

4^{as} JORNADAS de Segurança aos Incêndios Urbanos



Instituto Politécnico de Bragança

Atas dos Artigos



TÍTULO:

Atas dos Artigos das 4^{as} Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos

EDIÇÃO:

ALBRASCI (Associação Luso-Brasileira para a Segurança Contra Incêndio)

EDITORES:

Débora Ferreira (IPB), Elza Fonseca (IPB), João Carlos Viegas (LNEC), João Paulo C. Rodrigues (UC - ALBRASCI), José Pedro Lopes (ANPC), Luís Mesquita (IPB), Nuno Lopes (UA), Paulo Piloto (IPB)

DESIGN GRÁFICO:

Soraia Maduro – CIPweb IPB

EDIÇÃO:

1^a, Novembro de 2014

ISBN:

978-989-97210-2-9

DEPÓSITO LEGAL:

382800/14

IMPRESSÃO:

Bringráfica – Indústrias Gráficas, Lda

OBSERVAÇÃO:

Nenhuma parte desta obra pode ser reproduzida sem autorização escrita dos autores e da editora

PREFÁCIO

A Segurança Contra Incêndio de Edifícios (SCIE) atingiu a sua maturidade em Portugal fruto do desenvolvimento sustentado que tem tido na última década não só ao nível da investigação com a realização de vários projetos nacionais e europeus em várias instituições Portuguesas, como com o aparecimento de formação avançada (mestrado e doutoramento) e formação profissional em várias áreas da SCIE e da criação duma regulamentação uniforme para a área, suportada por uma normalização também ela completa e abrangente de toda a área da SCIE. Este desenvolvimento trará enormes retornos não só ao nível da segurança das edificações, bens e pessoas, como económicos, com um reflexo positivo para a sociedade. Portugal está hoje na primeira linha do desenvolvimento na área da SCIE. Poderemos dizer que projetar e construir hoje é mais seguro em termos de SCIE do que há quinze anos atrás e por isso temos que nos sentir orgulhosos.

No acompanhamento deste desenvolvimento, os Laboratórios das instituições públicas Portuguesas também se apetrecharam com novos e importantes equipamentos, que permitem o ensaio e certificação dos produtos das indústrias nacionais, tornando estas mais competitivas na sua ação não só no mercado nacional como internacional.

Portugal é hoje uma referência mundial na área da SCIE, sendo respeitado no Brasil e restantes PALOP como no resto do mundo. Neste relacionamento deve se destacar a ligação com o Brasil não só ao nível dos bombeiros, dos técnicos da empresas e dos professores e investigadores que na ALBRASCI – Associação Luso-Brasileira para a Segurança Contra Incêndio encontraram um espaço de discussão e colaboração em diferentes iniciativas em SCIE.

As Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos começaram em 2006, aquando da realização do primeiro Mestrado em Segurança Contra Incêndios Urbanos na Universidade de Coimbra, e em cada nova edição o sucesso vai-se renovando com o aparecimento de novos trabalhos científicos com um nível científico cada vez maior. Estas Jornadas têm constituído um fórum de debate alargado entre técnicos e demais interessados na área da SCIE.

As 4^{as} Jornadas em SCIE (4JORNINC) realizam-se este ano em Bragança, no Instituto Politécnico, pois esta é uma Escola que ao longo das últimas décadas tem realizado trabalho na área e criou um grupo de investigação que tem atuado ao maior nível em termos nacionais e internacionais. O número e qualidade das publicações submetidas a este evento foi muito bom pelo que o sucesso das 4JORNINC está assegurado.

Para finalizar queria agradecer a sua participação nestas Jornadas que serão certamente do seu maior interesse e profícuas para o seu desenvolvimento profissional.

João Paulo C. Rodrigues

COMISSÃO ORGANIZADORA

Débora Ferreira (IPB)
Elza Fonseca (IPB)
João Paulo C. Rodrigues (UC - ALBRASCI)
João Carlos Viegas (LNEC)
Luís Mesquita (IPB)
Nuno Lopes (UA)
José Pedro Lopes (ANPC)
Paulo A. G. Piloto (IPB)



Laboratório Nacional de Engenharia Civil



COMISSÃO CIENTÍFICA

Aldina M. da Cruz Santiago (FCTUC)
António Moura Correia (IPC)
A. Sérgio Miguel (U Minho)
Carlos Ferreira de Castro (Action Modulers)
Carlos Pina dos Santos (LNEC)
Cristina Calmeiro dos Santos (IPCB)
Débora Ferreira (IPB)
Elza Fonseca (IPB)
José Carlos M. Góis (FCTUC)
João Carlos Viegas (LNEC)
João Ferreira (IST)
João Paulo C. Rodrigues (FCTUC)
João Pinheiro (CDOS Bragança – ANPC)
João Ramôa Correia (IST)
Joaquim Barros (U Minho)
Jorge Gil Saraiva (LNEC)
Lino Forte Marques (FCTUC)
Luís Laím (FCTUC)
Luís Mesquita (IPB)
Miguel Chichorro Gonçalves (FEUP)
Nuno Lopes (UA)
Paulo A. G. Piloto (IPB)
Paulo Jorge M. F. Vila Real (UA)
Paulo Lourenço (U Minho)
Pedro Martins Arezes (U Minho)
Pedro Vieira Carvalheira (FCTUC)
Rui Faria (FEUP)
Vítor Carlos T. Abrantes (FEUP)

