



**FCTUC** FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

# ***2as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos***

**Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade de Coimbra**

**3 de Junho de 2011**

**Actas das Comunicações das 2as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos**

**João Paulo Correia Rodrigues**

**Primeira edição  
Junho, 2011**

Copyright © 2011 João Paulo C. Rodrigues

Nenhuma parte desta obra pode ser reproduzida sem autorização escrita do editor.

**ISBN: 978-972-96524-5-5**

**Editado por:**

**FCTUC** – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Rua Sílvio  
Lima 3030-790, Coimbra. Portugal.

## **ESTUDO EXPERIMENTAL DE VIGAS PROTEGIDAS COM TINTA INTUMESCENTE SOB A ACCÃO DO FOGO**

<b>Luís M. R. Mesquita</b> Assistente 2º Triénio, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal .	<b>Paulo A.G. Piloto</b> Professor Coordenador, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal .	<b>Sérgio Roque</b> Mestrando, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal .	<b>Mário A. P. Vaz</b> Professor Associado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### **SUMÁRIO**

São apresentados os resultados de 50 testes de elementos à flexão para análise da eficácia da aplicação de tintas intumescentes em elementos sujeitos à flexão, aplicada a distintas secções transversais, IPE, CHS, SHS e LNP. O carregamento mecânico aplicado é mantido constante durante os testes e corresponde a valores do grau de utilização de 30%, 50% e 70%. Os testes são conduzidos à temperatura ambiente e ao fogo, segundo a curva ISO834, com diferentes espessuras de protecção e sem protecção. Verifica-se um aumento do tempo de resistência ao fogo com a aplicação deste tipo de protecção. Para a mesma espessura de protecção a temperatura crítica e o tempo de resistência ao fogo diminui com o aumento do grau de utilização.

**Palavras-chave:** Resistência ao fogo; Ensaio experimentais; Temperatura crítica; Tinta Intumescente.

### **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.

Um dos procedimentos utilizados para 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.

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.

Como vantagens desta protecção destacam-se o menor peso introduzido na estrutura, em comparação com outras medidas de protecção, a possibilidade de 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 medidas de espessura frequentes, pelo que a

---

\* Autor correspondente – Departamento de Mecânica Aplicada, Instituto Politécnico de Bragança, Campus Santa Apolónia, Ap. 1134, 5301-857 Bragança, Portugal, email [Imesquita@ipb.pt](mailto:Imesquita@ipb.pt)

sua aplicação na fase de construção da obra só é possível com boas condições atmosféricas, originando interrupções na erecção da estrutura, que são susceptíveis de gerar um aumento do custo total de protecção ao fogo.

O desenvolvimento de tintas mais ecológicas determinou o fabrico de tintas de base aquosa com uma redução significativa de componente orgânicos voláteis. Estas tintas possuem uma cura mais rápida, podendo-se aplicar uma demão mais espessa, afigurando-se mais versáteis do que as de base solvente por possuírem uma superfície de maior dureza, minimizando o dano produzido no manuseamento dos elementos protegidos.

A metodologia simplificada para verificação de segurança, preconizada nas normas europeias (Eurocódigos), 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, ver equação (1).

$$\Delta T_s = \frac{k_p A_p / V (T_g - T_s)}{c_s \rho_s d_p \left(1 + \frac{\phi}{3}\right)} \Delta t - \left(e^{\phi/10} - 1\right) \Delta T_g \quad ; \Delta T_s \geq 0 \text{ e } \Delta T_g \geq 0 \quad (1)$$

Com  $\phi = c_p \rho_p d_p / c_s \rho_s (V/A_p)$  e  $\Delta t \leq 30s$  para elementos de aço protegidos. Esta equação é baseada na solução da equação diferencial de condução de calor, com condições limites não homogêneas e utilizando várias hipóteses simplificativas. Estas hipóteses limitam a respectiva utilização a materiais cujas propriedades se mantêm constantes com a temperatura, como é o caso da aplicação de placas de gesso, fibras minerais e vermiculite. Nesta expressão,  $\Delta T_s$ , representa a evolução da temperatura do aço, quando submetida a uma variação de temperatura exterior, baseada em curvas de incêndio normalizadas,  $\Delta T_g$ , [1]. A informação sobre a evolução da protecção passiva deverá incluir uma actualização dos valores da condutividade e da espessura de protecção durante a evolução do incêndio, isto é, introduzindo a variação de  $\lambda_p(t)$  (condutividade) e de  $d_p(t)$  (espessura de protecção) com o tempo ou com a temperatura média do intumescente.

O cálculo da temperatura crítica de elementos cuja resistência é directamente proporcional à tensão de cedência do aço pode ser determinado em função do grau de utilização,  $\mu_0$ , pela equação (2). Nos restantes casos, em elementos sujeitos a fenómenos de instabilidade, este cálculo requer um procedimento iterativo.

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[ \frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833} - 1} \right] + 482 \quad (2)$$

Recentes publicações sobre protecção passiva apresentam resultados analíticos baseados em equações diferenciais simplificadas [2-6] cujos resultados pretendem determinar uma solução aproximada para a evolução da temperatura do material protegido. Nestas soluções não é considerada a variação da camada protectora.

A especificação da espessura de protecção segue, normalmente, a recomendação dos fabricantes das tintas, apresentada em forma de tabelas ou gráficos, para diferentes temperaturas críticas, espessuras de protecção e diferentes períodos de estabilidade ao fogo. Estes dados são baseados em resultados de testes experimentais conduzidos em fornos de resistência ao fogo utilizando elementos estruturais típicos (vigas e pilares), com e sem carga, e que, em regra, são mantidos confidenciais devido à natureza comercial dos fabricantes, limitando uma correcta e completa caracterização das propriedades físicas e térmicas deste material.

Com este trabalho pretende-se efectuar uma análise da eficácia da aplicação de tintas intumescentes em elementos sujeitos à flexão, aplicada a distintas secções transversais (IPE, CHS, SHS e LNP) e com diferentes níveis de carregamento (30%, 50% e 70%). A capacidade de resistência ao fogo dos elementos é obtida através de ensaios executados num forno, sob a acção de carregamento mecânico e com as condições térmicas prescritas pela curva ISO834 [7].

## **CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AÇO DAS SECÇÕES**

Para a caracterização das propriedades mecânicas do material dos perfis foram efectuados ensaios de tracção em provetes obtidos por maquinagem da alma, no caso dos perfis IPE, da aba de maior dimensão, no caso das cantoneiras e numa zona afastada do cordão de soldadura no caso dos perfis tubulares. De referir que, no caso do tubo redondo, o provete foi ensaiado sem efectuar qualquer conformação da zona útil. Para cada tipo de perfil foram efectuados no mínimo três ensaios de tracção, segundo a norma NPEN10002-1 [8]. Os resultados permitiram determinar o valor do módulo de elasticidade, E, a tensão limite de proporcionalidade a 0.2% , a tensão de cedência superior, ReH, e inferior, ReL, a tensão resistente máxima, Rm, e a extensão após rotura, At.

A Tabela 1 apresenta a comparação entre os resultados experimentais e os valores nominais para a respectiva classe do aço, em que a tensão de cedência real é considerada igual ao valor médio à tensão de cedência superior, excepto no caso da secção CHS em que, por não possuir patamar de cedência, é considerado o valor médio da tensão limite de proporcionalidade. Com a excepção desta secção, a tensão de cedência média das restantes secções é superior ao valor nominal.

Tabela 1 – Comparação entre a resistência nominal e a real determinada pelos ensaios de tracção.

	IPE 100		SHS 100x100x4		CHS 101,6x4,05		L 100x50x8	
	Nom	Real	Nom	Real	Nom	Real	Nom	Real
<b>fy</b>	275	302,47	235	352,00	235	200,99	275	311,22
<b>fu</b>	430	431,25	360	398,83	360	300,75	430	430,33

## **METODOLOGIA EXPERIMENTAL E PREPARAÇÃO DOS PERFIS**

O método mais convencional de se determinar a resistência ao fogo de elementos estruturais de aço protegidos e não protegidos é através de testes normalizados de resistência ao fogo. O objectivo deste teste é determinar o período de tempo que o elemento ensaiado se mantém estável quando sujeito a um carregamento mecânico, normalmente constante, e a uma solitação térmica definida por uma das curvas de incêndio padrão. A resistência ao fogo é definida pelo tempo decorrido desde o início do aquecimento até que o elemento deixa de ter capacidade de carga para suportar o carregamento aplicado e se dá o colapso estrutural. Em termos práticos esta situação ocorre quando se verifica um aumento rápido do deslocamento vertical e/ou lateral.

