

# ANÁLISE TERMOMECÂNICA DE PERFIS ENFORMADOS A FRIO

## THERMOMECHANICAL ANALYSIS OF COLD FORMED STEEL SECTIONS

L. Mesquita<sup>1</sup>, M Mendonça<sup>2</sup>, R. Ramos<sup>2</sup>, Luisa Barreira<sup>3</sup>, Paulo Piloto<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Mecânica Aplicada, Instituto Politécnico de Bragança

<sup>2</sup> Engenharia Mecânica, Instituto Politécnico de Bragança

<sup>3</sup> Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal



### 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 aqueles provenientes dos modelos simplificados do Eurocódigo 3, verificando-se que, tendencialmente, os obtidos pelos modelos simplificados são em geral superiores aos obtidos nos ensaios experimentais.*

### ABSTRACT

*This work presents an experimental study about cold formed steel elements submitted to compression loads. The sections analyzed are C and Z sections made of steel sheet with 1.5 and 2 [mm] thick and three different cross section heights. The compression tests were made at ambient and elevated temperatures. In both cases a pinned support was developed and used. The member resistance at ambient temperature was determined by applying an increasing compression load until the member collapse was achieved. The fire tests were performed in a fire resistance furnace, using the same type of end supports, and a mechanical load given by a specific degree of utilization that is maintained constant during the fire test. These tests allow the determination of the fire resistance time and member critical temperature. The experimental results are compared with the ones obtained with the Eurocode simplified models.*

## 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 padroniza-

das pelos laminados a quente. Como o fabrico é processado à temperatura ambiente, os perfis enformados a frio exibem menores tensões residuais (Moen, C. D. *et al*, 2008; Schafer, B. W. *et al*, 1998).

Young e Rasmussen (Young, Ben *et al*, 1999) apresentaram um estudo experimental do comportamento de elementos enformados a frio em pilares, com secção em C, sujeitas à compressão com as extremidades encastradas ou rotuladas. Foi demonstrado experimentalmente que a mudança da linha de ação do esforço

interno provocada por deformações devido à encurvadura local não produz momentos globais em pilares encastrados como acontece em pilares rotulados nas extremidades. Assim, para pilares simétricos com o mesmo comprimento efetivo, a resistência dos pilares encastrados é maior que a resistência dos pilares rotulados quando a carga última excede a carga do modo local de encurvadura. Para pilares de secção em C, a diferença na resistência é maior para comprimentos pequenos e intermédios onde a resistência é afetada pela encurvadura local.

Prola e Batista et al (Batista, E. *et al*, 1998; Prola, Luís Carlos *et al*, 2002), entre outros tópicos analisaram o comportamento de pilares influenciados por fenómenos de interação entre os modos globais de flexão e modos locais de placa ou distorcionais. Os resultados obtidos mostraram, inequivocamente, que os módulos efetivos constituem uma ferramenta adequada para quantificar a redução de rigidez provocada pelos fenómenos de pós-encurvadura local e a interação MD (Modo Distorcional) – MGF (Modo Global de Flexão) que são significativamente superiores às originadas pela interação MLP (Modo Local Placa) – MGF (Modo Global de Flexão).

O colapso de elementos de aço enformados a frio de paredes finas sujeitas a uma carga última tendo em conta as imperfeições locais e ou globais, para pilares variando a esbelteza e a temperatura do mesmo foi estudado por Fenge et al (Feng, M. *et al*, 2004). 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, obtêm-se valores 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 (CEN, 2004) 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 (CEN, 2010), desenvolvido originalmente para elementos de aço laminados a quente, parece produzir resultados aceitáveis e seguros.

Amaral realizou um estudo numérico cujos resultados permitiram evidenciar um bom comportamento das madres enformadas a frio com secção ómega, sujeitas a cargas descendentes, desde que os painéis de revestimento de cobertura confirmam rigidez transversal que dificulte a ocorrência de encurvadura lateral (Amaral, C., 2008).

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 EC3, no caso dos perfis de aço enformados a frio. Um estudo elaborado por Kankanamge (Kankanamge, D. N. *et al*, 2012) 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 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 baixo tempo de resistência ao fogo.

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. 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 (ISO834, 1999).