ÍNDICE

PREFÁCIO	i
COMISSÃO ORGANIZADORA	iii
COMISSÃO CIENTÍFICA	iv
PALESTRAS	1
O DIMENSIONAMENTO AO FOGO DE ESTRUTURAS E OS EUROCÓDIGOS ESTRUTURAIS	3
PREVENÇÃO E PROTEÇÃO CONTRA OS RISCOS DERIVADOS DE ATMOSFERAS EXPLOSIVAS.....	27
GRAU DE PRONTIDÃO DOS MEIOS DE SOCORRO E A EFICÁCIA DOS BOMBEIROS PORTUGUESES	37
CONTROLO DE FUMO EM GRANDES ÁTRIOS.....	47
VALIDAÇÃO NUMÉRICA DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM CONDIÇÕES DE INCÊNDIO.....	61
ARTIGOS	111
SESSÃO DE ARTIGOS 1:	111
ANÁLISE DA REGULAMENTAÇÃO PORTUGUESA DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS E PROPOSTA DA SUA APLICAÇÃO EM MOÇAMBIQUE.....	113
UMA VISÃO SISTÊMICA DA SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES NO BRASIL E A POSSIBILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DE UM REGULAMENTO NACIONAL.....	127
ANÁLISE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO SEGUNDO OS PRECEITOS DE DESEMPENHO, DURABILIDADE E SEGURANÇA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO CONFORME AS PRESCRIÇÕES NORMATIVAS BRASILEIRAS.....	139
SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM INSTALAÇÕES DE ARMAZENAMENTO DE MERCADORIAS.....	149
INCÊNDIOS EM TÚNEIS RODOVIÁRIOS – ENSAIOS À ESCALA REAL	157
IMPLEMENTAÇÃO DA DIRETIVA ATEX NO SETOR INDUSTRIAL	167
CONCEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DE REDES SECAS.....	177
COMPUTATIONAL SIMULATION ON THE PERFORMANCE OF AIR PLANE JETS FOR SMOKE CONTROL.....	187
CARACTERIZAÇÃO DOS JATOS GERADOS POR VENTILADORES DE IMPULSO.....	199
SESSÃO DE ARTIGOS 2:	213
ANÁLISE DO PERIGO DE INCÊNDIO NA ANTIGA VILA DOS PESCADORES EM PORTO ALEGRE (RIO GRANDE DO SUL - BRASIL).....	215
ADEQUAÇÃO DO MÉTODO DE GREENER À AVALIAÇÃO DO RISCO DE INCÊNDIO NOS CENTROS URBANOS ANTIGOS.....	225
ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NA AVALIAÇÃO DO RISCO DE INCÊNDIO DE EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS.....	235

AVALIAÇÃO DE RISCO DE INCÊNDIO URBANO – PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA ANÁLISE E GESTÃO DO EDIFÍCIO EXISTENTE	245
ORGANIZAÇÃO E GESTÃO DA SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS: PRINCIPAIS GRUPOS DE INTERESSE.....	253
A SEGURANÇA OPERACIONAL NA ATIVIDADE DE SALVAMENTO E DE COMBATE A INCÊNDIOS	263
SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFÍCIOS GESTÃO NO USO DOS EDIFÍCIOS	273
ESTUDO DA EVACUAÇÃO EM CASO DE INCÊNDIO EM EDIFÍCIOS.....	283
O CONTROLO DE FUMO POR MEIOS ATIVOS E A EVACUAÇÃO EM LOCAIS DE RISCO.....	293
SESSÃO DE ARTIGOS 3:	305
ANÁLISE NUMÉRICA DA ENCURVADURA POR ESFORÇO TRANSVERSO EM VIGAS SUJEITAS A INTERAÇÃO ENTRE ESFORÇO TRANSVERSO E MOMENTO FLETOR A TEMPERATURAS ELEVADAS	307
ESTUDO PARAMÉTRICO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS EM C ENFORMADAS A FRIO	319
EFFECT OF ELEVATED TEMPERATURES ON THE BOND STRENGTH OF FRP-STRENGTHENED BRICKS	331
ESTUDIO NUMÉRICO DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS SOMETIDAS A FLEXIÓN A ALTAS TEMPERATURAS.....	341
RESISTÊNCIA AO FOGO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE AÇO INOXIDÁVEL COM SECÇÕES TUBULARES QUADRADAS DE CLASSE 4 SUJEITOS A FLEXÃO COMPOSTA COM COMPRESSÃO	351
COMPORTAMENTO AO FOGO DE ELEMENTOS DE COMPARTIMENTAÇÃO DE BASE GESSO SUJEITOS A INCÊNDIO NATURAL	363
COMPORTAMENTO AO FOGO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO REFORÇADAS À FLEXÃO COM LAMINADOS DE CFRP COLADOS EXTERIORMENTE. ESTUDO EXPERIMENTAL	375
ANÁLISE NUMÉRICA DE VIGAS MISTAS PARCIALMENTE REVESTIDAS DE AÇO E CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	387
ANÁLISE TÉRMICA DE PILARES DE AÇO EXPOSTOS A INCÊNDIOS LOCALIZADOS.....	399
SESSÃO DE ARTIGOS 4:	411
PROPAGAÇÃO DE CHAMAS ATRAVÉS DE VÃOS DE FACHADA EM EDIFÍCIOS.....	413
COMPORTAMENTO AO FOGO DE COLUNAS DE GFRP. ESTUDO EXPERIMENTAL	425
BETÕES CORRENTES EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	435
ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MODELOS DE CÁLCULO DA EN1993-1-2 PARA O DIMENSIONAMENTO AO FOGO DE VIGAS C EM AÇO ENFORMADAS A FRIO.....	445
BETÃO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE AÇO E TÊXTEIS RECICLADAS DE PNEU SUJEITO A ALTAS TEMPERATURAS.....	457
ANÁLISE TÉRMICA 2D E 3D DE UM PAVIMENTO/COBERTURA EM MADEIRA COM PERFURAÇÕES.....	467
RESISTÊNCIA AO FOGO DE VIGAS EM MADEIRA E SECÇÕES DE PERFIS EM AÇO.....	475

4^{as} Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos
Instituto Politécnico de Bragança - Portugal - 6-7 de Novembro de 2014

REDUÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS SECÇÕES METÁLICAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS COM BETÃO SUJEITAS AO FOGO	483
COMPORTAMENTO AO FOGO DE PAREDES EM TABIQUE.....	493
SESSÃO DE ARTIGOS 5:.....	505
RESISTÊNCIA AO FOGO DE LAJES CELULARES EM MADEIRA COM DIFERENTES PERFURAÇÕES – ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	507
RESISTÊNCIA AO FOGO DE LAJES CELULARES EM MADEIRA COM DIFERENTES PERFURAÇÕES – ANÁLISE NUMÉRICA.....	517
RESISTÊNCIA AO FOGO DE BLOCOS DE BETÃO LEVE À BASE DE CAROÇO DE ESPIGA DE MILHO	527
REAÇÃO AO FOGO DE BETÃO COM E SEM FIBRAS DE POLIPROPILENO – ANÁLISE EXPERIMENTAL E VALIDAÇÃO NUMÉRICA.....	537
VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE ELEMENTOS NÃO UNIFORMES EM AÇO - VALIDAÇÃO NUMÉRICA DO MÉTODO GERAL DO EC3.....	549
FORMULAÇÃO E COMPORTAMENTO DE TINTAS INTUMESCENTES.....	559
ESTUDIO NUMÉRICO DE VIGAS PARCIALMENTE EMBEBIDAS SOMETIDAS A FLEXIÓN EXPUESTAS A FUEGO ISO834.....	569
COMPORTAMENTO AO FOGO DE PERFIS C E Z ENFORMADOS A FRIO	579
ENSAIOS DE REAÇÃO AO FOGO DE TINTAS INTUMESCENTES COM GRANULADO DE CORTIÇA.....	589
FATOR DE REDUÇÃO DO NÍVEL DE CARREGAMENTO, η_n : VALORES DE PROJETO E CONSEQUÊNCIAS DA SIMPLIFICAÇÃO APONTADA NO EC2-1-2.....	599
NÍVEL DE CARREGAMENTO À TEMPERATURA NORMAL, n : VALORES DE PROJETO E VALORES MÁXIMOS APONTADOS NO EC2-1-2	609

COMPORTAMENTO AO FOGO DE PERFIS C E Z ENFORMADOS A FRIO

Luis Mesquita*
Professor
IPB - Bragança

Miguel Mendonça
Aluno
IPB - Bragança

Rui Ramos
Aluno
IPB - Bragança

Luisa Barreira
Técnica Lab.
IPB - Bragança

Paulo Piloto
Professor
IPB - Bragança

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo paramétrico realizado em perfis enformados a frio de secção transversal C e Z de diferentes alturas da secção e de espessura da chapa de aço. A análise é realizada através de ensaios à temperatura ambiente e num forno de resistência ao fogo em condições de incêndio. Os resultados da capacidade resistente, do tempo de resistência ao fogo e da temperatura crítica, são comparados com os resultados dos modelos simplificados do Eurocódigo 3, partes 1.2 e 1.3, verificando-se que, tendencialmente, os obtidos pelos modelos simplificados são em geral superiores aos obtidos nos ensaios experimentais.

PALAVRAS-CHAVE: Resistência ao fogo; Enformados a frio; Temperatura crítica; Instabilidade.

1. INTRODUÇÃO

Os perfis enformados a frio têm uma grande aplicação em estruturas de aço leve ("light steel framing"), nomeadamente em edifícios, devido à sua leveza e resistência mecânica específica. As vantagens apresentadas pelos elementos estruturais enformados a frio são: a sua grande resistência em função do seu peso reduzido, a sua gama alargada de secções, e a possibilidade de fabrico com dimensões inferiores às mínimas padronizadas pelos laminados a quente. Como o fabrico é processado à temperatura ambiente, os perfis enformados a frio exibem menores tensões residuais [1, 2].

A sensibilidade da resistência última de elementos de aço enformados a frio de paredes finas, em relação às imperfeições locais e ou globais e ao modelo de comportamento do material, para pilares variando a esbelteza e a temperatura do mesmo foi estudado por Fenge et al [3].

* Autor correspondente – Dep. de Mecânica Aplicada, Instituto Politécnico de Bragança. Campus Santa Apolónia, 5301-857 Bragança.

Telef.: +351 273 303116, Fax: +351 273 313051, E-mail: lmesquita@ipb.pt

Concluiu-se que as imperfeições iniciais têm um efeito muito importante sobre a capacidade de carga de um pilar com uma distribuição de temperatura uniforme e que quanto maior forem as imperfeições iniciais, menor será a resistência do pilar. Combinando os diversos modos de encurvadura, como é comum acontecer nas estruturas reais, resultam valores de capacidade de carga diferentes, quando aplicado apenas um modo de imperfeição inicial. No entanto combiná-los de forma a simular a situação real é muito difícil de implementar em simulações numéricas devido à dificuldade da exatidão e precisão de dados experimentais obtidos. Concluiu também que a curva da encurvadura da coluna à temperatura ambiente proposta pela parte 1-3 do Eurocódigo 3 [4] não é claramente adequada para o dimensionamento destes elementos em situação de incêndio, uma vez que tende a sobrestimar a resistência do pilar em determinados casos. A curva de encurvadura de pilares proposta pela parte 1-2 do Eurocódigo 3 [5], desenvolvido originalmente para elementos de aço laminados a quente, parece produzir resultados aceitáveis e seguros.

Os valores recomendados dos fatores de imperfeição para as curvas de encurvadura lateral, para secções em C com reforço nas extremidades, são explícitos na parte 1-3 do Eurocódigo 3, no caso dos perfis de aço enformados a frio. Um estudo elaborado por Kankanamge [6] refere que, à temperatura ambiente, a curva proposta encontra-se adequada para perfis com esbelteza elevada, enquanto que para esbeltezas intermédias a curva demonstrou ser demasiado conservativa, sendo sugerido pelos autores a adoção da curva “a” em vez da curva “b” conforme prescrito na norma.

