

## Determinação numérica da condutância térmica da interface aço-betão para estruturas mistas a temperaturas elevadas

Paulo A. G. Piloto<sup>1</sup>, Ana B. Ramos Gavilán<sup>2</sup> e Luís M.R. Mesquita<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico de Bragança, Dep. Mec. Aplicada, Campus Santa Apolónia, 5301-857 Bragança, Portugal  
email: [ppiloto@ipb.pt](mailto:ppiloto@ipb.pt) <http://www.ipb.pt/~ppiloto>

<sup>2</sup> Universidade de Salamanca, Departamento de Mecánica, Campus Viriato, 49022 Zamora, España

<sup>3</sup> Instituto Politécnico de Bragança, Dep. Mec. Aplicada, Campus Santa Apolónia, 5301-857 Bragança, Portugal

### Sumário

Neste trabalho é apresentado um método de optimização para determinação do valor da condutância da interface de contacto entre o aço e o betão, para vigas de aço parcialmente embebidas com betão. Este tipo de elementos faz parte de estruturas mistas, conferindo um aumento de resistência mecânica em condições de incêndio. Os resultados foram determinados na sequência de ensaios experimentais de adesão entre os dois materiais, para temperaturas elevadas, permitindo validar o comportamento térmico e mecânico da interface. As simulações numéricas foram efectuadas com a utilização do método dos elementos finitos e métodos de optimização de primeira ordem.

**Palavras chave:** Condutância; Optimização; Método dos elementos finitos; Contacto aço-betão.

### 1 Introdução

Para simulação numérica dos ensaios de “push-out”, realizados em vigas de aço parcialmente embebidas com betão (elementos de construção mista), foi necessário construir uma instalação experimental adequada ao princípio do teste destrutivo. Este teste consiste na separação dos dois materiais, por efeito de corte, realizado a temperaturas elevadas. A interface aço betão foi construída por mecanismos de adesão natural (química e atrito), sendo necessário determinar o comportamento térmico e mecânico desta interface, ver figura 1.

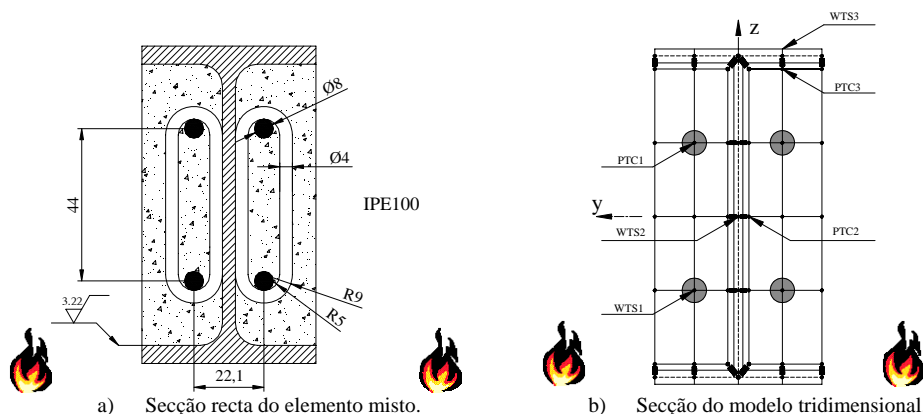
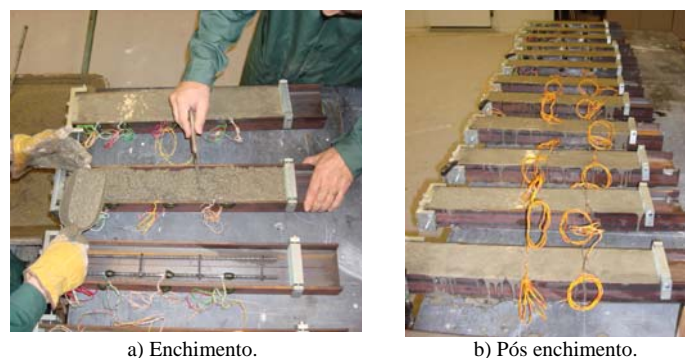


Fig. 1. Secção do elemento em estudo.

