

ESTUDO ANALÍTICO E NUMÉRICO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE PERFIS METÁLICOS PROTEGIDOS COM TINTA INTUMESCENTE

Luís M.R. Mesquita^{1*}, Paulo A.G. Piloto¹ e Mário A.P. Vaz²

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

2: Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr Roberto Frias, S/N 4200-465 Porto
e-mail: gmavaz@fe.up.pt, web <http://www.fe.up.pt/>

Palavras-chave: Resistência ao Fogo, Protecção ao Fogo, Tinta Intumescente, Transferência de Calor, Teorema de Duhamel, Função de Green.

Resumo. *Este trabalho apresenta dois métodos analíticos para determinar a evolução da temperatura no aço, baseadas no teorema de Duhamel e no método das funções de Green. Estas soluções são baseadas no modelo unidimensional de condução de calor aplicado ao material de protecção, considerando uma condição de fronteira não homogénea na interface em contacto com o incêndio, estabelecidas para propriedades térmicas constantes e posteriormente adequadas a propriedades dependentes da temperatura através de um processo incremental. São comparados os resultados experimentais e os determinados por via analítica e numérica, utilizando o método dos elementos finitos. É ainda comparada a evolução da temperatura de vários perfis, considerando diferentes espessuras de protecção.*

1. INTRODUÇÃO

A verificação da segurança estrutural de elementos de aço, em situação de incêndio é efectuada atendendo às exigências de resistência ao fogo determinada segundo as especificações do Eurocódigo 3, Parte 1.2 e os regulamentos nacionais de segurança contra incêndio, [1, 2]. A exigência de resistência ao fogo de elementos estruturais é estabelecida segundo três domínios: domínio do tempo, domínio da resistência e domínio da temperatura.

No domínio do tempo, a resistência ao fogo de um determinado elemento deve ser comparado com o tempo preestabelecido no regulamento. Este depende, essencialmente, do tipo de ocupação do edifício e da sua altura, podendo variar entre 30 e 180 minutos, de modo a garantir a evacuação dos seus ocupantes e dos elementos de combate ao incêndio.

A verificação no domínio da temperatura requer o cálculo da temperatura de colapso, denominada de temperatura crítica. Devido à perda de resistência do aço com a temperatura, a temperatura crítica pretendida é obtida através da aplicação de medidas de protecção passiva. Esta situação implica o conhecimento do comportamento da reacção de materiais de protecção passiva em situação de incêndio, como é o caso da utilização de tintas intumescentes. As tintas intumescentes são materiais reactivos que reagem com a acção de um incêndio, originando um aumento de volume, criando uma camada protectora que reduz o aumento da temperatura no aço. O comportamento térmico da tinta intumescente influencia o comportamento global termo-mecânico dos elementos estruturais em condições de incêndio, uma vez que aumenta a resistência térmica e por consequência o tempo de resistência ao fogo. Este método de protecção apresenta menos peso introduzido na estrutura, a possibilidade de aplicação em estaleiro e a obtenção de um bom acabamento superficial, comparativamente às outras medidas de protecção.

As especificações técnicas de protecção passiva são determinadas pelos fabricantes destes produtos, baseadas em ensaios experimentais confidenciais, utilizando elementos estruturais típicos (vigas e pilares), com e sem carga. Os resultados são apresentados em forma de tabelas ou gráficos, para diferentes temperaturas críticas, espessuras de protecção e diferentes períodos de estabilidade ao fogo.

A análise da transferência de calor é fundamental para se determinar, de uma forma aproximada, a temperatura crítica de elementos com protecção ao fogo, na qual as propriedades do material de protecção e a temperatura dos gases de incêndio são factores essenciais. A metodologia actual para verificação de segurança, preconizada nas normas europeias, [1], não tem em consideração o aumento da espessura do material protector, nem a variação das propriedades térmicas e físicas com o aumento da temperatura, não descrevendo o comportamento real deste material, em situação de incêndio.

Num trabalho anterior, os autores apresentaram um conjunto de ensaios experimentais de resistência ao fogo de vigas de aço protegidas com tinta intumescente e a condutividade térmica efectiva foi determinada em função da temperatura média do aço e dos gases do incêndio, [3].

