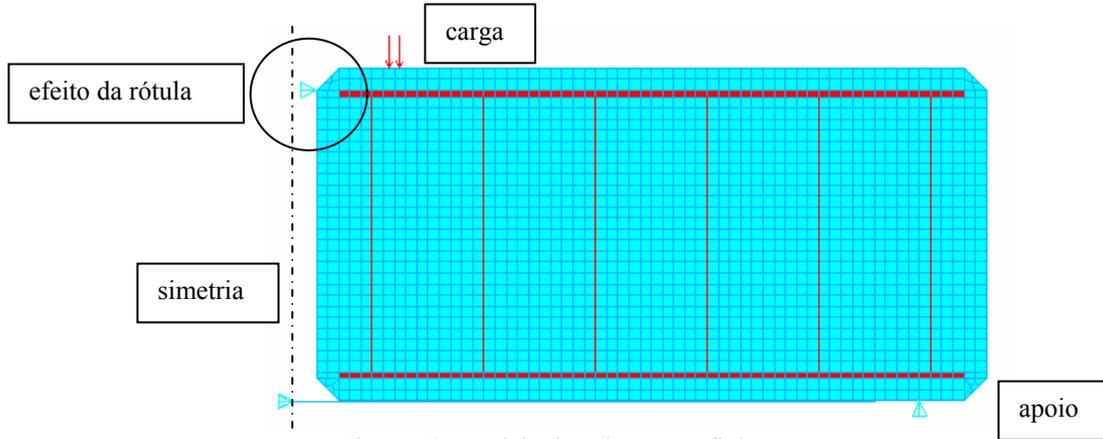


Figura 12. Modelo dos elementos finitos.

Betão (norma EC2)	Armadura (matweb)	Adesivo (fabricante)	CFRP (fabricante)
E=29,3 GPa, $\nu=0,2$	E=201,6 GPa, $\nu=0,26$	E=3034 MPa, $\nu=0,3$	E=240 GPa, $\nu=0,3$

Tabela 2. Propriedades elásticas dos componentes.

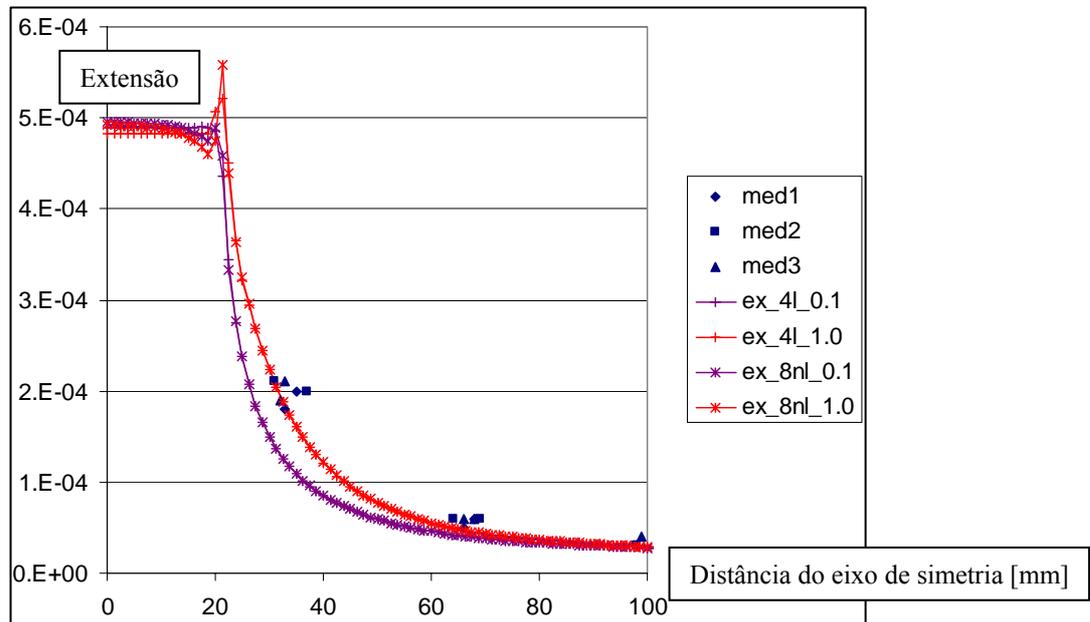


Figura 13. Comparação das medições com os resultados numéricos.

