

ADESÃO AÇO - BETÃO EM VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS PARA DIFERENTES CONDIÇÕES TÉRMICAS

Paulo A. G. Piloto ^a, Ana B. Ramos Gavilán ^b e Luís M.R. Mesquita ^c

^{a,c} *Instituto Politécnico de Bragança, ESTIG, Dep. de Mecânica Aplicada*

^b *Universidade de Salamanca, EPSZ, Dep. de Engenharia Mecânica*

Resumo. As vigas em aço parcialmente embebidas com betão são elementos de estruturas mistos, constituídos por elementos de perfis em aço, reforçados com blocos de betão armado entre os banzos. Esta solução construtiva é responsável pelo aumento da resistência mecânica à temperatura ambiente e em condições de incêndio. Neste trabalho são apresentados resultados experimentais para o valor da tensão de corte de adesão relacionada com os dois processos de ligação (química e atrito) para a temperatura ambiente e temperaturas elevadas. Os ensaios experimentais são baseados em testes tipo “push-out”. Os ensaios experimentais são reproduzidos em simulações numéricas, não lineares geométricas e materiais.

1 Introdução

Para caracterizar o comportamento do contacto entre o aço e o betão, existente em vigas parcialmente embebidas com betão, foram utilizados ensaios do tipo “push-out”. A tensão de adesão é definida pela tensão de corte transferida entre estes materiais, influenciando o estado limite último da viga, tendo em consideração a sua capacidade resistente.

Este trabalho apresenta resultados da tensão de adesão determinados à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas (400 [°C]), através da determinação de curvas de força deslocamento.

Os ensaios foram realizados em vigas com 650 [mm] de comprimento em aço S275JR, com betão de baixa resistência, reforçado com aço B500s, de acordo com a geometria de reforço representada na Fig. 1.

São ainda apresentados resultados sobre a transferência de deformações entre o aço e o betão, ao longo do comprimento de adesão.

A simulação numérica é efectuada com base em modelos de betão reforçados, utilizando elementos finitos sólidos e elementos de barra. O modelo de viga é reproduzido através de elementos de casca. A adesão natural é simulada por elementos de mola não lineares. Todas as simulações foram realizadas no programa Ansys. Os resultados são comparados para as diferentes condições térmicas em estudo.

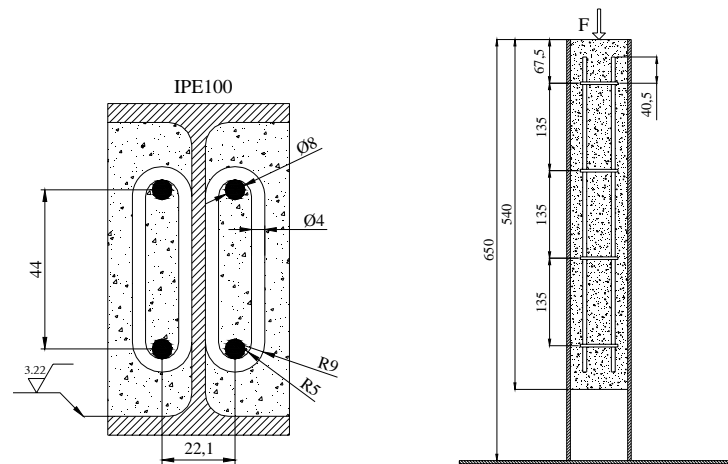


Fig. 1: Viga parcialmente embebida sem ligação mecânica.

2 Ensaios experimentais

Para a realização dos ensaios experimentais foi utilizado um sistema de carregamento axial, devidamente instrumentado, para actuar nos blocos de betão. Os resultados do deslocamento relativo e das deformações transferidas entre os dois materiais foram determinados para a temperatura ambiente e para temperaturas elevadas. Para esta última situação, foi desenvolvido um sistema de isolamento térmico para utilização de uma unidade de aquecimento, baseado em resistências eléctricas, ver Fig. 2.



