



**Universidade de  
Aveiro  
Ano 2012**

Departamento de Engenharia Civil

**Oscar Coelho de  
Almeida**

**Comparação da proteção ao fogo: Perfis de secção  
aberta e fechada**





**Universidade de  
Aveiro  
Ano 2012**

Departamento de Engenharia Civil

**Oscar Coelho de  
Almeida**

**Comparação da proteção ao fogo: Perfis de secção  
aberta e fechada**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação científica do Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.



Dedico este trabalho aos meus pais, irmã e irmão.



## **o júri**

Presidente

Prof<sup>a</sup>. Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes  
Professora auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real  
Professor catedrático da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto  
Professor coordenador do Instituto Politécnico de Bragança

Prof. Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes  
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro





## **Agradecimentos**

Os meus agradecimentos aos Professores Nuno Lopes e Paulo Vila Real, respectivamente meu orientador e co-orientador pelas linhas orientadoras, partilha de conhecimento, críticas para a obtenção dos melhores resultados e pelos contactos fornecidos que permitiram a aquisição do material necessário para a realização desta tese.

Agradeço a “Ferpinta” por ter oferecido os perfis Tubulares.

Agradeço a “Martifer” por ter oferecido os perfis de secção aberta, ter soldado os termopares aos perfis e ainda por os ter pintado com tinta intumescente.

Por fim agradeço aos meus pais por me terem pago as despesas do curso.



**palavras-chave**

Secções tubulares, fogo, intumescente, chs, ensaios

**resumo**

O aço sofre uma perda de capacidade de carga quando sujeito a altas temperaturas, é por isso, importante estudar as características das estruturas metálicas para assim poder saber avaliar a resistência das mesmas, incluindo as estruturas de aço. Pelo facto de os perfis tubulares se encontrarem ainda poucos estudados, são pouco usados como elementos de construção. Com esta tese pretendeu-se incrementar o conhecimento existente sobre as características ao fogo dos perfis tubulares. Nesta tese efetuaram-se ensaios de comparação de resistência ao fogo para perfis curtos de secção aberta e perfis curtos de secção fechada, nomeadamente perfis IPE e CHS, usando como elemento de proteção passiva tinta intumescente. Conclui-se que para uma mesma massividade os perfis IPE usados apresentaram um melhor comportamento ao fogo do que os perfis CHS testados. A tinta intumescente utilizada não ofereceu o nível de proteção esperado, tendo-se verificado um nível de proteção abaixo do desejado.



**keywords**

Hollow sections, fire, intumescente coating, chs, tests

**abstract**

Steel elements have a reduction in their strength when submitted to high temperatures, it is then important to study and been able to categorize metallic constructions characteristics. Hollow sections are not very often used on metallic constructions due to the fact that their characteristics are not very well known yet. The main objective of this thesis was to decrease that lack of knowledge, to do so experiments have been made. Fire resistance comparisons experiments have been made between short CHS sections and short IPE sections with intumescent coating has fire resistant element. For the same section factor used the IPE sections showed a better behavior in the fire resistance tests than the CHS sections. The intumescent coating did not offer the required protection; the level of protection was inferior to the expected.



---

# Índice

Índice de tabelas.....	IV
Índice de figuras.....	V
Nomenclatura .....	IX
Capítulo 1 – Considerações gerais .....	1
1.1 Introdução .....	1
1.2 Objetivo .....	1
1.3 Organização da tese.....	2
Capítulo 2 – Conceitos gerais .....	3
2.1 Massividade .....	3
2.2 Classes de resistência ao fogo .....	3
2.3 Condutividade térmica .....	4
2.4 Calor específico.....	5
2.5 Curvas de incêndio.....	6
2.5.1 Curva standard ISO 834.....	6
2.5.2 Curva para materiais reativos ao fogo.....	6
2.5.3 Curva de incêndio natural.....	7
2.5.4 Gráfico com as diferentes curvas de incêndio .....	7
2.6 Termopares .....	7
2.6.1 Regras a respeitar na utilização de termopares .....	9
2.7 Método existente para determinar a espessura de proteção em perfis de secção fechada .....	9
2.8 Forno de ensaio.....	10
Capítulo 3 - Proteção para estruturas metálicas.....	13
3.1 Considerações gerais .....	13
3.2 Tintas intumescentes.....	13
3.3 Betão.....	15
3.4 Placas de gesso .....	16

3.5 Vermiculite.....	17
3.6 Perlite .....	18
3.7 Fibras minerais .....	18
3.8 Argila expandida.....	19
3.9 Água.....	19
3.10 Madeira .....	19
Capítulo 4 - Secções metálicas.....	21
4.1 Considerações gerais.....	21
4.2 Secções metálicas abertas.....	23
4.3 Secções metálicas fechadas .....	24
Capítulo 5 – Ensaios.....	25
5.1 Considerações gerais.....	25
5.2 Cálculo de massividades .....	25
5.2.1 Cálculo da massividade dos perfis IPE.....	26
5.2.2 Cálculo da massividade dos perfis CHS.....	27
5.3 Escolha dos perfis e material de proteção a serem ensaiados .....	27
5.4 Material disponível.....	28
5.5 Preparação dos perfis para realização dos ensaios.....	29
5.6 Localização dos termopares .....	30
5.6.1 Perfis de secção aberta.....	31
5.6.2 Perfis de secção fechada .....	31
5.7 Localização dos termopares de controlo no forno.....	32
5.8 Ensaio N°1.....	33
5.8.1 Resultados do ensaio N°1 .....	34
5.9 Ensaio N°2.....	36
5.9.1 Resultados do ensaio N°2 .....	37
5.10 Ensaio N°3.....	42
5.10.1 Resultados do ensaio N°3 .....	44



---

5.11 Ensaio N°4.....	48
5.11.1 Resultados do ensaio N°4 .....	49
5.12 Ensaio N°5.....	52
5.12.1 Resultados do ensaio N°5 .....	53
5.13 Ensaio N°6.....	59
5.13.1 Resultados do ensaio N°6 .....	60
5.14 Comparação dos ensaios .....	63
5.14.1 Comparação dos ensaios com a curva ISO 834.....	63
5.14.2 Comparação dos ensaios com a curva de incêndio natural.....	67
5.14.3 Dados retirados do ensaio com a curva de aquecimento lento.....	70
Capítulo 6 – Conclusões .....	75
6.1 Considerações finais .....	75
6.2 Considerações futuras.....	78
Bibliografia .....	81

## Índice de tabelas

Tabela 3.1 - Película seca obtida consoante o método de aplicação (CIN, 2009) .....	14
Tabela 3.2 - Propriedades do betão (Vila Real, 2003).....	15
Tabela 3.3 - Propriedades das placas de gesso (Vila Real, 2003) .....	16
Tabela 3.4 - Propriedades das placas de vermiculite (Vila Real, 2003).....	17
Tabela 3.5 - Propriedades da perlite (Vila Real, 2003).....	18
Tabela 3.6 - Propriedades da fibra mineral (Vila Real, 2003) .....	18
Tabela 5.1 – Tempo de ensaio para 500°C de temperatura, perfil CHS .....	41
Tabela 5.2 – Temperatura média obtida ao fim de 30 minutos de ensaio, perfil CHS .....	41
Tabela 5.3 - Tempo de ensaio para 500°C de temperatura, perfil IPE.....	41
Tabela 5.4 - Temperatura média obtida ao fim de 30 minutos de ensaio, perfil IPE .....	41
Tabela 5.5 - Tempo de ensaio para 500°C de temperatura.....	55
Tabela 5.6 - Temperatura média obtida ao fim de 30 minutos de ensaio .....	55
Tabela 5.7 - Tempo de ensaio para 500°C de temperatura.....	56
Tabela 5.8 - Temperatura média obtida ao fim de 30 minutos de ensaio .....	56
Tabela 5.9 – Resumo dos dados obtidos com a curva ISO 834 .....	64
Tabela 5.10 - Resumo dos dados obtidos com a curva de incêndio natural .....	67
Tabela 5.11 – Avaliação para perfil IPE 220 .....	72
Tabela 5.12 – Avaliação para perfil CHS 139,7x4 .....	74
Tabela 6.1 – Resumo dos dados médios obtidos com a curva ISO 834 .....	75
Tabela 6.2 - Resumo dos dados obtidos com a curva de incêndio natural .....	77

---

## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Resistência, estanquidade e isolamento ao fogo (SERC, 2010) .....	4
Figura 2.2 - Condutividade térmica do aço em função da temperatura .....	5
Figura 2.3 - Calor específico do aço em função da temperatura .....	5
Figura 2.4 - Comparação entre as curvas .....	7
Figura 2.5 - Termopar (G. M. Silva s.d).....	8
Figura 2.6 - Funcionamento do termopar .....	8
Figura 2.7 - Temperatura/Tensão para diferentes tipos de termopares (G. M. Silva s.d).....	8
Figura 3.1 - Expansão ao fogo de tinta intumescente.....	14
Figura 3.2 – Betão leve (Pereira s.d.) .....	15
Figura 3.3 – Representação de um perfil metálico protegido por betão.....	15
Figura 3.4 – Gesso (Pereira s.d.) .....	16
Figura 3.5 – Vermiculite (Pereira s.d.) .....	17
Figura 3.6 – Grãos de argila (Pereira s.d.) .....	19
Figura 4.1 – Alguns perfis siderúrgicos .....	21
Figura 4.2 - Perfis enformados a frio .....	22
Figura 4.3 - Chapas dobradas.....	22
Figura 4.4 - Solda por arco submerso .....	22
Figura 4.5 – Exemplo de um perfil metalúrgico de secção aberta .....	23
Figura 4.6 - Perfis de secção aberta .....	23
Figura 4.7 - Perfis de secção fechada.....	24
Figura 5.1 - Perfis com 4 e 3 faces de exposição, respectivamente .....	25
Figura 5.2 - Legenda do perfil IPE.....	26
Figura 5.3 - Massividade de vários perfis IPE .....	26
Figura 5.4 - Legenda do perfil CHS.....	27
Figura 5.5 - Massividade de alguns perfis CHS.....	27
Figura 5.6 - Perfil descarregado ensaiado verticalmente (EN13381-8, 2010.....	29
Figura 5.7 - Espaçamento entre termopares .....	30

Figura 5.8 - Localização dos termopares nos perfis de secção aberta e fechada respectivamente (EN13381-8, 2010).....	30
Figura 5.9 - Localização longitudinal e em corte dos termopares nos perfis IPE 220 .....	31
Figura 5.10 - Localização longitudinal e em corte dos termopares nos perfis CHS 139,7x4	32
Figura 5.11 - Localização dos termopares de controlo no forno .....	32
Figura 5.12 - Foto do ensaio N°1 com perfil CHS 139,7x4 .....	33
Figura 5.13 - Ensaio 1, localização do perfil no forno e dos respectivos termopares.....	33
Figura 5.14 - Gráfico resultante do ensaio N°1.....	34
Figura 5.15 - Foto com resultado do ensaio 1 .....	35
Figura 5.16 - Ensaio 2, disposição dos perfis no forno .....	36
Figura 5.17 - Ensaio 2, localização dos perfis no forno e respectivos termopares.....	36
Figura 5.18 - Gráfico resultante do ensaio N°2 com perfil CHS 139,7x4 .....	37
Figura 5.19 - Fio termopar saliente .....	38
Figura 5.20 - Reforço de tinta intumescente em zona problemática .....	38
Figura 5.21 - Gráfico resultante do ensaio N°2 com perfil IPE 220.....	39
Figura 5.22 - Foto com resultado do ensaio 2 .....	40
Figura 5.23 - Visualização focada dos perfis do ensaio 2.....	40
Figura 5.24 - Comparação entre os dois termopares com temperaturas mais baixas, ensaio 2 .....	42
Figura 5.25 - Ensaio 3, disposição dos perfis no forno .....	43
Figura 5.26 - Ensaio 3, localização dos perfis no forno e respectivos termopares.....	43
Figura 5.27 - Gráfico resultante do ensaio N°3 com perfil CHS 139,7x4 .....	45
Figura 5.28 - Gráfico resultante do ensaio N°3 com perfil IPE 220.....	46
Figura 5.29 - Foto com resultado do ensaio 3 .....	46
Figura 5.30 - Comparação entre os perfis ensaiados.....	46
Figura 5.31 - Comparação entre os dois termopares com temperaturas mais baixas, ensaio 3 .....	47
Figura 5.32 - Disposição dos perfis no forno, ensaio 4.....	48
Figura 5.33 - Ensaio 4, localização dos perfis no forno e respectivos termopares.....	48

---

Figura 5.34 - Gráfico resultante do ensaio N <sup>o</sup> 4 com perfil CHS 139,7x4 .....	49
Figura 5.35 - Gráfico resultante do ensaio N <sup>o</sup> 4 com perfil IPE 220.....	50
Figura 5.36 - Foto com resultado do ensaio 4 .....	51
Figura 5.37 – Visualização focada dos perfis do ensaio 4.....	51
Figura 5.38 - Comparação entre os dois termopares com temperaturas mais baixas, ensaio 4 .....	52
Figura 5.39 - Ensaio 5, disposição dos perfis no forno.....	52
Figura 5.40 - Ensaio 5, localização dos perfis no forno e respectivos termopares.....	53
Figura 5.41 - Gráfico resultante do ensaio N <sup>o</sup> 5 com perfil CHS 139,7x4 .....	53
Figura 5.42 - Gráfico resultante do ensaio N <sup>o</sup> 5 com perfil IPE 220.....	56
Figura 5.43 - Foto com resultado do ensaio 5 .....	57
Figura 5.44 – Visualização focada dos perfis do ensaio 5.....	57
Figura 5.45 - Comparação entre os dois termopares com temperaturas mais baixas, ensaio 5 .....	58
Figura 5.46 - Colocação dos perfis no forno, ensaio 6 .....	59
Figura 5.47 - Ensaio 6, localização dos perfis no forno e respectivos termopares.....	59
Figura 5.48 - Disposição inicial e final dos termopares no ensaio 6 .....	60
Figura 5.49 - Gráfico resultante do ensaio N <sup>o</sup> 6 com ambos os perfis .....	61
Figura 5.50 - Gráfico resultante do ensaio N <sup>o</sup> 6 sem os termopares de controlo .....	62
Figura 5.51 - Foto com resultado do ensaio 6 .....	62
Figura 5.52 – Visualização focada dos perfis do ensaio 6.....	62
Figura 5.53 – Temperatura nos perfis sem proteção, ELEFIR-EN .....	63
Figura 5.54 - Comparação entre os termopares de temperaturas mais baixas .....	65
Figura 5.55 - Comparação entre dados práticos e analíticos .....	66
Figura 5.56 - Gráfico obtido com o programa ELEFIR-EN para a curva de incêndio natural .....	67
Figura 5.57 - Comparação entre os termopares de temperaturas mais baixas .....	68
Figura 5.58 - Comparação entre dados práticos e analíticos .....	69
Figura 5.59 – Método de avaliação da validade dos ensaios (EN13381-8) .....	70

Figura 5.60 – Avaliação da validade dos termopares T24-Ensaio2 e T26 para perfil IPE ...	71
Figura 5.61 – Avaliação da validade dos termopares T21-Ensaio5 e T26 para perfil IPE ...	71
Figura 5.62 - Avaliação da validade dos termopares T23-Ensaio1 e T30 para perfil CHS ..	72
Figura 5.63 - Avaliação da validade dos termopares T22-Ensaio2 e T30 para perfil CHS ..	73
Figura 5.64 - Avaliação da validade dos termopares T22-Ensaio5 e T30 para perfil CHS ..	73
Figura 6.1 - Comparação entre os termopares de temperaturas mais baixas e programa ELEFIR-EN para a curva ISO 834 .....	76
Figura 6.2 - Comparação entre os termopares de temperaturas mais baixas e programa ELEFIR-EN para a curva de aquecimento lento .....	77

---

## Nomenclatura

A – área

$A_m$  – área da superfície de um elemento diretamente aquecido pelo fogo por unidade de comprimento

b – largura da secção transversal

c – raio

$c_p$  – calor específico

d – altura ou diâmetro externo

$d_p$  – espessura de material de proteção

$\Delta T$  – intervalo de tempo

$\rho_p$  – massa volúmica

$\rho\%$  - teor de água

H – comprimento do perfil

h – altura da secção transversal

L – comprimento

$\lambda_p$  – condutividade térmica

m – massa

P – perímetro da secção

r - raio

t – tempo ou espessura

$t_f$  – espessura do banzo

$t_w$  – espessura da alma

V – volume





# Capítulo 1 - Considerações gerais

## 1.1 Introdução

Como é do conhecimento geral o aço sofre uma redução de desempenho quando sujeito a altas temperaturas. Por um lado a sua elevada condutividade térmica faz com que a temperatura se propague rapidamente e por outro as propriedades mecânicas degradam-se drasticamente com o aumento da temperatura. Assim, qualquer que seja o sistema estrutural adotado para uma edificação, ele terá inevitavelmente perda de resistência mecânica quando sujeito a altas temperaturas, como as que ocorrem em situação de incêndio. É pois fundamental saber avaliar a resistência das estruturas metálicas em situação de incêndio, de modo a evitar um possível colapso da estrutura e garantir a segurança dos ocupantes, além de minimizar perdas económicas (Vila Real, 2003). Hoje em dia a maior parte das construções metálicas são realizadas usando secções abertas, pois a utilização generalizada dos perfis de secção fechada, tendencialmente mais leves do que os perfis de secção aberta e de melhor resistência a efeitos combinados de flexão torção, está condicionada pelo facto das características desses se encontrarem ainda pouco estudadas, nomeadamente o seu comportamento ao fogo, daí o surgimento deste tema para elaboração de uma tese. (Jimmy Haedir, 2012)

## 1.2 Objetivo

O objetivo desta dissertação consiste na realização de um estudo comparativo, da proteção passiva ao fogo necessária em elementos estruturais com diferentes secções. Pretende-se efetuar comparações de soluções necessárias para secções abertas e para secções tubulares, em aço. Este estudo teve uma componente experimental onde foi realizada a caracterização do comportamento térmico ao fogo de um dos diversos materiais usuais na proteção de estruturas metálicas (placas de gesso, tintas intumescentes, etc.), recorrendo a ensaios experimentais no forno do LERF – Laboratório de Estruturas e Resistência ao Fogo da Universidade de Aveiro. Pretendeu-se conhecer

o efeito, quer das máximas temperaturas atingidas em incêndios quer da forma secção transversal nos perfis, para o material de proteção escolhido.

### **1.3 Organização da tese**

Esta tese está organizada em seis capítulos. Uma introdução teórica bem como o objetivo desta tese estão presentes no Capítulo 1.

No capítulo 2 estão presentes descrições gerais de conceitos utilizados na realização desta tese.

No capítulo 3 descreve-se de forma sucinta as características de vários elementos de proteção passiva ao fogo usados para proteger estruturas metálicas.

O capítulo 4 apresenta os vários tipos de elementos metálicos existentes, bem como o seu processo de fabrico, apresenta ainda diferentes tipos de secções metálicas.

No Capítulo 5 está explicito quais os perfis e elementos de proteção seleccionados para a realização desta tese, descrição de como os ensaios foram realizados, bem como comentários e comparações dos mesmos.

No capítulo 6 estão presentes as conclusões finais e os desenvolvimentos futuros.

## Capítulo 2 – Conceitos gerais

### 2.1 Massividade

Define-se massividade ou fator de forma como a razão entre a área a descoberto do perfil e o volume total do mesmo.

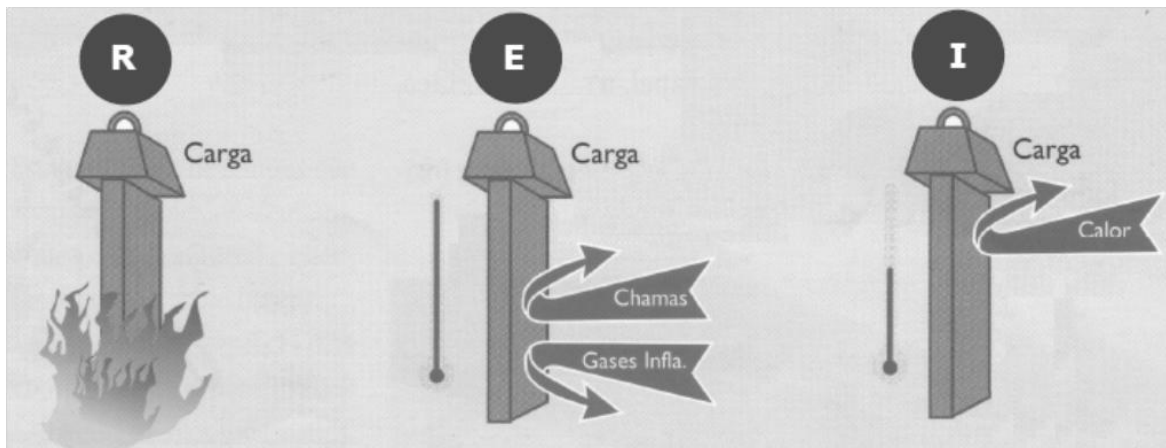
$$\text{massividade} = \frac{Am}{V} \quad (2.1)$$

Quanto maior for a massividade de um perfil, maior será a velocidade a que aumenta a temperatura do mesmo, ou seja, perfis com massividades baixas têm melhor comportamento em situação de incêndio (Vila Real, 2003).

Da geometria dos perfis utilizados em estruturas metálicas (com secções abertas e secções tubulares) obtém-se que os perfis tubulares possuem fatores de forma inferiores aos dos perfis abertos (por exemplo: I e H), para uma mesma massa, esperando-se assim que apresentem um melhor comportamento em situação de incêndio. Os perfis I e H sem proteção alcançam quanto muito um índice de proteção de R15, enquanto que os perfis tubulares sem proteção poderão alcançar facilmente esse índice podendo chegar inclusive ao índice R30 (ICT, 2010).

### 2.2 Classes de resistência ao fogo

O comportamento dos elementos de construção são expressos através de quatro critérios principais de classificação, três dos quais R (Capacidade de suporte de carga), E (Estanquidade a chamas e gases inflamáveis) e I (Isolamento térmico), são aplicáveis à maioria dos elementos de construção que devem satisfazer a uma exigência de resistência ao fogo, o quarto W (radiação) requerido em certos Estados-Membros. Podem ser completados por critérios adicionais M (resistência aos impactos), C (Fecho automático) e S (Passagem de fumo) e sufixos que trazem precisões relativas à configuração de exposição ao fogo e o domínio de aplicação dos resultados de ensaios. As definições anteriores obrigam a explicar com detalhe o programa térmico a que deve ser submetido o elemento construtivo para determinar a sua resistência (SERC, 2010).



**Figura 2.1 - Resistência, estanquidade e isolamento ao fogo (SERC, 2010)**

A classificação ao fogo é realizada em minutos e apresentada usando a/as letra/s correspondente/s a sua classe de comportamento, seguida de um dos seguintes tempos que corresponde ao menor valor obtido em cada escalão (R,E e I)(figura 2.1), 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 240, 360 (EN13501-2, 2004).

Por exemplo, um elemento com resistência mecânica de 155 minutos, estanquidade 80 minutos e isolamento térmico de 42 minutos poderá apresentar uma das seguintes classes de resistencia, R120, RE60 ou REI30 (EN13501-2, 2004).

### **2.3 Condutividade térmica**

A condutividade térmica (figura 2.2) corresponde a quantidade de calor que, na unidade de tempo, é transmitida por condução entre duas superfícies de área unitária distantes entre si de uma unidade de comprimento e cujas temperaturas diferem de um grau. A condutividade térmica é expressa nas unidades W/(mK) (Vila Real, 2003).

