



CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO E DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE TINTAS INTUMESCENTES

Mesquita, L.M.R.^a; Piloto, P.A.G.^b; Vaz, M.A.P.^c

^{a,b} *Instituto Politécnico de Bragança, Departamento de Mecânica Aplicada, Campus de Santa Apolónia, Ap. 1134; 5301-857 Bragança*
e-mail: {lmesquita,ppiloto}@ipb.pt, web <http://www.ipb.pt/>

^c *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, DEMEGI*
Rua Dr Roberto Frias, S/N 4200-465 Porto
e-mail: gmavaz@fe.up.pt, web <http://www.fe.up.pt/>

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. As placas de aço são pintadas na face exposta ao calor com diferentes espessuras de protecção e sujeitas a diferentes fluxos de calor. 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. Numericamente é utilizado o MDF para resolver o problema inverso e determinar a condutividade térmica efectiva e a temperatura à superfície do intumescente.

1 Introdução

A aplicação de materiais de protecção ao fogo é uma das medidas adoptadas para dotar uma estrutura da capacidade resistente definida regulamentarmente. A temperatura crítica dos elementos estruturais protegidos é uma das variáveis de projecto e depende essencialmente das propriedades do material de protecção e da temperatura proveniente da acção do fogo. Os materiais de protecção passiva podem ser caracterizados em não reactivos, dos quais os mais utilizados encontram-se em forma de placas ou sprays, e reactivos, sendo as tintas intumescentes 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. A transferência de calor através do material que ocorre durante a fase inicial e a sua intumescência é de elevada importância na definição e dimensionamento desta protecção térmica.

A determinação do campo de temperaturas do material intumescente envolve uma transformação de fase com duas ou mais fronteiras móveis que definem o seu estado: inicial, pastoso e camada carbonosa.

Na literatura podem ser encontrados diferentes modelos para tratar o comportamento de intumescência como um problema de transferência de calor. Outros modelos descrevem a intumescência e a formação carbonosa com bases nos modelos cinéticos de degradação térmica, considerando as reacções químicas ocorridas, fenómenos térmicos e de transporte, [1-4]. Devido à complexidade existente na decomposição térmica dos sistemas intumescentes, os modelos existentes são baseados em algumas simplificações, como a consideração do modelo unidimensional de transferência de calor, propriedades térmicas independentes da temperatura e do espaço e a incidência de um fluxo de calor constante, onde as perdas de calor por radiação e convecção são ignoradas, [2]. Também se considera que os processos termoquímicos da intumescência ocorrem sem libertação ou absorção de energia, [5].

Anderson et al, [6,7], desenvolveram um modelo matemático que descreve o mecanismo de intumescência, considerando as equações da conservação da massa e energia. O modelo assume que a transição para o estado de intumescência ocorre numa camada muito fina e é dividida em duas regiões, o material virgem e a camada carbonosa. Este modelo foi comparado com resultados experimentais conduzidos em placas de aço pintadas com tinta intumescente. Num estudo posterior, [8], Anderson et al apresentaram uma estimativa da condutividade térmica efectiva do intumescente. Os resultados permitiram verificar que a eficiência da intumescência depende da sua estrutura celular e que a sua baixa condutividade térmica resulta das bolhas de ar presentes na estrutura porosa e que actuam como agente expensor do material sólido.

Os autores, num trabalho anterior [9], efectuaram vários ensaios de resistência ao fogo para determinar o comportamento de vigas de aço protegidas com tinta intumescente, considerando diferentes espessuras protecção. Com base nos resultados foi estimada a variação da condutividade térmica efectiva da intumescência com a temperatura, na qual a variação das propriedades térmicas e físicas foram consideradas implicitamente.