No que diz respeito ao comportamento térmico, será necessário determinar o fluxo de calor que passa entre os dois materiais, para efectuar uma previsão numérica do campo de temperaturas. Estas temperaturas condicionam o comportamento mecânico dos dois materiais e em particular da sua interface.

A resistência de contacto existe pelo facto da interface dos dois materiais ser constituída por pequenas zonas de contacto e por outras que contêm vazios e fluidos, resultantes do processo de fabrico deste tipo de elemento, ver figura 2. Estas zonas de “vazios” e fluidos apresentam valores de condutividade térmica inferiores aos existentes em corpos sólidos.



**Fig. 2.** Fase de preparação dos provetes para ensaio.

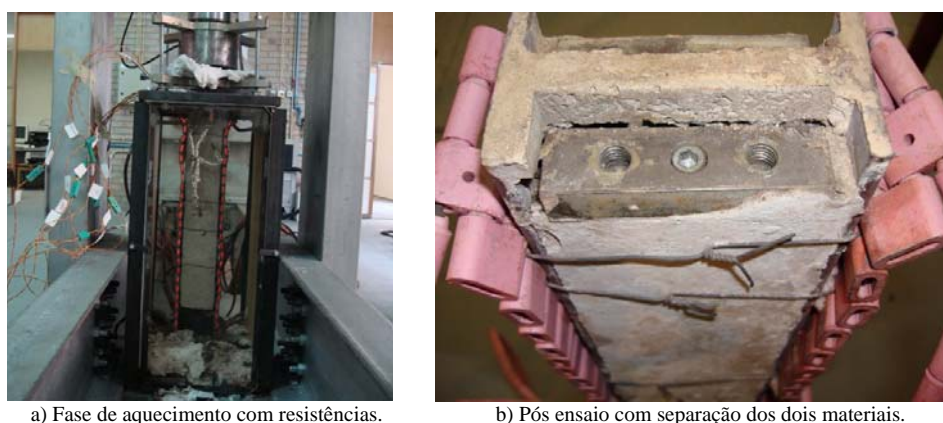
Um dos modelos mais conhecidos para previsão da condutância da interface foi proposto por Yovanovitch, [1,2]. Este modelo tem em consideração a condutância do contacto e do vazio. A primeira está relacionada com condutividade térmica da interface, depende da rugosidade média aritmética das superfícies, é função da pressão de contacto e das micro-durezas superficiais do corpo sólido mais macio. A segunda parcela está relacionada com a condutividade térmica da substância de separação, da espessura de separação e de outros parâmetros relacionados com estas substâncias.

Neste trabalho será determinado o valor médio da condutância da interface aço-betão, utilizando um método inverso de análise não linear de transferência de calor, para simulação do processo transiente de aquecimento dos provetes. O processo utiliza ainda um método de optimização de primeira ordem, cuja função objectivo será determinada através da minimização do erro relativo quadrático, entre as temperaturas medidas experimentalmente e as temperaturas determinadas numericamente. Trata-se, portanto, de uma série de ciclos de análise, avaliação e modificação da variável de projecto (condutância).

O modelo numérico utiliza elementos finitos de mola não lineares para simular o contacto entre os dois materiais, permitindo definir o valor da condutância térmica da interface e validar os resultados.

## 2 Ensaios experimentais

Os ensaios de “push-out” foram realizados em vigas de aço, parcialmente embebidas com betão armado. O objectivo destes ensaios será fazer deslocar os blocos de betão em relação ao perfil em aço, em situação de temperaturas elevadas. Para tal, foi necessário utilizar um sistema de aquecimento em câmara isolada, baseado no princípio de Joule, utilizando resistências electro-cerâmicas. Estas resistências estão ligadas a uma unidade de aquecimento de 70 [kVA]. Os provetes foram submetidos a uma taxa de aquecimento de 400 [°C/h], nas duas superfícies dos banzos da parte metálica, ver figura 3.