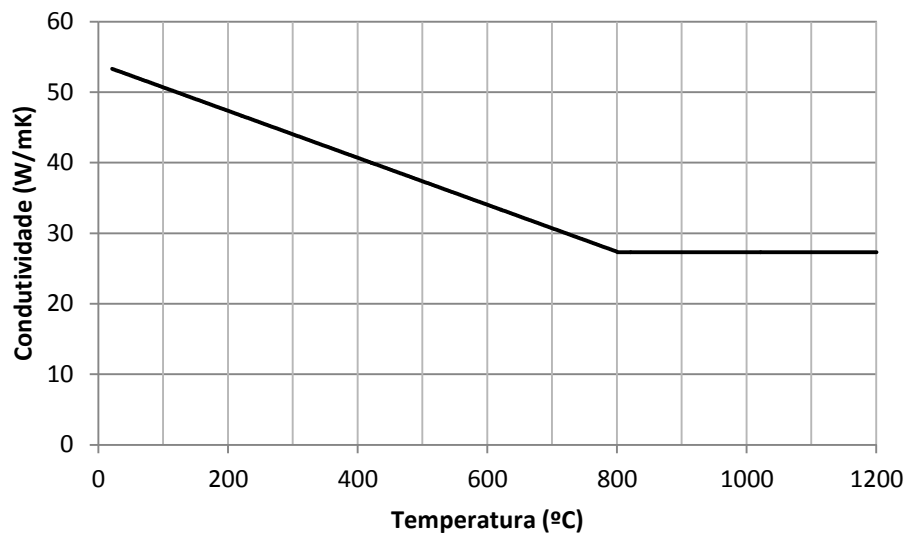


Figura 2.2 – Condutividade térmica do aço em função da temperatura

## 2.4 Calor específico

O calor específico (figura 2.3) corresponde a quantidade de calor que, é necessário fornecer à unidade de massa de um material para que a sua temperatura aumente de uma unidade. O calor específico é expresso nas unidades J/(kgK) (Vila Real, 2003).

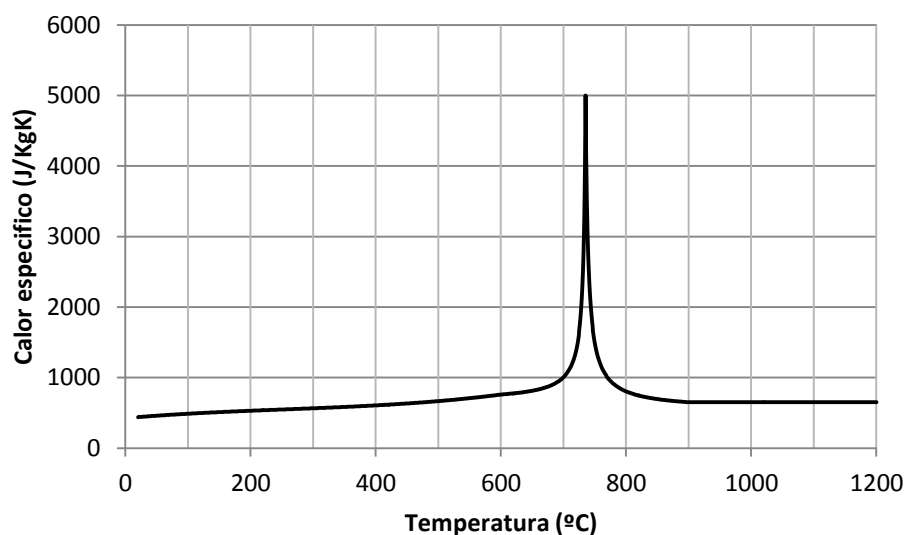


Figura 2.3 – Calor específico do aço em função da temperatura

## 2.5 Curvas de incêndio

Encontram-se a seguir definidas os três tipos de curvas de incêndio que foram utilizados na realização desta tese.

### 2.5.1 Curva standard ISO 834

O Comité Europeu de Normalização (CEN), elaborou uma norma europeia harmonizada e traduzida como Norma EN1363-1/2/3, para estabelecer os métodos de ensaio que permitem determinar a resistência ao fogo dos elementos da construção, no âmbito da União Europeia, para assim eliminar as barreiras que existem no espaço do mercado único. (SERC, 2010)

Com base nessa norma foi criada a curva standard ISO-834 (2.2), por forma a existir termo de comparação entre os varios ensaios realizados em diferentes países.

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (} t \text{ em minutos)} \quad (2.2)$$

A curva ISO 834 faz parte das chamadas curvas nominais, são curvas de incêndio que não dependem da dimensão ou do tipo de edificado.

### 2.5.2 Curva para materiais reativos ao fogo

Outra curva de incêndio existente é a curva descrita na EN13381-8 (curva de aquecimento lento), equações (2.3) e (2.4), cuja fórmula se encontra a seguir. Esta seria a curva a utilizar na realização dos ensaios de comparação dos perfis tubulares com os de secção aberta, segundo essa mesma norma.

$$T = 154 \times \sqrt[4]{t} + 20 \quad 0 \leq t \leq 20 \quad (2.3)$$

$$T = 345 \log_{10}[8(t - 20) + 1] + 21 \quad 20 < t \leq 40 \quad (2.4)$$

Com “t” em minutos.

### 2.5.3 Curva de incêndio natural

Através do programa OZONE, efetuou-se uma modelação numérica para assim obter uma aproximação a uma curva de incêndio natural, sendo que, devido à diversidade de situações de incêndio possíveis, a definição de uma curva adequada para o caso pretendido é bastante difícil.

A representação gráfica da curva escolhida pode ver-se de seguida.

### 2.5.4 Gráfico com as diferentes curvas de incêndio

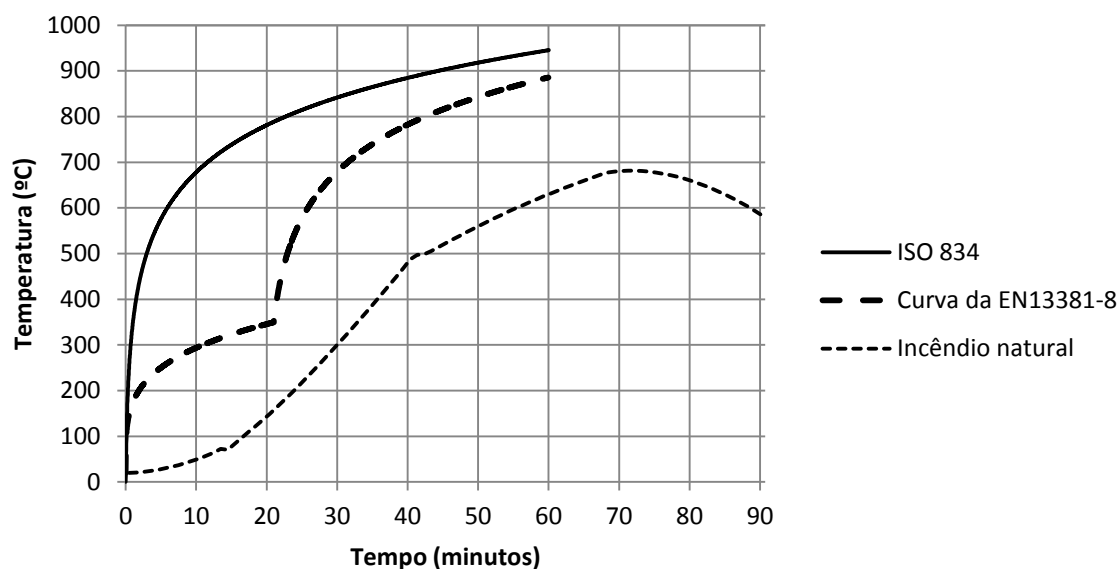


Figura 2.4 - Comparação entre as curvas

## 2.6 Termopares

Um termopar (figura 2.5) é um elemento primário de medida de temperatura constituído por dois fios de metais diferentes ligados um ao outro numa extremidade, o seu princípio de funcionamento baseia-se no princípio de Seebeck (Williams, 1988).

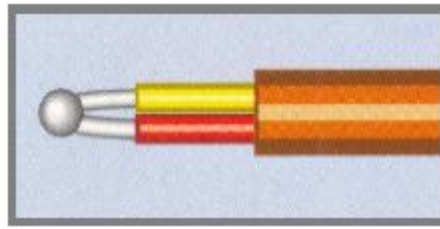


Figura 2.5 - Termopar (G. M. Silva s.d.)

Thomas Seebeck descobriu em 1822, que a união de dois metais diferentes sob acção de temperatura variavel gera tensão eléctrica variável que pode ser medida num voltímetro, preparado para o efeito, por forma a que a sua resistência interna não interfira com os dados obtidos (Williams, 1988) (figura 2.6).

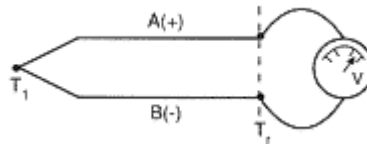


Figura 2.6 - Funcionamento do termopar

Existem diversos tipos de termopares: tipo “T”, tipo “K”, tipo “N” e tipo “J” descritos na norma UNE20679-1.

A relação temperatura/tensão medida através de termopares é de proporcionalidade linear (figura 2.7) permitindo obter medições de temperaturas com apenas  $\pm 1^\circ\text{C}$  de erro.

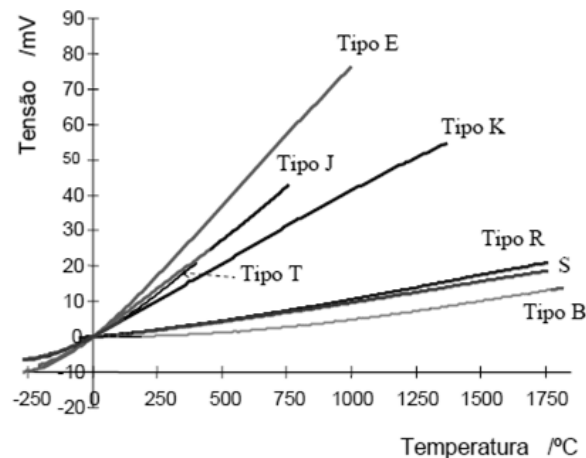


Figura 2.7 - Temperatura/Tensão para diferentes tipos de termopares (G. M. Silva s.d.)



Para a realização dos ensaios descritos nesta tese, foram usados termopares tipo “K”, sendo esses constituídos por um fio de Cromel e outro fio de Alumel.

### **2.6.1 Regras a respeitar na utilização de termopares**

O diâmetro do fio do termopar deve ser superior a 0,5 mm para prevenir problemas mecânicos que provoquem a rotura do termopar durante o ensaio. Para termopares revestidos interiormente com material mineral, o diâmetro mínimo exterior deverá ser de 1,5 mm. Os termopares deverão estar providos de um adequado isolamento por forma a que não se deteriore sob ação de temperaturas inferiores a 1200°C.

A zona quente do termopar deverá estar solidamente unida ao aço da amostra a medir, mediante soldadura ou outros métodos que não afetem a exatidão e velocidade de resposta do termopar. A fixação mecânica não é permitida.

A norma (EN23820, 1997) indica que os termopares devem ser considerados como estando em mau estado caso se verifique alguma das condições a seguir anunciadas:

- Um rápido decréscimo da temperatura existente anteriormente, com a consequente indicação de “zero” como valor da temperatura ou temperatura ambiente.
- Um rápido incremento da temperatura indicada, com valor superior a aquele que o sistema conseguiria medir.
- Uma temperatura de aspeto “flutuante e sinuoso” com valores diferentes dos previstos (EN23820, 1997).

## **2.7 Método existente para determinar a espessura de proteção em perfis de secção fechada**

Para o caso de perfis diferentes de “I” ou “H”, como é o caso dos perfis tubulares, a norma EN23820 indica que o procedimento para calcular a espessura do material de proteção deve seguir a seguinte metodologia:

- Determinar a massividade do perfil

-Determinar a espessura de material de proteção correspondente a esse valor de massividade como se o perfil analisado fosse “I” ou “H”. Essa espessura deverá ser determinada em mm e a essa espessura será atribuída a designação  $d_p$ .

-Incrementar a espessura da seguinte forma:

a) Para valores até  $250 \text{ m}^{-1}$

$$\text{Espessura modificada} = d_p \times \left( 1 + \frac{\frac{A_p}{V}}{1000} \right) \quad (2.5)$$

b) Para valores superiores a  $250 \text{ m}^{-1}$

$$\text{Espessura modificada} = 1,25 \times d_p \quad (2.6)$$

Com esta tese pretende-se comparar o estipulado acima com os valores obtidos através de ensaios diretos.

Segundo a norma (EN23820, 1997), a espessura máxima de proteção aplicada aos perfis tubulares não deve ser superior ao estabelecido como máximo para perfis do tipo “H” ou “I”. Os parâmetros estabelecidos nesta norma devem ser utilizados tendo em conta que a aplicação dessas espessuras nos perfis tubulares não deve ser usada com novas técnicas de fixação e que estes tipos de perfis não devem afetar o comportamento do sistema de proteção ensaiado (EN23820, 1997).

## 2.8 Forno de ensaio

Relativamente ao forno de ensaios, este foi projetado para a utilização de combustíveis líquidos ou gasosos, é ainda apropriado ao aquecimento de elementos de compartimentação verticais ou horizontais numa das suas faces, pilares em todas as suas faces, paredes em mais do que uma face e até mesmo vigas em três ou quatro lados, conforme seja necessário. Por vezes, certos elementos específicos requerem fornos com características especiais.

O forno desempenha as condições normalizadas para a exposição ao fogo. O seu revestimento interior foi realizado com materiais cuja densidade é inferior a  $1000 \text{ kg/m}^3$ ,

com uma espessura mínima de 50mm e constitui menos de 70% da superfície interna exposta ao fogo.

Segundo a EN1363-1 estas são as características fundamentais para um forno de laboratório de ensaios de resistência ao fogo, características essas cumpridas pelo LERF. O forno foi construído de acordo com as especificações acima requeridas, respeitando também as recomendações da EGOLF (European Group of Organizations for Fire Testing, Inspection and Certification) (Silva, 2008).



## Capítulo 3 – Proteção para estruturas metálicas

### 3.1 Considerações gerais

Visto que em estruturas metálicas a resistência diminui com o aumento da temperatura isso constitui um problema para esse tipo de construção. É portanto necessário aplicar elementos que protejam a estrutura de forma a melhorar essa redução de desempenho em situação de incêndio.

Para tal são utilizados, para proteger as estruturas metálicas, materiais com elevado calor específico e materiais com pequena condutividade térmica.

Os materiais utilizados nessas proteções não podem originar produtos voláteis inflamáveis, não podem ser combustíveis e não pode ocorrer libertação de gases tóxicos aquando do contacto com o fogo (ICT, 2010).

Os sistemas de proteção das estruturas metálicas poderão ser de envolvimento total, parcial ou enchimento, proteção no contorno, proteção em caixão, proteção com mantas, proteção por resguardos ou ecrãs, ou ainda através de irrigação da estrutura. (Pereira s.d.)

### 3.2 Tintas intumescentes

As tintas intumescentes são materiais reativos formulados com uma série de componentes ativos que sob a ação de um incêndio reagem quimicamente entre si formando uma espuma carbonosa, originando um aumento de volume tipicamente entre 40 a 50 vezes.

Os componentes ativos formadores da intumescência são o catalisador ou agente desidratante ácido, geralmente polifosfato de amónio, o agente carbonífero, como o pentaeritritol e o agente expensor, constituído por compostos nitrogenados como a melamina. De entre as reações químicas que ocorrem durante o processo da intumescência, destaca-se a decomposição do catalisador aproximadamente aos 150 °C. A uma temperatura superior, o ácido formado vai reagir com o agente carbonífero e a

uma temperatura entre os 200 e os 300 °C, dependendo do agente expansor, dá-se a decomposição deste formando-se gases que vão expandir o resíduo carbonoso gerando uma espuma de cor preta. Por volta dos 700°C a camada superficial transforma-se numa camada cerâmica porosa de cor branca e de baixa condutividade térmica. (Mesquita, 2009).



**Figura 3.1 - Expansão ao fogo de tinta intumescente**

As vantagens do uso de tinta intumescente são, melhor aspecto visual do que os outros tipos de protecção, menor peso introduzido na estrutura em comparação com outras medidas de protecção, possibilidade de aplicação em estaleiro, suporta intemperismos e permite ainda aos arquitectos expor os perfis metálicos pelo seu bom acabamento superficial.

As desvantagens são, custo mais elevado do que qualquer outro tipo de protecção, maior tempo de aplicação pois são necessárias varias camadas de tinta, sendo necessário esperar que a camada anterior seque para se aplicar a seguinte e também o facto de que em áreas externas o acabamento requer manutenção periodica (Mesquita, 2009).

A espessura a aplicar em obra depende da massividade do perfil a proteger, da temperatura máxima a que deve resistir a protecção e das características especificas da tinta de cada fabricante, pois as características das tintas variam de fabricante para fabricante. A espessura de película seca máxima (tabela 3.1) por demão depende do método de aplicação, do tipo de tinta e da marca do fabricante.

**Tabela 3.1 – Película seca obtida consoante o método de aplicação (CIN, 2009)**

Espessura	( $\mu\text{m}$ )
Airless	800
Trincha	400
Rolo	250

### 3.3 Betão

Quer o betão normal quer o betão leve (figura 3.2) são utilizados como material de proteção térmica.

O betão normal é um material pesado, com uma grande capacidade térmica, absorvendo portanto grande quantidade de calor. Por outro lado o betão leve é um material com baixa condutividade térmica. Em qualquer caso são ambos materiais com reduzida difusividade térmica, retardando assim o aquecimento dos elementos protegidos.



Figura 3.2 – Betão leve (Pereira s.d.)

Uma das vantagens da utilização do betão envolvendo os elementos de aço (figura 3.3), é a sua excelente durabilidade em ambientes agressivos.

Embora bom isolante térmico o betão não tem tido uma utilização mais generalizada em virtude dos elevados custos da sua aplicação, existindo no mercado processos alternativos de proteção térmica mais económicos (Vila Real, 2003).



Figura 3.3 – Representação de um perfil metálico protegido por betão

Tabela 3.2 - Propriedades do betão (Vila Real, 2003)

	Massa volúmica ( $\rho_p$ ) kg/m <sup>3</sup>	Teor de água ( $\rho\%$ )	Condutividade térmica ( $\lambda_p$ ) W/(mK)	Calor específico ( $c_p$ ) J/(kgK)
Betão	2300	4	1,6	1000
Betão leve	1600	5	0,8	840

### 3.4 Placas de gesso

O sulfato de cálcio desidratado, vulgarmente designado por Gesso (figura 3.4), é usado por forma a proteger elementos metálicos do fogo, pois no seu estado seco contém cerca de 20% de água na sua constituição (tabela 3.3) que quando submetido a altas temperaturas se liberta, absorvendo calor.



Figura 3.4 – Gesso (Pereira s.d.)

Outro facto de absorção térmica é o facto de no processo de aquecimento o gesso se transformar em sulfato de cálcio anidro, reação essa que absorve grande quantidades de energia térmica.

Na colocação das proteções de gesso deve ter-se o cuidado de colocar uma rede de fibra de vidro entre o perfil a proteger e o gesso pois esse degrada-se com facilidade com o aumento da temperatura, necessitando portanto de um suporte adequado.

No caso de serem usadas placas de gesso, não será necessário usar suportes (Pereira s.d.).

Tabela 3.3 - Propriedades das placas de gesso (Vila Real, 2003)

	Massa volúmica ( $\rho$ ) kg/m <sup>3</sup>	Teor de água ( $\rho$ %)	Condutividade térmica ( $\lambda$ ) W/(mK)	Calor específico ( $c_p$ ) J/(kgK)
Placas de gesso	800	20	0,2	1700



### 3.5 Vermiculite

A Vermiculite (figura 3.5) é uma rocha mineral que contém partículas de água presas entre as suas lamelas.



Figura 3.5 – Vermiculite (Pereira s.d.)

Quando submetida a elevadas temperaturas (700 a 1000°C), as partículas de água transformam-se em vapor de água, afastando as lamelas entre si, o que provoca um aumento de volume da rocha, esse fenómeno cria um efeito tampão dificultando a transmissão de calor ao perfil a proteger. Quando esse fenómeno ocorre, a rocha obtida denomina-se por vermiculite expandida.

É de notar que não existe libertação de gases tóxicos aquando da transformação em vermiculite expandida, apenas se liberta vapor de água, o que torna a vermiculite uma alternativa saudável.

A vermiculite é aplicada sob a forma de painéis.

Como forma de proteção contra o fogo também se pode usar a vermiculite expandida na composição de um betão que será usado para proteger o perfil em causa, esse betão especial desempenhará melhores funções de proteção contra o fogo do que o betão simples (Pereira s.d.). Um dos inconvenientes do uso da vermiculite é o seu elevado custo. Pode ver-se na tabela 3.4 algumas propriedades da vermiculite.

Tabela 3.4 - Propriedades das placas de vermiculite (Vila Real, 2003)

	Massa volúmica $\rho_p$ kg/m <sup>3</sup>	Teor de água $\rho\%$	Condutividade térmica $\lambda_p$ W/(mK)	Calor específico $c_p$ J/(kgK)
Vermiculite (projeção)	550	15	0,12	1100
Placas de vermiculite	800	15	0,2	1200

### 3.6 Perlite

A Perlite é um agregado mineral que sobre ação da temperatura expande, obtendo-se um comportamento e uma proteção semelhante a vermiculite (Pereira s.d.).

Pode ver-se algumas propriedades da perlite na tabela 3.5.

**Tabela 3.5 - Propriedades da perlite (Vila Real, 2003)**

	Massa volúmica $\rho_p$ kg/m <sup>3</sup>	Teor de água $\rho\%$	Condutividade térmica $\lambda_p$ W/(mK)	Calor específico $c_p$ J/(kgK)
Perlite (projeção)	550	15	0,12	1100
Placas de Perlite	800	15	0,2	1200

### 3.7 Fibras minerais

As fibras minerais são materiais obtidos artificialmente fazendo passar uma corrente de vapor através de um líquido constituído por rochas ou escórias vulcânicas fundidas, dependendo a natureza das fibras da composição das rochas utilizadas no seu fabrico. Entre as várias fibras minerais podemos considerar:

- A fibra ou lã de vidro, obtida a partir da fusão de uma composição de vidro particular
- A fibra ou lã de rocha, fabricada normalmente a partir das escórias de alto forno

Estes materiais aplicam-se geralmente por projecção pneumática mas também existem em placas rígidas ou semi-rígidas (Vila Real, 2003). Pode ver-se na tabela 3.6 algumas propriedades da fibra mineral.

**Tabela 3.6 - Propriedades da fibra mineral (Vila Real, 2003)**

	Massa volúmica $\rho_p$ kg/m <sup>3</sup>	Teor de água $\rho\%$	Condutividade térmica $\lambda_p$ W/(mK)	Calor específico $c_p$ J/(kgK)
Fibra mineral	300	1	0,12	1200

### 3.8 Argila expandida

A argila expandida (figura 3.6) por resistir a elevadas temperaturas (1100 – 1200 °C) pode ser usada como elemento de proteção ao fogo de perfis metálicos.



Figura 3.6 – Grãos de argila (Pereira s.d.)

A aplicação de argila expandida pode ser realizada de várias formas. Despejada à granel entre a cofragem e o elemento à proteger, usada como agregado de betão leve que depois é aplicado sobre o elemento ou ainda em blocos pré-fabricados de betão leve (Pereira s.d.)

### 3.9 Água

A água pode ser usada em perfis de secção fechada fazendo a água circular no seu interior, oferecendo uma proteção elevadíssima se existir uma boa circulação e um bom sistema de arrefecimento dessa mesma água. Esse processo é no entanto muito caro, não sendo portanto usualmente aplicado (Vila Real, 2003).

### 3.10 Madeira

Apesar de combustível, pode usar-se a madeira para proteger as estruturas metálicas de fogos e incêndios. O comportamento ao fogo das madeiras varia de espécie para espécie, verificando-se que a taxa de combustão varia inversamente com a massa volúmica e que a dificuldade de ignição é proporcional à sua massa volúmica. Assim, as madeiras duras são interessantes de utilizar para garantir uma determinada resistência ao fogo ou para fazer camadas de proteção. Quando a superfície exposta de madeira arde, origina-se rapidamente uma cama de carvão isolante, que protege a madeira central não ardida e o respetivo perfil metálico da ação do fogo. Como a madeira tem

baixa condutividade térmica, existe apenas uma reduzida transmissão de calor para o perfil metálico (Cachim s.d.).

## Capítulo 4 – Secções metálicas

### 4.1 Considerações gerais

O aço tem vindo a ser usado cada vez mais na construção devido as suas características de alta resistência mecânica, ductilidade, durabilidade, alta resistência a corrosão, facilidade de aplicação em obra, fácil manutenção e boa estética (Ellobody, 2006).

Os perfis metálicos podem ser obtidos por um processo siderúrgico ou ainda por um processo metalúrgico.

Produtos siderúrgicos são chapas barras e perfis laminados a quente (Zattoni, 2008).



