



Estudo Experimental do Comportamento de Elementos em Aço Protegidos com Tinta Intumescente em Condições de Incêndio

Sérgio Paulo Pereira de Almeida Roque

Relatório Final de Projecto apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia da Construção

Orientador:

Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Setembro de 2011

Aos meus pais e à Cátia Moreira.

Agradecimentos

Quero agradecer aos meus pais pelo trabalho, apoio e incentivo desenvolvido durante os meus estudos e felicita-los pelo sucesso conseguido.

Saliento o apoio e a dedicação da minha namorada Cátia Moreira e a toda a sua família (pais e irmã).

Os meus sinceros agradecimentos ao Prof. Doutor Paulo Piloto, pelo seu apoio, força e dedicação, que sempre ofereceu durante a realização deste trabalho.

Agradeço também ao Prof. Luís Mesquita, pela sua ajuda na realização dos ensaios e na interpretação dos resultados.

Agradeço aos técnicos de laboratório da ESTIG – IPB que me auxiliaram nas mais diversas tarefas: Eng^a. Luísa, Eng^o. Meireles, Sr. Octávio, Sr. João e Eng^o. Abílio.

Ao Prof. Doutor Manuel Minhoto, por ter incentivado e apresentado esta possibilidade, acompanhando indirectamente os trabalhos.

Por fim agradeço à ESTIG-IPB pelas facilidades concedidas.

Agradeço às empresas CIN, J. Soares Correia e ArcelorMittal pela cedência do material utilizado.

Agradeço o apoio da FCT pela bolsa de investigação integrada no projecto de investigação PTDC/EME-PME/64913/2006.

Não esqueço todos aqueles que, directamente e indirectamente, estiveram envolvidos neste trabalho.

“Estudo Experimental do Comportamento de Elementos em Aço Protegidos com Tinta Intumescente em Condições de Incêndio”

por

Sérgio Paulo Pereira de Almeida Roque

Relatório Final de Projecto apresentado à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia da Construção

Trabalho realizado sob a orientação de
Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Resumo

Este relatório apresenta o trabalho desenvolvido no âmbito de uma tese de mestrado em Engenharia da Construção, incluído num projecto de investigação PTDC/EME-PME/64913/2006, apoiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

A motivação desta investigação experimental está relacionada com a necessidade de definir e conhecer o comportamento da protecção passiva de tinta intumescente, de elementos e estruturas metálicas, definir um método simplificado de cálculo para protecções reactivas e ainda produzir dados essenciais para a calibração e ou validação de novos métodos simplificados e avançados de cálculo.

Foram previstas quatro séries de testes, com 52 ensaios em perfis metálicos de diferentes secções (IPE, SHS, CHS e LNP). A cada secção correspondeu uma série de 13 ensaios. Em cada série foram realizados 2 ensaios à temperatura ambiente (acção mecânica incremental) e 11 ensaios de resistência ao fogo, com diferentes valores de protecção e níveis de carga

A aplicação de tinta intumescente permitiu com que todos os elementos atingissem a sua ruptura num período de tempo superior, aumentando assim a

sua capacidade de resistência ao fogo. Nos elementos de secção IPE e CHS observou-se que quanto maior a camada de protecção, maior a resistência do elemento. O mesmo não se verificou nos elementos de secção SHS, devido ao fenómeno de retracção verificado para espessuras de protecção superior. O fenómeno de retracção verificou-se ainda na maioria dos elementos com secção CHS.

Palavras-chave:

Estruturas metálicas, Resistência ao fogo, Tinta intumescente, Ensaios experimentais.

“Experimental study of steel elements behaviour protected with intumescent paint under fire conditions”

by

Sérgio Paulo Pereira de Almeida Roque

Final Project Report submitted to the School of Technology and Management,
Polytechnic Institute of Bragança, for the Master degree in Construction
Engineering

Work performed under the supervision of
Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Abstract

This report presents the work undertaken as part of a master's thesis in Construction Engineering, included in a research project PTDC/EME-PME/64913/2006, supported by the Portuguese Foundation for Science and Technology.

The motivation for this experimental research is to define and understand the behaviour of passive protection of intumescent paint, applied to steel structures and elements, define a simplified method for the design of reactive protections and produce experimental data for calibration / validation of new simplified methods and advanced calculation methods.

52 bending testes were planned with different steel cross-sections (IPE, SHS, CHS and LNP) grouped in four series. 13 tests were prepared for each cross section (series). In each series 2 tests were developed at room temperature (incremental mechanical action) and 11 fire resistance tests were developed with different level of protection and load.

The use of intumescent paint allowed higher fire resistance time for all tested elements. The fire resistance of IPE e CHS section elements increased with the level of the protection. A different behaviour was verified for the SHS due to the

“pull-back” mechanism of the intumescent layer. This “pull-back” phenomenon occurred for the most of CHS section elements.

Key words:

Steel Structures, Fire resistance, Intumescent paint, Experimental tests.

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Objectivos.....	1
1.2	Resumo dos capítulos.....	2
2	Revisão do estado da arte.....	4
3	Acção do fogo.....	8
3.1	Contexto normativo.....	9
4	Propriedades dos materiais.....	17
4.1	Aço.....	17
4.1.1	Caracterização nominal de resistência.....	17
4.1.1.1	Temperatura ambiente.....	18
4.1.1.2	Temperaturas elevadas.....	18
4.1.2	Caracterização real.....	26
4.2	Secções transversais.....	29
4.2.1	Caracterização nominal.....	29
4.2.2	Caracterização real.....	32
4.3	Tinta intumescente.....	34
5	Resistência nominal das secções e dos elementos.....	36
5.1	Classificação de secções.....	38
5.1.1	Classificação das secções em estudo.....	42
5.2	Resistência à flexão (temperatura ambiente).....	45
5.2.1	Resistência dos elementos/secções em estudo.....	56
5.3	Resistência à flexão (fogo).....	59
5.3.1	Domínio da resistência.....	59
5.3.2	Domínio da temperatura.....	62
5.3.3	Resistência dos elementos em estudo.....	65
5.4	Grau de utilização real, com características e propriedades reais.....	70
5.4.1	Exemplo prático de determinação do grau de utilização.....	71
6	Ensaaios experimentais.....	75
6.1	Enquadramento normativo.....	77
6.2	Infra-estrutura e procedimento dos ensaios.....	77
6.3	Preparação dos elementos.....	88
6.4	Resultados experimentais dos ensaios à temperatura ambiente.....	102

6.4.1	Elementos com secção IPE100.....	103
6.4.2	Elementos com secção SHS.....	105
6.4.3	Elementos com secção CHS.....	107
6.4.4	Elementos com secção LNP.	109
6.5	Resultados experimentais dos ensaios realizados ao fogo.	111
6.5.1	Elementos sem protecção.....	111
6.5.1.1	Elementos com secção IPE100.	112
6.5.1.2	Elementos com secção SHS.....	114
6.5.1.3	Elementos com secção CHS.....	117
6.5.1.4	Elementos com secção LNP.	120
6.5.2	Elementos com protecção.....	123
6.5.2.1	Elementos com secção IPE100.	123
6.5.2.2	Elementos com secção SHS.....	130
6.5.2.3	Elementos com secção CHS.....	137
6.5.2.4	Elementos com secção LNP.	144
7	Conclusões e trabalhos futuros.....	152
8	Referências bibliográficas.....	160
9	Anexo – Parte I.	A1
10	Anexo – Parte II.	A3
11	Anexo – Parte III.	A5
12	Anexo – Parte IV.....	A9
13	Anexo – Parte V.....	A11

Índice de figuras

Figura 1 – Tetraedro do fogo (Consiglio, 2010).....	8
Figura 2 – À esquerda um fogo numa lareira, à direita o incêndio do Chiado em Lisboa 1988 (Tinoni, 2007).....	9
Figura 3 – Incêndio de uma estrutura exterior no edifício em Xangai, 2010 (Safety, 2010).	12
Figura 4 – Um incêndio por hidrocarbonetos WTC NY, 2001 (Mundo, 2009).	13
Figura 5 – Os três tipos de classificação de elementos ao fogo.....	15
Figura 6 – Domínios de verificação de resistência ao fogo de elementos (Vila Real, 2003).	16
Figura 7 – Provetes durante e após a maquinação.	26
Figura 8 – Ensaios realizados de teste de resistência à tracção dos provetes.	27
Figura 9 – Propriedades dimensionais das secções para o cálculo da classe segundo EC3.	30
Figura 10 – Ferramentas de ajuda à medição das secções.	33
Figura 11 – Exemplo de um processo de intumescência, com tinta intumescente aplicada num perfil sob a acção do fogo.....	35
Figura 12 – Esquema de carga e apoios para o elemento.	36
Figura 13 – Representação genérica das secções (CENa, 2005).....	38
Figura 14 – Curvas momento-rotação para as diferentes classes de secção transversal (Vila Real, 2003).	39
Figura 15 – Estado de tensões na secção assimétrica LNP 100x50x8.	44
Figura 16 – Representação do fenómeno de encurvadura lateral verificado em 2 ensaios.	47
Figura 17 – Figura retirada do artigo de Mohri, representa um elemento da secção não paralelo aos eixos principais, (Mohri, Azrar, & Potier-Ferry, 2001).	53
Figura 18 – Secção transversal LNP 100x50x8.....	55
Figura 19 – Indicação do sistema de eixos para cálculo de “ β_u ”, de acordo com Tahair, (Tahair, 2002).....	56
Figura 20 – Secção com e sem protecção (cálculo da massividade), (Group, 2009).....	64
Figura 21 - Esquema de aplicação de carga, com dimensões do elemento e eixos.	78
Figura 22 - Apoios experimentais, (duplo à esquerda, simples à direita).	79
Figura 23 - Esquema experimental da aplicação da carga.....	79
Figura 24 - Posição dos LVDT's no elemento.	80
Figura 25 - Esquema de leitura dos deslocamentos dos LVDT's	80
Figura 26 – Cilindro acoplado dos medidores de deslocamento d e célula de carga.	81
Figura 27 – Esquema geral do ensaio.....	83
Figura 28 – Demonstração do isolamento nos apoios das extremidades.	83
Figura 29 – Sistema pronto a iniciar um ensaio ao fogo.....	84
Figura 30 - Durante um ensaio com todo o equipamento utilizado.....	85
Figura 31 – Representação de dois instantes referentes a dois ensaios C4 e I6.	85
Figura 32 – Representação do final de dois ensaios (I6 e L3), ainda com os queimadores ligados.	86
Figura 33 – Estado limite último do ensaio I3 e do ensaio S6.	86
Figura 34 - Corte e furação dos elementos.	88
Figura 35 - Posição da estação de leitura de deformações no elemento.	89
Figura 36 - Localização dos extensómetros nos elementos para as várias secções transversais.	90
Figura 37 – Elementos com extensómetros instalados.	91
Figura 38 – Material necessário à extensometria.	91
Figura 39 – Preparação da superfície para extensometria.	92
Figura 40 – Fase de colagem do extensómetro no elemento.....	92

Figura 41 – Fase de soldadura do fio no extensómetro	92
Figura 42 - Localização das secções de leitura de temperaturas no aço.....	93
Figura 43 - Localização dos sensores de temperatura (termopares) nas diferentes secções.....	94
Figura 44 – Elementos com sensores de temperaturas (termopares) instalados e protegidos.....	95
Figura 45 – Preparação do elemento para instalar os termopares.	96
Figura 46 – Soldadura dos fios termopares.	96
Figura 47 – Acondicionamento dos elementos com os termopares instalados.....	96
Figura 48 – Processo de aplicação do intumescente nos elementos.....	97
Figura 49 – Fases de pintura dos elementos (pintura, controlo dimensional e acondicionamento).	97
Figura 50 - Localização dos pontos de controlo de espessura de tinta nas várias secções.	98
Figura 51 – Observação do controlo dimensional da espessura de tinta nos elementos.....	98
Figura 52 – Leitura da imperfeição geométrica de cada elemento.....	101
Figura 53 – Deformação final dos elementos I1 e I2.....	104
Figura 54 – Deformação resultante da ruptura nos ensaios S1 e S2.....	106
Figura 55 – Deformação provocada aos ensaios C1 e C2.....	108
Figura 56 – Deformação imposta aos ensaios L1 e L2.	110
Figura 57 - Deformação imposta nos elementos IPE em condições de incêndio, sem protecção.	114
Figura 58 - Deformação imposta aos elementos de secção SHS ao fogo, sem protecção.....	116
Figura 59 – Deformação imposta aos elementos de secção CHS, ensaiados ao fogo sem protecção.	119
Figura 60 - Deformação imposta aos elementos LNP em ambiente de fogo, sem protecção.....	122
Figura 61 – Reunião final de todos os elementos testados, incluindo os seus responsáveis.	158

Índice de gráficos

Gráfico 1 – Curvas de incêndio nominais.	11
Gráfico 2 – Representação dos valores para a redução das propriedades do aço a temperaturas elevadas.	20
Gráfico 3 – Relação tensão-extensão do aço ao carbono para situação de incêndio, sem endurecimento.	22
Gráfico 4 – Relação tensão-extensão para o aço ao carbono em condições de incêndio, considerando a fase de endurecimento.	23
Gráfico 5 – Relação tensão-extensão para diferentes temperaturas, considerando a fase de endurecimento.	23
Gráfico 6 – Evolução da extensão térmica do aço com a variação da temperatura.	24
Gráfico 7 – Evolução do calor específico do aço, com a variação da temperatura.	25
Gráfico 8 – Evolução da condutibilidade térmica com a variação da temperatura no aço.	26
Gráfico 9 – Agrupamento dos gráficos força / extensão, nos ensaios aos provetes de aço.	28
Gráfico 10 – Comparação entre curvas de encurvadura lateral.	49
Gráfico 11 – Relação entre resistência nominal dos elementos ao fogo e a sua temperatura crítica.	68
Gráfico 12 – Perspectiva de evolução das temperaturas nos elementos desprotegidos, segundo EC3.	70
Gráfico 13 – Comparação entre valores nominais de grau de utilização e reais.	74
Gráfico 14 - Comparação entre I1 e I2 para força/deslocamento.	103
Gráfico 15 - Comparação entre as deformações nos ensaios I1 e I2.	104
Gráfico 16 - Comparação entre os registos dos LVDT's em I1 e I2.	104
Gráfico 17 - Comparação entre S1 e S2 para força/deslocamento.	105
Gráfico 18 - Comparação entre as deformações nos ensaios S1 e S2.	106
Gráfico 19 - Comparação entre os registos dos LVDT's em S1 e S2.	106
Gráfico 20 - Comparação entre C1 e C2 para força/deslocamento.	107
Gráfico 21 - Comparação entre as deformações nos ensaios C1 e C2.	108
Gráfico 22 - Comparação entre os registos dos LVDT's em C1 e C2.	108
Gráfico 23 - Comparação entre L1 e L2 para força/deslocamento.	109
Gráfico 24 - Comparação entre as deformações nos ensaios L1 e L2.	110
Gráfico 25 - Comparação entre os registos dos LVDT's em L1 e L2.	110
Gráfico 26 – Valores para I3, I4 e I5 do histograma de cargas (F) e deslocamento (d), versus tempo (t).	112
Gráfico 27 – Valores de I3, I4 e I5 da evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.	113
Gráfico 28 – Valores de I3, I4 e I5 do deslocamento a meio vão consoante as temperatura registadas.	113
Gráfico 29 – Histograma de carga (F) e deslocamento (d) para os ensaios S3, S4 e S5.	115
Gráfico 30 – Registo de temperaturas e deslocamento (d) nos ensaios S3, S4 e S5.	115
Gráfico 31 - Comparação entre S3, S4 e S5 para os valores de deslocamento em função da temperatura registada.	116
Gráfico 32 – Comparação dos histogramas de carga (F) e deslocamento (d) nos ensaios C3, C4 e C5.	118
Gráfico 33 – Evolução das temperaturas e deslocamento (d), ao longo do tempo para os ensaios C3, C4 e C5.	118
Gráfico 34 – Evolução do deslocamento (d) com o aumento das temperaturas, para os ensaios C3, C4 e C5.	119
Gráfico 35 – Valores registados do histograma de carga e do deslocamento (d), para os ensaios L3, L4 e L5.	120
Gráfico 36 – Comparação entre L3, L4 e L5, para a evolução das temperaturas e deslocamento (d) ao longo do tempo.	121
Gráfico 37 – Evolução de (d), correspondente ao valor de temperatura registado nos ensaios L3, L4 e L5.	122
Gráfico 38 – Histograma de carga (F) e deslocamento (d), para os ensaios I3, I6 e I7.	124

Gráfico 39 – Evolução de temperaturas nos ensaios I3, I6 e I7, a par do deslocamento (d).	124
Gráfico 40 – Valores de (d) para os elementos I3, I6 e I7 perante a evolução das temperaturas nos ensaios....	125
Gráfico 41 – Valores de (F) e (d) versus tempo (t), para os ensaios I4, I8, I9, I12 e I13.....	126
Gráfico 42 – Valores de temperaturas durante os ensaios I4, I8, I9, I12 e I13, a par de (d).	127
Gráfico 43 – Valor de (d) consoante o aumento das temperaturas, nos ensaios I4, I8, I9, I12 e I13.	127
Gráfico 44 - Comparação entre I5, I10 e I11 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.	129
Gráfico 45 - Comparação entre I5, I10 e I11 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.	129
Gráfico 46 - Comparação entre I5, I10 e I11 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.....	129
Gráfico 47 – Valores de (F) e (d) versus tempo (t), para os ensaios S3, S6 e S7.	131
Gráfico 48 - Comparação entre os ensaios S3, S6 e S7, dos valores de temperaturas e deslocamento (d).	131
Gráfico 49 – Registo dos valores de (d), para a temperatura nos elementos e no interior do forno, para os ensaios S3, S6 e S7.	132
Gráfico 50 – Registo de cargas (F) e (d) nos ensaios S4, S8, S9, S12 e S13.	133
Gráfico 51 – Registo de temperaturas e deslocamento (d) para os ensaios S4, S8, S9, S12 e S13.	133
Gráfico 52 – Registo de deslocamento (d) consoante o registo de temperaturas, para os ensaios S4, S8, S9, S12 e S13.	134
Gráfico 53 – Registo de cargas (F) e deslocamento (d) nos ensaios S5, S10 e S11.....	136
Gráfico 54 – Registo de temperaturas e deslocamento (d) nos ensaios S5, S10 e S11.	136
Gráfico 55 – Registo de (d) relacionado com a evolução das temperaturas nos ensaios S5, S10 e S11.	136
Gráfico 56 – Registo de carga (F) e deslocamento (d) versus tempo (t) nos ensaios C3, C6 e C7.	138
Gráfico 57 – Registo de temperaturas e deslocamento (d), nos ensaios C3, C6 e C7.	138
Gráfico 58 – Registo de deslocamento (d) consoante o registo de temperaturas nos ensaios C3, C6 e C7.	139
Gráfico 59 – Registo de força (F) e de deslocamento (d), versus tempo, nos ensaios C4, C8, C9, C11, C12 e C13.	140
Gráfico 60 – Registo de temperaturas e deslocamento (d), nos ensaios C4, C8, C9, C11, C12 e C13.	141
Gráfico 61 – Registo de deslocamento (d) conforme o registo de temperaturas, nos ensaios C4, C8, C9, C11, C12 e C13.	141
Gráfico 62 - Comparação entre C5 e C10 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.	143
Gráfico 63 - Comparação entre C5 e C10 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.	143
Gráfico 64 - Comparação entre C5 e C10 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.	143
Gráfico 65 – Registo de carga (F) e deslocamento (d) nos ensaios L3, L6 e L7.	145
Gráfico 66 – Registo de temperaturas e deslocamento (d) nos ensaios L3, L6 e L7.	145
Gráfico 67 - Comparação entre L3, L6 e L7 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.....	146
Gráfico 68 – Registo de valores para o histograma de carga (F) e deslocamento (d) nos ensaios L4, L8 e L9.	147
Gráfico 69 – Registo de temperaturas e deslocamento (d) nos ensaios L4, L8 e L9.	147
Gráfico 70 – Registo de deslocamento (d) em função do valor de temperatura, nos ensaios L4, L8 e L9.	147
Gráfico 71 – Registo de carga (F) e deslocamento (d) nos ensaios L5, L10 e L11.	149
Gráfico 72 – Registo de temperaturas e deslocamento (d) nos ensaios L5, L10 e L11.	150
Gráfico 73 – Registo do valor de deslocamento (d) em função da evolução das temperaturas nos ensaios L5, L10 e L11.	150
Gráfico 74 – Relação entre grau de utilização, resistência ao fogo e espessura de protecção, nos ensaios de secção IPE 100.	155
Gráfico 75 – Relação entre grau de utilização, resistência ao fogo e espessura de protecção, nos ensaios de secção SHS 100x100x4.	155

Gráfico 76 – Relação entre grau de utilização, resistência ao fogo e espessura de protecção, nos ensaios de secção CHS 101,6x4,05.....	155
Gráfico 77 – Relação entre grau de utilização, resistência ao fogo e espessura de protecção, nos ensaios de secção LNP 100x50x8.....	156

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Método de cálculo pelo EN 1993-1-2.	10
Tabela 2 – Exigências dos três tipos de classificações de elementos ao fogo.	15
Tabela 3 – Classes de resistência ao fogo de elementos em minutos.	15
Tabela 4 – Definição das propriedades mecânicas do aço.	18
Tabela 5 – Factores de redução das propriedades mecânicas do aço.	19
Tabela 6 – Valores de tensão de cedência e tensão de ruptura obtidos nos ensaios de tracção ao aço.	29
Tabela 7 – Características mecânicas das secções transversais.	32
Tabela 8 – Valores médios das medidas efetuadas às secções, medidas em [mm].	33
Tabela 9 – Propriedades mecânicas das secções com as características reais da secção e material.	34
Tabela 10 – Convenção genérica dos eixos nas secções transversais.	38
Tabela 11 – Limites máximos das classes para elementos internos (CENa, 2005).	40
Tabela 12 – Limites máximos das classes para elementos externos (CENa, 2005).	41
Tabela 13 – Limites máximos das classes para secções tubulares (CENa, 2005).	41
Tabela 14 – Resumo de classificações das secções transversais.	45
Tabela 15 – Curvas de encurvadura lateral a utilizar no caso geral.	49
Tabela 16 – Valores a tomar para o factor de imperfeição segundo as curvas de encurvadura lateral.	49
Tabela 17 – Curvas de encurvadura lateral a utilizar no caso particular.	50
Tabela 18 – Valores a adoptar na determinação do momento crítico, (CEN, 1992).	51
Tabela 19 – Determinação do coeficiente α_m (tabela do IVro “Flexural-Torsional Buckling of Structures”).	53
Tabela 20 – Resumo da resistência das secções à flexão (temperatura ambiente).	59
Tabela 21 – Valores de k_c segundo Paulo Vila Real et al.	61
Tabela 22 – Temperatura crítica nominal dos elementos.	65
Tabela 23 – Valores dos factores de redução da tensão de cedência e módulo de elasticidade.	66
Tabela 24 – Resistência à flexão nominal para condições de incêndio (SHS e CHS).	66
Tabela 25 – Resistência à flexão nominal para condições de incêndio com secção IPE e LNP.	68
Tabela 26 – Valores dos parâmetros para o cálculo da evolução da temperatura nos elementos.	69
Tabela 27 – Tempo nominal de resistência para cada tipo de secção.	70
Tabela 28 – Momento actuante nos elementos em condições de incêndio, em [kN.m].	71
Tabela 29 – Momento resistente dos elementos à temperatura ambiente, em [kN.m].	72
Tabela 30 – Processo iterativo para a determinação do grau de utilização a 30% no IPE.	73
Tabela 31 – Valores comparativos entre o grau de utilização com características nominais e reais.	74
Tabela 32 – Programa de ensaios realizados.	76
Tabela 33 – Características dos sensores utilizados nos ensaios.	81
Tabela 34 – Valores de espessura de tinta para o elemento I6 em [mm].	99
Tabela 35 – Valores registados do controlo dimensional da espessura de tinta.	100
Tabela 36 – Valores medidos da imperfeição geométrica nos elementos (LNP e IPE).	102
Tabela 37 – Comparação entre os valores de Força (F) em [N], nos ensaios I1 e I2.	104
Tabela 38 – Comparação entre os valores de Força (F) em [N], nos ensaios S1 e S2.	106
Tabela 39 – Comparação entre os valores de Força (F) em [N], nos ensaios C1 e C2.	108
Tabela 40 – Comparação entre os valores de Força (F) em [N], nos ensaios L1 e L2.	111
Tabela 41 – Valores de tempo e temperatura registados nos ensaios I3, I4 e I5.	114
Tabela 42 – Valores de tempo e temperatura registados nos ensaios S3, S4 e S5.	117

Tabela 43 – Valores de tempo e temperatura registados nos ensaios C3, C4 e C5	120
Tabela 44 – Valores de tempo e temperatura registados nos ensaios L3, L4 e L5	123
Tabela 45 - Valores de registo dos ensaios I3, I6 e I7	125
Tabela 46 - Valores registados nos ensaios I4, I8, I9, I12 e I13.	128
Tabela 47 - Valores de tempo conseguidos na secção IPE, para $\mu=70\%$	130
Tabela 48 - Valores registados para os ensaios S3, S6 e S7	132
Tabela 49 - Valores registados nos ensaios S4, S8, S9, S12 e S13.	134
Tabela 50 - Valores de tempo conseguidos na secção SHS, para $\mu=70\%$	137
Tabela 51 - Valores de tempo conseguidos na secção CHS, para $\mu=30\%$	139
Tabela 52 – Registo de valores para ensaios C4, C8, C9, C11, C12 e C13.	142
Tabela 53 - Valores de tempo conseguidos na secção CHS, para $\mu=70\%$	144
Tabela 54 – Registo de valores determinados nos ensaios L4, L8 e L9.	146
Tabela 55 – Registo de valores para os ensaios L4, L8 e L9	148
Tabela 56 - Valores de tempo conseguidos na secção LNP, para $\mu=70\%$	150
Tabela 57 – Resumo dos ensaios à temperatura ambiente.	153
Tabela 58 – Resumo de ensaios à flexão, sob ambiente de fogo ISO 834.	154

Lista de Abreviações

A lista que se segue descreve as abreviaturas utilizadas ao longo de todo o documento e tem como objectivo a melhor compreensão do conteúdo.

Esta listagem não é exaustiva, pelo que algumas abreviaturas são apresentadas ao longo do documento.

Letras maiúsculas do alfabeto latino

A	área da secção transversal
A_m	área da superfície de um elemento por unidade de comprimento
A_m/V	factor de massividade para elementos não protegidos
$[A_m/V]_b$	factor de massividade para elementos envolvidos num caixão
A_p	área da superfície do elemento protegido com o material de protecção contra incêndio
A_p/V	factor de massividade para elementos isolados por meio de um material de protecção contra incêndio
A_t	valor de extensão após ruptura
C_1, C_2	coeficientes para o cálculo do momento crítico em encurvadura lateral
DFT	espessura de tinta seca (dry film thickness)
DH	deslocamento horizontal ocorrido durante o ensaio, no topo do elemento
DV	deslocamento vertical ocorrido durante o ensaio, no topo do elemento
E	módulo de elasticidade do material
$E_{a,\theta}$	inclinação da recta que representa o domínio elástico para o aço a temperaturas elevadas
$E_{fi,d}$	valor de cálculo dos efeitos das acções em situação de incêndio
$E_{fi,d,t}$	valor de cálculo dos efeitos relevantes das acções em situação de incêndio, no instante t
F	carga aplicada ao elemento
F_{Ed}	valor de carga actuante
G	módulo de distorção do material
I	momento de inércia à flexão da secção transversal
I_t	momento de inércia à torção da secção transversal
I_w	constante de empenamento da secção transversal
K	coeficiente redutor do comprimento efectivo
L	comprimento efectivo do elemento para cálculo da encurvadura lateral
$M_{b,fi,t,Rd}$	valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral no instante t
$M_{b,Rd}$	valor de cálculo do momento flector resistente à encurvadura lateral
M_{cr}	valor do momento crítico elástico de encurvadura lateral
$M_{c,Rd}$	valor de cálculo do momento flector resistente em relação a um eixo principal de uma secção transversal
M_{Ed}	valor de cálculo do momento actuante

$M_{fi,\theta,Rd}$	valor de cálculo do momento resistente da secção transversal para uma temperatura θ_a uniforme, no instante t , sem influência dos apoios
$M_{pl,Rd}$	valor de cálculo do momento flector resistente plástico de uma secção transversal
M_{vx}	valor do momento crítico para uma secção transversal duplamente simétrica
P_v	carga de Euler
R_{eH}	limite superior de tensão de cedência
R_{eL}	limite inferior de tensão de cedência
$R_{fi,d,t}$	valor de cálculo da resistência do elemento em situação de incêndio, no instante t
$R_{fi,d,0}$	valor de cálculo de $R_{fi,d,t}$ no instante $t = 0$
R_m	tensão de limite de ruptura
$R_{p0,2\%}$	tensão limite de proporcionalidade para 0,2% de deformação
V	volume de um elemento por unidade de comprimento
V_{Ed}	valor de cálculo do esforço transversal actuante
W_{el}	módulo de resistência elástica à flexão da secção transversal
$W_{el,min}$	módulo de resistência elástica mínimo à flexão da secção transversal
$W_{eff,min}$	módulo de resistência elástica mínimo à flexão da secção transversal efectiva
W_{pl}	módulo de resistência plástica à flexão da secção transversal
W_y	módulo de resistência à flexão de uma secção transversal

Letras minúsculas do alfabeto latino

b	largura da base de uma secção transversal
c_a	calor específico do aço
c_p	calor específico do material de protecção contra incêndio
d	deslocamento do ponto de aplicação da carga no ensaio
d_p	espessura do material de protecção contra incêndio
f	factor de correcção de χ_{LT}
f_3	coeficiente para a determinação do momento crítico da secção assimétrica
f_{fi}	factor de correcção de $\chi_{LT,fi}$
$f_{p,\theta}$	tensão limite de proporcionalidade a temperaturas elevadas, θ_a
$f_{u,\theta}$	tensão de ruptura, tendo em conta o endurecimento, a temperaturas elevadas, θ_a
f_y	tensão de cedência a 20°C
$f_{y,\theta}$	tensão de cedência efectiva à temperatura θ_a
h	altura de uma secção transversal
$\dot{h}_{net,c}$	fluxo de calor efectivo em convecção por unidade de área
$\dot{h}_{net,d}$	fluxo de calor efectivo por unidade de área
$\dot{h}_{net,r}$	fluxo de calor efectivo em radiação por unidade de área
i	raio de giração da secção transversal
k_c	factor de correcção a tomar em consideração o diagrama de momentos
$k_{E,\theta}$	factor de redução para a inclinação da recta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θ_a , atingida no instante t

$k_{E,\theta,com}$	factor de redução para a inclinação da recta que representa o domínio elástico à temperatura máxima do aço no banzo comprimido $\theta_{a,com}$, atingida no instante t
$k_{p,\theta}$	factor de redução para o limite de proporcionalidade à temperatura; θ_a
$k_{y,\theta}$	factor de redução da tensão de cedência do aço à temperatura θ_a , no instante t
$k_{y,\theta,com}$	factor de redução para a tensão de cedência do aço no banzo comprimido à temperatura $\theta_{a,com}$ atingida no instante t
k_{sh}	factor de correcção devido ao efeito de sombra
l	comprimento entre apoios de um elemento
t	tempo
t_f	espessura do banzo de uma secção transversal
$t_{fi,d}$	valor de cálculo da resistência ao fogo (propriedade do elemento)
$t_{fi,requ}$	tempo requerido de resistência ao fogo
t_w	espessura da alma de uma secção transversal
u	coordenada segundo o eixo u-u
v	coordenada segundo o eixo v-v
v_0	coordenada em v-v do centro de corte
z_g	coordenada na secção transversal do ponto de aplicação da carga

Letras maiúsculas do alfabeto grego

$\Delta\theta_{a,t}$	aumento de temperatura no aço durante um intervalo de tempo Δ_t
$\Delta\theta_{g,t}$	aumento de temperatura ambiente dos gases durante o intervalo de tempo Δ_t
Δ_t	intervalo de tempo
Δ_l	alongamento induzido pela temperatura
Φ	factor de forma
Φ_{LT}	valor para determinar o coeficiente de redução χ_{LT}
$\phi_{LT,\theta,com}$	valor para determinar o coeficiente de redução $\chi_{LT,fi}$
$\theta_{cr,d}$	valor de cálculo da temperatura crítica dos materiais
θ_d	valor de cálculo da temperatura dos materiais
θ_g	temperatura dos gases no compartimento de incêndio, ou na proximidade do elemento
θ_m	temperatura na superfície do elemento
θ_r	temperatura de radiação efectiva do ambiente de incêndio

Letras minúsculas do alfabeto grego

α	factor de imperfeição em situação de incêndio
α_c	coeficiente de transferência de calor por convecção
α_{LT}	factor de imperfeição para encurvadura lateral
α_m	coeficiente para determinação do momento crítico em secções assimétricas
β	factor de correcção das curvas de dimensionamento à encurvadura lateral de vigas constituídas por perfis laminados e soldados equivalentes

β_u	constante de monossimetria da secção transversal
γ_{M0}	coeficiente parcial de segurança para a resistência de secções transversais de qualquer classe
γ_{M1}	coeficiente parcial de segurança para a resistência dos elementos em relação a fenómenos de encurvadura, avaliada através de verificações individuais de cada elemento
$\gamma_{M,fi}$	coeficiente parcial para a propriedade considerada do material, em situação de incêndio
δ	valor de deformação durante o ensaio, no ponto de localização do extensómetro
$\varepsilon, \varepsilon_{fi}$	coeficiente que depende de f_y
ε_f	emissividade das chamas, do fogo
ε_m	emissividade da superfície do elemento
$\varepsilon_{p,\theta}$	extensão limite de proporcionalidade
$\varepsilon_{y,\theta}$	extensão de cedência
$\varepsilon_{t,\theta}$	extensão limite para o patamar de cedência
$\varepsilon_{u,\theta}$	extensão última
θ_a	temperatura no aço
$\theta_{a,com}$	temperatura no aço no banzo mais comprimido
$\theta_{a,cr}$	temperatura crítica do aço
$\theta_{g,t}$	temperatura ambiente dos gases no instante t
λ_p	condutibilidade térmica do aço
$\bar{\lambda}_{LT}$	esbelteza normalizada para encurvadura lateral
$\bar{\lambda}_{LT,0}$	comprimento do patamar das curvas de dimensionamento à encurvadura lateral de vigas construídas por perfis laminados e soldados equivalentes
$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	esbelteza normalizada para encurvadura lateral em situação de incêndio
λ_p	condutibilidade térmica do sistema de protecção contra incêndio
μ_0	grau de utilização no instante $t = 0$
σ	constante de Stephan Boltzmann
ρ_a	massa específica do aço
ρ_p	massa específica do material de protecção contra incêndio
χ_{LT}	coeficiente de redução para a encurvadura lateral
$\chi_{LT,fi}$	coeficiente de redução para a encurvadura lateral em situação de incêndio
$\chi_{LT,fi,mod}$	coeficiente de redução modificado para encurvadura lateral em situação de incêndio
$\chi_{LT,mod}$	coeficiente de redução modificado para encurvadura lateral

1 Introdução.

Para satisfazer as exigências regulamentares estruturais de segurança contra incêndios, as estruturas metálicas podem utilizar mecanismos de protecção passiva (utilização de tintas intumescentes). Trata-se de um material reactivo que altera as suas propriedades e características termo-físicas, aumentando a resistência térmica da protecção durante acidente deste tipo.

A resistência ao fogo das estruturas metálicas aumenta com a utilização deste mecanismo de protecção, validando a sua aplicação.

Neste trabalho são apresentados resultados experimentais de elementos metálicos protegidos com tinta intumescente. Tratam-se de elementos estruturais, submetido à flexão, com quatro tipos de secção transversal diferente IPE, SHS, CHS e LNP. Os resultados foram determinados por ensaios à flexão em condições de temperatura ambiente e ao fogo pela utilização da curva padrão ISO 834. Aos ensaios a temperaturas elevadas foram alternados dois níveis de protecção (1 [mm] e 2 [mm]), alterando ainda o nível de carga aplicado ao elemento, representando três níveis de grau de utilização 30%, 50% e 70%.

1.1 Objectivos.

A metodologia actual para verificação de segurança é baseada nos ensaios certificados dos produtores de tintas, em função da temperatura crítica, da espessura de protecção e do factor de massividade do elemento.

Pretende-se com este trabalho efectuar a caracterização e validar o comportamento deste tipo de elementos / materiais, utilizando métodos experimentais.

Foram realizados ensaios experimentais em elementos viga, utilizando diferentes secções transversais. Pretende-se contribuir para um estudo paramétrico que relaciona a espessura de protecção com tinta intumescente, com a massividade e com um valor específico de grau de utilização (30%, 50% e

70%). Para cada grau de utilização corresponde um valor de temperatura crítica associada.

Cada elemento definirá a sua capacidade resistente à flexão, em condições de temperaturas elevadas, quando atingir o seu valor de temperatura crítica, definida pelo seu colapso. Com os ensaios experimentais pretende-se comparar a temperatura crítica dos elementos, determinada pelos métodos simplificados e observada nos ensaios.

O trabalho de investigação e desenvolvimento conduziu à elaboração de uma tese original e inovadora, de natureza científica, envolvendo meios experimentais.

1.2 Resumo dos capítulos.

Nos capítulos seguintes descreve-se todo o trabalho realizado durante o trabalho de investigação, incluindo a análise dos resultados obtidos nos ensaios.

No primeiro capítulo, é efectuado uma introdução ao tema com a descrição do trabalho realizado e resumo de todos os capítulos.

No segundo capítulo é feita uma contextualização do estado da arte, com uma pesquisa sobre o tema em documentos da especialidade.

O terceiro capítulo descreve a acção do fogo, em contexto com a legislação em vigor.

No quarto capítulo estão descritas as características dos materiais, o aço e a tinta intumescente, com resultados de ensaios de resistência à tracção do aço, e ainda uma medição dos elementos das secções transversais, permitindo assim determinar as propriedades mecânicas reais das secções.

No quinto capítulo é feito um cálculo nominal de resistência dos elementos à flexão em condições de temperatura ambiente segundo EN 1993-1-1. É determinada a resistência ao fogo (ISO 834) sob três graus de utilização (30%, 50% e 70%) segundo EN 1993-1-2. É feito um estudo do grau de utilização efectivo, com as características reais dos materiais.

No sexto capítulo é descrito os ensaios pretendidos de realização com todo o processo execução destes, incluindo a legislação consultada, a instrumentação

dos elementos, e ainda o processo experimental. É mostrada uma comparação entre as várias leituras dos vários ensaios da mesma secção.

O sétimo capítulo apresenta as conclusões e trabalhos previstos para desenvolvimento futuro.

Em Anexo – Parte I., estão descritas as condições a que foram realizados os provetes de ensaio à tracção do aço, nos diferentes materiais. No Anexo – Parte II. encontram-se os resultados dos ensaios de tracção, caracterizando as propriedades mecânicas, reais do aço.

Foi efectuada a medição das secções e encontram-se descritas no Anexo – Parte III.. No Anexo – Parte IV. observa-se a verificação ao corte dos elementos, de acordo com os métodos simplificados, preconizados pela (CEN, 1992).

No Anexo – Parte V. encontram-se as fichas resultantes da realização dos ensaios, com os resultados experimentais e registo fotográfico.

2 Revisão do estado da arte.

Desde a tragédia do WTC em Nova Iorque nos EUA (2001), a protecção de estruturas metálica ao fogo tem sido alvo de uma maior atenção por parte dos especialistas.

O estudo de tintas intumescentes como agente protector do fogo, é relativamente recente, desde a década de 1950. Existem alguns registos de experiências e testes sobre a evolução da temperatura em elementos e estruturas metálicas, contudo a maior divulgação destes estudos ocorre no final do século XX, início do século XXI.

Este capítulo fala sobre os estudos até então elaborados e publicados sobre a tinta intumescente como agente protector do aço. Foi elaborada uma pesquisa dos artigos científicos da especialidade, que a seguir se descreve.

Em 2003 M. Bartholmai *et al* (Bartholmai, Schriever, & Scharrel, 2003), publicaram um estudo para desenvolver um método simplificado para prever a temperatura no aço com protecção de tinta intumescente sobre a acção do fogo, utilizando os dados obtidos por um calorímetro de cone. O estudo concluiu que a tinta intumescente altera a sua espessura e propriedades térmicas com o aumento da temperatura, contudo um método simplificado torna-se difícil de elaborar, pois a camada intumescente não se forma uniformemente e depende da incidência do calor e das chamas.

Colin Bailey (Bailey, 2004), publicou um estudo sobre a evolução de temperaturas na alma de vigas metálicas em I de alma cheia e em I alveolares. Aqui observou a evolução das temperaturas na viga alveolar, que se caracterizou pelo fenómeno de retracção da tinta nas zonas de furos da alma. A tinta retraiu, deixando o aço de base à exposição do fogo, elevando assim a temperatura na alma do perfil em comparação com mesma viga de alma cheia.

Em 2005 Luís Mesquita *et al* (Mesquita, Piloto, Vaz, Vila Real, & Ramos, 2005), apresentaram um estudo para a verificação da capacidade resistente de uma viga metálica, simplesmente apoiada, sujeita a uma carga mecânica constante, caracterizada por dois actuadores hidráulicos, sobre a acção de temperaturas elevadas caracterizada por uma taxa de aquecimento de 800 [°C/h]. Estas vigas foram protegidas com diferentes espessuras de tinta intumescente,

para aferir qual o tempo de resistência nestas condições. Os resultados permitiram confirmar que uma maior espessura de tinta, confere a um maior tempo de resistência à viga.

Em 2006 M. Jimenez *et al* (Jimenez, Duquesne, & Bourbigot, 2006), foi apresentado um estudo para aferir, com ensaios experimentais, várias formulações de tintas intumescentes, com vista à protecção do aço sobre a acção da curva de incêndios de hidrocarbonetos. Os melhores resultados foram conseguidos quando se mistura na resina APP e ácido bórico, verificando-se que à uma pequena perda da viscosidade aos 350 [°C], com um grande aumento da camada intumescente e aderência ao substrato.

Em 2007 Luís Mesquita *et al* (Mesquita, Piloto, & Vaz, 2007), desenvolveram um estudo que teve como objectivo de caracterizar o efeito da camada intumescente numa placa de aço pintada, para assim determinar a evolução das temperaturas na chapa e ainda a evolução da intumescência. Foi aplicado um fluxo de calor radiante através de um calorímetro de cone. O estudo permitiu concluir que quanto maior a espessura da camada de tinta seca, maior é a camada de intumescente. Foi apresentado um modelo numérico para determinação da condutibilidade térmica com base nos resultados experimentais. Verificaram também que tendo em consideração a variação da camada de intumescência e da sua massa específica, obtêm-se valores mais elevados de condutibilidade térmica.

Ainda no mesmo ano os mesmos autores (Mesquita, Piloto, & Vaz, 2007), elaboraram um estudo analítico e numérico a vigas protegidas com tinta intumescente. O estudo foi baseado em dois métodos analíticos, o teorema de Duhamel e o método das funções de Green para determinação da evolução da temperatura nos perfis metálicos, com diferentes valores de espessura de protecção. Foram ainda apresentados resultados numéricos baseados no método dos elementos finitos obtidos através da PDEtoolbox do programa Matlab. Os resultados numéricos aproximam-se dos resultados dos ensaios, contudo apresentam valores iniciais para a temperatura do aço um pouco baixas. Os métodos analíticos apresentam uma diferença de temperaturas superior.

Em 2008 Zhi-Hua Wang *et al* (Wang & Tan, 2008), apresentaram uma formulação para prever a evolução da temperatura no aço protegido com tinta

intumescente. A função de Green aproxima as soluções obtidas experimentalmente e de estudos em elementos finitos. Contudo esta solução ainda é muito incompleta, pois não tem em consideração a variação de espessura da camada de protecção e variação das propriedades térmicas da tinta. Ainda assim os resultados apresentados são muito próximos dos obtidos pelo método experimental e numérico, podendo adoptar-se para determinar uma temperatura crítica estimada.

Em 2009, Xianghe Dai *et al* (Dai, Wang, & Bailey, 2009), publicaram um artigo em que o estudo tem o objectivo de validar um método simplificado para determinação de temperaturas em ligações de elementos metálicos, parcialmente protegidas com tinta intumescente, através da realização de vários ensaios de resistência ao fogo. O método simplificado pretende encontrar uma combinação entre a formulação presente no EN 1993-1-2 (CENb, 2005), para elementos sem protecção e testes ao fogo da condutividade térmica da tinta intumescente. O método aqui apresentado afirma-se muito próximo dos resultados obtidos nos ensaios.

Os mesmos autores publicaram nesse ano um artigo (Dai, Wang, & Bailey, 2009), em que elaboraram uma série de ensaios ao fogo de ligações metálicas, protegidas, parcialmente protegidas e desprotegidas de tinta intumescente. O objectivo era analisar a evolução da temperatura nos perfis com diferentes condições, para poder concluir sobre o efeito de proteger a estrutura sem proteger os parafusos. Os autores concluíram que a solução parcialmente protegida retarda a evolução da temperatura na ligação, contudo o melhor comportamento foi verificado na ligação totalmente protegida, em comparação com uma ligação totalmente desprotegida.

No mesmo ano R. R. Krishnamoorthy *et al* (Krishnamoorthy & Bailey, 2009), desenvolveram o estudo numérico dos ensaios realizados anteriormente por Colin Bailey (Dai, Wang, & Bailey, 2009), sobre ligações parcialmente desprotegidas e totalmente protegidas, através do programa informático ABAQUS. O estudo numérico realizado mostrou valores idênticos aos resultados experimentais nas ligações desprotegidas, contudo a utilização do material de protecção nas simulações não permitiu obter resultados semelhantes aos experimentais, talvez devido às propriedades utilizadas do material de protecção.

Ainda em 2009 Luís Mesquita *et al* (Mesquita, Piloto, Vaz, & Pinto, 2009), publicaram um estudo sobre uma série de placas de aço protegidas com várias espessuras de tinta intumescente, e expostas a diferentes fluxos de calor. Neste estudo foi utilizado um calorímetro de cone. Com o estudo desenvolveu-se uma solução numérica para prever a evolução da temperatura no aço protegido pela tinta intumescente, que se mostrou bastante próxima dos resultados experimentais.

Em 2010, L. Mesquita *et al* (Mesquita, Piloto, Magalhães, Pimenta, & Vaz, 2010), apresentaram um estudo para caracterizar a decomposição da camada formada pela tinta intumescente. São apresentados resultados experimentais, obtidos através de termogravimetria e num calorímetro de cone. Foram elaborados vários testes, para determinação da perda de massa com a temperatura, variação da camada intumescente e evolução das temperaturas no substrato. Os resultados permitem concluir que a intumescência depende da espessura seca inicial de tinta e do fluxo de calor. Foram utilizados métodos simplificados para cálculo das constantes cinéticas, para obter determinar a perda de massa com a temperatura. Os valores de energia de activação determinados diferem do método utilizado (método de Kissinger e de Flynn-Wall-Ozawa).

Em 2010 Zhidong Han *et al* (Han, Fina, Malucelli, & Camino, 2010), elaboraram um estudo em que analisaram diferentes parâmetros de teste numa placa de aço protegida com tinta intumescente, nomeadamente a espessura de protecção, a distância da fonte de calor, o fluxo de calor, o tamanho da amostra e o isolamento da amostra, quando submetidos à acção do fogo (ISO 834). Concluiu-se que a alteração destes factores mostrou ser relevante na evolução da temperatura nas amostras.

Em 2011 Mindaugas Grigonis *et al* (Grigonis, MAČIULAITIS, & Lipinskas, 2001), elaboram um estudo com várias qualidades de tintas intumescentes aplicadas em aço, e diferentes modos de exposição ao fogo. O estudo concluiu que para além da espessura da camada protectora, o modo de exposição ao fogo, influenciam directamente a evolução da temperatura no aço. Determinou ainda que a espessura de tinta não é directamente proporcional ao nível de protecção que esta proporciona, e que os melhores resultados foram com espessuras de 1 [mm].

3 Acção do fogo.

O fogo é um processo de oxidação dos materiais quando ocorre o efeito termoquímico, quando estes são levados a temperaturas elevadas, gerando luz e calor, resultando assim num processo de inflamação. Para a geração do fogo é necessário quatro elementos fundamentais, combustível, carburante, calor e reacção em cadeia, formando assim o tetraedro fundamental do fogo, representado pela Figura 1. Sem a existência de um destes quatro elementos o fogo não terá lugar, e por sua vez, quanto mais rico for um destes elementos maior será a quantidade de energia libertada no processo.

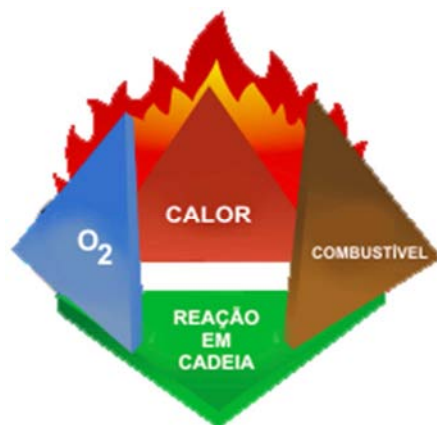


Figura 1 – Tetraedro do fogo (Consiglio, 2010).

Chama-se a um incêndio à ocorrência de um fogo não controlado, que poderá ser prejudicial para as pessoas e bens.

Os incêndios já têm lugar no globo terrestre ao longo de toda a sua existência, desde que os quatro elementos se juntaram pela primeira vez. A natureza sempre se encarregou de provocar incêndios, juntando o calor dos trovões e lava, com oxigénio da atmosfera, madeira das florestas ou crude, reagindo todos em cadeia, formando assim um incêndio natural.

Um exemplo claro da diferença entre fogo e incêndio é representado na Figura 2, mostrando um exemplo de uma lareira de habitação, com fogo controlado no seu interior, aproveitando a energia libertada para aquecimento de interiores, contrastando com uma imagem do incêndio de 1988 que destruiu o Chiado em plena baixa de Lisboa, em Portugal.



Figura 2 – À esquerda um fogo numa lareira, à direita o incêndio do Chiado em Lisboa 1988 (Tinoni, 2007).

Preocupante é o facto de hoje em dia estes incêndios sejam provocados por pirómanos que actuam de forma consciente ou inconscientemente. A ignição súbita generalizada (“flashover”) é geralmente utilizada para descrever a dinâmica do crescimento de um fogo, quando este se torna totalmente desenvolvido.

Interessa aqui neste trabalho estudar e caracterizar a ocorrência de um fogo num qualquer elemento de uma estrutura de um edifício.

Para tal existem curvas de incêndio definidas na regulamentação em vigor, que em função do tempo definem a temperatura a que se encontra o ambiente em redor dos elementos, domínios de resistência ao fogo dos materiais e cargas aplicadas aos elementos.

3.1 Contexto normativo.

Portugal adoptou recentemente o Eurocódigo NP EN 1991-1-2 (LNEC, 2010), que define as acções em estruturas expostas ao fogo. Esta norma surge no seguimento pré-norma NP ENV 1991-2-2:2000 e define-se como sendo a tradução portuguesa da EN 1991-1-2, ou seja Parte 1-2 do Eurocódigo 1: Acções em Estruturas.

Esta acção deve ser combinada com especial atenção, porque é considerada como accidental.

A aplicação da norma destina-se a projectos estruturais em edifícios expostos ao fogo. Estes deverão garantir capacidade resistente a acções mecânicas e térmicas. Deve ser o objectivo da aplicação da norma, a protecção de bens e pessoas, limitando a propagação de riscos, no caso de ocorrência de um incêndio.

A forma de cálculo descrita pela norma estabelece duas abordagens, uma abordagem prescritiva (“prescriptive based rules”), utilizando fogos nominais e abordagem baseada no desempenho (“performance based rules”) utilizando acções térmicas baseadas em parâmetros físicos e químicos. Cada abordagem pode analisar em particular um elemento, parte de uma estrutura ou a estrutura completa. Na Tabela 1 representa-se um resumo de procedimentos alternativos para o projecto de estruturas sob a acção do fogo.

Tabela 1 – Método de cálculo pelo EN 1993-1-2.

Métodos de cálculo			Valores tabelados (nível 1)	Modelos de cálculo simplificados (nível 2)	Modelos de cálculo avançado (nível 3)
Regras prescritivas	Elemento	Determinação das acções mecânicas e das condições fronteira	Sim	Sim	Sim
	Parte da estrutura		Não	Sim (se disponível)	Sim
	Estrutura completa	Seleção das acções mecânicas	Não	Não	Sim
Regulamento baseado no desempenho	Elemento	Determinação das acções mecânicas e das condições fronteira	Não	Sim (se disponível)	Sim
	Parte da estrutura		Não	Não	Sim
	Estrutura completa	Seleção das acções mecânicas	Não	Não	Sim

Para a definição da resistência de um elemento ao fogo, é necessário determinar o tempo a que este exposto a uma curva de incêndio preserva a sua capacidade resistente. As curvas de incêndio definidas são de dois tipos, nominais (casos convencionais) e paramétricas (casos de incêndio natural).

As curvas nominais são as mais convencionais para a verificação da resistência ao fogo dos elementos. Os exemplos mais conhecidos são a curva de

incêndio padrão, a curva para elementos exteriores e a curva para incêndio de hidrocarbonetos.

A curva de incêndio natural pode ser definida com modelos simplificados e avançados. As curvas paramétricas são definidas com base em incêndio e nos parâmetros específicos que definem as condições no compartimento de incêndio. A utilização deste tipo de curva implica a utilização de uma fase de arrefecimento, contabilização de aberturas nas fachadas, características da envolvente no compartimento e carga de incêndio que será completamente consumida, esta curva é definida no documento EN 1991-1-2 (CEN, 2002)

As curvas de incêndio nominais, definidas pela norma EN 1991-1-2 (CEN, 2002), representam-se em função do tempo pelas seguintes expressões (1-3) e ainda pelo Gráfico 1. Considere-se que “*t*” é o tempo decorrido desde o início do incêndio e define-se em minutos. O resultado das expressões de temperatura é apresentado em grau Celcius e define o valor da temperatura dos gases no compartimento de incêndio.

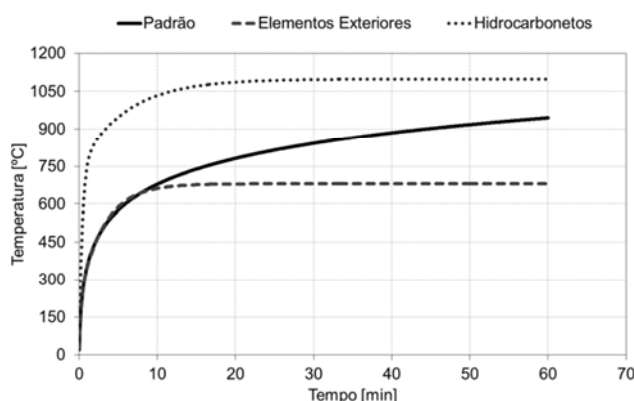


Gráfico 1 – Curvas de incêndio nominais.

A curva de incêndio padrão é definida através de:

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

Esta curva é principalmente conhecida por ISO 834, e considera-se suficiente para uma análise de resistência de elementos estruturais ao fogo.

A curva de incêndio para elementos exteriores é definida por:

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (2)$$

Esta curva é utilizada no caso de querer avaliar a resistência de elementos estruturais no exterior do edifício. Na Figura 3 representa-se um incêndio num edifício multifamiliar em Xangai, 2010, afectando a estrutura no exterior do mesmo.



Figura 3 – Incêndio de uma estrutura exterior no edifício em Xangai, 2010 (Safety, 2010).

A curva de incêndio de hidrocarbonetos é definida por:

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (3)$$

A curva de incêndio por hidrocarbonetos simula um incêndio provocado por um agente explosivo, como é o caso da gasolina ou outro combustível fóssil. Um exemplo claro de um incêndio por hidrocarbonetos foi o ataque terrorista das Torres Gémeas em Nova Iorque, WTC NY, 2001, ver Figura 4.



Figura 4 – Um incêndio por hidrocarbonetos WTC NY, 2001 (Mundo, 2009).

Estas curvas de incêndio transmitem energia para os elementos próximos em forma de calor. O calor transmite-se sobre três formas, radiação, convecção e condução.

A condução é a forma de transportar calor dentro de um corpo sólido. O aquecimento de parte do corpo agita as partículas da vizinhança transmitindo ao restante corpo o calor da zona que está sendo solicitada.

A convecção processa-se da mesma forma que a condução com a diferença de se executar dentro de um corpo líquido ou gasoso, de antever que aqui as partículas aquecidas deslocam-se para uma zona superior, gerando um ciclo rotativo dentro do líquido.

A radiação transmite o calor através de ondas electromagnéticas, sem a necessidade de existência de qualquer meio para se propagar no espaço.

Num incêndio são consideradas todas estas formas de transferência de calor, em particular na superfície dos elementos aquecidos importa considerar a convecção e a radiação.

De acordo com EN 1991-1-2 o fluxo de calor efectivo na superfície de um elemento é determinado pela expressão (4), que define o valor de $\dot{h}_{net,d}$ em $[W/m^2]$. A mesma norma define os parâmetros que constituem $\dot{h}_{net}$, são eles, o contributo de calor por convecção e por radiação, respectivamente definidos por $\dot{h}_{net,c}$ e $\dot{h}_{net,r}$ em $[W/m^2]$.

$$\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad [W/m^2] \quad (4)$$

Em que o fluxo de calor por convecção é definido por (5):

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad [W/m^2] \quad (5)$$

Sendo que α_c é o coeficiente de convecção, que toma o valor de 25 [W/m²K] nas curvas de incêndio padrão ISO834 e na curva de incêndio para elementos exteriores, e de 50 [W/m²K] para uma curva de incêndio de hidrocarbonetos, θ_g e θ_m representam os valores de temperatura nos gases da proximidade do elemento exposto e temperatura na superfície do elemento, respectivamente.

O fenómeno de calor por radiação é definido por (6):

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad [W/m^2] \quad (6)$$

Sendo que Φ representa o factor de forma, ε_m e ε_f representam valores de emissividade, consecutivamente da superfície do elemento e do fogo, σ representa a constante de Stefan Boltzmann (5,67x10⁻⁸ [W/m²K⁴]), e finalmente θ_r e θ_m representam os valores de temperatura de radiação efectiva do ambiente de incêndio e temperatura na superfície do elemento, respectivamente.

Um elemento deverá apresentar uma capacidade de resistência ao fogo imposta pelo regulamento de Segurança contra Incêndios em Edifícios (DR, 2008). As euroclasses de resistência ao fogo são definidas conforme a sua função (Estrutural, Compartimentação, desenfumagem e continuidade do serviço) e o seu desempenho em situação de incêndio.

O sistema de classificação europeu define três classes primárias R, E e I, substituindo as antigas classificações EF, PC e CF. Sendo que “R”, representa um elemento que apenas tem funções estruturais, “E” deverá garantir a estanquidade de chamas e gases inflamáveis, “I” deverá garantir isolamento térmico. A Figura 5 ilustra estas três classificações, e na Tabela 2 estão descritas as exigências destas classes em relação ao fogo.

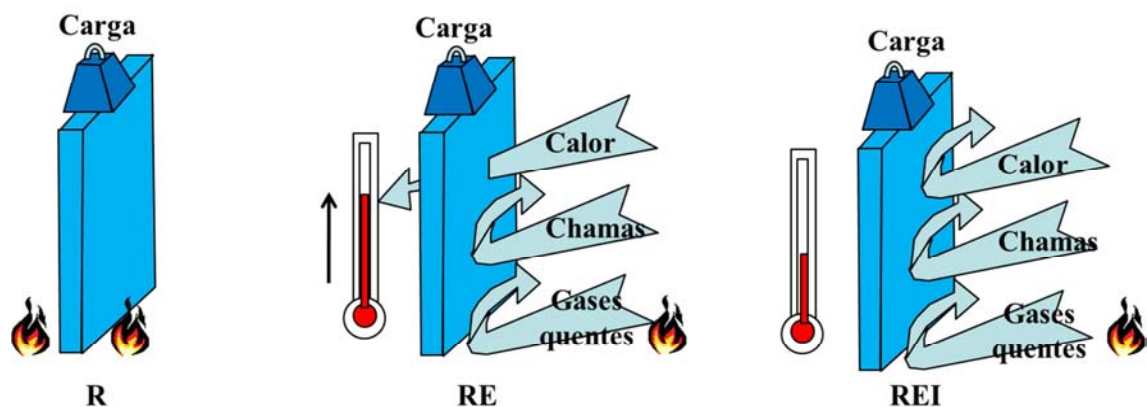


Figura 5 – Os três tipos de classificação de elementos ao fogo.

Tabela 2 – Exigências dos três tipos de classificações de elementos ao fogo.

Exigência	Qualificação		
	R	RE	REI
	Estável ao fogo	Pára-chamas	Corta-fogo
Capacidade de suporte de carga	Sim	Sim	Sim
Estanquidade de chamas e gases inflamáveis	Não	Sim	Sim
Isolamento térmico	Não	Não	Sim

Ainda dentro destas três classificações, o elemento deve ser caracterizado por 10 classes, que correspondem ao tempo mínimo de resistência ao fogo. Estas classes estão definidas na Tabela 3 e são representadas em minutos (DR, 2008).

Tabela 3 – Classes de resistência ao fogo de elementos em minutos.

15	20	30	45	60	90	120	180	240	360
----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----

Para uma análise mecânica segundo o EN 1991-1-2 (CEN, 2002), a verificação de resistência ao fogo poderá ser efectuada em três domínios (tempo, resistência e temperatura). Esta verificação deverá seguir as condições descritas pelas expressões seguintes (7), (8) e (9), em que $t_{fi,d}$ representa o tempo de cálculo de resistência ao fogo, $t_{fi,requ}$ representa o tempo requerido de resistência ao fogo, $R_{fi,d,t}$ representa o valor de cálculo de resistência ao fogo do elemento, no instante t, $E_{fi,d,t}$ representa o valor de cálculo dos efeitos relevantes das acções e situação de incêndio, no instante t, θ_d representa o valor de cálculo da temperatura dos materiais [°C], $\theta_{cr,d}$ representa o valor de cálculo da temperatura crítica dos materiais [°C].

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad (7)$$

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t} \quad (8)$$

$$\theta_d \geq \theta_{cr,d} \quad (9)$$

A Figura 6 descreve os três domínios de verificação à resistência dos elementos. O domínio do tempo é representado pelo intervalo 1, em que “ $t_{fi,d}$ ” representa o valor de tempo limite para a resistência do elemento. O intervalo 2 representa o domínio da resistência, em que a resistência do elemento, “ $R_{fi,d,t}$ ” deverá ser sempre superior às ações. O intervalo 3 define-se o domínio da temperatura, indicando que a temperatura dos materiais, “ θ_d ” deverá ser sempre inferior à temperatura crítica destes, $\theta_{cr,d}$.

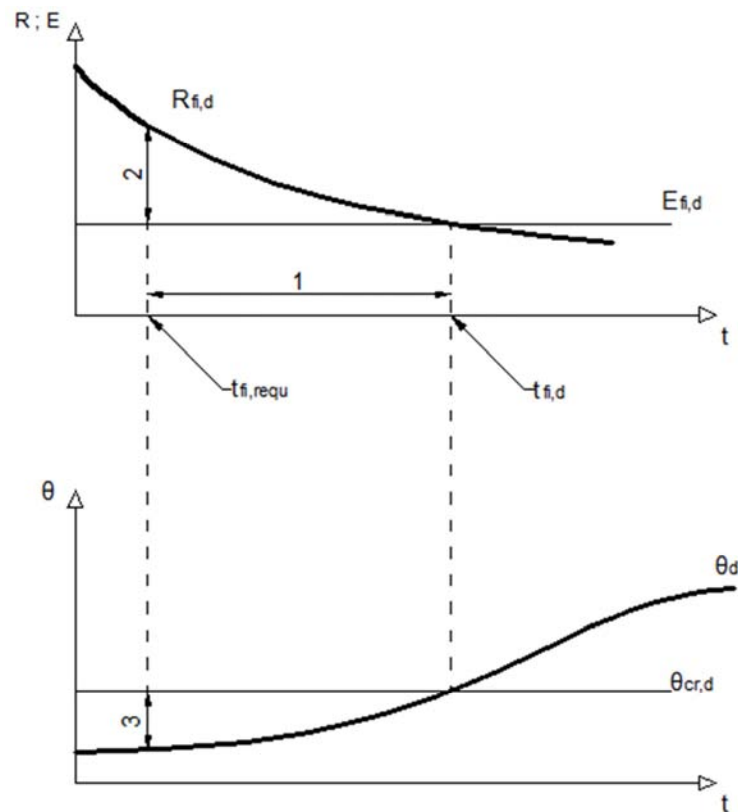


Figura 6 – Domínios de verificação de resistência ao fogo de elementos (Vila Real, 2003).

4 Propriedades dos materiais.

Os materiais utilizados neste trabalho, os elementos metálicos de diferentes secções e a tinta intumescente, foram gentilmente cedidos por diferentes empresas. As propriedades dos materiais utilizados foram definidas através das normas e catálogos da especialidade.

Foram posteriormente efectuadas aferições das propriedades dos elementos metálicos, através de ensaios e medições. Foram efectuados ensaios de tracção a provetes de aço e foram efectuadas medições das secções transversais com o objectivo de comparar com os valores nominais com os valores reais.

4.1 Aço.

As propriedades nominais do aço, que caracterizam a capacidade resistente das diferentes secções, são definidas pela norma EN 1993-1-1 (CENa, 2005) e EN 1993-1-2 (CENb, 2005), à temperatura ambiente e ao fogo, respectivamente.

Para efeitos de comparação com os valores nominais, efectuou-se ensaio de tracção a provetes do mesmo material, que fora utilizado para definição dos elementos de ensaio conforme a norma NP 10002-1 (IPQ, 2006). Esta norma, foi recentemente substituída pela norma ISO 6892-1 (ISO, 2009).

4.1.1 Caracterização nominal de resistência.

A caracterização da resistência nominal do aço é definida pelos Eurocódigos, nomeadamente pelo EN 1993-1-1 (CENa, 2005) à temperatura ambiente e EN 1993-1-2 (CENb, 2005) para condições de elementos expostos a temperaturas elevadas (incêndio).

Os elementos seleccionados para ensaio foram caracterizados por dois tipos de aço. O aço S275 para os elementos com secção transversal IPE e LNP e o

aço S235 para as secções SHS e CHS. Esta classificação foi fornecida pelos fornecedores.

4.1.1.1 Temperatura ambiente.

As propriedades do aço são definidas pela EN 1993-1-1 (CENa, 2005).

Os valores da tensão de cedência “ f_y ” e a tensão última de tracção “ f_u ”, para os dois tipos de aço do presente estudo são apresentados na Tabela 4, sendo que nenhuma das 4 secções transversais ultrapassa a espessura de 40[mm].

Tabela 4 – Definição das propriedades mecânicas do aço.

Aço	Tensão de cedência f_y	Tensão última de tracção f_u
	[N/mm ²]	[N/mm ²]
S275 (IPE e LNP)	275	430
S235 (SHS e CHS)	235	360

De acordo com o documento, devem ser adoptados os valores de cálculo para as propriedades específicas do aço. O módulo de elasticidade E deve ser considerado igual a 210000 [N/mm²], o módulo de elasticidade transversal G deve ser considerado como o definido pela expressão (10), o coeficiente de Poisson em regime elástico deve ser igual a $\nu = 0,3$ e o coeficiente de dilatação térmica linear $\alpha = 12 \times 10^{-6}$ [K⁻¹] (para $T \leq 100^\circ\text{C}$).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \approx 81000 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (10)$$

4.1.1.2 Temperaturas elevadas.

As propriedades do aço a temperaturas elevadas são definidas pela EN 1993-1-2 (CENb, 2005). A aplicação desta norma deve ter em consideração as propriedades do aço à temperatura ambiente.

As propriedades de resistência à deformação do aço, para temperaturas elevadas, são definidas a partir da sua redução do seu valor a 20°C. A sua redução é efectuada com a multiplicação do valor à temperatura ambiente por um

factor de redução, de acordo com a propriedade a definir e em função da temperatura a que se encontra o aço.

A tensão de cedência efectiva $f_{y,\theta}$, a tensão limite de proporcionalidade $f_{p,\theta}$ e a inclinação da recta que representa o domínio elástico $E_{a,\theta}$, são obtidos pela multiplicação do correspondente factor de redução a temperaturas elevadas $k_{y,\theta}$, $k_{p,\theta}$ e $k_{E,\theta}$, respectivamente pelas propriedades a 20°C, tensão de cedência f_y e módulo de elasticidade E . Os factores de redução das propriedades do aço ao carbono a temperaturas elevadas estão definidos na Tabela 5 e representados no Gráfico 2 (CENb, 2005).

Tabela 5 – Factores de redução das propriedades mecânicas do aço.

Temperatura do aço [°C]	Factor de redução $k_{y,\theta}$	Factor de redução $k_{p,\theta}$	Factor de redução $k_{E,\theta}$
20	1,000	1,00	1,00
100	1,000	1,00	1,00
200	1,000	0,807	0,900
300	1,000	0,613	0,800
400	1,000	0,420	0,700
500	0,780	0,360	0,600
600	0,470	0,180	0,310
700	0,230	0,075	0,130
800	0,110	0,050	0,090
900	0,060	0,0375	0,0675
1000	0,040	0,025	0,045
1100	0,020	0,0125	0,0225
0,000	0,000	0,000	0,000

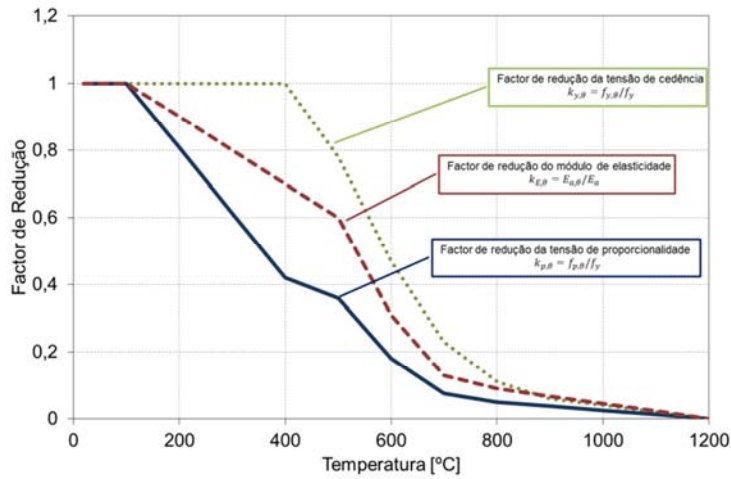


Gráfico 2 – Representação dos valores para a redução das propriedades do aço a temperaturas elevadas.

A massa específica do aço a temperaturas elevadas não varia, mantendo-se constante, num valor de $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$.

A relação entre tensões e extensões a utilizar deve ser tomado de acordo com o Gráfico 3, em que se pode observar a fase elástica do material, sem considerar a fase de endurecimento do aço ao carbono. Os parâmetros aqui referidos são: tensão de cedência efectiva $f_{y,\theta}$, tensão limite de proporcionalidade $f_{p,\theta}$, Inclinação da recta que representa o domínio elástico $E_{a,\theta}$, extensão limite de proporcionalidade $\varepsilon_{p,\theta}$, extensão de cedência $\varepsilon_{y,\theta}$, extensão limite para o patamar de cedência $\varepsilon_{t,\theta}$ e extensão última $\varepsilon_{u,\theta}$.

O comportamento do material deve ser definido para quatro fases. Numa primeira fase (linear elástica) o material possui um comportamento reversível de acordo com a expressão (11), em que a extensão é directamente proporcional à tensão.

$$\sigma = \varepsilon E_{a,\theta} \text{ quando } (\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}) \quad (11)$$

Numa segunda fase (transição), o comportamento do material é descrito pela expressão (12-13). Esta fase é caracterizada por alguns parâmetros (a, b, c) e pelas propriedades $f_{p,\theta}$ e $f_{y,\theta}$.

$$\sigma = f_{p,\theta} - c + \left(b/a\right) \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2\right]^{0,5} \text{ quando } (\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}) \quad (12)$$

$$\text{Módulo da tangente} \Rightarrow \frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{\left(a \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2\right]^{0,5}\right)} \quad (13)$$

A relação entre a tensão e a extensão é dada pelo módulo tangente.

A terceira fase (patamar de cedência) é referida como zona plástica, pela qual a tensão se mantém constante. Nesta fase o material possui um módulo de tangente igual a zero e está caracterizado pelos valores de deformação $\varepsilon_{y,\theta} = 2\%$ e $\varepsilon_{t,\theta} = 15\%$

$$\sigma = f_{y,\theta} \text{ quando } (\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}) \quad (14)$$

$$\text{Módulo da tangente} \Rightarrow 0 \quad (15)$$

A quarta fase foi definida porque o material possui ductilidade finita, próxima do valor correspondente a $\varepsilon_{u,\theta} = 20\%$. Esta fase é descrita pela expressão (16).

$$\sigma = f_{y,\theta} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta})] \text{ quando } (\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}) \quad (16)$$

$$\sigma = 0,0 \text{ quando } (\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}) \quad (17)$$

Os parâmetros (a,b,c) devem ser determinados pela expressão (18).

$$\begin{aligned} a^2 &= (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c/E_{a,\theta}) \\ b^2 &= c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} + c^2 \\ c &= \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})} \end{aligned} \quad (18)$$

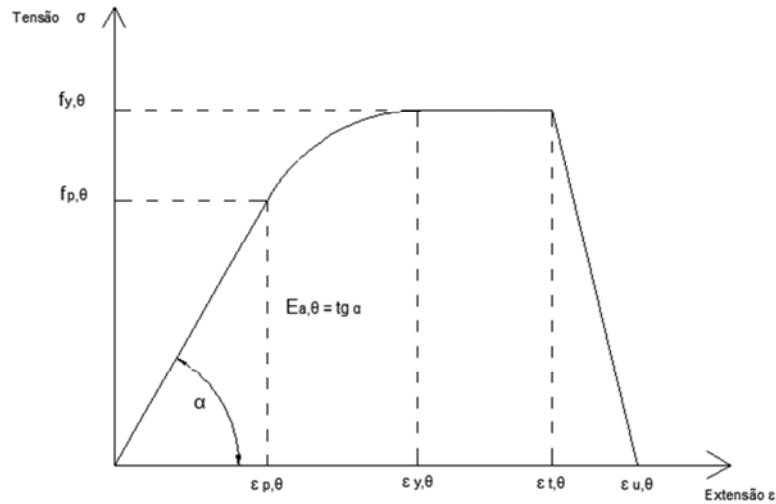


Gráfico 3 – Relação tensão-extensão do aço ao carbono para situação de incêndio, sem endurecimento.

Alguns materiais possuem endurecimento por deformação. O endurecimento do aço ao carbono em condições de temperatura elevadas, é definido pelo Anexo A da norma EN 1993-1-2. Para ter em conta a fase de endurecimento do aço a temperaturas elevadas, ver Gráfico 4. Devem ser consideradas as relações (19-21)

$$f_{u,\theta} = 1,25f_{y,\theta} \text{ quando } (\theta_a < 300^\circ\text{C}) \quad (19)$$

$$f_{u,\theta} = f_{y,\theta}(2 - 0,0025\theta_a) \text{ quando } (300^\circ\text{C} < \theta_a < 400^\circ\text{C}) \quad (20)$$

$$f_{u,\theta} = f_{y,\theta} \text{ quando } (\theta_a > 400^\circ\text{C}) \quad (21)$$

Para esta nova fase devem ser considerados o seguinte valor de extensão:
 $\varepsilon_{s,\theta} = 4\%$

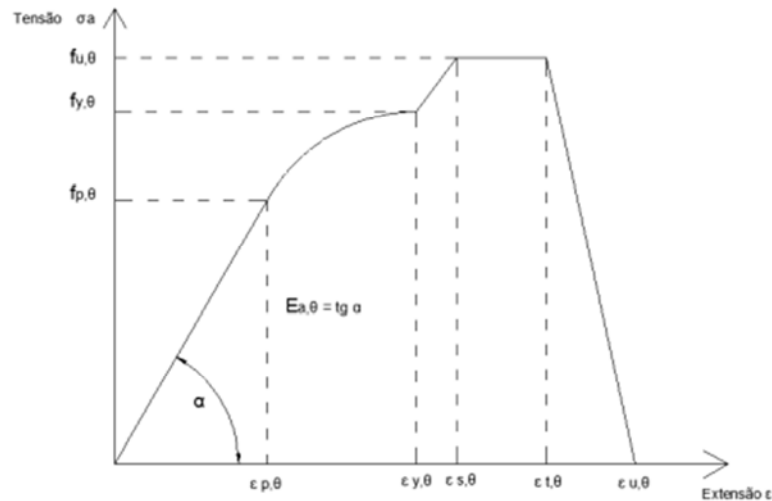


Gráfico 4 – Relação tensão-extensão para o aço ao carbono em condições de incêndio, considerando a fase de endurecimento.

A variação da relação entre tensão-extensão, com a temperatura, considerando um patamar de endurecimento, é representado pelo Gráfico 5, em que se observa a tensão-extensão para quatro níveis de temperaturas (300°C, 400°C, 450°C e 500°C). Observa-se uma redução da fase de endurecimento até aos 450°C, deixando de se considerar para temperaturas superiores.

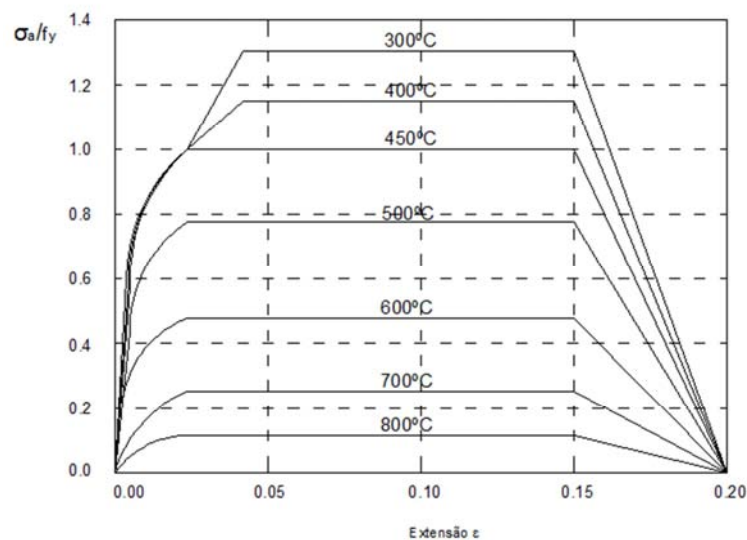


Gráfico 5 – Relação tensão-extensão para diferentes temperaturas, considerando a fase de endurecimento.

As propriedades térmicas do aço mais significativas são três, ambas definidas na EN 1993-1-2 (CENb, 2005). A extensão do material “ $\Delta l/l$ ”, o calor específico “ c_a ” e a condutibilidade térmica “ λ_a ”.

A extensão do material segue a tendência descrita pelo conjunto de equações (22) à (24), e graficamente representadas pelo Gráfico 6 em função da evolução da temperatura no material. Pode-se observar um patamar de extensão entre os 800°C devido à transformação da fase do material, de ferrite para austenite, designando-se de transformação alotrópica.

$$\Delta l/l = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4} \quad (22)$$

quando $(20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 750^\circ\text{C})$

$$\Delta l/l = 1,1 \times 10^{-2} \quad \text{quando } (750^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 860^\circ\text{C}) \quad (23)$$

$$\Delta l/l = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3} \quad \text{quando } (860^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}) \quad (24)$$

Em que “l” representa o comprimento a 20°C do elemento, “Δl” representa o alongamento induzido pela temperatura e “θ_a” representa a temperatura do aço [°C].

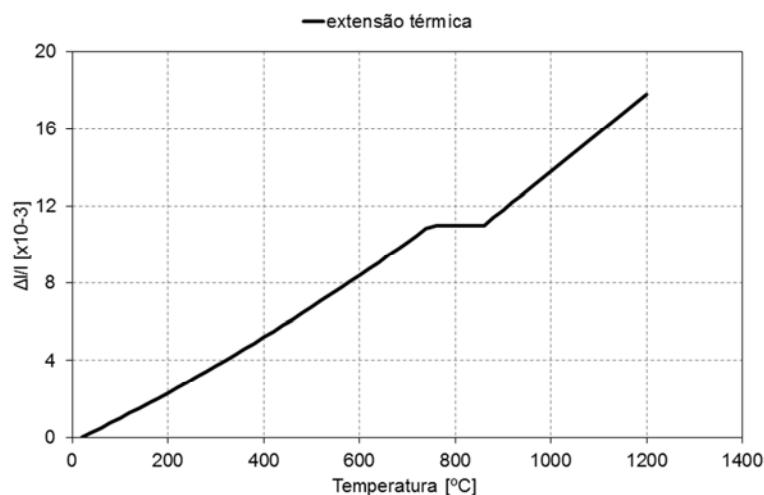


Gráfico 6 – Evolução da extensão térmica do aço com a variação da temperatura.

A evolução do calor específico do aço c_a , com a variação da temperatura é definida pela equação (25), de acordo com a EN 1993-1-2 (CENb, 2005), e representada graficamente no Gráfico 7. Neste gráfico é possível observar uma variação brusca do valor para temperaturas entre os 700°C e 800°C. A perturbação observada deve-se à transformação alotrópica do aço endotérmica.

$$\begin{aligned}
 C_a &= 425 + 7.73 \times 10^{-1}(\theta_a)^2 - 1.69 \times 10^{-6}(\theta_a)^3 + 2.22 \times 10^{-6}(\theta_a)^3; \\
 &\text{quando } (20 < \theta_a \leq 600[^\circ\text{C}]) \\
 C_a &= 666 - \left[\frac{13000}{\theta_a - 738} \right]; \text{ quando } (600 < \theta_a \leq 735[^\circ\text{C}]) \\
 C_a &= 545 - \left[\frac{17820}{\theta_a - 731} \right]; \text{ quando } (735 < \theta_a \leq 900[^\circ\text{C}]) \\
 C_a &= 650; \text{ quando } (900 < \theta_a \leq 1200[^\circ\text{C}])
 \end{aligned} \tag{25}$$

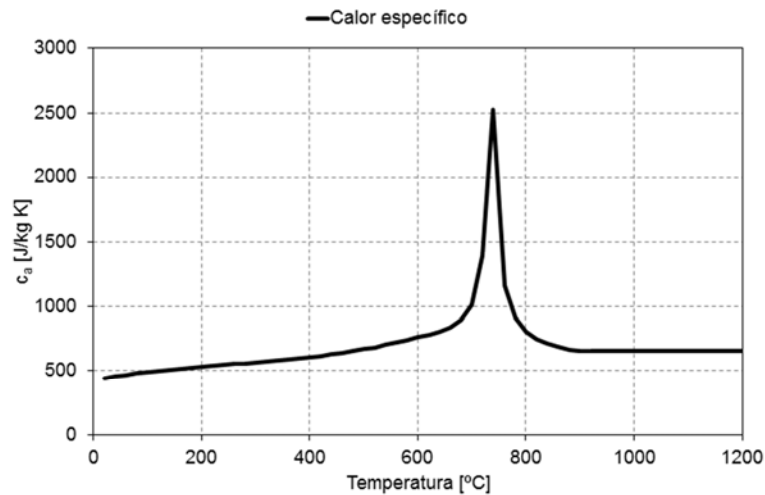


Gráfico 7 – Evolução do calor específico do aço, com a variação da temperatura.

A variação da condutibilidade térmica do aço com a variação da temperatura do material é definida pela expressão (26), e representada graficamente no Gráfico 8. Como se pode observar observa-se uma tendência de diminuição da condutibilidade até aos 800°C, onde ocorre uma estabilização para um valor de 27,3 [W/mK].

$$\begin{aligned}
 \lambda_a &= 54 - 3.33 \left(\frac{\theta_a}{100} \right); \text{ quando } (20 < \theta_a < 800[^\circ\text{C}]) \\
 \lambda_a &= 27.3; \text{ quando } (800 < \theta_a \leq 1200[^\circ\text{C}])
 \end{aligned} \tag{26}$$

A alteração da tendência deverá estar relacionada com a transformação alotrópica endotérmica, já mencionada.

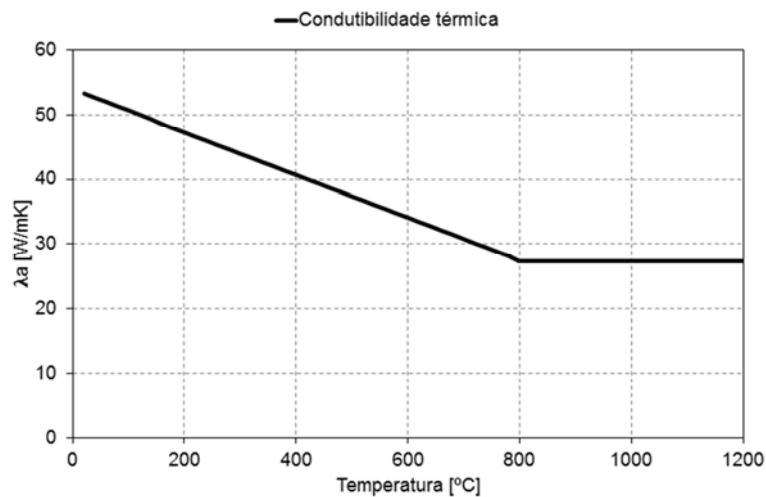


Gráfico 8 – Evolução da condutibilidade térmica com a variação da temperatura no aço.

4.1.2 Caracterização real.

Foram efectuados ensaios de resistência à tracção em provetes, extraídos dos perfis em aço, do mesmo lote de perfis utilizados para os elementos de ensaio à flexão. Para cada secção foram maquinados um mínimo de três provetes. Os provetes foram maquinados com as dimensões definidas pela norma NP EN 100002-1 (IPQ, 2006), ver Anexo – Parte I.. Na Figura 7 estão representados os provetes, durante e após a maquinação em CNC dos perfis em aço. Esta norma foi revogada pela ISO 6892-1 (ISO, 2009), contudo os ensaios foram realizados ainda com as considerações da norma anterior.



Figura 7 – Provetes durante e após a maquinação.

Os ensaios foram realizados numa máquina de ensaios de tracção universal Instron 4485, como se pode observar na Figura 8. Na figura está representado um provete no início do ensaio e outro depois da sua ruptura. Trata-se de um provete

da secção transversal LNP. Para controlo dimensional da espessura foi utilizado um micrómetro analógico.



Figura 8 – Ensaio realizado de teste de resistência à tracção dos provetes.

Os dados foram registados, com velocidade normalizada, e tratados posteriormente em formato Excel[®]. Os resultados de força / extensão permitem determinar os valores do módulo de elasticidade “ E ”, da tensão limite de proporcionalidade para 0,2% de deformação ($R_{p0,2}$), o limite superior de tensão de cedência (R_{eH}) e o limite inferior de tensão de cedência (R_{eL}). Os resultados ainda permitem calcular os valores de tensão de limite de ruptura (R_m) e o valor de extensão após ruptura (A_t).

Os resultados dos ensaios foram sobrepostos em formato gráfico e em tabela, tendo definido o valor médio e o desvio padrão para cada conjunto de ensaios do material da mesma secção transversal.

No Gráfico 9 estão representados os resultados dos ensaios de tracção dos perfis metálicos. Pode-se concluir que os elementos enformados a quente IPE e LNP (PI e PL), são os que possuem um patamar de cedência, antes de passar a uma fase plástica, atingindo a sua capacidade última de resistência à tracção. Os provetes de secção SHS e CHS (PS e PC), são secções enformadas a frio, não possuem um patamar de cedência bem definido, antes de atingir a sua capacidade última de resistência à tracção. Nos provetes PL, da secção LNP, observou-se uma pequena variabilidade dos resultados, por este motivo optou-se pela realização de um ensaio extra, para consolidação dos valores médios e diminuição do desvio padrão.

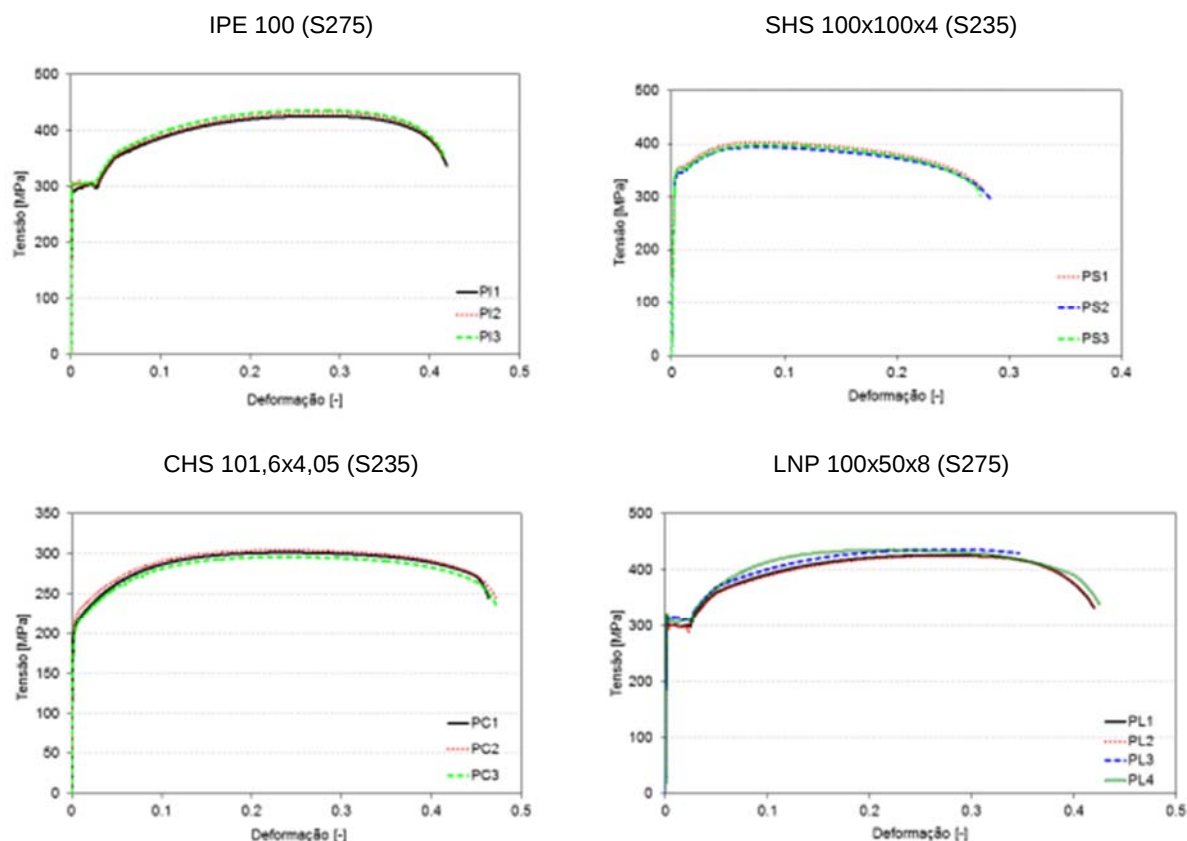


Gráfico 9 – Agrupamento dos gráficos força / extensão, nos ensaios aos provetes de aço.

Da Tabela III.1 à Tabela III.4, do Anexo – Parte III., estão representados os resultados dos ensaios de resistência à tracção dos provetes disposto no Anexo – Parte I.. Os valores relevantes a recolher dos ensaios à tracção, necessários ao cálculo de resistência dos elementos pelos regulamentos, nomeadamente o EN 1993-1-1 (CENa, 2005) e EN 1993-1-2 (CENb, 2005), são o módulo de elasticidade “ E ” e a tensão de cedência $f_y = R_{eH}$. A tensão última (f_u) deverá ser considerada igual ao valor de (R_m) dos ensaios de tracção. Nos provetes de aço em que não se encontre uma zona de cedência bem definida, provetes de perfis enformados a frio, o valor da tensão de cedência “ f_y ” deverá ser igual à tensão limite de proporcionalidade a 0,2% ($R_{p0,2}$).

Na Tabela 6, observam-se os valores nominais e reais das propriedades dos aços. Através do valor de tensão de cedência “ f_y ” real, é possível verificar a influência no grau de utilização dos elementos.

Tabela 6 – Valores de tensão de cedência e tensão de ruptura obtidos nos ensaios de tracção ao aço.

Secção		IPE	SHS	CHS	LNP
Módulo de elasticidade (E [GPa])	Nominal	210	210	210	210
	Ensaio de tracção	198	196	--	208
Tensão de cedência (f_y [MPa])	Nominal	275	235	235	275
	Ensaio de tracção	303	344	201	311
Tensão de ruptura (f_u [MPa])	Nominal	430	360	360	430
	Ensaio de tracção	431	399	301	430

4.2 Secções transversais.

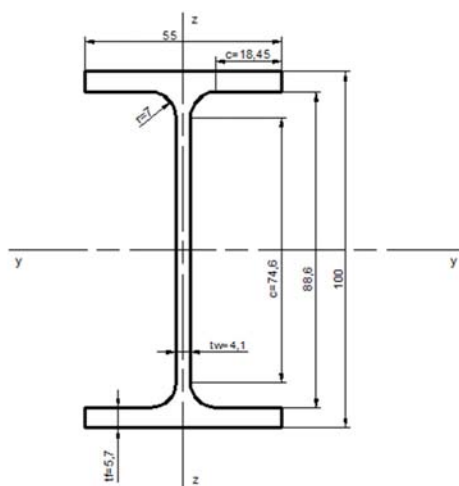
Do material disponível em laboratório foram escolhidas secções aleatórias, mas com o cuidado de seleccionar perfis do mesmo lote, provenientes do mesmo fornecedor.

Efectuou-se um levantamento de propriedades mecânicas relevantes ao cálculo de resistência à flexão, através de catálogos de fornecedores. Efectuou-se ainda a medição da geometria, para aferir o valor das propriedades nominais de cada secção e poder contabilizar esse feito no grau de utilização aplicado a cada elemento.

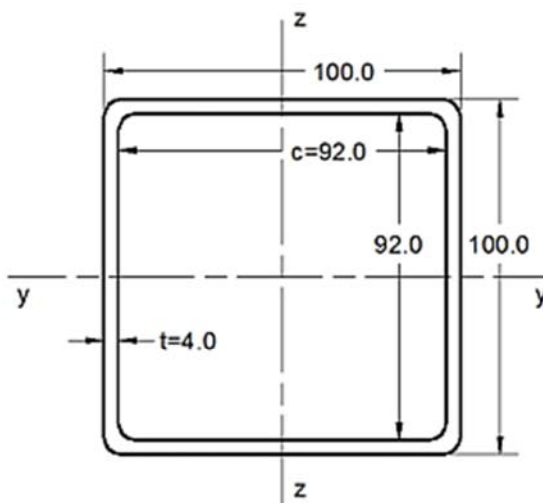
4.2.1 Caracterização nominal.

As secções transversais dos elementos escolhidos para ensaio são as dispostas pela Figura 9, contendo as dimensões apresentadas em catálogos técnicos e fichas do fornecedor, mais propriamente o programa de vendas da Arcelor Mittal (Arcelor Mittal, 2005), do Manual Técnico de Produtos Siderúrgicos da CHAGAS (Forêncio Augusto Chagas, S.A., 2002), do catálogo da Aceralia (Aceralia, 2001) e ainda tabelas da Metálica disponíveis on-line (Metálica, 1999-2011). Serão estas as dimensões adoptadas para todos os cálculos nominais dos elementos.

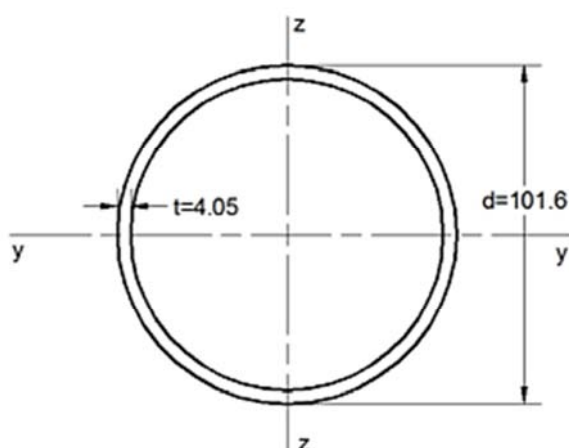
IPE 100 (Arcelor Mittal)



SHS 100x100x4 (Aceralia)



CHS 101,6x4,05 (Metálica)



LNP 100x50x8 (Chagas)

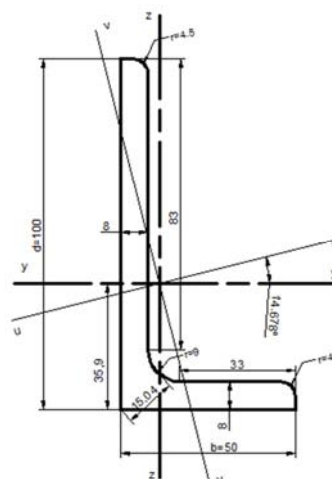


Figura 9 – Propriedades dimensionais das secções para o cálculo da classe segundo EC3.

Para o cálculo da capacidade resistente de cada secção transversal deverão ser consideradas as propriedades inerciais destas, sendo elas: a área da secção transversal (A), o momento de inércia de segunda ordem à flexão (I), constante de torção (I_t), constante de empenamento (I_w), módulo elástico da secção (W_{el}), módulo plástico da secção (W_{pl}) e raio de giração (i). Estas propriedades foram recolhidas de catálogos da especialidade, já atrás referidos e encontram-se descritos na Tabela 7.

Para a secção LNP 100x50x8 não estavam disponíveis os valores de certas propriedades, tais como a constante de empenamento, constante de torção e módulo de resistência plástica à flexão. Para a determinação das constantes de torção e empenamento, foi utilizada uma aproximação descrita pelo Instituto

Canadiano do Aço para a Construção (Construction, 2002). As expressões para a determinação da constante de torção (I_t) e constante de empenamento (I_w) estão descritas pelas expressões (27) e (28) respectivamente.

$$I_t = (b' + d') \left(\frac{t^3}{3} \right) \quad (27)$$

$$I_w = (b'^3 + d'^3) \left(\frac{t^3}{36} \right) \quad (28)$$

Onde:

$$b' = b - t/2 \quad (29)$$

$$d' = d - t/2 \quad (30)$$

Nestas expressões, “ b ” representa o comprimento do banzo menor, “ d ” representa o comprimento do banzo maior, “ t ” representa a espessura da secção.

Para a determinação do módulo de resistência plástico à flexão foi utilizado um programa Shape Designer 6, da MechaTools Technologies, fazendo uso de uma aproximação da secção através de duas formas rectangulares de 100x8 [cm] e 42x8 [cm].

Tabela 7 – Características mecânicas das secções transversais.

Catálogo:	Arcelormittal	Aceralia	Metálica	Chagas
Característica	IPE 100	SHS 100x100x4	CHS 101,6x4,05	LNP 100x50x8
A (m ²)	1,03X10 ⁻³	1,52X10 ⁻³	1,21X10 ⁻³	1,14X10 ⁻³
I _y (m ⁴)	1,71X10 ⁻⁶	2,36X10 ⁻⁶	1,45X10 ⁻⁶	1,16X10 ⁻⁶
I _z (m ⁴)	1,59X10 ⁻⁷	2,36X10 ⁻⁶	1,45X10 ⁻⁶	1,95X10 ⁻⁷
I _v (m ⁴)	--	--	--	1,27X10 ⁻⁷
I _u (m ⁴)	--	--	--	1,23X10 ⁻⁶
I _t (m ⁴)	1,2X10 ⁻⁸	--	--	2,42X10 ⁻⁸
I _w (m ⁴)	3,5X10 ⁻¹⁰	--	--	1,4X10 ⁻¹¹
W _{el,y} (m ³)	3,42X10 ⁻⁵	4,73X10 ⁻⁵	2,85X10 ⁻⁵	1,81X10 ⁻⁵
W _{el,z} (m ³)	5,79X10 ⁻⁶	4,73X10 ⁻⁵	2,85X10 ⁻⁵	5,04X10 ⁻⁶
W _{el,v} (m ³)	--	--	--	4,29X10 ⁻⁶
W _{el,u} (m ³)	--	--	--	1,9X10 ⁻⁵
W _{pl,y} (m ³)	3,94X10 ⁻⁵	5,53X10 ⁻⁵	3,78X10 ⁻⁵	--
W _{pl,z} (m ³)	9,2X10 ⁻⁶	5,53X10 ⁻⁵	3,78X10 ⁻⁵	--
W _{pl,v} (m ³)	--	--	--	1,51X10 ⁻⁵
W _{pl,u} (m ³)	--	--	--	3,05X10 ⁻⁵
i _y (m)	0,0407	0,039	0,0345	0,0318
i _z (m)	0,0124	0,039	0,0345	0,0131
i _v (m)	--	--	--	0,0105
i _u (m)	--	--	--	0,0328

4.2.2 Caracterização real.

Foram efectuados vários pontos de medição para o controlo geométrico, em vários elementos das diferentes secções, para apurar as dimensões reais das secções transversais, com a ajuda de um micrómetro e um paquímetro, ver Figura 10.

Na Tabela 8 encontram-se descritos os valores médios, resultante das medições sobre as secções transversais. É efectuada uma comparação com os valores nominais referidos pelos fornecedores. O registo das medições,

encontram-se no Anexo – Parte III., descrevendo os valores sobre os vários pontos escolhidos para efectuar o cálculo dos valores médios.



Figura 10 – Ferramentas de ajuda à medição das secções.

Tabela 8 – Valores médios das medidas efetuadas às secções, medidas em [mm].

Secção:	IPE 100				SHS 100x100x4		CHS 101,6x4,05		LNP 100x50x8		
Elemento:	h	b	tf	tw	h	t	d	t	h	b	t
Nominal	100,0	55,0	5,7	4,1	100,0	4,0	101,6	4,05	100,0	50,0	8,0
Real	102,03	54,81	5,54	4,50	100,09	4,18	100,53	3,65	99,68	50,88	8,46

Com as dimensões reais das secções, determinam as propriedades inerciais reais dos elementos de diferentes secções transversais. O cálculo das propriedades mecânicas destas secções é efectuado, no caso dos IPE, com os catálogos que fornecem expressões, no caso do SHS e LNP, utilizando a ferramenta de análise de secções transversais Shape Designer 6, da MechaTools Technologies. Para o cálculo das propriedades mecânicas reais da secção CHS utilizou-se duas referências, para as propriedades gerais as Tabelas Técnicas (Farinha & Reis, 1993), para as propriedades plásticas da secção (Chen & Sohal, 1995).

Na Tabela 9 representa-se a comparação entre as propriedades mecânicas reais das secções e as nominais.

Tabela 9 – Propriedades mecânicas das secções com as características reais da secção e material.

IPE 100, fonte (Arcelor Mittal, 2005)									
Propriedade	A (m ²)	I _y (m ⁴)	I _z (m ⁴)	i _y (m)	i _z (m)	I _t (m ⁴)	I _w (m ⁴)	W _{ply} (m ³)	W _{plz} (m ³)
Nominal	1,03	1,71	1,59	0,0407	0,0124	1,2	3,5	3,94	9,2
	X10 ⁻³	X10 ⁻⁶	X10 ⁻⁷			X10 ⁻⁸	X10 ⁻¹⁰	X10 ⁻⁵	X10 ⁻⁶
Real	1,06	1,78	1,53	0,041	0,012	1,29	3,54	4,05	8,94
	X10 ⁻³	X10 ⁻⁶	X10 ⁻⁷			X10 ⁻⁸	X10 ⁻¹⁰	X10 ⁻⁵	X10 ⁻⁶
SHS 100x100x4, fonte (Shape Designer)									
Propriedade	A (m ²)	I (m ⁴)	i (m)	W _{el} (m ³)	W _{pl} (m ³)				
Nominal	1,52	2,36	0,039	4,73	5,53				
	X10 ⁻³	X10 ⁻⁶		X10 ⁻⁵	X10 ⁻⁵				
Real	1,61	2,5	0,0394	4,97	5,82				
	X10 ⁻³	X10 ⁻⁶		X10 ⁻⁵	X10 ⁻⁵				
CHS 101,6x4,05, fonte (Farinha & Reis, 1993) e (Chen & Sohal, 1995)									
Propriedade	A (m ²)	I (m ⁴)	i (m)	W _{el} (m ³)	W _{pl} (m ³)				
Nominal	1,21	1,45	0,0345	2,85	3,78				
	X10 ⁻³	X10 ⁻⁶		X10 ⁻⁵	X10 ⁻⁵				
Real	1,11	1,3	0,0343	2,6	3,43				
	X10 ⁻³	X10 ⁻⁶		X10 ⁻⁵	X10 ⁻⁵				
LNP 100x50x8, fonte (Shape Designer)									
Propriedade	A (m ²)	I _v (m ⁴)	I _u (m ⁴)	i _v (m)	i _u (m)	I _t (m ⁴)	I _w (m ⁴)	W _{plv} (m ³)	W _{plu} (m ³)
Nominal	1,14	1,27	1,23	0,0105	0,0328	2,42	1,4	1,51	3,05
	X10 ⁻³	X10 ⁻⁷	X10 ⁻⁶			X10 ⁻⁸	X10 ⁻¹¹	X10 ⁻⁵	X10 ⁻⁵
Real	1,14	1,41	1,3	0,0108	0,0329	2,82	1,56	1,6	3,22
	X10 ⁻³	X10 ⁻⁶	X10 ⁻⁶			X10 ⁻⁸	X10 ⁻¹¹	X10 ⁻⁵	X10 ⁻⁵

4.3 Tinta intumescente.

Neste trabalho foi utilizada uma tinta intumescente, designada por tinta A. trata-se de uma tinta de base aquosa.

A tinta reage sob a acção do calor, produzindo uma espuma isolante de muito baixa condutividade térmica, protegendo o material de base da acção do fogo. Com base em testes laboratoriais, as empresas produtoras desta tinta,

afirmam que este tipo de protecção passiva, quando aplicada em superfícies metálicas, retardando o efeito da acção do fogo, em cerca de 15 a 120 minutos, aumentando assim o tempo de resistência ao fogo das estruturas metálicas.

Na Figura 11 estão representados dois estados da tinta sob a acção da curva de incêndio nominal ISO 834, inicialmente a camada protectora sem reacção, não apresenta alterações na superfície, um minuto depois a reacção da tinta em forma de espuma.



Figura 11 – Exemplo de um processo de intumescência, com tinta intumescente aplicada num perfil sob a acção do fogo.

Esta tinta permite a aplicação em superfícies interiores e superfícies exteriores. Permite também uma elevada produtividade, pois permite a aplicação de elevadas espessuras por cada demão aplicada. Ainda permite a aplicação de várias demãos consecutivas, admitindo a sobreposição de consecutivas camadas.

O fabricante recomenda que a aplicação desta tinta, entre demãos, seja efectuada em locais protegidos de elevados graus de humidade, sendo de evitar ambientes de chuva ou sujeitos a salpicos de água. O ambiente de aplicação da tinta podem variar entre temperaturas de 5 a 45 [°C], possuir uma humidade relativa entre 0 e 85 [%]. Para garantir uma boa aplicação, a superfície do elemento a pintar deve estar 3°C acima do ponto de orvalho.

5 Resistência nominal das secções e dos elementos.

Neste capítulo desenvolve-se um estudo nominal da capacidade resistente última dos elementos propostos a ensaio. Os elementos cujas secções transversais são: IPE 100 (S275), SHS 100x100x4 (S235), CHS 101,6x4,05 (S235) e LNP 100x50x8 (S275), têm em comum o seu comprimento entre apoios ($l=1210$ [mm]). O elemento será colocado na posição vertical e solicitado por uma força transversal ao meio vão, que provocará esforços de flexão e transverso, como se observa na Figura 12. Verifica-se a existência de um apoio duplo e um apoio simples nos extremos do elemento, que caracterizam as condições fronteira. O efeito desta acção de flexão provocou modos de colapso distintos. Para os elementos SHS e CHS verificou-se um estado limite ultimo (ELU) com formação de rótula plástica, enquanto que para os elementos IPE e LNP verificou-se em ELU por instabilidade do elemento (encurvadura lateral).

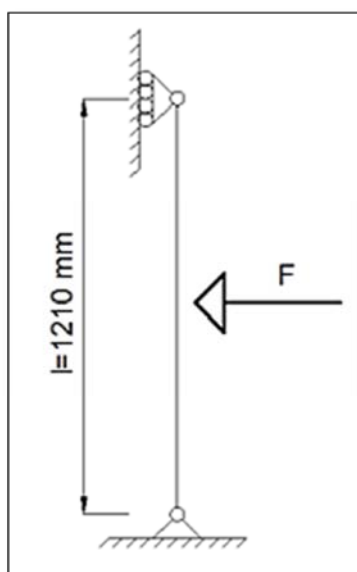


Figura 12 – Esquema de carga e apoios para o elemento.

Os esforços internos produzidos pelo estado de flexão em três pontos são o momento flector e o esforço transverso. Sendo o valor máximo de cada um deles definido pelas expressões (31) e (32)

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed} l}{4} \quad (31)$$

$$V_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{2} \quad (32)$$

Em que “ M_{Ed} ” representa o valor de cálculo do momento flector actuante, “ V_{Ed} ” representa o valor de cálculo de esforço transversal actuante, “ F_{Ed} ” representa o valor da força transversal actuante a meio vão do elemento, “ l ” é o comprimento entre apoios do elemento.

O estudo da capacidade resistente destes elementos será determinada para duas condições, condições de temperatura ambiente ($\pm 20^{\circ}\text{C}$) com carga (F) incremental, e ao fogo dependendo do grau de utilização com carga (F) constante.

A capacidade resistente dos elementos à temperatura ambiente será determinada pela capacidade de carga máxima que estes suportam. Em condições de ambiente ao fogo pretende-se determinar a temperatura crítica dos elementos a três graus de utilização diferentes (valores nominais), $\mu_0=30\%$, $\mu_0=50\%$ e $\mu_0=70\%$.

A definição da capacidade resistente de um elemento, com uma determinada secção transversal deve ser definida de acordo com EN 1993-1-1 (CENa, 2005), esta norma permite o cálculo da capacidade resistente dos elementos à temperatura ambiente.

Para uma análise de resistência ao fogo dos elementos, deverá ser utilizada a norma EN 1993-1-2 (CENb, 2005).

Antes de uma análise à resistência última dos elementos, deverá ser definida a convenção dos eixos a adoptar, que segue o disposto pela EN 1993-1-1 (CENa, 2005). Na Figura 13 representa-se a convenção genérica dos eixos, para as secções transversais em estudo (secções com dois eixos de simetria e secções assimétricas).

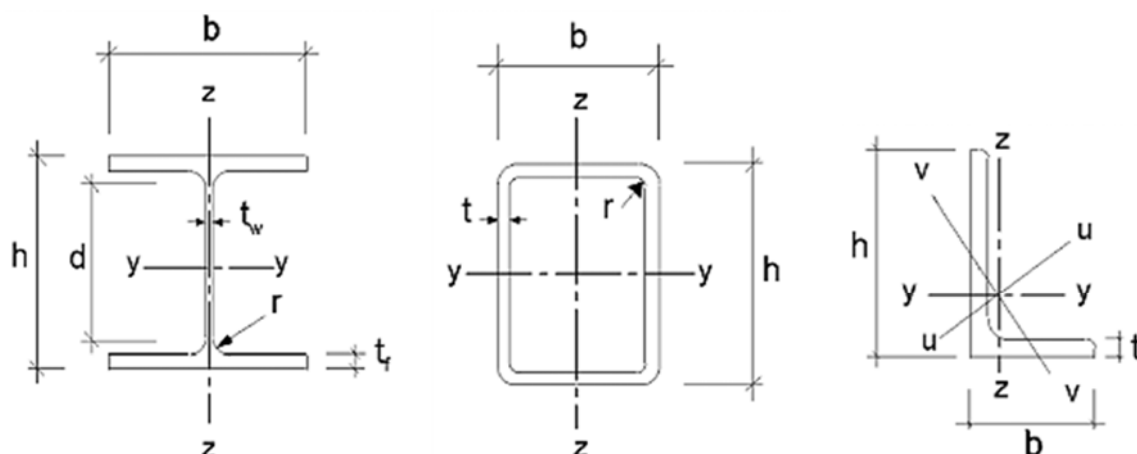


Figura 13 – Representação genérica das secções (CENa, 2005).