Fig. 2: Ensaio de “push-out” à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas.

Nos ensaios realizados à temperatura ambiente, as vigas foram submetidas a uma força incremental, até se atingir o estado limite último de deslocamento relativo do betão armado ou ao colapso local do betão.

Nos ensaios realizados a temperaturas elevadas, as vigas foram previamente solicitadas termicamente, com uma taxa de aquecimento de 400 [°C/h], estabilizando o campo de temperaturas da viga durante um período de 1 hora. A viga foi posteriormente carregada axialmente.

2.1 Materiais

Os materiais foram caracterizados de acordo com as normas [1-2], permitindo determinar as principais propriedades mecânicas. O perfil metálico foi ainda caracterizado em função de estado geométrico da superfície, [3-4].

O perfil IPE100 possui designação comercial S275JR, com tensão de cedência determinada em 490 [MPa], baseado em seis ensaios, apresentando um desvio padrão de 11 [MPa].

A rugosidade da superfície de cada viga foi medida em 18 troços de 12,5 [mm], cada com 5 amostras de 2,5 [mm]. Foi determinado o valor da rugosidade média aritmética igual a 3,22 [μm]. Para este estado superficial de contacto com betão armado, será previsível um coeficiente de atrito entre 0,2 e 0,6, [5].

O betão de baixa resistência foi determinado a partir de cimento Portland, tipo II, classe CEM-II/B-L 32,5N com agregados de silício de dimensão adequada ao volume de recobrimento necessário e ao espaço disponível para o enchimento. As amostras de betão foram elaboradas e testadas aos 7 e 28 dias, enquanto as vigas foram mantidas em câmara húmida a $23 \pm 1,7$ [°C], com uma humidade relativa de 95 [%].

O reforço utilizado para o betão foi determinado com barras de aço B500s, com tensão de cedência igual a 500 [MPa]. As armaduras de reforço da secção foram realizadas em varão de aço liso com 4 [mm] de diâmetro e com uma tensão de cedência de 200 [MPa]. O reforço foi posicionado com arame antes de se efectuar o enchimento do betão nas vigas, ver Fig. 3.

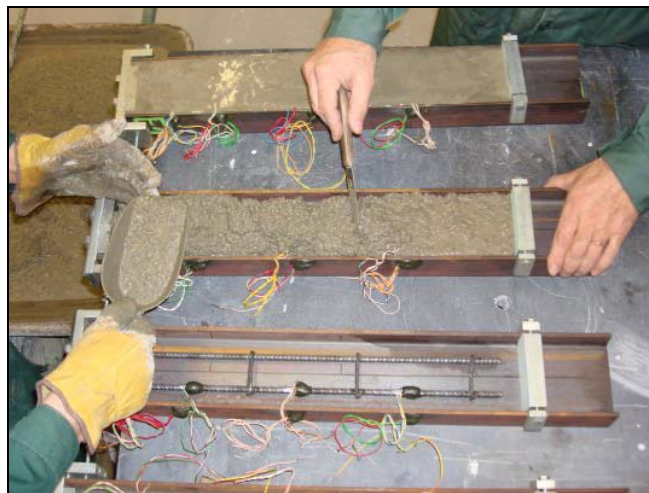


Fig. 3: Enchimento das vigas parcialmente embebidas.

2.2 Instrumentação

Os ensaios foram preparados com base num carregamento axial efectuado nos blocos de betão armado, para determinar o comportamento da transferência de esforços e de resistência relativa entre o betão e o aço. Um cilindro hidráulico é responsável pela acção exercida nos blocos de betão, sendo o esforço transmitido para a viga de aço por corte. A acção do cilindro e a reacção exercida no perfil é medida por células de carga.

O deslocamento relativo do betão foi medido por intermédio de um sensor de posição potenciométrico, ligado a um sistema de aquisição de dados, com uma resolução de $\pm 0,1$ [mm].