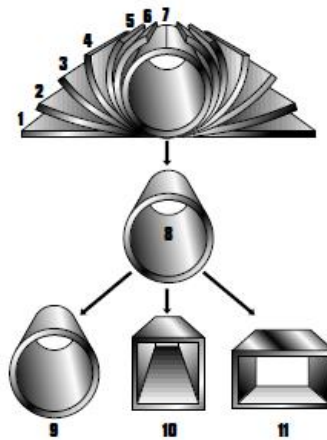
Figura 4.1 – Alguns perfis siderúrgicos

Produtos metalúrgicos são perfis obtidos pela dobra de tiras de aço (perfis enformados a frio) (Zattoni, 2008).

O termo “enformados a frio” costuma ser empregue para descrever as peças metálicas que adquiriram a sua forma final após passarem por um processo de moldagem mecânica à temperatura ambiente, contrastando assim com os perfis laminados a quente. Para que se possa moldar ou dobrar sem aquecer a chapa, esta terá de possuir baixa espessura, usualmente entre os 0,3 mm e os 6 mm. As peças são produzidas a partir de chapa de aço galvanizado, por aplicar forças elevadas ao invés de calor, podendo ser usados diversos processos tais como a prensagem, quinagem ou perfilagem (Silvestre, 2009).

A dobra do perfil é realizada fazendo a chapa metálica passar por um conjunto de rolos que provocam nela dobras cada vez mais acentuadas (Figura 4.2 pontos 2-6). A extremidade (Figura 4.2 ponto 7) é soldada por um processo eléctrico ou por solda normal. Depois de homogeneizar a zona soldada, o perfil circular obtido pode ser

remodelado na secção final pretendida (circular, quadrada ou rectangular). (STIONA, 2010).



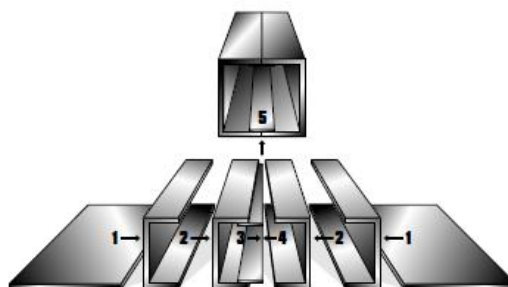
**Figura 4.2 - Perfis enformados a frio**

Outro processo de fabricação consiste na dobra progressiva da chapa de forma a obter, desde logo, a secção pretendida, sendo a extremidade soldada no final e o perfil arrefecido de seguida (STIONA, 2010).



**Figura 4.3 - Chapas dobradas**

É ainda usado outro processo de fabricação, que consiste em justapor duas placas idênticas que são depois soldadas por um processo denominado de Solda por arco submerso, obtendo-se assim o perfil final pretendido.



**Figura 4.4 - Solda por arco submerso**

## 4.2 Secções metálicas abertas

Existem no mercado vários perfis laminados com secções em I, em H ou em U. Os Perfis IPE e INP são perfis com secção em I. O perfil IPE é o tipo de secção em I que oferece uma melhor relação entre a resistência a flexão e o peso próprio. Em geral, os perfis INP resistem a cargas um pouco maiores do que os IPE com a mesma altura, mas com um peso de aço maior. Os Perfis HEB, HEA e HEM são perfis H. A maior largura dos banzos permite-lhes resistir a flexões maiores do que os IPE e INP com a mesma altura, mas empregando muito mais material para resistência igual, pelo que só se empregam em vigas quando existam limitações estritas de espaço disponível para a viga. Os HEB caracterizam-se por um perfil com a alma mais espessa do que os HEA, o que lhes confere uma maior resistência com a mesma altura, embora a custa de uma quantidade maior de material. Existe também o perfil HEM, que tem espessuras ainda maiores do que os HEB e que não se empregam em vigas. Os perfis H têm a vantagem sobre os I de resistirem melhor as flexões por terem os banzos mais largos (Silvestre, 2009).

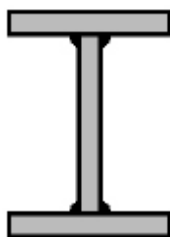


Figura 4.5 – Exemplo de um perfil metalúrgico de secção aberta

As secções abertas são as secções mais comuns e mais usadas na construção, existindo no mercado vários tipos dessas secções, nomeadamente em I, L, H, U, T e outras.

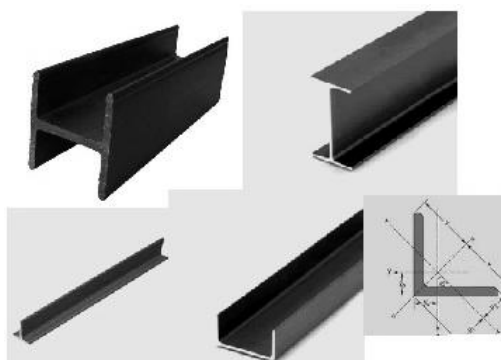


Figura 4.6 - Perfis de secção aberta

Nesta tese foram usados perfis laminados a quente, nomeadamente perfis IPE. Os perfis IPE devem seguir o estipulado pela norma EN-36526:1994 relativamente as suas dimensões e devem obedecer as tolerâncias de dimensões e forma estipuladas pela norma EN-10034:1994.

### 4.3 Secções metálicas fechadas

As secções metálicas fechadas são aquelas que apresentam uma secção em corte oca, sem qualquer tipo de corte longitudinal.

As secções metálicas fechadas mais comuns são as secções rectangulares (RHS), circulares (CHS) e quadrangulares (SHS). Pela sua geometria são as mais indicadas para resistir de forma económica a altas solicitações de cargas axiais, torção e efeitos combinados.



Figura 4.7 - Perfis de secção fechada

Dos perfis enformados a frio, foram escolhidos os perfis CHS como representantes dos perfis de secção fechada para a realização dos ensaios desta tese.



## Capítulo 5 - Ensaio

### 5.1 Considerações gerais

A realização dos ensaios de resistência ao fogo basearam-se no estipulado na norma EN13381-8, não tendo sido no entanto seguida à risca.

Não existe um único critério de avaliação que possa ser aplicado a todos os elementos de proteção. Para cada ensaio deve usar-se o método mais apropriado em função dos critérios de aceitação necessários, para esse método de análise (EN13381-8, 2010).

As temperaturas obtidas nestes ensaios de perfis curtos foram usadas para relacionar o tempo que cada amostra demorou a atingir a temperatura de 500°C, e que temperatura se observou ao fim 30 minutos do início de ensaio. Comparou-se também as temperaturas verificadas nos termopares que registaram as temperaturas mais baixas.

Nesta dissertação foram ensaiados perfis com 4 faces de exposição.

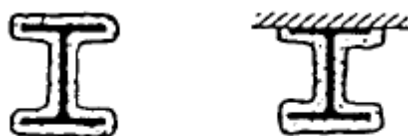


Figura 5.1 - Perfis com 4 e 3 faces de exposição, respectivamente

### 5.2 Cálculo de massividades

Começou-se por calcular a massividade (5.1) de vários perfis para assim escolher dois deles, um CHS e um IPE, com massividades semelhantes por forma a poder compará-los experimentalmente ao fogo.

$$massividade = \frac{Am}{V} \quad (5.1)$$

Como a fórmula da área vem:

$$A = P \times L \quad (5.2)$$

E a fórmula do volume vem:

$$V = A \times L \quad (5.3)$$

Para um L igual apenas se precisa de determinar a área e o perímetro de cada perfil e assim calcular as massividades com base na equação (5.4).

$$massividade = \frac{P}{A} \quad (5.4)$$

### 5.2.1 Cálculo da massividade dos perfis IPE

Determinou-se o perímetro e a área dos perfis IPE segundo as equações (5.5) e (5.6) respetivamente.

$$P(m) = \frac{4tf + 2b + 2 \times (b - tw - 2r) + 2\pi \times r + 2d}{1 \times 10^3} \quad (5.5)$$

$$A(m^2) = \frac{2tf \times b + tw \times (h - 2tf) + \left[ (2r)^2 - \frac{2\pi \times r^2}{4} \right]}{1 \times 10^6} \quad (5.6)$$

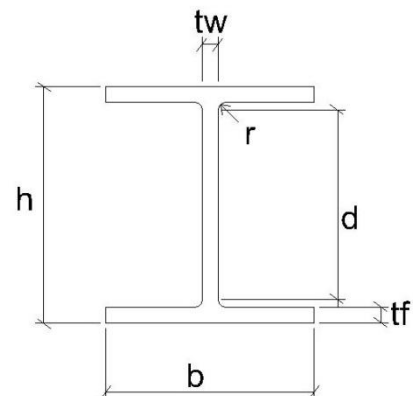


Figura 5.2 - Legenda do perfil IPE

Depois aplicou-se a equação (5.4) aos vários perfis e assim se obteve as massividades ( $m^{-1}$ ) dos mesmos, as quais podem ser observadas na figura 5.3.

IPE120	359,7	IPE180	291,45	IPE240	235,68	IPE330	200,3
IPE140	335,19	IPE200	269,69	IPE270	226,58	IPE360	186,04
IPE160	309,86	IPE220	253,99	IPE300	215,57		

Figura 5.3 - Massividade de vários perfis IPE

### 5.2.2 Cálculo da massividade dos perfis CHS

Calculou-se o perímetro e a área de vários perfis CHS segundo as equações (5.7) e (5.8) respetivamente.

$$P(m) = \frac{\pi \times d}{1 \times 10^3} \quad (5.7)$$

$$A(m^2) = \frac{\pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 - \pi \times \left[\frac{(d-2t)}{2}\right]^2}{1 \times 10^6} \quad (5.8)$$

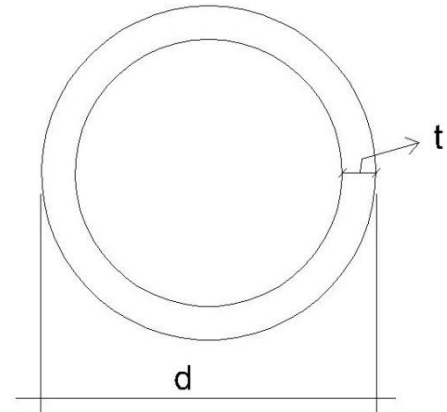


Figura 5.4 - Legenda do perfil CHS

Em seguida, aplicou-se a equação (5.4) usada anteriormente para cada um desses perfis, resultando daí as massividades ( $m^{-1}$ ) listadas na figura 5.5.

114,3x4	259,07	139,7x3	340,65	139,7x5	207,42	168,3x5	206,12
114,3x6	175,9	139,7x4	257,4	139,7x6	174,15		

Figura 5.5 - Massividade de alguns perfis CHS

### 5.3 Escolha dos perfis e material de proteção a serem ensaiados

Depois de analisadas as massividades dos vários perfis, observou-se que as massividades do perfil IPE 220 ( $254 m^{-1}$ ) e do perfil CHS 139,7x4 ( $257,4 m^{-1}$ ) eram semelhantes e sendo também eles de dimensões razoáveis, optou-se pela escolha dos mesmos para a realização dos ensaios desta tese.

O material de proteção escolhido foi a tinta intumescente pela sua fácil aplicação em perfis tubulares.

A título de comparação decidiu-se calcular o peso de cada perfil, tendo-se obtido para o perfil IPE 220 um peso de 26,2 kg (A. Correia dos Reis, 2006), e para o perfil CHS 139,7x4 um peso de 13,13 Kg, segundo a equação 5.9.

$$m(KN) = \frac{\pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 - \pi \times \left[\frac{(d-2t)}{2}\right]^2}{1 \times 10^6} \times 77 = 0,1313 \Leftrightarrow m(Kg) = 0,1313 * 100 \quad (5.9)$$
$$\Leftrightarrow m(Kg) = 13,13$$

Verifica-se portanto que o perfil IPE 220, tem cerca do dobro da massa do perfil CHS 139,7x4.

Segundo a norma EN13381-8 deveriam ter sido testados pelo menos 19 perfis, isto é, 13 perfis IPE220 (254 m<sup>-1</sup>) com 1 metro de comprimento, representando os perfis de secção aberta mais 6 perfis CHS 139,7x4 (257,4 m<sup>-1</sup>) também com 1 metro de comprimento representando os perfis de secção fechada. Devido à falta de material disponível optou-se por reduzir o número total de ensaios, o que invalida o uso dos métodos de avaliação descritos na norma EN13381-8.

#### **5.4 Material disponível**

Foram oferecidos pela “Ferpinta” 6 perfis CHS 139,7x4, com as respectivas chapas de aço soldadas nas extremidades e com os dois parafusos soldados a cada uma dessas chapas.

A “Martifer” ofereceu 6 perfis IPE 220, com as chapas de aço soldadas nas extremidades e com as respectivas aberturas para por aí passarem os parafusos, como se tinha indicado.

A “Martifer” teve ainda a amabilidade de soldar os termopares necessários nos 12 perfis e de pintar com tinta intumescente esses mesmos 12 perfis. Para uma temperatura crítica de 500°C e uma resistência R30, obtiveram espessuras de tinta seca de 465µm para os perfis IPE 220 e espessuras de tinta seca de 580µm para os perfis CHS 139,7x4, que é o volume de tinta necessária, segundo as tabelas dos próprios, para proteger os perfis. A marca da tinta intumescente usada não nos foi comunicada.

Segundo a EN23820, para massividades superiores a 250 m<sup>-1</sup> deve usar-se como espessura de tinta intumescente para perfis tubulares, o valor de tinta para perfis de secção aberta multiplicando esse valor pelo fator 1,25. Apesar de não se ter tido acesso

as tabelas usadas pela “Martifer” facilmente se verifica pela equação (5.10) que as suas tabelas são baseadas nesse princípio.

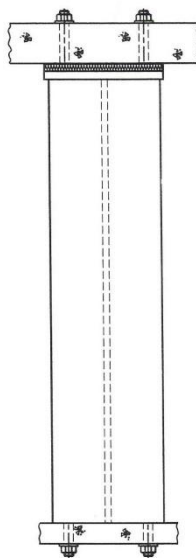
$$1,25 \times 465 = 581,25 \quad (5.10)$$

Os termopares foram soldados aos perfis de aço através de um maçarico, e usando prata como elemento fundente.

Os perfis foram depois pintados, pelos funcionários da “Martifer” com as espessuras de tinta acima referidas, 465µm para os perfis IPE 220 e 580µm para os perfis CHS 139,7x4.

## 5.5 Preparação dos perfis para realização dos ensaios

Segundo a norma os perfis deveriam estar acomodados da seguinte forma. Nas extremidades dos perfis deveriam estar soldadas chapas de aço de 6 mm de espessura e dimensões de comprimento e largura iguais aos da secção do perfil em causa.



**Figura 5.6 - Perfil descarregado ensaiado verticalmente (EN13381-8, 2010)**

Por cima dessas chapas de aço deveria ter sido colocada uma placa de gesso de igual dimensão em termos de largura e comprimento, mas com espessura igual a 35mm, placa essa que seria aparafusada a chapa de aço como se vê na figura 5.6.

Devido a falta de material disponível e as características do forno não serem compatíveis com a fixação vertical dos perfis, os ensaios não foram realizados seguindo a norma à

letra. Pode ver-se de seguida a forma como, a norma prévia a realização dos ensaios e a forma como efetivamente eles foram efetuados.

## 5.6 Localização dos termopares

Segundo a norma EN13381-8 os termopares deveriam ter sido colocados, para ambos os perfis, nas posições 1 e 2, como se vê na figura 5.7.

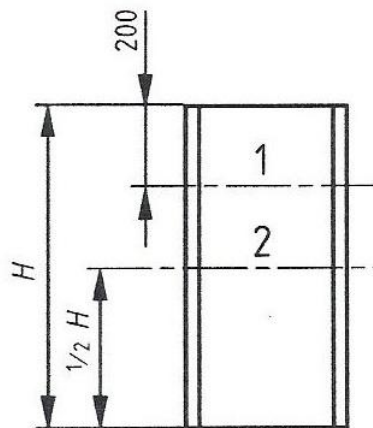


Figura 5.7 - Espaçamento entre termopares

Relativamente a localização em corte, os termopares deveriam ter sido colocados como se vê na figura 5.8.

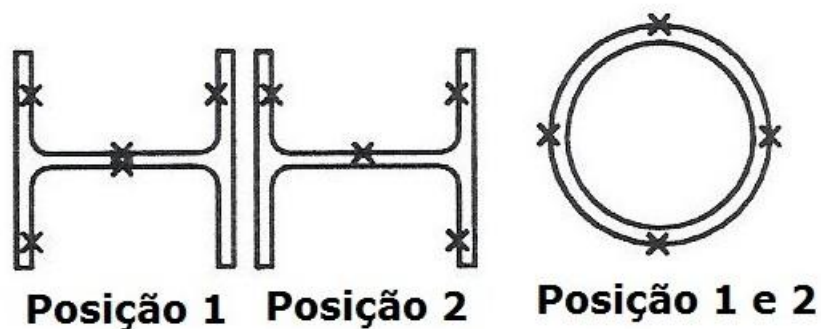


Figura 5.8 - Localização dos termopares nos perfis de secção aberta e fechada respectivamente (EN13381-8, 2010)

No caso dos perfis de secção aberta teriam sido usados 9 termopares por cada perfil desse tipo a ser ensaiado. Já no caso dos perfis de secção fechada teriam sido usados 8 termopares por cada perfil.

Por se achar não ser necessário a utilização de tantos termopares, a localização dos mesmos foi alterada para o esquema que se pode ver de seguida.

### 5.6.1 Perfis de secção aberta

Os termopares foram soldados a distâncias de 0,5m e de 0,25m de uma mesma extremidade, em corte longitudinal. Foram soldados 2 termopares por cada corte transversal, compreendendo um termopar a meia distância na alma e outro a meia distância no interior do banzo, e sendo a alma e o banzo de lados opostos. Teve-se ainda o cuidado de verificar que a sua posição ficasse semelhante ao que se vê na figura 5.9.

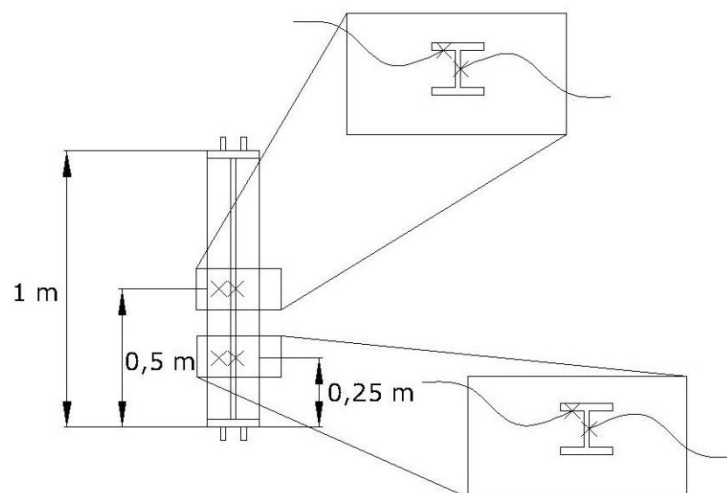


Figura 5.9 - Localização longitudinal e em corte dos termopares nos perfis IPE 220

### 5.6.2 Perfis de secção fechada

Os termopares foram soldados a distâncias de 0,5m e de 0,25m de uma mesma extremidade, em corte longitudinal. Foram soldados 2 termopares nas extremidades dos tubos, em corte transversal, por forma a ficarem equidistantes da circunferência do tubo, para cada uma das distâncias iniciais estipuladas. Teve-se ainda o cuidado de verificar o

alinhamento desses, por forma à que a sua localização ficasse semelhante ao que se vê na figura 5.10.

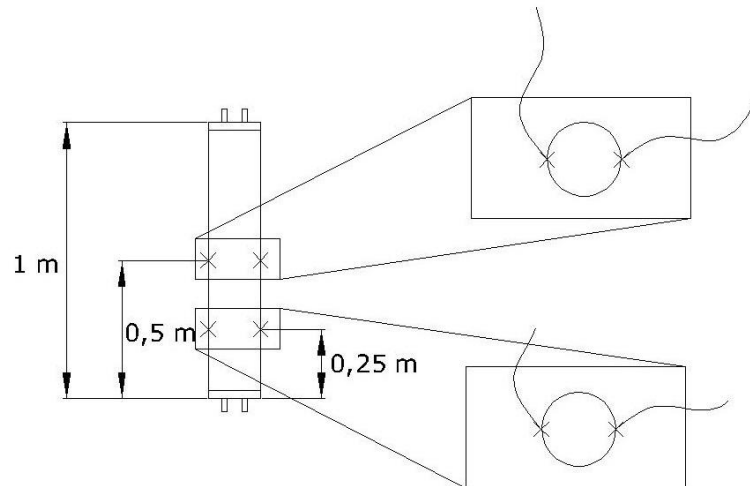


Figura 5.10 - Localização longitudinal e em corte dos termopares nos perfis CHS 139,7x4

## 5.7 Localização dos termopares de controlo no forno

Para verificar qual a temperatura real existente no forno foram usados os termopares de controlo C12, C13 e C14, cuja localização pode ser observada na figura 5.11 e cuja função foi medir a temperatura existente no interior do forno durante os vários ensaios realizados.

A medição da temperatura, nesses termopares, foi efetuada uma vez por minuto.



Figura 5.11 – Localização dos termopares de controlo no forno



## 5.8 Ensaio N°1

Na realização do primeiro ensaio, optou-se por ensaiar apenas um perfil tubular.

O perfil foi colocado como se vê na figura 5.12, apoiados sobre tijolos, com restrição de movimento lateral por forma a não resvalar. Foi aplicada a curva ISO 834, com duração de 60 minutos, como curva de incêndio neste ensaio.



Figura 5.12 - Foto do ensaio N°1 com perfil CHS 139,7x4

Os termopares T21, T23, T24 e T17 de registo de temperatura do perfil foram dispostos como se observa na figura 5.13, na qual também se vê a posição dos queimadores no forno.



Figura 5.13 – Ensaio 1, localização do perfil no forno e dos respectivos termopares

### 5.8.1 Resultados do ensaio N°1

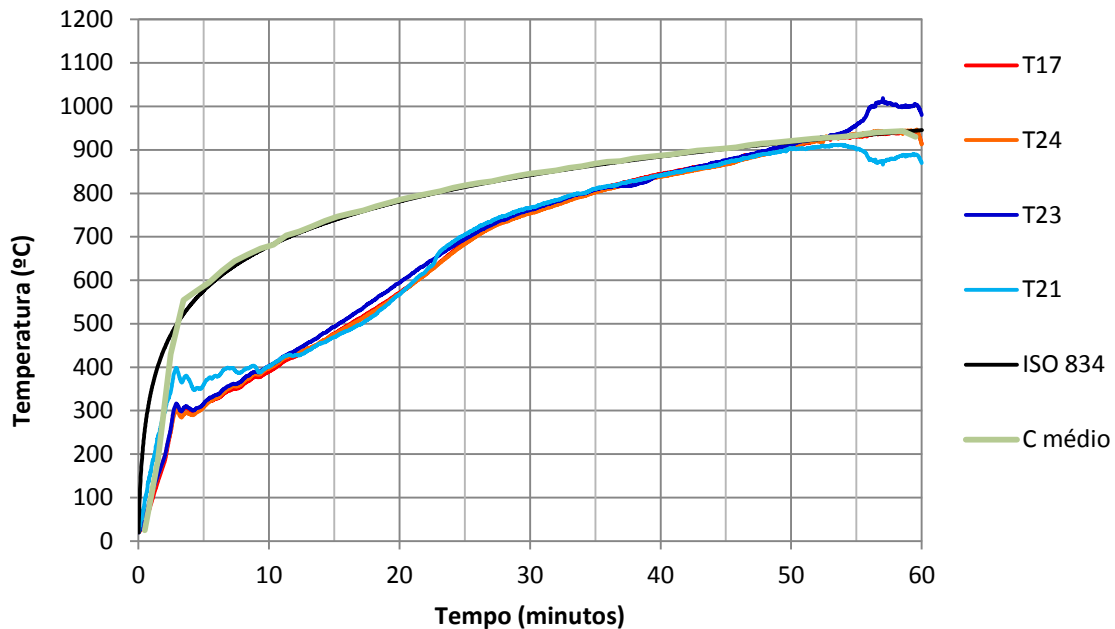


Figura 5.14 – Gráfico resultante do ensaio N°1

Dos dados registados pelos 3 termopares de controlo, efetuou-se a média dos valores obtidos, tendo-se chamado a essa média de “C médio”. Verifica-se que a temperatura média medida no interior do formo, no início do ensaio, foi inferior a da curva ISO 834 até cerca dos 3 minutos de ensaio, sendo depois desse valor coincidente com a mesma.

