

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS EM AÇO PROTEGIDAS COM TINTA INTUMESCENTE

Mesquita, L. M. R.¹; Piloto, P.A.G.²; Vaz, M.A.P.³; Vila Real, P.M.M.⁴

¹ – Assistente, DMA-ESTIG, Instituto Politécnico de Bragança

² – Professor Coordenador, DMA-ESTIG, Instituto Politécnico de Bragança

³ – Professor Associado, DEMEGI – FEUP, Universidade do Porto

⁴ – Professor Catedrático, DEC, Universidade de Aveiro



RESUMO

Uma viga sem constrangimentos laterais submetida a um carregamento mecânico e sujeita a um aumento de temperatura, por exemplo proveniente de um incêndio, pode atingir o colapso pelo fenómeno de instabilidade por encurvadura lateral torsional, originado pela diminuição da capacidade resistente. Este trabalho apresenta o procedimento experimental e os ensaios realizados para a determinação da resistência ao fogo de vigas de aço IPE100 protegidas com tinta intumescente. São analisadas diferentes espessuras de protecção ao fogo, verificando-se um aumento da temperatura crítica e do tempo de resistência ao fogo com o aumento desta. Com base nos resultados experimentais é apresentada a evolução da condutividade térmica da tinta intumescente com a temperatura.

1- INTRODUÇÃO

As estruturas de aço são amplamente utilizadas na construção de edifícios devido à sua elevada resistência mecânica, boa ductilidade e rápida execução da obra. No entanto, devido à deterioração das propriedades mecânicas com a temperatura, é fundamental que toda a estrutura, e os seus elementos, possuam a resistência necessária para prevenir um eventual colapso causado pela ocorrência de um incêndio.

A resistência do aço a temperaturas elevadas encontra-se definida com grande detalhe, sendo conhecido que a 550 [°C] o aço estrutural possui somente 60 % da sua capacidade resistente à temperatura

ambiente. Estudos mais recentes vieram demonstrar que esta temperatura limite depende essencialmente de dois factores, a distribuição da temperatura na secção transversal e o grau de utilização, definido pelo carregamento e pela capacidade resistente, (Corus, 2001).

Um dos métodos mais eficazes de dotar uma estrutura com a capacidade de resistência ao fogo pretendida é proceder-se ao seu dimensionamento sem a utilização de protecção adicional, recorrendo à utilização de perfis de gama superior, de aços de melhor qualidade ou de elevada resistência ao fogo. Em alternativa, é comum a aplicação de sistemas de protecção passiva, como o betão, placas de gesso, fibras minerais ou tintas

intumescentes, dotando os elementos estruturais de uma protecção ao fogo total ou parcial.

As tintas intumescentes são materiais reactivos que reagem com a acção de um incêndio, originando um aumento de volume, tipicamente entre 40 a 50 vezes, ver a Figura 1, comportando-se como uma camada protectora que reduz o aumento da temperatura no aço (Dowling, 2003). Como vantagens notórias destaca-se o menor peso introduzido na estrutura, em comparação com outras medidas de protecção, a sua aplicação em estaleiro e a obtenção de um bom acabamento superficial, que pode ser melhorado com a aplicação de filmes decorativos. Por outro lado, a sua aplicação exige uma elevada experiência com um elevado controlo de qualidade e com medidas de espessura frequentes.



Figura 1 - Reacção da tinta intumescente.

O aquecimento dos perfis protegidos é devido, essencialmente, ao modo de transferência de calor por condução, já que o aço não se encontra directamente exposto à radiação do fogo ou em contacto com os seus gases, (Lewis, 2000). A aplicação de tintas intumescentes como protecção ao fogo é função das propriedades físicas e térmicas do mesmo, do factor de massividade do elemento a proteger e do tempo de resistência ao fogo pretendido. O aumento do tempo de resistência ao fogo pode ser obtido com o aumento da espessura de protecção ou, para a mesma espessura de protecção, utilizando perfis de massividade inferior.