As deformações no aço e no betão são medidas à temperatura ambiente, por intermédio de extensómetros eléctricos do tipo LY11-3/120 (HBM). As deformações são medidas em 4 posições ao longo do comprimento da viga, para determinar o esforço de corte transferido do

betão para o aço. Nas medições das deformações do betão é assumido como desprezável o deslocamento relativo entre o aço do reforço e o betão envolvente. As deformações do betão são medidas ao nível das barras de reforço, utilizando uma pasta AK22 (HBM), para protecção da humidade e eventual dano mecânico. Os extensómetros foram posicionados entre as armaduras de reforço, ver Fig. 4.

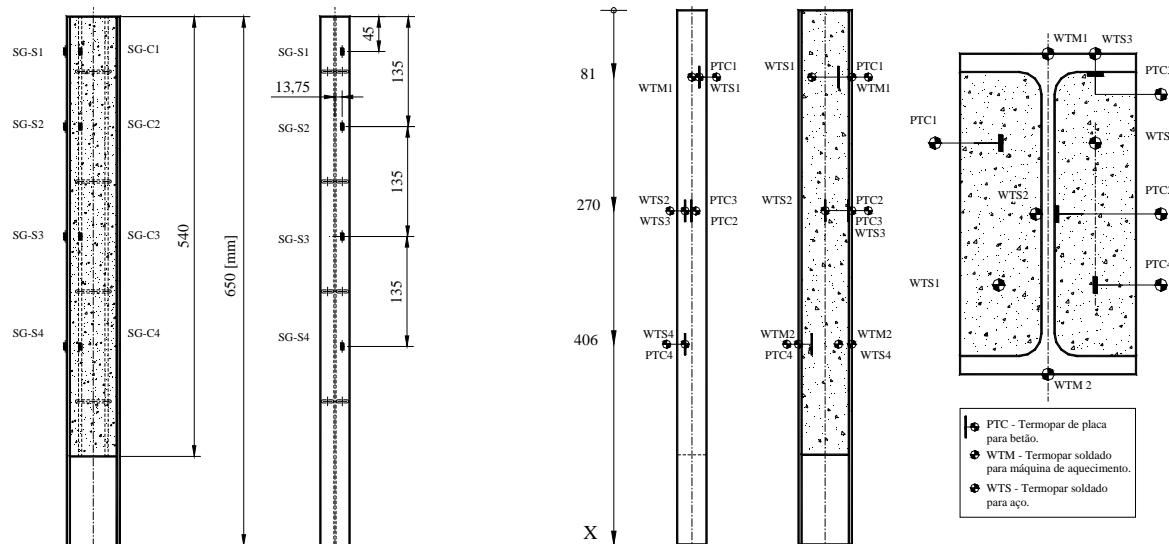


Fig. 4: Posição dos extensómetros e dos termopares no aço e no betão.

Para controlar o processo de aquecimento nos ensaios realizados a temperaturas elevadas, foram utilizados termopares do tipo K, posicionados em locais adequados para determinar a temperatura da interface entre o aço e betão, para além de outros pontos de medição posicionados nos dois materiais, ver Fig. 4.

Na superfície exterior do betão foi instalado um sensor de temperatura adicional para medição da evolução da temperatura de aquecimento.

A carga axial é imposta por incrementos, através de um elemento de interface em aço rosado e ligado à célula de carga, efectuando a medição com uma resolução de 1 [%] da força máxima do ensaio.

2.3 Resultados à temperatura ambiente

Durante os ensaios foram registados os valores da carga exercida no betão, em função do deslocamento deste em relação ao aço da viga. Estas curvas permitem determinar a tensão de adesão e validar modelos de comportamento por comparação entre resultados experimentais e numéricos.