As propriedades mecânicas usadas no cálculo preliminar são resumidas na Tabela 2, entre parênteses é designação de fonte (os valores da placa compósita correspondem a direcção longitudinal, outros valores foram estimados de acordo com teoria clássica dos laminados). Para a comparação usaram-se as extensões medidas na placa de compósito correspondentes a 5kN, que é cerca de 25% de carga máxima, ou seja as não-linearidades ainda não deviam afectar os resultados. No gráfico da Figura 13 são incluídas três medições e todos os valores são postos para um lado do eixo de simetria. Verificou-se coincidência satisfatória nos valores das extensões medidas e calculadas. Na legenda “med1”, “med2” e “med3” correspondem aos valores experimentais. Outros valores são numéricos, “4” ou “8” corresponde ao número dos nós no elemento, “1” ou “nl” refere-se a análise linear ou a com o efeito de grandes deformações incluído e “0.1” ou “1.0” designa a espessura de adesivo em [mm].

4.3. Modelo de falha adesiva

Usou-se o modelo da secção anterior. Analisou-se, na fase linear (carga 5kN) o tipo e dimensões de elemento adequado e escolheu-se o valor da tensão de corte na extremidade do adesivo como o valor de referência. Concluiu-se assim (Figura 14) que os elementos de 8 nós são mais apropriados e que o efeito de grandes deformações também melhora a convergência dos resultados em função do lado máximo dos elementos. A legenda dos resultados numéricos segue as mesmas regras como na figura anterior. Estudou-se também a sensibilidade deste resultado de referência ao valor de espessura de adesivo. A dependência é significativa como era de esperar (Figura 15). Valores máximos são equilibrados pela grande variação de tensão axial da placa compósita. Nas grandes espessuras de adesivo nota-se a diminuição do valor na face livre, que se revela nas perturbações da variação de extensão (veja Figura 16, que corresponde a ampliação da Figura 13).

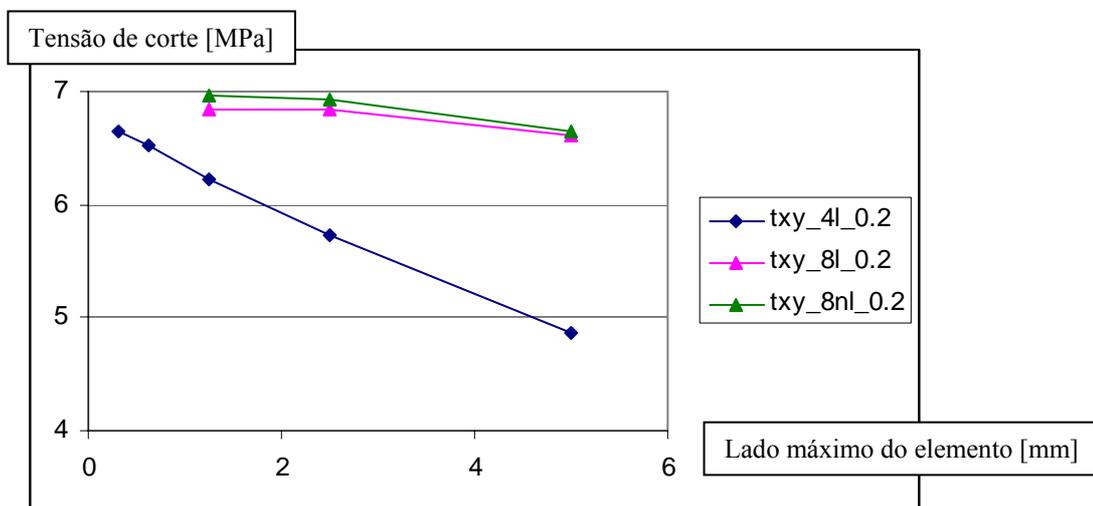


Figura 14. Estudo da convergência dos resultados numéricos.