Este trabalho apresenta um desenvolvimento analítico da transferência de calor em elementos estruturais protegidos, admitindo uma análise unidimensional da equação diferencial de

condução de calor, sujeita a condições de fronteira não homogêneas. Este método utiliza o teorema de Duhamel e o método das funções de Green para determinar a evolução da temperatura no aço. São apresentados resultados numéricos baseados no método dos elementos finitos obtidos através da PDEtoolbox do programa Matlab. Utilizando a variação da condutividade térmica efectiva, os resultados analíticos e numéricos são comparados com os resultados experimentais. O estudo é ainda apresentado para diferentes espessuras de protecção e factores de massividade.

2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE RESISTÊNCIA AO FOGO

Os autores, num trabalho anterior procederam à execução de um conjunto de ensaios experimentais em vigas de aço protegidas com tinta intumescente de base solvente, [3]. As vigas, de perfil IPE100, possuíam diferentes espessuras de protecção, foram submetidas a uma taxa de aquecimento de 800 [°C/h] e a variação da temperatura no aço foi medida através de termopares do tipo K, instalados por baixo da camada de tinta, ver Figura 1.



Figura 1. Ensaio de resistência ao fogo.

Os resultados considerados neste trabalho são relativos aos ensaios 5, 6 e 7, com um valor médio de espessura seca de 1329, 1441 e 1521 [μm], respectivamente. As medições efectuadas da temperatura dos gases de incêndio (T_g) e da temperatura no aço (T_s) são apresentadas nas figuras 4-6.

Segundo o EC3-1.2, [1], o aumento da temperatura do aço com protecção ao fogo, ΔT_s , é calculado através de um processo numérico incremental, dado por:

$$\Delta T_s = \frac{k_i P/A (T_g - T_s)}{c_s \rho_s d_i \left(1 + \frac{\mu}{3}\right)} \Delta t - (e^{\mu/10} - 1) \Delta T_g \quad (1)$$

O incremento de tempo (Δt) deverá ser inferior a 30 segundos para elementos metálicos protegidos. ΔT_g representa o incremento de temperatura dos gases do incêndio verificado no incremento de tempo Δt . P/A representa o factor de massividade do perfil, enquanto que d_i e k_i representam a espessura e a condutividade do material de protecção. O factor μ representa o rácio entre a capacitância do material de protecção e do aço. ρ_s e c_s representam a massa específica e o calor específico do aço.

A inversão da equação (1) permite determinar de forma explícita a condutividade térmica efectiva da protecção, considerando os valores medidos das temperaturas do gás e do aço, obtendo-se a seguinte expressão:

$$k_p = \left[\frac{c_s \rho_s (1 + \mu/3)}{(T_g - T_s) \Delta t} \frac{d_p}{P/A} \right] \left[\Delta T_s + (e^{\mu/10} - 1) \Delta T_g \right] \quad (2)$$

A condutividade térmica efectiva da tinta intumescente no instante t_i é aproximada considerando a temperatura da protecção igual ao valor médio da temperatura do gás no instante actual e o valor da temperatura do aço no instante anterior $T_p(i) = (T_g(i) + T_s(i-1))/2$, [4].

A figura 1 apresenta a condutividade térmica efectiva obtida de acordo com a equação (2).

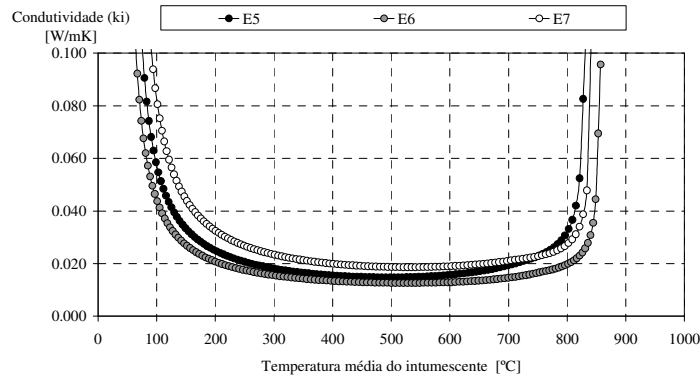


Figura 2. Variação da condutividade térmica efectiva do intumescente com a temperatura.

Na Figura 2 é possível verificar que a condutividade térmica do intumescente é aproximadamente constante no intervalo de temperaturas de 300 a 750 [°C] e pode ser comparada na sua forma, à solução apresentada por Tan et al [5].

3. SOLUÇÃO ANALÍTICA DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA NO AÇO

A análise de transferência de calor de elementos estruturais com protecção ao fogo requer, normalmente, a solução de um problema de difusão bidimensional. Como as condições de aquecimento consideram o elemento estrutural totalmente envolvido no fogo, o problema bidimensional pode ser aproximado pela equação unidimensional de condução de calor, considerando o método de parâmetros concentrados, ver a Figura 3, [6]. A espessura do aço d_s pode ser determinada, invertendo o factor de massividade do perfil.

