

## **Relatório**

### **Ensaios realizados de vigas à flexão**

No âmbito de:

Projecto de investigação PTDC/EME-PME/64913/2006

Estudo experimental do comportamento de elementos em aço protegidos com tintas intumescentes em condições de incêndio

**Coordenação Científica:** Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Outubro de 2010

Sérgio Roque

N.º16344



## 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 terceira parte deste projecto foi concluída com a realização de um conjunto de ensaios experimentais sobre o comportamento de vários tipos de secções metálicas, protegias com tinta intumescente sob acção do fogo.

A motivação desta investigação está relacionada com a necessidade de definir e conhecer o comportamento da protecção passiva de tinta intumescente,

Foram realizados 52 ensaios em perfis metálicos de diferentes secções (IPE, SHS, CHS e LNP). A cada série de 13 ensaios corresponde uma secção diferente. Em cada série foram realizados 2 ensaios à temperatura ambiente (acção mecânica incremental) e 11 ensaios sob acção do fogo (domínio do tempo / temperatura, acção mecânica constante). Destes últimos, 3 ensaios foram realizados sem qualquer protecção ao fogo, utilizando um grau de utilização de 30%, 50% e 70%. Os restantes 8 ensaios foram realizados com protecção passiva de tinta intumescente. Foram definidos dois ensaios para cada grau de utilização, com 1 [mm] de protecção e dois ensaios para um grau de utilização de 50% e 2 [mm] de protecção.

Os resultados experimentais permitiram concluir que

## Abstract

Development of simplified fire design calculation method for reactive protections on steel structures.

Understand the protection caused by the intumescent paint on steel structures under fire conditions.

Our research will provide essential data to the calibration / validation of new simplified design methods and advanced numerical methods.





## Índice

Índice de figuras.....	10
Índice de gráficos.....	15
Índice de Tabelas.....	39
Simbologia .....	42
Letras maiúsculas do alfabeto latino .....	42
Letras minúsculas do alfabeto latino .....	42
Letras minúsculas do alfabeto grego.....	42
1. Introdução.....	43
1.1. Objectivos.....	43
1.2. Resumo dos capítulos. ....	44
2. Revisão do estado da arte.....	45
2.1. Ensaios realizados por outros investigadores.....	45
3. Programa de ensaios.....	46
3.1. Enquadramento normativo.....	48
4. Caracterização das propriedades dos materiais.....	49
4.1. Aço. ....	49
4.2. Tinta.....	54
5. Ensaios de resistência à flexão. ....	56
5.1. Aquisição de Dados.....	60
5.2. À temperatura ambiente. ....	61
5.3. Em condições de incêndio .....	64
5.4. Procedimento de ensaio .....	69
5.5. Critério para determinação de resistência ao fogo. ....	76
6. Resultados experimentais. ....	78

6.1. À temperatura ambiente.....	78
6.1.1. Ensaio I1.....	78
6.1.2. Ensaio I2.....	82
6.1.3. Ensaio S1.....	86
6.1.4. Ensaio S2.....	89
6.1.5. Ensaio C1.....	93
6.1.6. Ensaio C2.....	97
6.1.7. Ensaio L1.....	102
6.1.8. Ensaio L2.....	106
6.2. Ao fogo sem protecção.....	110
6.2.1. Ensaio I3 ( $\mu=30\%$ ).....	110
6.2.2. Ensaio I4 ( $\mu=50\%$ ).....	116
6.2.3. Ensaio I5 ( $\mu=70\%$ ).....	121
6.2.4. Ensaio S3 ( $\mu=30\%$ ).....	125
6.2.5. Ensaio S4 ( $\mu=50\%$ ).....	130
6.2.6. Ensaio S5 ( $\mu=70\%$ ).....	135
6.2.7. Ensaio C3 ( $\mu=30\%$ ).....	139
6.2.8. Ensaio C4 ( $\mu=50\%$ ).....	144
6.2.9. Ensaio C5 ( $\mu=70\%$ ).....	149
6.2.10. Ensaio L3 ( $\mu=30\%$ ).....	154
6.2.11. Ensaio L4 ( $\mu=50\%$ ).....	159
6.2.12. Ensaio L5 ( $\mu=70\%$ ).....	164
6.3. Ao fogo com protecção.....	170
6.3.1. Ensaio I6 ( $\mu=30\%$ , protecção a 1 [mm]).....	170
6.3.2. Ensaio I7 ( $\mu=30\%$ , protecção a 1 [mm]).....	177
6.3.3. Ensaio I8 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm]).....	183

6.3.4.	Ensaio I9 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm]).....	188
6.3.5.	Ensaio I10 ( $\mu=70\%$ , protecção a 1 [mm]).....	193
6.3.6.	Ensaio I11 ( $\mu=70\%$ , protecção a 1 [mm]).....	198
6.3.7.	Ensaio I12 ( $\mu=50\%$ , protecção a 2 [mm]).....	203
6.3.8.	Ensaio I13 ( $\mu=50\%$ , protecção a 2 [mm]).....	209
6.3.9.	Ensaio S6 ( $\mu=30\%$ , protecção a 1 [mm]).....	214
6.3.10.	Ensaio S7 ( $\mu=30\%$ , protecção a 1 [mm]) .....	220
6.3.11.	Ensaio S8 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm]) .....	226
6.3.12.	Ensaio S9 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm]) .....	232
6.3.13.	Ensaio S10 ( $\mu=70\%$ , protecção a 1 [mm]) .....	238
6.3.14.	Ensaio S11 ( $\mu=70\%$ , protecção a 1 [mm]) .....	243
6.3.15.	Ensaio S12 ( $\mu=50\%$ , protecção a 2 [mm]) .....	249
6.3.16.	Ensaio S13 ( $\mu=50\%$ , protecção a 2 [mm]) .....	255
6.3.17.	Ensaio C6 ( $\mu=30\%$ , protecção a 1 [mm]) .....	261
6.3.18.	Ensaio C7 ( $\mu=30\%$ , protecção a 1 [mm]) .....	267
6.3.19.	Ensaio C8 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm]) .....	273
6.3.20.	Ensaio C9 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm]) .....	279
6.3.21.	Ensaio C10 ( $\mu=70\%$ , protecção a 1 [mm]) .....	285
6.3.22.	Ensaio C11 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm]) .....	290
6.3.23.	Ensaio C12 ( $\mu=50\%$ , protecção a 2 [mm]) .....	296
6.3.24.	Ensaio C13 ( $\mu=50\%$ , protecção a 2 [mm]) .....	303
6.3.25.	Ensaio L6 ( $\mu=30\%$ , protecção a 1 [mm]).....	309
6.3.26.	Ensaio L7 ( $\mu=30\%$ , protecção a 1 [mm]).....	315
6.3.27.	Ensaio L8 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm]).....	320
6.3.28.	Ensaio L9 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm]).....	325
6.3.29.	Ensaio L10 ( $\mu=70\%$ , protecção a 1 [mm]).....	331

6.3.30.	Ensaio L11 ( $\mu=70\%$ , protecção a 1 [mm]) .....	336
6.3.31.	Ensaio L12 ( $\mu=50\%$ , protecção a 2 [mm]) .....	342
6.3.32.	Ensaio L13 ( $\mu=50\%$ , protecção a 2 [mm]) .....	342
7.	Comparação de resultados.....	342
7.1.	Ensaios à temperatura ambiente.....	342
7.1.1.	Secção IPE 100.....	342
7.1.1.	Secção SHS 100x100x4.....	346
7.1.1.	Secção CHS 101,6x4,05.....	348
7.1.1.	Secção LNP 100x50x8.....	351
7.2.	Ensaios em condições de incêndio; sem protecção.....	355
7.2.1.	Secção IPE 100.....	355
7.2.2.	Secção SHS 100x100x4.....	358
7.2.3.	Secção CHS 101,6x4,05.....	361
7.2.4.	Secção LNP 100x50x8.....	363
7.3.	Comparação entre ensaios a um grau de utilização de $\mu=30\%$ .....	366
7.3.1.	Secção IPE 100.....	366
7.3.2.	Secção SHS 100x10x4.....	369
7.3.3.	Secção CHS 101,6x4,05.....	371
7.3.4.	Secção LNP 100x50x8.....	374
7.4.	Comparação entre ensaios a um grau de utilização de $\mu=50\%$ .....	376
7.4.1.	Secção IPE 100.....	377
7.4.2.	Secção SHS 100x10x4.....	379
7.4.3.	Secção CHS 101,6x4,05.....	382
7.4.1.	Secção LNP 100x50x8.....	385
7.5.	Comparação entre ensaios a um grau de utilização de $\mu=70\%$ .....	388
7.5.1.	Secção IPE 100.....	388