## 2. VERIFICAÇÕES DE SEGURANÇA SEGUNDO OS EUROCODIGO

### 2.1 Determinação do valor de cálculo da resistência

A capacidade resistente de uma secção solicitada com esforços axiais ( $N_{c,rd}$ ) é determinada pela equação seguinte, no caso de a área efetiva  $A_{eff}$  for menor do que a área bruta  $A_{br}$ .

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_{yb}}{\gamma_{Mo}} \quad (1)$$

A verificação de segurança de um elemento estrutural solicitado à compressão e sujeito ao estalo limite último por encurvadura deverá ser verificado mediante a seguinte equação:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (2)$$

em que  $N_{b,rd}$  é o valor de resistência à encurvadura de um elemento comprimido, segundo a norma EN 1993-1-1, que se define pela seguinte equação:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{Mo}} \quad (3)$$

Para secções transversais de classe 4 é determinante o cálculo da área efetiva  $A_{eff}$ , que segue um procedimento de cálculo iterativo de acordo com a norma EN 1993-1-3.

O coeficiente de redução ( $\chi$ ) depende essencialmente do coeficiente de encurvadura e do fator de imperfeição. Para os casos em estudo, o valor de fator de imperfeição adotado é de 0.34.

Quando os elementos são sujeitos a temperaturas elevadas, como as provenientes de um incêndio, o cálculo da resistência da secção transversal à compressão é definido pela seguinte equação:

$$N_{fi,c,Rd} = \frac{A_{eff} f_{y,\theta}}{\gamma_{Mo}} \quad (4)$$

Na situação de incêndio, a tensão de cedência ( $f_y$ ) deverá ser considerada igual à tensão limite convencional a 0.2%, designado por  $K_{0.2,f,\theta}$ .

O valor de cálculo da resistência à encurvadura  $N_{b,fi,t,Rd}$ , no instante  $t$  de um elemento comprimido com uma secção transversal da Classe 4, deverá ser determinado a partir da equação seguinte.

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} A_{eff} K_{0.2,f,\theta} f_y}{\gamma_{Mfi}} \quad (5)$$

O coeficiente de redução em situação de incêndio é agora determinado com um fator de imperfeição obtido pela expressão:  $\alpha = 0.65 \sqrt{235/f_y}$ .

### 2.2 Determinação da temperatura do aço em situação de incêndio

Para uma distribuição uniforme da temperatura na secção transversal, o aumento de temperatura  $\Delta\theta_{a,t}$ , num elemento de aço não protegido durante um intervalo de tempo,  $\Delta t$ , deverá ser determinado a partir de:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} h_{net,d} \cdot \Delta t \quad (6)$$

Nas superfícies expostas ao fogo, o fluxo de calor efetivo ( $h_{net}$ ) deverá ser determinado através da contribuição da transferência de calor por convecção e por radiação, proveniente da temperatura dos gases do incêndio. Esta temperatura é determinada pela curva de incêndio padrão ISO834.

No caso de elementos em que o colapso

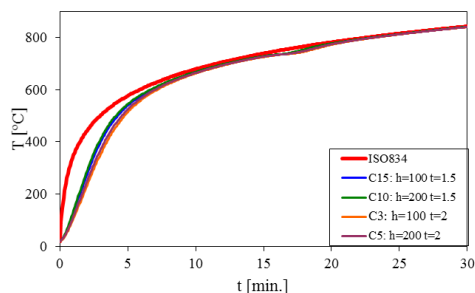
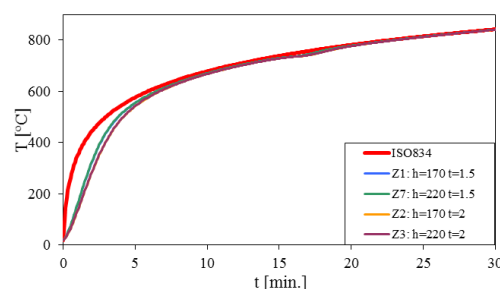
**Tabela 1** - Propriedades geométricas dos perfis C.