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 Ensaio experimentais

A formulação de um intumescente não tem sofrido variações significativas nos últimos anos, sendo a sua composição definida em geral por três componentes activos: uma fonte de ácido, como o polifosfato de amónio (APP) que se decompõe quando a temperatura atinge os 150 [°C]; agentes carboníferos, como o pentaeritritol (PER), que reage com o ácido formado e se decompõe entre os 200 e os 300 [°C]; e por fim um composto espumífero que vai expandir o resíduo carbonoso gerando uma espuma de cor preta. A uma temperatura próxima dos 700 [°C] a camada superficial transforma-se numa camada cerâmica porosa de cor branca e de baixa condutividade térmica.

O desempenho da protecção está directamente relacionado com a temperatura ou tempo em que a intumescência se inicia e o período que esta actua como barreira térmica.

Para avaliar o comportamento de uma tinta de base aquosa disponível no mercado são apresentados três ensaios experimentais. Estes testes são conduzidos num calorímetro de cone e permitem determinar a taxa de libertação de calor, a perda de massa, o calor efectivo de combustão, a ignição e extinção durante a combustão das amostras.

As placas de aço são quadradas, 100 [mm], com 4 [mm] de espessura, pintadas numa das faces com diferentes espessuras de protecção e testadas num calorímetro de cone segundo a norma E1354-04, [10]. As temperaturas são medidas através de quatro termopares do tipo k soldados na face exposta ao fluxo de calor e na face oposta em dois pontos distintos, ver a Fig. 1.

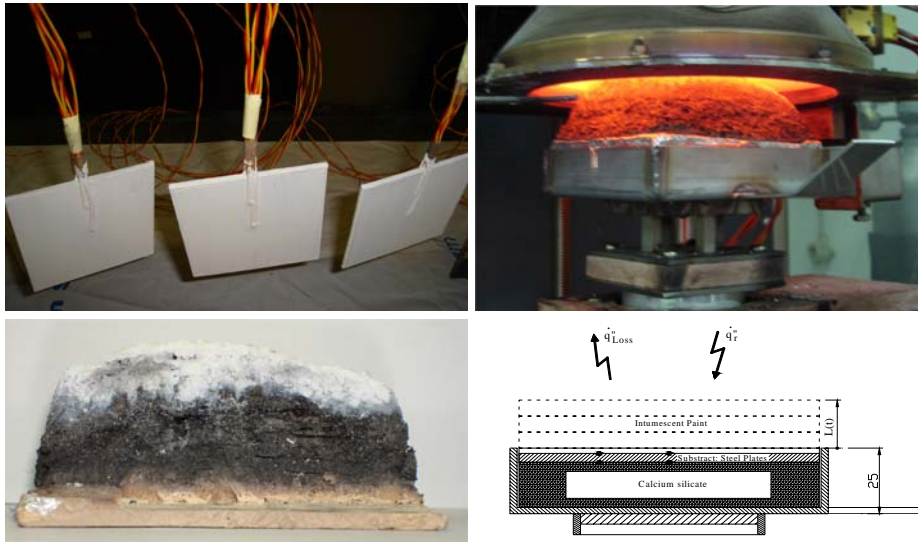


Fig. 1: Pintura das placas de aço, fixação dos termopares, *setup* experimental e desenvolvimento da intumescência.

Os provetes foram envolvidos numa folha de alumínio e colocados num suporte em aço inoxidável, com a superfície inferior em contacto com uma camada de silicato de cálcio de modo que a superfície superior se encontre à distância correcta da base do calorímetro.

Ainda que a norma determine, para amostras compostas por sistemas intumescentes, a utilização de uma estrutura de retenção e uma grelha metálica para impedir o desenvolvimento da intumescência, esta montagem não foi utilizada, permitindo-se o desenvolvimento livre da intumescência. É de realçar que o procedimento estabelecido pela norma nunca foi totalmente aceite pela comunidade científica, visto que ao impedir o desenvolvimento da intumescência a eficácia da tinta é alterada, [11].

A superfície do provete foi colocada a uma distância inicial de 25 [mm] da base do calorímetro, diminuindo com o aumento da intumescência. Esta situação pode originar uma não uniformidade do fluxo de calor na superfície da amostra, especialmente nas arestas da mesma, conforme verificado no trabalho de Schartel et al, [11].