7.5.2. Secção SHS 100x10x4. ....	390
7.5.3. Secção CHS 101,6x4,05. ....	393
7.5.4. Secção LNP 100x50x8. ....	396
8. Conclusão .....	399
9. Bibliografia .....	401

## Índice de figuras

Figura 1 – Provetes maquinados para ensaios à tracção. ....	49
Figura 2 – Ensaios realizados de teste à tracção dos provetes. ....	50
Figura 3 – À esquerda um elemento pintado quando o fogo se inicia, à direita quando a tinta inicia o seu processo de intumescência. ....	54
Figura 4 - Esquema de aplicação de carga, com dimensões do elemento e eixos. ....	56
Figura 5 - Apoios experimentais. (duplo à esquerda, simples à direita). ....	57
Figura 6 - Esquema experimental da aplicação da carga. ....	57
Figura 7 - Posição dos LVDT's no elemento. ....	58
Figura 8 - Esquema de leitura dos deslocamentos dos LVDT's ....	58
Figura 9 – Cilindro acoplado dos medidores de deslocamento ( $\delta$ ) e célula de carga. ....	59
Figura 10 - Corte e furação dos elementos. ....	60
Figura 11 – Esquema geral do ensaio. ....	61
Figura 12 - Posição da estação de leitura de deformações no elemento. ....	62
Figura 13 - Localização dos extensómetros nos elementos para as várias secções transversais. ....	63
Figura 14 – Elementos com extensómetros instalados. ....	64
Figura 15 - localização das secções de leitura de temperaturas no aço. ....	65
Figura 16 - Localização dos sensores de temperatura (termopares) nas diferentes secções. ....	66
Figura 17 – Elementos com sensores de temperaturas (termopares) instalados e protegidos. ....	67
Figura 18 – Fases de pintura dos elementos (pintura, controlo dimensional e acondicionamento). ....	68
Figura 19 - Localização dos pontos de controlo de espessura de tinta nas várias secções. ....	69

Figura 20 – Observação do controlo dimensional da espessura de tinta nos elementos. ....	69
Figura 21 – Leitura da imperfeição geométrica de cada elemento. ....	72
Figura 22 – Demonstração do isolamento nos apoios das extremidades.....	73
Figura 23 – Sistema pronto a iniciar um ensaio ao fogo. ....	73
Figura 24 - Durante um ensaio com todo o equipamento utilizado.....	74
Figura 25 – Representação de dois instantes referentes a dois ensaios C4 e I6. ....	74
Figura 26 – Representação do final de dois ensaios (I6 e L3) ainda com os queimadores ligados.....	75
Figura 27 – Estado limite último do ensaio I3 e do ensaio S6. ....	76
Figura 28 - Fotos da deformação sofrida no ensaio I1.....	81
Figura 29 - Fotos da deformação sofrida no ensaio I2.....	85
Figura 30 - Fotos da deformação sofrida no ensaio S1. ....	89
Figura 31 - Fotos da deformação sofrida no ensaio S2. ....	93
Figura 32 - Fotos da deformação sofrida no ensaio C1.....	97
Figura 33 - Fotos da deformação sofrida no ensaio C2. ....	102
Figura 34 - Fotos da deformação sofrida no ensaio L1.....	106
Figura 35 - Fotos da deformação sofrida no ensaio L2.....	110
Figura 36 - Fotos da evolução no ensaio I3.....	115
Figura 37 - Fotos da deformada sofrida no ensaio I4. ....	120
Figura 38 - Fotos da evolução no ensaio S3. ....	130
Figura 39 - Fotos da deformada sofrida no ensaio S4 .....	134
Figura 40 - Fotos da evolução no ensaio C3. ....	144
Figura 41 - Fotos da deformada sofrida no ensaio C4.....	148
Figura 42 – Foto da deformada sofrida no ensaio C5.....	153
Figura 43 - Fotos da evolução no ensaio L3.....	158

Figura 44 - Fotos da deformada sofrida no ensaio L3.....	159
Figura 45 - Fotos da deformada sofrida no ensaio L4.....	164
Figura 46 – Foto da deformada sofrida no ensaio L5.....	169
Figura 47 - Fotos antes do início do ensaio I6. ....	171
Figura 48 – Evolução do ensaio I6.....	175
Figura 49 – Deformada no ensaio I6.....	176
Figura 50 – Deformada sofrida no ensaio I6. ....	177
Figura 51 – Evolução do ensaio I7.....	182
Figura 52 – Deformada no ensaio I7.....	182
Figura 53 – Deformada sofrida no ensaio I8. ....	187
Figura 54 – Deformação sofrida no ensaio I9. ....	192
Figura 55 – Deformação sofrida no ensaio I10. ....	197
Figura 56 – Deformação sofrida no ensaio I11. ....	202
Figura 57 – Evolução do ensaio I12.....	208
Figura 58 – Deformada no ensaio I12.....	208
Figura 59 – Deformada sofrida no ensaio I12. ....	209
Figura 60 – Evolução do ensaio I12.....	214
Figura 61 – Evolução do ensaio S6. ....	219
Figura 62 – Deformada sofrida no ensaio S6.....	220
Figura 63 – Evolução do ensaio S7. ....	225
Figura 64 – Deformada sofrida no ensaio S7.....	226
Figura 65 – Deformada sofrida no ensaio S8.....	231
Figura 66 – Evolução do ensaio S9. ....	237
Figura 67 – Deformada sofrida no ensaio S9.....	237
Figura 68 – Deformada sofrida no ensaio S10.....	243
Figura 69 – Evolução do ensaio S11.....	248



Figura 70 – Deformada sofrida no ensaio S11. ....	249
Figura 71 – Evolução do ensaio S12. ....	254
Figura 72 – Deformada sofrida no ensaio S12. ....	255
Figura 73 – Evolução do ensaio S13. ....	257
Figura 74 – Retracção da intumescência sofrida no ensaio S13. ....	257
Figura 75 – Evolução do ensaio C6. ....	266
Figura 76 – Deformada sofrida e a retracção da camada intumescente no ensaio C6. ....	267
Figura 77 – Evolução do ensaio C7. ....	272
Figura 78 – Deformada sofrida no ensaio C7. ....	273
Figura 79 – Evolução do ensaio C8. ....	274
Figura 80 – Retracção da intumescência sofrida no ensaio C8. ....	275
Figura 81 – Evolução do ensaio C9. ....	284
Figura 82 – Deformada sofrida e retracção da camada intumescente no ensaio C9. ....	284
Figura 83 – Deformada sofrida e retracção da camada intumescente no ensaio C10. ....	290
Figura 84 – Evolução do ensaio C11. ....	295
Figura 85 – Deformada sofrida no ensaio C11. ....	296
Figura 86 – Evolução do ensaio C12. ....	302
Figura 87 – Deformada sofrida e retracção da camada intumescente no ensaio C12. ....	302
Figura 88 – Evolução do ensaio C13. ....	308
Figura 89 – Deformada sofrida e retracção da camada intumescente no ensaio C13. ....	309
Figura 90 – Evolução do ensaio L6. ....	314
Figura 91 – Deformada sofrida no ensaio L6. ....	314
Figura 92 – Deformada sofrida no ensaio L7. ....	319