O conjunto de ensaios experimentais realizados no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais do IPB, apresentado esquematicamente na Figura 1, para a avaliação do comportamento de vigas em situação de incêndio e aferir a influência da espessura de protecção e do grau de solitação é o apresentado na Tabela 2. Para comparação e determinação da capacidade de carga dos elementos (carga de colapso) são também realizados ensaios à temperatura ambiente e ao fogo sem qualquer protecção intumescente.

O forno, possui um volume nominal de 1 [m<sup>3</sup>], tem um revestimento de aço e é isolado com tijolos refractários e outros materiais adequados para altas temperaturas, como fibra cerâmica. Possui quatro queimadores de gás propano/gás natural. A evolução da temperatura no interior do forno é medida através de um termopar de placa, segundo as especificações da norma EN1363-1 [9], e controlada por um controlador PID.

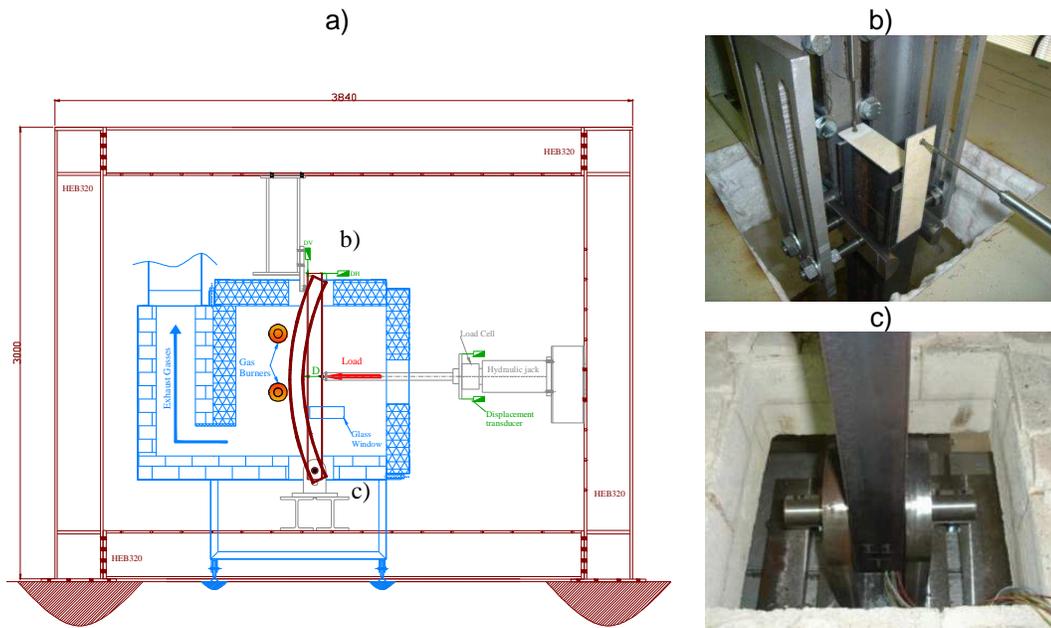


Figura 1 – a) Setup experimental utilizado nos ensaios. b) Apoio simples de forquilha superior e posição dos LVDTs. c) Apoio duplo inferior.

As vigas são sujeitas a um carregamento mecânico constante e posterior solicitação ao fogo segundo a ISO834, determinando-se para cada grau de utilização e espessura de protecção a correspondente temperatura crítica. Os elementos para ensaio possuem um comprimento total ( $L_t$ ) de 1370 [mm], um comprimento entre apoios ( $L$ ) de 1210 [mm] e um comprimento de exposição ao fogo ( $L_f$ ) de 1000 [mm].

O carregamento mecânico aplicado nos perfis expostos ao fogo corresponde a um grau de utilização predeterminado. O valor de carga correspondente foi determinado considerando a situação de flexão e um valor de  $R_{fi,d,0}$ , resistência ao fogo em  $t=0$ , definido pelo momento resistente à encurvadura lateral, no caso das secções IPE e LNP, e pelo momento resistente da secção transversal, no caso das secções SHS e CHS.

A carga é aplicada através de um cilindro hidráulico que possui uma célula de carga na sua extremidade e é controlado por um sistema servo-hidráulico. O nível de carga, definido em função do grau de utilização, é aplicado de forma incremental até se atingir o valor pretendido e mantido constante durante a acção do fogo.

Para a monitorização da temperatura nos perfis são soldados termopares tipo K dispostos longitudinalmente em três secções distintas e nestas em diferentes pontos da secção transversal, conforme o especificado na norma prEN13381-8 para pilares em carga, [10], e apresentado na Figura 2. Como a norma não especifica a localização dos termopares em secções do tipo cantoneira, foi adoptada a distribuição apresentada na figura. Os fios de termopar são ainda protegidos com uma cantoneira metálica de pequenas dimensões (9x9 [mm]) para evitar a sua exposição a temperaturas superiores às do ponto de medição, conforme disposto na norma EN1363-1 [9].

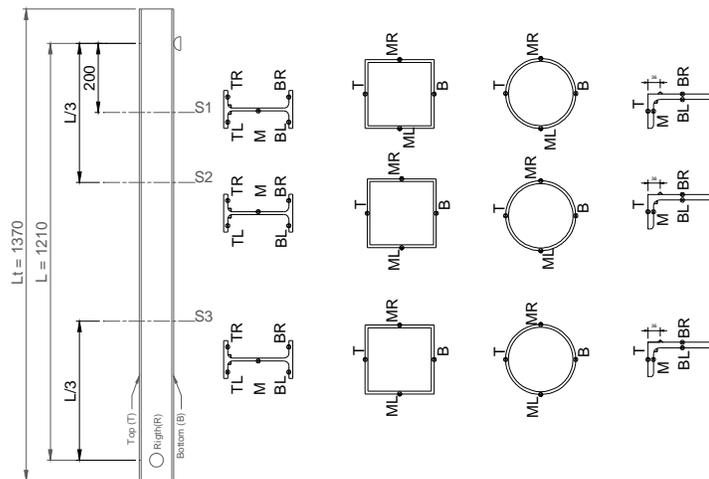


Figura 2 – Localização dos termopares soldados ao elemento. Distribuição ao longo do elemento e nas secções transversais.

Adicionalmente procedeu-se à medição dos deslocamentos horizontal (DH) e vertical (DV) da secção superior da viga através de dois LVDT e do deslocamento transversal (D) a meio vão da viga, correspondente à aplicação da carga, através de um transdutor potenciométrico de fio.

A pintura dos elementos seguiu as recomendações do fabricante, presentes na ficha técnica do produto, utilizando o método de projecção por pistola convencional. Durante o processo de pintura a espessura média foi sendo controlada, através de um medidor de espessura húmida, havendo em todas as situações que dar várias demãos para se obter a espessura pretendida. Após a pintura os elementos foram acondicionados em ambiente controlado de temperatura (23°C) e humidade relativa (50%) durante 8 dias.

Finalizado o tempo de cura, a espessura seca de tinta (DFT) foi medida através de um medidor de espessura seca, que funciona por indução magnética, em cinco secções e em vários pontos distribuídos em cada uma destas, como mostra a Figura 3 e conforme especificado na norma prEN 13381-8, [10].

