



cmm

VIII CONGRESSO DE
**Construção
Metálica
e Mista**

Luís Simões da Silva, CMM
Paulo Cruz, UM
Nuno Lopes, UA
J. Almeida Fernandes, LNEC
António Batista, LNEC

com o apoio de



Universidade de Lisboa



VIII CONGRESSO DE
**Construção
Metálica e Mista**

Actas do VIII Congresso de Construção Metálica e Mista

Centro Cultural Vila Flor
24 e 25 de Novembro de 2011

Luís Simões da Silva

Departamento de Engenharia Civil
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Coimbra, Portugal

Paulo Cruz

Universidade do Minho
Guimarães, Portugal

Nuno Lopes

Universidade de Aveiro
Aveiro, Portugal

J. Almeida Fernandes

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal

António Baptista

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Lisboa, Portugal

organização: **CMM** – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
com a colaboração: **UNIVERSIDADE DO MINHO**



VIII Congresso de Construção Metálica e Mista

Copyright © 2011

por Luís Simões da Silva, Paulo Cruz, Nuno Lopes, J. Almeida Fernandes, António Baptista

Editora:

cmm – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra
Polo II – Rua Luís Reis Santos
3030-788 Coimbra, Portugal
Tel.: +351 239 098 422; Tlm.: +351 965 061 249; Fax: +351 239 405 722
Email: cmm@cmm.pt
Url: www.cmm.pt

1ª Edição: Novembro 2011

Tiragem: 350 exemplares

Não é permitida a reprodução total ou parcial deste livro, o registo em suporte informático, ou a transmissão através de qualquer processo electrónico ou mecânico, sem a prévia autorização por escrito dos titulares dos direitos da edição.

Depósito legal: 335945/11
ISBN: 978-989-95605-2-9

Coordenação editorial: Luís Figueiredo Silva
Concepção gráfica da capa: 3LM / Rui Veríssimo
Formatação de conteúdos e paginação: Joana Filipe Albuquerque
Impressão: Multicomp Lda, Mem Martins

Nota da editora

Este texto foi elaborado a partir da reprodução dos originais preparados pelos autores. Por conseguinte, a editora não pode aceitar qualquer responsabilidade pelo conteúdo, nem por possíveis erros no texto.

Prefácio

O 8º Congresso da **cmm** coincide com um período de crise económica e financeira mundial. O sector da construção metálica tem-se afirmado como um motor de inovação e exportação, quer no sub-sector dos edifícios (em particular as soluções em aço enformado a frio), as pontes e as infra-estruturas para energias renováveis. Além disso, num período em que as preocupações com as alterações climáticas se tomam cada vez mais avassaladoras, a construção em aço permite soluções que minimizam a emissão de CO₂, já que é o único material infinitamente reciclável sem perda de propriedades ou valor.

Pela quarta vez, serão apresentados neste Congresso os prémios do ECCS, recentemente atribuídos, tendo o prémio português sido atribuído ao projecto do Dolce Vita Tejo, da autoria dos gabinetes de arquitectura: Atelier One e Promontório Arquitectos. Os gabinetes de engenharia responsáveis pelo projecto estrutural foram: Atelier One e Tal Projecto. O projecto foi executado pela Martifer Construções (estrutura metálica). O Dono de Obra foi a Dolce Vita Tejo SA.

Em 2010-11, a **cmm** continuou a desempenhar um papel extremamente activo no panorama Europeu da construção metálica. Através do Comité Técnico do IPQ para a Execução de Estruturas Metálicas tem participado activamente no TC 135 do CEN. Esta iniciativa é ainda mais relevante pela próxima introdução da necessidade de marcação CE para produtos e componentes metálicos fruto da introdução da norma EN 1090-1. Neste contexto a **cmm** desenvolveu uma nova actividade de apoio aos associados, nomeadamente às metalomecânicas, que consiste em desenvolver e implementar em cada uma das empresas que o solicite os procedimentos necessários para que estejam preparadas a solicitar a certificação por um Organismo Notificado e obter a marcação CE.