A convenção dos eixos define-os genericamente para as diferentes secções transversais, descritos na Tabela 10.

Tabela 10 – Convenção genérica dos eixos nas secções transversais.

Eixo	Descrição
x-x	Eixo longitudinal do elemento
y-y	Eixo principal horizontal da secção transversal
z-z	Eixo principal vertical da secção transversal
u-u	Eixo principal central de máxima inércia em secções assimétricas
v-v	Eixo principal central de mínima inércia em secções assimétricas

5.1 Classificação de secções.

A análise de um qualquer elemento estrutural inicia-se pela classificação da sua secção transversal. A pré-disposição de qualquer parte da secção do elemento para encurvar localmente, pode limitar a capacidade resistente destes quando submetidos a carregamento por flexão. Nesses casos pode ser necessário impedir que a tensão de cedência seja alcançada, (Vila Real, 2003).

A norma EN 1993-1-1 (CENa, 2005), classifica as secções transversais do elemento em função da esbelteza das partes que constituem a secção, do valor da resistência do cálculo, da capacidade de rotação plástica e do risco de encurvadura local, (Vila Real, 2003).

São então definidas quatro classes de secções transversais. As secções transversais de classe 1, são aquelas em que se pode formar uma rótula plástica,

com a capacidade de rotação necessária para uma análise plástica, sem redução da sua resistência. Secções transversais de classe 2, são aquelas que podem atingir o momento resistente plástico, mas cuja capacidade de rotação é limitada pela encurvadura local. As secções transversais de classe 3, são aquelas em que a tensão na fibra extrema comprimida, calculada com base numa distribuição elástica de tensões, pode atingir o valor da tensão de cedência, mas em que a encurvadura local pode impedir que o momento resistente plástico seja atingido. Secções transversais de classe 4, são aquelas em que ocorre a encurvadura local antes de se atingir a tensão de cedência numa ou mais partes da secção transversal.

A Figura 14 (Vila Real, 2003), representa a evolução das curvas de momento-rotação para as várias classes de secção transversal, evidenciando a resistência e a capacidade de rotação que pode ser obtida antes do aparecimento de fenómenos de encurvadura local que se representam pela inversão da tendência da curva. A figura mostra o valor necessário de rotação para que se produzam tensões plásticas e a consequente formação de uma rótula plástica na secção.

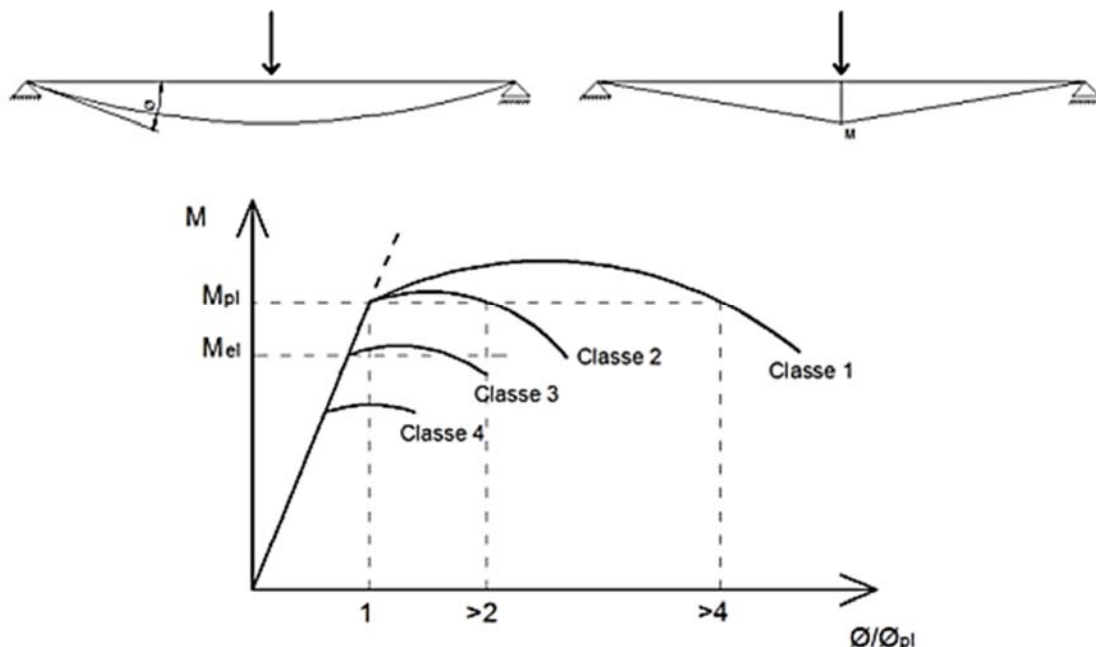


Figura 14 – Curvas momento-rotação para as diferentes classes de secção transversal (Vila Real, 2003).

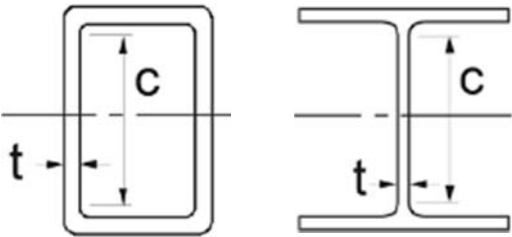
A classificação das secções transversais, é diferenciada na secção transversal, em elementos interiores e elementos exteriores. É feita uma análise distinta para secções circulares, e assimétricas de classe 3 à compressão pura.

Para a determinação da classe global da secção transversal em análise a EN 1993-1-1 (CENa, 2005), define algumas considerações. A secção deverá ser classificada de acordo com a maior classe obtida da análise dos seus componentes (alma e banzos), considerando assim a classe menos favorável à segurança. As secções que não satisfaçam as condições da classe 1, 2 e 3, deveram ser tomadas como sendo de classe 4. O coeficiente adimensional ε , relativo à tensão de cedência determina-se pela seguinte expressão (32). f_y representa o valor da tensão de cedência do material em [MPa].

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (33)$$

Os elementos interiores da secção transversal são classificados de acordo com a Tabela 11, adaptada do de EN 1993-1-1 (CENa, 2005), em que especifica limites máximos para cada classe. No caso em estudo, importa verificar soluções para o estado de flexão.

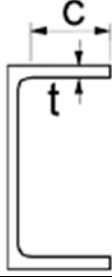
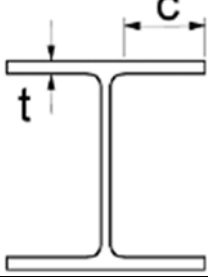
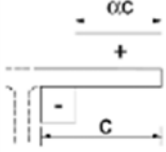
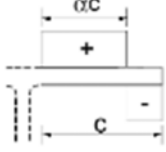
Tabela 11 – Limites máximos das classes para elementos internos (CENa, 2005).



Classe / Estado de tensão	Flexão	Compressão
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$

Os elementos exteriores da secção transversal são classificados de acordo com a Tabela 12, adaptada do Eurocódigo 3, em que especifica limites máximos para cada classe. As cantoneiras (secção LNP) à flexão deverão ser consideradas como elementos externos.

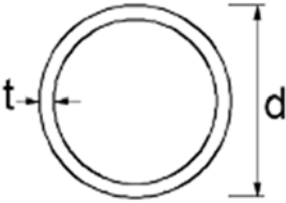
Tabela 12 – Limites máximos das classes para elementos externos (CENa, 2005).

 		Flexão	
Estado de tensão / Classe	Compressão	Externamente comprimido	Externamente traccionado
			
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq 9\varepsilon/\alpha$	$c/t \leq 9\varepsilon/\alpha\sqrt{\alpha}$
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq 10\varepsilon/\alpha$	$c/t \leq 10\varepsilon/\alpha\sqrt{\alpha}$
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 21\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$	

O coeficiente k_σ deverá ser determinado de acordo com a EN 1993-1-5 (CEN, 2006)

A Tabela 13, adaptada da EN 1993-1-1 (CENa, 2005), determina os valores máximos das classes de uma secção transversal tubular.

Tabela 13 – Limites máximos das classes para secções tubulares (CENa, 2005).

	
Classe / Estado de tensão	Flexão e compressão
1	$d/t \leq 50\varepsilon^2$
2	$d/t \leq 70\varepsilon^2$
3	$d/t \leq 90\varepsilon^2$

Para uma análise a temperaturas elevadas, o documento EN 1993-1-2 (CENb, 2005), define que o método para determinação das classes de secções à temperatura ambiente se mantêm para este caso, contudo o coeficiente adimensional ε deverá ser corrigido pela expressão (34), (Vila Real, 2003), em

que f_y é o valor da tensão de cedência do material à temperatura ambiente, em MPa.

$$\varepsilon_{fi} = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (34)$$

O valor de 0,85 teve em consideração a influência provocada pelo aumento da temperatura.

5.1.1 Classificação das secções em estudo.

Esta secção pretende determinar a classe das secções transversais descritas na Figura 9, segundo a EN 1993-1-1 (CENa, 2005) e EN 1993-1-2 (CENb, 2005).

Na análise da secção transversal IPE 100 (S275), a classificação da secção é efectuada com a alma sujeita à flexão e os banzos à compressão pura. A condição para a alma e banzos pertencerem à classe 1 é verificada pelas seguintes expressões respectivamente.

À temperatura ambiente é determinado pelas expressões (35) e (36)

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon \Leftrightarrow \frac{74,6}{4,1} \leq 72 \times \sqrt{\frac{235}{275}} \Leftrightarrow 18,2 \leq 66,56 \quad (35)$$

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon \Leftrightarrow \frac{18,45}{5,7} \leq 9 \times \sqrt{\frac{235}{275}} \Leftrightarrow 3,24 \leq 8,32 \quad (36)$$

Em condições de fogo determina-se pelas expressões (37) e (38)

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon \Leftrightarrow \frac{74,6}{4,1} \leq 72 \times 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{275}} \Leftrightarrow 18,2 \leq 56,58 \quad (37)$$

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon \Leftrightarrow \frac{18,45}{5,7} \leq 9 \times 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{275}} \Leftrightarrow 3,24 \leq 7,07 \quad (38)$$

Depois da análise a cada elemento em separado da secção transversal, alma (34) e (36), banzos (35) e (37), pode-se definir a secção IPE 100 (S275) como sendo da classe 1 em condições de temperatura ambiente, e como sendo de classe 1 para condições de fogo.

A verificação da classe da secção transversal SHS 100x100x4 (S235), é efectuada em dois estados de tensão, com os elementos laterais à flexão e com os elementos de topo ou base à compressão pura, a condição para pertencer à classe 1 é verificada nas seguintes expressões, respectivamente.

À temperatura ambiente:

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon \Leftrightarrow \frac{92}{4} \leq 72 \times \sqrt{\frac{235}{235}} \Leftrightarrow 23 \leq 72 \quad (39)$$

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon \Leftrightarrow \frac{92}{4} \leq 33 \times \sqrt{\frac{235}{235}} \Leftrightarrow 23 \leq 33 \quad (40)$$

Em condições de fogo:

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon \Leftrightarrow \frac{92}{4} \leq 72 \times 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{235}} \Leftrightarrow 23 \leq 61,2 \quad (41)$$

$$\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon \Leftrightarrow \frac{92}{4} \leq 33 \times 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{235}} \Leftrightarrow 23 \leq 28,05 \quad (42)$$

Depois da análise a cada estado de tensão dos elementos em separado, na secção transversal, flexão (38) e (40), banzos (39) e (41), pode-se definir a secção SHS 100x100x4 (S235) como sendo da classe 1 em condições de temperatura ambiente, e como sendo de classe 1 para condições de ambiente ao fogo.

A classe da secção transversal CHS 101,6x4,05 (S235), é efectuada de acordo com a Tabela 13. A condição para que pertença à classe 1 é verificada nas expressões seguintes (42) e (43), em condições de temperatura ambiente e condições de fogo, respectivamente.

$$\frac{d}{t} \leq 50\varepsilon \Leftrightarrow \frac{101,6}{4,05} \leq 50 \times \sqrt{\frac{235}{235}} \Leftrightarrow 25,09 \leq 50 \quad (43)$$

$$\frac{d}{t} \leq 50\varepsilon \Leftrightarrow \frac{101,6}{4,05} \leq 50 \times 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{235}} \Leftrightarrow 25,09 \leq 42,5 \quad (44)$$

Da análise das expressões anteriores, conclui-se que a secção transversal CHS 101,6x4,05 (S235), pertence à classe 1 quando exposta à temperatura ambiente pertence à classe 1 quando exposta a condições de fogo.

A análise da classificação para a secção LNP 100x50x8 (S275), foi efectuada como sendo uma situação de elementos externos à flexão e compressão, como descrito pela Tabela 12. A situação pretendida pelo estudo coloca à flexão o banzo maior e à compressão pura o banzo menor, como representado pela Figura 15, que descreve o estado de tensões na secção transversal, no momento de aplicação da carga.

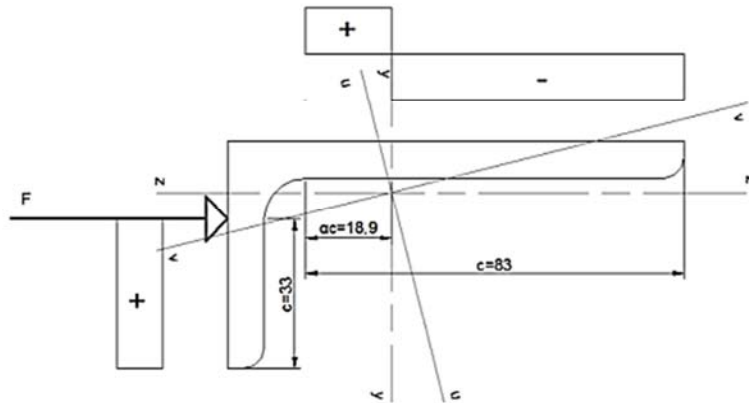


Figura 15 – Estado de tensões na secção assimétrica LNP 100x50x8.

As expressões seguintes permitem validar que a secção (LNP) pertence à classe 1, para elementos externos à flexão e à compressão, respectivamente.

À temperatura ambiente:

$$\frac{c}{t} \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}} \Leftrightarrow \frac{83}{8} \leq \frac{9 \times \sqrt{\frac{235}{275}}}{0,23 \times \sqrt{0,23}} \Leftrightarrow 10,38 \leq 75,43 \quad (45)$$

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon \Leftrightarrow \frac{33}{8} \leq 9 \times \sqrt{\frac{235}{275}} \Leftrightarrow 4,13 \leq 8,32 \quad (46)$$

Em condições de fogo:

$$\frac{c}{t} \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}} \Leftrightarrow \frac{83}{8} \leq \frac{9 \times 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{275}}}{0,23 \times \sqrt{0,23}} \Leftrightarrow 10,38 \leq 65,8 \quad (47)$$

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon \Leftrightarrow \frac{33}{8} \leq 9 \times 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{275}} \Leftrightarrow 4,13 \leq 7,07 \quad (48)$$

Da análise das expressões anteriores, conclui-se que a secção LNP 100x50x8 (S275) é da classe 1 em condições de temperatura ambiente e de classe 1 em condições de fogo.

Na Tabela 14 descreve-se um resumo de classificações a que cada uma das secções transversais pertencem, segundo a classificação da EN 1993-1-1 (CENa, 2005) e EN 1993-1-2 (CENb, 2005).

Tabela 14 – Resumo de classificações das secções transversais.

Condição	IPE 100 (S275)	SHS 100x100x4 (S235)	CHS 101,6x4,05 (S235)	LNP 100x50x8 (S275)
Temperatura ambiente	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1
Fogo	Classe 1	Classe 1	Classe 1	Classe 1

5.2 Resistência à flexão (temperatura ambiente).

A resistência de um elemento para o estado limite último (ELU) é abordado no capítulo 6 da EN 1993-1-1 (CENa, 2005), em que se especificam os termos a considerar no cálculo de resistência última de um elemento. Neste trabalho interessa determinar a capacidade resistente para o momento flector máximo, preconizado pelo Eurocódigo. A resistência ao esforço transversal irá ser desprezada, pois esta não é significativa para a determinação da capacidade resistente última dos elementos envolvidos no trabalho, ver Anexo – Parte IV..

Segundo a EN 1993-1-1 (CENa, 2005), o valor de cálculo do momento flector actuante M_{Ed} , para cada elemento, deve satisfazer a seguinte condição:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (49)$$

Em que $M_{c,Rd}$ representa o valor de cálculo do momento resistente. Determina-se pelas seguintes expressões, em função da classe de secção:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = W_{pl} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \text{ (classes 1 e 2)} \quad (50)$$

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = W_{el,min} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \text{ (classes 3)} \quad (51)$$

$$M_{c,Rd} = W_{eff,min} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \text{ (classes 4)} \quad (52)$$

Nestas expressões " W_{pl} " representa o valor do módulo de resistência plástica à flexão, " $W_{el,min}$ " representa o valor do módulo de resistência à flexão na fibra da secção com máximos de tensão elástica, " $W_{eff,min}$ " representa o valor do módulo de resistência à flexão efectivo de cálculo para secções de classe 4, e deve ser determinada segundo a EN 1993-1-5 (CEN, 2006).

Os coeficientes parciais de segurança são definidos por γ_{Mi} , consoante o tipo de análise. O coeficiente γ_{M0} é relativo à resistência da secção transversal de qualquer classe e toma o valor de $\gamma_{M0} = 1,0$, enquanto γ_{M1} sendo relativo a à resistência dos elementos à encurvadura e toma o valor de $\gamma_{M1} = 1,0$ de acordo com EN1993-1-1 (CENa, 2005).

O mecanismo de formação de rótula plástica corresponde à plastificação total da secção, quando o momento flector atinge o momento plástico da secção, $M_{pl,Rd}$, permitindo a rotação independente da secção à esquerda e à direita do ponto onde está a ser criada.

A encurvadura trata-se de um fenómeno de instabilidade a que os elementos estruturais estão sujeitos quando estes estão submetidos a esforços de compressão. Este fenómeno é verificado quando o elemento solicitado é carregado no seu eixo de maior inércia, o eixo menos resistente torna-se instável e forma uma tendência de deslocamento lateral da secção quando esta está

sujeita a esforços de flexão. Este fenómeno designa-se por encurvadura lateral (Vila Real, 2003).

Na Figura 16 observa-se o fenómeno de encurvadura verificado em 2 ensaios, durante a realização da parte experimental do presente trabalho. Os elementos sujeito à flexão são de secção transversal IPE e LNP. Observa-se o deslocamento lateral do banzo sujeito à compressão, devido à instabilização da alma na secção transversal.



Figura 16 – Representação do fenómeno de encurvadura lateral verificado em 2 ensaios.

O problema de encurvadura torna-se evidente quando o elemento se encontra muito próximo da sua capacidade última de resistência, e coloca-se a possibilidade de ocorrência do fenómeno nos elementos em estudo, pois nestes casos os elementos apresentam secções transversais monossimétricas (IPE 100) e assimétricas (LNP 100x50x8).

O documento EN 1993-1-1 (CENa, 2005), propõe um método de cálculo à encurvadura para secções não restringidas lateralmente e solicitadas na direcção do seu eixo principal de maior inércia, quando esta se encontra solicitada à flexão. Sendo que nas secções de revolução e secções ocas, não são considerados fenómenos de encurvadura na sua capacidade última de resistência.

De acordo com o documento referido, qualquer elemento uniforme sujeito a cargas que provoquem esforços de flexão, deverá verificar a seguinte condição:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (53)$$

Em que $M_{b,Rd}$ representa o valor de cálculo do momento flector resistente à encurvadura. Este valor deve ser considerado pela seguinte expressão:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (54)$$

Nas expressões, o módulo de resistência à flexão “ W_y ”, deverá ser considerado de acordo com a classe da secção transversal, de acordo com:

$$W_y = W_{pl,y} \text{ (classe 1 ou 2);}$$

$$W_y = W_{el,y} \text{ (classe 3);}$$

$$W_y = W_{eff,y} \text{ (classe 4);}$$

χ_{LT} representa o coeficiente de redução da resistência à flexão da secção, devido à possibilidade da ocorrência de fenómenos de encurvadura lateral.

Para o cálculo do factor de redução χ_{LT} o documento EN 1993-1-1 (CENa, 2005), apresenta diferentes métodos de cálculo, para as diferentes situações previstas. Um caso geral que se descreve a seguir, e um caso particular para secções laminadas ou soldadas equivalentes. A principal diferença entre estes, reside no facto de o caso geral ser mais conservador, tratando-se de um método genérico de análise. No caso geral, devem ser verificadas as seguintes expressões:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \text{ mas } \chi_{LT} \leq 1,0 \quad (55)$$

Sendo:

$$\Phi_{LT} = \frac{1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2}{2} \quad (56)$$

Na expressão anterior “ α_{LT} ” representa o factor de imperfeição determinado com base na Tabela 15, que determina as curvas de encurvadura lateral a considerar.

A esbelteza normalizada “ $\bar{\lambda}_{LT}$ ” deve ser determinada pela expressão seguinte.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \text{ (esbelteza normalizada)} \quad (57)$$

M_{cr} representa o valor do momento crítico elástico, que depende das propriedades simétricas da secção e do caso de carga considerada e dos apoios.

Na Tabela 15 estão descritas as curvas de encurvadura a utilizar no caso geral.

Tabela 15 – Curvas de encurvadura lateral a utilizar no caso geral.

Secção transversal	Limites	Curva de encurvadura
Secções em I laminadas	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
Secções em I laminadas	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
Outras secções transversais	--	d

Na Tabela 16 estão descritos os valores a tomar de α_{LT} , dependendo da curva de encurvadura lateral a considerada.

Tabela 16 – Valores a tomar para o factor de imperfeição segundo as curvas de encurvadura lateral.

Curva de encurvadura	a	b	c	d
Factor de imperfeição	0,21	0,34	0,49	0,76

No Gráfico 10 estão representadas as curvas de encurvadura lateral, obtêm-se um valor do factor de redução χ_{LT} correspondente ao valor de esbelteza normalizada. Pode-se verificar que quanto maior for o valor do factor de imperfeição α_{LT} , menor é o valor do factor de redução χ_{LT} , resultando assim em níveis de segurança mais elevados nos casos que utilizam a curva “d”, comparativamente à curva “a” (Reis & Camotim, 2000).

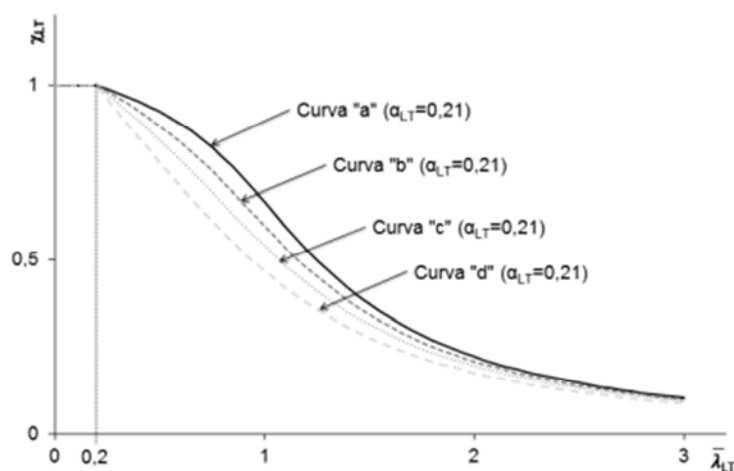


Gráfico 10 – Comparação entre curvas de encurvadura lateral.

No caso particular de secções transversais laminadas a quente, ou secções soldadas equivalentes do tipo I, no documento EN 1993-1-1 (CENa, 2005), através do ponto 6.3.2.3, apresenta uma proposta de cálculo do coeficiente de redução χ_{LT} , expresso na seguinte condição:

$$\chi_{Lt} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \left(\chi_{Lt} \leq 1,0 \wedge \chi_{Lt} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \right) \quad (58)$$

Sendo:

$$\Phi_{LT} = \frac{1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}{2} \quad (59)$$

O factor de imperfeição " α_{LT} " é determinado pela Tabela 17, em função curvas de encurvadura lateral a utilizar no caso particular.

O limite de esbelteza adimensional, " $\bar{\lambda}_{LT,0}$ " pode assumir o valor máximo admissível (0,4), enquanto que o factor " β " pode assumir um valor mínimo admissível (0,75), " $\bar{\lambda}_{LT}$ " assume o mesmo da expressão (40).

Tabela 17 – Curvas de encurvadura lateral a utilizar no caso particular.

Secção transversal	Limites	Curva de encurvadura
Secções em I laminadas	$h/b \leq 2$	b
	$h/b > 2$	c
Secções em I soldadas	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

O documento EN 1993-1-1 (CENa, 2005), refere a possibilidade de uma correcção ao coeficiente χ_{LT} , tendo em conta a distribuição dos momentos flectores no elemento. Esta correcção tem em conta os seguintes termos:

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \left(\chi_{Lt} \leq 1,0 \wedge \chi_{Lt} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \right) \quad (60)$$

O parâmetro " f " pode ser calculado através da expressão seguinte.

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c) \left[1 - 2,0(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right] \quad (f \leq 1,0) \quad (61)$$

O factor de correcção " k_c " é determinado em função do diagrama de momentos flectores. Para uma distribuição de momentos triangular, com valor nulo dos apoios, " k_c " assume um valor igual a 0,86, (CENa, 2005).

Para determinação do momento crítico da vigas com dupla simetria, caso da secção IPE 100, foi utilizada uma formulação presente na pré-norma ENV 1993-1-1 (CEN, 1992).

Momento crítico M_{cr} , para secções monossimétricas, determina-se através de:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k l)^2} \left\{ \left[\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k l)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + [C_2 z_g]^2 \right]^{0,5} - C_2 z_g \right\} \quad (62)$$

Na expressão anterior, “E” representa o módulo de elasticidade do material, l representa o comprimento efectivo do elemento, “ I_z ” representa o momento de inércia do eixo de menor resistência, “ I_w ” representa a constante de torção, “ I_t ” representa a constante de empenamento, “K” representa o coeficiente redutor do comprimento efectivo, que pode ser tomado como 1 neste caso prático, “ k ” e “ k_w ” podem neste caso ser tomados como igual à unidade, “ z_g ” representa a coordenada do ponto de aplicação da carga na secção transversal, medida a partir do centro geométrico, “ C_1 ” e “ C_2 ” são coeficientes dependentes das condições fronteira e do caso de aplicação de carga no elemento, que se determina pela Tabela 18, (CEN, 1992)

Tabela 18 – Valores a adoptar na determinação do momento crítico, (CEN, 1992).

Table F.1.2 Values of factors C_1 , C_2 and C_3 corresponding to values of factor k : Transverse loading cases					
Loading and support conditions	Bending moment diagram	Values of k	Values of factors		
			C_1	C_2	C_3
		1,0 0,5	1,132 0,972	0,459 0,304	0,525 0,980
		1,0 0,5	1,285 0,712	1,562 0,652	0,753 1,070
		1,0 0,5	1,385 1,070	0,553 0,432	1,730 3,050
		1,0 0,5	1,565 0,938	1,267 0,715	2,640 4,800
		1,0 0,5	1,046 1,010	0,430 0,410	1,120 1,890

A abordagem do problema em secções assimétricas (caso LNP 100x50x8) é um tipo de secção transversal ainda pouco estudada em termos de comportamento como viga não restringida lateralmente. Foram encontradas algumas referências em particular (Trahair, 1993), que estuda vigas à flexão simplesmente apoiadas. Faz referência a vigas assimétricas, e diz que podem ser analisadas, de acordo com as formulações descritas no livro, como secções monossimétricas, calculando o respectivo valor da constante de monossimetria da secção β_u . De acordo com as condições em análise, foi assumido:

$$M_{cr} = M_{vx} \alpha_m \left\{ \left[1 + \left(\frac{0,4 \alpha_m f_3 \beta_u P_v}{2 M_{vx}} \right)^2 \right]^{0,5} + \frac{0,4 \alpha_m f_3 \beta_u P_v}{2 M_{vx}} \right\} \quad (63)$$

Em que M_{vx} representa o valor de momento crítico definido para uma secção duplamente simétrica.

$$M_{vx} = \left\{ \frac{\pi^2 E I_v}{L^2} \left[G I_t + \frac{\pi^2 E I_w}{L^2} \right] \right\}^{0,5} \quad (64)$$

Em que, “ E ” representa o módulo de elasticidade do material, “ l ” representa o comprimento efectivo do elemento, “ I_v ” representa o momento de inércia do eixo de menor resistência, “ I_w ” representa a constante de torção, “ I_t ” representa a constante de empenamento, “ G ” representa o módulo de distorção do material, “ f_3 ” representa igual a: $\frac{\pi^2}{8} - \frac{1}{2} \cong 0,73$ e “ P_v ” representa a carga de Euler, determinada por:

$$P_v = \frac{\pi^2 E I_v}{l_e^2} \quad (65)$$

β_u é a constante da monossimetria da secção e é definido por:

$$\beta_u = \frac{1}{I_u} \int_A v(u^2 + v^2) dA - 2v_0 \quad (66)$$

Sendo que v e u são as coordenadas do elemento referentes aos eixos em análise, e v_0 é a coordenada em v do centro de corte.

α_m representa o coeficiente que é influenciado pelo caso de carga no elemento. De acordo com Tabela 19 (Trahair, 1993), assume o valor de 1,35.

Tabela 19 – Determinação do coeficiente α_m (tabela do IVro “Flexural-Torsional Buckling of Structures”).

Beam Segment	Moment Distribution	α_m	Range
		$1.75 + 1.05\beta + 0.3\beta^2 \neq 2.5$	$-1 < \beta < 1$
		$1.0 + 0.35(1.0 - 2a/L)^2$	$0 < 2a/L < 1$
		$1.35 + 0.4(2a/L)^2$	$0 < 2a/L < 1$
		$1.35 + 0.15\beta$ $-1.2 + 3.0\beta$	$0 < \beta < 0.89$ $0.89 < \beta < 1$
		$1.35 + 0.36\beta$	$0 < \beta < 1$
		$1.13 + 0.10\beta$ $-1.25 + 3.5\beta$	$0 < \beta < 0.7$ $0.7 < \beta < 1$
		$1.13 + 0.12\beta$ $-2.38 + 4.8\beta$	$0 < \beta < 0.75$ $0.75 < \beta < 1$

Para uma secção assimétrica (LNP 100x50x8) quem tem como eixos principais centrais de inércia “u-u” e “v-v”, não se torna particularmente simples o cálculo do coeficiente β_u .

De acordo com os trabalhos de investigação de Mohri *et al* (Mohri, Azrar, & Potier-Ferry, 2001), encontram-se referências de cálculos de coeficientes de Wagner em secções não alinhadas com os seus eixos de referência, ver Figura 17.

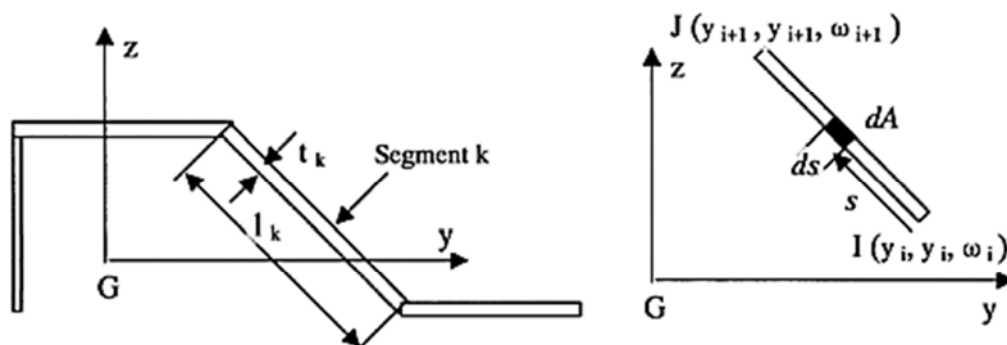


Figura 17 – Figura retirada do artigo de Mohri, representa um elemento da secção não paralelo aos eixos principais, (Mohri, Azrar, & Potier-Ferry, 2001).

Os coeficientes de Wagner para o elemento referido na Figura 17 são definidos pelas expressões seguintes:

$$\beta_y = \frac{1}{2I_z} \int_A y (y^2 + z^2) dA - y_c \quad (67)$$

$$\beta_z = \frac{1}{2I_y} \int_A z (y^2 + z^2) dA - z_c \quad (68)$$

Os integrais relacionados com estes coeficientes de Wagner poder ser aproximados pela solução discreta, descrita por (Mohri, Azrar, & Potier-Ferry, 2001). A solução discreta dos integrais, para a direcção “y-y” segue-se:

$$\int_A y^3 + y z^2 dA \Leftrightarrow \int_A y^3 dA + \int_A y z^2 dA \quad (69)$$

A aproximação do primeiro integral é feito por:

$$\int_A y^3 dA = \sum_{k=1}^2 \left(\frac{S_k}{4} (y_i^3 + y_{i+1}^3 + y_i^2 y_{i+1} + y_i y_{i+1}^2) \right) \quad (70)$$

A aproximação do segundo integral é feita por:

$$\int_A y z^2 dA = \sum_{k=1}^2 \left(\frac{S_k}{4} \left(z_i^2 \left(y_i + \frac{y_{i+1}}{3} \right) + z_{i+1}^2 \left(\frac{y_i}{3} + y_{i+1} \right) + \frac{2}{3} z_i z_{i+1} (y_i + y_{i+1}) \right) \right) \quad (71)$$

Sendo que nos integrais anteriores o valor de S_k refere-se à área do elemento em estudo.

Na Figura 18 está representada a acção em estudo, utilizando sistemas de eixo com correspondência ao trabalho de Mohri *et al* (Mohri, Azrar, & Potier-Ferry, 2001); em que duas componentes da secção não se encontram paralelas aos eixos principais centrais de inércia (u-u e v-v).

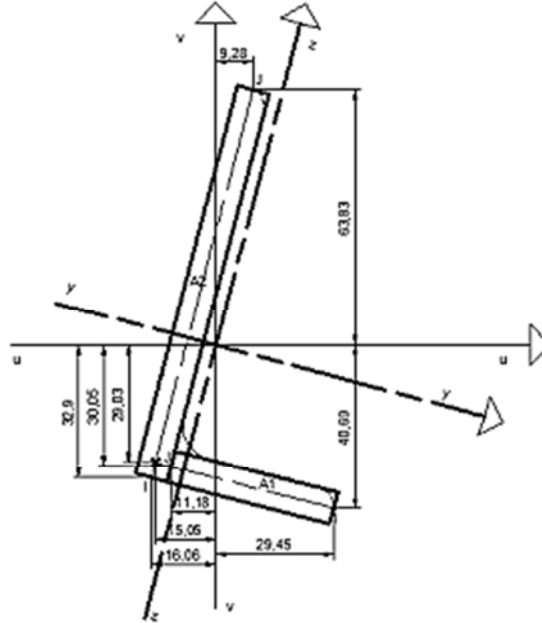


Figura 18 – Secção transversal LNP 100x50x8.

Os integrais dos coeficientes de Wagner que se determinam pela solução discreta em (73) e (74) podem ser utilizados para a definição dos integrais da constante de monossimetria da secção “ β_u ”. Então a solução do integral descreve-se por:

$$\int_A v^3 + v u^2 dA \Leftrightarrow \int_A v^3 dA + \int_A v u^2 dA \quad (72)$$

A aproximação do primeiro integral é definida por:

$$\int_A v^3 dA = \sum_{k=1}^2 \left(\frac{A_k}{4} (v_i^3 + v_{i+1}^3 + v_i^2 v_{i+1} + v_i v_{i+1}^2) \right) \quad (73)$$

A aproximação do segundo integral é feita por:

$$\int_A v u dA = \sum_{k=1}^2 \left(\frac{A_k}{4} \left(u_i^2 \left(v_i + \frac{v_{i+1}}{3} \right) + u_{i+1}^2 \left(\frac{v_i}{3} + v_{i+1} \right) + \frac{2}{3} u_i u_{i+1} (v_i + v_{i+1}) \right) \right) \quad (74)$$

Sendo que A_k se refere à área do elemento na secção em estudo.

O sistema de eixos a adoptar para resolver as equações (73) e (74), devem utilizar o método descrito por (Trahair, 2002). Nesta referência é determinado o

momento crítico em cantoneiras. O documento refere ainda que se deve analisar a secção transversal, de acordo com o sentido da carga “F”. Considerando a posição do centro de corte “ v_0 ”. A Figura 19 refere esta convenção de acordo com o trabalho deste investigador (Trahair, 2002). Para uma secção do tipo cantoneira, com abas desiguais deve resultar com um valor positivo de “ β_u ” para um valor de coordenada negativa no centro de corte “ v_0 ”, e vice versa, sendo que o sentido dos eixos devem coincidir com o sentido da direcção da carga “F”.

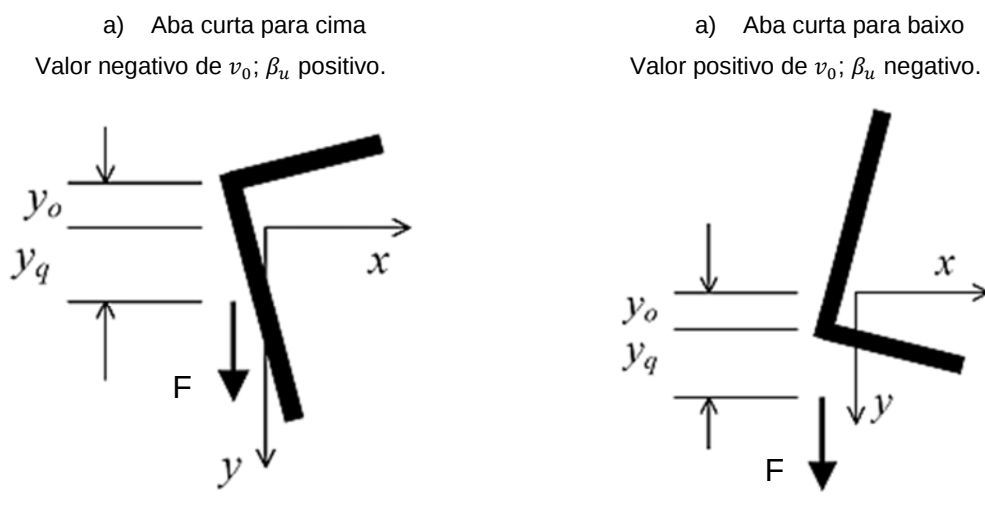


Figura 19 – Indicação do sistema de eixos para cálculo de “ β_u ”, de acordo com Tahair, (Trahair, 2002).

5.2.1 Resistência dos elementos/secções em estudo.

Pretende-se verificar a resistência à flexão das secções transversais em estudo, IPE 100 S275, SHS 100x100x4 S235, CHS 101,6x4,05 S235 e LNP 100x50x8 S275. As secções em estudo são parte integrante dos elementos de viga com 1210 [mm] de comprimento, sujeitos a flexão em três pontos. Os apoios são considerados simples e duplo, ver Figura 12.

A resistência das secções com dupla simetria deverão ser por plastificação da secção, enquanto que para outras secções deverá ser verificada a resistência do elemento para fenómenos de instabilidade (encurvadura lateral).

A determinação da resistência à encurvadura lateral por flexão dos elementos com secção transversal IPE 100, de acordo com EN 1993-1-1 (CENa,

2005), inicia-se pelo cálculo do momento crítico M_{cr} , de acordo com a expressão (62) e com o disposto na Tabela 18 e Tabela 7.

$$M_{cr} = 1,365 \times \frac{\pi^2 \times 210 \times 10^6 \times 1,59 \times 10^{-7}}{(1 \times 1,21)^2} \times \left\{ \left[\left(\frac{1}{1} \right)^2 \times \frac{3,5 \times 10^{-10}}{1,59 \times 10^{-7}} + \frac{(1 \times 1,21)^2 \times 81 \times 10^6 \times 1,2 \times 10^{-8}}{\pi^2 \times 210 \times 10^6 \times 1,59 \times 10^{-7}} + [0,553 \times 0,05]^2 \right]^{0,5} - 0,553 \times 0,05 \right\} = 17,705 \text{ kN.m} \quad (75)$$

O cálculo deverá ser elaborado pelo caso particular de vigas duplamente simétricas.

A secção transversal é da classe 1, pelo que $W_y = W_{pl,y}$.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{3,94 \times 10^{-5} \times 275000}{17,705}} = 0,782 \quad (76)$$

Pela Tabela 17 verifica-se que $h/b \leq 2$, em consequência a curva de encurvadura correspondente é a “b”.

$$\phi_{LT} = \frac{1 + 0,34 \times (0,782 - 0,4) + 0,75 \times 0,782^2}{2} = 0,794 \quad (77)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,794 + \sqrt{0,794^2 - 0,75 \times 0,782^2}} = 0,782 < 1,0 \quad (78)$$

$$f = 1 - 0,5 \times (1 - 0,86) \times [1 - 2,0 \times (0,782 - 0,8)^2] = 0,930 < 1,0 \quad (79)$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{0,782}{0,930} = 0,889 < 1,0 \wedge \chi_{Lt} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \quad (80)$$

A resistência do elemento à encurvadura lateral $M_{b,Rd}$, toma o valor de:

$$M_{b,Rd} = 0,889 \times 3,94 \times 10^{-5} \times \frac{275 \times 10^3}{1,0} = 9,632 \text{ kN.m} \quad (81)$$

A resistência à flexão dos elementos com secção transversal SHS 100x100x4, prescrita pela EN 1993-1-1 (CENa, 2005), efectua-se pela seguinte expressão, sabendo que a secção é da classe 1:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = W_{pl} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 5,49 \times 10^{-5} \times \frac{235000}{1,0} = 12,902 \text{ kN.m} \quad (82)$$

Com o mesmo critério determina-se a resistência à flexão dos elementos com secção transversal CHS 101,6x4,05.

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = W_{pl} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 3,78 \times 10^{-5} \times \frac{235000}{1,0} = 8,883 \text{ kN.m} \quad (83)$$

A resistência à encurvadura lateral por flexão dos elementos com secção transversal LNP 100x50x8, prescrita pela EN 1993-1-1 (CENa, 2005), inicia-se pelo cálculo do momento crítico M_{cr} de acordo com a expressão (63), em Trahair, (Trahair, 1993).

$$M_{vx} = \left\{ \frac{\pi^2 \times 210 \times 10^6 \times 1,27e^{-7}}{1,21^2} \left[81e \times 10^6 \times 2,42 \times 10^{-8} + \frac{\pi^2 \times 210 \times 10^6 \times 1,4 \times 10^{-11}}{1,21^2} \right] \right\}^{0,5} = 18,854 \text{ kN.m} \quad (84)$$

$$P_v = \frac{\pi^2 \times 210 \times 10^6 \times 1,27 \times 10^{-7}}{1,21^2} = 179,784 \text{ kN} \quad (85)$$

$$\beta_u = 0,072 \quad (86)$$

$$M_{cr} = 18,854 \times 1,35$$

$$\left\{ \left[1 + \left(\frac{0,4 \times 1,35 \times 0,73 \times 0,072 \times 179,784}{2 \times 18,854} \right)^2 \right]^{0,5} + \frac{0,4 \times 1,35 \times 0,73 \times 0,072 \times 179,784}{2 \times 18,854} \right\} = 29,111 \text{ kN.m} \quad (87)$$

O cálculo deverá ser elaborado pelo caso geral de EN 1993-1-1 (CENa, 2005), para determinação da resistência à encurvadura lateral.

A secção transversal é da classe 1, pelo que $W_y = W_{pl,y}$.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{3,05 \times 10^{-5} \times 275000}{29,111}} = 0,538 \quad (88)$$

Pela Tabela 15 determina-se que $h/b \leq 2$ em consequência a curva de encurvadura correspondente é a “d”.

$$\phi_{LT} = \frac{1 + 0,76 \times (0,538 - 0,2) + 0,538^2}{2} = 0,773 \quad (89)$$

$$\chi_{Lt} = \frac{1}{0,773 + \sqrt{0,773^2 - 0,538^2}} = 0,753 < 1,0 \Rightarrow OK \quad (90)$$

A resistência do elemento à encurvadura lateral $M_{b,Rd}$, toma o valor de:

$$M_{b,Rd} = 0,753 \times 3,05 \times 10^{-5} \times \frac{275 \times 10^3}{1,0} = 6,348 \text{ kN.m} \quad (91)$$

Na Tabela 20, descreve-se o momento resistente dos elementos para cada tipo de secção transversal, em situação de temperatura ambiente.

Tabela 20 – Resumo da resistência das secções à flexão (temperatura ambiente).

Secção	IPE	SHS	CHS	LNP
Momento resistente à flexão (temperatura ambiente) [kN.m]	9,632 (encurvadura lateral)	13,00 (rótula plástica)	8,883 (rótula plástica)	6,348 (encurvadura lateral)

5.3 Resistência à flexão (fogo).

5.3.1 Domínio da resistência.

A resistência dos elementos metálicos, com diferentes secções transversais, sujeitos a forças que provoquem esforços de flexão, com condições de temperaturas elevadas (fogo), foi estudada de acordo com EN 1993-1-2 (CENb, 2005).

Para a verificação da segurança, deverá ser satisfeita a condição da inequação.

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \quad (92)$$

$E_{fi,d}$ representa o valor de cálculo dos efeitos das acções em situação, $R_{fi,d,t}$ representa o valor de cálculo da resistência do elemento de aço, em situação de incêndio, no instante “t”.

A resistência da secção de uma viga à flexão, em condições de fogo, considerando uma distribuição de temperaturas uniforme em todo o elemento, deverá ser determinada por:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}] M_{Rd} \quad (93)$$

M_{Rd} representa o valor do momento plástico resistente, para secções de classe 1 e 2, à temperatura ambiente, $k_{y,\theta}$ corresponde ao factor de redução da tensão de cedência do aço à temperatura “ θ_a ” no instante “t”, definido em 4.1.1, $\gamma_{M,fi}$ representa um coeficiente parcial de segurança para a propriedade considerada do material, em condições de incêndio, e recomenda-se a utilização do valor igual a $\gamma_{M,fi} = 1,0$, $\gamma_{M,0}$ representa a mesma quantidade, definida no subcapítulo 5.2.

A resistência de um elemento à encurvadura lateral em condições de fogo, para secções transversais de classe 1 e 2, deverá ser determinada por:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{y,\theta,com} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (94)$$

Na expressão, “ $W_{pl,y}$ ” representa o módulo plástico de resistência à flexão segundo o eixo de maior inércia, “ $k_{y,\theta,com}$ ” representa o factor de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura máxima no banzo comprimido $\theta_{a,com}$ no instante t, sendo que de um modo conservativo se possa admitir como sendo igual a θ_a , “ $\chi_{LT,fi}$ ” representa o coeficiente de redução para a encurvadura lateral em situação de incêndio, e calcula-se pelas expressões seguintes (95) a (98):

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta,com}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}]^2}} \quad (95)$$

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{[1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta,com})^2]}{2} \quad (96)$$

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (97)$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} [k_{y,\theta,com} / k_{E,\theta,com}]^{0,5} \quad (98)$$

$k_{E,\theta,com}$ é o factor de redução para o módulo de elasticidade à temperatura máxima do aço no banzo comprimido $\theta_{a,com}$, no instante t , sendo que de um modo conservativo se possa admitir como sendo igual a θ_a .

Segundo o trabalho de Vila Real *et al* (Vila Real, Lopes, Silva, & Franssen, 2003), sobre encurvadura lateral de vigas sujeitas à acção do fogo, os autores propõem uma correcção à expressão do EN 1993-1-2 (CENb, 2005), para determinação da resistência de vigas sujeitas à acção do fogo. A expressão da norma europeia resulta em valores mais conservadores, devido ao facto de não fazer distinção ao diagrama de momentos aplicado na viga, o artigo propõem a seguinte correcção ao valor de $\chi_{LT,fi}$, pela expressão seguinte.

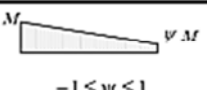
$$\chi_{LT,fi,mod} = \chi_{LT,fi} / f_{fi} \quad (\chi_{LT,fi,mod} \leq 1) \quad (99)$$

Em que “ f_i ” depende do tipo de carregamento e define-se por:

$$f_{fi} = 1 - (0,5 - k_c) \quad (100)$$

Sendo $k_c = 1$ para tipos de carregamento não definidos pela Tabela 21 (Vila Real, Lopes, Silva, & Franssen, 2003).

Tabela 21 – Valores de k_c segundo Paulo Vila Real *et al*.

	Distribuição de momentos	Classes da secção 1, 2 e 3
		k_c
A	 $-1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,3\psi + 0,15\psi^2$ mas $k_c \leq 1$
B		0.79
C		0.91

O grau de utilização (μ_0) de um elemento de classe 1, 2 ou 3 no instante $t = 0$, de acordo com a EN 1993-1-2 (CENb, 2005), definido na expressão:

$$\mu_0 = E_{fi,d}/R_{fi,d,0} \quad (101)$$

Em que “ $R_{fi,d,0}$ ” representa o valor de “ $R_{fi,d,t}$ ” no instante de $t = 0$.

Numa situação de dimensionamento ou de verificação de projecto é conhecido o valor das cargas e acções presentes no momento do incêndio. Para determinar o grau de utilização e a sua temperatura crítica associada $\theta_{a,cr}$, devem ser utilizados processos iterativos, conforme referido em (Vila Real, 2003) e (Vila Real & Franssen, 2010).

De acordo com EN 1993-1-2 (CENb, 2005), para elementos de classe 1,2 ou 3, que não estejam sujeitos a fenómenos de instabilidade, pode ser utilizada a expressão (102) para determinar a temperatura crítica do elemento, desde que não se utilizem graus de utilização inferior a $\mu_0 = 0,013$.

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad (102)$$

Quando à partida se estabelece o valor do grau de utilização “ μ_0 ”, pode-se determinar directamente a temperatura crítica do aço $\theta_{a,cr}$, utilizando a expressão anterior.

5.3.2 Domínio da temperatura.

Para determinação da resistência, importa determinar a evolução da temperatura no elemento, a expressão seguinte descreve a resistência à temperatura do elemento.

$$\theta_d \geq \theta_{cr,d} \quad (103)$$

O tempo que demora um elemento a atingir a sua temperatura crítica $\theta_{a,cr}$, depende das propriedades da secção transversal e ainda da solicitação da curva de fogo que este esteja exposto.

A EN 1993-1-2 (CENb, 2005), apresenta a expressão (104) para determinar o incremento de temperatura $\Delta\theta_{a,t}$ para um intervalo de tempo Δt , em elementos

desprotegidos, assumindo uma distribuição uniforme de temperaturas no elemento.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta_t \quad (104)$$

Nesta equação, “ A_m/V ” representa o factor de massividade para elementos não protegidos [$1/m$] e não deve ser considerado inferior a 10 [m^{-1}], “ A_m ” representa a área da superfície de elemento por unidade de comprimento [m^2/m]; “ V ” representa o volume de elemento por unidade de comprimento [m^3/m], “ c_a ” representa o calor específico do aço, “ ρ_a ” representa a massa específica do aço, “ $\dot{h}_{net,d}$ ” representa o valor de cálculo do fluxo de calor efectivo por unidade de área [W/m^2] já definido no ponto 3.1, utilizando $\varepsilon_f = 1,0$, “ Δ_t ” representa o intervalo de tempo “ t ”, que não deve ser considerado superior a 5 [s], “ k_{sh} ” representa o factor de correcção para o efeito de sombra.

Para elementos de secção do tipo I, k_{sh} determina-se pela expressão seguinte:

$$k_{sh} = 0,9 \left[\frac{A_m}{V} \right]_b / \left[\frac{A_m}{V} \right] \quad (105)$$

Para casos em que as secções tenham a forma convexa (rectangulares, quadrangulares e circulares), este parâmetro deve ser tomado como igual a 1,0.

Para todos os outros tipos de secções, deve ser adoptado o seguinte valor:

$$k_{sh} = \left[\frac{A_m}{V} \right]_b / \left[\frac{A_m}{V} \right] \quad (106)$$

O parâmetro $[A_m/V]_b$ representa o factor de massividade calculado como se o perfil tivesse uma protecção da secção envolvida em caixão.

No caso de se ignorar o efeito de sombra ($k_{sh} = 1,0$), resultam valores conservativos para as temperaturas de elementos (superiores ao esperado).

O cálculo do factor de massividade deve ser efectuado com as propriedades transversais da secção. “ A_m ” pode representar o valor do perímetro medido na secção transversal exposto ao fogo, e “ V ” pode representar a área da secção transversal do elemento.

Diversos autores (Vila Real, 2003), apresentam tabelas para a determinação deste parâmetro, em função do número de faces expostas à acção do fogo.

Na Figura 20, estão representados dois tipos de secção, com e sem protecção, (Group, 2009).

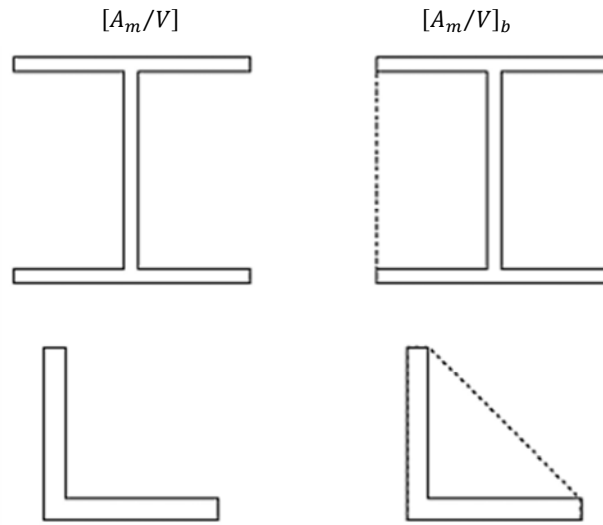


Figura 20 – Secção com e sem protecção (cálculo da massividade), (Group, 2009).

O documento EN 1993-1-2 (CENb, 2005), apresenta uma expressão para prever a evolução das temperaturas no aço, isolado por material de protecção contra incêndio. O aumento de temperatura no elemento “ $\Delta\theta_{a,t}$ ”, para uma distribuição uniforme de temperaturas e sujeito a um incremento de tempo de expansão ao fogo Δt , poderá ser determinada pela expressão seguinte:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p/V (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{c_a \rho_a d_p (1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (107)$$

(mas $\Delta\theta_{a,t} \geq 0$ se $\Delta\theta_{g,t} > 0$)

Na expressão o parâmetro “ ϕ ” define o tipo de protecção (leve, pesada). Este parâmetro compara a capacidade calorífica do material de protecção com a capacidade calorífica do material do elemento a proteger (aço). Quando inferior a (0,5) a protecção deve ser considerada leve.

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p/V \quad (108)$$

A_p/V representa o factor de massividade para elementos de aço isolados por meio de material de protecção contra incêndio, A_p representa a área superficial de material protegido no elemento (m^2/m), c_p representa o calor específico do material de protecção contra incêndio (J/kgK), d_p representa a

espessura do material de protecção contra incêndio (m), Δ_t representa o intervalo de tempo [s], que não deve ser considerado superior a 30 s, $\theta_{g,t}$ representa a temperatura dos gases no ambiente no instante t , $\Delta\theta_{g,t}$ representa o aumento de temperatura ambiente dos gases durante o intervalo de tempo Δ_t , λ_p representa a condutibilidade térmica do sistema de protecção contra incêndios (W/mK), ρ_p representa a massa específica do material de protecção contra incêndio (kg/m³).

As propriedades térmicas do material de protecção contra incêndio utilizados “ λ_p ”, “ ρ_p ” e “ c_p ”, devem estar de acordo com a referência.

Para a determinação de “ A_p ”, deve ser considerado o perímetro da secção transversal envolvida com o material de protecção contra incêndio. Vila Real em (Vila Real, 2003), apresenta um resumo de tabelas para a determinação do parâmetro “ A_p/V ”.

5.3.3 Resistência dos elementos em estudo.

Nesta secção pretende-se determinar a resistência ao fogo dos elementos em viga descritos anteriormente, para as diferentes secções transversais IPE, SHS, CHS e LNP, e diferentes graus de utilização, $\mu_0=30\%$, $\mu_0=50\%$ e $\mu_0=70\%$. Pretende-se adicionalmente efectuar uma previsão de resistência no domínio do tempo, sob a acção da curva de fogo padrão ISO 834.

Para os graus de utilização definidos, utilizando a expressão (102), é passível determinar a temperatura crítica dos elementos $\theta_{a,cr}$. Obtém-se assim os resultados descritos pela Tabela 22, contendo o valor da temperatura crítica nominal dos elementos para cada grau de utilização, tendo em consideração as limitações de aplicação da expressão.

Tabela 22 – Temperatura crítica nominal dos elementos.

Grau de utilização μ_0	Temperatura crítica $\theta_{a,cr}$ [°C]
30%	663,78
50%	584,67
70%	525,78

Para as temperaturas descritas na Tabela 22, correspondem os valores apresentados na Tabela 23 para os factores de redução das propriedades do material. Estes valores foram interpolados dos valores apresentados no documento EN 1993-1-2 (CENb, 2005).

Tabela 23 – Valores dos factores de redução da tensão de cedência e módulo de elasticidade.

Temperatura [°C]	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta,com}$
663,78	0,317	0,195
584,67	0,518	0,354
525,78	0,700	0,525

Para os elementos de secção transversal SHS e CHS, irá ser utilizada a expressão (93), com o valor da resistência ao momento flector, à temperatura ambiente.

Para o cálculo para um grau de utilização de 30% ($\mu_0=30\%$), considerando as secções SHS e CHS respectivamente, pode ser determinado o momento resistente em condições de incêndio.

$$M_{fi,\theta,Rd} = 0,317 \times [1,0/1,0] \times 12,902 = 4,12 \text{ kN.m} \quad (109)$$

$$M_{fi,\theta,Rd} = 0,317 \times [1,0/1,0] \times 8,883 = 2,82 \text{ kN.m} \quad (110)$$

Os resultados estão para os restantes graus de utilização apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Resistência à flexão nominal para condições de incêndio (SHS e CHS).

Temperatura crítica [°C]	SHS 100x100x4 [kN.m]	CHS 101,6x4,05 [kN.m]
663,78	4,12	2,82
584,67	6,73	4,60
525,78	9,10	6,22

Os elementos de secção IPE e LNP, como são susceptíveis de ruptura por encurvadura lateral, a sua resistência ao momento flector em condições de incêndio deve ser calculada pela expressão (94). Para um grau de utilização de 50% ($\mu_0=50\%$), e considerando uma secção IPE 100, pode ser determinado o valor de momento resistente em condições de incêndio.

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = 0,782 [0,518/0,354]^{0,5} = 0,945 \quad (111)$$

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,601 \quad (112)$$

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{[1 + 0,6 \times 0,945 + (0,945)^2]}{2} = 1,231 \quad (113)$$

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{1,231 + \sqrt{[1,231]^2 - [0,945]^2}} = 0,495 \quad (114)$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = 0,495 \times 3,94 \times 10^{-5} \times 0,518 \times 275000 / 1,0 = 2,777 \text{ kN.m} \quad (115)$$

Pela proposta apresentada por Vila Real (Vila Real, Lopes, Silva, & Franssen, 2003), utilizando as expressões (99) e (100) é possível determinar o coeficiente de redução modificado.

$$\chi_{LT,fi,mod} = \frac{0,495}{1 - (0,5 - 0,79)} = 0,553 \quad (116)$$

O valor de momento resistente em condições de incêndio pode ser calculado.

$$M_{b,fi,t,Rd,mod} = 0,553 \times 3,94 \times 10^{-5} \times 0,518 \times 275000 / 1,0 = 3,10 \text{ kN.m} \quad (117)$$

Para um grau de utilização de 50% ($\mu_0=50\%$), e tendo em consideração a secção LNP pode ser determinado o valor do momento resistente em condições de incêndio.

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = 0,538 [0,518/0,354]^{0,5} = 0,650 \quad (118)$$

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{275}} = 0,601 \quad (119)$$

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{[1 + 0,6 \times 0,686 + (0,686)^2]}{2} = 0,907 \quad (120)$$

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{0,907 + \sqrt{[0,907]^2 - [0,686]^2}} = 0,650 \quad (121)$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = 0,650 \times 3,05e^{-5} \times 0,518 \times 275000 / 1,0 = 2,837 \text{ kN.m} \quad (122)$$

Pela proposta apresentada por Vila Real (Vila Real, Lopes, Silva, & Franssen, 2003), utilizando as expressões (99) e (100) é possível determinar o coeficiente de redução modificado.

$$\chi_{LT,fi,mod} = \frac{0,65}{1 - (0,5 - 0,79)} = 0,726 \quad (123)$$

$$M_{b,fi,t,Rd,mod} = 0,726 \times 3,05e^{-5} \times 0,518 \times 275000 / 1,0 = 3,17 \text{ kN.m} \quad (124)$$

Na Tabela 25 estão apresentados os valores nominais de resistência ao fogo das vigas com secção IPE e LNP. Uma comparação com a proposta referida, contendo a correcção com o factor “ f_{fi} ”.

Tabela 25 – Resistência à flexão nominal para condições de incêndio com secção IPE e LNP.

Temperatura crítica [°C]	EC 3		Correcção com f_{fi}	
	IPE 100 [kN.m]	LNP 100x50x8 [kN.m]	IPE 100 [kN.m]	LNP 100x50x8 [kN.m]
663,78	1,62	1,69	1,81	1,88
584,67	2,78	2,84	3,10	3,17
525,78	3,92	3,93	4,38	4,39

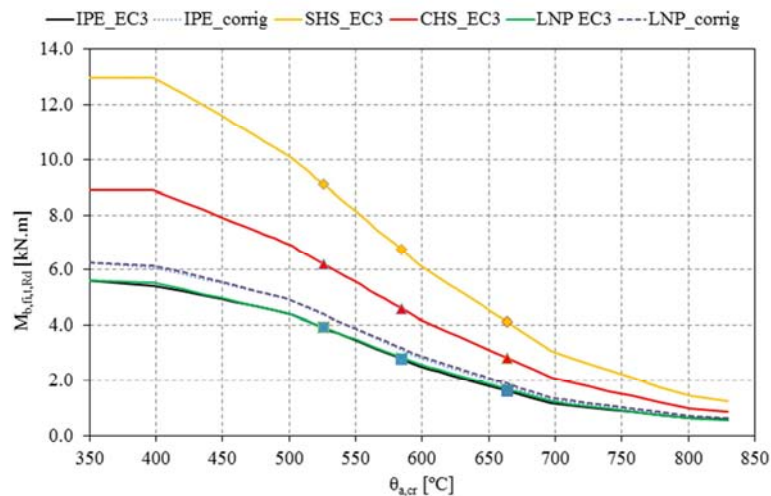


Gráfico 11 – Relação entre resistência nominal dos elementos ao fogo e a sua temperatura crítica.

No Gráfico 11 apresenta-se uma comparação entre os diferentes tipos de secção transversal dos elementos, da sua capacidade resistente à flexão, em condições de fogo, dependendo do valor de temperatura crítica. Pode-se observar a decréscimo do valor de resistência do elemento com o aumento da temperatura. Comparando as soluções corrigidas verifica-se uma resistência maior para os elementos com a nova proposta de Vila Real *et al* (Vila Real, Lopes, Silva, & Franssen, 2003). Com o aumento da temperatura crítica a resistência tende para zero em todos os elementos.

Conhecendo a evolução de temperatura é possível determinar o tempo de resistência ao fogo. A evolução da temperatura nos elementos deverá ser efectuada de acordo com a expressão (107), sobre a acção da curva de fogo padrão ISO 834.

Segue-se o cálculo do factor de sombra para os elementos com secção transversal IPE e LNP, quando totalmente envolvidos por fogo.

$$k_{sh}(IPE) = 0,9 \times \frac{300}{388} = 0,696 \quad (125)$$

$$k_{sh}(LNP) = \frac{235,15}{264,09} = 0,890 \quad (126)$$

Na Tabela 26 estão apresentados os valores dos parâmetros de cálculo da evolução da temperatura nas diferentes secções transversais dos elementos, sobre a acção da curva de fogo padrão ISO 834.

Tabela 26 – Valores dos parâmetros para o cálculo da evolução da temperatura nos elementos.

Secção / Parâmetro	$\left[\frac{A_m}{V}\right]_b$ [m ⁻¹]	$\frac{A_m}{V}$ [m ⁻¹]	k_{sh}	ρ_a [kg/m ³]	Δ_t [s]	α_c	ϕ	ε_f	ε_m
IPE 100	300	388	0,696	7850	5,0	25	1,0	1,0	0,7
SHS 100x100x4	250	250	1,0	7850	5,0	25	1,0	1,0	0,7
CHS 101,6x4,05	246,9	246,9	1,0	7850	5,0	25	1,0	1,0	0,7
LNP 100x50x8	235,15	264,09	0,890	7850	5,0	25	1,0	1,0	0,7

A previsão para a evolução das temperaturas nos elementos desprotegidos, é apresentado no Gráfico 12, considerando que a temperatura inicial do aço é de 20°C. Em conjunto com a evolução das temperaturas, observa-se o ponto previsto

em que cada tipo de secção atinge os graus de utilização em estudo ($\mu_0=30\%$, $\mu_0=50\%$ e $\mu_0=70\%$).

Na Tabela 27 estão apresentados os tempos que cada tipo de secção transversal demorou a atingir a temperatura crítica, em minutos completos.

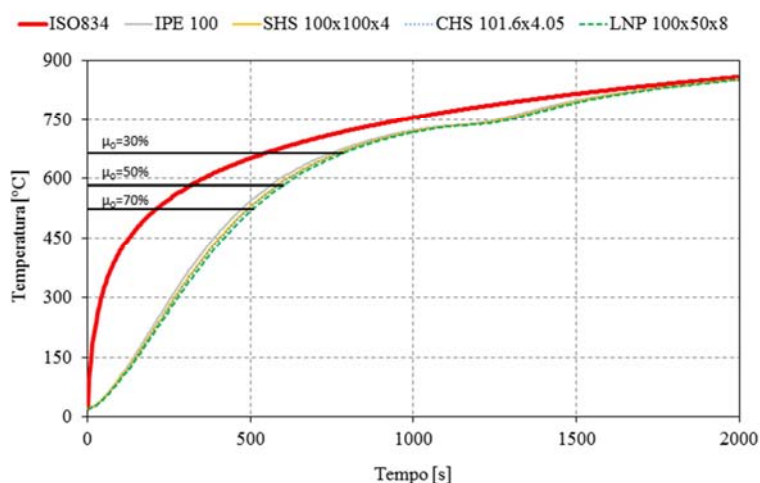


Gráfico 12 – Perspectiva de evolução das temperaturas nos elementos desprotegidos, segundo EC3.

Tabela 27 – Tempo nominal de resistência para cada tipo de secção.

Grau de utilização	Resistência ao fogo [min]			
	IPE 100	SHS 100x100x4	CHS 101,6x4,05	LNP 100x50x8
30%	12	12	12	13
50%	9	9	9	10
70%	7	8	8	8

5.4 Grau de utilização real, com características e propriedades reais.

Na secção 4.2.2 foram descritas propriedades mecânicas reais da secção, de acordo com medições efectuadas às secções transversais dos elementos. Na secção 4.1.2 foram apresentados resultados dos ensaios de tracção ao aço dos perfis, para todas as secções transversais.

Com as características reais dos elementos, existe a possibilidade de caracterizar o grau de utilização real destes em condições de incêndio, com as expressões nominais de resistência, preconizadas pelo Eurocódigo 3.

Pelo cálculo do momento actuante nos elementos no ponto anterior, determinados pela imposição do grau de utilização, $\mu_0=30\%$, $\mu_0=50\%$ e $\mu_0=70\%$, sabe-se o valor o valor de carga actuante no elemento. As propriedades reais da secção e material, actualizam a resistência dos elementos à temperatura ambiente, e ainda a resistência dos elementos ao fogo quanto $t = 0$.

Pela expressão (102), pode-se então determinar um grau de utilização real dos elementos, com as propriedades reais do material e secção, e com o valor do momento actuante. Contudo, utilizando as expressões preconizadas pela EN 1993-1-2 (CENa, 2005), tornando este grau de utilização nominal, mas com propriedades reais do material e mecânicas da secção transversal.

Na Tabela 28 descreve os momentos actuantes nas secções em estudo.

Tabela 28 – Momento actuante nos elementos em condições de incêndio, em [kN.m].

Secção	IPE	SHS	CHS	LNP
$\mu_0 = 30\%$	1,62	4,09	2,82	1,69
$\mu_0 = 50\%$	2,78	6,68	4,60	2,84
$\mu_0 = 70\%$	3,92	9,03	6,22	3,93

Sabendo à partida o valor do momento actuante, necessita-se de calcular a resistência dos elementos para $t = 0$, com as propriedades reais da secção e material. Para os elemento que não estão sujeitos a fenómenos de encurvadura, o processo de determinação do grau de utilização passa por inverter o processo de cálculo descrito na secção 5.3, pelas expressões (93) e (102).

Para elementos sujeitos a encurvadura lateral, o processo não é tão simples, pois a resistência quanto $t = 0$ depende do factor de $\chi_{LT,fi}$, este por sua vez depende da temperatura crítica do elemento, que agora não é possível determinar directamente. A resolução do problema parte por um processo iterativo de cálculo da temperatura crítica, e por consequência determinação do grau de utilização do elemento.

5.4.1 Exemplo prático de determinação do grau de utilização.

Pretende-se determinar o grau de utilização dos elementos, sabendo que o valor do momento actuante é descrito na Tabela 28, que as propriedades mecânicas são as descritas pela Tabela 9 e os valores da tensão de cedência na Tabela 6.

O cálculo do momento resistente das secções já foi demonstrado no ponto 5.2.1, apresenta-se então os valores de resistência à temperatura ambiente das secções transversais dos elementos na Tabela 29, comparando com a resistência dos mesmos elementos com a utilização das propriedades nominais do material e secção.

Tabela 29 – Momento resistente dos elementos à temperatura ambiente, em [kN.m].

Secção	IPE ($M_{b,Rd}$)	SHS ($M_{c,Rd}$)	CHS ($M_{c,Rd}$)	LNP ($M_{b,Rd}$)
Propriedades nominais	9,632	12,902	8,883	6,348
Propriedades reais	10,58	20,04	6,88	7,45

Para as secções com dupla simetria de eixos, sem problemas de encurvadura lateral (SHS e CHS), o método de cálculo deverá ser elaborado de forma inversa, a percentagem de utilização destes elementos, com um grau de utilização nominal de $\mu_0 = 30\%$, determina-se por, respectivamente SHS e CHS:

$$k_{y,\theta(SHS)} = \frac{4,12}{20,04} = 0,2057 \quad (127)$$

$$k_{y,\theta(CHS)} = \frac{2,82}{6,88} = 0,4089 \quad (128)$$

O que, pela interpolação da Tabela 5, equivale a uma temperatura de 720°C e 625°C para SHS e CHS, sendo esta a temperatura crítica dos elementos para cada secção, que pela inversão da equação (102) obtém-se:

$$\mu_{0(SHS)} = \left[0,9674 \left(e^{\frac{720-482}{39,19}} + 1 \right) \right]^{-\frac{1}{3,833}} = 0,2064 \Leftrightarrow 20,6\% \quad (129)$$

$$\mu_{0(CHS)} = \left[0,9674 \left(e^{\frac{625-482}{39,19}} + 1 \right) \right]^{-\frac{1}{3,833}} = 0,3856 \Leftrightarrow 38,56\% \quad (130)$$

Aos elementos em que exista a possibilidade de ocorrer encurvadura lateral, um processo iterativo terá lugar, para o cálculo para determinação do grau de utilização, sabendo inicialmente o valor da solicitação no elemento.

Segue-se um exemplo de cálculo para o elemento com secção transversal IPE 100, com um grau de utilização nominal de 30% ($\mu_0 = 30\%$), descrito pela Tabela 30.

Tabela 30 – Processo iterativo para a determinação do grau de utilização a 30% no IPE.

$\theta_{a,cr}$	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com}$	$\phi_{LT,\theta,com}$	$\chi_{LT,fi}$	$M_{b,fi,t=0,Rd}$	$E_{fi,d}$	μ_0	$\theta_{a,cr}$
20,000	1,000	1,000	0,823	1,074	0,567	6,933	1,616	0,233	701,927
701,927	0,228	0,129	1,092	1,409	0,435	5,320	1,616	0,304	661,889
661,889	0,321	0,199	1,047	1,348	0,455	5,570	1,616	0,290	668,846
668,846	0,305	0,186	1,053	1,356	0,452	5,535	1,616	0,292	667,899
667,899	0,307	0,188	1,052	1,355	0,453	5,540	1,616	0,292	668,035
668,035	0,307	0,188	1,052	1,355	0,453	5,539	1,616	0,292	668,016
668,016	0,307	0,188	1,052	1,355	0,453	5,540	1,616	0,292	668,018
668,018	0,307	0,188	1,052	1,355	0,453	5,540	1,616	0,292	668,018

Os resultados da determinação do grau de utilização com as características reais do material e secção transversal, são descritos na Tabela 31. Observa-se um grau de utilização elevado nos elementos de secção transversal CHS, ainda um grau de utilização relativamente baixo nos elementos de secção transversal SHS. Nos elementos de secção transversal IPE e LNP verifica-se uma utilização baixa, contudo em todos os elementos verifica-se um afastamento do grau de utilização mais acentuado, consoante o aumento da solicitação.

Esta mesma tendência observa-se no Gráfico 13, o qual representa qual o grau de utilização para o momento actuante, em situação de características da secção e material nominais e reais. Os pontos à direita da linha correspondente à secção em análise, indicam que o elemento está a um grau de utilização mais baixo do que o que foi determinado nominalmente, o caso contrário indica um grau de utilização elevado em relação ao determinado nominalmente. Podendo concluir desta análise o facto de os elementos com secção IPE e LNP estarem do lado da segurança em termos de dimensionamento nominal, a secção SHS utiliza valores nominais muito conservativos e a secção CHS nominalmente não está do lado da segurança, encontrando-se sobre utilizada.

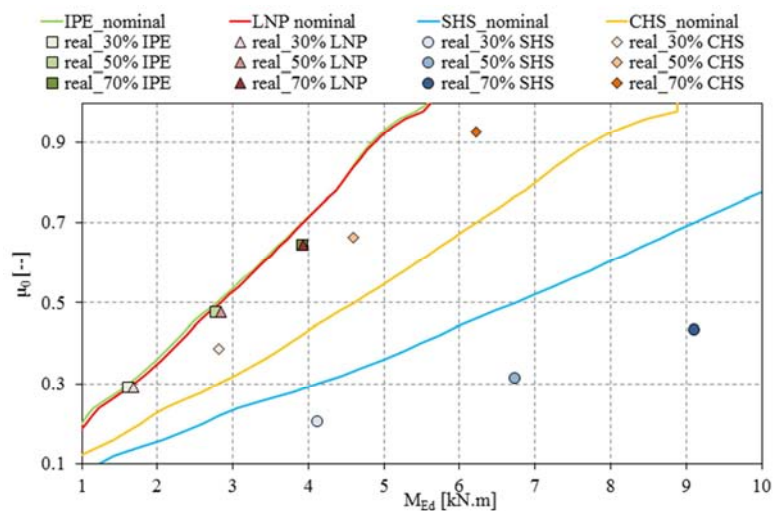


Gráfico 13 – Comparação entre valores nominais de grau de utilização e reais.

Tabela 31 – Valores comparativos entre o grau de utilização com características nominais e reais.

Grau nominal / Secção transversal	Grau real			
	IPE	SHS	CHS	LNP
$\mu_0 = 30\%$	29,17%	20,64%	38,56%	29,17%
$\mu_0 = 50\%$	47,71%	31,60%	66,32%	47,71%
$\mu_0 = 70\%$	64,38%	43,56%	92,76%	64,38%

6 Ensaaios experimentais.

Os ensaios de elementos metálicos protegidos com tinta intumescente foram realizados à flexão, utilizando apoios de forquilha e uma carga transversal aplicada a meio vão. Foram ainda analisados os modos de colapso para cada tipo de secção.

Foram realizados dois ensaios à temperatura ambiente para cada tipo de secção, para determinação e validação da realização da resistência de cada elemento. Nestes ensaios foram registadas as deformações com extensometria eléctrica e registados deslocamentos com transdutores electromagnéticos (LVDT) e potenciométricos (fio).

Para verificar os métodos simplificados de cálculo preconizados na EN 1993-1-2 (CENb, 2005), foram realizados três ensaios a cada tipo de secção transversal, sem protecção metálica para três graus de utilização distintos (30%, 50% e 70%). Nestes ensaios foram registadas as temperaturas do perfil metálico em três secções, utilizando termopares do tipo K, e registados deslocamentos utilizando os transdutores descritos.

Os restantes ensaios (8 para cada secção transversal), foram realizados com protecção de tinta intumescente com duas espessuras de protecção de tinta de base aquosa (1 [mm] e 2 [mm]). Foram testadas duas vigas para cada grau de utilização. Foram registadas as temperaturas e os deslocamentos com os mesmos transdutores.

Na Tabela 32 apresenta-se um resumo dos ensaios realizados, descrevendo as diferentes secções transversais, incluindo as condições de ambiente do teste, instrumentação aplicada, nível de protecção aplicada, carga aplicada e massividade do elemento.

No Anexo – Parte V., encontram-se as fichas resultantes dos ensaios, onde se registaram todas as medições efectuadas e resultados conseguidos.

Tabela 32 – Programa de ensaios realizados.

Material	Nome	Massividade	Condições			Instrumentação		Força aplicada [N]
		[m ⁻¹]	Amb	Fogo	DFT [μm]	Extensó- metros	Termo- pares	EC3
IPE 100 S275	I1	387	20°C	--	--	4	--	(31840) incremental
	I2	387	20°C	--	--	4	--	(31840) incremental
	I3	387	--	μ=30%	--	--	15	5340
	I4	387	--	μ=50%	--	--	15	9180
	I5	387	--	μ=70%	--	--	15	12940
	I6	387	--	μ=30%	1000	--	15	5340
	I7	387	--	μ=30%	1000	--	15	5340
	I8	387	--	μ=50%	1000	--	15	9180
	I9	387	--	μ=50%	1000	--	15	9180
	I10	387	--	μ=70%	1000	--	15	12940
	I11	387	--	μ=70%	1000	--	15	12940
	I12	387	--	μ=50%	2000	--	15	9180
	I13	387	--	μ=50%	2000	--	15	9180
SHS 100x100x4 S235	S1	250	20°C	--	--	3	--	(42980) incremental
	S2	250	20°C	--	--	3	--	(42980) incremental
	S3	250	--	μ=30%	--	--	12	13620
	S4	250	--	μ=50%	--	--	12	22250
	S5	250	--	μ=70%	--	--	12	30090
	S6	250	--	μ=30%	1000	--	12	13620
	S7	250	--	μ=30%	1000	--	12	13620
	S8	250	--	μ=50%	1000	--	12	22250
	S9	250	--	μ=50%	1000	--	12	22250
	S10	250	--	μ=70%	1000	--	12	30090
	S11	250	--	μ=70%	1000	--	12	30090
	S12	250	--	μ=50%	2000	--	12	22250
	S13	250	--	μ=50%	2000	--	12	22250
CHS 101,6x4,05 S235	C1	246,9	20°C	--	--	3	--	(29370) incremental
	C2	246,9	20°C	--	--	3	--	(29370) incremental
	C3	246,9	--	μ=30%	--	--	12	9310
	C4	246,9	--	μ=50%	--	--	12	15200
	C5	246,9	--	μ=70%	--	--	12	20560
	C6	246,9	--	μ=30%	1000	--	12	9310
	C7	246,9	--	μ=30%	1000	--	12	9310
	C8	246,9	--	μ=50%	1000	--	12	15200
	C9	246,9	--	μ=50%	1000	--	12	15200
	C10	246,9	--	μ=70%	1000	--	12	20560
	C11	246,9	--	μ=70%	1000	--	12	20560
	C12	246,9	--	μ=50%	2000	--	12	15200
	C13	246,9	--	μ=50%	2000	--	12	15200
LNP 100x50x8 S275	L1	250	20°C	--	--	4	--	(21690) incremental
	L2	250	20°C	--	--	4	--	(21690) incremental
	L3	250	--	μ=30%	--	--	12	5840
	L4	250	--	μ=50%	--	--	12	9830
	L5	250	--	μ=70%	--	--	12	13610
	L6	250	--	μ=30%	1000	--	12	5840
	L7	250	--	μ=30%	1000	--	12	5840
	L8	250	--	μ=50%	1000	--	12	9830
	L9	250	--	μ=50%	1000	--	12	9830
	L10	250	--	μ=70%	1000	--	12	13610
	L11	250	--	μ=70%	1000	--	12	13610
	L12	250	--	μ=50%	2000	--	12	9830
	L13	250	--	μ=50%	2000	--	12	9830

6.1 Enquadramento normativo.

Para a realização dos ensaios de resistência à flexão sob condições de incêndio, foram utilizadas duas normas. Para os procedimentos gerais de ensaios em condições de incêndio utilizou-se a EN 1363-1 (CEN, 1999), para ensaios ao fogo, com a aplicação de protecções reactivas a elementos em aço, utilizou-se a prEN 13381-8 (CEN, 2009)

Estas normas definem as condições em que devem decorrer os ensaios e tratamento dos resultados. As normas definem 9 secções para regulamentar os ensaios ao fogo dos elementos (provetes): equipamento de ensaio, condições de ensaio, provetes de ensaio, instalação dos provetes, condicionamento dos provetes, aplicação de instrumentação, procedimento de ensaio, tratamento de resultados e relatório de ensaio.

A prEN 13381-8 regulamenta o tipo de ensaios que se executaram neste trabalho, contudo a EN 1363-1 regulamenta os ensaios ao fogo em geral, é frequente então a pré-norma referir as condições da norma EN 1363-1.

O equipamento de ensaio é definido pela EN 1363-1 e define-o como sendo um forno de resistência vertical, em que deve ter condições para ensaiar os elemento propostos, com as condições de fronteira pretendidas, sensores de medição de temperaturas, deslocamento e força e deve ser resistente ao próprio ensaio.

6.2 Infra-estrutura e procedimento dos ensaios.

Os ensaios de resistência à flexão realizados no LERM (Estig-IPB), tinham como objectivo a comparação entre os valores obtidos pela utilização dos métodos simplificados do Eurocódigo 3, obtidos no ponto 5 deste documento, e os resultados experimentais, para se possivel conhecer a diferença entre um método de análise simplificado e um método experimental. Na Figura 21 está representado o modelo do elemento simplesmente apoiado, com o sistema de eixos considerado e as dimensões gerais de ensaio. De salientar que o

comprimento efectivo do elemento exposto ao fogo l_f , é diferente do comprimento entre apoios l , e ainda diferente do comprimento total do elemento l_t , necessário para assegurar as condições de apoio e o seu deslocamento devido ao modo de colapso progressivo.

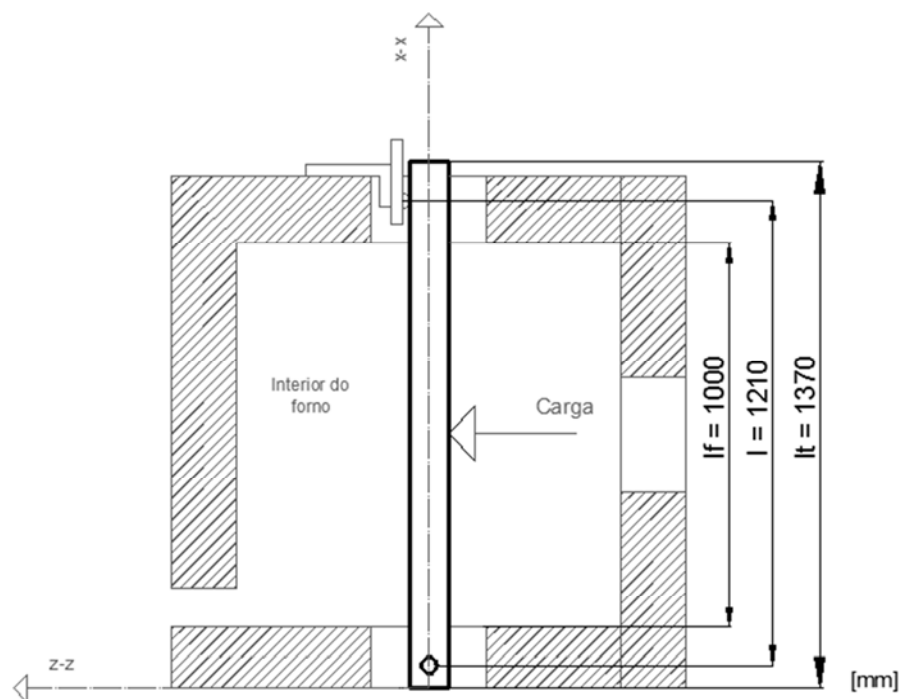


Figura 21 - Esquema de aplicação de carga, com dimensões do elemento e eixos.

A construção da infra-estrutura para os ensaios de resistência ao fogo decorreu por fases, desde a abertura permanente das extremidades, já existentes no forno, construção dos apoios (simples e duplo) e a definição do ponto de aplicação da carga. O forno existente já previa a instalação de elementos externos de suporte, contendo três aberturas. A construção do apoio duplo foi conseguida com a elaboração de uma rótula coincidente com a furação a executada no elemento, introduzindo um veio que possibilita a rotação em torno do eixo “y-y”. Na construção do apoio simples impediu-se a rotação em torno do eixo “x-x” (torção), e os deslocamentos nas direcções “y-y” e “z-z”, ver Figura 22.



Figura 22 - Apoios experimentais, (duplo à esquerda, simples à direita).

O ponto de aplicação da carga foi definido com recurso a um cilindro óleo-hidráulico, com extensão de um tubo circular e extremidade cilíndrica simulando uma carga pontual, ver Figura 23.



Figura 23 - Esquema experimental da aplicação da carga.

Foram medidos os deslocamentos (horizontal e vertical) na extremidade superior do elemento. Estes deslocamentos foram medidos com recurso a dois LVDT's, ligados a um sistema de aquisição de dados HBM "Spyder", utilizando uma frequência de 5 [Hz], com processamento de dados "Catman easy". A Figura 24 mostra a posição de leitura dos transdutores de deslocamento axial (DV) e horizontal (DH). Os sentidos considerados positivos na leitura destes dados, estão representados na Figura 25.



Figura 24 - Posição dos LVDT's no elemento.

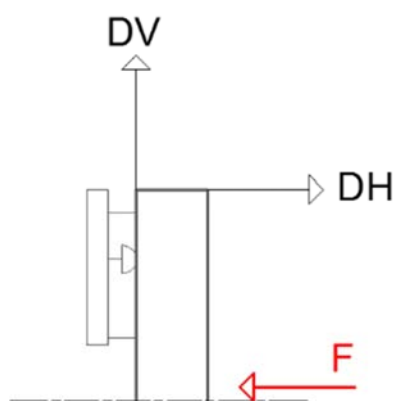


Figura 25 - Esquema de leitura dos deslocamentos dos LVDT's

O deslocamento transversal d , foi medido a meio vão do elemento, utilizando quatro transdutores de deslocamento potenciométrico, recolhendo dados com uma frequência de 5 [Hz]. Este deslocamento é medido no ponto de aplicação da carga, segundo a direcção "z-z". Este deslocamento permite determinar o estado limite último, por utilização do critério de deslocamento e velocidade do ponto de aplicação da carga, previstos na norma EN 1363-1 (CEN, 1999).

O sistema de carga F e deslocamento d foram efectuados através de um controlador Siemens.

Entre o cilindro e o tubo de secção circular foi posicionada uma célula de carga, para determinação da carga exercida no elemento.

Na Figura 26, estão representados os medidores de deslocamento d e a célula de carga, acoplados ao cilindro óleo-hidráulico.

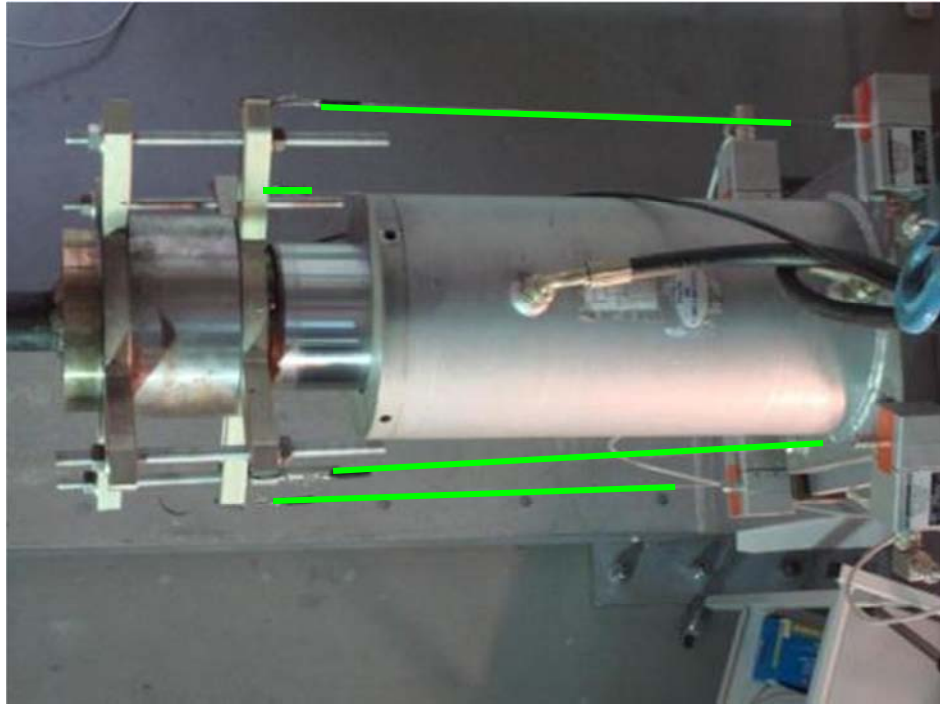


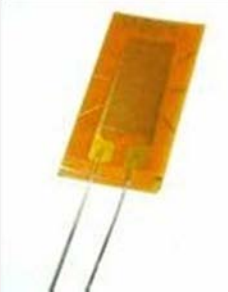
Figura 26 – Cilindro acoplado dos medidores de deslocamento d e célula de carga.

Os resultados dos ensaios estão representados de forma gráfica, tendo sido tratados no programa Excel.

Na Tabela 33, é apresentada uma listagem de sensores utilizados nos ensaios, suas resoluções e características.

Tabela 33 – Características dos sensores utilizados nos ensaios.

Sensor	Resolução/capacidade máxima	Representação
Transdutor de deslocamento por fio potenciométrico	+/- 0,1[mm] / 1250 [mm]	
Transdutor de deslocamento electromagnético LVDT (Linear variable differential transformer)	+/- 0,01[mm] / 300 [mm]	

Transdutor de força, célula de carga	$\pm 0,1 \text{ [N]} / 100 \text{ [kN]}$	
Transdutor de temperatura, termopar de fio K, com diâmetro de 0,711 [mm]	$\pm 0,01[^\circ\text{C}] / 850^\circ\text{C}$	
Transdutor de temperatura, termopar placa, fio tipo K, bainha de revestimento de 1 [mm] (controlo do forno)	$\pm 0,001[^\circ\text{C}] / 1200^\circ\text{C}$	
Transdutor de deformação, extensómetros 1-LY11-3/120 (HBM)	$0,2\% / 10.122,69\%$	
Medidor de espessura de tinta seca em ligas ferrosas (Elcometer 456)	Sonda F1: $\pm 0,1[\mu\text{m}] / 1500 [\mu\text{m}]$ Sonda F2: $\pm 0,01[\mu\text{m}] / 5000 [\mu\text{m}]$	

Na Figura 27, encontra-se representado um corte longitudinal do forno, com todos os intervenientes de um ensaio.

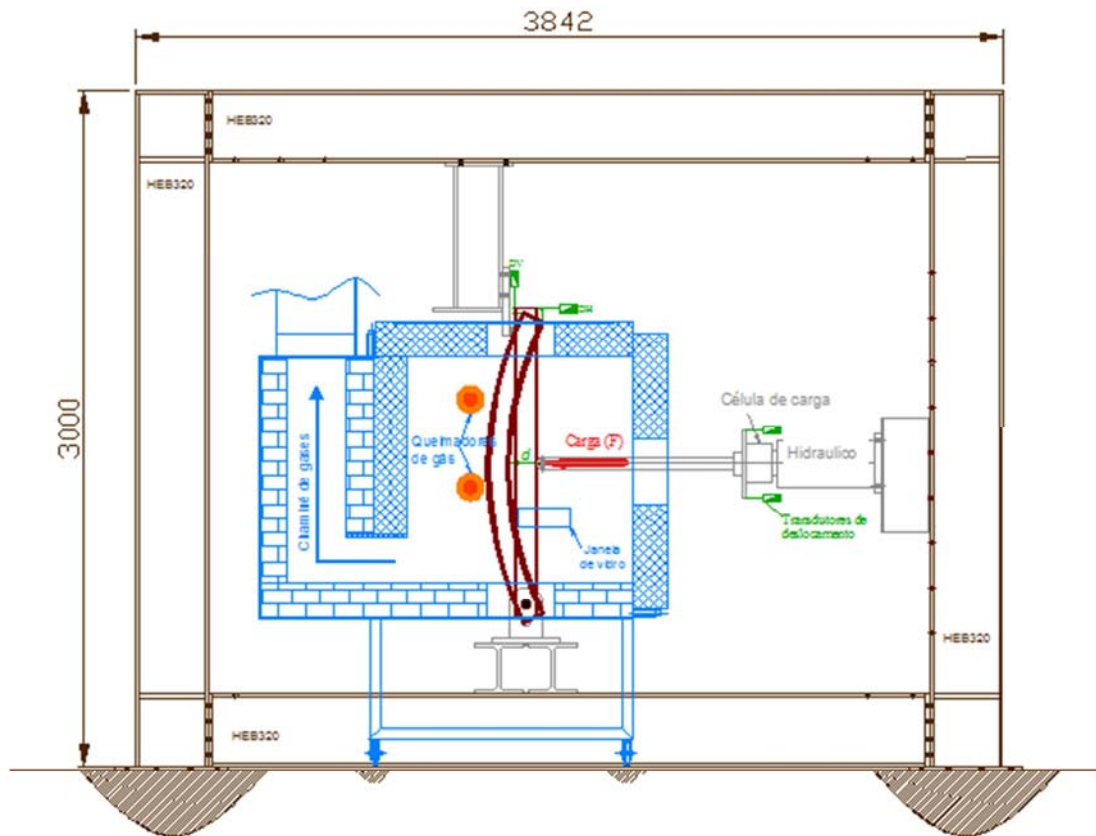


Figura 27 – Esquema geral do ensaio.

Antes do início de cada ensaio era efectuada uma verificação em todo o sistema de aquisição de dados, garantia-se a verticalidade do elemento (medindo o nível), o bom isolamento dos apoios e era efectuado a aproximação do sistema de carga com o elemento, ver Figura 28.



Figura 28 – Demonstração do isolamento nos apoios das extremidades.

Na Figura 29 observa-se o estado inicial para um ensaio em condições de incêndio.

Todo o procedimento de ensaio encontra-se de acordo com o estipulado nas normas de ensaio em condições de incêndio para elementos com protecção reactiva, (CEN, 1999) e (CEN, 2009).



Figura 29 – Sistema pronto a iniciar um ensaio ao fogo.

A carga foi incrementada até atingir o valor determinado para cada grau de utilização definido pelos métodos simplificados.

O forno está programado para seguir uma curva de incêndio normalizada, ISO834, fazendo a leitura da temperatura no seu interior através de um termopar de placa, assegurando assim uma evolução de temperaturas próximo da curva.

Na Figura 30 encontra-se representado todo o equipamento utilizado nos ensaios.



Figura 30 - Durante um ensaio com todo o equipamento utilizado.



Figura 31 – Representação de dois instantes referentes a dois ensaios C4 e I6.

Na Figura 31 observam-se dois instantes em dois ensaios distintos, à esquerda está representado um elemento de secção transversal CHS sem protecção. À direita está representado um elemento de secção IPE, protegido com tinta intumescente. Neste último é possível observar a evolução de tinta intumescente numa fase inicial da reacção.

O final do ensaio foi determinado para ultrapassar as condições impostas pela norma (CEN, 1999). Tendo em consideração o deslocamento e a velocidade

do ponto de aplicação da carga. O ensaio foi terminado depois de ultrapassados os valores referidos.

Na Figura 32 estão representados dois ensaios distintos, logo após a curva de fogo ter sido desligada, e ainda com os queimadores do forno ligados. À esquerda podemos observar o final do ensaio I6 (temperatura no forno de 950°C), e à direita o final do ensaio L3 (temperatura no forno de 926 °C).

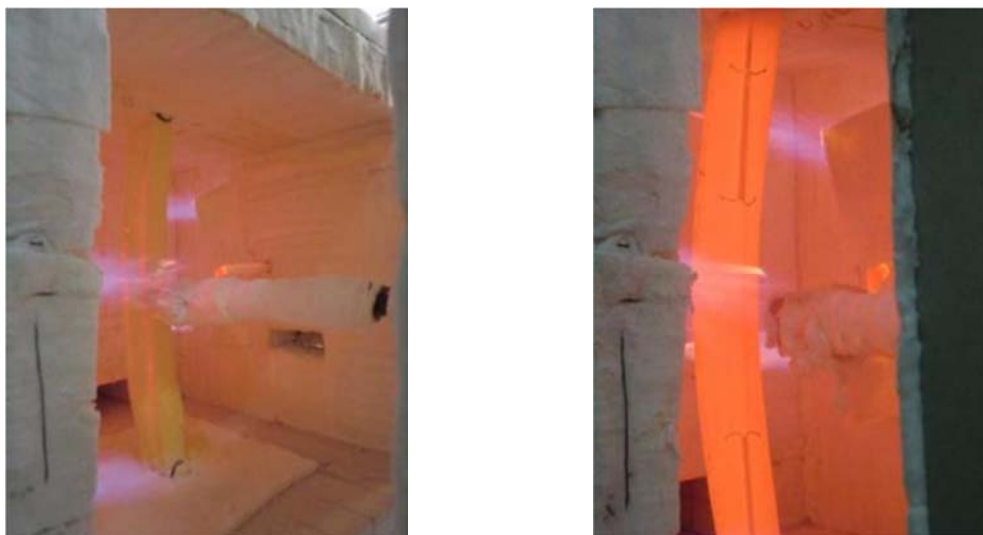


Figura 32 – Representação do final de dois ensaios (I6 e L3), ainda com os queimadores ligados.

Na Figura 33 observam-se dois estados limites últimos diferentes, à esquerda uma ruptura por encurvadura lateral (I3), e à direita uma ruptura por formação de rótula plástica (S6).



Figura 33 – Estado limite último do ensaio I3 e do ensaio S6.

O critério utilizado para determinar o tempo de resistência ao fogo está definido na norma europeia EN 1363-1 (CEN, 1999). Neste documento definem-se dois parâmetros (deslocamento e velocidade) para caracterizar o estado limite último. Estes parâmetros são comparados com dois valores de referência, os quais sendo simultaneamente ultrapassados definem o tempo de resistência ao fogo.

O limite de resistência da viga em condições de incêndio, é atingido quando se verifica simultaneamente, o limite de deslocamento e taxa de deslocamento.

Limite de deslocamento a meio vão:

$$d = \frac{l^2}{400\dot{d}} \text{ [mm]} \quad (131)$$

Limite de taxa de deslocamento (velocidade):

$$\frac{dd}{dt} = \frac{l^2}{9000\dot{d}} \text{ [mm/min]} \text{ quando } (d > l/30) \quad (132)$$

Em que $\dot{d}$ representa o valor da distância entre a fibra mais comprimida e a fibra mais traccionada na secção transversal, em condições de temperatura ambiente. l representa o comprimento inicial do elemento.

O valor de limite de deslocamento é constante, pois o valor de l e $\dot{d}$ são constantes e é atingido antes de $l/30$, logo o valor de limite de taxa de deslocamento é que define o limite de resistência ao fogo, depois de se ter atingido valores de deslocamento superiores a $l/30$.

Ainda foi representada uma comparação entre os critérios adoptados nos ensaios propostos em EN 1363 (CEN, 1999), e os critérios propostos pela norma Britânica de testes de resistência ao fogo BS 476:Parte 20 (BS, 1987). A norma Britânica define dois parâmetros (deslocamento e velocidade) para caracterização do estado limite último. O limite de resistência da viga em condições de incêndio, pela norma Britânica (BS, 1987), é atingido sempre que um destes parâmetros seja ultrapassado:

Deslocamento a meio vão:

$$d = \frac{l}{20} \text{ [mm]} \quad (133)$$

Taxa de deslocamento (velocidade):

$$\frac{dd}{dt} = \frac{l^2}{9000d} \text{ [mm/min]} \text{ quando } (d > l/30) \quad (134)$$

Em que $\dot{d}$ representa o valor da profundidade transversal do elemento estrutural; e l representa o comprimento inicial do elemento.

Para determinação da capacidade resistente última (F_{Rd}) à temperatura ambiente, foi utilizado o critério da perda de rigidez inicial do elemento à flexão, baseado nos registos gráficos (Força (F) versus deslocamento transversal a meio vão (d)).

6.3 Preparação dos elementos.

Todos os elementos para ensaio de flexão foram cortados, como se pode observar na Figura 34, com um comprimento total (l_t) de 1370 [mm], possibilitando um comprimento entre apoios (l) de 1210 [mm], e um comprimento de exposição ao fogo (l_f) de 1000 [mm].

Na Figura 34 podemos ainda observar a furação dos elementos, efectuada com uma broca craneana de diâmetro 40 [mm], localizado a 60 [mm] da extremidade inferior.



Figura 34 - Corte e furação dos elementos.

Todos os ensaios realizados de resistência à flexão à temperatura ambiente foram monitorizados através de instrumentação nos elementos, com a instalação de extensómetros de três fios. Estes sensores foram posicionados a 665 [mm] da extremidade inferior de cada elemento, ver Figura 35.

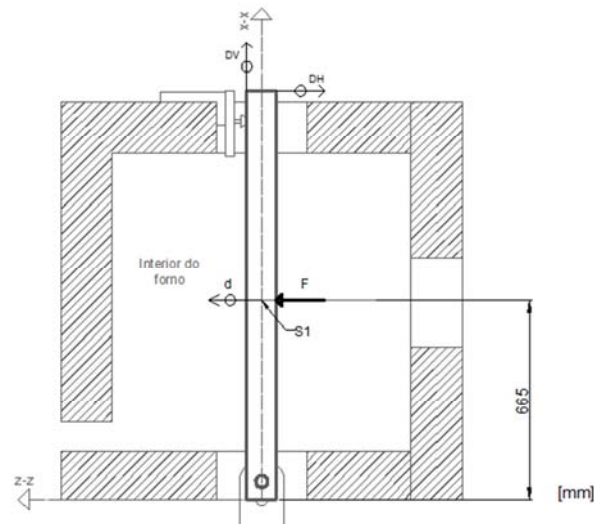


Figura 35 - Posição da estação de leitura de deformações no elemento.

Na Figura 36 está representada a posição e o número de sensores utilizados para medição da deformação na direcção axial dos elementos "x-x".

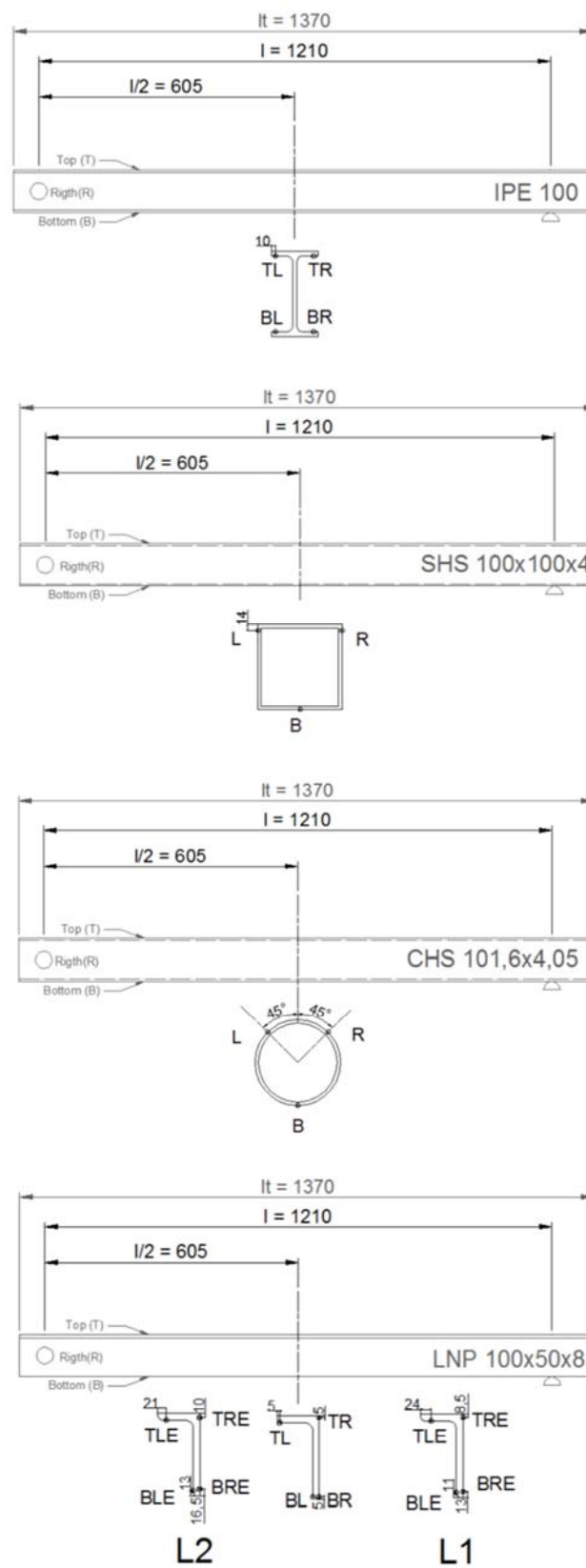


Figura 36 - Localização dos extensómetros nos elementos para as várias secções transversais.

Nos perfis LNP 100x50x8 foram posicionados mais extensómetros tendo em consideração a inexistência de qualquer plano de simetria na secção.

Estes extensómetros encontravam-se ligados a um computador, através de um sistema de aquisição de dados, "Spyder". Os dados foram processados num programa de tratamento de dados Catman Easy, recolhidos com uma frequência de 5 [Hz]

Na Figura 37 mostra os elementos com os extensómetros já instalados, com um verniz de revestimento.



Figura 37 – Elementos com extensómetros instalados.

A metodologia de aplicação dos extensómetros seguiu as recomendações do manual de introdução à extensometria (Barreira, 2007).

Na Figura 38 está representado todo o material necessário para o procedimento de colocação dos extensómetros.

O primeiro passo deve considerar a preparação da superfície de contacto com o extensómetro, tal como se observa pela Figura 39. Com uma régua deve ser marcada a zona de instalação do extensómetro, limpar a zona com acetona para remover gorduras, aplicar a lixa fina para alisar a superfície e por fim proceder ao condicionamento da superfície para remover impurezas.

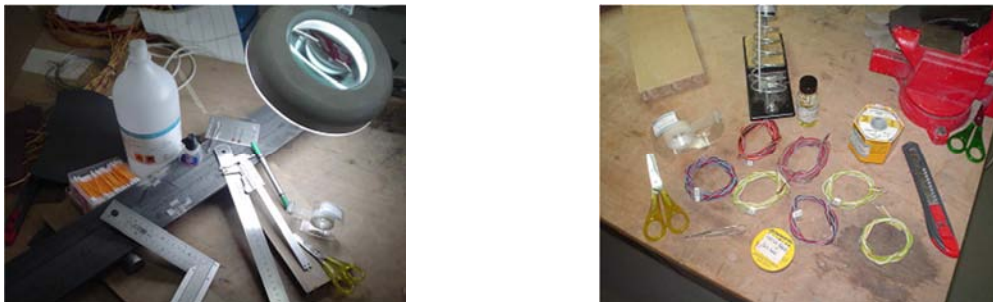


Figura 38 – Material necessário à extensometria.

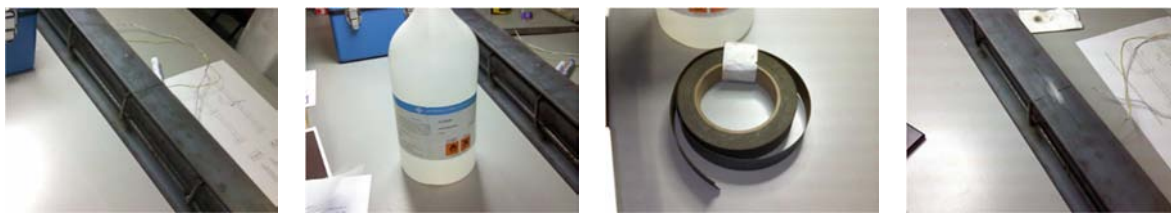


Figura 39 – Preparação da superfície para extensometria.

Na Figura 40 está representado o processo de colagem do extensómetro. Os extensómetros utilizados (1-LY11-3/120 (HBM) de 120Ω) medem a deformação numa só direcção e contêm dois fios de ligação. Sem tocar com as mãos no extensómetro procede-se à colocação de fita adesiva no extensómetro. Passado um a dois minutos, retira-se a fita com um ângulo de 45° para evitar levantar o extensómetro da superfície.



Figura 40 – Fase de colagem do extensómetro no elemento.

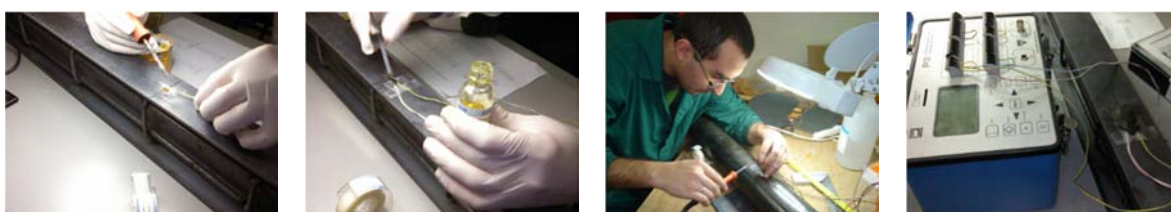


Figura 41 – Fase de soldadura do fio no extensómetro.

A Figura 41 representa o processo de soldadura dos fios do extensómetro. No processo de comunicação do extensómetro com o sistema de aquisição de dados, foram utilizados três fios. Os extensómetros foram protegidos com verniz.

Todos os termopares foram colocados de acordo com a pré-norma prEN 13382-8 (CEN, 2009), considerando um elemento do tipo coluna. A localização

destes termopares encontra-se dividida em três secções, conforme descrito na Figura 42. Em cada tipo de secção foram instalados quatro ou cinco termopares, consoante a forma da secção transversal, ver Figura 43.