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/m^2], para o teste1, teste2 e teste3, respectivamente. Os fluxos de calor por radiação apresentados são representativos de um incêndio na sua fase inicial e de um fogo totalmente desenvolvido.

2.1 Resultados experimentais

Os ensaios foram conduzidos ao longo de 1200 [s] e durante este período o desenvolvimento da intumescência foi registado através de uma câmara. No final de todos os testes, veri-

ficou-se que a intumescência ultrapassou o nível da base do cone. A espessura final da intumescência foi de 41.74, 29.50 e 35.36 [mm] para os testes 1, 2 e 3, respectivamente.

Os valores medidos da taxa de libertação de calor e do calor efectivo de combustão dos testes 2 e 3 são aproximadamente zero. O teste 1 registou um valor de pico da taxa de libertação de calor de $26.3 \text{ [kW/m}^2\text{]}$ no instante 155 [s], um valor de pico do calor efectivo de combustão de 17.1 [MJ/kg] no instante 200 [s], com valores médios de $9.8 \text{ [kW/m}^2\text{]}$ e 8.3 [MJ/kg] , respectivamente. Foram registadas chamas transientes, no teste 1, entre os instantes 80 e 125 [s], entrando em combustão após o instante 130 [s] até 730 [s].

A Fig. 2 apresenta a perda de massa e o peso residual dos ensaios realizados. 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%.

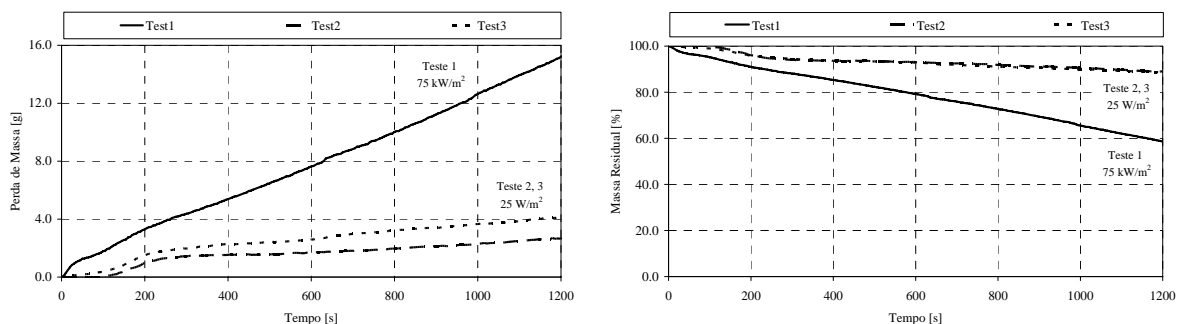


Fig. 2: Valores medidos da perda de massa e massa residual.

Utilizando técnicas de processamento de imagem, a variação da espessura do intumescente foi registada e medida ao longo do tempo, ver a Fig. 3. Devido à elevada intumescência do teste 1, a medida do deslocamento da fronteira do intumescente ficou limitada ao espaço visual livre, não havendo a possibilidade de adquirir imagens úteis até ao final do ensaio.

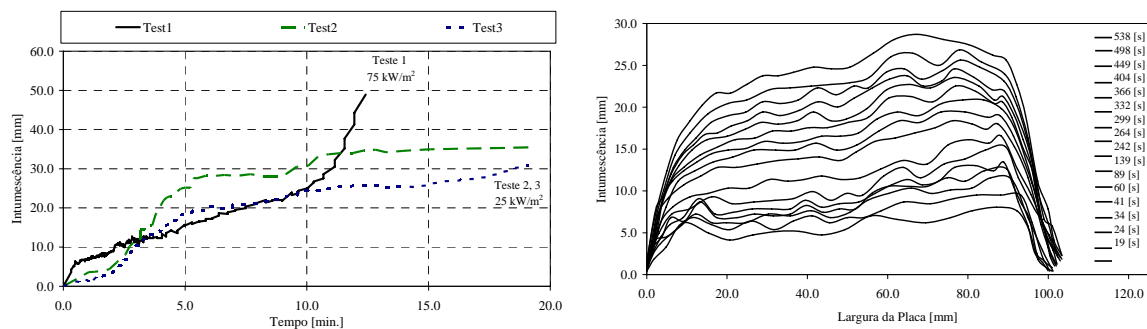


Fig. 3: Variação da espessura do intumescente e perfil da intumescência do teste 1.