Figura 93 – Evolução do ensaio L8.....	324
Figura 94 – Deformada sofrida no ensaio L8. ....	325
Figura 95 – Evolução do ensaio L9.....	330
Figura 96 – Deformada sofrida e camada de intumescência no ensaio L9.....	330
Figura 97 – Evolução do ensaio L10.....	335
Figura 98 – Deformada sofrida e camada formada de intumescência no ensaio L10. ....	336
Figura 99 – Evolução do ensaio L11.....	341
Figura 100 – Deformada sofrida no ensaio L11. ....	341
Figura 101 – Reunião dos ensaios I1 e I2.....	345
Figura 102 – Reunião dos ensaios S1 e S2.....	348
Figura 103 – Reunião dos ensaios C1 e C2.....	351
Figura 104 – Reunião dos ensaios L1 e L2.....	355
Figura 105 - Deformação sofrida nos elementos IPE ao fogo, sem protecção. ....	358
Figura 106 - Deformação sofrida nos elementos SHS ao fogo, sem protecção. ....	360
Figura 107 - Deformação sofrida nos elementos CHS ao fogo, sem protecção. ....	363
Figura 108 - Deformação sofrida nos elementos LNP ao fogo, sem protecção.....	366
Figura 109 – Reunião final de todos os elementos testados, incluindo os seus responsáveis. ....	400

## Índice de gráficos

Gráfico 1 - Curvas tensão-deformação dos provetes da secção IPE100 S275. .	50
Gráfico 2 - Curvas tensão-deformação dos provetes da secção SHS100x100x4 S235. ....	51
Gráfico 3 - Curvas tensão-deformação dos provetes da secção CHS101,6x4,06 S235. ....	52
Gráfico 4 - Curvas tensão-deformação dos provetes da secção LNP100x50x8 S275. ....	53
Gráfico 5 - Patamares de aplicação da carga no ensaio I1. ....	78
Gráfico 6 - Leitura dos LVDT's para o ensaio I1. ....	79
Gráfico 7 - leitura das deformações para o ensaio I1. ....	79
Gráfico 8 - Carga/deslocamento para o ensaio I1.....	80
Gráfico 9 - Carga/LVDT's para o ensaio I1.....	80
Gráfico 10 - Deformações/carga para o ensaio I1. ....	81
Gráfico 11 - Patamares de aplicação da carga no ensaio I2. ....	82
Gráfico 12 - Leitura dos LVDT's para o ensaio I2. ....	83
Gráfico 13 - Leitura das deformações para o ensaio I2. ....	83
Gráfico 14 - Carga/deslocamento para o ensaio I2.....	84
Gráfico 15 - Carga/LVDT's para o ensaio I2.....	84
Gráfico 16 - Deformações/carga para o ensaio I2. ....	85
Gráfico 17 - Patamares de aplicação da carga no ensaio S1. ....	86
Gráfico 18 - Leitura dos LVDT's para o ensaio S1.....	87
Gráfico 19 - Leitura das deformações para o ensaio S1.....	87
Gráfico 20 - Carga/deslocamento para o ensaio S1. ....	88
Gráfico 21 - Carga/LVDT's para o ensaio S1. ....	88

Gráfico 22 - Deformações/carga para o ensaio S1. ....	89
Gráfico 23 - Patamares de aplicação da carga no ensaio S2. ....	90
Gráfico 24 - Leitura dos LVDTs para o ensaio S2. ....	90
Gráfico 25 - Leitura das deformações para o ensaio S2. ....	91
Gráfico 26 - Carga/deslocamento para o ensaio S2. ....	91
Gráfico 27 - Carga/LVDT's para o ensaio S2. ....	92
Gráfico 28 - Deformações/carga para o ensaio S2. ....	92
Gráfico 29 - Patamares de aplicação da carga no ensaio C1. ....	93
Gráfico 30 - Leitura dos LVDT's para o ensaio C1. ....	94
Gráfico 31 - Leitura das deformações para o ensaio C1. ....	94
Gráfico 32 – Pormenor sobre as leituras das deformações para o ensaio C1. ...	95
Gráfico 33 - Carga/deslocamento para o ensaio C1. ....	95
Gráfico 34 - Carga/LVDT's para o ensaio C1. ....	96
Gráfico 35 - Deformações/carga para o ensaio C1. ....	96
Gráfico 36 – Pormenor de deformações/carga para o ensaio C1. ....	97
Gráfico 37 - Patamares de aplicação da carga no ensaio C2. ....	98
Gráfico 38 - Leitura dos LVDTs para o ensaio C2. ....	98
Gráfico 39 - Leitura das deformações para o ensaio C2. ....	99
Gráfico 40 – Pormenor de leitura das deformações para o ensaio C2. ....	99
Gráfico 41 - Carga/deslocamento para o ensaio C2. ....	100
Gráfico 42 - Carga/LVDT's para o ensaio C2. ....	100
Gráfico 43 - Deformações/carga para o ensaio C2. ....	101
Gráfico 44 – Pormenor de deformações/carga para o ensaio C2. ....	101
Gráfico 45 - Patamares de aplicação da carga no ensaio L1. ....	103
Gráfico 46 - Leitura dos LVDT's para o ensaio L1. ....	103
Gráfico 47 - Leitura das deformações para o ensaio L1. ....	104

Gráfico 48 - Carga/deslocamento para o ensaio L1.....	104
Gráfico 49 - Carga/LVDT's para o ensaio L1.....	105
Gráfico 50 - Deformações/carga para o ensaio L1. ....	105
Gráfico 51 - Patamares de aplicação da carga no ensaio L2. ....	107
Gráfico 52 - Leitura dos LVDT's para o ensaio L2. ....	107
Gráfico 53 - Leitura das deformações para o ensaio L2. ....	108
Gráfico 54 - Carga/deslocamento para o ensaio L2.....	108
Gráfico 55 - Carga/LVDT's para o ensaio L2.....	109
Gráfico 56 - Deformações/carga para o ensaio L2. ....	109
Gráfico 57 - Registo da intensidade da carga ao longo do tempo no ensaio I3.	111
Gráfico 58 - Registo da carga e deslocamento a meio vão, assim que ligada a curva de incêndio, para o ensaio I3. ....	112
Gráfico 59 - Registo da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio I3.....	112
Gráfico 60 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I3.....	113
Gráfico 61 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I3. ....	113
Gráfico 62 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I3. ....	114
Gráfico 63 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I3.....	114
Gráfico 64 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I3. ....	115
Gráfico 65 - Registo da intensidade da carga ao longo do tempo no ensaio I4.	116
Gráfico 66 - Registo da carga e deslocamento a meio vão, assim que ligada a curva de incêndio, para o ensaio I4. ....	117
Gráfico 67 - Registo da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio I4.....	117
Gráfico 68 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I4.....	118

Gráfico 69 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I4. ....	118
Gráfico 70 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I4.....	119
Gráfico 71 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I4. ....	119
Gráfico 72 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I4. ....	120
Gráfico 73 - Registo da intensidade da carga ao longo do tempo no ensaio I4.	121
Gráfico 74 - Registo da carga e deslocamento a meio vão ao longo do tempo após o início de incêndio para o ensaio I5. ....	122
Gráfico 75 - Registo da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio I5. ....	122
Gráfico 76 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I5. ....	123
Gráfico 77 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I5. ....	123
Gráfico 78 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I5.....	124
Gráfico 79 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I5. ....	124
Gráfico 80 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I5. ....	125
Gráfico 81 - Registo da intensidade da carga ao longo do tempo no ensaio S3. ....	126
Gráfico 82 - Registo da carga e deslocamento a meio vão ao longo do tempo após o início de incêndio para o ensaio S3.....	126
Gráfico 83 - Registo da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio S3.....	127
Gráfico 84 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S3.....	127
Gráfico 85 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S3. ....	128
Gráfico 86 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S3. ....	128