2- EXIGÊNCIAS REGULAMENTARES DE RESISTÊNCIA AO FOGO

Os regulamentos de segurança contra incêndio, como por exemplo o regulamento de segurança contra incêndios em edifícios de habitação, (DL, 1990), estabelecem que os elementos estruturais devem possuir uma resistência ao fogo suficiente para limitar a ocorrência do colapso durante a evacuação das pessoas e o combate ao incêndio, desempenhando a altura do edifício um factor importante na definição da classe de resistência ao fogo da estrutura. Nos edifícios de habitação unifamiliares, os elementos estruturais que desempenham funções de suporte devem possuir uma resistência ao fogo de pelo menos 30 minutos, ou seja, ter uma qualificação EF30, salvo quando constituídos por materiais não combustíveis. Para edifícios de altura superior a 9 [m], mas inferior a 28 [m], os elementos estruturais devem ser da classe de resistência ao fogo EF60, e da classe EF90 para edifícios de altura superior a 60 [m]. No caso de parques de estacionamento cobertos, (DL, 1995), que ocupam uma parte do edificio, pode ser exigível uma classe de resistência ao fogo de EF180.

2.1 - Cálculo da temperatura de elementos protegidos

A Figura 2 representa o modelo unidimensional de transferência de calor entre um elemento de aço protegido por uma camada de isolamento, de espessura d_p , e os gases do incêndio.

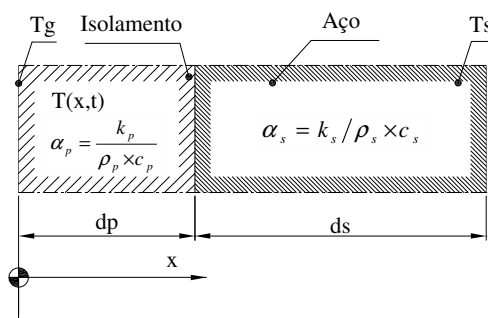


Figura 2 – Modelo unidimensional de transferência de calor.

O aumento de temperatura do elemento estrutural com protecção ao fogo pode ser calculado através da análise transiente da condução de calor no intumescente, expressa pela equação diferencial (1).

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_p} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \quad (1)$$

α_p representa a difusividade térmica da protecção ($=k_p / \rho_p c_p$), em que c_p representa o calor específico da protecção, k_p a condutividade da protecção e ρ_p a massa volúmica da protecção.

A solução da equação diferencial passa pela hipótese simplificativa da condição fronteira de Dirichlet na camada do intumescente em contacto com os gases do incêndio, $T(0,t)=T_g(t)$. A evolução da temperatura é dada pela curva de incêndio padrão ISO834, ver a equação (2), assumindo-se que a temperatura na superfície exterior da protecção é igual à temperatura dos gases do incêndio.

$$T_g = 20 + 345 \times \log_{10}(8t + 1) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2)$$

Wickström (Wickström, 1985) e Melinek e Thomas (Melinek, 1987) apresentaram expressões distintas que permitem o cálculo da temperatura em elementos com protecção ao fogo. No entanto, Wong e Ghajel (Wong, 2005) verificaram a existência de uma elevada discrepância nos resultados das duas soluções quando são utilizados materiais de protecção ao fogo de elevada densidade, como é o caso do betão.

Segundo o EC3 (CEN prEN 1993-1-2, 2003) o aumento da temperatura do aço com protecção ao fogo, ΔT_s , pode ser calculado pela equação (3), a qual é baseada na solução de Wickström.

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

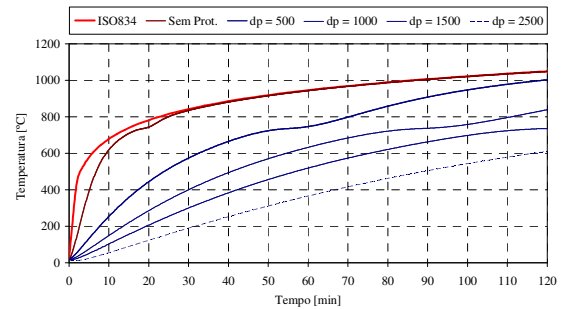
Em que:

$$\phi = \frac{c_p \rho_p d_p}{c_s \rho_s (P/A)}$$

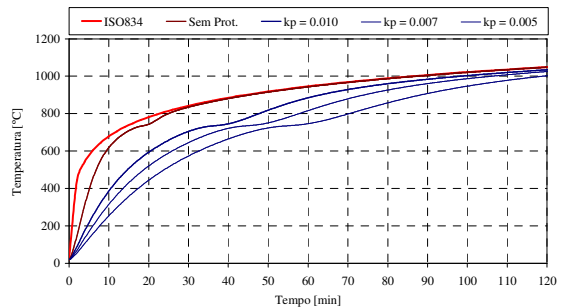
c_s e ρ_s representam o calor específico (J/Kg K) e a densidade (Kg/m³)

do aço, respectivamente, ΔT_g o aumento da temperatura do gás ocorrido no intervalo Δt , T_g e T_s são a temperatura do gás e do aço, respectivamente (°C) e P/A o factor de massividade, perímetro/área da secção transversal, (m⁻¹).