Finalmente, assinalo a publicação deste 8º livro de actas do congresso, o qual revela bem a adesão da comunidade do aço (técnica e científica) a esta iniciativa, com um número de artigos que demonstra uma actividade e qualidade muito acima da média.

Luis Simões da Silva

Presidente da **cmm** e da Comissão Organizadora do
VII Congresso de Construção Metálica e Mista da
Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista

RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS PROTEGIDAS COM TINTA INTUMESCENTE: ESTUDO EXPERIMENTAL

Luís M. R. Mesquita ^a, Paulo A.G. Piloto ^a, Sérgio Roque ^a, Mário A. P. Vaz ^b

^a *Instituto Politécnico de Bragança*

^b *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*

Resumo. Considerando um conjunto de 50 testes experimentais, é apresentada uma análise da eficácia da aplicação de tintas intumescentes, de base aquosa, aplicada a distintas secções transversais: IPE, CHS, SHS e LNP. Os elementos estruturais sujeitos à flexão são submetidos a um carregamento mecânico, mantido constante e correspondente a valores do grau de utilização de 30%, 50% e 70%, e a uma solicitação térmica definida pela curva de incêndio padrão. Para efeitos de análise são apresentados os resultados dos testes conduzidos à temperatura ambiente e ao fogo sem protecção e com diferentes espessuras de protecção.

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.

Os incêndios que ocorrem a nível mundial conduzem à morte 100.000 pessoas por ano, correspondendo a um custo de aproximadamente 1% do PIB. Este grande impacto na sociedade, envolvendo perda de vidas e de bens, pode ser atenuado através dos regulamentos contra o risco de incêndio, cuja regulamentação define os níveis mínimos de segurança e é complementada por normas técnicas dos produtos que definem os testes a considerar e quais os critérios de classificação, e ainda pelas normas de ensaio ao fogo que determinam o comportamento dos materiais utilizados na construção e os parâmetros a medir durante a sua execução, (EFRA, 2006).

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.

Com o objectivo de se obter uma redução no custo total de protecção ao fogo, através da aplicação da tinta intumescente em estaleiro, Longton et al.[1] fizeram um estudo que incidiu na análise das propriedades das tintas intumescentes actuais e sua adequação para a aplicação em estaleiro, sua reformulação para colocação em obra no mesmo dia através de uma cura rápida e uma elevada durabilidade. Segundo estes autores, a redução do dano produzido pelo manuseamento dos elementos estruturais protegidos, durante o seu armazenamento (carregamento e descarregamento) e posteriormente aquando da construção da estrutura, pode ser conseguido através da melhoria das propriedades do intumescente, como a tenacidade, resistência ao impacto e a sua resistência ao risco. Serão necessários cuidados adicionais nos casos em que o dano torna o substrato (aço) visível, já que os ensaios produzidos mostram que o intumescente possui uma expansão lateral quase nula.

A metodologia actual para verificação de segurança estabelecida nas normas europeias 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.

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, μ_0 . Nos restantes casos, em elementos sujeitos a fenómenos de instabilidade, este cálculo requer um procedimento iterativo. O anexo nacional da mesma norma [2] particulariza que, na ausência do cálculo da temperatura crítica e para elementos das classes 1, 2 e 3 utilizados em edifícios correntes com local de risco E, local de estabelecimento destinado a dormida para pessoas sem limitações, a temperatura do aço de elementos traccionados e vigas à flexão sem encurvadura lateral não deve ultrapassar os 525 [°C]. Para todos os restantes locais a temperatura do aço não deve ultrapassar os 540 [°C]. Nas restantes situações, incluindo elementos em que possa ocorrer fenómenos de instabilidade a temperatura limite deverá ser de 500 [°C].