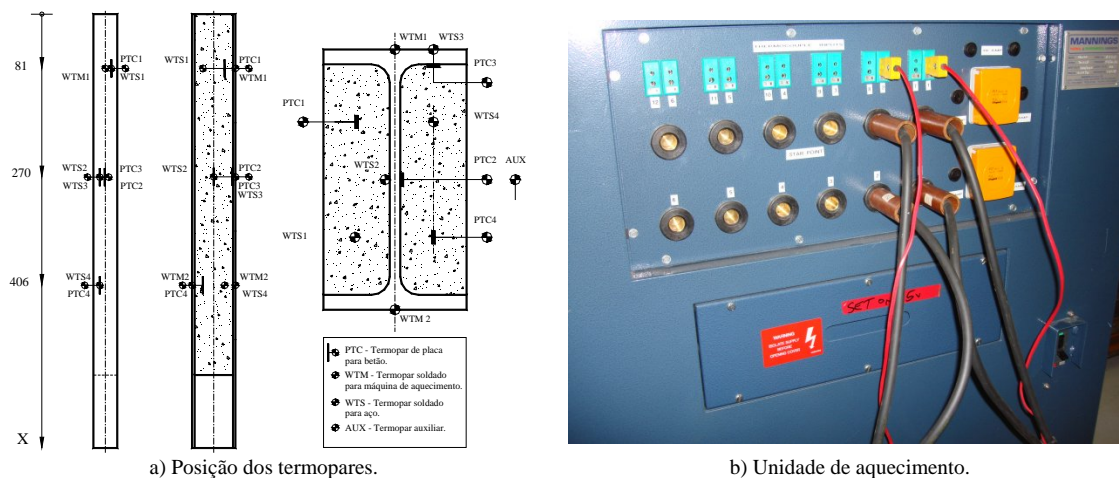
**Fig. 3.** Ensaios de “push-out” a temperaturas elevadas.

O processo de aquecimento utilizou uma câmara isolada, constituída por duas placas de vermiculite expandida e dois vidros super termo-resistentes, com condutividades de 0,19 e 1,7 [W/mK], respectivamente.

### 2.1 Instrumentação

Para controlar o processo de aquecimento foram utilizados termopares do tipo K, ligados com a unidade de aquecimento. Para além destes pontos de controlo da evolução da temperatura (WTM), foram utilizados mais

oito termopares, colocados em contacto (PTC) ou soldados (WTS), para medir temperaturas no betão e no aço. Foi ainda utilizado um termopar auxiliar para acompanhar a temperatura do ambiente, na superfície do betão, durante a fase de aquecimento, ver figura 4.

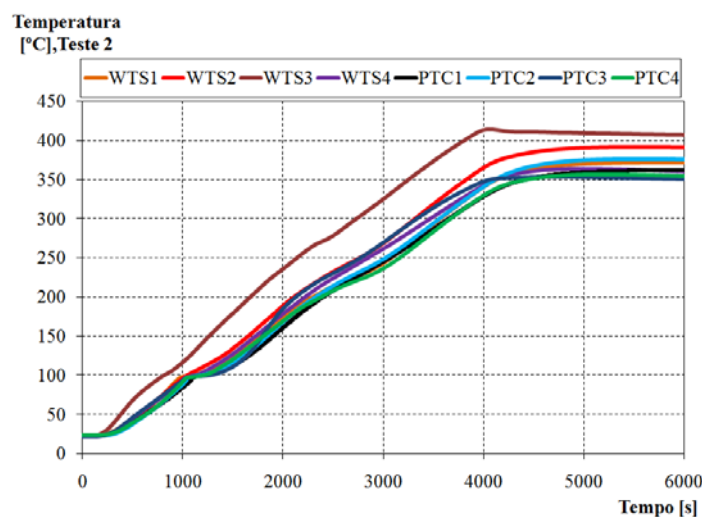


**Fig. 4.** Sistemas de controlo do processo de aquecimento.

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 [ $\mu$ m].

## 2.2 Resultados experimentais

As temperaturas foram medidas num sistema de aquisição com 16 saídas, HBM, com frequência de aquisição igual a 1 [Hz]. O processo de aquisição demonstra que a unidade de aquecimento segue a taxa prevista, conforme se pode verificar na figura 5.