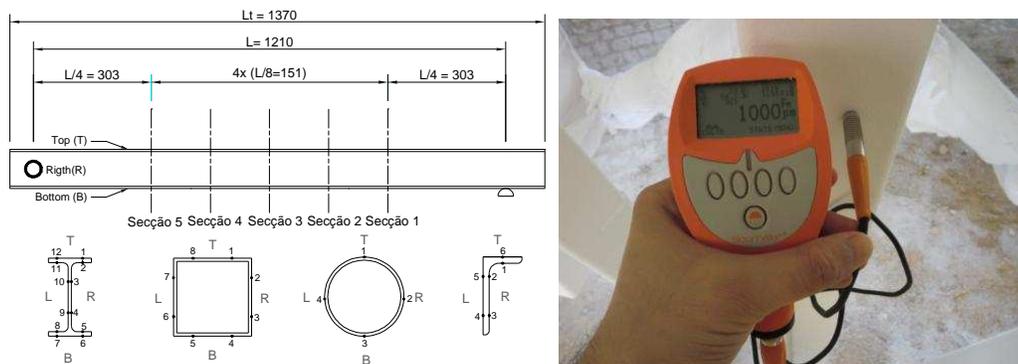


Figura 3 – Localização das secções e pontos de controlo da espessura de tinta seca. Equipamento de medição da espessura.

Tabela 2 - Caracterização e resultados dos testes realizados. (\* Força de colapso resultante do teste à temperatura ambiente).

Grupo/ Teste Seccão	A <sub>p</sub> /V nº	Sol. Térmica	μ <sub>0</sub>	Q [kN]	dp [μm]			Resistência		Resistência		
					DFT	Desv.	Máx.	Mín.	T [°C]	t [s]	T [°C]	t[s]
IPE 100 S275	I1	387	T. Amb.	-	31,84*	-	-	-	-	-	-	-
	I2	387	T. Amb.	-	31,84*	-	-	-	-	-	-	-
	I3	387	ISO834 30%	5,34	-	-	-	-	663,78	745,56	751,20	1156
	I4	387	ISO834 50%	9,18	-	-	-	-	584,67	562,96	684,47	749
	I5	387	ISO834 70%	12,94	-	-	-	-	525,78	473,19	659,01	632
	I6	387	ISO834 30%	5,34	974	193	1253	445	663,78	-	722,71	2505
	I7	387	ISO834 30%	5,34	975	170	1287	576	663,78	-	727,57	2570
	I8	387	ISO834 50%	9,18	1012	185	1342	560	584,67	-	701,02	2331
	I9	387	ISO834 50%	9,18	1055	202	1528	490	584,67	-	701,88	2467
	I10	387	ISO834 70%	12,94	998	148	1268	653	525,78	-	695,31	2341
	I11	387	ISO834 70%	12,94	989	193	1360	501	525,78	-	690,21	2295
	I12	387	ISO834 50%	9,18	1824	156	2140	1440	584,67	-	676,52	2867
	I13	387	ISO834 50%	9,18	1832	194	2270	1440	584,67	-	747,46	3127
SHS 100x100x4 S235	S1	250	T. Amb.	-	42,98*	-	-	-	-	-	-	-
	S2	250	T. Amb.	-	42,98*	-	-	-	-	-	-	-
	S3	250	ISO834 30%	13,62	-	-	-	-	663,78	766,13	722,56	1032
	S4	250	ISO834 50%	22,25	-	-	-	-	584,67	583,56	641,95	693
	S5	250	ISO834 70%	30,09	-	-	-	-	525,78	492,36	594,02	573
	S6	250	ISO834 30%	13,62	1105	115	1310	854	663,78	-	687,79	2444
	S7	250	ISO834 30%	13,62	1094	113	1338	777	663,78	-	685,53	2411
	S8	250	ISO834 50%	22,25	1141	100	1309	944	584,67	-	617,08	2060
	S9	250	ISO834 50%	22,25	1141	104	1350	909	584,67	-	608,73	2047
	S10	250	ISO834 70%	30,09	1144	114	1482	886	525,78	-	555,69	1812
	S11	250	ISO834 70%	30,09	1131	92	1270	854	525,78	-	562,24	1836
	S12	250	ISO834 50%	22,25	1932	112	2210	1730	584,67	-	651,64	1967
	S13	250	ISO834 50%	22,25	1933	144	2310	1700	584,67	-	Sem colapso	
CHS 101,6x4,05 S235	C1	246,9	T. Amb.	-	29,37*	-	-	-	-	-	-	-
	C2	246,9	T. Amb.	-	29,37*	-	-	-	-	-	-	-
	C3	246,9	ISO834 30%	9,31	-	-	-	-	663,78	769,61	602,27	540
	C4	246,9	ISO834 50%	15,20	-	-	-	-	584,67	587,01	499,42	376
	C5	246,9	ISO834 70%	20,56	-	-	-	-	525,78	495,56	255,64	164
	C6	246,9	ISO834 30%	9,31	997	114	1270	800	663,78	-	560,26	1414
	C7	246,9	ISO834 30%	9,31	1004	111	1187	818	663,78	-	562,23	1861
	C8	246,9	ISO834 50%	15,20	1026	143	1330	770	584,67	-	Sem colapso	
	C9	246,9	ISO834 50%	15,20	1006	93	1140	810	584,67	-	472,24	1144
	C10	246,9	ISO834 70%	20,56	1071	143	1306	754	525,78	-	169,12	146
	C11	246,9	ISO834 50%	20,56	1120	178	1439	785	525,78	-	490,75	1411
	C12	246,9	ISO834 50%	15,20	1896	200	2190	1490	584,67	-	563,47	1378
	C13	246,9	ISO834 50%	15,20	1807	210	2270	1430	584,67	-	512,00	1261
LNP 100x50x8 S275	L1	250	T. Amb.	-	21,69*	-	-	-	-	-	-	-
	L2	250	T. Amb.	-	21,69*	-	-	-	-	-	-	-
	L3	250	ISO834 30%	5,84	-	-	-	-	663,78	766,13	822,55	1743
	L4	250	ISO834 50%	9,83	-	-	-	-	584,67	583,56	761,68	1297
	L5	250	ISO834 70%	13,61	-	-	-	-	525,78	492,36	745,66	1210
	L6	250	ISO834 30%	5,84	1041	91	1205	898	663,78	-	983,42	4692
	L7	250	ISO834 30%	5,84	1026	107	1309	850	663,78	-	1015,19	4655
	L8	250	ISO834 50%	9,83	1053	108	1318	898	584,67	-	747,38	3382
	L9	250	ISO834 50%	9,83	1063	96	1271	825	584,67	-	760,49	3533
	L10	250	ISO834 70%	13,61	1135	118	1420	882	525,78	-	756,97	3801
	L11	250	ISO834 70%	13,61	1114	110	1377	953	525,78	-	600,68	1937

A Tabela 2 apresenta a caracterização dos testes realizados, podendo-se verificar os valores médios, média aritmética de todos os pontos do elemento, da espessura seca de protecção (DFT), o seu desvio padrão e o valor máximo e mínimo de todas as medições.

### **CRITÉRIO DE COLAPSO E DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO**

Para determinação do critério de colapso e correspondente resistência ao fogo, foram utilizados os critérios especificados na norma EN1363-1 [9], em que este é definido pelo instante em que o elemento deixa de suportar a carga por perda de capacidade resistente.

Para pilares, deve-se considerar que o elemento deixa de possuir capacidade de carga quando é excedida uma contracção vertical igual a  $C = h/100$  e uma taxa de contracção vertical definida por  $dC/dt = 3h/1000$ , em  $[mm/min]$ , sendo  $h$  a altura inicial do pilar em  $[mm]$ . Para vigas, deve-se considerar que o elemento deixa de suportar a carga por perda de capacidade resistente quando é atingido um deslocamento vertical a meio vão dado por  $D = L^2/400d$  e uma taxa de deslocamento definida por  $dD/dt = L^2/9000d$ , em  $[mm/min]$ . Nas expressões anteriores  $L$  é o vão da viga em  $[mm]$  e  $d$  a distância do topo da secção transversal ao extremo inferior da zona em tracção, normalmente equivalente à altura da secção transversal. O critério da taxa de deslocamento só pode ser aplicado quando se atinge um deslocamento a meio vão dado por  $L/30$ .