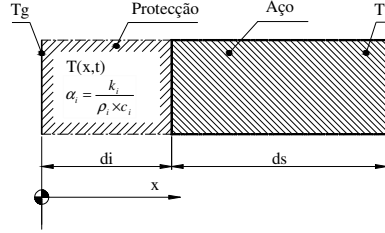


Figura 3. Modelo unidimensional de transferência de calor.

Considerando as propriedades do material de protecção constantes, independentes da temperatura, o campo de temperaturas é dado pela equação diferencial (3).

$$\alpha_i \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad (3)$$

Onde o termo $\alpha_i = k_i / \rho_i c_i$ é relativo à difusividade da protecção, em que ρ_i e c_i representam a massa específica e o calor específico, respectivamente.

As condições de fronteira não homogêneas do modelo são dadas por:

$$T(0, t) = T_g(t), \quad x = 0 \quad (4)$$

$$-k_i \frac{\partial T(d_i, t)}{\partial x} = Q_s \frac{\partial T(d_i, t)}{\partial t}, \quad x = d_i \quad (5)$$

em que Q_s é a capacitância térmica do aço, $Q_s = \rho_s c_s d_s$. Como condição inicial para a análise da transferência de calor é assumida uma temperatura uniforme.

$$T(x, 0) = T_0, \quad t = 0 \quad (6)$$

A existência da condição fronteira não homogênea (dependente do tempo), equação (4), na interface entre a protecção e os gases de incêndio, implica uma resolução alternativa aos métodos clássicos. Os métodos utilizados e apresentados neste trabalho são os métodos do teorema de Duhamel e das funções de Green.

3.1. Teorema de Duhamel

O teorema de Duhamel permite alcançar uma solução do problema original, com condições de fronteira não homogêneas, com base no integral da solução de um problema auxiliar mais simples, com condições de fronteira homogêneas.

Do teorema de Duhamel pode-se estabelecer que, se $v = F(r, t)$ representa a temperatura em r no instante t , de um corpo com uma temperatura inicial nula, considerando a temperatura na fronteira unitária, então a solução do problema, quando a temperatura na fronteira é variável no tempo, $\phi(t)$, é determinada pela equação (7), [7].

$$v = \int_0^t \phi(\tau) \frac{\partial}{\partial t} F(r, t - \tau) d\tau. \quad (7)$$

Considere-se um novo problema auxiliar definido pelas equações (8-11), obtido através da mudança de variável.

$$\alpha_i \frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t} \quad (8)$$

$$\theta(0,t) = \theta_0, \quad x = 0 \quad (9)$$

$$-k_i \frac{\partial \theta(d_i,t)}{\partial x} = Q_s \frac{\partial \theta(d_i,t)}{\partial t}, \quad x = d_i \quad (10)$$

$$\theta(x,0) = 0, \quad t = 0 \quad (11)$$

A solução deste problema auxiliar, que pode ser determinada por métodos clássicos, é dada pela equação (12), [7].

$$\frac{\theta(x,t)}{\theta_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\beta_n^2 + \mu^2)}{\beta_n(\beta_n^2 + \mu^2 + \mu)} e^{-\frac{\alpha_i \beta_n^2}{d_i^2} t} \sin\left(\frac{\beta_n x}{d_i}\right) \quad (12)$$

β_n representa as raízes da equação transcendental $\beta_n \operatorname{tg} \beta_n = \mu$.

A temperatura no domínio do material de protecção pode ser determinada pelo teorema de Duhamel.

$$T(x,t) = T_0 - \int_{\tau=0}^t Tg(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\theta(x,t-\tau)}{\theta_0} \right) d\tau \quad (13)$$

Quando a temperatura na fronteira do intumescente em contacto com o incêndio é dada pela curva de incêndio padrão ISO834, o integral da equação anterior não é de resolução expedita, envolvendo o integral do produto de uma função logarítmica por um exponencial. A forma de resolver este problema consiste em aproximar a curva de incêndio por uma soma de funções exponenciais, utilizada pelo regulamento Sueco, [6], e definida pela equação (14), considerando uma temperatura inicial nula.

$$Tg(t) = \sum_{j=0}^3 \theta_j e^{-\phi_j t} \quad (14)$$

Os coeficientes θ_j e ϕ_j são constantes definidos na Tabela 1.