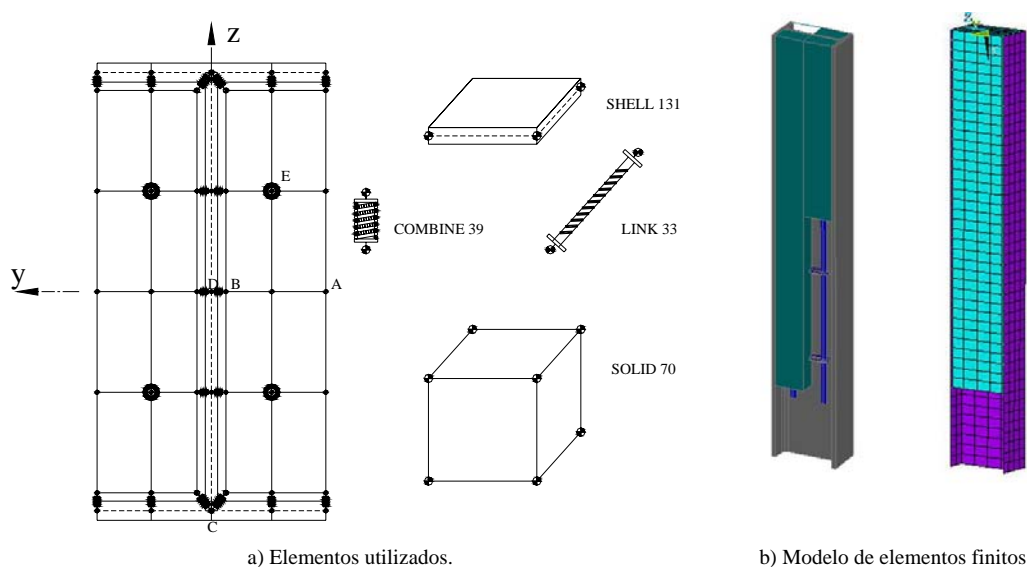
**Fig. 5.** Medições efectuadas no provete (teste 2).

Os resultados experimentais demonstram uma pequena flutuação nos perfis das temperaturas PTC, correspondente ao instante de tempo 1000 [s], altura em que se verifica a desidratação do betão. A interface aço-betão deverá estabilizar para um nível de temperatura correspondente ao intervalo de 350-400 [°C]. Os restantes ensaios (teste 1 e teste 3) produziram evolução semelhante das temperaturas.

## 3 Simulações numéricas

As simulações numéricas foram efectuadas para validar o modelo de comportamento da interface aço-betão e ao mesmo tempo, determinar o valor da condutância observada. Foi utilizado um modelo tridimensional, baseado em elementos finitos de casca para modelar o perfil em aço, adicionando elementos sólidos para simular o

comportamento do betão (material quase frágil), sobrepondo elementos de barra na malha destes últimos para simular o reforço. Finalmente, para analisar o mecanismo de transferência de calor na interface, foi utilizado o elemento de mola não linear, conforme representação esquemática da figura 6. A escolha destes elementos foi condicionada pela análise termo-mecânica a efectuar no programa Ansys, [3].



**Fig. 6.** Discretização por elementos finitos.

### 3.1 Modelo numérico

O programa utiliza o método de Newton Raphson, para resolução do problema iterativo, não linear transiente. O processo de incremento temporal recorre ao método trapezoidal, função do parâmetro de integração.

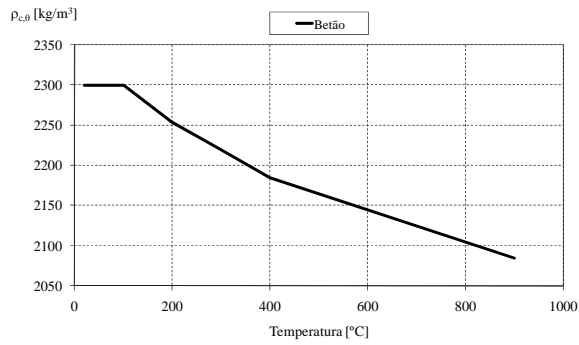
Para simular o perfil em aço foi utilizado um elemento de casca definido por camadas, Shell 131, com capacidade de condução de calor no plano do elemento e na espessura, assumindo neste caso uma variação linear do perfil de temperatura. Possui 4 nós e um limite de 32 graus de liberdade (temperatura) em cada nó. As funções de forma são lineares no plano do elemento e utiliza um esquema de integração de 2x2.