O deslocamento axial do betão foi determinado para um dos três ensaios realizados à temperatura ambiente, produzindo uma tensão de adesão máxima de 0,423 [MPa], considerado como valor médio em toda a extensão de contacto dos dois materiais, ver Fig. 5.

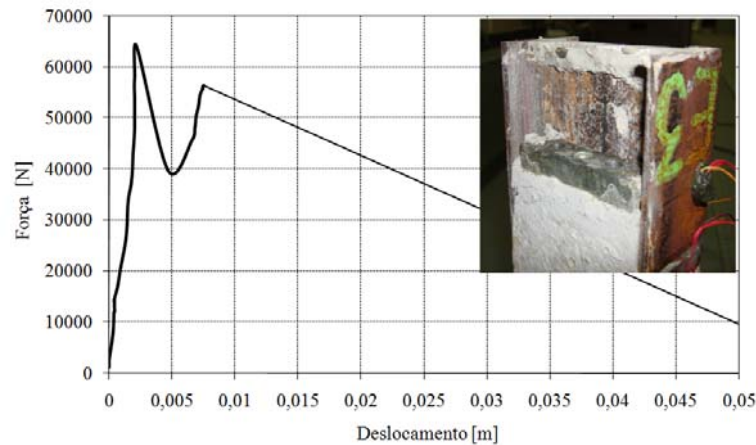


Fig. 5: Resultados de força versus deslocamento axial.

As deformações foram medidas em 4 secções distintas, de acordo com a posição dos extensómetros. Os resultados das medições efectuadas na superfície do aço da viga estão representados na Fig. 6.

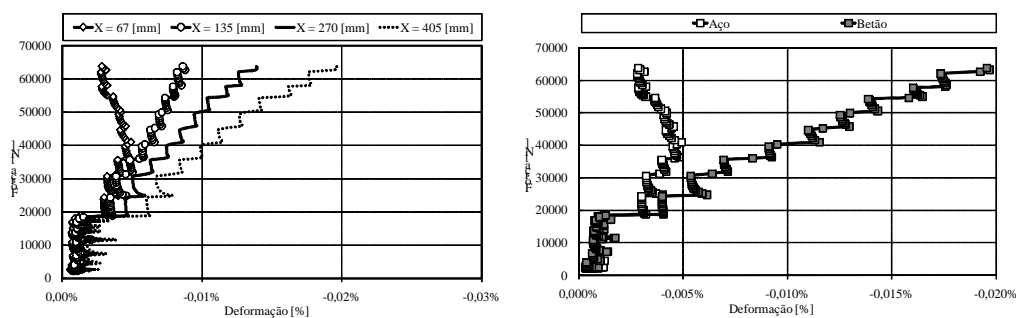


Fig. 6: Resultados da deformação axial no aço e no betão.

Estes resultados mostram que a deformação aumenta no perfil em função da distância relativa à posição de carregamento.

A deformação foi ainda comparada para ambos os materiais, medida na primeira secção ($X=67$ [mm]). Para pequenos valores de força axial, as deformações no betão e no aço apresentam resultados muito semelhantes. Para além desse valor de carga, as diferenças de deformação axial são evidentes, ver Fig. 6.

Na vizinhança do local de introdução da carga foram visíveis pequenas fissuras, para o instante correspondente ao estado limite último.

2.4 Resultados a temperaturas elevadas

O betão quando submetido a temperaturas elevadas apresenta deterioração irreversível das suas propriedades mecânicas, nomeadamente a diminuição do valor da tensão de compressão e o colapso entre a pasta de cimento e os respectivos agregados. Para temperaturas próximas de 250 [°C] aparece o fenómeno de desidratação ou perda de vapor de água não evaporado ou fluidos de desidratação. Para temperaturas próximas dos 300 [°C] verifica-se uma perda da capacidade resistente de cerca de 15 a 40 [%], enquanto para 550 [°C] a redução aproxima-se do intervalo de 55 a 75 [%] em relação ao seu valor original, [6].