A Figura 3 mostra a evolução da temperatura de um perfil IPE100, com um factor de massividade igual a 387 [m⁻¹], submetido à curva de incêndio ISO834 e protegido com tinta intumescente, apresentando-se a influência da espessura da protecção e da condutividade térmica na protecção ao fogo. A espessura de protecção é considerada constante durante a acção do fogo, tendo sido considerados os valores $\rho_p = 1360 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ e $c_p = 1000 \text{ [J/kg K]}$.



a) Influência da espessura de protecção, d_p , em $[\mu\text{m}]$, para uma condutividade de $k_p=0.005 \text{ [w/m}^\circ\text{C]}$.



b) Influência da condutividade do intumescente para uma espessura constante de $d_p=500 \text{ [}\mu\text{m}]$.

Figura 3 – Análise de um perfil IPE100 protegido com tinta intumescente.

2.2 - Resistência à encurvadura lateral – Eurocódigo 3

A resistência ao fogo de um elemento estrutural pode ser definida como o intervalo de tempo transcorrido desde o início de um incêndio normalizado, até ao momento em que o elemento atinge a sua

temperatura crítica. Isto é, a temperatura a partir da qual o elemento deixa de satisfazer as funções de suporte de cargas para que foi projectado, com o limite de segurança estabelecido pela equação.

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \quad (4)$$

em que $E_{fi,d}$ representa o valor de cálculo do efeito das acções exercidas sobre o elemento, que no caso presente deve ser determinado em função da combinação accidental, enquanto que $R_{fi,d,t}$ representa o valor de cálculo da capacidade resistente do elemento, ver a Figura 4, em que 1 representa o domínio do tempo, 2 o domínio da resistência e 3 o domínio da temperatura, (Vila Real, 2003).

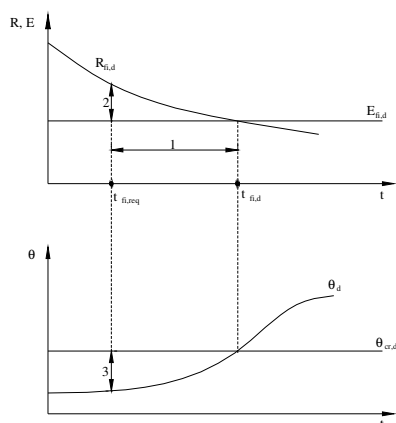


Figura 4 - Domínios de verificação da resistência ao fogo.

No caso da verificação de segurança de elementos de viga (classe 1 e 2), $R_{fi,d,t}$ pode representar, por exemplo, o valor de cálculo do momento flector resistente no instante t , $M_{b,fi,t,Rd}$, sem constrangimentos laterais, devendo este ser determinado pela equação (5).

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{y,\theta,com} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (5)$$

O cálculo da temperatura crítica para elementos sujeitos a fenómenos de instabilidade (elementos comprimidos por flexão sujeitos à encurvadura lateral), por exemplo, deverá obedecer a um processo iterativo, uma vez que a resistência não é directamente proporcional à tensão de cedência do aço. Para os casos em que se verifica esta proporcionalidade, a temperatura crítica é determinada em função do grau de utilização, μ_0 , pela

equação (6), sem a necessidade de se recorrer a um processo iterativo.

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad (6)$$

O grau de utilização, μ_0 , é definido pela relação entre o valor de cálculo do efeito das acções e a capacidade resistente no instante $t = 0$.

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \quad (7)$$

3 - ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Pretende-se com este trabalho apresentar um conjunto de ensaios experimentais, à escala real, para determinação da temperatura crítica de vigas submetidas à acção do fogo, protegidas com tinta intumescente, sujeitas a um carregamento mecânico constante e posterior solicitação térmica. A instrumentação das vigas foi feita de acordo com as especificações da norma UNE 23820, (UNE 23820, 1997).