Perfil	Sol. Térmica	h	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	t	N <sub>b,Rd,z</sub>	N <sub>c,Rd</sub>
C15	T. Ambiente	100,8	50,8	50,7	19,6	19,5	1,5	66,25	81,11
C14	ISO834	100,7	50,7	50,7	19,6	19,4	1,5	66,15	81,02
C16	ISO834	101	49,8	51,3	19,3	19,7	1,5	66,08	81,01
C12	T. Ambiente	148,8	51,4	51,5	19,9	20,2	1,5	69,2	82,2
C17	ISO834	151	50,9	50,4	19,4	19,6	1,5	67,9	81,1
C18	ISO834	150,5	50,8	51,1	19,6	20	1,5	68,5	81,6
C10	T. Ambiente	197,9	75,9	75,6	21	21	1,5	79,3	84,1
C11	ISO834	199,8	75,7	76	20	20,4	1,5	78,3	83
C13	ISO834	200,6	75,9	75,7	20,3	19,9	1,5	78,1	82,9
C3	T. Ambiente	98,4	48,6	49,2	19,4	19,7	2	91,64	117,7
C8	ISO834	98,1	49,1	48,5	19,4	19,8	2	91,47	117,6
C9	ISO834	97,9	48,9	48,3	19,5	19,5	2	90,96	117,2
C1	T. Ambiente	148,3	49,7	49,6	19,8	19	2	98,4	122
C2	ISO834	150	49,8	49,3	18,3	19	2	96,6	120,1
C4	ISO834	150	48,8	49,4	18,1	18,5	2	95,4	119,2
C5	T. Ambiente	199,9	73,7	74,3	18,3	18,6	2	123,2	133,9
C6	ISO834	198,6	74,7	74	18,4	18,6	2	123,2	134
C7	ISO834	199,2	73,7	74	18,3	18,5	2	123	133,8

seja definido pela resistência da secção transversal, a temperatura crítica,  $\theta_{a,cr}$ , no instante  $t$  poderá ser determinada para qualquer grau de utilização  $\mu_0$ , no instante  $t=0$ , utilizando a seguinte equação.

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[ \frac{1}{0,9674\mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad (7)$$

A evolução da temperatura do aço, de algumas das secções em estudo, C e Z, para diferentes espessuras de chapa e diferentes alturas nominais da secção é apresentada nas figuras 1 e 2.

**Fig. 1** – Variação da temperatura das secções C segundo o método simplificado do eurocódigo.**Fig. 2** - Variação da temperatura das secções Z segundo o método simplificado do eurocódigo.

Nas figuras anteriores é ainda representada a curva de incêndio ISO834. As curvas mostram o aquecimento rápido do aço, devido à baixa capacitância térmica, resultando em valores do tempo de resistência ao fogo muito reduzidos.

### 3. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os perfis de secção C e Z, com as dimensões geométricas apresentadas nas Tabela 1 e 2, e com um metro de comprimento, foram ensaiados à temperatura ambiente e

Tabela 2 - Propriedades geométricas dos perfis Z.

Perfil	Sol. Térmica	h	b <sub>1</sub>	b <sub>2j</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	t	N <sub>b,Rd,z</sub>	N <sub>c,Rd</sub>
Z1	T. Ambiente	173,2	51,8	51,7	23	22,9	1,5	77,4	85,6
Z4	ISO834	172,7	52	51,6	22,7	22,8	1,5	77,2	8,54
Z5	ISO834	173,2	51,9	51,7	22,6	22,8	1,5	77,2	8,53
Z7	T. Ambiente	223,7	51,5	51,5	22,8	23,1	1,5	76,7	84,8
Z8	ISO834	224,5	51,6	51,4	22,7	22,7	1,5	76,5	84,5
Z9	ISO834	221,8	52,1	52,2	23,2	23,1	1,5	77,5	85,4
Z10	T. Ambiente	201,4	52	52	23	23,2	1,5	77,5	85,5
Z11	ISO834	201,1	52	51,9	23,2	23,3	1,5	77,7	85,7
Z12	ISO834	200,1	52,2	52,2	23	23,4	1,5	77,8	85,8
Z2	T. Ambiente	169,5	49	48,7	18,8	19	2	104,5	120,4
Z6	ISO834	166,8	49,4	49,4	19	19	2	105,4	120,9
Z18	ISO834	170	48,8	48,9	18,8	19	2	104,5	120,4
Z15	T. Ambiente	198,8	49	48,7	18,8	19	2	104,8	120,7
Z16	ISO834	198	49,1	49	19,4	19,4	2	105,2	121
Z17	ISO834	199,2	49	48,8	18,9	19	2	104,9	120,8
Z3	T. Ambiente	218,6	49,1	49	19,4	19,4	2	105,9	121,7
Z13	ISO834	219,3	49	49,4	18,7	19,2	2	105,8	121,6
Z14	ISO834	219,8	49	48,8	18,8	19,2	2	105	120,9