A Fig. 3 também apresenta o desenvolvimento da intumescência, fronteira livre, do teste 1 ao longo do plano vertical da amostra. Foi registada uma maior intumescência junto do local correspondente à passagem dos fios dos termopares, originada por uma ligeira acumulação da tinta aquando da sua pintura.

Os perfis da temperatura, medidos através dos termopares, na interface da tinta com a superfície superior e na superfície inferior, são apresentados na Fig. 4. Os valores medidos em ambas as faces são muito próximos devido à espessura reduzida da placa. Como seria expectável as temperaturas adquiridas com o teste 1 são superiores às obtidas nos restantes testes.

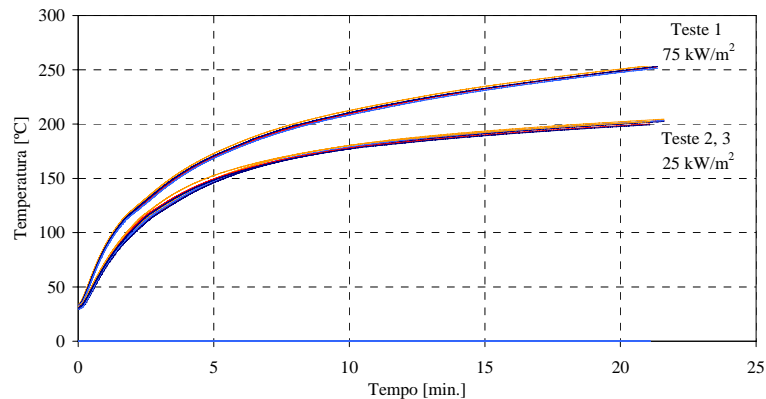


Fig. 4: Temperaturas medidas nas superfícies superior e inferior da placa de aço.

3 Estudo numérico do comportamento da intumescência

Quando uma tinta intumescente é exposta a um fluxo de calor, começa a reagir, iniciando-se o processo de intumescência. Este mecanismo de reacção inclui uma fase inicial de pré aquecimento, na qual a energia térmica é absorvida pela tinta e a sua temperatura aumenta rapidamente. Quando a temperatura à superfície da tinta, no estado virgem, atinge a temperatura de pirólise, é absorvido algum calor através de processos endotérmicos, formando-se bolhas de gás que originam o aparecimento de uma camada carbonosa de cor preta. Com o contínuo deslocamento da onda térmica ao longo do material virgem, a camada carbonosa continua a aumentar até que a fronteira móvel atinge o substrato e todo o material virgem é consumido, como representado na Fig. 5.

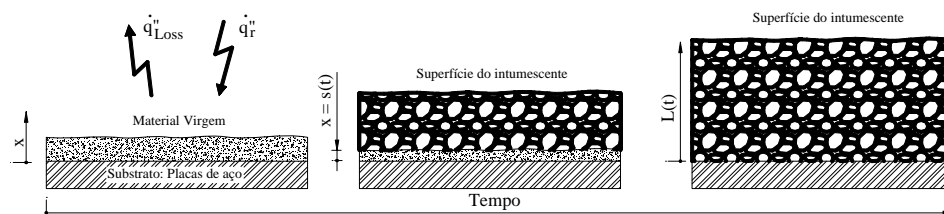


Fig. 5: Desenvolvimento da intumescência.