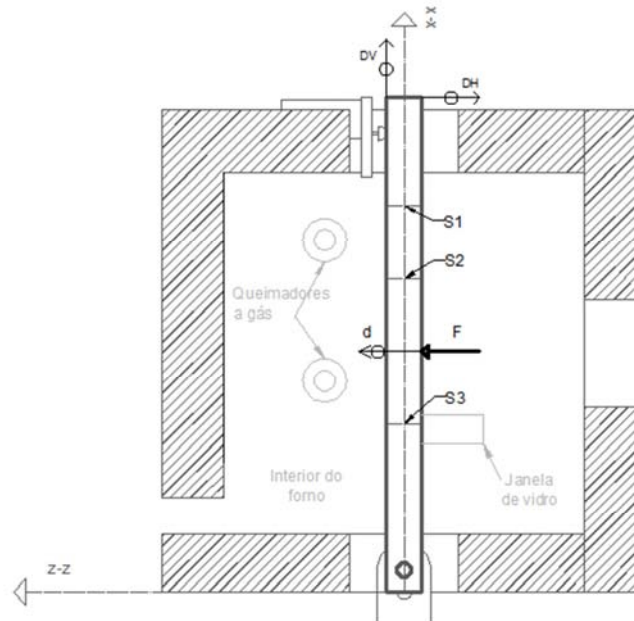


Figura 42 - Localização das secções de leitura de temperaturas no aço

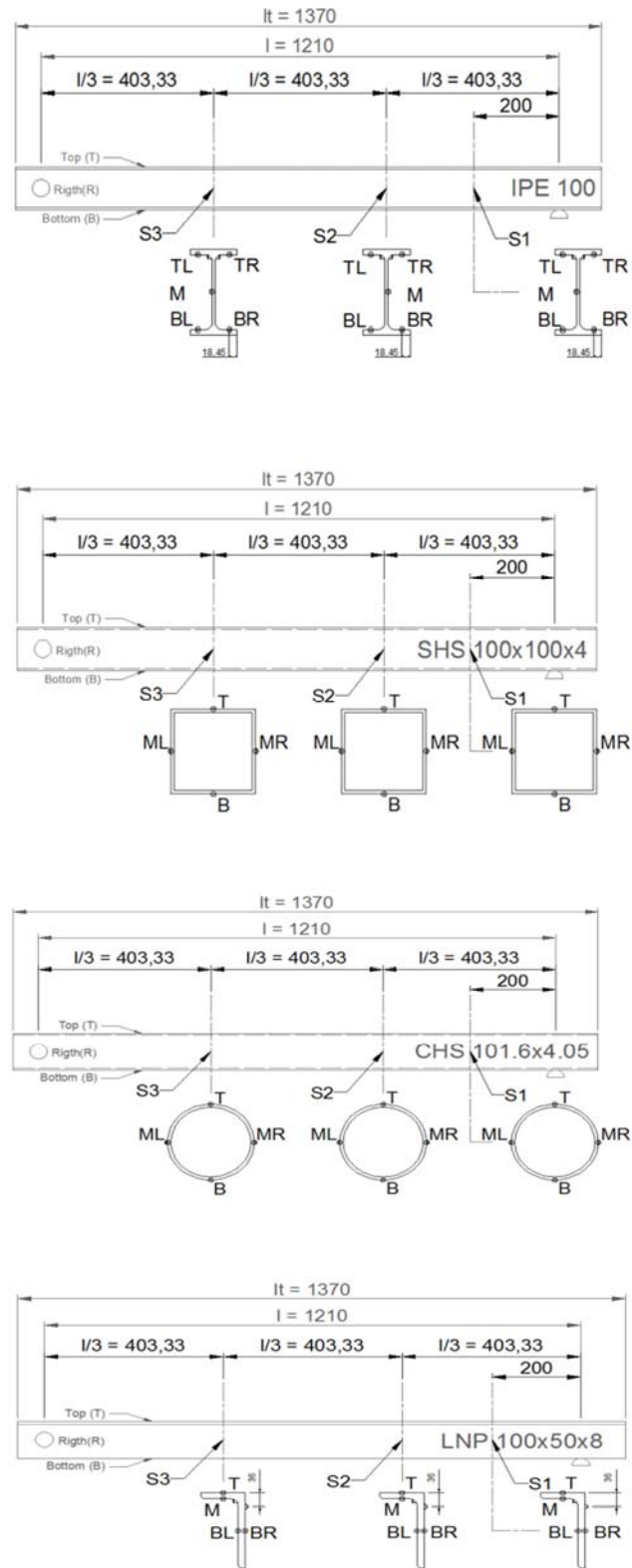


Figura 43 - Localização dos sensores de temperatura (termopares) nas diferentes secções.

Todos os fios dos termopares foram protegidos com cantoneiras metálicas (L 9x9 [mm]), soldadas ao longo dos elementos, conforme disposto na norma EN

1363-1 (CEN, 1999). Na Figura 44 estão representados alguns elementos com os sensores de temperatura instalados, devidamente protegidos com as cantoneiras.

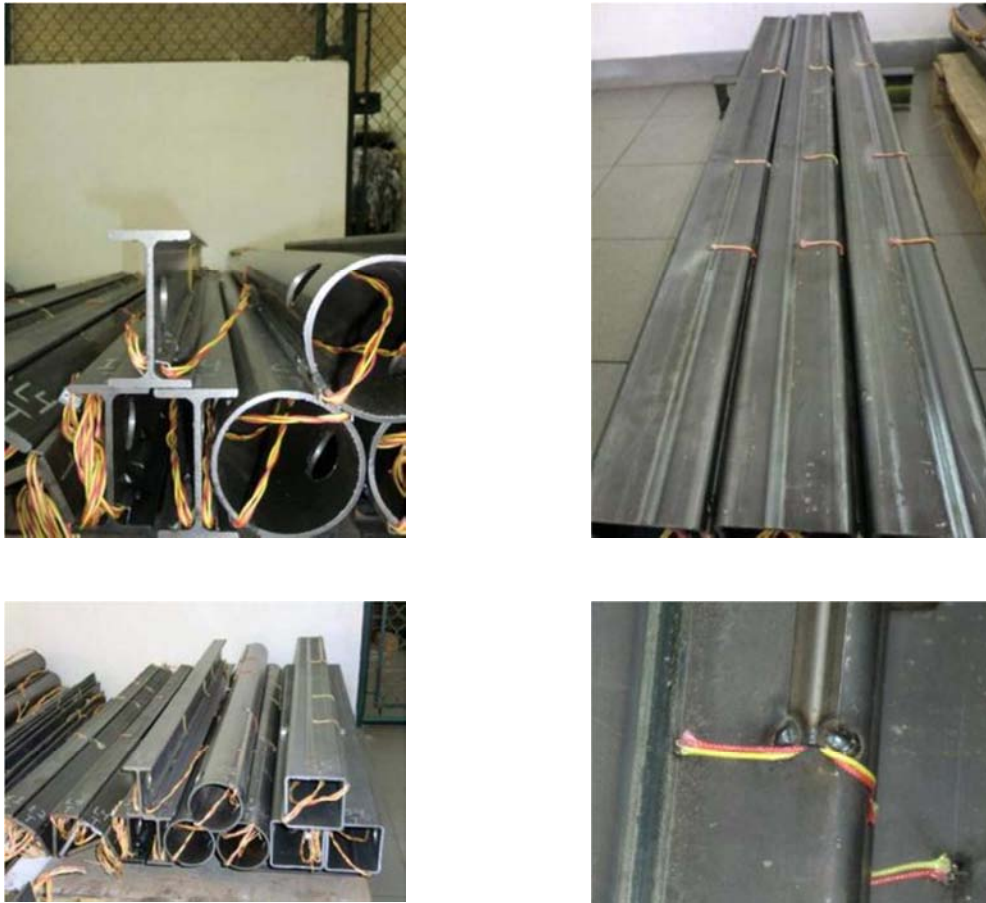


Figura 44 – Elementos com sensores de temperaturas (termopares) instalados e protegidos.

Estas cantoneiras foram soldadas ao perfil com pequenos pontos de soldadura MIG.

Na Figura 45 estão representadas imagens do equipamento utilizado, nomeadamente o sistema de soldadura dos termopares, o sistema de soldadura das cantoneiras e o equipamento auxiliar de marcação de regularização da superfície.

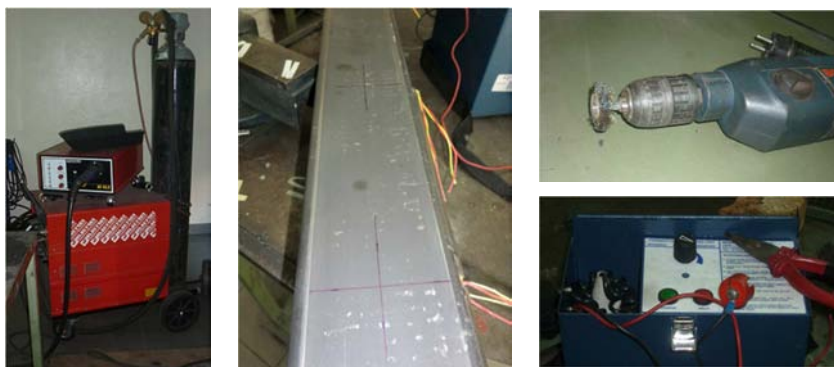


Figura 45 – Preparação do elemento para instalar os termopares.

Na Figura 46 está representada a fixação dos termopares e a canalização destes para as diferentes secções. Todos os termopares foram verificados depois de efectuada a sua instalação, recorrendo a um multímetro digital, ver Figura 47.



Figura 46 – Soldadura dos fios termopares.



Figura 47 – Acondicionamento dos elementos com os termopares instalados.

O processo de pintura está representado na Figura 48. Os elementos foram colocados numa estrutura auxiliar, pendurados para não contactarem com impurezas e poeiras.

A tinta foi preparada de acordo com as instruções do fornecedor, utilizando uma proporção de um litro de água para quatro litros de tinta. A tinta foi coada antes de ser introduzida na pistola de pintura.

Os elementos foram pintados uniformemente, por camadas, controlando a espessura com um medidor de tinta húmida. A espessura final (DFT) foi controlada com um medidor de tinta seca, de funcionamento electromagnético, ver Figura 48.

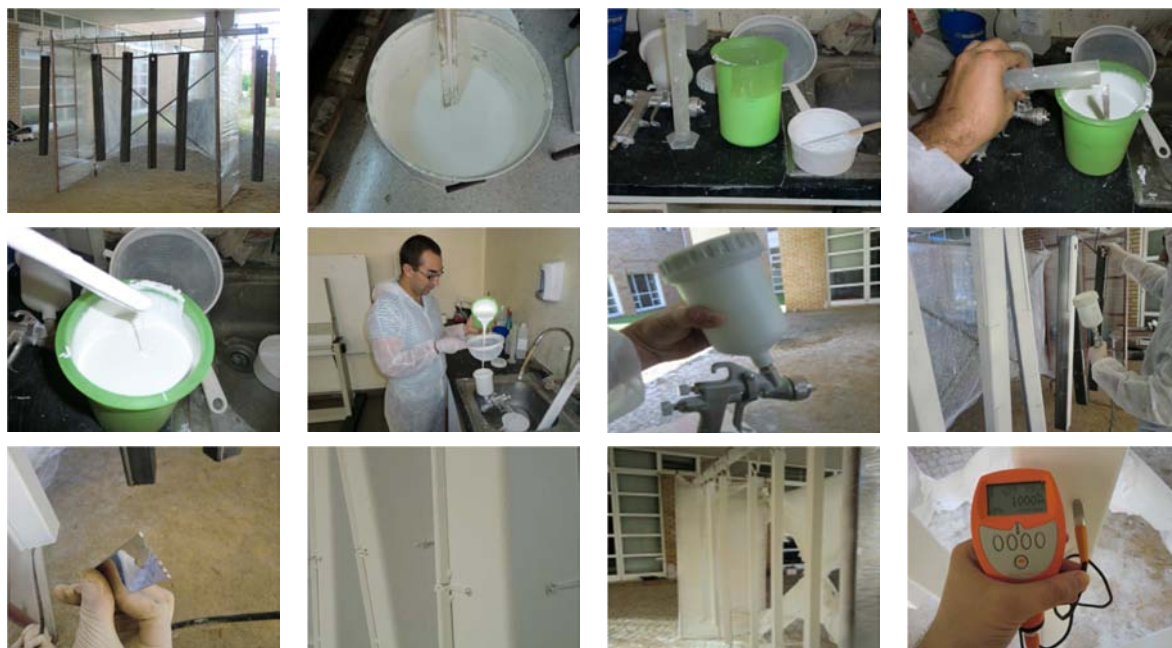


Figura 48 – Processo de aplicação do intumescente nos elementos.

Depois de finalizada a pintura, os elementos foram colocados num ambiente controlado de temperatura (23°C) e humidade relativa (50%), durante 8 dias.

Na Figura 49, estão representadas todas as fases descritas anteriormente, incluindo a pintura, controlo dimensional e acondicionamento.



Figura 49 – Fases de pintura dos elementos (pintura, controlo dimensional e acondicionamento).

A espessura de tinta intumescente seca (DFT) foi medida com recurso a um medidor electromagnético para bases ferrosas. Este medidor foi calibrado em função das espessuras pretendidas.

O controlo da espessura dos elementos foi elaborado de acordo com a pré-norma prEN 13381-8 (CEN, 2009), tendo sido definidas cinco secções de leitura, ver Figura 50.

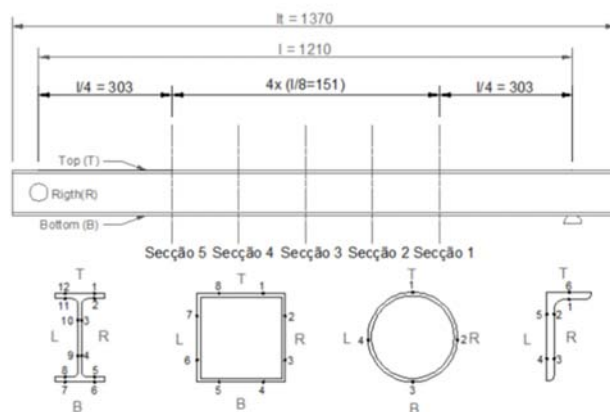


Figura 50 - Localização dos pontos de controlo de espessura de tinta nas várias secções.

Na Figura 51 pode-se observar o controlo dimensional da espessura de tinta seca (DFT), nos elementos.



Figura 51 – Observação do controlo dimensional da espessura de tinta nos elementos.

Em cada procedimento de controlo dimensional da espessura de tinta elaborou-se um estudo estatístico com as leituras nos diferentes pontos definidos na Figura 50. Desse estudo, resultaram valores de média (DFT), desvio padrão, valor máximo e valor mínimo. Na Tabela 34 estão representados os valores do controlo dimensional da protecção utilizada no elemento I6.

Tabela 34 – Valores de espessura de tinta para o elemento I6 em [μm].

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média (DFT)	Desvio Padrão	Valor Máximo	Valor Mínimo
1	2000	1900	1950	1760	1580	1838	170	2000	1580
2	1720	1700	1800	1920	1680	1764	98	1920	1680
3	1750	1890	1950	1970	1810	1874	93	1970	1750
4	1930	2000	2020	1920	1840	1942	72	2020	1840
5	1970	1900	1890	1930	1850	1908	45	1970	1850
6	1820	2060	1920	1840	1830	1894	101	2060	1820
7	1730	2000	1840	1960	1880	1882	106	2000	1730
8	1750	1790	1590	1920	1870	1784	127	1920	1590
9	1720	1790	1780	1800	1730	1764	36	1800	1720
10	1590	1680	1580	1490	1520	1572	73	1680	1490
11	1440	1810	1590	1700	1610	1630	137	1810	1440
12	1950	2050	2030	2140	2020	2038	68	2140	1950
Média	1781	1881	1828	1863	1768	1824			
Desvio padrão	165	130	165	163	146		156		
Valor Maior	2000	2060	2030	2140	2020			2140	
Valor menor	1440	1680	1580	1490	1520				1440

Na Tabela 35 encontram-se definidos os valores medidos de espessura de tinta seca, DFT “Dry Film Thickness”. O valor médio de espessura foi determinado com função dos valores registados nas medições efectuadas ao longo do elemento.

Tabela 35 – Valores registados do controlo dimensional da espessura de tinta.

Secção	Ensaio	Valores de espessura de tinta seca [µm]			
		DFT	Desv. Pad.	Máx.	Mín.
IPE 100 S275	I1	--	--	--	--
	I2	--	--	--	--
	I3	--	--	--	--
	I4	--	--	--	--
	I5	--	--	--	--
	I6	974	193	1253	445
	I7	975	170	1287	576
	I8	1012	185	1342	560
	I9	1055	202	1528	490
	I10	998	148	1268	653
	I11	989	193	1360	501
	I12	1824	156	2140	1440
	I13	1832	194	2270	1440
SHS 100x100x4 S235	S1	--	--	--	--
	S2	--	--	--	--
	S3	--	--	--	--
	S4	--	--	--	--
	S5	--	--	--	--
	S6	1105	115	1310	854
	S7	1094	113	1338	777
	S8	1141	100	1309	944
	S9	1141	104	1350	909
	S10	1144	114	1482	886
	S11	1131	92	1270	854
	S12	1932	112	2210	1730
	S13	1933	144	2310	1700
CHS 101,6x4,05 S235	C1	--	--	--	--
	C2	--	--	--	--
	C3	--	--	--	--
	C4	--	--	--	--
	C5	--	--	--	--
	C6	997	114	1270	800
	C7	1004	111	1187	818
	C8	1026	143	1330	770
	C9	1006	93	1140	810
	C10	1071	143	1306	754
	C11	1120	178	1439	785
	C12				
	C13				
LNP 100x50x8 S275	L1	--	--	--	--
	L2	--	--	--	--
	L3	--	--	--	--
	L4	--	--	--	--
	L5	--	--	--	--
	L6	1041	91	1205	898
	L7	1026	107	1309	850
	L8	1053	108	1318	898
	L9	1063	96	1271	825
	L10	1135	118	1420	882
	L11	1114	110	1377	953
	L12	--	--	--	--
	L13	--	--	--	--

Para a definição do estudo de cada elemento foi ainda registada a imperfeição geométrica inicial do elemento, com o auxílio de um feixe laser, ver Figura 52. Com uma régua é observado o afastamento do perfil a meio vão, em relação ao feixe laser. Estas leituras servirão para definição da imperfeição a utilizar, no caso de estudo com Elementos Finitos, para validação dos ensaios.



Figura 52 – Leitura da imperfeição geométrica de cada elemento.

Nos perfis SHS e CHS não foi efectuada a medição da imperfeição geométrica. Verificou-se ainda que em alguns elementos de secção IPE, mais especificamente os elementos I9 e I10, que os banzos se encontravam desalinhados. Na Tabela 36 podemos observar os resultados da análise da imperfeição geométrica medida nos elementos de secção transversal IPE e LNP.

Tabela 36 – Valores medidos da imperfeição geométrica nos elementos (LNP e IPE).

Secção	Nome	Imperfeição [mm]
IPE 100 S275	I1	--
	I2	1,0
	I3	--
	I4	1,0
	I5	--
	I6	0,5
	I7	--
	I8	--
	I9	--
	I10	--
	I11	--
	I12	--
	I13	--
LNP 100x50x8 S275	L1	7,0
	L2	1,0
	L3	--
	L4	--
	L5	--
	L6	1,0
	L7	--
	L8	1,0
	L9	3,0
	L10	1,0
	L11	2,0
	L12	--
	L13	--

6.4 Resultados experimentais dos ensaios à temperatura ambiente.

Neste ponto serão apresentadas comparações entre os vários resultados obtidos, à temperatura ambiente. Poderão ser analisados os resultados individuais no Anexo – Parte V..

Por ordem de apresentação segue-se os resultados de I1 com I2, S1 com S2, C1 com C2 e L1 com L2.

No subcapítulo 5.2 foi descrito o processo de cálculo da resistência à flexão de cada elemento, pelos métodos simplificados, preconizados pela EN 1993-1-1 (CENa, 2005). A diferença que se verifica entre este método e os ensaios, poderá ser justificada pela diferença existente entre os valores das propriedades nominais e valores das propriedades reais, e ainda pela diferença da geometria da secção resistente. Outra justificação para esta diferença, reside nos métodos simplificados de cálculo.

6.4.1 Elementos com secção IPE100.

Nesta secção apresenta-se uma comparação entre dois ensaios de flexão, realizados a elementos de secção IPE 100, à temperatura ambiente (I1 e I2). Para estes ensaios, era esperada uma capacidade resistente à instabilidade por encurvadura lateral de 31.840,00 [N] (nominal).

No Gráfico 14, apresentam-se os resultados de força (F) versus deslocamento transversal (d), que coincidem na sua evolução, com uma pequena diferença no valor de carga máxima atingida.

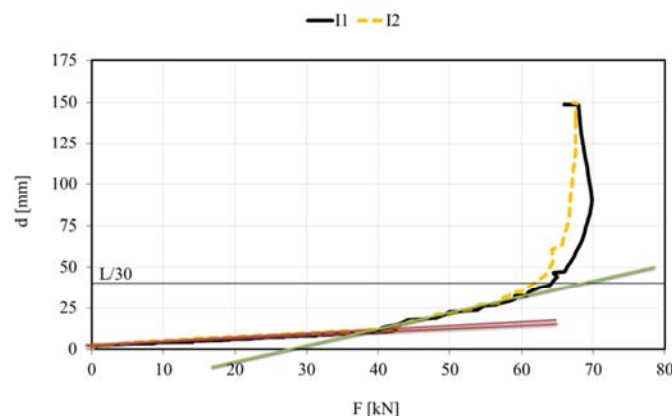


Gráfico 14 - Comparação entre I1 e I2 para força/deslocamento.

No Gráfico 15 é efectuada a comparação das deformações registadas durante os dois ensaios (δ). Observa-se um comportamento semelhante nos dois elementos, os valores de TL e TR que inicialmente estão sob compressão, passam depois a esforços de tracção, devido ao fenómeno de encurvadura lateral, os valores de BL e BR encontram-se sempre sujeitos a tracção.

No Gráfico 16, apresentam-se os resultados registados pelos LVDT's, no topo dos elementos (DV e DH). Os resultados assemelham-se, verificando-se que a secção inicialmente sofre uma pequena rotação obrigando o valor do deslocamento vertical ser positivo (DV), depois quando é imposta a deformação no ponto de aplicação da carga, o elemento sofre uma maior rotação na parte superior e um movimento vertical descendente.

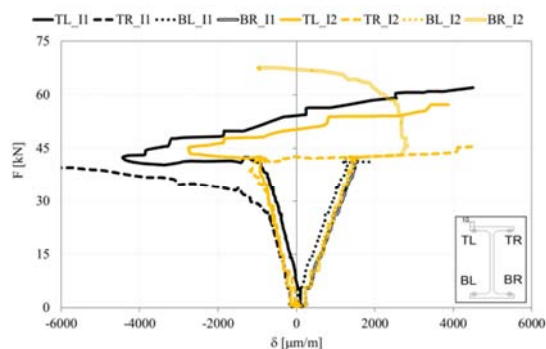


Gráfico 15 - Comparação entre as deformações nos ensaios I1 e I2.

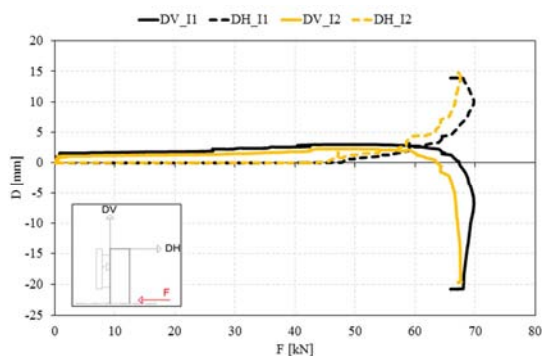


Gráfico 16 - Comparação entre os registos dos LVDT's em I1 e I2.

O modo de colapso nos dois ensaios foi idêntico, tendo ocorrido um fenómeno de instabilidade por encurvadura lateral, caracterizado por um deslocamento lateral da secção para o lado esquerdo, visto do ponto de aplicação da carga. Na Figura 53, observa-se a comparação do estado limite último entre estes ensaios, e o seu estado de deformação final.



Figura 53 – Deformação final dos elementos I1 e I2.

Na Tabela 37 descreve-se os valores conseguidos do cálculo simplificado para definir a resistência dos elementos, com valores nominais e reais, comparando com os valores do ensaio.

Tabela 37 – Comparação entre os valores de Força (F) em [N], nos ensaios I1 e I2.

Elemento	EN 1993-1-1		Ensaio
	Nominal	Real	
I1	31.840,00	34.988,00	37.500,00
I2			41.500,00
Valor médio:			39.500,00

6.4.2 Elementos com secção SHS.

Nesta secção apresenta-se a comparação dos dois ensaios à flexão da secção transversal SHS 100x100x4, realizados à temperatura ambiente (S1 e S2). Foi determinada uma capacidade resistente nominal à flexão de 42.980,00 [N] (nominal).

No Gráfico 17, observam-se os resultados de aplicação de força (F) versus deslocamento (d). Permite-se concluir que os valores são idênticos, havendo apenas uma pequena diferença no valor máximo.

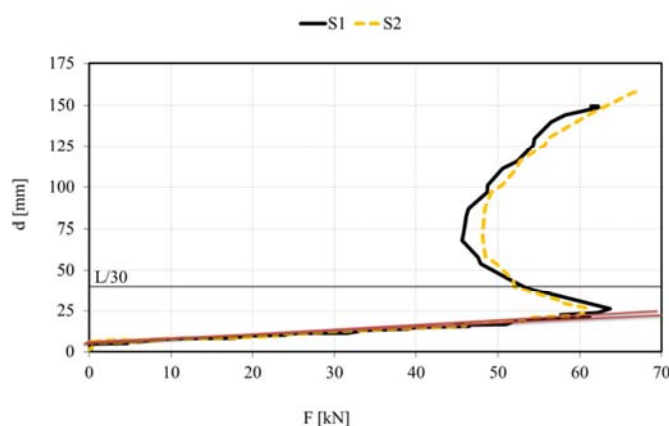


Gráfico 17 - Comparação entre S1 e S2 para força/deslocamento.

No Gráfico 18 é efectuada a comparação das deformações (δ), registadas durante os dois ensaios. Observa-se um comportamento semelhante, todos os extensómetros têm uma evolução para valores de deformação positivos, exceptuando os valores de L e R que inicialmente apresentam valores de compressão.

No Gráfico 19, apresenta-se a comparações dos resultados registados pelos LVDT's (D). Os registos têm uma tendência semelhante nos dois ensaios, verificando-se que a secção inicialmente sofre uma pequena rotação obrigando o valor do deslocamento vertical ser positivo, depois quando é imposta a deformação no ponto de aplicação da carga, o elemento sofre uma maior rotação na parte superior e um deslizamento vertical descendente.

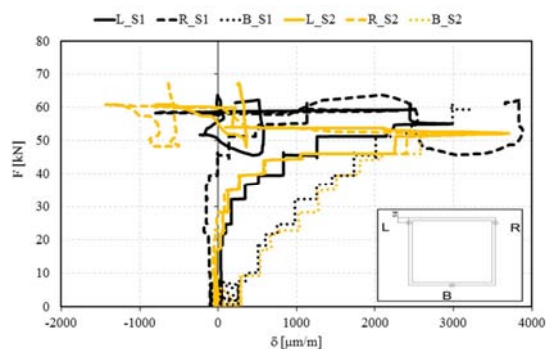


Gráfico 18 - Comparação entre as deformações nos ensaios S1 e S2.

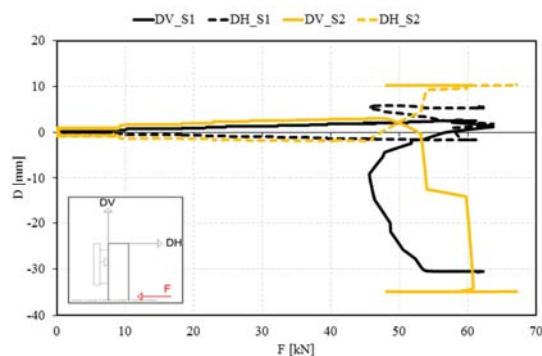


Gráfico 19 - Comparação entre os registos dos LVDT's em S1 e S2.

O modo de colapso nos dois ensaios foi idêntico, sendo que a sua ruptura ocorreu com a formação de uma rótula plástica no ponto de aplicação da carga. Na Figura 54, observa-se a deformação final nos elementos, devido ao estado limite último ter sido atingido.



Figura 54 – Deformação resultante da ruptura nos ensaios S1 e S2.

Na Tabela 38 apresentam-se os valores obtidos pelo cálculo simplificado para definir a resistência dos elementos, com valores nominais e reais, comparando com os valores do ensaio.

Tabela 38 – Comparação entre os valores de Força (F) em [N], nos ensaios S1 e S2.

Elemento	EN 1993-1-1		Ensaio
	Nominal	Real	
S1	42.980,00	66.233,00	62.200,00
S2			60.000,00
Valor médio:			61.100,00

6.4.3 Elementos com secção CHS.

Apresenta-se aqui a comparação entre dois ensaios à flexão da secção CHS 101,6x4,05, em condições de temperatura ambiente (C1 e C2). Era esperada uma capacidade resistente à flexão de 29.370,00 [N] (nominal).

No Gráfico 20, apresenta-se os resultados de força versus deslocamento, que se mostram idênticos na sua evolução, de salientar uma pequena diferença no valor de carga máxima.

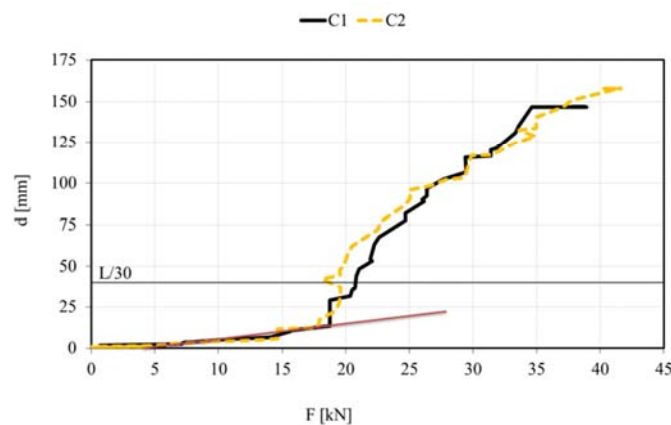


Gráfico 20 - Comparação entre C1 e C2 para força/deslocamento.

No Gráfico 21 é efectuada a comparação das deformações (δ), durante os dois ensaios. Pela observação do gráfico, pode-se afirmar um comportamento semelhante, o extensómetro B tem uma evolução positiva, os extensómetros L e R iniciam-se com valores positivos e no final apresentam valores negativos.

No Gráfico 22, apresenta-se a comparações dos resultados registados pelos LVDT's (D). Os registos foram idênticos nos dois ensaios, verificando-se que a secção quando é imposta a deformação por rótula plástica no ponto de aplicação da carga, o elemento sofre uma maior rotação na parte superior provocando um registo vertical descendente e o registo horizontal positivo.

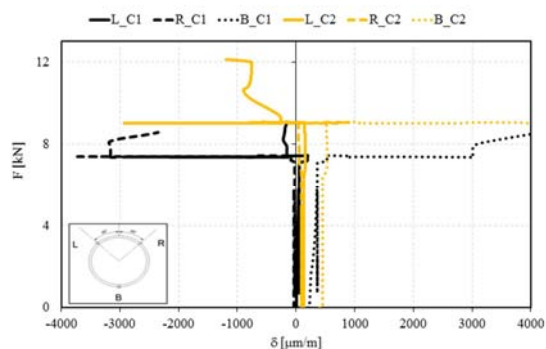


Gráfico 21 - Comparação entre as deformações nos ensaios C1 e C2.

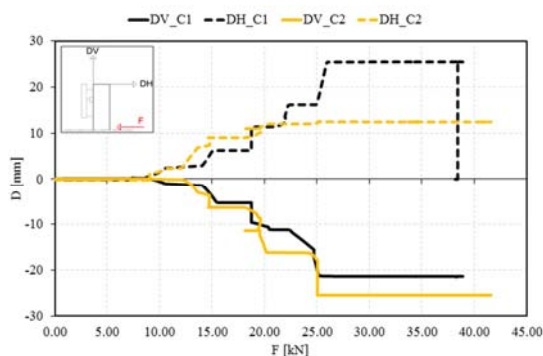


Gráfico 22 - Comparação entre os registos dos LVDT's em C1 e C2.

O modo de colapso nos dois ensaios foi semelhante, tendo ocorrido uma ruptura por rótula plástica da secção. Na Figura 55, observa-se a comparação entre estes ensaios e o seu estado de deformação final, provocado pelo seu estado limite último.



Figura 55 – Deformação provocada aos ensaios C1 e C2.

Na Tabela 39 apresentam-se os valores obtidos pelo cálculo simplificado para definir a resistência dos elementos, com valores nominais e reais, comparando com os valores do ensaio.

Tabela 39 – Comparação entre os valores de Força (F) em [N], nos ensaios C1 e C2.

Elemento	EN 1993-1-1		Ensaio
	Nominal	Real	
C1	29.370,00	22.760,00	18.700,00
C2			17.900,00
Valor médio:			18.300,00

6.4.4 Elementos com secção LNP.

Para os ensaios à flexão, em condições de temperatura ambiente da secção LNP 100x50x8 (L1 e L2), era esperada uma capacidade resistente à instabilidade por encurvadura lateral de 21.690,00 [N] (nominal).

No Gráfico 23, observa-se os resultados de força versus deslocamento. As curvas têm uma tendência muito semelhante, com uma pequena diferença no valor de carga máxima.

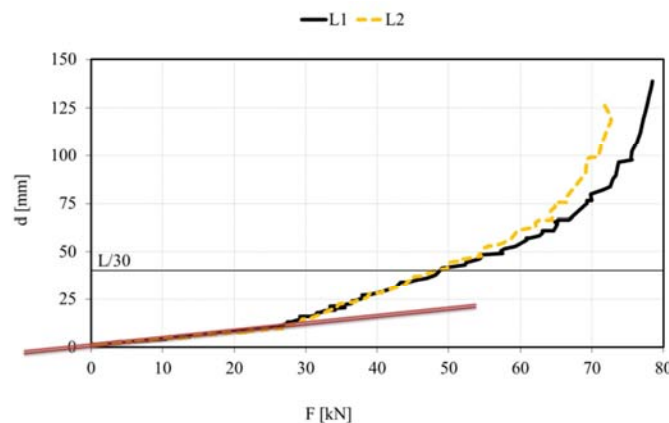


Gráfico 23 - Comparação entre L1 e L2 para força/deslocamento.

No Gráfico 24 é efectuada a comparação entre os valores registados pelos extensómetros dos dois ensaios, correspondentes aos valores de deformação (δ). Pela observação do gráfico, pode-se afirmar um comportamento muito semelhante nos diferentes ensaios. Os valores do extensómetro TL, TLE e TRE apresentam uma tendência negativa, enquanto que os restantes extensómetros apresentam valores positivos.

No Gráfico 25, apresentam-se as comparações dos resultados registados pelos LVDT's (D). Os registos foram semelhantes nos dois ensaios, verificando-se que a secção inicialmente sofre uma pequena rotação obrigando o valor do deslocamento vertical a ser positivo, depois quando é imposta a deformação no ponto de aplicação da carga, o elemento sofre uma maior rotação na parte superior e um deslocamento vertical descendente.

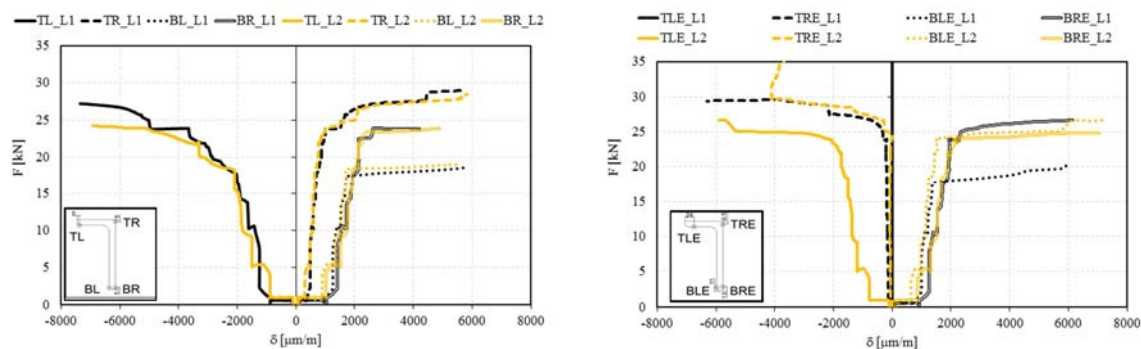


Gráfico 24 - Comparação entre as deformações nos ensaios L1 e L2.

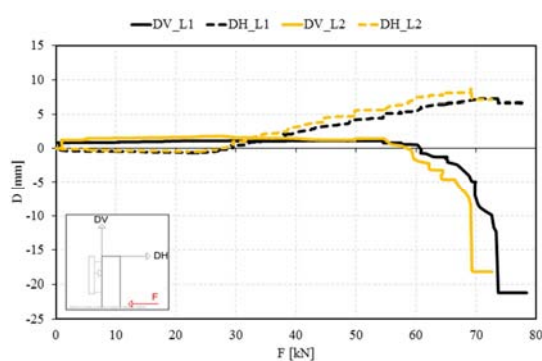


Gráfico 25 - Comparação entre os registos dos LVDT's em L1 e L2.

O modo de colapso nos dois ensaios foi idêntico, tendo ocorrido um fenómeno de encurvadura lateral, a par de um deslocamento lateral da secção para a direita, visto do ponto de aplicação da carga. Na Figura 56, observa-se a comparação entre estes ensaios e o seu estado de deformação final.



Figura 56 – Deformação imposta aos ensaios L1 e L2.

Na Tabela 40 apresentam-se os valores obtidos pelo cálculo simplificado para definir a resistência dos elementos, com valores nominais e reais, comparando com os valores do ensaio.

Tabela 40 – Comparação entre os valores de Força (F) em [N], nos ensaios L1 e L2.

Elemento	EN 1993-1-1		Ensaio
	Nominal	Real	
L1	21.690,00	25.450,00	25.900,00
L2			25.950,00
Valor médio:			25.925,00

6.5 Resultados experimentais dos ensaios realizados ao fogo.

Nesta secção apresentam-se todos os resultados dos ensaios à flexão realizados em condições de ambiente de incêndio, sob a curva de incêndio padrão ISO 834. Os ensaios foram realizados num forno de resistência ao fogo.

Foram ensaiados vários elementos de diferentes secções transversais, com diferentes níveis de carga, representando graus de utilização de 30%, 50% e 70%. Ainda foram registados os resultados dos ensaios aplicando vários níveis de protecção, com tinta intumescente aplicada nos elementos.

6.5.1 Elementos sem protecção.

Serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios à flexão em condições de incêndio de elementos metálico, não protegidos. As secções transversais em estudo são, por ordem de apresentação: IPE 100, SHS 100x100x4, CHS 101,6x4,05 e LNP 100x50x8. Em cada secção apresentada é efectuado o estudo de três níveis de carga aplicados no elemento, representando consequentemente três graus de utilização, $\mu=30\%$ para o ensaio com índice 3, $\mu=50\%$ para o ensaio com índice 4 e $\mu=70\%$ para o ensaio com índice 5.

Para estes ensaios, foram definidos os graus de utilização, de acordo com os métodos simplificados de cálculo preconizados pela EN 1993-1-2 (CENb, 2005). A diferença que se possa vir a verificar nos resultados, advém dos valores nominais adoptados para definir a resistência mecânica do material e secção, ainda será possível verificar algumas diferenças devido à formulação dos métodos simplificados.

Para cada grau de utilização está definida uma temperatura crítica, 663,78 [°C] para $\mu=30\%$, 584,67 [°C] para $\mu=50\%$ e 525,78 [°C] para $\mu=70\%$. Foi determinado o valor de carga a aplicar em função da temperatura crítica definida.

Com os resultados obtidos fez-se uso da expressão (103), para determinar o grau de utilização real, pelo valor de temperatura a que se encontrava o elemento no momento de colapso.

6.5.1.1 Elementos com secção IPE100.

Descreve-se aqui uma comparação entre três ensaios à flexão da secção transversal IPE 100, sob condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO 834 (I3, I4 e I5). Os valores de carga aplicados (F) foram de 5.340,00 [N] para o ensaio I3, 9.180,00 [N] para o ensaio I4 e 12.940,00 [N] para o ensaio I5.

No Gráfico 26 está representado o histograma de carga (F) registado em cada ensaio, assim como o deslocamento (d) medido no ponto de aplicação da carga. Verifica-se que quanto maior for o grau de utilização, maior é o nível da carga aplicada e menor será o tempo de resistência ao fogo. Observa-se que a diferença entre os valores de deslocamento (d) não são directamente proporcionais à diferença do nível de carga (F). Ainda se pode observar uma ligeira perturbação no registo da carga (F) quando elemento atinge a ruptura.

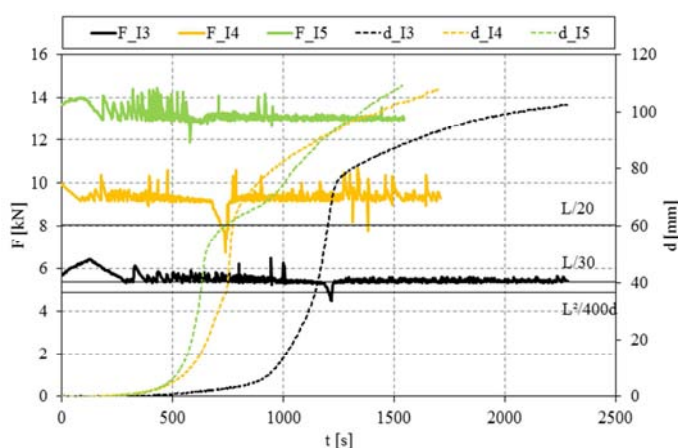


Gráfico 26 – Valores para I3, I4 e I5 do histograma de cargas (F) e deslocamento (d), versus tempo (t).

No Gráfico 27 observa-se a evolução da temperatura média de cada elemento, da curva de fogo ISO 834 e da temperatura determinado pelos métodos

simplificados, a par do deslocamento (d). Pode-se perceber uma diferença entre os valores de ensaio e os métodos simplificados. A evolução das temperaturas nos três ensaios é idêntica, pois esta não depende do grau de utilização solicitado. Verifica-se um aumento do deslocamento (d) quando o elemento atinge a sua temperatura crítica, onde é definida a resistência do elemento ao fogo.

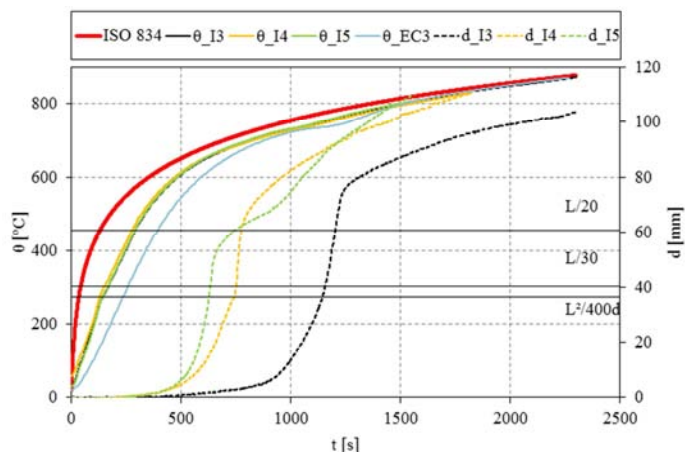


Gráfico 27 – Valores de I3, I4 e I5 da evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 28 observa-se o valor de deslocamento (d) consoante se verifica um aumento de temperatura do perfil e do ambiente no forno. A temperatura crítica (θ_{cr}) do elemento é determinada numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que a curva de deslocamento, para a temperatura no aço, atinge o valor de $l/30$.

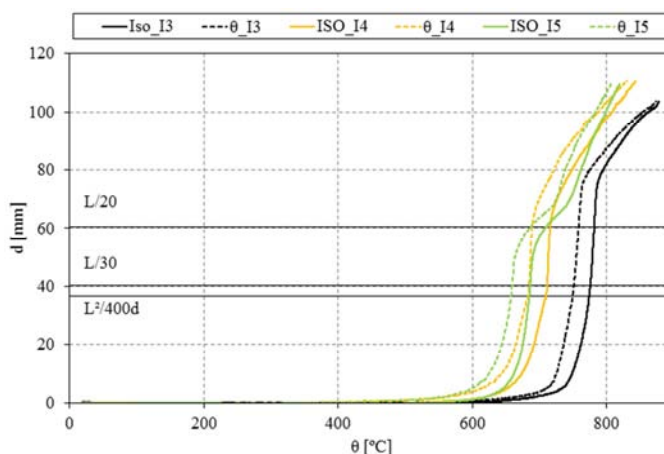


Gráfico 28 – Valores de I3, I4 e I5 do deslocamento a meio vão consoante as temperatura registadas.

Todos os elementos atingiram um estado limite último por encurvadura lateral, que definiu o seu modo de colapso, ver Figura 57.



Figura 57 - Deformação imposta nos elementos IPE em condições de incêndio, sem protecção.

Pode-se observar os valores registados de tempo, temperatura e grau de utilização real, na Tabela 41. O tempo que cada ensaio demora a atingir o seu colapso é maior do que o definido pelos métodos simplificados, assim como o valor da temperatura crítica. O valor do grau de utilização real do ensaio, definido pela temperatura crítica de ensaio, é menor do que o previsto.

Tabela 41 – Valores de tempo e temperatura registados nos ensaios I3, I4 e I5

Ensaio	Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]		Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
	$L^2/9000d$	$L^2/400d$	L/30	L/20	EC 3	Ensaio	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
I3	885	1143	1156	1202	12	19	751,20	29%	17%
I4	480	743	749	774	9	12	684,47	48%	26%
I5	443	626	632	740	7	10	659,01	64%	31%

6.5.1.2 Elementos com secção SHS.

Apresenta-se de seguida uma comparação de três ensaios à flexão da secção transversal SHS 100x100x4, sob condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO 834 (S3, S4 e S5). O valor das cargas aplicadas, foram 13.620,00 [N] para o ensaio S3, 22.250,00 [N] para o ensaio S4 e 30.090,00 [N] para o ensaio S5.

No Gráfico 29 pode-se observar o histograma de carga (F) para cada ensaio, assim como o deslocamento (d) medido no ponto de aplicação da carga. Verifica-se que quanto maior for o grau de utilização, menor será o tempo de resistência ao fogo. Esta relação não é linearmente proporcional. Ainda se pode observar uma perturbação no registo da carga (F) quando elemento atinge a ruptura.

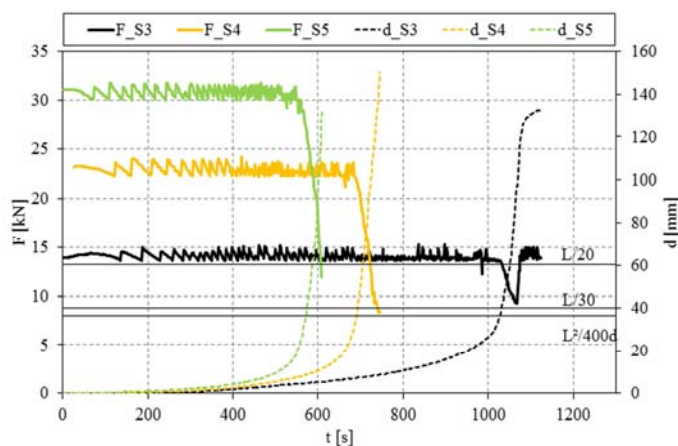


Gráfico 29 – Histograma de carga (F) e deslocamento (d) para os ensaios S3, S4 e S5.

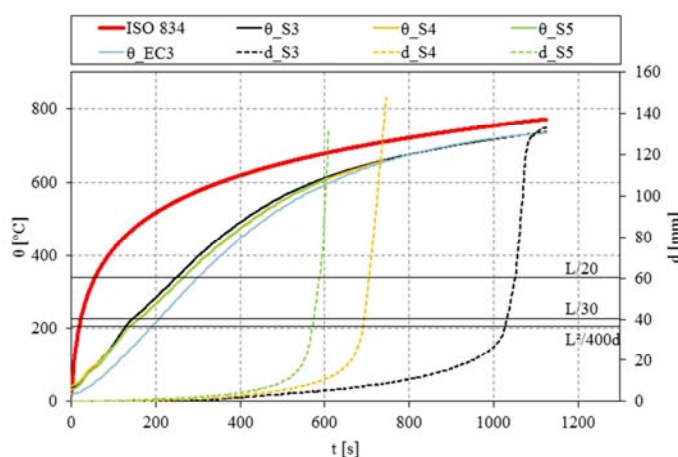


Gráfico 30 – Registo de temperaturas e deslocamento (d) nos ensaios S3, S4 e S5.

No Gráfico 30 pode-se observar a evolução das temperaturas, referente à média dos perfis, curva de fogo ISO 834 e temperatura determinada pelos

métodos simplificados de cálculo. A par da evolução das temperaturas registou-se o deslocamento (d) do ponto de aplicação da carga, e verificou-se uma rápida evolução quando os elementos atingiram a temperatura crítica (θ_{cr}).

No Gráfico 31 observa-se o valor de deslocamento (d) consoante se verifica um aumento de temperatura do perfil e do ambiente no forno. A temperatura crítica (θ_{cr}) do elemento é determinada numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que a curva de deslocamento, para a temperatura no aço, atinge o valor de $l/30$.

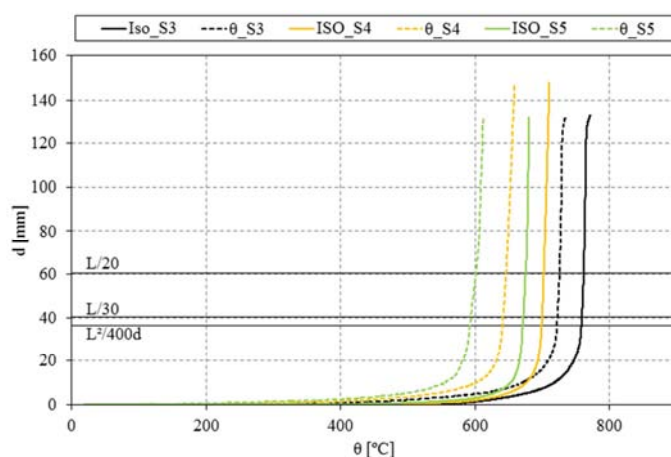


Gráfico 31 - Comparação entre S3, S4 e S5 para os valores de deslocamento em função da temperatura registada.



Figura 58 - Deformação imposta aos elementos de secção SHS ao fogo, sem protecção.

Na Figura 58 observa-se a deformação imposta aos elementos S3, S4 e S5. A deformação destes elementos, provocada por formação de uma rótula plástica, foi imposta pelo estado limite último dos elementos.

Pode-se observar os valores registados de tempo, temperatura e grau de utilização real, na Tabela 42. O tempo que cada ensaio demora a atingir o seu colapso é maior do que o definido pelos métodos simplificados, assim como o valor da temperatura crítica. O valor do grau de utilização real do ensaio, definido pela temperatura crítica de ensaio, é menor do que o previsto.

Tabela 42 – Valores de tempo e temperatura registados nos ensaios S3, S4 e S5

Ensaio	Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]		Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
	$L^2/9000d$	$L^2/400d$	L/30	L/20	EC 3	Ensaio	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
S3	731	1028	1032	1051	12	17	722,56	21%	20%
S4	473	691	693	705	9	11	641,95	32%	35%
S5	430	571	573	587	8	9	594,02	44%	47%

6.5.1.3 Elementos com secção CHS.

È apresentada nesta secção uma comparação dos três ensaios à flexão, dos elementos com secção transversal CHS 101,6x4,05, em ambiente de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834 (C3, C4 e C5). Para estes ensaios as cargas a aplicar foram 9.310,00 [N] para o ensaio C3, 15.200,00 [N] para o ensaio C4 e 20.560,00 [N] para o ensaio C5.

No Gráfico 32 são apresentados os histogramas de carga (F), assim como o deslocamento medido no ponto de aplicação da carga (d). Verifica-se que quanto maior for o grau de utilização, menor será o tempo de resistência ao fogo, contudo esta relação não é linearmente proporcional. O ensaio C5 regista um aumento de valores de deslocamento (d) logo após o início do incêndio. Ainda se pode observar uma ligeira perturbação no registo da carga (F) quando elemento atinge a ruptura.

O Gráfico 33 regista a evolução das temperaturas no ensaio, a temperatura dos perfis e o previsto pelos métodos de cálculo simplificado e da curva ISO 834. A par das temperaturas observa-se a evolução do deslocamento (d) ao longo do ensaio. Pode-se observar uma rápida evolução do deslocamento quando a temperatura crítica do perfil é atingida (θ_{cr}).

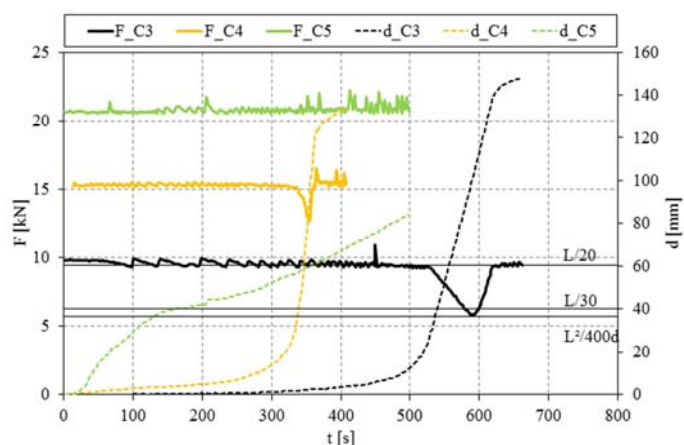


Gráfico 32 – Comparação dos histogramas de carga (F) e deslocamento (d) nos ensaios C3, C4 e C5.

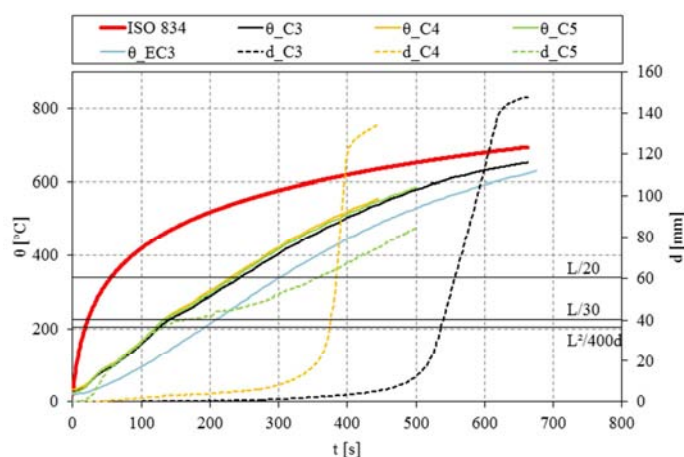


Gráfico 33 – Evolução das temperaturas e deslocamento (d), ao longo do tempo para os ensaios C3, C4 e C5.

O valor de deslocamento (d) evolui conforme as temperaturas registadas, no Gráfico 34 observa-se a evolução de (d) par o aumento da temperatura da curva ISO 834 e o aumento da temperatura dos perfis. A temperatura crítica dos elementos (θ_{cr}), é determinada traçando uma recta perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que (d), para a temperatura no perfil, atinge o valor de $l/30$.

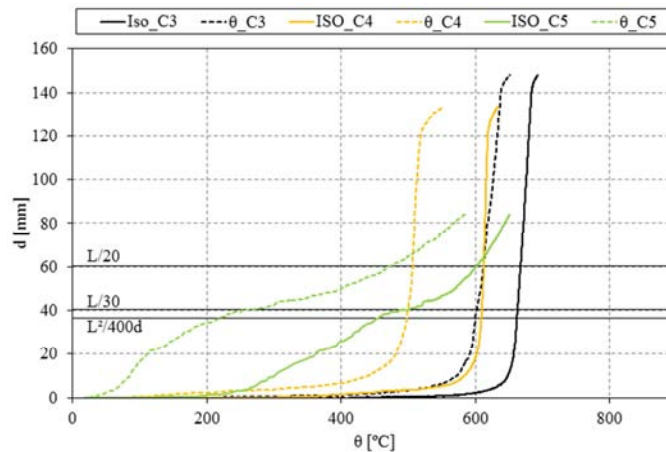


Gráfico 34 – Evolução do deslocamento (d) com o aumento das temperaturas, para os ensaios C3, C4 e C5.

A ruptura dos elementos observou-se no momento em que se formou uma rótula plástica da secção, no ponto de aplicação da carga, ver Figura 59.



Figura 59 – Deformação imposta aos elementos de secção CHS, ensaiados ao fogo sem protecção.

Na Tabela 43 observa-se o registo de tempo para os ensaios C3, C4 e C5. Ainda se observa os valores registados de temperatura crítica e grau de utilização real.

Da análise dos resultados verifica-se um elevado grau de utilização destes elementos, comparando com os graus de utilização estabelecidos inicialmente. De referir que o ensaio C5 apresenta um valor do grau de utilização real de 100%.

Tabela 43 – Valores de tempo e temperatura registados nos ensaios C3, C4 e C5

Ensaio	Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]		Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
	L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	EC 3	Ensaio	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
C3	409	537	540	557	12	9	602,27	38,6%	45%
C4	251	374	376	384	9	6	499,42	66%	79%
C5	0	129	164	358	8	2	255,64	92,8%	100%

6.5.1.4 Elementos com secção LNP.

De seguida apresenta-se a comparação entre os ensaios à flexão L3, L4 e L5, sob ambiente de fogo. Para esta secção as cargas aplicadas para definir os graus de utilização pretendidos foram: 5.840,00 [N] para o ensaio L3, 9.830,00 [N] para o ensaio L4 e 13.610,00 [N] para o ensaio L5.

No Gráfico 35 está representado o histograma de carga decorrido em cada ensaio (F), assim como o deslocamento medido no ponto de aplicação da carga (d). Verifica-se que quanto maior for o grau de utilização, menor será o tempo de resistência ao fogo, sendo que a relação entre os ensaio não é linear.

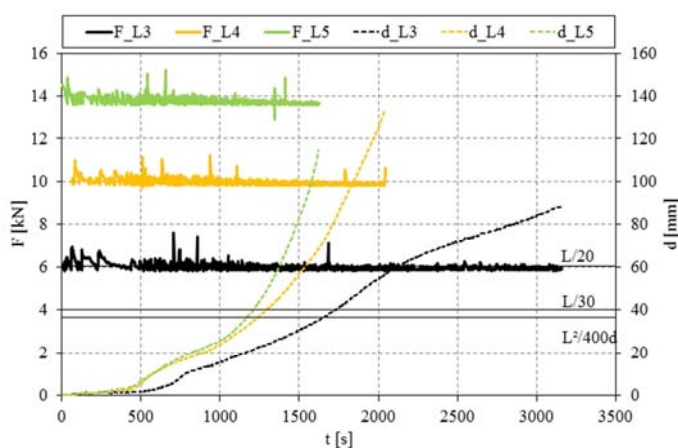


Gráfico 35 – Valores registados do histograma de carga e do deslocamento (d), para os ensaios L3, L4 e L5.

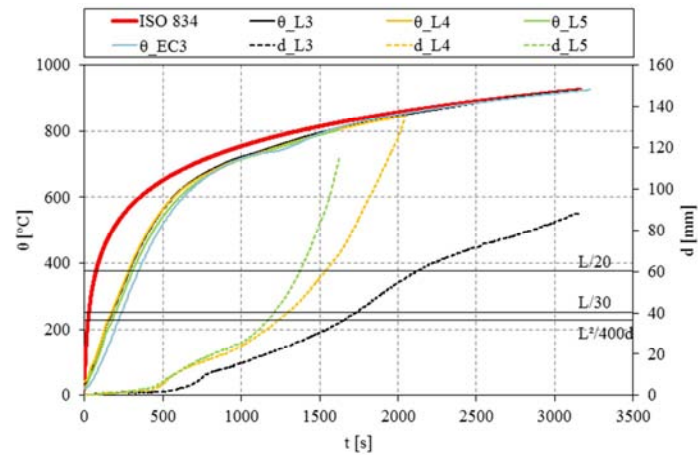


Gráfico 36 – Comparação entre L3, L4 e L5, para a evolução das temperaturas e deslocamento (d) ao longo do tempo.

No Gráfico 36 observa-se a evolução das temperaturas decorrente nos ensaios. É registada a temperatura média de cada elemento, a par da previsão através dos métodos simplificados e ainda ca curva ISO 834, ao longo do tempo. De referir que a evolução das temperaturas no elemento nada difere com o grau de utilização. Apresenta-se ainda o registo de deslocamento (d), com a evolução do tempo. O valor de (d) evolui conforme é atingida a temperatura crítica do elemento.

O Gráfico 37 mostra a evolução de (d) para as temperaturas no elemento e na curva ISO 834. Pela análise do gráfico, observa-se um offset entre os valores de deslocamento para o temperatura do elemento e temperatura da curva, a temperatura do elemento é mais baixa que a temperatura da curva quando o elemento atinge a sua ruptura.

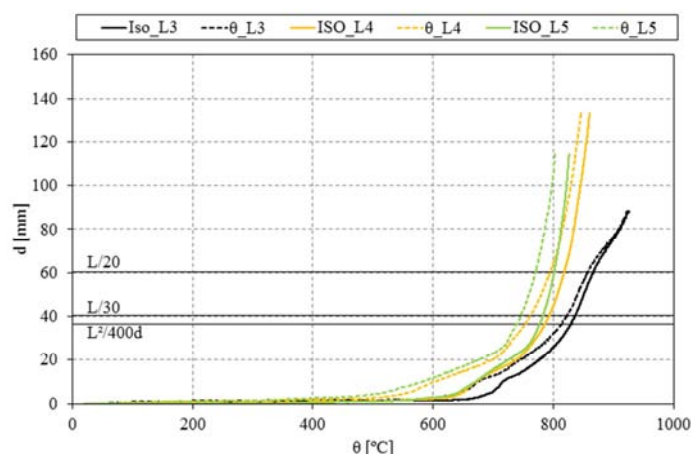


Gráfico 37 – Evolução de (d), correspondente ao valor de temperatura registado nos ensaios L3, L4 e L5.

Os elementos ensaiados atingiram o seu limite último no momento da sua ruptura, tendo ocorrido um fenómeno de encurvadura lateral, ver Figura 60.



Figura 60 - Deformação imposta aos elementos LNP em ambiente de fogo, sem protecção.

Na Tabela 44 observa-se o registo dos tempos para os ensaios L3, L4 e L5, a par dos valores de temperatura crítica e grau de utilização real. Pode-se observar que o grau de utilização deste elemento apresenta valores muito baixos, relativamente aos definidos inicialmente, consequentemente observou-se um aumento significativo do tempo de resistência do elemento ao fogo, comparando com o calculado pelos métodos simplificados.

Tabela 44 – Valores de tempo e temperatura registados nos ensaios L3, L4 e L5

Ensaio	Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]		Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
	L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	EC 3	Ensaio	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
L3	674	1657	1743	2134	13	29	822,55	29%	10%
L4	468	1238	1297	1541	10	21	761,68	48%	16%
L5	455	1170	1210	1376	8	20	745,66	64%	17%

6.5.2 Elementos com protecção.

Aos elementos do subcapítulo anterior (6.6.1.), aplicou-se agora dois níveis de protecção com tinta intumescente. Realizaram-se dois ensaios com 1000 [µm] de protecção para os três graus de utilização, e dois ensaios com 2000 [µm] e um grau de utilização de 50%.

Nomearam-se os ensaios com índice 6 e 7 para os elementos com um nível de carga correspondente a um grau de utilização de 30% e 1000 [µm] de protecção de tinta intumescente, com 1000 [µm] de protecção e um grau de utilização de 50% com índice 8 e 9. Aos ensaios com índice 10 e 11 aplicou-se 1000 [µm] de tinta e um grau de utilização de 70%, com 2000 [µm] de protecção e um grau de utilização de 50% nomearam-se com índice 12 e 13.

Descrevem-se de seguida os ensaios por secções e por grau de utilização, comparando o nível de protecção aplicado a cada elemento, a par dos resultados obtidos no ensaio equivalente sem protecção.

6.5.2.1 Elementos com secção IPE100.

Apresenta-se de seguida a comparação de três ensaios à flexão, sob a curva de fogo ISO 834 (I3, I6 e I7). Estes ensaios são de secção IPE 100 com a aplicação de um grau de utilização de 30%, I6 e I7 com 1000 [µm] de protecção com tinta intumescente e I3 sem aplicação de protecção.

No Gráfico 38 observa-se o histograma de carga (F), a par do deslocamento a meio vão (d). Pode-se perceber a influência directa no tempo na protecção aplicada aos elementos, resultando numa maior duração do tempo de resistência ao fogo.

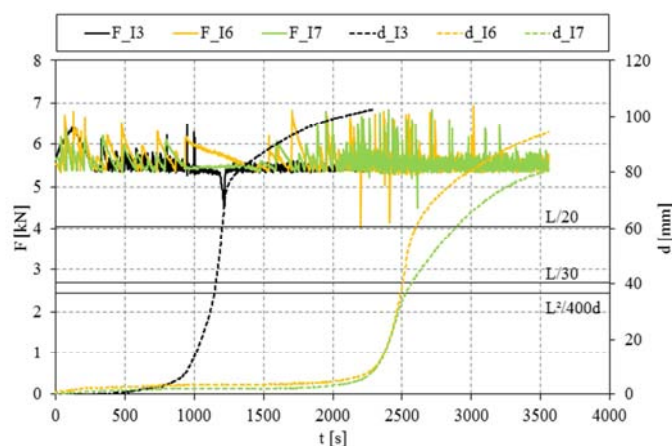


Gráfico 38 – Histograma de carga (F) e deslocamento (d), para os ensaios I3, I6 e I7.

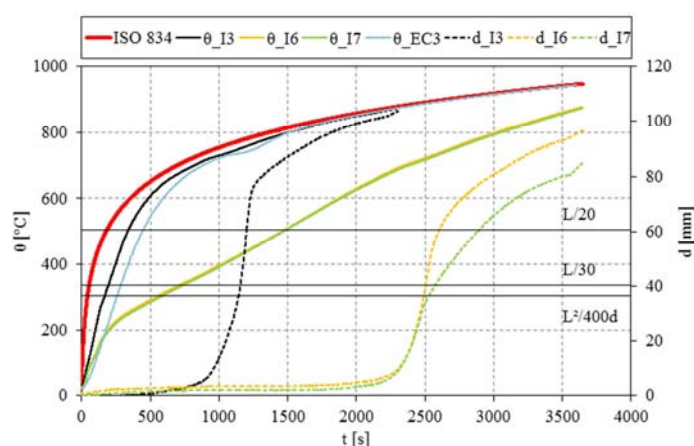


Gráfico 39 – Evolução de temperaturas nos ensaios I3, I6 e I7, a par do deslocamento (d).

No Gráfico 39 observa-se a evolução das temperaturas nos ensaios, a par de evolução da temperatura determinada pelos métodos simplificados, para elementos sem protecção, e a curva ISO 834. Pode claramente distinguir-se a diferença entre os elementos com protecção e o elemento sem protecção, verificando um atraso na evolução das temperaturas do material protegido. Ainda se encontram representados os valores de deslocamento (d), em que se pode perceber uma ligeira descida da temperatura crítica em relação ao elemento sem protecção. Este fenómeno também é perceptível no Gráfico 40, em que se

observa a evolução do deslocamento (d) perante a evolução da temperatura do elemento e do ambiente no forno, proporcionado pela curva de fogo ISO 834. Pode-se observar que existe uma maior diferença entre a temperatura no forno e a temperatura no elemento quando este se encontra com protecção, no momento em que este atinge o seu colapso a $l/30$.

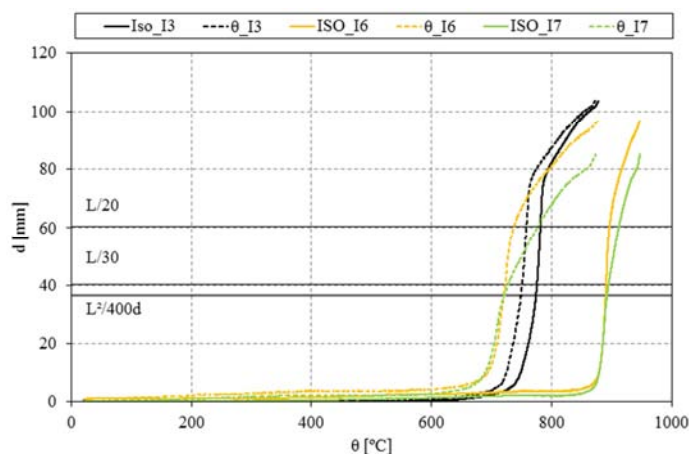


Gráfico 40 – Valores de (d) para os elementos I3, I6 e I7 perante a evolução das temperaturas nos ensaios.

Tabela 45 - Valores de registo dos ensaios I3, I6 e I7.

Ensaio	EC 3					Ensaio				
	Massividade [m ⁻¹]	(Métodos Simplificados)			Espessura de protecção DFT [μm]					
		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)	Grau de utilização (%)		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)		Grau de utilização real (%)	
I3	387	663,78	12	30	--	752,2	Média	19	Média	17
I6	387	663,78	--	30	974	722,71	725,14	41	42	20
I7	387	663,78	--	30	975	727,57		42		20

Na Tabela 45 é efectuada a comparação da resistência ao fogo dos ensaios. Importante referir que a protecção garantiu um incremento de resistência ao fogo de aproximadamente 23 minutos. Observa-se em conjunto com o aumento de tempo de resistência ao fogo dos elementos, um ligeiro aumento do grau de utilização. Pela observação dos Anexo – Parte V., os ensaios I6 e I7 apresentam um valor de temperaturas mais elevado junto ao ponto de aplicação da carga, enquanto que no ensaio I3 a temperatura medida nas secções era idêntica.

De seguida apresenta-se uma comparação de cinco ensaios a um grau de utilização de $\mu=50\%$, da secção transversal IPE 100, sob condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO 834 (I4, I8, I9, I12 e I13). O primeiro elemento foi testado sem protecção (I4), os outros quatro foi utilizado uma protecção de 1000 [μm] (I8 e I9), e 2000 [μm] (I12 e I13) de tinta intumescente.

No Gráfico 41 observa-se o valor de carga (F) e deslocamento (d), durante o decurso dos ensaios. Verifica-se que a protecção aplicada aos elementos afecta a resistência ao fogo dos elementos, contudo não se verifica uma proporção linear entre os diferentes níveis de protecção. De referir que o ensaio I12 sofreu um fenómeno de encurvadura local, diminuindo assim o seu tempo de resistência ao fogo, comparando com o ensaio I13.

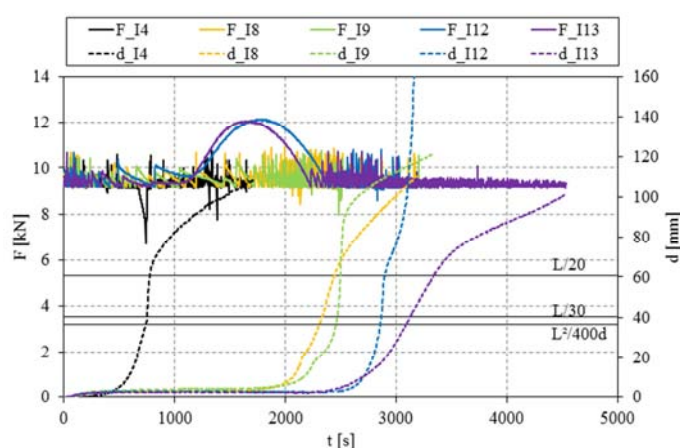


Gráfico 41 – Valores de (F) e (d) versus tempo (t), para os ensaios I4, I8, I9, I12 e I13.

No Gráfico 42 observa-se a evolução das temperaturas para os cinco ensaios, que esta é afectada directamente pelo nível de protecção. Observa-se que um maior nível de protecção atrasa o aumento da temperatura nos elementos. Pode-se observar o momento em que a camada de protecção começa a reagir, proporcionando uma diferença na tendência de crescimento das curvas. De referir que o momento em que o elemento atinge a temperatura crítica o elemento define a sua capacidade resistente ao fogo, com um rápido aumento do valor de deslocamento a meio vão (d).

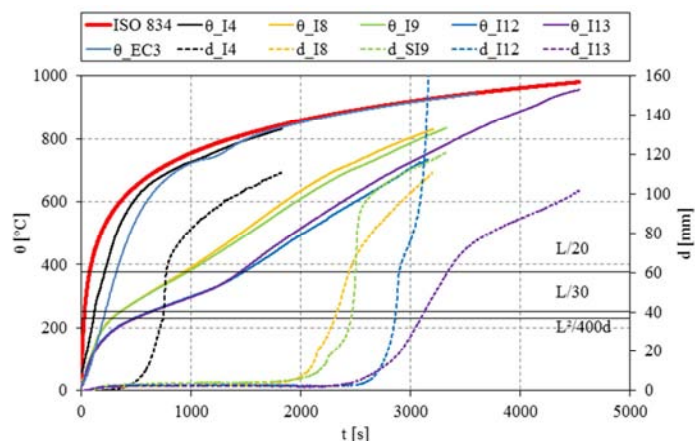


Gráfico 42 – Valores de temperaturas durante os ensaios I4, I8, I9, I12 e I13, a par de (d) .

O valor de (d) é influenciado pelo aumento de temperaturas no ambiente do forno e consequentemente pelo aumento de temperaturas no elemento, no Gráfico 43 observa-se essa evolução. Pode-se verificar que a temperatura do ambiente é sempre maior que a temperatura registada no elemento, no momento do colapso. Ainda se pode verificar que a presença da protecção nos elementos provoca um aumento da diferença entre estas curvas, e quanto maior o nível da protecção maior essa diferença.

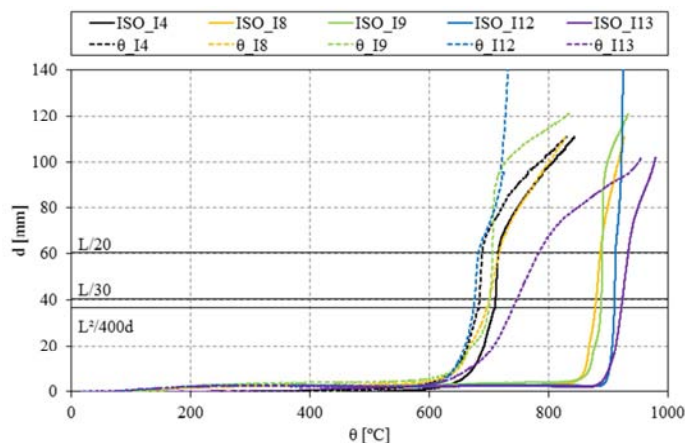


Gráfico 43 – Valor de (d) consoante o aumento das temperaturas, nos ensaios I4, I8, I9, I12 e I13.

Na Tabela 46 é efectuada a comparação da resistência ao fogo dos ensaios. Como se observou anteriormente, o ensaio sem protecção tem uma resistência ao fogo superior ao determinado pelos métodos simplificados, consequentemente, um grau de utilização menor do que o imposto. Com um nível de protecção de 1000 [μm] regista-se um aumento da resistência ao fogo de sensivelmente 28

minutos, e com um nível de protecção de 2000 [µm] regista-se um aumento de resistência ao fogo de aproximadamente 38 minutos. Verifica-se em todos os ensaios um aumento da temperatura crítica (θ_{cr}), consequentemente uma diminuição do grau de utilização.

Tabela 46 - Valores registados nos ensaios I4, I8, I9, I12 e I13.

Ensaio	Massividade [m ⁻¹]	EC 3 (Métodos Simplificados)			Espessura de protecção DFT [µm]	Ensaio				
		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)	Grau de utilização (%)		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)		Grau de utilização real (%)	
I4	387	584,67	9	50	--	684,47	Média	12	Média	26
I8	387	584,67	--	50	1012	701,02	701,45	38	40	23
I9	387	584,67	--	50	1055	701,88		41		23
I12	387	584,67	--	50	1824	676,52	711,99	47	50	28
I13	387	584,67	--	50	1824	747,46		52		17

O conjunto de ensaios à flexão que se seguem, são os elementos de I5, I10 e I11, estes com um grau de utilização de 70%. Foram submetidos a um ambiente de fogo, proporcionado por uma curva de fogo ISO 834, o ensaio I4, já analisado anteriormente, não apresenta qualquer tipo de protecção ao fogo e os ensaios I10 e I11 ostentam um nível de protecção de 1000 [µm] de tinta intumescente.

No Gráfico 44 pode-se observar o registo do histograma de cargas (F) e o valor de deslocamento (d), durante os ensaios. Verificou-se um deslocamento das curvas de registo de (d) para os ensaios com os elementos protegidos.

No Gráfico 45 observa-se a evolução das temperaturas nos elementos ao longo do tempo, nos três ensaios, a par do deslocamento a meio vão dos elementos (d). Ainda se pode observar a curva de fogo ISO 834 e as temperaturas do elemento sem protecção determinadas pelos métodos simplificados. Registou-se uma interrupção no aumento das temperaturas dos elementos protegidos, provocado pela reacção da camada de protecção, permitindo assim o aumento do tempo de resistência dos elementos com protecção aplicada.

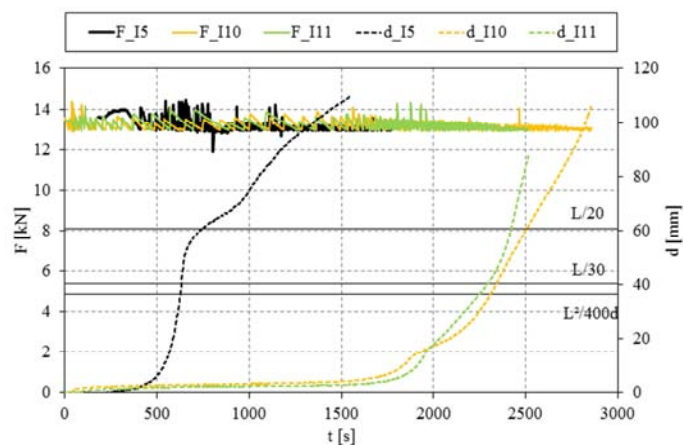


Gráfico 44 - Comparação entre I5, I10 e I11 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.

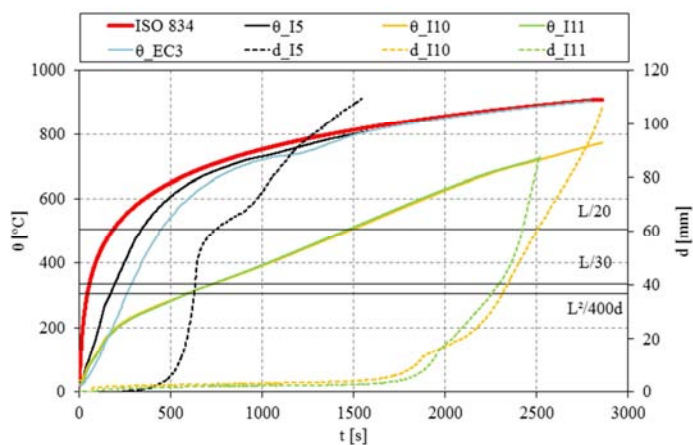


Gráfico 45 - Comparação entre I5, I10 e I11 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.

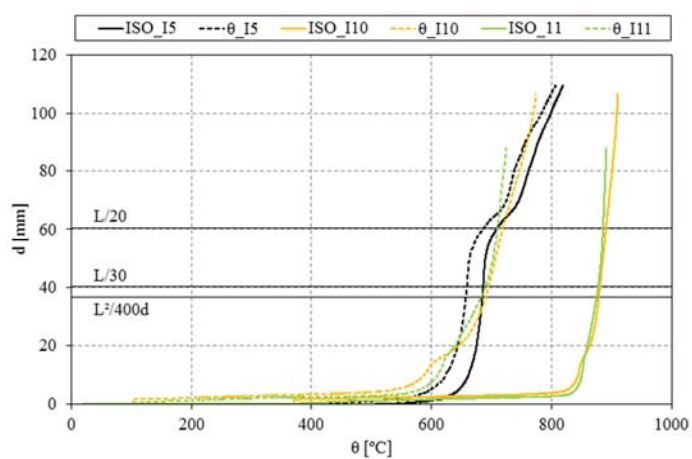


Gráfico 46 - Comparação entre I5, I10 e I11 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.

No Gráfico 46 observa-se o valor registado de (d) para o valor das temperaturas nos elementos e no ambiente do forno. Regista-se que em relação

ao elemento sem protecção, a existência de um offset da curva de (d) para o registo de temperaturas no ambiente do forno, sem que este fenómeno deve-se à protecção aplicada aos elementos.

Na Tabela 47 observa-se os valores determinados pelos métodos simplificados do Eurocódigo 3, a par dos valores registados pelos ensaios. Na observação afirma-se que os elementos com protecção de 1000 [μm] de tinta intumescente aumentam o tempo de resistência ao fogo, em relação ao mesmo elemento sem protecção, com um valor de aproximadamente 29 minutos. Também se pode verificar um aumento da temperatura crítica (θ_{cr}), consequentemente uma diminuição do grau de utilização dos elementos nos ensaios.

Tabela 47 - Valores de tempo conseguidos na secção IPE, para $\mu=70\%$.

Ensaio	EC 3					Ensaio				
	Massividade [m ⁻¹]	(Métodos Simplificados)			Espessura de protecção DFT [µm]					
		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)	Grau de utilização (%)		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)		Grau de utilização real (%)	
I5	387	525,78	7	70	--	659,01	Média	10	Média	31
I10	387	525,78	--	70	998	695,31	692,76	39	39	24
I11	387	525,78	--	70	989	690,21		38		25

6.5.2.2 Elementos com secção SHS.

Nesta secção pode-se observar os resultados dos ensaios à flexão, sob ambiente de fogo caracterizado pela curva de fogo ISO 834, aos elementos com secção SHS 100x100x4.

De seguida pode-se observar a comparação entre os ensaios com um grau de utilização de 30% (S3, S6 e S7). O ensaio S3 sem protecção e os ensaios S6 e S7 com uma espessura de tinta seca de 1000 [μm], que actuará como material de protecção ao fogo nos elementos.

No Gráfico 47 observa-se que o histograma de carga (F) regista uma pequena perturbação quando os elementos atingem a sua ruptura. A par do

registo de força (F), encontra-se representado o registo de deslocamento a meio vão (d), e pode-se verificar que os elementos com protecção aplicada atingem a sua ruptura num valor de tempo superior. Esta tendência pode-se também observar pela análise do Gráfico 48, que regista os valores de deslocamento (d), a par das temperaturas registadas nos ensaios. Observa-se também um desvio da curva da temperatura média dos elementos com protecção, estas curvas, ao contrário do elemento sem protecção, permitem a observação da evolução tardia das temperaturas nos elementos, consequentemente atingindo o colapso mais tarde.

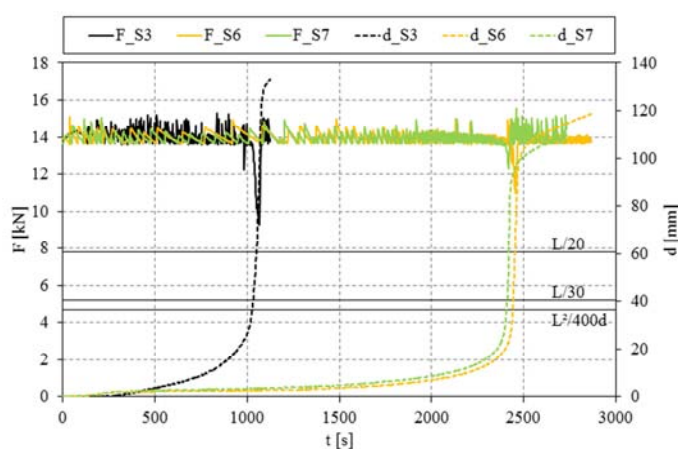


Gráfico 47 – Valores de (F) e (d) versus tempo (t), para os ensaios S3, S6 e S7.

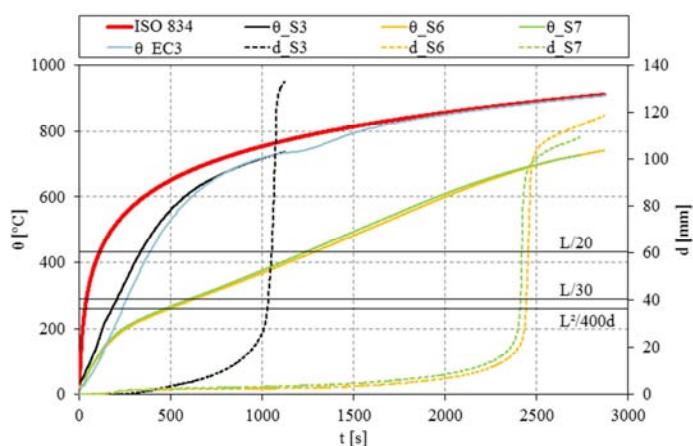


Gráfico 48 - Comparação entre os ensaios S3, S6 e S7, dos valores de temperaturas e deslocamento (d).

No Gráfico 49 observa-se a comparação entre os três ensaios, para os valores de (d) conforme a evolução da temperatura do elemento e do interior do

forno. Permite-se observar que ao contrário do elemento sem protecção, os elementos com protecção de tinta intumescente atingem a ruptura com uma maior diferença entre a temperatura no forno e a registada no elemento.

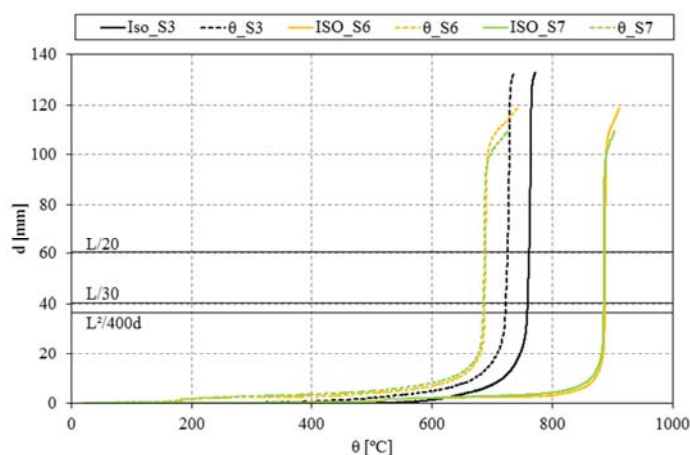


Gráfico 49 – Registo dos valores de (*d*), para a temperatura nos elementos e no interior do forno, para os ensaios S3, S6 e S7.

Na Tabela 48 é possível observar os valores de resistência ao fogo dos ensaios, temperatura crítica (θ_{cr}) no momento da ruptura e grau de utilização real determinada através do valor da temperatura crítica. Observa-se que o nível de protecção de 1000 [μm] confere um aumento no tempo de resistência do elemento em aproximadamente 23 minutos. Ainda se pode observar uma diminuição do valor da temperatura crítica, consequentemente um aumento do grau de utilização nos elementos.

Tabela 48 - Valores registados para os ensaios S3, S6 e S7.

Ensaio	Massividade [m ⁻¹]	EC 3 (Métodos Simplificados)			Espessura de protecção DFT [µm]	Ensaio				
		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)	Grau de utilização (%)		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)		Grau de utilização real (%)	
							Média	Média		
S3	250	663,78	12	30	--	722,56	Média	17	Média	20
S6	250	663,78	--	30	1105	687,79	686,66	40	40	26
S7	250	663,78	--	30	1094	685,53		40		26

De seguida apresenta-se os resultados dos ensaios com 50% de grau de utilização (S4, S8, S9, S12 e S13). O ensaio S4 não tem aplicada protecção ao

fogo, contrariamente aos ensaios S8 e S9 com 1000 [μm], e S12 e S13 com 2000 [μm] de espessura de tinta intumescente (DFT).

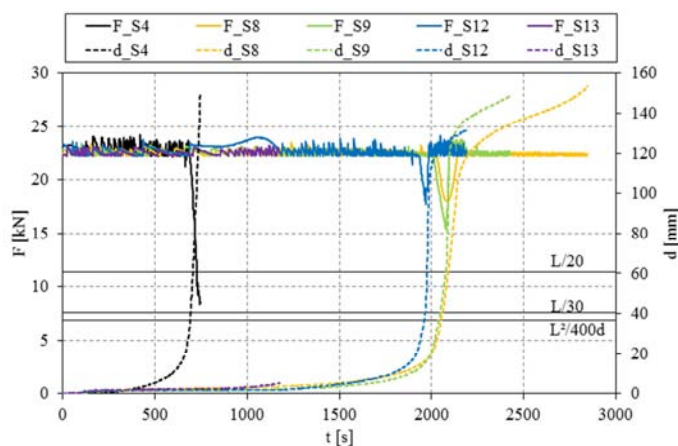


Gráfico 50 – Registro de cargas (F) e (d) nos ensaios S4, S8, S9, S12 e S13.

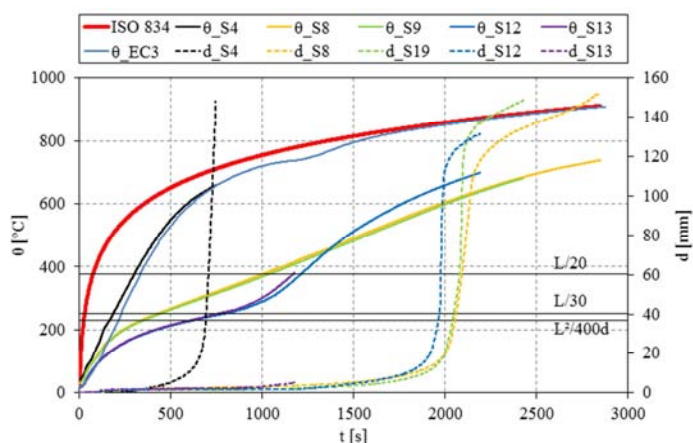


Gráfico 51 – Registro de temperaturas e deslocamento (d) para os ensaios S4, S8, S9, S12 e S13.

No Gráfico 50 está representado o histograma de carga para cada ensaio (F), assim como o deslocamento no ponto de aplicação de carga (d). Observa-se uma pequena perturbação do registo de cargas no momento de ruptura do elemento, ainda pode-se observar um aumento do tempo de resistência dos elementos com protecção aplicada, contudo o nível de protecção não é proporcional ao tempo de resistência. Observou-se um fenómeno de retracção da camada intumescente nos ensaios S12 e S13, no instante em que esta se formava. A retracção da camada expôs o aço às temperaturas elevadas, o que provocou um aumento súbito das temperaturas no elemento, ver Anexo – Parte V. os registos fotográficos deste fenómeno. No Gráfico 51 permite a observação da

evolução das temperaturas nos ensaios, observa-se o momento em que a retracção da camada intumescente começou a expor o aço, começando a elevar as temperaturas de forma vigorosa. Devido a este fenómeno, decidiu-se cancelar o ensaio S13 no momento em que a retracção teve efeito na camada protectora.

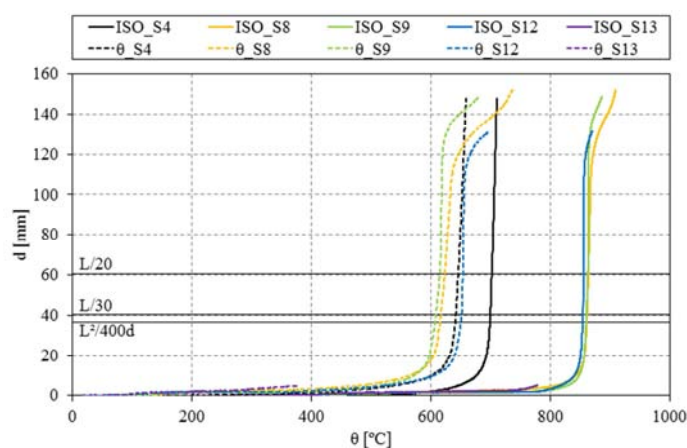


Gráfico 52 – Registo de deslocamento (d) consoante o registo de temperaturas, para os ensaios S4, S8, S9, S12 e S13.

No Gráfico 52 pode-se observar a evolução do deslocamento (d) em função do registo de temperaturas nos elementos e no interior do forno. Observa-se que os elementos com uma protecção mais eficaz (S8 e S9) têm uma maior diferença de temperaturas do que o ensaio S12, em que a camada protectora retraiu.

Tabela 49 - Valores registados nos ensaios S4, S8, S9, S12 e S13.

Ensaio	Massividade [m ⁻¹]	EC 3 (Métodos Simplificados)			Espessura de protecção DFT [µm]	Ensaio				
		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)	Grau de utilização (%)		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo		Grau de utilização real (%)	
							(min)	(min)		
S4	250	584,67	9	50	--	641,95	Média	11	Média	35
S8	250	584,67	--	50	1141	617,08	612,91	34	34	41
S9	250	584,67	--	50	1141	608,73		34		43
S12	250	584,67	--	50	1932	651,64		32		32
S13	250	584,67	--	50	1933	Não atingiu a ruptura.				

Na Tabela 49 observa-se que os elementos com a aplicação de tinta intumescente aumentam o tempo de resistência ao fogo, e esse aumento nos elementos S8e S9 representa-se por um valor de 23 minutos, no ensaio S12 um

valor de 11 minutos. Conclui-se que o aumento de espessura de tinta seca (DFT), nos elementos de secção SHS, não traduz um aumento de resistência ao fogo. A eficácia da camada de protecção nos ensaios S8 e S9 conferiu ao elemento uma temperatura crítica inferior, consequentemente um grau de utilização mais elevado. A exposição do aço às temperaturas elevadas no ensaio S12, resultou numa temperatura crítica superior, resultando um grau de utilização inferior.

Os últimos resultados em análise dos ensaios com elementos de secção SHS, são os que têm um grau de utilização de 70%.

No Gráfico 53 observa-se o histograma de carga de cada ensaio (F), a par do deslocamento medido no ponto de aplicação da carga (d). Verifica-se que a camada de protecção, influência directamente a duração do ensaio, aumentando a resistência dos elementos ao fogo. Registou-se uma pequena perturbação no instante que os elementos atingiram a sua ruptura.

No Gráfico 54 observa-se a evolução das temperaturas nos elementos dos três ensaios, a par da curva de fogo ISO 834 e a temperatura calculada pelos métodos simplificados para um elemento sem protecção. Observa-se também o valor de deslocamento (d) para os três ensaios, em que se observa um rápido crescimento deste valor quando é atingida a temperatura crítica dos elementos. Pode-se observar um desvio do aumento das temperaturas nos elementos com protecção aplicada, provocada pela reacção da camada intumescente.

No Gráfico 55 apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura e o deslocamento a meio vão (d), para os três ensaios. Observa-se que a camada de protecção mantém o elemento em temperaturas inferiores ao registado no interior do forno. Uma análise deste gráfico permite-se a determinação da temperatura crítica do elemento no momento do colapso.

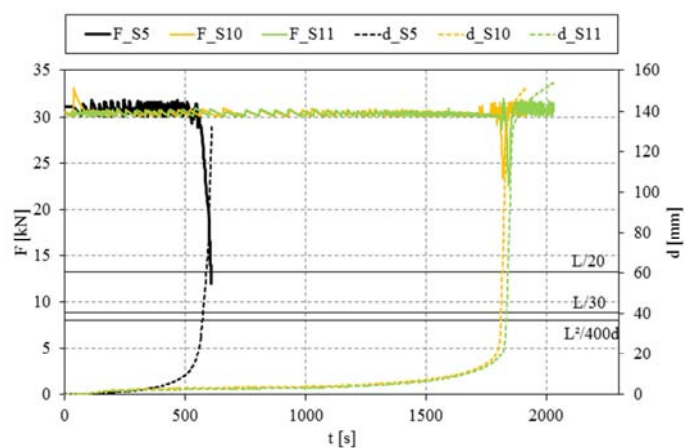


Gráfico 53 – Registo de cargas (F) e deslocamento (d) nos ensaios S5, S10 e S11.

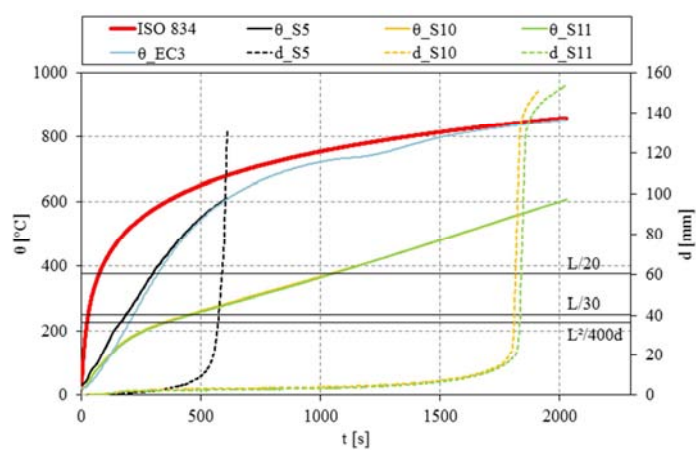


Gráfico 54 – Registo de temperaturas e deslocamento (d) nos ensaios S5, S10 e S11.

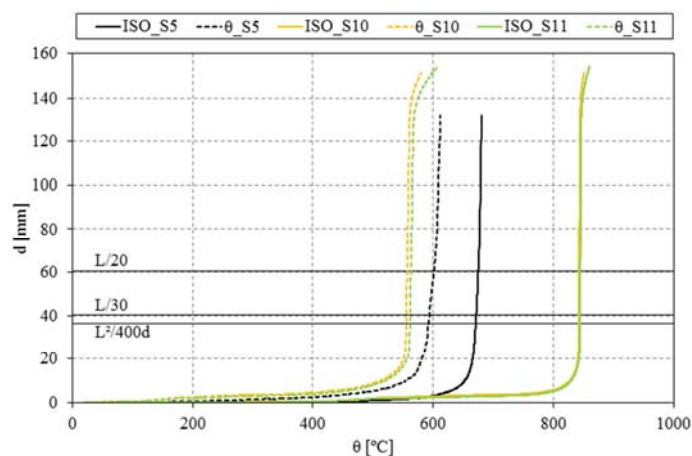


Gráfico 55 – Registo de (d) relacionado com a evolução das temperaturas nos ensaios S5, S10 e S11.

Na Tabela 50 é efectuada a comparação da resistência ao fogo dos ensaios no domínio de temperaturas e tempo. Pode-se observar que o nível de protecção

de 1000 [μm] confere aos elementos um aumento do tempo de resistência, em relação ao elemento sem protecção, no valor de 21 minutos. Aos elementos com protecção é registada uma temperatura crítica inferior ao elemento sem protecção, consequentemente um grau de utilização superior.

Tabela 50 - Valores de tempo conseguidos na secção SHS, para $\mu=70\%$.

Ensaio	Massividade [m ⁻¹]	EC 3 (Métodos Simplificados)			Espessura de protecção DFT [μm]	Ensaio				
		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)	Grau de utilização (%)		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)		Grau de utilização real (%)	
S5	250	525,78	8	70	--	594,02	Média	9	Média	47
S10	250	525,78	--	70	1144	555,69	558,97	30	30	60
S11	250	525,78	--	70	1131	562,24		30	30	57

6.5.2.3 Elementos com secção CHS.

Seguem-se os resultados registados nos ensaios à flexão, sob ambiente de fogo, para os elementos de secção CHS 101,6x4,05. Nestes elementos observou-se a ocorrência muito frequente do fenómeno de retracção da camada intumescente. Pode-se observar o registo fotográfico destes ensaios no Anexo – Parte V..

Os primeiros ensaios desta secção foram os elementos com um nível de carga determinado por um grau de utilização de 30% (C3, C6 e C7), C3 sem protecção e C6 e C7 com 1000 [μm] de espessura de tinta seca.

No Gráfico 56 pode-se observar o registo de cargas (F), assim como o registo do deslocamento (d). A aplicação de tinta intumescente nos elementos confere um maior tempo de resistência ao fogo, contudo no ensaio C6 observou-se o fenómeno de retracção da camada intumescente, tendo atingido a sua ruptura mais cedo que C7. O ensaio C7 foi o único elemento de secção CHS que não se registou retracção da camada intumescente, contudo, não se observou nenhuma condição extraordinária para o sucedido.

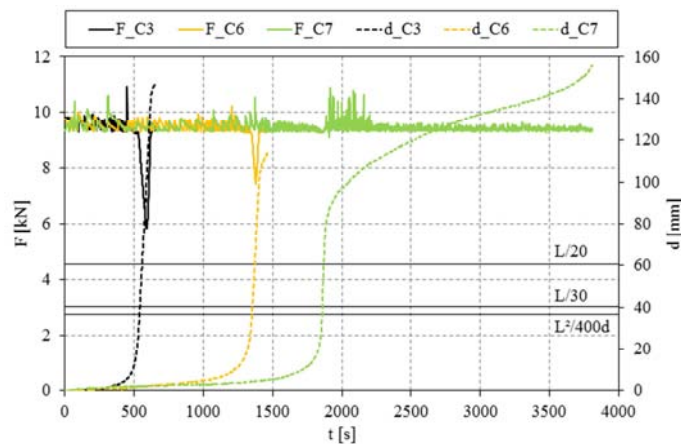


Gráfico 56 – Registro de carga (F) e deslocamento (d) versus tempo (t) nos ensaios C3, C6 e C7.

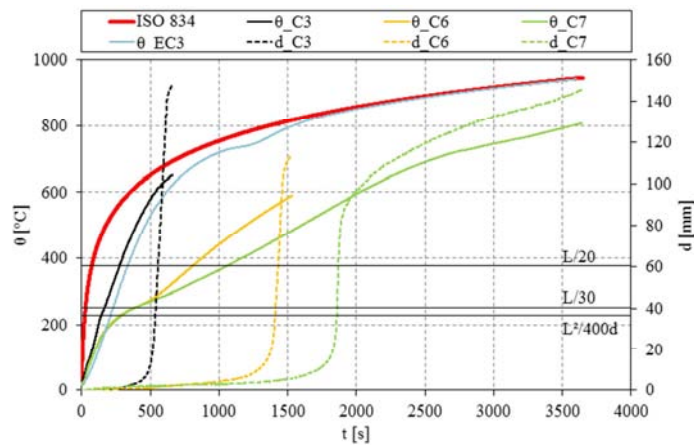


Gráfico 57 – Registro de temperaturas e deslocamento (d), nos ensaios C3, C6 e C7.

No Gráfico 57 observa-se a evolução das temperaturas nos ensaios, a par do deslocamento (d). Pode-se observar que a retracção da camada intumescente influencia o registro de temperaturas do ensaios C6, assim como o tempo de resistência ao fogo do mesmo.

No Gráfico 58 apresenta-se o valor registado do deslocamento (d) consoante o aumento de temperaturas registado. Pode-se perceber a influência da protecção nos ensaios C6 e C7, e ainda a diferença entre estes dois ensaios na curva de temperatura do forno.

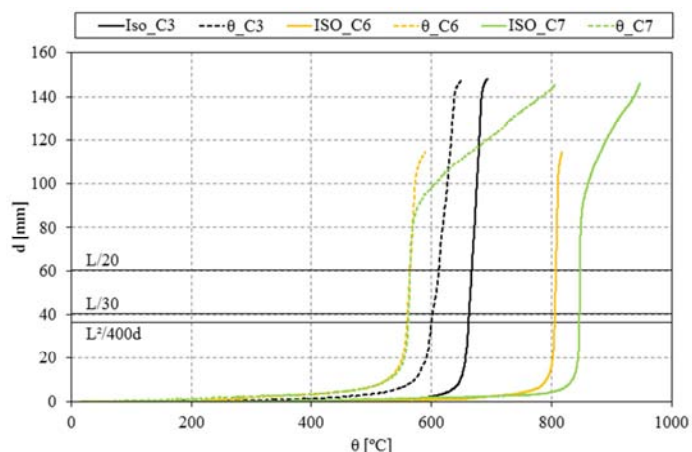


Gráfico 58 – Registro de deslocamento (d) consoante o registro de temperaturas nos ensaios C3, C6 e C7.

Na Tabela 51 é efectuada a comparação da resistência ao fogo dos elementos. Observa-se que a protecção aumenta o tempo de resistência ao fogo, contudo o fenómeno de retracção da camada intumescente provoca um desvio da curva de temperaturas no elemento, antecipando a sua ruptura. A média de aumento de resistência dos elementos protegidos, em relação ao não protegido é de 18 minutos. A temperatura crítica registada dos elementos protegidos é inferior ao elemento não protegido, elevando assim o grau de utilização destes.

Tabela 51 - Valores de tempo conseguidos na secção CHS, para $\mu=30\%$.

Ensaio	EC 3					Ensaio				
	Massividade [m ⁻¹]	(Métodos Simplificados)			Espessura de protecção DFT [µm]					
		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)	Grau de utilização (%)		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)		Grau de utilização real (%)	
C3	246,9	663,78	12	30	--	602,27	Média	9	Média	45
C6	246,9	663,78	--	30	997	560,26	561,25	23	27	58
C7	246,9	663,78	--	30	1004	562,23		31		57

De seguida são apresentados os resultados dos ensaios à flexão sob a curva de fogo ISO 834, com um grau de utilização de 50% (C4, C8, C9, C12 e C13), decidiu-se incluir o ensaio C11 neste grupo, alterando o seu grau de utilização de 70% para 50%. O ensaio C4 sem protecção, C8, C9 e C11 com 1000 [μm] e 2000 [μm] de espessura seca de tinta intumescente (DFT) nos

ensaios C12 e C13. O ensaio C8 terminou antes de atingir a sua ruptura, depois de se ter observado uma forte exposição do aço, devido à retracção da camada intumescente.

No Gráfico 59 observa-se o registo de carga (F) e deslocamento (d), versus tempo. Observa-se uma pequena perturbação no valor da carga, no momento em que o elemento regista uma rápida evolução em (d). Não se verificou proporção linear, entre a espessura de protecção e o tempo de resistência ao fogo, que a protecção lhe garantiu. Contudo verifica-se que a protecção garantiu aos elementos um incremento no tempo de resistência ao fogo.

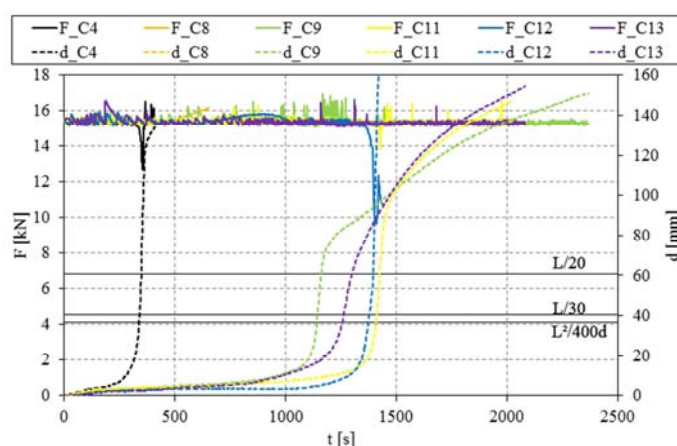


Gráfico 59 – Registo de força (F) e de deslocamento (d), versus tempo, nos ensaios C4, C8, C9, C11, C12 e C13.

No Gráfico 60 observa-se a evolução das temperaturas durante os ensaios, incluindo a curva ISO 834 e a temperatura num elementos sem protecção determinada pelos métodos simplificados. Pode-se observar o instante em que a tinta intumescente retraiu, expondo zonas de aço do elemento às temperaturas elevadas, perturbando a curva de evolução de temperaturas nos elementos. Regista-se o ponto de ruptura do elemento, quando este atinge a sua temperatura crítica.

No Gráfico 61 observa-se a evolução de (d) segundo o registo de temperaturas nos ensaios (elemento e curva ISO 834). Existe uma diferença visível entre os elementos com e o elemento sem protecção, ao nível da temperatura do forno. A diferença que se regista entre as temperaturas a que os elementos se encontram, quando atingem a sua ruptura, justifica-se pelas zonas

do elemento expostas às temperaturas elevadas, pois a zona resistente do elemento situa-se no ponto de aplicação da carga.

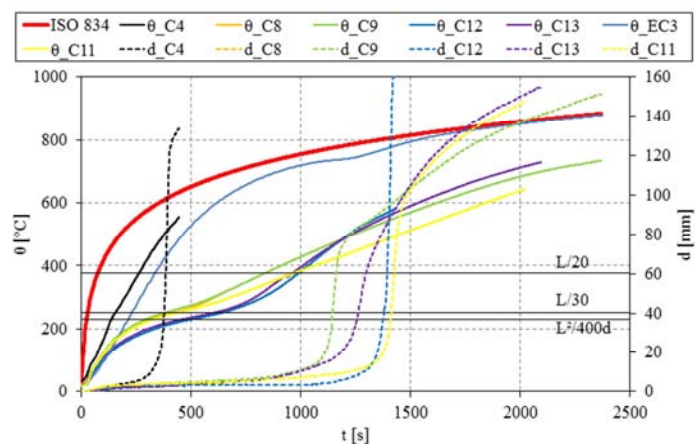


Gráfico 60 – Registo de temperaturas e deslocamento (d), nos ensaios C4, C8, C9, C11, C12 e C13.

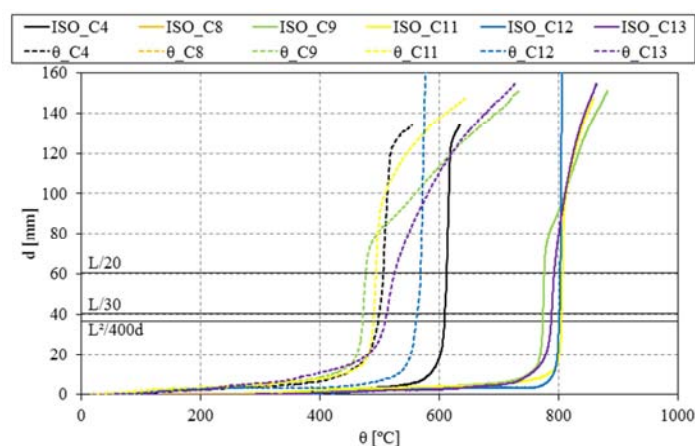


Gráfico 61 – Registo de deslocamento (d) conforme o registo de temperaturas, nos ensaios C4, C8, C9, C11, C12 e C13.

Na Tabela 52 encontram-se descritos os valores determinados pelos métodos simplificados e registados nos ensaios. Permite-se concluir que, apesar de em todos os elementos ter-se registado o fenómeno de retracção da camada intumescente, o tempo de resistência ao fogo dos elementos aumentou. Para uma camada de protecção de 1000 μm o tempo de resistência ao fogo aumentou em 15 minutos, e com 2000 μm de espessura de tinta aumentou em 16 minutos. No registo das temperaturas críticas (θ_{cr}), observa-se duas situações distintas, com 1000 μm o valor de θ_{cr} diminuiu, consequentemente aumentando assim o grau de utilização real, com 2000 μm de DFT a temperatura crítica aumenta, diminuindo

assim o grau de utilização. Estas diferenças poderão existir, devido à localização das zonas expostas do aço durante o fenómeno de retracção da camada intumescente, ver no Anexo – Parte V. os registos fotográficos dos ensaios.

Tabela 52 – Registo de valores para ensaios C4, C8, C9, C11, C12 e C13.

Ensaio	EC 3					Ensaio				
	Massividade [m ⁻¹]	(Métodos Simplificados)			Espessura de protecção DFT [µm]					
		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)	Grau de utilização (%)		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)		Grau de utilização real (%)	
C4	246,9	584,67	9	50	--	499,42	Média	6	Média	79
C8	246,9	584,67	--	50	1026	Não atingiu a ruptura.				
C9	246,9	584,67	--	50	1006	472,24	481,50	19	21	87
C11	246,9	584,67	--	50	1120	490,75		23		82
C12	246,9	584,67	--	50	1896	563,47	537,74	22	22	57
C13	246,9	584,67	--	50	1807	512,00		21		75

Por fim apresenta-se os resultados dos elementos com um grau de utilização de 70%, tendo alterado o ensaio C11 para um grau de utilização de 50%, restou comparar o ensaio C5 (sem protecção), com o ensaio C10 (1000 [µm] de tinta intumescente). O ensaio C5, já analisado no ponto 6.5.1.3, registou um grau de utilização real de 100%, é previsto que a camada de protecção não tenha influência na resistência ao fogo do elemento.