Nas medições efetuadas no perfil, verifica-se que o termopar T21, teve uma ligeira oscilação no intervalo de 3 a 9 minutos, não sendo no entanto de descartar os dados obtidos através desse termopar. A partir dos 54 minutos de ensaio, os termopares T21 e T23 (localizados do lado das chamas) deixaram de efetuar medições que se possam designar de corretas, pelo que é de ignorar os valores medidos por esses termopares a partir desse tempo.

Observam-se 3 grandes retas de comportamento, uma dos 0 aos 3 minutos que se caracteriza por ser de crescimento acentuado, a qual se cede um patamar de temperatura relativamente estável dos 3 aos 5 minutos, coincidindo com a temperatura de 300°C, temperatura essa que segundo os dados teóricos corresponde a primeira fase

de reação da tinta intumescente, fase essa em que o agente ácido reage com o agente carbonífero formando gases que expandem o resíduo carbonoso gerando uma espuma de cor preta.

Entre os 5 e os 25 minutos dá-se um aumento da temperatura de forma mais lenta mas ainda de forma acentuada. Dos 25 minutos até ao final do ensaio verifica-se uma terceira linha de tendência, mais suave do que as duas anteriores. O início dessa reta de comportamento mais suave, aos 25 minutos, coincide com a temperatura de 700°C, em que relembrando os fundamentos teóricos, esses apontam para o fato de surgir uma segunda fase de reação da tinta intumescente, em que a essa temperatura se forma uma camada superficial cerâmica porosa de cor branca e de baixa condutividade térmica. Pelo que se pode observar que essa segunda reação, tal como a primeira, provocam uma diminuição real da velocidade a que a temperatura do perfil aumenta.

Verifica-se que a temperatura de 500°C foi atingida ao fim de cerca de 17 minutos de ensaio e que a temperatura do perfil ao fim de 30 minutos de ensaio foi cerca de 750°C. O estado do perfil CHS, depois de quinze horas de arrefecimento, resultante deste ensaio pode ser observado na figura 5.15.



**Figura 5.15 – Foto com resultado do ensaio 1**

Como se vê na figura 5.15, o perfil apresenta cor branca, o que significa que a tinta desencadeou a sua segunda fase de reação que ocorre por volta dos 700°C.

## 5.9 Ensaio Nº2

Na realização do segundo ensaio, colocaram-se dois perfis no forno, um perfil de secção aberta e outro de secção fechada, como se tinha inicialmente planeado fazer. Utilizou-se como curva de incêndio a curva ISO 834, para uma duração de 60 minutos.

A disposição dos perfis no forno pode ser observada na figura 5.16.



Figura 5.16 – Ensaio 2, disposição dos perfis no forno

Os termopares T18, T22, T19, T20, T17, T24, T23 e T21 foram dispostos como se observa na figura 5.17.

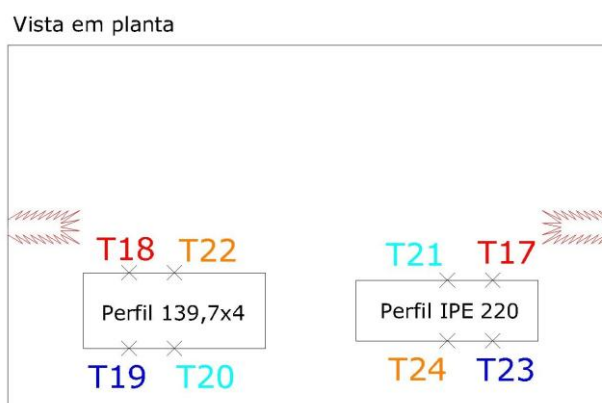


Figura 5.17 - Ensaio 2, localização dos perfis no forno e respectivos termopares

### 5.9.1 Resultados do ensaio N°2

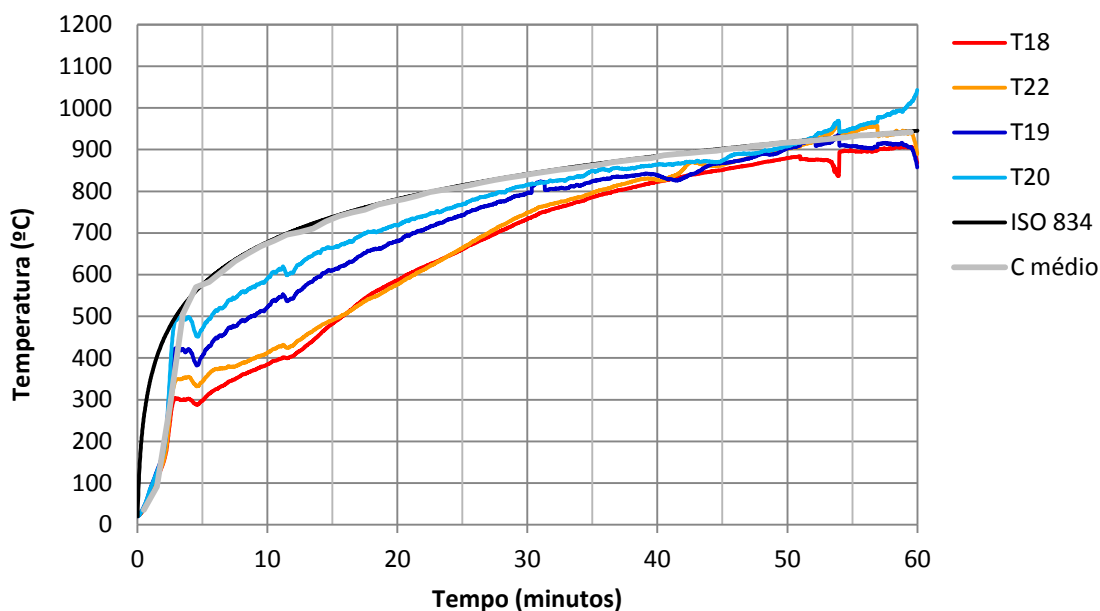


Figura 5.18 - Gráfico resultante do ensaio N°2 com perfil CHS 139,7x4

Dos dados registados pelos 3 termopares de controlo, efetuou-se a média dos valores obtidos, tendo-se chamado a essa média de “C médio”. Verifica-se que a temperatura média medida no interior do forno, no início do ensaio, foi inferior a da curva ISO 834 até cerca dos 3 minutos de ensaio, sendo depois desse valor coincidente com a mesma.

Relativamente as medições de temperatura efetuadas pelos termopares soldados ao perfil, verificam-se grandes discrepâncias de temperaturas. Segundo a norma EN23820, seriam de descartar os resultados obtidos neste ensaio, no entanto, devido a falta de ensaios realizados para esta tese optou-se por não descartar este ensaio.

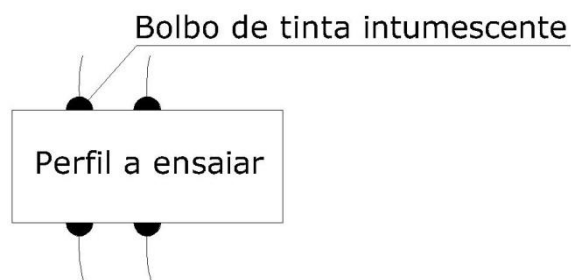
Os termopares T18 e T22, localizados do lado das chamas, efetuaram medições de temperaturas mais baixas do que os termopares T19 e T20, localizados do lado da porta do forno. O comportamento dos termopares foi semelhante em todo o ensaio, mas com diferença na temperatura a qual se verificou esse comportamento. Tal comportamento pode dever-se ao facto de alguns termopares nas zonas mais próximas do perfil apresentarem os fios salientes, figura 5.19. Apesar de os dois fios que constituem cada um dos termopares não se tocarem nessas zonas, facilmente se conclui que a temperatura fluiu dos fios expostos para a zona interior onde eles se intersectavam, provocando assim um registo de aumento de temperatura superior ao que seria

espectável. Pelo facto de os termopares apenas medirem acréscimos de temperatura, o erro reduziu-se aquando da expansão da tinta intumescente, mas não se verificou decréscimo da temperatura já medida, nem poderia tal verificar-se. Os termopares mais próximos das chamas registaram temperaturas inferiores aos termopares mais afastados das chamas. Pelo que se conclui que a tinta intumescente reagiu primeiro naquela zona, corrigindo assim o acréscimo de temperatura aí medido.



**Figura 5.19 – Fio termopar saliente**

Por forma a corrigir esse problema, deveria ter-se pintado com tinta intumescente essas zonas problemáticas, figura 5.20, criando assim uns bolbos de tinta intumescente com espessura superior ao inicialmente calculado e cuja influência pouco interferiria nos resultados finais, pois a condução de calor dar-se-ia pela restante superfície de contacto dos perfis.

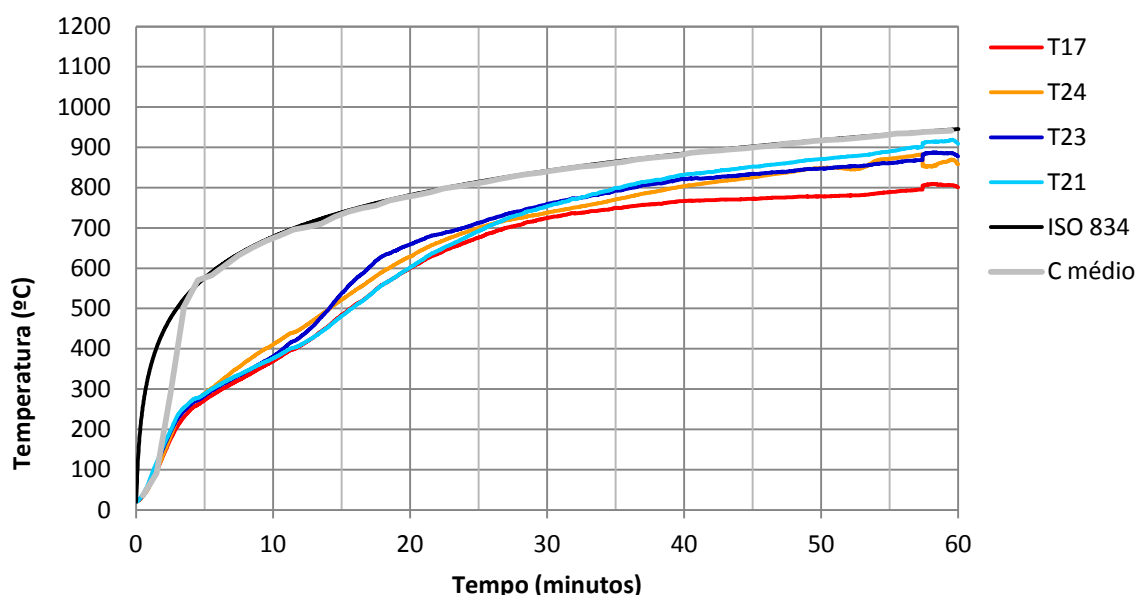


**Figura 5.20 – Reforço de tinta intumescente em zona problemática**

A diferença de temperaturas observadas entre o termopar que verificou maior temperatura T20 e o que verificou menor temperatura T18 é cerca de 200°C aos 3 minutos de ensaio. Essa diferença de temperatura foi-se atenuando a medida que o ensaio prosseguiu. Aos 54 minutos verificam-se medições fora do normal para os

termopares T18 e T20, bem como próximo do fim do ensaio para os termopares T20 e T19, sendo as medições do termopar T20 superiores ao medido no interior do forno, pelo que as medições desse termopar nesses instantes são de desprezar.

Tal como no ensaio N<sup>o</sup>1, verifica-se uma primeira reta de aquecimento rápido, seguido por outra de comportamento sinuoso até cerca dos 750°C, a partir dessa temperatura observa-se a terceira reta em que o aumento de temperatura foi mais lento. O termopar T20 atingiu a temperatura de 500°C aos 3 minutos de ensaio, o T19 aos 9 minutos, o T22 e o T18 aos 15 minutos simultaneamente.



**Figura 5.21 – Gráfico resultante do ensaio N<sup>o</sup>2 com perfil IPE 220**

No caso dos dados medidos pelos termopares soldados ao perfil IPE, verifica-se que o gráfico resultante é mais coerente do que o do perfil CHS.

Aos 13 minutos observa-se que o termopar T23 verificou um aumento de temperatura crescente superior aos outros termopares, pelo que se considera esse acontecimento um erro de medição do próprio termopar. A partir dos 35 minutos a temperatura do termopar T17 difere das restantes pelo que se considera também que o resultado a ter em conta é o apresentado pelos outros três termopares.

Tal como no ensaio N<sup>o</sup>1 observam-se 3 retas de comportamento, uma dos 0 aos 3 minutos de aquecimento rápido. Outra que se inicia por volta dos 250°C e que se



prolonga até aos 700°C de forma um pouco sinuosa. A partir daí verifica-se uma terceira linha de tendência, cujo aumento de temperatura é inferior as outras. A temperatura de 500°C foi atingida por volta dos 15 minutos de ensaio. Ao fim de 30 minutos de ensaio a temperatura média do perfil foi cerca de 740°C.



**Figura 5.22 - Foto com resultado do ensaio 2**

Depois de quinze horas de arrefecimento, fotografou-se os perfis no respetivo forno de ensaio, figuras 5.22 e 5.23, observa-se que o perfil CHS 139,7x4 apresenta menos material derivado da expansão de tinta intumescente junto a si, e apresenta também os quatro termopares soltos, o que pode ter afetado os dados registados no final do ensaio.



**Figura 5.23 – Visualização focada dos perfis do ensaio 2**

Como os dados obtidos foram muito discrepantes, decidiu-se efetuar a média dos valores de temperatura obtidos para a temperatura de 500°C, nos vários termopares e assim concluir, por interpolação, qual seria o tempo decorrido aquando da ocorrência dessa temperatura, tabela 5.1.



**Tabela 5.1 – Tempo de ensaio para 500°C de temperatura, perfil CHS**

CHS	T22	T20	T18	T19	Média
10 min	412,44 °C	590,44 °C	384,59 °C	521,41 °C	477,22 °C
11,35 min					500 °C
15 min	491,16 °C	664,19 °C	482,37 °C	609,83 °C	561,89 °C

Para saber qual a temperatura obtida ao fim de 30 minutos de ensaio, calculou-se a média das temperaturas obtidas nesse tempo, tabela 5.2.

**Tabela 5.2 – Temperatura média obtida ao fim de 30 minutos de ensaio, perfil CHS**

CHS	T22	T20	T18	T19	Média
30 min	749,17 °C	815,92 °C	733,84 °C	796,65 °C	773,89 °C

Efetuu-se o mesmo para os resultados com o perfil IPE, tabelas 5.3 e 5.4.

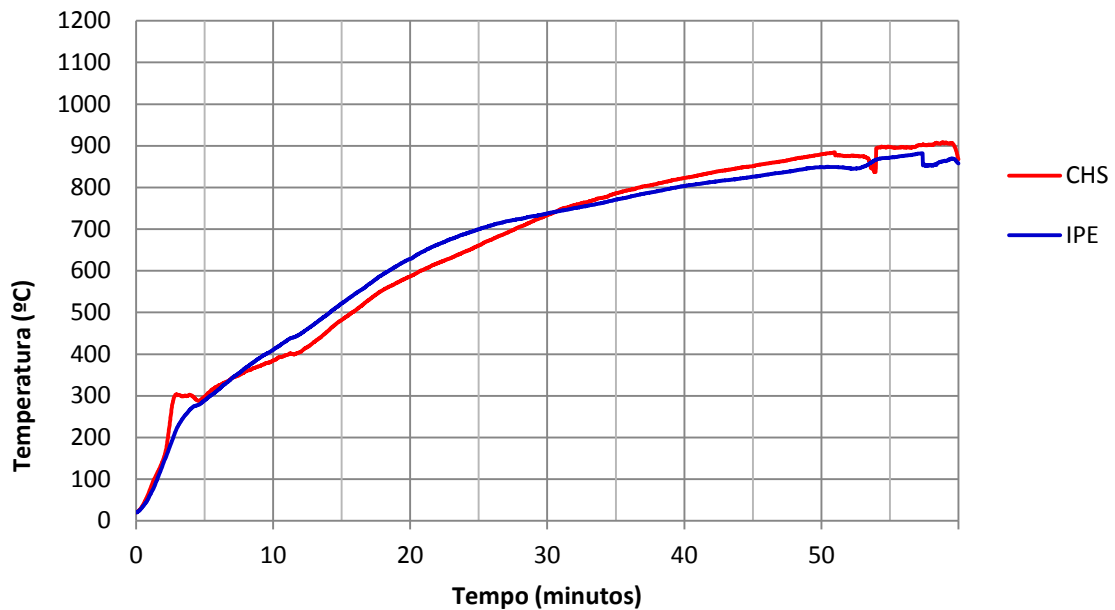
**Tabela 5.3 - Tempo de ensaio para 500°C de temperatura, perfil IPE**

IPE	T17	T23	T21	T24	média
10 min	369,86 °C	381,28 °C	376,28 °C	410,82 °C	384,56 °C
14,74 min					500 °C
15 min	484,1 °C	537,9 °C	481,32 °C	522,4 °C	506,43 °C

**Tabela 5.4 - Temperatura média obtida ao fim de 30 minutos de ensaio, perfil IPE**

IPE	T17	T23	T21	T24	média
30 min	724,65 °C	759,06 °C	754,08 °C	737,94 °C	743,93 °C

Como outra forma de análise decidiu-se efetuar a comparação entre os dois termopares que efetuaram os registos de temperaturas mais baixas em cada perfil, figura 5.24. Pois como os termopares apenas medem acréscimos de temperaturas considera-se que os termopares cujos registos de temperatura são superiores possuem mais erros de medição associados a si provenientes do início dos ensaios.



**Figura 5.24 - Comparação entre os dois termopares com temperaturas mais baixas, ensaio 2**

Segundo esta comparação, não se verificam grandes diferenças de comportamento entre o perfil IPE e o CHS. O perfil IPE apresenta temperaturas ligeiramente superiores entre os 8-28 minutos. A partir dos 28 minutos, é o perfil CHS que apresenta os valores de maiores temperaturas.

### 5.10 Ensaio N°3

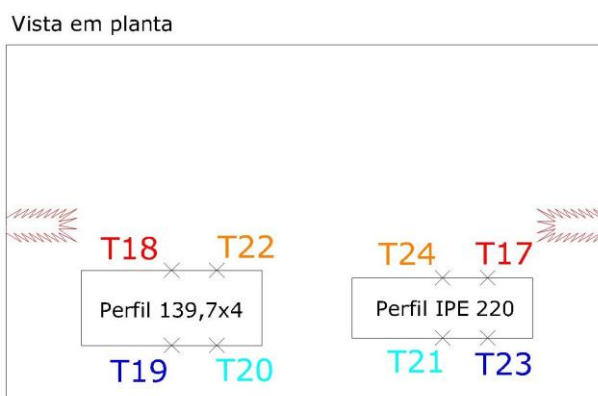
Na realização do terceiro ensaio, adotou-se a mesma metodologia do ensaio N°2. Tendo como diferenças o facto de se ter usado como curva de incêndio, uma curva de incêndio natural, e tendo essa sido aplicada durante 90 minutos. Existe ainda como diferença a disposição do perfil tubular, que por descuido ficou em posição invertida ao inicialmente previsto.

A disposição dos perfis no forno pode ser observada na figura 5.25.



**Figura 5.25 - Ensaio 3, disposição dos perfis no forno**

Os termopares T18, T22, T19, T20, T17, T24, T23 e T21 foram dispostos como se observa na figura 5.26



**Figura 5.26 – Ensaio 3, localização dos perfis no forno e respectivos termopares**

### 5.10.1 Resultados do ensaio N°3

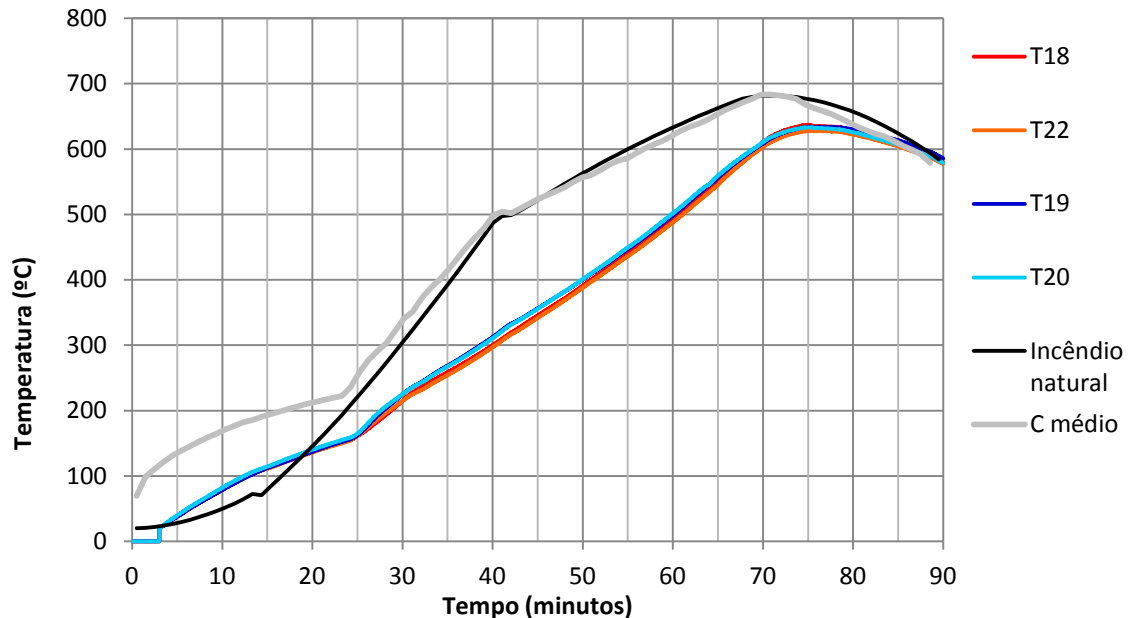


Figura 5.27 - Gráfico resultante do ensaio N°3 com perfil CHS 139,7x4

Verifica-se que o forno produziu um aquecimento inicial superior ao que a curva indicava, obtendo-se por isso medições de temperatura nos termopares soldados aos perfis superiores a própria curva. O início do registo de temperaturas, nos perfis, neste ensaio só começou depois de decorridos 3 minutos do mesmo.

Dos dados registados pelos 3 termopares de controlo, efetuou-se a média dos valores obtidos, tendo-se chamado a essa média de “C médio”. Verifica-se que a temperatura média medida no interior do forno, no início do ensaio, foi bastante superior a da curva de incêndio natural teórica, efeito esse que durou, até cerca dos 24 minutos de ensaio. Depois desse valor e até cerca dos 40 minutos de ensaio verifica-se apenas um valor ligeiramente superior. A partir desse tempo existe uma certa coincidência de temperaturas observadas.

Observam-se 4 linhas de tendência, uma dos 3 aos 25 minutos de aquecimento lento, depois segue-se uma dos 25 aos 30 minutos de aquecimento mais rápido, da qual deriva uma outra de aquecimento ligeiramente menos acentuado cujo início coincide com a temperatura de 220°C, em que como anteriormente observado, próximo dessa

temperatura se dá o início da primeira fase de expansão da tinta intumescente, o que aparentemente produziu uma redução na velocidade a que a temperatura no perfil aumentava. Essa terceira linha de tendência prolonga-se até cerca dos 73 minutos de ensaio, tempo a partir do qual surge a quarta linha de tendência e que se prolonga até ao fim. Essa quarta linha de tendência é derivada da redução de temperatura própria da curva de incêndio natural. No final do ensaio verificam-se temperaturas no perfil semelhantes as temperaturas observadas no forno, comportamento explicado pelo fato da inercia térmica do aço ser superior à do ar.

A temperatura de 500°C foi atingida por volta dos 60 minutos de ensaio.

Ao fim de 30 minutos de ensaio a temperatura medida no perfil foi cerca de 220°C, enquanto que ao fim de 60 minutos foi cerca de 500°C, como observado anteriormente.