Tabela 1. Coeficientes da função exponencial, equação (14).

j	0	1	2	3
$\theta [^\circ \text{C}]$	1325	-430	-270	-625
$\phi [h^{-1}]$	0	0.2	1.7	19

Considerando a equação (14), a distribuição da temperatura no domínio do intumescente e no tempo pode ser determinada por:

$$T(x,t) = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=0}^3 \left[\frac{\theta_j (e^{(-\phi_j)t} - e^{-\frac{\alpha_i \beta_n^2}{d_i^2} t})}{1 - \phi_j d_i^2 / (\alpha_i \beta_n^2)} K_n \sin\left(\frac{\beta_n x}{d_i}\right) \right] \quad (15)$$

em que $K_n = 2(\beta_n^2 + \mu^2) / [\beta_n(\beta_n^2 + \mu^2 + \mu)]$.

A evolução da temperatura no aço, $T_s(t)$, é determinada substituindo $x=d_i$ na equação anterior.

$$T(d_i, t) = T_s(t) = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=0}^3 \left[\frac{\theta_j (e^{(-\phi_j)t} - e^{-\frac{\alpha_i}{d_i^2} \beta_n^2 t})}{1 - \phi_j d_i^2 / (\alpha_i \beta_n^2)} K_n \sin(\beta_n) \right] \quad (16)$$

3.2. Funções de Green

Considere-se um problema genérico de transferência de calor, definido pela equação (17), na região R , sujeito à condição de fronteira (18) na superfície S_i e à condição inicial definida pela equação (19), [8].

$$\nabla^2 T(r, t) + \frac{1}{k} g(r, t) - m^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} \quad (17)$$

$$k_i \frac{\partial T}{\partial n_i} + h_i T = f_i(r_i, t) - (\rho c d)_i \frac{\partial T}{\partial t} \quad (18)$$

$$T(r, 0) = F(r) \quad (19)$$

O termo $m^2 T$ poderá representar a perda de calor numa direcção lateral, $m = f(r)$. A condição de fronteira (18) pode representar cinco condições de fronteira distintas, impondo $k_i = 0$ ou k , $h_i = 0$ ou h e também $b = 0$ ou $b \neq 0$.

O método das funções de Green (FG) define uma função, utilizando-a para determinar a solução do problema original. Uma FG, $G(r, t | r', \tau)$, representa a temperatura na posição r , no instante t , obtida através de uma fonte de calor instantânea e unitária localizada em r' e libertada no instante τ . As funções de Green devem satisfazer a propriedade de causalidade, em que $G = 0$ para $t - \tau < 0$ e $G \geq 0$ para $t - \tau > 0$, assim como a propriedade de reciprocidade, em que $G(r, t | r', \tau) = G(r', -\tau | r, -t)$.

A FG do problema definido pelas equações (17-19) deve obedecer ao seguinte problema auxiliar, em que o operador ∇_0^2 é relativo às coordenadas auxiliares r' .

$$\nabla_0^2 G + \frac{1}{\alpha} \delta(r' - r) \delta(\tau - t) - m^2 G = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial G}{\partial \tau} \quad (20)$$

$$k_i \frac{\partial G}{\partial n_i} + h_i G = (\rho c d)_i \frac{\partial G}{\partial \tau} = Q_{Si} \frac{\partial G}{\partial \tau} \quad (21)$$

$$G(r, t | r', \tau) \Big|_{\tau=0} = 0 \quad (22)$$

δ representa a função delta Dirac. Este problema auxiliar possui condições de fronteira homogêneas e uma temperatura inicial nula.

Reescrevendo a equação (17) em função das variáveis r' e τ , obtém-se.

$$\nabla_0^2 T(r', \tau) + \frac{1}{k} g(r', \tau) - m^2 T(r', \tau) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r', \tau)}{\partial \tau} \quad (23)$$

Multiplicando a equação (23) por G e a equação (20) por T e subtraindo esta última à anterior, obtém-se a equação (24).

$$(G \nabla_0^2 T - T \nabla_0^2 G) + \frac{1}{k} g(r', \tau) G - \frac{1}{\alpha} \delta(r' - r) \delta(\tau - t) T - m^2 (GT - TG) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial (TG)}{\partial \tau} \quad (24)$$

Integrando a equação (24) relativamente a r' , na região R , e também em relação a τ desde 0 a $t^* = t + \varepsilon$, em que ε representa um pequeno incremento de tempo positivo, utilizando o teorema de Green e explicitando em ordem a $T(r, t)$, determina-se a equação (25).