Gráfico 87 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S3. ....	129
Gráfico 88 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S3.....	129
Gráfico 89 - Registo da carga e deslocamento a meio vão ao longo do tempo após o início de incêndio para o ensaio S4. ....	131
Gráfico 90 - Registo da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio S4. ....	131
Gráfico 91 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S4. ....	132
Gráfico 92 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S4.....	132
Gráfico 93 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S4. ....	133
Gráfico 94 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S4. ....	133
Gráfico 95 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S4.....	134
Gráfico 96 - Registo da carga e deslocamento a meio vão ao longo do tempo após o início de incêndio para o ensaio S5. ....	135
Gráfico 97 - Registo da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio S5. ....	136
Gráfico 98 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S5. ....	137
Gráfico 99 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S5.....	137
Gráfico 100 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S5. ....	138
Gráfico 101 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S5.....	138
Gráfico 102 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S5.....	139
Gráfico 103 - Registo da intensidade da carga ao longo do tempo no ensaio C3. ....	140

Gráfico 104 - Registo da carga e deslocamento a meio vão ao longo do tempo após o início de incêndio para o ensaio C3.....	140
Gráfico 105 - Registo da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio C3.....	141
Gráfico 106 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C3. ....	141
Gráfico 107 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C3.....	142
Gráfico 108 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C3. ....	142
Gráfico 109 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C3.....	143
Gráfico 110 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C3.....	143
Gráfico 111 - Registo da carga e deslocamento a meio vão ao longo do tempo após o início de incêndio para o ensaio C4.....	145
Gráfico 112 - Registo da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio C4.....	145
Gráfico 113 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C4. ....	146
Gráfico 114 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C4.....	146
Gráfico 115 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C4. ....	147
Gráfico 116 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C4.....	147
Gráfico 117 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C4.....	148
Gráfico 118 - Registo da carga e deslocamento a meio vão ao longo do tempo após o início de incêndio para o ensaio C5.....	150
Gráfico 119 - Registo da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio C5.....	150
Gráfico 120 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C5. ....	151



Gráfico 121 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C5.....	151
Gráfico 122 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C5.....	152
Gráfico 123 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C5. ....	152
Gráfico 124 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C5.....	153
Gráfico 125 - Registo da intensidade da carga ao longo do tempo no ensaio L3. ....	154
Gráfico 126 - Registo da carga e deslocamento a meio vão, assim que ligada a curva de incêndio, para o ensaio L3. ....	155
Gráfico 127 - Registo da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio L3.....	155
Gráfico 128 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L3.....	156
Gráfico 129 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L3. ....	156
Gráfico 130 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L3. ....	157
Gráfico 131 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L3. ....	157
Gráfico 132 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L3. ....	158
Gráfico 133 - Registo da carga e deslocamento a meio vão, assim que ligada a curva de incêndio, para o ensaio L4. ....	160
Gráfico 134 - Registo da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio L4.....	161
Gráfico 135 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L4.....	161
Gráfico 136 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L4. ....	162
Gráfico 137 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L4. ....	162

Gráfico 138 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L4. ....	163
Gráfico 139 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L4. ....	163
Gráfico 140 - Registo da carga e deslocamento a meio vão ao longo do tempo após o início de incêndio para o ensaio L5. ....	165
Gráfico 141 - Registo da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio L5. ....	166
Gráfico 142 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L5. ....	166
Gráfico 143 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L5. ....	167
Gráfico 144 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L5. ....	167
Gráfico 145 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L5. ....	168
Gráfico 146 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L5. ....	168
Gráfico 147 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio I6. ....	172
Gráfico 148 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio I6. ....	172
Gráfico 149 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I6. ....	173
Gráfico 150 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I6. ....	173
Gráfico 151 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I6. ....	174
Gráfico 152 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I6. ....	174
Gráfico 153 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I6. ....	175
Gráfico 154 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio I7. ....	178

Gráfico 155 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio I7. ....	179
Gráfico 156 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I7.....	179
Gráfico 157 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I7. ....	180
Gráfico 158 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I7. ....	180
Gráfico 159 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I7.....	181
Gráfico 160 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I7. ....	181
Gráfico 161 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio I8. ....	184
Gráfico 162 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio I8. ....	184
Gráfico 163 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I8.....	185
Gráfico 164 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I8. ....	185
Gráfico 165 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I8. ....	186
Gráfico 166 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I8.....	186
Gráfico 167 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I8. ....	187
Gráfico 168 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio I9. ....	189
Gráfico 169 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio I9. ....	189
Gráfico 170 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I9.....	190
Gráfico 171 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I9. ....	190

Gráfico 172 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I9.....	191
Gráfico 173 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I9. ....	191
Gráfico 174 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I9. ....	192
Gráfico 175 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio I10.....	194
Gráfico 176 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio I10.....	194
Gráfico 177 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I10.....	195
Gráfico 178 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I10. ....	195
Gráfico 179 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I10.....	196
Gráfico 180 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I10. ....	196
Gráfico 181 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I10. ....	197
Gráfico 182 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio I11.....	199
Gráfico 183 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio I11.....	199
Gráfico 184 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I11.....	200
Gráfico 185 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I11. ....	200
Gráfico 186 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I11.....	201
Gráfico 187 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I11. ....	201
Gráfico 188 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I11. ....	202

Gráfico 189 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio I12. ....	204
Gráfico 190 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio I12. ....	204
Gráfico 191 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I12.....	205
Gráfico 192 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I12. ....	206
Gráfico 193 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I12. ....	206
Gráfico 194 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I12. ....	207
Gráfico 195 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I12. ....	207
Gráfico 196 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio I13. ....	210
Gráfico 197 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio I13. ....	211
Gráfico 198 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I13.....	211
Gráfico 199 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I13. ....	212
Gráfico 200 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I13. ....	212
Gráfico 201 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I13. ....	213
Gráfico 202 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I13. ....	213
Gráfico 203 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio S6.....	215
Gráfico 204 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio S6. ....	216
Gráfico 205 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S6. ....	216

Gráfico 206 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S6. ....	217
Gráfico 207 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S6. ....	218
Gráfico 208 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S6. ....	218
Gráfico 209 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S6. ....	219
Gráfico 210 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio S7. ....	221
Gráfico 211 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio S7. ....	222
Gráfico 212 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S7. ....	222
Gráfico 213 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S7. ....	223
Gráfico 214 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S7. ....	224
Gráfico 215 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S7. ....	224
Gráfico 216 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S7. ....	225
Gráfico 217 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio S8. ....	227
Gráfico 218 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio S8. ....	228
Gráfico 219 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S8. ....	228
Gráfico 220 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S8. ....	229
Gráfico 221 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S8. ....	230
Gráfico 222 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S8. ....	230

Gráfico 223 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S8.....	231
Gráfico 224 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio S9.....	233
Gráfico 225 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio S9.....	233
Gráfico 226 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S9.....	234
Gráfico 227 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S9.....	235
Gráfico 228 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S9.....	235
Gráfico 229 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S9.....	236
Gráfico 230 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S9.....	236
Gráfico 231 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio S10.....	239
Gráfico 232 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio S10.....	239
Gráfico 233 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S10.....	240
Gráfico 234 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S10.....	241
Gráfico 235 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S10.....	241
Gráfico 236 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S10.....	242
Gráfico 237 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S10.....	242
Gráfico 238 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio S11.....	244
Gráfico 239 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio S11.....	245

Gráfico 240 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S11.....	245
Gráfico 241 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S11. ....	246
Gráfico 242 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S11. ....	247
Gráfico 243 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S11. ....	247
Gráfico 244 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S11. ....	248
Gráfico 245 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio S12. ....	250
Gráfico 246 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio S12. ....	251
Gráfico 247 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S12.....	251
Gráfico 248 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S12. ....	252
Gráfico 249 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S12. ....	253
Gráfico 250 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S12. ....	253
Gráfico 251 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S12. ....	254
Gráfico 252 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio S13. ....	258
Gráfico 253 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio S13. ....	259
Gráfico 254 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S13.....	259
Gráfico 255 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S13. ....	260
Gráfico 256 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S13. ....	260