Para simular o comportamento do betão foi utilizado um elemento sólido, Solid 70, com capacidade de condução do calor nas três direcções do espaço. Possui 8 nós com um grau de liberdade por nó. As funções de forma são lineares em cada direcção ortogonal e utiliza um esquema de integração de 2x2x2. O reforço deste material é conseguido através da partilha de alguns nós com um elemento de barra, Link 33, constituído por dois nós com um grau de liberdade em cada nó, possibilitando a condução de calor entre eles. As funções de forma deste último elemento são lineares e utilizam integração exacta.

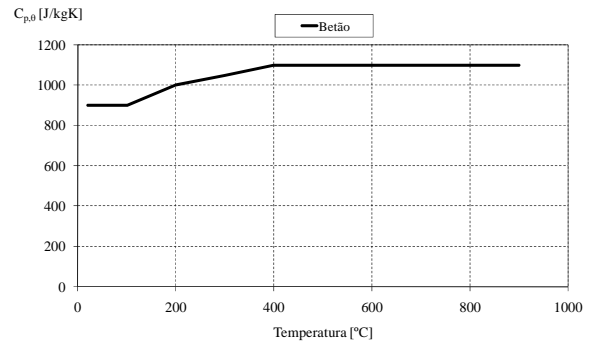
Para simular o comportamento da interface aço-betão, foi utilizado o elemento com dois nós, um grau de liberdade por nó, sem massa, seguindo as propriedades da condutância da interface.

As propriedades dos materiais em análise dependem da temperatura, conforme se pode verificar nas figuras 7 e 8. Na figura seguinte encontram-se representadas as propriedades térmicas do betão.

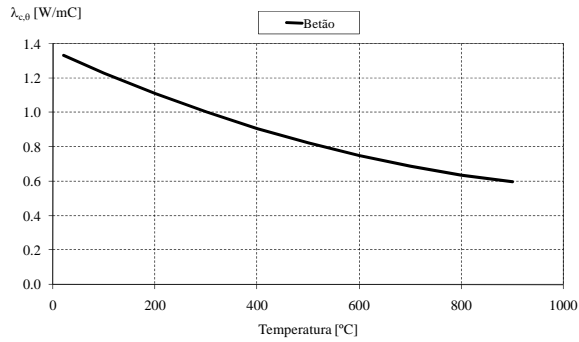
O Betão foi considerado de baixa resistência (C12/15), peso normal, com agregados de silício, considerado com humidade desprezável. Para a condutividade foi considerada a variação limite inferior, proposta no eurocódigo 2, [4].



a) Massa específica.



b) Calor específico.



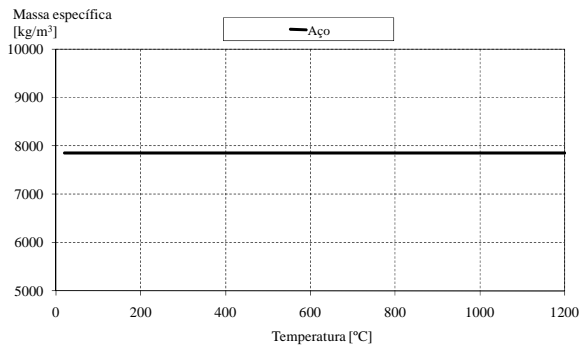
c) Condutividade.



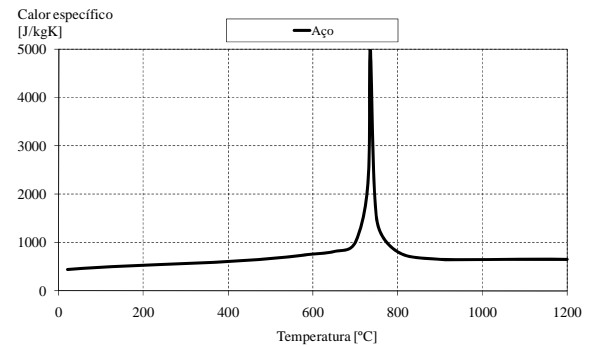
d) Material depois de ensaio destrutivo.