$$\begin{aligned} T(r, t) = & \int_R G(r, t | r', 0) F(r') dv' + \frac{\alpha}{k} \int_{\tau=0}^{t^*} \int_R g(r', \tau) G(r, t | r', \tau) dv' d\tau \\ & + \alpha \int_{\tau=0}^{t^*} \sum_{i=1}^S \int_{s_i} \left[\frac{f_i(r'_i, \tau)}{k_i} G(r, t | r'_i, \tau) \right] ds'_i d\tau - \alpha \int_{\tau=0}^{t^*} \sum_{j=1}^S \int_{s_j} f_j(r'_j, \tau) \left. \frac{\partial G}{\partial n_j} \right|_{r'=r'_j} ds'_j d\tau \\ & + \alpha \sum_{i=1}^S \int_{s_i} \frac{Q_{Si}}{k_i} G(r, t | r'_i, 0) F(r'_i) ds'_i \end{aligned} \quad (25)$$

A equação anterior define o campo de temperaturas de um sólido com condições de fronteira não homogêneas prescritas. Na equação a FG deve ser determinada no instante $\tau = 0$ e o quarto termo considera os efeitos das condições de fronteira de Dirichlet.

Quando a equação diferencial e as suas condições de fronteira são homogêneas, a equação (25) reduz-se à equação (26).

$$T(r, t) = \int_R G(r, t | r', 0) F(r') dv' \quad (26)$$

A função $G(r, t | r', 0)$ é determinada através da solução do problema homogêneo e por comparação desta com a equação (26). Segundo Ozisik [9], a função $G(r, t | r', \tau)$ pode ser obtida através da substituição de t por $t - \tau$.

Considere-se o problema auxiliar definido pelas equações (8-11), considerando que $F(x) = \theta_0$. Utilizando o método da separação de variáveis, com a mudança de variável $T(x, t) = X(x) \cdot \varphi(t)$, a solução do problema é definida por:

$$T(x, t) = \sum_{m=1}^{\infty} C_m X_m(\beta_m, x) e^{-\frac{\beta_m^2 \alpha}{d_i^2} t} \quad (27)$$

em que $X_m(\beta_m, x) = \sin(\beta_m x / d_i)$ e β são as soluções da equação transcendental já apresentada. Expandindo $F(x)$ numa série de Fourier, considerando a propriedade de ortogonalidade, a solução do problema auxiliar homogêneo é dado por,

$$T(x,t) = \int_0^{d_i} \sum_{m=1}^{\infty} w(x) \frac{X_m(\beta_m, x) X_m(\beta_m, x')}{N(\beta_m)} e^{-\frac{\beta_m^2 \alpha_i t}{d_i^2}} F(x') dx' \quad (28)$$

onde $w(x)$ é uma função peso igual a $w(x) = 1 + (Q_i/Q_s)L\delta(L-x)$ e a norma é dada por

$$N(\beta_m) = \int_0^{d_i} w(x) X_m(\beta_m, x)^2 dx, [8].$$

A FG é obtida através da comparação das equações (28) e (26). A solução do problema não homogêneo definido pelas equações (3-6) é a apresentada na equação (29).

$$T(x,t) = T_0 + \alpha_i \int_{\tau=0}^t f_j(x', \tau) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{X_m(\beta_m, x)}{N(\beta_m)} \frac{\partial X_m(\beta_m, x')}{\partial x_j} \Big|_{x'=0} e^{-\frac{\beta_m^2 \alpha_i (t-\tau)}{d_i^2}} d\tau \quad (29)$$

Considerando que a temperatura de incêndio é definida pela equação (14), a evolução da temperatura do aço é determinada pela equação (30).

$$T_{st}(t) = T_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{j=0}^3 \left\{ \frac{1}{N(\beta_m)} \frac{d_i \sin(\beta_m)}{\beta_m (1 - \phi_j d_i^2 / (\alpha_i \beta_m^2))} \theta_j \left(e^{-\phi_j t} - e^{-\frac{\beta_m^2 \alpha_i t}{d_i^2}} \right) \right\} \quad (30)$$

3.3. Comparação da variação da temperatura segundo os dois métodos

A Figura 4 apresenta uma comparação, dos métodos apresentados e da formulação presente no EC3-1.2, do aumento da temperatura no aço sujeito à curva de incêndio padrão.