Gráfico 257 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S13.....	261
Gráfico 258 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S13.....	261
Gráfico 259 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio C6.....	262
Gráfico 260 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio C6.....	263
Gráfico 261 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C6.....	263
Gráfico 262 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C6.....	264
Gráfico 263 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C6.....	265
Gráfico 264 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C6. ....	265
Gráfico 265 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C6.....	266
Gráfico 266 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio C7.....	268
Gráfico 267 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio C7.....	269
Gráfico 268 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C7.....	269
Gráfico 269 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C7.....	270
Gráfico 270 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C7.....	270
Gráfico 271 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C7. ....	271
Gráfico 272 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C7.....	271
Gráfico 273 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio C8.....	276

Gráfico 274 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio C8. ....	276
Gráfico 275 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C8. ....	277
Gráfico 276 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C8. ....	277
Gráfico 277 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C8. ....	278
Gráfico 278 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C8. ....	278
Gráfico 279 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C8. ....	279
Gráfico 280 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio C9. ....	280
Gráfico 281 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio C9. ....	280
Gráfico 282 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C9. ....	281
Gráfico 283 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C9. ....	282
Gráfico 284 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C9. ....	282
Gráfico 285 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C9. ....	283
Gráfico 286 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C9. ....	283
Gráfico 287 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio C10. ....	286
Gráfico 288 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio C10. ....	286
Gráfico 289 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C10. ....	287
Gráfico 290 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C10. ....	288

Gráfico 291 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C10.....	288
Gráfico 292 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C10. ....	289
Gráfico 293 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C10.....	289
Gráfico 294 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio C11.....	291
Gráfico 295 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio C11.....	292
Gráfico 296 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C11. ....	293
Gráfico 297 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C11.....	293
Gráfico 298 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C11.....	294
Gráfico 299 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C11. ....	294
Gráfico 300 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C11.....	295
Gráfico 301 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio C12.....	297
Gráfico 302 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio C12.....	298
Gráfico 303 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C12. ....	298
Gráfico 304 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C12.....	299
Gráfico 305 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C12.....	300
Gráfico 306 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C12. ....	300
Gráfico 307 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C12.....	301

Gráfico 308 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio C13.....	304
Gráfico 309 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio C13. ....	304
Gráfico 310 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C13. ....	305
Gráfico 311 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C13.....	306
Gráfico 312 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C13. ....	306
Gráfico 313 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C13.....	307
Gráfico 314 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C13.....	307
Gráfico 315 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio L6.....	310
Gráfico 316 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio L6.....	311
Gráfico 317 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L6.....	311
Gráfico 318 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L6. ....	312
Gráfico 319 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L6.....	312
Gráfico 320 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L6. ....	313
Gráfico 321 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L6. ....	313
Gráfico 322 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio L7.....	316
Gráfico 323 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio L7.....	316
Gráfico 324 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L7.....	317

Gráfico 325 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L7. ....	317
Gráfico 326 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L7. ....	318
Gráfico 327 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L7. ....	318
Gráfico 328 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L7. ....	319
Gráfico 329 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio L8. ....	321
Gráfico 330 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio L8. ....	321
Gráfico 331 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L8. ....	322
Gráfico 332 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L8. ....	322
Gráfico 333 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L8. ....	323
Gráfico 334 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L8. ....	323
Gráfico 335 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L8. ....	324
Gráfico 336 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio L9. ....	326
Gráfico 337 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio L9. ....	327
Gráfico 338 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L9. ....	327
Gráfico 339 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L9. ....	328
Gráfico 340 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L9. ....	328
Gráfico 341 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L9. ....	329

Gráfico 342 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L9. ....	329
Gráfico 343 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio L10.....	332
Gráfico 344 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio L10.....	332
Gráfico 345 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L10. ....	333
Gráfico 346 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L10. ....	333
Gráfico 347 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L10.....	334
Gráfico 348 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L10. ....	334
Gráfico 349 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L10. ....	335
Gráfico 350 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio L11.....	337
Gráfico 351 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio L11.....	338
Gráfico 352 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L11. ....	338
Gráfico 353 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L11. ....	339
Gráfico 354 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L11.....	339
Gráfico 355 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L11. ....	340
Gráfico 356 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L11. ....	340
Gráfico 357 - Comparação entre patamares da aplicação de força para I1 e I2. ....	343
Gráfico 358 - Comparação entre I1 e I2 para força/deslocamento.....	343
Gráfico 359 - Comparação entre as deformações nos ensaios I1 e I2.....	344

Gráfico 360 - Comparação entre os registos dos LVDT's em I1 e I2.....	345
Gráfico 361 - Comparação entre patamares da aplicação de força para S1 e S2. .....	346
Gráfico 362 - Comparação entre S1 e S2 para força/deslocamento. ....	347
Gráfico 363 - Comparação entre as deformações nos ensaios S1 e S2. ....	347
Gráfico 364 - Comparação entre os registos dos LVDT's em S1 e S2.....	348
Gráfico 365 - Comparação entre patamares da aplicação de força para C1 e C2. .....	349
Gráfico 366 - Comparação entre C1 e C2 para força/deslocamento. ....	350
Gráfico 367 - Comparação entre as deformações nos ensaios C1 e C2.....	350
Gráfico 368 - Comparação entre os registos dos LVDT's em C1 e C2. ....	351
Gráfico 369 - Comparação entre patamares da aplicação de força para L1 e L2. .....	352
Gráfico 370 - Comparação entre L1 e L2 para força/deslocamento. ....	353
Gráfico 371 - Comparação entre as deformações nos ensaios L1 e L2. ....	353
Gráfico 372 - Comparação entre os registos dos LVDT's em L1 e L2.....	354
Gráfico 373 – Comparação entre I3, I4 e I5 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão. ....	356
Gráfico 374 – Comparação entre I3, I4 e I5 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão. ....	356
Gráfico 375 - Comparação entre I3, I4 e I5 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias. ....	357
Gráfico 376 – Comparação entre S3, S4 e S5 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão. ....	359
Gráfico 377 – Comparação entre S3, S4 e S5 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão. ....	359
Gráfico 378 - Comparação entre S3, S4 e S5 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias. ....	360
Gráfico 379 – Comparação entre C3, C4 e C5 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão. ....	361

Gráfico 380 – Comparação entre C3, C4 e C5 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão. ....	362
Gráfico 381 - Comparação entre C3, C4 e C5 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.....	363
Gráfico 382 – Comparação entre L3, L4 e L5 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão. ....	364
Gráfico 383 – Comparação entre L3, L4 e L5 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão. ....	365
Gráfico 384 - Comparação entre L3, L4 e L5 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.....	365
Gráfico 385 - Comparação entre I3, I6 e I7 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão. ....	367
Gráfico 386 - Comparação entre I3, I6 e I7 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão. ....	367
Gráfico 387 - Comparação entre I3, I6 e I7 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.....	368
Gráfico 388 - Comparação entre S3, S6 e S7 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão. ....	369
Gráfico 389 - Comparação entre S3, S6 e S7 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão. ....	370
Gráfico 390 - Comparação entre S3, S6 e S7 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.....	370
Gráfico 391 - Comparação entre C3, C6 e C7 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão. ....	372
Gráfico 392 - Comparação entre C3, C6 e C7 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão. ....	372
Gráfico 393 - Comparação entre C3, C6 e C7 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.....	373
Gráfico 394 - Comparação entre L3, L6 e L7 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão. ....	374
Gráfico 395 - Comparação entre L3, L6 e L7 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão. ....	375