No modelos apresentados até à data, é comum considerar-se que a região de transição do estado virgem para o estado carbonoso, ocorre numa frente infinitamente pequena, seguindo-se os estudos de Anderson et al, [7].

O problema que envolve a solução da equação da energia em cada lado da fronteira móvel é considerado um problema generalizado de Stefan, no qual a localização da fronteira móvel e da fronteira livre deve ser determinada como parte do problema proposto.

3.1 Solução aproximada da temperatura à superfície da intumescência

A determinação exacta da temperatura à superfície do intumescente é um trabalho complexo, sendo necessário considerar a quantidade exacta do fluxo de calor que chega à mesma e impõe a caracterização do comportamento térmico da tinta intumescente. O conhecimento das propriedades térmicas é decisivo, a influência do substrato e as perdas de calor pela superfície inferior da placa representam algumas das dificuldades na implementação de um processo numérico.

Para analisar o comportamento térmico do intumescente, é considerada uma solução aproximada, em que o balanço energético é dado pela equação 1, [12].

$$\varepsilon \dot{q}_r'' - \dot{q}_{r,L}'' - \dot{q}_{conv,L}'' = c_i \rho_i d_i \frac{\partial T}{\partial t} + c_s \rho_s d_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Na equação anterior, \dot{q}_r'' representa o fluxo de calor radiante emitido pelo cone, $\dot{q}_{r,L}''$ e $\dot{q}_{conv,L}''$ representam a perda de calor por radiação, $\varepsilon \sigma (T^4 - T_a^4)$, e a perda de calor por convecção, $h_c (T - T_a)$, respectivamente. ε representa a emissividade da superfície do intumescente, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, h_c o coeficiente de transferência de calor por convecção. ρ , c e d representam a densidade, o calor específico e a espessura, respectivamente. Os subscritos i e s representam as propriedades do intumescente e do aço, respectivamente.

Os termos do segundo membro representam o calor armazenado no intumescente e na placa de aço. Neste balanço energético, a energia proveniente das reações químicas endotérmicas e exotérmicas são desprezadas. Adicionalmente, como as temperaturas medidas em ambas as superfícies da placa são muito próximas, as perdas de calor pela base da placa também são ignoradas.

De uma forma geral a emissividade é dependente da temperatura e função do estado do material. Para materiais intumescentes podem ser encontrados na literatura valores compreendidos entre 0.7 e 0.95, em que o valor inferior é normalmente associado à tinta no estado virgem, [13], e para a superfície da camada carbonosa podem ser encontrados valores de 0.8, 0.9 e 0.95, consultar [8,13,14]. Neste trabalho foi considerado uma emissividade de 0.9 e um coeficiente de transferência de calor por convecção igual a 20 [W/(m²K)].

A massa específica da tinta intumescente foi determinada através do método do picnómetro, obtendo-se um valor de 1375 [kg/m³] para a tinta no estado virgem e de 616 [kg/m³] para a camada carbonosa. É de realçar que este método não considera a porosidade do material.

Aplicando o método das diferenças finitas à equação (1) e aproximando a derivada no tempo por uma diferença finita à frente, obtém-se a equação (2):

$$\varepsilon \dot{q}_r'' - h_c (T_t - T_a) - \varepsilon \sigma (T_t^4 - T_a^4) = \frac{(c_i \rho_i d_i)_{t+\Delta t}}{\Delta t} \left[\frac{T_{t+\Delta t} + T_{st}}{2} - \frac{T_t + T_{st}}{2} \right] + \frac{c_s \rho_s d_s}{\Delta t} \left[\frac{T_{st+\Delta t} - T_{st}}{2} \right] \quad (2)$$

em que T_s representa a temperatura no aço. A temperatura do intumescente é considerada igual ao valor médio da temperatura da superfície e do aço. Do mesmo modo, a temperatura do aço foi obtida pelo valor médio da temperatura das superfícies superior e inferior da placa. As propriedades do aço são assumidas constantes, com um calor específico de 600 [J/kgK] e uma massa específica de 7850 [kg/m³]. O calor específico da tinta intumescente foi considerado constante e igual a 1000 [J/kgK].