em condições de incêndio num forno de resistência ao fogo.

### 3.1 Ensaios 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.

O sistema de aplicação de carga consiste num cilindro hidráulico com uma célula de carga na extremidade, ver Fig. 3, comandado por uma electroválvula.

Os perfis são suportados com apoios totalmente biarticulados, com uma placa de topo e de base ligada a um elemento hemisférico que garante a aplicação pontual da carga e ao mesmo tempo a rotação livre de

ambas as extremidades do perfil, como se verifica na Fig. 4.

Colocou-se o perfil entre os apoios simples, podendo rodar livremente em torno do seu eixo. A carga, que simula o grau de utilização do perfil, é aplicada por um cilindro hidráulico, comandado por uma electroválvula.

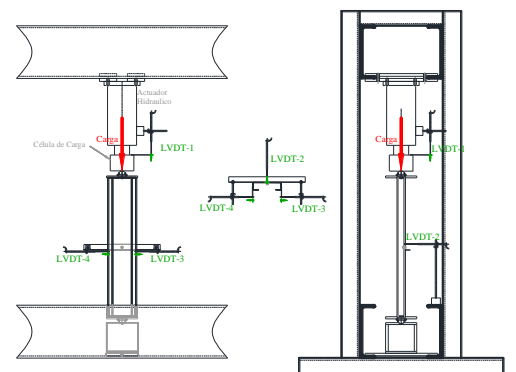


Fig. 3 - Setup experimental dos ensaios realizados à temperatura ambiente.

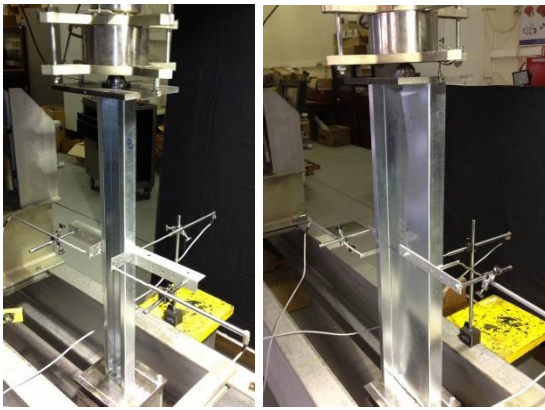


Fig. 4 – Elementos se secção em C e Z no decurso do teste.

Os deslocamentos ao longo da aplicação da carga são medidos através de quatro LVDTs, posicionados no topo do elemento (LVDT1) e a meio do seu comprimento para medir o deslocamento da alma e dos banzos (LVDT2 a 4).

As figuras 5 a 10 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].

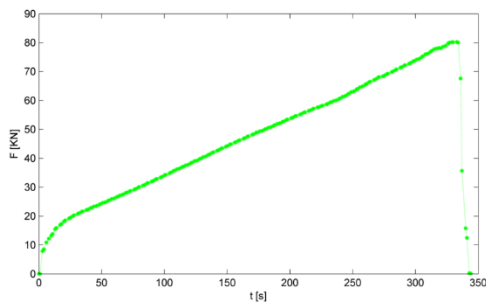


Fig. 5 – Histograma da aplicação da carga ao longo do tempo do perfil C1 (h=150 [mm] e t=2[mm]).