Especial atenção deve ser dada aos testes realizados no Reino unido, já que estes são habitualmente realizados segundo a norma BS 476. De acordo com esta norma a resistência ao fogo de vigas é definida pelo critério de deslocamento vertical igual a  $L/20$  ou uma taxa de deslocamento igual à definida pela EN 1363. Esta taxa de deslocamento não pode ser considerada antes de se atingir um deslocamento  $L/30$ . A EN 1363-1 difere da BS 476 na medida em que requer que ambos os limites sejam atingidos para que se considere obtido o ponto de colapso, enquanto que na segunda só é necessário ocorrer um dos critérios. Como a taxa de deslocamento é igual em ambas as normas, a aplicação da norma BS 476 resulta num tempo ou temperatura mais conservativa, [11].

Para os perfis analisados, com uma altura da secção transversal igual a  $d = 100[mm]$ , o critério do deslocamento máximo a meio vão é atingido para  $D = 36.6[mm]$ , resultando num deslocamento equivalente a  $L/33$ . Da análise das curvas de carga versus deslocamento pode-se verificar que o critério da taxa de deslocamento é atingido antes mesmo de se atingir um deslocamento  $L/30$ , pelo que, para os perfis ensaiados a resistência ao fogo é definida pelo critério do deslocamento vertical igual a  $L/30$ .

### **RESULTADOS DOS TESTES À TEMPERATURA AMBIENTE**

Para caracterização da resistência dos perfis em estudo, foram efectuados dois testes de cada secção em condições de temperatura ambiente. A carga pontual foi aplicada de modo incremental até se detectar a perda de capacidade de resistência do elemento.

Os resultados mostram que o colapso dos perfis IPE100 e das cantoneiras deve-se ao modo de instabilidade por encurvadura lateral torsional (ELT). As secções SHS e CHS instabilizam por formação de rótula plástica na secção de aplicação da carga. A evolução do deslocamento a meio vão do elemento em função da carga aplicada é apresentada na Figura 4, onde se pode observar uma variação típica destes fenómenos de colapso. Atendendo a estes modos de colapso, as cargas resistentes,  $Q_{exp}$ , foram definidas como as aplicadas no instante em que é detectado um deslocamento a meio vão equivalente a  $L/30$ , no caso em que existe ELT e a carga máxima detectada aquando da existência de uma rótula plástica. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 3.

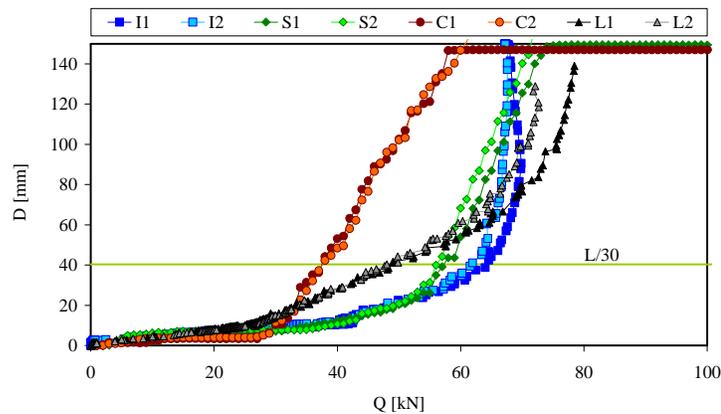


Figura 4 – Variação do deslocamento a meio vão em função da carga aplicada dos testes realizados à temperatura ambiente.

Tabela 3 – Comparação entre a capacidade resistente definida pelo eurocódigo e os valores experimentais.

Secção	Teste nº	Resistência EC3-1.1	$Q_{exp}$ [kN]	Modo de colapso
IPE 100	I1	31,84	64,56	ELT
	I2	31,84	61,93	ELT
SHS	S1	42,98	63,73	Rot. Plástica
	S2	42,98	60,75	Rot. Plástica
CHS	C1	29,37	38,91	Rot. Plástica
	C2	29,37	41,42	Rot. Plástica
LNP	L1	21,69	49,03	ELT
	L2	21,69	48,06	ELT

## RESULTADOS DOS TESTES EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO SEM PROTECÇÃO AO FOGO

Todas as secções em estudo foram ensaiadas em condições de incêndio sem qualquer protecção ao fogo, com solicitações de carga mecânica representativas do grau de utilização pretendido.

A temperatura crítica determinada pelo método de cálculo simplificado do eurocódigo, utilizando a equação (2), para os graus de utilização analisados, 30%, 50% e 70%, é de 663,78 [°C], 584,67 [°C] e 525,78 [°C], respectivamente. Para a secção IPE100, estes valores correspondem um tempo de resistência ao fogo, determinado pela equação simplificada da evolução da temperatura em elementos sem protecção ao fogo, de 12, 9 e 7 minutos completos. As restantes secções, com um factor de massividade de aproximadamente  $250[m^{-1}]$ , possuem uma resistência ao fogo de 12, 9 e 8 minutos.

Os valores anteriores podem ser comparados com os resultados experimentais, ao nível do domínio do tempo e da temperatura, considerando o critério de colapso descrito na secção 0. Em todos os testes realizados este critério define como colapso o tempo associado a um deslocamento a meio vão equivalente a  $L/30$ .

A Figura 5 apresenta os resultados da variação da temperatura do perfil com o tempo, considerando a média aritmética dos termopares instalados nas três secções dos perfis.

Os gráficos anteriores e os valores numéricos apresentados na Tabela 2 mostram que os valores experimentais da temperatura crítica e do tempo de resistência ao fogo das secções IPE, SHS e LNP são sempre superiores aos determinados pelo eurocódigo, independentemente do grau de utilização. A temperatura crítica e o tempo de

resistência são inversamente proporcionais ao grau de utilização aplicado no elemento. Já no caso da secção CHS os valores obtidos pelo eurocódigo são ambos superiores aos obtidos experimentalmente, cujos valores são de 9, 6 e 2 [min] relativos aos testes C3, C4 e C5, respectivamente. De referir, uma vez mais, que o valor da carga aplicada, resultante do grau de utilização pretendido, foi determinado através da capacidade resistente nominal e que os ensaios de caracterização do material evidenciam uma tensão de cedência 14,5% inferior à nominal.

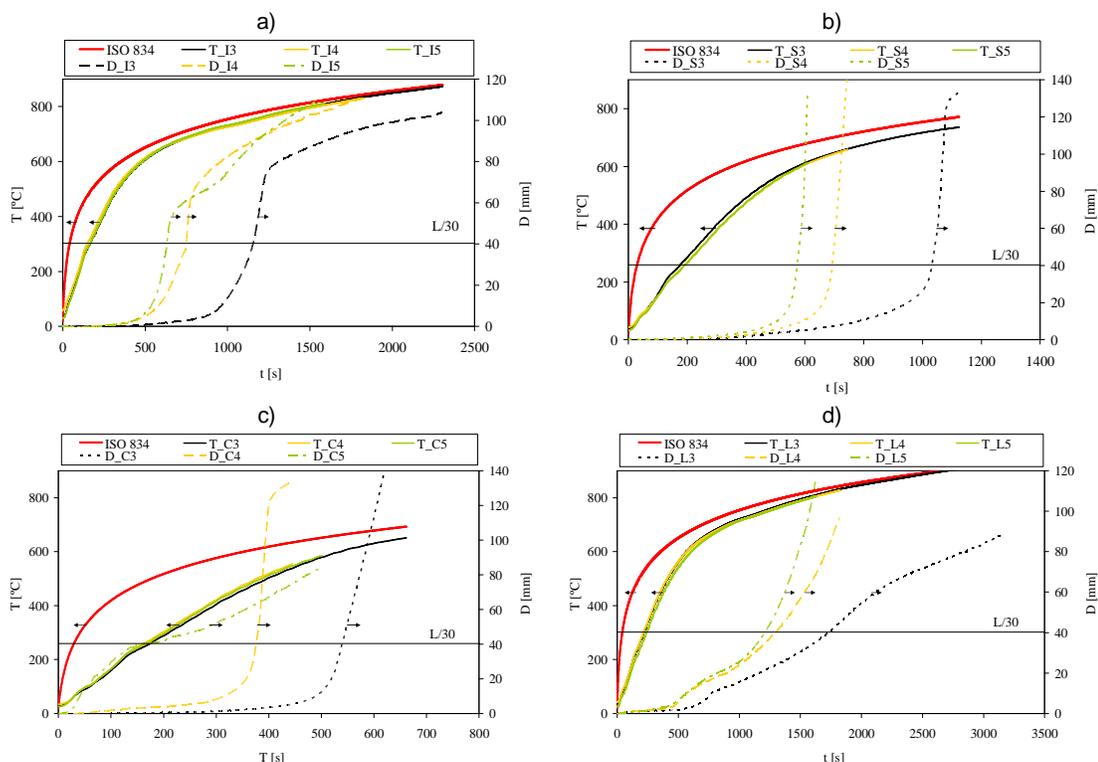


Figura 5 – Resultados experimentais da evolução da temperatura média do perfil e do deslocamento a meio vão.  
a) Secção IPE. b) secção SHS. c) Secção CHS. d) Secção LNP.

