

MEDIÇÃO E VALIDAÇÃO DA TEMPERATURA CRÍTICA EM ELEMENTOS PARCIALMENTE EMBEBIDOS COM BETÃO SOB ACÇÃO DO FOGO

Paulo A. G. Piloto^{1*}, Ana B. R. Gavilán² e Luís M. R. Mesquita¹

1: Departamento de Mecânica Aplicada *IDMEC
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
Campus de Santa Apolónia, ap. 1134, 5301-857, Bragança, Portugal
e-mail: {ppiloto, lmesquita}@ipb.pt, web: <http://www.ipb.pt>

2: Departamento de Mecánica
Escuela Politecnica Superior
Universidad de Salamanca
Campus Viriato, Avda. Cardenal Cisneros, 34, 49022- ZAMORA, España
e-mail: aramos@usal.es, web: <http://www.usal.es>

Palavras-chave: Temperatura crítica, Resistência ao fogo, Elementos mistos aço betão

Resumo. *Neste trabalho são apresentados resultados de ensaios realizados sob acção do fogo em elementos mistos de aço e betão, constituídos por perfis laminados, parcialmente revestidos com betão armado. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma europeia de ensaios de resistência ao fogo EN1363 parte 1. Os elementos foram ensaiados à flexão sob acção da curva de incêndio padrão ISO834. A temperatura crítica e a resistência ao fogo foram determinadas para o estado limite último de doze elementos, para três graus de utilização (40, 60 e 80%) e para diferentes configurações dos estribos (soldados e não soldados). Foi utilizado um modelo de elementos finitos para validar a temperatura medida nos diferentes materiais (aço do perfil, betão e reforço) e o deslocamento sofrido pelo elemento. O modelo termo-mecânico foi comparado com os ensaios realizados, utilizando elementos tridimensionais e elementos de interface para simular a transferência de calor e a adesão entre os blocos de betão armado e o perfil metálico. Os resultados numéricos confirmam as medições experimentais em todas as vertentes, quando comparados deslocamentos e temperaturas.*

1. INTRODUÇÃO

Os elementos em aço parcialmente revestidos com betão apresentam uma solução mista com maior rigidez e com maior resistência ao fogo, quando comparados com soluções metálicas. Estes elementos são constituídos por um perfil em aço laminado ou soldado e com betão armado entre as almas do perfil. O betão armado será responsável pelo aumento das características mencionadas e em particular pelo melhor desempenho em condições de incêndio.

Para avaliar a resistência ao fogo de vigas parcialmente embebidas com betão, foram realizados 12 ensaios à flexão, para diferentes graus de utilização (40, 60 e 80% do valor do momento plástico à temperatura ambiente) e para duas condições de ligação mecânica dos estribos à alma do perfil (soldados e não soldados). Os ensaios foram realizados num forno de resistência ao fogo de acordo com EN1631 [1]. Os resultados permitiram determinar o valor da temperatura crítica, independentemente do Estado Limite Último (ELU) atingido por cada elemento. O método de ensaio permite quantificar a capacidade resistente do elemento quando submetido ao fogo, utilizando um critério específico para definir o ELU. O valor da resistência ao fogo foi determinado no domínio do tempo ($t_{fi,d}$ – valor de resistência ao fogo em minutos completos) e no domínio da temperatura ($\theta_{cr,d}$ – temperatura crítica).

Para validar os ensaios experimentais, foi utilizado um modelo de elementos finitos tridimensional Ansys [2], com elementos de interface para simular o contacto entre os dois tipos de materiais (aço e betão). A evolução da temperatura e dos deslocamentos foi determinada numericamente com o programa. Os resultados numéricos validam as medições efectuadas.

2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios foram realizados no laboratório do Instituto Politécnico de Bragança, utilizando um forno de resistência e um pórtico de reacção, ver figura 1. Os elementos parcialmente embebidos com betão foram ensaiados à flexão, na posição vertical. O valor da força foi mantido constante durante a realização de cada ensaio, utilizando a curva de incêndio padrão ISO834, [3].

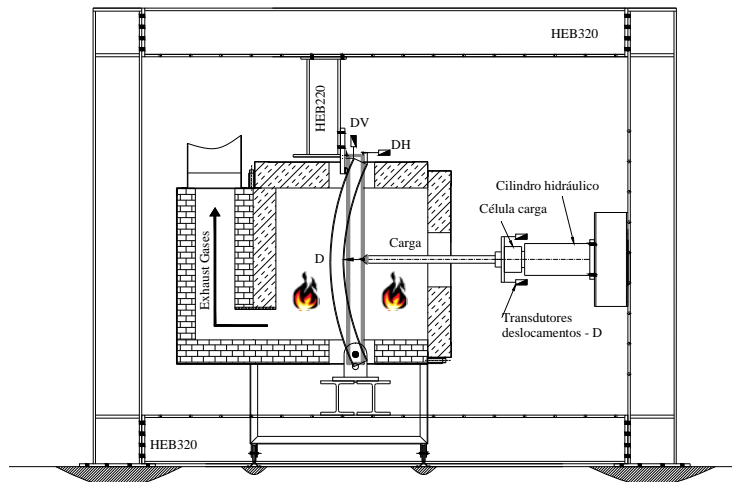


Figura 1. Esquema utilizado nos ensaios de resistência ao fogo.

Os ensaios tiveram duração distinta, em função da capacidade demonstrada pelo elemento para manter a carga.

Na figura 2 está representada a posição do elemento dentro do forno. A distância entre apoios “Ls” foi considerada igual a 1.21 m, o comprimento de exposição ao fogo “Lf” foi 1.0 m e o comprimento total do elemento “Lt” igual a 1.37 m. O apoio inferior apresenta restrições ao deslocamento nas direcções Z/Y e restrições à rotação nas direcções Z/X. O apoio superior apresenta restrições ao deslocamento nas direcções Z/Y e restrições à rotação na direcção X.

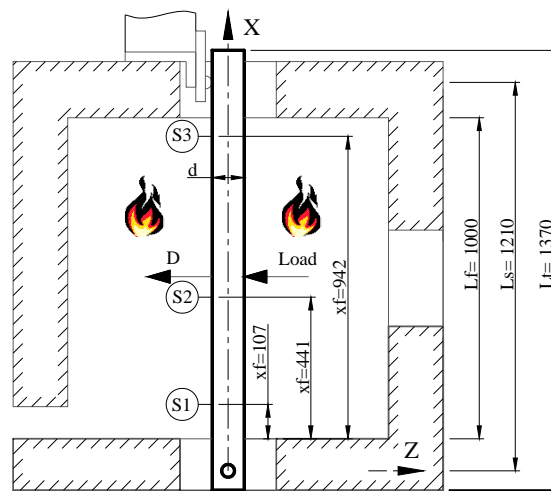


Figura 2. Posição do elemento e identificação das secções S1-3 (xf [mm]).

Foram definidas 3 secções para controlo da temperatura em cada elemento, utilizando cinco termopares tipo K para as secções S1 / S3 e seis termopares para a secção S2. Cada secção está identificada através das coordenadas locais “xf”. Alguns termopares foram soldados directamente no perfil (Si-FS, Si-OS, Si-WS) e nos reforços (Si-RS), enquanto que outros

foram soldados em pequenas porcas de aço, embebidas nas posições definidas para medição da temperatura do betão (Si-IC e Si-OC), ver figura 3. A aquisição da temperatura em cada ponto (junção) foi efectuada com uma frequência de 2 [Hz].