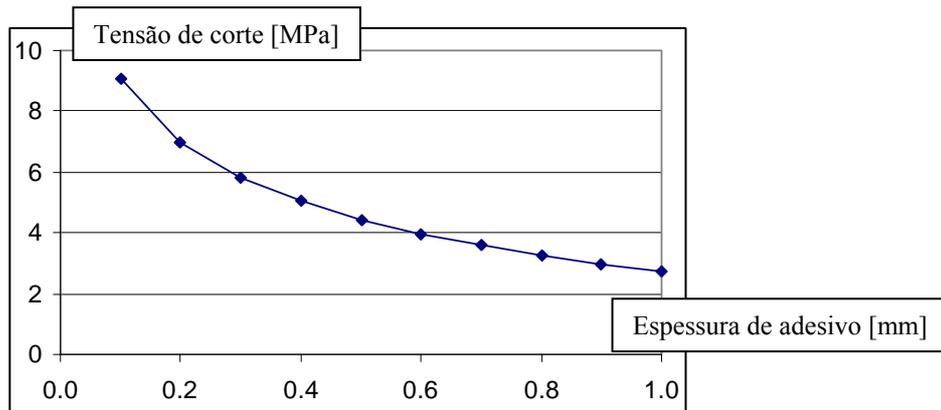


Figura 15. Tensão de corte máxima em função de espessura do adesivo.

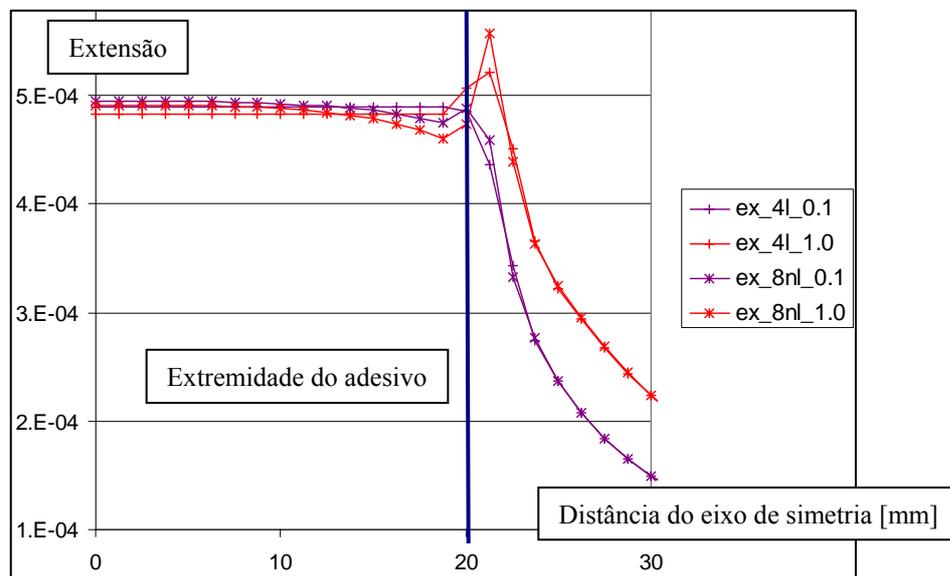


Figura 16. Perturbações da variação de extensão na placa compósita.

No estudo com o modelo de falha adesiva aplicou-se carga de 100kN, com apenas elementos de 8 nós de lado maior 2.5 mm ou 1.25mm. Foram estudados três casos, dois para comparar os resultados variando a espessura do adesivo de 1mm para 0.1mm e outro para comparar diferentes limites de cedência do adesivo (3MPa e 2MPa) e de módulo tangente (100MPa e 10 MPa). Os resultados são resumidos nas Figuras 17-20. Concluiu-se que o modelo é estável e simples e que os resultados são obtidos duma maneira relativamente rápida e sem problemas de convergência. Sabendo os valores limites para um modelo “bond-slip” pode-se determinar a carga máxima para os casos estudados. A distorção máxima do adesivo obtida para esta elevada carga é obviamente irreal como se nota da Figura 21, que representa o detalhe da extremidade do adesivo.