## RESULTADOS DOS TESTES EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO COM PROTECÇÃO AO FOGO

O setup experimental e a metodologia utilizada neste grupo de testes são semelhantes à da secção anterior. Para evitar o contacto directo entre o elemento de aplicação de carga e o elemento estrutural protegido, foi aplicado um isolamento térmico com uma manta cerâmica. Este contacto impede que, no ponto de aplicação de carga, haja intumescência da tinta. Na Figura 6 pode-se verificar a evolução do teste I7, desde o início da formação da camada carbonosa até à degradação total da tinta, ficando na fase final do teste com uma camada intumescente de cor branca.

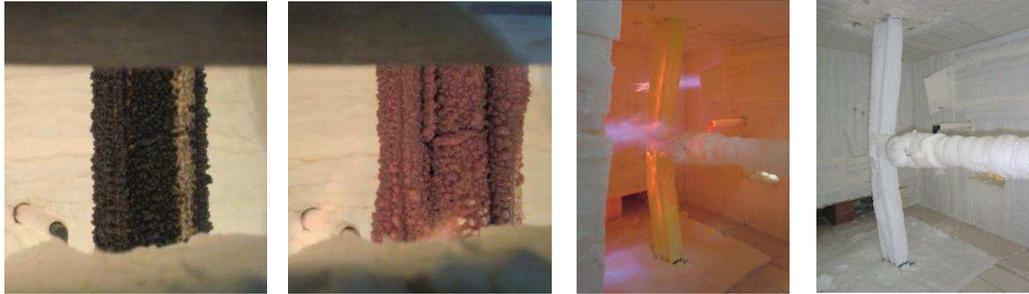


Figura 6 – Evolução da intumescência do teste I7.

Os resultados dos testes realizados com tinta intumescente são apresentados na Figura 7, podendo ser comparados com os resultados dos testes sem protecção ao fogo. Os valores de temperatura apresentados nos gráficos são relativos a temperaturas médias medidas pelos termopares das três secções do elemento.

A evolução da temperatura dos testes realizados com a secção IPE100 mostra uma clara distinção entre os perfis com espessuras de protecção nominais de 1000 [µm] e 2000 [µm] e não há uma relação evidente da influência do grau de utilização na variação da temperatura.

Nas secções SHS e CHS a influência da espessura de protecção no desempenho da tinta só é evidente para períodos de exposição curtos. No caso dos perfis protegidos com 2000 [µm], com o aumento do tempo de exposição e consequente aumento da espessura da camada intumescente, verifica-se um desprendimento parcial, e por vezes total, desta à superfície do aço. Esta situação leva à diminuição da camada protectora e torna-se mais desfavorável em comparação com a espessura de protecção de 1000 [µm], originando para longos períodos de exposição temperaturas superiores às da espessura de protecção inferior.

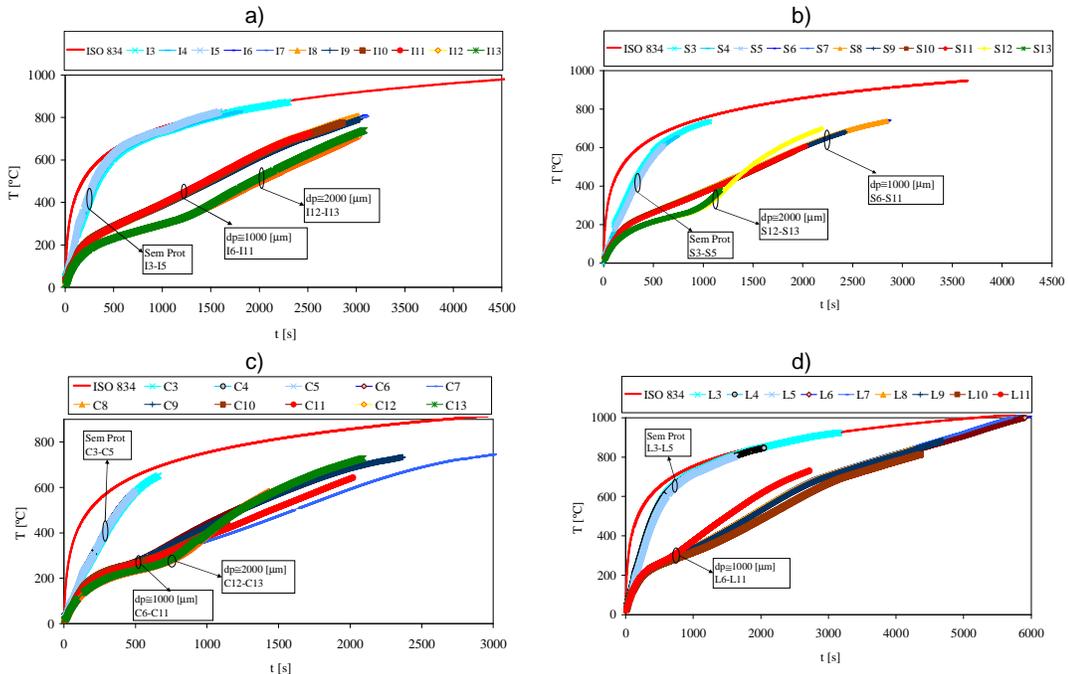


Figura 7 – Resultados experimentais da evolução da temperatura média do perfil e do deslocamento a meio vão. a) Secção IPE. b) secção SHS. c) Secção CHS. d) Secção LNP.

Devido à elevada capacidade resistente da secção LNP, com um tempo de resistência ao fogo de aproximadamente uma hora, quando protegido com 1000  $\mu\text{m}$  e com um grau de utilização de 50%, não foram efectuados testes com espessuras superiores.

A temperatura crítica e o tempo de resistência ao fogo foram determinados através do critério de colapso, a que corresponde um deslocamento a meio vão de  $L/30$ . Os valores numéricos são apresentados na Tabela 2 e a evolução do deslocamento a meio vão em função do tempo de exposição ao fogo é apresentada na Figura 8. Para efeitos de comparação os gráficos apresentam adicionalmente os resultados dos testes sem protecção.

As figuras revelam a eficácia desta medida de protecção, através do aumento do tempo de resistência ao fogo em comparação com o mesmo elemento sem protecção sujeito ao mesmo grau de utilização. No caso dos testes C9 e L11 este aumento não é tão significativo, porque ocorreu uma retracção local da camada intumescente na fase inicial do teste deixando parte do aço exposto directamente aos gases do incêndio. O teste C10 ensaiado com um grau de utilização de 70% atingiu o colapso ao fim de 146 [s] mesmo antes do início da reacção da tinta intumescente. Atendendo a este facto o grau de utilização do teste C11 foi alterado para 50%.