Gráfico 396 - Comparação entre L3, L6 e L7 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias. ....	376
Gráfico 397 - Comparação entre I4, I8, I9, I12 e I13 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão. ....	377
Gráfico 398 - Comparação entre I4, I8, I9, I12 e I13 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão. ....	378
Gráfico 399 - Comparação entre I4, I8, I9, I12 e I13 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias. ....	378
Gráfico 400 - Comparação entre S4, S8, S9, S12 e S13 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão. ....	380
Gráfico 401 - Comparação entre S4, S8, S9, S12 e S13 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão. ....	381
Gráfico 402 - Comparação entre S4, S8, S9, S12 e S13 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias. ....	381
Gráfico 403 - Comparação entre C4, C8, C9, C11, C12 e C13 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão. ....	383
Gráfico 404 - Comparação entre C4, C8, C9, C11, C12 e C13 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão. ....	384
Gráfico 405 - Comparação entre C4, C8, C9, C11, C12 e C13 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias. ....	384
Gráfico 406 - Comparação entre L4, L8 e L9 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão. ....	386
Gráfico 407 - Comparação entre L4, L8 e L9 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão. ....	386
Gráfico 408 - Comparação entre L4, L8 e L9 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias. ....	387
Gráfico 409 - Comparação entre I5, I10 e I11 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão. ....	388
Gráfico 410 - Comparação entre I5, I10 e I11 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão. ....	389
Gráfico 411 - Comparação entre I5, I10 e I11 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias. ....	390

Gráfico 412 - Comparação entre S5, S10 e S11 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão. ....	391
Gráfico 413 - Comparação entre S5, S10 e S11 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão. ....	392
Gráfico 414 - Comparação entre S5, S10 e S11 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias. ....	392
Gráfico 415 - Comparação entre C5 e C10 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão. ....	394
Gráfico 416 - Comparação entre C5 e C10 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão. ....	394
Gráfico 417 - Comparação entre C5 e C10 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.....	395
Gráfico 418 - Comparação entre L5, L10 e L11 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão. ....	396
Gráfico 419 - Comparação entre L5, L10 e L11 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão. ....	397
Gráfico 420 - Comparação entre L5, L10 e L11 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.....	398

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Ensaios e condições a realizar. ....	47
Tabela 2 – Resultados das propriedades mecânicas dos provetes da secção IPE100 S275.....	51
Tabela 3 – Resultados das propriedades mecânicas dos provetes da secção SHS100x100x4 S235.....	52
Tabela 4 – Resultados das propriedades mecânicas dos provetes da secção CHS101,6x4,05 S235. ....	53
Tabela 5 – Resultados das propriedades mecânicas dos provetes da secção L100x50x8 S275.....	54
Tabela 6 – Características físicas da tinta intumescente. ....	55
Tabela 7 – características dos sensores utilizados nos ensaios.....	60
Tabela 8 – Valores de espessura de tinta para o elemento I6 em [µm]. ....	70
Tabela 9 – Valores registados do controlo dimensional da espessura de tinta. .	71
Tabela 10 – Valores medidos da imperfeição geométrica nos elementos (LNP e IPE). ....	72
Tabela 11 – Valores de protecção para ensaio I6. ....	170
Tabela 12 – Valores de protecção para ensaio I7. ....	178
Tabela 13 - Valores de protecção para ensaio I8. ....	183
Tabela 14 - Valores de protecção para ensaio I9. ....	188
Tabela 15 – Valores de protecção para ensaio I10.....	193
Tabela 16 – Valores de protecção para ensaio I11.....	198
Tabela 17 - Valores de protecção para ensaio I12. ....	203
Tabela 18 - Valores de protecção para ensaio I13. ....	210
Tabela 19 – Valores de protecção para ensaio S6. ....	215
Tabela 20 – Valores de protecção para ensaio S7. ....	221

Tabela 21 - Valores de protecção para ensaio S8. ....	227
Tabela 22 - Valores de protecção para ensaio S9. ....	232
Tabela 23 - Valores de protecção para ensaio S10. ....	238
Tabela 24 - Valores de protecção para ensaio S11. ....	244
Tabela 25 - Valores de protecção para ensaio S12. ....	250
Tabela 26 - Valores de protecção para ensaio S13. ....	256
Tabela 27 – Valores de protecção para ensaio C6. ....	262
Tabela 28 – Valores de protecção para ensaio C7. ....	268
Tabela 29 - Valores de protecção para ensaio C8. ....	274
Tabela 30 - Valores de protecção para ensaio C9. ....	279
Tabela 31 - Valores de protecção para ensaio C10. ....	285
Tabela 32 - Valores de protecção para ensaio C11. ....	291
Tabela 33 - Valores de protecção para ensaio C12. ....	297
Tabela 34 - Valores de protecção para ensaio C13. ....	303
Tabela 35 – Valores de protecção para ensaio L6. ....	310
Tabela 36 – Valores de protecção para ensaio L7. ....	315
Tabela 37 - Valores de protecção para ensaio L8. ....	320
Tabela 38 - Valores de protecção para ensaio L9. ....	326
Tabela 39 – Valores de protecção para ensaio L10. ....	331
Tabela 40 – Valores de protecção para ensaio L11. ....	337
Tabela 41 - Valores de tempo conseguidos na secção IPE, para $\mu=30\%$ . ....	368
Tabela 42 - Valores de tempo conseguidos na secção SHS, para $\mu=30\%$ . ....	371
Tabela 43 - Valores de tempo conseguidos na secção CHS, para $\mu=30\%$ . ....	373
Tabela 44 - Valores de tempo conseguidos na secção LNP, para $\mu=30\%$ . ....	376
Tabela 45 - Valores de tempo conseguidos na secção IPE, para $\mu=50\%$ . ....	379
Tabela 46 - Valores de tempo conseguidos na secção SHS, para $\mu=50\%$ . ....	382

Tabela 47 - Valores de tempo conseguidos na secção SHS, para $\mu=50\%$ .....	385
Tabela 48 - Valores de tempo conseguidos na secção LNP, para $\mu=50\%$ .....	387
Tabela 49 - Valores de tempo conseguidos na secção IPE, para $\mu=70\%$ . ....	390
Tabela 50 - Valores de tempo conseguidos na secção SHS, para $\mu=70\%$ .....	393
Tabela 51 - Valores de tempo conseguidos na secção CHS, para $\mu=70\%$ . ....	395
Tabela 52 - Valores de tempo conseguidos na secção LNP, para $\mu=70\%$ .....	398

## Simbologia

### Letras maiúsculas do alfabeto latino

$A_t$  – Extensão total na ruptura

DH – Deslocamento horizontal sofrido no topo do elemento na direcção “z-z”

DV – Deslocamento vertical sofrido no topo do elemento na direcção “x-x”

E – Modulo de elasticidade

F – Força aplicada a meio vão do elemento

I – Comprimento entre apoios do elemento

$l_t$  – comprimento total do elemento

$l_f$  – comprimento inicial efectivo do elemento exposto ao fogo

$R_{eL}$  – Tensão de cedência inferior

$R_{eH}$  – Tensão de cedência superior

$R_m$  – Tensão de ruptura à tracção

$R_{p0,2}$  – Tensão limite de proporcionalidade a 0,2%

### Letras minúsculas do alfabeto latino

d – distância entre a fibra mais comprimida e a fibra mais traccionada no elemento, em condições de temperatura ambiente

### Letras minúsculas do alfabeto grego

$\delta$  – Deslocamento transversal no ponto de aplicação da carga no elemento na direcção “z-z”

## 1. Introdução.

Este relatório está inserido no âmbito de uma bolsa de investigação, com o título de “Estudo experimental do comportamento de elementos em aço protegidos com tintas intumescentes em condições de incêndio”, com duração de 12 meses, financiada pela FCT. Esta bolsa de investigação é inserida no âmbito do Projecto de investigação PTDC/EME-PME/64913/2006.

### 1.1. Objectivos.

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

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.

A elaboração de ensaios experimentais em perfis curtos IPE, CHS, SHS e LNP, para um valor específico de grau de utilização, sob condições de incêndio normalizado, pretende elaborar um estudo paramétrico da espessura da tinta e da massividade na temperatura crítica dos elementos.

Prevê-se ainda a publicação de um trabalho de investigação e desenvolvimento conducente à elaboração de uma dissertação original e inovadora, de natureza científica, envolvendo meios experimentais.

## **1.2. Resumo dos capítulos.**

Os capítulos seguintes irão descrever todo o processo do trabalho realizado. Iniciando-se por uma introdução ao tema, descrição dos ensaios pretendidos de realizar, todo o processo de instrumentação dos elementos (à temperatura ambiente e sobre condições de incêndio) e ainda o processo experimental.