No Gráfico 62 está representado o histograma de carga (F) e deslocamento (d) nos dois ensaios. Observa-se que o elemento deforma-se logo após a curva de fogo iniciar, atingindo pouco tempo depois a sua ruptura.

No Gráfico 63 registou-se a evolução das temperaturas nos elementos e deslocamento (d). Observa-se que a camada de protecção actua depois da ruptura do elemento, tornando-se irrelevante para a resistência ao fogo do elemento.

No Gráfico 64 observa-se o valor de deslocamento (d) consoante o valor de temperatura registado nos ensaios. Com o aumento da temperatura observa-se um aumento no valor de deslocamento (d), momentos antes da formação da camada intumescente.

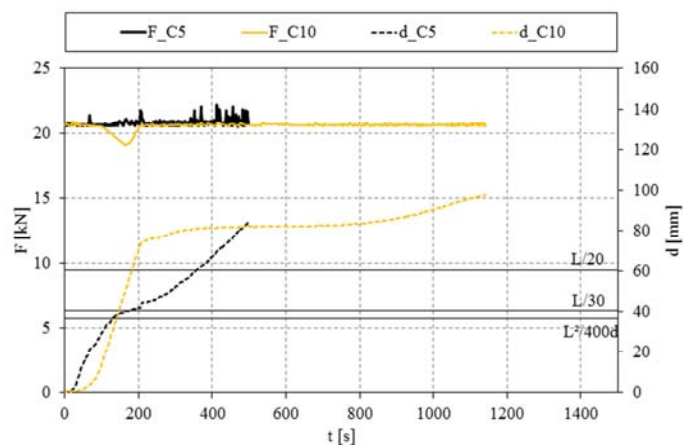


Gráfico 62 - Comparação entre C5 e C10 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.

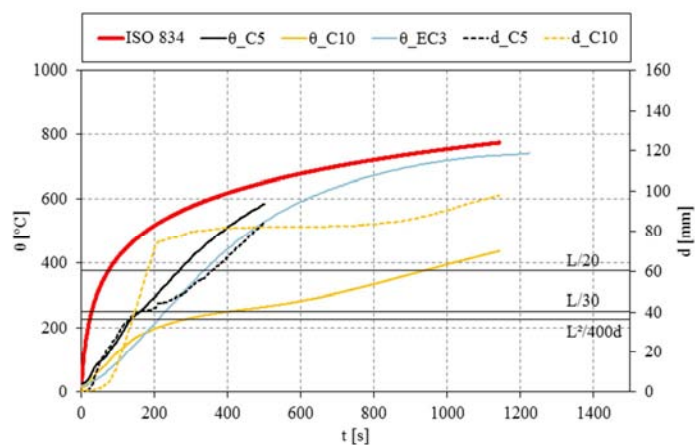


Gráfico 63 - Comparação entre C5 e C10 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.

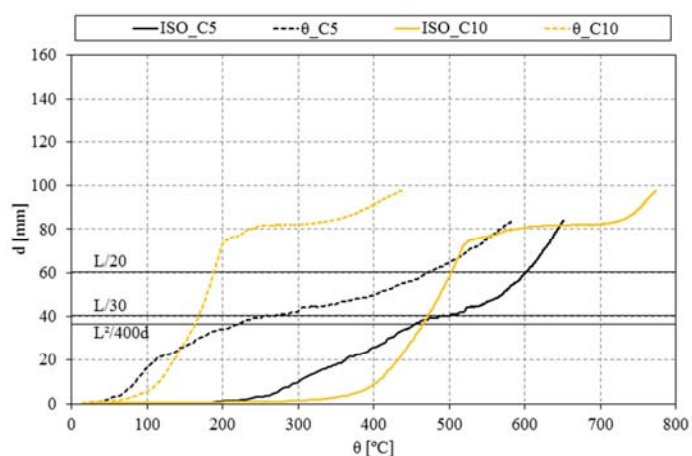


Gráfico 64 - Comparação entre C5 e C10 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.

Na Tabela 53 é efectuada a comparação da resistência ao fogo do elemento no domínio das temperaturas e no domínio do tempo. Observa-se que os

elementos são caracterizados com o mesmo valor de resistência ao fogo dos elementos, existindo um ligeira diferença no valor de temperatura crítica. De concluir que ambos os ensaios têm um grau de utilização de 100%, e que a camada de protecção não aumenta o tempo de resistência ao fogo do elemento.

Tabela 53 - Valores de tempo conseguidos na secção CHS, para $\mu=70\%$.

Ensaio	Massividade [m ⁻¹]	EC 3 (Métodos Simplificados)			Espessura de protecção DFT [µm]	Ensaio		
		θ_{cr}	Resistência ao fogo (min)	Grau de utilização (%)		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)	Grau de utilização real (%)
		[°C]						
C5	246,9	525,78	8	70	--	255,64	2	100
C10	246,9	525,78	--	70	1071	169,12	2	100

6.5.2.4 Elementos com secção LNP.

Os elementos de secção transversal LNP 100x50x8 foram a ultima série de elementos com protecção ensaiados à flexão, sob a curva de fogo ISO 834. Aos elementos dos ensaios L12 e L13 não lhes foi aplicada protecção, por este motivo não se levaram a ensaio.

Os primeiros ensaios, desta ultima série de ensaios, foram os elementos com um grau de utilização de 30%, L3 sem protecção aplicada, L6 e L7 com 1000 [μm] de espessura de tinta seca (DFT).

No Gráfico 65 está representado o histograma de carga (F) para cada ensaio, assim como o deslocamento medido no ponto de aplicação da carga (*d*). Verifica-se que a camada de protecção influencia a resistência do elemento ao fogo, aumentando o tempo de resistência ao fogo do mesmo. De salientar que estes foram mais longos deste trabalho, devido ao facto de estes elementos se encontrarem a um grau de utilização real muito baixo, ver ponto 6.5.1.4.

No Gráfico 66 observa-se a evolução das temperaturas nos elementos, a par de evolução da temperatura prevista para um elemento sem protecção determinada pelos métodos simplificados e a curva ISO 834. Ainda a evolução do deslocamento (*d*) nos três ensaios. Pode-se observar a actuação da tinta

intumescente na protecção do elemento, aumentando assim o tempo de resistência ao fogo do mesmo. De salientar que o ensaio L7 registou temperaturas mais elevadas no elemento do que no ambiente do forno.

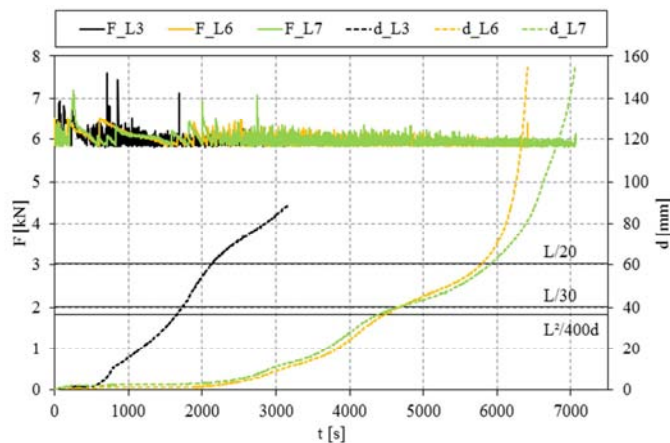


Gráfico 65 – Registo de carga (F) e deslocamento (d) nos ensaios L3, L6 e L7.

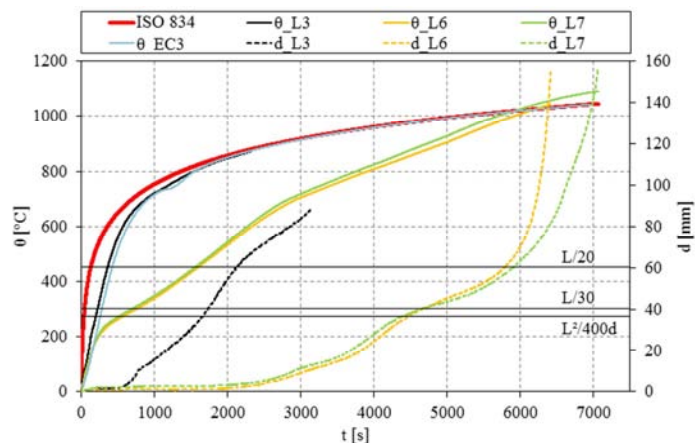


Gráfico 66 – Registo de temperaturas e deslocamento (d) nos ensaios L3, L6 e L7.

No Gráfico 67 observa-se a evolução do deslocamento (d) conforme o aumento de temperatura no forno (ISO 834) e temperatura no elemento. Observa-se que no momento do colapso a temperatura no elemento é inferior à do forno, contudo a tendência inversa é observada com a evolução do ensaio.

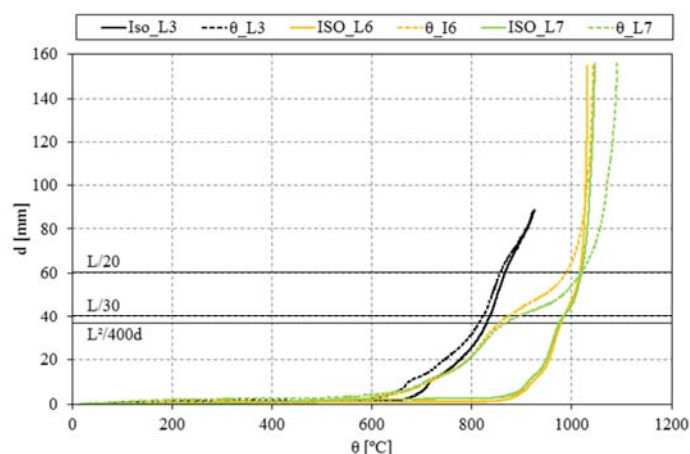


Gráfico 67 - Comparação entre L3, L6 e L7 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.

Na Tabela 54 é efectuada a comparação da resistência ao fogo dos elementos, comparando os valores determinados pelos métodos simplificados aos valores obtidos pela análise dos ensaios. Verifica-se que a protecção aplicada aos elementos confere um aumento de resistência ao fogo no valor de 49 minutos. A temperatura crítica aumentou nos elementos protegidos, diminuindo assim o valor do grau de utilização dos elementos.

Tabela 54 – Registo de valores determinados nos ensaios L4, L8 e L9.

Ensaio	EC 3					Ensaio				
	Massividade [m ⁻¹]	(Métodos Simplificados)			Espessura de protecção DFT [µm]					
		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)	Grau de utilização (%)		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)		Grau de utilização real (%)	
L3	250	663,78	12	30	--	822,55	Média	29	Média	10
L6	250	663,78	--	30	1041	875,50	884,38	78	78	7
L7	250	663,78	--	30	1026	893,25		77		7

De seguida observam-se os resultados obtidos pela análise dos ensaios com um grau de utilização de 50%, L4 sem protecção, L8 e L9 com 1000 [μm] de tinta intumescente.

No Gráfico 68 está representado o histograma de carga (F) e o valor de deslocamento a meio vão (d). Observa-se o aumento de resistência ao fogo que o elemento possui, com a aplicação da camada de protecção com tinta intumescente.

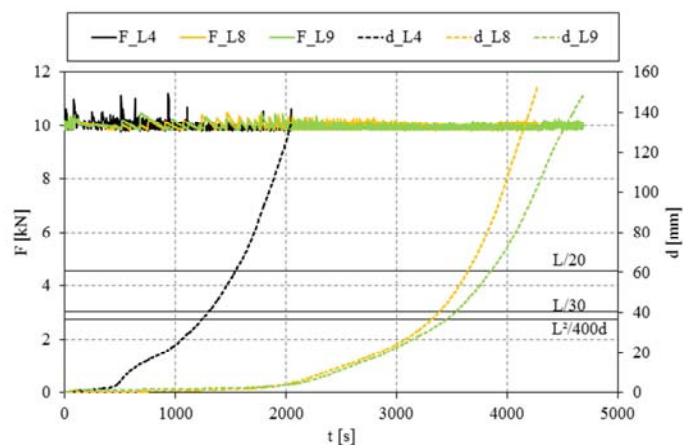


Gráfico 68 – Registo de valores para o histograma de carga (F) e deslocamento (d) nos ensaios L4, L8 e L9.

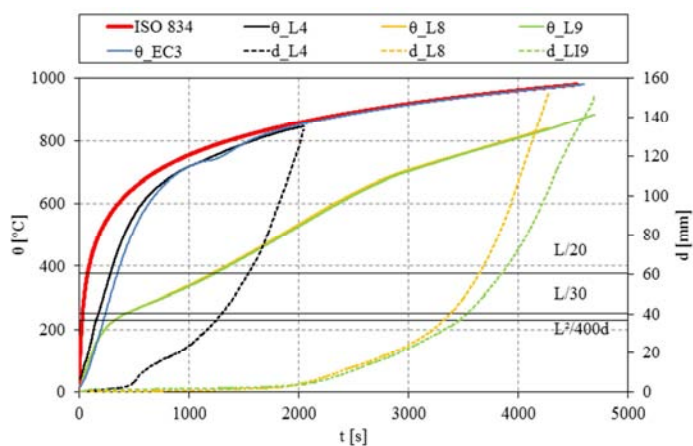


Gráfico 69 – Registo de temperaturas e deslocamento (d) nos ensaios L4, L8 e L9.

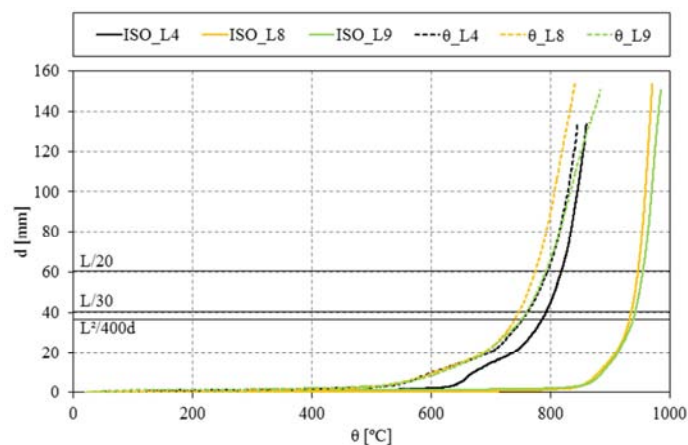


Gráfico 70 – Registo de deslocamento (d) em função do valor de temperatura, nos ensaios L4, L8 e L9.

No Gráfico 69 é permitido observar a evolução das temperaturas dos elementos, da temperatura prevista para um elemento sem protecção e a curva ISO 834, a par do deslocamento (d). Observa-se o momento em que a tinta intumescente reage às temperaturas elevadas, atrasando a evolução da temperatura no elemento, consequentemente aumentando a resistência ao fogo do elemento.

No Gráfico 70 observa-se a evolução do valor de (d) em função do valor da temperatura do elemento e da curva ISO 834. O ponto de ruptura do elemento é atingido com um valor de temperatura do elemento inferior ao valor de temperatura no ambiente do forno, a camada de protecção aplicada ao elemento permite que esta diferença se torne maior.

Na Tabela 55 é registado os valores de resistência e temperaturas nos elementos determinados pelos métodos simplificados de cálculo e os determinados em ensaio. A protecção aplicada aos elementos permitiu um aumento de resistência ao fogo no valor de 36 minutos. Os elementos com protecção aplicada não registaram temperaturas críticas diferentes do elemento sem protecção, contudo o grau de utilização destes elementos é inferior ao determinado com os valores nominais.

Tabela 55 – Registo de valores para os ensaios L4, L8 e L9.

Ensaio	Massividade [m ⁻¹]	EC 3 (Métodos Simplificados)			Espessura de protecção DFT [µm]	Ensaio				
		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)	Grau de utilização (%)		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)		Grau de utilização real (%)	
							Média	Média		
L4	250	584,67	9	50	--	761,68	Média	21	Média	16
L8	250	584,67	--	50	1053	747,38	753,94	56	57	17
L9	250	584,67	--	50	1063	760,49		58		16

Por fim analisam-se o último conjunto de ensaios desta última série de ensaios. Os ensaios L5, L10 e L11 encontram-se sobre um grau de utilização de 70%, o ensaio L3 não apresenta protecção, os ensaios L10 e L11 apresentam uma camada de protecção, com tinta intumescente, no valor de 1000 [μm]. Observou-se um fenómeno de retracção no ensaio L11, localizado no banzo de

maior dimensão (100), provocando assim uma diminuição da sua resistência ao fogo.

No Gráfico 71 observa-se o histograma de carga (F) registado nos ensaios, a par do deslocamento (d). Observa-se a influência no registo de tempo que a protecção aplicada permite um aumento de resistência ao fogo dos elementos. O ensaio L11 registou um fenómeno de retracção da camada intumescente, definindo assim um valor de resistência ao fogo inferior, comparando com o ensaio L10.

No Gráfico 72 observa-se a evolução das temperaturas durante os ensaios, a par da evolução do deslocamento (d), versus tempo (t). Permite-se observar o momento em que a camada intumescente se começa a formar, protegendo o elemento das temperaturas elevadas do ambiente do forno, consequentemente evoluindo o valor de resistência ao fogo dos elementos. Verifica-se também o momento de retracção da camada intumescente no ensaio L11, diminuindo o valor de resistência ao fogo, comparando com o ensaio L10.

No Gráfico 73 observa-se o deslocamento (d) em função do valor de temperaturas registado no elemento e no ambiente do forno. Verifica-se que a temperatura no elemento é inferior à temperatura do forno no momento do colapso, e quanto maior a resistência ao fogo do elemento, maior é essa diferença.

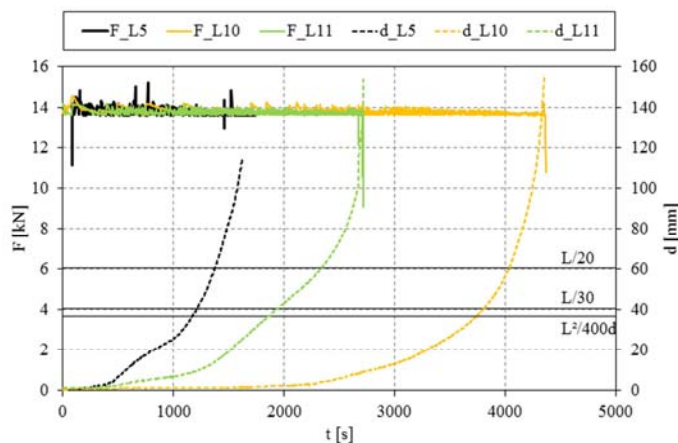


Gráfico 71 – Registo de carga (F) e deslocamento (d) nos ensaios L5, L10 e L11.

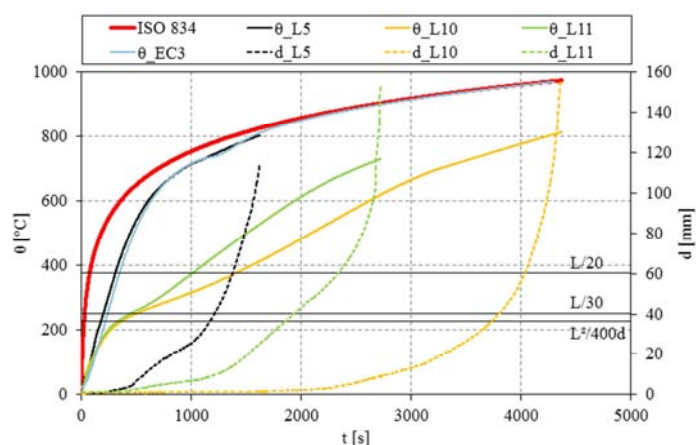


Gráfico 72 – Registro de temperaturas e deslocamento (*d*) nos ensaios L5, L10 e L11.

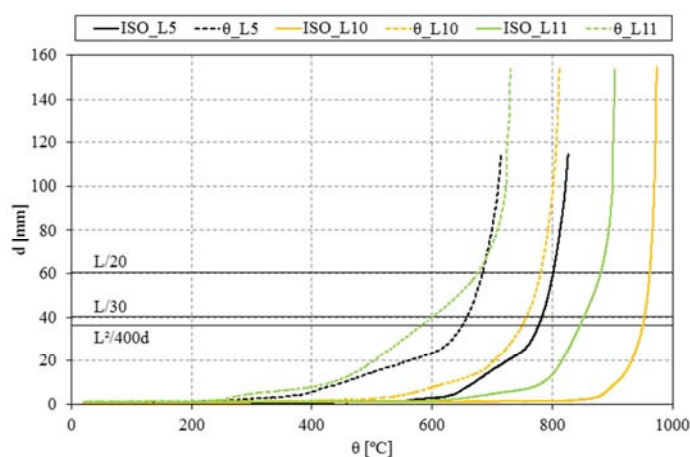


Gráfico 73 – Registro do valor de deslocamento (*d*) em função da evolução das temperaturas nos ensaios L5, L10 e L11.

Tabela 56 - Valores de tempo conseguidos na secção LNP, para $\mu=70\%$.

Ensaio	Massividade [m ⁻¹]	EC 3 (Métodos Simplificados)			Espessura de protecção DFT [µm]	Ensaio				
		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)	Grau de utilização (%)		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)		Grau de utilização real (%)	
							Média	Média		
L5	250	525,78	7	70	--	745,66	Média	20	Média	17
L10	250	525,78	--	70	1135	756,97	678,83	63	48	16
L11	250	525,78	--	70	1114	600,68		32		45

Na Tabela 56 observa-se a resistência dos elementos determinados pelos métodos simplificados de cálculo, comparando com os valores registados nos ensaios. Pode-se concluir que a aplicação de protecção permite um aumento de

resistência do elemento no valor de 28 minutos, comparando com um elemento sem protecção. O fenómeno de retracção diminuiu a média do tempo de resistência ao fogo dos elementos com protecção, assim com o registo de temperatura crítica dos elementos. Contudo, o valor do grau de utilização real dos ensaios é inferior ao determinado com os valores nominais.

7 Conclusões e trabalhos futuros.

Foram ensaiadas um total de 50 elementos à flexão, dos quais 8 à temperatura ambiente no domínio da resistência, 42 em condições de incêndio, no domínio do tempo, com a aplicação de carga constante. Dos 42 elementos testados ao fogo, sobre a acção de uma curva de incêndio padrão ISO834, 12 foram testados sem qualquer tipo de protecção, 30 testados com a aplicação de 1 e 2 [mm] de protecção passiva (tinta intumescente).

Foram consideradas quatro tipos diferentes de secções transversais: IPE 100 S275; SHS 100x100x4 S235; CHS 101,6x4,05 S235 e LNP 100x50x8. Sendo que o número total de ensaios, nas diferentes condições, foi dividido por igual número para as diferentes secções, com a excepção de dois elementos da secção LNP com a previsão de 2 [mm] de protecção.

Nos 42 elementos testados em condições de incêndio, procurou-se verificar a influência da carga e da protecção. Foram ensaiados elementos a três graus de utilização diferentes (30%, 50% e 70%), e ainda 2 níveis de protecção (1000 e 2000 [μm]).

Os 8 elementos ensaiados à temperatura ambiente tinham como objectivo comparar os resultados experimentais, com os métodos simplificados de cálculo (CENa, 2005) tendo em consideração os valores nominais das propriedades do material e do perfil. Os elementos de secção SHS e CHS possuem uma resistência experimental inferior ao determinado pelo métodos simplificados, enquanto que os elementos de secção IPE e LNP apresentam resultados experimentais superiores. A diferença entre os métodos poderá prender-se ao método utilizado para definição do momento de colapso nos ensaios experimentais.

Na Tabela 57 observa-se o resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados à flexão, em condições de temperatura ambiente.

Tabela 57 – Resumo dos ensaios à temperatura ambiente.

Elemento	EN 1993-1-1		Ensaio	
	Nominal	Real	<i>l</i> /30	Média
I1	31.840,00	34.988,00	37.500,00	39.500,00
I2			41.500,00	
S1	42.980,00	66.233,00	62.200,00	61.100,00
S2			60.000,00	
C1	29.370,00	22.760,00	18.700,00	18.300,00
C2			17.900,00	
L1	21.690,00	25.450,00	25.900,00	25.925,00
L2			25.950,00	

Nos 12 elementos ensaiados em condições de incêndio sem protecção, foi determinado o valor de resistência ao fogo experimental e comparando com o valor de resistência ao fogo, utilizando o método simplificado (valores nominais). Para esta comparação foram utilizados três graus de utilização diferentes. Os valores de resistência ao fogo determinados experimentalmente aproximam-se dos valores de resistência determinados pelo método simplificado (valores reais), para o caso dos elementos com secção SHS e CHS. Nas restantes secções a diferença observada é maior.

Nos 40 elementos testados com diferentes níveis de protecção, verificou-se a influência da espessura no tempo de resistência ao fogo. A resistência ao fogo aumenta com o aumento da espessura de protecção. Esta conclusão é válida para os elementos de secção IPE. Nos restantes casos, o aumento de espessura de protecção não proporciona aumento de resistência ao fogo, pelo facto de se terem verificado problemas de retracção da tinta, expondo zonas do elemento directamente ao fogo.

A maioria dos elementos de secção CHS apresentou um problema de retracção da tinta.

A protecção tornou-se efectiva em todos os elementos ensaiados, com maior expressão para o caso dos perfis LNP.

Na Tabela 58 observa-se os resultados dos ensaios à flexão, sob condições de fogo ISO 834.

Os gráficos 74, 75, 76 e 77 representam uma comparação entre os vários graus de utilização, resistência ao fogo e espessura de tinta dos ensaios, para cada tipo de secção transversal.

Tabela 58 – Resumo de ensaios à flexão, sob ambiente de fogo ISO 834.

Ensaio	Massividade [m-1]	EC 3 (Métodos Simplificados)						Ensaio				
		θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo nom. (min)	Resistência ao fogo real (min)	Grau de utilização nom. (%)	Grau de utilização real (%)	Espessura de protecção DFT [µm]	θ_{cr} [°C]	Resistência ao fogo (min)	Grau de utilização real (%)		
I3	388	663,78	12	12	30	29	--	752,2	Média	19	Média	17
I6	388	663,78	--		30	29	974	722,71	725,14	41	42	20
I7	388	663,78	--		30	29	975	727,57		42		20
I4	388	584,67	9	9	50	48	--	684,47		12		26
I8	388	584,67	--		50	48	1012	701,02	701,45	38	40	23
I9	388	584,67	--		50	48	1055	701,88		41		23
I12	388	584,67	--		50	48	1824	676,52	711,99	47	50	28
I13	388	584,67	--		50	48	1824	747,46		52		17
I5	388	525,78	7	8	70	64	--	659,01		10		31
I10	388	525,78	--		70	64	998	695,31	692,76	39	39	24
I11	388	525,78	--		70	64	989	690,21		38		25
S3	250	663,78	12	16	30	21	--	722,56		17		20
S6	250	663,78	--		30	21	1105	687,79	686,66	40	40	26
S7	250	663,78	--		30	21	1094	685,53		40		26
S4	250	584,67	9	12	50	32	--	641,95		11		35
S8	250	584,67	--		50	32	1141	617,08	612,91	34	34	41
S9	250	584,67	--		50	32	1141	608,73		34		43
S12	250	584,67	--		50	32	1932	651,64		32		32
S13	250	584,67	--		50	32	1933	Não atingiu a ruptura.				
S5	250	525,78	8	10	70	44	--	594,02		9		47
S10	250	525,78	--		70	44	1144	555,69	558,97	30	30	60
S11	250	525,78	--		70	44	1131	562,24		30		57
C3	246,9	663,78	12	11	30	38,6	--	602,27		9		45
C6	246,9	663,78	--		30	38,6	997	560,26	561,25	23	27	58
C7	246,9	663,78	--		30	38,6	1004	562,23		31		57
C4	246,9	584,67	9	8	50	66	--	499,42		6		79
C8	246,9	584,67	--		50	66	1026	Não atingiu a ruptura.				
C9	246,9	584,67	--		50	66	1006	472,24	481,50	19	21	87
C11	246,9	584,67	--		50	66	1120	490,75		23		82
C12	246,9	584,67	--		50	66	1896	563,47	537,74	22	22	57
C13	246,9	584,67	--		50	66	1807	512,00		21		75
C5	246,9	525,78	8	6	70	92,8	--	255,64	212,38	2	2	100
C10	246,9	525,78	--		70	92,8	1071	169,12		2		100
L3	264,08	663,78	13	13	30	29	--	822,55		29		10
L6	264,08	663,78	--		30	29	1041	875,50	884,38	78	78	7
L7	264,08	663,78	--		30	29	1026	893,25		77		7
L4	264,08	584,67	10	10	50	48	--	761,68		21		16
L8	264,08	584,67	--		50	48	1053	747,38	701,45	56	57	17
L9	264,08	584,67	--		50	48	1063	760,49		58		16
L5	264,08	525,78	8	8	70	64	--	745,66		20		17
L10	264,08	525,78	--		70	64	1135	756,97	678,83	63	48	16
L11	264,08	525,78	--		70	64	1114	600,68		32		45

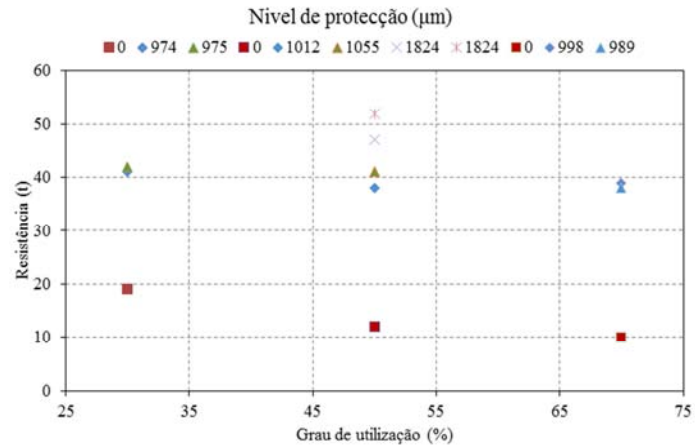


Gráfico 74 – Relação entre grau de utilização, resistência ao fogo e espessura de protecção, nos ensaios de secção IPE 100.

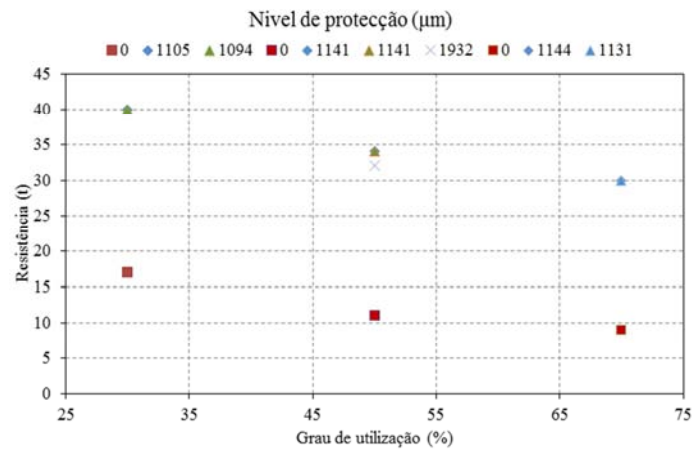


Gráfico 75 – Relação entre grau de utilização, resistência ao fogo e espessura de protecção, nos ensaios de secção SHS 100x100x4.

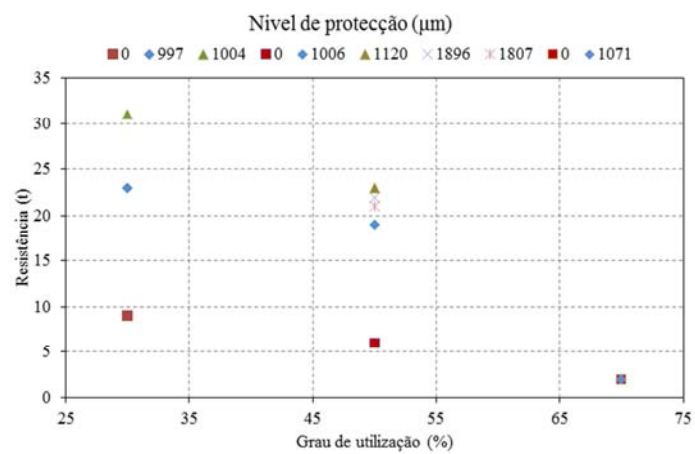


Gráfico 76 – Relação entre grau de utilização, resistência ao fogo e espessura de protecção, nos ensaios de secção CHS 101,6x4,05.

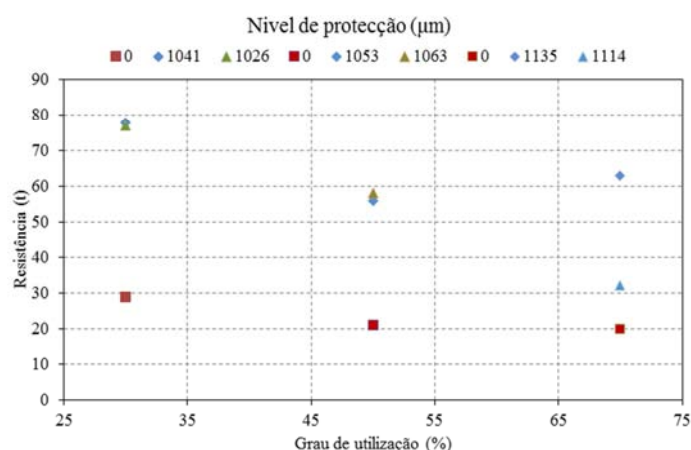


Gráfico 77 – Relação entre grau de utilização, resistência ao fogo e espessura de protecção, nos ensaios de secção LNP 100x50x8.

Nos Gráficos 78, 79 e 80 está representado o estudo com os valores de massividade dos elementos ensaiados, o nível de protecção e tempo de resistência. Ainda se pode observar a tendência registada para cada caso.

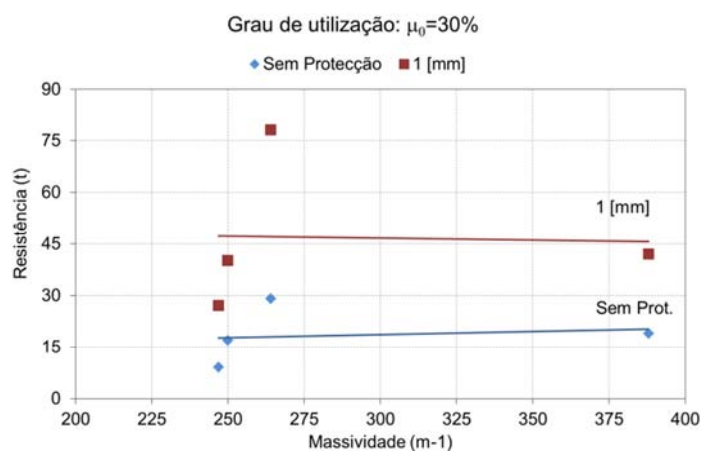


Gráfico 78 – Relação entre massividade e resistência ao fogo para $\mu_0 = 30\%$.

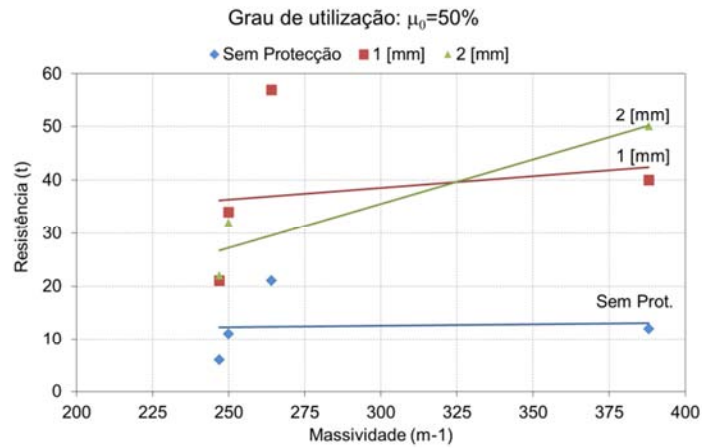


Gráfico 79 – Relação entre massividade e resistência ao fogo para $\mu_0 = 50\%$.

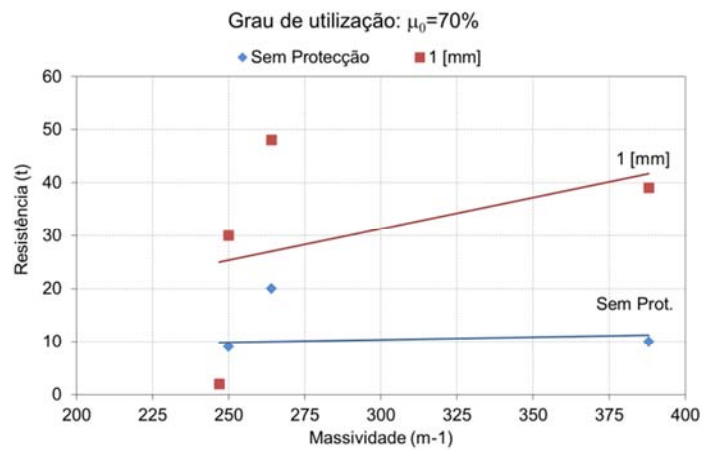


Gráfico 80 – Relação entre massividade e resistência ao fogo para $\mu_0 = 70\%$.

Na Figura 61 está representada a reunião de todos os elementos testados, organizados por secção.



Figura 61 – Reunião final de todos os elementos testados, incluindo os seus responsáveis.

Para trabalhos futuros é proposta a validação dos ensaios experimentais com estudos numéricos, utilizando o método dos Elementos Finitos. Propõe-se ainda a comparação destes resultados experimentais, com os resultados experimentais do fornecedor da tinta.

Tendo em consideração o problema de retracção da tinta, é proposto um estudo de resistência da camada carbonosa na direcção da expansão e em qualquer outra direcção ortogonal.

Avaliar as tensões superficiais do material aquando da formação da intumescência, em particular em superfícies convexas.

Para facilitar o cálculo de resistência ao fogo deste tipo de elementos com este tipo de protecção, propõe-se a definição de um método simplificado que

permita determinar a evolução da temperatura de perfis metálicos com tinta intumescente.

Para completar este estudo, seria conveniente a realização de mais ensaios, fazendo variar a espessura de protecção da tinta, o comprimento dos elementos e de outro tipo de secções transversais.

8 Referências bibliográficas.

- Aceralia. (2001). *Tubos Estruturais*. Espanha.
- Arcelor Mittal. (2005). *Perfis e Barras Comerciais, Programa de Vendas*. Bilbao: Long Carbon Europe.
- Bailey, C. (2004). Indicative fire tests to investigate the behaviour of cellular beams protected with intumescent coatings. *Fire Safety Journal* 39, 689-709.
- Barreira, L. (2007). *Introdução à extensometria (formação no âmbito da avaliação de desempenho 2007; LERM-ESTIG)*. Bragança: IPB.
- Bartholmai, M., Schriever, R., & Scharrel, B. (2003). Influence of external heat flux and coating thickness on the thermal insulation properties of two different intumescent coatings using cone calorimeter and numerical analysis. *FIRE AND MATERIALS*, 27, 151-162.
- BS. (1987). *BS 467-20 - Fire tests on building materials and structures - Part 20: Method for determination of the fire resistance of elements of construction (general principles)*. Reino Unido, Londres: British Standard.
- CEN. (1992). *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General Rules and rules for buildings*. Brussels: CEN.
- CEN. (1999). *EN 1363-1, (fire resistance tests, general requirements)*. Europe: European Standard.
- CEN. (2002). *EN 1991-1-2, Actions on structures - Part 1-2: General Actions - Actions on structures exposed to fire*. Brussels: CEN.
- CEN. (2006). *Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements*. Brussels: CEN.
- CEN. (2009). *prEN 13381-8 (test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - part 8: Applied reactive protection to steel members)*. Europe: European Standard.
- CENa. (2005). *EN 1993-1.1, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: European Standard.
- CENb. (2005). *EN 1993-1.2, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*. brussels: European Standard.

- Chen, W., & Sohal, I. (1995). *Plastic Design and Second-Order Analysis of Steel Frames*. New York: Springer-Verlag.
- Consiglio, R. (10 de 2010). Asserco: *Segurança do Trabalho : É Fogo !* Obtido em 05 de 2011, de Blog de Renato Consiglio: <http://marteladasnodedo.blogspot.com/2011/05/seguranca-do-trabalho-e-fogo.html>
- Construction, C. I. (2002). *TORSIONAL SECTION PROPERTIES OF STEEL SHAPES*. Canadá: Canadian Institute of Steel Construction.
- Dai, X., Wang, Y., & Bailey, C. (2009). A Simple Method to Predict Temperatures in Steel Joints with Partial Intumescent Coating Fire Protection. *Fire Technology*, 46, 19-35.
- Dai, X., Wang, Y., & Bailey, C. (2009). Effects of partial fire protection on temperature developments in steel joints protected by intumescent coating. *Fire Safety Journal* 44, 376-386.
- DR. (2008). *DL 220/2008 - Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndios em Edifícios*. Lisboa, Portugal: Casa de Moeda.
- Farinha, J., & Reis, A. (1993). *Tabelas Técnicas*. Setubal, Portugal: P.O.B.
- Forêncio Augusto Chagas, S.A. (2002). *Manual Técnico de Produtos Siderúrgicos*. Torres Vedras, Portugal: CHAGAS.
- Grigonis, M., MAČIULAITIS, R., & Lipinskas, D. (2001). Fire Resistance Tests of Various Fire Protective Coatings. *MATERIALS SCIENCE*, vol 17, 1392-1320.
- Group, T. (2009). *Designing Steel Structures for Fire Safety*. London, UK: Taylor & Francis Group.
- Han, Z., Fina, A., Malucelli, G., & Camino, G. (2010). Testing fire protective properties of intumescent coatings by in-line temperature measurements on a cone calorimeter. *Progress in Organic Coatings* 69, 475-480.
- IPQ. (2006). *NP EN 10002-1; Materiais metálicos, Ensaios de tracção, Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente*. Portugal: Norma Portuguesa.
- ISO. (2009). *ISO 6892-1: Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature*. Switzerland: International Standard.

- Jimenez, M., Duquesne, S., & Bourbigot, S. (2006). Characterization of the performance of an intumescent fire protective coating. *Surface & Coatings Technology*, 201, 979-987.
- Krishnamoorthy, R., & Bailey, C. (2009). Temperature distribution of intumescent coated steel framed. *NSCC*, 572-579.
- LNEC. (2010). *NP EN 1991-1-2, Eurocódigo 1 - Acções em estruturas, Parte 1-2: Acções gerais. Acções em estruturas expostas ao fogo*. Caparica - Portugal: Instituto Português da Qualidade.
- Mesquita, L. (2004). *INSTABILIDADE TERMO-MECÂNICA DE VIGAS SUBMETIDAS A TEMPERATURAS ELEVADAS*. Porto: FEUP.
- Mesquita, L., Piloto, P., & Vaz, M. (2007). CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO E DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE TINTAS INTUMESCENTES. *VI Congresso de Construção Metálica e Mista*, 1-10.
- Mesquita, L., Piloto, P., & Vaz, M. (2007). ESTUDO ANALÍTICO E NUMÉRICO DA RESISTÊNCIA AO FOGO DE PERFIS METÁLICOS PROTEGIDOS COM TINTA INTUMESCENTE. *CMNE/CILAMCE*.
- Mesquita, L., Piloto, P., & Vaz, M. (2007). EXPERIMENTAL STUDY OF INTUMESCENT FIRE PROTECTION COATINGS. *European Coatings Conference: "Fire Retardant Coatings II"*.
- Mesquita, L., Piloto, P., Magalhães, F., Pimenta, J., & Vaz, M. (2010). CARACTERIZAÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA E FORMAÇÃO CARBONOSA DE TINTAS INTUMESCENTES. *8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental*.
- Mesquita, L., Piloto, P., Vaz, M., & Pinto, T. (2009). Decomposition of Intumescent Coatings: Comparison between a Numerical Method and Experimental Results. *Acta Polytechnica Vol. 49*, 60-65.
- Mesquita, L., Piloto, P., Vaz, M., Vila Real, P., & Ramos, F. (2005). COMPORTAMENTO DE VIGAS EM AÇO PROTEGIDAS COM TINTA INTUMESCENTE. *V congresso de Estruturas Metálicas e Mistas*.
- Metálica. (1999-2011). *Metálica - Tubo redondo estrutural*. Obtido em Janeiro de 2010, de Metálica: <http://www.metalica.com.br/tubos-redondos-mecanicos-trefilados/>

- Mohri, F., Azrar, L., & Potier-Ferry, M. (2001). *Flexural-torsional post-buckling analysis of thin-walled elements with open sections*. France: Elsevier Science Ltd.
- Mundo, M. (8 de 2009). *8 anos do atentado as Torres Gêmeas*. Obtido em 3 de 2011, de Mudo Mundo - Pequenas ações podem mudar o mundo ao seu redor!: <http://mudemundo.blogspot.com/2009/09/8-anos-do-atentado-as-torres-gemeas.html>
- Pereira, A. (2009). *Estudo Experimental e Simulação numérica do Comportamento de Tintas Intumescentes na Protecção de Elementos Estruturais em Condições de Incêndio*. Bragança: IPB - ESTIG.
- Pinto, T. (2008). *Estudo de tintas intumescentes na protecção de elementos estruturais em condições de incêndio*. Bragança: IPB-ESTIG.
- Reis, A., & Camotim, D. (2000). *Estabilidade Estrutural*. Portugal: McGRAW-HILL.
- Safety, F. a. (2010). *Shanghai Fire*. Obtido em 3 de 2011, de Fire and Safety - Survive from city fire: <http://safety-and-fire.com/?p=41>
- Tinoni. (1 de 2007). *O incêndio do Chiado*. Obtido em 3 de 2011, de Blog do Tinoni: <http://casadotinoni.blogspot.com/2007/08/o-incndio-do-chiado.html>
- Trahair, N. (1993). *Flexural-Torsional Buckling of Structures*. London: E & FN SPON.
- Trahair, N. (2002). *Lateral Buckling Strengths of Steel Angle Section Beams - Research Report No R812*. Australia: The University of Sydney.
- Vila Real, P. (2003). *Incêndio em Estruturas Metálicas - Cálculo Estructural*. Portugal: Orion.
- Vila Real, P., & Franssen, J.-M. (2010). *Fire Design of Steel Structures*. Portugal: ECCS.
- Vila Real, P., Lopes, N., Silva, L., & Franssen, J.-M. (2003). *Encurvadura lateral de vigas metálicas sujeitas à acção do fogo: uma nova proposta de cálculo simples complementar ao ec3*. Lisboa: Congresso de Construção Metálica e Mista.
- Wang, Z.-H., & Tan, K. H. (2008). Green's function aproch for heat conduction: application to steel members protected by intumescent paint. *Numerical Heat Transfer, Part B*, 54, 435-453.

9 Anexo – Parte I.

No presente anexo, encontram-se definidas as dimensões dos provetes de ensaio à tracção do aço das diferentes secções transversais.

A Norma Portuguesa EN 10002-1 especifica o método de tracção de materiais metálicos e define as suas características mecânicas à temperatura ambiente. Os ensaios de tracção consistem na medição da deformação de um provete, sobe a acção de uma força de tracção, até que este atinja a sua ruptura. Os dados recolhidos de cada ensaio permitem definir as propriedades mecânicas do material.

Para a elaboração dos provetes metálicos devem ser tomadas as seguintes dimensões:

S_0 é a menor área transversal de material, que para secções prismáticas define-se por: $S_0 = b \times e$;

b é a menor largura do provete, e é a espessura do material;

L_0 é um comprimento de referência antes da aplicação da força, definido por:
 $L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$;

L_c é um comprimento do troço de secção constante de menor área transversal do provete, e é definido por: $L_c \geq L_0 + 1,5\sqrt{S_0}$;

L_e é um comprimento de zona útil do provete utilizado na medição da deformação, através de um extensómetro, que deve ser: $L_e \geq L_0/2$;

L_t é um comprimento total do provete.

As secções transversais IPE, SHS e CHS têm uma espessura muito aproximada, as dimensões adoptadas para os ensaios de tracção são as dispostas na Figura I.1.

As dimensões dos provetes das secções transversais LNP estão definidas pela Figura I.2.

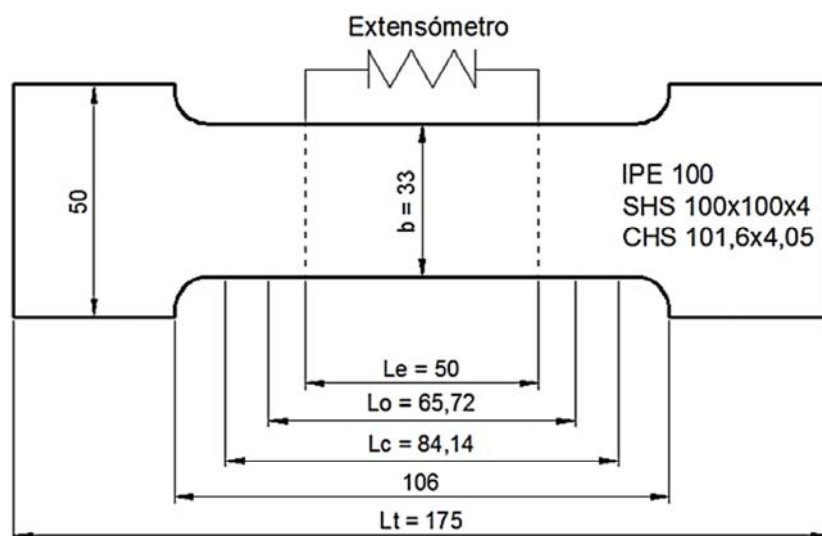


Figura I.62 – Dimensões dos provetes maquinados para as secções de espessura 4 [mm].

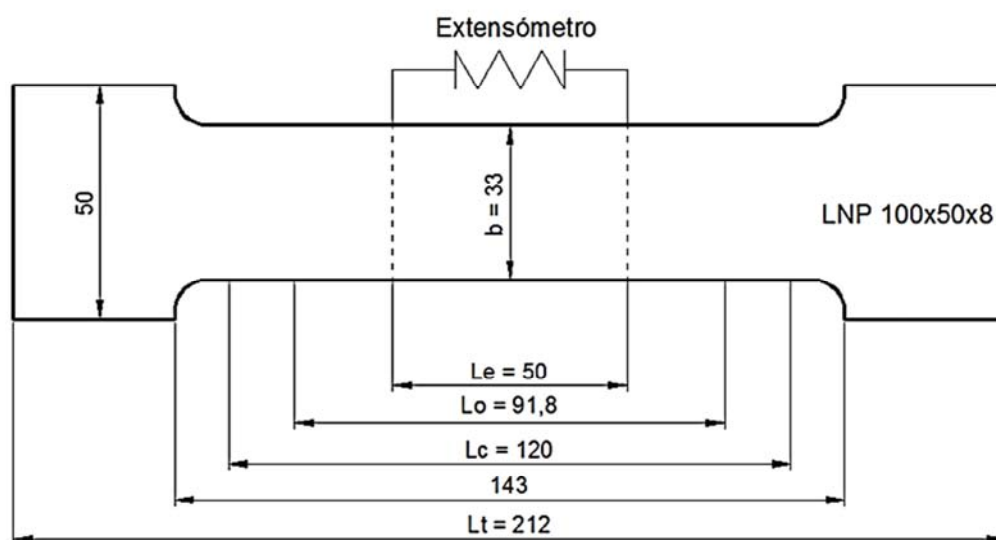


Figura I.63 – Dimensões dos provetes maquinados para secções de espessura 8 [mm].

10 Anexo – Parte II.

No presente anexo, encontram-se registados os valores obtidos nos ensaios de tracção, aos provetes dispostos no anexo I.

Os resultados são apresentados de acordo com a norma NP EN 100002-1 (IPQ, 2006).

Tabela II.59 – Resultados médios das propriedades mecânicas relevantes para os provetes da secção IPE100 (S275).

Provette nº	E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
PI1	198,606	292,989	295,848	296,741	426,061	41,834
PI2	200,433	304,256	305,329	301,038	431,612	41,378
PI3	194,664	304,969	306,222	304,789	436,082	41,540
Média	197,901	300,738	302,466	300,856	431,252	41,584
Desv. Padrão	2,948	6,720	5,749	4,028	5,020	0,231

Tabela II.60 – Resultados médios das propriedades mecânicas relevantes para os provetes da SHS100x100x4 (S235).

Provette nº	E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
PS1	172,694	348,557	356,923	357,119	403,828	--
PS2	204,890	338,633	346,223	346,223	394,875	--
PS3	209,222	344,860	352,842	351,667	397,796	--
Média	195,602	344,017	351,996	351,670	398,833	--
Desv. Padrão	19,957	5,016	5,400	5,448	4,566	--

Tabela II.61 – Resultados médios das propriedades mecânicas relevantes para os provetes da CHS101,6x4,05 S235.

Provette nº	E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
PC1	--	200,7042	--	--	301,4931	47,680
PC2	--	207,6773	--	--	304,7633	48,688
PC3	--	194,5968	--	--	295,9788	48,968
Média	--	200,993	--	--	300,745	48,445
Desv. Padrão	--	6,545	--	--	4,440	0,677

Tabela II.62 – Resultados médios das propriedades mecânicas relevantes para os provetes da L100x50x8 S275.

Provete nº	E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
PL1	203,501	300,504	304,816	297,956	425,958	41,966
PL2	205,994	295,506	306,287	286,683	424,389	42,098
PL3	211,965	313,636	311,873	306,287	436,145	34,574
PL4	210,707	307,451	321,910	308,738	434,824	42,462
Média	208,042	304,274	311,222	299,916	430,329	40,275
Desv. Padrão	3,439	6,871	6,709	8,623	5,206	3,297

11 Anexo – Parte III.

Neste anexo, é descrita a medição efectuada a todas as secções transversais.

Tabela III.63 – Valores medidos na secção IPE 100.

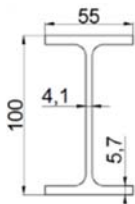
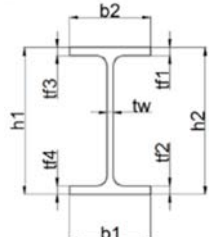
Nominal		Real							
									
Leitura	Leituras em (mm)								
	h1	h2	b1	b2	tf1	tf2	tf3	tf4	tw
1	101,90	102,40	55,30	55,00	5,25	5,51	5,66	5,50	4,40
2	101,90	101,90	55,60	54,60	5,62	5,50	5,62	5,28	4,60
3	101,80	102,10	55,00	54,40	5,70	5,53	5,70	5,34	4,40
4	102,00	102,20	53,60	55,00	5,77	5,48	5,77	5,43	4,60
Média	101,90	102,15	54,88	54,75	5,59	5,51	5,69	5,39	4,50
Desv pad	0,08	0,21	0,88	0,30	0,23	0,02	0,06	0,10	0,12
Máx	102,00	102,40	55,60	55,00	5,77	5,53	5,77	5,50	4,60
Mín	101,80	101,90	53,60	54,40	5,25	5,48	5,62	5,28	4,40
Média t	102,03		54,81		5,54		4,50		
Desv pad t	0,20		0,62		0,16		0,12		
Máx t	102,40		55,60		5,77		4,60		
Mín t	101,80		53,60		5,25		4,40		

Tabela III.64 – Valores medidos na secção SHS 100x100x4.

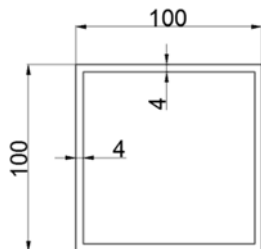
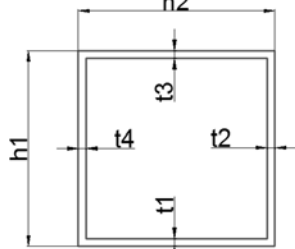
Nominal		Real				
						
Leitura	Medidas em (mm)					
	h1	h2	t1	t2	t3	t4
1	99,90	99,90	4,24	4,15	4,29	4,18
2	100,30	100,30	4,14	4,22	4,17	4,14
3	99,90	100,30	4,19	4,12	4,13	4,22
4	99,90	100,20	4,14	4,11	4,16	4,22
Média	100,00	100,18	4,18	4,15	4,19	4,19
Desv pad	0,20	0,19	0,05	0,05	0,07	0,04
Máx	100,30	100,30	4,24	4,22	4,29	4,22
Mín	99,90	99,90	4,14	4,11	4,13	4,14
Média t	100,09			4,18		
Desv pad t	0,20			0,05		
Máx t	100,30			4,29		
Mín t	99,90			4,11		

Tabela III.65 – Valores medidos na secção CHS 101,6x4,05.

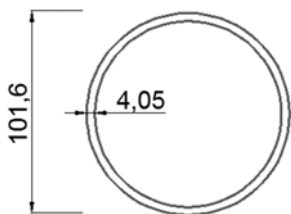
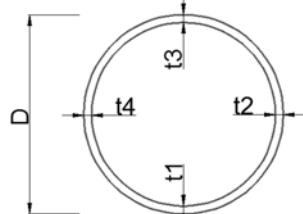
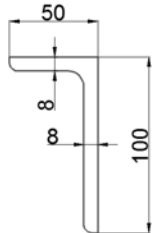
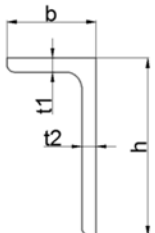
Nominal		Real				
						
Leitura	Medidas em (mm)					
	D	t1	t2	t3	t4	
1	100,70	3,80	3,60	3,60	3,60	
2	100,30	3,70	3,70	3,80	3,70	
3	100,70	3,50	3,50	3,60	3,70	
4	100,40					
Média	100,53	3,67	3,60	3,67	3,67	
Desv pad	0,21	0,15	0,10	0,12	0,06	
Máx	100,70	3,80	3,70	3,80	3,70	
Mín	100,30	3,50	3,50	3,60	3,60	
Média t	100,53			3,65		
Desv pad t	0,21			0,10		
Máx t	100,70			3,80		
Mín t	100,30			3,50		

Tabela III.66 – Valores medidos na secção LNP 100x50x8.

Nominal		Real		
				
Leitura	Medidas em (mm)			
	h	b	t1	t2
1	99,70	50,70	8,20	8.30
2	99,60	50,90	8,30	8.80
3	99,60	51,00	8,30	8.50
4	99,80	50,90	8,30	9.00
Média	99,68	50,88	8,28	8.65
Desv pad	0,10	0,13	0,05	0.31
Máx	99,80	51,00	8,30	9.00
Mín	99,60	50,70	8,20	8.30
Média	99,68	50,88	8,46	
Desv pad t	0,10	0,13	0,29	
Máx t	99,80	51,00	9,00	
Mín t	99,60	50,70	8,20	

12 Anexo – Parte IV.

Verificação da segurança ao esforço transversal, sendo que o esforço de corte máximo induzido no elemento será no valor de $V_{Ed} = F/2$ e deverá satisfazer a expressão (IV.1), segundo a norma EN 1993-1-1 (CENa, 2005).

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (IV.1)$$

$$V_{c,Rd} = \frac{A_v(f_y/\sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (IV.2)$$

O valor de A_v deverá ser definido de acordo com a EN 1993-1-1 (CENa, 2005).

$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f \text{ para (IPE)} \quad (IV.3)$$

$$A_v = 2A/\pi \text{ para (SHS e CHS)} \quad (IV.4)$$

$$A_v = 0,9(A - bt) \text{ para (LNP)} \quad (IV.5)$$

Secção IPE 100:

$$A_v = 505,17 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (IV.6)$$

$$V_{c,Rd} = \frac{505,17(275/\sqrt{3})}{1,0} = 80.365,00 \text{ [N]} \quad (IV.7)$$

Secção SHS:

$$A_v = 967,7 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (IV.8)$$

$$V_{c,Rd} = \frac{967,7(235/\sqrt{3})}{1,0} = 131.290,00 \text{ [N]} \quad (IV.9)$$

Secção CHS:

$$A_v = 770,31[mm^2] \quad (IV.10)$$

$$V_{c,Rd} = \frac{770,31(235/\sqrt{3})}{1,0} = 104.514,00 [N] \quad (IV.11)$$

Secção LNP:

$$A_v = 666,00[mm^2] \quad (IV.12)$$

$$V_{c,Rd} = \frac{666,00(235/\sqrt{3})}{1,0} = 105.742,00 [N] \quad (IV.13)$$

13 Anexo – Parte V.

Este anexo contém as fichas que descrevem os ensaios, a elementos metálicos à flexão, realizados em laboratório (IPB-ESTIG).

As fichas estão organizadas em quatro tipos de secção transversal, IPE 100, SHS 100x100x4, CHS 101,6x4,05 e LNP 100x50x8. Cada secção foi submetida a dois tipos condições de ambiente, 20°C e a uma curva de fogo ISO 834. Os ensaios a 20°C são com carga incremental e os ao fogo são de carga constante.

Os ensaios ao fogo são realizados sobre 3 graus de utilização distintos, 30%, 50% e 70%. Foram efectuados três ensaios sem protecção e oito ensaios com tinta intumescente, exceptuando a secção LNP que se realizou apenas seis com protecção de tinta intumescente.

Estas fichas estão organizadas em cinco secções. A primeira parte refere informações gerais sobre o ensaio e as considerações adoptadas. A segunda parte descreve as características do elemento, instrumentação, ensaios ao material, medições da secção transversal e propriedades da protecção (nos casos em que seja aplicada). A terceira secção mostra os resultados gráficos obtidos durante o ensaio, incluindo: deformações, deslocamentos, força, temperaturas, taxa de deslocamento e comparações. Na secção seguinte encontram-se registos fotográficos dos momentos relevantes do ensaio. Por último são apresentados os resultados obtidos dos ensaios e comparações com os resultados nominais.

Tipo de ensaio: Ensaio de resistência à flexão de perfil metálico

Nome do teste: I1

Data: 12 \ 05 \ 2010

Tipo de secção: IPE 100

Tipo de aço: S275

Força aplicada: incremental [N]

Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Deformações: extensómetros 120Q

Curva de fogo utilizada: temperatura ambiente

Tipo de protecção: nenhuma

Espessura de protecção: 0,0 [mm]

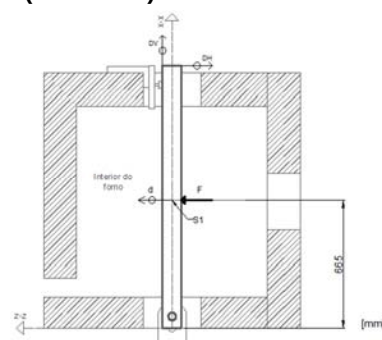
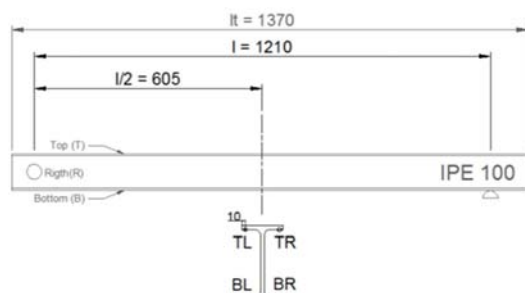
Duração do ensaio: --

Temperatura máxima registada: --

Descrição do ensaio:

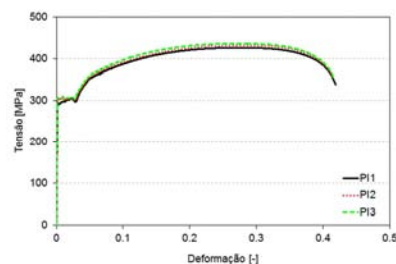
Ensaio de resistência à flexão de um perfil metálico com secção transversal IPE 100, em condições de temperatura ambiente. Serão aplicados incrementos de carga de 5000 [N]. A resistência à flexão do elemento, determinado pela EN1993-1-1, com as propriedades nominais do material e secção transversal, é de 31840 [N].

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



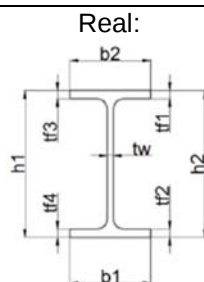
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Proveite nº	E [GPa]	R _{p0.2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{el} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PI1	198,606	292,989	295,848	296,741	426,061	41,834
PI2	200,433	304,256	305,329	301,038	431,612	41,378
PI3	194,664	304,969	306,222	304,789	436,082	41,540
Média	197,901	300,738	302,466	300,856	431,252	41,584
Desv. Padrão	2,948	6,720	5,749	4,028	5,020	0,231

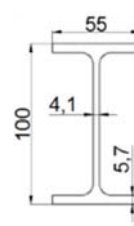


Propriedades da secção:

Leitura	Leituras em (mm)							
	h1	h2	b1	b2	tf1	tf2	tf3	tf4
1	101,90	102,40	55,30	55,00	5,25	5,51	5,66	5,50
2	101,90	101,90	55,60	54,60	5,62	5,50	5,62	5,28
3	101,80	102,10	55,00	54,40	5,70	5,53	5,70	5,34
4	102,00	102,20	53,60	55,00	5,77	5,48	5,77	5,43
Média	101,90	102,15	54,88	54,75	5,59	5,51	5,69	5,39
Desv pad	0,08	0,21	0,88	0,30	0,23	0,02	0,06	0,10
Máx	102,00	102,40	55,60	55,00	5,77	5,53	5,77	5,50
Mín	101,80	101,90	53,60	54,40	5,25	5,48	5,62	5,28
Média t	102,03	102,03	54,81	54,81	5,54	5,54	5,54	5,54
Desv pad t	0,20	0,20	0,62	0,62	0,16	0,16	0,16	0,16
Máx t	102,40	102,40	55,60	55,60	5,77	5,77	5,77	5,77
Mín t	101,80	101,80	53,60	53,60	5,25	5,25	5,25	5,25



Nominal:



Resultados:

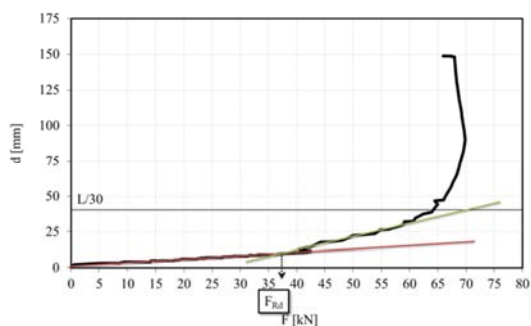


Gráfico V.78 – Força versus deslocamento a meio vão.

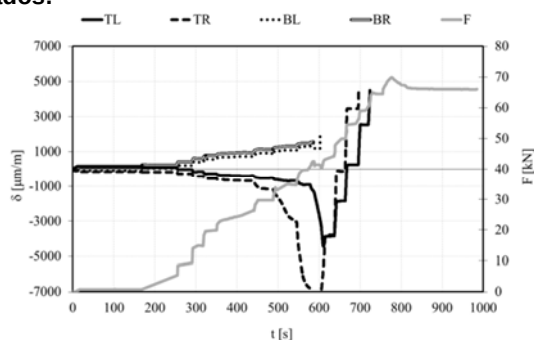


Gráfico V.79 – Deformação e força, versus tempo.

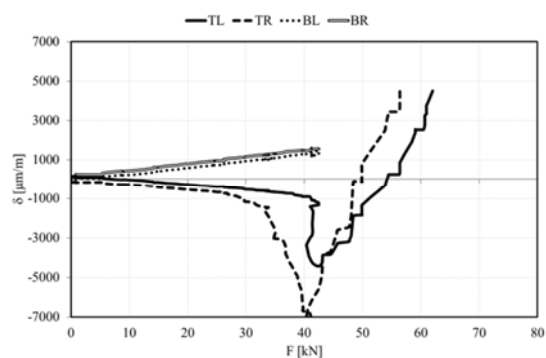


Gráfico V.80 – Deformação versus força.

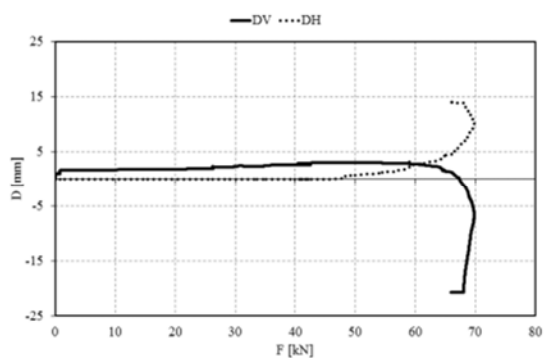


Gráfico V.81 – Deslocamento da extremidade do elemento versus força.

Registos fotográficos:



Figura V.64 – Estado inicial.



Figura V.65 – Elemento no seu estado de ruptura.

Resistência do elemento [N]:

Eurocódigo 3-1-1		Ensaio
Nominal	Real	
31.840,00	34.988,00	37.500,00

Tipo de ensaio: Ensaio de resistência à flexão de perfil metálico

Nome do teste: I2

Data: 13 \ 05 \ 2010

Tipo de secção: IPE 100

Tipo de aço: S275

Força aplicada: incremental [N]

Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Deformações: extensómetros 120Q

Curva de fogo utilizada: temperatura ambiente

Tipo de protecção: nenhuma

Espessura de protecção: 0,0 [mm]

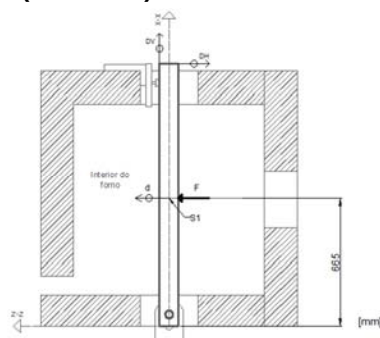
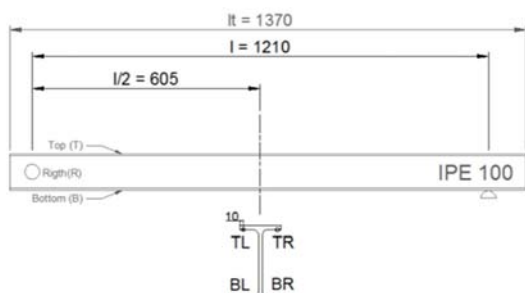
Duração do ensaio: --

Temperatura máxima registada: --

Descrição do ensaio:

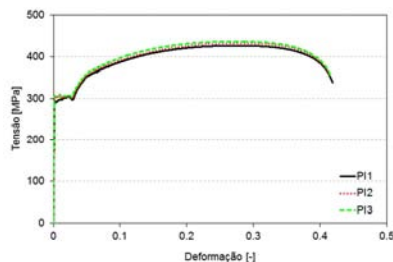
Ensaio de resistência à flexão de um perfil metálico com secção transversal IPE 100, em condições de temperatura ambiente. Serão aplicados incrementos de carga de 5000 [N]. A resistência à flexão do elemento, determinado pela EN1993-1-1, com as propriedades nominais do material e secção transversal, é de 31840 [N].

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



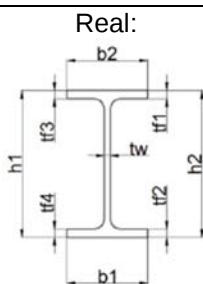
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Proveite nº	E [GPa]	R _{p0.2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{el} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PI1	198,606	292,989	295,848	296,741	426,061	41,834
PI2	200,433	304,256	305,329	301,038	431,612	41,378
PI3	194,664	304,969	306,222	304,789	436,082	41,540
Média	197,901	300,738	302,466	300,856	431,252	41,584
Desv. Padrão	2,948	6,720	5,749	4,028	5,020	0,231

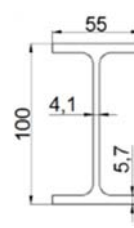


Propriedades da secção:

Leitura	Leituras em (mm)							
	h1	h2	b1	b2	tf1	tf2	tf3	tf4
1	101,90	102,40	55,30	55,00	5,25	5,51	5,66	5,50
2	101,90	101,90	55,60	54,60	5,62	5,50	5,62	5,28
3	101,80	102,10	55,00	54,40	5,70	5,53	5,70	5,34
4	102,00	102,20	53,60	55,00	5,77	5,48	5,77	5,43
Média	101,90	102,15	54,88	54,75	5,59	5,51	5,69	5,39
Desv pad	0,08	0,21	0,88	0,30	0,23	0,02	0,06	0,10
Máx	102,00	102,40	55,60	55,00	5,77	5,53	5,77	5,50
Mín	101,80	101,90	53,60	54,40	5,25	5,48	5,62	5,28
Média t	102,03	102,03	54,81	54,81	5,54	5,54	5,54	5,54
Desv pad t	0,20	0,20	0,62	0,62	0,16	0,16	0,16	0,16
Máx t	102,40	102,40	55,60	55,60	5,77	5,77	5,77	5,77
Mín t	101,80	101,80	53,60	53,60	5,25	5,25	5,25	5,25



Nominal:



Resultados:

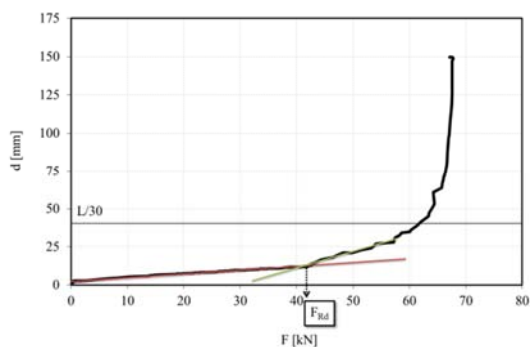


Gráfico V.82 – Força versus deslocamento a meio vão.

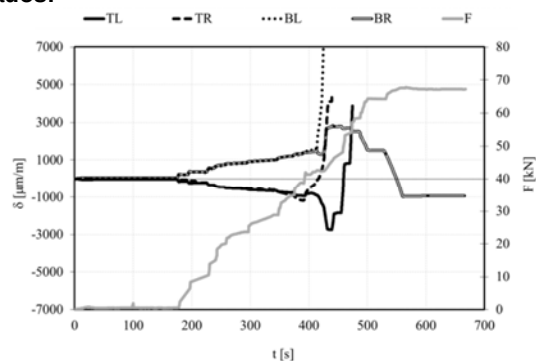


Gráfico V.83 – Deformação e força, versus tempo.

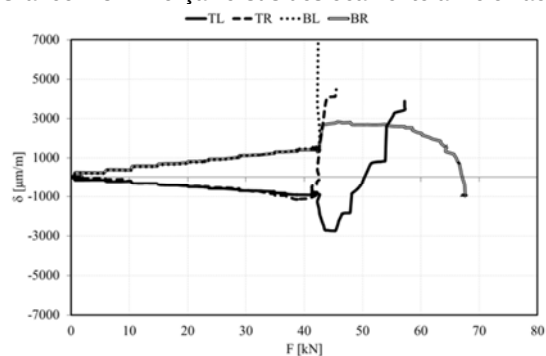


Gráfico V.84 – Deformação versus força.

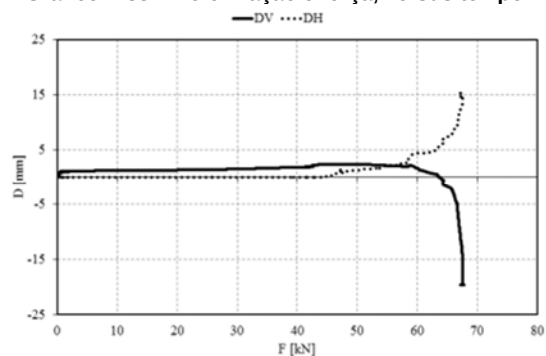


Gráfico V.85 – Deslocamento da extremidade do elemento versus força.

Registos fotográficos:



Figura V.66 – Deformação final, vista do topo.



Figura V.67 – Estado de rotação do topo do elemento.



Figura V.68 – Fase final do ensaio.



Figura V.69 – Deformação final do elemento.

Resistência do elemento [N]:		
Eurocódigo 3-1-1		Ensaio
Nominal	Real	
31.840,00	34.988,00	

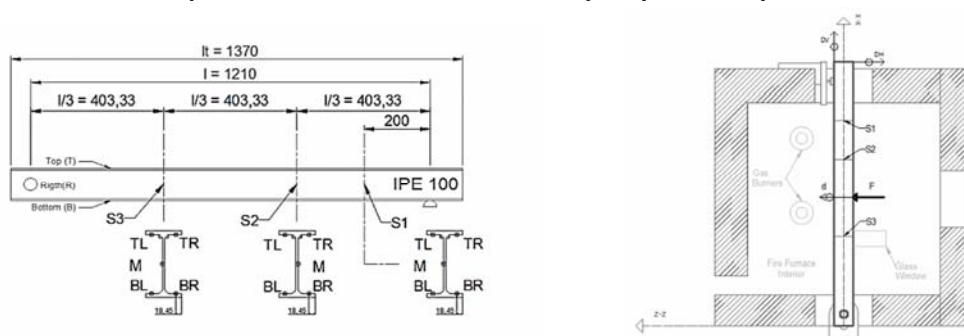
41.500,00

Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico sem protecção
Nome do teste: I3 **Curva de fogo utilizada:** Padrão (ISO 834)
Data: 25 \ 07 \ 2010 **Tipo de protecção:** nenhuma
Tipo de secção: IPE 100 **Espessura de protecção:** 0,0 [mm]
Tipo de aço: S275 **Duração do ensaio:** 40 [min]
Força aplicada: 5340 [N] **Temperatura máxima registada:** 878,45 [°C]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Descrição do ensaio:

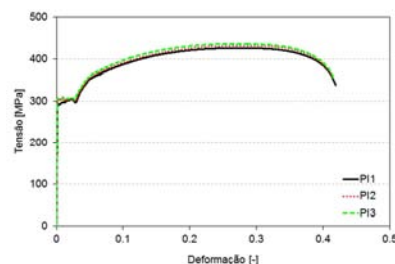
Ensaio de resistência ao fogo de elemento IPE 100, sem protecção, com a aplicação de carga, representando um estado de utilização nominal de $\mu_0=30\%$ segundo EN1993-1-2, que define uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=663,78^\circ\text{C}$. A resistência nominal do elemento é de 12 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



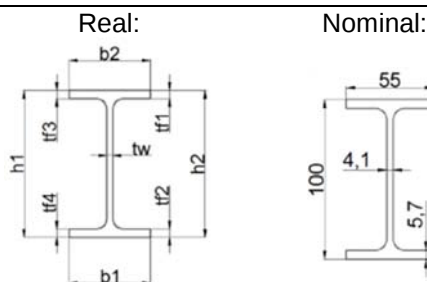
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete n°	E [GPa]	R _{p0.2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PI1	198,606	292,989	295,848	296,741	426,061	41,834
PI2	200,433	304,256	305,329	301,038	431,612	41,378
PI3	194,664	304,969	306,222	304,789	436,082	41,540
Média	197,901	300,738	302,466	300,856	431,252	41,584
Desv. Padrão	2,948	6,720	5,749	4,028	5,020	0,231



Propriedades da secção:

Leitura	Leituras em (mm)							
	h1	h2	b1	b2	tf1	tf2	tf3	tf4
1	101,90	102,40	55,30	55,00	5,25	5,51	5,66	5,50
2	101,90	101,90	55,60	54,60	5,62	5,50	5,62	5,28
3	101,80	102,10	55,00	54,40	5,70	5,53	5,70	5,34
4	102,00	102,20	53,60	55,00	5,77	5,48	5,77	5,43
Média	101,90	102,15	54,88	54,75	5,59	5,51	5,69	5,39
Desv pad	0,08	0,21	0,88	0,30	0,23	0,02	0,06	0,10
Máx	102,00	102,40	55,60	55,00	5,77	5,53	5,77	5,50
Mín	101,80	101,90	53,60	54,40	5,25	5,48	5,62	5,28
Média t	102,03		54,81			5,54		4,50
Desv pad t	0,20		0,62			0,16		0,12
Máx t	102,40		55,60			5,77		4,60
Mín t	101,80		53,60			5,25		4,40



Resultados:

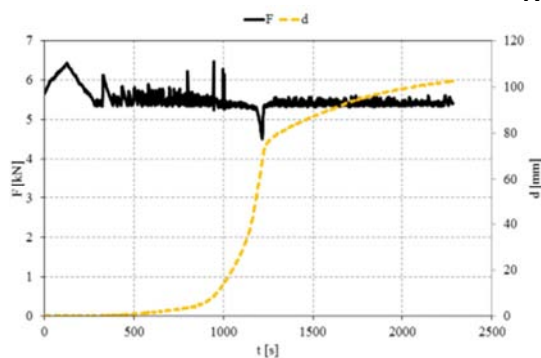


Gráfico V.86 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

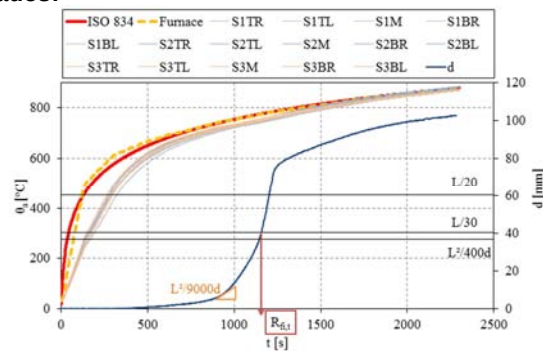


Gráfico V.87 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

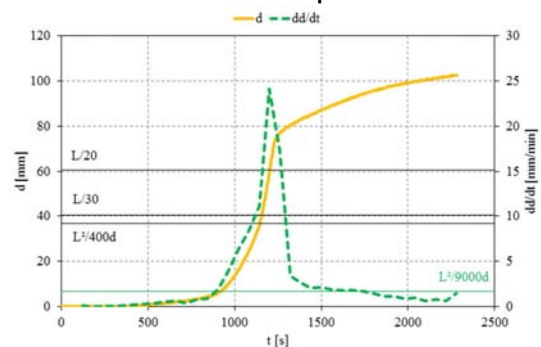


Gráfico V.88 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

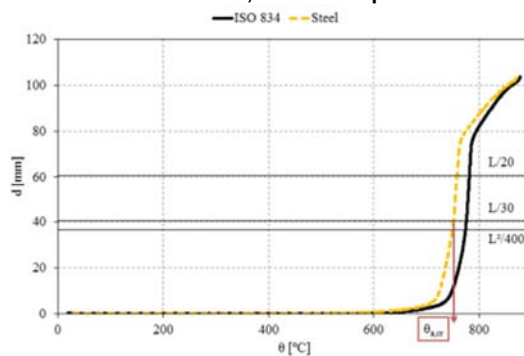


Gráfico V.89 – Deslocamento versus temperatura.

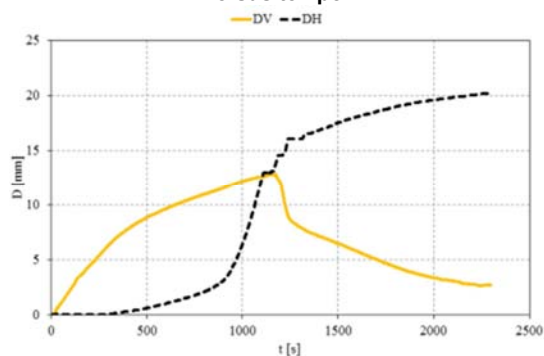


Gráfico V.90 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

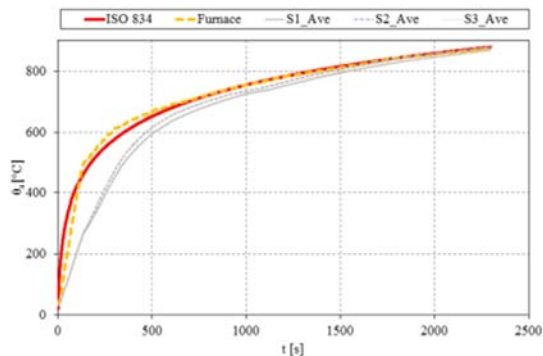


Gráfico V.91 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

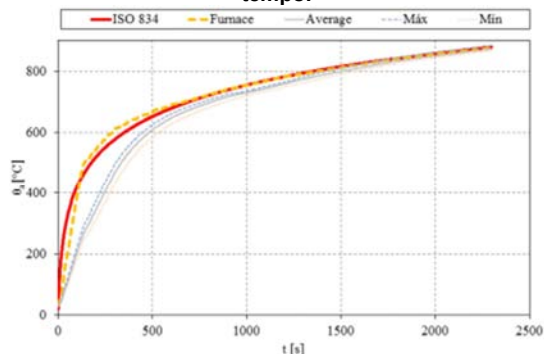


Gráfico V.92 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

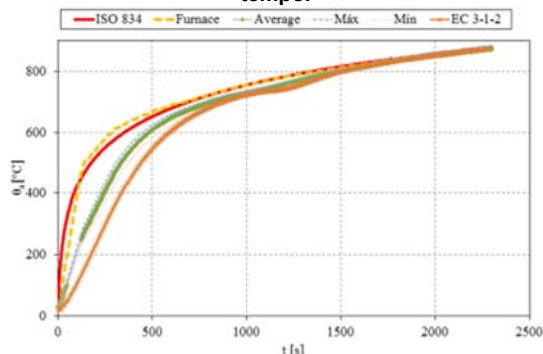


Gráfico V.93 – Temperatura da secção e temperatura prevista pelo EC 3-1-2, versus tempo.

Registos fotográficos:



Figura V.70 – Início do incêndio dentro do forno.



Figura V.71 – Elemento na sua fase de ruptura.

Comentários:

Durante o ensaio verificou-se uma rápida movimentação do ponto de aplicação da carga, no instante em que o elemento atingiu a sua ruptura por encurvadura lateral torsional.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	19	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
885	1143	1156	1202		751,20	29%	17%

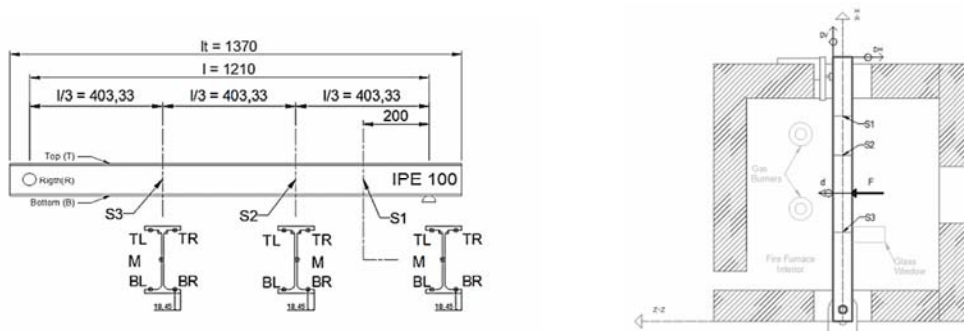
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico sem protecção
Nome do teste: I4
Data: 25 \ 07 \ 2010
Tipo de secção: IPE 100
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 9810 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: nenhuma
Espessura de protecção: 0,0 [mm]
Duração do ensaio: 34 [min]
Temperatura máxima registada: 841,88 [°C]

Descrição do ensaio:

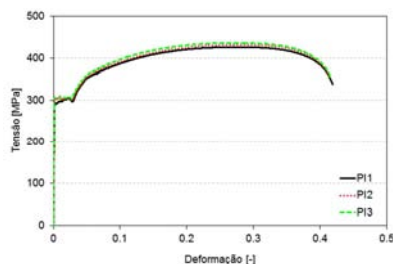
Ensaio de resistência ao fogo de elemento IPE 100, sem protecção, com a aplicação de carga, representando um estado de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, que define uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. A resistência nominal do elemento é de 9 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



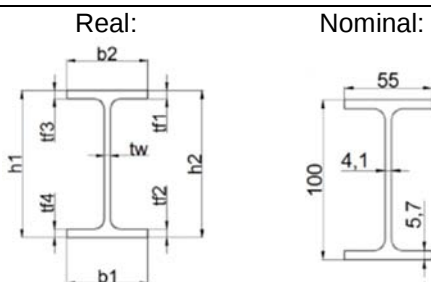
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provetes	E [Pa]	R _{p0.2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PI1	198,606	292,989	295,848	296,741	426,061	41,834
PI2	200,433	304,256	305,329	301,038	431,612	41,378
PI3	194,664	304,969	306,222	304,789	436,082	41,540
Média	197,901	300,738	302,466	300,856	431,252	41,584
Desv. Padrão	2,948	6,720	5,749	4,028	5,020	0,231



Propriedades da secção:

Leitura	Leituras em (mm)							
	h1	h2	b1	b2	tf1	tf2	tf3	tf4
1	101,90	102,40	55,30	55,00	5,25	5,51	5,66	5,50
2	101,90	101,90	55,60	54,60	5,62	5,50	5,62	5,28
3	101,80	102,10	55,00	54,40	5,70	5,53	5,70	5,34
4	102,00	102,20	53,60	55,00	5,77	5,48	5,77	5,43
Média	101,90	102,15	54,88	54,75	5,59	5,51	5,69	5,39
Desv pad	0,08	0,21	0,88	0,30	0,23	0,02	0,06	0,10
Máx	102,00	102,40	55,60	55,00	5,77	5,53	5,77	5,50
Mín	101,80	101,90	53,60	54,40	5,25	5,48	5,62	5,28
Média t	102,03		54,81			5,54		4,50
Desv pad t	0,20		0,62			0,16		0,12
Máx t	102,40		55,60			5,77		4,60
Mín t	101,80		53,60			5,25		4,40



Resultados:

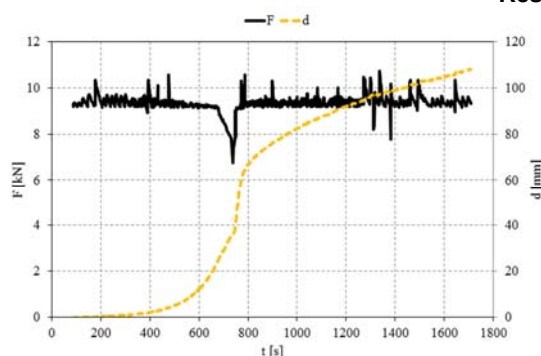


Gráfico V.94 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

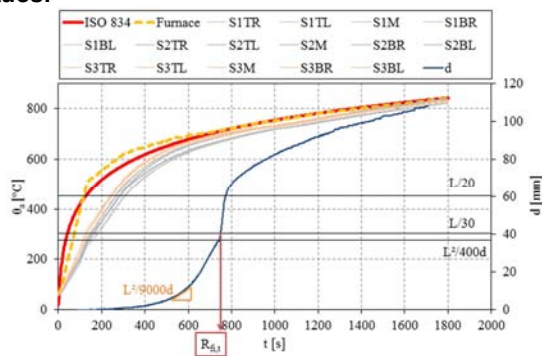


Gráfico V.95 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

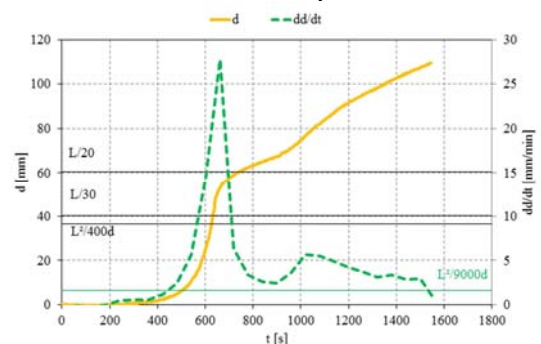


Gráfico V.96 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

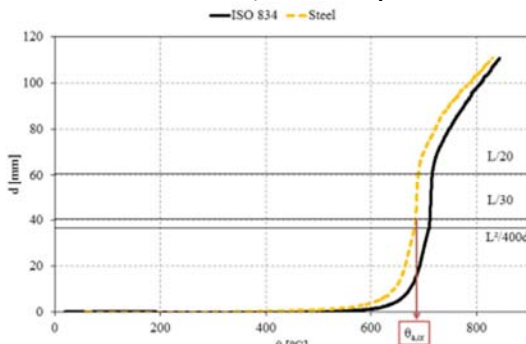


Gráfico V.97 – Deslocamento versus temperatura.

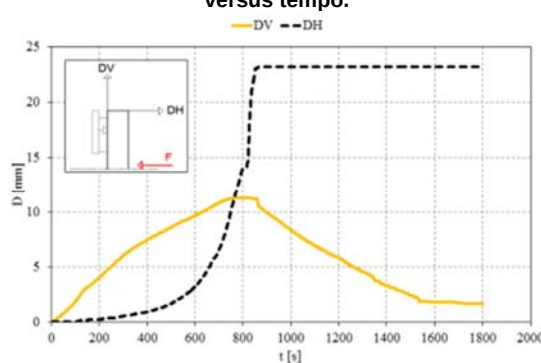


Gráfico V.98 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

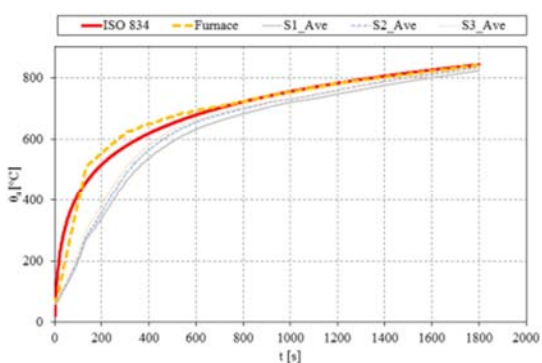


Gráfico V.99 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

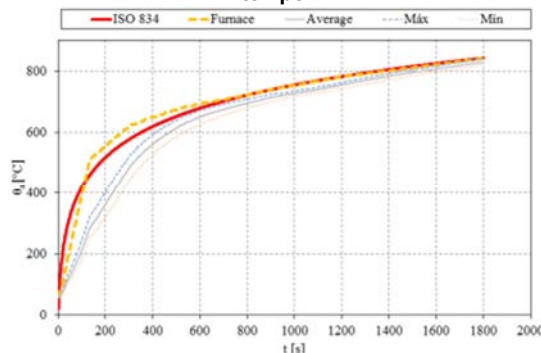


Gráfico V.100 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

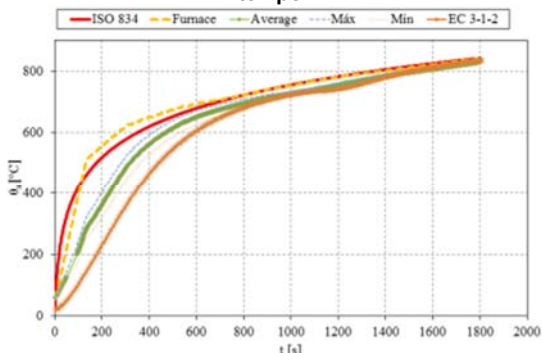


Gráfico V.101 – Temperatura da secção e temperatura prevista pelo EC 3-1-2, versus tempo.

Registos fotográficos:



Figura V.72 – Curva de fogo iniciado.



Figura V.73 – Elemento na sua fase de ruptura.



Figura V.74 – Final do ensaio.



Figura V.75 – Deformação imposta no elemento.

Comentários:

Durante o ensaio verificou-se uma rápida movimentação do ponto de aplicação da carga, no instante em que o elemento atingiu a sua ruptura por encurvadura lateral torsional.

Instante tempo [s]				Resistência do elemento:			
				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
$L^2/9000d$	$L^2/400d$	L/30	L/20	12	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
480	743	749	774		684,47	48%	26%

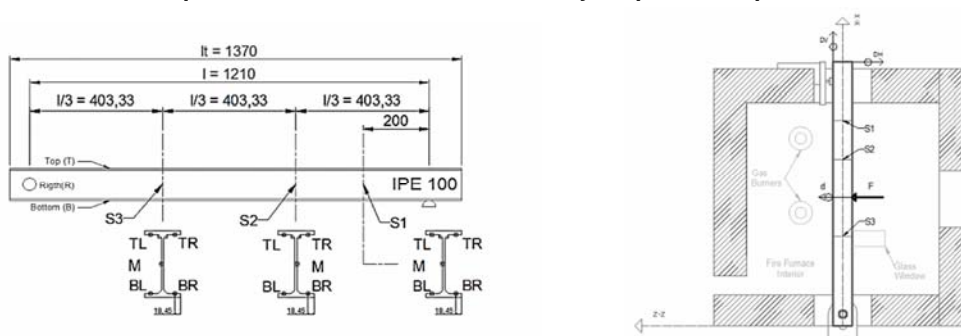
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico sem protecção
Nome do teste: I5
Data: 26 \ 07 \ 2010
Tipo de secção: IPE 100
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 12940 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: nenhuma
Espessura de protecção: 0,0 [mm]
Duração do ensaio: 30 [min]
Temperatura máxima registada: 827 [°C]

Descrição do ensaio:

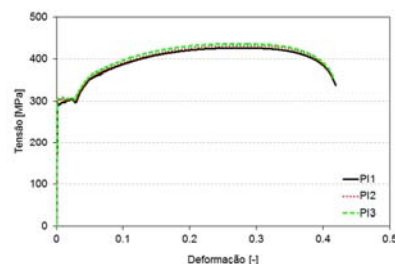
Ensaio de resistência ao fogo de elemento IPE 100, sem protecção, com a aplicação de carga, representando um estado de utilização nominal de $\mu_0=70\%$ segundo EN1993-1-2, que define uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=525,78^\circ\text{C}$. A resistência nominal do elemento é de 7 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



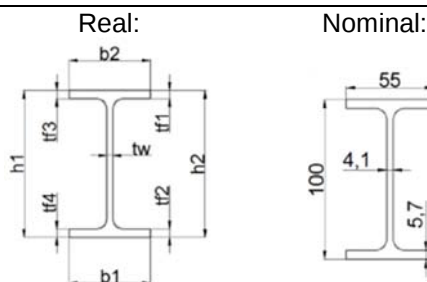
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete n°	E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
PI1	198,606	292,989	295,848	296,741	426,061	41,834
PI2	200,433	304,256	305,329	301,038	431,612	41,378
PI3	194,664	304,969	306,222	304,789	436,082	41,540
Média	197,901	300,738	302,466	300,856	431,252	41,584
Desv. Padrão	2,948	6,720	5,749	4,028	5,020	0,231



Propriedades da secção:

Leitura	Leituras em (mm)								
	h1	h2	b1	b2	tf1	tf2	tf3	tf4	tw
1	101,90	102,40	55,30	55,00	5,25	5,51	5,66	5,50	4,40
2	101,90	101,90	55,60	54,60	5,62	5,50	5,62	5,28	4,60
3	101,80	102,10	55,00	54,40	5,70	5,53	5,70	5,34	4,40
4	102,00	102,20	53,60	55,00	5,77	5,48	5,77	5,43	4,60
Média	101,90	102,15	54,88	54,75	5,59	5,51	5,69	5,39	4,50
Desv pad	0,08	0,21	0,88	0,30	0,23	0,02	0,06	0,10	0,12
Máx	102,00	102,40	55,60	55,00	5,77	5,53	5,77	5,50	4,60
Mín	101,80	101,90	53,60	54,40	5,25	5,48	5,62	5,28	4,40
Média t	102,03		54,81			5,54			4,50
Desv pad t	0,20		0,62			0,16			0,12
Máx t	102,40		55,60			5,77			4,60
Mín t	101,80		53,60			5,25			4,40



Resultados:

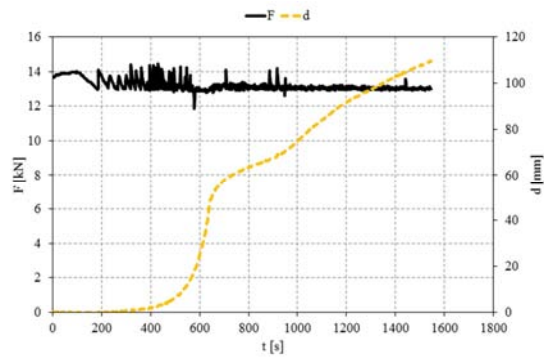


Gráfico V.102 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

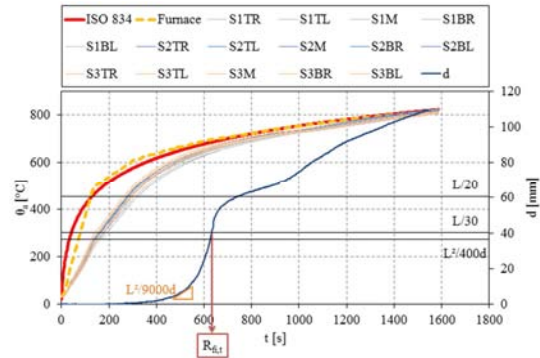


Gráfico V.103 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

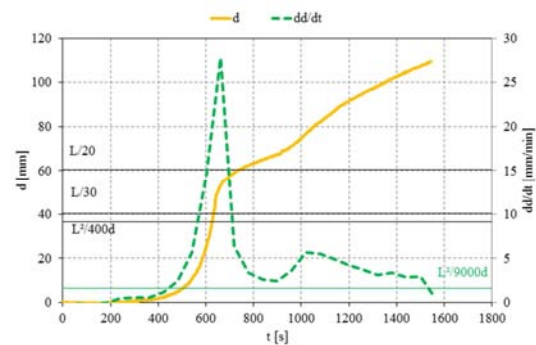


Gráfico V.104 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

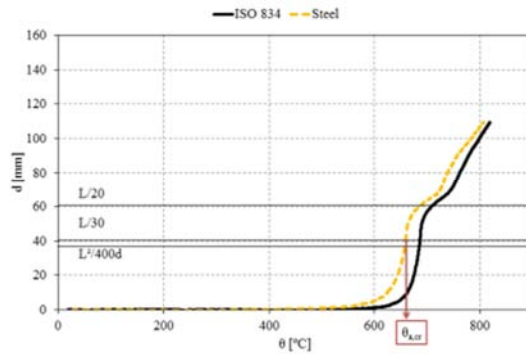


Gráfico V.105 – Deslocamento versus temperatura.

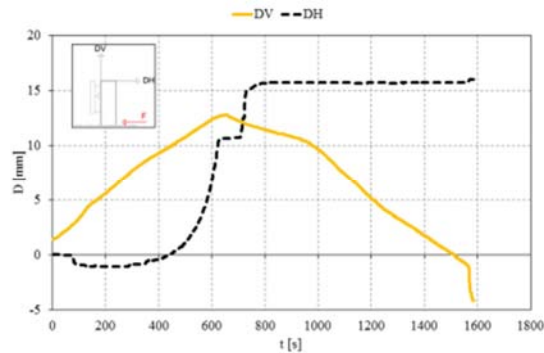


Gráfico V.106 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

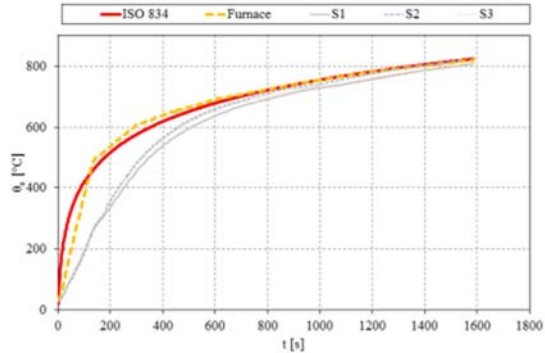


Gráfico V.107 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

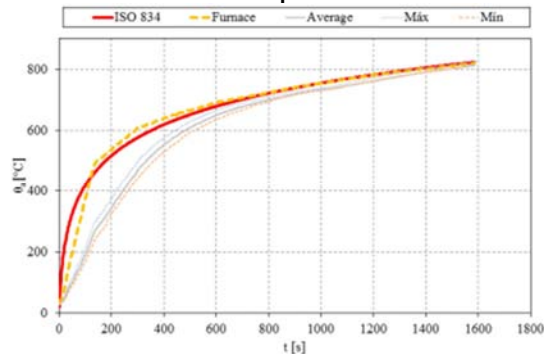


Gráfico V.108 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

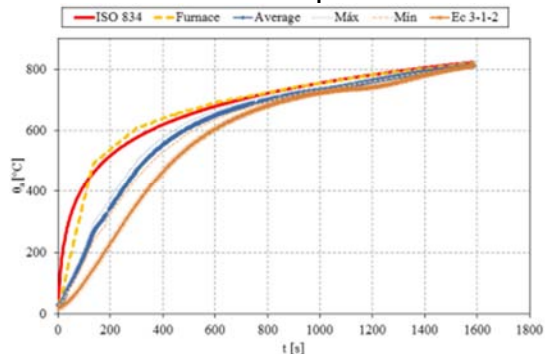


Gráfico V.109 – Temperatura da secção e temperatura prevista pelo EC 3-1-2, versus tempo.

Registos fotográficos:



Figura V.76 – Elemento dentro do forno.



Figura V.77 – Elemento pronto a iniciar o ensaio.

Comentários:

Durante o ensaio verificou-se uma rápida movimentação do ponto de aplicação da carga, no instante em que o elemento atingiu a sua ruptura por encurvadura lateral torsional.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	10	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
443	626	632	740		659,01	64%	31%

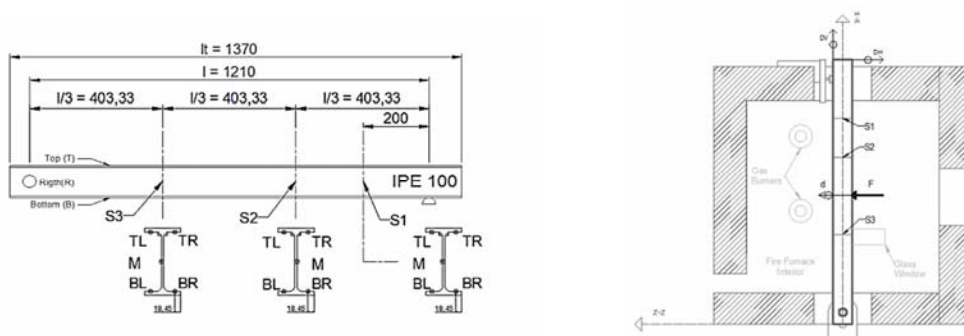
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: I6
Data: 17 \ 08 \ 2010
Tipo de secção: IPE 100
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 5340 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: Tinta intumescente
Espessura de protecção: 0,974 [mm]
Duração do ensaio: 64 [min]
Temperatura máxima registada: 947,28 [°C]

Descrição do ensaio:

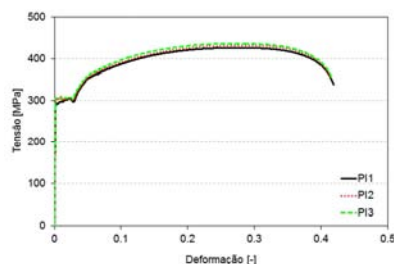
Ensaio de resistência ao fogo de elemento IPE 100, com aplicação de 1000 (μm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=30\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=663,78^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (I3), tem uma resistência ao fogo de 19 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



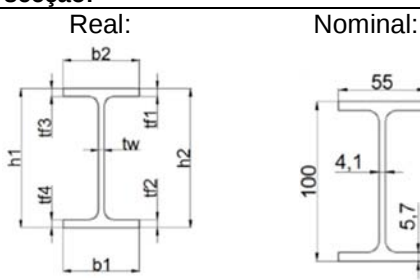
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provetes nº	E [GPa]	R _{p,0.2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A ₁ [%]
PI1	198,606	292,989	295,848	296,741	426,061	41,834
PI2	200,433	304,256	305,329	301,038	431,612	41,378
PI3	194,664	304,969	306,222	304,789	436,082	41,540
Média	197,901	300,738	302,466	300,856	431,252	41,584
Desv. Padrão	2,948	6,720	5,749	4,028	5,020	0,231



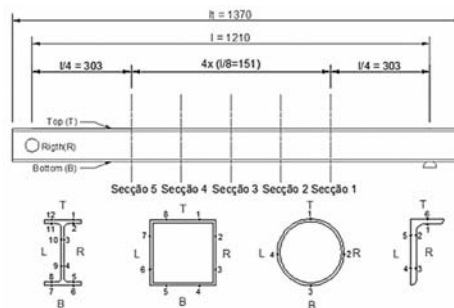
Propriedades da secção:

Leitura	Leituras em (mm)								
	h1	h2	b1	b2	tf1	tf2	tf3	tf4	tw
1	101,90	102,40	55,30	55,00	5,25	5,51	5,66	5,50	4,40
2	101,90	101,90	55,60	54,60	5,62	5,50	5,62	5,28	4,60
3	101,80	102,10	55,00	54,40	5,70	5,53	5,70	5,34	4,40
4	102,00	102,20	53,60	55,00	5,77	5,48	5,77	5,43	4,60
Média	101,90	102,15	54,88	54,75	5,59	5,51	5,69	5,39	4,50
Desv pad	0,08	0,21	0,88	0,30	0,23	0,02	0,06	0,10	0,12
Máx	102,00	102,40	55,60	55,00	5,77	5,53	5,77	5,50	4,60
Mín	101,80	101,90	53,60	54,40	5,25	5,48	5,62	5,28	4,40
Média t	102,03		54,81			5,54		4,50	
Desv pad t	0,20		0,62			0,16		0,12	
Máx t	102,40		55,60			5,77		4,60	
Mín t	101,80		53,60			5,25		4,40	



Propriedades da protecção [μm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1091	1092	991	1109	1166	1089,80	63,13	1166	991
2	766	852	839	852	664	794,60	81,29	852	664
3	1166	1178	985	1078	953	1072,00	102,27	1178	953
4	1230	1253	1089	1131	1182	1177,00	67,95	1253	1089
5	682	532	451	458	445	513,60	100,52	682	445
6	996	1171	987	1098	1097	1069,80	77,59	1171	987
7	1034	1106	939	1029	1039	1029,40	59,48	1106	939
8	992	907	1072	1194	881	1009,20	127,74	1194	881
9	987	1140	1071	1147	918	1052,60	99,13	1147	918
10	1001	1009	1003	1114	888	1003,00	79,98	1114	888
11	767	768	694	934	861	804,80	93,42	934	694
12	1023	1030	1066	1150	1115	1076,80	54,82	1150	1023
Média	977,92	1003,17	932,25	1024,50	934,08	974,38			
Desv pad	163,76	206,37	188,92	202,96	215,02		193,05		
Máx	1230	1253	1089	1194	1182			1253	
Mín	682	532	451	458	445				445



Resultados:

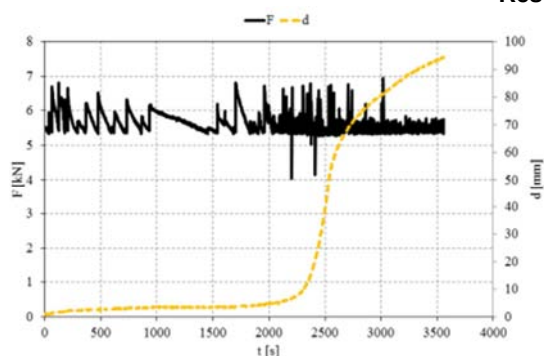


Gráfico V.110 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo,

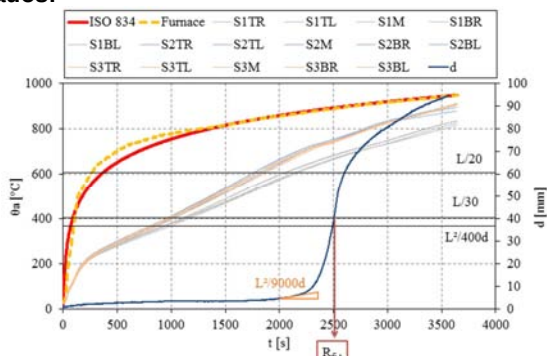


Gráfico V.111 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

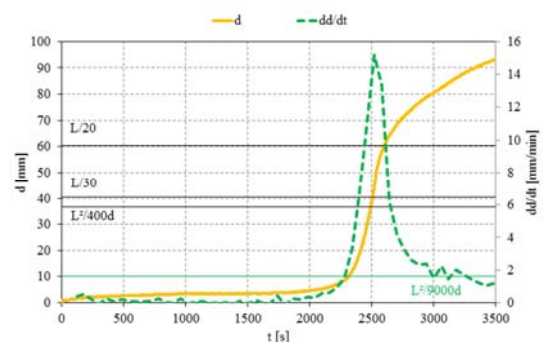


Gráfico V.112 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo,

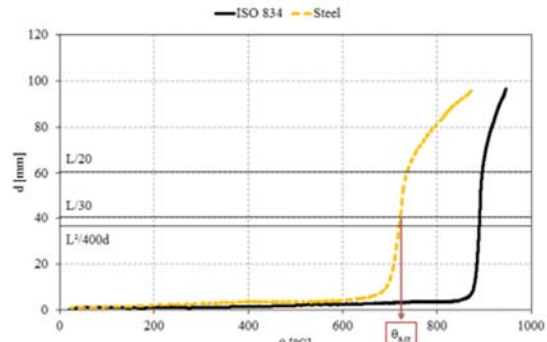


Gráfico V.113 – Deslocamento versus temperatura,

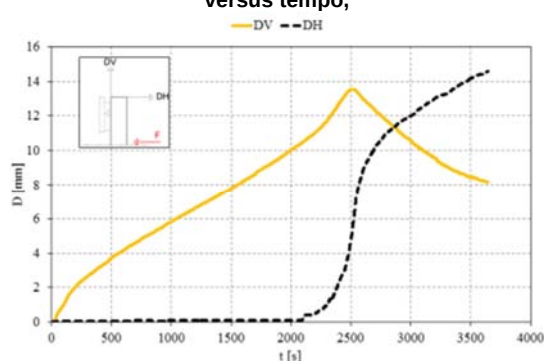


Gráfico V.114 – Deslocamento da extremidade, versus tempo,

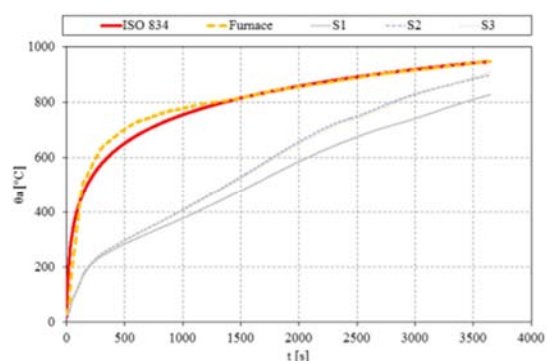


Gráfico V.115 – Temperatura média nas secções, versus tempo,

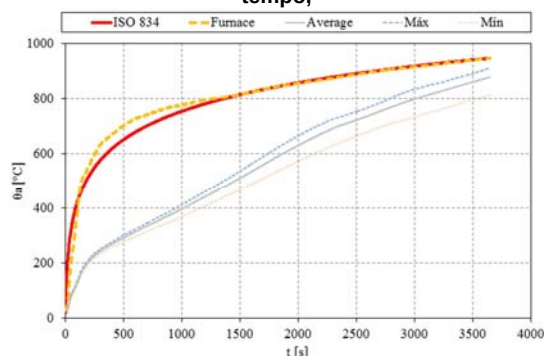


Gráfico V.7 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

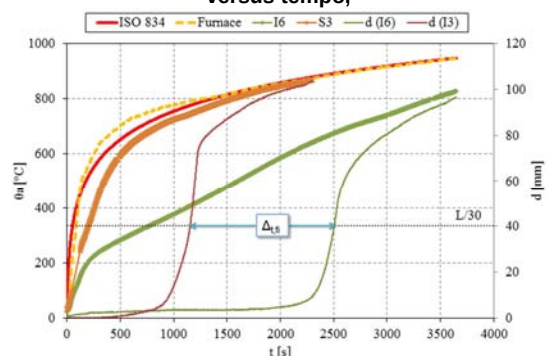


Gráfico V.7 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.78 – Elemento instalado nos apoios.