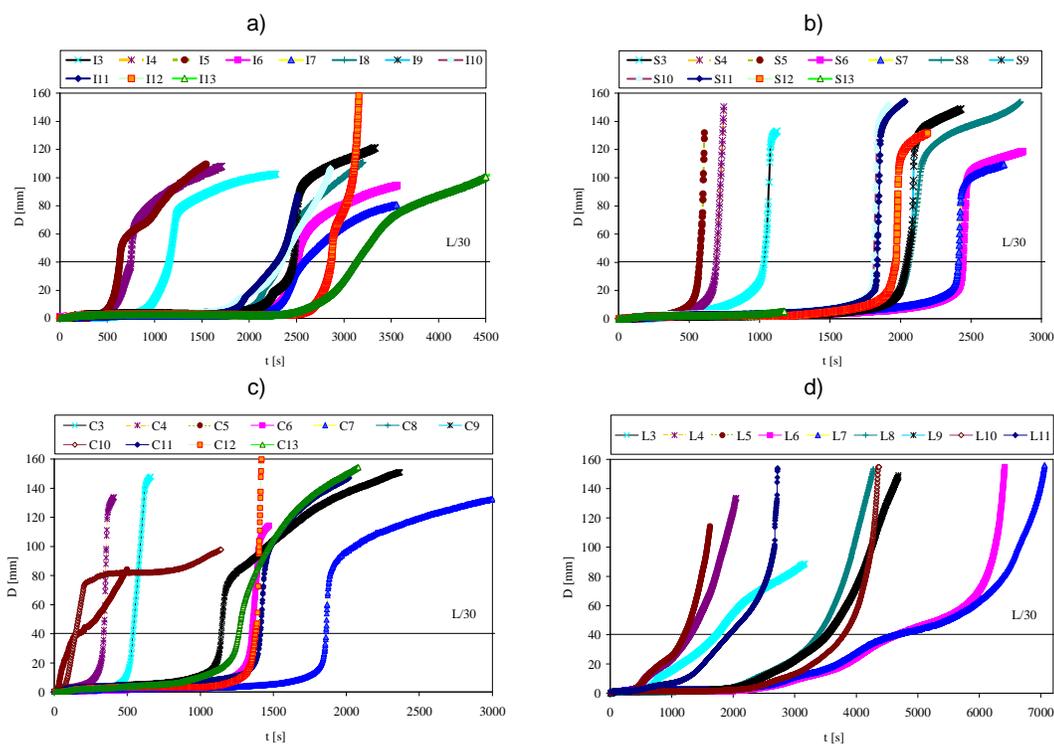


Figura 8 – Resultados experimentais da evolução do deslocamento a meio vão. a) Secção IPE. b) Secção SHS. c) Secção CHS. d) Secção LNP.

## CONCLUSÕES

Para investigar a influência da espessura de protecção ao fogo, do grau de utilização e do tipo de secção transversal de elementos estruturais solicitados em flexão, foram realizados 50 ensaios experimentais num forno de resistência ao fogo. Destes, 8 foram realizados à temperatura ambiente e 42 em condições de incêndio sob a acção da curva de incêndio padrão ISO834, para graus de utilização de 30%, 50% e 70%. Para efeitos de comparação foram realizados 12 testes sem qualquer tipo de protecção e 30 com 1 e 2 [mm] de tinta intumescente.

No caso dos testes sem protecção ao fogo é apresentada uma comparação entre os resultados experimentais e os valores obtidos pelos métodos simplificados de cálculo. Das secções analisadas só a secção CHS é que apresenta períodos de resistência ao fogo inferiores aos obtidos pelo eurocódigo, considerando as propriedades nominais. Os resultados experimentais da secção LNP representam um tempo de resistência superior a duas vezes o determinado pelo eurocódigo.

Nos elementos ensaiados com diferentes espessuras de protecção verifica-se a influência desta através de um aumento do tempo de resistência ao fogo. Para a mesma espessura de protecção a temperatura crítica e o tempo de resistência ao fogo diminui com o aumento do grau de utilização.

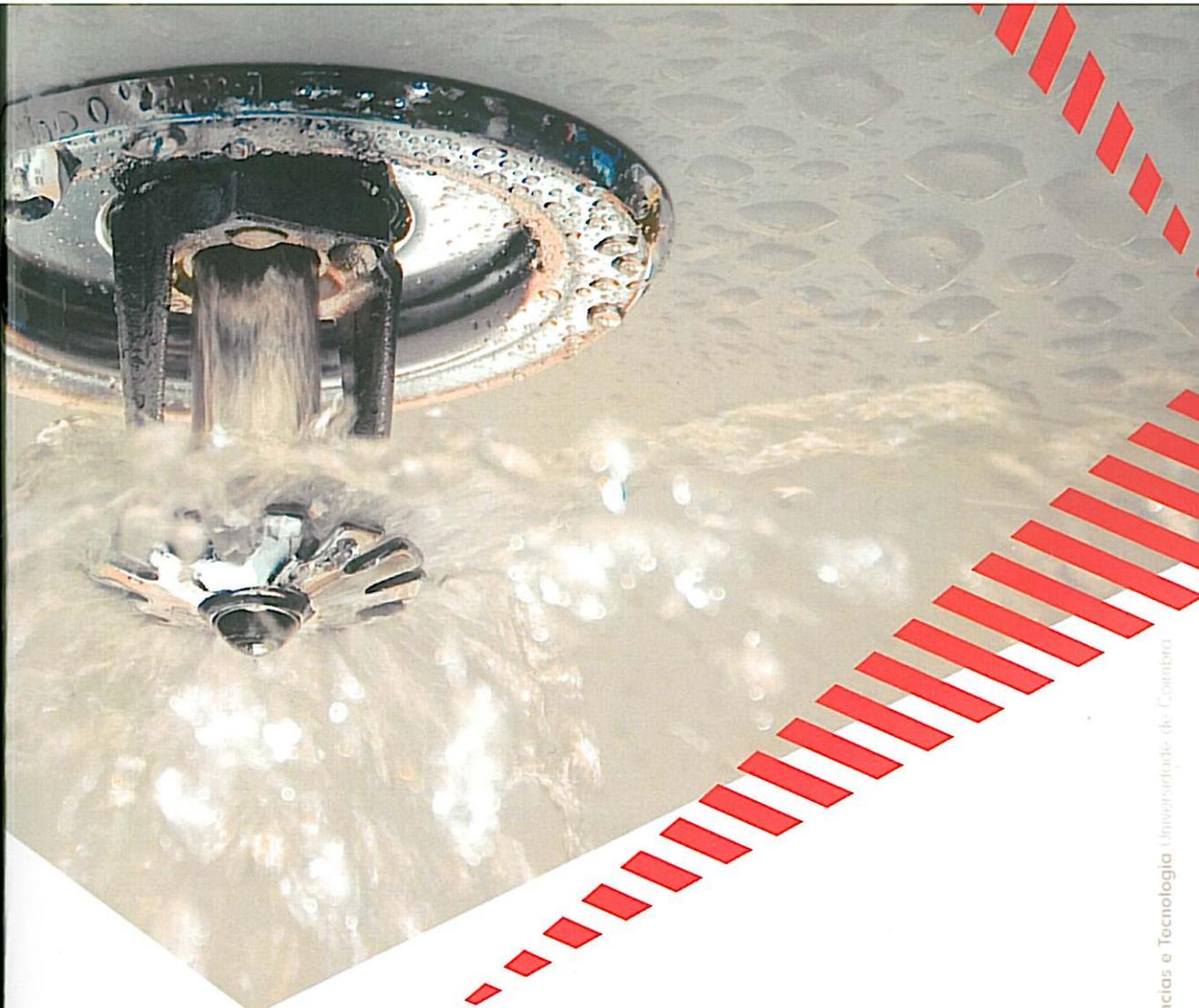
Nos elementos SHS e CHS protegidos verifica-se uma frequente retracção da intumescência deixando algumas zonas do perfil desprotegidas. No entanto o desempenho dos perfis protegidos é notoriamente melhor que os perfis não protegidos da mesma secção.

## AGRADECIMENTOS

Os autores reconhecem o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do Projecto PTDC/EME-PME/64913/2006, "Assessment of Intumescent Paint Behaviour for Passive Protection of Structural Elements Submitted to Fire Conditions", da Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/28909/2006 e a contribuição da empresa CIN.