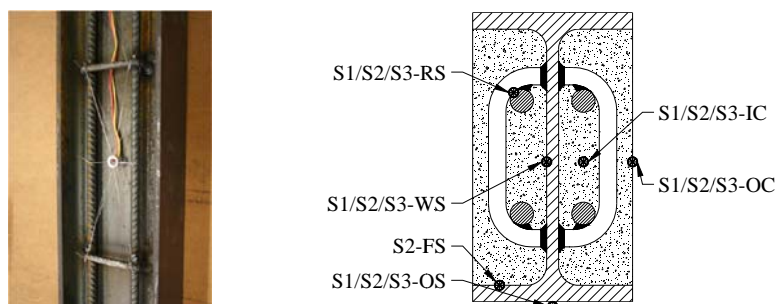


Figura 3. Posição dos termopares nas secções S1/S2/S3.

O forno possui uma potência máxima de 360 [kW] e utiliza quatro queimadores com funcionamento a gás. O controlo da evolução da temperatura dentro do forno é efectuada com auxílio de um termopar de placa. A temperatura do forno foi medida com uma frequência de 0.5[Hz].

Os elementos de viga foram construídos com perfis IPE100 em aço S275, parcialmente revestidos com betão de densidade normal C20/25, utilizando agregados de silício. Foram utilizadas barras de reforço longitudinal com diâmetro de 8 mm e estribos com barras de diâmetro de 6 mm, ambos com qualidade B500. A secção destes elementos está representada na figura 4, considerando os dois tipos de ligação mecânica para os estribos.

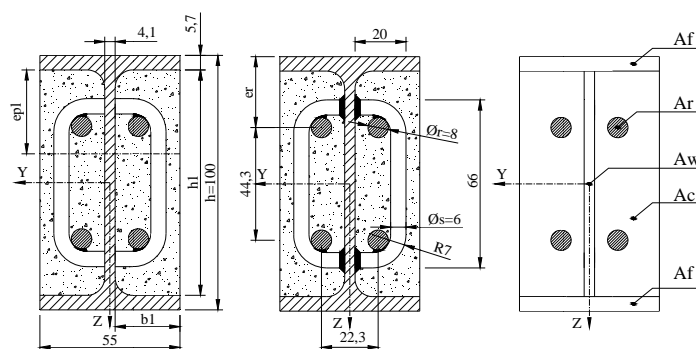


Figura 4. Dimensões da secção recta [mm] e ligações dos estribos.

Os estribos foram espaçados de $S=167$ mm ao longo do comprimento do elemento, ver figura 5. Estes elementos foram betonados no laboratório em duas fases, sem necessidade de utilização de cofragens, com um intervalo de 7 dias. Os ensaios foram realizados 60 dias após a primeira betonagem.

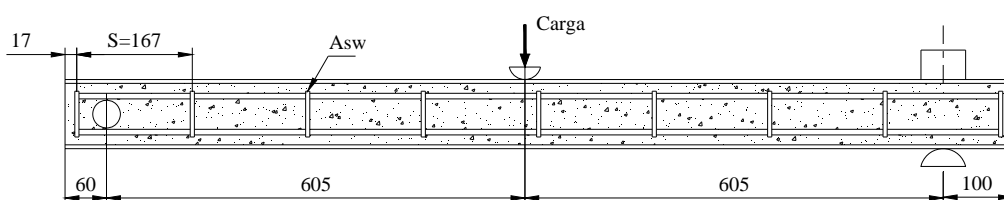


Figura 5. Corte longitudinal das vigas.

A superfície dos materiais não teve qualquer tratamento especial, devendo ser considerada no estado normal dos fornecedores. Os reforços foram soldados aos estribos e à alma do perfil pelo processo MAG (caso W), e atados com arame aos estribos (caso NW).

Foram ainda determinadas as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos (aço do perfil, aço do reforço e betão). Estes ensaios foram realizados à tracção e à compressão. Os resultados estão representados na tabela 1, para valores da tensão de cedência do aço, f_y , e resistência do betão à compressão, $f_{ck,cube}$.

| Material | Tensão de cedência | Tensão última tracção / compressão |
|-----------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| ReH [MPa] (f_y) Perfil | 302.466±5.749 | 431.252±5.020 |
| ReH [MPa] (f_y) Reforço | 531.508±7.908 | 626.574±11.539 |
| $f_{ck,cube}$ [MPa] betão | - | 21.45±1.03 |

Tabela 1. Propriedades mecânicas dos materiais ensaiados.

As propriedades térmicas mais significativas dos materiais (condutividade, calor específico) não foram medidas, contudo o valor da condutância térmica na interface aço – betão foi determinada em 80 kW/m^2 , [4].

Os ensaios foram preparados de acordo com as condições apresentadas na tabela 2. Foram definidas 4 séries de três ensaios, realizados nas mesmas condições. As imperfeições laterais foram medidas com feixe laser, com amplitude máxima a meio vão (imperfeição máxima).

| Série | Identificação elemento | Estribos [W / NW] | Ação térmica | Ação mecânica [% M_{pl}] | Imperfeição Máxima [-] |
|-------|---------------------------|----------------------|--------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 1 | B/1.2-01 | W | ISO834 | 40% | L/1210 |
| | B/1.2-02 | W | ISO834 | 40% | L/1210 |
| | B/1.2-03 | W | ISO834 | 40% | L/1210 |
| 2 | B/1.2-04 | W | ISO834 | 80% | L/1210 |
| | B/1.2-05 | W | ISO834 | 80% | - |
| | B/1.2-06 | W | ISO834 | 80% | L/2420 |
| 3 | B/1.2-07 | NW | ISO834 | 80% | L/1210 |
| | B/1.2-08 | NW | ISO834 | 80% | L/807 |
| | B/1.2-09 | NW | ISO834 | 80% | L/2420 |
| 4 | B/1.2-10 | W | ISO834 | 60% | L/1210 |
| | B/1.2-11 | W | ISO834 | 60% | L/1210 |
| | B/1.2-12 | W | ISO834 | 60% | L/807 |

Tabela 2. Identificação dos elementos ensaiados.

As séries 2 e 3 permitem comparar o efeito da ligação dos estribos, enquanto que os ensaios

das séries 1,2 e 4 permitem comparar a resistência ao fogo deste elementos, para diferentes graus de utilização.

2.1. Critério de resistência ao fogo

O critério utilizado para definir o Estado Limite Último (ELU) foi determinado de acordo com a norma de ensaio [1]. Este critério permite classificar a capacidade resistente do elemento (classificação R), independentemente do modo de colapso atingido. A resistência ao fogo foi definida como o tempo transcorrido desde o instante em que iniciou o aquecimento e o instante em que o elemento deixou de ter capacidade para suportar a carga imposta. Este critério foi definido com base nas medições efectuadas para o deslocamento máximo verificado no elemento de viga (D) e nos cálculos efectuados para a taxa de variação do deslocamento (dD/dt). O ELU foi considerado quando ambos os parâmetros (D e dD/dt) excederam o valor limite, eq. 1.

$$\begin{aligned} D &= L^2/400 d \quad [mm] \\ dD/dt &= L^2/9000 d \quad [mm/min] \quad (D \geq L/30) \end{aligned} \quad (1)$$

A aplicação deste critério permite determinar o tempo de resistência ao fogo ($t_{fi,d}$) e o valor da temperatura crítica do elemento ($\theta_{cr,d}$).