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 correspondentes a um grau de utilização de 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 [3].

2. Caracterização das propriedades mecânicas e geométricas dos perfis

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 [4]. 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, R_m , e a extensão após rotura, A_t .

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.

Para a caracterização das propriedades geométricas foram efectuadas várias medições distribuídas ao longo dos perfis. O valor médio foi utilizado para o cálculo das propriedades geométricas necessárias à determinação da resistência plástica da secção ou da resistência à encurvadura lateral, dependendo do modo de colapso do perfil, e posterior grau de utilização real do mesmo, ver a Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades nominais e reais do material e das secções em estudo

		A [mm ²] x10 ²	Iz [mm ⁴] x10 ⁴	Iy [mm ⁴] x10 ⁴	It [mm ⁴] x10 ⁴	Iw [mm ⁶] x10 ⁹	$r_{pl,y}$ [mm ³] x10 ³	f_y [MPa]
IPE	Nom	10,30	15,9	171,00	1,20	0,35	39,40	275
	Real	10,59	15,35	177,85	1,28	0,35	40,46	302,47
L	Nom	11,40	12,70	12,3	2,42	1,40	30,68	275
	Real	11,36	14,07	12,99	2,82	1,56	32,21	311,22
SHS	Nom	15,20	236,30	236,30			55,33	235
	Real	16,11	249,70	249,70			58,24	352,00
CHS	Nom	12,41	145,00	145,00			37,80	235
	Real	11,11	130,50	130,50			34,25	200,99

3. Descrição da infra-estrutura e metodologia experimental

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 solicitação 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 Instituto Politécnico de Bragança, para a avaliação do comportamento de vigas em situação de incêndio e aferir a influência da espessura de protecção e do grau de solicitação é o apresentado na Tabela 2. Para efeitos de 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.