## REFERÊNCIAS

- [1] EN1993-1-2, *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-2: General rules, Structural fire design*. 2005, European Committee for Standardization
- [2] Wong, M.B. and J.I. Ghojel, *Sensitivity analysis of heat transfer formulations for insulated structural steel components*. Fire Safety Journal, 2003. **38**(2): p. 187-201.
- [3] Tan, K.h., Z. Wang, and S.K. Au, *Heat transfer analysis for steelwork insulated by intumescent paint exposed o standard fire conditions*, in *Third international Workshop Structures in fire*. 2004: Ottawa.
- [4] Silva, V.P.E., *Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process - a simple derivation*. Engineering Structures, 2005. **27**(14): p. 2036-2043.
- [5] Wang, Z.-H., S.K. Au, and K.H. Tan, *Heat transfer analysis using a Green's function approach for uniformly insulated steel members subjected to fire*. Engineering Structures, 2005. **27**(10): p. 1551-1562.
- [6] Wang, Z.H. and K.H. Tan, *Sensitivity study of time delay coefficient of heat transfer formulations for insulated steel members exposed to fire*. Fire Safety Journal, 2006. **41**(1): p. 31-38.
- [7] ISO834, *Fire-resistance tests - Elements of building construction*. 1975, International Organization for Standardization: Geneva. p. 20 p.
- [8] IPQ, *NP EN 10002-1: Materiais metálicos, Ensaio de tracção. Parte 1: Método de ensaio*. 1990, Instituto Português da Qualidade.
- [9] CEN, *EN1363-1: Fire resistance tests. General requirements*. 1999, European Committee for Standardization
- [10] prEN13381-8, *Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Applied reactive protection to steel members*. 2007, European Committee for Standardization
- [11] Gardner, L. and N.R. Baddoo, *Fire testing and design of stainless steel structures*. Journal of Constructional Steel Research, 2006. **62**(6): p. 532-543.



# 2<sup>AS</sup> JORNADAS DE SEGURANÇA AOS INCÊNDIOS URBANOS

editor João Paulo C. Rodrigues (FCTUC)

# // ACTAS

DAS COMUNICAÇÕES



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra

Dep. de Engenharia Civil

# Comissões

## Comissão Organizadora

João Paulo Correia Rodrigues (FCTUC - ALBRASCI) – **Coordenador**

António Leça Coelho (LNEC) – **Coordenador**

Henrique Vicêncio (ANPC)

Luís Filipe Rocha de Almeida (ANET)

Maria Filomena Ferreira (OE - ALBRASCI)

Paulo Prata Ramos (OA - ALBRASCI)

## Comissão Científica

Aldina Maria da Cruz Santiago (FCTUC)

António Leça Coelho (LNEC)

António Rui de Almeida Figueiredo (FCTUC)

Carlos Pina dos Santos (LNEC)

João Carlos Viegas (LNEC)

João Lopes Porto (FEUP)

João Miguel Pires Ventura (IST)

João Paulo Coreia Rodrigues (FCTUC)

Jorge Gil Saraiva (LNEC)

José Carlos Miranda Góis (FCTUC)

José Manuel Baranda Ribeiro (FCTUC)

Lino Forte Marques (FCTUC)

Miguel Chichorro Gonçalves (FEUP)

Paulo Alexandre G. Piloto (IPB)

Paulo Jorge M. F. Vila Real (UA)

Pedro Martins Arezes (UMinho)

Pedro Vieira Carvalheira (FCTUC)

Ricardo António L. Mendes (FCTUC)

Vítor Carlos Trindade Abrantes (FEUP)

## **ESTUDO EXPERIMENTAL DE VIGAS PROTEGIDAS COM TINTA INTUMESCENTE SOB A ACÇÃO DO FOGO**

<b>Luís M. R. Mesquita</b> Assistente 2º Triénio, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal .	<b>Paulo A.G. Piloto</b> Professor Coordenador, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal .	<b>Sérgio Roque</b> Mestrando, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal .	<b>Mário A. P. Vaz</b> Professor Associado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Palavras-chave:** Resistência ao fogo; Ensaios experimentais; Temperatura crítica; Tinta Intumescente.

### **1 INTRODUÇÃO**

Um dos procedimentos utilizados para 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.

Com este trabalho pretende-se efectuar uma análise da eficácia da aplicação de tintas intumescentes em elementos sujeitos à flexão, aplicada a distintas secções transversais (IPE, CHS, SHS e LNP) e com diferentes níveis de carregamento (30%, 50% e 70%). A capacidade de resistência ao fogo dos elementos é obtida através de ensaios executados num forno, sob a acção de carregamento mecânico e com as condições térmicas prescritas pela curva de incêndio padrão [1].

### **2 RESULTADOS DOS TESTES EXPERIMENTAIS**

O conjunto de ensaios experimentais realizados no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais do IPB para a avaliação do comportamento de vigas em situação de incêndio e aferir a influência da espessura de protecção e do grau de sollicitação é o apresentado na Tabela 1.

---

\* Autor correspondente – Departamento de Mecânica Aplicada, Instituto Politécnico de Bragança, Campus Santa Apolónia, Ap. 1134, 5301-857 Bragança, Portugal, email lmesquita@ipb.pt

As vigas são sujeitas a um carregamento mecânico constante e posterior solicitação ao fogo segundo a ISO834, determinando-se para cada grau de utilização e espessura de protecção a correspondente temperatura crítica. Os elementos para ensaio possuem um comprimento total ( $L_t$ ) de 1370 [mm], um comprimento entre apoios ( $L$ ) de 1210 [mm] e um comprimento de exposição ao fogo ( $L_f$ ) de 1000 [mm].

Os resultados dos testes realizados com tinta intumescente são apresentados na Figura 1, podendo ser comparados com os resultados dos testes sem protecção ao fogo. Os valores de temperatura apresentados nos gráficos são relativos a temperaturas médias medidas pelos termopares das três secções do elemento.

A evolução da temperatura dos testes realizados com a secção IPE100 mostra uma clara distinção entre os perfis com espessuras de protecção nominais de 1000 [ $\mu\text{m}$ ] e 2000 [ $\mu\text{m}$ ] e não há uma relação evidente da influência do grau de utilização na variação da temperatura.

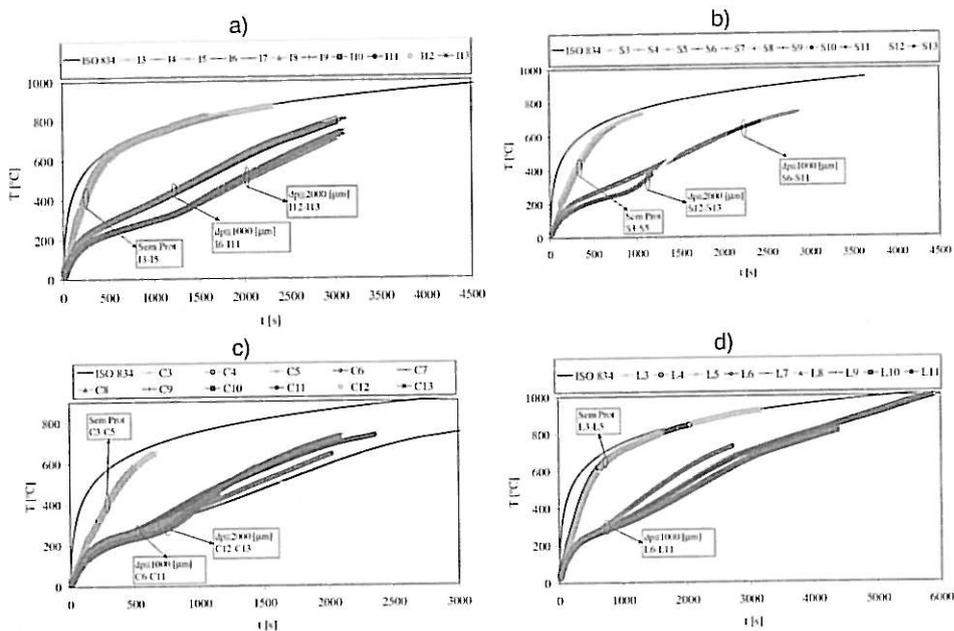


Figura 1 – Resultados experimentais da evolução da temperatura média do perfil e do deslocamento a meio vão. a) Secção IPE. b) secção SHS. c) Secção CHS. d) Secção LNP.

Tabela 1 - Caracterização e resultados dos testes realizados. (\* Força de colapso resultante do teste à temperatura ambiente).