A Fig. 6 apresenta a evolução da temperatura da superfície intumescente para dois casos de estudo. No primeiro caso, C1, foi 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.

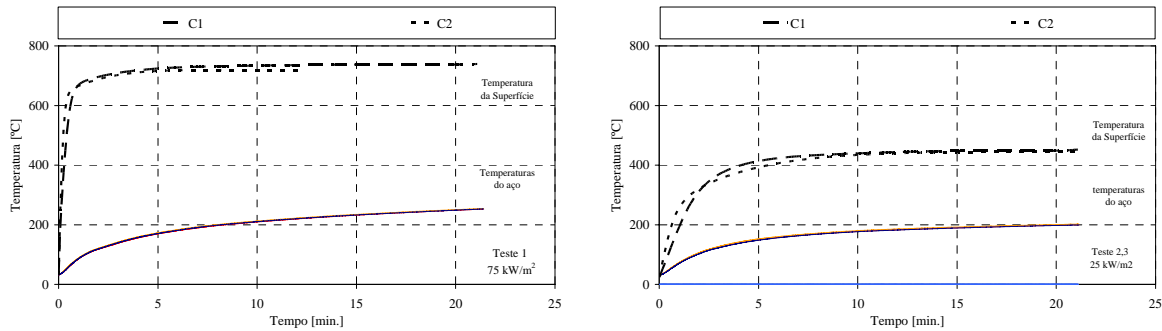


Fig. 6: Evolução da temperatura à superfície da intumescência.

Na Fig. 6 pode-se verificar que, na fase inicial, o calor absorvido pelo intumescente tem uma elevada influência na temperatura à superfície. No caso C2, verificam-se temperaturas superiores na fase inicial do aquecimento, porque quando se considera a massa específica do material carbonoso, o calor absorvido é menor.

3.2 Determinação da condutividade térmica efectiva

O desenvolvimento da intumescência pode ser analisado como um problema unidimensional de condução de calor, em que o fluxo de calor se propaga através da tinta e, assumindo que a transição do estado virgem para carbonoso se dá numa camada muito fina, fica activa à temperatura T^* .

Após esta fase de pré aquecimento, a superfície atinge a temperatura de transição e a protecção pode ser dividida em duas camadas. Com vista à determinação de um valor estimado da condutividade térmica efectiva do intumescente, assumiu-se que este é constituído por uma única camada de massa específica e calor específico constantes. A equação diferencial do problema é:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = k_{eff} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \quad 0 < x < L(t) \quad (3)$$

A condição fronteira na superfície livre determina que o fluxo de calor que passa no intumescente seja igual ao fluxo de calor proveniente do cone menos as perdas de calor por convecção e radiação.

$$k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L(t)} = \varepsilon \dot{q}_r'' - h_c (T - T_a) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \quad x = L(t) \quad (4)$$

Na interface do tinta com o substrato, $x = 0$, devido à elevada difusividade e reduzida espessura do aço, não foi considerada qualquer gradiente de temperatura na placa.

Assumindo uma condição adiabática na base da placa, a condição fronteira é definida pela equação (5).

$$k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} = d_s c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad x = 0 \quad (5)$$

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

$$L(0) = d_0 \quad (6)$$

$$T(x,0) = T_a \quad (7)$$

O problema apresentado, formulado com as equações (3-7), que consiste na determinação de K_{eff} e do campo de temperaturas $T(x,t)$, é considerado um problema inverso mal posto, porque não possui uma solução única, [15]. Para resolver este problema são necessárias condições adicionais ao nível da temperatura. A solução adoptada é a de considerar a temperatura do aço igual aos valores medidos experimentalmente, cuja evolução é apresentada na Fig. 4.

$$T_s(0,t) = T_s(t) \quad (8)$$

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 (9-11).