Tabela 2: Caracterização e resultados dos testes experimentais

Grupo/ Secção	Teste nº	A_p/V [m ⁻¹]	Sol. Térmica	μ_0	Q [kN]	dp [μ m]				EC3		Exp.	
						DFT	Desv.	Máx.	Mín.	T [°C]	t [min]	T [°C]	t [min]
IPE 100 S275	I1	387	T. Amb.	-	31,84*	-	-	-	-	-	-	-	-
	I2	387	T. Amb.	-	31,84*	-	-	-	-	-	-	-	-
	I3	387	ISO834	30%	5,34	-	-	-	-	663,78	12	751,20	19
	I4	387	ISO834	50%	9,18	-	-	-	-	584,67	9	684,47	12
	I5	387	ISO834	70%	12,94	-	-	-	-	525,78	7	659,01	10
	I6	387	ISO834	30%	5,34	974	193	1253	445	663,78	-	722,71	41
	I7	387	ISO834	30%	5,34	975	170	1287	576	663,78	-	727,57	42
	I8	387	ISO834	50%	9,18	1012	185	1342	560	584,67	-	701,02	38
	I9	387	ISO834	50%	9,18	1055	202	1528	490	584,67	-	701,88	41
	I10	387	ISO834	70%	12,94	998	148	1268	653	525,78	-	695,31	39
	I11	387	ISO834	70%	12,94	989	193	1360	501	525,78	-	690,21	38
	I12	387	ISO834	50%	9,18	1824	156	2140	1440	584,67	-	676,52	47
	I13	387	ISO834	50%	9,18	1832	194	2270	1440	584,67	-	747,46	52
SHS 100x100x4 S235	S1	250	T. Amb.	-	42,98*	-	-	-	-	-	-	-	-
	S2	250	T. Amb.	-	42,98*	-	-	-	-	-	-	-	-
	S3	250	ISO834	30%	13,62	-	-	-	-	663,78	12	722,56	17
	S4	250	ISO834	50%	22,25	-	-	-	-	584,67	9	641,95	11
	S5	250	ISO834	70%	30,09	-	-	-	-	525,78	8	594,02	9
	S6	250	ISO834	30%	13,62	1105	115	1310	854	663,78	-	687,79	40
	S7	250	ISO834	30%	13,62	1094	113	1338	777	663,78	-	685,53	40
	S8	250	ISO834	50%	22,25	1141	100	1309	944	584,67	-	617,08	34
	S9	250	ISO834	50%	22,25	1141	104	1350	909	584,67	-	608,73	34
	S10	250	ISO834	70%	30,09	1144	114	1482	886	525,78	-	555,69	30
	S11	250	ISO834	70%	30,09	1131	92	1270	854	525,78	-	562,24	30
	S12	250	ISO834	50%	22,25	1932	112	2210	1730	584,67	-	651,64	32
	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	12	602,27	9
	C4	246,9	ISO834	50%	15,20	-	-	-	-	584,67	9	499,42	6
	C5	246,9	ISO834	70%	20,56	-	-	-	-	525,78	8	255,64	2
	C6	246,9	ISO834	30%	9,31	997	114	1270	800	663,78	-	560,26	23
	C7	246,9	ISO834	30%	9,31	1004	111	1187	818	663,78	-	562,23	31
	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	19
	C10	246,9	ISO834	70%	20,56	1071	143	1306	754	525,78	-	169,12	2
	C11	246,9	ISO834	50%	20,56	1120	178	1439	785	525,78	-	490,75	23
	C12	246,9	ISO834	50%	15,20	1896	200	2190	1490	584,67	-	563,47	22
	C13	246,9	ISO834	50%	15,20	1807	210	2270	1430	584,67	-	512,00	21
LNP 100,50x8 S275	L1	250	T. Amb.	-	21,69*	-	-	-	-	-	-	-	-
	L2	250	T. Amb.	-	21,69*	-	-	-	-	-	-	-	-
	L3	250	ISO834	30%	5,84	-	-	-	-	663,78	12	822,55	29
	L4	250	ISO834	50%	9,83	-	-	-	-	584,67	9	761,68	21
	L5	250	ISO834	70%	13,61	-	-	-	-	525,78	8	745,66	20
	L6	250	ISO834	30%	5,84	1041	91	1205	898	663,78	-	983,42	78
	L7	250	ISO834	30%	5,84	1026	107	1309	850	663,78	-	1015,19	77
	L8	250	ISO834	50%	9,83	1053	108	1318	898	584,67	-	747,38	56
	L9	250	ISO834	50%	9,83	1063	96	1271	825	584,67	-	760,49	58
	L10	250	ISO834	70%	13,61	1135	118	1420	882	525,78	-	756,97	63
	L11	250	ISO834	70%	13,61	1114	110	1377	953	525,78	-	600,68	32

O forno de resistência ao fogo, possui um volume nominal de 1 [m³], 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 [3], e controlada por um controlador PID.