O aço também apresenta degradação das suas propriedades mecânicas, numa escala diferente. Para uma temperatura entre os 550 e os 650 [°C] verifica-se uma alteração da microes-

trutura do material, com uma conseqüente eliminação das tensões residuais existentes. Para temperaturas entre os 700 e os 800 [°C], o comportamento das propriedades do aço é dominado pela alteração da microestrutura do material, através da criação da fase γ , austenítica.

Durante os ensaios foram registados os valores da carga exercida no betão em função do deslocamento deste em relação ao aço da viga. Estas curvas permitem determinar a tensão de adesão a temperaturas elevadas e validar modelos de comportamento por comparação entre resultados experimentais e numéricos.

As vigas parcialmente embebidas foram aquecidas, utilizando um sistema de aquecimento com uma potência de 70 [kVA]. As temperaturas foram registadas durante o processo de aquecimento e durante todo o processo de carregamento mecânico, ver Fig. 7.

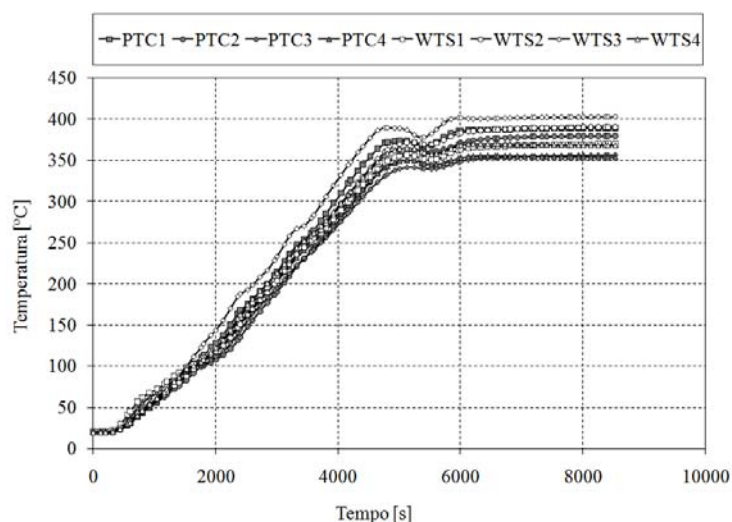


Fig. 7: Registo do valor da temperatura no aço e no betão.

As vigas foram mantidas numa câmara de isolamento térmico, constituída por placas de vermiculite expandida e vidro termo resistente. A temperatura no interior da câmara foi controlada por termopares soldados na viga de aço (WTM), directamente ligados com o sistema de aquecimento.

O deslocamento relativo do betão foi medido durante os ensaios. O betão não apresentou fissuras visíveis, sendo de realçar o deslocamento dos blocos de betão, por colapso da adesão aço-betão. Depois do colapso da adesão, aparece uma inclinação negativa no gráfico do deslocamento relativo, ver Fig. 8, sendo a fase posterior controlada pelo atrito existente entre os dois materiais.

As diferenças de comportamento para os dois primeiros testes podem ser justificadas pelo facto do colapso de adesão no teste 2 se ter verificado em instantes diferentes para os dois blocos de betão. O teste 3 seguiu os valores medidos do teste 1, apresentando um valor de tensão de adesão superior.