2.2. Resultado da temperatura

A curva nominal de incêndio foi utilizada para provocar o aquecimento dos elementos. As temperaturas foram registadas nas 3 secções distintas, S1-S3, para verificar a homogeneidade deste processo. A máxima diferença de temperatura crítica registada entre as secções e a temperatura média do elemento foi inferior a 3.2% para os ensaios da série 1. Para os restantes ensaios, séries 2-4, este resultado foi inferior a 5.1, 6.3 e 11.2%, respectivamente. Estes resultados permitem concluir que a variação da temperatura no comprimento do elemento não é muito significativa.

A temperatura registada em cada secção não é uniforme, verificando-se uma diferença de 150 °C entre os valores medidos no exterior da secção e os valores registados no interior, definindo duas evoluções distintas, conforme se pode comprovar nos resultados das figuras 6-9. Nestas figuras estão representados os valores das temperaturas registadas pelos termopares da secção S2. A temperatura registada no exterior é superior ao valor da temperatura registada no interior. A oscilação inicial no perfil da temperatura é proporcionada pelo nível de humidade existente no betão.

O ensaio B/1.2-09 apresentou maiores fissuras no betão, comparativamente com os ensaios realizados na série 2, motivo pelo qual se registou maior valor da temperatura no interior do elemento.

Nas secções S1 e S3 foram registadas evoluções de temperatura semelhante, mas com valores inferiores. Esta pequena variação está relacionada com o isolamento utilizado nos apoios.

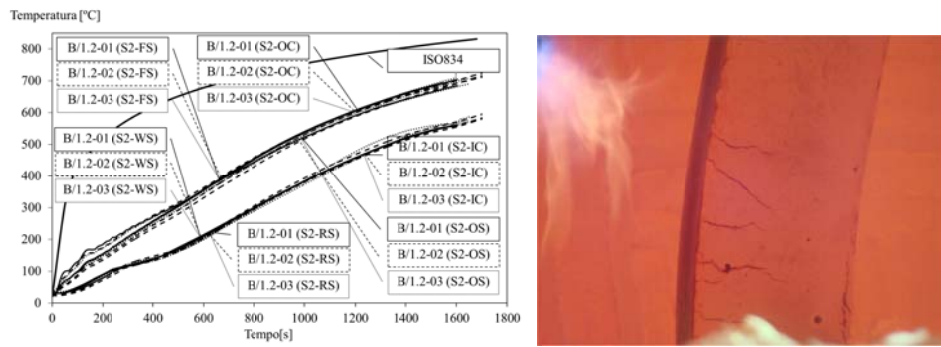


Figura 6. Evolução da temperatura na secção S2, série 1.

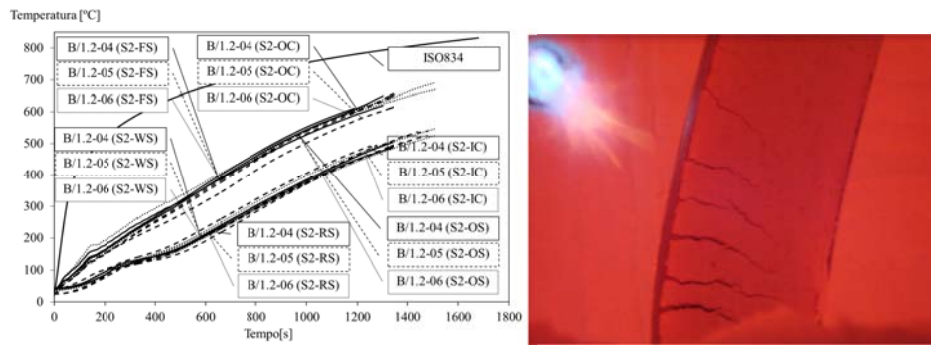


Figura 7. Evolução da temperatura na secção S2, série 2.

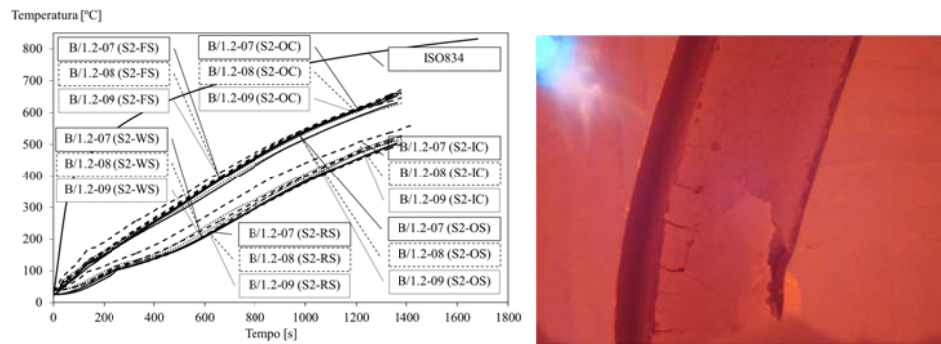


Figura 8. Evolução da temperatura na secção S2, série 3.

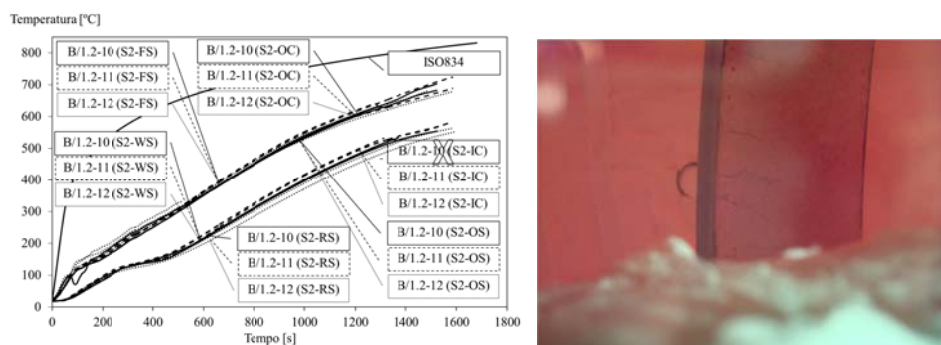


Figura 9. Evolução da temperatura na secção S2, série 4.

A temperatura crítica foi determinada para cada para cada material, utilizando um valor médio ponderado com influência da área de cada registro. Os valores T_{is} , T_{ic} e T_{ir} representam o valor da temperatura no perfil, no betão e no reforço, definidos para cada secção Si ($i=1,2,3$), e foram determinados de acordo com eq. 2.

$$T_{is} = (2Af(SiOS) + Aw(SiWS)) / (2Af + Aw)$$

$$T_{ic} = [1/4Ac(SiIC) + 3/8Ac(SiIC + SiOC) + 3/8Ac(SiIC + SiOS)] / (Ac) \quad (2)$$

$$T_{ir} = SiRS$$

Onde Af representa o valor da área do banzo, Aw representa o valor da área da alma, Ac representa o valor da área do betão, Ar o valor da área do reforço e At representa o valor da área total da secção recta, ver figura 3.