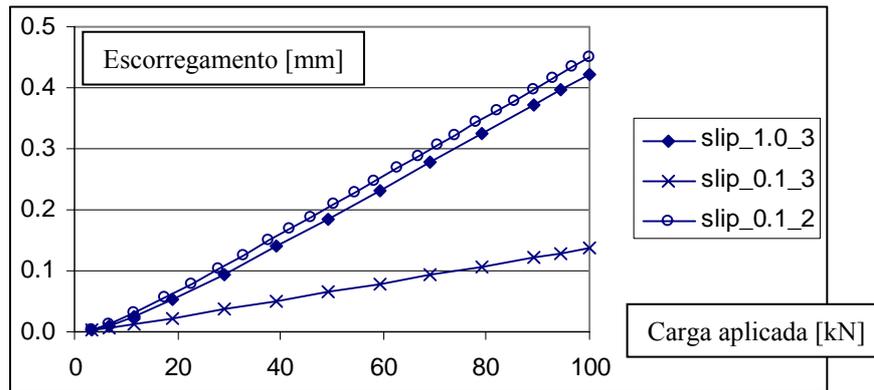


Figura 17. Escorregamento na extremidade do adesivo.

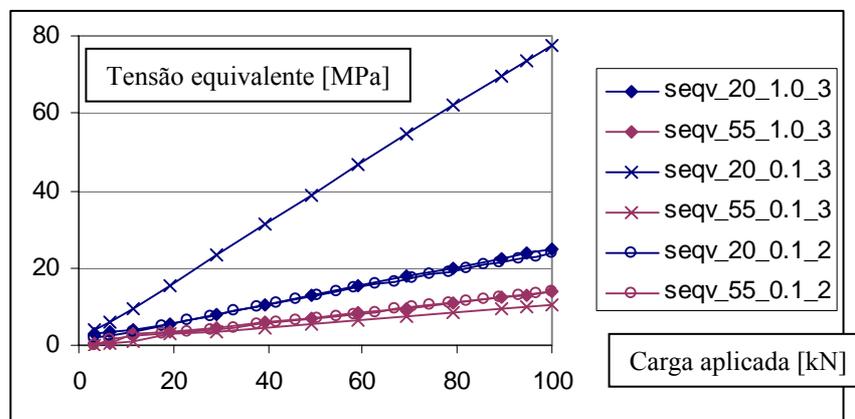


Figura 18. Tensão equivalente na extremidade do adesivo e na distância de 55 mm do eixo de simetria.

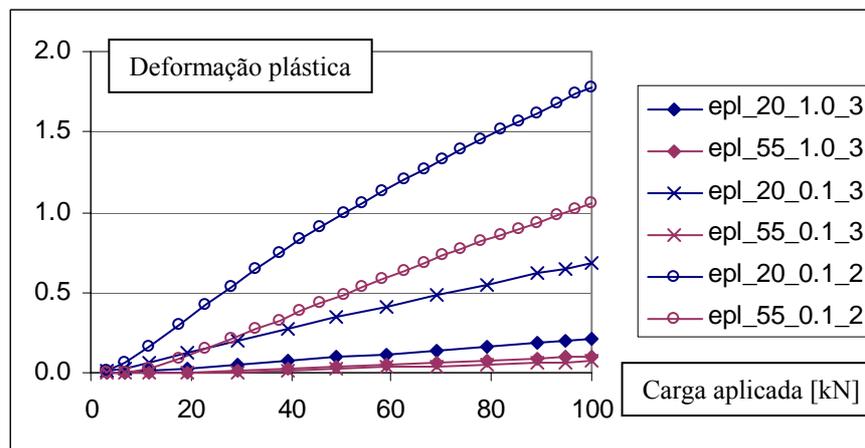


Figura 19. Deformação plástica equivalente na extremidade do adesivo a na distância de 55 mm do eixo de simetria.