Tratando-se de elementos estruturais de parede fina, são em geral classificados como secções de classe 4 segundo o Eurocódigo 3, parte 1.1 e sujeitos a fenómenos de instabilidade local, distorcional e global, ou uma interação destes três modos. Os enformados a frio quando expostos a uma condição de incêndio atingem o colapso a baixas temperaturas, traduzindo-se num tempo de resistência ao fogo reduzido.

Este trabalho aborda o comportamento térmico e mecânico de perfis de aço enformados a frio através de um estudo experimental à temperatura ambiente e em condições de incêndio. São analisadas secções C e Z com espessuras de chapa de 1.5 e 2 [mm] e três alturas da secção distintas. A capacidade resistente dos perfis é determinada à temperatura ambiente por um conjunto de 12 testes através da aplicação de uma força de compressão, continuamente crescente, até se atingir o colapso do elemento (perda de equilíbrio). Em situação de incêndio são realizados 24 testes num forno de resistência ao fogo, nos quais o elemento estrutural é submetido a um carregamento mecânico constante, representativo de um grau de utilização, e simultaneamente ao fogo através da curva de incêndio padrão ISO834.

2. VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA SEGUNDO O EUROCÓDIGO

2.1 Método da largura efetiva do EC3

A verificação da resistência da secção transversal enformada a frio, apresentada no Eurocódigo 3 parte 1.3 [4], é baseada no método da largura efetiva. Este método requer a determinação da área efetiva da secção transversal, reduzida em relação à área bruta, através do cálculo da largura efetiva, $b_{eff} = \rho b$, de todas as placas comprimidas, dependente da esbelteza da placa,

$\bar{\lambda}_p$. O fator de redução, ρ , é determinado segundo as especificações da parte 1.5 do Eurocódigo 3 [7].

No caso de elementos de aço ao carbono enformados a frio, a tensão de cedência do material deve ser substituída por f_{yb} e o coeficiente de redução substituído pelo respetivo valor da tensão limite de proporcionalidade a 0.2% de deformação, $k_{0.2p,\theta}$. De acordo com esta metodologia, o coeficiente ε_θ , a temperaturas elevadas, varia com a temperatura da placa. Assim, para os aços ao carbono laminados, resulta num valor entre 0.75 e 1.06 do seu valor à temperatura ambiente, enquanto que para os enformados a frio resulta num intervalo entre 1 e 1.22 do mesmo coeficiente à temperatura ambiente. Para a aplicação das regras simplificadas do Eurocódigo 3, nomeadamente para a classificação das secções, é permitida a utilização de um valor simplificado independente da temperatura de valor igual a 0.85, resultando em: $\varepsilon_\theta = 0.85 \cdot \sqrt{235/f_y}$. Esta inconsistência já havia sido apontada por Renaud [8], cuja opinião vai no sentido de se utilizar a temperaturas elevadas a mesma metodologia da temperatura ambiente.

A temperaturas elevadas e para as secções de classe 4, a verificação de segurança deve ser determinada considerando as propriedades efetivas, [5], e no caso das secções enformadas a frio com a tensão limite de proporcionalidade a 0.2%. Assim, o valor do coeficiente de esbelteza da placa a temperaturas elevadas deve ser obtido por $\bar{\lambda}_{p,\theta} = \bar{\lambda}_p$, sem considerar o rácio dos coeficientes de redução apresentados. No intervalo de temperaturas entre 20 e 1200 [°C] a raiz deste rácio conduz a valores compreendidos entre 0.82 e 1.0.

Para considerar a influência do modo de encurvadura distorcional, o Eurocódigo 3, parte 1.3 [4] especifica que a espessura da secção do reforço, incluindo a parte reduzida da flange, deve ser reduzida, $t_{red} = \chi_d t$, em função do fator de redução da resistência à encurvadura distorcional, χ_d , determinado em função dos limites da esbelteza da encurvadura distorcional, $\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb}/\sigma_{cr,s}}$.

2.2 Determinação da temperatura do aço em situação de incêndio

Quando o elemento estrutural se encontra sujeito a uma exposição ao fogo por quatro lados, o aumento de temperatura $\Delta\theta_{a,t}$, do elemento de aço não protegido durante um intervalo de tempo, Δt , deverá ser determinado a partir de [5]:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{Am/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \cdot \Delta t \quad (1)$$

Nas superfícies expostas ao fogo, o fluxo de calor efetivo, \dot{h}_{net} , deverá ser determinado através da contribuição da transferência de calor por convecção e por radiação, proveniente da temperatura dos gases do incêndio. k_{sh} representa o fator de correção do efeito de sombra. No caso de elementos em que o colapso seja definido pela resistência da secção transversal, a temperatura crítica, $\theta_{a,cr}$, no instante t poderá ser determinada para qualquer grau de utilização μ_0 , no instante $t=0$, utilizando a seguinte equação.

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

A evolução da temperatura do aço, de algumas das secções em estudo, C e Z, para diferentes espessuras de chapa e alturas nominais da secção é apresentada na Figura 1. Na figura 1 é ainda representada a curva de incêndio ISO834. As curvas mostram o aquecimento rápido do aço provocado pela sua baixa capacitância térmica, resultando em valores do tempo de resistência ao fogo muito reduzidos.

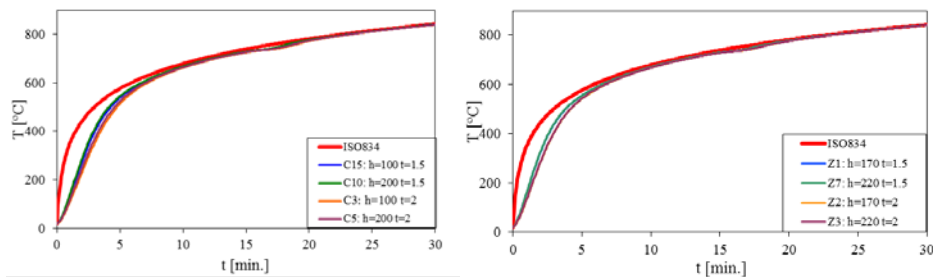


Figura 1 – Variação da temperatura das secções C e Z segundo o método simplificado do EC3 parte 1.2.