Figura V.79 – Elemento pronto para início de ensaio.



Figura V.80 – Final do ensaio com queimadores ligados.



Figura V.81 – Deformação final do elemento.



Figura V.82 – Início da reacção da protecção.



Figura V.83 – Formação da camada intumescente.



Figura V.84 – Camada intumescente formada.



Figura V.85 – Fase final do ensaio.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogénea da camada intumescente da protecção, registando-se depois uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por encurvadura lateral.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
$L^2/9000d$	$L^2/400d$	L/30	L/20			Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
2280	2491	2505	2601	41	Média do perfil	29%	20%
					722,71		

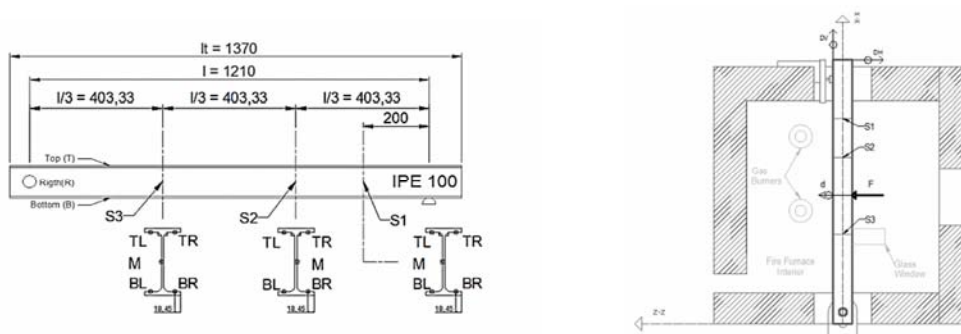
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: I7
Data: 18 \ 08 \ 2010
Tipo de secção: IPE 100
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 5340 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: Tinta intumescente
Espessura de protecção: 0,975 [mm]
Duração do ensaio: 70 [min]
Temperatura máxima registada: 947,24 [°C]

Descrição do ensaio:

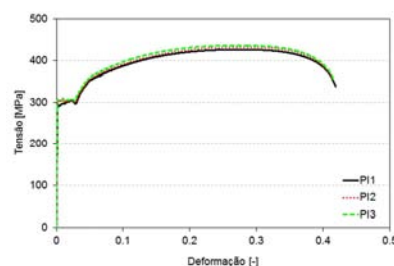
Ensaio de resistência ao fogo de elemento IPE 100, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=30\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=663,78^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (I3), tem uma resistência ao fogo de 19 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



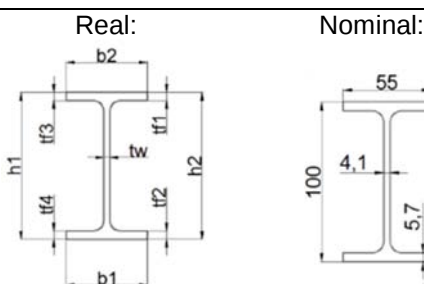
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provette n°	E [GPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
PI1	198,606	292,989	295,848	296,741	426,061	41,834
PI2	200,433	304,256	305,329	301,038	431,612	41,378
PI3	194,664	304,969	306,222	304,789	436,082	41,540
Média	197,901	300,738	302,466	300,856	431,252	41,584
Desv. Padrão	2,948	6,720	5,749	4,028	5,020	0,231



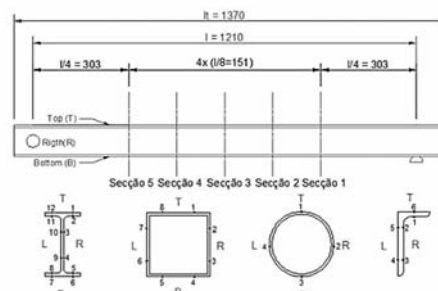
Propriedades da secção:

Leitura	Leituras em (mm)									
	h1	h2	b1	b2	tf1	tf2	tf3	tf4	tw	tfw
1	101,90	102,40	55,30	55,00	5,25	5,51	5,66	5,50	4,40	4,40
2	101,90	101,90	55,60	54,60	5,62	5,50	5,62	5,28	4,60	4,60
3	101,80	102,10	55,00	54,40	5,70	5,53	5,70	5,34	4,40	4,40
4	102,00	102,20	53,60	55,00	5,77	5,48	5,77	5,43	4,60	4,60
Média	101,90	102,15	54,88	54,75	5,59	5,51	5,69	5,39	4,50	4,50
Desv pad	0,08	0,21	0,88	0,30	0,23	0,02	0,06	0,10	0,12	0,12
Máx	102,00	102,40	55,60	55,00	5,77	5,53	5,77	5,50	4,60	4,60
Mín	101,80	101,90	53,60	54,40	5,25	5,48	5,62	5,28	4,40	4,40
Média t	102,03		54,81			5,54			4,50	
Desv pad t	0,20		0,62			0,16			0,12	
Máx t	102,40		55,60			5,77			4,60	
Mín t	101,80		53,60			5,25			4,40	



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	2	S3	4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1043	1066	932	984	994	1003,80	52,56	1066	932
2	903	881	890	1141	859	934,80	116,38	1141	859
3	1002	1017	1055	1287	909	1054,00	140,88	1287	909
4	1121	892	1124	1175	1081	1078,60	109,52	1175	892
5	683	576	592	664	591	621,20	48,63	683	576
6	1067	1008	1090	1107	1040	1062,40	39,48	1107	1008
7	1003	978	973	1031	1025	1002,00	26,40	1031	973
8	1042	1230	1048	1173	1123	1123,20	80,83	1230	1042
9	1214	1211	991	1273	968	1131,40	141,09	1273	968
10	980	1069	1002	1009	935	999,00	48,65	1069	935
11	654	710	720	794	671	709,80	54,34	794	654
12	942	945	937	1088	976	977,60	63,58	1088	937
Média	971,17	965,25	946,17	1060,50	931,00	974,82			
Desv pad	162,91	187,23	153,86	183,21	158,50		170,03		
Máx	1214	1230	1124	1287	1123			1287	
Mín	654	576	592	664	591				576



Resultados:

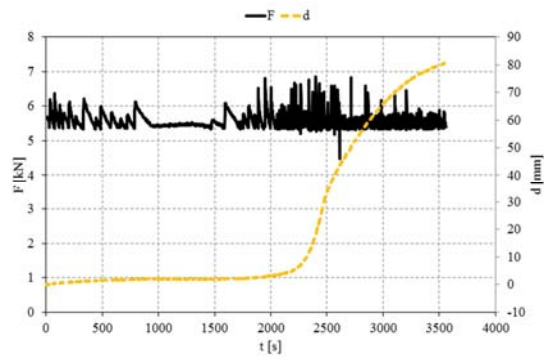


Gráfico V.116 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo,

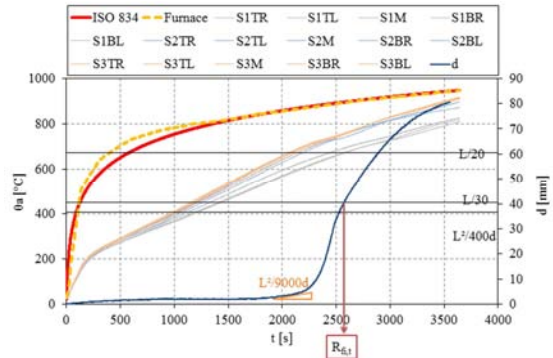


Gráfico V.117 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

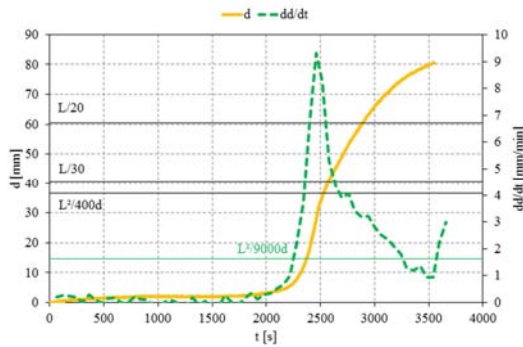


Gráfico V.118 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo,

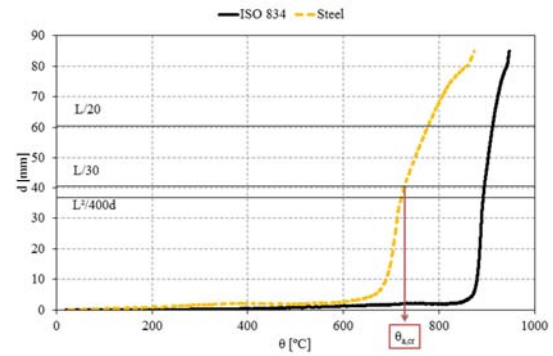


Gráfico V.119 – Deslocamento versus temperatura,

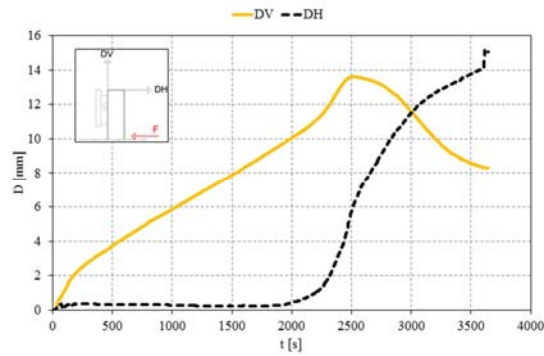


Gráfico V.120 – Deslocamento da extremidade, versus tempo,

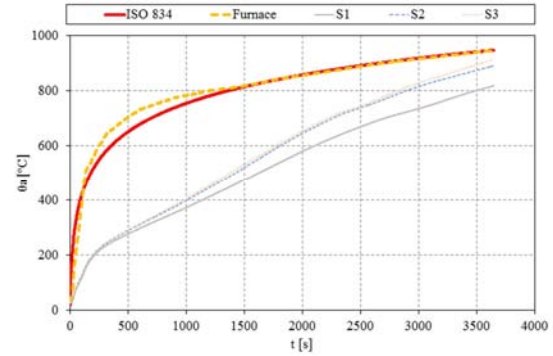


Gráfico V.121 – Temperatura média nas secções, versus tempo,

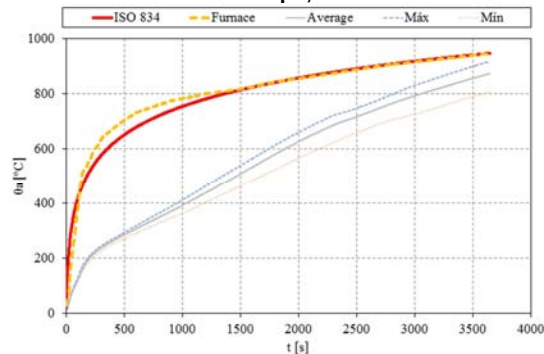


Gráfico V.7 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

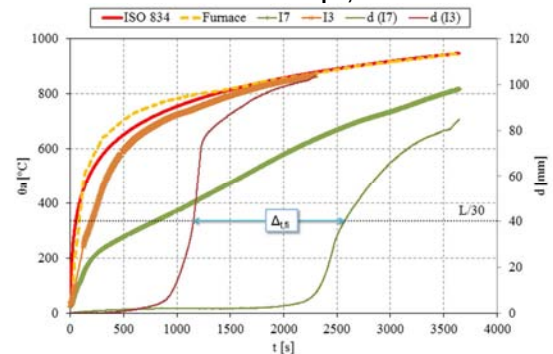


Gráfico V.7 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:

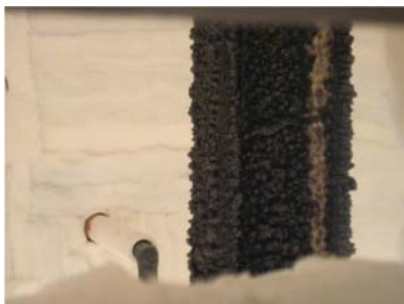


Figura II.86 – Formação da camada intumescente.



Figura II.87 – Camada intumescente formada.

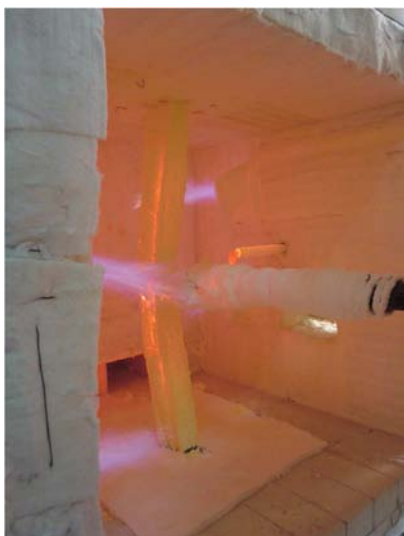


Figura V.88 – Ensaio terminado, ainda com os queimadores do forno ligados.



Figura V.89 – Deformação final do elemento.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogénea da camada intumescente da protecção, registando-se depois uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por encurvadura lateral.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
$L^2/9000d$	$L^2/400d$	L/30	L/20	42	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
2251	2530	2570	2892		727,57	29%	20%

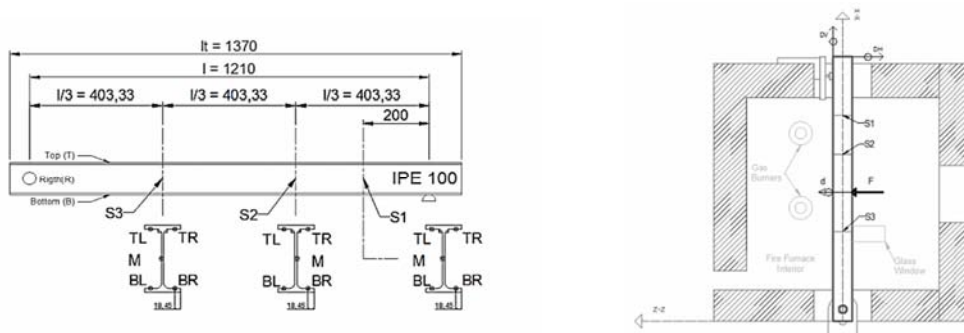
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: I8
Data: 18 \ 08 \ 2010
Tipo de secção: IPE 100
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 9180 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: Tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,012 [mm]
Duração do ensaio: 57 [min]
Temperatura máxima registada: 927,73 [°C]

Descrição do ensaio:

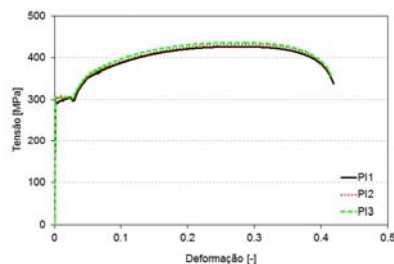
Ensaio de resistência ao fogo de elemento IPE 100, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (I4), tem uma resistência ao fogo de 12 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



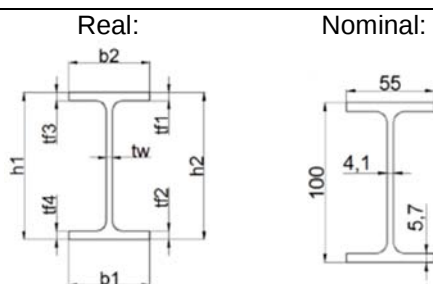
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Proveite nº	E [GPa]	$R_{p,0.2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
PI1	198,606	292,989	295,848	296,741	426,061	41,834
PI2	200,433	304,256	305,329	301,038	431,612	41,378
PI3	194,664	304,969	306,222	304,789	436,082	41,540
Média	197,901	300,738	302,466	300,856	431,252	41,584
Desv. Padrão	2,948	6,720	5,749	4,028	5,020	0,231



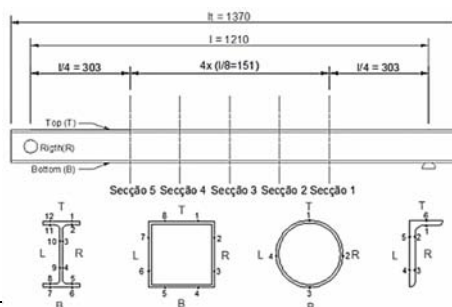
Propriedades da secção:

Leitura	Leituras em (mm)								
	h1	h2	b1	b2	tf1	tf2	tf3	tf4	tw
1	101,90	102,40	55,30	55,00	5,25	5,51	5,66	5,50	4,40
2	101,90	101,90	55,60	54,60	5,62	5,50	5,62	5,28	4,60
3	101,80	102,10	55,00	54,40	5,70	5,53	5,70	5,34	4,40
4	102,00	102,20	53,60	55,00	5,77	5,48	5,77	5,43	4,60
Média	101,90	102,15	54,88	54,75	5,59	5,51	5,69	5,39	4,50
Desv pad	0,08	0,21	0,88	0,30	0,23	0,02	0,06	0,10	0,12
Máx	102,00	102,40	55,60	55,00	5,77	5,53	5,77	5,50	4,60
Mín	101,80	101,90	53,60	54,40	5,25	5,48	5,62	5,28	4,40
Média t	102,03		54,81			5,54			4,50
Desv pad t	0,20		0,62			0,16			0,12
Máx t	102,40		55,60			5,77			4,60
Mín t	101,80		53,60			5,25			4,40



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1053	1090	1128	1104	1032	1081,40	38,74	1128	1032
2	1015	1113	1065	1189	1125	1101,40	65,49	1189	1015
3	1191	1134	1120	1342	1076	1172,60	103,23	1342	1076
4	1091	1118	1129	1306	1176	1164,00	85,11	1306	1091
5	628	698	887	806	738	751,40	99,53	887	628
6	840	1063	1040	1086	1178	1041,40	124,18	1178	840
7	886	971	1264	1043	1194	1071,60	156,03	1264	886
8	925	1001	849	1036	969	956,00	72,46	1036	849
9	1042	1037	990	1169	1056	1058,80	66,41	1169	990
10	976	1086	976	1145	874	1011,40	105,83	1145	874
11	573	616	560	630	599	595,60	29,11	630	560
12	1124	1180	1175	1131	1071	1136,20	44,30	1180	1071
Média	945,33	1008,92	1015,25	1082,25	1007,33	1011,82			
Desv pad	189,40	174,88	186,02	197,20	185,01		185,45		
Máx	1191	1180	1264	1342	1194			1342	
Mín	573	616	560	630	599				560



Resultados:

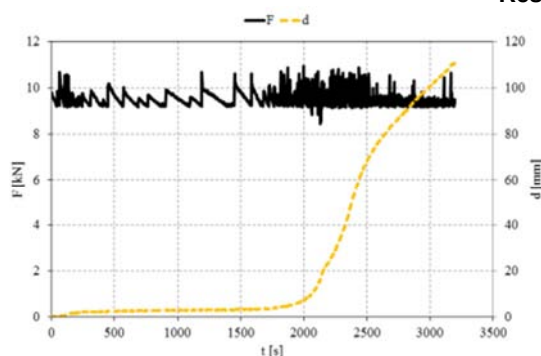


Gráfico V.122 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo,

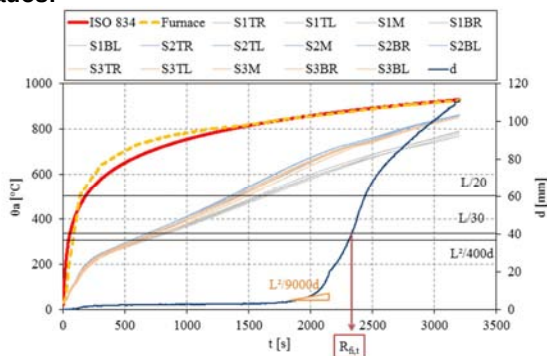


Gráfico V.123 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

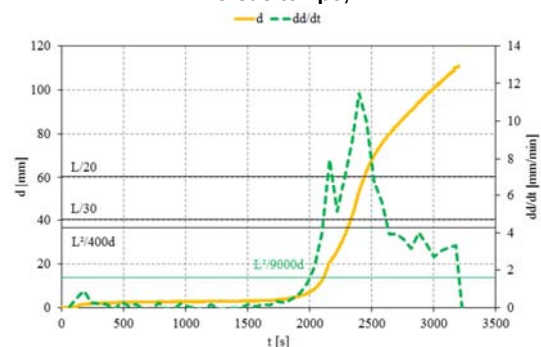


Gráfico V.124 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo,

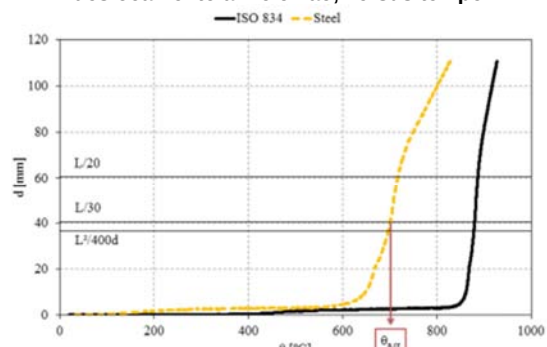


Gráfico V.125 – Deslocamento versus temperatura,

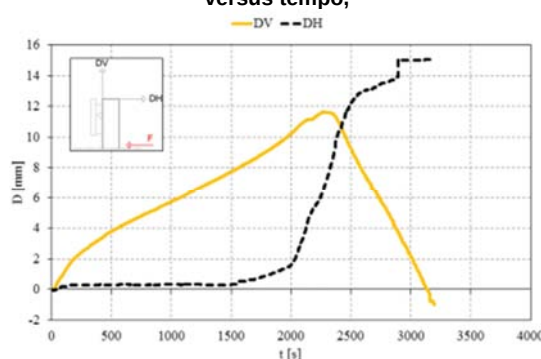


Gráfico V.126 – Deslocamento da extremidade, versus tempo,

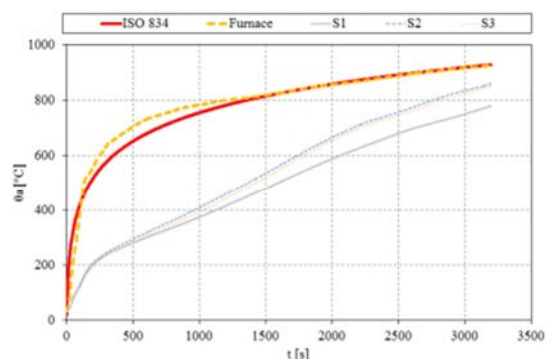


Gráfico V.127 – Temperatura média nas secções, versus tempo,

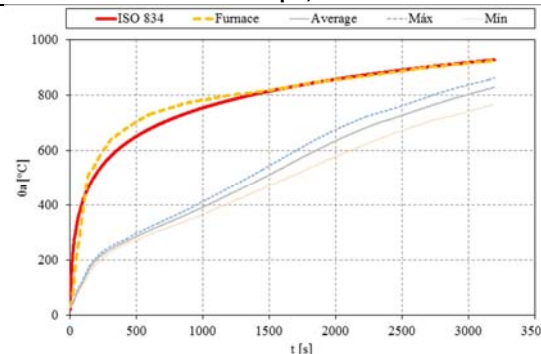


Gráfico V.7 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

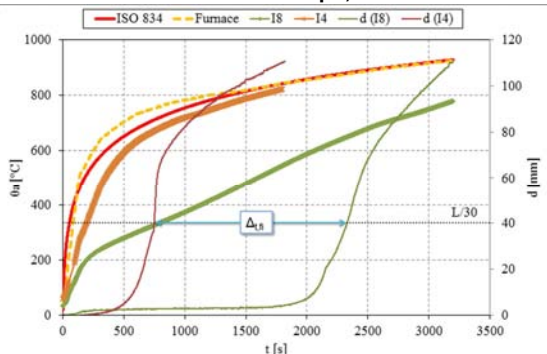


Gráfico V.7 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.90 – Camada intumescente formada.



Figura V.91 – Fase final do ensaio.



Figura V.92 – Ensaio terminado, ainda com os queimadores do forno ligados.



Figura V.93 – Deformação sofrida pelo elemento.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogênea da camada intumescente da protecção, registando-se depois uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por encurvadura lateral.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
$L^2/9000d$	$L^2/400d$	L/30	L/20	38	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
2162	2306	2331	2441		701,02	47,7%	23%

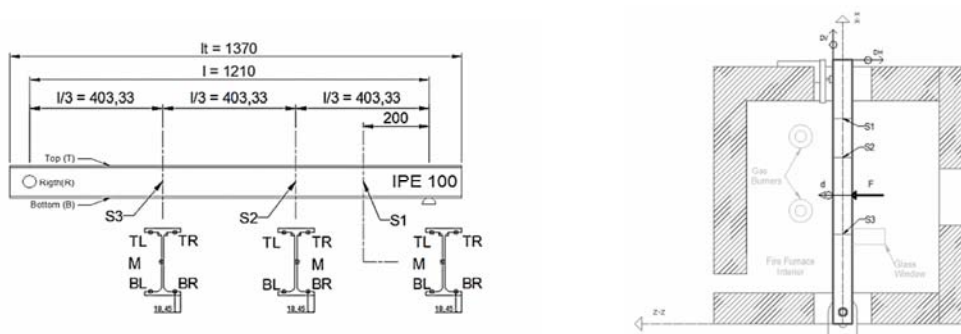
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: I9
Data: 19 \ 08 \ 2010
Tipo de secção: IPE 100
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 9180 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: Tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,055 [mm]
Duração do ensaio: 60 [min]
Temperatura máxima registada: 933,55 [°C]

Descrição do ensaio:

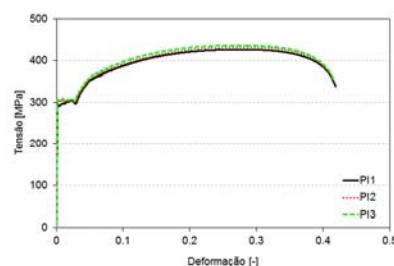
Ensaio de resistência ao fogo de elemento IPE 100, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (I4), tem uma resistência ao fogo de 12 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



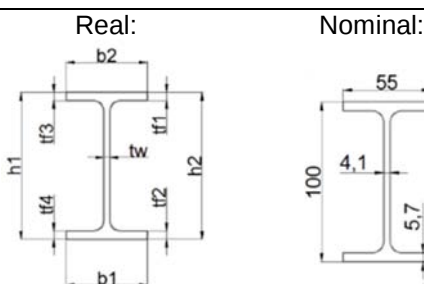
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete n°	E [GPa]	R _{p0.2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PI1	198,606	292,989	295,848	296,741	426,061	41,834
PI2	200,433	304,256	305,329	301,038	431,612	41,378
PI3	194,664	304,969	306,222	304,789	436,082	41,540
Média	197,901	300,738	302,466	300,856	431,252	41,584
Desv. Padrão	2,948	6,720	5,749	4,028	5,020	0,231



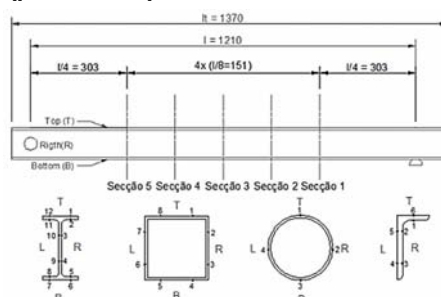
Propriedades da secção:

Leitura	Leituras em (mm)								
	h1	h2	b1	b2	tf1	tf2	tf3	tf4	tw
1	101,90	102,40	55,30	55,00	5,25	5,51	5,66	5,50	4,40
2	101,90	101,90	55,60	54,60	5,62	5,50	5,62	5,28	4,60
3	101,80	102,10	55,00	54,40	5,70	5,53	5,70	5,34	4,40
4	102,00	102,20	53,60	55,00	5,77	5,48	5,77	5,43	4,60
Média	101,90	102,15	54,88	54,75	5,59	5,51	5,69	5,39	4,50
Desv pad	0,08	0,21	0,88	0,30	0,23	0,02	0,06	0,10	0,12
Máx	102,00	102,40	55,60	55,00	5,77	5,53	5,77	5,50	4,60
Mín	101,80	101,90	53,60	54,40	5,25	5,48	5,62	5,28	4,40
Média t	102,03		54,81		5,54		4,50		
Desv pad t	0,20		0,62		0,16		0,12		
Máx t	102,40		55,60		5,77		4,60		
Mín t	101,80		53,60		5,25		4,40		



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	985	1079	1137	114	1046	1078,80	66,92	1147	985
2	888	902	946	1017	958	942,20	51,02	1017	888
3	1029	1041	1132	1208	1167	1115,40	78,28	1208	1029
4	1158	1113	1127	1238	1136	1154,40	49,51	1238	1113
5	893	803	1011	1076	964	949,40	105,65	1076	803
6	1034	1131	1062	1044	1138	1081,80	49,21	1138	1034
7	1093	1168	1078	1056	1092	1097,40	42,20	1168	1056
8	652	731	490	513	574	592,00	99,86	731	490
9	1247	1347	1344	1211	1147	1259,20	86,55	1347	1147
10	1371	1528	1315	1473	1261	1389,60	110,18	1528	1261
11	1064	1084	1024	1085	810	1013,40	116,36	1085	810
12	905	1038	1014	1068	883	981,60	82,59	1068	883
Média	1026,58	1080,42	1056,67	1094,67	1014,67	1054,60			
Desv pad	186,89	216,78	214,30	222,05	190,09		201,78		
Máx	1371	1528	1344	1473	1261			1528	
Mín	652	731	490	513	574				490



Resultados:

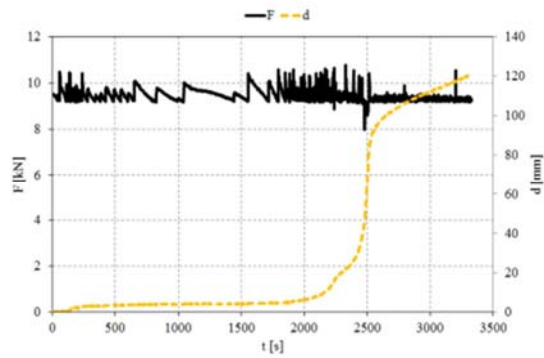


Gráfico V.128 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo,

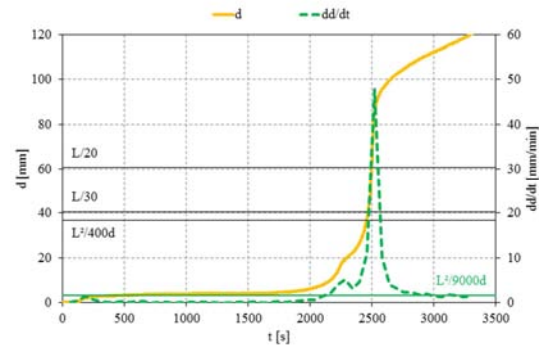


Gráfico V.130 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo,

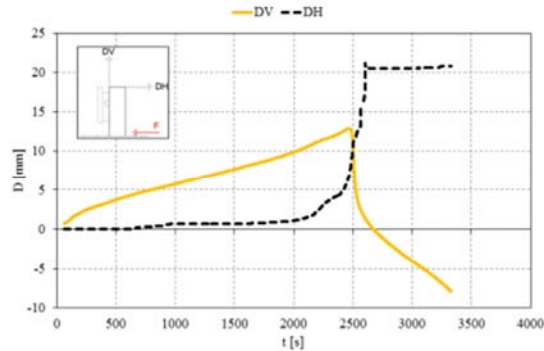


Gráfico V.132 – Deslocamento da extremidade, versus tempo,

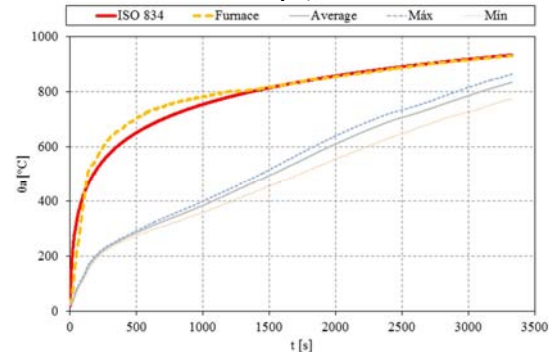


Gráfico V.7 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

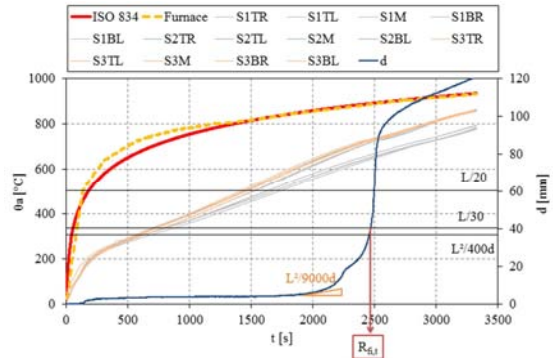


Gráfico V.129 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

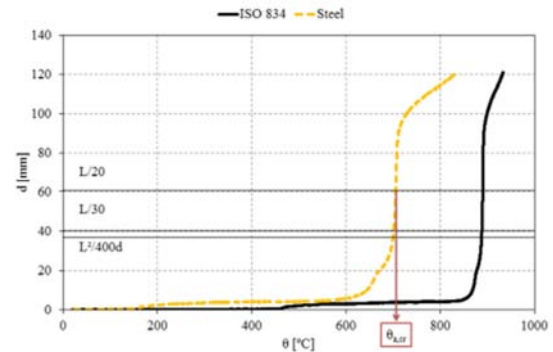


Gráfico V.131 – Deslocamento versus temperatura,

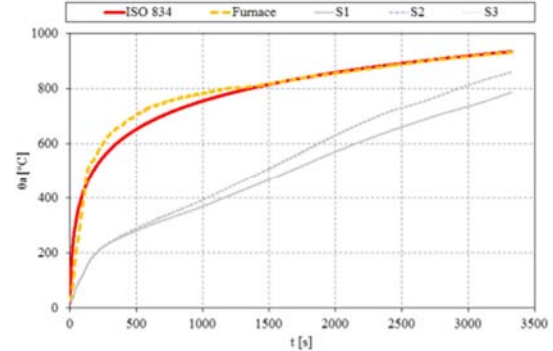


Gráfico V.133 – Temperatura média nas secções, versus tempo,

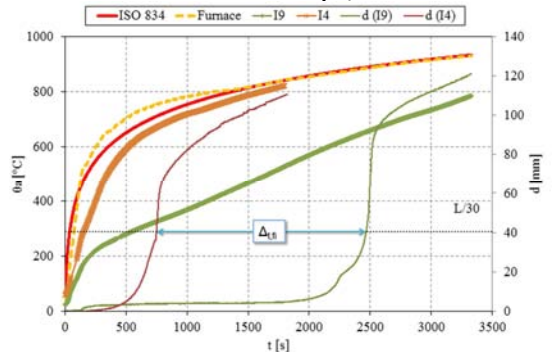


Gráfico V.7 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogénea da camada intumescente da protecção, registando-se depois uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por encurvadura lateral.

Resistência do elemento:							
Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	41	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
2201	2455	2467	2496		701,88	47,7%	23%

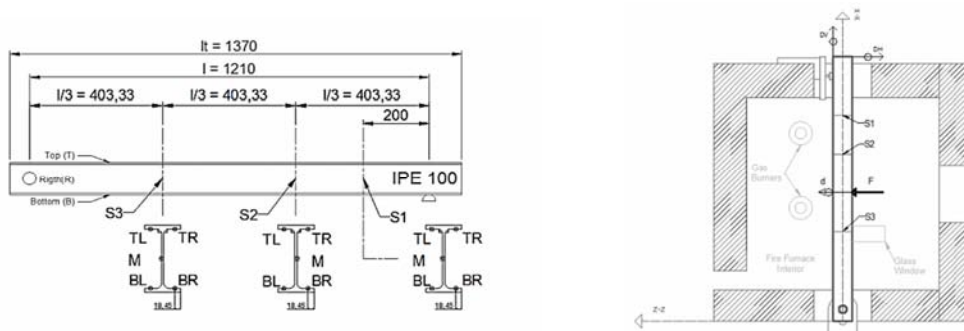
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: I10
Data: 19 \ 08 \ 2010
Tipo de secção: IPE 100
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 12940 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: Tinta intumescente
Espessura de protecção: 0,998 [mm]
Duração do ensaio: 52 [min]
Temperatura máxima registada: 910,89 [°C]

Descrição do ensaio:

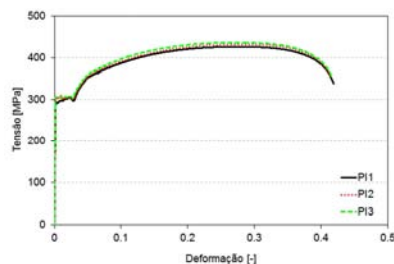
Ensaio de resistência ao fogo de elemento IPE 100, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=70\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=525,78^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (I5), tem uma resistência ao fogo de 10 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



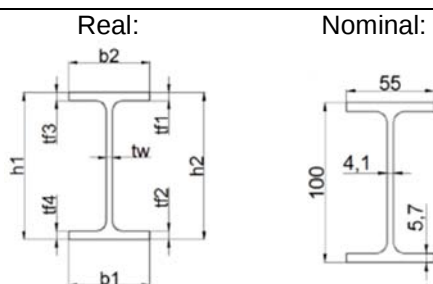
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provede n°	E [GPa]	R _{p,0.2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PI1	198,606	292,989	295,848	296,741	426,061	41,834
PI2	200,433	304,256	305,329	301,038	431,612	41,378
PI3	194,664	304,969	306,222	304,789	436,082	41,540
Média	197,901	300,738	302,466	300,856	431,252	41,584
Desv. Padrão	2,948	6,720	5,749	4,028	5,020	0,231



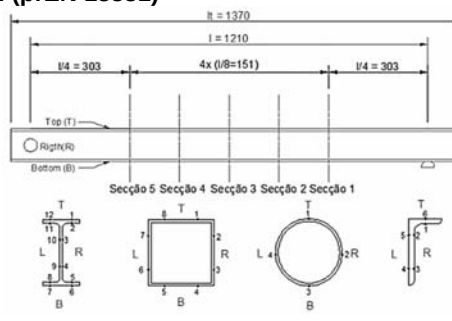
Propriedades da secção:

Leitura	Leituras em (mm)								
	h1	h2	b1	b2	tf1	tf2	tf3	tf4	tw
1	101,90	102,40	55,30	55,00	5,25	5,51	5,66	5,50	4,40
2	101,90	101,90	55,60	54,60	5,62	5,50	5,62	5,28	4,60
3	101,80	102,10	55,00	54,40	5,70	5,53	5,70	5,34	4,40
4	102,00	102,20	53,60	55,00	5,77	5,48	5,77	5,43	4,60
Média	101,90	102,15	54,88	54,75	5,59	5,51	5,69	5,39	4,50
Desv pad	0,08	0,21	0,88	0,30	0,23	0,02	0,06	0,10	0,12
Máx	102,00	102,40	55,60	55,00	5,77	5,53	5,77	5,50	4,60
Mín	101,80	101,90	53,60	54,40	5,25	5,48	5,62	5,28	4,40
Média t	102,03		54,81			5,54			4,50
Desv pad t	0,20		0,62			0,16			0,12
Máx t	102,40		55,60			5,77			4,60
Mín t	101,80		53,60			5,25			4,40



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1129	1060	1102	111	1233	1127,60	64,27	1233	1060
2	952	1000	871	931	811	913,00	73,45	1000	811
3	983	1122	941	1197	917	1032,00	121,69	1197	917
4	1085	1038	1096	1166	1268	1130,60	89,42	1268	1038
5	653	735	695	782	700	713,00	48,32	782	653
6	1034	1040	1050	1078	1047	1049,80	16,95	1078	1034
7	1034	1131	1025	1091	1089	1074,00	44,06	1131	1025
8	861	985	800	967	830	888,60	82,89	985	800
9	1026	1046	1038	1161	1015	1057,20	59,21	1161	1015
10	936	1054	1039	1096	946	1014,20	70,10	1096	936
11	791	805	686	839	1041	832,40	129,86	1041	686
12	1056	1076	1225	1137	1223	1143,40	79,40	1225	1056
Média	961,67	1007,67	964,00	1046,58	1010,00	997,98			
Desv pad	135,67	119,57	168,56	135,14	178,66		147,59		
Máx	1129	1131	1225	1197	1268			1268	
Mín	653	735	686	782	700				653



Resultados:

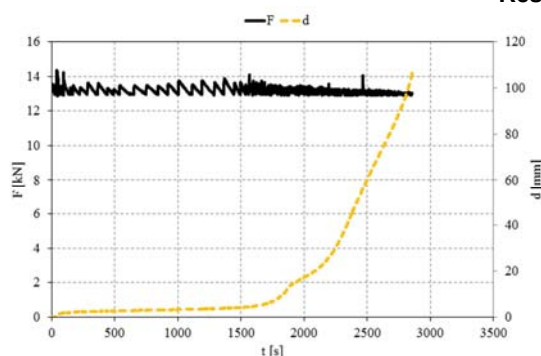


Gráfico V.134 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo,

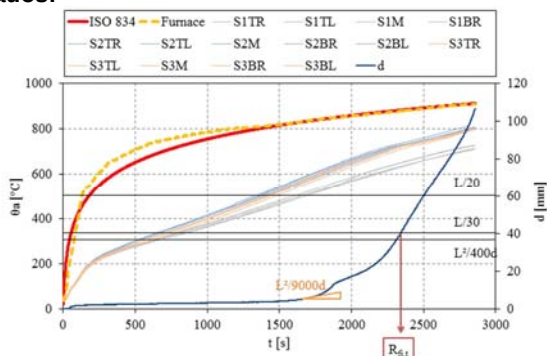


Gráfico V.135 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

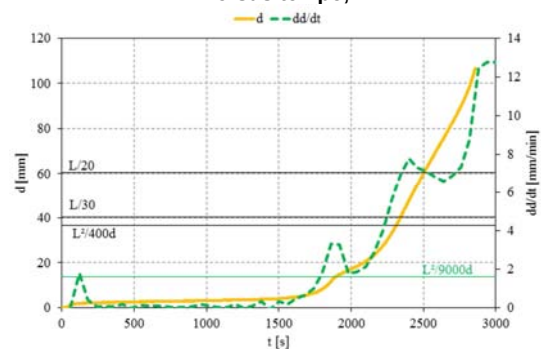


Gráfico V.136 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo,

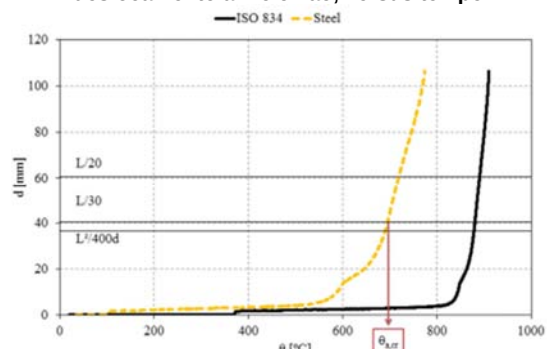


Gráfico V.137 – Deslocamento versus temperatura,

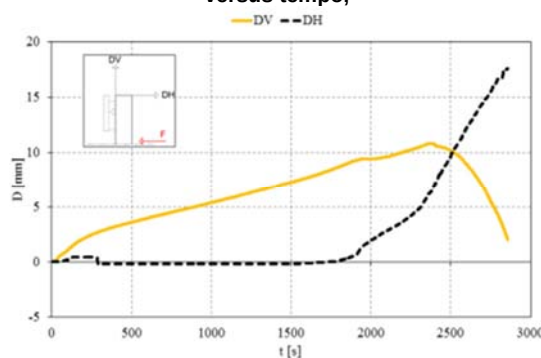


Gráfico V.138 – Deslocamento da extremidade, versus tempo,

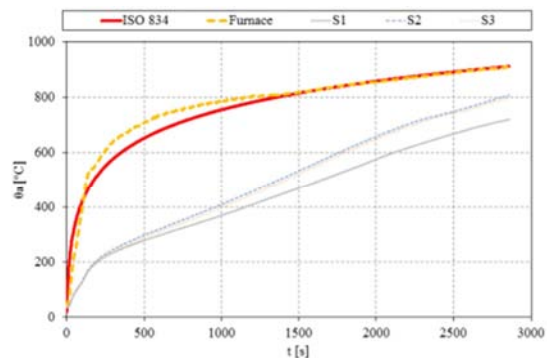


Gráfico V.139 – Temperatura média nas secções, versus tempo,

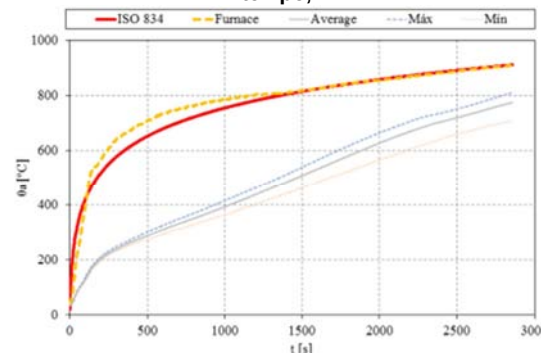


Gráfico V.7 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

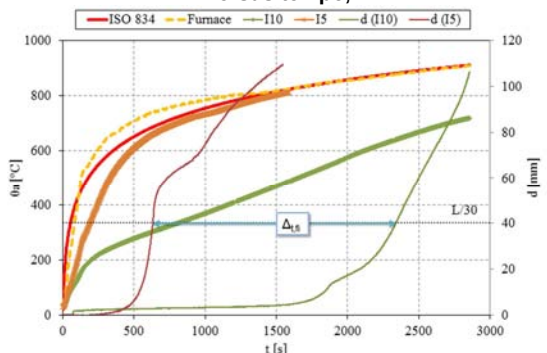


Gráfico V.7 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.94 – Fase inicial da curva de fogo.



Figura V.95 – Início da Reacção da protecção.



Figura V.96 – Ensaio terminado, ainda com os queimadores ligados.



Figura V.97 – Deformação do elemento após o final de ensaio.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogênea da camada intumescente da protecção, registando-se depois uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por encurvadura lateral.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	39	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
1787	2312	2341	2504		695,31	64,4%	24%

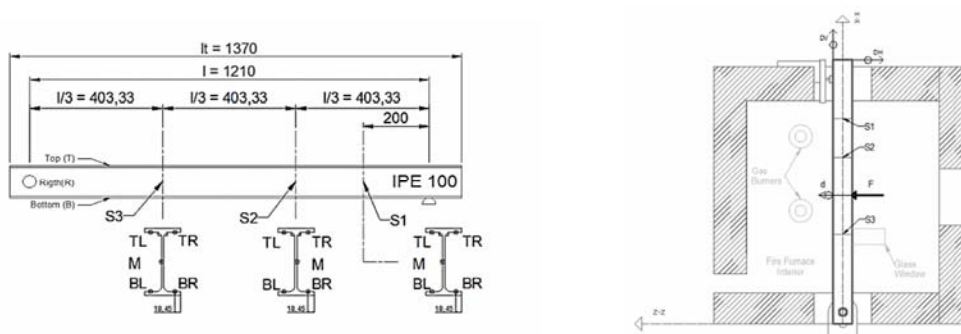
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: I11
Data: 24 \ 08 \ 2010
Tipo de secção: IPE 100
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 12940 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: Tinta intumescente
Espessura de protecção: 0,989 [mm]
Duração do ensaio: 47 [min]
Temperatura máxima registada: 891,74 [°C]

Descrição do ensaio:

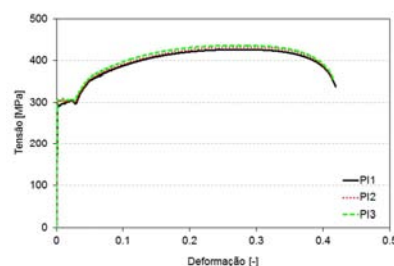
Ensaio de resistência ao fogo de elemento IPE 100, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=70\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=525,78^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (I5), tem uma resistência ao fogo de 10 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



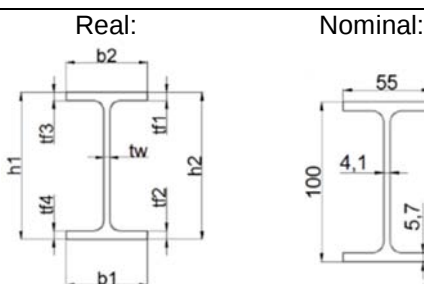
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete n°	E [GPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
PI1	198,606	292,989	295,848	296,741	426,061	41,834
PI2	200,433	304,256	305,329	301,038	431,612	41,378
PI3	194,664	304,969	306,222	304,789	436,082	41,540
Média	197,901	300,738	302,466	300,856	431,252	41,584
Desv. Padrão	2,948	6,720	5,749	4,028	5,020	0,231



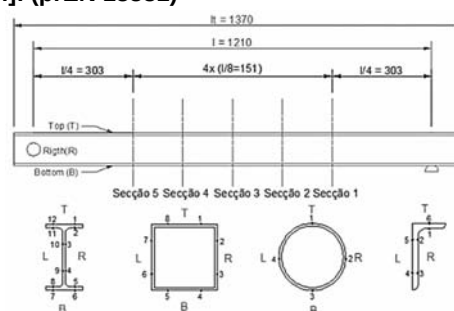
Propriedades da secção:

Leitura	Leituras em (mm)									
	h1	h2	b1	b2	tf1	tf2	tf3	tf4	tw	tfw
1	101,90	102,40	55,30	55,00	5,25	5,51	5,66	5,50	4,40	4,40
2	101,90	101,90	55,60	54,60	5,62	5,50	5,62	5,28	4,60	4,60
3	101,80	102,10	55,00	54,40	5,70	5,53	5,70	5,34	4,40	4,40
4	102,00	102,20	53,60	55,00	5,77	5,48	5,77	5,43	4,60	4,60
Média	101,90	102,15	54,88	54,75	5,59	5,51	5,69	5,39	4,50	4,50
Desv pad	0,08	0,21	0,88	0,30	0,23	0,02	0,06	0,10	0,12	0,12
Máx	102,00	102,40	55,60	55,00	5,77	5,53	5,77	5,50	4,60	4,60
Mín	101,80	101,90	53,60	54,40	5,25	5,48	5,62	5,28	4,40	4,40
Média t	102,03	102,03	54,81	54,81	5,54	5,54	5,54	5,54	4,50	4,50
Desv pad t	0,20	0,20	0,62	0,62	0,16	0,16	0,16	0,16	0,12	0,12
Máx t	102,40	102,40	55,60	55,60	5,77	5,77	5,77	5,77	4,60	4,60
Mín t	101,80	101,80	53,60	53,60	5,25	5,25	5,25	5,25	4,40	4,40



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	957	894	1049	946	027	974,60	63,06	1049	894
2	908	940	957	938	728	894,20	94,57	957	728
3	951	950	1092	994	867	970,80	81,89	1092	867
4	1091	1197	1203	1181	1116	1157,60	50,81	1203	1091
5	545	548	501	504	552	530,00	25,25	552	501
6	1161	1201	1181	1139	1207	1177,80	28,23	1207	1139
7	1360	1184	1030	1206	1188	1193,60	116,97	1360	1030
8	934	1029	1081	1285	1083	1082,40	128,38	1285	934
9	1020	1050	979	1213	1006	1053,60	92,71	1213	979
10	952	1005	947	989	1058	990,20	45,12	1058	947
11	769	845	672	855	816	791,40	74,63	855	672
12	1042	1043	1090	982	1076	1046,60	41,70	1090	982
Média	974,17	990,50	981,83	1019,33	977,00	988,57			
Desv pad	199,48	181,62	204,08	211,25	197,33		192,84		
Máx	1360	1201	1203	1285	1207			1360	
Mín	545	548	501	504	552				501



Resultados:

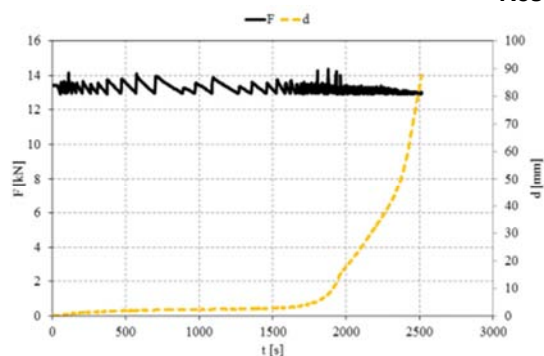


Gráfico V.140 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo,

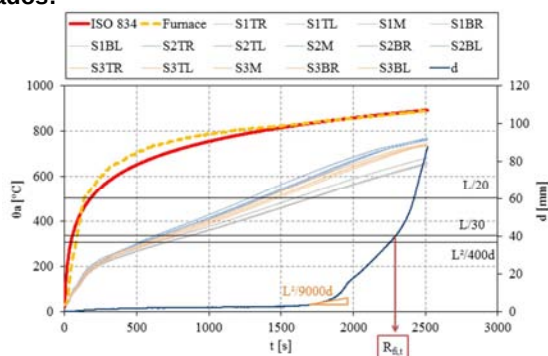


Gráfico V.141 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

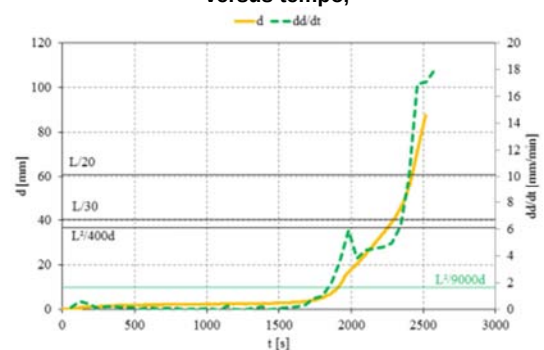


Gráfico V.142 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo,

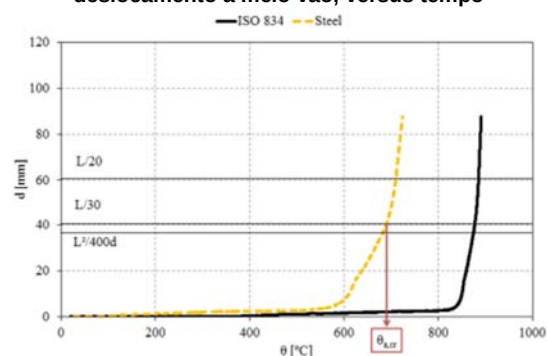


Gráfico V.143 – Deslocamento versus temperatura,

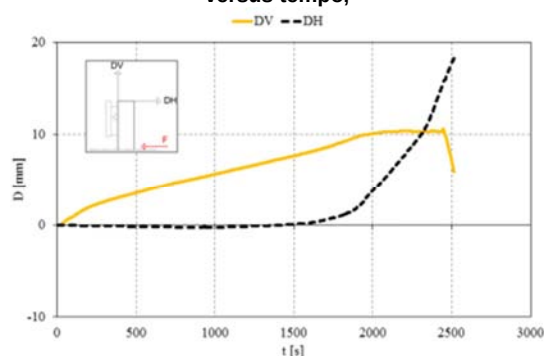


Gráfico V.144 – Deslocamento da extremidade, versus tempo,

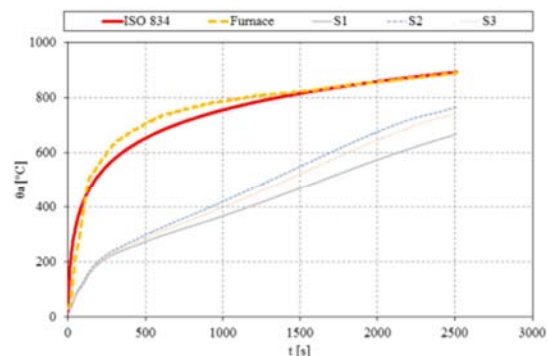


Gráfico V.145 – Temperatura média nas secções, versus tempo,

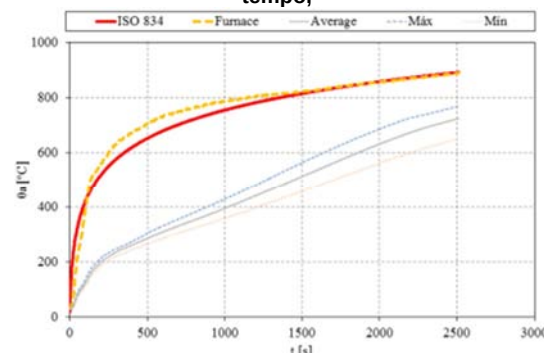


Gráfico V.7 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

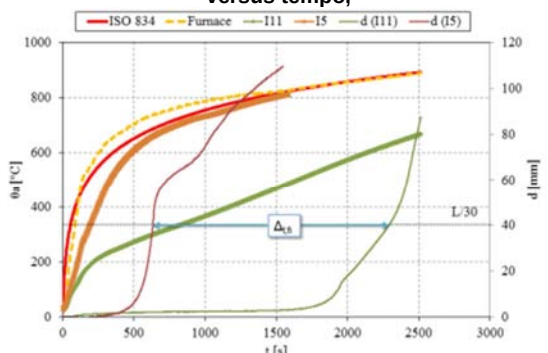


Gráfico V.7 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.98 – Início do ensaio.

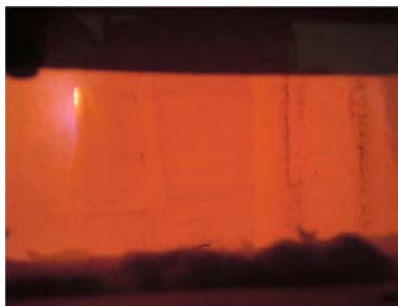


Figura V.99 – Fase final do ensaio.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogénea da camada intumescente da protecção, registando-se depois uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por encurvadura lateral.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	38	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
1822	2253	2295	2422		690,21	64,4%	25%

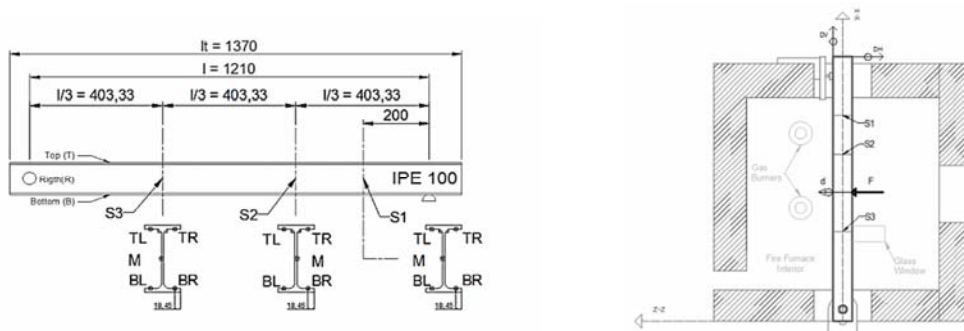
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: I12
Data: 19 \ 10 \ 2010
Tipo de secção: IPE 100
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 9180 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: Tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,824 [mm]
Duração do ensaio: 56 [min]
Temperatura máxima registada: 925,8 [°C]

Descrição do ensaio:

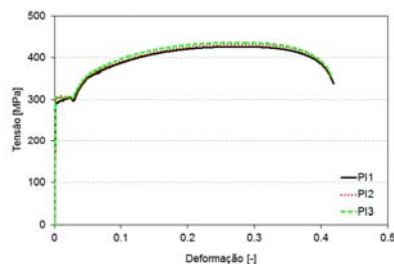
Ensaio de resistência ao fogo de elemento IPE 100, com aplicação de 2000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (I4), tem uma resistência ao fogo de 12 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



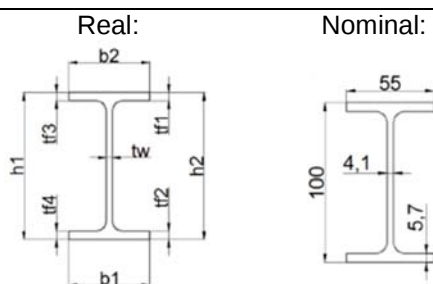
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provedor	E [Pa]	R _{p,0.2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PI1	198,606	292,989	295,848	296,741	426,061	41,834
PI2	200,433	304,256	305,329	301,038	431,612	41,378
PI3	194,664	304,969	306,222	304,789	436,082	41,540
Média	197,901	300,738	302,466	300,856	431,252	41,584
Desv. Padrão	2,948	6,720	5,749	4,028	5,020	0,231



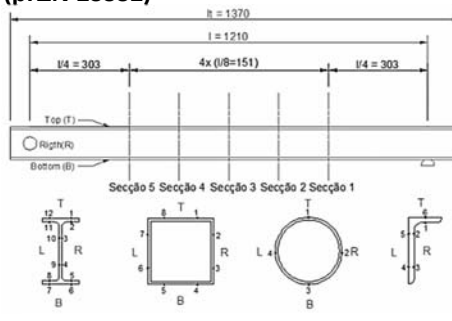
Propriedades da secção:

Leitura	h1	h2	b1	b2	tf1	tf2	tf3	tf4	tw
1	101,90	102,40	55,30	55,00	5,25	5,51	5,66	5,50	4,40
2	101,90	101,90	55,60	54,60	5,62	5,50	5,62	5,28	4,60
3	101,80	102,10	55,00	54,40	5,70	5,53	5,70	5,34	4,40
4	102,00	102,20	53,60	55,00	5,77	5,48	5,77	5,43	4,60
Média	101,90	102,15	54,88	54,75	5,59	5,51	5,69	5,39	4,50
Desv pad	0,08	0,21	0,88	0,30	0,23	0,02	0,06	0,10	0,12
Máx	102,00	102,40	55,60	55,00	5,77	5,53	5,77	5,50	4,60
Mín	101,80	101,90	53,60	54,40	5,25	5,48	5,62	5,28	4,40
Média t	102,03		54,81		5,54				4,50
Desv pad t	0,20		0,62		0,16				0,12
Máx t	102,40		55,60		5,77				4,60
Mín t	101,80		53,60		5,25				4,40



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	2000	1900	1950	1760	1580	1838,00	169,76	2000	1580
2	1720	1700	1800	1920	1680	1764,00	98,39	1920	1680
3	1750	1890	1950	1970	1810	1874,00	93,17	1970	1750
4	1930	2000	020	920	1 40	1942,00	71,55	2020	1840
5	1970	1900	1890	1930	1850	1908,00	44,94	1970	1850
6	1820	2060	1920	1840	1830	1894,00	100,90	2060	1820
7	1730	2000	1840	1960	1880	1882,00	105,92	2000	1730
8	1750	1790	1590	1920	1870	1784,00	127,20	1920	1590
9	1720	1790	1780	1800	1730	1764,00	36,47	1800	1720
10	1590	1680	1580	1490	1520	1572,00	73,28	1680	1490
11	1440	1810	1590	1700	1610	1630,00	137,30	1810	1440
12	1950	2050	2030	2140	2020	2038,00	68,34	2140	1950
Média	1780,83	1880,83	1828,33	1862,50	1768,33	1824,17			
Desv pad	165,33	129,51	164,53	163,10	146,15		155,51		
Máx	2000	2060	2030	2140	2020			2140	
Mín	1440	1680	1580	1490	1520				1440



Resultados:

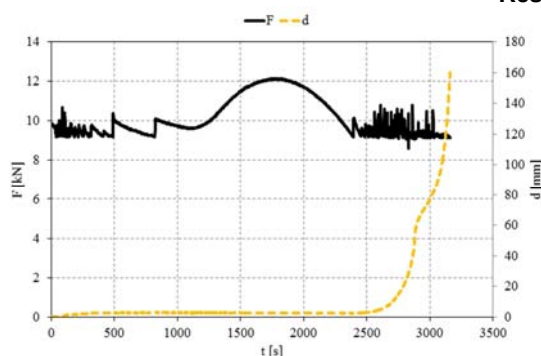


Gráfico V.146 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo,

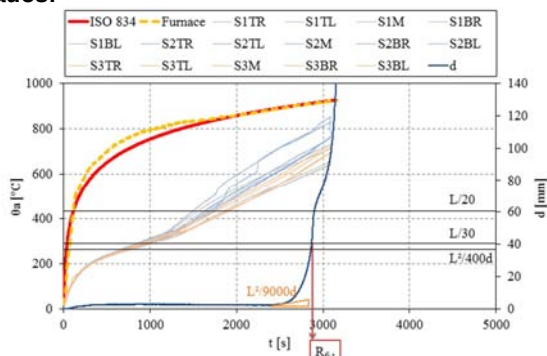


Gráfico V.147 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

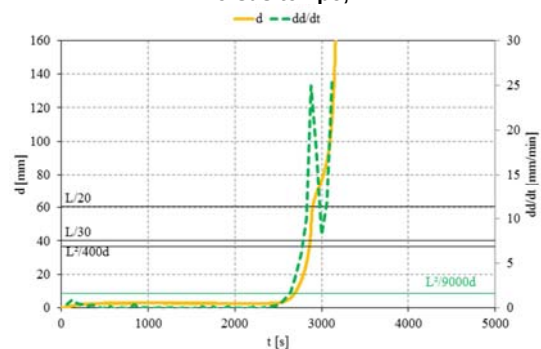


Gráfico V.148 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo,

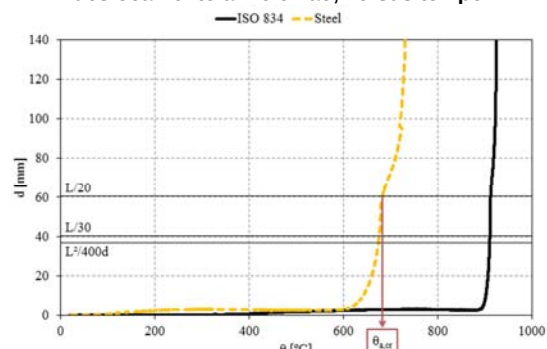


Gráfico V.149 – Deslocamento versus temperatura,

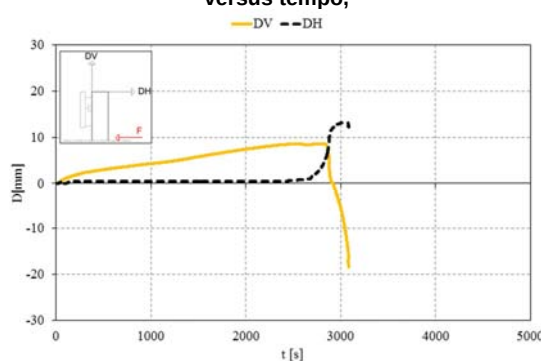


Gráfico V.150 – Deslocamento da extremidade, versus tempo,

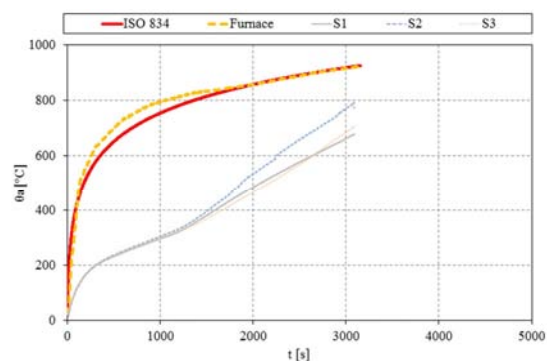


Gráfico V.151 – Temperatura média nas secções, versus tempo,

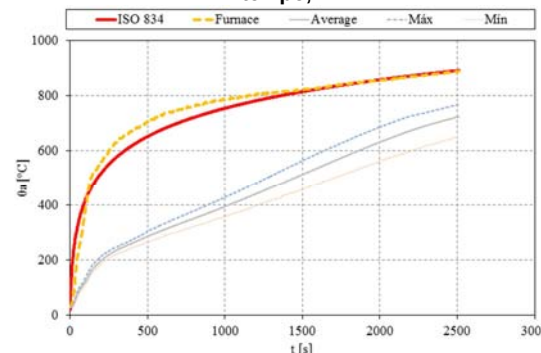


Gráfico V.7 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

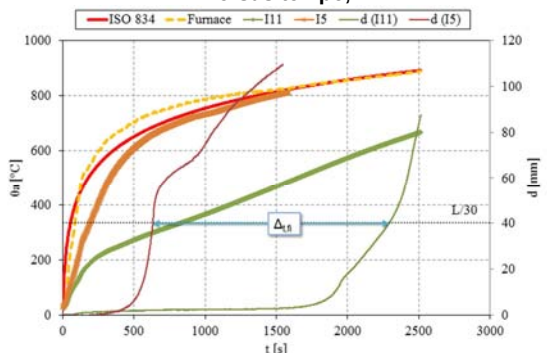


Gráfico V.7 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.100 – Camada intumescente formada.

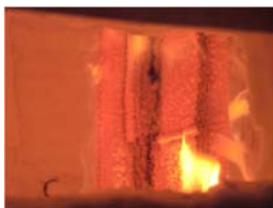


Figura V.101 – Fase intermédia do ensaio.



Figura V.102 – Deformação sofrida pelo elemento.



Figura V.103 – Pormenor da encurvadura local.



Figura V.104 – Ensaio terminado.



Figura V.105 – Desprendimento da camada intumescente.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma grande evolução, pouco homogénea, da camada intumescente da protecção. A camada de intumescência desprende-se em zonas localizadas e algumas das zonas do material ficaram expostas a elevadas temperaturas, essa exposição resultou numa rápida evolução das temperaturas junto à secção 2 e consequente perda de capacidade do aço nessa zona, resultando num fenómeno de encurvadura local.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
$L^2/9000d$	$L^2/400d$	L/30	L/20			Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
2630	2858	2867	2896	47	676,52	47,7%	28%

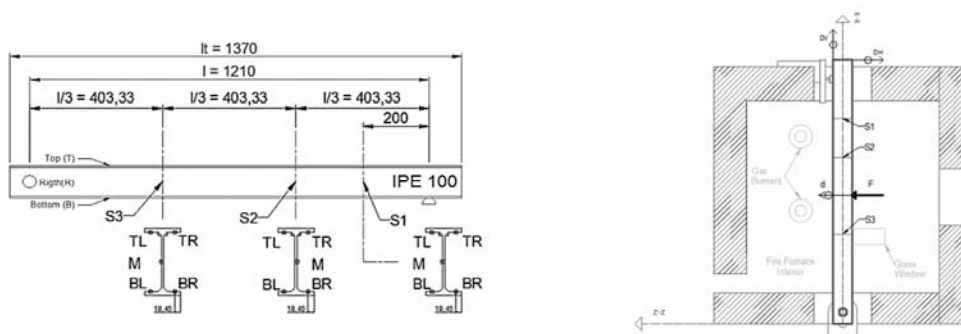
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: I13
Data: 20 \ 10 \ 2010
Tipo de secção: IPE 100
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 9180 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: Tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,832 [mm]
Duração do ensaio: 80 [min]
Temperatura máxima registada: 1008,42 [°C]

Descrição do ensaio:

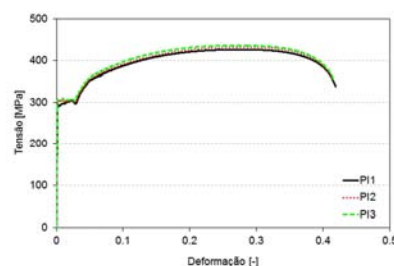
Ensaio de resistência ao fogo de elemento IPE 100, com aplicação de 2000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (I4), tem uma resistência ao fogo de 12 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



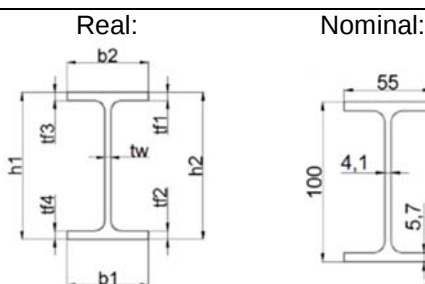
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Proveite n°	E [GPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
PI1	198,606	292,989	295,848	296,741	426,061	41,834
PI2	200,433	304,256	305,329	301,038	431,612	41,378
PI3	194,664	304,969	306,222	304,789	436,082	41,540
Média	197,901	300,738	302,466	300,856	431,252	41,584
Desv. Padrão	2,948	6,720	5,749	4,028	5,020	0,231



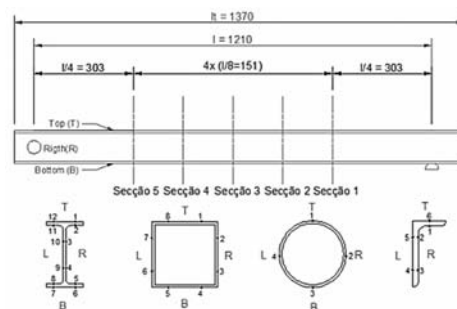
Propriedades da secção:

Leitura	Leituras em (mm)								
	h1	h2	b1	b2	tf1	tf2	tf3	tf4	tw
1	101,90	102,40	55,30	55,00	5,25	5,51	5,66	5,50	4,40
2	101,90	101,90	55,60	54,60	5,62	5,50	5,62	5,28	4,60
3	101,80	102,10	55,00	54,40	5,70	5,53	5,70	5,34	4,40
4	102,00	102,20	53,60	55,00	5,77	5,48	5,77	5,43	4,60
Média	101,90	102,15	54,88	54,75	5,59	5,51	5,69	5,39	4,50
Desv pad	0,08	0,21	0,88	0,30	0,23	0,02	0,06	0,10	0,12
Máx	102,00	102,40	55,60	55,00	5,77	5,53	5,77	5,50	4,60
Mín	101,80	101,90	53,60	54,40	5,25	5,48	5,62	5,28	4,40
Média t	102,03		54,81			5,54			4,50
Desv pad t	0,20		0,62			0,16			0,12
Máx t	102,40		55,60			5,77			4,60
Mín t	101,80		53,60			5,25			4,40



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1860	19 0	2000	198	1870	1930,00	63,25	2000	1860
2	1670	1770	1780	1880	1780	1776,00	74,36	1880	1670
3	1550	1590	1680	1580	1470	1574,00	75,70	1680	1470
4	1890	2030	2180	2230	1950	2056,00	145,88	2230	1890
5	1770	1850	1830	1730	1700	1776,00	63,87	1850	1700
6	1890	1930	2170	2050	1920	1992,00	116,70	2170	1890
7	1830	1810	1890	1910	1700	1828,00	82,58	1910	1700
8	1740	1630	1530	1770	1620	1658,00	97,31	1770	1530
9	1640	1820	1960	1980	2020	1884,00	155,82	2020	1640
10	1820	1970	2180	2270	2060	2060,00	176,21	2270	1820
11	1440	1620	1620	1600	1460	1548,00	90,11	1620	1440
12	1700	1920	1930	1990	1960	1900,00	115,11	1990	1700
Média	1733,33	1823,33	1895,83	1914,17	1792,50	1831,83			
Desv pad	140,41	146,31	218,90	218,57	204,50		194,47		
Máx	1890	2030	2180	2270	2060			2270	
Mín	1440	1590	1530	1580	1460				1440



Resultados:

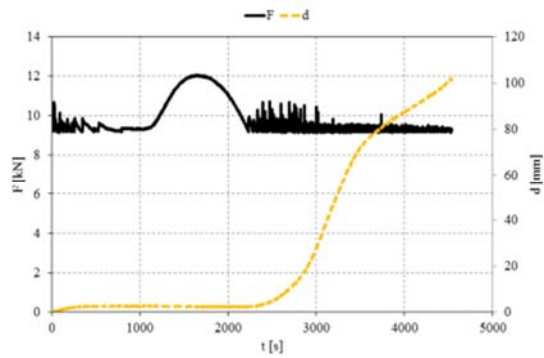


Gráfico V.152 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo,

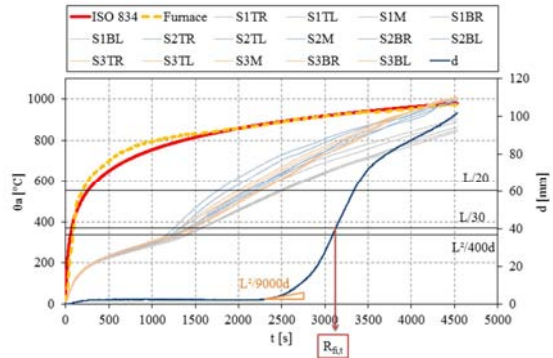


Gráfico V.153 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

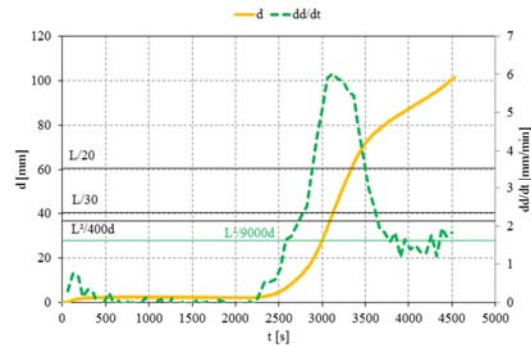


Gráfico V.154 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo,

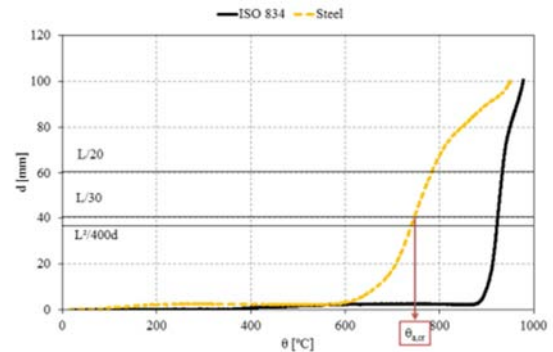


Gráfico V.155 – Deslocamento versus temperatura,

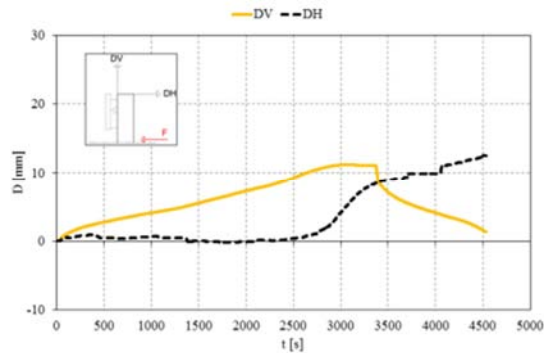


Gráfico V.156 – Deslocamento da extremidade, versus tempo,

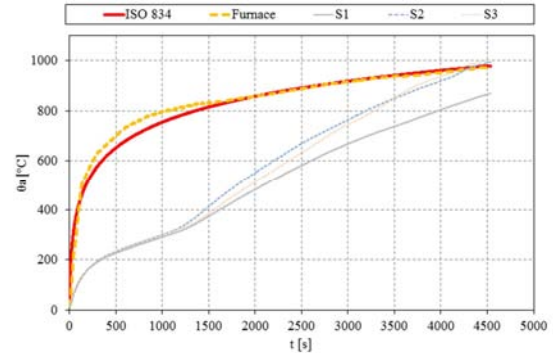


Gráfico V.157 – Temperatura média nas secções, versus tempo,

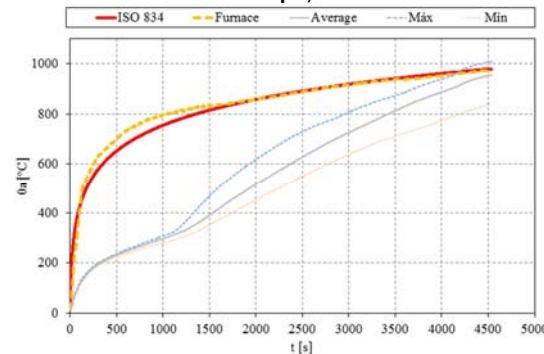


Gráfico V.7 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

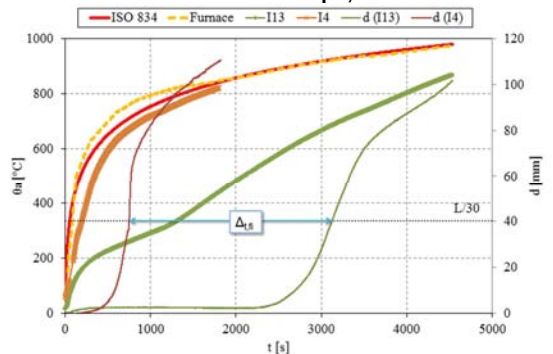


Gráfico V.7 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:

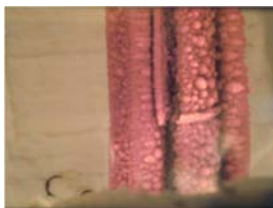


Figura V.106 – Formação da camada intumescente.



Figura V.107 – Camada intumescente formada.



Figura V.108 – Fase final do ensaio.

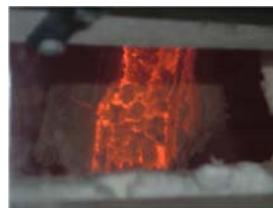


Figura V.109 – Ensaio terminado.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma grande evolução, pouco homogênea, da camada intumescente da protecção. Mais tarde observou-se um rápido deslocamento do ponto de aplicação da carga, devido ao fenómeno de encurvadura lateral, levando o elemento ao seu colapso.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
$L^2/9000d$	$L^2/400d$	L/30	L/20	52	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
2579	3088	3127	3337		747,46	47,7%	17%

Tipo de ensaio: Ensaio de resistência à flexão de perfil metálico

Nome do teste: S1

Data: 14 \ 05 \ 2010

Tipo de secção: SHS 100x100x4

Tipo de aço: S235

Força aplicada: incremental [N]

Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Deformações: extensómetros 120Q

Curva de fogo utilizada: temperatura ambiente

Tipo de protecção: nenhuma

Espessura de protecção: 0,0 [mm]

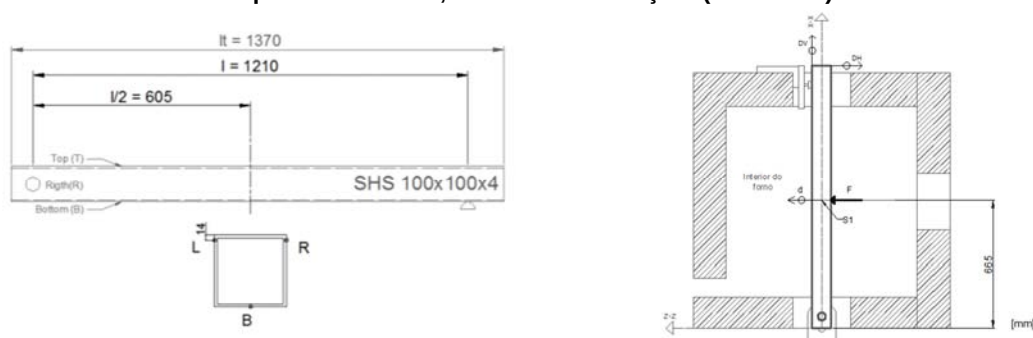
Duração do ensaio: --

Temperatura máxima registada: --

Descrição do ensaio:

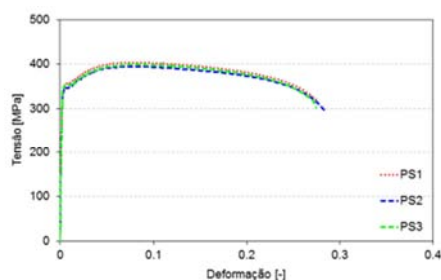
Ensaio de resistência à flexão de um perfil metálico com secção transversal SHS 100x100x4, em condições de temperatura ambiente. Serão aplicados incrementos de carga de 5000 [N]. A resistência à flexão do elemento, determinado pela EN1993-1-1, com as propriedades nominais do material e secção transversal, é de 42980 [N].

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



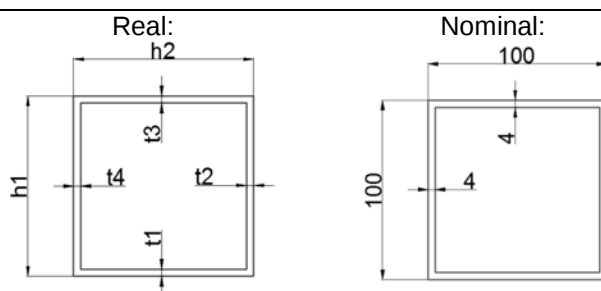
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete nº	E [GPa]	Rp,0.2 [MPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
PS1	172,694	348,557	356,923	357,119	403,828	--
PS2	204,890	338,633	346,223	346,223	394,875	--
PS3	209,222	344,860	352,842	351,667	397,796	--
Média	195,602	344,017	351,996	351,670	398,833	--
Desv. Padrão	19,957	5,016	5,400	5,448	4,566	--



Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)					
	h1	h2	t1	t2	t3	t4
1	99,90	99,90	4,24	4,15	4,29	4,18
2	100,30	100,30	4,14	4,22	4,17	4,14
3	99,90	100,30	4,19	4,12	4,13	4,22
4	99,90	100,20	4,14	4,11	4,16	4,22
Média	100,00	100,18	4,18	4,15	4,19	4,19
Desv pad	0,20	0,19	0,05	0,05	0,07	0,04
Máx	100,30	100,30	4,24	4,22	4,29	4,22
Mín	99,90	99,90	4,14	4,11	4,13	4,14
Média t	100,09		4,18			
Desv pad t	0,20		0,05			
Máx t	100,30		4,29			
Mín t	99,90		4,11			



Resultados:

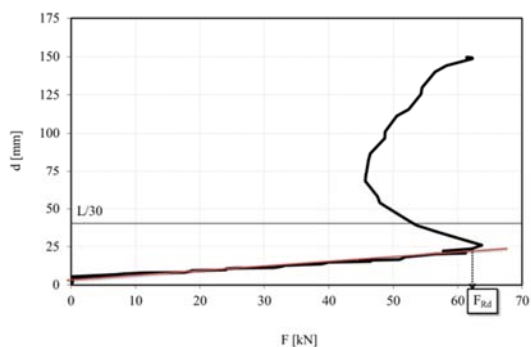


Gráfico V.158 – Força versus deslocamento a meio vão.

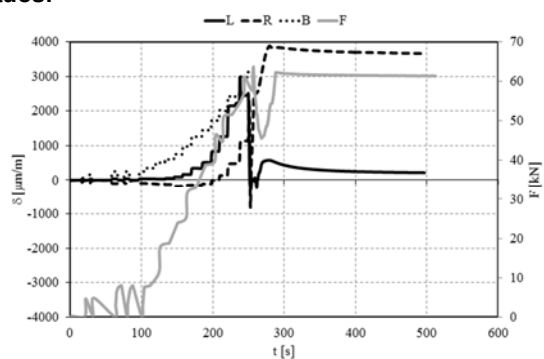


Gráfico V.159 – Deformação e força, versus tempo.

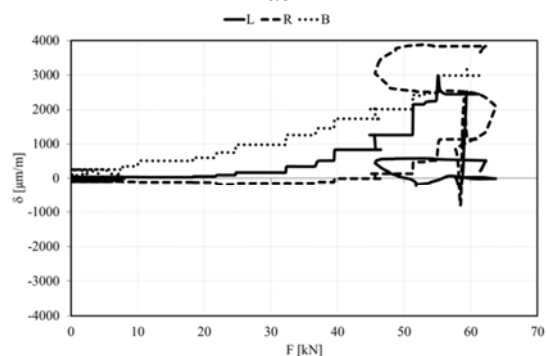


Gráfico V.160 – Deformação versus força.

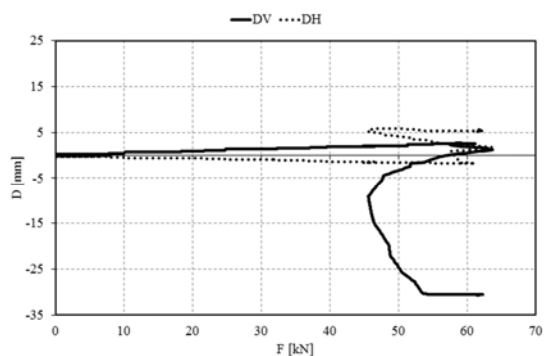


Gráfico V.161 – Deslocamento da extremidade do elemento versus força.

Registos fotográficos:



Figura V.110 – Elemento próximo da ruptura.



Figura V.111 – Elemento no seu estado de ruptura.

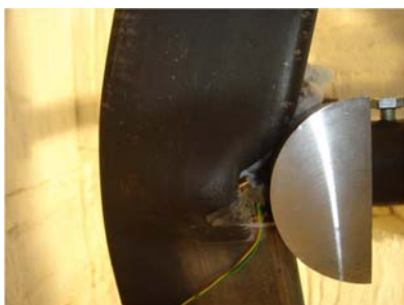


Figura V.112 – Rótula plástica imposta.



Figura V.113 – Estado de deformação do elemento.

Resistência do elemento [N]:

Eurocódigo 3-1-1		Ensaio
Nominal	Real	
42.980,00	66.233,00	62.200,00

Tipo de ensaio: Ensaio de resistência à flexão de perfil metálico

Nome do teste: S2

Data: 17 \ 05 \ 2010

Tipo de secção: SHS 100x100x4

Tipo de aço: S235

Força aplicada: incremental [N]

Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Deformações: extensómetros 120Ω

Curva de fogo utilizada: temperatura ambiente

Tipo de protecção: nenhuma

Espessura de protecção: 0,0 [mm]

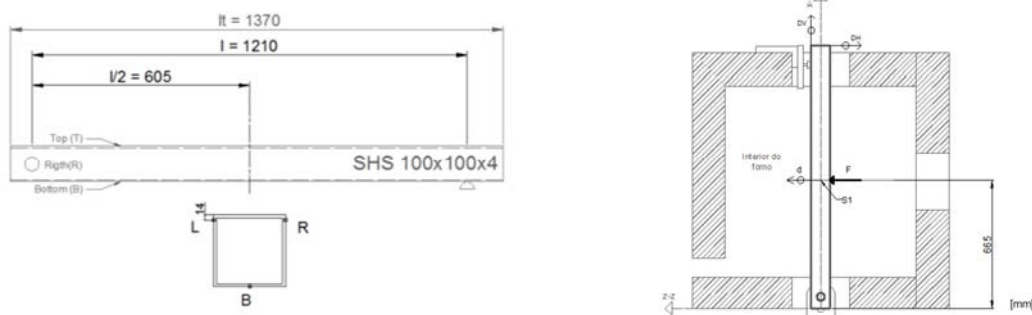
Duração do ensaio: --

Temperatura máxima registada: --

Descrição do ensaio:

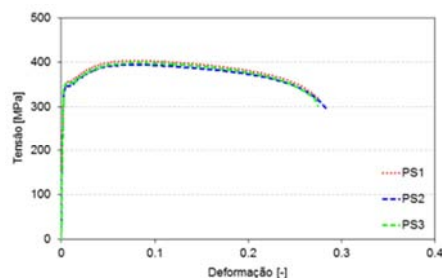
Ensaio de resistência à flexão de um perfil metálico com secção transversal SHS 100x100x4, em condições de temperatura ambiente. Serão aplicados incrementos de carga de 5000 [N]. A resistência à flexão do elemento, determinado pela EN1993-1-1, com as propriedades nominais do material e secção transversal, é de 42980 [N].

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



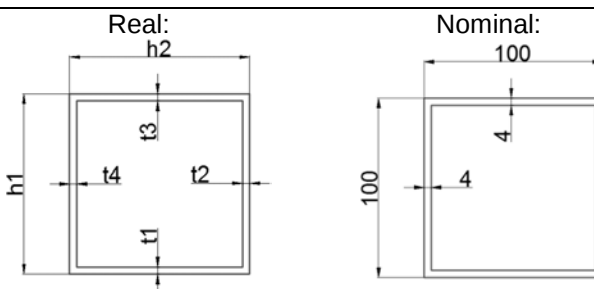
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete n°	E [GPa]	Rp,0.2 [MPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
PS1	172,694	348,557	356,923	357,119	403,828	--
PS2	204,890	338,633	346,223	346,223	394,875	--
PS3	209,222	344,860	352,842	351,667	397,796	--
Média	195,602	344,017	351,996	351,670	398,833	--
Desv. Padrão	19,957	5,016	5,400	5,448	4,566	--



Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)					
	h1	h2	t1	t2	t3	t4
1	99,90	99,90	4,24	4,15	4,29	4,18
2	100,30	100,30	4,14	4,22	4,17	4,14
3	99,90	100,30	4,19	4,12	4,13	4,22
4	99,90	100,20	4,14	4,11	4,16	4,22
Média	100,00	100,18	4,18	4,15	4,19	4,19
Desv pad	0,20	0,19	0,05	0,05	0,07	0,04
Máx	100,30	100,30	4,24	4,22	4,29	4,22
Mín	99,90	99,90	4,14	4,11	4,13	4,14
Média t	100,09		4,18			
Desv pad t	0,20		0,05			
Máx t	100,30		4,29			
Mín t	99,90		4,11			



Resultados:

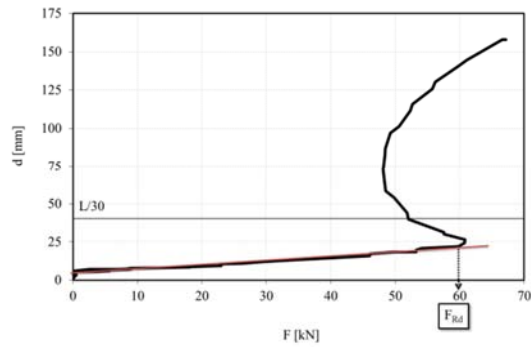


Gráfico V.162 – Força versus deslocamento a meio vão.

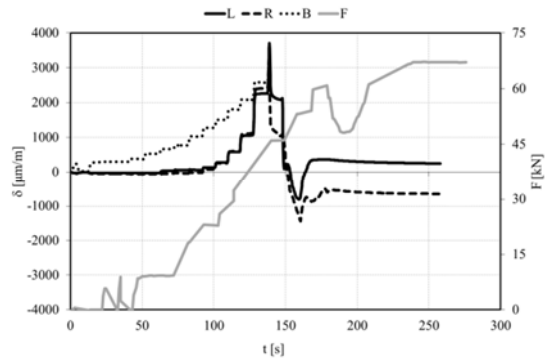


Gráfico V.163 – Deformação e força, versus tempo.

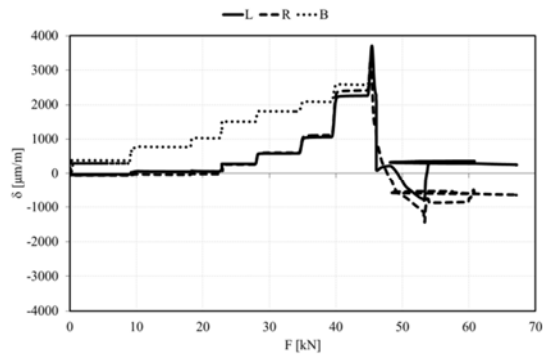


Gráfico V.164 – Deformação versus força.

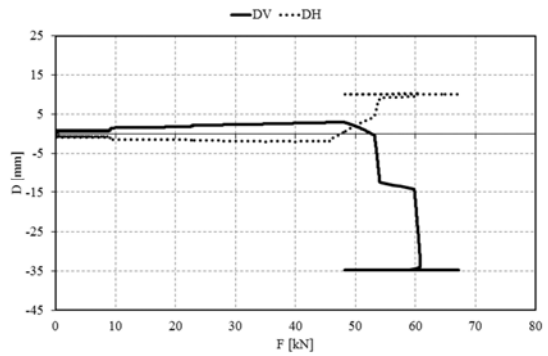


Gráfico V.165 – Deslocamento da extremidade do elemento versus força.

Registos fotográficos:



Figura V.114 – Rótula plástica formada pela ruptura.

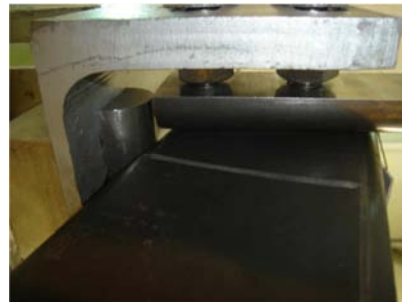


Figura V.115 – Rotação e deslocamento no topo.

Resistência do elemento [N]:

Eurocódigo 3-1-1		Ensaio
Nominal	Real	
42.980,00	66.233,00	60.000,00

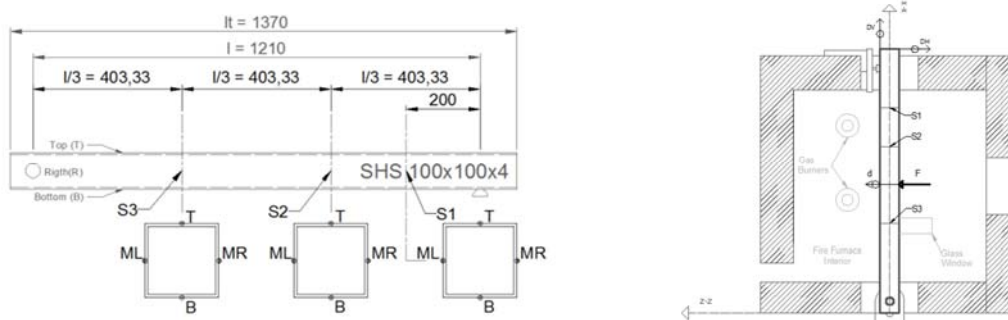
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico sem protecção
Nome do teste: S3
Data: 26 \ 07 \ 2010
Tipo de secção: SHS 100x100x4
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 13620 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: nenhuma
Espessura de protecção: 0,0 [mm]
Duração do ensaio: 22 [min]
Temperatura máxima registada: 747,8 [°C]

Descrição do ensaio:

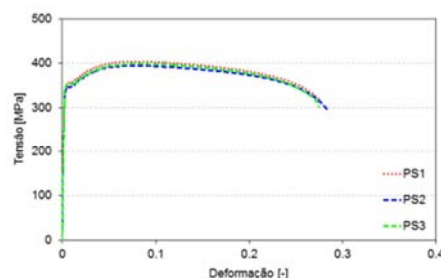
Ensaio de resistência ao fogo de elemento SHS 100x100x4, sem protecção, com a aplicação de carga, representando um estado de utilização nominal de $\mu_0=30\%$ segundo EN1993-1-2, que define uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=663,78^\circ\text{C}$. A resistência nominal do elemento é de 12 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



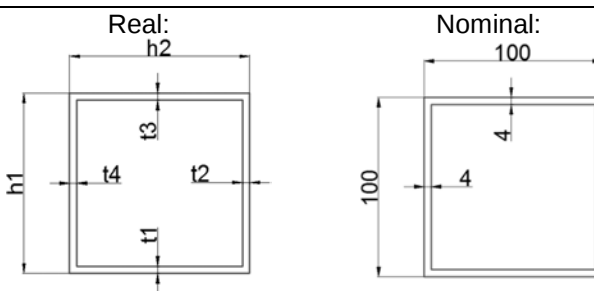
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete nº	E [GPa]	Rp,0.2 [MPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
PS1	172,694	348,557	356,923	357,119	403,828	--
PS2	204,890	338,633	346,223	346,223	394,875	--
PS3	209,222	344,860	352,842	351,667	397,796	--
Média	195,602	344,017	351,996	351,670	398,833	--
Desv. Padrão	19,957	5,016	5,400	5,448	4,566	--



Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)					
	h1	h2	t1	t2	t3	t4
1	99,90	99,90	4,24	4,15	4,29	4,18
2	100,30	100,30	4,14	4,22	4,17	4,14
3	99,90	100,30	4,19	4,12	4,13	4,22
4	99,90	100,20	4,14	4,11	4,16	4,22
Média	100,00	100,18	4,18	4,15	4,19	4,19
Desv pad	0,20	0,19	0,05	0,05	0,07	0,04
Máx	100,30	100,30	4,24	4,22	4,29	4,22
Mín	99,90	99,90	4,14	4,11	4,13	4,14
Média t	100,09		4,18			
Desv pad t	0,20		0,05			
Máx t	100,30		4,29			
Mín t	99,90		4,11			



Resultados:

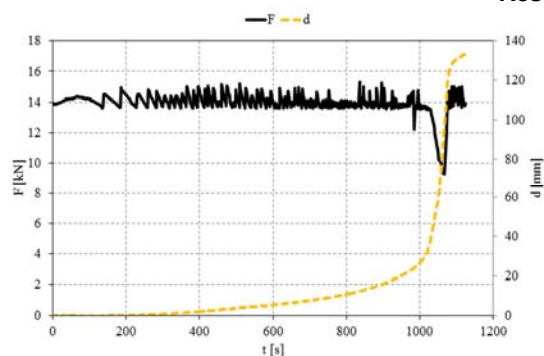


Gráfico V.166 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

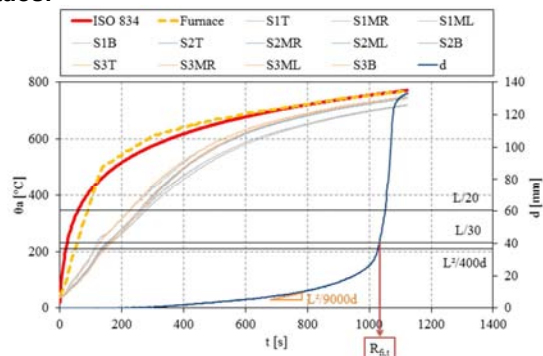


Gráfico V.167 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

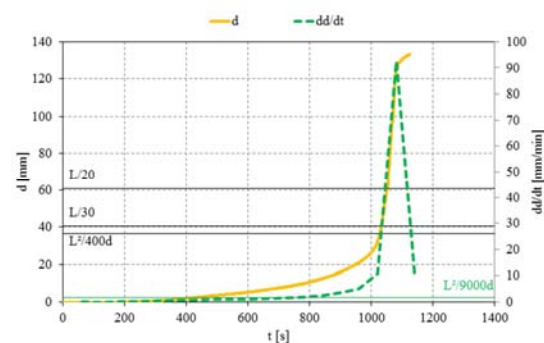


Gráfico V.168 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

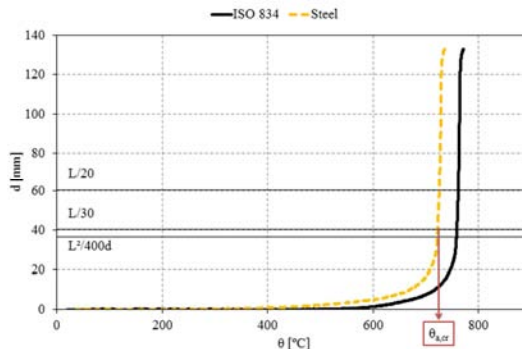


Gráfico V.169 – Deslocamento versus temperatura.

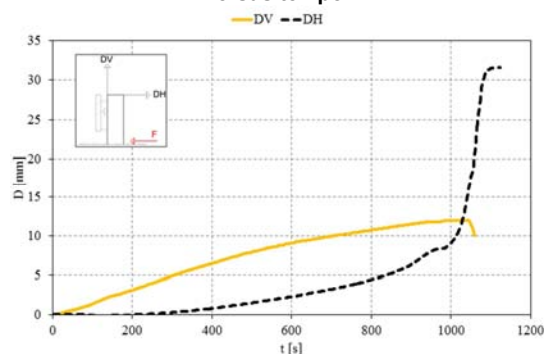


Gráfico V.170 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

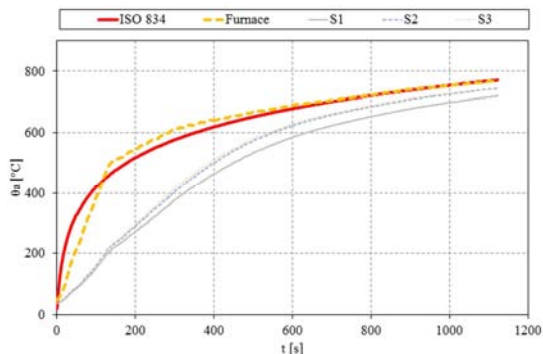


Gráfico V.171 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

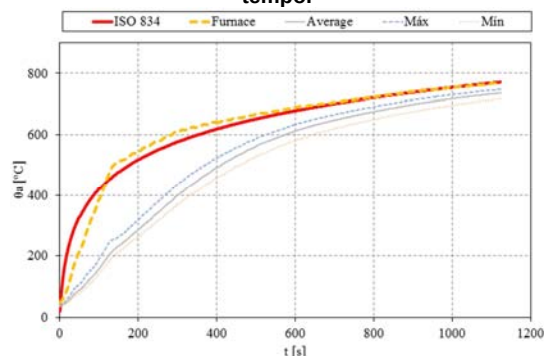


Gráfico V.172 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

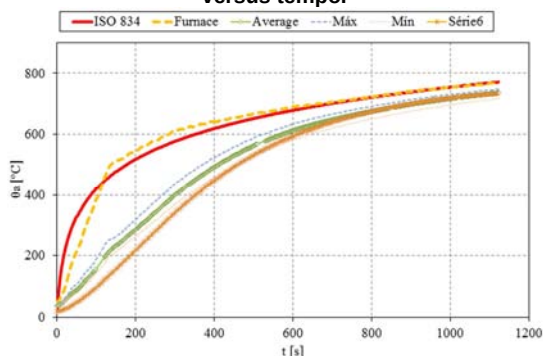


Gráfico V.173 – Temperatura da secção e temperatura prevista pelo EC 3-1-2, versus tempo.

Registos fotográficos:



Figura V.116 – Início do ensaio.



Figura V.117 – Final do ensaio.