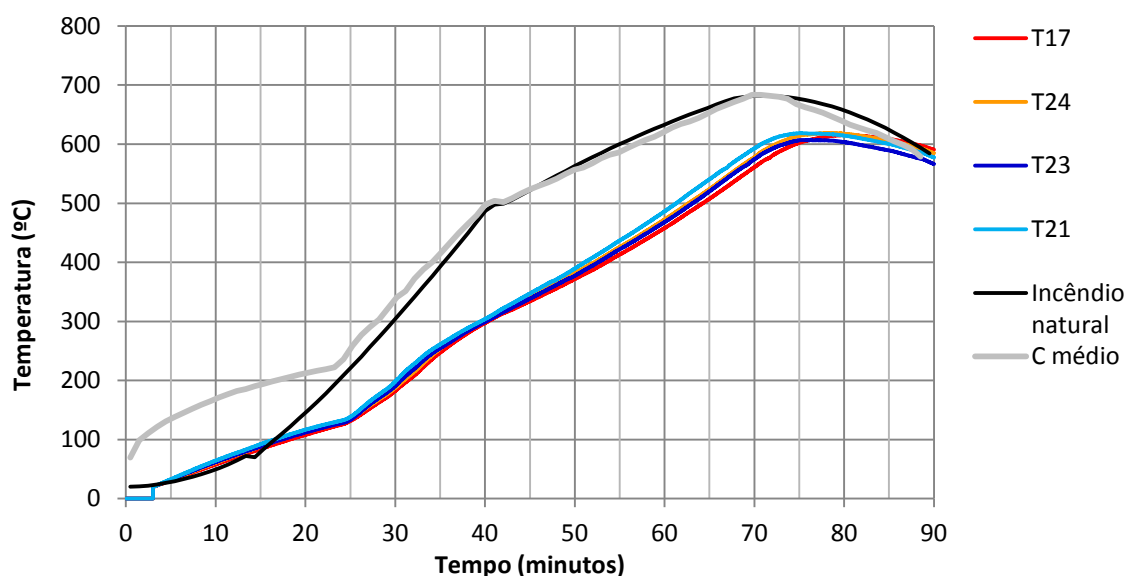


Figura 5.28 - Gráfico resultante do ensaio N°3 com perfil IPE 220

Tal como no caso do perfil tubular, observam-se 4 linhas de tendência, uma dos 3 aos 25 minutos de aquecimento lento, depois segue-se uma dos 25 aos 35 minutos de aquecimento mais rápido, da qual deriva uma outra de aquecimento ligeiramente menos acentuado cujo início coincide com a temperatura de 250°C, em que como anteriormente observado, próximo dessa temperatura se dá a primeira fase de expansão da tinta intumescente, o que aparentemente produziu uma redução na velocidade a que a temperatura no perfil aumentou. Essa terceira linha de tendência prolonga-se até cerca dos 73 minutos de ensaio, tempo a partir do qual surge a quarta linha de tendência e que

se prolonga até ao fim. Essa quarta linha de tendência é derivada da redução de temperatura própria da curva de incêndio natural.

A temperatura de 500°C foi atingida por volta dos 63 minutos de ensaio.

Ao fim de 30 minutos de ensaio a temperatura medida no perfil foi cerca de 200°C, enquanto que ao fim de 60 minutos foi cerca de 480°C.



**Figura 5.29 - Foto com resultado do ensaio 3**

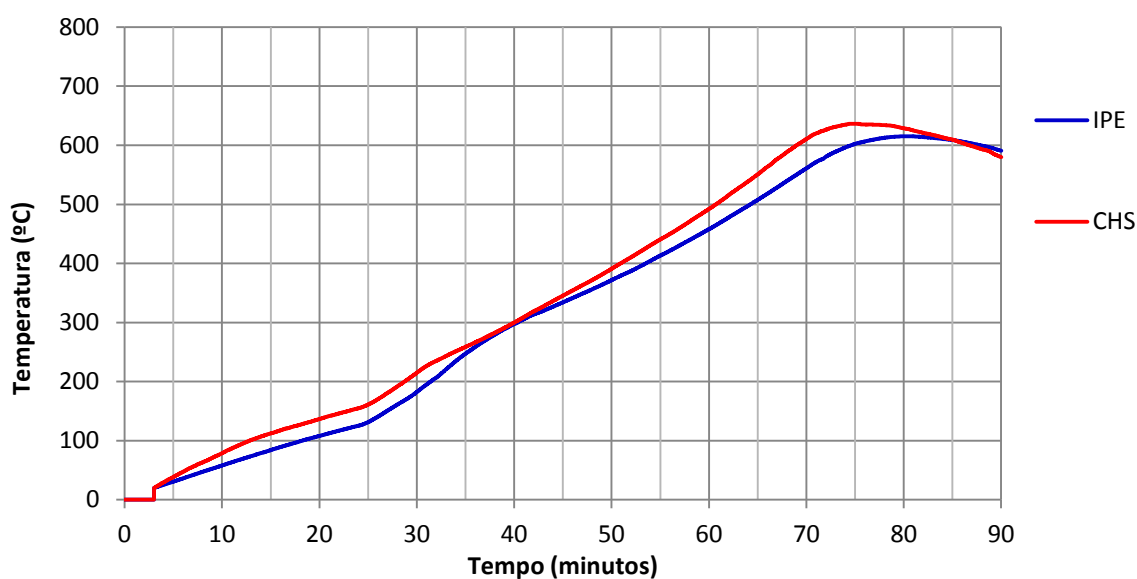
Pelo facto de os perfis não terem alcançado a temperatura de 700°C era de esperar encontrar os perfis, segundo os dados teóricos, apresentando uma espuma de cor preta. No entanto vê-se pela figura 5.28 que os mesmos apresentam cor acinzentada, pelo que se conclui que a tinta usada nestes ensaios difere um pouco daquela que se apresentou nos dados teóricos. A segunda fase de expansão da tinta intumescente não se realizou pois a temperatura de 700°C não foi alcançada.



**Figura 5.30 – Comparação entre os perfis ensaiados**

Na figura 5.30, vê-se os resultados dos ensaios N°1, N°2 e N°3, contando da esquerda para a direita. Os dois perfis do lado direito apresentam material visivelmente mais escuro e de maior consistência.

Efetuada a comparação entre os dois termopares que mediram as temperaturas mais baixas em cada perfil obteve-se o gráfico da figura 5.31.



**Figura 5.31 - Comparação entre os dois termopares com temperaturas mais baixas, ensaio 3**

Entre o início do ensaio e relativamente até ao final do mesmo, o perfil CHS apresentou valores de temperaturas superiores às do perfil IPE. No final do ensaio é de notar que pelo facto do perfil CHS ter apenas metade da massa do perfil IPE, conseguiu registar uma diminuição de temperatura superior pelo que no final do ensaio, apresenta uma temperatura inferior à do perfil IPE.

### 5.11 Ensaio Nº4

Na realização do quarto ensaio, adotou-se a mesma metodologia do ensaio Nº3. Existe contudo uma diferença, que consiste no facto de no perfil tubular um dos termopares ter vindo despedagado, pelo que este ensaio foi realizado tendo o perfil circular apenas 3 termopares. Usou-se a mesma curva de incêndio natural e tempo de aplicação que fora usada no ensaio 3.

A disposição dos perfis no forno pode ser observada na figura 5.32.



Figura 5.32 - Disposição dos perfis no forno, ensaio 4

Os termopares T18, T22, T19, T17, T24, T23 e T21 foram dispostos como se observa na figura 5.33.

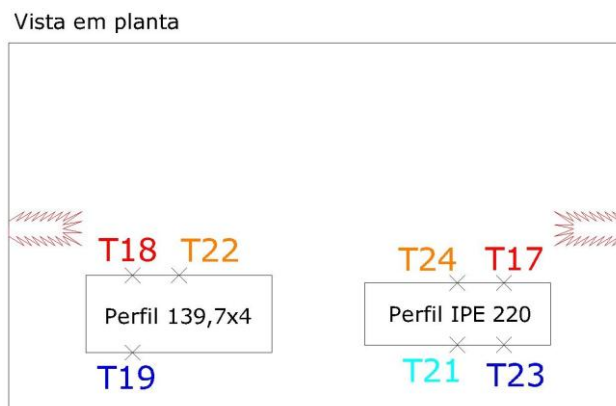


Figura 5.33 – Ensaio 4, localização dos perfis no forno e respectivos termopares



### 5.11.1 Resultados do ensaio N<sup>o</sup>4

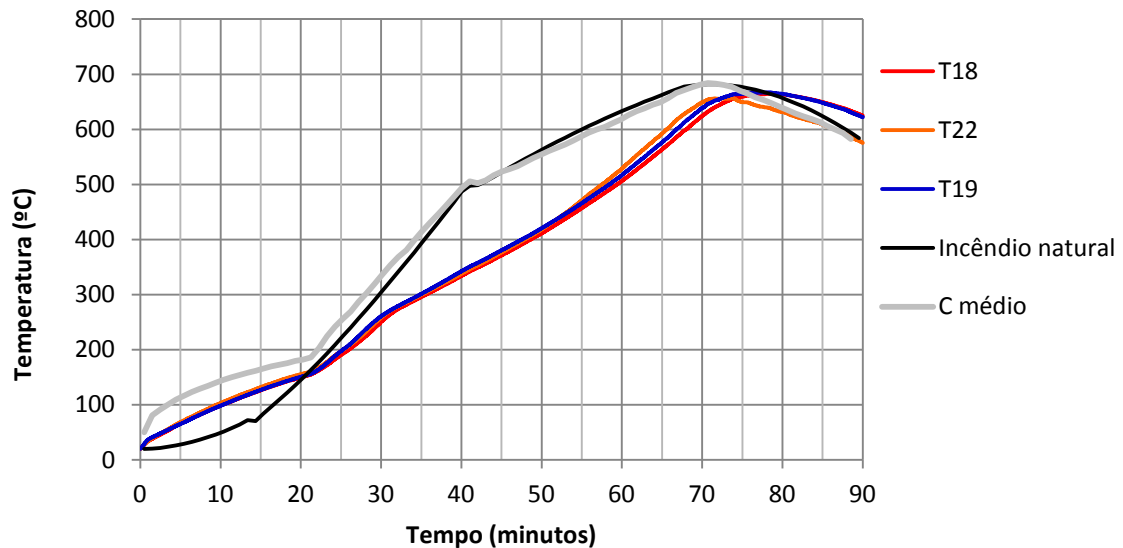


Figura 5.34 - Gráfico resultante do ensaio N<sup>o</sup>4 com perfil CHS 139,7x4

O ensaio 4 foi realizado seguindo a mesma curva de incêndio natural que fora usada no ensaio 3, e tal como nesse ensaio.

Dos dados registados pelos 3 termopares de controlo, efetuou-se a média dos valores obtidos, tendo-se chamado a essa média de “C médio”. Verifica-se que a temperatura média medida no interior do formo, no início do ensaio, foi bastante superior a da curva de incêndio natural teórica, efeito esse que durou, até cerca dos 22 minutos de ensaio. Depois desse valor e até cerca dos 40 minutos de ensaio verifica-se apenas um valor ligeiramente superior. A partir desse tempo existe uma certa coincidência de temperaturas observadas.

Observam-se 4 linhas de tendência, uma dos 0 aos 22 minutos de aquecimento lento, depois segue-se outra dos 22 aos 31 minutos de aquecimento mais rápido, da qual deriva uma outra de aquecimento ligeiramente menos acentuada cujo início coincide com a temperatura de 280°C, em que como anteriormente observado, próximo dessa temperatura se dá o início da primeira fase de expansão da tinta intumescente. Essa terceira linha de tendência prolonga-se até cerca dos 73 minutos de ensaio, tempo a partir do qual surge a quarta linha de tendência, de arrefecimento, e que se prolonga até

ao fim do ensaio. No final verificam-se temperaturas no perfil superiores as temperaturas observadas no forno, comportamento esse já explicado anteriormente, e que é devido ao fato da inercia térmica do aço ser superior à do ar.

A temperatura de 500°C foi atingida por volta dos 58 minutos de ensaio.

Ao fim de 30 minutos de ensaio a temperatura medida no perfil foi cerca de 280°C, enquanto que ao fim de 60 minutos foi cerca de 510°C.

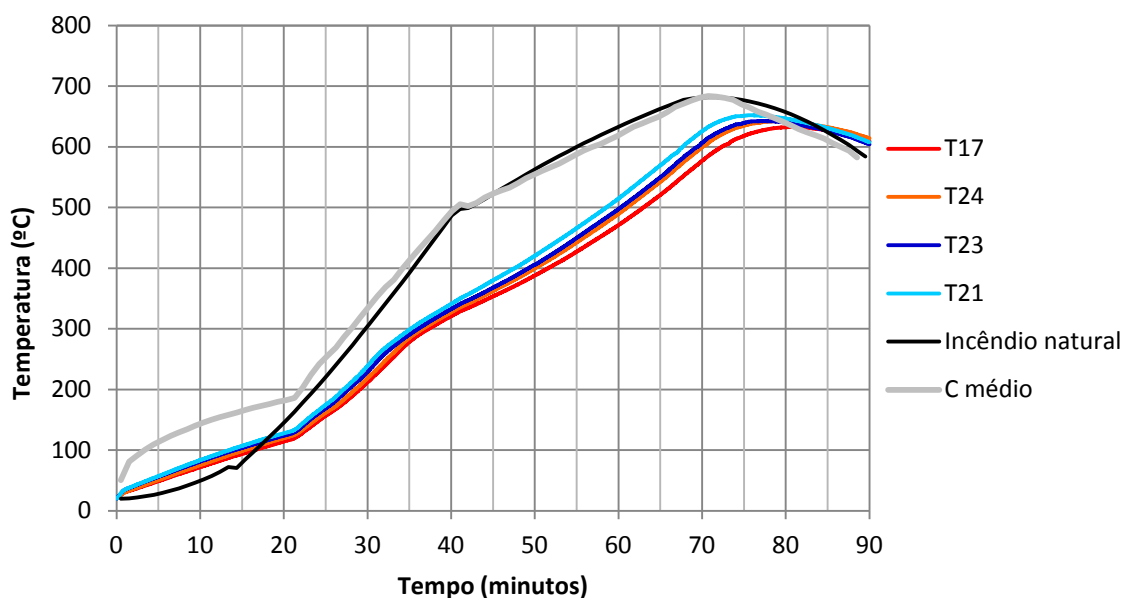


Figura 5.35 - Gráfico resultante do ensaio N°4 com perfil IPE 220

Verifica-se uma ligeira variação de valores medidos nos termopares soldados ao perfil entre os 50 e os 80 minutos de ensaio, não sendo no entanto significativa essa variação.

Mais uma vez observam-se 4 linhas de tendência, uma dos 0 aos 22 minutos de aquecimento lento, depois segue-se uma dos 22 aos 35 minutos de aquecimento mais rápido, da qual deriva uma outra de aquecimento ligeiramente menos acentuado cujo início coincide com a temperatura de 300°C, em que como anteriormente observado, próximo dessa temperatura se dá a primeira fase de expansão da tinta intumescente. Essa terceira linha de tendência prolonga-se até cerca dos 73 minutos de ensaio, tempo a partir do qual surge a quarta linha de tendência, que se prolonga até ao fim e cuja ocorrência foi já explicada anteriormente.

A temperatura de 500°C foi atingida por volta dos 60 minutos de ensaio.

Ao fim de 30 minutos de ensaio a temperatura medida no perfil foi cerca de 230°C, enquanto que ao fim de 60 minutos foi cerca de 500°C.

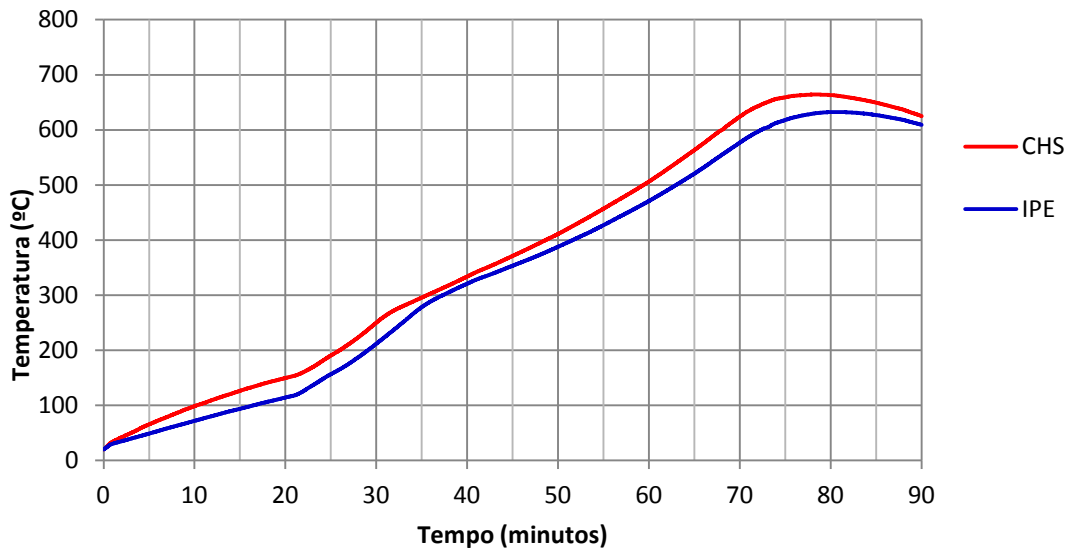


**Figura 5.36 - Foto com resultado do ensaio 4**

Observa-se na figura 5.36, que os perfis apresentam cor acinzentada, tal como no ensaio anterior, e que o perfil CHS 139,7x4 apresenta uma crista de cor branca (figura 5.37). Talvez o queimador existente junto a zona superior do perfil tenha provocado o desencadear da segunda fase de reação da tinta intumescente, nessa zona, originando assim a crista.



**Figura 5.37 – Visualização focada dos perfis do ensaio 4**



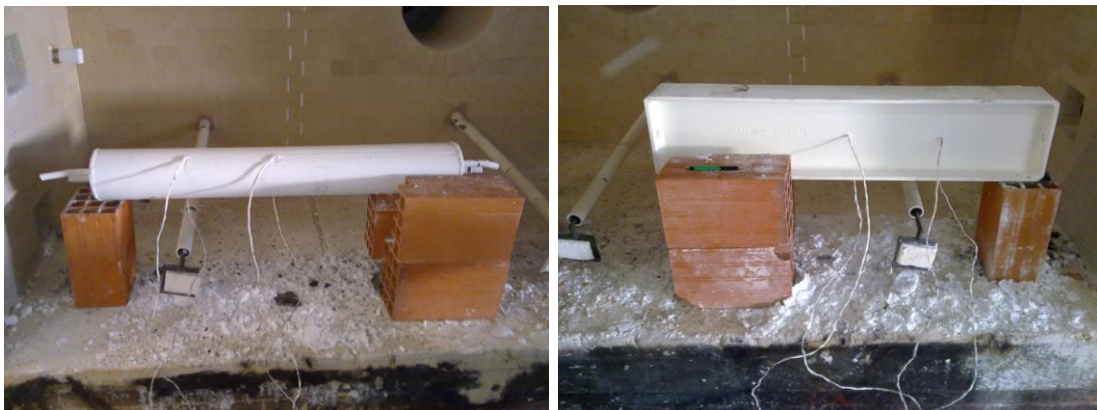
**Figura 5.38 - Comparação entre os dois termopares com temperaturas mais baixas, ensaio 4**

Tal como no ensaio N°3, o perfil CHS apresenta valores de temperatura superiores às do perfil IPE. Conclui-se que o perfil IPE, teve um melhor comportamento ao fogo.

## 5.12 Ensaio N°5

Na realização do quinto ensaio, adotou-se a mesma metodologia do ensaio 2, curva ISO 834, aplicada durante 60 minutos.

A disposição dos perfis no forno pode ser observada na figura 5.38.



**Figura 5.39 - Ensaio 5, disposição dos perfis no forno**

Os termopares T18, T22, T19, T20, T17, T24, T23 e T21 foram dispostos como se observa na figura 5.40.

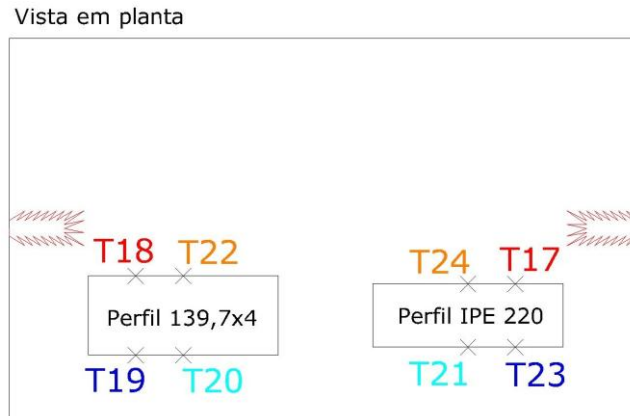


Figura 5.40 - Ensaio 5, localização dos perfis no forno e respectivos termopares

### 5.12.1 Resultados do ensaio N°5

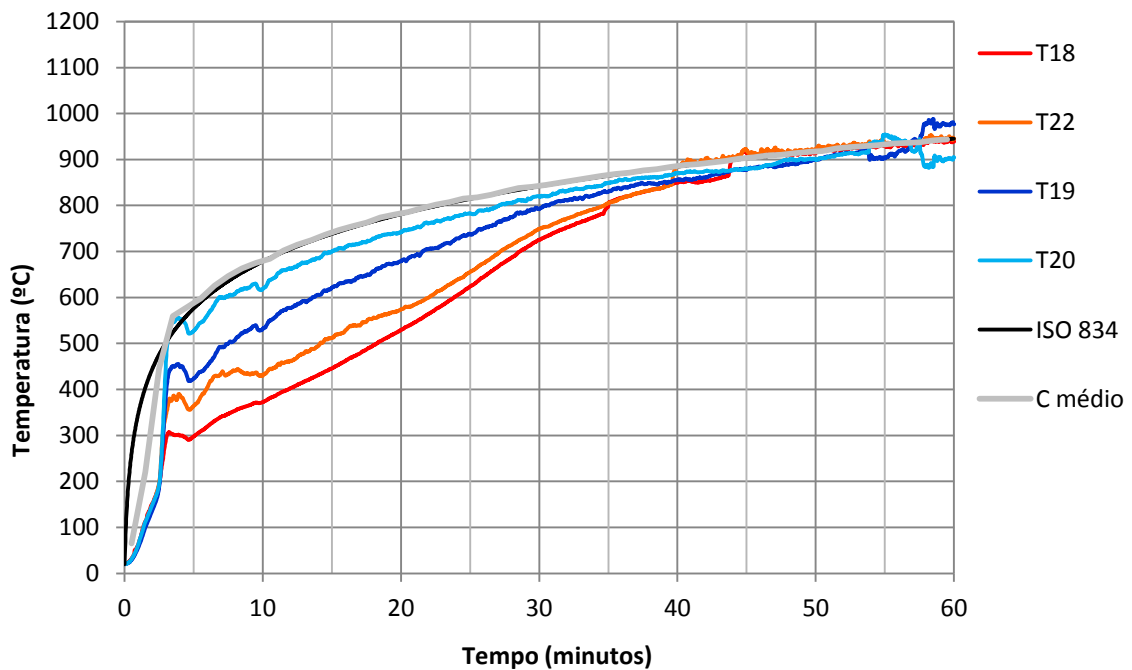


Figura 5.41 - Gráfico resultante do ensaio N°5 com perfil CHS 139,7x4

Dos dados registados pelos 3 termopares de controlo, efetuou-se a média dos valores obtidos, tendo-se chamado a essa média de “C médio”. Verifica-se que a temperatura média medida no interior do formo, no início do ensaio, foi inferior a da curva ISO 834 até cerca dos 3 minutos de ensaio, sendo depois desse valor coincidente com a mesma.

Tal como no ensaio 2 os fios de termopar junto ao perfil estavam descascados mas não se tocavam, pelo que isso pode ter influenciado na discrepância dos resultados obtidos.

As medições de temperatura efetuadas pelos termopares soldados ao perfil, verificam grandes discrepâncias de temperaturas. Tal como no ensaio 2, segundo a norma EN23820, seriam de descartar os resultados obtidos neste ensaio, no entanto, devido a falta de ensaios realizados para esta tese optou-se por não descartar este ensaio.

Os termopares T18 e T22, localizados do lado das chamas, efetuaram medições de temperaturas mais baixas do que os termopares T19 e T20, localizados do lado da porta do forno, o mesmo comportamento se tinha observado no ensaio 2. O comportamento dos termopares foi semelhante em todo o ensaio, mas com diferença na temperatura a qual se verificou esse comportamento, devido a discrepância de temperaturas inicialmente registadas.