Na fase inicial da preparação das vigas, procedeu-se à soldadura dos termopares e pintura protectora aderente utilizando um primário. Posteriormente procedeu-se à pintura com a tinta intumescente, de base solvente, utilizando uma pistola convencional a ar comprimido, para a aplicação das demãos necessárias para a obtenção da espessura de protecção pretendida.



a) Aplicaçao do primário.



b) Controlo dimensional da espessura seca de tinta intumescente.

Figura 5 – Preparação das vigas para os ensaios.

A Tabela 1 apresenta os valores medidos da espessura seca em cinco secções longitudinais da viga, utilizando oito medições por secção.

O primeiro conjunto de três ensaios (E2, E3, E4) possui um valor médio de espessura de protecção de $468.3 [\mu\text{m}]$ enquanto que o segundo conjunto (E5, E6, E7) apresenta um valor médio de $1427.2 [\mu\text{m}]$, correspondendo a uma estabilidade ao fogo ISO834 de 31 e 44 minutos, respectivamente. Estes valores foram obtidos por extrapolação dos valores recomendados pelo fabricante da tinta, de um factor de massividade de $360 [\text{m}^{-1}]$ para a massividade do perfil utilizado, considerando uma temperatura crítica de $550 [^{\circ}\text{C}]$, (CIN, 2003). É ainda apresentado o resultado de um ensaio de uma viga sem tinta intumescente (E1), para se verificar a eficácia deste tipo de protecção.

3.1 - Procedimento experimental

As vigas encontram-se suportadas com apoios de forquilha e não possuem qualquer constrangimento lateral, podendo

atingir o fenómeno de instabilidade por encurvadura lateral torsional, ver a figura 2. Segundo o Eurocódigo 3 parte 1.1 o momento resistente da viga, à temperatura ambiente, é determinado pela equação (8), (CEN prEN1993-1-1, 2003).

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1} \quad (8)$$

$W_{pl,y}$ representa o valor do módulo plástico, f_y o valor da tensão de cedência e χ_{LT} o factor de redução para a encurvadura lateral.

Os perfis utilizados nos ensaios são IPE100 de qualidade S235, com as seguintes propriedades mecânicas: módulo de elasticidade $E = 209.7 [\text{GPa}]$ e tensão de cedência $f_y = 293 [\text{MPa}]$, valores medidos experimentalmente. As vigas encontram-se solicitadas com as cargas representadas na Figura 6, aplicadas a uma distância de $250 [\text{mm}]$ dos apoios, através de dois cilindros hidráulicos cujo valor ($F=18.3 [\text{KN}]$) origina um momento uniforme entre apoios, correspondente a 60% do momento resistente à encurvadura lateral ($7.647 [\text{KNm}]$).

A distância entre apoios (L_{sup}) é de $2200 [\text{mm}]$, o comprimento de viga exposto ao fogo (L_{exp}) é de $1950 [\text{mm}]$. A evolução da temperatura na viga é registada através de termopares do tipo K, soldados à viga, posicionados de acordo com a norma UNE 23820 e representados na Figura 6.

Tabela 1 - Valores medidos da espessura de tinta intumescente $[\mu\text{m}]$.

Ensaio	Secção 1	Secção 2	Secção 3	Secção 4	Secção 5	Média
E1	Sem Protecção					
E2	440,50	468,38	435,75	418,88	408,00	434,30
E3	430,50	492,00	493,88	504,63	448,38	473,88
E4	487,25	544,63	491,13	502,38	458,38	496,75
E5	1265,25	1327,47	1348,81	1363,06	1291,56	1319,23
E6	1465,72	1506,41	1553,88	1558,47	1522,09	1521,31
E7	1410,56	1463,44	1488,94	1407,59	1434,38	1440,98