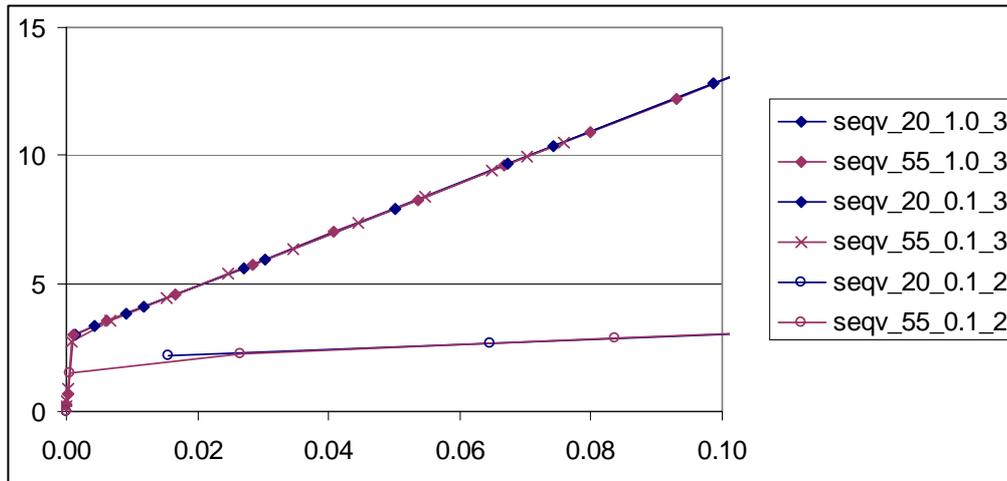


Figura 20. Deformação total equivalente versus tensão equivalente [MPa] na extremidade do adesivo a na distância de 55 mm do eixo de simetria.

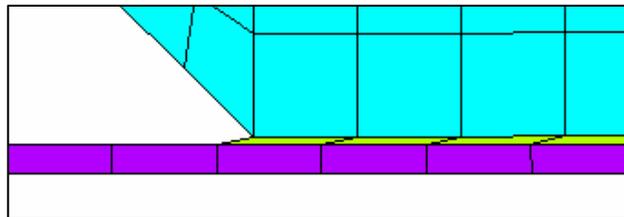


Figura 21. Detalhe do modelo deformado (caso 3).

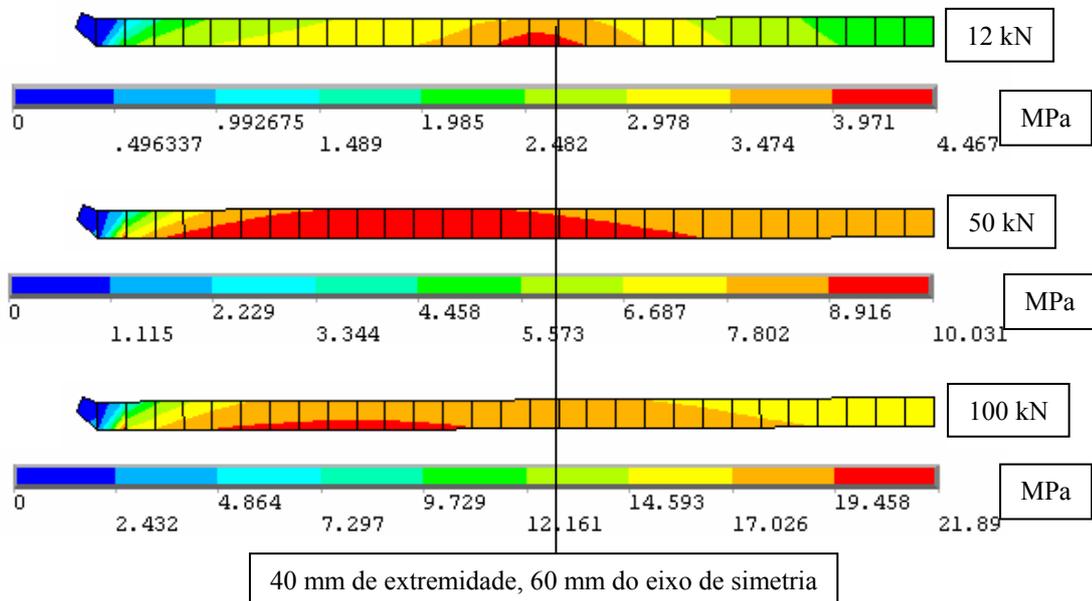


Figura 22. Evolução da primeira tensão principal com a carga aplicada na camada adjacente do betão (caso 1).