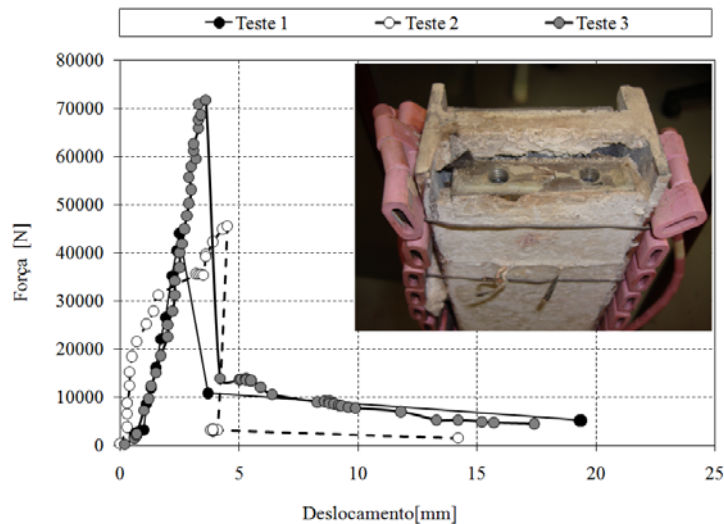


Fig. 8: Resultados de força versus deslocamento axial.

O valor da tensão de adesão máxima foi determinado como o valor médio em toda a extensão de contacto dos dois materiais, de acordo com a tabela 1.

Tabela 1: Tensão de adesão aço-betão.

Teste	Max. força [N]	Max. tensão adesão [MPa]
Teste 1	44142	0.293
Teste 2	45487	0.302
Teste 3	71689	0.476

3 Simulações numéricas

Para simular o comportamento durante os ensaios tipo “push-out”, foram utilizadas simulações não lineares materiais e geométricas, com grandes deslocamentos associados ao movimento do betão. São apresentados resultados para simular o comportamento à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas, utilizando os valores experimentais de referência para a tensão de adesão e os valores das temperaturas de aquecimento medidas durante a execução dos ensaios.

3.1 Materiais

Os modelos do comportamento dos materiais foram adaptados a partir dos eurocódigos, [7-8], para simular o comportamento à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas. O betão comporta-se como um material quase frágil, apresentando comportamento distinto de compressão e de tracção. Este material apresenta ainda um critério de rotura com base no modelo Willam Warnke, [9], baseado num parâmetro de tensão. Nestas condições, o betão é capaz de fracturar por tracção e esmagar por compressão. Ambos os materiais adoptam um critério de plastificação.

3.2 Modelo para viga parcialmente embebida

Cada viga parcialmente embebida foi discretizada através de um modelo tridimensional, utilizando os elementos SOLID65, LINK8, SHELL181 e COMBIN39 do programa Ansys.

Estes elementos são utilizados para análise mecânica. Para a análise térmica são utilizados elementos correspondentes, SOLID70, LINK33, SHELL131 e COMBIN39.

Uma parte da malha de elementos finitos foi gerada por elementos de casca para representar o perfil de aço, enquanto a outra parte, constituída por elementos sólidos e de barra, serve para representar o comportamento do betão armado. Estas duas partes do modelo devem ser ligadas por elementos de interface, representativos do fenómeno de adesão, ver Fig. 9.

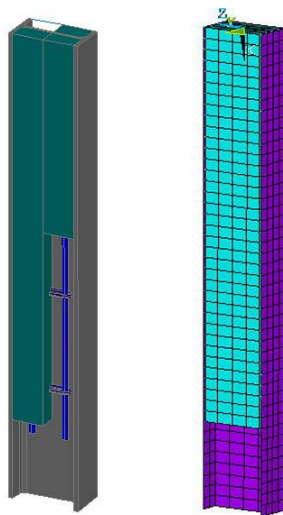


Fig. 9: Modelo de viga parcialmente embebida com betão.

O modelo térmico requer a utilização de soluções não lineares, utilizando a condutância adequada para representar o fenómeno de transferência térmica na interface aço-betão. Os resultados das temperaturas, existentes em toda a extensão da viga, foram determinados e fixados para as condições de aquecimento verificadas em regime quase permanente dos ensaios experimentais.

O modelo mecânico requer a utilização de soluções geométricas e materiais não lineares, para simular grandes deslocamentos e carregamentos incrementais. A força axial do cilindro foi simulada por pequenos incrementos aplicados na superfície de carga. Esta condição numérica converge para uma solução evolutiva, adoptando um critério de convergência por deslocamento.