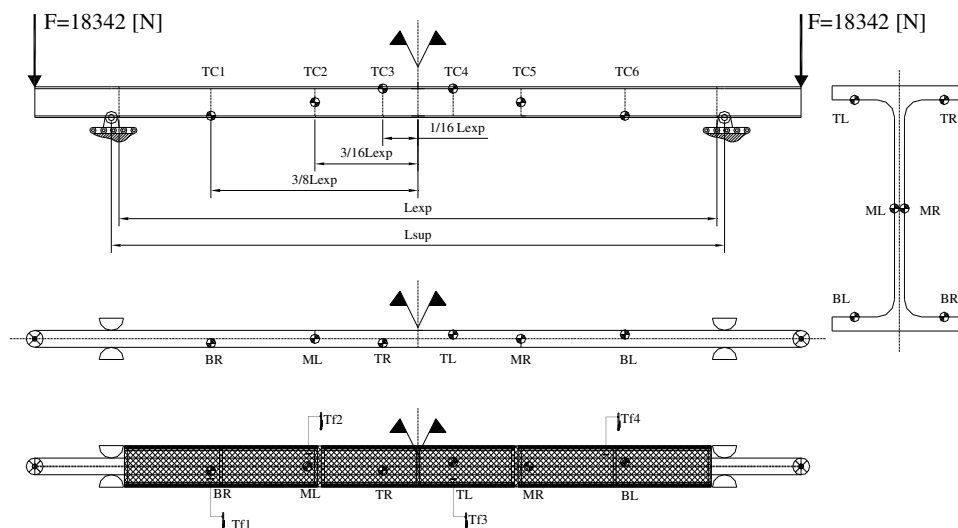


Figura 6 - Caso de estudo e localização dos termopares.

O aquecimento é aplicado de acordo com uma taxa de aquecimento pré definida de 800 [°C/h], utilizando o esquema representado na Figura 7. As resistências eléctricas (8) são apoiadas numa armadura em aço (9) e ligadas a um sistema de aquecimento. Para aumentar a eficiência térmica do processo é utilizada uma manta de fibra cerâmica (4) com malha de aço inoxidável. Para além do registo da temperatura na viga (3), é registada a temperatura na envolvente do perfil (1) e na armadura (2).

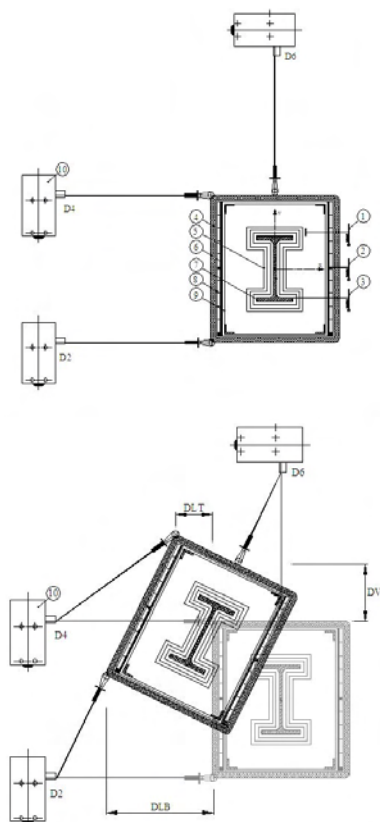


Figura 7 - Esquema do procedimento do ensaio.

Durante a execução dos ensaios, ver as Figura 8 e Figura 9, são medidos os deslocamentos, na secção central da viga, com os transdutores de deslocamento apresentados na Figura 7 (D2, D4, D6).



Figura 8 - Ensaio em execução.

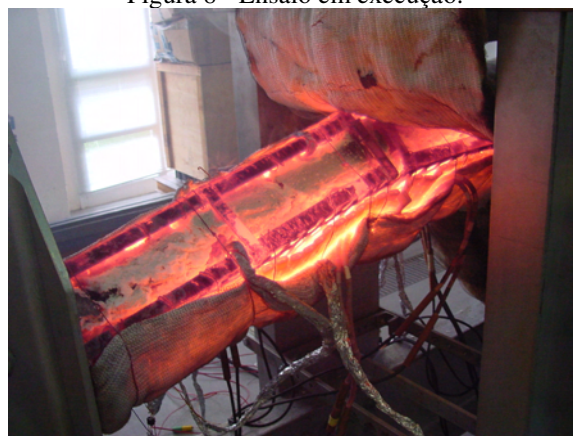


Figura 9 - Desenvolvimento da intumescência após a acção térmica.

4- RESULTADOS

A Figura 10 apresenta os resultados obtidos no ensaio E1, no qual não foi aplicada qualquer protecção intumescente.