A temperatura crítica de cada secção é determinada através da eq. 3 e a temperatura crítica do elemento, $\theta_{cr,d}$, obtida pela média ponderada do valor da temperatura crítica de cada secção, eq. 4.

$$TSi = [T_{is}(Aw + 2Af) + T_{ic}(Ac) + T_{ir}(Ar)] / At \quad (3)$$

$$\theta_{cr,d} = [TS1 + 2TS2 + TS3] / 4 \quad (4)$$

Na tabela 3 estão representados os valores das temperaturas críticas para os materiais, secções e para o elemento. Foi utilizado o valor médio da temperatura crítica para cada material, determinado em cada série de ensaios.

| | | | | | |
|-----------------|-------------|----------|----------|----------|---------|
| Série 1 | Secção (Si) | Tis [°C] | Tic [°C] | Tir [°C] | TSi[°C] |
| | TS1 | 616.8 | 591 | 548.1 | 594.5 |
| | TS2 | 630.6 | 595.1 | 546.4 | 599.3 |
| | TS3 | 601.4 | 571.8 | 542.8 | 579.0 |
| $\theta_{cr,d}$ | média | 619.9 | 588.3 | 545.9 | 593.0 |
| Série 2 | Secção (Si) | Tis [°C] | Tic [°C] | Tir [°C] | TSi[°C] |
| | TS1 | 494.1 | 465.9 | 398.6 | 465.8 |
| | TS2 | 528.4 | 490.4 | 422.8 | 492.1 |
| | TS3 | 506.8 | 479.1 | 440.4 | 482.9 |
| $\theta_{cr,d}$ | média | 514.4 | 481.5 | 421.2 | 483.2 |
| Série 3 | Secção (Si) | Tis [°C] | Tic [°C] | Tir [°C] | TSi[°C] |
| | TS1 | 506.0 | 484.9 | 412.8 | 488.9 |
| | TS2 | 524.1 | 497.0 | 423.7 | 501.2 |
| | TS3 | 498.3 | 467.1 | 435.3 | 476.3 |
| $\theta_{cr,d}$ | média | 513.1 | 486.5 | 423.9 | 492.1 |
| Série 4 | Secção (Si) | Tis [°C] | Tic [°C] | Tir [°C] | TSi[°C] |
| | TS1 | 547.3 | 534.0 | 473.2 | 533.1 |
| | TS2 | 576.2 | 555.2 | 491.2 | 555.7 |
| | TS3 | 514.8 | 487.3 | 446.6 | 490.6 |
| $\theta_{cr,d}$ | média | 553.6 | 532.9 | 475.6 | 533.8 |

Tabela 3. Temperatura crítica para cada série de resultados.

Na figura 10 estão representados os valores médios das temperaturas críticas dos materiais (T_s exp., T_c exp., T_r exp.) e dos elementos (PEB exp.), para as séries 1,2 e 4. A temperatura

crítica do reforço apresenta o menor valor da secção. A resistência ao fogo diminui com o aumento do grau de utilização.

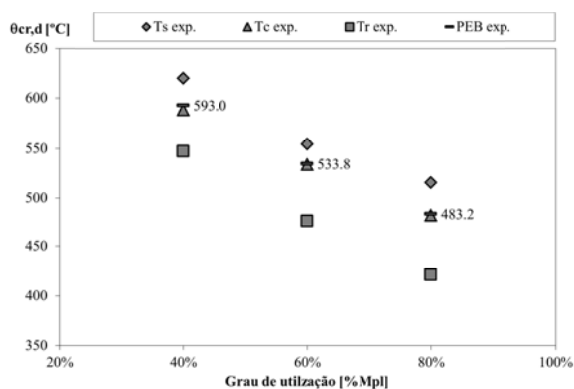


Figura 10. Temperatura crítica em função do grau de utilização.

2.3. Resultado do deslocamento

Esta secção analisa a variação do deslocamento transversal, registado na secção média de cada elemento, representando a medição desde o início do processo de aquecimento. Esta posição corresponde ao local onde o deslocamento máximo é esperado, sendo utilizada para caracterizar a resistência ao fogo.

O sistema de carga foi capaz de manter o valor da força quase constante, com variação máxima de $\pm 5\%$. Os valores das forças aplicadas em cada série correspondem a uma percentagem do momento plástico da secção (40% = 18252.9 N, 60% = 27379.3 N e 80% = 36505.8 N).

A taxa de variação do deslocamento foi calculada a partir das medições do deslocamento transversal, durante o período do ensaio.

O sistema de aquisição, utilizado para a medição do deslocamento e da força, utilizou uma frequência de amostragem de 0.5 [Hz].

Nas figuras 11-14 está representada a medição do deslocamento transversal (D). Este valor aumenta de uma forma linear com a duração do incêndio, para pequenos valores de taxa de deslocamento (dD/dt). O critério do deslocamento, definido na eq. 1, foi o primeiro a ser ultrapassado. O critério da taxa de deslocamento foi determinante para calcular a resistência ao fogo, por influência da condição de aplicabilidade ($L/30$). A resistência ao fogo foi calculada quando ambos os critérios foram ultrapassados.

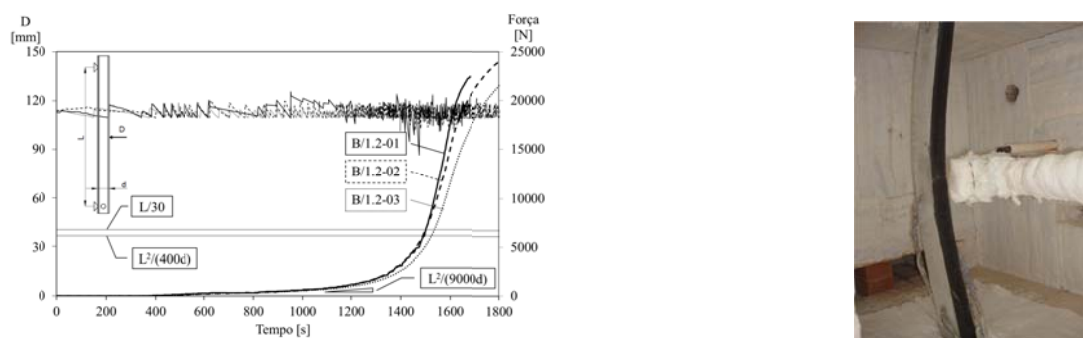


Figura 11 – Evolução do deslocamento na secção média, série 1.

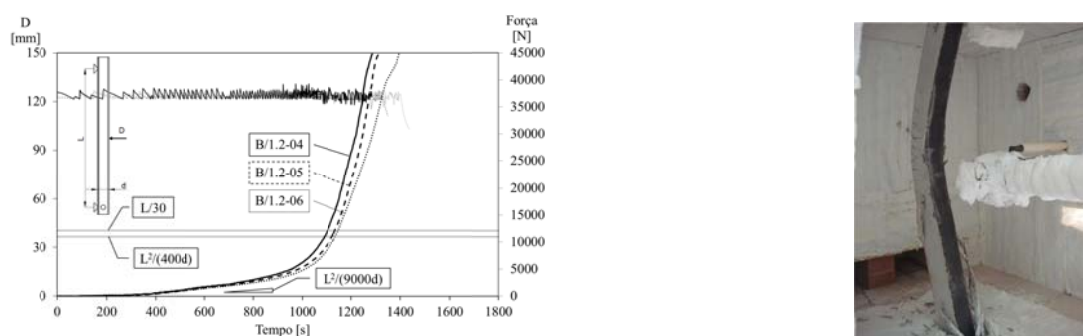


Figura 12 – Evolução do deslocamento na secção média, série 2.