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

$$c\rho_{i,k-1} \frac{T_{i,k} - T_{i,k-1}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x_i} \left[k_{eff,k} \frac{T_{i+1,k} - T_{i,k}}{\Delta x_i} - d_s c_s \rho_s \frac{T_{i,k} - T_{i,k-1}}{\Delta t} \right] \quad (9)$$

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

$$c\rho_{i,k-1} \frac{T_{i,k} - T_{i,k-1}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x_i} \left[k_{eff,k} \frac{T_{i+1,k} - 2T_{i,k} - T_{i-1,k}}{\Delta x_i} \right] \quad (10)$$

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

$$c\rho_{i,k-1} \frac{T_{i,k} - T_{i,k-1}}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x_i} \left[\varepsilon \dot{q}_r'' - h_c (T_{i,k-1} - T_a) - \varepsilon \sigma (T_{i,k-1}^4 - T_a^4) - k_{eff,k} \frac{T_{i,k} - T_{i-1,k}}{\Delta x_i} \right] \quad (11)$$

O cálculo inicia-se no nó $i = 1..n_x$ no instante k , assumindo uma condutividade térmica inicial constante. O campo de temperaturas é obtido pela resolução do sistema de equações através do método de decomposição LU. Para refinar o valor da condutividade térmica adoptado é utilizado um processo iterativo com o critério de paragem $error = (T_{s,Exp} - T_{s,num}) / T_{s,Exp} \leq 1\%$. Este valor é considerado no instante de tempo seguinte, determinado de acordo com a condição de estabilidade $\Delta t = \Delta x^2 / 2\alpha$, obtendo-se uma nova condutividade térmica.

As Fig. 7 e 8 apresentam os resultados numéricos da condutividade térmica efectiva do teste 1 e dos testes 2 e 3, considerando os caso C1 e C2 apresentados na secção precedente. As figuras também apresentam a temperatura à superfície do intumescente, T_{surf} , e a temperatura do aço, T_{steel} , obtidas por este método numérico.

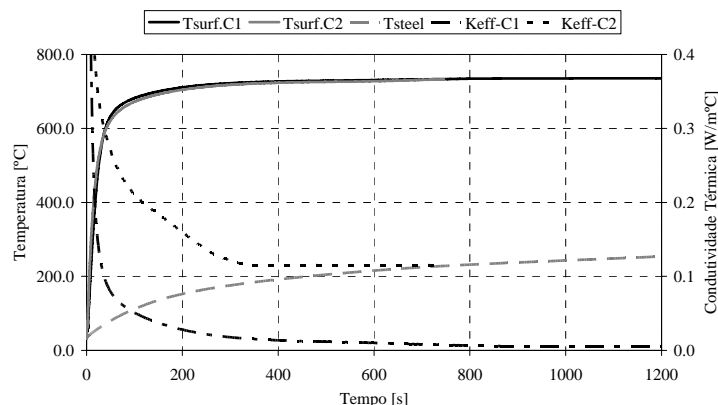


Fig. 7: Condutividade térmica efectiva do teste 1.

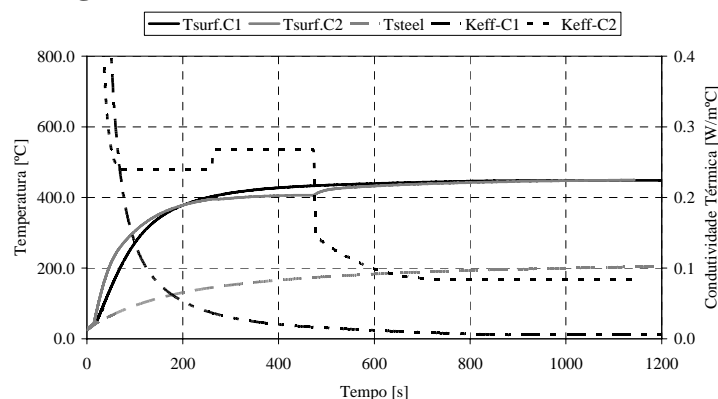


Fig. 8: Condutividade térmica efectiva do teste 2 e 3.