**Fig. 7.** Propriedades térmicas do betão.

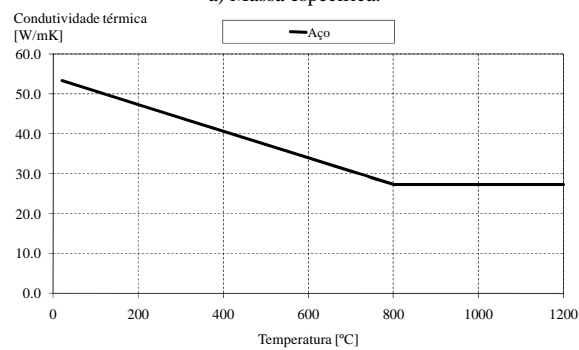
As propriedades térmicas do aço foram consideradas independentes da qualidade, [5]. O aço S275JR foi utilizado para o perfil metálico, enquanto que o aço com referência B500s foi considerado para o reforço do betão.



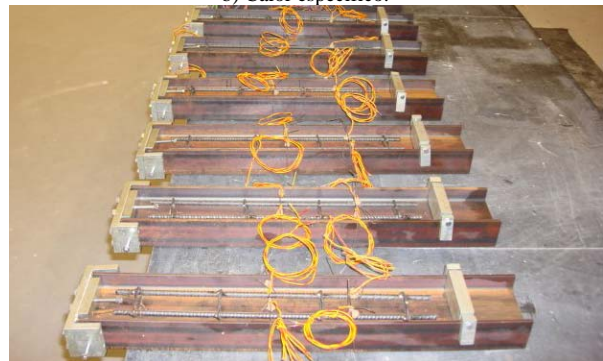
a) Massa específica.



b) Calor específico.



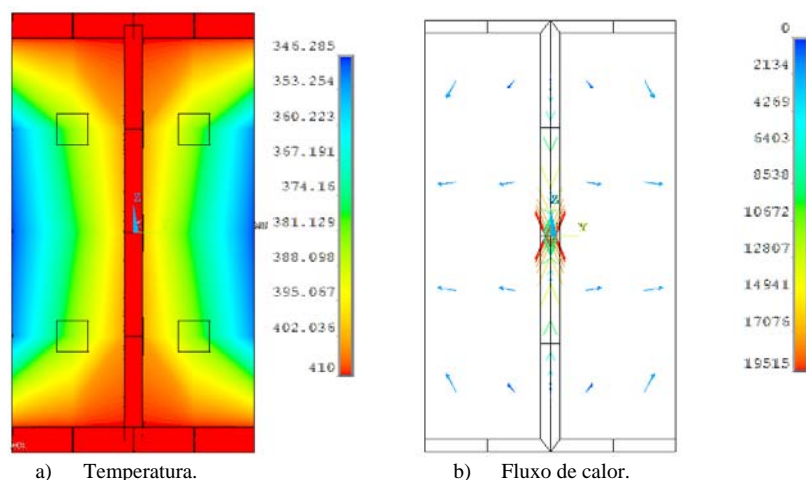
c) Condutividade.