3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os perfis de secção C e Z, com as dimensões geométricas apresentadas na Tabela 1, com um metro de comprimento, foram ensaiados à temperatura ambiente e em condições de incêndio num forno de resistência ao fogo. Os perfis são obtidos através de chapa de aço galvanizada de 1.5 e 2 [mm] da classe DX51D +Z (EN10342), com propriedades nominais iguais a: $f_y = 284[MPa]$ e $f_u = 355[MPa]$.

A caracterização da resistência mecânica das chapas de aço foi determinada através da realização de ensaios de tração à temperatura ambiente, resultando num valor médio da tensão de cedência, $f_y = R_{eH}$, de 239.64 [MPa] e de 282,11 [MPa], para as chapas de aço de 2 e 1.5 [mm], respetivamente. Os resultados da tensão ultima, $f_u = R_m$, são de 315.03 [MPa] e de 309.28 [MPa], para as chapas de aço de 2 e 1.5 [mm], respetivamente.

3.1 Ensaio experimentais à temperatura ambiente

Com vista à determinação da capacidade de resistência dos elementos enformados a frio, foi efetuado um conjunto de testes à temperatura ambiente através da aplicação de uma carga de compressão axial continuamente crescente até se atingir o colapso do elemento. Os perfis foram suportados com apoios totalmente biarticulados, com uma placa de topo e de base ligada a um elemento hemisférico, garantindo a aplicação pontual da carga e ao mesmo tempo a rotação livre de ambas as extremidades do perfil, como se verifica na Figura 2. Colocou-se o perfil entre os apoios simples, podendo rodar livremente em torno do seu eixo. A carga, que simula o grau de

Comportamento ao fogo de perfis C e Z enformados a frio

utilização do perfil, é aplicada por um cilindro hidráulico, comandado por uma electroválvula, ver Figura 2.

Tabela 1 - Propriedades geométricas dos perfis C e Z em [mm].

Perfil	Sol. Térmica	h [mm]	b ₁ [mm]	b ₂ [mm]	c ₁ [mm]	c ₂ [mm]	t [mm]
C15	T. Amb.	100,8	50,8	50,7	19,6	19,5	1,5
C14	ISO834	100,7	50,7	50,7	19,6	19,4	1,5
C16	ISO834	101,0	49,8	51,3	19,3	19,7	1,5
C12	T. Amb.	148,8	51,4	51,5	19,9	20,2	1,5
C17	ISO834	151,0	50,9	50,4	19,4	19,6	1,5
C18	ISO834	150,5	50,8	51,1	19,6	20,0	1,5
C10	T. Amb.	197,9	75,9	75,6	21,0	21,0	1,5
C11	ISO834	199,8	75,7	76,0	20,0	20,4	1,5
C13	ISO834	200,6	75,9	75,7	20,3	19,9	1,5
C3	T. Amb.	98,4	48,6	49,2	19,4	19,7	2
C8	ISO834	98,1	49,1	48,5	19,4	19,8	2
C9	ISO834	97,9	48,9	48,3	19,5	19,5	2
C1	T. Amb.	148,3	49,7	49,6	19,8	19,0	2
C2	ISO834	150,0	49,8	49,3	18,3	19,0	2
C4	ISO834	150,0	48,8	49,4	18,1	18,5	2
C5	T. Amb.	199,9	73,7	74,3	18,3	18,6	2
C6	ISO834	198,6	74,7	74,0	18,4	18,6	2
C7	ISO834	199,2	73,7	74,0	18,3	18,5	2
Z1	T. Amb.	173,2	51,8	51,7	23	22,9	1,5
Z4	ISO834	172,7	52	51,6	22,7	22,8	1,5
Z5	ISO834	173,2	51,9	51,7	22,6	22,8	1,5
Z7	T. Amb.	223,7	51,5	51,5	22,8	23,1	1,5
Z8	ISO834	224,5	51,6	51,4	22,7	22,7	1,5
Z9	ISO834	221,8	52,1	52,2	23,2	23,1	1,5
Z10	T. Amb.	201,4	52,0	52,0	23,0	23,2	1,5
Z11	ISO834	201,1	52,0	51,9	23,2	23,3	1,5
Z12	ISO834	200,1	52,2	52,2	23,0	23,4	1,5
Z2	T. Amb.	169,5	49,0	48,7	18,8	19,0	2
Z6	ISO834	166,8	49,4	49,4	19,0	19,0	2
Z18	ISO834	170,0	48,8	48,9	18,8	19,0	2
Z15	T. Amb.	198,8	49,0	48,7	18,8	19,0	2
Z16	ISO834	198,0	49,1	49,0	19,4	19,4	2
Z17	ISO834	199,2	49,0	48,8	18,9	19,0	2
Z3	T. Amb.	218,6	49,1	49,0	19,4	19,4	2
Z13	ISO834	219,3	49,0	49,4	18,7	19,2	2
Z14	ISO834	219,8	49,0	48,8	18,8	19,2	2

Os deslocamentos foram medidos através de quatro LVDTs, posicionados no topo do elemento (LVDT1) e a meio do seu comprimento para medir o deslocamento da alma (LVDT2) e dos banzos, à direita (LVDT3) e à esquerda(LVDT4).

As figuras seguintes apresentam os resultados típicos obtidos em cada um dos testes, apresentando-se como exemplo os resultados do histograma de carga e os deslocamentos medidos pelos LVDTs da secção C1, com uma altura nominal de 150 [mm] e uma espessura de 2 [mm], e da secção Z3 com uma altura nominal de 220 [mm] e uma espessura de 2 [mm].