Comentários:

Durante o ensaio verificou-se uma rápida movimentação do ponto de aplicação da carga, no instante em que o elemento atingiu a sua ruptura por rótula plástica.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	17	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
731	1028	1032	1051		722,56	21%	20%

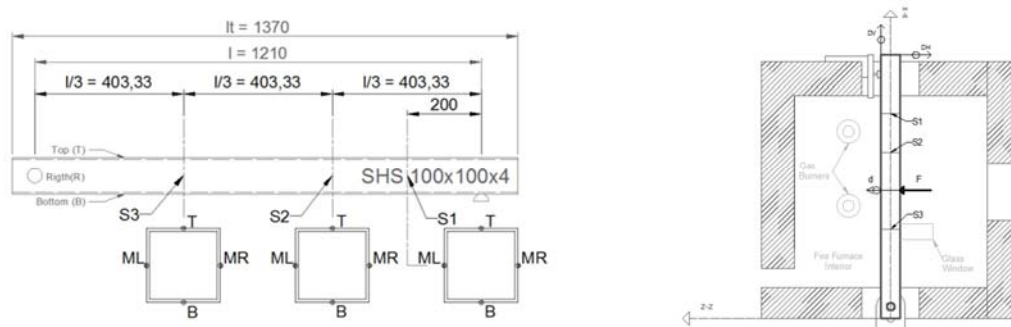
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico sem protecção
Nome do teste: S4
Data: 27 \ 07 \ 2010
Tipo de secção: SHS 100x100x4
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 22250 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: nenhuma
Espessura de protecção: 0,0 [mm]
Duração do ensaio: 15 [min]
Temperatura máxima registada: 712,27 [°C]

Descrição do ensaio:

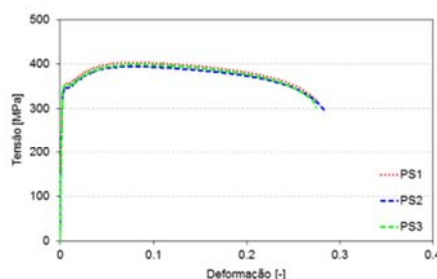
Ensaio de resistência ao fogo de elemento SHS 100x100x4, sem protecção, com a aplicação de carga, representando um estado de utilização nominal de $\mu_0=40\%$ segundo EN1993-1-2, que define uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. A resistência nominal do elemento é de 9 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



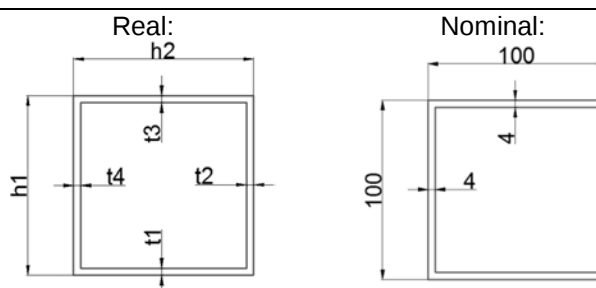
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete n°	E [GPa]	Rp,0.2 [MPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
PS1	172,694	8,557	356,923	357,119	403,828	--
PS2	204,890	338,633	346,223	346,223	394,875	--
PS3	209,222	344,860	352,842	351,667	397,796	--
Média	195,602	344,017	351,996	351,670	398,833	--
Desv. Padrão	19,957	5,016	5,400	5,448	4,566	--



Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)					
	h1	h2	t1	t2	t3	t4
1	99,90	99,90	4,24	4,15	4,29	4,18
2	100,30	100,30	4,14	4,22	4,17	4,14
3	99,90	100,30	4,19	4,12	4,13	4,22
4	99,90	100,20	4,14	4,11	4,16	4,22
Média	100,00	100,18	4,18	4,15	4,19	4,19
Desv pad	0,20	0,19	0,05	0,05	0,07	0,04
Máx	100,30	100,30	4,24	4,22	4,29	4,22
Mín	99,90	99,90	4,14	4,11	4,13	4,14
Média t	100,09		4,18			
Desv pad t	0,20		0,05			
Máx t	100,30		4,29			
Mín t	99,90		4,11			



Resultados:

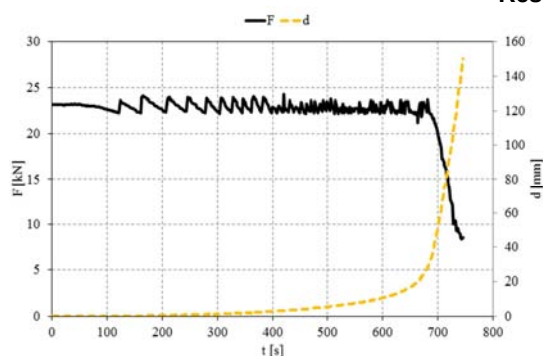


Gráfico V.174 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

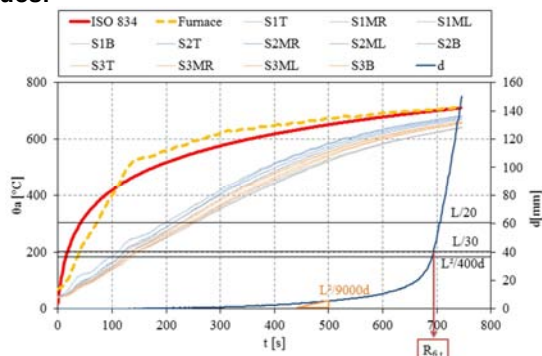


Gráfico V.175 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

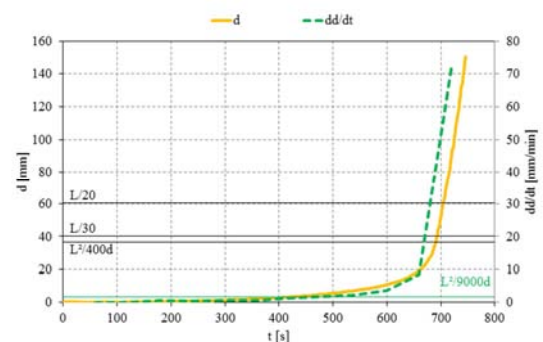


Gráfico V.176 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

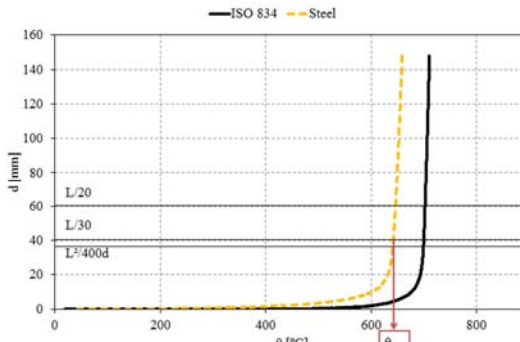


Gráfico V.177 – Deslocamento versus temperatura.

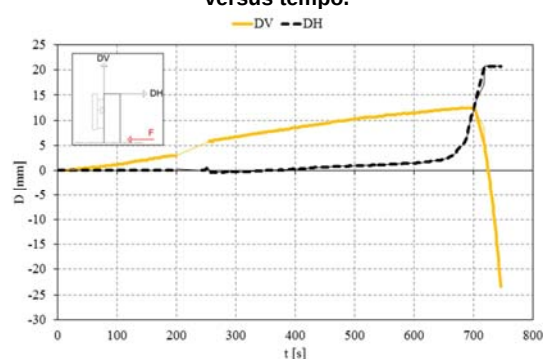


Gráfico V.178 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

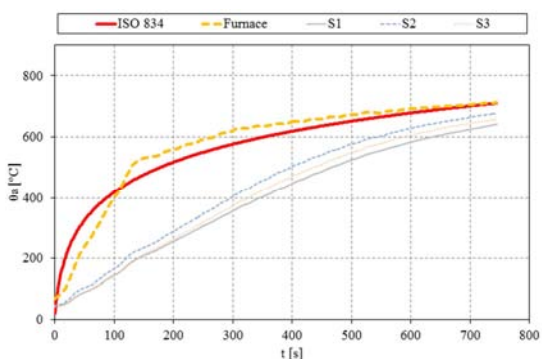


Gráfico V.179 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

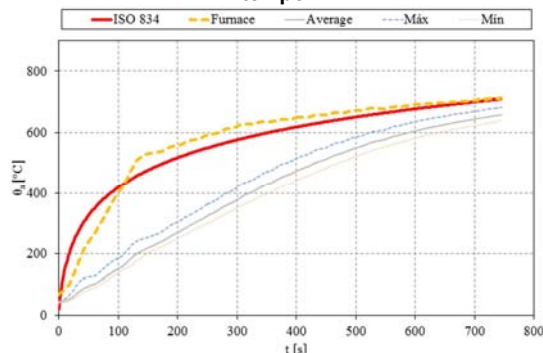


Gráfico V.180 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

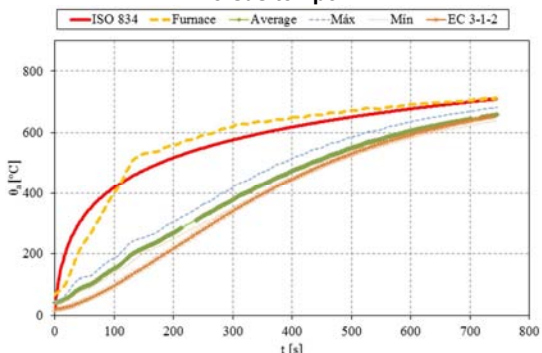


Gráfico V.181 – Temperatura da secção e temperatura prevista pelo EC 3-1-2, versus tempo.

Registos fotográficos:



Figura V.118 – Deformação imposta no elemento.



Figura V.119 – Rótula plástica formada.

Comentários:

Durante o ensaio verificou-se uma rápida movimentação do ponto de aplicação da carga, no instante em que o elemento atingiu a sua ruptura por rótula plástica.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
$L^2/9000d$	$L^2/400d$	$L/30$	$L/20$	11	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
473	691	693	705		641,95	32%	35%

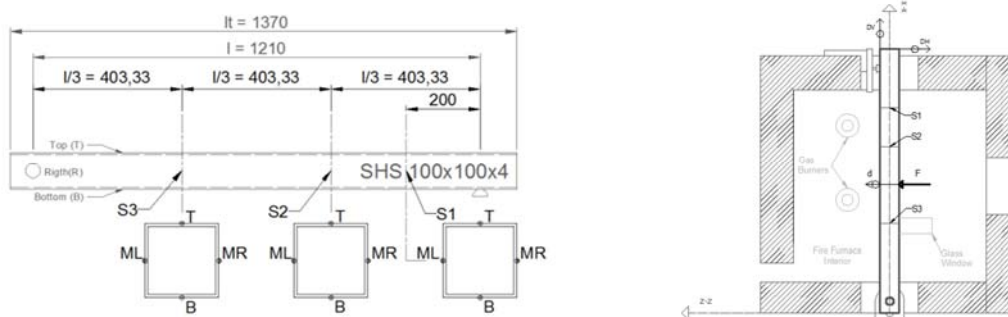
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico sem protecção
Nome do teste: S5
Data: 27 \ 07 \ 2010
Tipo de secção: SHS 100x100x4
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 30090 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: nenhuma
Espessura de protecção: 0,0 [mm]
Duração do ensaio: 19 [min]
Temperatura máxima registada: 693,24 [°C]

Descrição do ensaio:

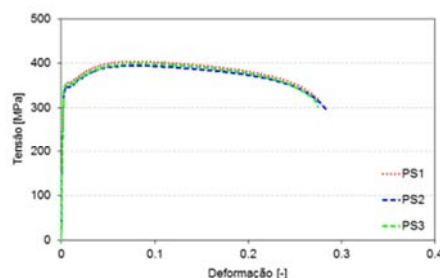
Ensaio de resistência ao fogo de elemento SHS 100x100x4, sem protecção, com a aplicação de carga, representando um estado de utilização nominal de $\mu_0=70\%$ segundo EN1993-1-2, que define uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=525,78^\circ\text{C}$. A resistência nominal do elemento é de 8 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



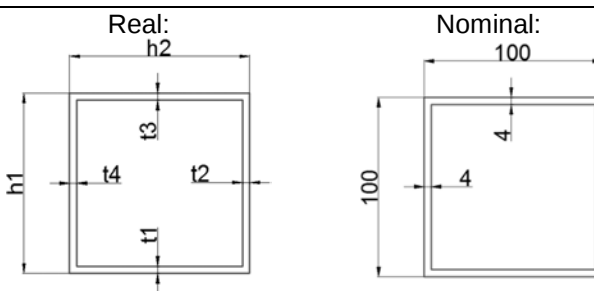
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete nº	E [Pa]	Rp,0.2 [MPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [M a]	At [%]
PS1	172,694	348,557	356,923	357,119	403,828	--
PS2	204,890	338,633	346,223	346,223	394,875	--
PS3	209,222	344,860	352,842	351,667	397,796	--
Média	195,602	344,017	351,996	351,670	398,833	--
Desv. Padrão	19,957	5,016	5,400	5,448	4,566	--



Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)					
	h1	h2	t1	t2	t3	t4
1	99,90	99,90	4,24	4,15	4,29	4,18
2	100,30	100,30	4,14	4,22	4,17	4,14
3	99,90	100,30	4,19	4,12	4,13	4,22
4	99,90	100,20	4,14	4,11	4,16	4,22
Média	100,00	100,18	4,18	4,15	4,19	4,19
Desv pad	0,20	0,19	0,05	0,05	0,07	0,04
Máx	100,30	100,30	4,24	4,22	4,29	4,22
Mín	99,90	99,90	4,14	4,11	4,13	4,14
Média t	100,09		4,18			
Desv pad t	0,20		0,05			
Máx t	100,30		4,29			
Mín t	99,90		4,11			



Resultados:

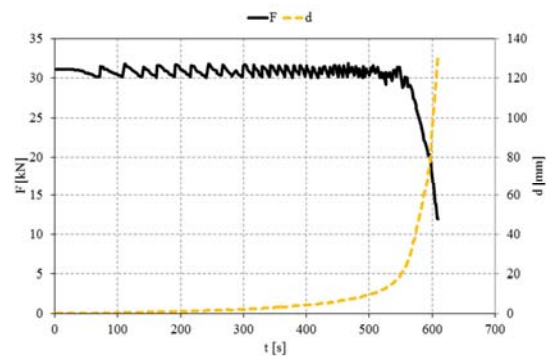


Gráfico V.182 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

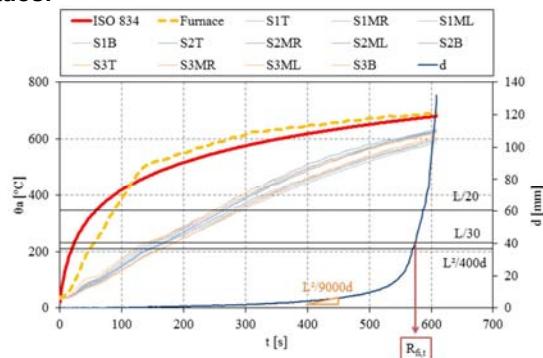


Gráfico V.183 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

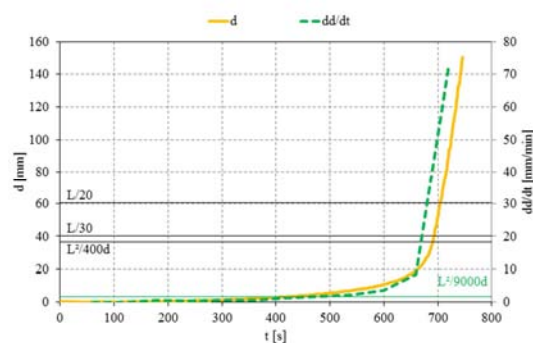


Gráfico V.184 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

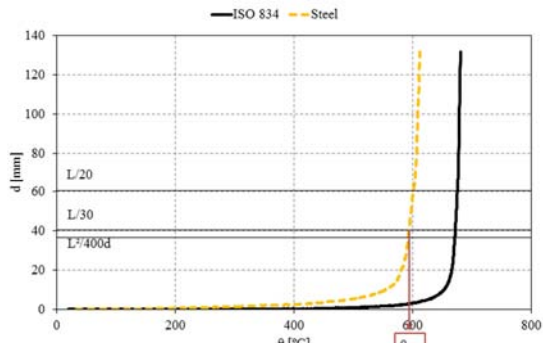


Gráfico V.185 – Deslocamento versus temperatura.

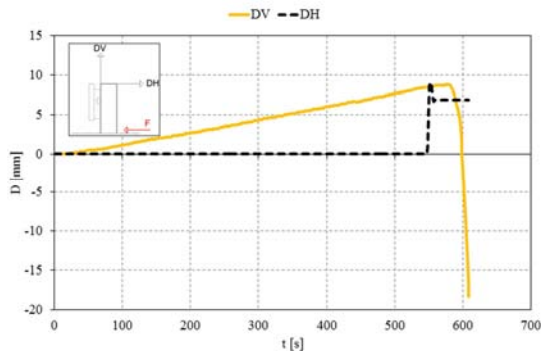


Gráfico V.186 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

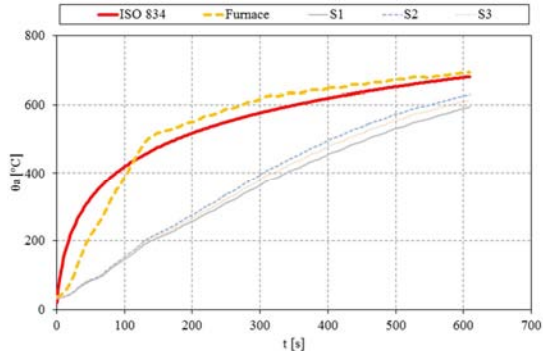


Gráfico V.187 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

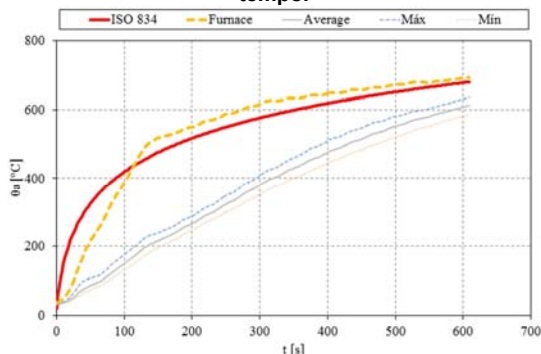


Gráfico V.188 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

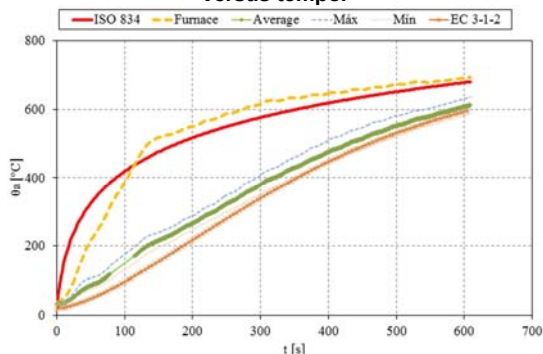


Gráfico V.189 – Temperatura da secção e temperatura prevista pelo EC 3-1-2, versus tempo.

Comentários:

Durante o ensaio verificou-se uma rápida movimentação do ponto de aplicação da carga, no instante em que o elemento atingiu a sua ruptura por rótula plástica.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	9	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
430	571	573	587		594,02	44%	47%

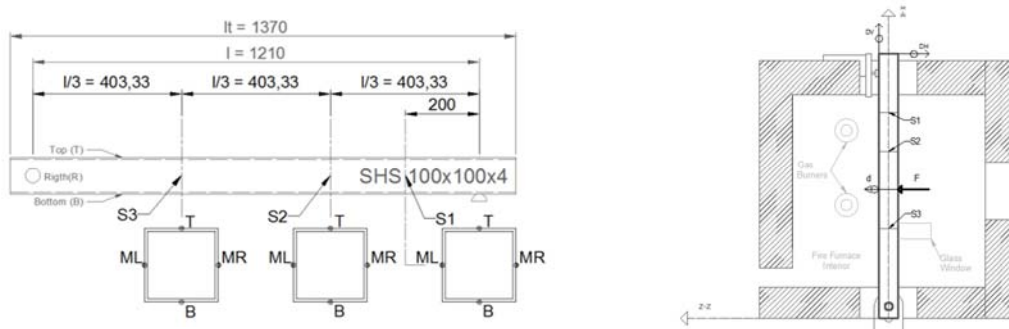
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: S6
Data: 25 \ 08 \ 2010
Tipo de secção: SHS 100x100x4
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 13620 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,105 [mm]
Duração do ensaio: 50 [min]
Temperatura máxima registada: 911,31 [°C]

Descrição do ensaio:

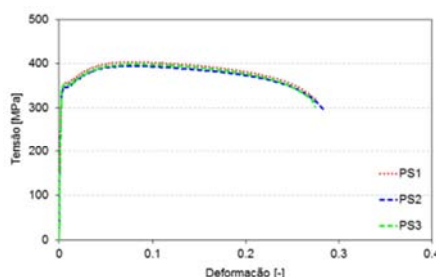
Ensaio de resistência ao fogo de elemento SHS 100x100x4, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=30\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=663,78^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (S3), tem uma resistência ao fogo de 17 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



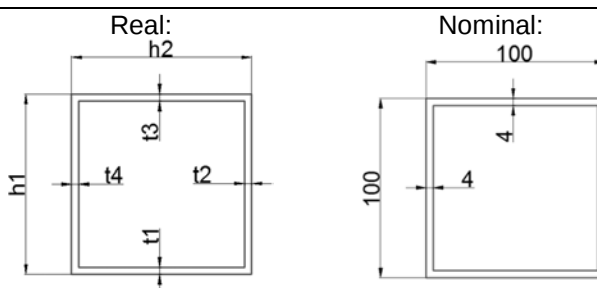
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Proveite nº	E [GPa]	Rp,0.2 [MPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
PS1	172,694	348,557	356,923	357,119	403,828	--
PS2	204,890	338,633	346,223	346,223	394,875	--
PS3	209,222	344,860	352,842	351,667	397,796	--
Média	195,602	344,017	351,996	351,670	398,833	--
Desv. Padrão	19,957	5,016	5,400	5,448	4,566	--



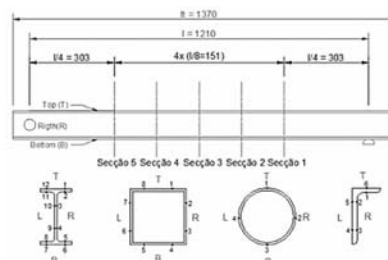
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)					
	h1	h2	t1	t2	t3	t4
1	99,90	99,90	4,24	4,15	4,29	4,18
2	100,30	100,30	4,14	4,22	4,17	4,14
3	99,90	100,30	4,19	4,12	4,13	4,22
4	99,90	100,20	4,14	4,11	4,16	4,22
Média	100,00	100,18	4,18	4,15	4,19	4,19
Desv pad	0,20	0,19	0,05	0,05	0,07	0,04
Máx	100,30	100,30	4,24	4,22	4,29	4,22
Mín	99,90	99,90	4,14	4,11	4,13	4,14
Média t	100,09		4,18			
Desv pad t	0,20		0,05			
Máx t	100,30		4,29			
Mín t	99,90		4,11			



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1278	1170	1296	1197	873	1162,80	170,45	1296	873
2	1161	1050	1076	1081	1049	1083,40	45,77	1161	1049
3	1145	1173	1068	1117	991	1098,80	71,66	1173	991
4	1043	988	979	1049	924	996,60	51,36	1049	924
5	1121	1171	1163	1224	1093	1154,40	50,20	1224	1093
6	1269	1161	970	1129	1120	1129,80	107,22	1269	970
7	979	1031	946	1223	1067	1049,20	107,74	1223	946
8	1238	1310	1170	1245	854	1163,40	179,92	1310	854
Média	1154,25	1131,75	1083,50	1158,13	996,38	1104,80			
Desv pad	106,79	103,39	120,69	73,68	102,22		114,75		
Máx	1278	1310	1296	1245	1120			1310	
Mín	979	988	946	1049	854				854



Resultados:

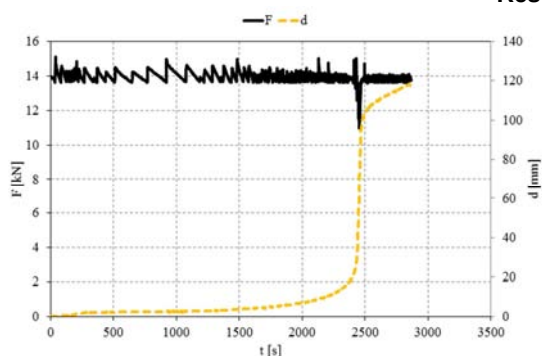


Gráfico V.190 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

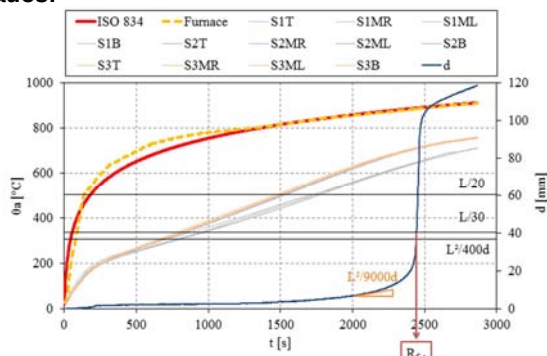


Gráfico V.191 – Temperatura na seção e deslocamento a meio vão, versus tempo

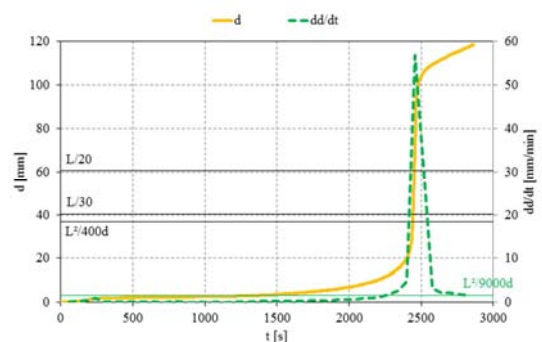


Gráfico V.192 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

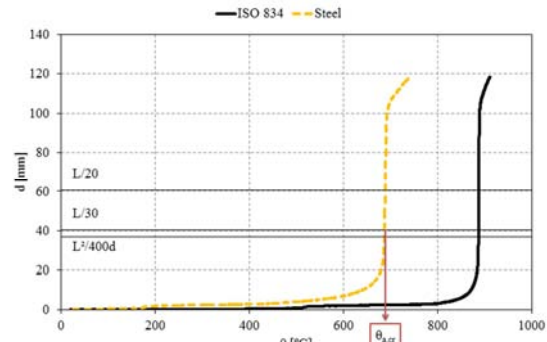


Gráfico V.193 – Deslocamento versus temperatura.

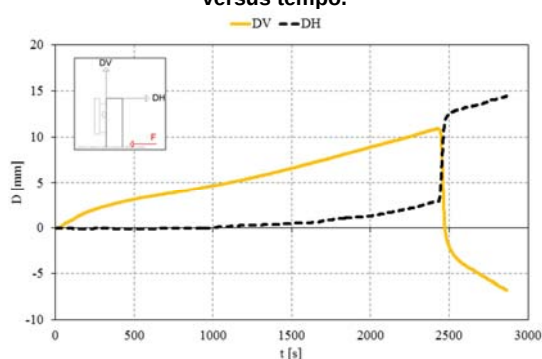


Gráfico V.194 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

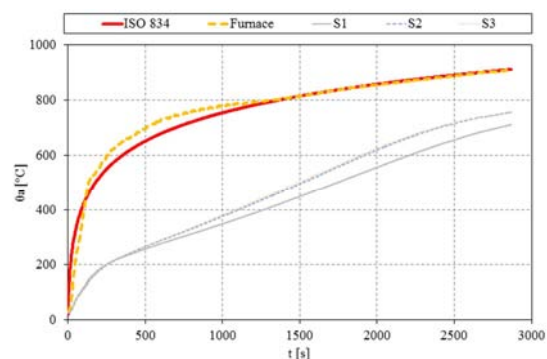


Gráfico V.195 – Temperatura média nas seções, versus tempo.

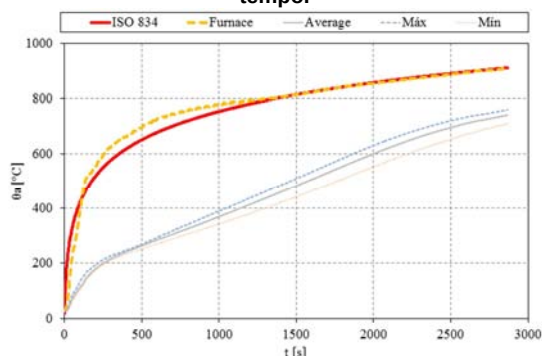


Gráfico V.196 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

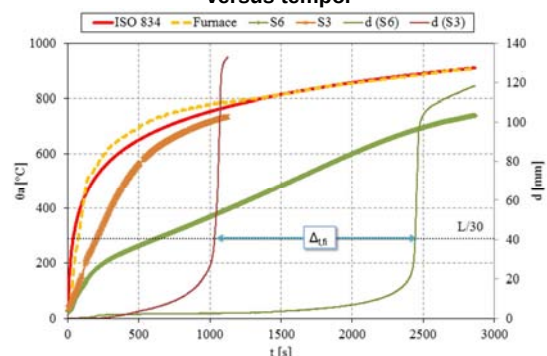


Gráfico V.197 – Comparação com um elemento da mesma seção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.120 – Início do ensaio.



Figura V.121 – Reacção da protecção.

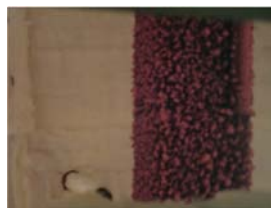


Figura V.122 – Camada intumescente formada.



Figura V.123 – Fase final do ensaio.



Figura V.124 – Ensaio terminado, ainda com os queimadores do forno ligados.



Figura V.125 – Deformação final imposta ao elemento.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogênea da camada intumescente da protecção, registando-se depois uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por rótula plástica.

Instante tempo [s]				Resistência do elemento:		Grau de utilização real	
				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]		
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	40	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
2254	2442	2444	2453		687,79	21%	26%

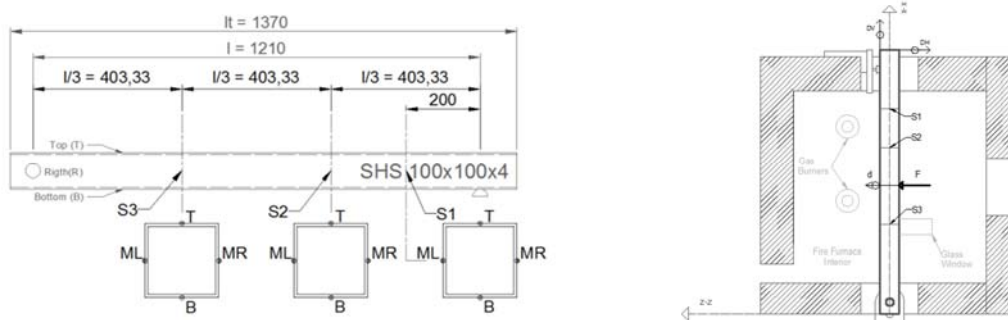
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: S7
Data: 01 \ 09 \ 2010
Tipo de secção: SHS 100x100x4
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 13620 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,094 [mm]
Duração do ensaio: 49 [min]
Temperatura máxima registada: 904,16 [°C]

Descrição do ensaio:

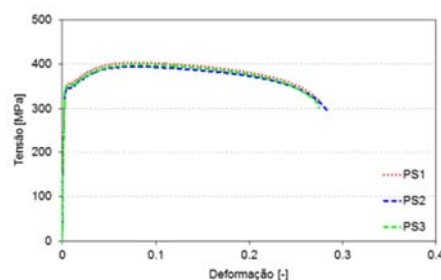
Ensaio de resistência ao fogo de elemento SHS 100x100x4, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=30\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=663,78^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (S3), tem uma resistência ao fogo de 17 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



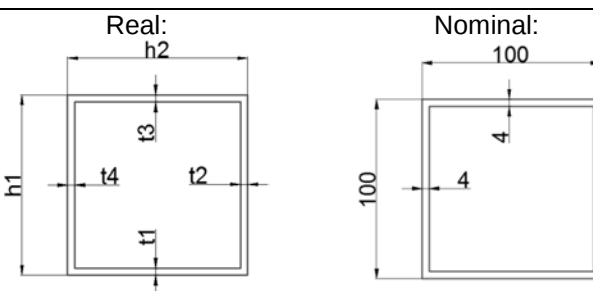
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete nº	E [GPa]	Rp,0.2 [MPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
PS1	172,694	348,557	356,923	357,119	403,828	--
PS2	204,890	338,633	346,223	346,223	394,875	--
PS3	209,222	344,860	352,842	351,667	397,796	--
Média	195,602	344,017	351,996	351,670	398,833	--
Desv. Padrão	19,957	5,016	5,400	5,448	4,566	--



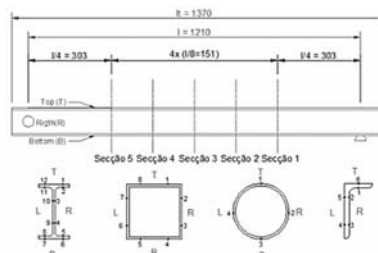
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)					
	h1	h2	t1	t2	t3	t4
1	99,90	99,90	4,24	4,15	4,29	4,18
2	100,30	100,30	4,14	4,22	4,17	4,14
3	99,90	100,30	4,19	4,12	4,13	4,22
4	99,90	100,20	4,14	4,11	4,16	4,22
Média	100,00	100,18	4,18	4,15	4,19	4,19
Desv pad	0,20	0,19	0,05	0,05	0,07	0,04
Máx	100,30	100,30	4,24	4,22	4,29	4,22
Mín	99,90	99,90	4,14	4,11	4,13	4,14
Média t	100,09		4,18			
Desv pad t	0,20		0,05			
Máx t	100,30		4,29			
Mín t	99,90		4,11			



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1161	1204	1112	1141	959	1115,40	93,62	1204	959
2	1128	1019	1055	1044	1061	1061,40	40,55	1128	1019
3	906	1111	1085	1122	1027	1050,20	88,59	1122	906
4	1063	1225	1269	1229	900	1137,20	154,33	1269	900
5	1220	1103	1194	1225	1049	1158,20	78,32	1225	1049
6	995	1001	1013	1115	987	1022,20	52,74	1115	987
7	1035	1188	1201	1338	963	1145,00	147,87	1338	963
8	1121	1219	1117	1058	777	1058,40	167,58	1219	777
Média	1078,63	1133,75	1130,75	1159,00	965,38	1093,50			
Desv pad	99,96	89,22	84,76	98,82	92,74		112,77		
Máx	1220	1225	1269	1338	1061			1338	
Mín	906	1001	1013	1044	777				777



Resultados:

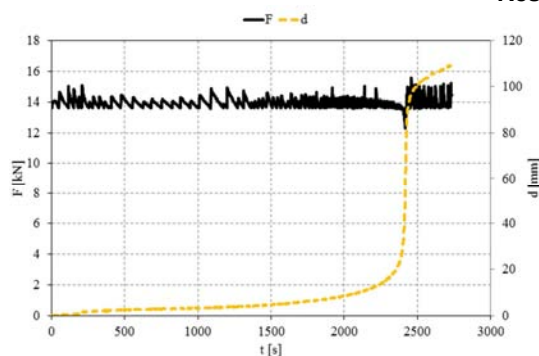


Gráfico V.198 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

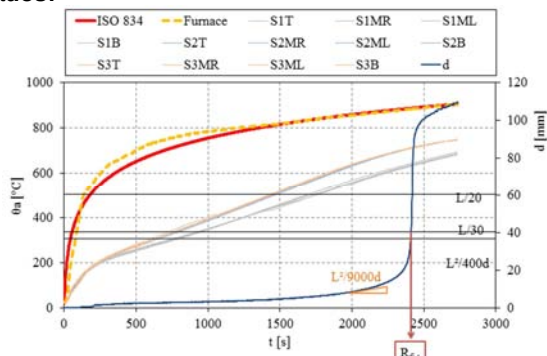


Gráfico V.199 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

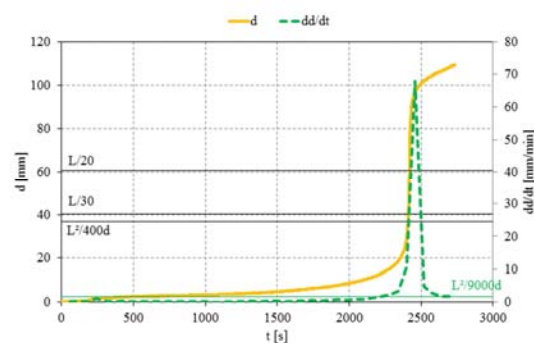


Gráfico V.200 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

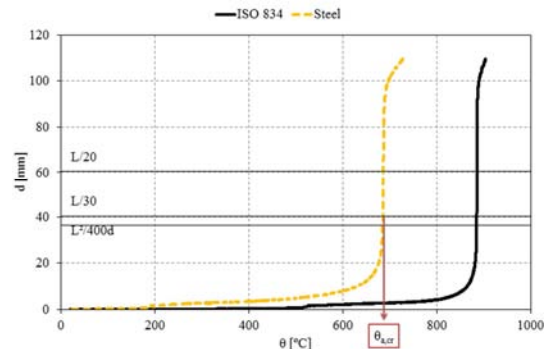


Gráfico V.201 – Deslocamento versus temperatura.

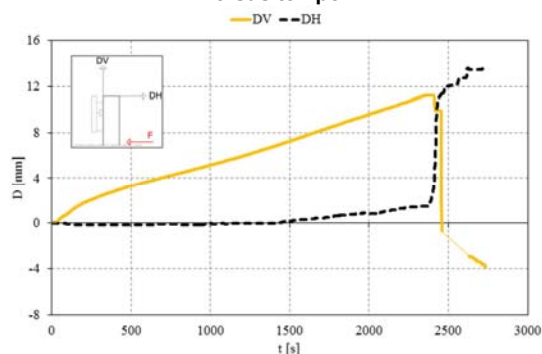


Gráfico V.202 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

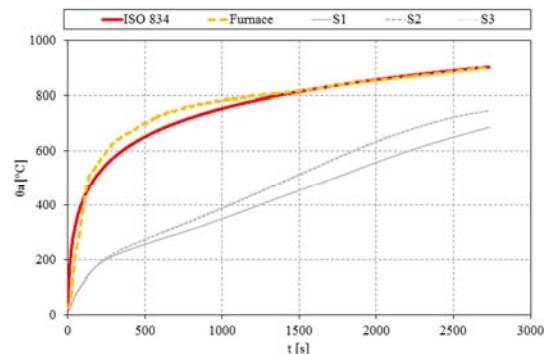


Gráfico V.203 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

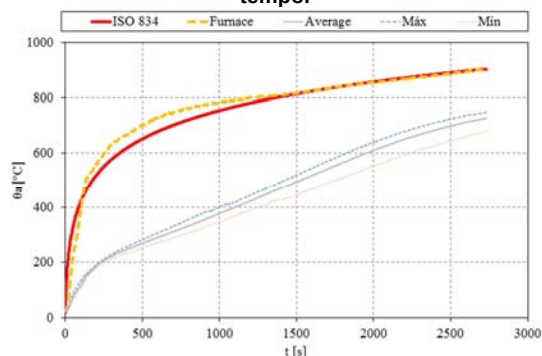


Gráfico V.204 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

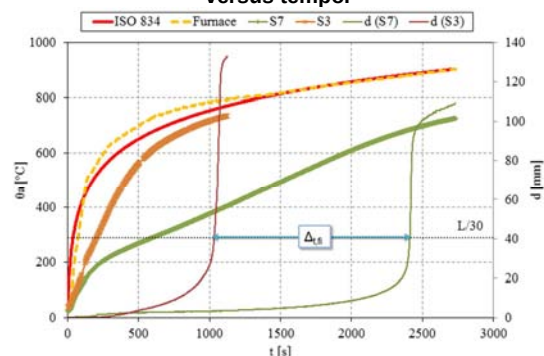


Gráfico V.205 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.126 – Início da reacção da camada de protecção.



Figura V.127 – Formação da camada intumescente.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogénea da camada intumescente da protecção, registando-se depois uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por rótula plástica.

				Resistência do elemento:			
Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	40	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
2219	2409	2411	2419		685,53	21%	26%

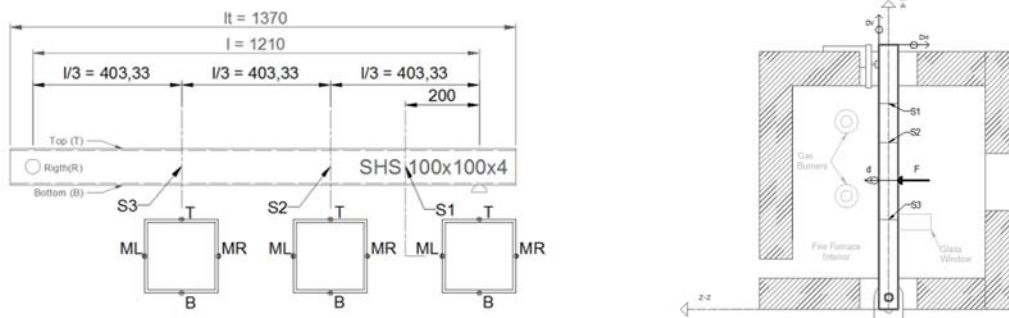
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: S8
Data: 01 \ 09 \ 2010
Tipo de secção: SHS 100x100x4
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 22250 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,141 [mm]
Duração do ensaio: 49 [min]
Temperatura máxima registada: 910,37 [°C]

Descrição do ensaio:

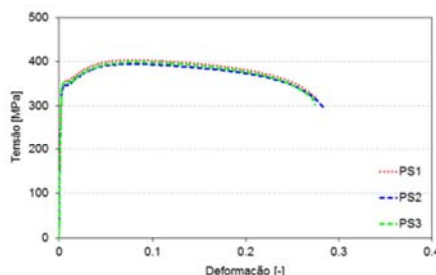
Ensaio de resistência ao fogo de elemento SHS 100x100x4, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (S4), tem uma resistência ao fogo de 11 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



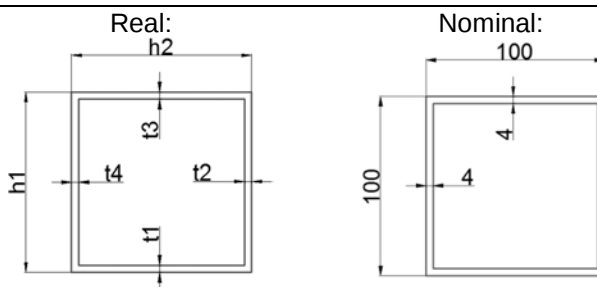
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete nº	E [GPa]	Rp,0.2 [MPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
PS1	172,694	348,557	356,923	357,119	403,828	--
PS2	204,890	338,633	346,223	346,223	394,875	--
PS3	209,222	344,860	352,842	351,667	397,796	--
Média	195,602	344,017	351,996	351,670	398,833	--
Desv. Padrão	19,957	5,016	5,400	5,448	4,566	--



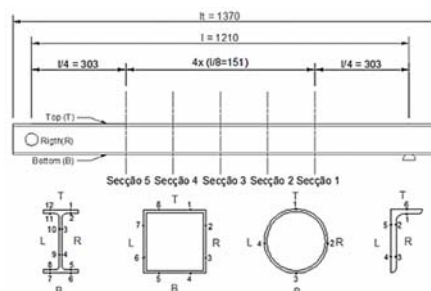
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)					
	h1	h2	t1	t2	t3	t4
1	99,90	99,90	4,24	4,15	4,29	4,18
2	100,30	100,30	4,14	4,22	4,17	4,14
3	99,90	100,30	4,19	4,12	4,13	4,22
4	99,90	100,20	4,14	4,11	4,16	4,22
Média	100,00	100,18	4,18	4,15	4,19	4,19
Desv pad	0,20	0,19	0,05	0,05	0,07	0,04
Máx	100,30	100,30	4,24	4,22	4,29	4,22
Mín	99,90	99,90	4,14	4,11	4,13	4,14
Média t	100,09		4,18			
Desv pad t	0,20		0,05			
Máx t	100,30		4,29			
Mín t	99,90		4,11			



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1305	1271	1133	1067	1167	1188,60	98,34	1305	1067
2	1143	1234	1029	1112	1030	1109,60	85,77	1234	1029
3	1014	1210	1204	995	1094	1103,40	101,63	1210	995
4	1160	1082	1309	1179	975	1141,00	123,56	1309	975
5	1288	1174	1250	1256	970	1187,60	128,63	1288	970
6	1152	1153	1180	1239	1028	1150,40	77,00	1239	1028
7	1081	1155	1191	1236	993	1131,20	95,84	1236	993
8	1195	1145	1058	1242	944	1116,80	118,22	1242	944
Média	1167,25	1178,00	1169,25	1165,75	1025,13	1141,08			
Desv pad	97,19	58,90	93,51	97,27	73,75		100,14		
Máx	1305	1271	1309	1256	1167			1309	
Mín	1014	1082	1029	995	944				944



Resultados:

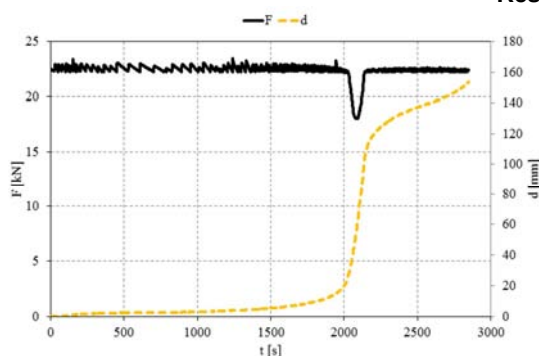


Gráfico V.206 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

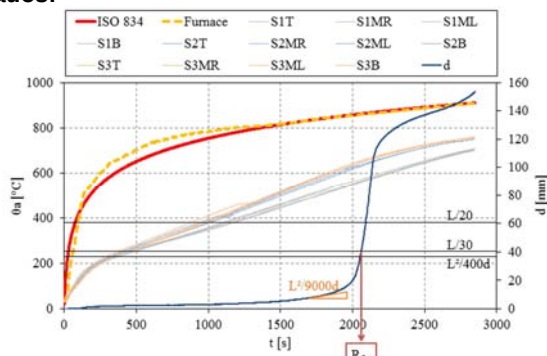


Gráfico V.207 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

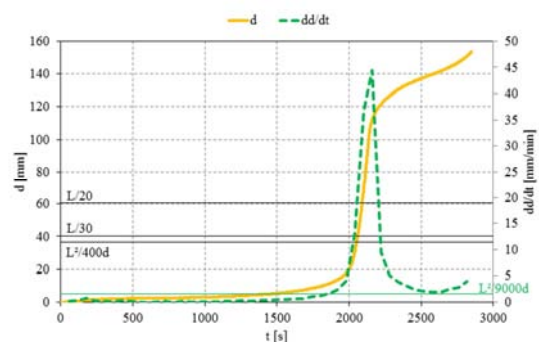


Gráfico V.208 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

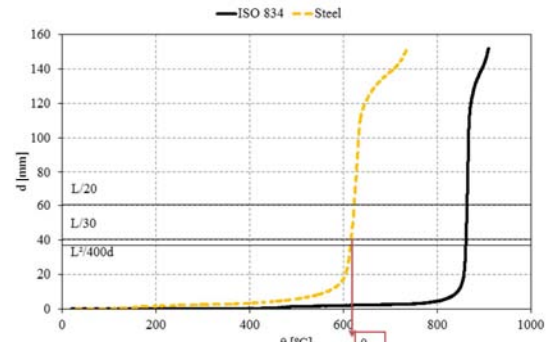


Gráfico V.209 – Deslocamento versus temperatura.

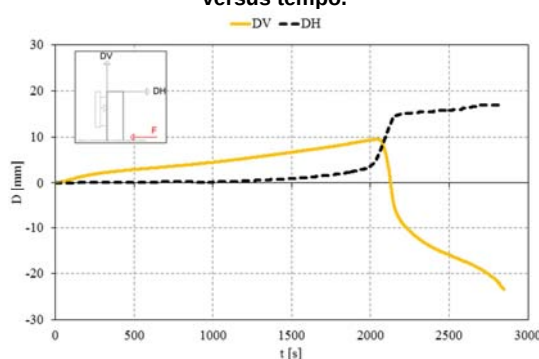


Gráfico V.210 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

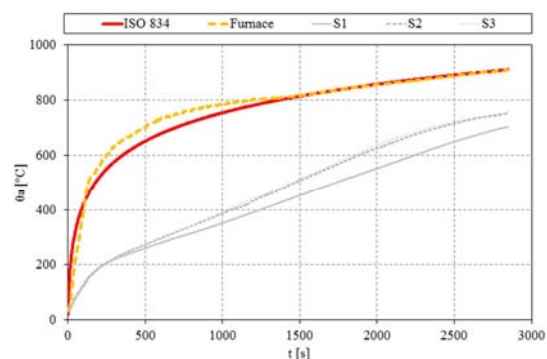


Gráfico V.211 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

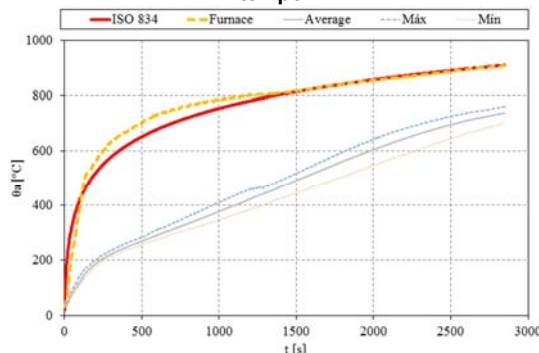


Gráfico V.212 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

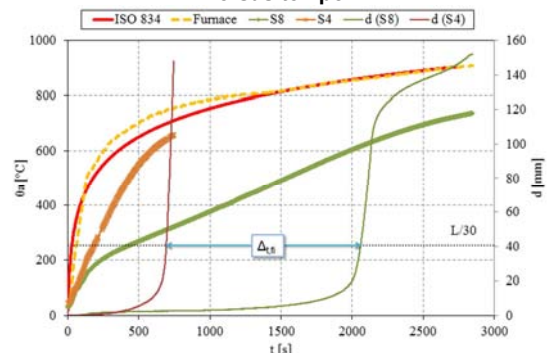


Gráfico V.213 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:

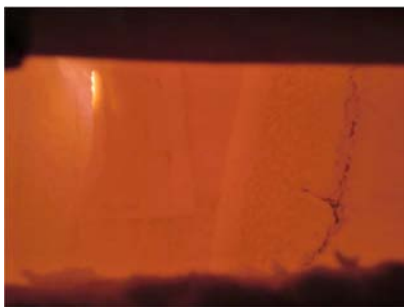


Figura V.128 – Fase final do ensaio já com o elemento na sua ruptura.

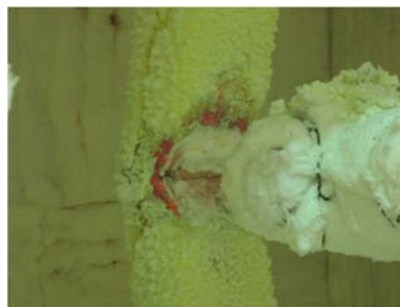


Figura V.129 – Estado de deformação por rótula plástica.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogénea da camada intumescente da protecção, registando-se depois uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por rótula plástica.

				Resistência do elemento:			
Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
$L^2/9000d$	$L^2/400d$	L/30	L/20	34	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
1860	2053	2060	2091		617,08	32%	41%

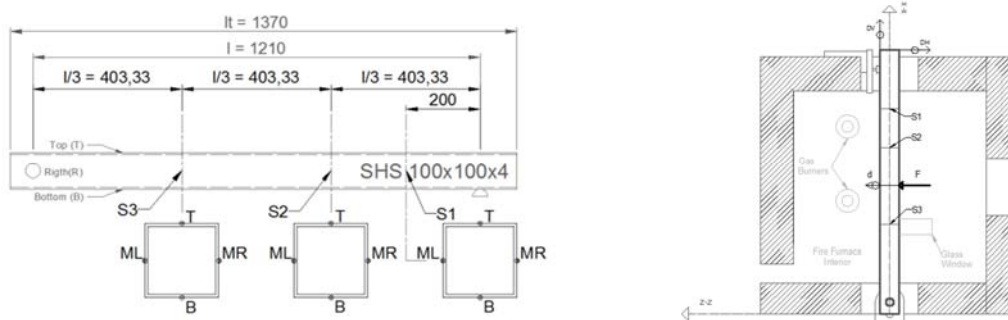
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: S9
Data: 03 \ 09 \ 2010
Tipo de secção: SHS 100x100x4
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 22250 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,141 [mm]
Duração do ensaio: 49 [min]
Temperatura máxima registada: 886,42 [°C]

Descrição do ensaio:

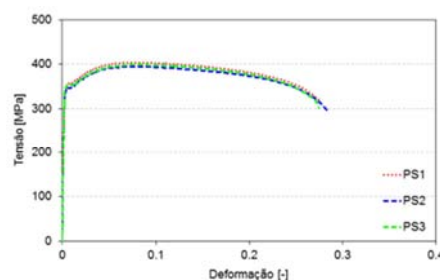
Ensaio de resistência ao fogo de elemento SHS 100x100x4, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (S4), tem uma resistência ao fogo de 11 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



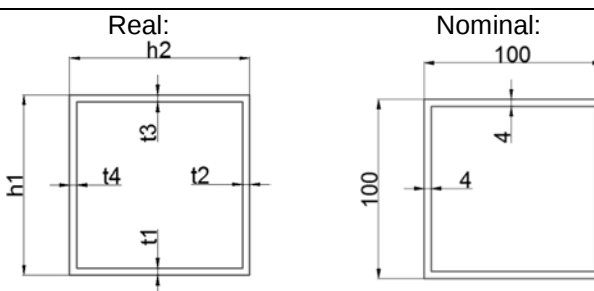
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete nº	E [GPa]	Rp,0.2 [MPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
PS1	172,694	348,557	356,923	357,119	403,828	--
PS2	204,890	338,633	346,223	346,223	394,875	--
PS3	209,222	344,860	352,842	351,667	397,796	--
Média	195,602	344,017	351,996	351,670	398,833	--
Desv. Padrão	19,957	5,016	5,400	5,448	4,566	--



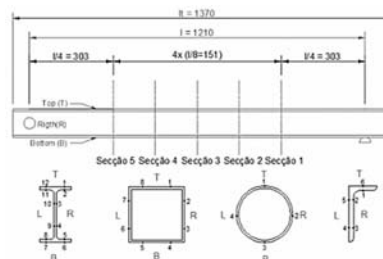
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)					
	h1	h2	t1	t2	t3	t4
1	99,90	99,90	4,24	4,15	4,29	4,18
2	100,30	100,30	4,14	4,22	4,17	4,14
3	99,90	100,30	4,19	4,12	4,13	4,22
4	99,90	100,20	4,14	4,11	4,16	4,22
Média	100,00	100,18	4,18	4,15	4,19	4,19
Desv pad	0,20	0,19	0,05	0,05	0,07	0,04
Máx	100,30	100,30	4,24	4,22	4,29	4,22
Mín	99,90	99,90	4,14	4,11	4,13	4,14
Média t	100,09		4,18			
Desv pad t	0,20		0,05			
Máx t	100,30		4,29			
Mín t	99,90		4,11			



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1121	1224	1267	1070	1128	1162,00	80,89	1267	1070
2	1279	1130	943	1150	938	1088,00	146,30	1279	938
3	1107	1187	1173	1350	1140	1191,40	93,91	1350	1107
4	1084	1039	1057	1099	909	1037,60	75,56	1099	909
5	1195	1131	1149	1081	1180	1147,20	44,75	1195	1081
6	1224	1184	1232	1208	1296	1228,80	41,80	1296	1184
7	963	1289	1243	1175	1050	1144,00	135,45	1289	963
8	1209	1244	1130	1008	1062	1130,60	98,42	1244	1008
Média	1147,75	1178,50	1149,25	1142,63	1087,88	1141,20			
Desv pad	99,71	78,14	107,89	105,21	126,88		103,62		
Máx	1279	1289	1267	1350	1296			1350	
Mín	963	1039	943	1008	909				909



Resultados:

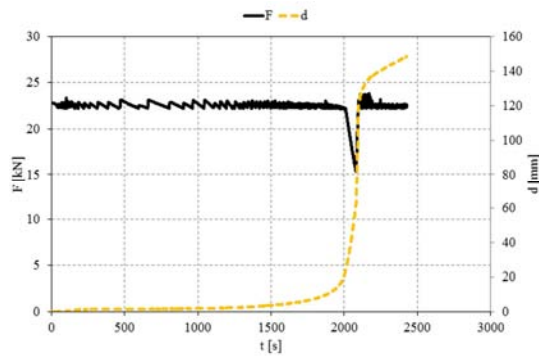


Gráfico V.214 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

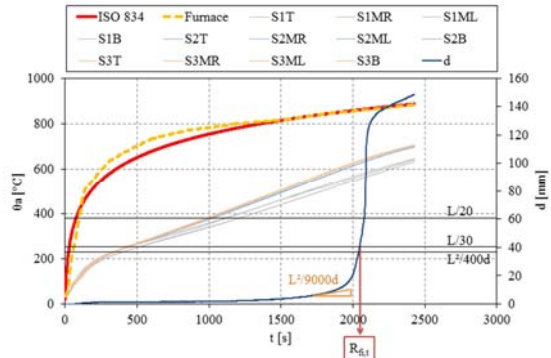


Gráfico V.215 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

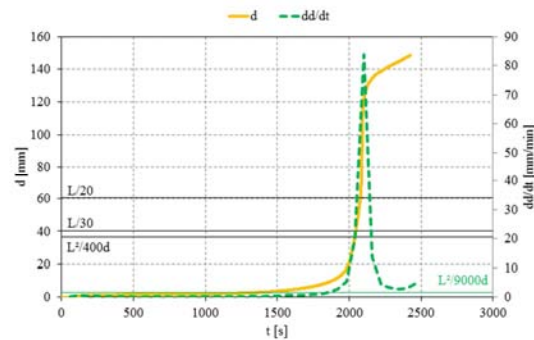


Gráfico V.216 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

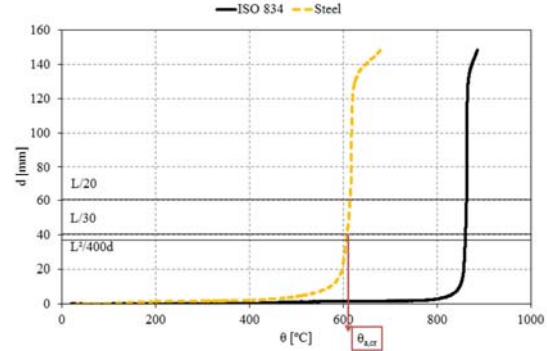


Gráfico V.217 – Deslocamento versus temperatura.

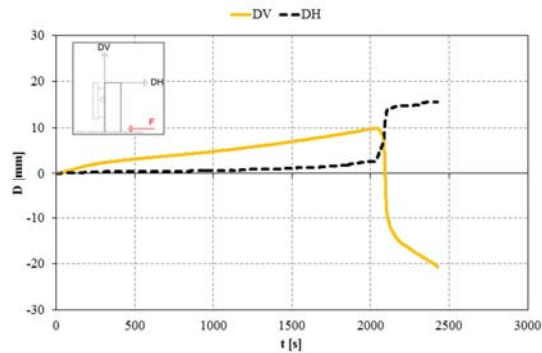


Gráfico V.218 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

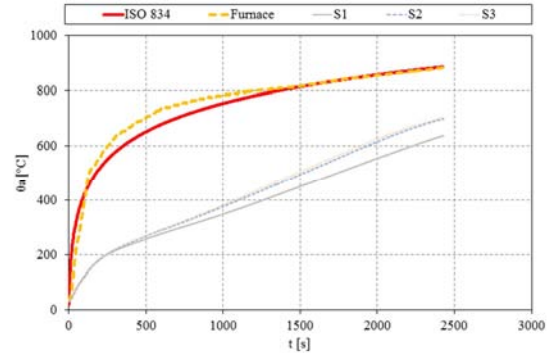


Gráfico V.219 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

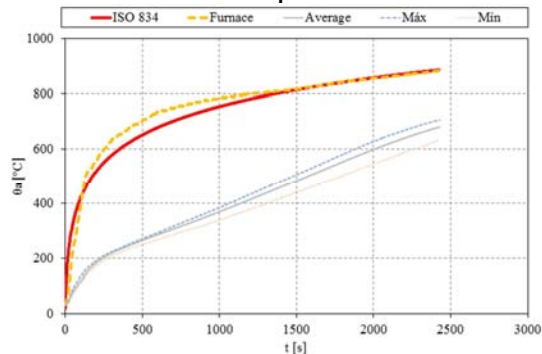


Gráfico V.220 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

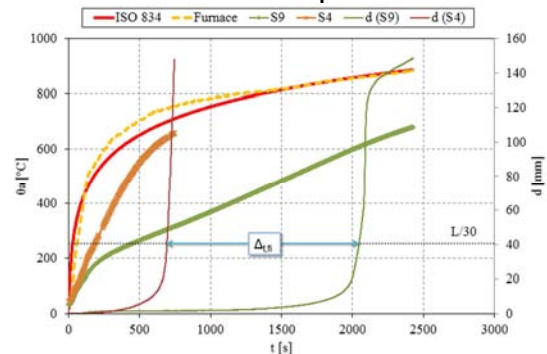


Gráfico V.221 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.130 – Início da reacção da protecção.



Figura V.131 – Camada intumescente já totalmente formada.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogénea da camada intumescente da protecção, registando-se depois uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por rótula plástica.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	34	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
1856	2040	2047	2078		608,73	32%	43%

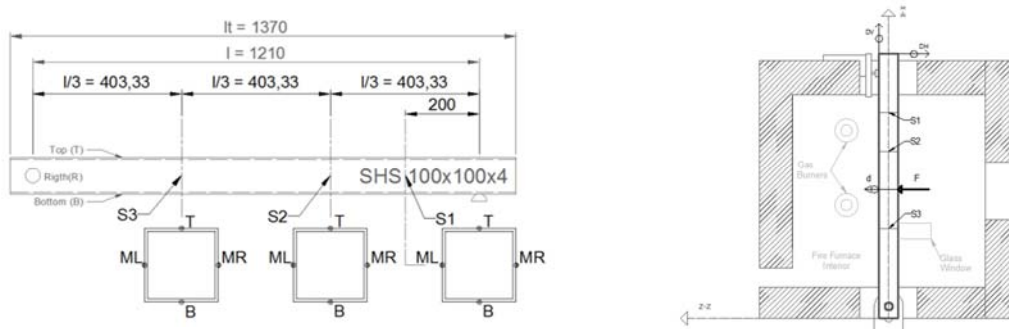
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: S10
Data: 02 \ 09 \ 2010
Tipo de secção: SHS 100x100x4
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 30090 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,144 [mm]
Duração do ensaio: 34 [min]
Temperatura máxima registada: 851,19 [°C]

Descrição do ensaio:

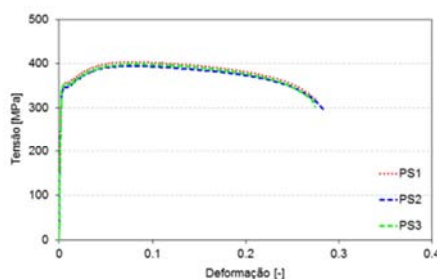
Ensaio de resistência ao fogo de elemento SHS 100x100x4, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=70\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=525,78^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (S5), tem uma resistência ao fogo de 9 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



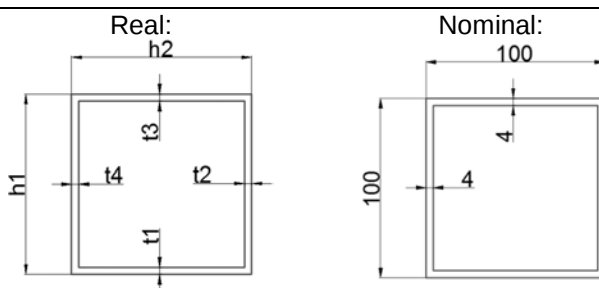
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Proveite nº	E [GPa]	Rp,0.2 [MPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
PS1	172,694	348,557	356,923	357,119	403,828	--
PS2	204,890	338,633	346,223	346,223	394,875	--
PS3	209,222	344,860	352,842	351,667	397,796	--
Média	195,602	344,017	351,996	351,670	398,833	--
Desv. Padrão	19,957	5,016	5,400	5,448	4,566	--



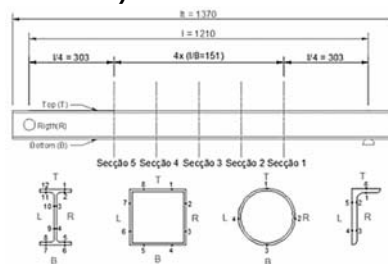
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)					
	h1	h2	t1	t2	t3	t4
1	99,90	99,90	4,24	4,15	4,29	4,18
2	100,30	100,30	4,14	4,22	4,17	4,14
3	99,90	100,30	4,19	4,12	4,13	4,22
4	99,90	100,20	4,14	4,11	4,16	4,22
Média	100,00	100,18	4,18	4,15	4,19	4,19
Desv pad	0,20	0,19	0,05	0,05	0,07	0,04
Máx	100,30	100,30	4,24	4,22	4,29	4,22
Mín	99,90	99,90	4,14	4,11	4,13	4,14
Média t	100,09		4,18			
Desv pad t	0,20		0,05			
Máx t	100,30		4,29			
Mín t	99,90		4,11			



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1117	1086	1158	1243	1100	1140,80	63,20	1243	1086
2	1103	1171	1024	1051	1088	1087,40	56,07	1171	1024
3	1086	1039	968	1141	964	1039,60	76,28	1141	964
4	1082	1085	1237	1278	1043	1145,00	10,03	1278	1043
5	1293	1217	1386	1271	1047	1242,80	125,32	1386	1047
6	1156	1129	1113	1228	1056	1136,40	62,93	1228	1056
7	1126	1214	1166	1165	886	1111,40	129,81	1214	886
8	1086	1175	1277	1482	1207	1245,40	149,01	1482	1086
Média	1131,13	1139,50	1166,13	1232,38	1048,88	1143,60			
Desv pad	70,03	65,30	135,23	126,38	94,84		114,04		
Máx	1293	1217	1386	1482	1207			1482	
Mín	1082	1039	968	1051	886				886



Resultados:

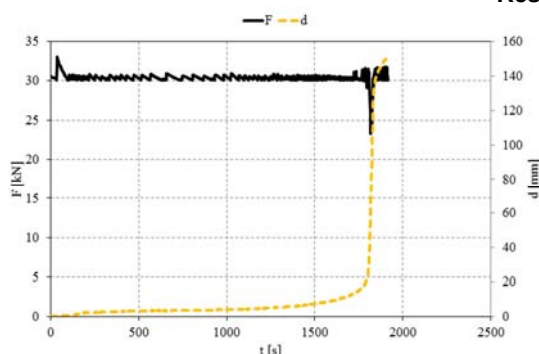


Gráfico V.222 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

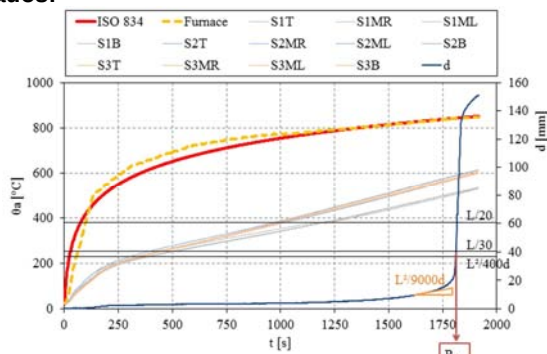


Gráfico V.223 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

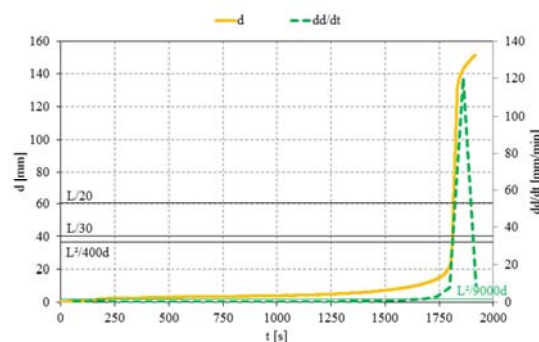


Gráfico V.224 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

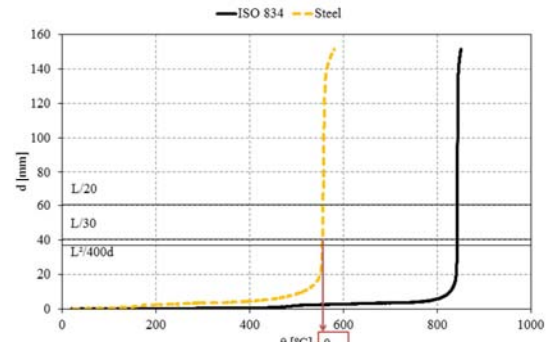


Gráfico V.225 – Deslocamento versus temperatura.

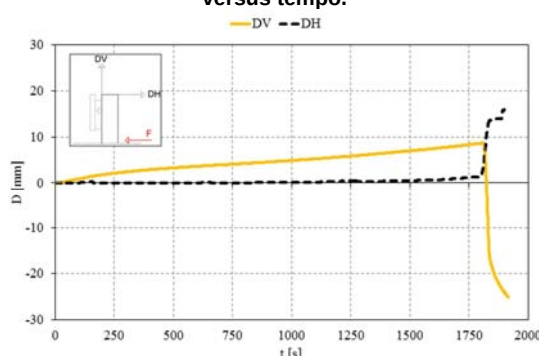


Gráfico V.226 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

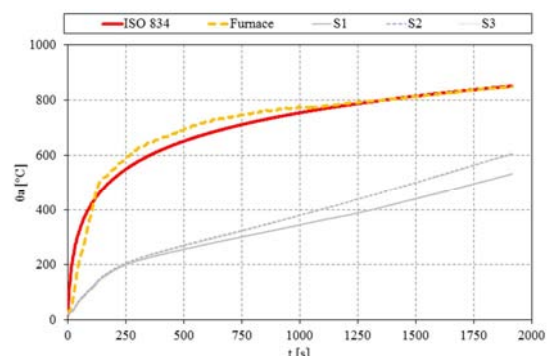


Gráfico V.227 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

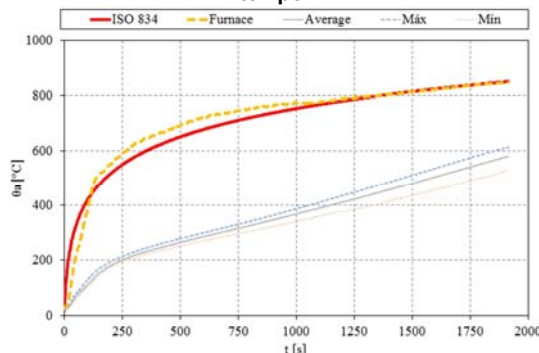


Gráfico V.228 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

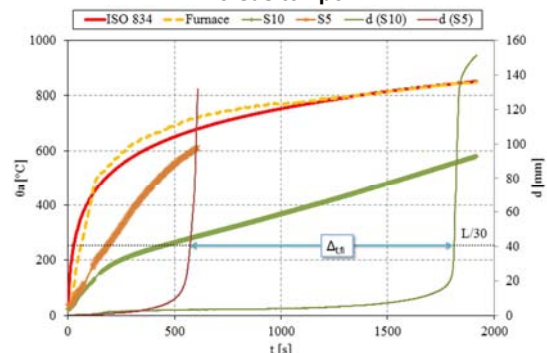


Gráfico V.229 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.132 – Final do ensaio, ainda com os queimadores do forno de resistência ligados.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogénea da camada intumescente da protecção, registando-se depois uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por rótula plástica.

				Resistência do elemento:			
Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	30	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
1732	1811	1812	1816		555,69	44%	60%

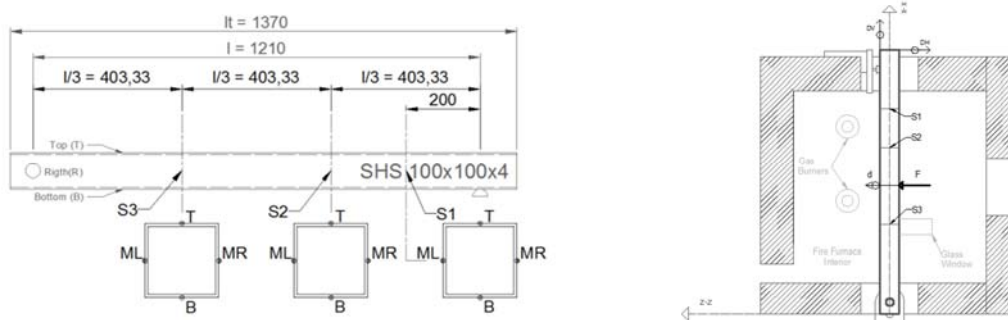
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: S11
Data: 03 \ 09 \ 2010
Tipo de secção: SHS 100x100x4
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 30090 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,131 [mm]
Duração do ensaio: 38 [min]
Temperatura máxima registada: 859,82 [°C]

Descrição do ensaio:

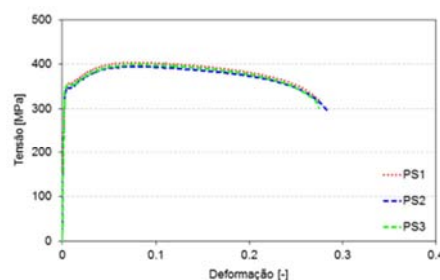
Ensaio de resistência ao fogo de elemento SHS 100x100x4, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=70\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=525,78^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (S5), tem uma resistência ao fogo de 9 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



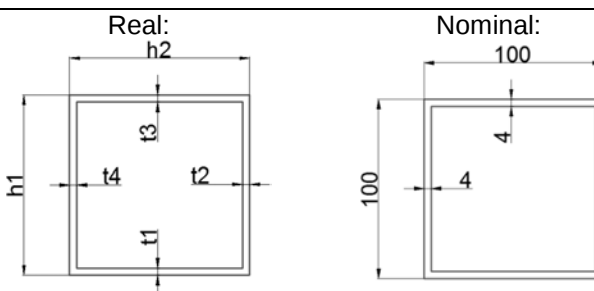
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete nº	E [GPa]	Rp,0.2 [MPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
PS1	172,694	348,557	356,923	357,119	403,828	--
PS2	204,890	338,633	346,223	346,223	394,875	--
PS3	209,222	344,860	352,842	351,667	397,796	--
Média	195,602	344,017	351,996	351,670	398,833	--
Desv. Padrão	19,957	5,016	5,400	5,448	4,566	--



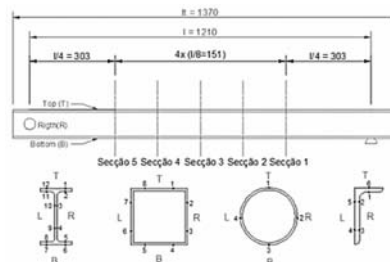
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)					
	h1	h2	t1	t2	t3	t4
1	99,90	99,90	4,24	4,15	4,29	4,18
2	100,30	100,30	4,14	4,22	4,17	4,14
3	99,90	100,30	4,19	4,12	4,13	4,22
4	99,90	100,20	4,14	4,11	4,16	4,22
Média	100,00	100,18	4,18	4,15	4,19	4,19
Desv pad	0,20	0,19	0,05	0,05	0,07	0,04
Máx	100,30	100,30	4,24	4,22	4,29	4,22
Mín	99,90	99,90	4,14	4,11	4,13	4,14
Média t	100,09		4,18			
Desv pad t	0,20		0,05			
Máx t	100,30		4,29			
Mín t	99,90		4,11			



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1114	1134	1190	1156	1027	1124,20	61,21	1190	1027
2	1190	1230	1139	1170	1057	1157,20	65,02	1230	1057
3	982	1243	1160	1066	994	1089,00	111,53	1243	982
4	1089	1166	1019	1018	1011	1060,60	66,94	1166	1011
5	1140	1270	1261	1199	1147	1203,40	61,18	1270	1140
6	1118	1074	1019	1128	1066	1081,00	43,86	1128	1019
7	1200	1222	1168	1264	1166	1204,00	40,87	1264	1166
8	1134	1222	1178	1244	854	1126,40	158,03	1244	854
Média	1120,88	1195,13	1141,75	1155,63	1040,25	1130,73			
Desv pad	67,54	65,26	83,69	83,99	97,11		92,20		
Máx	1200	1270	1261	1264	1166			1270	
Mín	982	1074	1019	1018	854				854



Resultados:

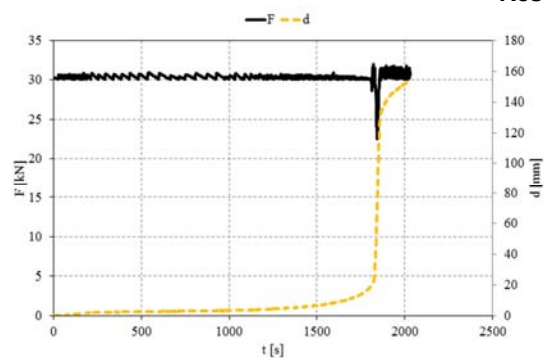


Gráfico V.230 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

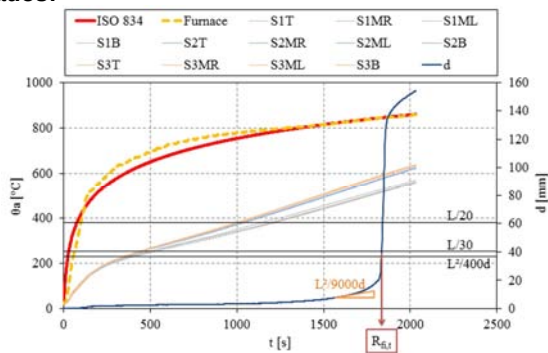


Gráfico V.231 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

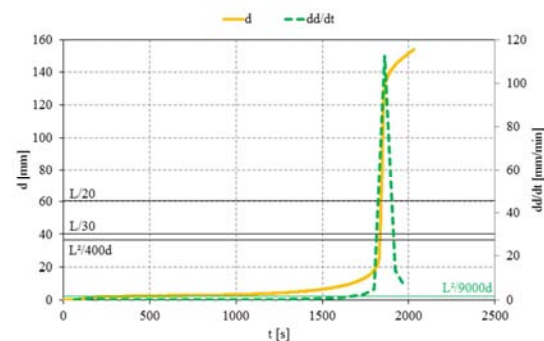


Gráfico V.232 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

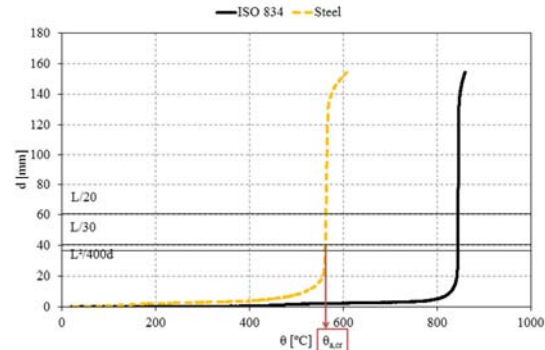


Gráfico V.233 – Deslocamento versus temperatura.

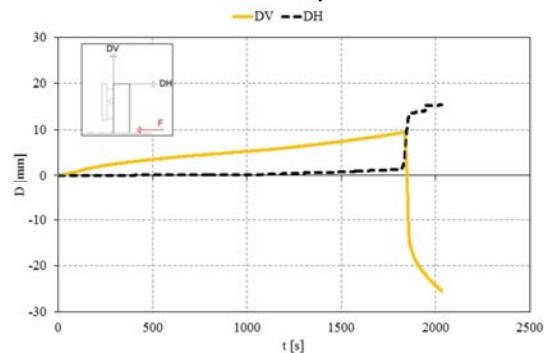


Gráfico V.234 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

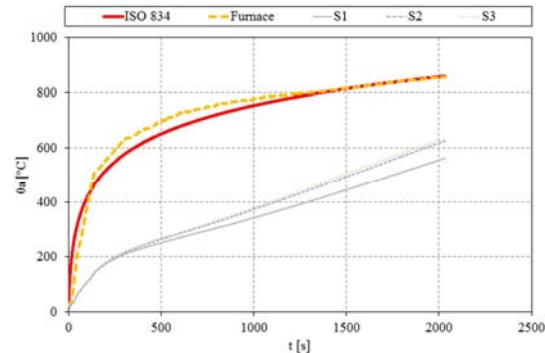


Gráfico V.235 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

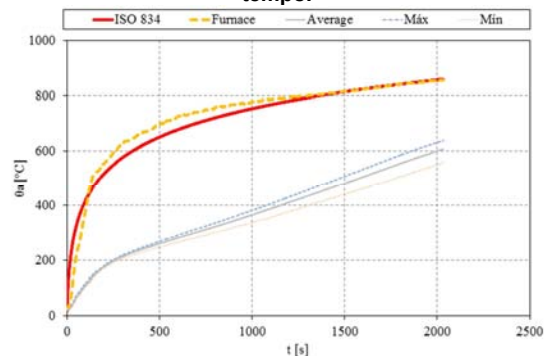


Gráfico V.236 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

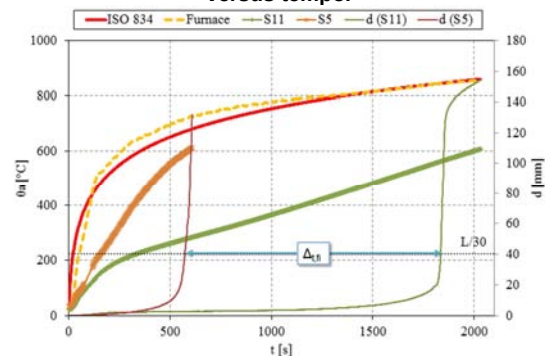


Gráfico V.237 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:

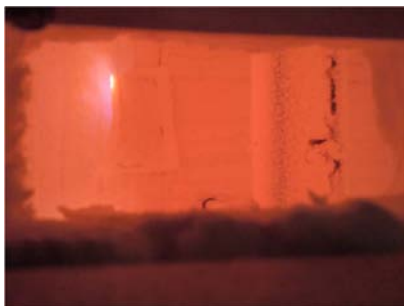


Figura V.133 – Camada intumescente já formada.



Figura V.134 – Rótula plástica imposta ao elemento depois do ensaio.

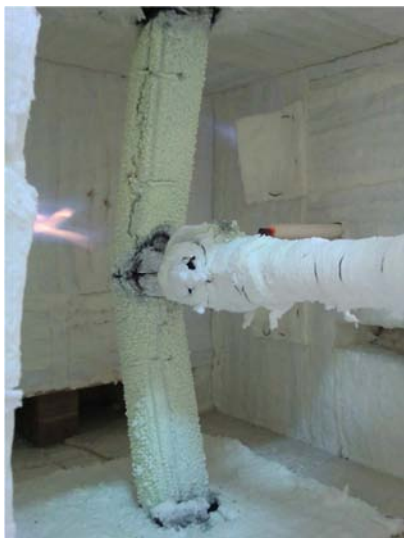


Figura V.135 – Final do ensaio, ainda com os queimadores ligados.



Figura V.136 – Estado de deformação imposto ao elemento.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogênea da camada intumescente da protecção, registando-se depois uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por rótula plástica.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20			Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
1712	1834	1836	1840	30	Média do perfil	44%	57%

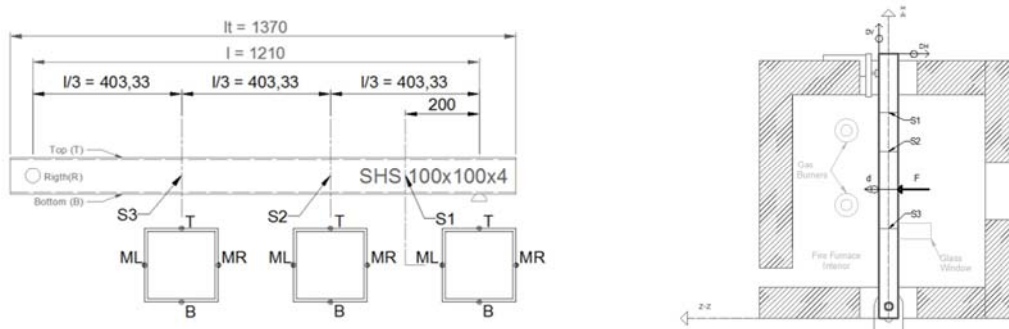
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: S12
Data: 08 \ 10 \ 2010
Tipo de secção: SHS 100x100x4
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 22250 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,933 [mm]
Duração do ensaio: 39 [min]
Temperatura máxima registada: 859,54 [°C]

Descrição do ensaio:

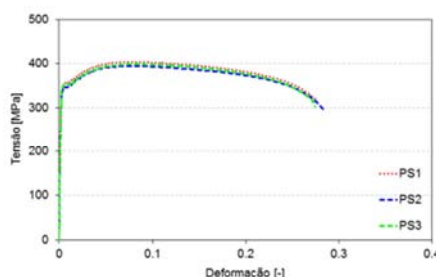
Ensaio de resistência ao fogo de elemento SHS 100x100x4, com aplicação de 2000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (S4), tem uma resistência ao fogo de 11 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



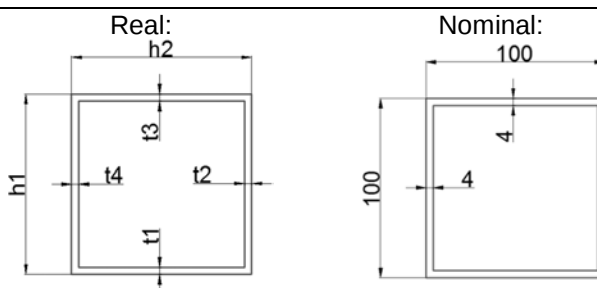
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Proveite nº	E [GPa]	Rp,0.2 [MPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
PS1	172,694	348,557	356,923	357,119	403,828	--
PS2	204,890	338,633	346,223	346,223	394,875	--
PS3	209,222	344,860	352,842	351,667	397,796	--
Média	195,602	344,017	351,996	351,670	398,833	--
Desv. Padrão	19,957	5,016	5,400	5,448	4,566	--



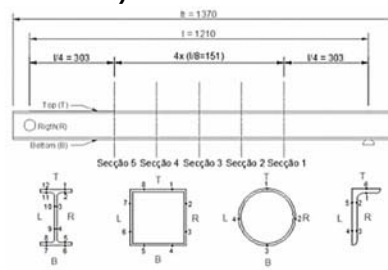
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)					
	h1	h2	t1	t2	t3	t4
1	99,90	99,90	4,24	4,15	4,29	4,18
2	100,30	100,30	4,14	4,22	4,17	4,14
3	99,90	100,30	4,19	4,12	4,13	4,22
4	99,90	100,20	4,14	4,11	4,16	4,22
Média	100,00	100,18	4,18	4,15	4,19	4,19
Desv pad	0,20	0,19	0,05	0,05	0,07	0,04
Máx	100,30	100,30	4,24	4,22	4,29	4,22
Mín	99,90	99,90	4,14	4,11	4,13	4,14
Média t	100,09		4,18			
Desv pad t	0,20		0,05			
Máx t	100,30		4,29			
Mín t	99,90		4,11			



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1820	1860	1840	1930	1760	1842,00	61,81	1930	1760
2	2030	1960	2020	1910	1970	1978,00	48,68	2030	1910
3	1800	1940	1970	1980	1930	1924,00	72,32	1980	1800
4	2000	2210	2140	060	175	20 2,00	176,55	2210	1750
5	1930	2070	2020	1950	1820	1958,00	95,24	2070	1820
6	1980	1930	1880	2130	1730	1930,00	145,77	2130	1730
7	1840	1820	1820	2020	1890	1878,00	84,38	2020	1820
8	1940	1930	1940	2030	1740	1916,00	106,44	2030	1740
Média	1917,50	1965,00	1953,75	2001,25	1823,75	1932,25			
Desv pad	87,30	123,17	107,03	73,38	94,41		111,64		
Máx	2030	2210	2140	2130	1970			2210	
Mín	1800	1820	1820	1910	1730				1730



Resultados:

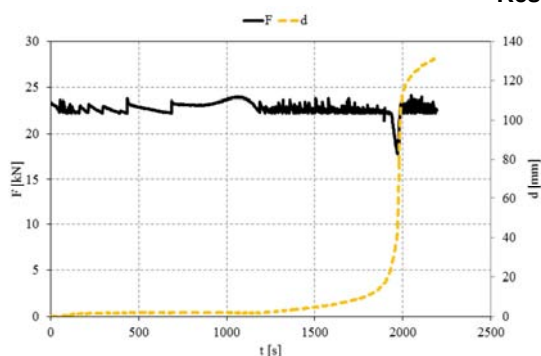


Gráfico V.238 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

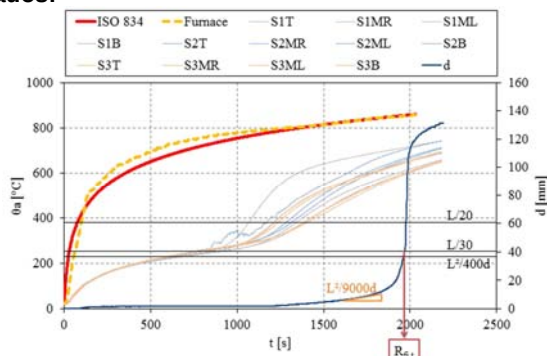


Gráfico V.239 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

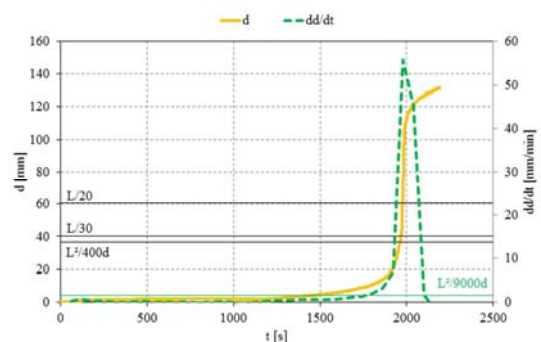


Gráfico V.240 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

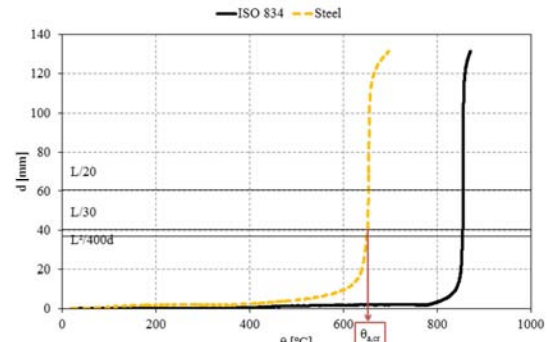


Gráfico V.241 – Deslocamento versus temperatura.

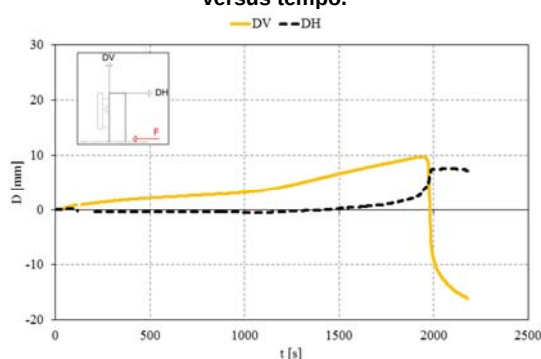


Gráfico V.242 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

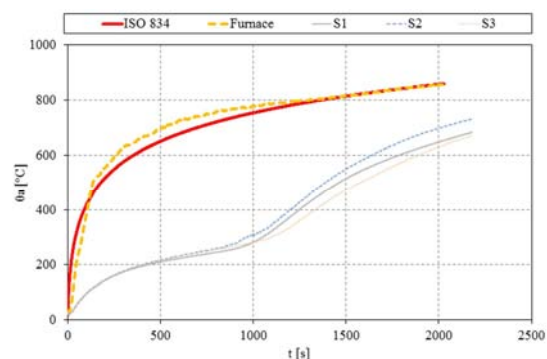


Gráfico V.243 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

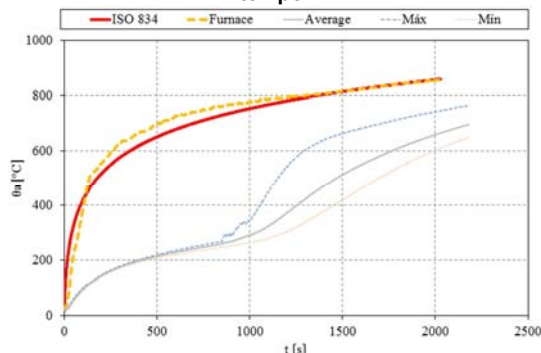


Gráfico V.244 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

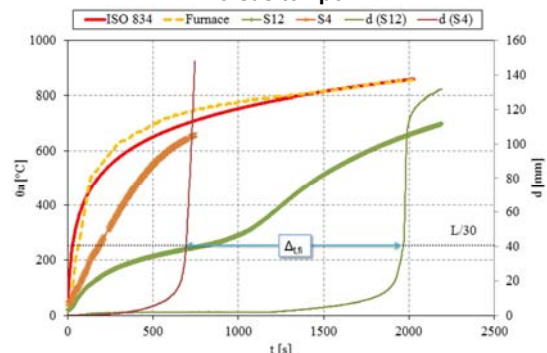


Gráfico V.245 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.137 – Formação da camada intumescente.



Figura V.138 – Fase intermédia do ensaio.



Figura V.139 – Início da retracção da camada.

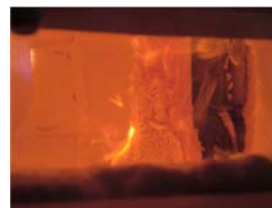


Figura V.140 – Visualização do aço exposto ao fogo.

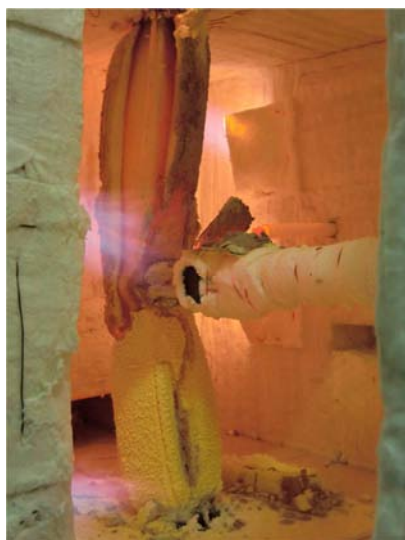


Figura V.141 – Final do ensaio, ainda com os queimadores ligados.



Figura V.142 – Visualização da retracção da camada intumescente, depois do ensaio terminado.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se um crescimento irregular e volumoso da camada intumescente. Durante o desenvolvimento da camada intumescente, observou-se que esta ia expondo superfícies do elemento às altas temperaturas, devido a um fenómeno de retracção da tinta intumescente. O facto de terem sido expostas zonas do aço às altas temperaturas, levou o elemento à sua ruptura por rótula plástica.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	32	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
1767	1961	1967	1976		651,64	32%	32%

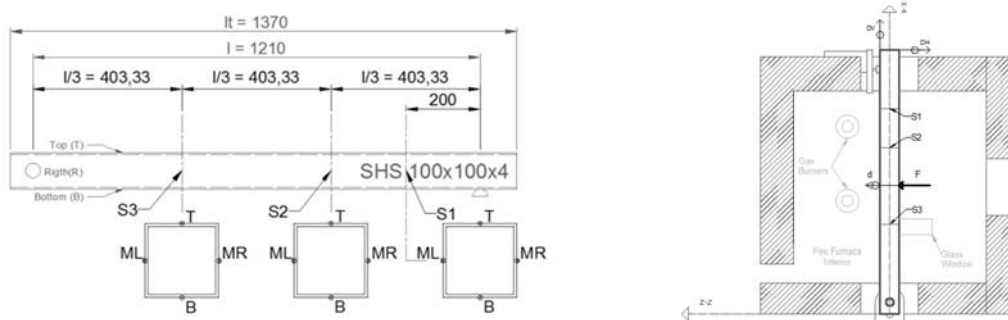
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: S13
Data: 11 \ 10 \ 2010
Tipo de secção: SHS 100x100x4
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 22250 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,932 [mm]
Duração do ensaio: 24 [min]
Temperatura máxima registada: 791,90 [°C]

Descrição do ensaio:

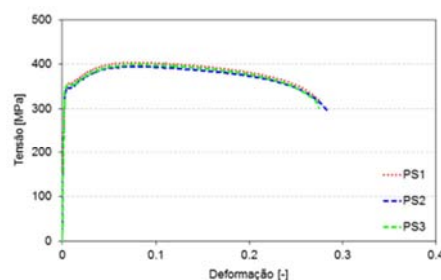
Ensaio de resistência ao fogo de elemento SHS 100x100x4, com aplicação de 2000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (S4), tem uma resistência ao fogo de 11 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



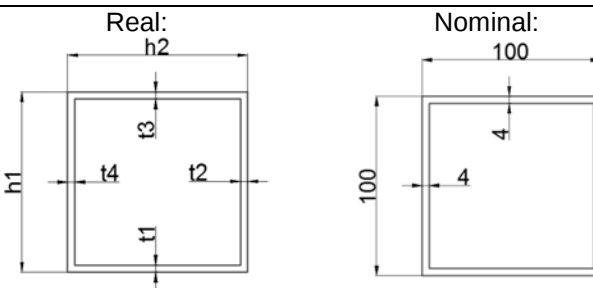
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete n°	E [GPa]	Rp,0.2 [MPa]	ReH [MPa]	ReL [MPa]	Rm [MPa]	At [%]
PS1	172,694	348,557	356,923	357,119	403,828	--
PS2	204,890	338,633	346,223	346,223	394,875	--
PS3	209,222	344,860	352,842	351,667	397,796	--
Média	195,602	344,017	351,996	351,670	398,833	--
Desv. Padrão	19,957	5,016	5,400	5,448	4,566	--



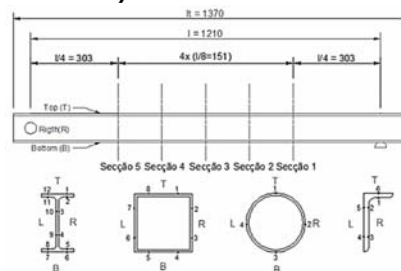
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)					
	h1	h2	t1	t2	t3	t4
1	99,90	99,90	4,24	4,15	4,29	4,18
2	100,30	100,30	4,14	4,22	4,17	4,14
3	99,90	100,30	4,19	4,12	4,13	4,22
4	99,90	100,20	4,14	4,11	4,16	4,22
Média	100,00	100,18	4,18	4,15	4,19	4,19
Desv pad	0,20	0,19	0,05	0,05	0,07	0,04
Máx	100,30	100,30	4,24	4,22	4,29	4,22
Mín	99,90	99,90	4,14	4,11	4,13	4,14
Média t	100,09		4,18			
Desv pad t	0,20		0,05			
Máx t	100,30		4,29			
Mín t	99,90		4,11			



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1780	1760	2000	2060	1980	1916,00	136,67	2060	1760
2	1800	1800	1930	2160	2110	1960,00	169,26	2160	1800
3	1770	1750	1810	1860	1830	1804,00	44,50	1860	1750
4	1980	1910	2040	2060	1800	1958,00	105,92	2060	1800
5	1840	1920	1910	1890	1800	1872,00	50,70	1920	1800
6	2090	2060	1970	2140	1870	2026,00	106,91	2140	1870
7	1700	1980	1770	1880	1760	1818,00	111,45	1980	1700
8	1980	2120	2170	2310	1980	2112,00	139,18	2310	1980
Média	1867,50	1912,50	1950,00	2045,00	1891,25	1933,25			
Desv pad	133,82	137,19	127,28	159,64	120,53		143,65		
Máx	2090	2120	2170	2310	2110			2310	
Mín	1700	1750	1770	1860	1760				1700



Resultados:

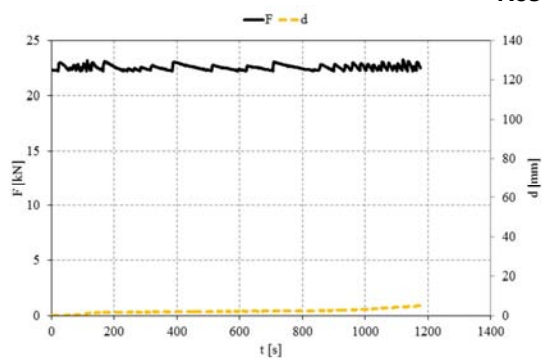


Gráfico V.246 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

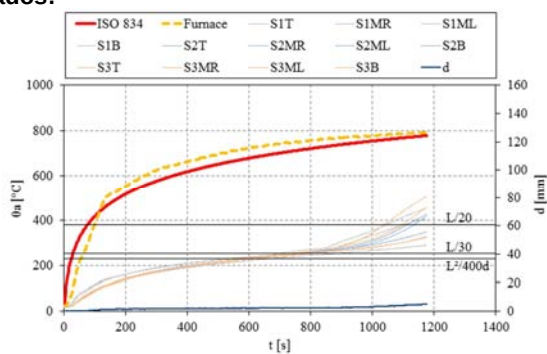


Gráfico V.247 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

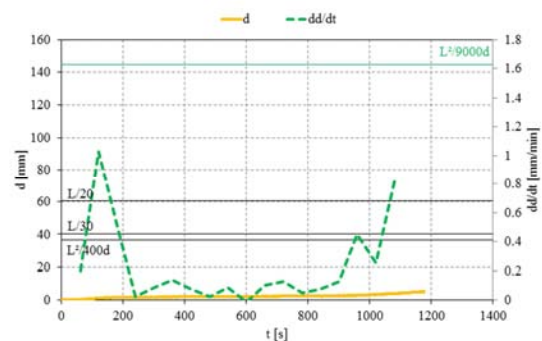


Gráfico V.248 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

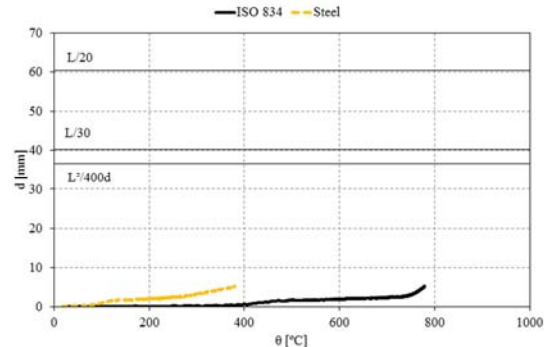


Gráfico V.249 – Deslocamento versus temperatura.

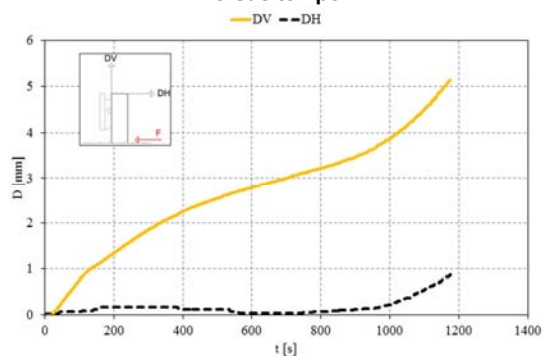


Gráfico V.250 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

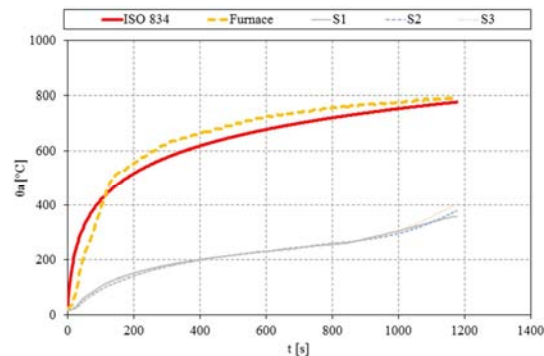


Gráfico V.251 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

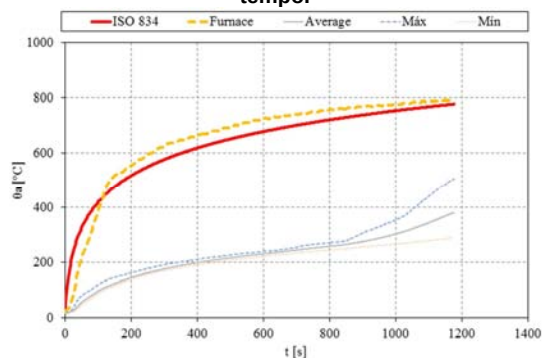


Gráfico V.252 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

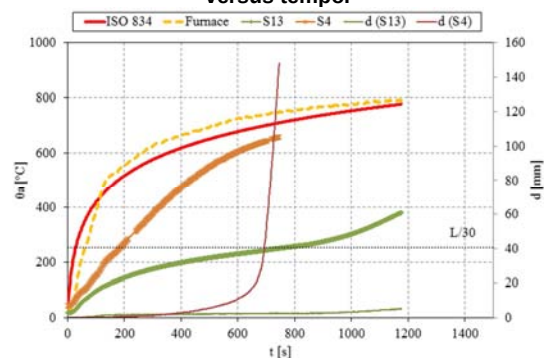


Gráfico V.253 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.143 – Formação da camada intumescente.



Figura V.144 – Formação de uma fractura na camada.



Figura V.145 – Camada intumescente formada.

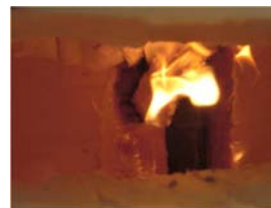


Figura V.146 – Visualização do aço exposto ao fogo.



Figura V.147 – Visualização do elemento na zona onde a camada não retraiu.



Figura V.148 – Visualização da retracção da camada intumescente.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se um crescimento irregular e volumoso da camada intumescente. Assim como o observado no ensaio anterior (S12), durante o desenvolvimento da camada intumescente, esta ia expondo superfícies do elemento às altas temperaturas, devido a um fenómeno de retracção da tinta intumescente. Perante o sucedido, decidiu-se terminar o ensaio antes de atingir a ruptura.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	--	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
--	--	--	--		--	32%	--

Tipo de ensaio: Ensaio de resistência à flexão de perfil metálico

Nome do teste: C1

Data: 17 \ 05 \ 2010

Tipo de secção: CHS 101,6x4,05

Tipo de aço: S235

Força aplicada: incremental [N]

Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Deformações: extensómetros 120Q

Curva de fogo utilizada: temperatura ambiente

Tipo de protecção: nenhuma

Espessura de protecção: 0,0 [mm]

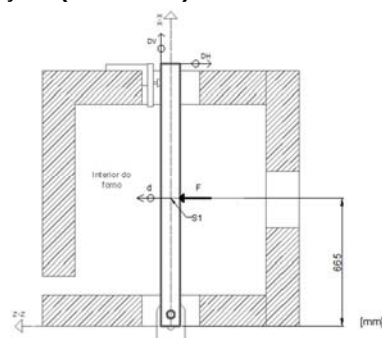
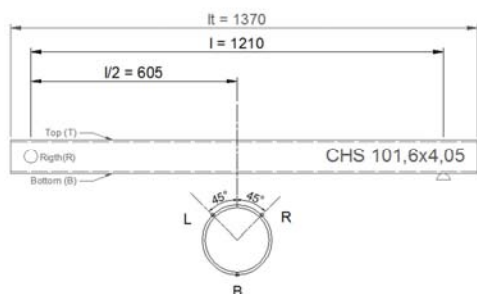
Duração do ensaio: --

Temperatura máxima registada: --

Descrição do ensaio:

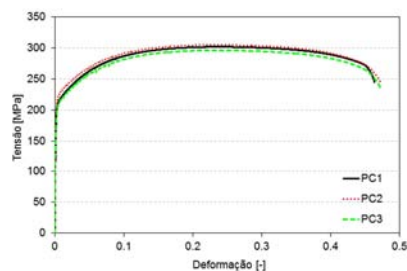
Ensaio de resistência à flexão de um perfil metálico com secção transversal CHS 101,6x4,05, em condições de temperatura ambiente. Serão aplicados incrementos de carga de 2000 [N]. A resistência à flexão do elemento, determinado pela EN1993-1-1, com as propriedades nominais do material e secção transversal, é de 29370 [N].

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



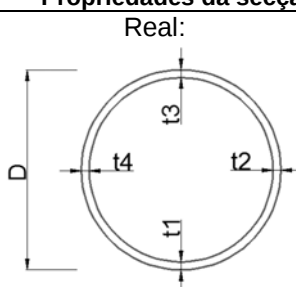
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete nº	E [GPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PC1	--	200,7042	--	--	301,4931	47,680
PC2	--	207,6773	--	--	304,7633	48,688
PC3	--	194,5968	--	--	295,9788	48,968
Média	--	200,993	--	--	300,745	48,445
Desv. Padrão	--	6,545	--	--	4,440	0,677

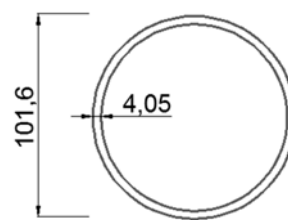


Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)				
	D	t1	t2	t3	t4
1	100,70	3,80	3,60	3,60	3,60
2	100,30	3,70	3,70	3,80	3,70
3	100,70	3,50	3,50	3,60	3,70
4	100,40				
Média	100,53	3,67	3,60	3,67	3,67
Desv pad	0,21	0,15	0,10	0,12	0,06
Máx	100,70	3,80	3,70	3,80	3,70
Mín	100,30	3,50	3,50	3,60	3,60
Média t	100,53			3,65	
Desv pad t	0,21			0,10	
Máx t	100,70			3,80	
Mín t	100,30			3,50	



Nominal:



Resultados:

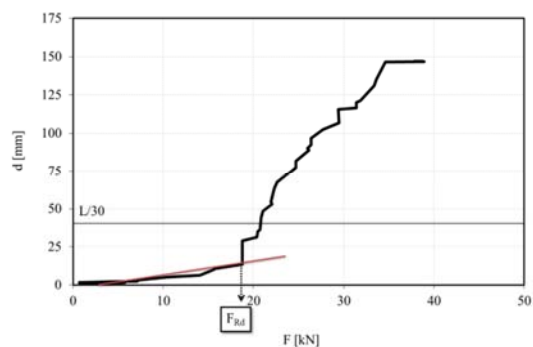


Gráfico V.254 – Força versus deslocamento a meio vão.

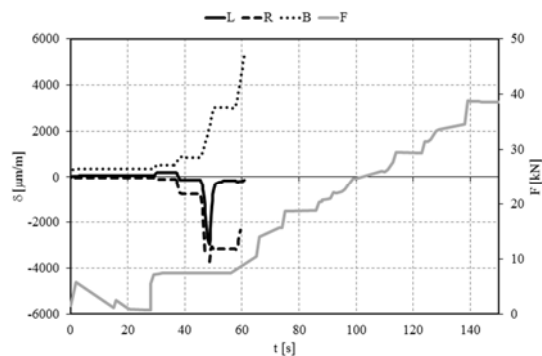


Gráfico V.255 – Deformação e força, versus tempo.

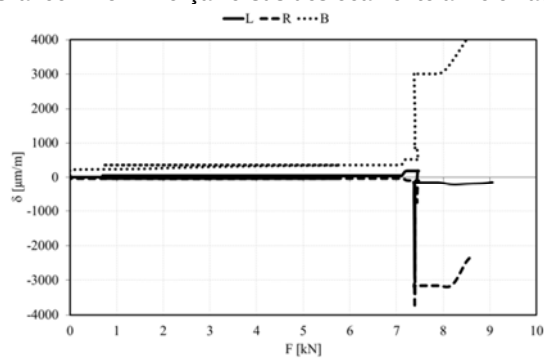


Gráfico V.256 – Deformação versus força.

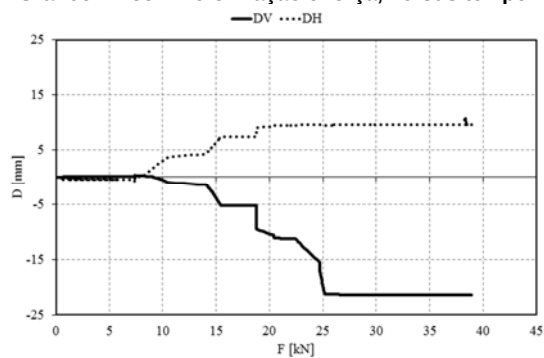


Gráfico V.257 – Deslocamento da extremidade do elemento versus força.

Registos fotográficos:



Figura V.149 – Início do ensaio.



Figura V.150 – Deformação provocada ao elemento no final do ensaio.



Figura V.151 – Formação da rótula plástica.



Figura V.152 – Vista no topo do elemento deformado.



Figura V.153 – Observação da rótula imposta ao elemento.

Resistência do elemento [N]:

Eurocódigo 3-1-1		Ensaio
Nominal	Real	
29.370,00	22.760,00	18.700,00

Tipo de ensaio: Ensaio de resistência à flexão de perfil metálico

Nome do teste: C2

Data: 18 \ 05 \ 2010

Tipo de secção: CHS 101,6x4,05

Tipo de aço: S235

Força aplicada: incremental [N]

Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Deformações: extensómetros 120Ω

Curva de fogo utilizada: temperatura ambiente

Tipo de protecção: nenhuma

Espessura de protecção: 0,0 [mm]

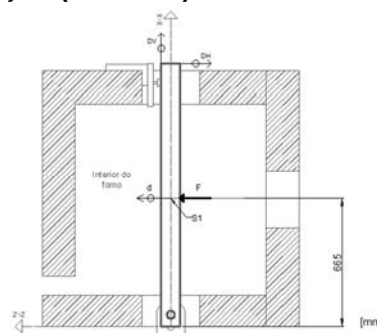
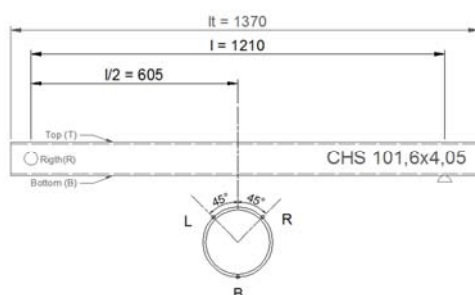
Duração do ensaio: --

Temperatura máxima registada: --

Descrição do ensaio:

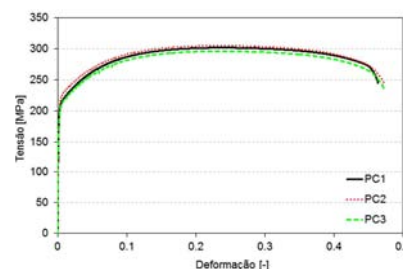
Ensaio de resistência à flexão de um perfil metálico com secção transversal CHS 101,6x4,05, em condições de temperatura ambiente. Serão aplicados incrementos de carga de 2000 [N]. A resistência à flexão do elemento, determinado pela EN1993-1-1, com as propriedades nominais do material e secção transversal, é de 29370 [N].