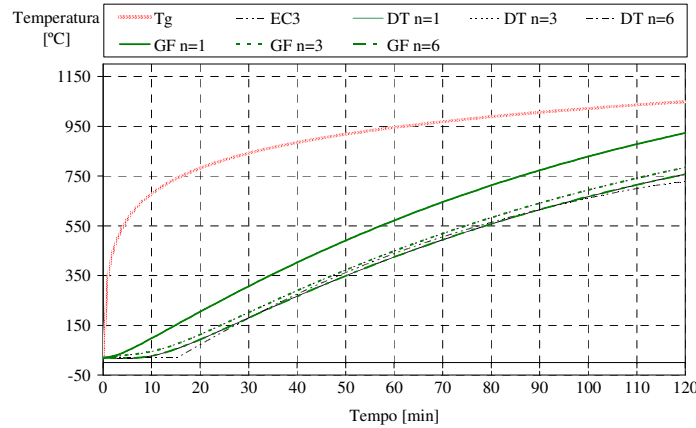


Figura 4. Comparação da evolução da temperatura no aço.

O caso de estudo é relativo a um perfil HEA300, com um factor de massividade de $153 [m^{-1}]$, protegido por placas de gesso de $40[mm]$. As propriedades térmicas do aço e do material de protecção consideradas são as apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades térmicas do aço e do material de protecção.

Aço			Protecção (Placas de gesso)		
ρ_s	c_s	k_s	ρ_i	c_i	k_i
7850	600	45	1440	840	0.48

A Figura 4 apresenta uma boa aproximação entre ambas as soluções quando são utilizados no mínimo três termos. Com seis termos os resultados obtidos pelo método das funções de Green e pelo teorema de Duhamel são quase coincidentes.

4.VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Esta secção compara os resultados dos ensaios experimentais de resistência ao fogo em perfis protegidos com tinta intumescente, apresentados na secção 2, com os resultados analíticos e numéricos. Em ambos os métodos foi considerada a variação da condutividade térmica efectiva obtida pelos ensaios experimentais e apresentados na Figura 2. Como as equações (16) e (30) foram obtidas assumindo propriedades térmicas constantes, a evolução da temperatura no aço foi determinada recorrendo a um processo incremental, baseado numa diferença finita à frente. As restantes propriedades térmicas foram consideradas independentes da temperatura e iguais a $\rho_i = 1360 [kg/m^3]$ e $c_i = 1000 [J/kg/K]$. As propriedades do aço são as apresentadas na Tabela 2. Os resultados numéricos foram obtidos através de uma análise bidimensional baseado no método dos elementos finitos realizada na PDEToolbox do software Matlab. Em ambas as soluções foi considerado um incremento de tempo de 30s, para garantir estabilidade numérica.

Nas figuras 5 a 7 são apresentados os resultados analíticos e numéricos da evolução da temperatura do aço em comparação com os resultados experimentais. Nas figuras $T_s - TD$ e $T_s - FG$ representam os resultados obtidos pelo teorema de Duhamel e pelo método das funções de Green, respectivamente, considerando em ambos os primeiros seis termos da série.

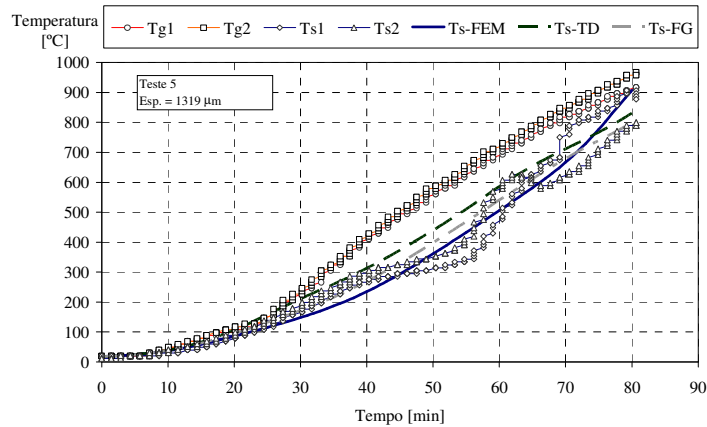


Figura 5. Evolução da temperatura no aço, teste 5.