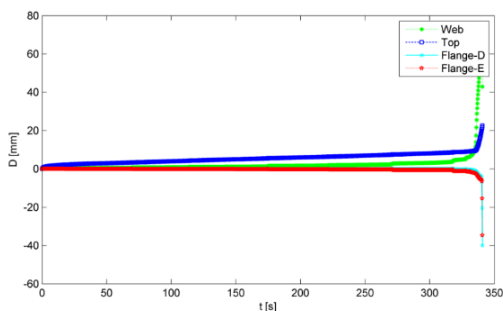


Fig. 6 – Variação dos deslocamentos do perfil C1 (h=150 [mm] e t=2[mm]).

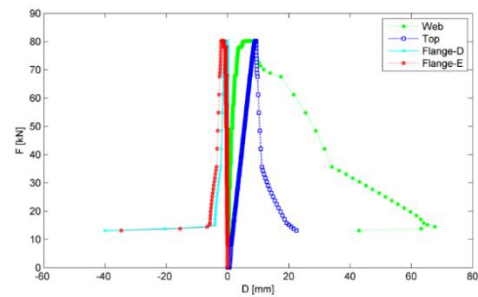


Fig. 7 - Variação dos deslocamentos do perfil C1 (h=150 [mm] e t=2[mm]) em função da carga aplicada.

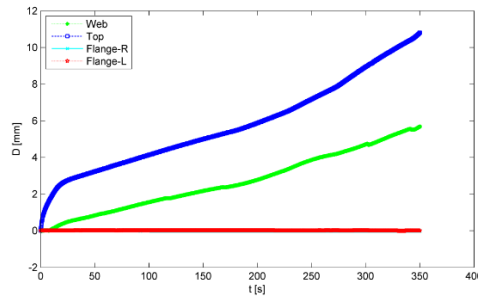


Fig. 8 - Variação dos deslocamentos do perfil Z3 (h=220 [mm] e t=2[mm]).

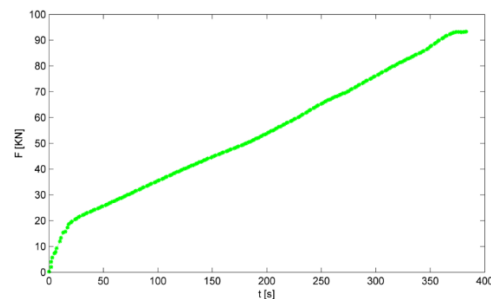


Fig. 9 - Histograma da aplicação da carga ao longo do tempo do perfil Z3 (h=220 [mm] e t=2[mm]).

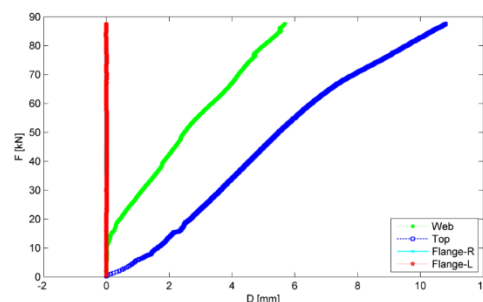


Fig. 10 - Variação dos deslocamentos do perfil Z3 (h=220 [mm] e t=2[mm]) em função da carga aplicada.

A Tabela 3 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 determinada pela formulação do eurocódigo.

**Tabela 3** – Resultados dos testes à temperatura ambiente das secções C e Z.

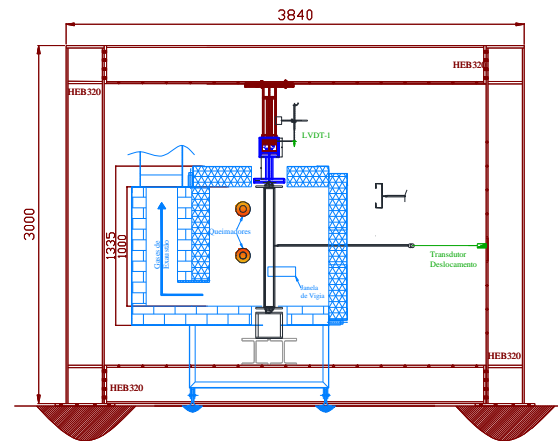
Perfil	h	t	E (GPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	A <sub>eff</sub>	N <sub>c,rd</sub> [KN]	Q <sub>exp</sub> [KN]
C15	100,8	1,5	186,11	232,33	296,0	68,78	63,89
C12	148,8	1,5	186,11	232,33	301,5	70,05	N.A.
C10	197,9	1,5	186,11	232,33	319,9	74,32	73,32
C3	98,4	2	179,94	239,64	423,6	101,51	85,79
C1	148,3	2	179,94	239,64	440,2	105,49	80,24
C5	199,9	2	179,94	239,64	489,7	117,35	94,62
Z1	173,2	1,5	186,11	232,33	314	72,95	76,59
Z7	223,7	1,5	186,11	232,33	312,1	72,51	68,69
Z10	201,4	1,5	186,11	232,33	314,3	73,02	67,39
Z2	169,5	2	179,94	239,64	437,5	104,84	96,55
Z15	198,8	2	179,94	239,64	439,4	105,30	94,15
Z3	218,6	2	179,94	239,64	443,3	106,23	93,33