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



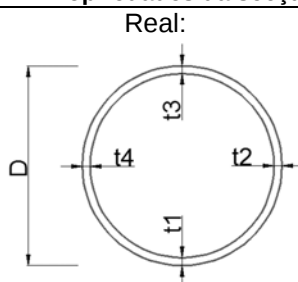
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete nº	E [GPa]	R _{p0.2} [MPa]	R _{eh} [MPa]	R _{el} [MPa]	R _m [MPa]	A ₁ [%]
PC1	--	200,7042	--	--	301,4931	47,680
PC2	--	207,6773	--	--	304,7633	48,688
PC3	--	194,5968	--	--	295,9788	48,968
Média	--	200,993	--	--	300,745	48,445
Desv. Padrão	--	6,545	--	--	4,440	0,677

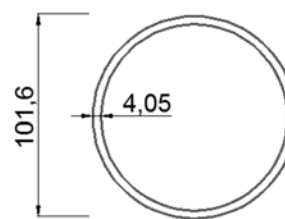


Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)				
	D	t1	t2	t3	t4
1	100,70	3,80	3,60	3,60	3,60
2	100,30	3,70	3,70	3,80	3,70
3	100,70	3,50	3,50	3,60	3,70
4	100,40				
Média	100,53	3,67	3,60	3,67	3,67
Desv pad	0,21	0,15	0,10	0,12	0,06
Máx	100,70	3,80	3,70	3,80	3,70
Mín	100,30	3,50	3,50	3,60	3,60
Média t	100,53			3,65	
Desv pad t	0,21			0,10	
Máx t	100,70			3,80	
Mín t	100,30			3,50	



Nominal:



Resultados:

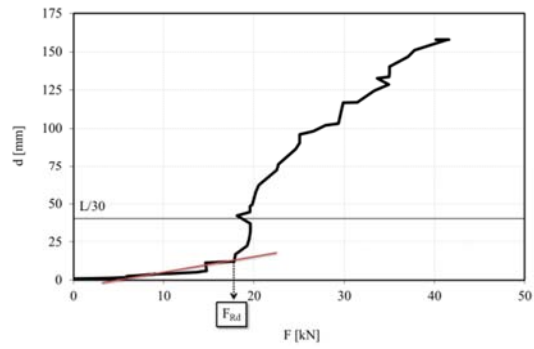


Gráfico V.258 – Força versus deslocamento a meio vão.

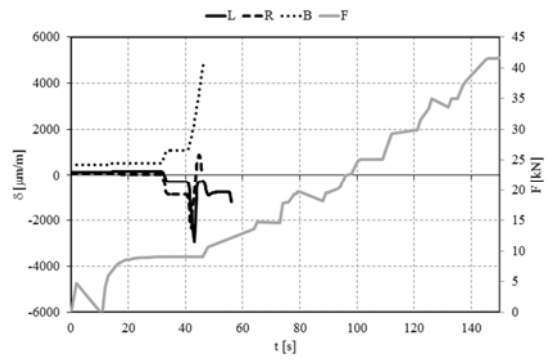


Gráfico V.259 – Deformação e força, versus tempo.

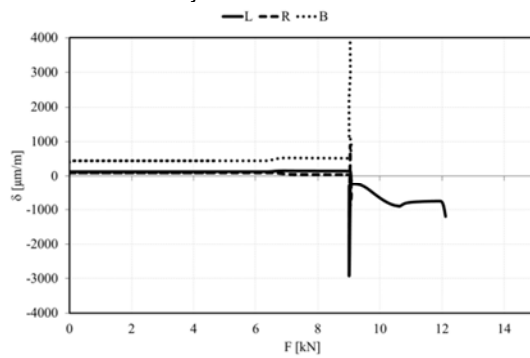


Gráfico V.260 – Deformação versus força.

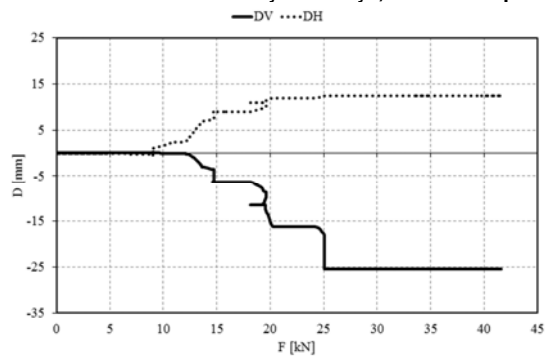


Gráfico V.261 – Deslocamento da extremidade do elemento versus força.

Registos fotográficos:



Figura V.154 – Formação da rótula plástica.



Figura V.155 – Vista no topo do elemento deformado.



Figura V.156 – Observação da rótula imposta ao elemento.

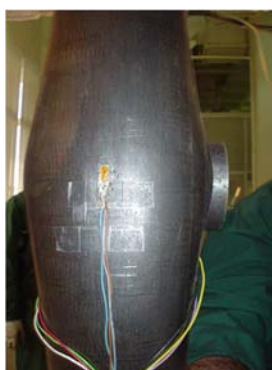


Figura V.157 – Deformação visual, final no extensómetro B.

Resistência do elemento [N]:

Eurocódigo 3-1-1		Ensaio
Nominal	Real	
29.370,00	22.760,00	17.900,00

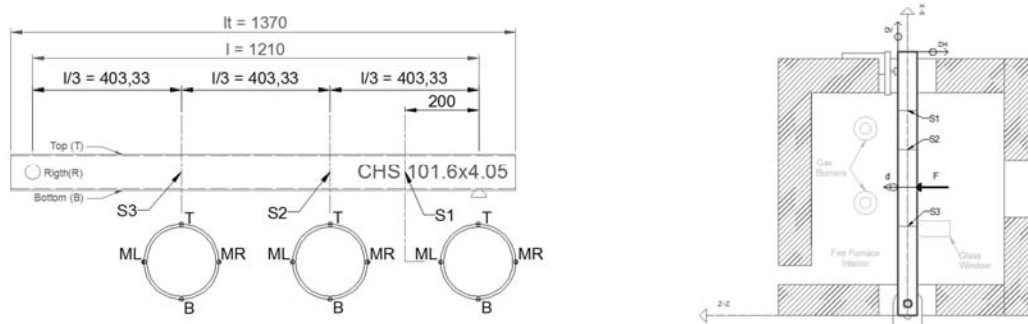
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico sem protecção
Nome do teste: C3
Data: 10 \ 08 \ 2010
Tipo de secção: CHS 101,6x4,05
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 9310 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: nenhuma
Espessura de protecção: 0,0 [mm]
Duração do ensaio: 14 [min]
Temperatura máxima registada: 700,22 [°C]

Descrição do ensaio:

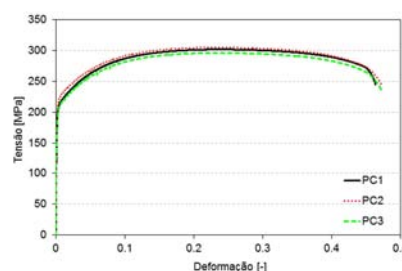
Ensaio de resistência ao fogo de elemento CHS 101,6x4,05, sem protecção, com a aplicação de carga, representando um estado de utilização nominal de $\mu_0=30\%$ segundo EN1993-1-2, que define uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=663,78^\circ\text{C}$. A resistência nominal do elemento é de 12 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



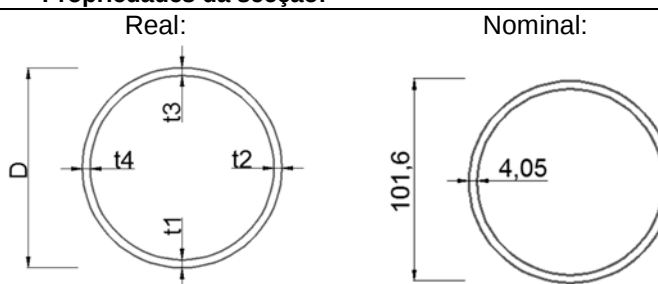
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete nº	E [GPa]	R _{p0.2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
C1	--	200,7042	--	--	301,4931	47,680
PC2	--	207,6773	--	--	304,7633	48,688
PC3	--	194,5968	--	--	295,9788	48,968
Média	--	200,993	--	--	300,745	48,445
Desv. Padrão	--	6,545	--	--	4,440	0,677



Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)				
	D	t1	t2	t3	t4
1	100,70	3,80	3,60	3,60	3,60
2	100,30	3,70	3,70	3,80	3,70
3	100,70	3,50	3,50	3,60	3,70
4	100,40				
Média	100,53	3,67	3,60	3,67	3,67
Desv pad	0,21	0,15	0,10	0,12	0,06
Máx	100,70	3,80	3,70	3,80	3,70
Mín	100,30	3,50	3,50	3,60	3,60
Média t	100,53			3,65	
Desv pad t	0,21			0,10	
Máx t	100,70			3,80	
Mín t	100,30			3,50	



Resultados:

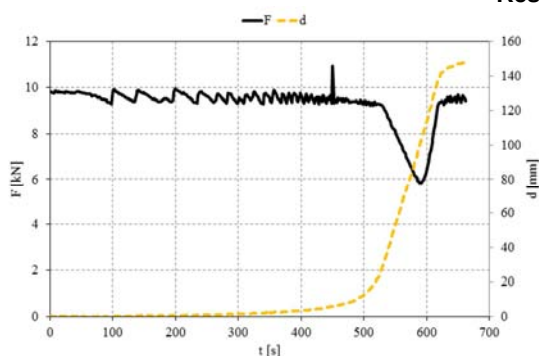


Gráfico V.262 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

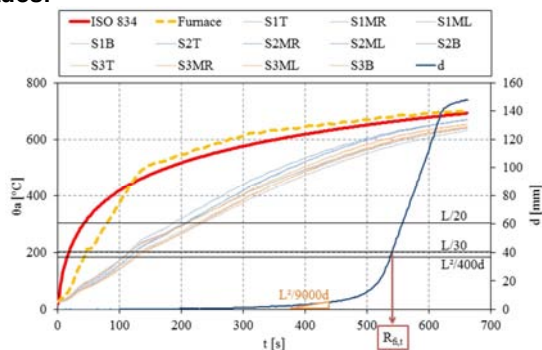


Gráfico V.263 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

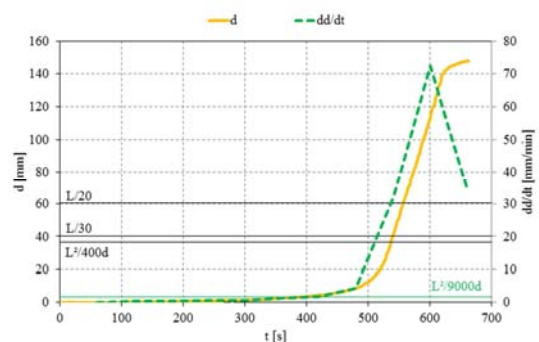


Gráfico V.264 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

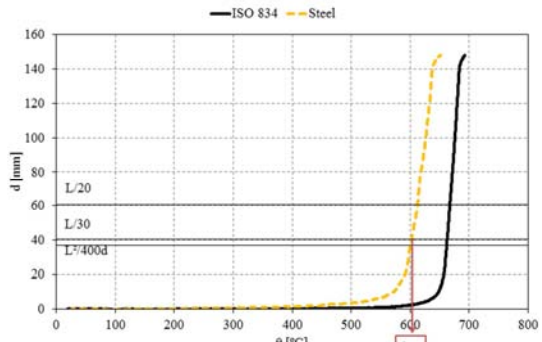


Gráfico V.265 – Deslocamento versus temperatura.

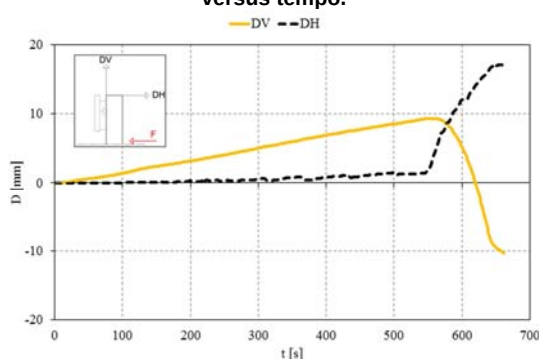


Gráfico V.266 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

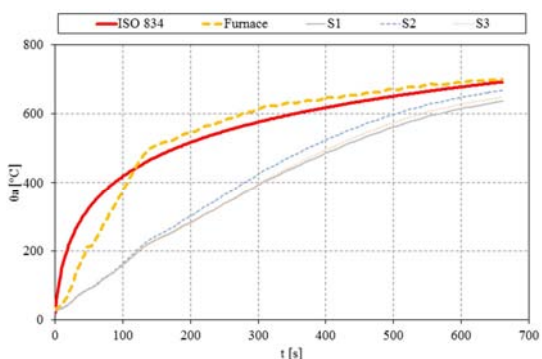


Gráfico V.267 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

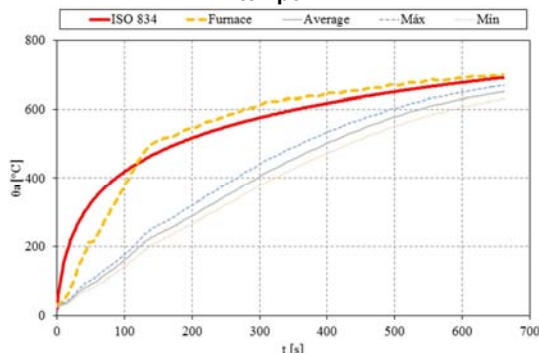


Gráfico V.268 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

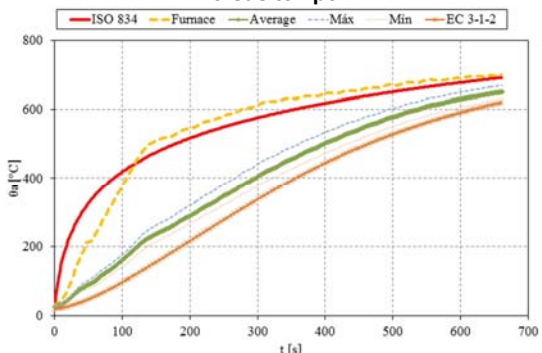


Gráfico V.269 – Temperatura da secção e temperatura prevista pelo EC 3-1-2, versus tempo.

Registos fotográficos:

Figura V.158 – Início do ensaio.



Figura V.159 – Deformação provocada ao elemento no final do ensaio.

Comentários:

Durante o ensaio verificou-se uma rápida movimentação do ponto de aplicação da carga, no instante em que o elemento atingiu a sua ruptura por rótula plástica.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20			Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
409	537	540	557	9	Média do perfil	38,6%	45%
					602,27		

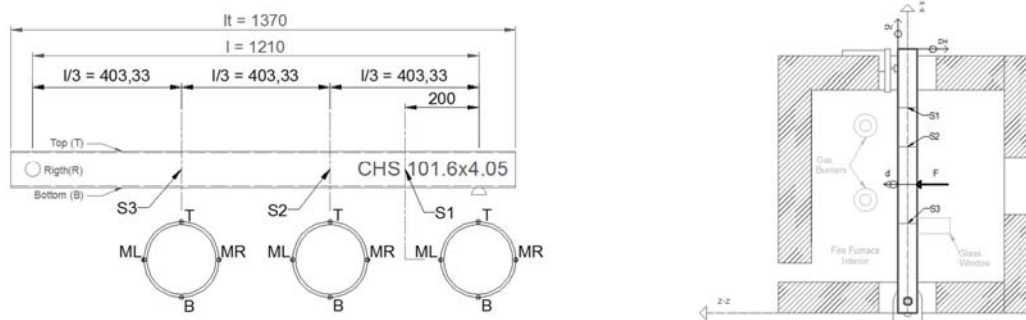
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico sem protecção
Nome do teste: C4
Data: 10 \ 08 \ 2010
Tipo de secção: CHS 101,6x4,05
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 15200 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: nenhuma
Espessura de protecção: 0,0 [mm]
Duração do ensaio: 10 [min]
Temperatura máxima registada: 660,83 [°C]

Descrição do ensaio:

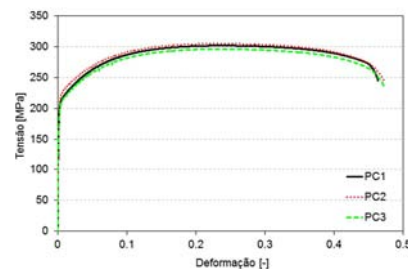
Ensaio de resistência ao fogo de elemento CHS 101,6x4,05, sem protecção, com a aplicação de carga, representando um estado de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, que define uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. A resistência nominal do elemento é de 9 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



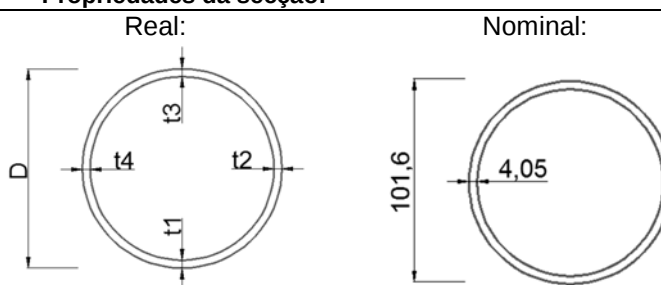
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete n°	E [GPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PC1	--	200,7042	--	--	301,4931	47,680
PC2	--	207,6773	--	--	304,7633	48,688
PC3	--	194,5968	--	--	295,9788	48,968
Média	--	200,993	--	--	300,745	48,445
Desv. Padrão	--	6,545	--	--	4,440	0,677



Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)				
	D	t1	t2	t3	t4
1	100,70	3,80	3,60	3,60	3,60
2	100,30	3,70	3,70	3,80	3,70
3	100,70	3,50	3,50	3,60	3,70
4	100,40				
Média	100,53	3,67	3,60	3,67	3,67
Desv pad	0,21	0,15	0,10	0,12	0,06
Máx	100,70	3,80	3,70	3,80	3,70
Mín	100,30	3,50	3,50	3,60	3,60
Média t	100,53		3,65		
Desv pad t	0,21		0,10		
Máx t	100,70		3,80		
Mín t	100,30		3,50		



Resultados:

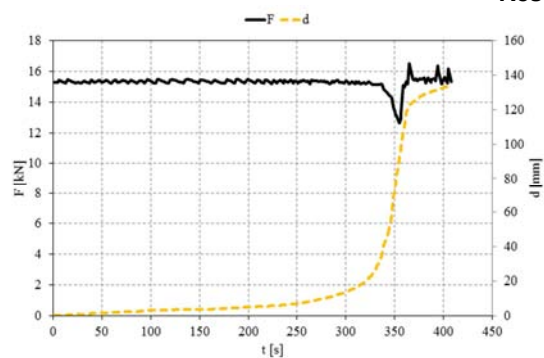


Gráfico V.270 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

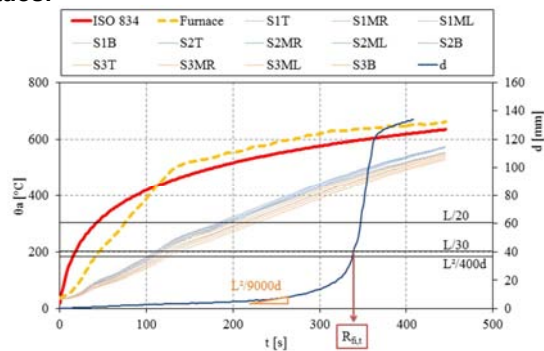


Gráfico V.271 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

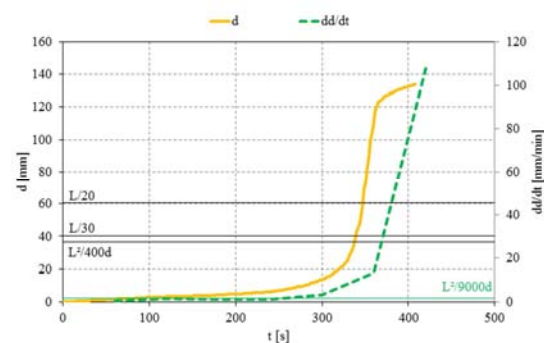


Gráfico V.272 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

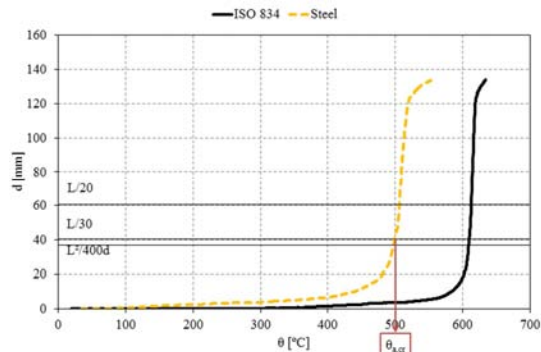


Gráfico V.273 – Deslocamento versus temperatura.

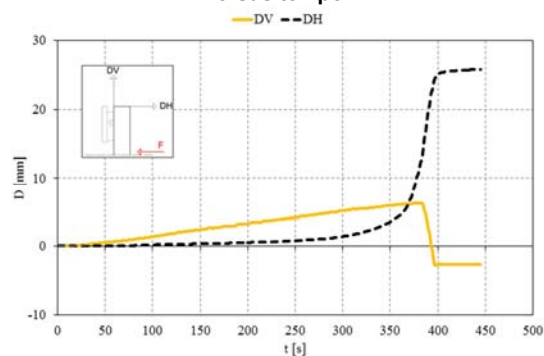


Gráfico V.274 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

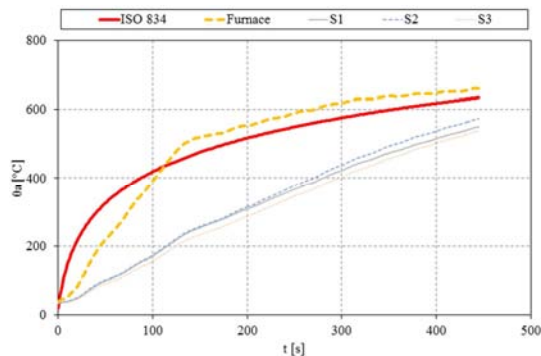


Gráfico V.275 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

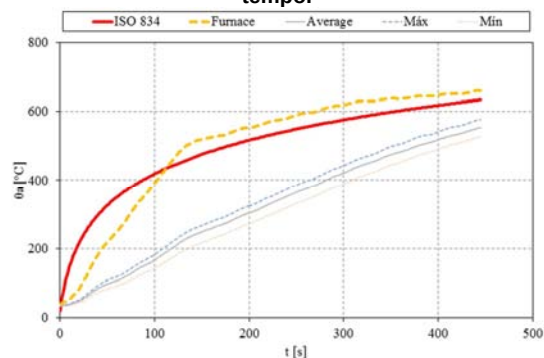


Gráfico V.276 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

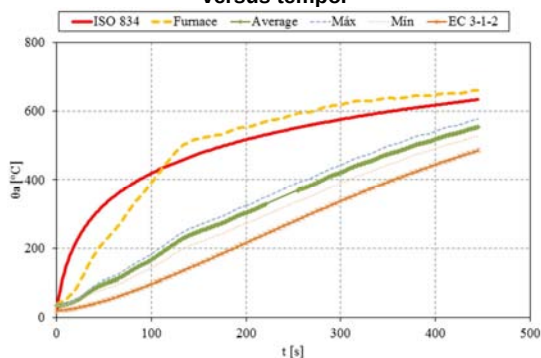


Gráfico V.277 – Temperatura da secção e temperatura prevista pelo EC 3-1-2, versus tempo.

Registos fotográficos:



Figura V.160 – Estado de deformação do elemento no final do ensaio.



Figura V.161 – Rótula plástica imposta no elemento.

Comentários:

Durante o ensaio verificou-se uma rápida movimentação do ponto de aplicação da carga, no instante em que o elemento atingiu a sua ruptura por rótula plástica.

				Resistência do elemento:			
Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	6	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
251	374	376	384		499,42	66%	79%

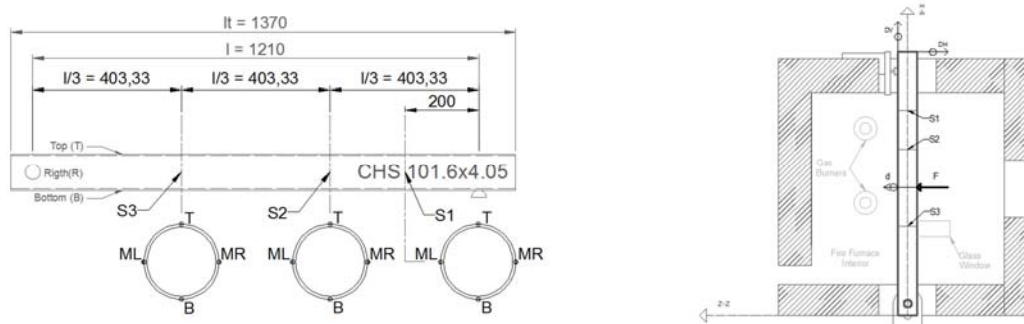
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico sem protecção
Nome do teste: C5
Data: 11 \ 08 \ 2010
Tipo de secção: CHS 101,6x4,05
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 20560 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: nenhuma
Espessura de protecção: 0,0 [mm]
Duração do ensaio: 11 [min]
Temperatura máxima registada: 672,27 [°C]

Descrição do ensaio:

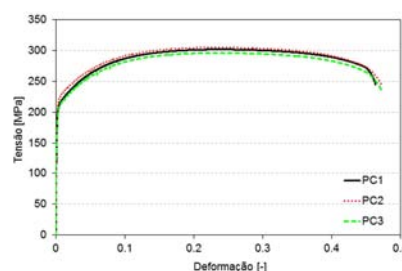
Ensaio de resistência ao fogo de elemento CHS 101,6x4,05, sem protecção, com a aplicação de carga, representando um estado de utilização nominal de $\mu_0=70\%$ segundo EN1993-1-2, que define uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=525,78^\circ\text{C}$. A resistência nominal do elemento é de 8 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



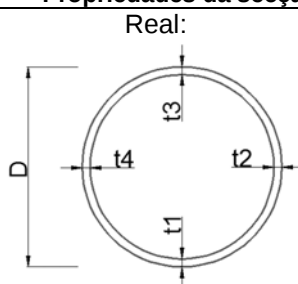
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provetes nº	E [GPa]	R _{p0.2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PC1	--	200,7042	--	--	301,4931	47,680
PC2	--	207,6773	--	--	304,7633	48,688
PC3	--	194,5968	--	--	295,9788	48,968
Média	--	200,993	--	--	300,745	48,445
Desv. Padrão	--	6,545	--	--	4,440	0,677

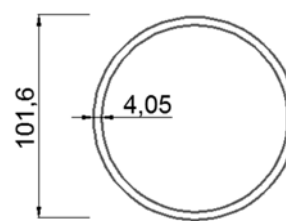


Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)				
	D	t1	t2	t3	t4
1	100,70	3,80	3,60	3,60	3,60
2	100,30	3,70	3,70	3,80	3,70
3	100,70	3,50	3,50	3,60	3,70
4	100,40				
Média	100,53	3,67	3,60	3,67	3,67
Desv pad	0,21	0,15	0,10	0,12	0,06
Máx	100,70	3,80	3,70	3,80	3,70
Mín	100,30	3,50	3,50	3,60	3,60
Média t	100,53			3,65	
Desv pad t	0,21			0,10	
Máx t	100,70			3,80	
Mín t	100,30			3,50	



Nominal:



Resultados:

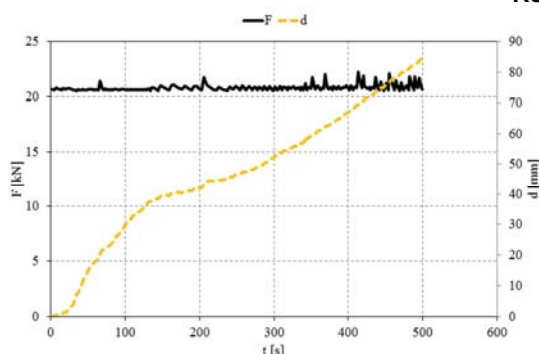


Gráfico V.278 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

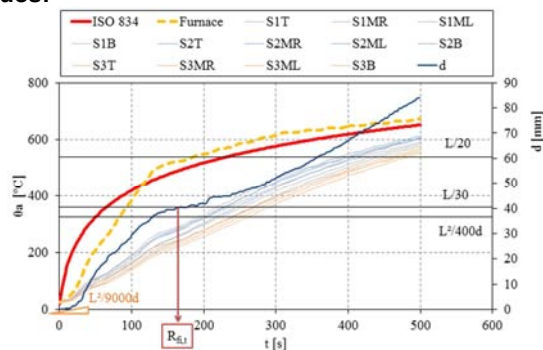


Gráfico V.279 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

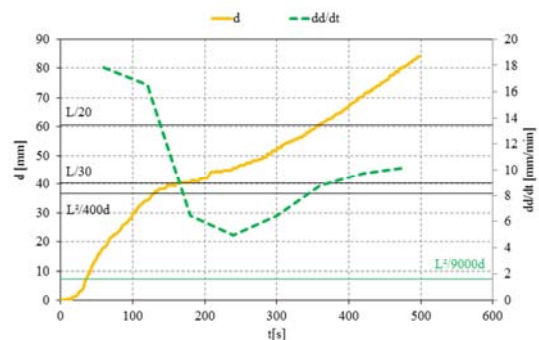


Gráfico V.280 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

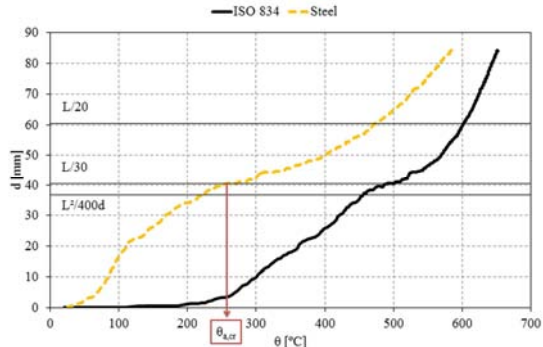


Gráfico V.281 – Deslocamento versus temperatura.

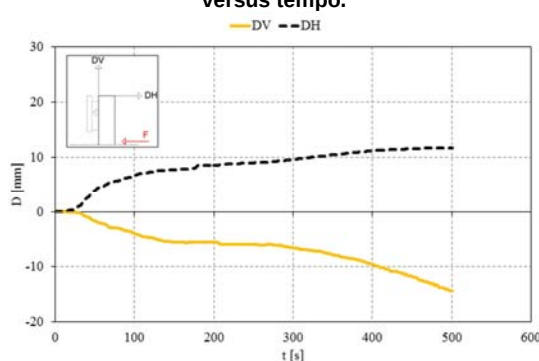


Gráfico V.282 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

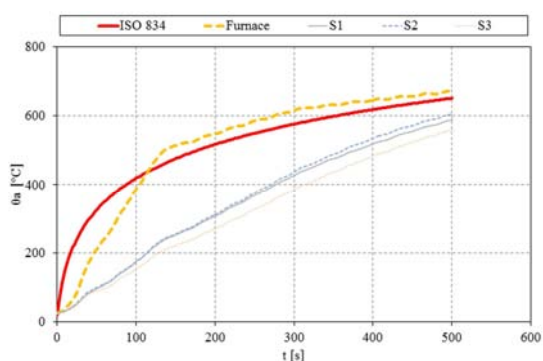


Gráfico V.283 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

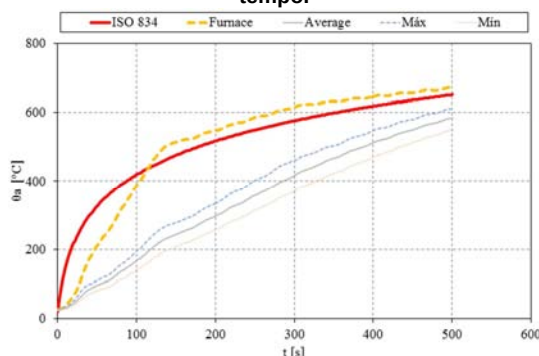


Gráfico V.284 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

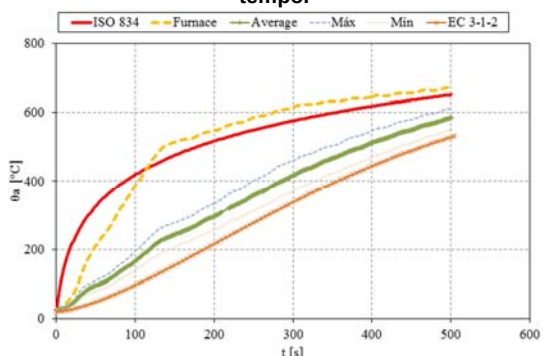


Gráfico V.285 – Temperatura da secção e temperatura prevista pelo EC 3-1-2, versus tempo.

Comentários:

O elemento apresentava uma ligeira deformação, provocada pela carga, antes de se iniciar as condições de incêndio. O elemento deformou-se continuamente durante as condições de incêndio.

Instante tempo [s]				Resistência do elemento:			
				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	2	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
0	129	164	358		255,64	92,8%	100%

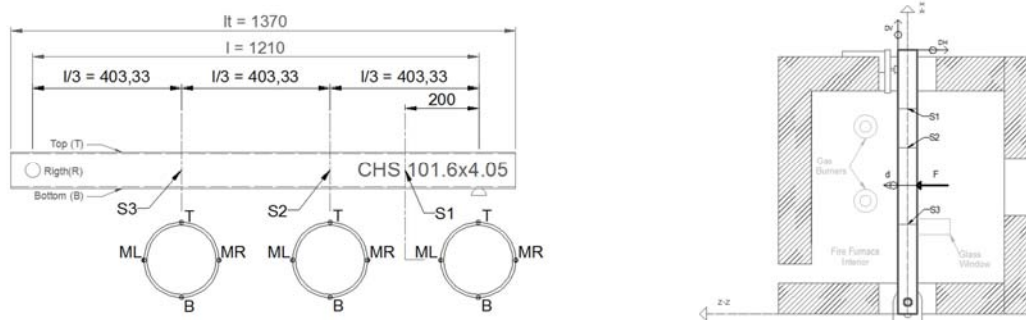
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: C6
Data: 11 \ 10 \ 2010
Tipo de secção: CHS 101,6x4,05
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 9310 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: tinta intumescente
Espessura de protecção: 0,997 [mm]
Duração do ensaio: 29 [min]
Temperatura máxima registada: 817,46 [°C]

Descrição do ensaio:

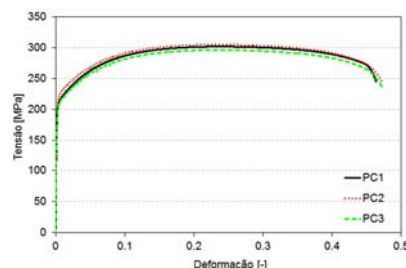
Ensaio de resistência ao fogo de elemento CHS 101,6x4,05, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=30\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=663,78^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (C3), tem uma resistência ao fogo de 9 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



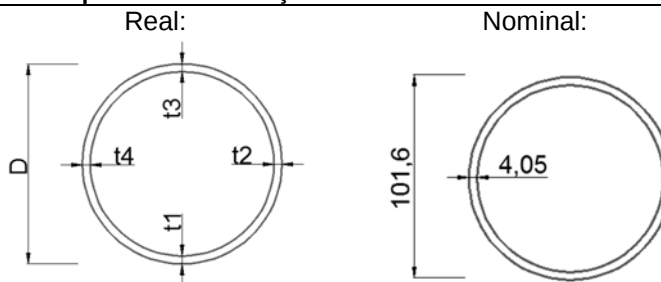
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete n°	E [GPa]	$R_{p,0.2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_1 [%]
PC1	--	200,7042	--	--	301,4931	47,680
PC2	--	207,6773	--	--	304,7633	48,688
PC3	--	194,5968	--	--	295,9788	48,968
Média	--	200,993	--	--	300,745	48,445
Desv. Padrão	--	6,545	--	--	4,440	0,677



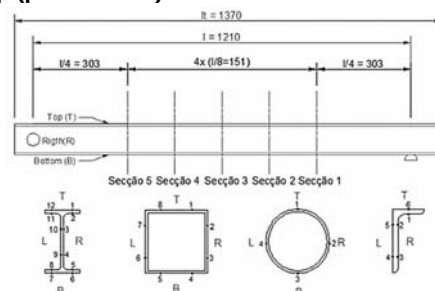
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)				
	D	t1	t2	t3	t4
1	100,70	3,80	3,60	3,60	3,60
2	100,30	3,70	3,70	3,80	3,70
3	100,70	3,50	3,50	3,60	3,70
4	100,40				
Média	100,53	3,67	3,60	3,67	3,67
Desv pad	0,21	0,15	0,10	0,12	0,06
Máx	100,70	3,80	3,70	3,80	3,70
Mín	100,30	3,50	3,50	3,60	3,60
Média t	100,53			3,65	
Desv pad t	0,21			0,10	
Máx t	100,70			3,80	
Mín t	100,30			3,50	



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	900	996	938	963	973	954,00	36,67	996	900
2	946	974	1050	1020	1080	1014,00	54,57	1080	946
3	1070	890	809	907	800	895,20	108,64	1070	800
4	1020	1270	1070	1100	1170	1126,00	97,11	1270	1020
Média	984,00	1032,50	966,75	997,50	1005,75	997,30			
Desv pad	75,70	164,79	120,14	82,45	159,06		114,23		
Máx	1070	1270	1070	1100	1170			1270	
Mín	900	890	809	907	800				800



Resultados:

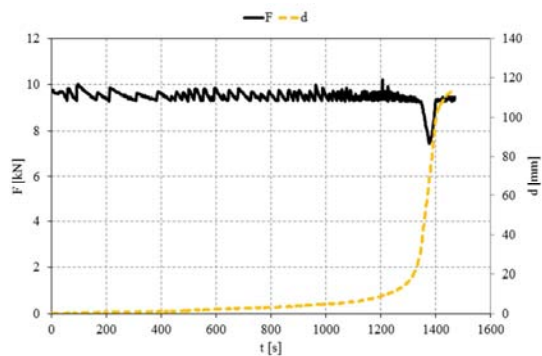


Gráfico V.286 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

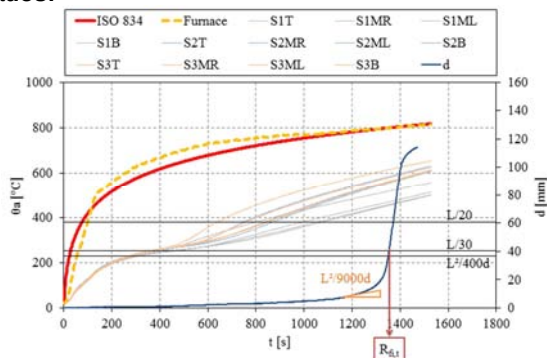


Gráfico V.287 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

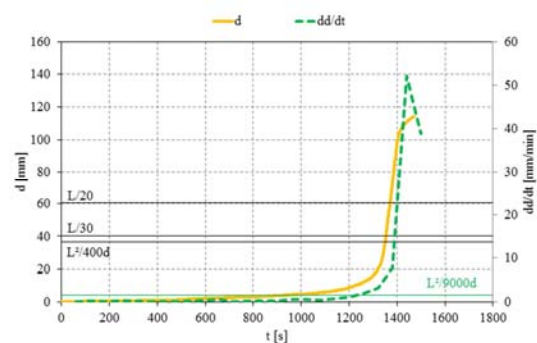


Gráfico V.288 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

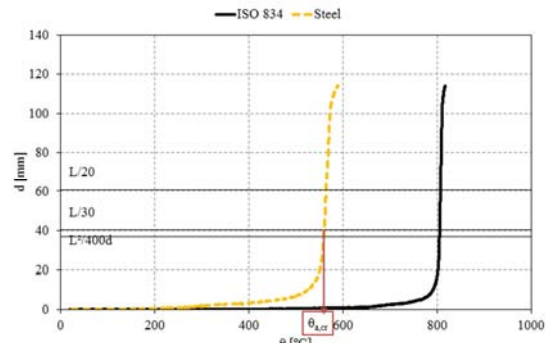


Gráfico V.289 – Deslocamento versus temperatura.

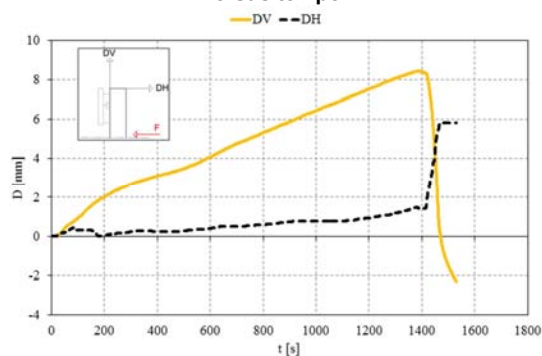


Gráfico V.290 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

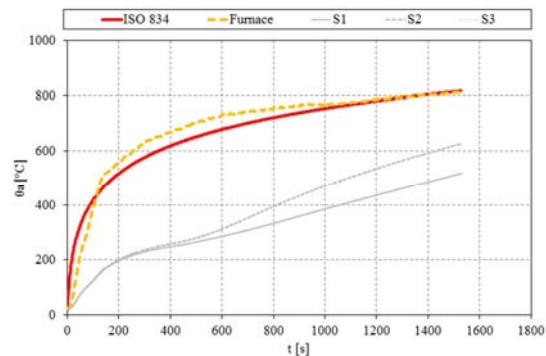


Gráfico V.291 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

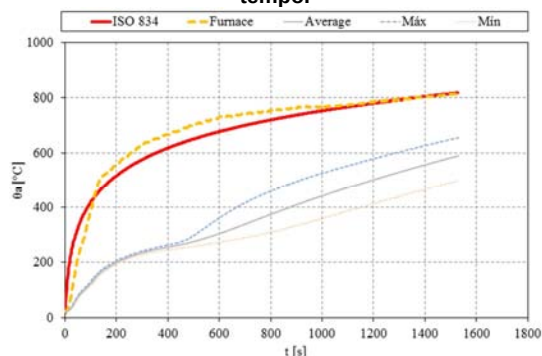


Gráfico V.292 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

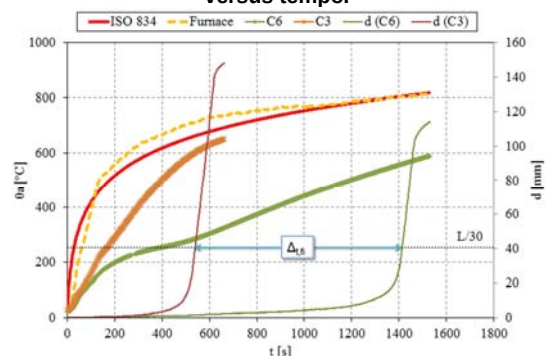


Gráfico V.293 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:

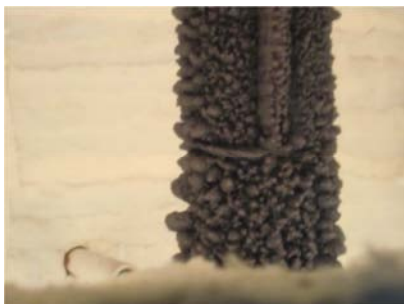


Figura V.162 – Desenvolvimento da camada intumescente.

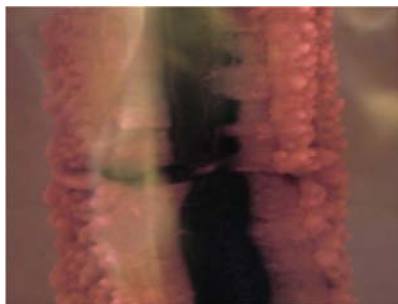


Figura V.163 – Retracção da camada intumescente.



Figura V.164 – Estado de deformação do elemento no final do ensaio.



Figura V.165 – Zona do elemento exposta ao fogo, devido à retracção da camada intumescente.

Comentários:

No início do ensaio observou-se um desenvolvimento homogéneo da camada de intumescência, com a evolução do aumento de temperaturas no forno, pode-se observar a retracção da camada ao longo de todo o elemento. De seguida registou-se uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por rótula plástica.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
$L^2/9000d$	$L^2/400d$	L/30	L/20	23	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
1233	1411	1414	1431		560,26	39%	58%

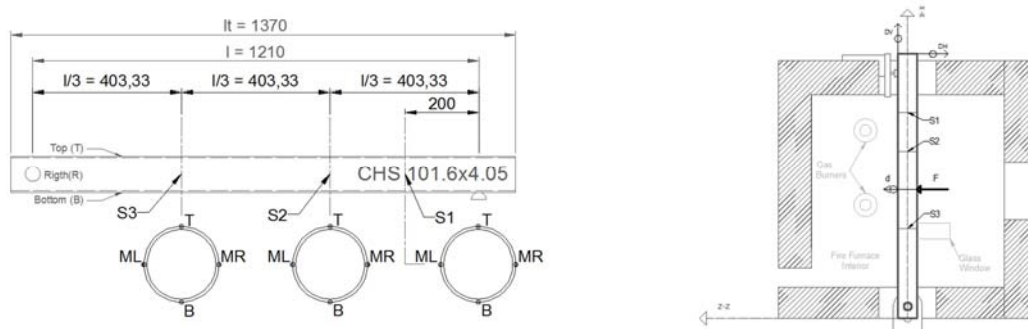
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: C7
Data: 24 \ 11 \ 2010
Tipo de secção: CHS 101,6x4,05
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 9310 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,004 [mm]
Duração do ensaio: 67 [min]
Temperatura máxima registada: 953,86 [°C]

Descrição do ensaio:

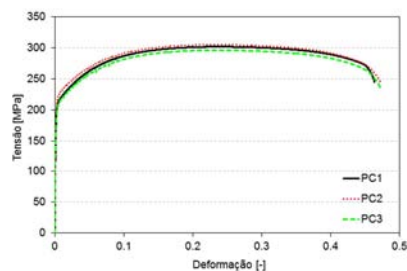
Ensaio de resistência ao fogo de elemento CHS 101,6x4,05, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=30\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=663,78^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (C3), tem uma resistência ao fogo de 9 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



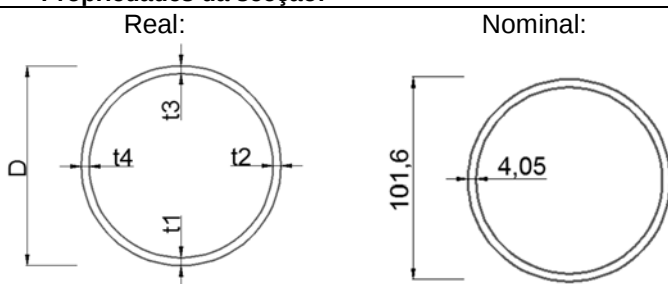
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete nº	E [GPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
PC1	--	200,7042	--	--	301,4931	47,680
PC2	--	207,6773	--	--	304,7633	48,688
PC3	--	194,5968	--	--	295,9788	48,968
Média	--	200,993	--	--	300,745	48,445
Desv. Padrão	--	6,545	--	--	4,440	0,677



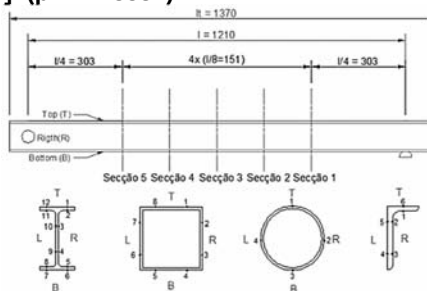
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)				
	D	t1	t2	t3	t4
1	100,70	3,80	3,60	3,60	3,60
2	100,30	3,70	3,70	3,80	3,70
3	100,70	3,50	3,50	3,60	3,70
4	100,40				
Média	100,53	3,67	3,60	3,67	3,67
Desv pad	0,21	0,15	0,10	0,12	0,06
Máx	100,70	3,80	3,70	3,80	3,70
Mín	100,30	3,50	3,50	3,60	3,60
Média t	100,53		3,65		
Desv pad t	0,21		0,10		
Máx t	100,70		3,80		
Mín t	100,30		3,50		



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1077	1079	974	1132	835	1019,40	117,91	1132	835
2	1109	1125	927	1147	1187	1099,00	100,51	1187	927
3	859	1002	904	1002	1066	966,60	83,49	1066	859
4	1028	964	868	976	818	930,80	85,53	1028	818
Média	1018,25	1042,50	918,25	1064,25	976,50	1003,95			
Desv pad	111,27	72,89	44,40	87,75	180,25		110,80		
Máx	1109	1125	974	1147	1187			1187	
Mín	859	964	868	976	818				818



Resultados:

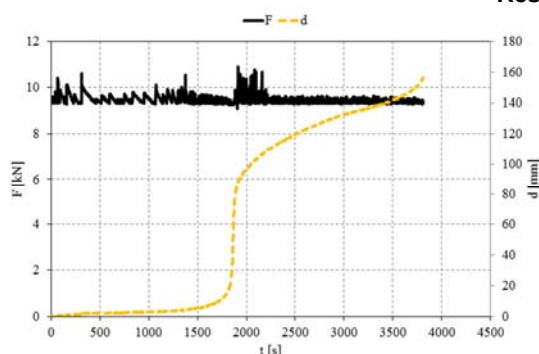


Gráfico V.294 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

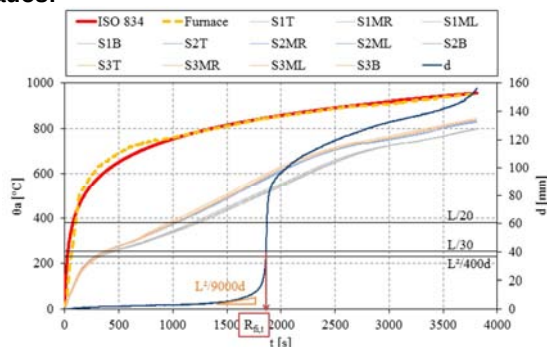


Gráfico V.295 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

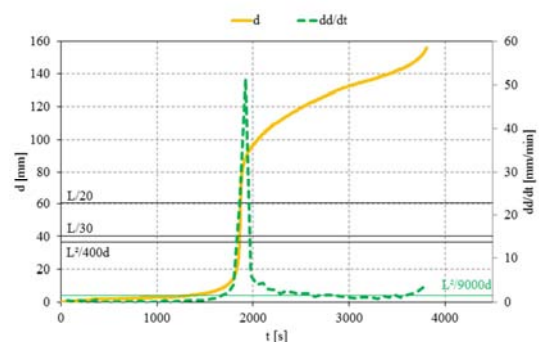


Gráfico V.296 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

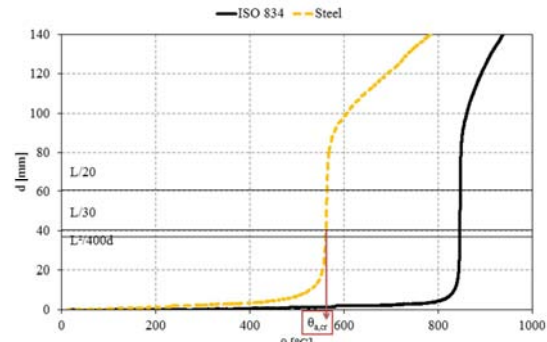


Gráfico V.297 – Deslocamento versus temperatura.

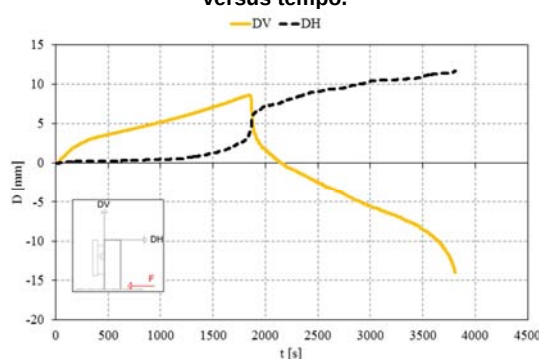


Gráfico V.298 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

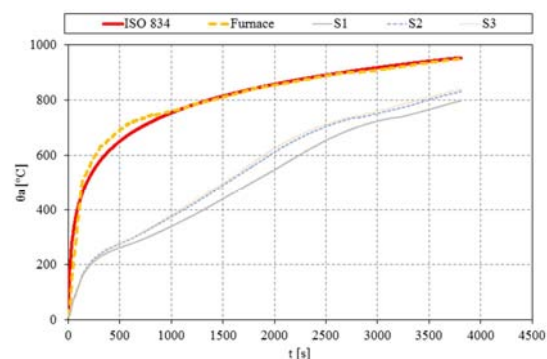


Gráfico V.299 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

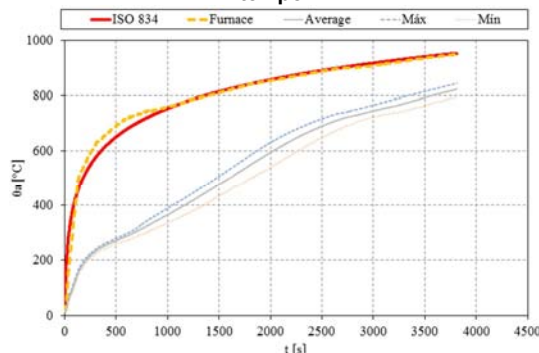


Gráfico V.300 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

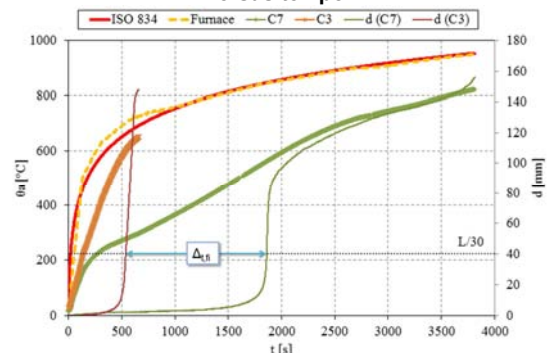


Gráfico V.301 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.166 – Formação da camada intumescente.



Figura V.167 – Fase intermédia da formação da camada.

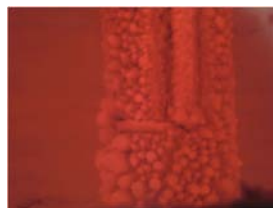


Figura V.168 – Camada intumescente formada.

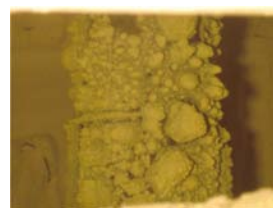


Figura V.169 – Fase final do ensaio.



Figura V.170 – Final do ensaio, com os queimadores ainda ligados.



Figura V.171 – Pormenor da rótula plástica formada durante a ruptura do elemento.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução da camada intumescente linear e homogénea, sem retracção. O elemento atingiu a ruptura por rótula plástica, no momento em que se registou uma rápida movimentação do ponto de aplicação da carga.

Resistência do elemento:							
Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
$L^2/9000d$	$L^2/400d$	L/30	L/20	31	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
1680	1859	1861	1869		562,23	39%	57%

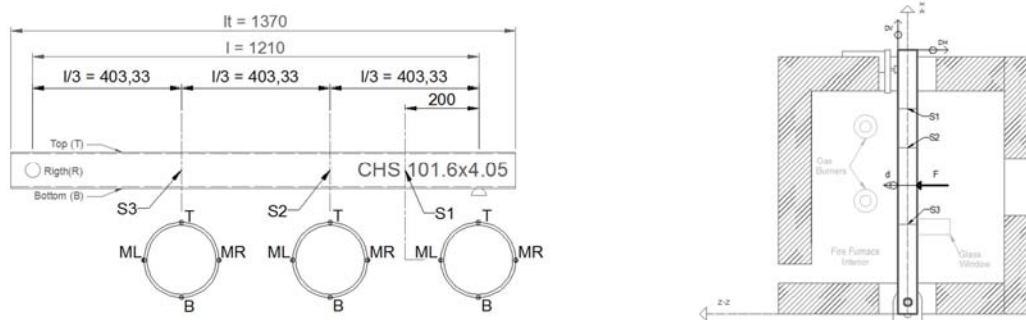
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: C8
Data: 12 \ 10 \ 2010
Tipo de secção: CHS 101,6x4,05
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 15200 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,004 [mm]
Duração do ensaio: 16 [min]
Temperatura máxima registada: 691,41 [°C]

Descrição do ensaio:

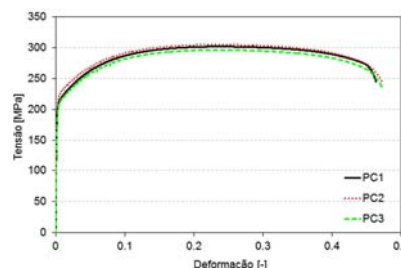
Ensaio de resistência ao fogo de elemento CHS 101,6x4,05, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (C4), tem uma resistência ao fogo de 6 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



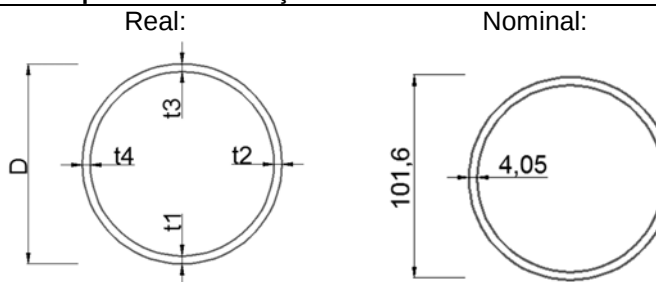
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provette n°	E [GPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _{eh} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]
PC1	--	200,7042	--	--	301,4931	47,680
PC2	--	207,6773	--	--	304,7633	48,688
PC3	--	194,5968	--	--	295,9788	48,968
Média	--	200,993	--	--	300,745	48,445
Desv. Padrão	--	6,545	--	--	4,440	0,677



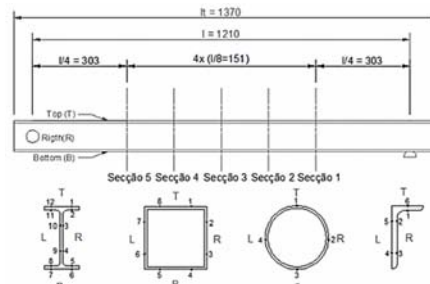
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)				
	D	t1	t2	t3	t4
1	100,70	3,80	3,60	3,60	3,60
2	100,30	3,70	3,70	3,80	3,70
3	100,70	3,50	3,50	3,60	3,70
4	100,40				
Média	100,53	3,67	3,60	3,67	3,67
Desv pad	0,21	0,15	0,10	0,12	0,06
Máx	100,70	3,80	3,70	3,80	3,70
Mín	100,30	3,50	3,50	3,60	3,60
Média t	100,53			3,65	
Desv pad t		0,21		0,10	
Máx t		100,70		3,80	
Mín t		100,30		3,50	



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1020	1060	900	1080	770	966,00	129,92	1080	770
2	1100	1330	978	1300	954	1132,40	175,96	1330	954
3	936	1110	850	1110	800	961,20	144,28	1110	800
4	950	1100	1040	1120	1020	1046,00	67,68	1120	950
Média	1001,50	1150,00	942,00	1152,50	886,00	1026,40			
Desv pad	75,25	121,93	83,92	99,79	120,32		143,3723		
Máx	1100	1330	1040	1300	1020			1330	
Mín	936	1060	850	1080	770				770



Resultados:

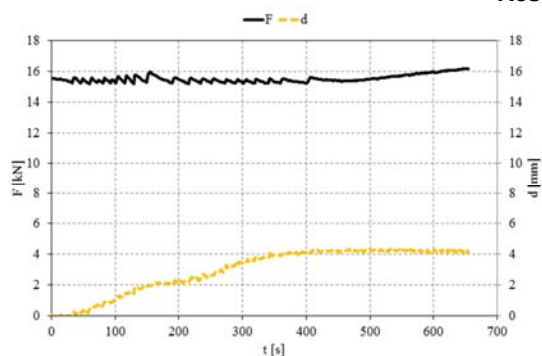


Gráfico V.302 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

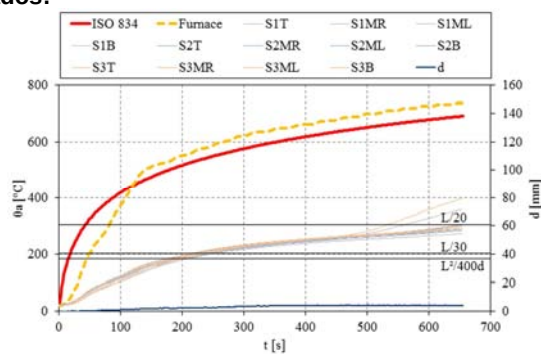


Gráfico V.303 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

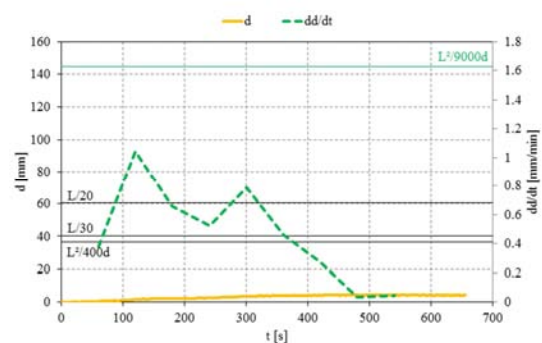


Gráfico V.304 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

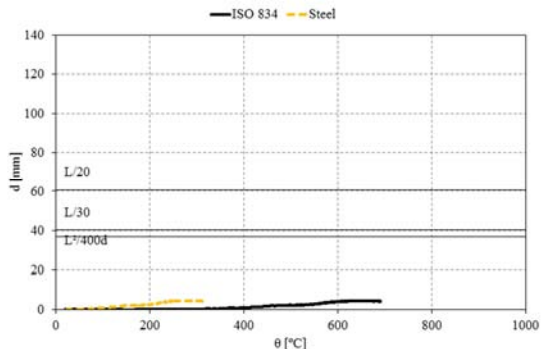


Gráfico V.305 – Deslocamento versus temperatura.

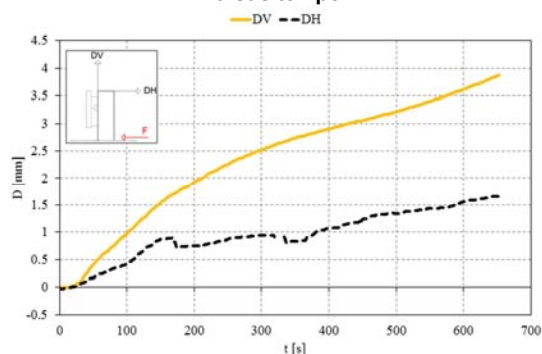


Gráfico V.306 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

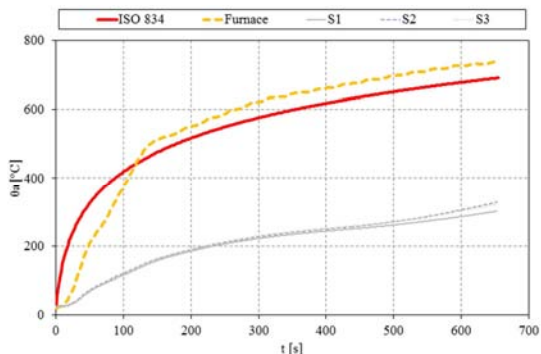


Gráfico V.307 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

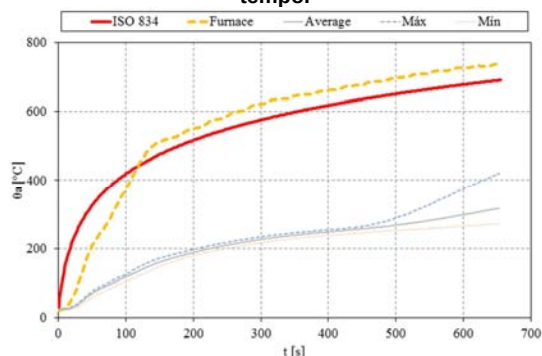


Gráfico V.308 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

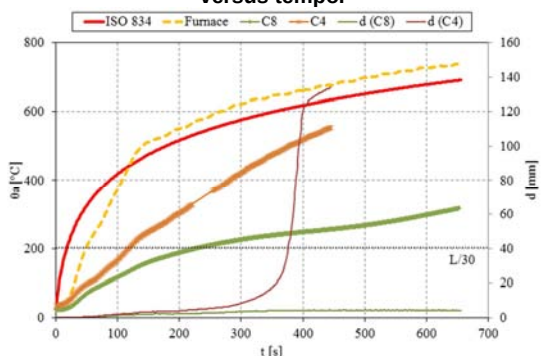


Gráfico V.309 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.172 – Formação da camada de protecção intumescente.



Figura V.173 – Formação da retracção na camada intumescente.



Figura V.174 – Final do ensaio, com a visualização do estado da camada intumescente.



Figura V.175 – Visualização da retracção da camada, expondo o aço às altas temperaturas.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma retracção na camada de intumescência da tinta. Observando o sucedido, decidiu-se não prolongar o ensaio até à ruptura do elemento.

				Resistência do elemento:		
Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	--	Média do perfil	Propriedades reais
						Temperatura crítica de ensaio
--	--	--	--		--	66%

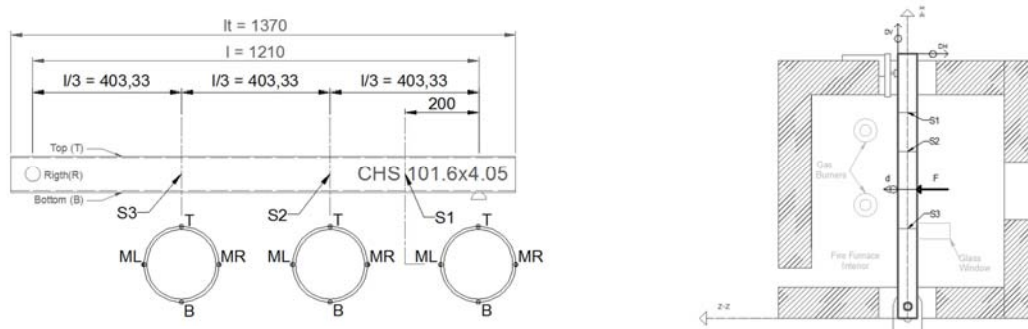
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: C9
Data: 23 \ 11 \ 2010
Tipo de secção: CHS 101,6x4,05
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 15200 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,006 [mm]
Duração do ensaio: 47 [min]
Temperatura máxima registada: 882,68 [°C]

Descrição do ensaio:

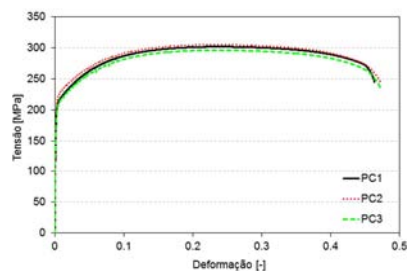
Ensaio de resistência ao fogo de elemento CHS 101,6x4,05, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (C4), tem uma resistência ao fogo de 6 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



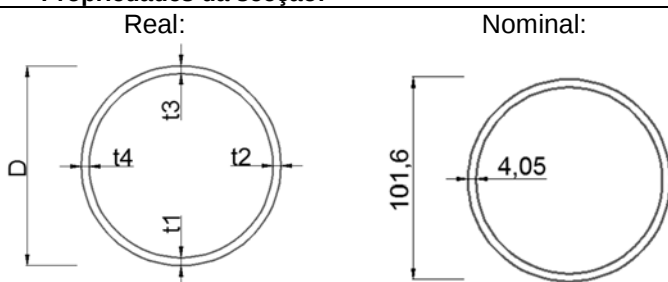
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete nº	E [GPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
PC1	--	200,7042	--	--	301,4931	47,680
PC2	--	207,6773	--	--	304,7633	48,688
PC3	--	194,5968	--	--	295,9788	48,968
Média	--	200,993	--	--	300,745	48,445
Desv. Padrão	--	6,545	--	--	4,440	0,677



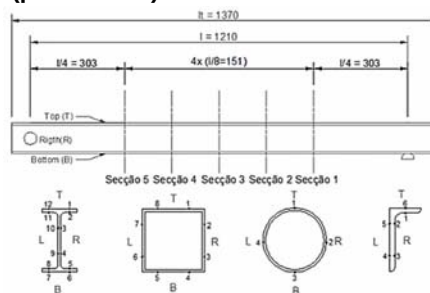
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)				
	D	t1	t2	t3	t4
1	100,70	3,80	3,60	3,60	3,60
2	100,30	3,70	3,70	3,80	3,70
3	100,70	3,50	3,50	3,60	3,70
4	100,40				
Média	100,53	3,67	3,60	3,67	3,67
Desv pad	0,21	0,15	0,10	0,12	0,06
Máx	100,70	3,80	3,70	3,80	3,70
Mín	100,30	3,50	3,50	3,60	3,60
Média t	100,53		3,65		
Desv pad t	0,21		0,10		
Máx t	100,70		3,80		
Mín t	100,30		3,50		



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	866	975	894	1007	961	940,60	58,62	1007	866
2	904	1082	1110	1105	1097	1059,60	87,63	1110	904
3	1021	1021	1002	984	810	967,60	89,43	1021	810
4	1020	1133	1140	1057	927	1055,40	87,92	1140	927
Média	952,75	1052,75	1036,50	1038,25	948,75	1005,80			
Desv pad	79,76	69,16	111,97	53,93	118,11		92,53		
Máx	1021	1133	1140	1105	1097			1140	
Mín	866	975	894	984	810				810



Resultados:

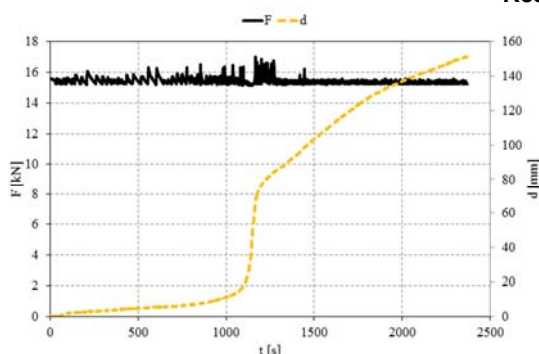


Gráfico V.310 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

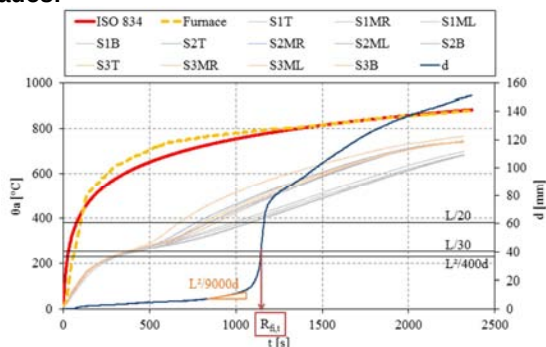


Gráfico V.311 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

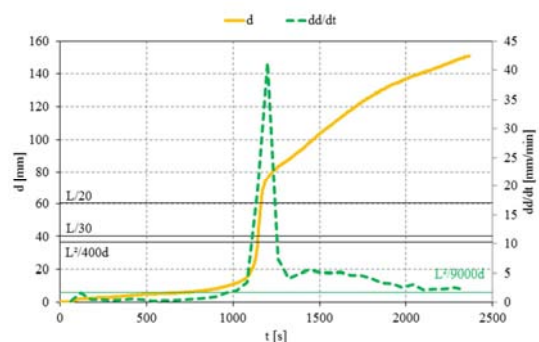


Gráfico V.312 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

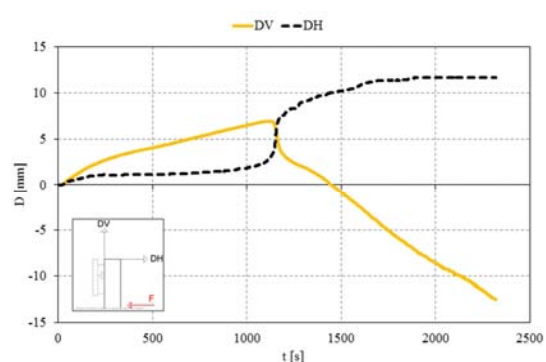


Gráfico V.313 – Deslocamento versus temperatura.

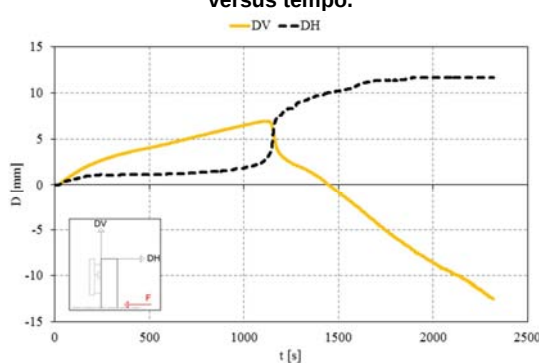


Gráfico V.314 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

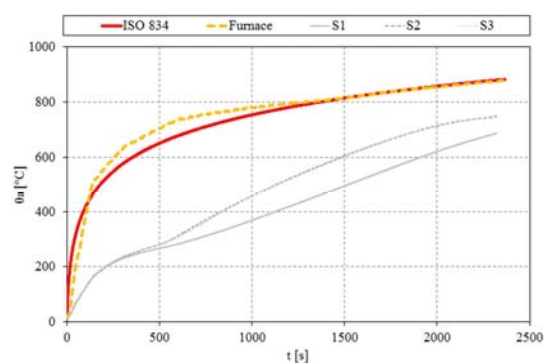


Gráfico V.315 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

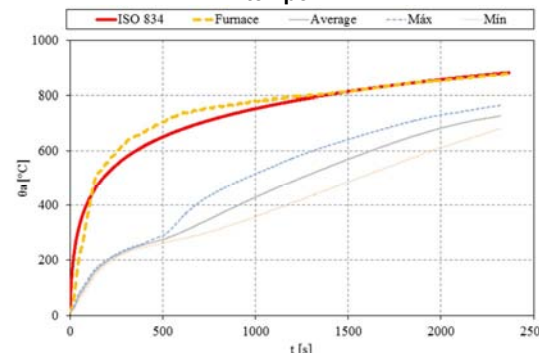


Gráfico V.316 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

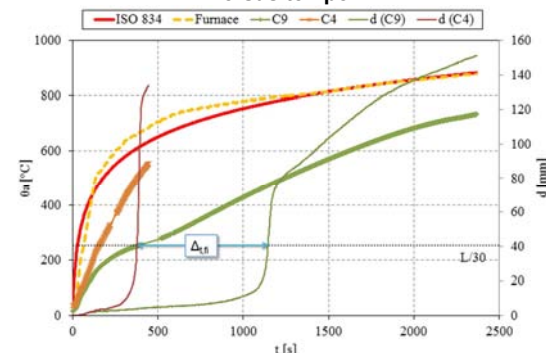


Gráfico V.317 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.176 – Formação da camada intumescente.



Figura V.177 – Início da retracção da camada.

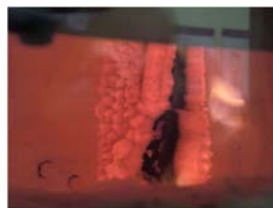


Figura V.178 – Aço exposto a elevadas temperaturas.



Figura V.179 – Visualização da zona onde ocorreu retracção da camada.



Figura V.180 – Final do ensaio, com a visualização da camada intumescente.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma retracção na camada de intumescência da tinta, o que levou a uma perda de capacidade resistente do aço nas zonas expostas às altas temperaturas. Observando-se depois um rápido deslocamento do ponto de aplicação da carga, levando o elemento à sua ruptura por rótula plástica.

				Resistência do elemento:			
Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	19	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
962	1141	1144	1161		472,24	66%	87

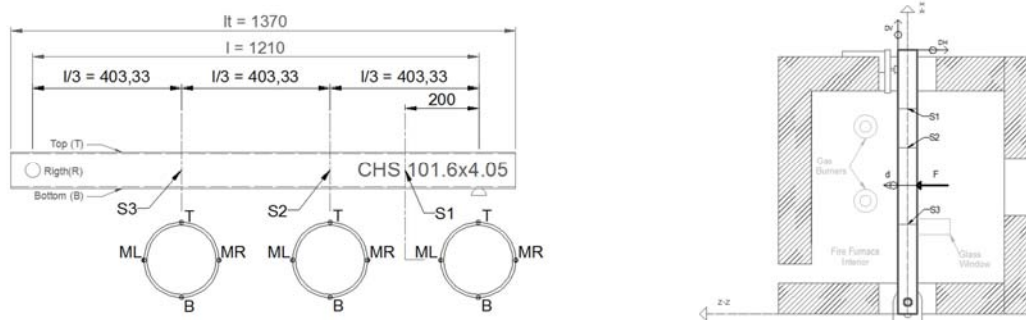
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: C10
Data: 19 \ 10 \ 2010
Tipo de secção: CHS 101,6x4,05
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 20560 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,071 [mm]
Duração do ensaio: 24 [min]
Temperatura máxima registada: 774,11 [°C]

Descrição do ensaio:

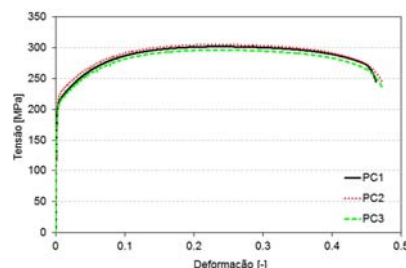
Ensaio de resistência ao fogo de elemento CHS 101,6x4,05, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=70\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=525,78^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (C5), tem uma resistência ao fogo de 2 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



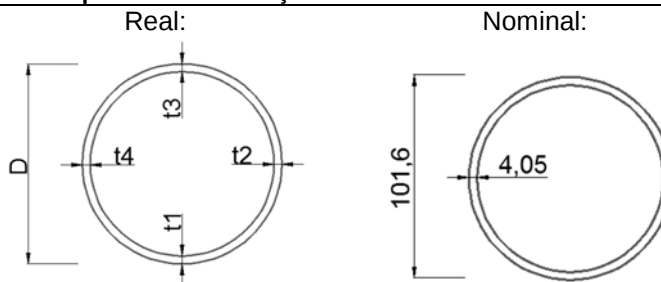
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete n°	E [GPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _{eh} [MPa]	R _{el} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PC1	--	200,7042	--	--	301,4931	47,680
PC2	--	207,6773	--	--	304,7633	48,688
PC3	--	194,5968	--	--	295,9788	48,968
Média	--	200,993	--	--	300,745	48,445
Desv. Padrão	--	6,545	--	--	4,440	0,677



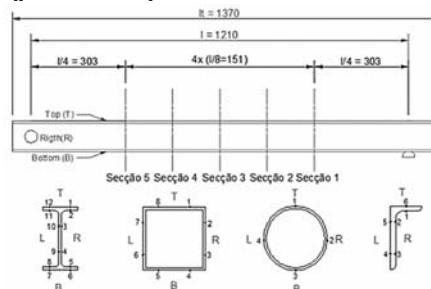
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)				
	D	t1	t2	t3	t4
1	100,70	3,80	3,60	3,60	3,60
2	100,30	3,70	3,70	3,80	3,70
3	100,70	3,50	3,50	3,60	3,70
4	100,40				
Média	100,53	3,67	3,60	3,67	3,67
Desv pad	0,21	0,15	0,10	0,12	0,06
Máx	100,70	3,80	3,70	3,80	3,70
Mín	100,30	3,50	3,50	3,60	3,60
Média t	100,53			3,65	
Desv pad t		0,21		0,10	
Máx t		100,70		3,80	
Mín t		100,30		3,50	



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1278	1274	1172	1306	1020	1210,00	117,77	1306	1020
2	1155	1143	1074	1187	1040	1119,80	60,74	1187	1040
3	913	1056	1040	1156	1037	1040,40	86,38	1156	913
4	754	974	874	1069	902	914,60	117,23	1069	754
Média	1025,00	1111,75	1040,00	1179,50	999,75	1071,20			
Desv pad	235,86	128,30	124,01	98,02	65,76		143,37		
Máx	1278	1274	1172	1306	1040			1306	
Mín	754	974	874	1069	902				754



Resultados:

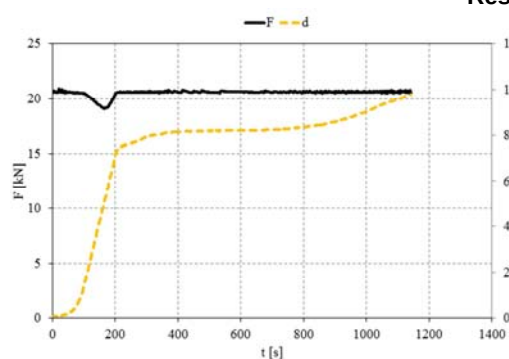


Gráfico V.318 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

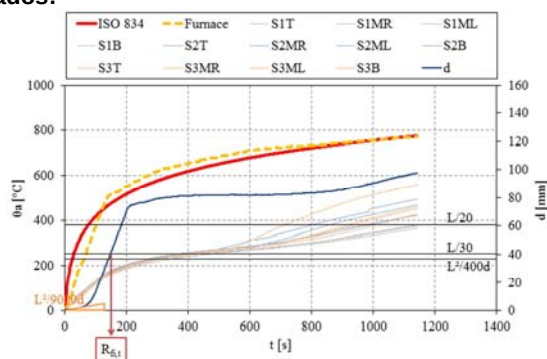


Gráfico V.319 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

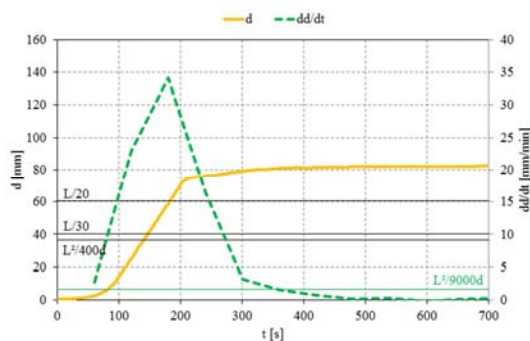


Gráfico V.320 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

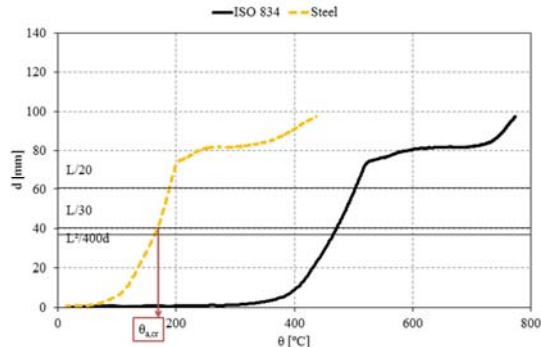


Gráfico V.321 – Deslocamento versus temperatura.

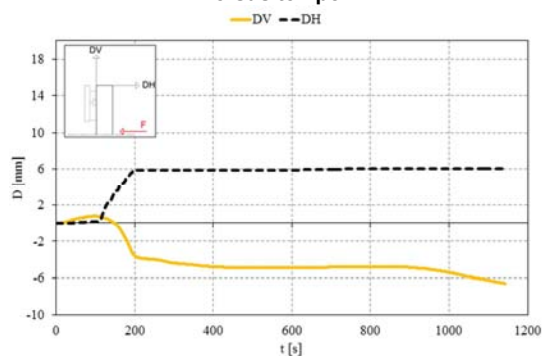


Gráfico V.322 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

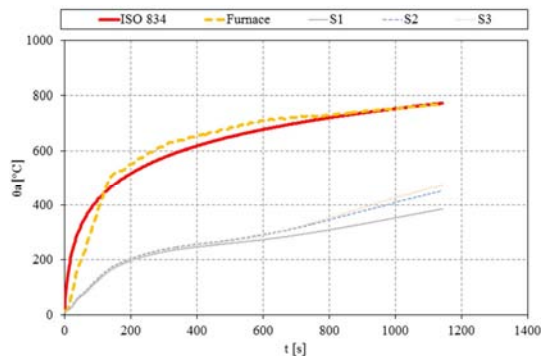


Gráfico V.323 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

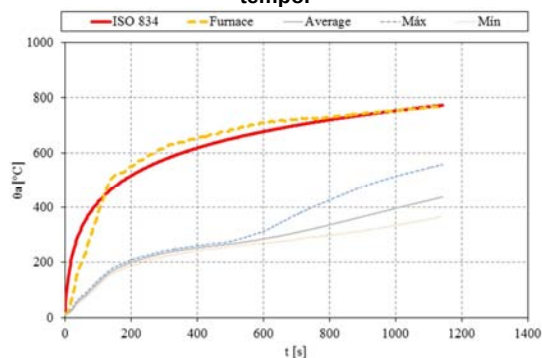


Gráfico V.324 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

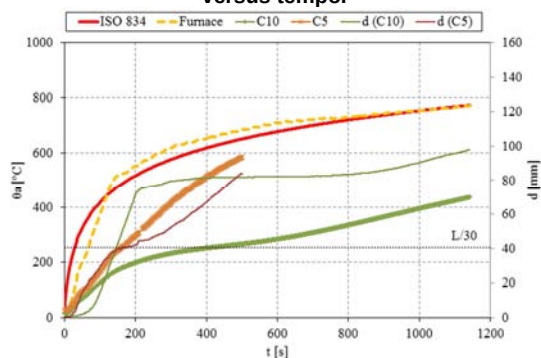


Gráfico V.325 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.181 – Formação da camada de protecção intumescente.



Figura V.182 – Camada intumescente já formada.



Figura V.183 – Final do ensaio, com a visualização da camada intumescente.



Figura V.184 – Visualização da retracção da camada, que expôs o aço às altas temperaturas.

Comentários:

Este elemento atingiu a sua ruptura por rótula plástica, nos instantes em que a tinta intumescente começou a formar a sua camada de protecção. Observou-se posteriormente a retracção da camada intumescente.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20			Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
				2	Média do perfil		
0	139	146	181		169,12	93%	100%

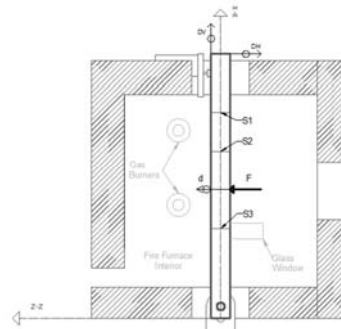
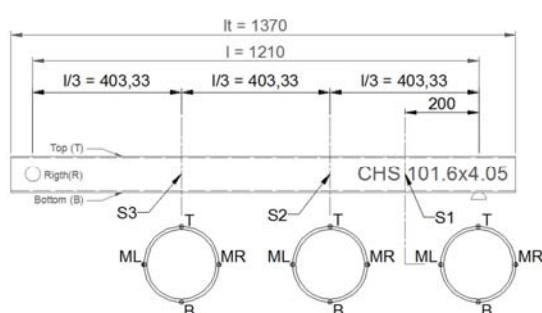
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: C11
Data: 26 \ 11 \ 2010
Tipo de secção: CHS 101,6x4,05
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 15200 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,120 [mm]
Duração do ensaio: 39 [min]
Temperatura máxima registada: 858,93 [°C]

Descrição do ensaio:

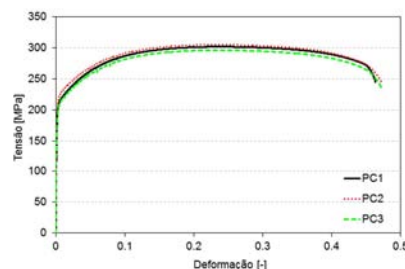
Ensaio de resistência ao fogo de elemento CHS 101,6x4,05, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (C4), tem uma resistência ao fogo de 6 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



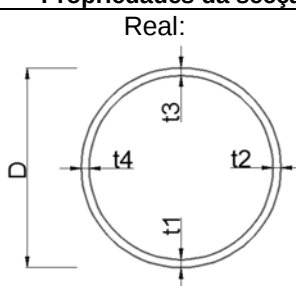
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Proveite nº	E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
PC1	--	200,7042	--	--	301,4931	47,680
PC2	--	207,6773	--	--	304,7633	48,688
PC3	--	194,5968	--	--	295,9788	48,968
Média	--	200,993	--	--	300,745	48,445
Desv. Padrão	--	6,545	--	--	4,440	0,677

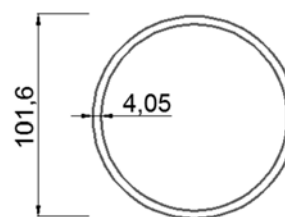


Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)				
	D	t1	t2	t3	t4
1	100,70	3,80	3,60	3,60	3,60
2	100,30	3,70	3,70	3,80	3,70
3	100,70	3,50	3,50	3,60	3,70
4	100,40				
Média	100,53	3,67	3,60	3,67	3,67
Desv pad	0,21	0,15	0,10	0,12	0,06
Máx	100,70	3,80	3,70	3,80	3,70
Mín	100,30	3,50	3,50	3,60	3,60
Média t	100,53		3,65		
Desv pad t	0,21		0,10		
Máx t	100,70		3,80		
Mín t	100,30		3,50		

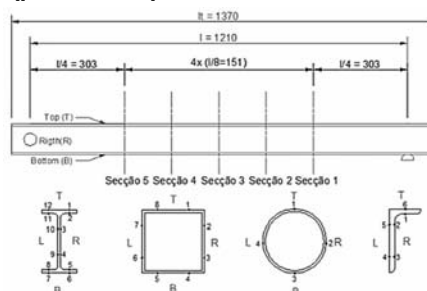


Nominal:



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1254	1355	1224	1439	1087	1271,80	133,82	1439	1087
2	1149	1232	1158	1284	1207	1206,00	55,48	1284	1149
3	1159	1259	1052	1152	900	1104,40	135,71	1259	900
4	800	979	785	915	1006	897,00	101,10	1006	785
Média	1090,50	1206,25	1054,75	1197,50	1050,00	1119,80			
Desv pad	199,36	160,43	193,29	221,87	129,68		177,79		
Máx	1254	1355	1224	1439	1207			1439	
Mín	800	979	785	915	900				785



Resultados:

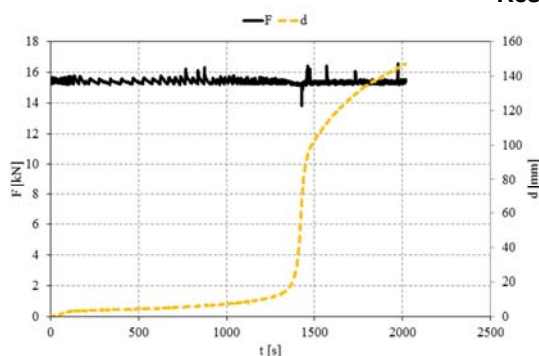


Gráfico V.326 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

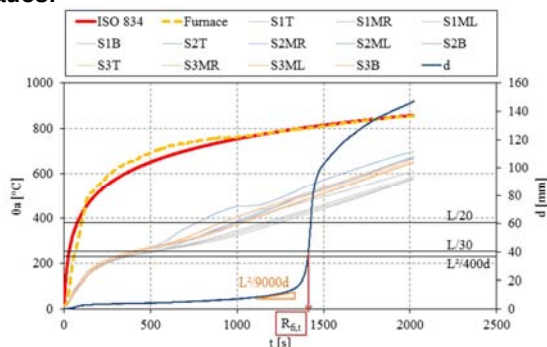


Gráfico V.327 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

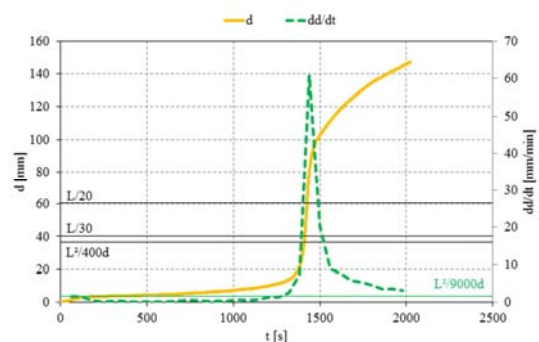


Gráfico V.328 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

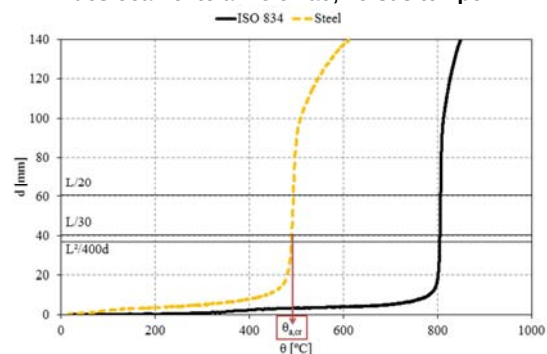


Gráfico V.329 – Deslocamento versus temperatura.

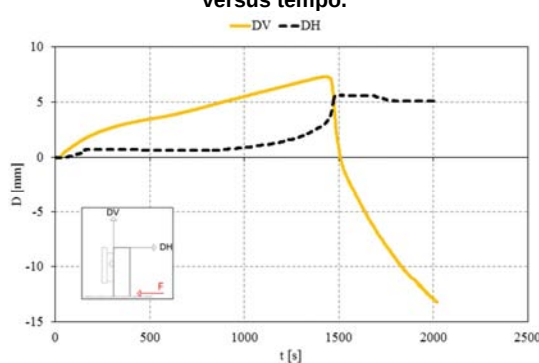


Gráfico V.330 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

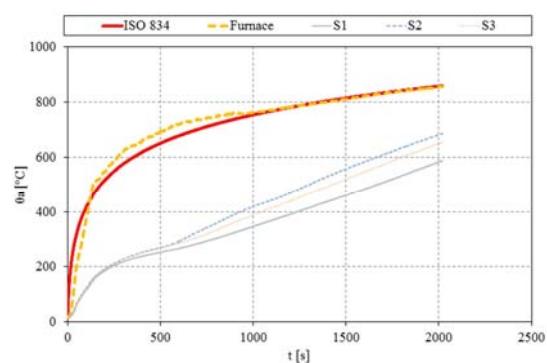


Gráfico V.331 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

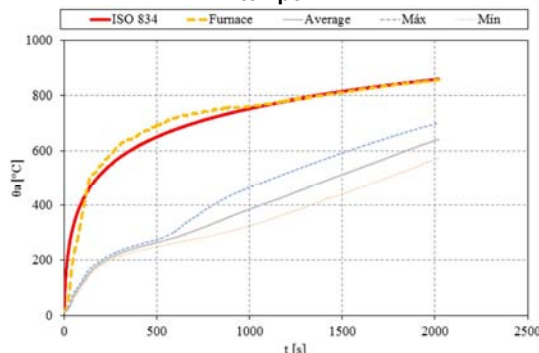


Gráfico V.332 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

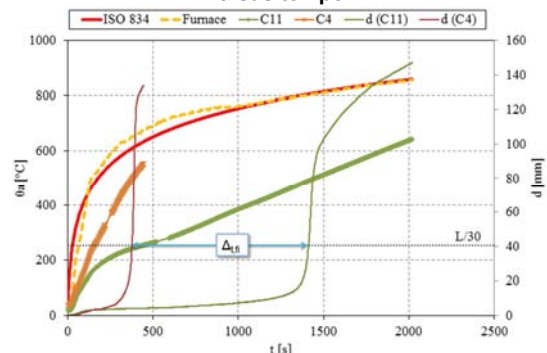


Gráfico V.333 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.185 – Formação da camada intumescente.



Figura V.186 – Fase intermédia da formação da camada.



Figura V.187 – Retracção da camada a evoluir.

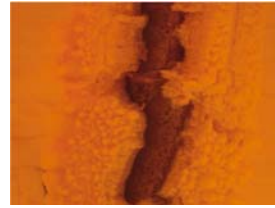


Figura V.188 – Aço exposto a elevadas temperaturas.



Figura V.189 – Final do ensaio, com os queimadores ainda ligados.



Figura V.190 – Deformação do elemento resultante da ruptura do elemento.

Comentários:

Neste elemento estava previsto um grau de utilização de 70%, alterou-se para um grau de 50%.

Durante o ensaio observou-se uma retracção na camada de intumescência da tinta, o que levou a uma perda de capacidade resistente do aço nas zonas expostas às altas temperaturas. Observando-se depois um rápido deslocamento do ponto de aplicação da carga, levando o elemento à sua ruptura por rótula plástica.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]		Grau de utilização real	
$L^2/9000d$	$L^2/400d$	L/30	L/20		Média do perfil		Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
1275	1408	1411	1424	23	490,75		66%	82

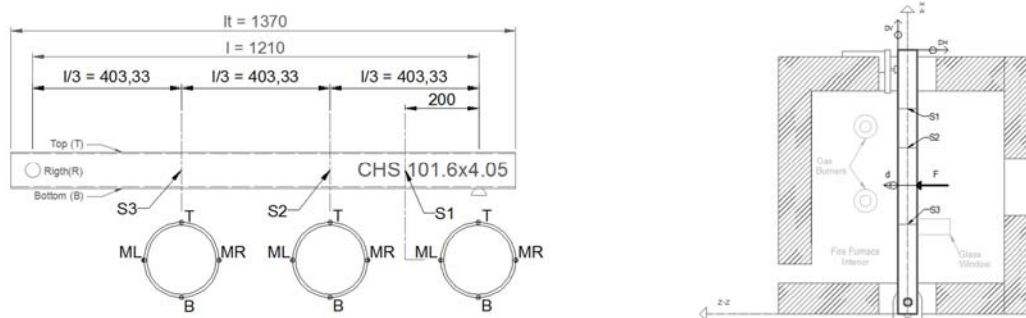
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: C12
Data: 19 \ 11 \ 2010
Tipo de secção: CHS 101,6x4,05
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 15200 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,895 [mm]
Duração do ensaio: 28 [min]
Temperatura máxima registada: 808,68 [°C]

Descrição do ensaio:

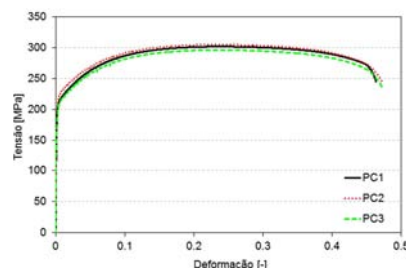
Ensaio de resistência ao fogo de elemento CHS 101,6x4,05, com aplicação de 2000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (C4), tem uma resistência ao fogo de 6 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



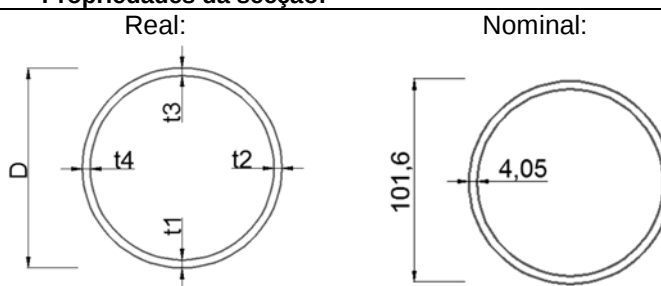
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Proveite n°	E [GPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _{eh} [MPa]	R _{el} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PC1	--	200,7042	--	--	301,4931	47,680
PC2	--	207,6773	--	--	304,7633	48,688
PC3	--	194,5968	--	--	295,9788	48,968
Média	--	200,993	--	--	300,745	48,445
Desv. Padrão	--	6,545	--	--	4,440	0,677



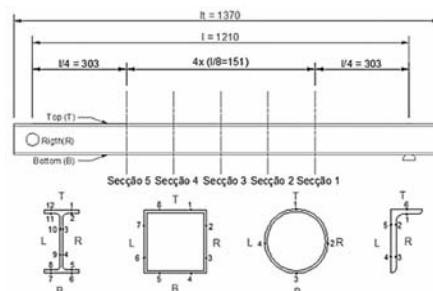
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)				
	D	t1	t2	t3	t4
1	100,70	3,80	3,60	3,60	3,60
2	100,30	3,70	3,70	3,80	3,70
3	100,70	3,50	3,50	3,60	3,70
4	100,40				
Média	100,53	3,67	3,60	3,67	3,67
Desv pad	0,21	0,15	0,10	0,12	0,06
Máx	100,70	3,80	3,70	3,80	3,70
Mín	100,30	3,50	3,50	3,60	3,60
Média t	100,53			3,65	
Desv pad t		0,21		0,10	
Máx t		100,70		3,80	
Mín t		100,30		3,50	



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Médi	D sv Pad	Máx	Mín
1	1820	1910	1780	1950	1600	1812,00	136,64	1950	1600
2	1870	2150	2130	2030	1800	1996,00	155,82	2150	1800
3	1730	1860	2100	1860	1550	1820,00	201,62	2100	1550
4	1490	2190	2080	2000	2010	1954,00	270,24	2190	1490
Média	1727,50	2027,50	2022,50	1960,00	1740,00	1895,50			
Desv pad	168,60	166,61	162,97	74,39	209,92		199,6701		
Máx	1870	2190	2130	2030	2010			2190	
Mín	1490	1860	1780	1860	1550				1490



Resultados:

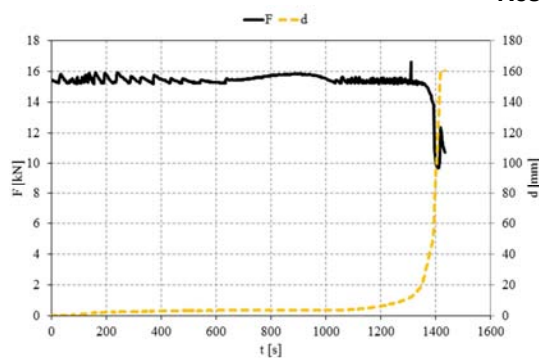


Gráfico V.334 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

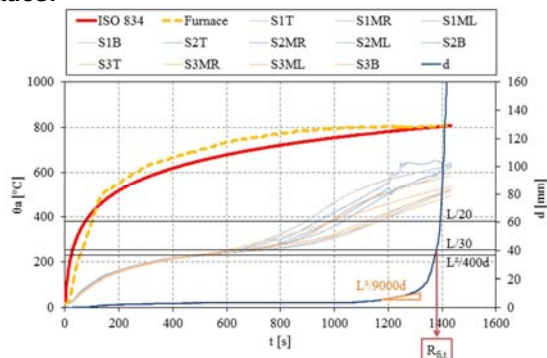


Gráfico V.335 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

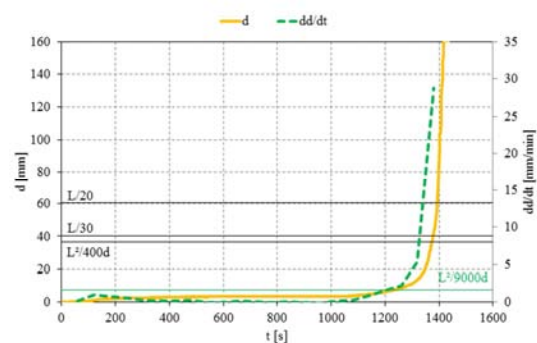


Gráfico V.336 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

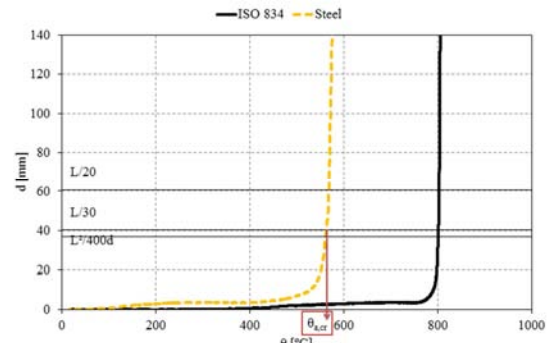


Gráfico V.337 – Deslocamento versus temperatura.

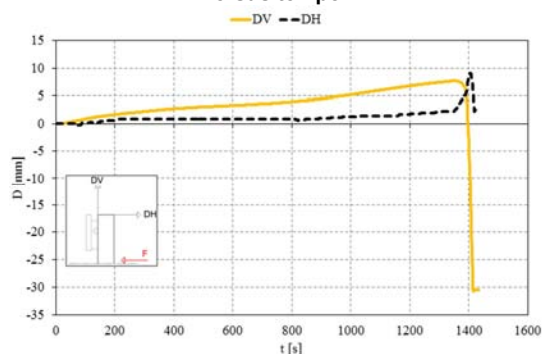


Gráfico V.338 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

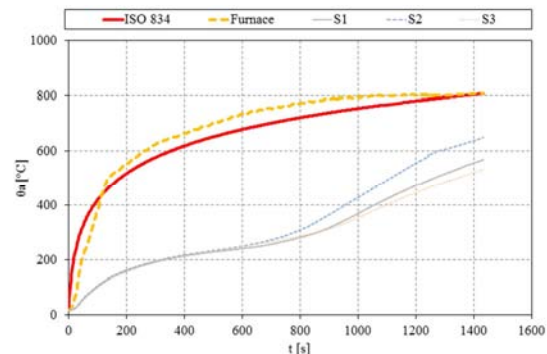


Gráfico V.339 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

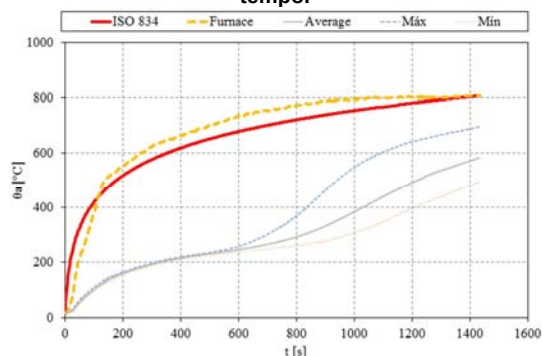


Gráfico V.340 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

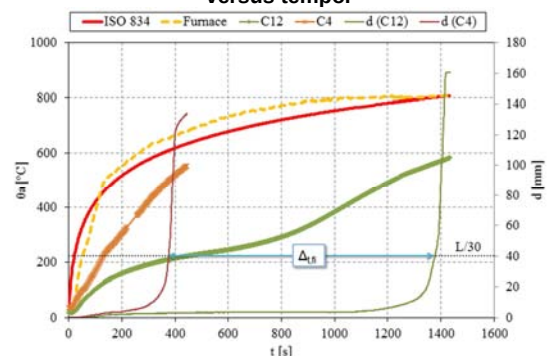


Gráfico V.341 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.191 – Formação da camada intumescente.



Figura V.192 – Fase intermédia da formação da camada.



Figura V.193 – Retracção da camada a evoluir.

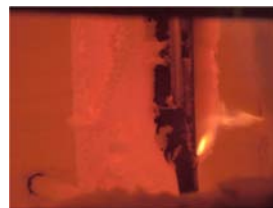


Figura V.194 – Aço exposto a elevadas temperaturas.



Figura V.195 – Final do ensaio, com os queimadores ainda ligados.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução da camada intumescente pouco homogénea, seguida de uma intensa retracção da mesma. Grandes zonas de aço ficaram expostas às altas temperaturas, levando o elemento a perder as suas capacidades resistentes, e atingindo a sua ruptura por rótula plástica.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20			Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
1205	1372	1378	1393	22	563,47	66%	57%

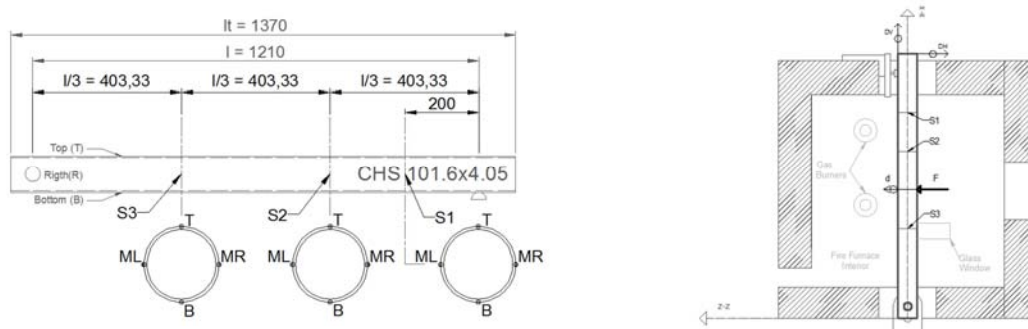
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: C13
Data: 22 \ 11 \ 2010
Tipo de secção: CHS 101,6x4,05
Tipo de aço: S235
Força aplicada: 15200 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,807 [mm]
Duração do ensaio: 40 [min]
Temperatura máxima registada: 864,31 [°C]

Descrição do ensaio:

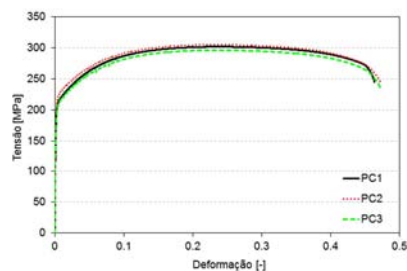
Ensaio de resistência ao fogo de elemento CHS 101,6x4,05, com aplicação de 2000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (C4), tem uma resistência ao fogo de 6 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



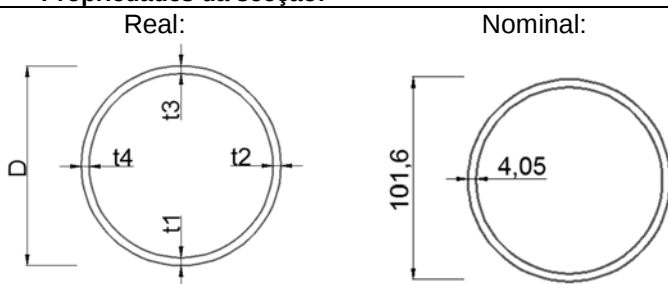
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete n°	E [GPa]	R _{p0,2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PC1	--	200,7042	--	--	301,4931	47,680
PC2	--	207,6773	--	--	304,7633	48,688
PC3	--	194,5968	--	--	295,9788	48,968
Média	--	200,993	--	--	300,745	48,445
Desv. Padrão	--	6,545	--	--	4,440	0,677



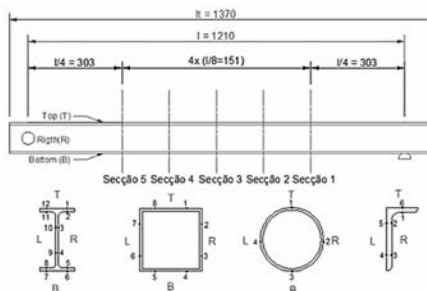
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)				
	D	t1	t2	t3	t4
1	100,70	3,80	3,60	3,60	3,60
2	100,30	3,70	3,70	3,80	3,70
3	100,70	3,50	3,50	3,60	3,70
4	100,40				
Média	100,53	3,67	3,60	3,67	3,67
Desv pad	0,21	0,15	0,10	0,12	0,06
Máx	100,70	3,80	3,70	3,80	3,70
Mín	100,30	3,50	3,50	3,60	3,60
Média t	100,53		3,65		
Desv pad t	0,21		0,10		
Máx t	100,70		3,80		
Mín t	100,30		3,50		



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1530	1630	1750	1690	1520	1624,00	99,90	1750	1520
2	1930	1780	1810	1990	1430	1788,00	217,76	1990	1430
3	1730	1870	1780	1870	1710	1792,00	75,63	1870	1710
4	1890	2060	2270	2160	1740	2024,00	211,49	2270	1740
Média	1770,00	1835,00	1902,50	1927,50	1600,00	1807,00			
Desv pad	181,84	179,72	246,22	198,05	149,44		209,91		
Máx	1930	2060	2270	2160	1740			2270	
Mín	1530	1630	1750	1690	1430				1430



Resultados:

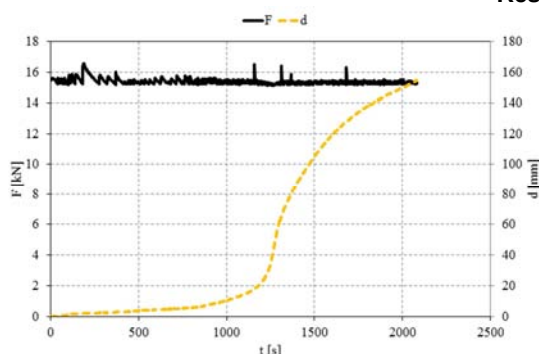


Gráfico V.342 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

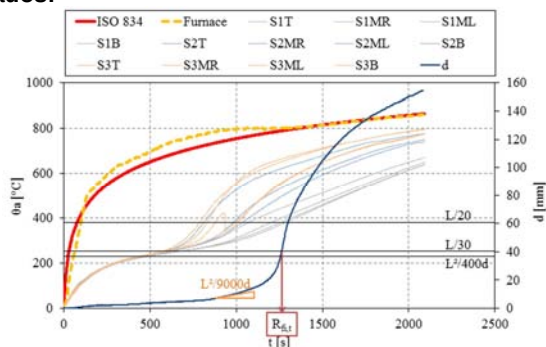


Gráfico V.343 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

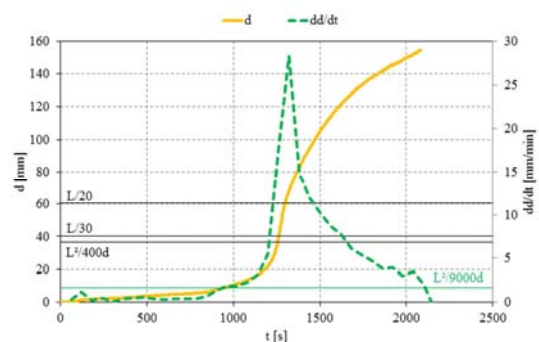


Gráfico V.344 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

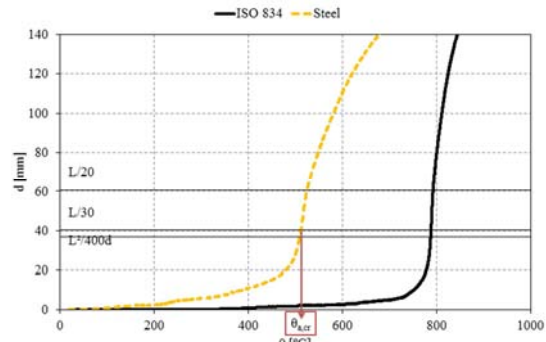


Gráfico V.345 – Deslocamento versus temperatura.