O reforço do betão foi considerado com elementos sobrepostos e nós comuns, desprezando o deslocamento relativo entre eles. O comportamento da interface foi representado por elementos de mola não lineares, nas direcções normais e tangenciais. Para a direcção normal foi adoptada uma rigidez elevada para evitar a inter-penetração entre os elementos de aço e betão. Para a direcção tangencial foi adoptada a rigidez determinada nos ensaios experimentais.

3.3 Resultados à temperatura ambiente

O deslocamento axial do betão foi determinado numericamente, considerando o comportamento experimental da adesão aço-betão, utilizando apenas o valor da tensão máxima de adesão. A forma da curva experimental não foi utilizada, tendo sido adoptado o valor do eurocódigo 4 [10], para o valor do atrito existente na interface entre os dois materiais. As diferenças entre o resultado numérico e experimental são assumidas, ver Fig. 10.

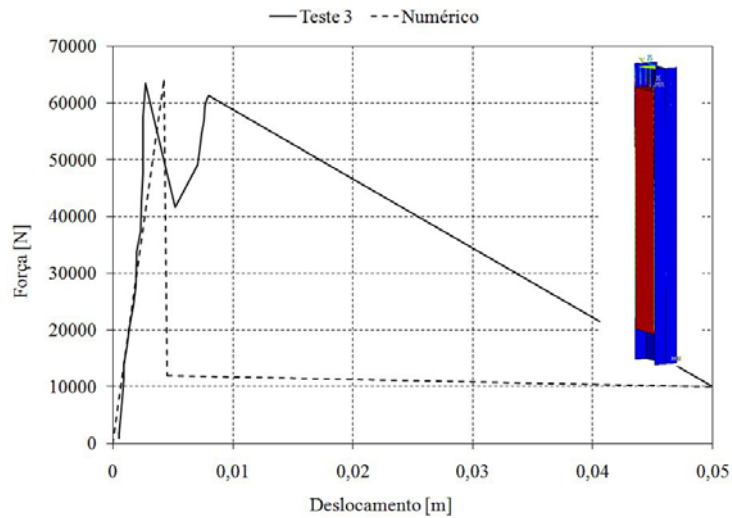


Fig. 10: Resultados de força versus deslocamento axial.

A semelhança nos valores de deformação axial, entre os resultados numéricos e experimentais, permitem validar o modelo de comportamento do elemento de mola não linear. Esta aproximação não simula o comportamento real para baixos valores de carga axial.

3.4 Resultados a temperaturas elevadas

A resistência térmica de adesão aço-betão é caracterizada pelo facto dos materiais se encontrarem em contacto através de algumas zonas específicas e pelo facto de, em paralelo, se verificar a existência de vazios com fluidos de condutividade térmica inferior às dos dois materiais. O valor de condutância adoptado para esta interface, à temperatura de 400 [°C], foi de 100 [W/m²K], [11].

A determinação numérica do campo de temperaturas resulta de uma análise não linear transiente, utilizando as condições de aquecimento medidas experimentalmente. Na Fig. 11, estão representados os valores das temperaturas, obtidas por via experimental e numérica, para a zona dos reforços, banzos e alma da viga.

Os resultados numéricos do deslocamento do betão estão representados na Fig. 12. O comportamento da adesão aço-betão foi validado com a definição das propriedades adequadas para o elemento de mola não linear.