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 pelos modos de instabilidade da secção transversal (MLP e MD) e também devido á excentricidade da aplicação da carga e dos apoios, cujo eixo passa pelo centro dos banzos da secção C e não pelo centro geométrico da secção.

### 3.2 Ensaios experimentais em condição de incêndio

O forno de resistência ao fogo utilizado nos ensaios, possui um volume nominal de 1 [m<sup>3</sup>], tem um revestimento de aço e é isolado com tijolos refratários e outros materiais adequados para altas temperaturas, como fibra cerâmica, Fig. . Possui quatro queimadores de gás propa-no/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 (CEN, 1999), e controlada por um controlador PID, Fig 12.

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 transdutor de fio ligado a um cabo de aço que

**Fig. 11** – Forno de resistência ao fogo utilizado nos ensaios.**Fig. 11** – Setup experimental dos testes ao fogo.

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.

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 é 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, dando-se o colapso.

Os perfis ensaiados, e apresentados na Tabela 4, são relativos a espessuras de chapa de 1,5 e 2,0 [mm], com três alturas distintas, de 100 150 e 200 [mm] para as secções C e de 170, 200 e 220 [mm] para as secções Z.

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 por um LVDT (D-Top).

Os gráficos das figuras 13 a 16 apresentam ainda a variação do deslocamento vertical, medido pelo LVDT (D-Top) e o horizontal medido pelo transdutor de fio (D-Midle), 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 tem-

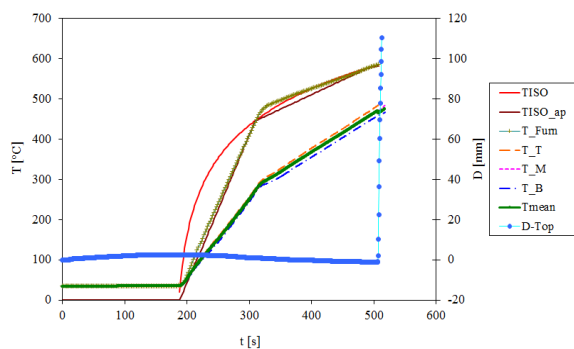


Fig. 12 – Resultados da variação da temperatura e deslocamento do ensaio ao fogo do perfil C17.

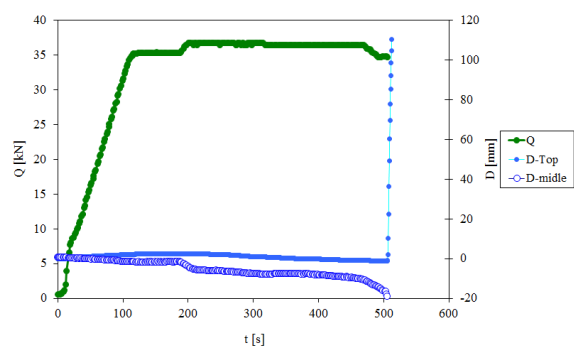


Fig. 13 - Resultados da variação da carga aplicada e dos deslocamentos do ensaio ao fogo do perfil C17

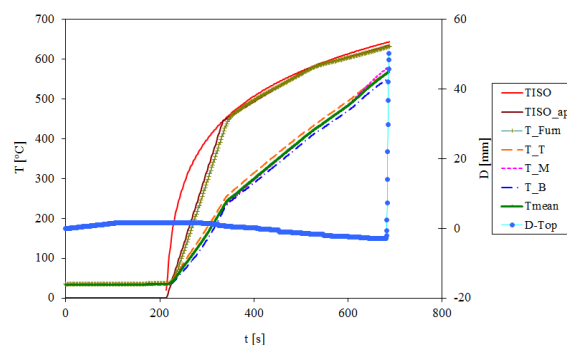


Fig. 15 - Resultados da variação da temperatura e deslocamento do ensaio ao fogo do perfil Z6.