As figuras mostram que, na fase inicial do aquecimento, a condutividade diminui até ao instante em que a temperatura da superfície e do aço são aproximadamente constantes, e posteriormente tende para um valor constante. O comportamento em ambos os casos é similar, mas obtém-se um valor de condutividade mais elevado no caso C2, quando a massa específica da camada carbonosa e a variação da espessura são consideradas.

Na fase final 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.

4 Conclusões

Este trabalho apresentou um conjunto de ensaios experimentais conduzidos num calorímetro de cone, para avaliar o comportamento de tintas intumescentes na protecção ao fogo. Os resultados mostram que o desenvolvimento da intumescência depende do valor inicial de espessura seca e do fluxo de calor incidente. No período analisado, o peso residual do material é aproximadamente linear.

Foi 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.

Verificou-se que se obtêm valores mais elevados da condutividade térmica quando se considera a variação da espessura do intumescente e a massa específica da camada carbonosa.

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

- [1]. Staggs J. E. J., “A discussion of modelling idealised ablative materials with particular reference to fire testing”, *Fire Safety Journal*, Vol. 28, 47-66, 1997.
- [2]. Moghtaderi B., Novozhilov V., Fletcher, D., Kent J. H., “An integral model for the transient pyrolysis of solid materials” *Fire and Materials*, Vol. 21, 7-16, 1997.
- [3]. Lyon R. E., “Pyrolysis kinetics of char forming polymers”, *Polymer Degradation and Stability*, N° 61, pp. 201-210, 1998.
- [4]. Jia F., Galea E. R., Patel M. K., “Numerical Simulation of the Mass Loss Process in Pyrolyzing Char Materials”, *Fire And Materials*, N° 23, 71-78, 1999.
- [5]. Kuznetsov, G. V., Rudzinskii, V. P., “Heat transfer in intumescent heat- and fire-insulating coatings”, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, Vol. 40, No. 3, 1999.
- [6]. Anderson, C.E.; Wauters, D.K.;" A Thermodynamic Heat Transfer model for Intumescent systems", *Int. Journal of Engineering Science*, Vol. 22, N° 7, pp.881-889, 1984.
- [7]. Anderson, C.E.; Dziuk, J.; Mallow, W.A.; Buckmaster, J.; “Intumescent Reaction Mechanisms”, *Journal of Fire Sciences*, N° 3, 161-194, 1985.
- [8]. Anderson, C.E.; Ketchum, D.E., Mountain, W.P. “Thermal Conductivity of Intumescent Chars”, *Journal of Fire Sciences*, vol. 6, pp. 390, 1988.
- [9]. Mesquita, L.M.R.; Piloto, P.A.G.; Vaz, M.A.P; Vila Real, P.M.M.; “Fire resistance tests in steel beams protected with intumescent coatings” (in portuguese); 6th National Congress for Experimental Mechanics; vol. 12, pp 129-137, ISSN 122 922, 2006.
- [10]. 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.
- [11]. Schartel B., Bartholmai M., Knoll U., “Some comments on the use of cone calorimeter data”, *Polymer Degradation and Stability*, N° 88, pp. 540-547, 2005.
- [12]. A. Omrane, Y.C. Wang, U. Göransson, G. Holmstedt, M. Alden; “Intumescent coating surface temperature measurement in a cone calorimeter using laser-induced phosphorescence”, *Fire Safety Journal*, 42, pp. 68–74, 2007.
- [13]. Koo, J. H., “Thermal characterization of a ceramic intumescent material”, *Fire Technology*, Vol. 34, N° 1, 1998.
- [14]. M. Bartholmai, R. Schriever, B. Schartel, “Influence of external heat flux and coating thickness on the thermal insulation properties of two different intumescent coatings using cone calorimeter and numerical analysis”, *Fire and Materials*, Vol. 27, Issue 4, 151 – 162, 2003.
- [15]. 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.