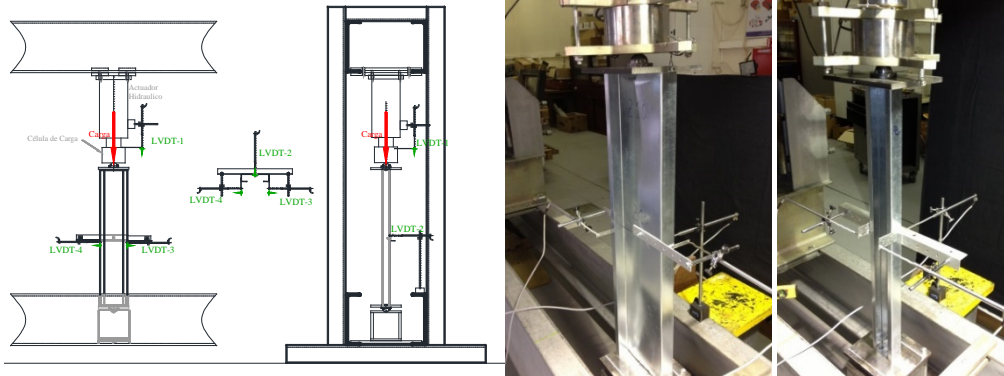


Figura 2 - Setup experimental dos ensaios realizados à temperatura ambiente.

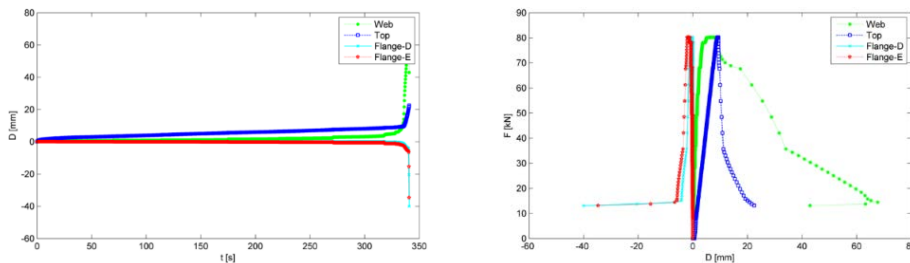


Figura 3 - Variação dos deslocamentos do perfil C1 ($h=150$ [mm] e $t=2$ [mm]) em função da carga aplicada.

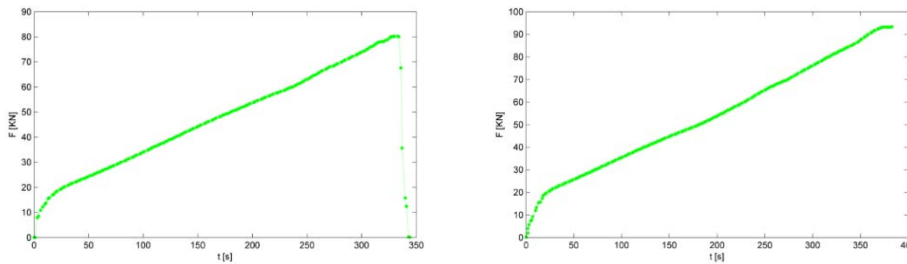


Figura 4 – Histograma da aplicação da carga ao longo do tempo do perfil C1 ($h=150$ [mm] e $t=2$ [mm]), à esquerda e do perfil Z3 ($h=220$ [mm] e $t=2$ [mm]), à direita.

A Tabela 2 apresenta os resultados experimentais da carga de colapso dos perfis ensaiados e os valores das propriedades mecânicas da chapa dos perfis obtidos através de ensaios de tração à temperatura ambiente. Para comparação, é igualmente apresentado o valor da resistência da secção transversal e da resistência à encurvadura, determinados pela formulação do Eurocódigo 3 parte 1.1, considerando os resultados experimentais das propriedades mecânicas. A tabela mostra uma diferença acentuada nos perfis de secção C em comparação com os Z. A diferença dos resultados experimentais em relação aos do EC3 pode ser justificada pela influência de outros modos de instabilidade, para além do modo global de flexão, como o modo distorcional que se apresenta ainda com uma influência preponderante para todas as secções analisadas com um metro de comprimento. Adicionalmente há a considerar a

excentricidade da aplicação da carga e dos apoios, no caso das secções C, cuja linha de ação passa na intersecção do centro da alma com o centro dos banzos e não pelo centro geométrico da secção.

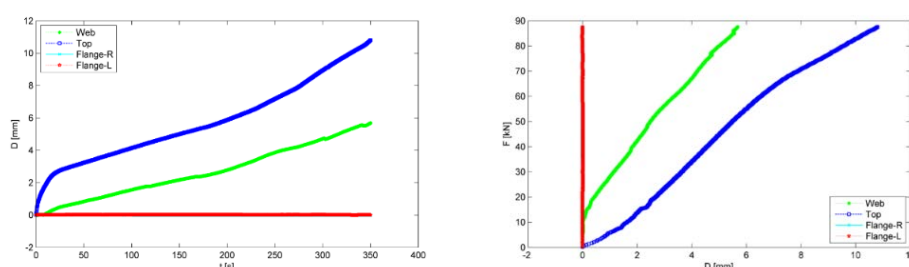


Figura 5 - Variação dos deslocamentos do perfil Z3 ($h=220$ [mm] e $t=2$ [mm]) em função da carga aplicada.

Tabela 2 – Resultados dos testes à temperatura ambiente das secções C e Z.