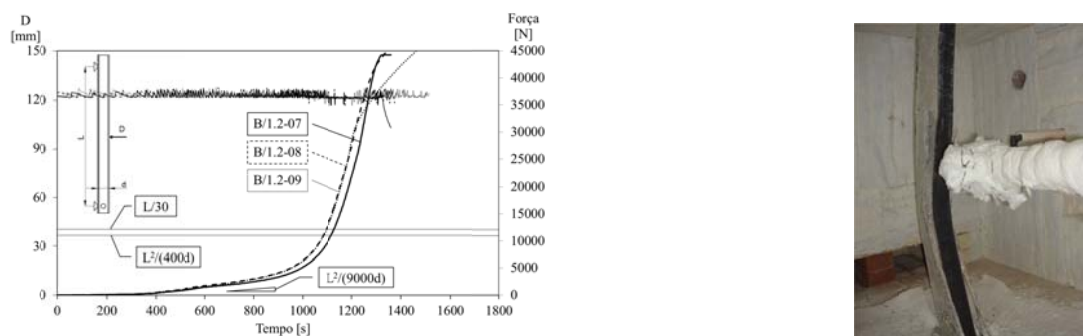


Figura 13 – Evolução do deslocamento na secção média, série 3.

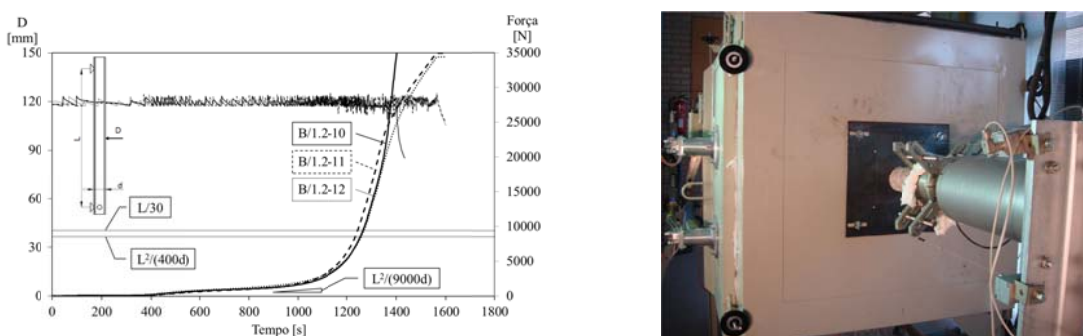


Figura 14 – Evolução do deslocamento na secção média, série 4.

Na tabela 4 estão representados os valores da resistência ao fogo para cada ensaio realizado.

| Série | Identificação elemento | Resistência ao fogo, $t_{f,d}$ [min] |
|-------|------------------------|--------------------------------------|
| 1 | B/1.2-01 | 25 |
| | B/1.2-02 | 25 |
| | B/1.2-03 | 25 |
| 2 | B/1.2-04 | 18 |
| | B/1.2-05 | 18 |
| | B/1.2-06 | 19 |
| 3 | B/1.2-07 | 18 |
| | B/1.2-08 | 18 |
| | B/1.2-09 | 18 |
| 4 | B/1.2-10 | 21 |
| | B/1.2-11 | 20 |
| | B/1.2-12 | 21 |

Tabela 4. Resistência ao fogo para cada série de resultados.

3. VALIDAÇÃO NUMÉRICA

Os ensaios experimentais foram validados com o programa de elementos finitos, ANSYS [2]. Foi utilizado um modelo térmico e um modelo mecânico para determinação da resistência ao fogo, utilizando elementos finitos distintos. Estes dois modelos estão desacoplados. Numa primeira fase foi efectuada uma análise térmica transiente não linear, para determinação da temperatura em todos os nós do modelo e numa segunda fase foi efectuada uma análise estrutural estática incremental (temperatura), com não linearidade geométrica e material, para determinação do deslocamento em todo o domínio.

3.1. Modelo numérico

O modelo térmico ANSYS foi definido com elementos SOLID70, COMBINE39 e LINK33, para representar o comportamento dos elementos mistos parcialmente embebidos com betão armado.

O elemento sólido (SOLID70) possui a capacidade de análise térmica tridimensional, possui oito nós, com um único grau de liberdade por nó (temperatura). Este elemento é utilizado para simular o comportamento térmico do perfil em aço e o comportamento térmico do betão, que se encontra embebido entre as almas do perfil. As funções de interpolação são lineares nas três direcções ortogonais e neste elemento foi utilizado um esquema de integração completa $2 \times 2 \times 2$.

O elemento de contacto (COMBINE39) é um elemento uniaxial, definido através de dois nós, com comportamento não linear generalizado (diferença de temperatura – fluxo de calor). Este elemento não possui massa nem capacidade para armazenar calor, servindo apenas para simular uma resistência térmica de contacto entre os dois materiais. Este contacto é reproduzido com um modelo de mola não linear, com ligação de um nó do perfil com um nó do betão. Neste modelo foi considerado um valor de condutância igual a $80 \text{ [kW/m}^2\text{]}$, conforme estudo realizado pelos autores, [4].

O elemento de barra (LINK33) é um elemento uniaxial com capacidade de condução de

calor entre os nós. Possui apenas um grau de liberdade por nó (temperatura). As funções de interpolações são lineares e utiliza um esquema de integração exacto.

Na figura 15 está representado um modelo da secção, a malha utilizada para o elemento de viga parcialmente embebido com betão e as condições fronteira.

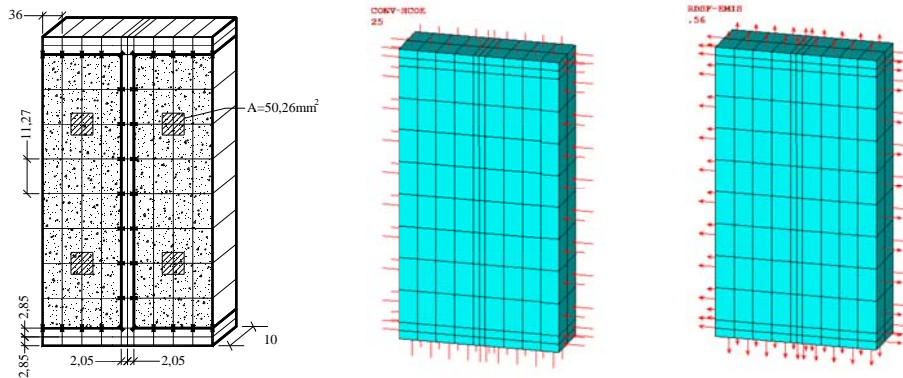


Figura 15 – Malha de elementos finitos e condições fronteira.

As condições fronteiras correspondem às acções definidas no EN1991-1-2 [5], com excepção para o valor da emissividade. Neste estudo foi considerado um valor de emissividade para o fogo de $\varepsilon_f=0.8$ e um critério de convergência, com uma tolerância de 0.1% para o fluxo de calor.

O modelo mecânico foi definido a partir do modelo térmico, modificando os elementos SOLID70, COMBINE39 e LINK33, pelos elementos SHELL181, SOLID65, COMBINE39 e LINK8, para representar o comportamento mecânico do aço do perfil, do betão, da adesão entre estes materiais e dos reforços (longitudinal e estribos), respectivamente, ver figura 16. Os nós intermédios dos elementos sólidos (SOLID70), utilizados no modelo térmico para simular o perfil, foram utilizados para definição dos elementos de casca no modelo mecânico (SHELL181).

O elemento SHELL181 é adequado para a análise de elementos de chapa fina e moderadamente espessa, possui quatro nós com seis graus de liberdade por nó (três translações e três rotações em cada eixo). Utiliza funções de interpolação lineares em cada direcção, com um esquema de integração completa (2x2, no plano) e um método de modos incompatíveis para aumentar a precisão em problemas dominados pelos estados de flexão no plano. Este último método elimina os problemas associados ao aumento de rigidez dos elementos para flexão no plano. Para este elemento foi utilizado um critério de plasticidade de von Mises, com endurecimento isotrópico multi-linear.