Além da possibilidade de introduzir valores do modelo “bond-slip”, abre-se a possibilidade de ligar a carga máxima deste modelo com a fractura do betão. Devido às deformações plásticas elevadas, a tensão na camada adjacente do betão ultrapassa valores de rotura. Pode-se verificar, que o início da fractura corresponde razoavelmente com as formas detectadas na parte experimental (Figura 22).

4.4. Modelo de fractura progressiva

Estudou-se a aptidão do elemento ANSYS Solid65 de 8 nós, que tem as capacidades de modelação de microfracturas na forma “smeared”. O elemento só poderá ser usado na análise tridimensional, e por isso foi esta opção escolhida no modelo paramétrico. A armadura foi implementada como sobreposição dos elementos de barra nos elementos de betão e os restantes componentes do provete foram incluídos com os elementos sólidos de 8 nós.

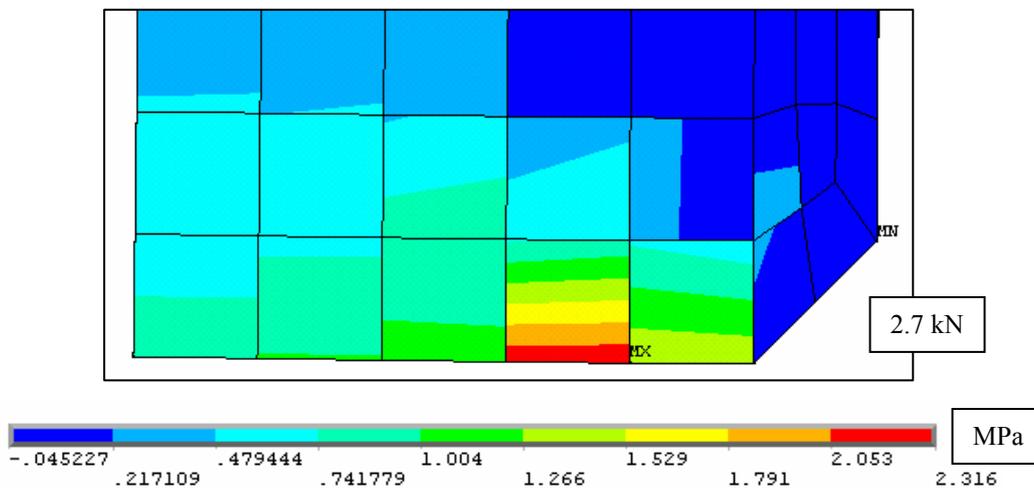


Figura 23. Primeira tensão principal (detalhe).

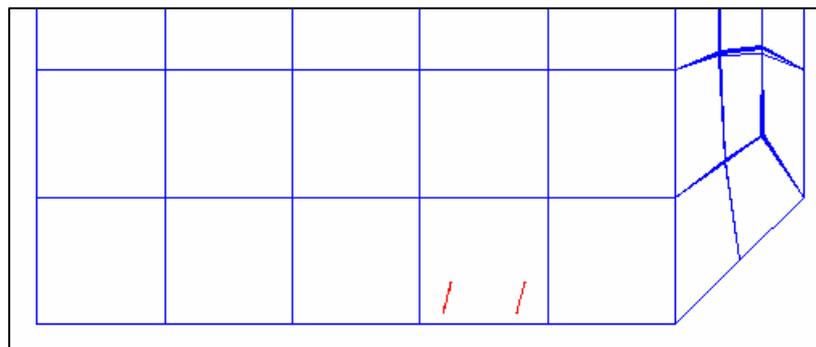


Figura 24. Primeiras microfrissuras (detalhe).

Deixando os valores de propriedades mecânicas especificadas na Tabela 2 usou-se

comportamento linear elástico e introduziu-se valor de rotura de betão em tracção de 2.1MPa de acordo com o valor experimental (Secção 2). O elemento Solid65, atingido o valor de rotura num dos pontos de Gauss, cria microfissura que alivia este valor e a resistência de tracção na direcção perpendicular ao plano da microfissura é removida. As microfissuras começaram na camada adjacente do betão para cargas bastante baixas (Figuras 23-26).