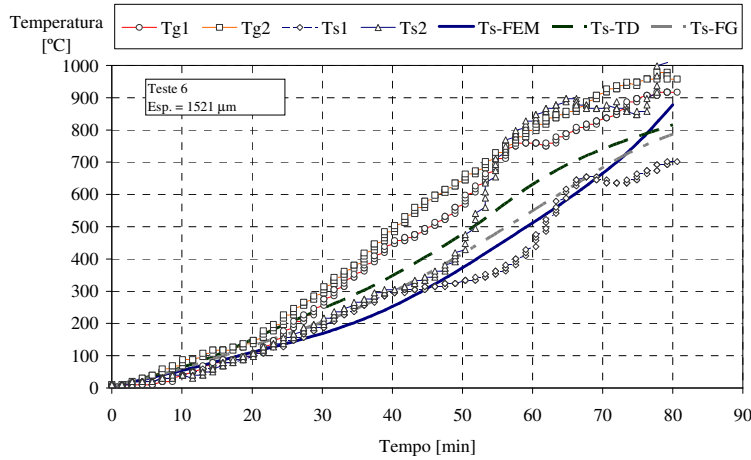


Figura 6. Evolução da temperatura no aço, teste 6.

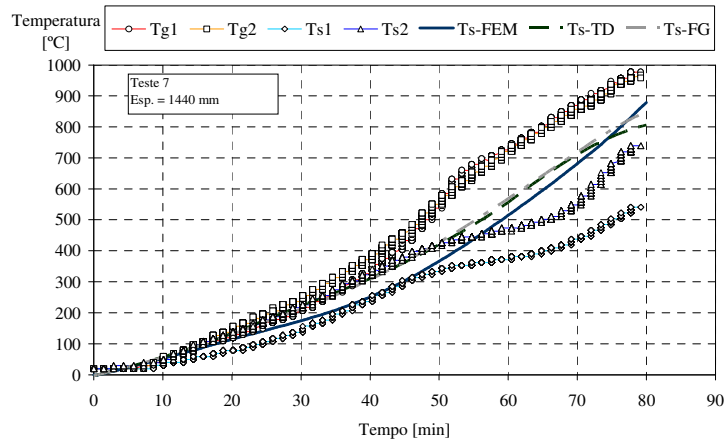


Figura 7. Evolução da temperatura no aço, teste 7.

As figuras mostram que se obtém uma melhor aproximação entre os resultados analíticos e experimentais na fase inicial de aquecimento. Na fase final verifica-se que os resultados analíticos e numéricos mostram uma ligeira divergência.

As figuras 8 a 10 apresentam a evolução da temperatura no aço de três perfis, HEA 300, IPE330 e IPE160, com factores de massividade (SF) 153, 200, e 310 $[m^{-1}]$, respectivamente, protegidos com diferentes espessuras de tinta intumescente, 1000, 1500 e 2000 $[\mu m]$.

No caso da espessura de protecção de 1000 $[\mu m]$, foi considerada a temperatura dos gases de incêndio e a condutividade térmica efectiva do teste 5. Nos restantes casos foram considerados os dados do teste 6.

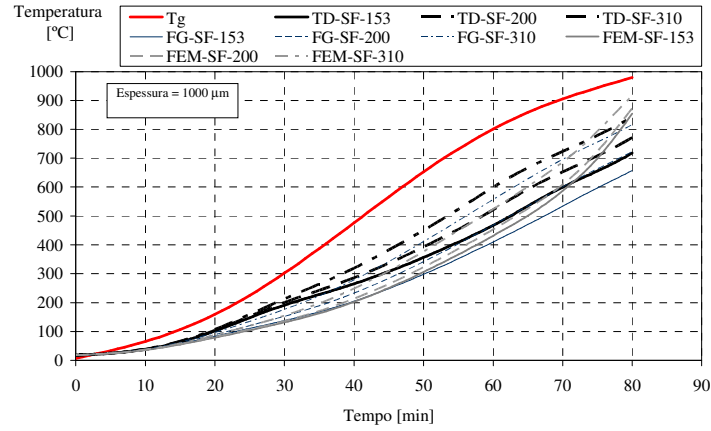


Figura 8. Evolução da temperatura no aço, $d_i = 1000[\mu m]$.

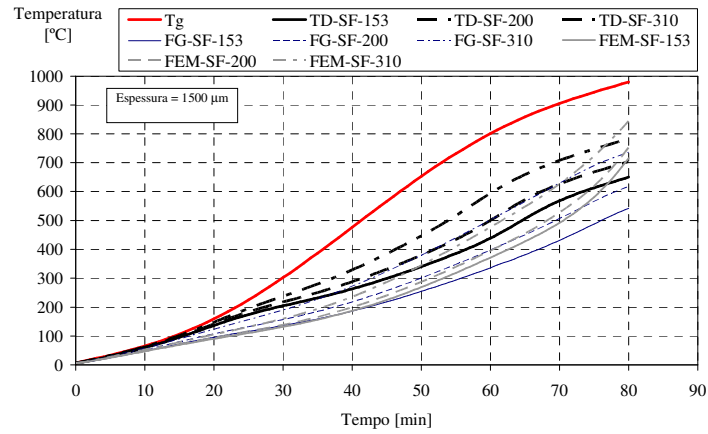


Figura 9. Evolução da temperatura no aço, $d_i = 1500[\mu m]$.