Será feita uma descrição exaustiva de todos os ensaios realizados, descrevendo os resultados de cada um, iniciando-se nos ensaios à temperatura ambiente, ensaios sobre condições de incêndio sem protecção e com a aplicação de tinta intumescente.

No final apresentam-se as comparações dos resultados, organizados por ensaios à temperatura ambiente e em condições de incêndio, comparando a influência do grau de utilização e da espessura de protecção.



## **2. Revisão do estado da arte.**

O estudo de tintas intumescentes como agente protector de estruturas, é relativamente recente. Existem alguns registos de experiências e teste sobre a evolução da temperatura nas estruturas, mas a grande intensidade de estudos começa a surgir nesta data.

### **2.1. Ensaios realizados por outros investigadores.**

Em 1998 M. Edwards, elaborou um estudo para determinar o desempenho ao fogo de colunas em SHS, preenchidas com betão e protegidos com tinta intumescente.

Em 2001 W. Sha e N.C. Lau, estudaram a evolução da temperatura durante um incêndio num piso fino, suportado com vigas protegidas com tinta intumescente.

Em 2002 T. M. Chan e W. Sha, estudaram um método alternativo, para determinar a espessura do revestimento intumescente para protecção contra incêndios, exigido para um piso fino suportado com vigas, utilizando os dados existentes de testes ao fogo.

Em 2004 Colin Bailey, elaborou uma investigação para avaliar o comportamento de vigas celulares, protegidas com tinta intumescente.

Em 2010 Y. Wang e C. Bailey, propuseram um método simplificado para calcular a evolução da temperatura em ligações metálicas, parcialmente protegidas com tinta intumescente.

### 3. Programa de ensaios.

Como anteriormente se tinha estudado a resistência nominal dos diferentes tipos de esquema possível de estudo no nosso laboratório, concluiu-se que devido à célula de carga disponível para aplicação da carga não era suficiente no estudo de colunas à compressão, ou seja elaborar um estudo à encurvadura de elementos comprimidos. Decidiu-se então apenas fazer um estudo de elementos à flexão.

Para podermos ter uma base de comparação dos ensaios e os resultados teóricos anteriormente obtidos, realizou-se numa primeira fase 2 ensaios de cada secção para a determinação da sua capacidade de resistência à flexão para condições de temperatura ambiente ( $\approx 20^{\circ}\text{C}$ ). Estas vigas foram monitorizadas cada uma com extensómetros e transdutores de deslocamentos como descrito no ponto seguinte.

Também para comparar com os métodos simplificados de cálculo preconizados no Eurocódigo (1) e (2), de resistência à flexão em condições de incêndio, realizou-se 1 ensaio de cada secção para cada grau de utilização (30%, 50% e 70%). Estes ensaios também foram instrumentados com sensores de temperatura no aço (termopares) e transdutores de deslocamento (LVDT e fio potenciométrico).

Por fim, realizaram-se ensaios para estes graus de utilização com protecção de tinta intumescente de base aquosa. Nos ensaios das viga com protecção pretendeu-se estudar 2 vigas de cada grau de utilização com uma espessura de 1000 ( $\mu\text{m}$ ) de tinta, ainda para comparar a influência dessa espessura, realizaram-se mais 2 ensaios a 2000 ( $\mu\text{m}$ ) num grau de utilização de 50%. Estas vigas protegidas contêm a mesma instrumentação que aquelas sem protecção.

De seguida apresenta-se uma tabela (Tabela 1) de resumo com os ensaios que se pretendem realizar, utilizando diferentes tipos de secções: (IPE, SHS, CHS e LNP).

Tabela 1 - Ensaios e condições a realizar.

Secção	Nome	Massividade	Condições			Instrumentação		Força aplicada (N)
		[m <sup>-1</sup> ]	Normal	FOGO	Esp. Tinta (µm)	Extensom	Termop	EC3 (2), (1)
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

### 3.1. Enquadramento normativo.

Na fase inicial do projecto, foi necessária determinar a capacidade resistente dos elementos.

A determinação da capacidade resistente nominal, dos elementos à temperatura ambiente, é calculada com base no Eurocódigo 3: Projecto de estruturas em aço, Parte 1: Regras gerais e regras para edifícios (2). Ainda foi utilizado este documento para definir as características do material depois de realizados os ensaios à tracção.

Para o cálculo dos elementos expostos a condições de incêndio, foi utilizado o Eurocódigo 3, Parte 1-2: Regras gerais, Verificação da resistência ao fogo (1).

Nos ensaios de tracção aos provetes, foi utilizado a Norma Portuguesa 10002: Ensaios de tracção a materiais metálicos, Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente (3).

Para os ensaios à flexão em condições de incêndio, foi necessária a consideração normativa Europeia em vigor, Norma Europeia 1363: ensaios de resistência ao fogo, Parte 1: Requisitos gerais (4).

Em forma de análise normativa em vigor, utilizou-se ainda a par da EN 1363-1, a Norma Britânica 476: Ensaios ao fogo de materiais em edifícios e estruturas, Parte 20: Método para a determinação da resistência ao fogo de elementos da construção (Princípios gerais) (5).

Para o controlo da camada protectora nos elementos, a tinta intumescente, utilizou-se a Pré-Norma Europeia 13381: Método de ensaio para a determinação da contribuição de resistência ao fogo dos elementos estruturais, Parte 8: Protecção reactiva aplicada em elementos metálicos (6).

## 4. Caracterização das propriedades dos materiais.

### 4.1. Aço.

Foram efectuados ensaios de tracção a provetes, do mesmo material utilizado nos ensaios. Para cada secção foram maquinados três provetes conforme a norma 10002-1 (3). Na Figura 1, encontram-se representados os provetes depois de maquinados.



Figura 1 – Provetes maquinados para ensaios à tracção.

Os ensaios foram realizados numa máquina de tracção, ver Figura 2. Os dados foram registados, e tratados em Excel<sup>®</sup>. Com os ensaios foram determinados novos valores de caracterização do aço (reais),  $E$ ,  $R_{p0.2\%}$ ,  $R_{eH}$ ,  $R_{eL}$ ,  $R_m$  e  $A_t$ .



Figura 2 – Ensaios realizados de teste à tracção dos provetes.

Os resultados dos ensaios foram sobrepostos em formato gráfico, depois foi feita uma média de valores para a definição das características do material.

Os resultados gráficos dos provetes PI, da secção IPE 100, encontram-se representados no Gráfico 1.

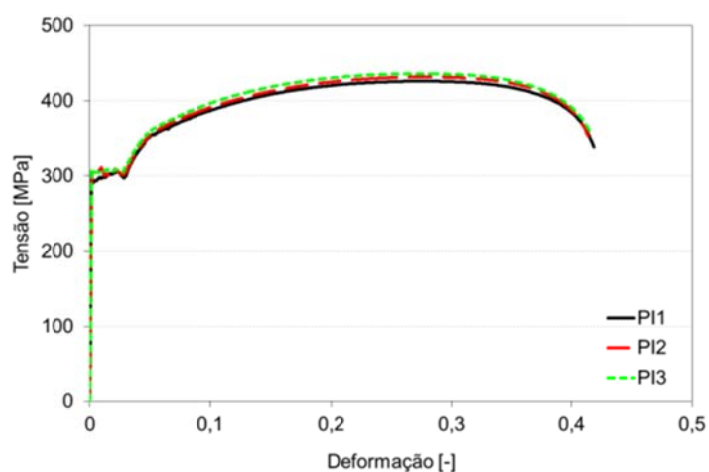


Gráfico 1 - Curvas tensão-deformação dos provetes da secção IPE100 S275.