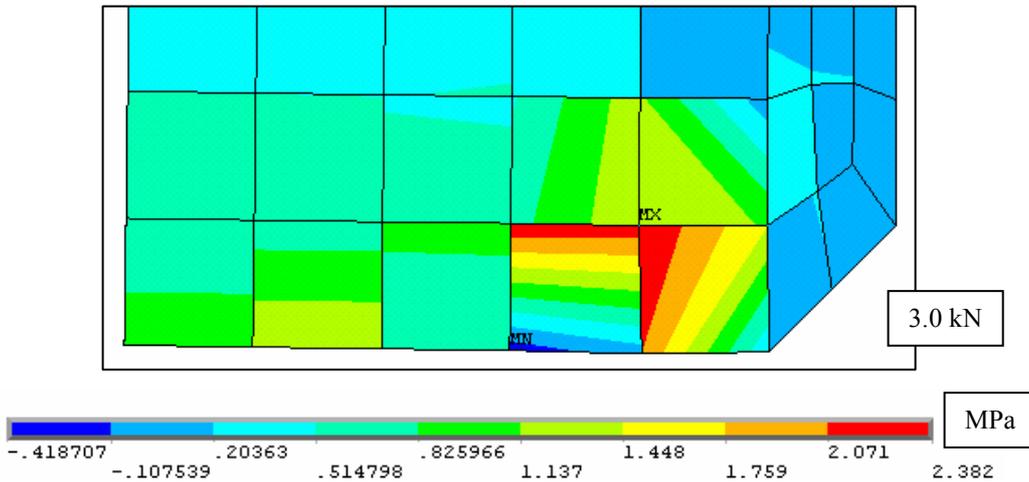


Figura 25. Primeira tensão principal no passo de tempo seguinte, depois da criação de microfissura (detalhe).

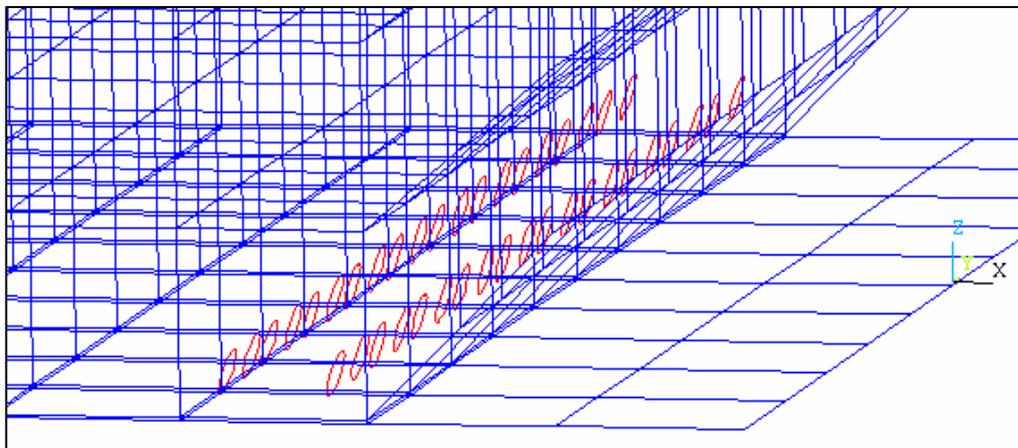


Figura 26. Início da criação de camada de microfissuras (detalhe).

Os resultados preliminares encontram-se neste estágio e pretende-se prosseguir o estudo e adaptar o modelo através da variação das propriedades dos materiais de modo a analisar os efeitos de envelhecimento artificial.

5. CONCLUSÕES

Como conclusão geral pode-se referir que a exposição a ciclos de nevoeiro salino e a ciclos de humidade é gravosa para a aderência entre betão e CFRP, podendo as perdas chegar aos 20%. As superfícies de rotura, para as condições impostas nos ensaios, alteram-se devido à exposição a ciclos de nevoeiro salino, passando o modo de rotura na interface entre o betão e o CFRP a ser a rotura adesiva, talvez devido a um ganho na resistência à tracção do betão e a degradação do adesivo.