Verifica-se que durante o ensaio, a temperatura da viga (T_{vi}) é aproximadamente igual à temperatura na envolvente da mesma (T_{fi}).

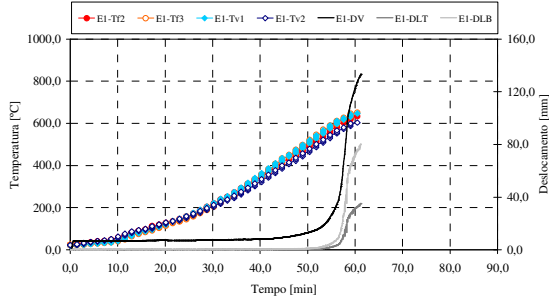


Figura 10 - Resultados do ensaio 1, sem protecção.

Na Figura 11 e Figura 12 encontram-se representados os resultados para o conjunto de vigas que possui uma espessura média de protecção igual a $468.3[\mu\text{m}]$ e para as vigas que possuem uma espessura média de protecção de $1427.2[\mu\text{m}]$, respectivamente.

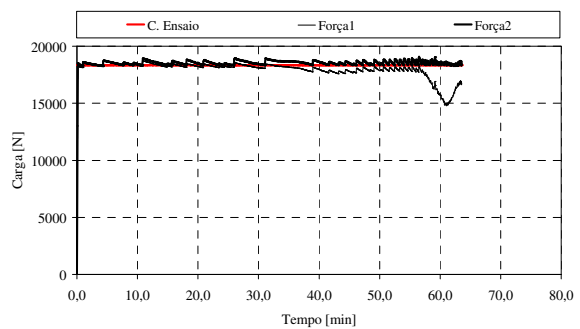
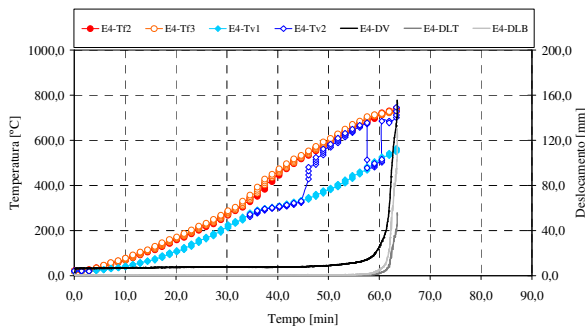
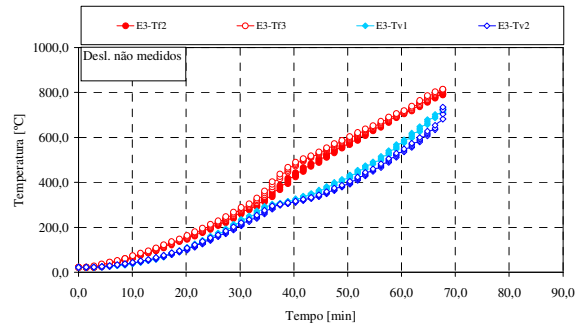
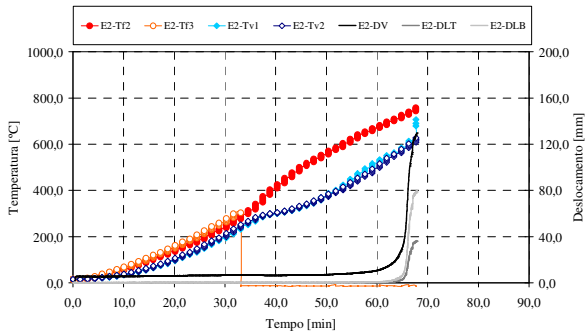


Figura 11 - Resultados dos ensaios E2 a E4.