Perfil	h [mm]	t [mm]	f_y [MPa]	A_{eff} [mm ²]	$N_{c,rd}$ [kN]	$N_{b,rd,z}$ [kN]	Q_{exp} [kN]
C15	100,8	1,5	232,33	296,0	68,78	56,7	63,89
C12	148,8	1,5	232,33	301,5	70,05	59,4	N.A.
C10	197,9	1,5	232,33	319,9	74,32	70,0	73,32
C3	98,4	2	239,64	423,6	101,51	78,9	85,79
C1	148,3	2	239,64	440,2	105,49	84,7	80,24
C5	199,9	2	239,64	489,7	117,35	83,6	94,62
Z1	173,2	1,5	232,33	314	72,95	66,3	76,59
Z7	223,7	1,5	232,33	312,1	72,51	65,8	68,69
Z10	201,4	1,5	232,33	314,3	73,02	66,4	67,39
Z2	169,5	2	239,64	437,5	104,84	104,3	96,55
Z15	198,8	2	239,64	439,4	105,30	91,2	94,15
Z3	218,6	2	239,64	443,3	106,23	92,2	93,33

3.2 Ensaio experimentais em condição de incêndio

O forno de resistência ao fogo utilizado nos ensaios, possui um volume nominal de 1 [m³], tem um revestimento de aço e é isolado com tijolos refratários e outros materiais adequados para altas temperaturas, como fibra cerâmica, ver a Figura 6. 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, e controlada por um controlador PID.

Os perfis são colocados no forno apoiados nos suportes utilizados nos testes à temperatura ambiente, e já descritos na secção anterior. Os deslocamentos dos perfis são medidos através de um LVDT posicionado no topo do elemento para medir a sua expansão e contração e por um

Mesquita, L.; Mendonça, M.; Ramos, R.; Barreira, L., Piloto, P.

transdutor de fio ligado a um cabo de aço que entra no interior do forno e que é fixo ao centro da alma a metade da altura do perfil. Este transdutor mede o deslocamento horizontal dos perfis. A temperatura do aço é medida através de três termopares do tipo K: um soldado à alma da secção média do perfil, outro a um dos banzos a 200 [mm] do topo, e o terceiro no segundo banzo a 200 [mm] da base do perfil.

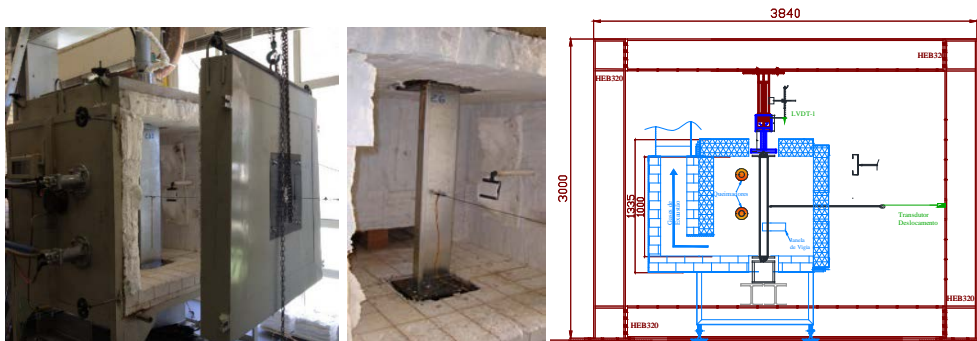


Figura 6 – Forno de resistência ao fogo utilizado nos ensaios e setup experimental dos testes experimentais ao fogo.

O procedimento de ensaio inicia-se com a aplicação da carga mecânica 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, representativo de um grau de utilização, é aplicado de forma incremental até se atingir o valor pretendido e mantido constante durante a ação do fogo. Posteriormente são ligados os queimadores de modo a seguir a curva de incêndio, registrando-se os dados enquanto o perfil possui capacidade de carga suficiente para suportar o carregamento mecânico, terminando com o colapso do elemento.

Os gráficos que se seguem mostram a curva da temperatura ISO834 (TISO), a curva aproximada à temperatura ISO pelo forno (TISO_ap), a curva da temperatura do termopar de placa (T_Furn), as curvas das temperaturas do aço medidas pelos fios termopar no topo, meio e base do perfil (T_T, T_M, T_B), uma curva média destas temperaturas medidas pelos fios termopar (Tmean), e ainda uma curva do deslocamento vertical, medido pelo LVDT colocado no topo do perfil e que mede o deslocamento vertical do cilindro hidráulico (D-Top).

Os gráficos seguintes apresentam ainda a variação do deslocamento vertical, medido pelo LVDT (D-Top) e o horizontal medido pelo transdutor de fio (D-Middle), em função da carga aplicada (Q). As curvas apresentadas mostram que o perfil se mantém estável, com deslocamentos reduzidos, na fase inicial do teste. Com o decorrer do teste e com o aumento da temperatura dos gases de incêndio e da temperatura do aço, a capacidade resistente do perfil diminui até que ocorre o colapso para uma temperatura considerada a temperatura crítica. Este instante é identificado nos gráficos quando a curva do deslocamento vertical possui uma assíntota vertical.

A Tabela 3 apresenta ainda os resultados dos ensaios experimentais ao fogo das secções C e Z e comparação com os resultados do Eurocódigo 3 parte 1.2. O tempo experimental (texp) e a temperatura (Texp) são medidos desde o instante em que forno é ligado até ao momento em que

Comportamento ao fogo de perfis C e Z enformados a frio

ocorre o colapso do perfil. Os resultados mostram que, para o mesmo nível de carga, o tempo de resistência e a temperatura crítica aumentam com a espessura da chapa de aço. O perfil que apresentou um maior tempo de resistência ao fogo foi o perfil C7 com 10 min de exposição ao fogo e uma temperatura máxima de 667 °C, e o perfil Z14 com 9 min de exposição ao fogo e uma temperatura máxima de 654 °C.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios experimentais ao fogo das secções C e Z e comparação com os resultados do Eurocódigo.