A diferença de temperaturas observadas entre o termopar que verificou maior temperatura T20 e o que verificou menor temperatura T18 é cerca de 250°C aos 3 minutos de ensaio. Essa diferença de temperatura foi-se atenuando a medida que o ensaio prosseguiu. Aos 58 minutos verificam-se medições fora do normal para os termopares T19 e T20.

Tal como no ensaio N<sup>o</sup>1, verifica-se uma primeira reta de aquecimento rápido entre os 0 e os 3 minutos, seguindo-se uma aparente redução de temperatura, que será resultado da primeira fase de reação da tinta intumescente. Depois segue-se outra linha de comportamento sinuoso até cerca dos 800°C, a partir dessa temperatura, aos 35 minutos, observa-se a terceira reta em que o aumento de temperatura foi mais lento e dura até ao final do ensaio.

O termopar T20 atingiu a temperatura de 500°C aos 3 minutos de ensaio, o T19 aos 7 minutos, o T22 aos 14 minutos e o T18 aos 18 minutos.

Como os dados obtidos foram muito discrepantes, decidiu-se efetuar a média dos valores de temperatura obtidos para a temperatura de 500°C, no vários termopares e assim concluir, por interpolação, qual seria o tempo decorrido aquando da ocorrência dessa temperatura, tabela 5.5.

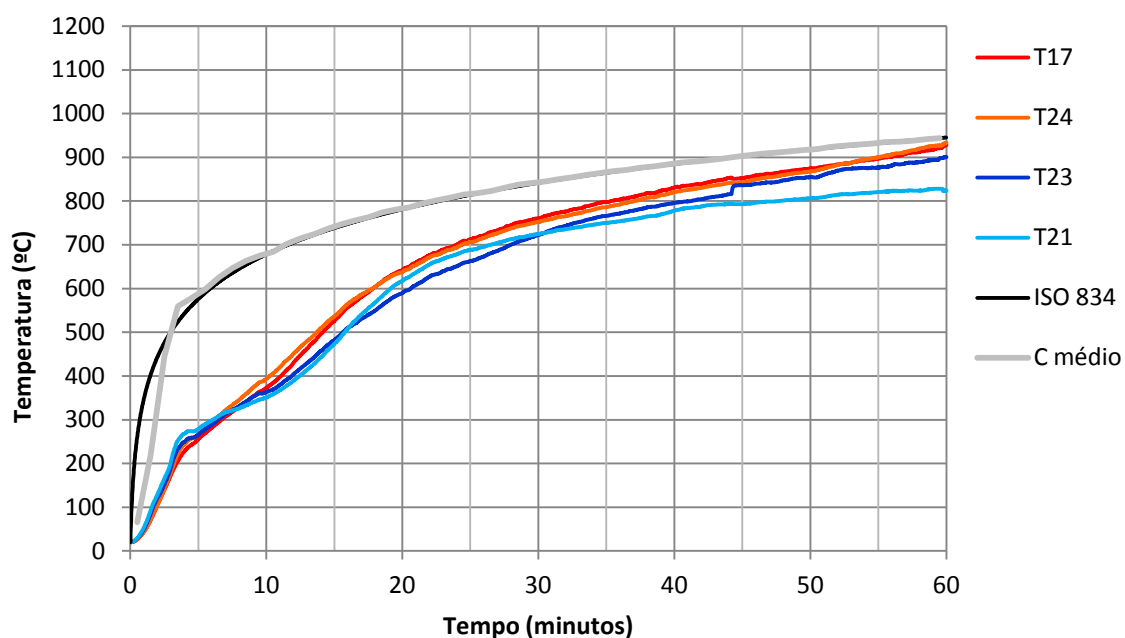
**Tabela 5.5 - Tempo de ensaio para 500°C de temperatura**

CHS	T22	T20	T18	T19	média
10 min	430,04 °C	618,55 °C	372,39 °C	531,74 °C	488,18 °C
10,72 min					500 °C
15 min	512,48 °C	700,20 °C	445,95 °C	621,42 °C	570,01 °C

Para saber qual a temperatura obtida ao fim de 30 minutos de ensaio, calculou-se a média das temperaturas obtidas nesse tempo, tabela 5.6.

**Tabela 5.6 - Temperatura média obtida ao fim de 30 minutos de ensaio**

CHS	T22	T20	T18	T19	média
30 min	749,20 °C	818,81 °C	725,47 °C	791,89 °C	771,34 °C



**Figura 5.42 - Gráfico resultante do ensaio N°5 com perfil IPE 220**

No caso do perfil IPE, verifica-se que o gráfico resultante é mais coerente do que o do perfil CHS, tal como aconteceu no ensaio 2.

Aos 40 minutos observa-se que o termopar T21 começou a distanciar-se dos restantes termopares em termos de registo de temperaturas efetuadas, pelo que se considera esse acontecimento um erro de medição do próprio termopar.

Tal como no primeiro ensaio observam-se 3 retas de comportamento, uma dos 0 aos 3 minutos de aquecimento rápido. Outra dos 3 aos 23 minutos, que se inicia por volta dos 270°C e que se prolonga até aos 680°C. A partir daí verifica-se uma terceira linha de tendência, cujo aumento de temperatura é inferior as outras.

Apesar de os dados obtidos no perfil IPE serem mais coerentes do que os obtidos no perfil CHS, por uma questão de similaridade decidiu-se usar o mesmo método anteriormente usado. Calculou-se então qual o tempo a que corresponde a temperatura média de 500°C, tabela 5.7.

**Tabela 5.7 - Tempo de ensaio para 500°C de temperatura**

IPE	T17	T23	T21	T24	média
10 min	372,89 °C	363,05 °C	393,67 °C	351,14 °C	370,18 °C
14,83 min					500 °C
15 min	526,06 °C	482,38 °C	536,36 °C	473,52 °C	504,58 °C

Do mesmo modo calculou-se a média das temperaturas obtidas ao fim de 30 minutos de ensaio, tabela 5.8.

**Tabela 5.8 - Temperatura média obtida ao fim de 30 minutos de ensaio**

IPE	T17	T23	T21	T24	média
30 min	760,77 °C	722,4 °C	752,3 °C	724,51 °C	739,99 °C



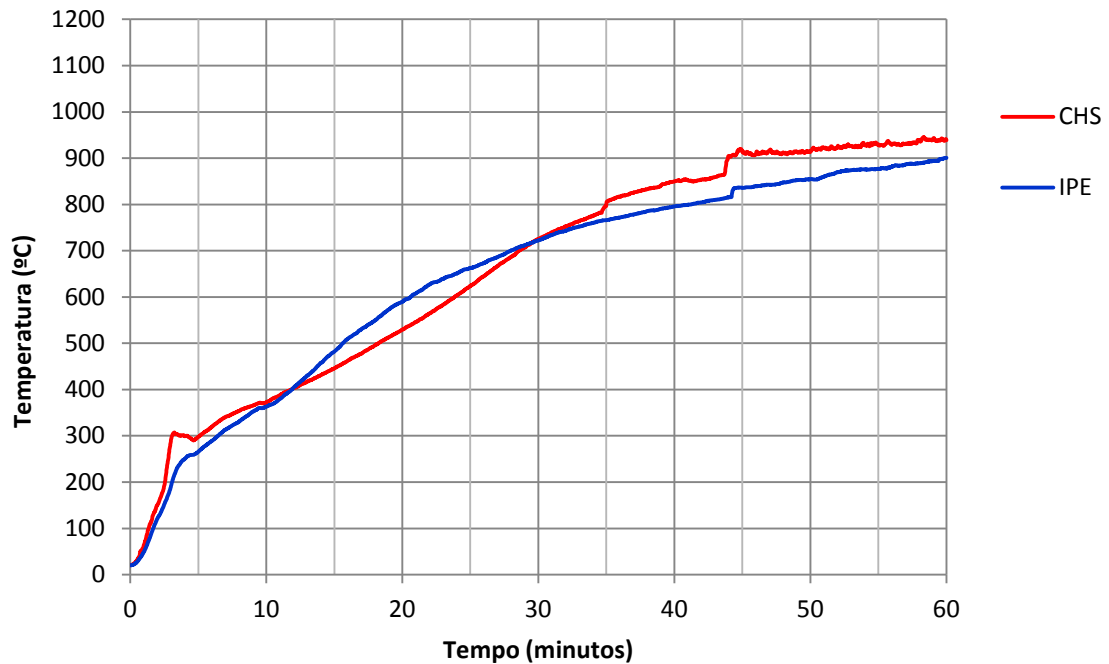


**Figura 5.43 - Foto com resultado do ensaio 5**

Observa-se, pelo facto de os perfis apresentarem cor branca, que a segunda fase de reacção da tinta intumescente se desencadeou em ambos os perfis. Depois de quinze horas de arrefecimento, verifica-se que o perfil CHS 139,7x4 apresenta falta de material isolante, enquanto que o perfil IPE 220, está aparentemente bem revestido. A perda de material deve-se a geometria da secção.



**Figura 5.44 - Visualização focada dos perfis do ensaio 5**



**Figura 5.45 - Comparação entre os dois termopares com temperaturas mais baixas, ensaio 5**

Verifica-se que o perfil CHS apresenta valores de temperaturas mais elevadas dos 0 aos 10 minutos de ensaio, depois é o perfil IPE que apresenta temperaturas mais elevadas até aos 30 minutos de ensaio. Dos 30 minutos de ensaio até ao final do mesmo é o perfil CHS que apresenta as temperaturas mais elevadas. O perfil IPE atingiu a temperatura de 500°C primeiro do que o perfil CHS, no entanto o perfil CHS atingiu a maior temperatura observada neste ensaio, pelo que não se pode concluir com base nesta comparação qual dos dois teve um melhor desempenho.

### 5.13 Ensaio N°6

Na realização do sexto ensaio, usou-se como curva de incêndio, a curva de aquecimento lento, descrita na norma EN13381-8, durante 40 minutos.

A disposição dos perfis no forno pode ser observada na figura 5.46.



Figura 5.46 - Colocação dos perfis no forno, ensaio 6

Os termopares T18, T22, T19, T20, T17, T24, T23 e T21 foram dispostos como se observa na figura 5.47.

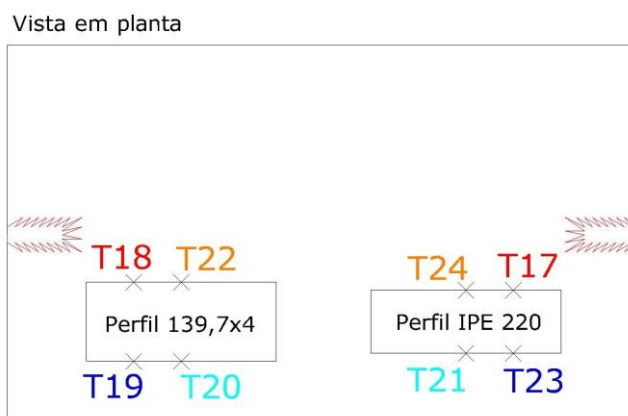


Figura 5.47 - Ensaio 6, localização dos perfis no forno e respectivos termopares

### 5.13.1 Resultados do ensaio N°6

Durante a realização do ensaio 6, constatou-se que as fichas onde os termopares estavam ligados apresentavam os polos invertidos, pelo que as temperaturas observadas eram negativas e sem nexos. Efetuou-se durante a realização do ensaio a troca de quatro termopares, o T22 pelo T30, o T20 pelo T22, o T24 pelo T21 e o T21 pelo T26, sendo a posição final dos termopares a que se pode observar na figura 5.48.

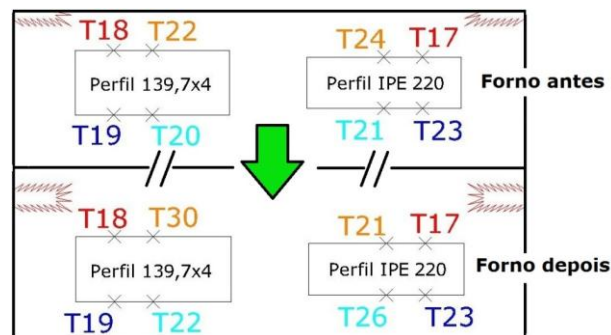
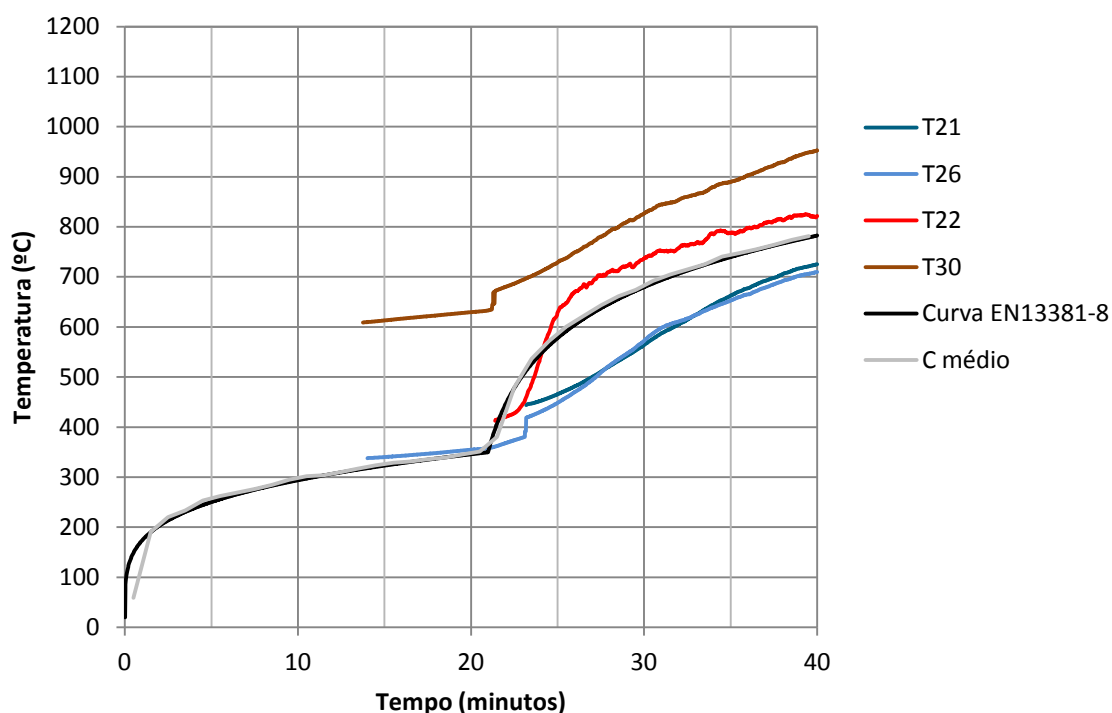


Figura 5.48 – Disposição inicial e final dos termopares no ensaio 6

Os novos termopares efetuaram medições corretas, pelo que apenas se consideram validos as medições por eles efetuadas.

Os dados desses termopares podem ser observados na figura 5.49, o registo dos mesmos iniciou-se aquando da substituição, pelo que cada um deles tem um início de registo diferente dos outros.



**Figura 5.49 - Gráfico resultante do ensaio N°6 com ambos os perfis**

A temperatura média registada pelos termopares de controlo é coincidente com a curva de aquecimento lento teórica para todo o ensaio, exceto nos dois minutos iniciais.

Verifica-se que as medições efetuadas pelo termopar T30 são superiores a média das temperaturas de controlo do forno. O termopar T22, também tem um comportamento estranho pois as temperaturas medidas estão coincidentes com as temperaturas do termopar de controlo que registou as temperaturas mais elevadas, verificando-se isso dos 27 minutos até ao final do ensaio.

Verifica-se que as temperaturas medidas no perfil CHS (T22 e T30) são elevadas e não coincidentes uma com a outra. Quando a curva de incêndio aumentou de temperatura (23 minutos) o termopar T22 aumentou também enquanto que os outros termopares aparentam ter tido aumentos de temperaturas inferiores.

O termopar T30, apesar de ter registos de temperaturas mais elevadas do que deveria ter, apresenta um comportamento semelhante ao termopar T26, no entanto aquando da subida drástica de temperatura, o aumento de temperatura nesse termopar deu-se mais cedo do que no termopar T26.

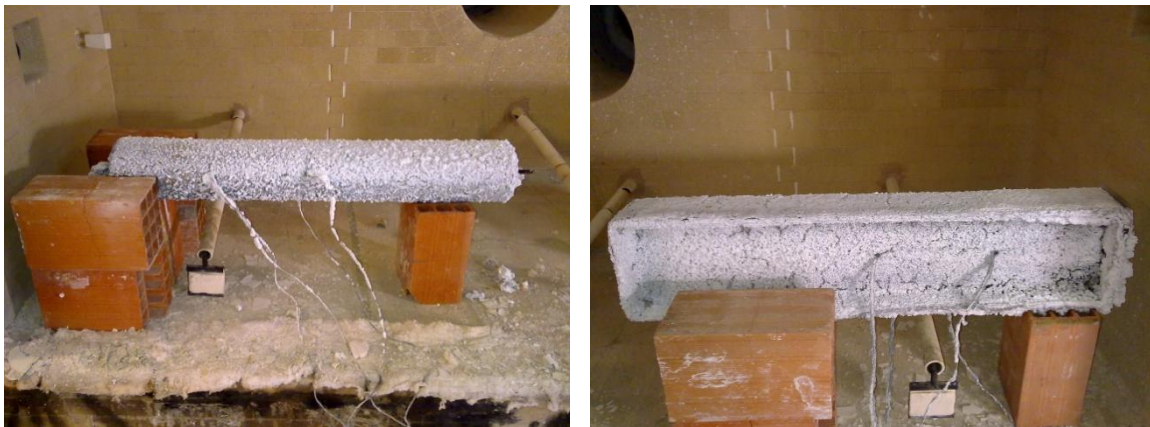
Apesar das temperaturas excessivamente altas medidas pelo termopar T30, o erro presente é fruto de medições iniciais superiores ao normal, pelo que ignorando esse

facto, se constata que a linha de temperaturas observadas é regular e apresenta o comportamento esperado, mas com temperaturas superiores ao que seria espectável. As temperaturas medidas no perfil IPE (T21 e T26) foram inferiores as medidas no perfil tubular (T22 e T30).



**Figura 5.51 - Foto com resultado do ensaio 6**

Observa-se nas figuras 5.51 e 5.52, que os perfis apresentam cor acinzentada, como ocorreu nos ensaios com curva de incêndio natural, pelo que se conclui que também neste ensaio não ocorreu a segunda fase de expansão da tinta intumescente.



**Figura 5.52 – Visualização focada dos perfis do ensaio 6**

## 5.14 Comparação dos ensaios

Por forma a poder comparar os dados práticos obtidos com dados analíticos, usou-se o programa ELEFIR-EN, desenvolvido na Universidade de Aveiro, para assim obter os mesmos. Determinou-se, com esse programa, qual a temperatura no forno e no aço em ambos os perfis para as diferentes curvas de incêndio e considerando ainda que não existia nenhum elemento de proteção passiva aplicado aos perfis.

### 5.14.1 Comparação dos ensaios com a curva ISO 834

Através do programa ELEFIR-EN e usando como curva de incêndio a curva ISO 834 para ambos os perfis, obteve-se o gráfico da figura 5.53.

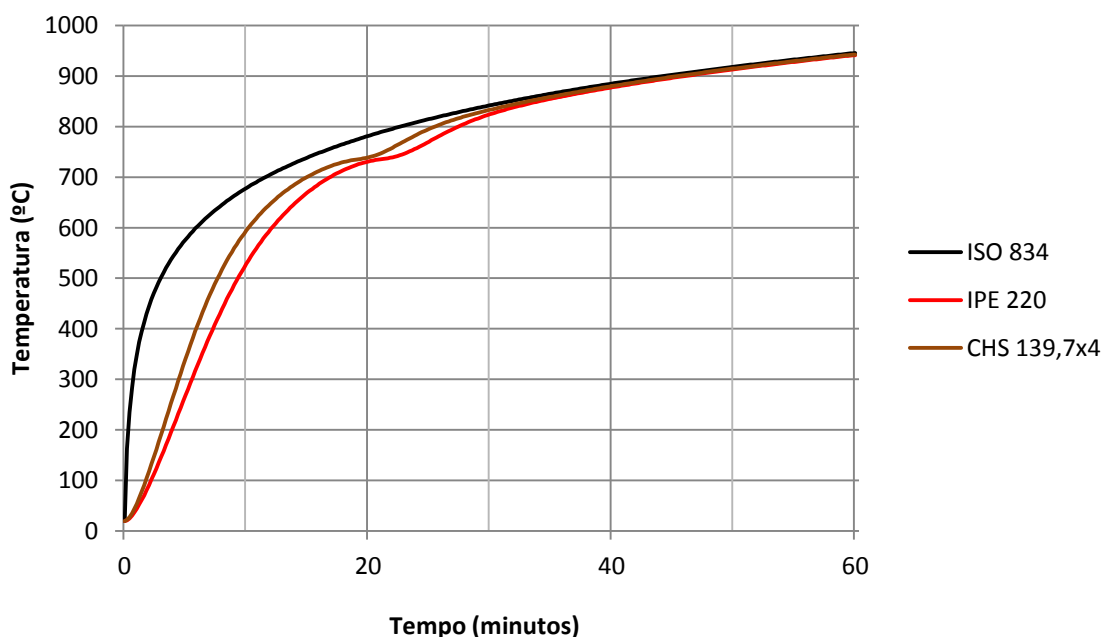


Figura 5.53 – Temperatura nos perfis sem proteção, ELEFIR-EN

Para a curva de incêndio ISO 834 sem proteção nos perfis, verifica-se pela figura 5.53 que o perfil IPE 220 apresenta um comportamento ao fogo ligeiramente melhor do que o perfil CHS 139,7x4. Isso ocorre porventura pelo fato de o perfil IPE beneficiar do fator sombra devido a sua geometria e também pelo fato desse perfil ter maior massa e portanto maior inércia térmica do que o perfil CHS.



Está presente na tabela 5.9 a comparação entre os dados analíticos do programa com os dados práticos obtidos.

**Tabela 5.9 – Resumo dos dados obtidos com a curva ISO 834**

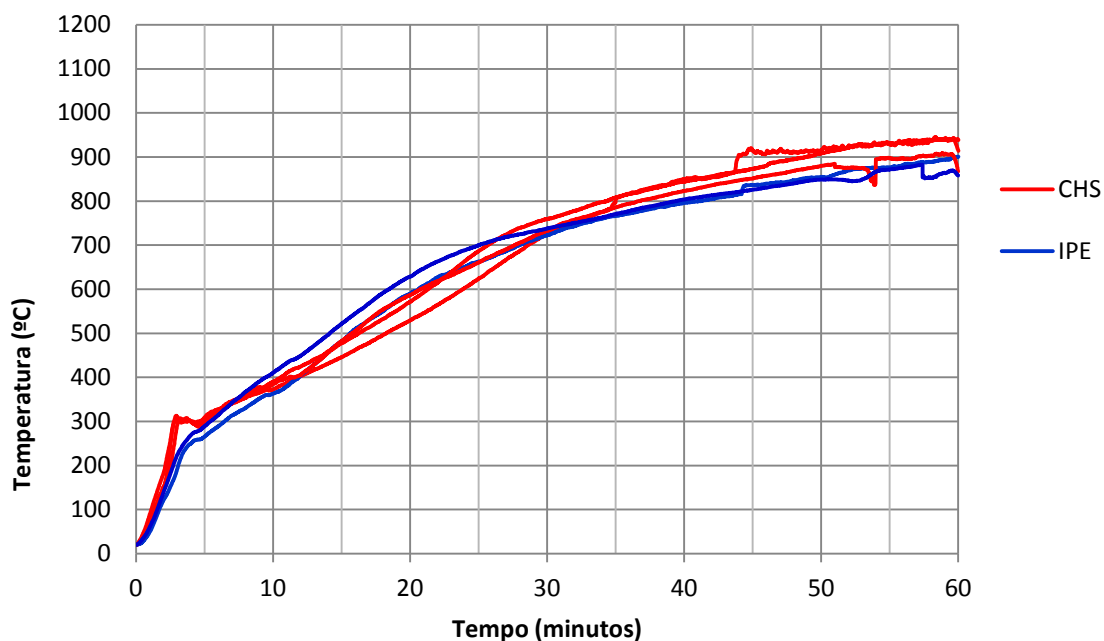
ISO 834						
	Analisado	1º ensaio	2º ensaio	5º ensaio	média	S/ prot.
CHS	500°C	17 min	11,35 min	10,72 min	13,02 min	7,9 min
	30 min	750 °C	773,90 °C	771,34 °C	765,08 °C	832 °C
IPE	500°C		14,74 min	14,83 min	14,79 min	9,4 min
	30 min		743,93 °C	740,00 °C	741,97 °C	821 °C

Dos ensaios realizados com a curva de incêndio ISO 834, verifica-se que os perfis IPE 220, apresentaram um melhor comportamento ao fogo do que os perfis CHS 139,7x4. A temperatura de 500°C foi atingida nos perfis CHS para um tempo inferior relativamente ao que aconteceu nos perfis IPE e verifica-se que ao fim de 30 minutos de ensaio a temperatura nos perfis de secção fechada era superior a temperatura medida nos perfis de secção aberta.