O elemento sólido SOLID65 possui oito nós com três graus de liberdade por nó (três translações em cada eixo). Possui funções de interpolação lineares e utiliza um esquema de integração completo (2x2x2). Para este elemento também foi utilizado um critério de plasticidade.

O elemento LINK8 foi utilizado para modelar o reforço longitudinal e os estribos. Possui comportamento uniaxial de tracção compressão, dois nós com três graus de liberdade em cada (três translações em cada eixo). Pode funcionar com comportamento plástico e grandes

deslocamentos. As funções de interpolação são lineares e é utilizado um esquema de integração exacto.

O elemento COMBINE39 foi utilizado para modelar a adesão entre o aço e o betão. Trata-se de um elemento com comportamento uniaxial, definido por dois nós, cada um com três graus de liberdade (três translações em cada eixo). Pode funcionar com comportamento plástico e grandes deslocamentos, associado a uma característica não linear de força versus deslocamento relativo entre nós. A área de contacto associada a este elemento foi calculada para definição da característica não linear da ligação dos nós do elemento de casca com os nós do elemento sólido. A adesão foi validada experimentalmente, através de ensaios realizados à temperatura ambiente e a uma temperatura elevada de 400 °C [8].

Os estribos foram distribuídos ao longo do comprimento do elemento, utilizando um modelo de estribos distribuídos, mantendo constante o quociente entre A_{sw}/S , ver figura 5. Este modelo distribuído permite representar o efeito do confinamento do betão e manter a resistência da secção ao esforço de corte.

A geometria do modelo foi definida com uma imperfeição longitudinal (amplitude máxima de uma sinusóide igual a $L/600$). Foram definidos as restrições adequadas aos apoios e imposta uma carga mecânica constante, correspondente ao grau de utilização. Foram ainda definidos incrementos de carga térmica (resultados da análise térmica), sobrepostos ao valor da carga mecânica. Estes incrementos possibilitaram a determinação da resistência ao fogo de cada elemento. Para cada simulação foi efectuada uma análise não linear estática incremental, com critério de convergência definido por uma tolerância de 5% para deslocamento, até se atingir o estado limite último.

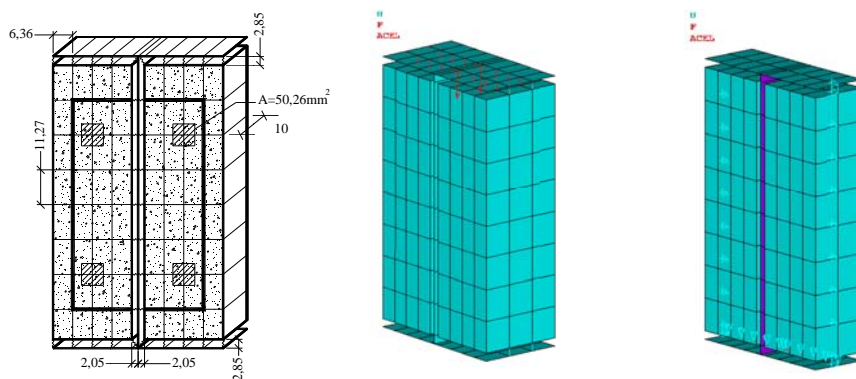


Figura 16 – Malha de elementos finitos e condições fronteira.

3.2. Propriedades dos materiais

Foram consideradas todas as propriedades térmicas e mecânicas necessárias para simular o comportamento transiente térmico e mecânico dos materiais, considerando a variação destas propriedades com a temperatura, de acordo com os modelos apresentados nos documentos de referência EN1993-1-2 [6], EN1992-1-2 [7].

3.3. Resultado da temperatura

A curva experimental de incêndio foi utilizada para determinar os resultados numéricos nas três secções definidas. Na figura 17 estão representados os resultados experimentais da evolução da temperatura nos seis pontos de medição da secção 2, correspondentes à série 1 e a respectiva validação numérica. Os resultados numéricos aproximam-se dos resultados experimentais, definindo duas evoluções distintas, confirmando a existência de uma diferença de temperatura na secção recta.

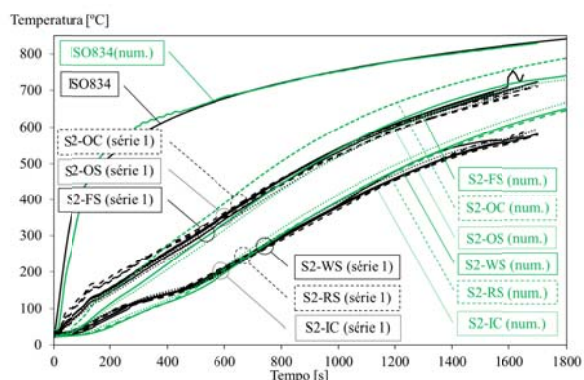


Figura 17 – Simulação térmica dos ensaios da série 1.

Estes resultados permitem validar a variação da temperatura na secção S2. Os resultados das secções S1 e S3 também foram validados.

A temperatura crítica foi determinada para cada material, utilizando um valor médio ponderado com a área de influência de cada registo, à semelhança dos resultados experimentais.

A temperatura crítica de cada secção é determinada através das eqs. 2-3 e a temperatura crítica do elemento, $\theta_{cr,d}$, obtida pela média ponderada do valor da temperatura crítica de cada secção, eq. 4, ver tabela 5.

| Série 1 | Secção (Si) | Tis [°C] | Tic [°C] | Tir [°C] | TSi[°C] |
|-----------------|-------------|----------|----------|----------|---------|
| | TS1 | 612.0 | 610.6 | 536.1 | 608.2 |
| | TS2 | 630.4 | 622.8 | 557.0 | 621.8 |
| | TS3 | 616.3 | 613.5 | 540.7 | 611.4 |
| $\theta_{cr,d}$ | média | 622.3 | 617.4 | 547.7 | 615.8 |
| Série 2 | Secção (Si) | Tis [°C] | Tic [°C] | Tir [°C] | TSi[°C] |
| | TS1 | 456.4 | 456.2 | 380.1 | 453.5 |
| | TS2 | 470.9 | 464.4 | 393.0 | 463.0 |
| | TS3 | 460.1 | 458.3 | 383.2 | 456.0 |
| $\theta_{cr,d}$ | média | 464.6 | 460.8 | 387.3 | 458.9 |
| Série 4 | Secção (Si) | Tis [°C] | Tic [°C] | Tir [°C] | TSi[°C] |
| | TS1 | 526.8 | 526.0 | 449.1 | 523.4 |
| | TS2 | 543.7 | 536.3 | 465.7 | 535.1 |
| | TS3 | 530.9 | 528.5 | 452.9 | 526.3 |
| $\theta_{cr,d}$ | média | 536.3 | 531.8 | 458.4 | 530.0 |

Tabela 5. Temperatura crítica para as séries 1,2 e 4.

Na figura 18 é feita a comparação dos valores médios das temperaturas críticas dos materiais e dos elementos, entre os resultados numéricos e experimentais, para as séries 1,2 e 4. A temperatura crítica do reforço continua a apresentar o menor valor da secção. A resistência ao fogo também diminui com o aumento do grau de utilização.