**Fig. 8.** Propriedades térmicas do aço.

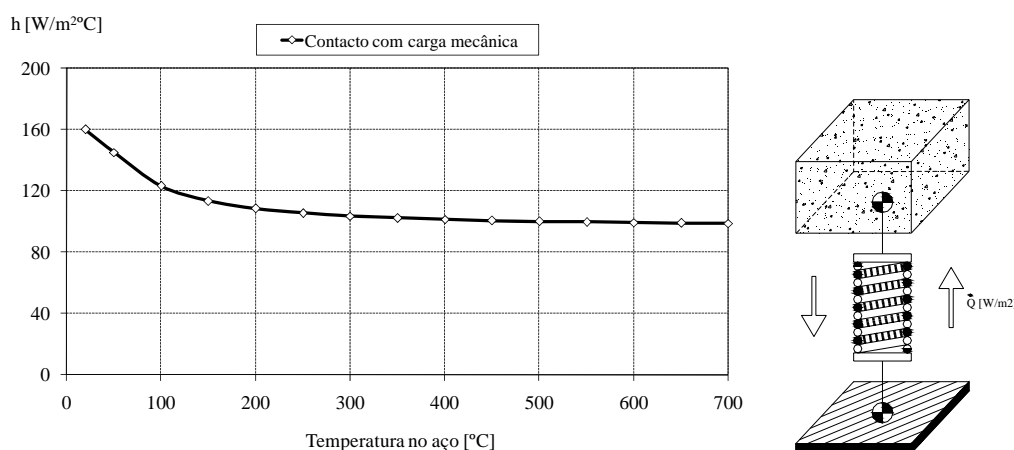


Na figura 9 encontra-se a representação do campo de temperaturas e do fluxo de calor, correspondente ao último instante de tempo. De acordo com os resultados, o aquecimento dos blocos de betão é feito de dentro para fora, através da condução de calor pelo perfil de aço.



**Fig. 9.** Resultados numéricos para instante final.

De acordo com o trabalho de Godjel, [2], a condutância da interface depende do estado de carregamento existente, variando com a temperatura de acordo com a figura 10.



**Fig. 10.** Variação da condutância para tubos circulares, [2].

A variação da condutância com a temperatura poderá estar relacionada com o processo termodinâmico presente nos primeiros instantes do aquecimento. Assumindo que a condutância de contacto permanece inalterada com a temperatura, a condutância relacionada com a substância de separação, existente nas zonas de “vazios”, tende a diminuir para assumir um valor constante, depois de se processar o fenómeno de evaporação da humidade e de criação de vapor, com valores de condutividade térmica normalmente inferiores.

### 3.2 Optimização

O processo de optimização foi utilizado para determinar o valor óptimo da característica da interface entre os dois materiais.

A condutância foi definida como variável de projecto, independente. Os limites inferiores e superiores são definidos em função do valor esperado, funcionando com funções de constrangimento. Estes limites devem corresponder aos valores limites fisicamente admissíveis [50,150]. A variação limite da variável de projecto foi limitada a 25 % do intervalo de valores admissíveis, para cada iteração.

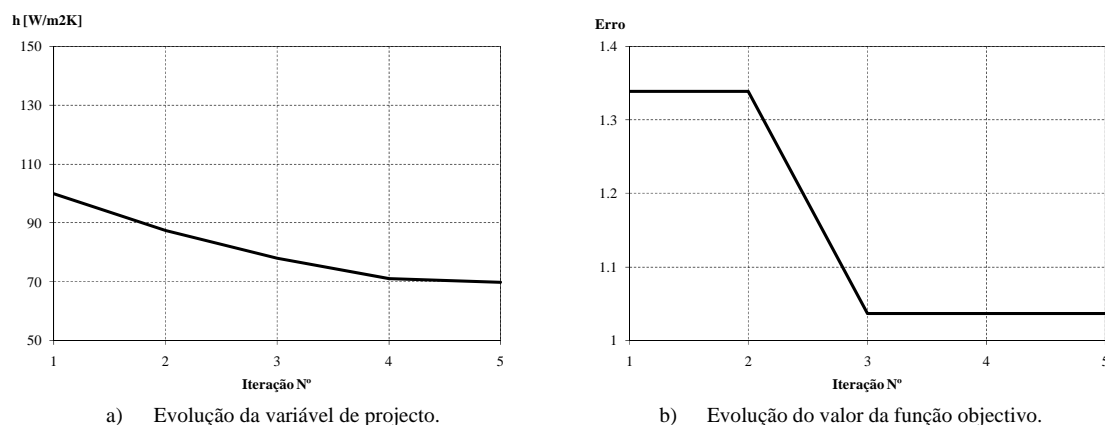
As temperaturas nos nós do modelo foram definidas como variáveis de estado, ou dependentes, sendo tipicamente função da variável de projecto.