Comparando os dados práticos obtidos através dos ensaios, com proteção, com os dados analíticos, sem proteção, obtidos no programa ELFIR-EN, verifica-se que a tinta intumescente acrescentou proteção aos perfis embora essa proteção não tenha sido muito significativa, pelo que se concluiu que a mesma não ofereceu o nível de proteção desejado.

Recolhendo os dados de todos os ensaios efetuados com a curva ISO 834 e usando apenas os termopares que verificaram as temperaturas mais baixas, obteve-se o gráfico da figura 5.54.

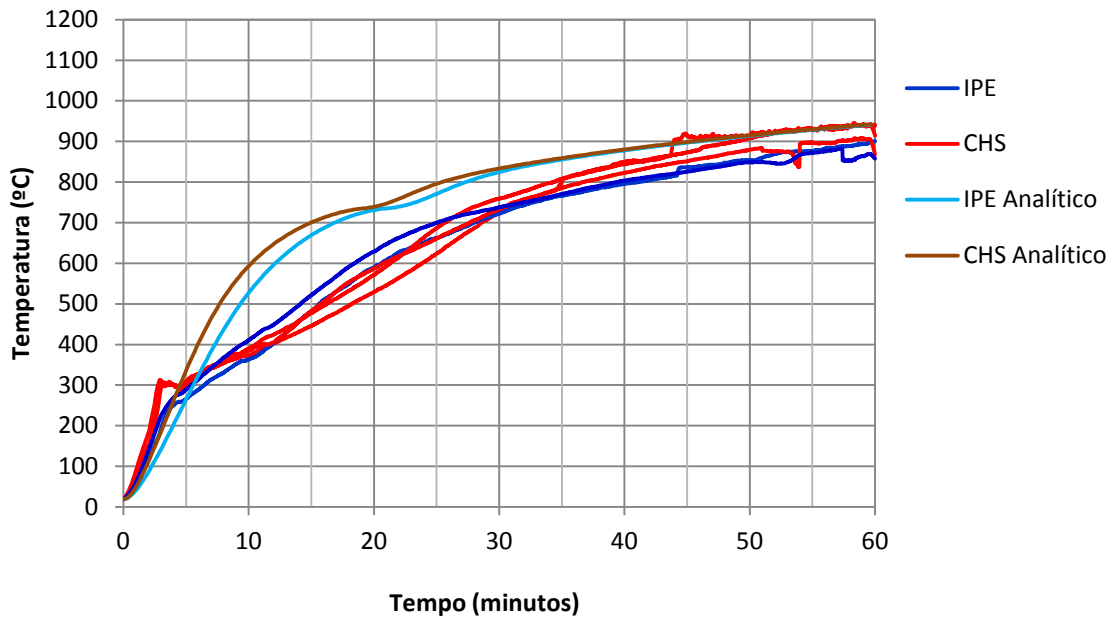




**Figura 5.54 - Comparação entre os termopares de temperaturas mais baixas**

Verifica-se que a temperatura registada inicialmente foi superior nos perfis CHS. Entre os 15 e os 27 minutos foram os perfis IPE que registaram as temperaturas mais elevadas, sendo a partir desse tempo (27 minutos), foram novamente os perfis CHS a terem efetuados o registo de temperaturas mais elevadas. Não se evidencia facilmente qual dos perfis tenha obtido um comportamento ao fogo superior. Os perfis IPE aparentam ter atingido a temperatura de 500°C antes do que os perfis CHS e verifica-se que aos 30 minutos de ensaio, as temperaturas dos perfis são relativamente iguais, ocorrendo no entanto uma inflexão de comportamento a partir desse ponto, isto é, os perfis CHS registam temperaturas mais elevadas do que os perfis IPE, até ao final do ensaio. As temperaturas mais elevadas são registadas pelos perfis CHS.

Verifica-se através da análise das temperaturas mais baixas, que os perfis tiveram um comportamento diferente, não se evidenciando no entanto nenhum caso mais favorável.



**Figura 5.55 - Comparação entre dados práticos e analíticos**

A temperatura inicial de ensaio foi ligeiramente superior a temperatura que teoricamente se observaria, pelo que as temperaturas observadas no início dos ensaios são superiores as temperaturas que teoricamente se observariam nos perfis caso esses não estivessem providos de proteção.

Verificando qual a diferença de comportamento entre os perfis com e sem proteção verifica-se que o efeito da tinta intumescente, aquando da sua primeira reação (entre os 200°C e os 300°C), foi bastante notório, tendo havia uma drástica diferenciação de comportamento nesse momento. Na segunda fase de reação da tinta intumescente ( $\approx$  700°C) verifica-se um decréscimo do aumento da temperatura tanto nos dados analíticos como nos práticos, o que leva a concluir que o efeito do aumento do calor específico do aço aos 740°C terá influenciado mais significativamente esse comportamento do que o desencadear da segunda fase de reação da tinta intumescente.

Nos dados analíticos o perfil CHS apresenta um pior comportamento ao fogo do que o perfil IPE, já nos dados práticos nada se pode concluir.

Em termos de valores médios, o perfil IPE apresenta um comportamento melhor do que o perfil CHS.

### 5.14.2 Comparação dos ensaios com a curva de incêndio natural

Através do programa ELEFIR-EN e usando como curva de incêndio a curva de incêndio natural registada no forno para ambos os perfis, obteve-se o gráfico da figura 5.56.

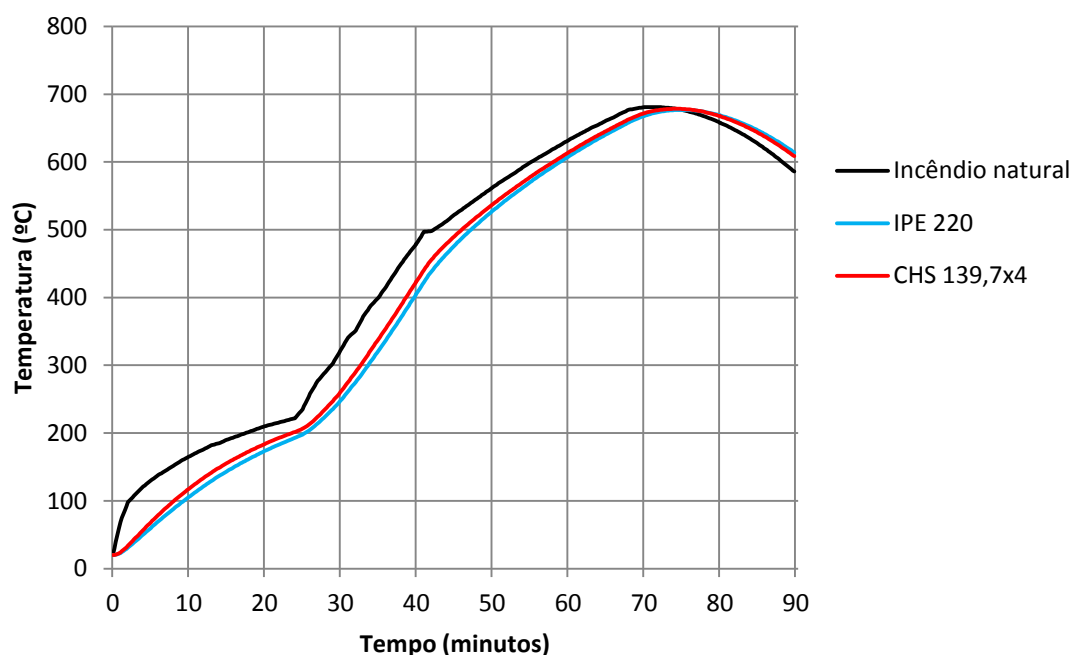


Figura 5.56 - Gráfico obtido com o programa ELEFIR-EN para a curva de incêndio natural

Para a curva de incêndio natural real registada nos ensaios sem proteção nos perfis, os dados analíticos apontam para que o perfil IPE 220 tenha um comportamento ao fogo ligeiramente melhor do que o perfil CHS 139,7x4. A diferença de comportamentos é bastante inferior ao obtido com a curva de incêndio ISO 834, porque as temperaturas aqui registadas são mais baixas.

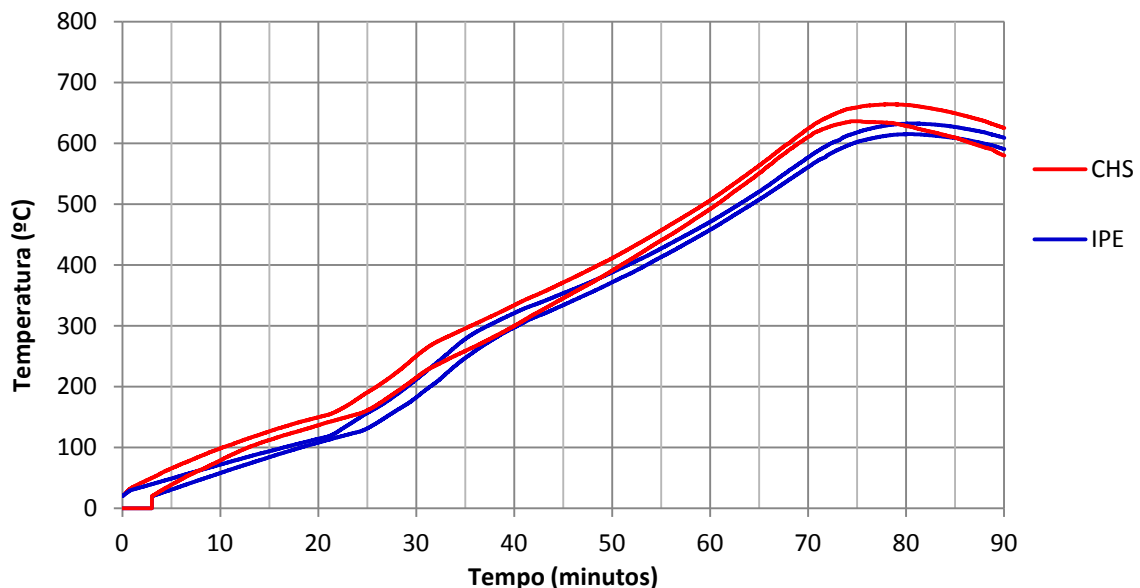
Tabela 5.10 - Resumo dos dados obtidos com a curva de incêndio natural

Curva de Incêndio natural					
	Analisado	3º ensaio	4º ensaio	média	S/ prot.
CHS	500°C	60 min	58 min	59 min	46 min
	30 min	220°C	280°C	250°C	260,52°C
IPE	500°C	63 min	58 min	60,5 min	47 min
	30 min	200°C	280°C	240°C	247,78°C

Dos ensaios realizados com a curva de incêndio natural, conclui-se o mesmo que no ponto anterior, os perfis IPE 220 tiveram um comportamento ligeiramente melhor do que os perfis CHS 139,7x4 relativamente ao comportamento ao fogo. A temperatura de 500°C foi atingida nos perfis CHS para um tempo inferior ao que aconteceu nos perfis IPE e verifica-se que ao fim de 30 minutos de ensaio a temperatura nos tubos era superior à temperatura medida nos perfis de secção aberta.

Verifica-se para o tempo de 30 minutos que as temperaturas registadas nos perfis são ligeiramente inferiores as temperaturas analíticas sem proteção e que o perfil IPE 220 apresenta uma temperatura inferior à do perfil CHS 139,7x4.

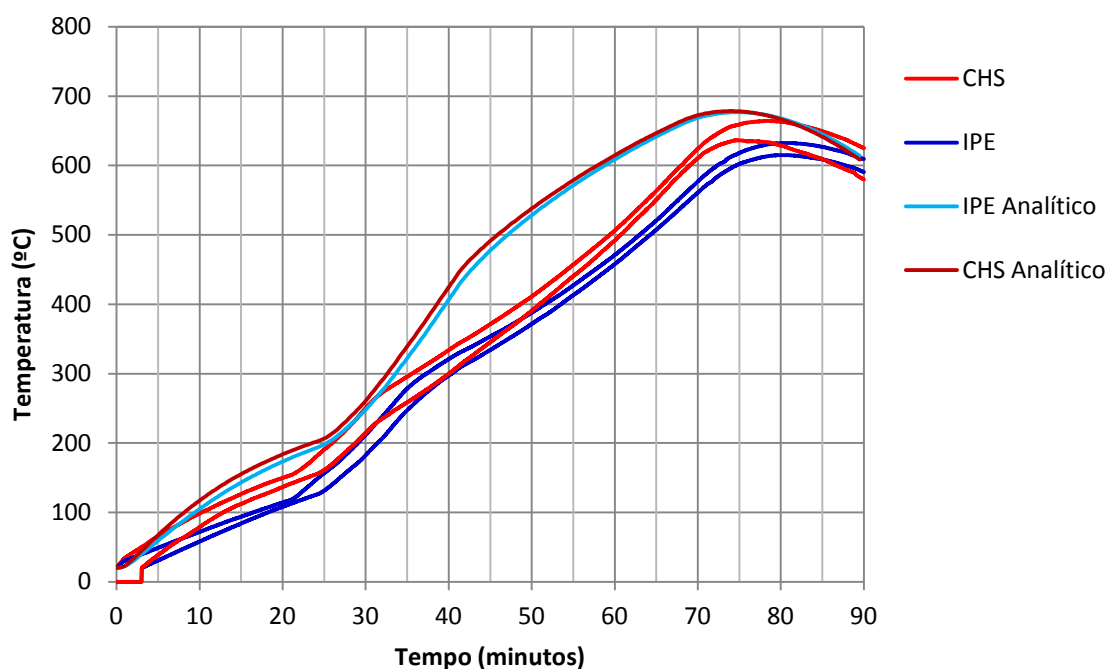
Usando como termo de comparação o das temperaturas mais baixas registadas, obtém-se o gráfico da figura 5.57.



**Figura 5.57 - Comparação entre os termopares de temperaturas mais baixas**

Com este método de comparação verifica-se o mesmo que no método dos valores médios. O perfil CHS apresenta temperaturas mais elevadas do que o perfil IPE, tendo inclusive atingido a temperatura de 500°C primeiro em ambos os ensaios. Conclui-se portanto que mais uma vez, para a esta curva de incêndio natural e com esta tinta intumescente, o perfil IPE demonstra ter tido um melhor comportamento ao fogo do que o perfil CHS.

Comparando agora, os dados analíticos com os dados práticos obteve-se o gráfico da figura 5.58.



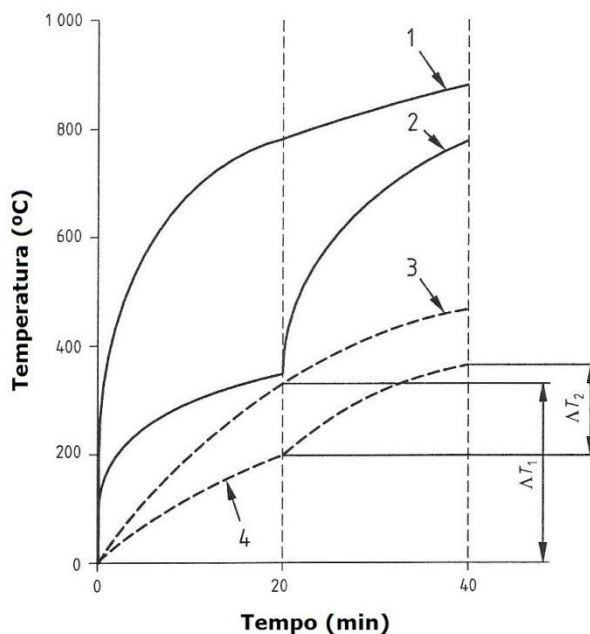
**Figura 5.58 - Comparação entre dados práticos e analíticos**

Verifica-se aproximadamente aos 300°C uma diminuição no incremento de temperatura por parte dos valores práticos obtidos, e verifica-se ainda que a temperatura de 500°C foi atingida mais tardiamente nos ensaios práticos. A temperatura de 500°C sem proteção seria alcançada aos 46 minutos de ensaio, tendo sido retardada para os 60 minutos no caso do perfil CHS e para os 63 minutos no caso do perfil IPE. Apesar de a temperatura no forno ter sido superior a curva de incêndio natural inicialmente prevista, o que favorece o desenvolvimento do intumescente, a proteção daí resultante foi no entanto reduzida. Para ambos os métodos analisados, conclui-se que o perfil IPE 220 teve um melhor comportamento ao fogo do que o perfil CHS 139,7x4.

### 5.14.3 Dados retirados do ensaio com a curva de aquecimento lento

Segundo a norma EN13381-8:2010 para poder aferir sobre a validade dos dados retirados da curva ISO 834 e da curva de aquecimento lento, para ensaios em que ambas tenham sido usadas, deve verificar-se o seguinte critério para cada termopar, soldado na mesma posição que outro com curva de aquecimento diferente (figura 5.59):

- $\Delta T_1 > \Delta T_2$



- 1 – Curva de incêndio ISO 834
- 2 – Curva de aquecimento lento
- 3 – Temperatura do elemento sujeito a curva ISO 834
- 4 – Temperatura do elemento sujeito a curva de aquecimento lento

Figura 5.59 – Método de avaliação da validade dos ensaios (EN13381-8)

Visto que para o caso da curva de aquecimento lento apenas se ter efetuado um ensaio e que desse apenas os termopares T26 e T30 terem registros de valores para o tempo de ensaio de 20 minutos, apenas se utilizou a aplicabilidade do critério para esses dois termopares.

O termopar T26 estava na mesma posição dos termopares T24 para o ensaio 2 e T21 para o ensaio 5, todos eles pertencentes a perfis IPE 220.

A comparação gráfica para esses termopares pode ver-se de seguida.

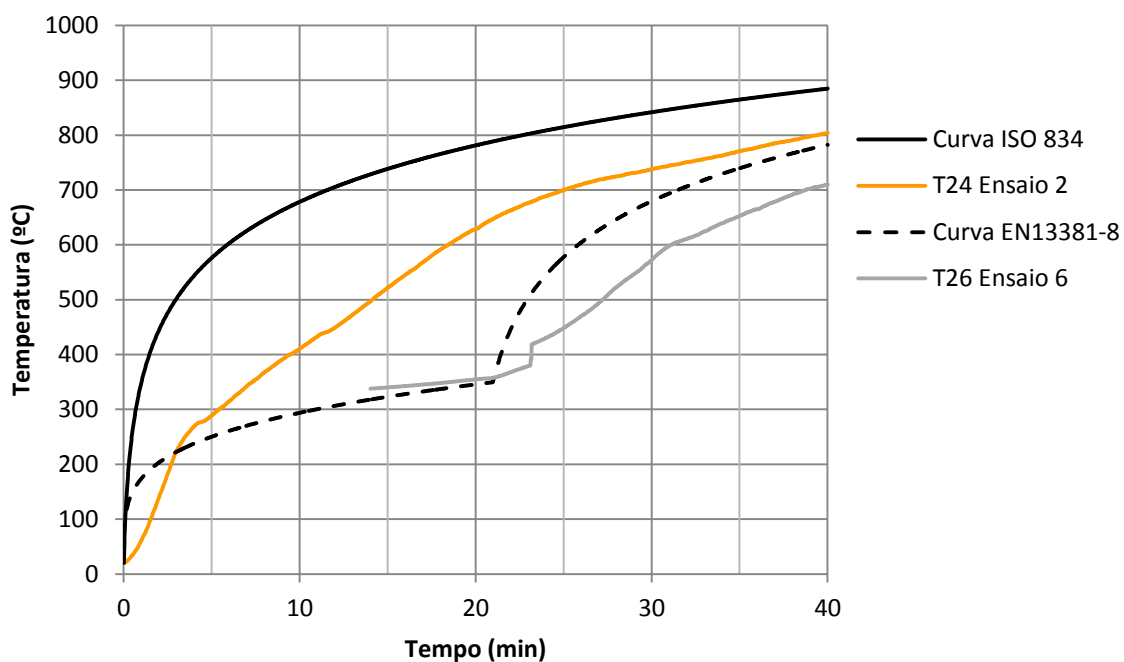


Figura 5.60 – Avaliação da validade dos termopares T24-Ensaio2 e T26 para perfil IPE

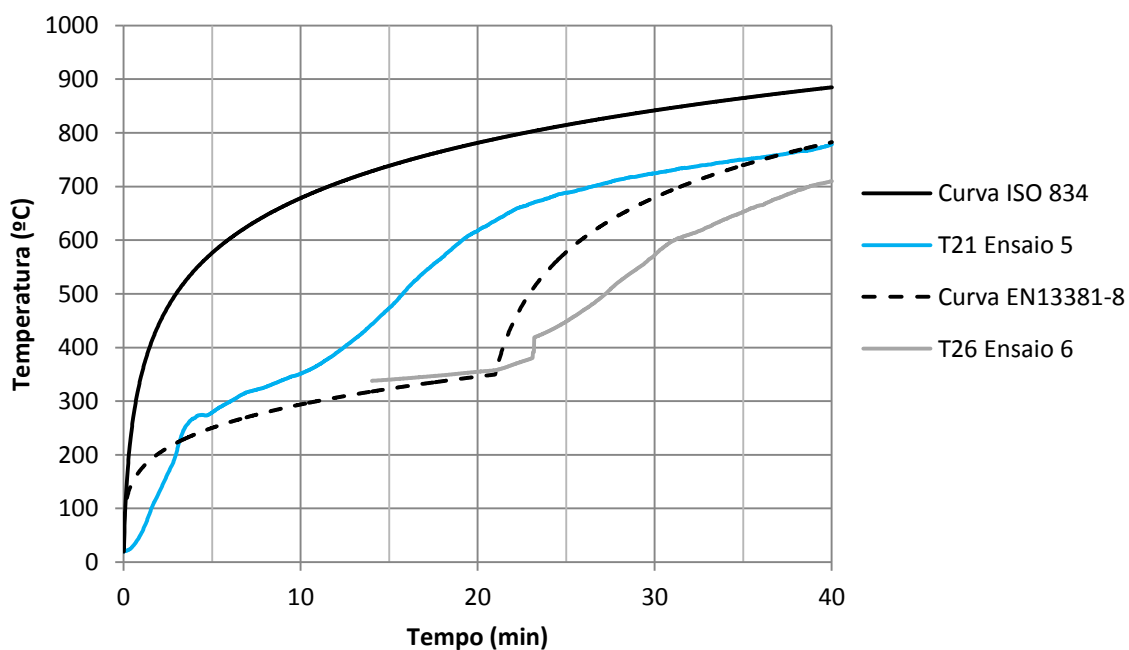


Figura 5.61 – Avaliação da validade dos termopares T21-Ensaio5 e T26 para perfil IPE

Para o caso dos termopares T24 e T21, dos ensaios 2 e 5 respectivamente, o valor de  $\Delta T_1$  é coincidente com o valor registado nos 20 minutos de ensaio. Para o caso do valor de  $\Delta T_2$ , esse é obtido efetuando a subtração do tempo que o termopar T26 registou aos 40 minutos pelo tempo registado aos 20 minutos.