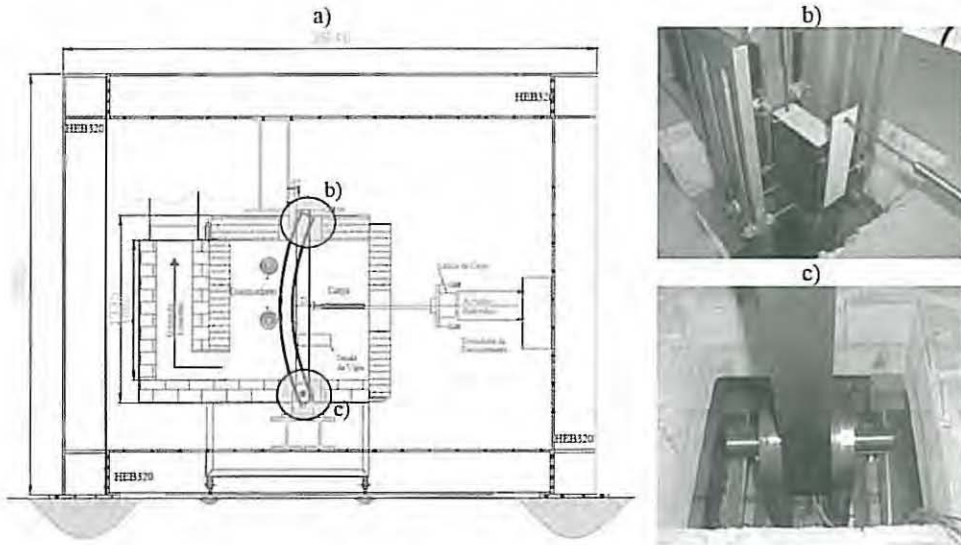


Fig. 1: a) Setup experimental utilizado nos ensaios. b) Apoio simples de forquilha superior e posição dos LVDTs. c) Apoio duplo inferior

As vigas são sujeitas a um carregamento mecânico constante e posterior solicitação ao fogo, 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 $R_{f,d,0}$, 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, [5], apresentado na Fig. 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 [3].

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.

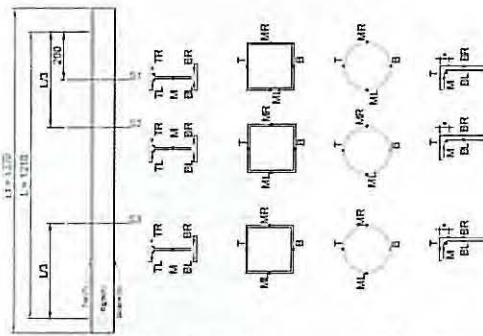


Fig. 2: Localização dos termopares soldados ao elemento. Distribuição ao longo do elemento e nas secções transversais

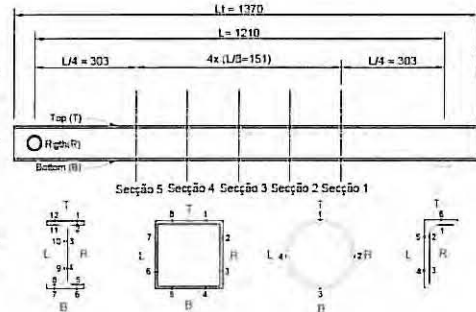


Fig. 3: Localização das secções e pontos de controlo da espessura de tinta seca

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 Fig. 3 e conforme especificado na norma prEN 13381-8, [5].

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.

3.1 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 [3], em que este é definido pelo instante em que o elemento deixa de suportar a carga por perda de capacidade resistente.

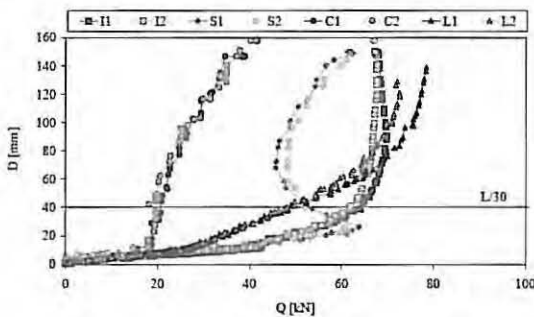
Para vigas, deve-se considerar que o elemento deixa de suportar a carga por perda de capacidade resistente quando é atingido um deslocamento vertical a meio vão dado por $D = L^2/400d$ e uma taxa de deslocamento definida por $dD/dt = L^2/9000d$, em $[mm/min]$. Nas expressões anteriores L é o vão da viga 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 $L/30$.

Para os perfis analisados, com uma altura da secção transversal igual a $d = 100[\text{mm}]$, o critério do deslocamento máximo a meio vão é atingido para $D = 36.6[\text{mm}]$, resultando num deslocamento equivalente a $L/33$. Da análise das curvas carga versus deslocamento a meio vão pode-se verificar que o critério relativo à taxa de deslocamento é atingido antes de se obter um deslocamento equivalente a $L/30$. Neste caso e para os perfis ensaiados a resistência ao fogo é definida como o instante, em minutos completos, no qual o perfil adquire um deslocamento a meio vão igual a $L/30$.