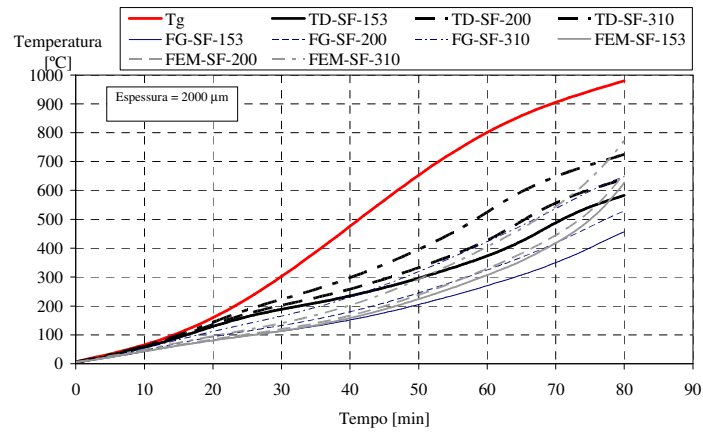


Figura 10. Evolução da temperatura no aço, $d_i = 2000[\mu m]$.

Os resultados anteriores mostram que, para a mesma espessura de protecção, a temperatura no aço aumenta com o valor do factor de massividade do perfil. Os resultados baseados no teorema de Duhamel são sempre superiores aos obtidos pelo método das funções de Green. Esta diferença é atenuada para valores mais reduzidos do rácio da capacitância térmica da protecção e do aço, μ , verificados em valores mais elevados do factor de massividade ou valores reduzidos da espessura de protecção.

Os resultados numéricos encontram-se mais próximos dos obtidos pelo método das funções de Green.

5. CONCLUSÕES

- Foram apresentadas duas soluções analíticas para determinar a evolução da temperatura do aço com protecção ao fogo. As soluções são baseadas no teorema de Duhamel e no método das funções de Green. Verificou-se que se obtém uma aproximação adequada com seis ou mais termos.
- Os resultados experimentais foram comparados com as soluções analíticas e com resultados numéricos obtidos pelo MEF. Os resultados numéricos prevêem temperaturas mais baixas, na fase inicial e intermédia dos testes, em comparação com os resultados analíticos.
- As duas soluções analíticas convergem para valores mais reduzidos do rácio da capacitância térmica do material de protecção e do aço.

REFERÊNCIAS

- [1] CEN; EN 1993-1-2; “Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-2: General rules, Structural fire design”; April 2005.
- [2] Regulamento de segurança contra incêndios em edifícios de habitação, Dec. Lei nº 64/90 de 21 de Fevereiro.
- [3] Mesquita, L.M.R.; Piloto, P.A.G.; Vaz, M.A.P; Vila Real, P.M.M.; “Ensaio de resistência ao fogo de vigas em aço protegidas com tinta intumescente”; revista Mecânica Experimental, APAET, vol. 12, pp 129-137; 2006.
- [4] Wickstrom, U.; Temperature analysis of heavily-insulated steel structures exposed to fire; Fire of Safety Journal, 9, pp281-285, 1985.
- [5] Tan, Kang Hai; Wang, Zhihua; Au, Siu Kui; “Heat transfer analysis for steelwork insulated by intumescent paint exposed to standard fire conditions”; 3rd International workshop “Structures in fire”; Ottawa – Canada; May 2004.
- [6] Wang, Z.-H., Tan, K.H., “Sensitivity study of time delay coefficient of heat transfer formulations for insulated steel members exposed to fire”, Fire Safety Journal, 41, 31-38, 2006.
- [7] Carslaw, H.S., Jaeger, J.C., “Conduction of heat in solids”, Oxford University Press, Second Edition, 1959.
- [8] Beck, J.V., Green’s Function solution for transient heat conduction problems”, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 27, 1235-1244, 1984.
- [9] Ozisik, M.N., “Heat Conduction”, John Wiley & Sons, Inc, Second edition, 1993.