Perfil	t	Carga		Resultados Exp.			Resultados do EC3		
		N _{c,rd} [KN]	Q _{nom} [KN]	t [s]	t [min]	T [°C]	t [s]	t [min]	T [°C]
C14	1,5	68,7	35	335	5	502,2	367	6	581,5
C16	1,5	68,7	25	426	7	580	497	8	636,0
C17	1,5	69,2	35	319	5	484	361	6	581,5
C18	1,5	69,6	25	426	7	597,4	493	8	636,0
C11	1,5	73,4	35	363	6	562	380	6	581,5
C13	1,5	73,3	20	512	8	625	646	10	679,7
C8	2	101,7	35	415	6	611	542	9	644,7
C9	2	101,1	25	551	9	625,6	712	11	691,4
C2	2	104,4	35	369	6	465,6	535	8	644,7
C4	2	103,7	25	555	9	626	740	12	697,5
C6	2	117,4	35	466	7	569	598	9	663,8
C7	2	117,4	25	627	10	667	845	14	717,6
Z4	1,5	72,77	35	362	6	550	370	6	591
Z5	1,5	72,72	25	462	7	611	510	8	644
Z8	1,5	72,28	35	251	4	455	367	6	591
Z9	1,5	72,97	25	504	8	633	512	8	644
Z11	1,5	73,14	35	371	6	562	357	5	591
Z12	1,5	73,21	25	453	7	610	511	8	644
Z6	2	105,27	35	474	7	584	535	8	649
Z18	2	104,84	25	595	9	653	729	12	698
Z16	2	105,56	35	474	7	581	535	8	649
Z17	2	105,37	25	597	9	649	729	12	698
Z13	2	105,71	35	469	7	585	535	8	649
Z14	2	105,54	25	596	9	654	727	12	698

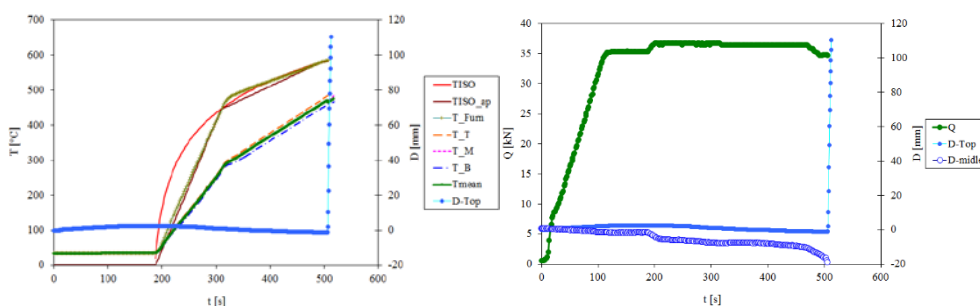


Figura 7 – Resultados da variação da temperatura e deslocamento do ensaio ao fogo do perfil C17.

4. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios à temperatura ambiente mostram que a resistência dos elementos é próxima dos valores determinados pelo método simplificado do Eurocódigo 3 parte 1.1. As diferenças nos resultados podem ser justificadas pelo efeito de imperfeições geométricas, interação entre o modo de instabilidade global e distorcional. Os ensaios de resistência ao fogo demonstram a reduzida resistência ao fogo dos perfis enformados a frio. As secções C em estudo possuem um tempo de resistência ao fogo entre 5 e 10 minutos, e as secções Z entre 4 e 9 minutos.

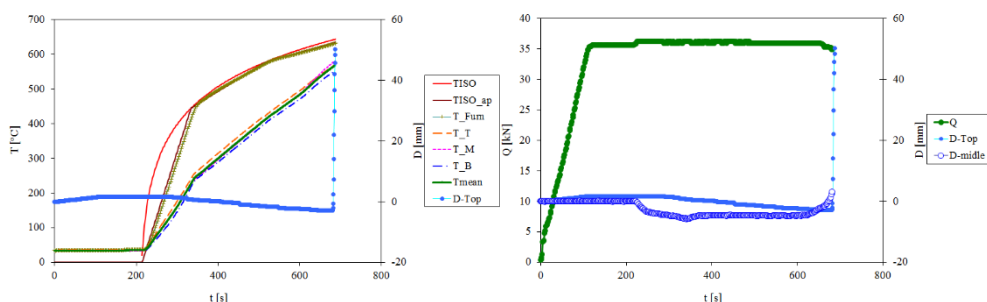


Figura. 8 - Resultados da variação da temperatura e deslocamento do ensaio ao fogo do perfil Z6.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da empresa IRMALEX no fornecimento dos perfis.

REFERÊNCIAS

- [1]. Schafer, B.W. and T. Pekoz, *Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses*. Journal of Constructional Steel Research, 1998. **47**(3): p. 193-210.
- [2]. Moen, C.D., T. Igusa, and B.W. Schafer, *Prediction of residual stresses and strains in cold-formed steel members*. Thin-Walled Structures, 2008. **46**(11): p. 1274-1289.
- [3]. Feng, M., Y.C. Wang, and J.M. Davies, *A numerical imperfection sensitivity study of cold-formed thin-walled tubular steel columns at uniform elevated temperatures*. Thin-Walled Structures, 2004. **42**(4): p. 533-555.
- [4]. CEN, *EN1993-1-3 Eurocode 3 : Design of steel structures, Part 1-3: General rules Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*. 2004, European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.
- [5]. CEN, *EN1993-1-2 Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-2: General rules, Structural fire design*. 2005, European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.
- [6]. Kankanamge, D.N. and M. Mahendran, *Behaviour and design of cold-formed steel beams subject to lateral-torsional buckling*. Thin-Walled Structures, 2012. **51**(0): p. 25-38.
- [7]. CEN, *EN1993-1-5 Eurocode 3 : Design of steel structures, Part 1-5: Plated structural elements*. 2006, European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.
- [8]. Renaud, C. and B. Zhao, *Investigation of simple calculation method in EN 1993-1-2 for buckling of hot rolled class 4 steel members exposed to fire*, in *PROCEEDINGS OF THE FOURTH INTERNATIONAL WORKSHOP STRUCTURES IN FIRE*. 2006: University of Aveiro, Aveiro, Portugal.