4. Testes experimentais realizados 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 de deve 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 Fig. 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.



Teste	Resistência EC3-1.1		Q_{exp}	Q_{exp}
	Nom.	Real	L/30 [kN]	Max [kN]
I1	31,84	34,99	64,22	69,82
I2	31,84	34,99	61,76	67,78
S1	42,98	66,23	53,11	63,73
S2	42,98	66,23	52,01	67,19
C1	29,37	22,76	20,78	38,91
C2	29,37	22,76	18,70	41,61
L1	21,69	25,45	48,78	78,44
L2	21,69	25,45	48,06	72,67

Fig. 4: Variação do deslocamento a meio vão e capacidade resistente segundo o eurocódigo 3 parte 1.1 e valores experimentais dos testes realizados à temperatura ambiente

5. Testes experimentais 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 3 parte 1.2, 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 3.1. Em todos os testes realizados este critério define como colapso o tempo associado a um deslocamento a meio vão equivalente a $L/30$.

Os valores apresentados na Tabela 2 e Tabela 3, 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 3 parte 1.2, 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 3 parte 1.2 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 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.

Tabela 3: Comparação da temperatura critica entre os resultados do EC3 e os experimentais sem protecção ao fogo

		Grau Utilização			Tcr (EC3)			Tcr (Exp.)		
IPE	Nom	30	50	70	663,78	584,67	525,78	751,20	684,47	659,01
	Real	29,17	47,71	64,38	668,02	592,17	541,72			
SHS	Nom	30	50	70	663,78	584,67	525,78	722,56	641,95	594,02
	Real	20,10	32,82	44,40	724,15	659,07	610,82			
CHS	Nom	30	50	70	663,78	584,67	525,78	602,27	499,42	255,64
	Real	40,89	66,77	90,32	625,45	536,21	443,98			
L	Nom	30	50	70	663,78	584,67	525,78	822,55	761,68	745,66
	Real	29,17	47,71	64,38	668,02	592,17	541,72			

6. Testes experimentais com protecção ao fogo

O setup experimental e a metodologia utilizada neste grupo de testes é em tudo semelhante ao 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 fibra cerâmica. Este contacto impede que, no ponto de aplicação de carga, haja intumescência da tinta.

Os resultados dos testes realizados com tinta intumescente são apresentados na Fig. 5, 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 conseqüente 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.