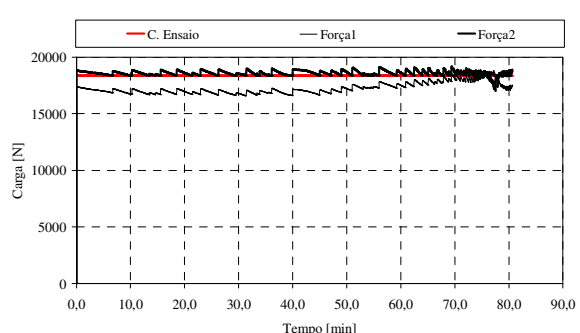
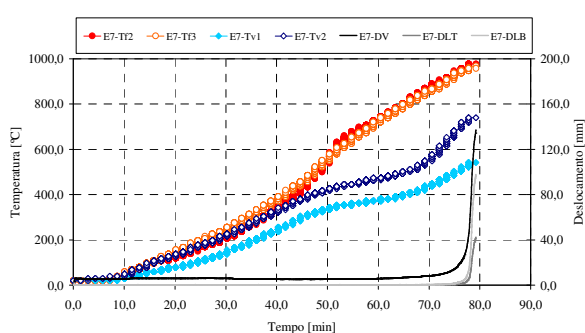
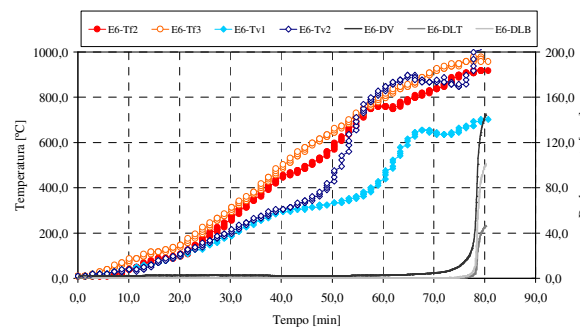
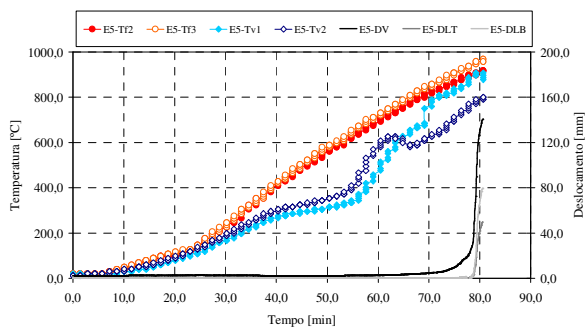


Figura 12 - Resultados dos ensaios E5 a E7.

Na Figura 11 e Figura 12 é ainda apresentada a evolução dos carregamentos relativos aos ensaios E4 e E5, respectivamente, nas quais se verifica a variação da carga aplicada com a capacidade resistente da viga. Este valor é mantido aproximadamente constante através do accionamento de uma electroválvula do circuito hidráulico sempre que a força de ambos os cilindros esteja abaixo do valor pretendido.

Estes resultados evidenciam a perda da capacidade resistente devido ao aumento da temperatura no aço. Verifica-se ainda o aumento do tempo de resistência ao fogo e da temperatura crítica com o aumento da espessura de protecção da viga. A análise dos resultados dos deslocamentos verifica a ocorrência de instabilidade por encurvadura lateral.

4.1 - Análise da condutividade do intumescente

A inversão da equação (3) permite obter de forma explícita a condutividade térmica do material de protecção, equação (9), e determinar a variação desta propriedade com a temperatura da protecção, com base nos valores experimentais das temperaturas do gás e da viga, admitindo uma espessura da tinta intumescente constante e igual à espessura inicial, (UNE 23820, 1997).

$$k_p = \left[\frac{c_s \rho_s (1 + \phi/3) d_p}{(T_g - T_s) \Delta t} \frac{d_p}{P/A} \right] \left[\Delta T_s + (e^{\phi/10} - 1) \Delta T_g \right] \quad (9)$$

A condutividade da tinta intumescente no instante t_i é determinada para a temperatura média da protecção $T_p(i) = (T_g(i) + T_s(i-1))/2$, isto é, o valor médio da temperatura do gás no instante actual e o valor da temperatura do aço no instante anterior. Considerando em cada ensaio experimental o valor médio das temperaturas registadas do fogo e no perfil, utilizando a equação (9), obtém-se a evolução da condutividade da tinta intumescente com a temperatura da protecção, representada na Figura 13.

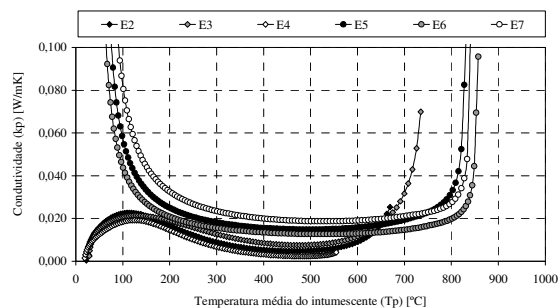


Figura 13 – Variação da condutividade do intumescente com a temperatura.