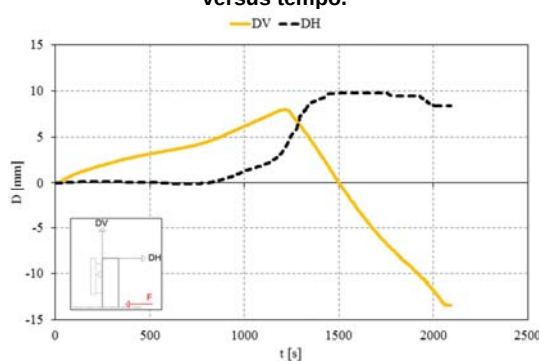


Gráfico V.346 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

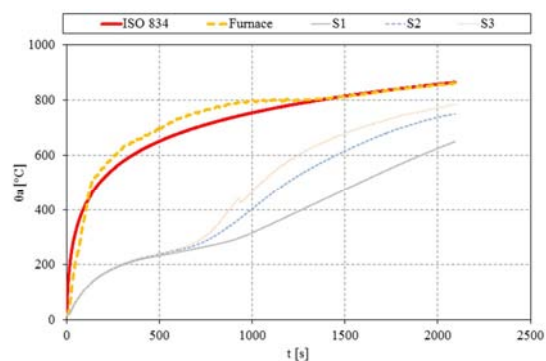


Gráfico V.347 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

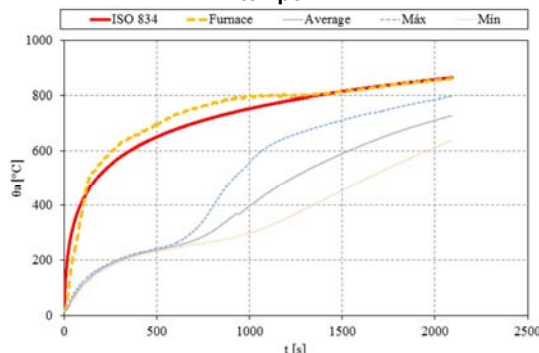


Gráfico V.348 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

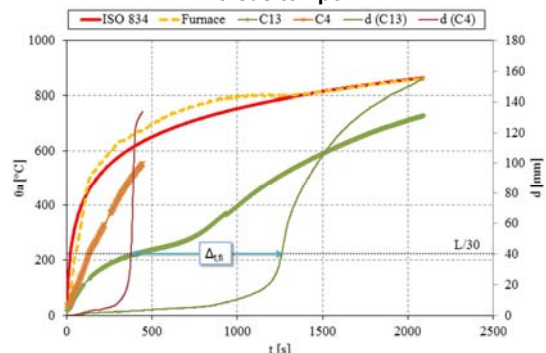


Gráfico V.349 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.196 – Formação da camada intumescente.

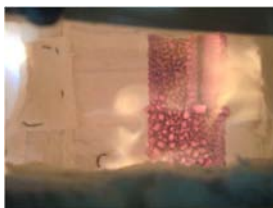


Figura V.197 – Fase intermédia da formação da camada.



Figura V.198 – Retracção da camada a evoluir.

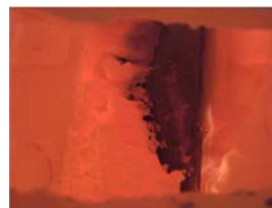


Figura V.199 – Aço exposto a elevadas temperaturas.



Figura V.200 – Final do ensaio, visualizando a camada intumescente.



Figura V.201 – Removida parte da camada intumescente do elemento.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução da camada intumescente pouco homogénea, seguida de uma intensa retracção da mesma. Grandes zonas de aço ficaram expostas às altas temperaturas, levando o elemento a perder as suas capacidades resistentes, e atingindo a sua ruptura por rótula plástica.

Resistência do elemento:							
Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	21	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
933	1255	1261	1297		512.00	66%	75%

Tipo de ensaio: Ensaio de resistência à flexão de perfil metálico

Nome do teste: L1

Data: 20 \ 05 \ 2010

Tipo de secção: LNP 100x50x8

Tipo de aço: S275

Força aplicada: incremental [N]

Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Deformações: extensómetros 120Ω

Curva de fogo utilizada: temperatura ambiente

Tipo de protecção: nenhuma

Espessura de protecção: 0,0 [mm]

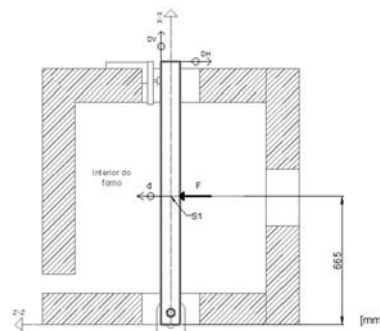
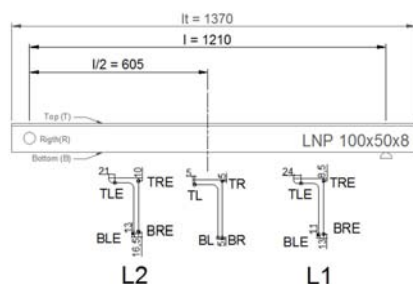
Duração do ensaio: --

Temperatura máxima registada: --

Descrição do ensaio:

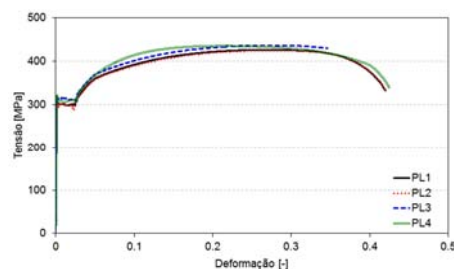
Ensaio de resistência à flexão de um perfil metálico com secção transversal LNP 100x50x8, em condições de temperatura ambiente. Serão aplicados incrementos de carga de 5000 [N]. A resistência à flexão do elemento, determinado pela EN1993-1-1, com as propriedades nominais do material e secção transversal, é de 21690 [N].

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



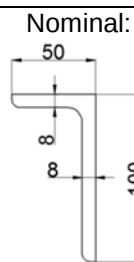
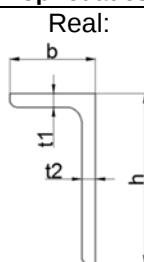
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provette n°	E [GPa]	R _{p0.2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PL1	203,501	300,504	304,816	297,956	425,958	41,966
PL2	205,994	295,506	306,287	286,683	424,389	42,098
PL3	211,965	313,636	311,873	306,287	436,145	34,574
PL4	210,707	307,451	321,910	308,738	434,824	42,462
Média	208,042	304,274	311,222	299,916	430,329	40,275
Desv. Padrão	3,439	6,871	6,709	8,623	5,206	3,297



Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)			
	h	b	t1	t2
1	99,70	50,70	8,20	8,30
2	99,60	50,90	8,30	8,80
3	99,60	51,00	8,30	8,50
4	99,80	50,90	8,30	9,00
Média	99,68	50,88	8,28	8,65
Desv pad	0,10	0,13	0,05	0,31
Máx	99,80	51,00	8,30	9,00
Mín	99,60	50,70	8,20	8,30
Média	99,68	50,88	8,46	
Desv pad t	0,10	0,13	0,29	
Máx t	99,80	51,00	9,00	
Mín t	99,60	50,70	8,20	



Resultados:

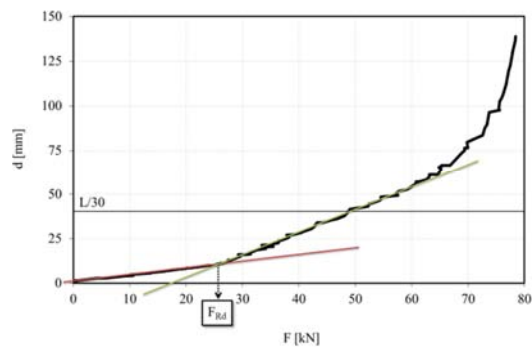


Gráfico V.350 – Força versus deslocamento a meio vão.

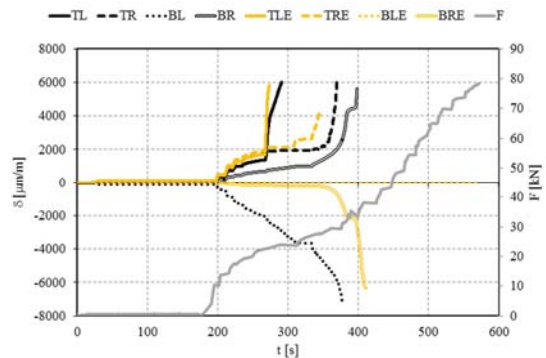


Gráfico V.351 – Deformação e força, versus tempo.

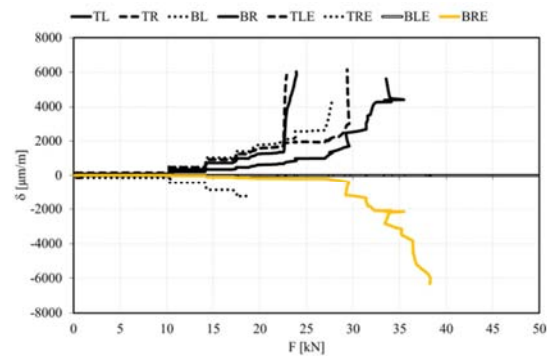


Gráfico V.352 – Deformação versus força.

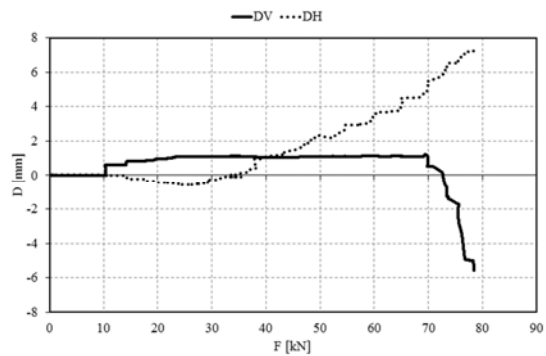


Gráfico V.353 – Deslocamento da extremidade do elemento versus força.

Registos fotográficos:



Figura V.202 – Início da instabilização lateral.



Figura V.203 – Deformação provocada pela instabilização lateral do elemento.

Resistência do elemento [N]:

Eurocódigo 3-1-1		Ensaio
Nominal	Real	
21.690,00	25.450,00	25.900,00

Tipo de ensaio: Ensaio de resistência à flexão de perfil metálico

Nome do teste: L2

Data: 20 \ 05 \ 2010

Tipo de secção: LNP 100x50x8

Tipo de aço: S275

Força aplicada: incremental [N]

Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Deformações: extensómetros 120Ω

Curva de fogo utilizada: temperatura ambiente

Tipo de protecção: nenhuma

Espessura de protecção: 0,0 [mm]

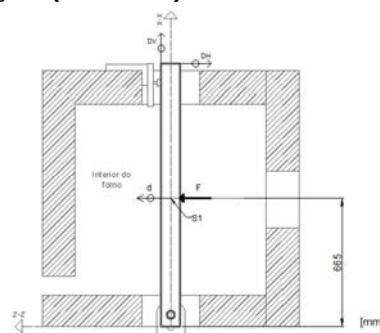
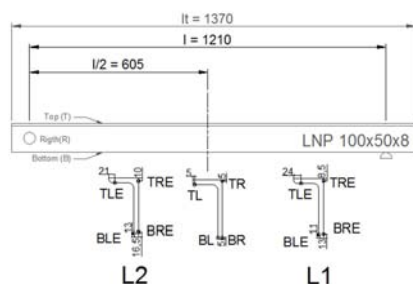
Duração do ensaio: --

Temperatura máxima registada: --

Descrição do ensaio:

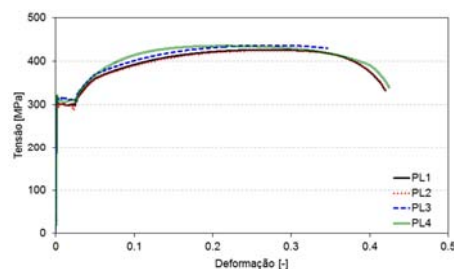
Ensaio de resistência à flexão de um perfil metálico com secção transversal LNP 100x50x8, em condições de temperatura ambiente. Serão aplicados incrementos de carga de 5000 [N]. A resistência à flexão do elemento, determinado pela EN1993-1-1, com as propriedades nominais do material e secção transversal, é de 21690 [N].

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



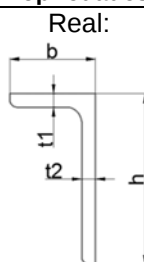
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provette n°	E [GPa]	R _{p0.2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PL1	203,501	300,504	304,816	297,956	425,958	41,966
PL2	205,994	295,506	306,287	286,683	424,389	42,098
PL3	211,965	313,636	311,873	306,287	436,145	34,574
PL4	210,707	307,451	321,910	308,738	434,824	42,462
Média	208,042	304,274	311,222	299,916	430,329	40,275
Desv. Padrão	3,439	6,871	6,709	8,623	5,206	3,297

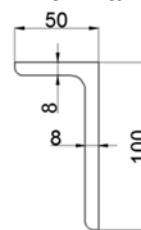


Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)			
	h	b	t1	t2
1	99,70	50,70	8,20	8,30
2	99,60	50,90	8,30	8,80
3	99,60	51,00	8,30	8,50
4	99,80	50,90	8,30	9,00
Média	99,68	50,88	8,28	8,65
Desv pad	0,10	0,13	0,05	0,31
Máx	99,80	51,00	8,30	9,00
Mín	99,60	50,70	8,20	8,30
Média	99,68	50,88	8,46	
Desv pad t	0,10	0,13	0,29	
Máx t	99,80	51,00	9,00	
Mín t	99,60	50,70	8,20	



Nominal:



Resultados:

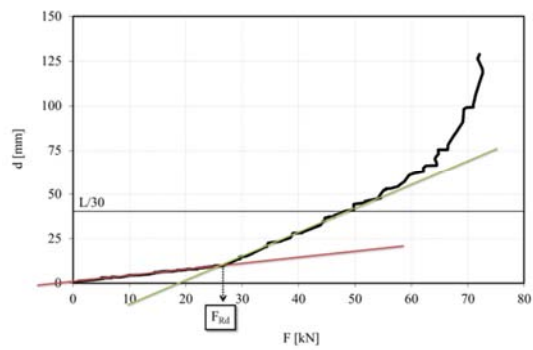


Gráfico V.354 – Força versus deslocamento a meio vão.

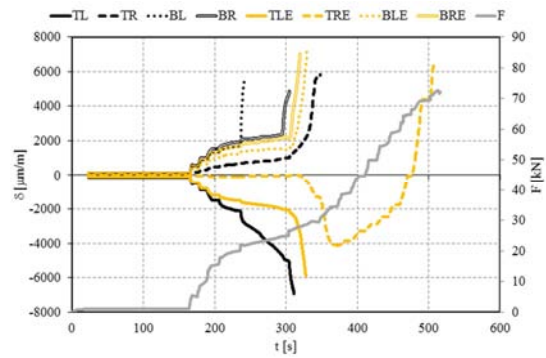


Gráfico V.355 – Deformação e força, versus tempo.

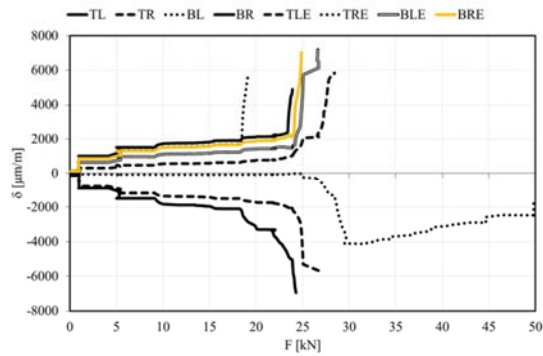


Gráfico V.356 – Deformação versus força.

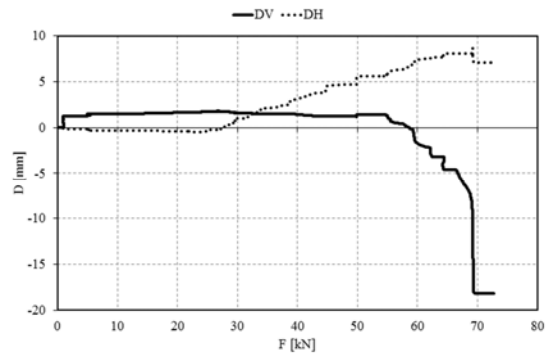


Gráfico V.357 – Deslocamento da extremidade do elemento versus força.

Registos fotográficos:



Figura V.204 – Deformação do elemento no final do ensaio.



Figura V.205 – Pormenorização da rotação lateral da secção.



Figura V.206 – Vista superior da deformação final.



Figura V.207 – Rotação no topo do elemento.

Resistência do elemento [N]:		
Eurocódigo 3-1-1		
Nominal	Real	Ensaio
21.690,00	25.450,00	25.950,00

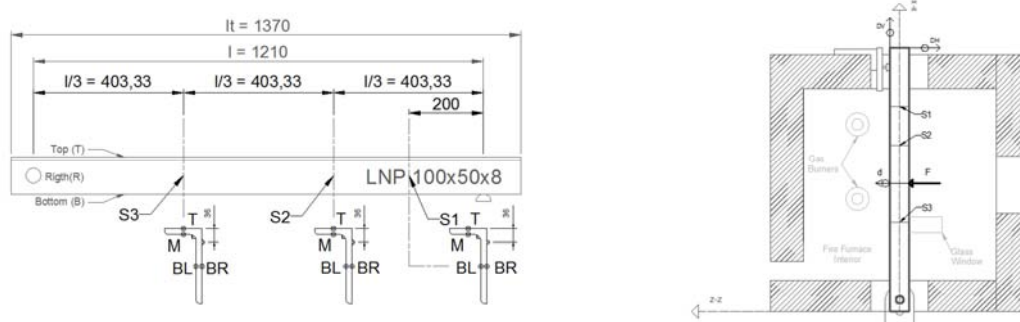
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico sem protecção
Nome do teste: L3
Data: 11 \ 08 \ 2010
Tipo de secção: LNP 100x50x8
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 5840 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: nenhuma
Espessura de protecção: 0,0 [mm]
Duração do ensaio: 57 [min]
Temperatura máxima registada: 930,32 [°C]

Descrição do ensaio:

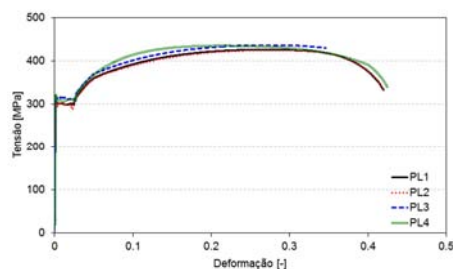
Ensaio de resistência ao fogo de elemento LNP 100x50x8, sem protecção, com a aplicação de carga, representando um estado de utilização nominal de $\mu_0=30\%$ segundo EN1993-1-2, que define uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=663,78^\circ\text{C}$. A resistência nominal do elemento é de 12 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

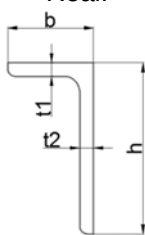
Provetes nº	E [Pa]	R _{p0.2} [MPa]	R _{0.2H} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PL1	203,501	300,504	304,816	297,956	425,958	41,966
PL2	205,994	295,506	306,287	286,683	424,389	42,098
PL3	211,965	313,636	311,873	306,287	436,145	34,574
PL4	210,707	307,451	321,910	308,738	434,824	42,462
Média	208,042	304,274	311,222	299,916	430,329	40,275
Desv. Padrão	3,439	6,871	6,709	8,623	5,206	3,297



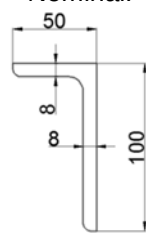
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)			
	h	b	t1	t2
1	99,70	50,70	8,20	8,30
2	99,60	50,90	8,30	8,80
3	99,60	51,00	8,30	8,50
4	99,80	50,90	8,30	9,00
Média	99,68	50,88	8,28	8,65
Desv pad	0,10	0,13	0,05	0,31
Máx	99,80	51,00	8,30	9,00
Mín	99,60	50,70	8,20	8,30
Média	99,68	50,88	8,28	8,65
Desv pad t	0,10	0,13	0,05	0,29
Máx t	99,80	51,00	8,30	9,00
Mín t	99,60	50,70	8,20	8,20

Real:



Nominal:



Resultados:

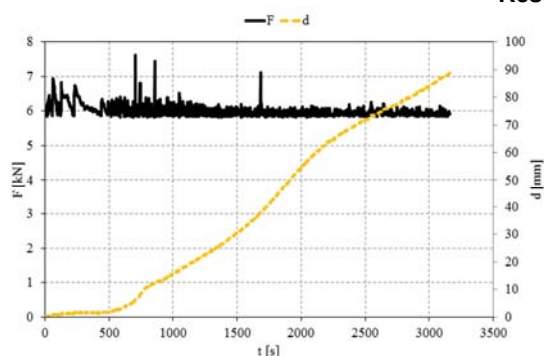


Gráfico V.358 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

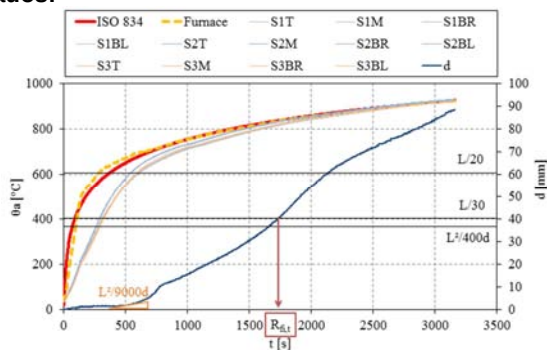


Gráfico V.359 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

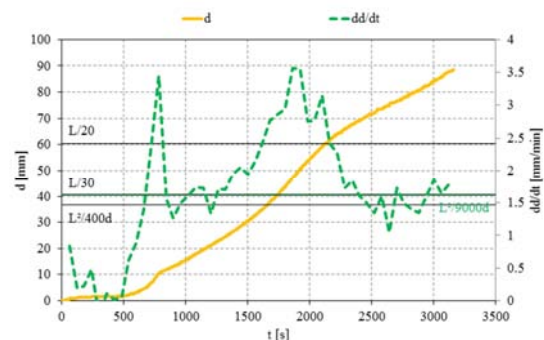


Gráfico V.360 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

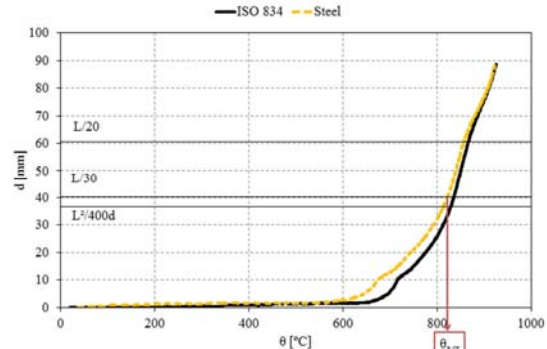


Gráfico V.361 – Deslocamento versus temperatura.

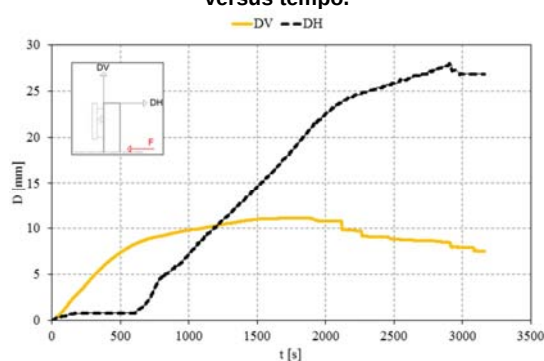


Gráfico V.362 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

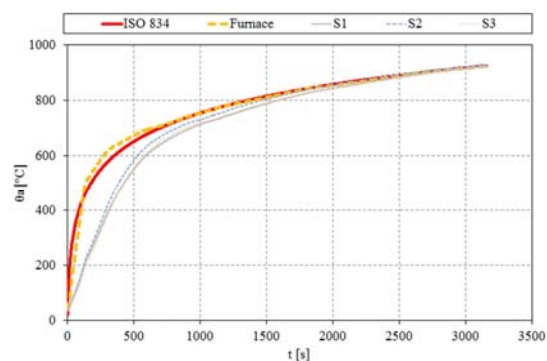


Gráfico V.363 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

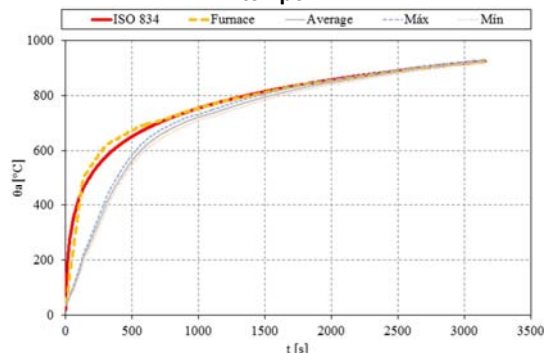


Gráfico V.364 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

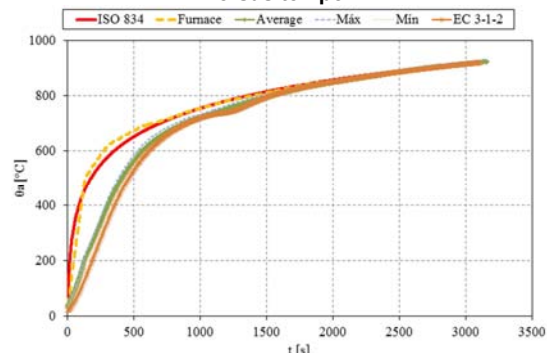


Gráfico V.365 – Temperatura da secção e temperatura prevista pelo EC 3-1-2, versus tempo.

Registos fotográficos:

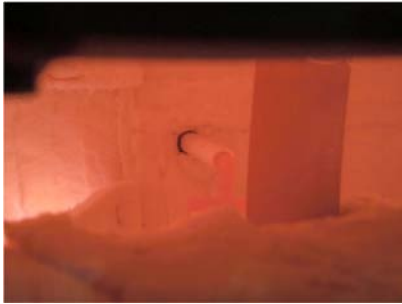


Figura V.208 – Instante do ensaio, início da encurvadura lateral no elemento.

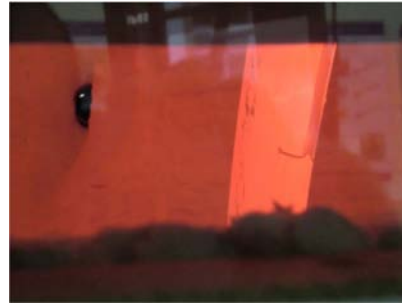


Figura V.209 – Final do ensaio, com o elemento ainda incandescente.



Figura V.210 – Final do ensaio, com os queimadores ainda ligados.



Figura V.211 – Deformação final imposta ao elemento.

Comentários:

Observou-se que o elemento instabilizou lateralmente durante o ensaio, provocando um crescimento contínuo do valor de deslocamento no ponto de aplicação da carga, até atingir a sua ruptura.

Instante tempo [s]				Resistência do elemento:		
				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	29	Média do perfil	Propriedades reais
						Temperatura crítica de ensaio
674	1657	1743	2134		822,55	29%
						10%

Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico sem protecção
Nome do teste: L4
Data: 12 \ 08 \ 2010
Tipo de secção: LNP 100x50x8
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 9830 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)

Tipo de protecção: nenhuma

Espessura de protecção: 0,0 [mm]

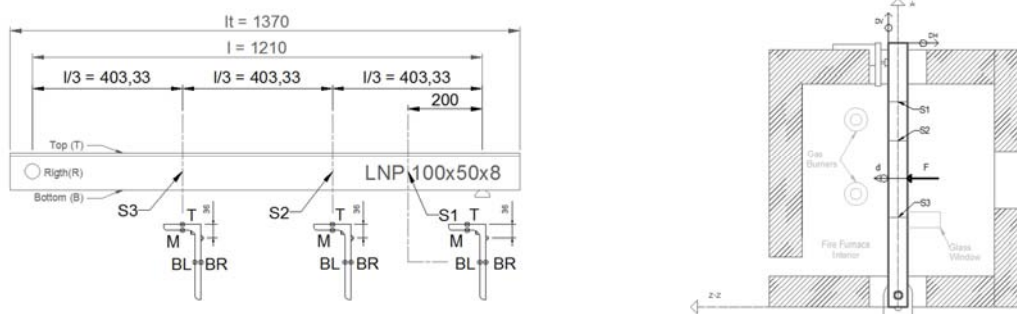
Duração do ensaio: 36 [min]

Temperatura máxima registada: 861,00 [°C]

Descrição do ensaio:

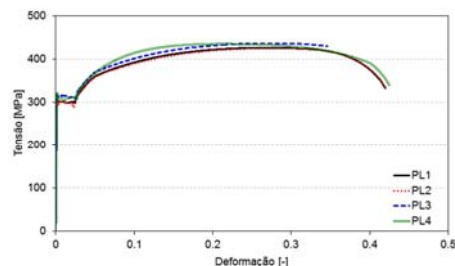
Ensaio de resistência ao fogo de elemento LNP 100x50x8, sem protecção, com a aplicação de carga, representando um estado de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, que define uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. A resistência nominal do elemento é de 9 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



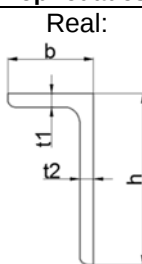
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provete n°	E [GPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
PL1	203,501	300,504	304,816	297,956	425,958	41,966
PL2	205,994	295,506	306,287	286,683	424,389	42,098
PL3	211,965	313,636	311,873	306,287	436,145	34,574
PL4	210,707	307,451	321,910	308,738	434,824	42,462
Média	208,042	304,274	311,222	299,916	430,329	40,275
Desv. Padrão	3,439	6,871	6,709	8,623	5,206	3,297

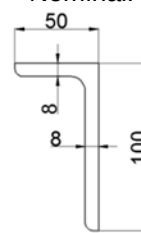


Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)			
	h	b	t1	t2
1	99,70	50,70	8,20	8,30
2	99,60	50,90	8,30	8,80
3	99,60	51,00	8,30	8,50
4	99,80	50,90	8,30	9,00
Média	99,68	50,88	8,28	8,65
Desv pad	0,10	0,13	0,05	0,31
Máx	99,80	51,00	8,30	9,00
Mín	99,60	50,70	8,20	8,30
Média	99,68	50,88	8,46	
Desv pad t	0,10	0,13	0,29	
Máx t	99,80	51,00	9,00	
Mín t	99,60	50,70	8,20	



Nominal:



Resultados:

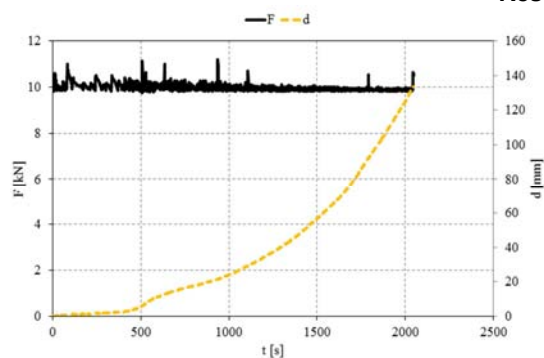


Gráfico V.366 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

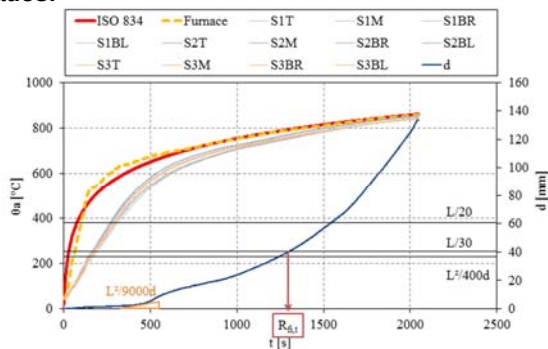


Gráfico V.367 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

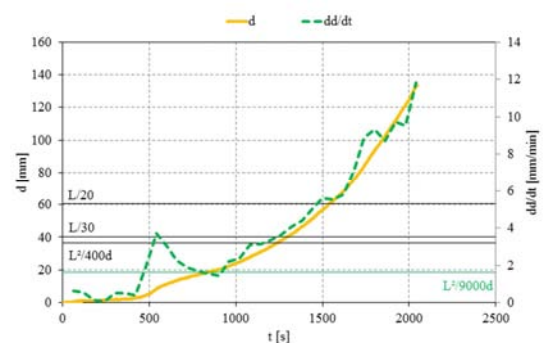


Gráfico V.368 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

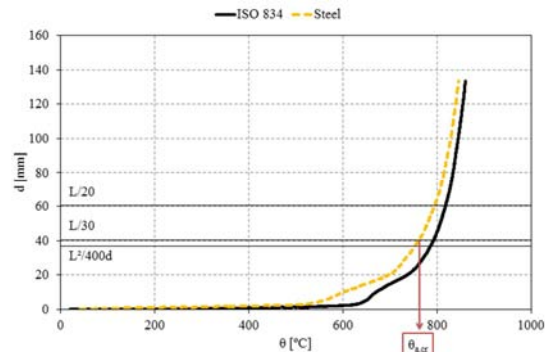


Gráfico V.369 – Deslocamento versus temperatura.

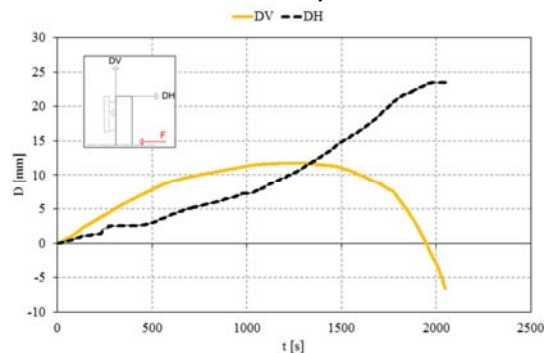


Gráfico V.370 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

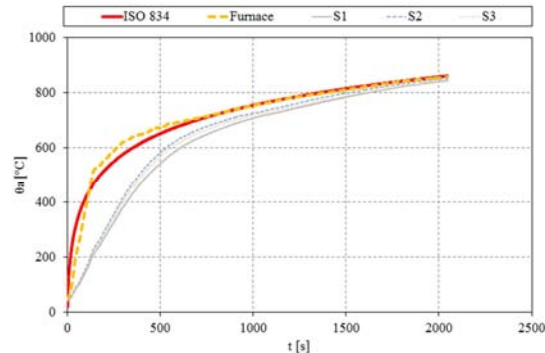


Gráfico V.371 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

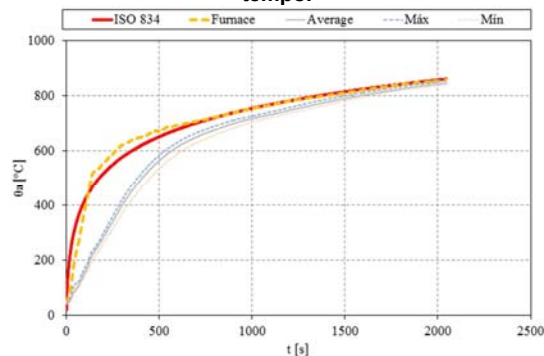


Gráfico V.372 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

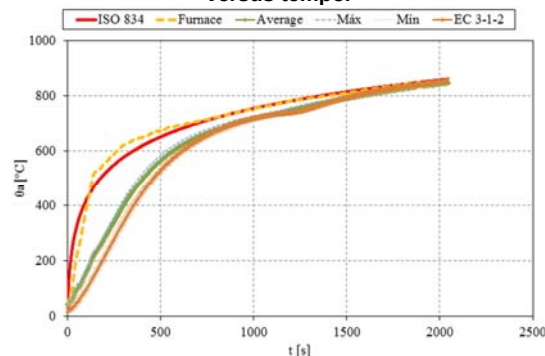


Gráfico V.373 – Temperatura da secção e temperatura prevista pelo EC 3-1-2, versus tempo.

Registos fotográficos:



Figura V.212 – Final do ensaio, com os queimadores ainda ligados.



Figura V.213 – Deformação final imposta ao elemento.

Comentários:

Observou-se que o elemento instabilizou lateralmente durante o ensaio, provocando a sua ruptura.

				Resistência do elemento:			
Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
$L^2/9000d$	$L^2/400d$	$L/30$	$L/20$	21	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
468	1238	1297	1541		761,68	48%	16%

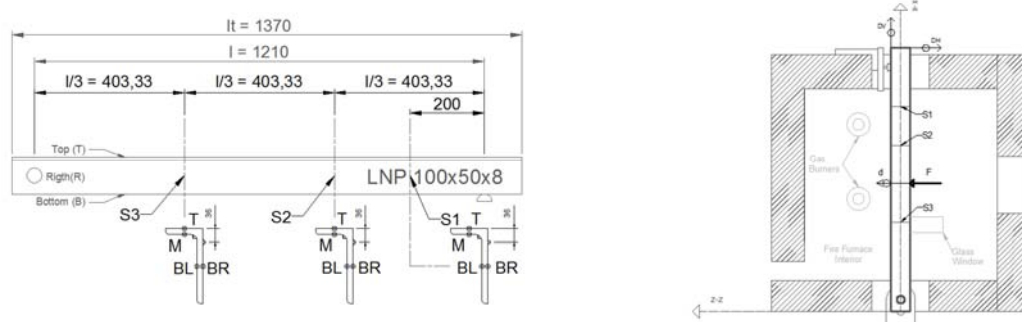
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico sem protecção
Nome do teste: L5
Data: 12 \ 08 \ 2010
Tipo de secção: LNP 100x50x8
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 13610 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: nenhuma
Espessura de protecção: 0,0 [mm]
Duração do ensaio: 29 [min]
Temperatura máxima registada: 826,35 [°C]

Descrição do ensaio:

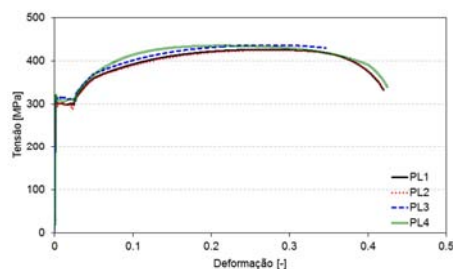
Ensaio de resistência ao fogo de elemento LNP 100x50x8, sem protecção, com a aplicação de carga, representando um estado de utilização nominal de $\mu_0=70\%$ segundo EN1993-1-2, que define uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=525,78^\circ\text{C}$. A resistência nominal do elemento é de 7 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

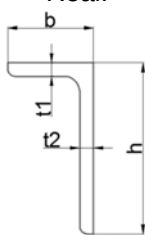
Provete nº	E [GPa]	$R_{p,0.2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
P 1	203,501	300,504	304,816	297,956	425,958	41,966
PL2	205,994	295,506	306,287	286,683	424,389	42,098
PL3	211,965	313,636	311,873	306,287	436,145	34,574
PL4	210,707	307,451	321,910	308,738	434,824	42,462
Média	208,042	304,274	311,222	299,916	430,329	40,275
Desv. Padrão	3,439	6,871	6,709	8,623	5,206	3,297



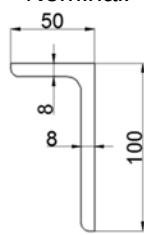
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)			
	h	b	t1	t2
1	99,70	50,70	8,20	8,30
2	99,60	50,90	8,30	8,80
3	99,60	51,00	8,30	8,50
4	99,80	50,90	8,30	9,00
Média	99,68	50,88	8,28	8,65
Desv pad	0,10	0,13	0,05	0,31
Máx	99,80	51,00	8,30	9,00
Mín	99,60	50,70	8,20	8,30
Média	99,68	50,88	8,46	
Desv pad t	0,10	0,13	0,29	
Máx t	99,80	51,00	9,00	
Mín t	99,60	50,70	8,20	

Real:



Nominal:



Resultados:

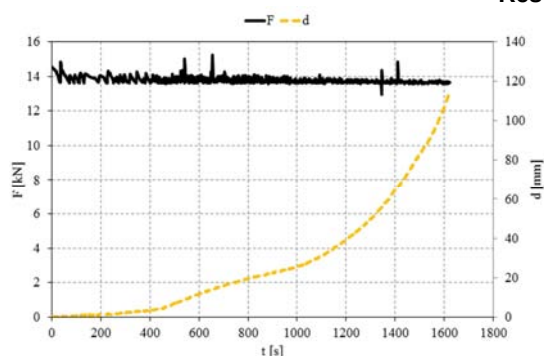


Gráfico V.374 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo.

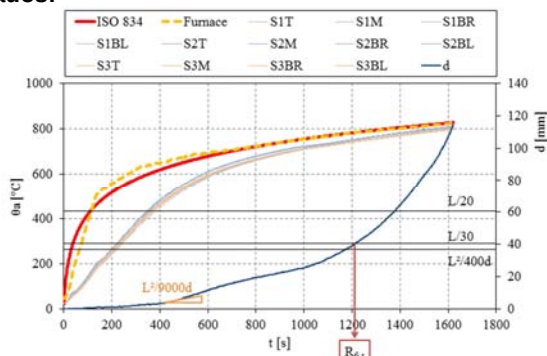


Gráfico V.375 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

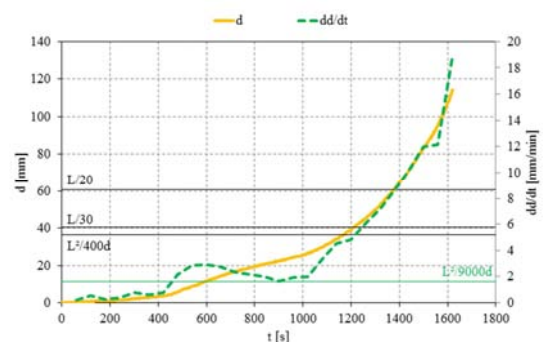


Gráfico V.376 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo.

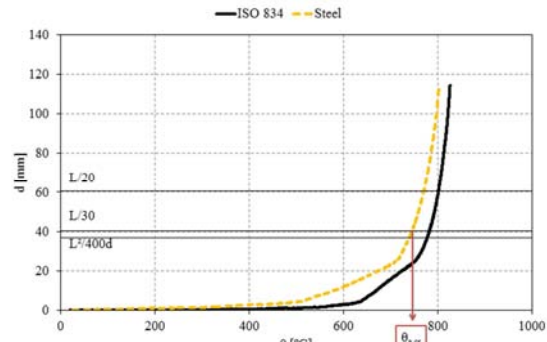


Gráfico V.377 – Deslocamento versus temperatura.

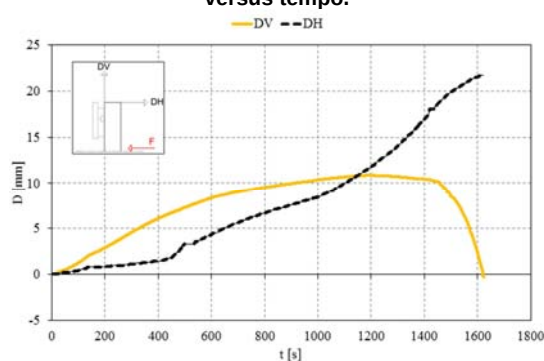


Gráfico V.378 – Deslocamento da extremidade, versus tempo.

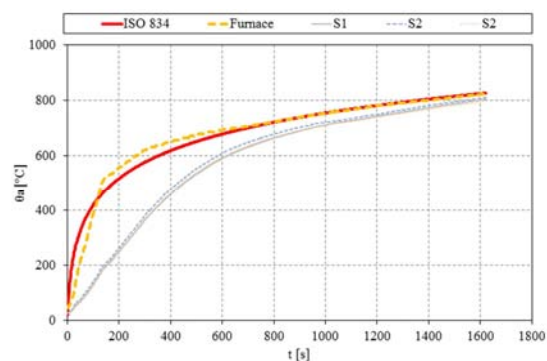


Gráfico V.379 – Temperatura média nas secções, versus tempo.

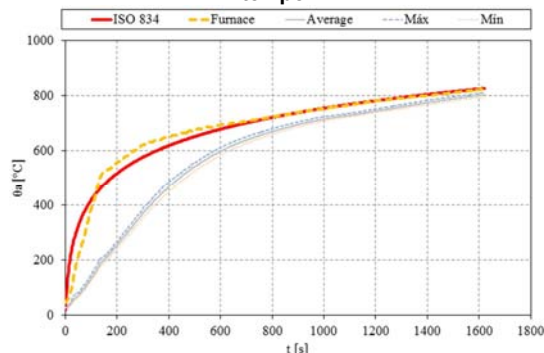


Gráfico V.380 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

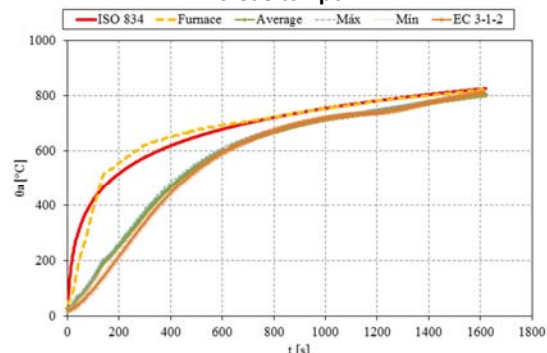


Gráfico V.381 – Temperatura da secção e temperatura prevista pelo EC 3-1-2, versus tempo.

Registos fotográficos:



Figura V.214 – Final do ensaio, ainda com os queimadores ligados.

Comentários:

Observou-se que o elemento instabilizou lateralmente durante o ensaio, provocando a sua ruptura.

				Resistência do elemento:			
Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	20	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
455	1170	1210	1376		745.66	64%	17%

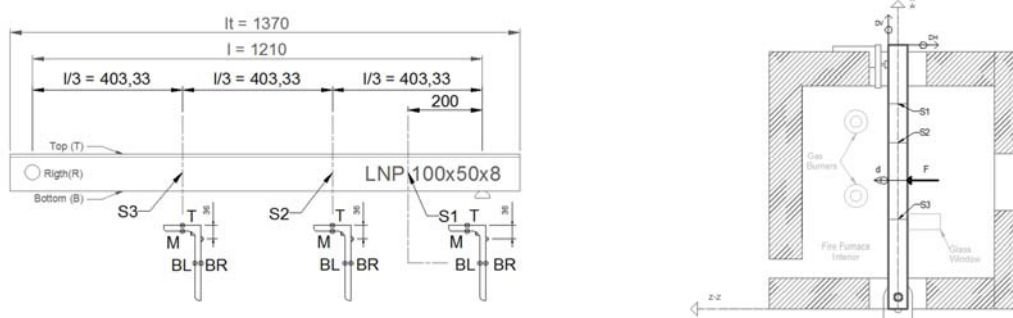
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: L6
Data: 06 \ 09 \ 2010
Tipo de secção: LNP 100x50x8
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 5840 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: Tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,041 [mm]
Duração do ensaio: 109 [min]
Temperatura máxima registada: 1085,07 [°C]

Descrição do ensaio:

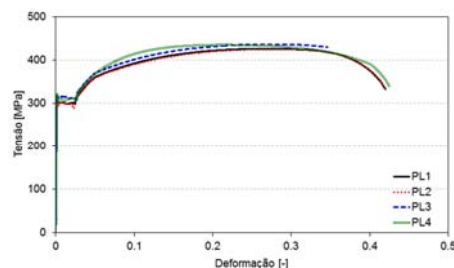
Ensaio de resistência ao fogo de elemento LNP 100x50x8, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=30\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=663,78^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (L3), tem uma resistência ao fogo de 29 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



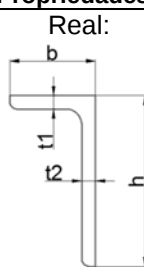
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provette nº	E [GPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
PL1	203,501	300,504	304,816	297,956	425,958	41,966
PL2	205,994	295,506	306,287	286,683	424,389	42,098
PL3	211,965	313,636	311,873	306,287	436,145	34,574
PL4	210,707	307,451	321,910	308,738	434,824	42,462
Média	208,042	304,274	311,222	299,916	430,329	40,275
Desv. Padrão	3,439	6,871	6,709	8,623	5,206	3,297

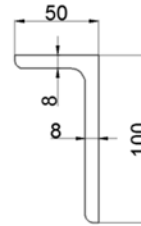


Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)			
	h	b	t1	t2
1	99,70	50,70	8,20	8,30
2	99,60	50,90	8,30	8,80
3	99,60	51,00	8,30	8,50
4	99,80	50,90	8,30	9,00
Média	99,68	50,88	8,28	8,65
Desv pad	0,10	0,13	0,05	0,31
Máx	99,80	51,00	8,30	9,00
Mín	99,60	50,70	8,20	8,30
Média	99,68	50,88	8,46	
Desv pad t	0,10	0,13	0,29	
Máx t	99,80	51,00	9,00	
Mín t	99,60	50,70	8,20	

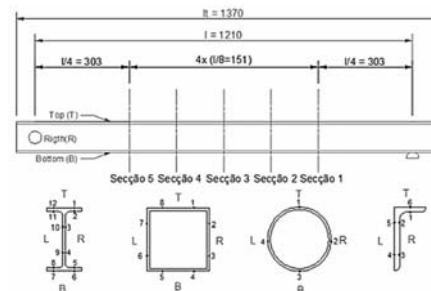


Nominal:



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1186	1105	1026	1141	1173	1126,20	64,18	1186	1026
2	1132	1064	1114	1146	1001	1091,40	59,29	1146	1001
3	905	999	911	903	916	926,80	40,68	999	903
4	972	898	999	1127	987	996,60	82,81	1127	898
5	1047	966	1054	1125	995	1037,40	61,11	1125	966
6	961	1063	1060	1205	1042	1066,20	87,99	1205	961
Média	516,92	507,92	513,67	553,92	509,50	1040,77			
Desv pad	108,34	76,35	68,74	104,51	85,76	90,55			
Máx	1186	1105	1114	1205	1173			1205	
Mín	905	898	911	903	916				898



Resultados:

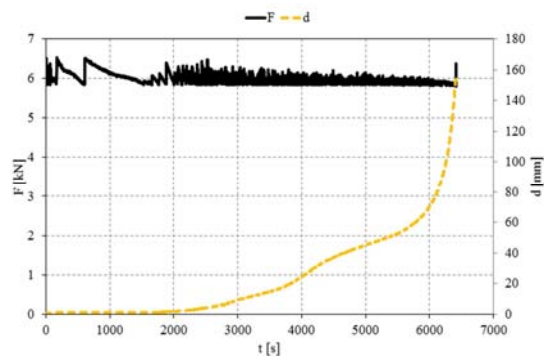


Gráfico V.382 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo,

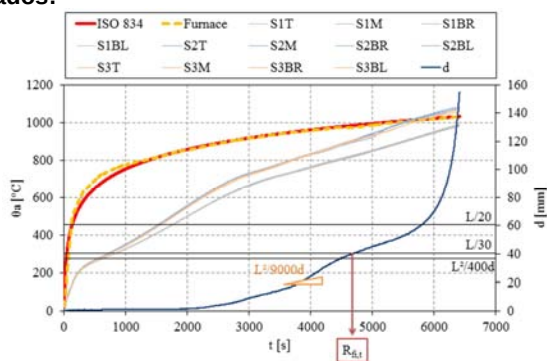


Gráfico V.383 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

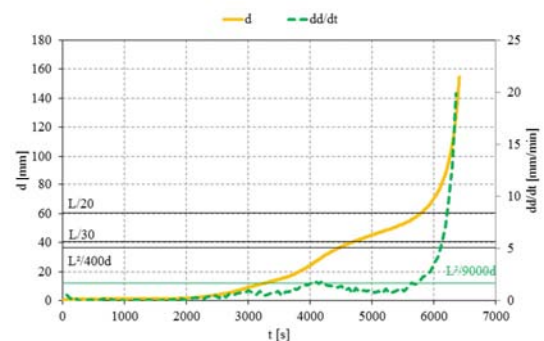


Gráfico V.384 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo,

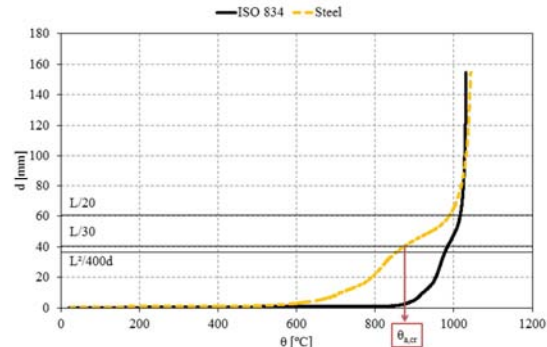


Gráfico V.385 – Deslocamento versus temperatura,

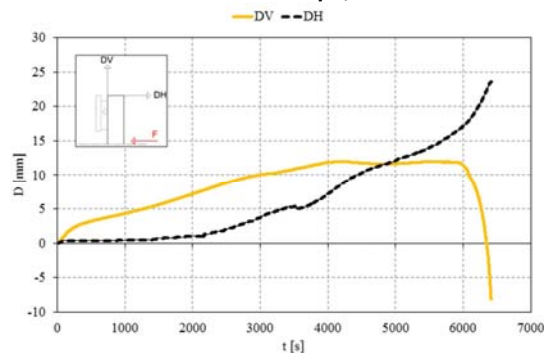


Gráfico V.386 – Deslocamento da extremidade, versus tempo,

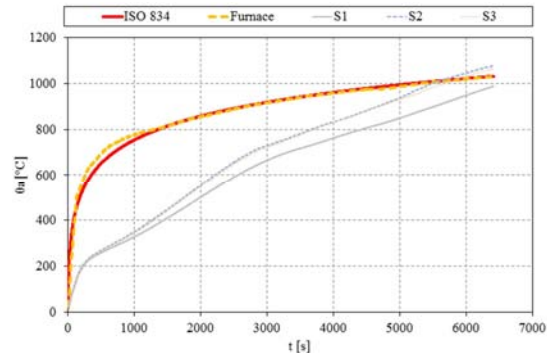


Gráfico V.387 – Temperatura média nas secções, versus tempo,

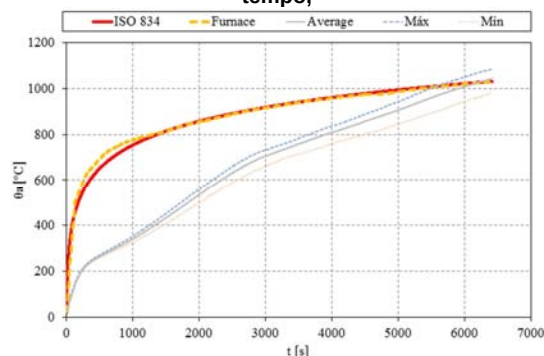


Gráfico V.7 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

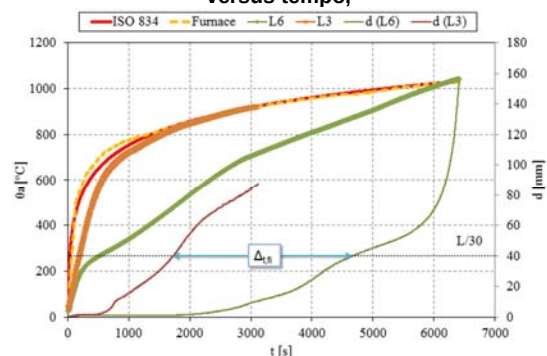


Gráfico V.7 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.215 – Início da reacção da tinta intumescente.



Figura V.216 – Formação da camada protectora.



Figura V.217 – Setup de ensaio pronto para dar início.



Figura V.218 – Final do ensaio, ainda com os queimadores ligados.



Figura V.219 – Zona do elemento que sofreu encurvadura lateral.



Figura V.220 – Deformação final, imposta ao elemento.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogénea da camada intumescente, registando-se depois uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por encurvadura lateral.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	78	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
3960	4478	4692	5797		875,50	29%	7%

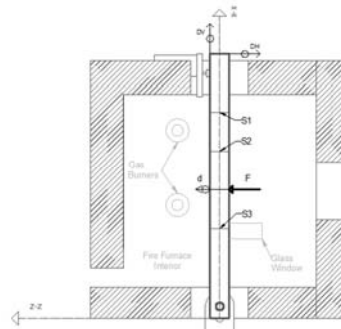
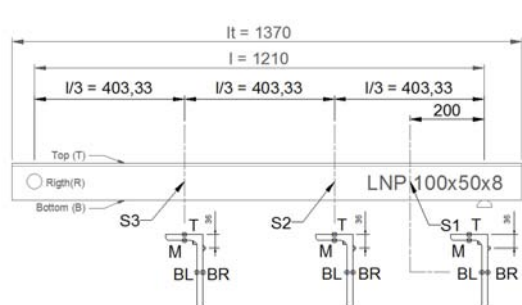
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: L7
Data: 29 \ 11 \ 2010
Tipo de secção: LNP 100x50x8
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 5840 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: Tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,026 [mm]
Duração do ensaio: 123 [min]
Temperatura máxima registada: 1118,62 [°C]

Descrição do ensaio:

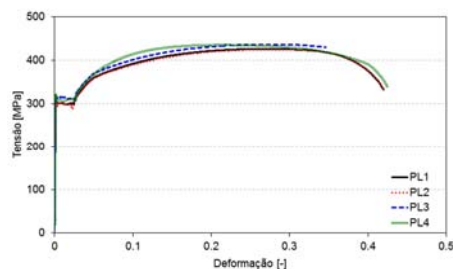
Ensaio de resistência ao fogo de elemento LNP 100x50x8, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=30\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=663,78^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (L3), tem uma resistência ao fogo de 29 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

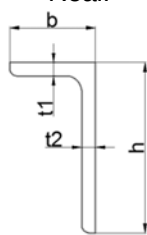
Proveite nº	E [GPa]	R _{p0.2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PL1	203,501	300,504	304,816	297,956	425,958	41,966
PL2	205,994	295,506	306,287	286,683	424,389	42,098
PL3	211,965	313,636	311,873	306,287	436,145	34,574
PL4	210,707	307,451	321,910	308,738	434,824	42,462
Média	208,042	304,274	311,222	299,916	430,329	40,275
Desv. Padrão	3,439	6,871	6,709	8,623	5,206	3,297



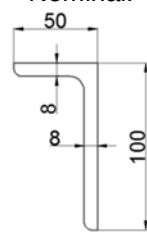
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)			
	h	b	t1	t2
1	99,70	50,70	8,20	8,30
2	99,60	50,90	8,30	8,80
3	99,60	51,00	8,30	8,50
4	99,80	50,90	8,30	9,00
Média	99,68	50,88	8,28	8,65
Desv pad	0,10	0,13	0,05	0,31
Máx	99,80	51,00	8,30	9,00
Mín	99,60	50,70	8,20	8,30
Média	99,68	50,88	8,46	
Desv pad t	0,10	0,13	0,29	
Máx t	99,80	51,00	9,00	
Mín t	99,60	50,70	8,20	

Real:

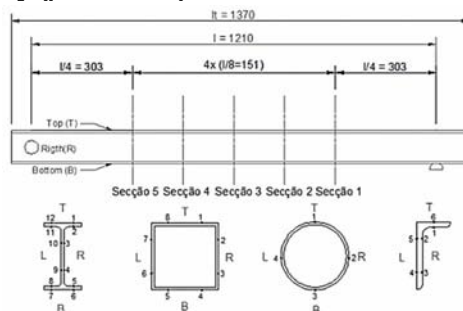


Nominal:



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1158	1146	1123	1056	1129	1122,40	39,61	1158	1056
2	1103	1039	1015	1068	991	1043,20	43,96	1103	991
3	994	850	929	950	915	927,60	52,66	994	850
4	1004	905	898	890	913	922,00	46,62	1004	890
5	968	945	966	1140	1031	1010,00	79,48	1140	945
6	1030	1132	989	1309	1187	1129,40	127,65	1309	989
Média	521,42	501,42	493,33	534,42	513,83	1025,77			
Desv pad	72,86	122,28	78,75	147,66	112,12		106,58		
Máx	1158	1146	1123	1309	1187			1309	
Mín	968	850	898	890	913				850



Resultados:

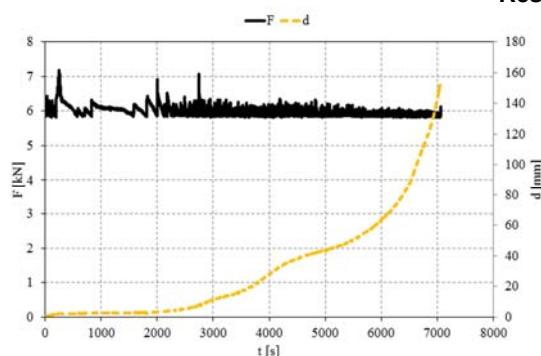


Gráfico V.388 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo,

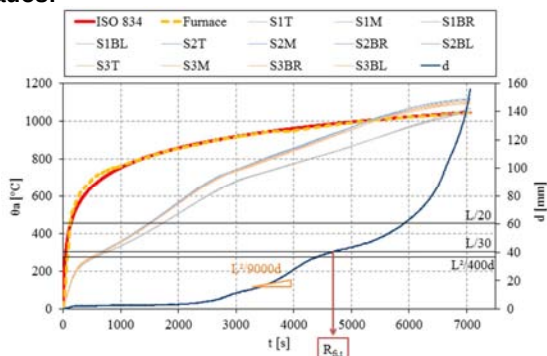


Gráfico V.389 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

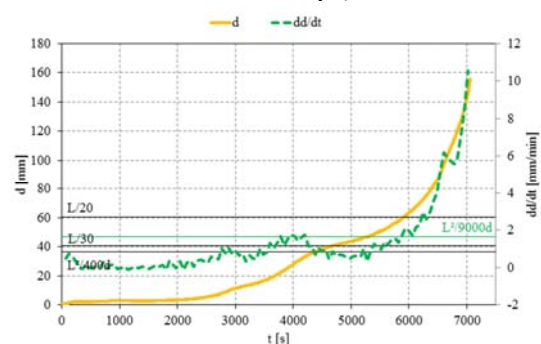


Gráfico V.390 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo,

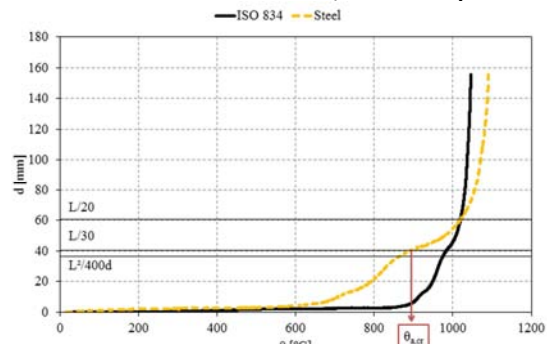


Gráfico V.391 – Deslocamento versus temperatura,

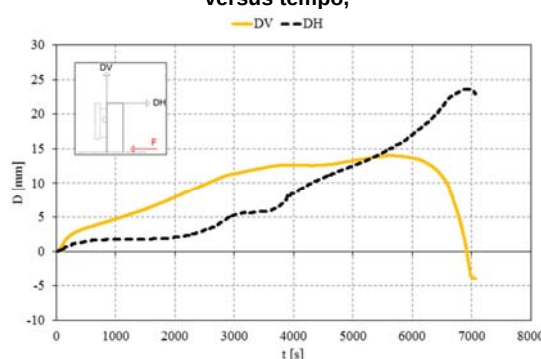


Gráfico V.392 – Deslocamento da extremidade, versus tempo,

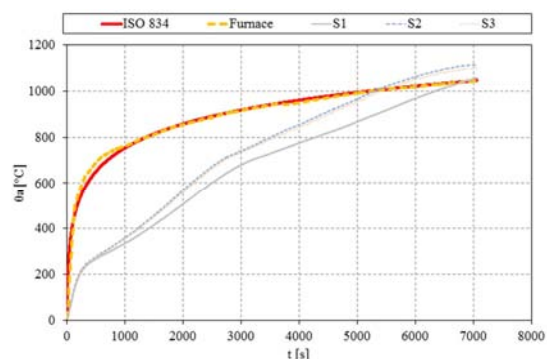


Gráfico V.393 – Temperatura média nas secções, versus tempo,

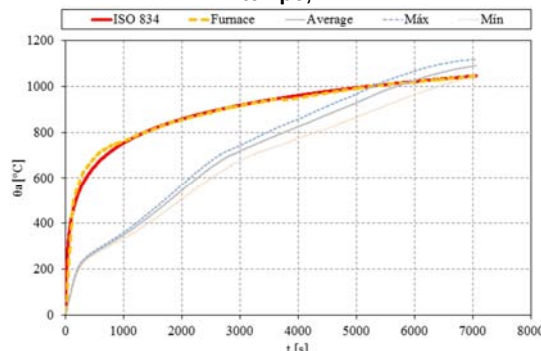


Gráfico V.7 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

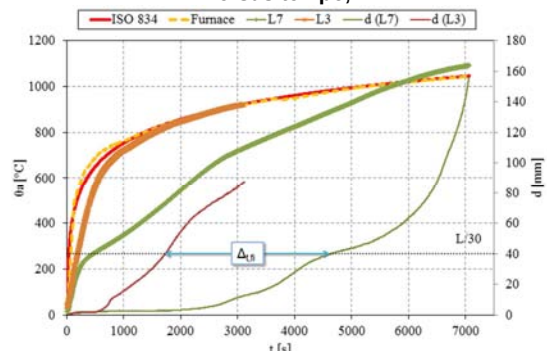


Gráfico V.7 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:

Figura V.221 – Deformação imposta ao elemento no final do ensaio.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogênea da camada intumescente, registando-se depois uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por encurvadura lateral.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
$L^2/9000d$	$L^2/400d$	L/30	L/20	77	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
3780	4390	4655	5914		893,25	29%	7%

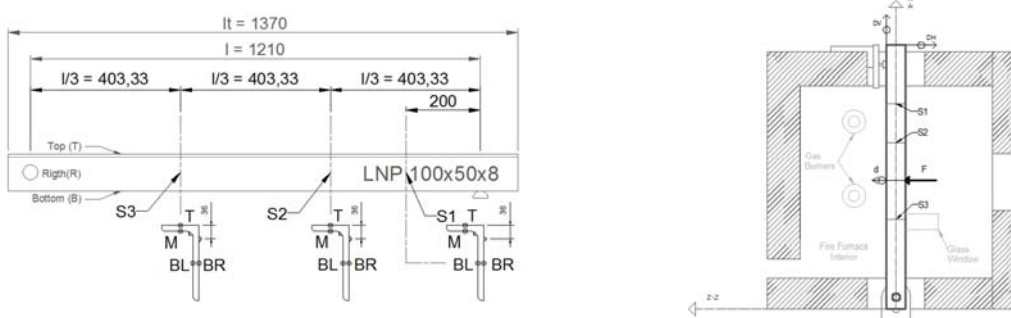
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: L8
Data: 09 \ 09 \ 2010
Tipo de secção: LNP 100x50x8
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 9830 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: Tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,053 [mm]
Duração do ensaio: 75 [min]
Temperatura máxima registada: 971,11 [°C]

Descrição do ensaio:

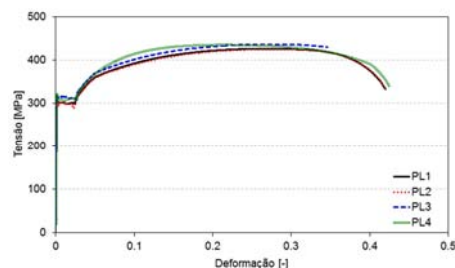
Ensaio de resistência ao fogo de elemento LNP 100x50x8, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (L4), tem uma resistência ao fogo de 21 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



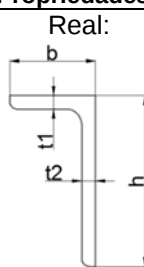
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provette nº	E [GPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
PL1	203,501	300,504	304,816	297,956	425,958	41,966
PL2	205,994	295,506	306,287	286,683	424,389	42,098
PL3	211,965	313,636	311,873	306,287	436,145	34,574
PL4	210,707	307,451	321,910	308,738	434,824	42,462
Média	208,042	304,274	311,222	299,916	430,329	40,275
Desv. Padrão	3,439	6,871	6,709	8,623	5,206	3,297

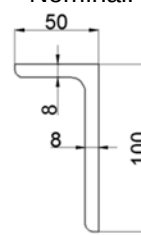


Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)			
	h	b	t1	t2
1	99,70	50,70	8,20	8,30
2	99,60	50,90	8,30	8,80
3	99,60	51,00	8,30	8,50
4	99,80	50,90	8,30	9,00
Média	99,68	50,88	8,28	8,65
Desv pad	0,10	0,13	0,05	0,31
Máx	99,80	51,00	8,30	9,00
Mín	99,60	50,70	8,20	8,30
Média	99,68	50,88	8,46	
Desv pad t	0,10	0,13	0,29	
Máx t	99,80	51,00	9,00	
Mín t	99,60	50,70	8,20	

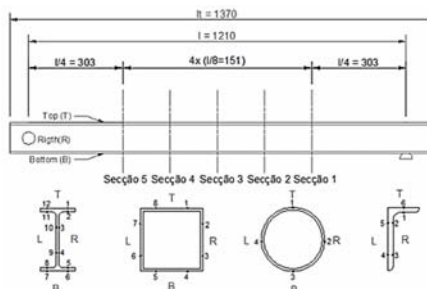


Nominal:



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1234	1119	1033	1318	1159	1172,60	108,92	1318	1033
2	1084	949	1066	1088	925	1022,40	78,86	1088	925
3	982	928	946	1017	995	973,60	36,24	1017	928
4	1161	983	943	1011	898	999,20	99,98	1161	898
5	1182	1088	960	1101	959	1058,00	96,86	1182	959
6	999	1074	968	1250	1155	1089,20	115,37	1250	968
Média	553,50	511,75	493,00	565,42	507,58	1052,50			
Desv pad	102,46	80,18	51,10	125,92	114,60		107,83		
Máx	1234	1119	1066	1318	1159			1318	
Mín	982	928	943	1011	898				898



Resultados:

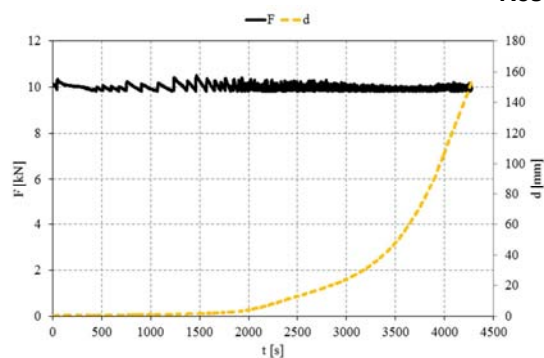


Gráfico V.394 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo,

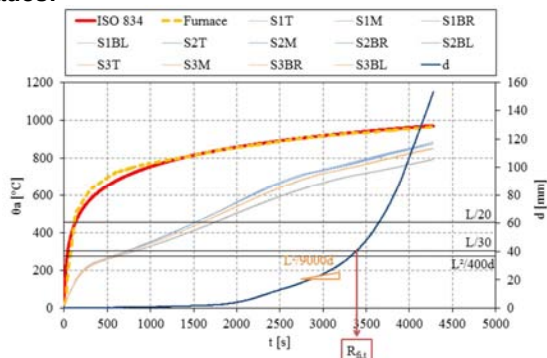


Gráfico V.395 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

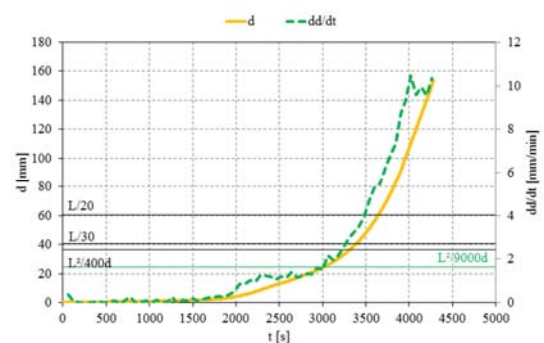


Gráfico V.396 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo,

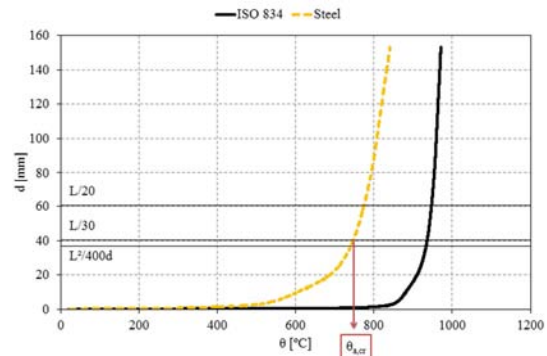


Gráfico V.397 – Deslocamento versus temperatura,

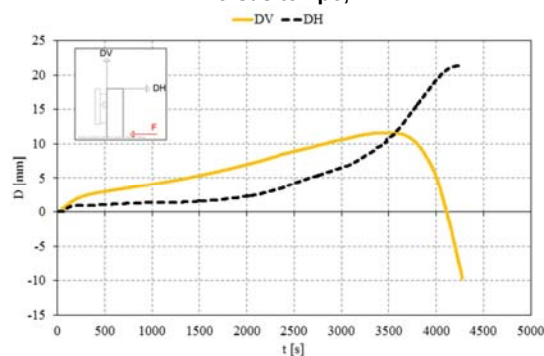


Gráfico V.398 – Deslocamento da extremidade, versus tempo,

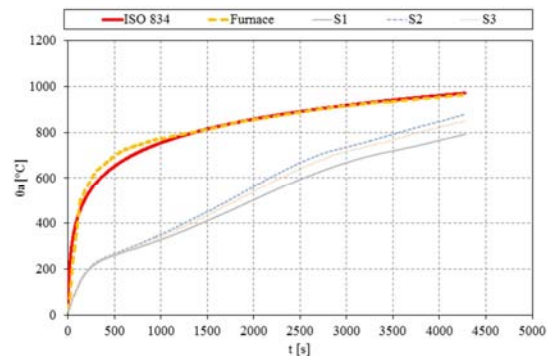


Gráfico V.399 – Temperatura média nas secções, versus tempo,

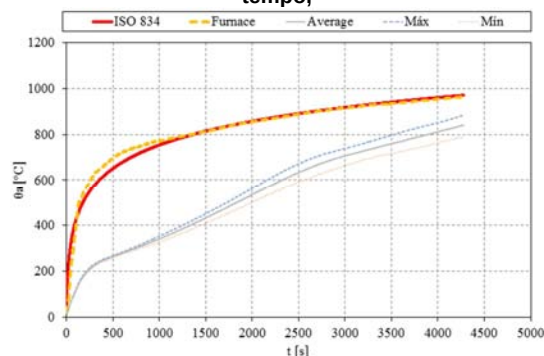


Gráfico V.7 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

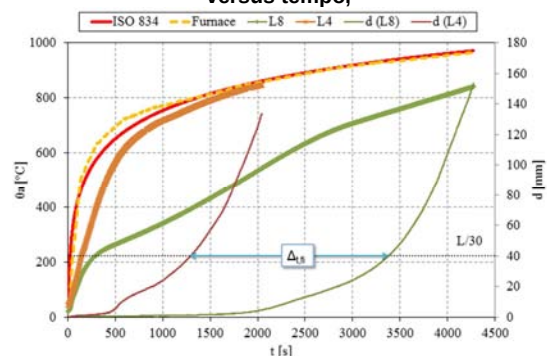


Gráfico V.7 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:

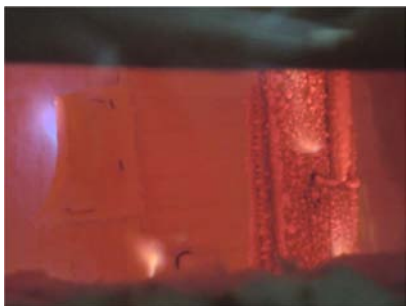


Figura V.222 – Início da reacção da tinta intumescente.



Figura V.223 – Formação da camada protectora.



Figura V.224 – Final do ensaio.



Figura V.225 – Pormenor da zona de instabilização lateral no elemento.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogénea da camada intumescente, registando-se depois uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por encurvadura lateral.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	56	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
3011	3316	3382	3646		747,38	48%	17%

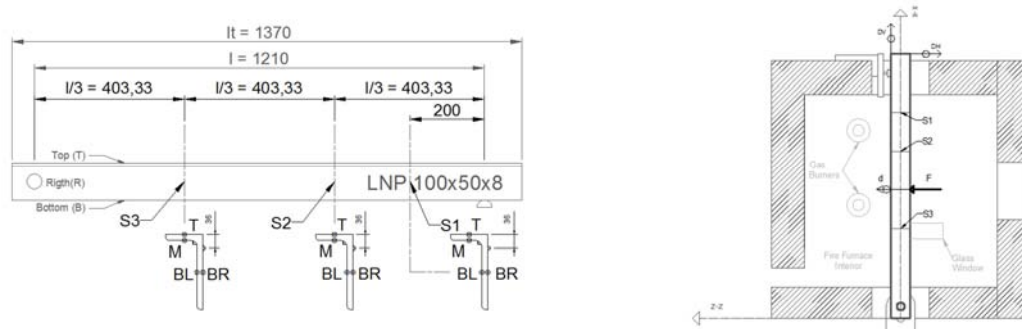
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: L9
Data: 08 \ 09 \ 2010
Tipo de secção: LNP 100x50x8
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 9830 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: Tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,063 [mm]
Duração do ensaio: 71 [min]
Temperatura máxima registada: 984,87 [°C]

Descrição do ensaio:

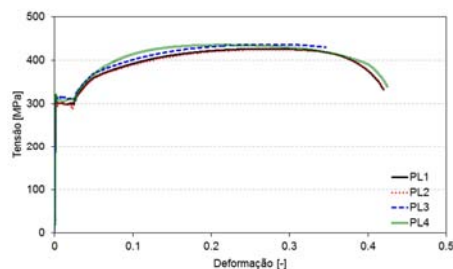
Ensaio de resistência ao fogo de elemento LNP 100x50x8, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=50\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=584,67^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (L4), tem uma resistência ao fogo de 21 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

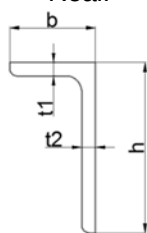
Proveite nº	E [GPa]	R _{p,0.2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PL1	203,501	300,504	304,816	297,956	425,958	41,966
PL2	205,994	295,506	306,287	286,683	424,389	42,098
PL3	211,965	313,636	311,873	306,287	436,145	34,574
PL4	210,707	307,451	321,910	308,738	434,824	42,462
Média	208,042	304,274	311,222	299,916	430,329	40,275
Desv. Padrão	3,439	6,871	6,709	8,623	5,206	3,297



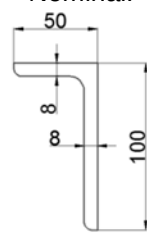
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)			
	h	b	t1	t2
1	99,70	50,70	8,20	8,30
2	99,60	50,90	8,30	8,80
3	99,60	51,00	8,30	8,50
4	99,80	50,90	8,30	9,00
Média	99,68	50,88	8,28	8,65
Desv pad	0,10	0,13	0,05	0,31
Máx	99,80	51,00	8,30	9,00
Mín	99,60	50,70	8,20	8,30
Média	99,68	50,88	8,46	
Desv pad t	0,10	0,13	0,29	
Máx t	99,80	51,00	9,00	
Mín t	99,60	50,70	8,20	

Real:

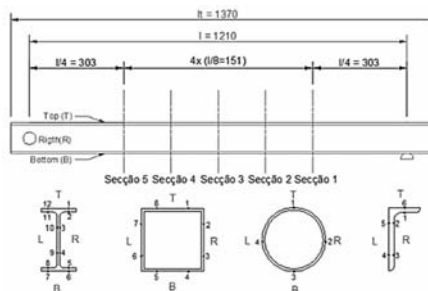


Nominal:



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1267	1165	1176	1271	1046	1185,00	92,09	1271	1046
2	1036	946	1125	1063	882	1010,40	96,42	1125	882
3	1089	1070	1079	1029	1042	1061,80	25,35	1089	1029
4	1075	1163	934	989	825	997,20	129,67	1163	825
5	1123	1070	1052	1024	1118	1077,40	42,66	1123	1024
6	981	1086	1029	1091	1034	1044,20	45,46	1091	981
Média	547,58	541,67	532,92	538,92	495,58	1062,67			
Desv pad	97,24	80,30	83,35	100,88	112,29		96,35		
Máx	1267	1165	1176	1271	1118			1271	
Mín	981	946	934	989	825				825



Resultados:

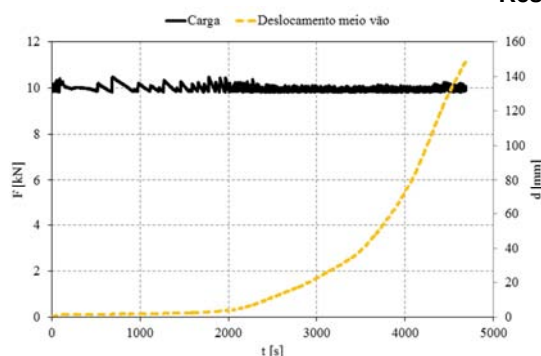


Gráfico V.400 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo,

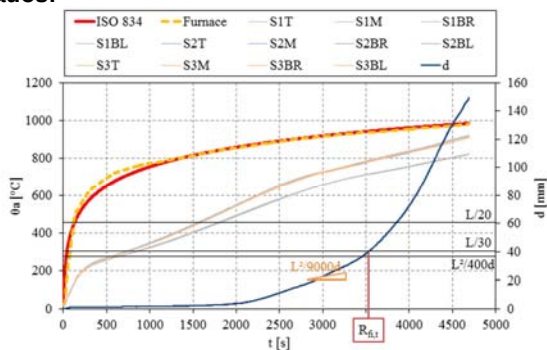


Gráfico V.401 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

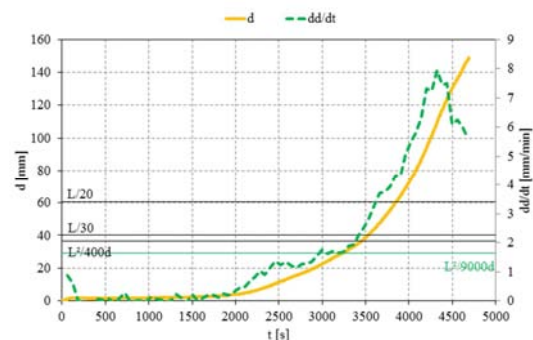


Gráfico V.402 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo,

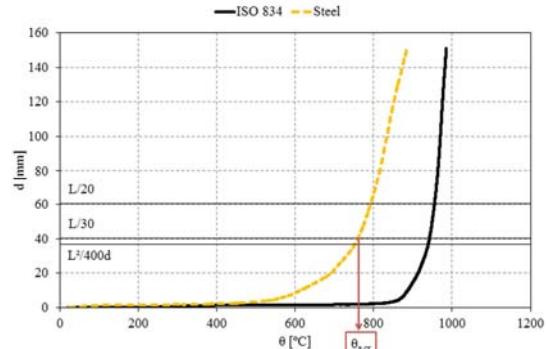


Gráfico V.403 – Deslocamento versus temperatura,

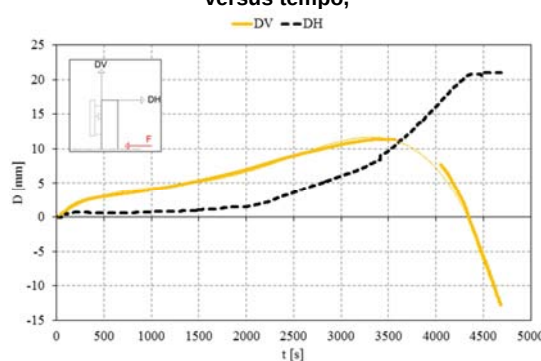


Gráfico V.404 – Deslocamento da extremidade, versus tempo,

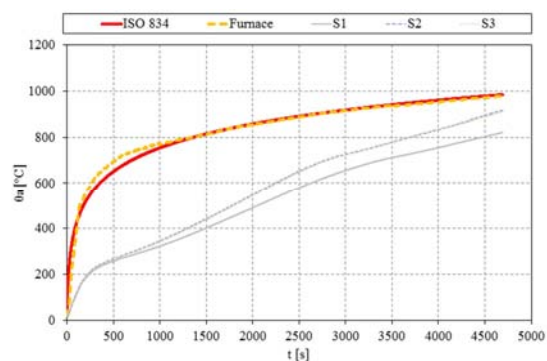


Gráfico V.405 – Temperatura média nas secções, versus tempo,

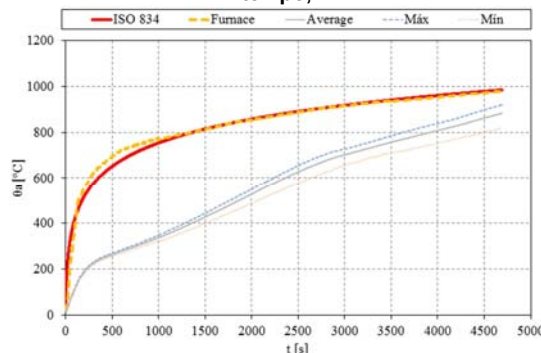


Gráfico V.7 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

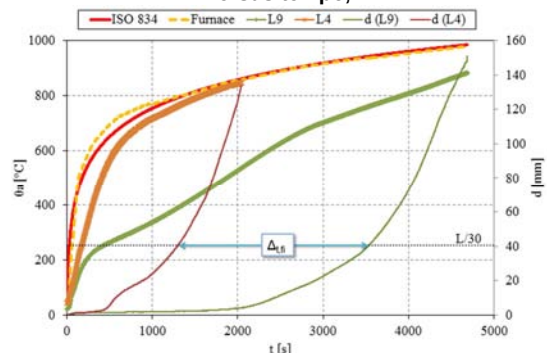


Gráfico V.7 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.226 – Início da formação da camada intumescente.

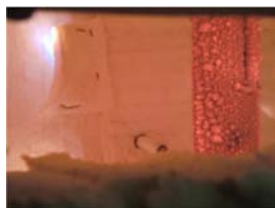


Figura V.227 – Instante do ensaio.

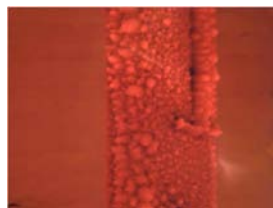


Figura V.228 – Camada intumescente já completamente formada.

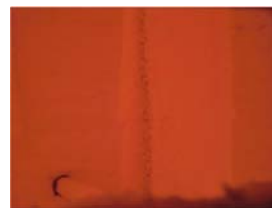


Figura V.229 – Final do ensaio.



Figura V.230 – Final do ensaio, com o elemento envolvido pela camada intumescente.



Figura V.231 – Deformação implantada ao elemento, depois da sua ruptura.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogênea da camada intumescente, registando-se depois uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por encurvadura lateral.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
$L^2/9000d$	$L^2/400d$	L/30	L/20	58	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
3061	3456	3533	3850		760,49	48%	16%

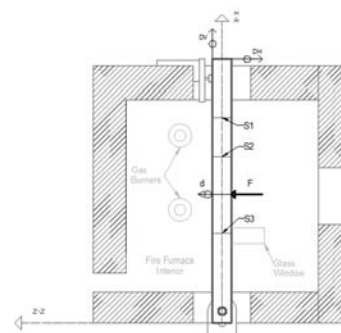
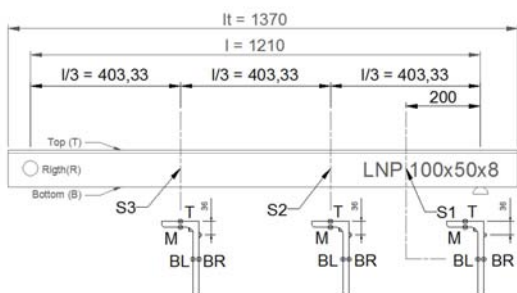
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: L10
Data: 07 \ 09 \ 2010
Tipo de secção: LNP 100x50x8
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 13610 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: Tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,135 [mm]
Duração do ensaio: 71 [min]
Temperatura máxima registada: 984,87 [°C]

Descrição do ensaio:

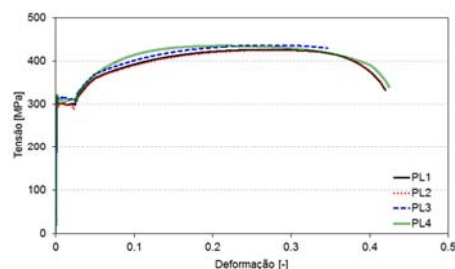
Ensaio de resistência ao fogo de elemento LNP 100x50x8, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=70\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=525,78^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (L5), tem uma resistência ao fogo de 20 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



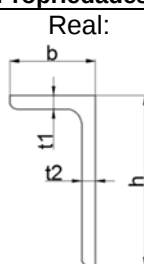
Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

Provette nº	E [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eL} [MPa]	R_m [MPa]	A_t [%]
PL1	203,501	300,504	304,816	297,956	425,958	41,966
PL2	205,994	295,506	306,287	286,683	424,389	42,098
PL3	211,965	313,636	311,873	306,287	436,145	34,574
PL4	210,707	307,451	321,910	308,738	434,824	42,462
Média	208,042	304,274	311,222	299,916	430,329	40,275
Desv. Padrão	3,439	6,871	6,709	8,623	5,206	3,297

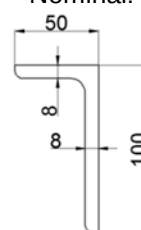


Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)			
	h	b	t1	t2
1	99,70	50,70	8,20	8,30
2	99,60	50,90	8,30	8,80
3	99,60	51,00	8,30	8,50
4	99,80	50,90	8,30	9,00
Média	99,68	50,88	8,28	8,65
Desv pad	0,10	0,13	0,05	0,31
Máx	99,80	51,00	8,30	9,00
Mín	99,60	50,70	8,20	8,30
Média	99,68	50,88	8,46	
Desv pad t	0,10	0,13	0,29	
Máx t	99,80	51,00	9,00	
Mín t	99,60	50,70	8,20	

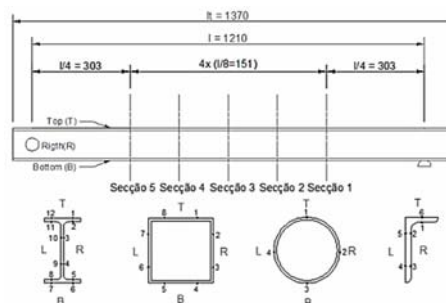


Nominal:



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1338	1336	1300	1420	1270	1332,80	56,26	1420	1270
2	1033	1022	966	1127	1066	1042,80	59,28	1127	966
3	1060	1126	1058	1137	1129	1102,00	39,47	1137	1058
4	1147	1094	1131	1053	882	1061,40	106,64	1147	882
5	1234	1209	1147	1193	1063	1169,20	67,31	1234	1063
6	1189	1166	1026	1053	1063	1099,40	73,02	1189	1026
Média	583,42	579,42	552,33	581,92	539,42	1134,60			
Desv pad	113,15	107,67	116,82	136,47	125,28		117,55		
Máx	1338	1336	1300	1420	1270			1420	
Mín	1033	1022	966	1053	882				882



Resultados:

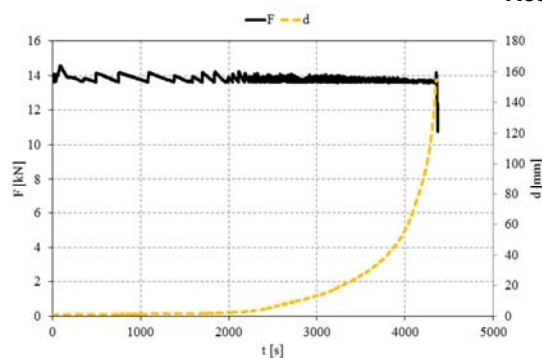


Gráfico V.406 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo,

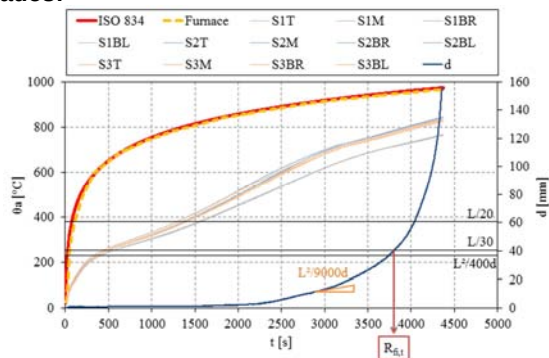


Gráfico V.407 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

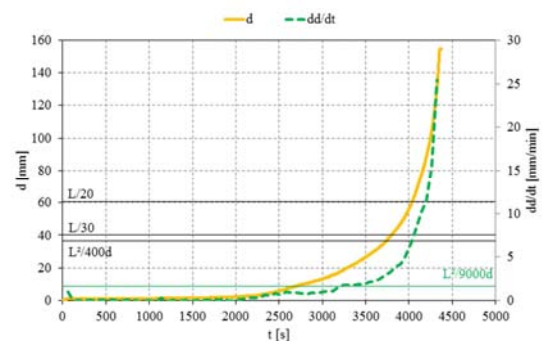


Gráfico V.408 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo,

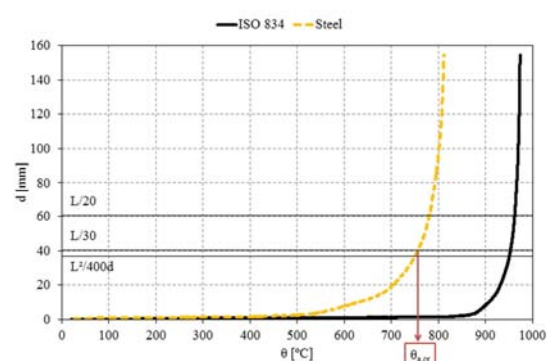


Gráfico V.409 – Deslocamento versus temperatura,

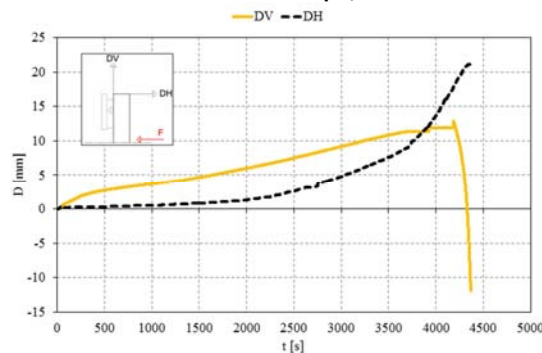


Gráfico V.410 – Deslocamento da extremidade, versus tempo,

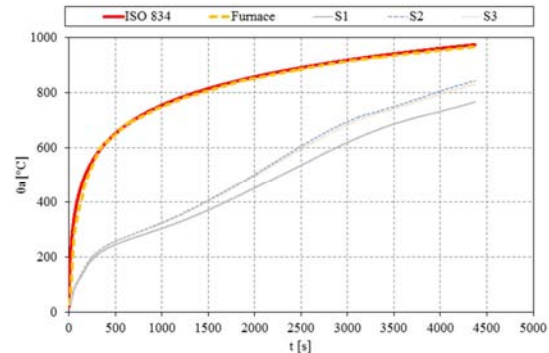


Gráfico V.411 – Temperatura média nas secções, versus tempo,

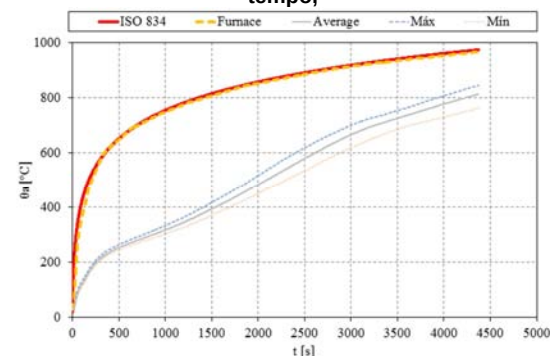


Gráfico V.7 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

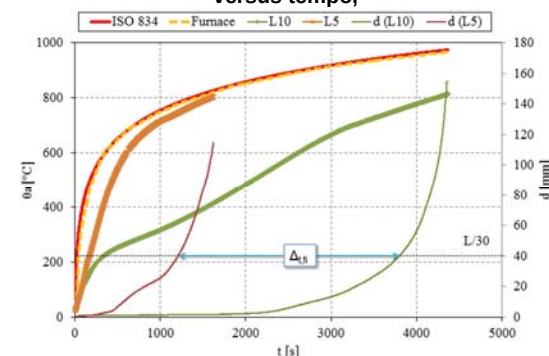


Gráfico V.7 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.232 – Início da reacção da tinta intumescente.



Figura V.233 – Camada intumescente formada.



Figura V.234 – Final do ensaio, ainda com os queimadores do forno de resistência ligados.



Figura V.235 – Zona onde ocorreu o fenómeno de encurvadura lateral, depois da ruptura do elemento.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogénea da camada intumescente, registando-se depois uma rápida evolução do deslocamento a meio vão, onde o elemento atingiu o colapso por encurvadura lateral.

Resistência do elemento:

Instante tempo [s]				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	63	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
3210	3739	3801	4036		756,97	64%	16%

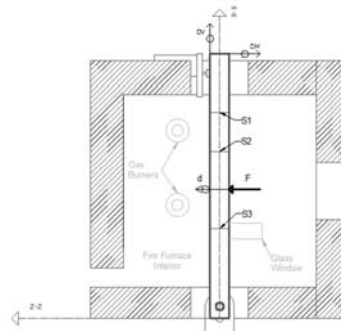
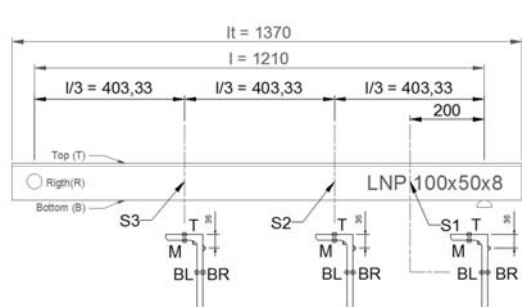
Tipo de ensaio: Ensaio de resistência ao fogo em perfil metálico com protecção
Nome do teste: L11
Data: 07 \ 09 \ 2010
Tipo de secção: LNP 100x50x8
Tipo de aço: S275
Força aplicada: 13610 [N]
Instrumentação: Deslocamentos: LVDT, fio potenciométrico; Temperaturas: termopares (fio tipo K)

Curva de fogo utilizada: Padrão (ISO 834)
Tipo de protecção: Tinta intumescente
Espessura de protecção: 1,135 [mm]
Duração do ensaio: 51 [min]
Temperatura máxima registada: 903,5 [°C]

Descrição do ensaio:

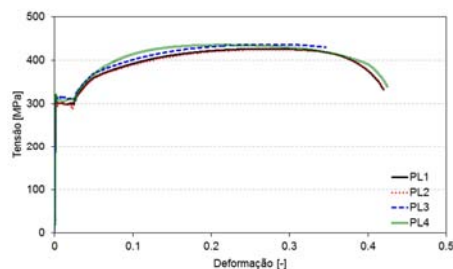
Ensaio de resistência ao fogo de elemento LNP 100x50x8, com aplicação de 1000 (µm) de tinta intumescente. A carga aplicada induz ao elemento um grau de utilização nominal de $\mu_0=70\%$ segundo EN1993-1-2, o equivalente a uma temperatura crítica nominal de $\theta_{a,cr}=525,78^\circ\text{C}$. Um elemento de igual secção transversal, sem protecção (L5), tem uma resistência ao fogo de 20 minutos.

Esquema de ensaio, com instrumentação: (EN 1363-1)



Propriedades do material: (NP EN 10002-1)

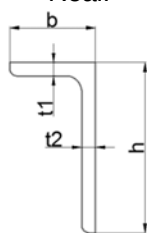
Provete n°	E [GPa]	R _{p,0.2} [MPa]	R _{eH} [MPa]	R _{eL} [MPa]	R _m [MPa]	A _t [%]
PL1	203,501	300,504	304,816	297,956	425,958	41,966
PL2	205,994	295,506	306,287	286,683	424,389	42,098
PL3	211,965	313,636	311,873	306,287	436,145	34,574
PL4	210,707	307,451	321,910	308,738	434,824	42,462
Média	208,042	304,274	311,222	299,916	430,329	40,275
Desv. Padrão	3,439	6,871	6,709	8,623	5,206	3,297



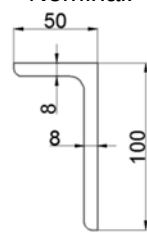
Propriedades da secção:

Leitura	Medidas em (mm)			
	h	b	t1	t2
1	99,70	50,70	8,20	8,30
2	99,60	50,90	8,30	8,80
3	99,60	51,00	8,30	8,50
4	99,80	50,90	8,30	9,00
Média	99,68	50,88	8,28	8,65
Desv pad	0,10	0,13	0,05	0,31
Máx	99,80	51,00	8,30	9,00
Mín	99,60	50,70	8,20	8,30
Média	99,68	50,88	8,46	
Desv pad t	0,10	0,13	0,29	
Máx t	99,80	51,00	9,00	
Mín t	99,60	50,70	8,20	

Real:

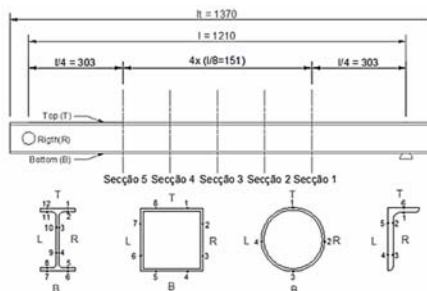


Nominal:



Propriedades da protecção [µm]: (prEN 13381)

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Desv Pad	Máx	Mín
1	1200	1163	1229	1377	1260	1245,80	81,63	1377	1163
2	1141	1007	974	1152	1088	1072,40	79,44	1152	974
3	1004	982	990	1133	953	1012,40	69,94	1133	953
4	1047	1000	1006	1031	1028	1022,40	19,24	1047	1000
5	1112	1182	1122	1266	1324	1201,20	92,03	1324	1112
6	1217	1127	1096	1137	1057	1126,80	59,29	1217	1057
Média	560,08	538,42	534,75	591,33	559,17	1113,50			
Desv pad	83,78	90,30	98,36	121,00	143,21		109,67		
Máx	1217	1182	1229	1377	1324			1377	
Mín	1004	982	974	1031	953				953



Resultados:

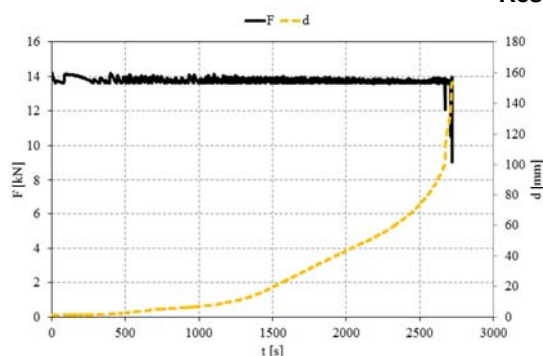


Gráfico V.412 – Força e deslocamento a meio vão, versus tempo,

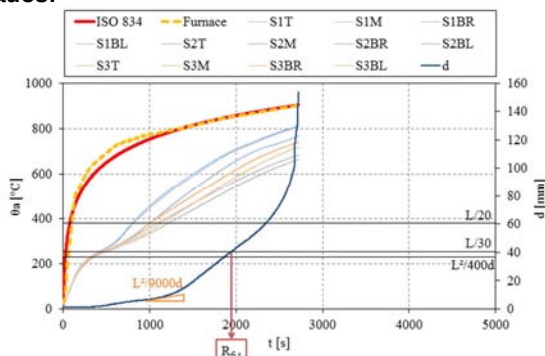


Gráfico V.413 – Temperatura na secção e deslocamento a meio vão, versus tempo

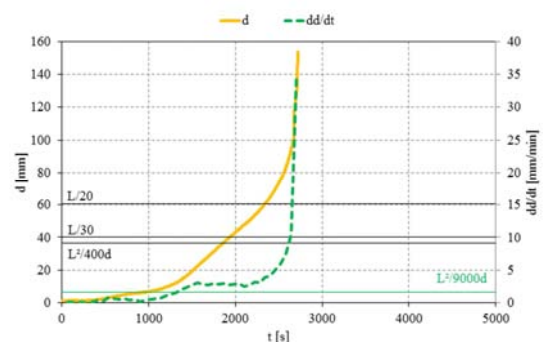


Gráfico V.414 – Deslocamento e taxa de deslocamento, versus tempo,

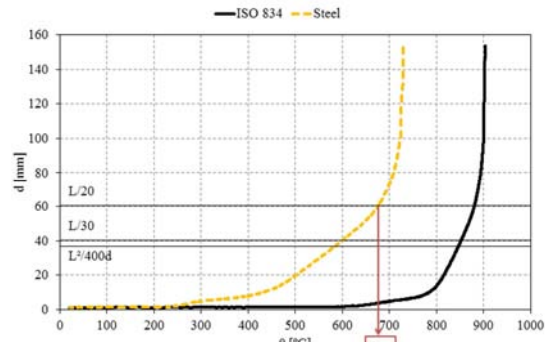


Gráfico V.415 – Deslocamento versus temperatura,

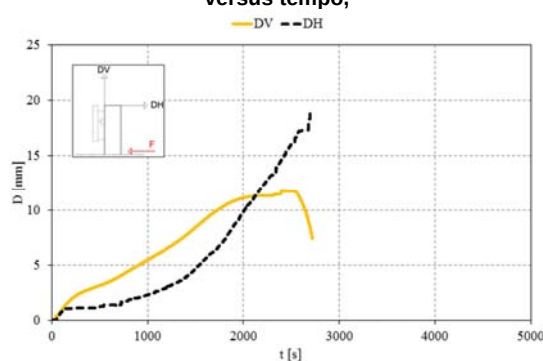


Gráfico V.416 – Deslocamento da extremidade, versus tempo,

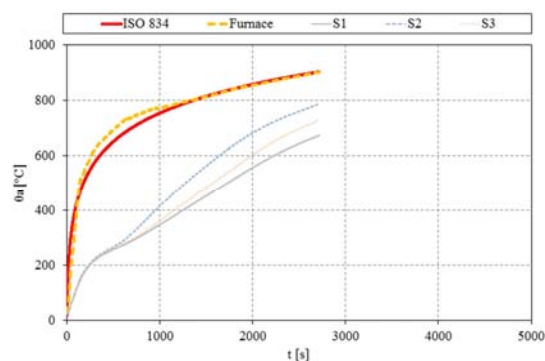


Gráfico V.417 – Temperatura média nas secções, versus tempo,

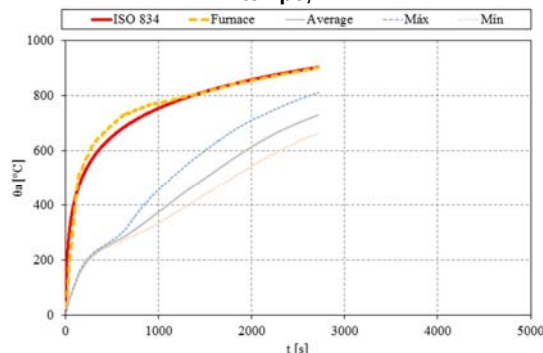


Gráfico V.7 – Temperatura média no elemento, versus tempo.

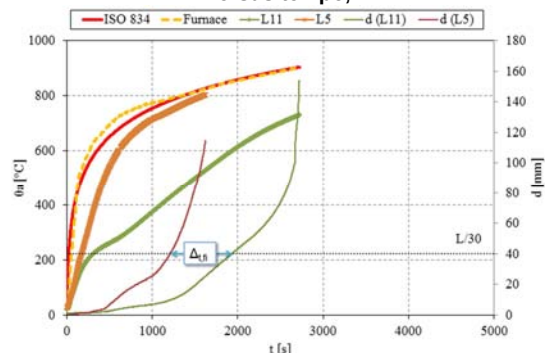


Gráfico V.7 – Comparação com um elemento da mesma secção transversal sem protecção.

Registos fotográficos:



Figura V.236 – Início da retracção da camada intumescente.

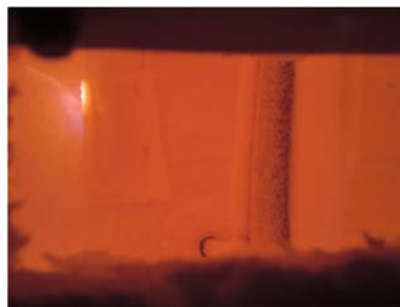


Figura V.237 – Aço exposto a elevadas temperaturas.



Figura V.238 – Final do ensaio, ainda com os queimadores ligados.



Figura V.239 – Zona de desprendimento da camada intumescente.



Figura V.240 – Zona do elemento que ficou exposta pela retracção da tinta.



Figura V.241 – Pormenor da zona de retracção da camada intumescente.

Comentários:

Durante o ensaio observou-se uma evolução homogénea da camada intumescente. Contudo observou-se um fenómeno de retracção da camada intumescente, no banzo maior da secção transversal, levando assim o aço a perder as suas capacidades resistentes quando o mesmo foi exposto às elevadas temperaturas no interior do forno. O elemento atingiu assim a sua ruptura por encurvadura lateral.

Instante tempo [s]				Resistência do elemento:			
				Resistência ao fogo [min]	Temperatura Crítica [°C]	Grau de utilização real	
L ² /9000d	L ² /400d	L/30	L/20	32	Média do perfil	Propriedades reais	Temperatura crítica de ensaio
1332	1856	1937	2339		600,68	64%	45%