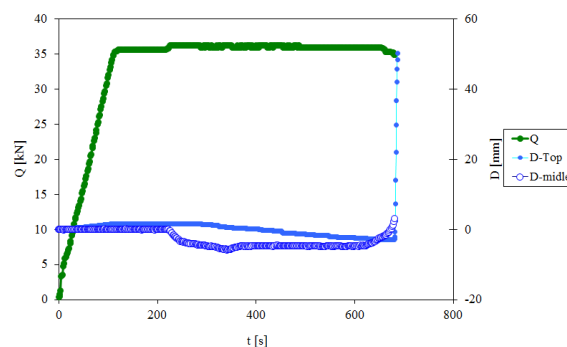


Fig. 16 - Resultados da variação da carga aplicada e dos deslocamentos do ensaio ao fogo do perfil Z6.

peratura 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 visível nos gráficos quando a curva do deslocamento vertical possui uma assíntota vertical.

A Tabela 4 apresenta ainda os resultados dos ensaios experimentais ao fogo das secções C e Z e comparação com os resultados do Eurocódigo. O tempo experimental ( $t_{exp}$ ) e a temperatura ( $T_{exp}$ ) são medidos desde o instante em que forno é ligado até ao momento em que ocorre o colapso do perfil.

Os resultados mostram que para o mesmo nível de carga o tempo de resistência e a temperatura crítica aumenta 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 4** – 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 <sub>c,rd</sub> [KN]	Q <sub>nom</sub> [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

#### 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. As diferenças nos resultados podem ser justificadas pela existência de imperfeições geométricas.

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.

#### AGRADECIMENTOS

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

#### REFERÊNCIAS

Amaral, C. , (2008), *Análise numérica do comportamento de madres enformadas a*

- frio, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- Batista, E.; Camotim, D.; Prola, L. C.; Vazquez, E., (1998), *On the stability and strength of steel columns affected by distortional buckling*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 46, n.º 1–3, p. 129-131.
- CEN, (1999), *EN1363-1: Fire resistance tests. General requirements*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- CEN, (2004), *EN1993-1-3 Eurocode 3 : Design of steel structures, Part 1-3: General rules Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- CEN, (2010), *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-2: General rules, Structural fire design*, Instituto Portugues da Qualidade,
- Feng, M.; Wang, Y. C.; Davies, J. M., (2004), *A numerical imperfection sensitivity study of cold-formed thin-walled tubular steel columns at uniform elevated temperatures*, Thin-Walled Structures, Vol. 42, n.º 4, p. 533-555.
- ISO834, (1999), *Fire-resistance tests - Elements of building construction*, International Organization for Standardization, Geneva.
- Kankanamge, D. N.; Mahendran, M., (2012), *Behaviour and design of cold-formed steel beams subject to lateral-torsional buckling*, Thin-Walled Structures, Vol. 51, n.º 0, p. 25-38.
- Moen, C. D.; Igusa, T.; Schafer, B. W., (2008), *Prediction of residual stresses and strains in cold-formed steel members*, Thin-Walled Structures, Vol. 46, n.º 11, p. 1274-1289.
- Prola, Luís Carlos; Camotim, Dinar, (2002), *On the distortional post-buckling behaviour of cold-formed lipped channel steel beams*. In Eds Chan, S. L., Teng, J. G. & Chung, K. F., *Advances in Steel Structures (ICASS '02)*, Chap. Elsevier, Oxford, 978-0-08-044017-0.
- Schafer, B. W.; Pekoz, T., (1998), *Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses*, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 47, n.º 3, p. 193-210.
- Young, Ben; J.R. Rasmussen, Kim, (1999), *Behaviour of cold-formed singly symmetric columns*, Thin-Walled Structures, Vol. 33, n.º 2, p. 83-102.