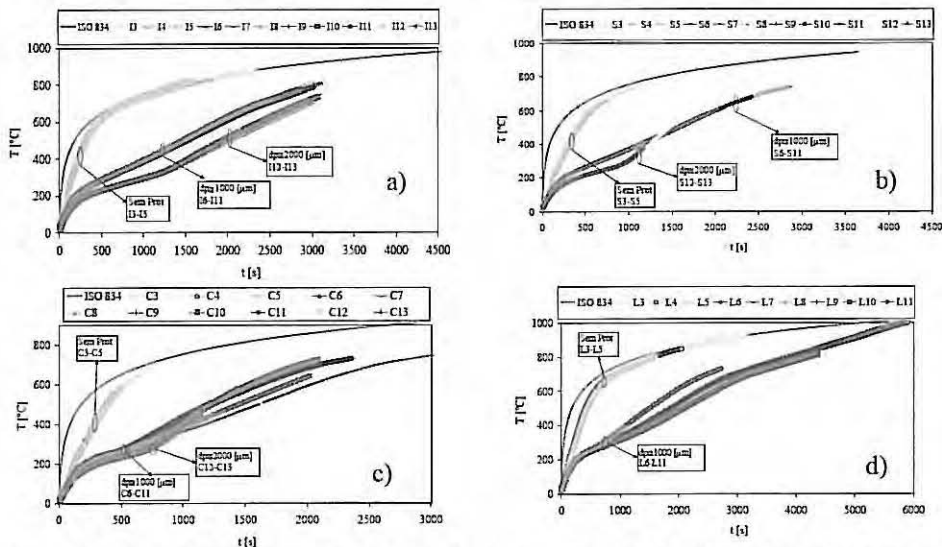


Fig. 5: Resultados experimentais da evolução da temperatura média do perfil e do deslocamento a meio vão. a) Secção IPE. b) secção SHS. c) Secção CHS. d) Secção LNP

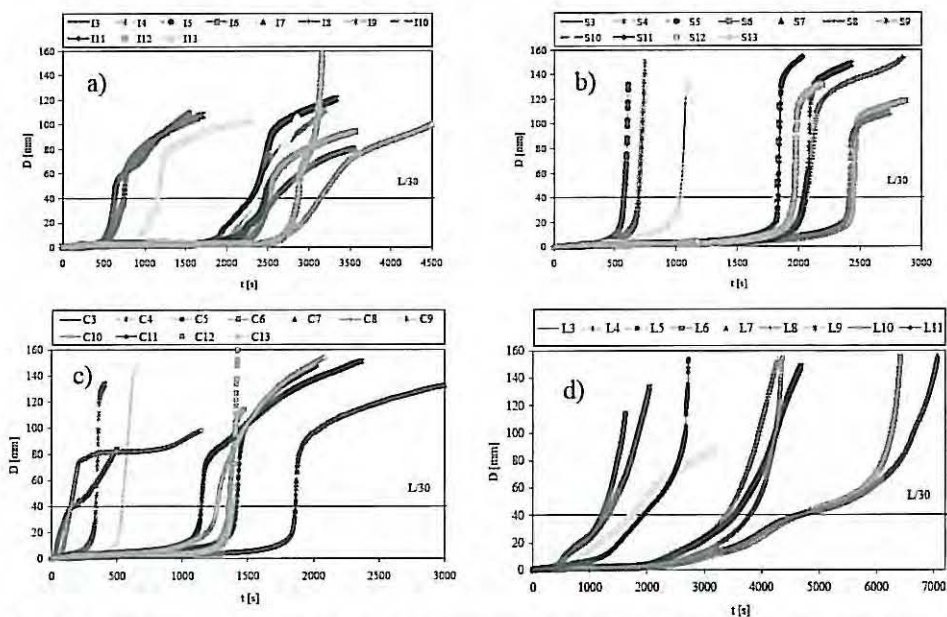


Fig. 6: Resultados experimentais da evolução do deslocamento a meio vão. a) Secção IPE. b) Secção SHS. c) Secção CHS. d) Secção LNP

Devido à elevada capacidade resistente da secção LNP, com um tempo de resistência ao fogo de aproximadamente uma hora, quando protegido com 1000 [μm] 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 Fig. 6. 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%.

7. 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. 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 3 parte 1.2, considerando as propriedades nominais. Os resultados experimentais da secção LNP representam um tempo de resistência superior a duas vezes o determinado pelo eurocódigo 3 parte 1.2.

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.

Referências

- [1] Longton, P.J., C. Houyoux, B. Zhao, and B. Chico, *Development of alternative technologies for off-site applied intumescent coatings*. 2005, European Commission: Luxembourg.
- [2] NPEN1993-1-2, *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-2: General rules, Structural fire design*. 2010, Instituto Portugues da Qualidade.
- [3] CEN, *EN1363-1: Fire resistance tests. General requirements*. 1999, European Committee for Standardization
- [4] IPQ, *NP EN 10002-1: Materiais metálicos, Ensaio de tracção. Parte 1: Método de ensaio*. 1990, Instituto Portugues da Qualidade.
- [5] 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.