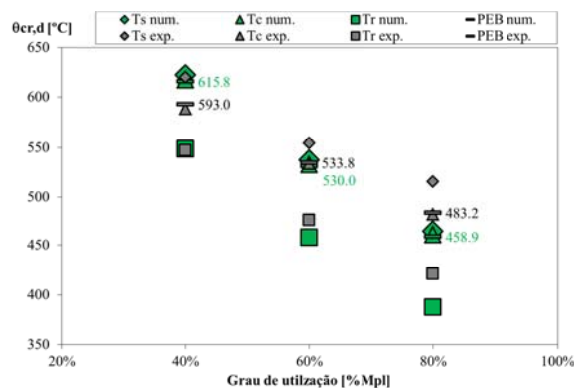


Figura 18. Temperatura crítica em função do grau de utilização.

A diferença da temperatura crítica, entre os resultados numéricos e experimentais, para os diferentes graus de utilização (40, 60, 80%), é inferior a 3.8, 0.7 e 5.0%, respectivamente.

3.4. Resultado do deslocamento

Foram efectuadas simulações para as séries 1,2 e 4, correspondentes aos graus de utilização de 40, 80 e 60%. Nestas séries foi assumida a ligação mecânica perfeita dos estribos com a alma do perfil.

Na figura 19 está representado o deslocamento transversal dos elementos, quando submetido às condições simuladas de incêndio. Este deslocamento foi registado na secção média de cada elemento, desde o início do processo de aquecimento.

Os resultados numéricos acompanham a evolução dos resultados experimentais, verificando-se uma pequena diferença no tempo de resistência. Esta pequena diferença é justificada pela pequena diferença verificada para o valor da temperatura crítica.

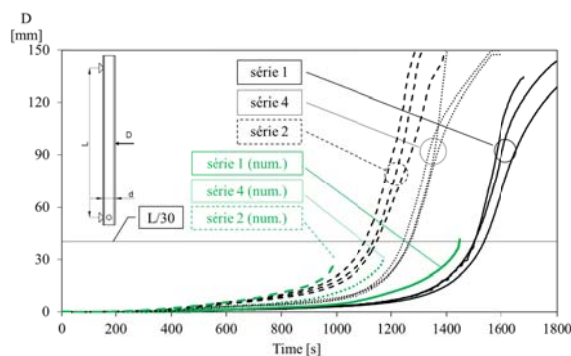


Figura 19 – Simulação termo-mecânica dos ensaios da série 1,2 e 4.

O tempo de resistência ao fogo, $t_{fi,d}$, foi estimado em minutos completos, para o ELU de cada simulação, ver tabela 6.

| Série | Identificação elemento | Resistência ao fogo, $t_{fi,d}$ [min] experimental | Resistência ao fogo, $t_{fi,d}$ [min] numérico |
|-------|------------------------|--|--|
| 1 | B/1.2-01 | 25 | 24 |
| | B/1.2-02 | 25 | |
| | B/1.2-03 | 25 | |
| 2 | B/1.2-04 | 18 | 16 |
| | B/1.2-05 | 18 | |
| | B/1.2-06 | 19 | |
| 4 | B/1.2-10 | 21 | 19 |
| | B/1.2-11 | 20 | |
| | B/1.2-12 | 21 | |

Tabela 6. Resistência ao fogo (experimental e numérico).

4. CONCLUSÕES

Foram apresentados resultados experimentais de doze ensaios de resistência ao fogo, realizados em elementos de aço parcialmente embebidos com betão reforçado. Os elementos foram submetidos a um estado de flexão, com carga concentrada a meio vão. Foram definidas quatro séries de três ensaios, para três graus de utilização (40, 60, e 80%) e para duas condições de ligação dos estribos (soldados e não soldados).

A resistência ao fogo depende do nível de carga utilizada, diminuindo progressivamente (25, 21, 18min) com o aumento do grau de utilização (40, 60, 80 %). As simulações numéricas também confirmam esta variação.

Verificaram-se dois tipos distintos de estado limite último. Para as séries 2 e 3 (80%), os elementos atingiram o estado limite último por instabilidade lateral torsional. Para as restantes séries (40 e 60%) os elementos atingiram o estado limite com formação de uma rótula plástica.

Não se verificou qualquer evidência do efeito da ligação mecânica dos estribos na resistência ao fogo. Em ambas as séries (2 e 3) foi determinado um valor de resistência ao fogo de 18 minutos, com excepção do ensaio B/1.2-06 com um valor de 19 minutos. Os ensaios da série 3 apresentaram maior separação dos blocos de betão, comparativamente aos ensaios da série 2.

As diferenças de temperatura entre as secções S1, S2, S3 e o valor da temperatura média do elemento foram inferiores a 10%, provando que o aquecimento foi homogéneo ao longo do comprimento exposição ao fogo e ainda a eficiência do isolamento nos apoios.

A temperatura do reforço representa o valor mínimo registado na secção.

Em todos os ensaios foram registadas evoluções da temperatura semelhantes, demonstrando que a temperatura não é uniforme na secção.

O comportamento mecânico do elemento foi determinado com o registo dos deslocamentos transversais, em particular o deslocamento a meio vão. Este deslocamento caracteriza-se por uma evolução linear, seguida de uma evolução não linear, com incremento significativo na taxa de deslocamento.

As simulações confirmam os resultados experimentais em todas as vertentes de comportamento (térmico e mecânico).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os perfis e os varões, fornecidos para a realização dos ensaios, às empresas: Arcelor – Mittal (Spain), J. Soares Correia (Portugal), Fepronor (Portugal) and Hierros Furquet (Spain).

REFERÊNCIAS

- [1] EN 1363-1, *Fire resistance tests, part 1- General requirement*; English version, 1999.
- [2] Ansys INC; *ANSYS Academic version*, Release 12.1, Help System, 2011.
- [3] ISO 834 -1, *Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements*”, 1999.
- [4] Piloto, P.A.G.; Ramos Gavilán, A.B.; Mesquita, L.M.R.; *Numerical analysis for thermal conductance of the interface between steel and concrete to composite structures at elevated temperatures*, proceedings of the *2nd Portuguese conference on Numerical methods applied to Thermodynamics and Fluid Mechanics* (in Portuguese), University of Aveiro, 8-9 May de 2008.
- [5] EN 1991-1-2; *Eurocode 1, Actions on structures – Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire*; November 2002.
- [6] EN 1993-1-2; *Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-2: General rules, Structural fire design*; April 2005.
- [7] EN 1992-1-2, *Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*; December 2004.
- [8] Piloto, P.A.G.; Ramos Gavilán, A.B.; Mesquita, L.M.R.; Barreira, Luisa; *Push-out tests for partially encased beams at elevated temperature*; proceedings of the “International Workshop of fire design of concrete structures, from modelling to structural performance”, session 6; ISBN 978-972-96524-2-4; University of Coimbra and International Federation for Structural Concrete, Coimbra, Portugal, 8-9 November 2007, abstracts edited in November 2007, papers edited in May 2008.

