

DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFECTIVA DE TINTAS INTUMESCENTES

Mesquita, L. M. R.¹; Piloto, P.A.G.¹; Vaz, M.A.P.³; Pinto, T.¹

¹–ESTIG, Instituto Politécnico de Bragança

³–FEUP, Universidade do Porto



RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo experimental e numérico efectuado em placas de aço protegidas com tinta intumescente e sujeitas a um fluxo de calor radiante proveniente de um calorímetro de cone. A variação da temperatura em ambas as faces da placa é obtida através de termopares do tipo k soldados à placa. Os resultados permitem caracterizar o comportamento térmico do intumescente, estimar a expansão volumétrica e a taxa de perda de massa. O método das diferenças finitas é utilizado para resolver o problema inverso, determinar a condutividade térmica efectiva e a temperatura à superfície do intumescente.

1- INTRODUÇÃO

A temperatura crítica é uma das variáveis de projecto essenciais ao dimensionamento de elementos estruturais protegidos, dependendo principalmente das propriedades do material de protecção e da temperatura proveniente da acção do fogo.

Os materiais de protecção ao fogo podem ser caracterizados em não reactivos, dos quais os mais utilizados se encontram em forma de placas ou sprays, e reactivos, de que as tintas intumescentes são um exemplo. O comportamento de uma tinta intumescente é caracterizado por uma expansão volumétrica e por uma perda de massa, originando uma espuma carbonosa que pode atingir entre 5 a 200 vezes o seu volume original.

Este trabalho apresenta um estudo experimental e numérico baseado em placas de aço pintadas com tinta intumescente e sujeitas a um fluxo de calor radiante proveniente de um calorímetro. A

espessura da intumescência e a temperatura no aço são medidas experimentalmente e utilizadas no estudo numérico para determinar a temperatura na superfície da intumescência e a condutividade térmica efectiva.

2- ENSAIOS EXPERIMENTAIS

As placas de aço ensaiadas são de geometria quadrada, com 100 [mm] de lado e 4 [mm] de espessura, pintadas numa das faces com diferentes espessuras de protecção e foram testadas num calorímetro de cone segundo a norma E1354, [ASTM(2004)].



Fig 1 - Desenvolvimento da intumescência durante ensaio.

O valor médio da espessura seca dos três provetes, obtido através de 23 medições, é de 3010, 2680 e 2690 [µm] e o fluxo de calor imposto no calorímetro de cone é de 75, 25 e 25 [kW/m²], para o teste1, teste2 e teste3, respectivamente.

A Fig. 2 apresenta a perda de massa das amostras ensaiadas. Verifica-se que a perda de massa tem, aproximadamente, uma dependência linear com o tempo, apresentando o teste 1 uma perda de massa superior, 41.5 %, comparado com os restantes, 11.5%.

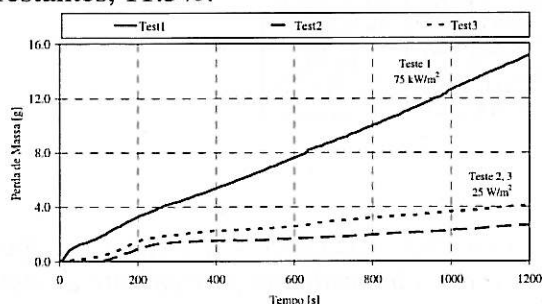


Fig 2 - Perda de massa ao longo do tempo.

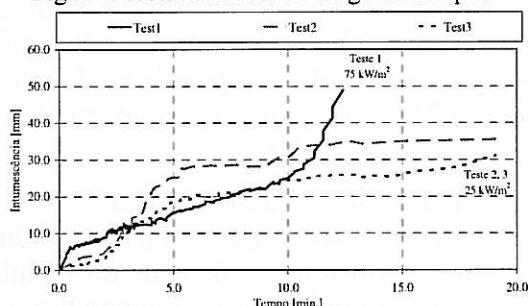


Fig 3 - Variação da espessura do intumescente e perfil da intumescência do teste 1.

Utilizando técnicas de processamento de imagem, sobre registos efectuados ao longo do ensaio, estimou-se a variação da espessura do intumescente ao longo do tempo, ver a Fig. 3. Os perfis da temperatura, medidos através dos termopares, na interface da tinta com a superfície superior e na superfície inferior da placa, são apresentados na Fig. 4.

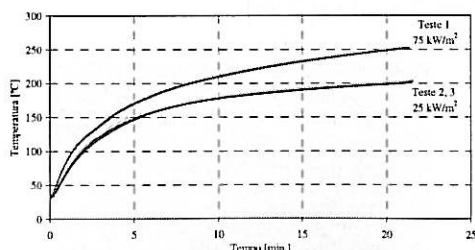


Fig 4 - Evolução das temperaturas nas superfícies superior e inferior da placa de aço.

3- CONDUTIVIDADE TÉRMICA EFECTIVA DO INTUMESCENTE

O desenvolvimento da intumescência é analisado como um problema unidimensional de condução de calor, em que o fluxo de calor se propaga através de uma camada única de protecção, ver figura 5.

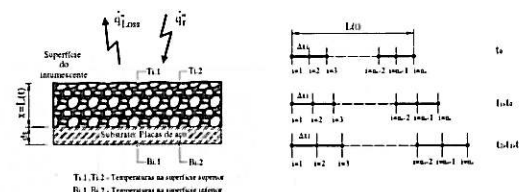


Fig 5 - Modelo unidimensional de condução de calor. Discretização espacial por DF.