**Tabela 5.11 – Avaliação para perfil IPE 220**

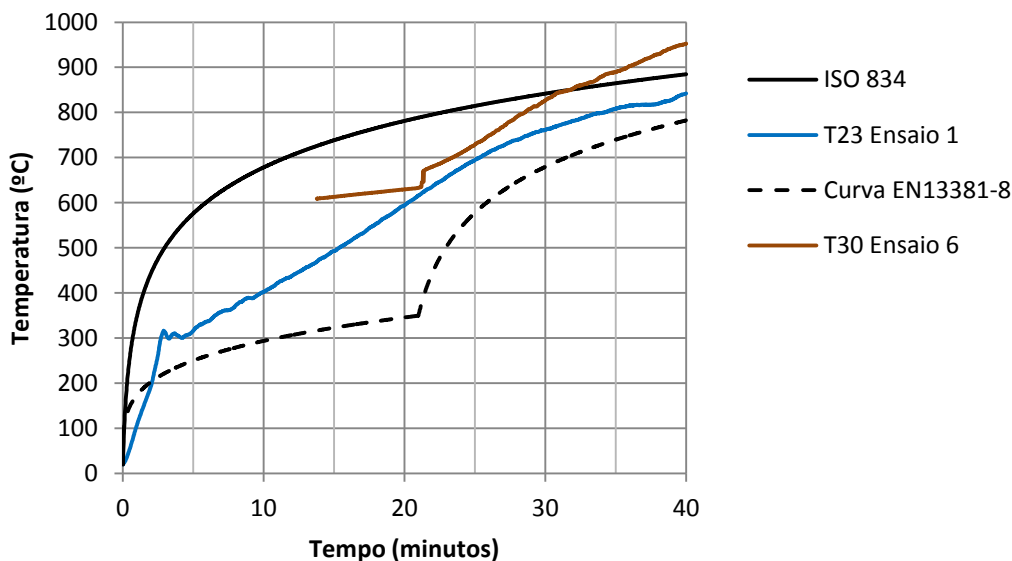
	T26-E6	T24-E2	T21-E5
20 min	354,73°C	628,71°C	617,57°C
40 min	709,81°C		
$\Delta T_2$	355,08 °C		

Os gráficos das figuras 5.60 e 5.61, apresentam temperaturas acima das curvas de incêndio, o que não acontece no modelo teórico. Isso não impede no entanto de efetuar a verificação  $\Delta T_1 > \Delta T_2$ .

Verifica-se pela tabela 5.11, que para ambos os casos  $\Delta T_1 > \Delta T_2$ , logo consideram-se validados os valores das medições efetuadas por esses termopares.

Efetuuou-se também a verificação de validade para o caso do termopar T30, do perfil CHS.

Os termopares da mesma posição que o T30 são o T23 para o ensaio 1 e T22 para o ensaio 2 e T22 para o ensaio 5. A comparação gráfica para esses termopares pode ver-se de seguida.



**Figura 5.62 - Avaliação da validade dos termopares T23-Ensaio1 e T30 para perfil CHS**



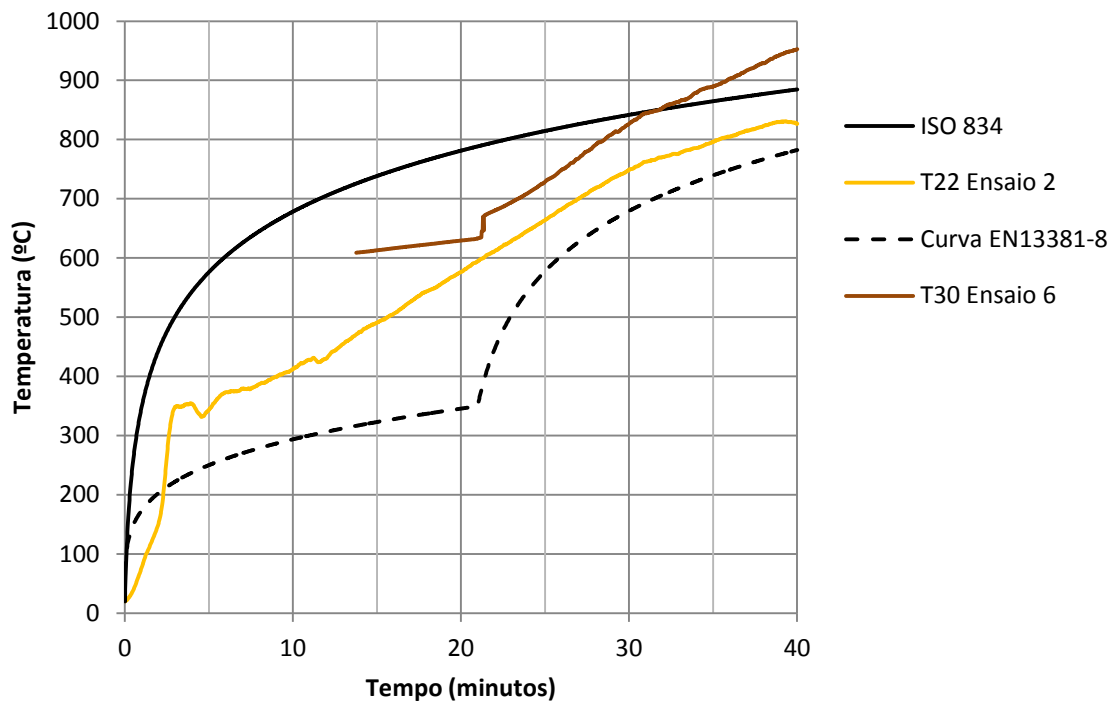


Figura 5.63 - Avaliação da validade dos termopares T22-Ensaio2 e T30 para perfil CHS

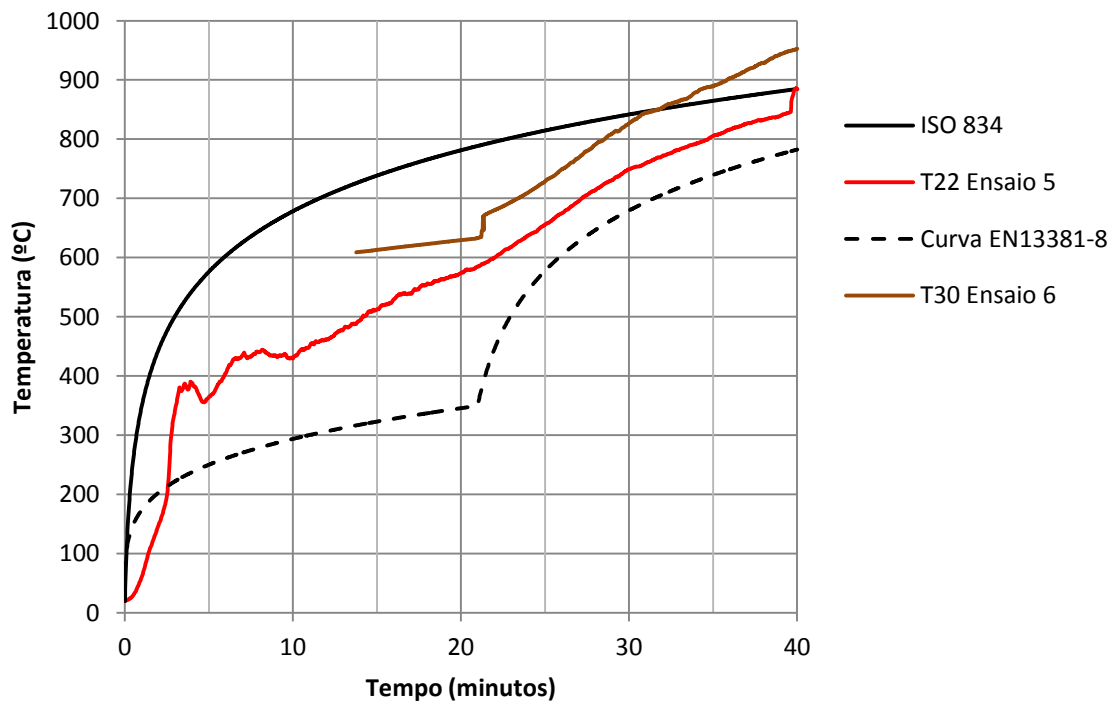


Figura 5.64 - Avaliação da validade dos termopares T22-Ensaio5 e T30 para perfil CHS

**Tabela 5.12 – Avaliação para perfil CHS 139,7x4**

	T30 E6	T23 E1	T22 E2	T22 E5
20 min	629,50°C	594,34°C	576,68°C	574,25°C
40 min	952,88°C			
$\Delta T2$	323,38°C			

Verifica-se pela tabela 5.12, que para os três casos  $\Delta T1 > \Delta T2$ , logo consideram-se validados os valores dos acréscimos de temperatura efetuados dos 20 aos 40 minutos pelo termopar T30, pois há que ter em consideração que as temperaturas registadas no início do ensaio por esse termopar terem sido superiores ao normal, efeito esse proveniente de erros de medição iniciais realçados nesta confirmação de validade do dados finais. Este teste vem validar também os dados efetuados pelos termopares T23 ensaio 1, T22 ensaio 2 e T22 ensaio 5.

Apesar de não se ter podido aferir sobre a validados de alguns termopares, os dados recolhidos no ensaio 6 não permitem concluir qual dos perfis tenha tido melhor comportamento ao fogo com a curva de aquecimento lento.

Pode-se hipoteticamente aferir sobre qual dos perfis tenha tido melhor comportamento ao fogo, pois verifica-se que o  $\Delta T2=355,08^\circ\text{C}$  do perfil IPE é superior ao  $\Delta T2=323,38^\circ\text{C}$  do perfil CHS, pelo que se se verificar a tendência observada nos outros ensaios, em que os termopares do perfil CHS no final do ensaio apresentam, no geral, temperaturas superiores ou iguais às dos termopares do perfil IPE, facilmente se verifica que como o  $\Delta T2$  do perfil IPE é superior, a temperatura observada aos 20 minutos no perfil IPE seria inferior a observada no perfil CHS, logo o perfil IPE terá registado temperaturas inferiores ao perfil CHS ao longo de todo o ensaio, tendo tido assim um melhor comportamento ao fogo.

## Capítulo 6 – Conclusões

### 6.1 Considerações finais

O presente estudo teve como principal objetivo efetuar uma comparação do comportamento ao fogo entre perfis de seção aberta e perfis de seção fechada com um elemento de proteção passiva ao fogo.

Foram escolhidos perfis de massividades semelhantes, o perfil IPE 220 ( $254\text{m}^{-1}$ ) como perfil de seção aberta e o perfil CHS 139,7x4 ( $257\text{m}^{-1}$ ) como perfil de seção fechada.

Foi usado como elemento de proteção passiva ao fogo, tinta intumescente por ser de fácil aplicação em perfis tubulares. Os perfis foram pintados para uma temperatura crítica de  $500^{\circ}\text{C}$  e uma resistência de R30, o que equivaleu a espessuras de proteção de  $465\mu\text{m}$  para os perfis IPE 220 e espessuras de  $580\mu\text{m}$  para os perfis CHS 139,7x4, segundo as tabelas do fabricante.

Foram efetuados ensaios nos perfis, com a curva de incêndio ISO 834, com uma curva de incêndio natural e com a curva de aquecimento lento descrita na norma EN13381-8.

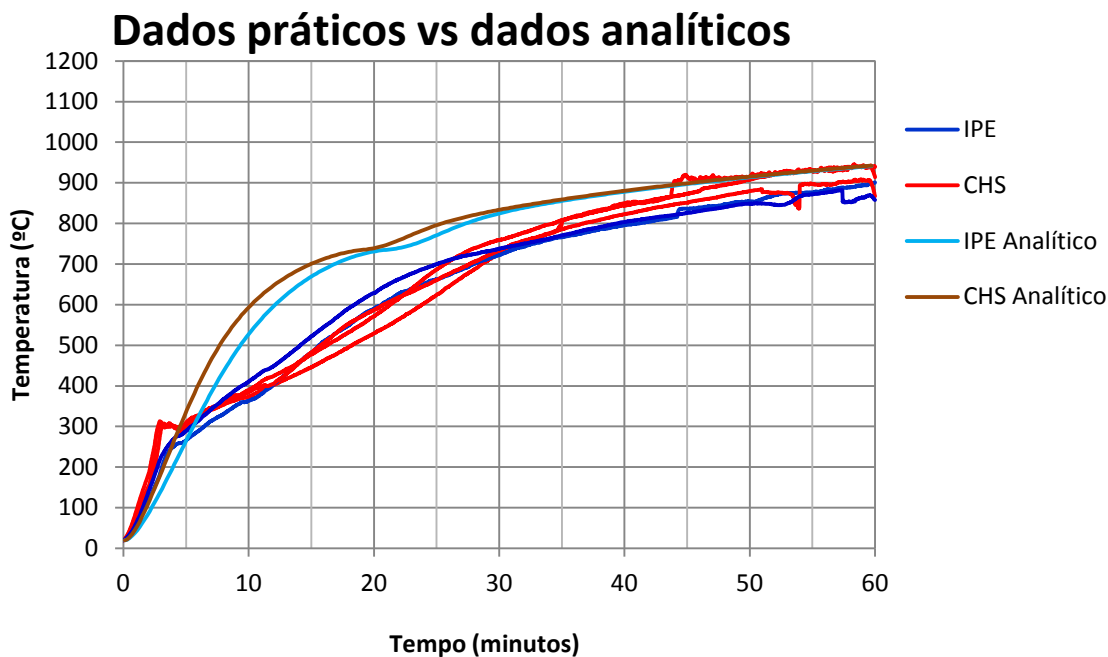
Foram analisados e comparados os dados médios obtidos, bem como as temperaturas mais baixas registadas nesses ensaios. Esses dados foram ainda comparados com dados analíticos vindos do programa EFEFIR-EN, desenvolvido na Universidade de Aveiro, por forma a se poder aferir sobre a real proteção fornecida pela tinta intumescente.

**Tabela 6.1 – Resumo dos dados médios obtidos com a curva ISO 834**

Curva ISO 834						
	Analisado	1º ensaio	2º ensaio	5º ensaio	média	S/ prot.
CHS	500°C	17 min	11,35 min	10,72 min	13,02 min	7,9 min
	30 min	750 °C	773,90 °C	771,34 °C	765,08 °C	832 °C
IPE	500°C		14,74 min	14,83 min	14,79 min	9,4 min
	30 min		743,93 °C	740,00 °C	741,97 °C	821 °C

Através da análise dos dados médios obtidos nos ensaios usando a curva ISO 834 (tabela 6.1), verificou-se que o perfil CHS atingiu a temperatura de  $500^{\circ}\text{C}$  para um tempo

inferior comparativamente com o perfil IPE, e que ao fim de 30 minutos de ensaio, a temperatura média medida nos perfis era superior no caso do perfil CHS. Chegou-se portanto a conclusão que para a curva ISO 834 e com a tinta intumescente oferecida o perfil CHS 139,7x4 apresentou um pior desempenho ao fogo do que o perfil IPE 220. Relativamente ao efeito da tinta, verificou-se que a mesma não forneceu o acréscimo de proteção desejado (R30 para 500°C).



**Figura 6.1 - Comparação entre os termopares de temperaturas mais baixas e programa ELEFIR-EN para a curva ISO 834**

Analisando as temperaturas dos termopares que obtiveram as temperaturas mais baixas (figura 6.1), verificou-se que o perfil CHS no final dos ensaios obteve medições de temperatura superiores às do perfil IPE. A temperatura de 500°C foi alcançada primeiro pelos perfis IPE, e que aos 30 minutos de ensaio as temperaturas eram bastante uniformes, pelo que não se conseguiu distinguir qual dos perfis tenha tido melhor comportamento ao fogo com base neste método de análise, para esta curva de ensaio.

Foram analisados os ensaios efetuados com a curva de incêndio natural (tabela 6.2).

Tabela 6.2 - Resumo dos dados obtidos com a curva de incêndio natural

Curva de Incêndio natural					
	Analisado	3º ensaio	4º ensaio	média	S/ prot.
CHS	500°C	60 min	58 min	59 min	46 min
	30 min	220°C	280°C	250°C	247,78°C
IPE	500°C	63 min	58 min	60,5 min	47 min
	30 min	200°C	280°C	240°C	260,52°C

Para essa curva de incêndio, verificou-se que o perfil CHS atingiu a temperatura de 500°C para um tempo inferior ao perfil IPE e que ao fim de 30 minutos de ensaio a temperatura no perfil CHS era superior à do perfil IPE. Conclui-se portanto que para esta curva de ensaio e para os perfis ensaiados nestas condições, o perfil IPE 220, apresentou um melhor comportamento ao fogo do que o perfil CHS 139,7x4.

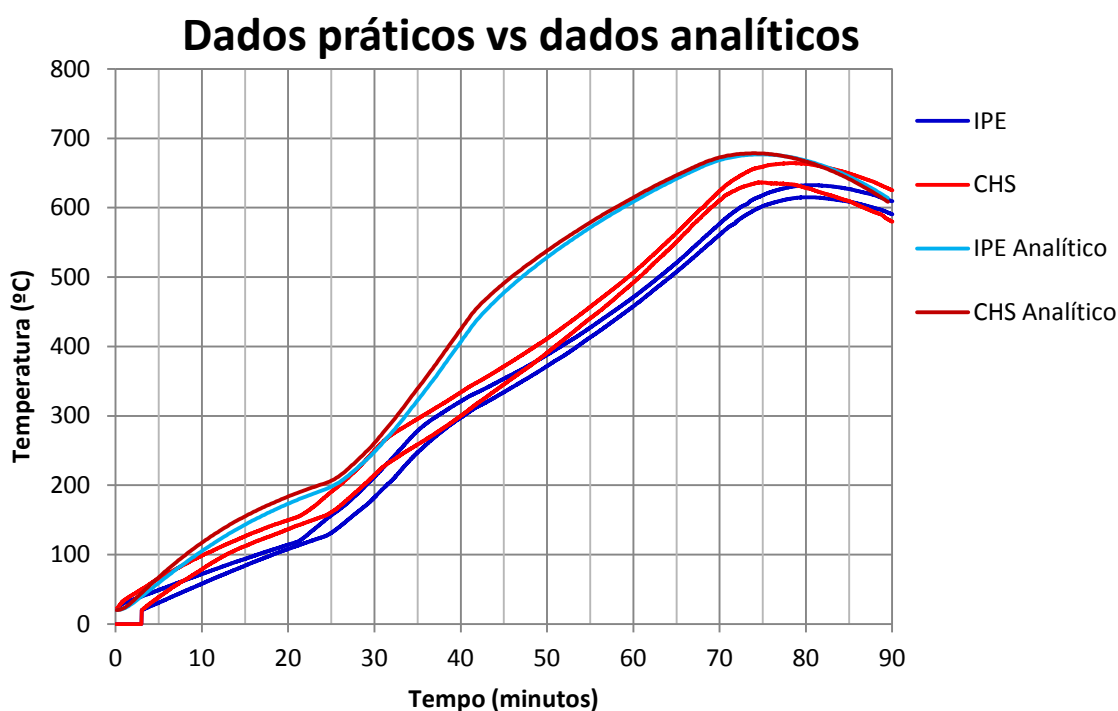


Figura 6.2 - Comparação entre os termopares de temperaturas mais baixas e programa ELEFIR-EN para a curva de aquecimento lento

Analisando as temperaturas mais baixas registadas em cada perfil, verificou-se que o perfil CHS apresentou as temperaturas mais altas ao longo de todo o ensaio (figura 6.2),

a temperatura de 500°C foi atingida primeiro nesses perfis e ao fim dos 30 minutos de ensaio eram também esses perfis que apresentavam maiores temperaturas registradas. Conclui-se portanto que para esta curva de incêndio natural ensaiada nestas condições, o perfil IPE 220, apresentou melhor comportamento ao fogo do que o perfil CHS 139,7x4. Verifica-se que o aumento de proteção oferecido pela tinta intumescente foi reduzido.

Foi realizado um ensaio com a curva de aquecimento lento, que no entanto não correu como previsto, pelo que o que se retirou desse ensaio foi uma conclusão baseada na hipótese de se ter verificado o mesmo comportamento que nos outros ensaios, isto é, o perfil CHS tenha obtido temperaturas iguais ou superiores ao perfil IPE no final do ensaio. Baseado nessa hipótese e como a diferença de temperatura entre o instante  $t=20$  min, e  $t=40$  min era superior no perfil IPE, conclui-se que para o instante  $t=20$  min, o perfil IPE tenha obtido temperaturas inferiores às do perfil CHS, logo temperaturas inferiores ao longo de todo o ensaio e assim tenha apresentado um melhor comportamento ao fogo do que o perfil CHS 139,7x4.

Pelo fato de se verificar uma menor desaceleração do incremento de temperaturas nos ensaios com a curva de incêndio ISO 834 do que nos ensaios com a curva de incêndio natural, aquando da ocorrência da primeira fase de reação da tinta intumescente, conclui-se que o desenvolvimento da intumescência depende do fluxo de calor inicial incidente (Piloto P. A. G. s.d.).

## **6.2 Considerações futuras**

Nesta tese efetuou-se a comparação do comportamento ao fogo entre perfis IPE 220 e perfis CHS 139,7x4 pintados com tinta intumescente de marca desconhecida para uma temperatura crítica de 500°C e uma resistência R30. Considera-se que mais ensaios devem ser realizados para melhor aferir sobre a real diferença de comportamento entre os perfis de secção aberta e os de secção fechada relativamente ao seu comportamento ao fogo.

Devem ser realizados ensaios com perfis de massividade iguais mas com diferentes elementos de proteção passiva, devem também ser ensaiados perfis com massividades iguais, sistemas de proteção iguais mas com resistências e temperaturas críticas

diferentes, isto é, perfis com espessuras de proteção diferentes. Esses ensaios devem ser realizados com diferentes curvas de incêndio.

Devem também ser realizados ensaios nas condições acima referidas para perfis sujeitos a esforços de tração, compressão, flexão, torção e efeitos combinados.





---

## Bibliografia

A. Correia dos Reis, M. Brazão Farinha, J. P. Brazão Farinha. *Tabelas Técnicas*. Edições Técnicas E.T.L., 2006.

Cachim, Paulo Barreto. *Construções em Madeira, A madeira como material de construção*. Publindústria.

CIN. *Tinta intumescente de alta espessura "7H-960 C-THERM HB"* BOLETIM TÉCNICO, 2009.

Ellobody, Ehab. *Buckling analysis of high strength stainless steel stiffened and unstiffened slender hollow section columns*. 2006.

EN-13381-8. *Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members*. Bruxelas: CEN, 2010.

EN-13501-2. *Clasificación de los productos de construcción y de los elementos constructivos en función de su comportamiento ante el fuego*. 2004.

EN-1363-1. *Ensayos de resistencia al fuego*. Madrid: AENOR, 2000.

EN-1993-1-2. *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*. 1995.

EN-23820. *Método de ensayo para determinar la contribución a la resistencia al fuego de los elementos estructurales, mediante la aplicación de protección a los elementos estructurales en acero*. 1997.

Han, Zhidong, Alberto Fina, Giulio Malucelli, and Giovanni Camino. *Testing fire protective properties of intumescent coatings by in-line temperature measurements on a cone calorimeter*. Harbin, 2010.

ICT. *Proteccion de estructuras tubulares ante incendio mediante pinturas intumescentes*. Artículo técnico nº1, 2010.

Jimmy Haedir, Xiao-Ling Zhao. *Design of CFRP-strengthened steel CHS tubular beams*. Australia: Journal of Constructional Steel Research, 2012.

Mesquita, Paulo Piloto, Vaz, Paulo Vila Real, and F. Ramos. *Comportamento de vigas em aço protegidas com tinta intumescente*. V Congresso de construção metálica e mista, 2009.

Pereira, Sérgio Bouça. *Determinação experimental da resistência ao fogo de produtos de construção*. Bolsa de Integração na Investigação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil: Laboratório da Tecnologia do Betão e do Comportamento.

Piloto P. A. G., Mesquita L.M.R., Vaz M. A. P., Pinto T. "Determinação da condutividade térmica efectiva de tintas intumescentes."

Silva, Arlete Costa. *Ensaio de resistência ao fogo de elementos de compartimentação*. Aveiro, 2008.

Silva, Gustavo Monteiro da. *Termopares, Dispositivos utilizados para medir temperatura*. Setúbal: Escola Superior de Tecnologia.

Silvestre, Nuno. *Do Comportamento à regulamentação europeia das estruturas de aço enformado a frio*. Concreta-Exponor, 2009.

STIONA, Steel Tube Institute of North America. *Hollow structural sections dimensions and section properties*. Glenview. 2010.

University of Liege, *Ozone V.2.2.6*, 2009.

Vila Real, Paulo. *Incêndio em estruturas metálicas: Cálculo Estrutural*. Orion, 2003.

Vila Real, P.M.M., Franssen, J.-M. *Elefir-EN*, 2010.

---

Williams, Jim. *Thermocouple measurement*. Application note 28: Linear Technology, 1988.

Zattoni, Carlos. *Perfis metálicos e laminados planos*. 2008.