Os modelos sujeitos a ciclos de nevoeiro salino resultam numa menor mobilização do comprimento de colagem, muito provavelmente devido à referida alteração nas superfícies de rotura.

Na parte numérica o modelo paramétrico permite analisar a configuração na rotura e a carga máxima, estudar a sensibilidade dos resultados aos parâmetros escolhidos e comparar alternativas de modelação. Pretende-se aperfeiçoar a parametrização de propriedades mecânicas. Os resultados preliminares mostram concordância aceitável com os resultados experimentais apresentados neste artigo e com as conclusões publicadas pelos outros autores.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projecto “Efeitos do Tempo no Desempenho de Reforço de Estruturas de Betão por Compósitos” - POCTI/ECM/36113/99, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

REFERÊNCIAS

- [1] P. Godonou e L. Liljenfeldt, *Effects of Weather on Durability of Bonding in Concrete Structures Repaired with CFRP*. Proceedings of *Structural Faults + Repair – 99*, Julho, (1999).
- [2] L.J. Malvar, N.R. Joshi, J.A. Beran, e T. Novinson, “Environmental Effects on the Short-Term Bond of Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Composites”, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. **7**, pp. 58-63, (2003).
- [3] L. Wu, S.V. Hoa e M. Ton-That, “Effects of Water on the Curing and Properties of Epoxy Adhesive Used for Bonding FRP Composite Sheet to Concrete”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. **92**, pp. 2261-2268, (2004).
- [4] G. Sala, “Composite degradation due to fluid absorption”, *Composites B*, Vol. **31**, pp. 357-373, (2000).
- [5] V.M. Karbhari e M. Engineer, “Effect of Environmental Exposure on the External Strengthening of Concrete with Composites-Short Term Bond Durability”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, SAGE, Vol. **15**, pp. 1194-1216, (1996).
- [6] V.M. Karbhari e L. Zhao, “Issues related to composite plating and environmental exposure effects on composite-concrete interface in external strengthening”, *Composite Structures*, Vol. **40**, pp. 293-304, (1998).
- [7] B.G. Kumar, R.P. Singh e T. Nakamura, “Degradation of Carbon Fiber-reinforced

- Epoxy Composites by Ultraviolet Radiation and Condensation”, *Journal of Composite Materials*, SAGE, Vol. **36**, pp. 2713-2733, (2002).
- [8] R.M. Guedes, J.J.L. Morais, A.T. Marques e A.H. Cardon, “Prediction of long-term behaviour of composite materials”, *Computers & Structures*, Vol. **76**, pp.183-194, (2000).
- [9] A. Costa, e J. Appleton, *Long-Term Behavior of Adhesive Joints – Effects of Concrete Degradation on the Concrete – FRP Bond*. Proceedings of International Conference “Composites in Construction”, University of Calabria, Italy, Setembro, (2003), pp. 16-19.
- [10] R. Marreiros, *Degradação da aderência entre CFRP e betão armado devida a envelhecimento acelerado*, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2005.
- [11] L. Bizindavyi e K.W. Neale, “Transfer Lengths and Bond Strengths for Composites Bonded to Concrete”, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. **3**, pp. 153-160, (1999).
- [12] J.G. Teng, X.Z. Lu, L.P. Ye e J.J. Jiang, *Bond-slip models for interfaces between externally bonded FRP and concrete*. Seracino ed. *FRP Composites in Civil Engineering – CICE, 2004*, Taylor & Francis Group, London (2005), pp. 55-68.
- [13] R. Perera, A. Recuero, A. De Diego e C. Lopez, “Adherence analysis of fiber-reinforced polymer strengthened RC beams”, *Computers & Structures*, Vol. **82**, pp. 1865-1873, (2004).
- [14] U.A. Ebead e K.W. Neale, *On the interfacial mechanics of FRP – strengthened concrete systems*. Seracino ed. *FRP Composites in Civil Engineering – CICE, 2004*, Taylor & Francis Group, London (2005), pp. 351-359.