A função objectivo foi definida no tempo e no espaço, através da minimização do erro relativo entre o valor pontual da temperatura numérica e o valor da temperatura medida experimentalmente, durante os ensaios, ver equação 1. A variável de estado que serve para comparação com os valores experimentais foi considerada em 6 instantes de tempo, com intervalo de 1200 [s] e no local correspondente a WTS1, WTS2, PTC1 e PTC2.

$$OBJ = Error = Min \left( \sum_{t=t_i}^{t_f} \left[ \frac{(T_t^{num} - T_t^{exp})}{T_t^{exp}} \right]^2 \right) \quad (1)$$

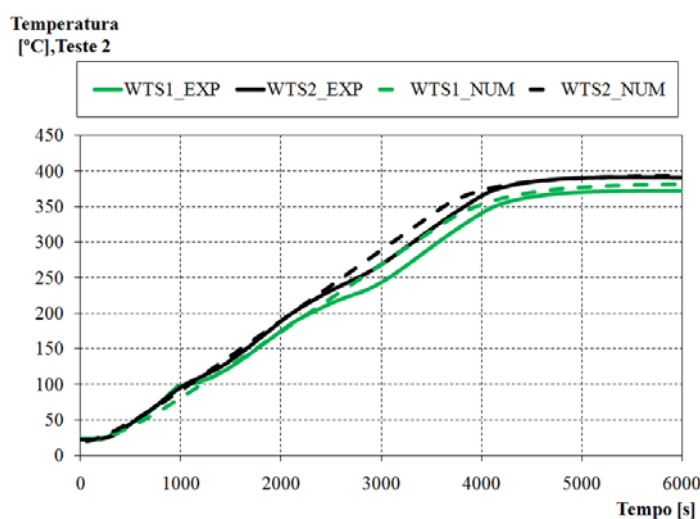
Foi utilizado um método de optimização de primeira ordem, baseado no cálculo de sensibilidades, com recurso a uma série de ciclos de análise, avaliação e modificação, com o objectivo de minimizar o erro relativo entre as temperaturas medidas e as determinadas pelo método dos elementos finitos. Para cada iteração deste processo são determinados os gradientes das variáveis dependentes em relação à variável de projecto, possibilitando a determinação da direcção de procura adequada. O problema converge quando a última solução é comparada com a anterior e com a melhor das soluções obtidas, tendo em consideração a tolerância definida para a solução objectivo, neste caso igual a 0,001%.

Durante o processo de optimização foi registada a variação do valor da condutância e do valor do erro, verificando-se uma convergência para o valor óptimo, através de uma diminuição monótona, conforme se pode verificar na figura 11.



**Fig. 11.** Resultados numéricos do processo de optimização.

A solução determinada em cada iteração do processo verifica as condições do problema, sendo a solução óptima correspondente às condições da última iteração. Na figura 12 encontra-se representada a comparação da evolução da temperatura em dois pontos singulares, WTS1 e WTS2, durante o processo de aquecimento.



**Fig. 12.** Comparação dos resultados numéricos e experimentais para o teste 2.

### **3. Conclusões**

Foi efectuado um estudo numérico para determinação da condutância da interface de contacto, partindo de um conjunto de ensaios experimentais efectuados para estudar o comportamento mecânico da interface entre o aço e betão a temperaturas elevadas.

Foi efectuado uma análise não linear para determinação da evolução da temperatura, utilizando um processo de optimização de primeira ordem, com recurso a um processo iterativo de análise, avaliação e modificação. A função objectivo foi definida em função dos valores de temperatura, medidos experimentalmente e determinados numericamente.

O valor da condutância, determinada numericamente, aproxima-se dos valores determinados por Ghojel e valida o modelo numérico em relação aos resultados experimentais.

### **Referências**

1. M. M. Yovanovich, New contact and gap correlations for conforming rough surfaces, *AIAA 16<sup>th</sup> Thermophysics Conference*, Palo Alto - CA, June 1981.
2. 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.
3. Ansys INC; “ANSYS Academic version”, Release 10.0, *Help System*, 2006.
4. CEN; “EN 1992-1-2, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design”; December 2004.
5. CEN; EN 1993-1-2; Eurocode 3, Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, April 2005.