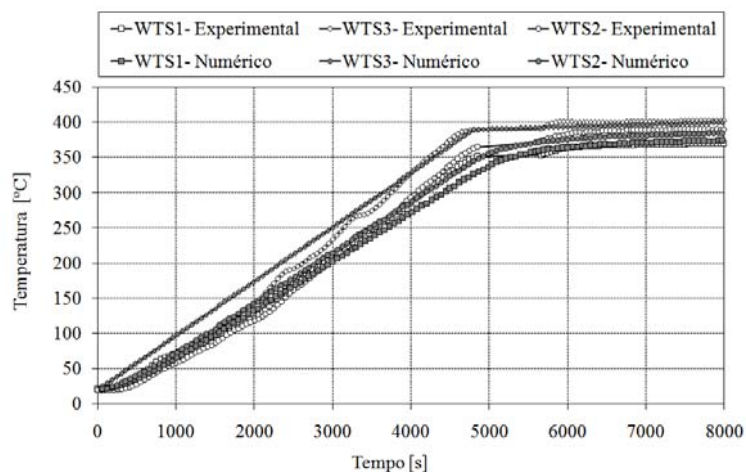


Fig. 11: Resultados numéricos de temperatura.

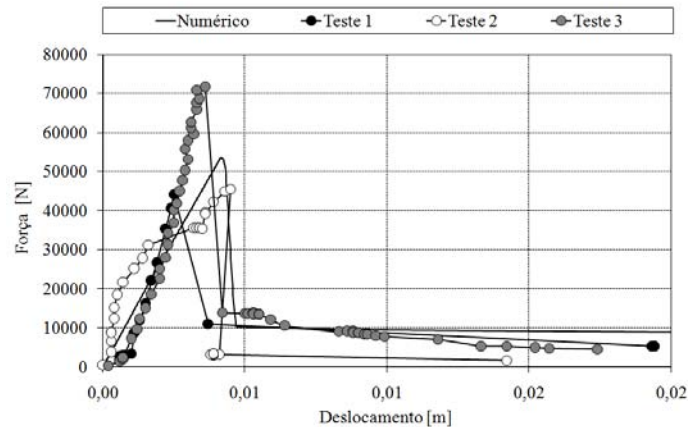


Fig. 12: Resultados de força versus deslocamento axial.

4 Conclusões

Este artigo apresenta um tipo de ensaio que permite caracterizar a adesão aço-betão para vigas parcialmente embebidas. Foram determinadas experimentalmente as tensões de adesão máximas para a temperatura ambiente e para a situação de temperaturas elevadas. Foi ainda possível determinar a variação das deformações e respectiva transferência de esforços entre as duas superfícies de adesão.

Os resultados numéricos permitiram validar os modelos adoptados para o comportamento de adesão entre os dois materiais.

Referências

- [1] NP EN 10 002-1, “Metallic materials. Tensile testing. Part 1: Method of test (at ambient temperature)”; 1990.
- [2] NP EN 12390 – 3, “Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens”, 2003.
- [3] ICS, ISO 4287, “Geometrical product specification (GPS)” – surface texture: Profile method – terms, definitions, and surface texture parameters, Switzerland, 1997.
- [4] CS, ISO 4288, “Geometrical product specification (GPS)” – surface texture: Profile method – rules and procedures for the assessment of surface texture, Switzerland, 1996.
- [5] Romulo Danilli da Silva, “Estudo da aderência aço concreto em pilares mistos preenchidos” (in portuguese); Master of Science Thesis; São Jorge School of Engineering, São Paulo, Brazil, March 2006.
- [6] Georgali, B.; Tsakiridis, P.E.; “Microstructure of fire-damaged concrete. A case study.”; Cement & Concrete Composites 27 (2005) 255-259.
- [7] CEN; EN 1993-1-2; Eurocode 3, Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, April 2005.
- [8] CEN; EN 1992-1-2, “Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design”; December 2004.
- [9] Documentation for ANSYS, Release 10.0, 2005.
- [10] CEN - EN 1994-1-1; “Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings”; Brussels, December 2004.
- [11] Ghojel, J, Experimental and analytical technique for estimating interface thermal conductance in composite structural elements under simulated fire conditions, Experimental Thermal and Fluid Science, No. 28, pp. 347-354, 2004.