Na Figura 13 pode-se verificar um comportamento diferenciável entre o conjunto dos ensaios em que foi utilizada uma espessura média de protecção de 468.3[µm], ensaios E2 a E4, e os ensaios E5 a E7 em que foi utilizada uma espessura média de 1427.2 [µm]. Nestes últimos é possível verificar que a condutividade térmica do intumescente é aproximadamente constante no intervalo de temperaturas de 300 a 750 [°C], possuindo uma variação com a temperatura idêntica à apresentada por Tan et all (Tan, 2004). Este comportamento distinto, entre os dois valores de espessura de protecção, impõe a realização de mais ensaios. No entanto a norma UNE 23820, (UNE 23820, 1997), especifica que para temperaturas do aço inferiores a 300 [°C] deverá ser utilizado o valor da condutividade térmica existente no intervalo de temperaturas de 250 a 300 [°C].

5 - CONCLUSÕES

Foi apresentado o método experimental para o estudo de vigas com protecção ao fogo através de tintas intumescentes. Estas foram ensaiadas com um carregamento mecânico constante e posteriormente submetidas a uma taxa de aquecimento até se atingir o colapso por encurvadura lateral. Verificou-se o aumento do tempo de resistência ao fogo e da temperatura crítica com o aumento da espessura de protecção.

Com os resultados experimentais da temperatura na envolvente da viga e da temperatura do aço, foi possível obter-se a evolução da condutividade térmica da tinta intumescente com a temperatura. Os resultados mostram dois comportamentos

distintos para ambas as espessuras analisadas. Para a maior espessura, pode-se verificar que a condutividade térmica é aproximadamente constante no intervalo de temperaturas de 300 a 750 [°C].

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas J. Soares Correia e CIN-Corporação Industrial do Norte, S.A., pela oferta dos materiais utilizados nos ensaios.

REFERÊNCIAS

- [1]. Corus Construction & Industrial, “Fire resistance of steel framed buildings”, 2001.
- [2]. Dowling, John; Designing for fire protection; Construton news suplement, pp 14-15, 2003.
- [3]. Lewis, K.R., “Fire Design of Steel Members”, Fire Engineering Research Report, University of Canterbury, ISSN 1173-5996, March 2000.
- [4]. Regulamento de segurança contra incêndios em edifícios de habitação, Dec. Lei nº 64/90 de 21 de Fevereiro.
- [5]. Regulamento de segurança contra incêndios em parques de estacionamento cobertos, Dec. Lei nº 66/95 de 8 de Abril.
- [6]. Wickstrom, U.; Temperature analysis of heavily-insulated steel structures exposed to fire; Fire of Safety Journal, 9, pp281-285, 1985.
- [7]. Melinek, S.J.; Thomas, P.H.; Heat flow to insulated steel; Fire of Safety Journal, 12, pp1-8, 1987.
- [8]. Wong, M.b.; Ghojel, J.I; Sensitivity analysis of heat transfer formulations for insulated structural components, Fire of Safety Journal, 38 pp187-201, 2003.
- [9]. CEN prEN 1993-1-2; “Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-2: General rules, Structural fire design”; Stage 49 – draft; April 2003.
- [10]. Vila Real, P. M. M.; “Incêndio em Estruturas Metálicas – Cálculo Estrutural”, Edições Orion, ISBN 972-8620-04-7, 2003.
- [11]. Asociación Española de Normalización y Certificación, UNE 23820 - “Método de ensayo para determinar la contribución a la resistencia al fuego de los elementos estructurales, mediante la aplicación de protección a los elementos estructurales en acero”; Madrid, 1997.
- [12]. CIN – Corporação Industrial do Norte; Boletim técnico, 7G-950 PROTHERM - HB Pintura intumescente de alta espessura; Julho 2003 - Portugal.
- [13]. CEN prEN 1993-1-1; “Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”; Stage 49 – draft; May 2003.
- [14]. Tan, K. h.; Wang, Z.; Au, S. K.; “Heat transfer analysis for steelwork insulated by intumescent paint exposed o standard fire conditions”; third international Workshop Structures in fire, Ottawa, Maio 2004.