Grupo/ Teste Seccção	$A_p/V$ nº	Sol. Térmica	$\mu_0$	Q [kN]	dp [mm]			Resistência		Resistência		
					DFT	Desv. Máx.	Mín.	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	
IPE 100 S275	I1	387	T. Amb.	-	31,84*	-	-	-	-	-	-	-
	I2	387	T. Amb.	-	31,84*	-	-	-	-	-	-	-
	I3	387	ISO834 30%	5,34	-	-	-	-	663,78	745,56	751,20	1156
	I4	387	ISO834 50%	9,18	-	-	-	-	584,67	562,96	684,47	749
	I5	387	ISO834 70%	12,94	-	-	-	-	525,78	473,19	659,01	632
	I6	387	ISO834 30%	5,34	974	193	1253	445	663,78	-	722,71	2505
	I7	387	ISO834 30%	5,34	975	170	1287	576	663,78	-	707,57	2570
	I8	387	ISO834 50%	9,18	1012	185	1342	560	584,67	-	701,02	2331
	I9	387	ISO834 50%	9,18	1055	202	1528	490	584,67	-	701,88	2467
	I10	387	ISO834 70%	12,94	998	148	1268	653	525,78	-	695,31	2341
	I11	387	ISO834 70%	12,94	989	193	1360	501	525,78	-	690,21	2295
	I12	387	ISO834 50%	9,18	1824	156	2140	1440	584,67	-	676,52	2867
	I13	387	ISO834 50%	9,18	1832	194	2270	1440	584,67	-	747,46	3127
SHS 100x100x4 S235	S1	250	T. Amb.	-	42,98*	-	-	-	-	-	-	-
	S2	250	T. Amb.	-	42,98*	-	-	-	-	-	-	-
	S3	250	ISO834 30%	13,62	-	-	-	-	663,78	766,13	722,56	1032
	S4	250	ISO834 50%	22,25	-	-	-	-	584,67	583,56	641,95	693
	S5	250	ISO834 70%	30,09	-	-	-	-	525,78	492,36	594,02	573
	S6	250	ISO834 30%	13,62	1105	115	1310	854	663,78	-	687,79	2444
	S7	250	ISO834 30%	13,62	1094	113	1338	777	663,78	-	685,53	2411
	S8	250	ISO834 50%	22,25	1141	100	1309	944	584,67	-	617,08	2060
	S9	250	ISO834 50%	22,25	1141	104	1350	909	584,67	-	608,73	2047
	S10	250	ISO834 70%	30,09	1144	114	1482	886	525,78	-	555,69	1812
	S11	250	ISO834 70%	30,09	1131	92	1270	854	525,78	-	562,24	1836
	S12	250	ISO834 50%	22,25	1932	112	2210	1730	584,67	-	651,64	1967
	S13	250	ISO834 50%	22,25	1933	144	2310	1700	584,67	-	Sem colapso	-
CHS 101,6x4,05 S235	C1	246,9	T. Amb.	-	29,37*	-	-	-	-	-	-	-
	C2	246,9	T. Amb.	-	29,37*	-	-	-	-	-	-	-
	C3	246,9	ISO834 30%	9,31	-	-	-	-	663,78	769,61	602,27	540
	C4	246,9	ISO834 50%	15,20	-	-	-	-	584,67	587,01	499,42	376
	C5	246,9	ISO834 70%	20,56	-	-	-	-	525,78	495,56	255,64	164
	C6	246,9	ISO834 30%	9,31	997	114	1270	800	663,78	-	560,26	1414
	C7	246,9	ISO834 30%	9,31	1004	111	1187	818	663,78	-	562,23	1861
	C8	246,9	ISO834 50%	15,20	1026	143	1330	770	584,67	-	Sem colapso	-
	C9	246,9	ISO834 50%	15,20	1006	93	1140	810	584,67	-	472,24	1144
	C10	246,9	ISO834 70%	20,56	1071	143	1306	754	525,78	-	169,12	146
	C11	246,9	ISO834 50%	20,56	1120	178	1439	785	525,78	-	490,75	1411
	C12	246,9	ISO834 50%	15,20	1896	200	2190	1490	584,67	-	563,47	1378
	C13	246,9	ISO834 50%	15,20	1807	210	2270	1430	584,67	-	512,00	1261

As figuras revelam a eficácia desta medida de protecção, através do aumento do tempo de resistência ao fogo em comparação com o mesmo elemento sem protecção sujeito ao mesmo grau de utilização. No caso dos testes C9 e L11 este aumento não é tão significativo, porque

ocorreu uma retracção local da camada intumescente na fase inicial do teste deixando parte do aço exposto directamente aos gases do incêndio.

Tabela 1 (cont) - Caracterização e resultados dos testes realizados. (\* Força de colapso resultante do teste à temperatura ambiente).

LNP 100x50x8 S275	L1	250	T. Amb.	-	21,69*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	L2	250	T. Amb.	-	21,69*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	L3	250	ISO834 30%	5,84	-	-	-	-	663,78	766,13	822,55	1743	-	-	-	-	-	-
	L4	250	ISO834 50%	9,83	-	-	-	-	584,67	583,56	761,68	1297	-	-	-	-	-	-
	L5	250	ISO834 70%	13,61	-	-	-	-	525,78	492,36	745,66	1210	-	-	-	-	-	-
	L6	250	ISO834 30%	5,84	1041	91	1205	898	663,78	-	983,42	4692	-	-	-	-	-	-
	L7	250	ISO834 30%	5,84	1026	107	1309	850	663,78	-	1015,19	4655	-	-	-	-	-	-
	L8	250	ISO834 50%	9,83	1053	108	1318	898	584,67	-	747,38	3382	-	-	-	-	-	-
	L9	250	ISO834 50%	9,83	1063	96	1271	825	584,67	-	760,49	3533	-	-	-	-	-	-
	L10	250	ISO834 70%	13,61	1135	118	1420	882	525,78	-	756,97	3801	-	-	-	-	-	-
	L11	250	ISO834 70%	13,61	1114	110	1377	953	525,78	-	600,68	1937	-	-	-	-	-	-

### 3 CONCLUSÕES

Para investigar a influência da espessura de protecção ao fogo, do grau de utilização e do tipo de secção transversal de elementos estruturais solicitados em flexão, foram realizados 50 ensaios experimentais num forno de resistência ao fogo. Destes, 8 foram realizados à temperatura ambiente e 42 em condições de incêndio sob a acção da curva de incêndio padrão ISO834, para graus de utilização de 30%, 50% e 70%. Para efeitos de comparação foram realizados 12 testes sem qualquer tipo de protecção e 30 com 1 e 2 [mm] de tinta intumescente.

No caso dos testes sem protecção ao fogo é apresentada uma comparação entre os resultados experimentais e os valores obtidos pelos métodos simplificados de cálculo. Nos elementos ensaiados com diferentes espessuras de protecção verifica-se a influência desta através de um aumento do tempo de resistência ao fogo. Para a mesma espessura de protecção a temperatura crítica e o tempo de resistência ao fogo diminui com o aumento do grau de utilização. Nos elementos SHS e CHS protegidos verifica-se uma frequente retracção da intumescência deixando algumas zonas do perfil desprotegidas. No entanto o desempenho dos perfis protegidos é notoriamente melhor que os perfis não protegidos da mesma secção.

### 4 AGRADECIMENTOS

Os autores reconhecem o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do Projecto PTDC/EME-PME/64913/2006, "Assessment of Intumescent Paint Behaviour for Passive Protection of Structural Elements Submitted to Fire Conditions", da Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/28909/2006 e a contribuição dos produtores das tintas CIN e Nullifire.

### 5 REFERÊNCIAS

- [1] CEN, *EN1363-1: Fire resistance tests. General requirements*. 1999, European Committee for Standardization.

# 2<sup>AS</sup> JORNADAS DE SEGURANÇA AOS INCÊNDIOS URBANOS

# ACTAS

AFILIADOS



ORDEM DOS ENGENHEIROS



Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering



ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS ENGENHEIROS TÉCNICOS

PATROCINADOR



Engifire  
Engenharia de Segurança  
Contra Incêndios, Lda.



9 789729 652455