A equação diferencial do problema é:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = k_{eff} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \quad 0 < x < L(t) \quad (1)$$

As condições de fronteira consideradas no domínio do intumescente são:

$$k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L(t)} = \quad (2)$$

$$\varepsilon \dot{q}_r - h_c(T - T_a) - \varepsilon \sigma(T^4 - T_a^4) \quad x = L(t)$$

$$k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} = d_s c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad x = 0 \quad (3)$$

As condições iniciais são definidas pelas equações (6) e (7).

$$L(0) = d_0 \quad (4)$$

$$T(x,0) = T_a \quad (5)$$

O problema apresentado, formulado com as equações (1-5), que consiste na determinação de K_{eff} e do campo de temperaturas $T(x,t)$, é considerado um problema inverso "mal posto", por não possuir solução única, [Al-Khalidy, (1998)]. Para resolver este problema, considerou-se que a temperatura do aço ($x=0$) é igual aos valores medidos experimentalmente.

$$T_s(0,t) = T_s(t) \quad (6)$$

Utilizando um esquema de diferença finita atrás para aproximar a derivada no tempo e impondo as condições de

fronteira, a distribuição da temperatura no intumescente e a sua condutividade térmica efectiva são obtidas pelas equações (7-9).

Para $i = 1$, $x = 0$

$$c\rho_{i,k-1} \frac{T_{i,k} - T_{i,k-1}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x_i} \left[k_{eff,k} \frac{T_{i+1,k} - T_{i,k}}{\Delta x_i} - d_s c_s \rho_s \frac{T_{i,k} - T_{i,k-1}}{\Delta t} \right] \quad (7)$$

Para $1 < i < n_x$, $0 < x < L(t)$

$$c\rho_{i,k-1} \frac{T_{i,k} - T_{i,k-1}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x_i} \left[k_{eff,k} \frac{T_{i+1,k} - 2T_{i,k} - T_{i-1,k}}{\Delta x_i} \right] \quad (8)$$

Para $i = n_x$, $x = L(t)$

$$c\rho_{i,k-1} \frac{T_{i,k} - T_{i,k-1}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x_i} \left[\varepsilon \dot{q}_r'' - h_c (T_{i,k-1} - T_a) - \varepsilon \sigma (T_{i,k-1}^4 - T_a^4) - k_{eff,k} \frac{T_{i,k} - T_{i-1,k}}{\Delta x_i} \right] \quad (9)$$

Para determinar o valor da condutividade térmica adoptado, em cada incremento de tempo, é utilizado um processo iterativo com o critério de paragem $error = (T_{s,Exp} - T_{s,num}) / T_{s,Exp} \leq 1\%$.

As Fig. 6 e 7 apresentam os resultados numéricos da condutividade térmica efectiva do teste 1 e dos testes 2 e 3, considerando dois casos de estudo. No primeiro caso, C1, é considerada a massa específica do material virgem e uma espessura constante, igual à espessura seca inicial. No segundo caso, C2, a massa específica e a espessura foi considerada dependente do tempo, utilizando-se, para os testes 2 e 3, o valor médio da espessura. As figuras também apresentam a temperatura à superfície do intumescente, T_{surf} , e a temperatura do aço, T_{steel} , obtidas por este método numérico.

Na fase final do ensaio existe uma diferença significativa entre os casos C1 e C2, com valores de 0.0056 [W/m°C] e 0.1151 [W/m°C] para o teste 1 e 0.0053 [W/m°C] e 0.085 [W/m°C] para os testes 2 e 3, respectivamente.

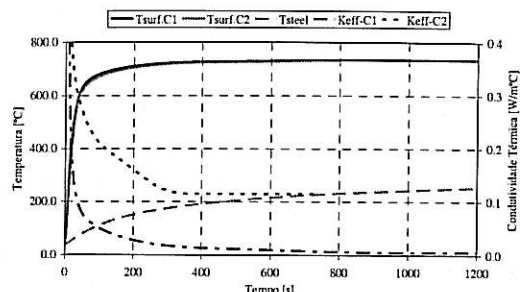


Fig 6 - Condutividade térmica efectiva (teste 1).

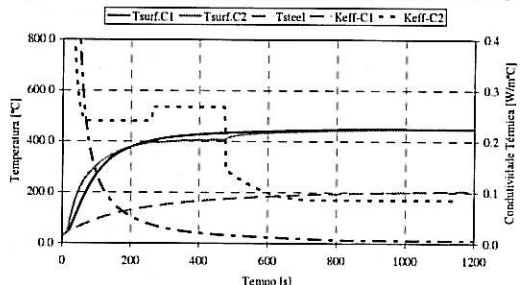


Fig 7 - Condutividade térmica efectiva (teste 2 e 3).

4- CONCLUSÕES

Os resultados mostram que o desenvolvimento da intumescência depende do valor inicial de espessura seca e do fluxo de calor incidente. No período analisado, a variação da massa do material varia de forma aproximadamente linear. Foi ainda apresentado um modelo numérico, baseado no método das diferenças finitas, para a análise do comportamento do intumescente e obtida uma aproximação da condutividade térmica efectiva e da temperatura à superfície do intumescente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, projecto PTDC/EME-PME/64913/2006, "Avaliação do Comportamento de um Material Intumescente na Protecção Passiva de Elementos Estruturais Submetidos a Incêndio", e bolsa de doutoramento SFRH/BD/28909/ 2006.

REFERÊNCIAS

- E1354-04, Standard Test For Heat And Visible Smoke Release For Materials And Products Using An Oxygen Consumption Calorimeter, American Society For Testing And Materials, 2004.
- Al-Khalidy, N, "On the solution of parabolic and hyperbolic inverse heat conduction problems", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 30, pp. 3731-3740, 1998.