Métodos Numéricos em Engenharia 2011

Editores:

António Tadeu
Isabel Narra Figueiredo
Luís Filipe Menezes
Paulo Amado Mendes

Antonio Rodríguez-Ferran
Irene Arias
Jesús M. Blanco

Coimbra, Portugal



Métodos Numéricos em Engenharia 2011

Numerical Methods in Engineering 2011

Editores:

António Tadeu
Isabel Narra Figueiredo
Luís Filipe Menezes
Paulo Amado Mendes

Antonio Rodríguez-Ferran
Irene Arias
Jesús M. Blanco

Publicado por:

APM|AC

SEMNI

COMISSÕES / COMMITTEES

COMISSÃO DIRECTIVA / STEERING COMMITTEE

APMTAC

António Tadeu (DEC-FCTUC)
Isabel Narra Figueiredo (DM-FCTUC)
Luís Filipe Menezes (DEM-FCTUC)

SEMNI

Antonio Rodríguez-Ferran (UPC)
Irene Arias (UPC)
Jesús M. Blanco (UPV-EHU)

COMISSÃO ORGANIZADORA / ORGANIZING COMMITTEE

António Portugal (DEQ - FCTUC)
Antonio Rodríguez-Ferran (UPC)
António Tadeu (DEC-FCTUC)
Helder Araújo (DEEC- FCTUC)
Irene Arias (UPC)
Isabel Narra Figueiredo (DM- FCTUC)
Jesús M. Blanco (UPV-EHU)
Luís Filipe Menezes (DEM-FCTUC)
Paulo Amado Mendes (DEC-FCTUC / ITeCons)
Paulo Carvalho (DEI-FCTUC)
Pedro Vieira Alberto (DF - FCTUC)

COMISSÃO CIENTÍFICA / SCIENTIFIC COMMITTEE

| | |
|----------------------------------|--------------------------------------|
| Abel Santos (FEUP) | Fermín Navarrina (UDC) |
| Adélia Sequeira (IST) | Filipe Teixeira Dias (UA) |
| Adélio Mendes (DEQ-FCTUC) | Helder Rodrigues (IST) |
| Anca-Maria Toader (UL) | Ignasi Colominas (UDC) |
| António Gameiro (FCTUC) | João Rocha Almeida (UNL) |
| Antonio Huerta (UPC) | Jorge Henriques (DEI-FCTUC) |
| António Mendes (UBI) | José Augusto Mendes Ferreira (FCTUC) |
| António Mendes Ferreira (FEUP) | José Carlos Pereira (IST) |
| Benjamín Suárez (UPC) | José César de Sá (FEUP) |
| Carlos Alves (IST) | José Luís Alves (UM) |
| Carlos Fiolhais (FCTUC) | José Luis Pérez Aparicio (UPV) |
| Carlos Mota Soares (IST) | José Manuel Sousa (DEQ-FCTUC) |
| Carlos Pina (LNEC) | José María Goicolea (UPM) |
| Dinar Camotim (IST) | Juana Fortes (LNEC) |
| Eduardo Arantes e Oliveira (IST) | Luis O. Silva (IST) |
| Eduardo Borges Pires (IST) | Luís Simões da Silva (FCTUC) |
| Eduardo Conceição (DEQ-FCTUC) | Luísa Durães (DEQ-FCTUC) |
| Eliás Cueto (UNIZAR) | Manuel Casteleiro (UDC) |
| Ercília Sousa (FCTUC) | Miguel Cervera (UPC) |
| Eugenio Oñate (UPC) | Miguel Coimbra (FCUP) |

COMISSÃO CIENTÍFICA / SCIENTIFIC COMMITTEE (cont.)

| | |
|--------------------------------|---------------------------|
| Paulo Firme Martins (IST) | Raimundo Delgado (FEUP) |
| Paulo Lourenço (UM) | Raul Fanguero (UM) |
| Paulo Oliveira (UBI) | Renato Natal Jorge (FEUP) |
| Paulo Piloto (IPB) | Rui Brito (CNC/FCTUC) |
| Paulo Vila Real (UA) | Rui Faria (FEUP) |
| Pedro Lopes Simões (DEQ-FCTUC) | Rui Paiva (DEI-FCTUC) |
| Pedro Oliveira (UM) | Xavier Oliver (UPC) |
| Rafael Gallego (UGR) | |

ORGANIZADORES DE SESSÕES TEMÁTICAS / THEMATIC SESSIONS' ORGANIZERS

| | |
|-------------------------------------|------------------------------|
| Abel Santos | José Vieira de Lemos |
| Alex Barbat | Julia Novo |
| Álvaro Cunha | Julieta António |
| Anca-Maria Toader | Luís Godinho |
| Andrés Sáez | M ^a Angeles Pérez |
| António Ferreira | Manuel L. Romero |
| Antonio Huerta | Marian Gutiérrez |
| Begoña Calvo | Mário Teles Figueiredo |
| Carlos Alberto da Conceição António | Michael Stingl |
| Carlos Alves | Niels Bay |
| Cristian Barbarosie | Nuno Lopes |
| Dinar Camotim | Nuno Silvestre |
| Eliás Cueto | Nuno Simões |
| Ercília Sousa | Paulo Amado Mendes |
| Ernesto Costa | Paulo Avilez-Valente |
| Etelvina Javierre | Paulo de Carvalho |
| F. Chinesta | Paulo Fernandes |
| Felipe Gabaldón Castillo | Paulo Firme Martins |
| Francisco Fenandez de Vega | Paulo Piloto |
| Francisco J. Navarro | Pedro V. Alberto |
| François Jouve | Rafael Jiménez Rodriguez |
| Guillaume Houzeaux | Raimundo Delgado |
| Guillermo Rus Carlborg | Raquel Bailón |
| Jaime Ramis Soriano | Renato Natal Jorge |
| Javier de Frutos | Ricardo P. Dias |
| Jesús María Blanco | Robertt A. Fortes Valente |
| João Folgado | Rui Calçada |
| João Manuel R.S. Tavares | Rui Carneiro Barros |
| João Paulo C. Rodrigues | Rui Faria |
| João Xavier | Sílvia Barbeiro |
| Jorge Henriques | Xavier Oliver Olivella |
| José Luis Morales Guerrero | Xavier Roca |

SECRETARIADO / SECRETARIAT

Inês Ferreira (ITeCons)
Rita Faria (ITeCons)

MEDIÇÃO E VALIDAÇÃO DA TEMPERATURA CRÍTICA EM ELEMENTOS PARCIALMENTE EMBEBIDOS COM BETÃO SOB ACÇÃO DO FOGO

Paulo A. G. Piloto ^{1*}, Ana B. R. Gavilán ² e Luís M. R. Mesquita ¹

1: Departamento de Mecânica Aplicada *IDMEC
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança
Campus de Santa Apolónia, ap. 1134, 5301-857, Bragança, Portugal
e-mail: {ppiloto, lmesquita}@ipb.pt, web: <http://www.ipb.pt>

2: Departamento de Mecánica
Escuela Politécnica Superior
Universidad de Salamanca
Campus Viriato, Avda. Cardenal Cisneros, 34, 49022- ZAMORA, España
e-mail: aramos@usal.es, web: <http://www.usal.es>

Palavras-chave: Temperatura crítica, Resistência ao fogo, Elementos mistos aço betão

Resumo. Neste trabalho são apresentados resultados de ensaios realizados sob acção do fogo em elementos mistos de aço e betão, constituídos por perfis laminados, parcialmente revestidos com betão armado. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma europeia de ensaios de resistência ao fogo EN1363 parte 1. Os elementos foram ensaiados à flexão sob acção da curva de incêndio padrão ISO834. A temperatura crítica e a resistência ao fogo foram determinadas para o estado limite último de doze elementos, para três graus de utilização (40, 60 e 80%) e para diferentes configurações dos estribos (soldados e não soldados). Foi utilizado um modelo de elementos finitos para validar a temperatura medida nos diferentes materiais (aço do perfil, betão e reforço) e o deslocamento sofrido pelo elemento. O modelo termo-mecânico foi comparado com os ensaios realizados, utilizando elementos tridimensionais e elementos de interface para simular a transferência de calor e a adesão entre os blocos de betão armado e o perfil metálico. Os resultados numéricos confirmam as medições experimentais em todas as vertentes, quando comparados deslocamentos e temperaturas.