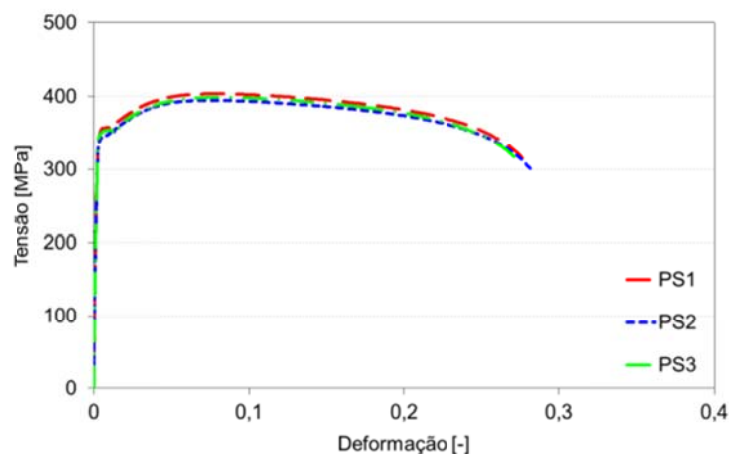
Os resultados obtidos nos testes PI encontram-se descritos na Tabela 2.

**Tabela 2 – Resultados das propriedades mecânicas dos provetes da secção IPE100 S275.**

Provette nº	E [GPa]	R <sub>p,0.2</sub> [MPa]	R <sub>eH</sub> [MPa]	R <sub>eL</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>t</sub> [%]
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
<b>Média</b>	197,901	300,738	302,466	300,856	431,252	41,584
<b>Desv. Padrão</b>	2,948	6,720	5,749	4,028	5,020	0,231

Os valores registados nos testes de tracção PI são bastante análogos, apesar da aleatoriedade na escolha do material a testar. Assim sendo, os valores a retirar destes ensaios, são o valor de cedência e o valor de tensão última,  $f_y$  e  $f_u$ , respectivamente 302,466 [MPa] e 431,252 [MPa], conforme descrito no eurocódigo 3-1 (2).

Os resultados gráficos dos provetes PS, da secção SHS 100x100x4, encontram-se representados no Gráfico 2. Observa-se um comportamento sem patamar de cedência, provavelmente por se tratar de um material enformado a frio.

**Gráfico 2 - Curvas tensão-deformação dos provetes da secção SHS100x100x4 S235.**

Os resultados obtidos nos testes PS encontram-se descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados das propriedades mecânicas dos provetes da secção SHS100x100x4 S235.

Proвете nº	E [GPa]	R <sub>p,0.2</sub> [MPa]	R <sub>eH</sub> [MPa]	R <sub>eL</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>t</sub> [%]
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	--

Os valores a retirar destes ensaios, o valor de cedência e o valor de tensão última,  $f_y$  e  $f_u$ , respectivamente 344,02 [MPa] e 351,67 [MPa], conforme descrito no eurocódigo 3-1 (2). Utilizou-se o valor de limite de proporcionalidade para a definição da tensão de cedência, por este ser uma material sem patamar de cedência definido.

Os resultados gráficos dos provetes PC, da secção CHS 101,6x4,05, encontram-se representados no Gráfico 3. Observa-se um comportamento sem a existência de um patamar de cedência, por se tratar de um material enformado a frio.

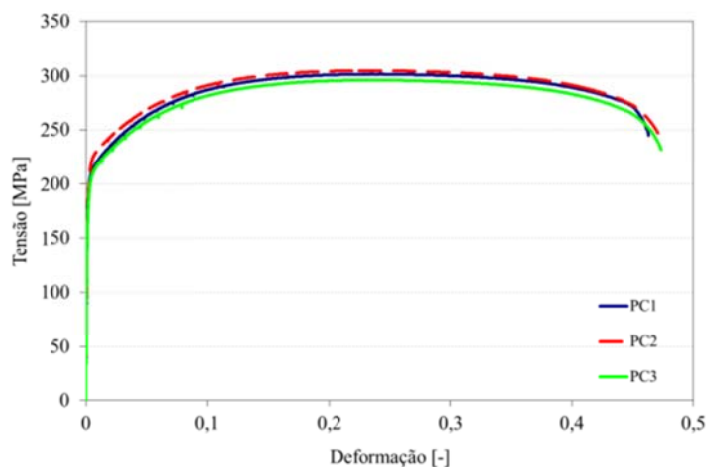


Gráfico 3 - Curvas tensão-deformação dos provetes da secção CHS101,6x4,06 S235.

Os resultados obtidos nos testes PC encontram-se descritos na Tabela 4.



Tabela 4 – Resultados das propriedades mecânicas dos provetes da secção CHS101,6x4,05 S235.

Proвете nº	E [GPa]	R <sub>p,0.2</sub> [MPa]	R <sub>eH</sub> [MPa]	R <sub>eL</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>t</sub> [%]
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

Os valores a retirar destes ensaios, o valor de cedência e o valor de tensão última,  $f_y$  e  $f_u$ , respectivamente 200,99 [MPa] e 300,75 [MPa], conforme descrito no eurocódigo 3-1 (2). Utilizou-se o valor de limite de proporcionalidade para a definição da tensão de cedência, por este ser uma material sem patamar de cedência.

Os resultados gráficos dos provetes PL, da secção LNP 100x50x8, encontram-se representados no Gráfico 4.

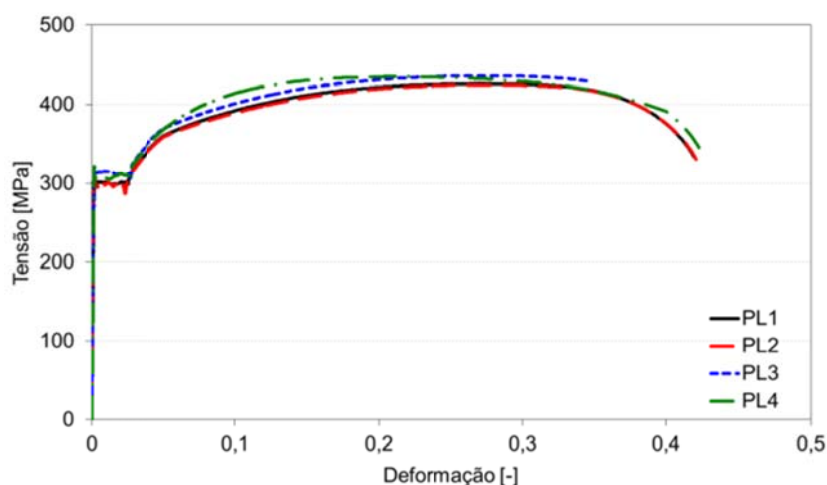


Gráfico 4 - Curvas tensão-deformação dos provetes da secção LNP100x50x8 S275.

Os resultados obtidos nos testes PL encontram-se descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados das propriedades mecânicas dos provetes da secção L100x50x8 S275.

Proвете nº	E [GPa]	R <sub>p,0.2</sub> [MPa]	R <sub>eH</sub> [MPa]	R <sub>eL</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>t</sub> [%]
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

Os valores registados nos testes de tracção PL apresentam alguma disparidade, por esse motivo é que se optou por realizar-se mais um provete desta secção. Obtida uma linearidade entre testes, registaram-se o valor de cedência e o valor de tensão última,  $f_y$  e  $f_u$ , respectivamente 304,27 [MPa] e 430,33 [MPa], conforme descrito no eurocódigo 3-1 (2).

Efectuada esta análise das características reais do material, de salientar os provetes PC com valores inferiores ao previsto. Sendo registado valores diferentes do previsto nominalmente, poderá alterar significativamente o seu grau de utilização que fora definido anteriormente.

#### 4.2. Tinta.

Trata-se de uma tinta intumescente aquosa do fabricante CIN, de referência 7B-730 C-THERM AQUA.

A tinta tem a propriedade de sob a acção do calor, produzir uma espuma isolante de muito baixa condutividade térmica, protegendo o suporte da acção do fogo. Na Figura 3 estão representados dois estados da tinta, inicialmente a camada protectora sem reacção, não apresenta alterações na superfície, um minuto depois a reacção da tinta em forma de espuma, como a representada.



Figura 3 – À esquerda um elemento pintado quando o fogo se inicia, à direita quando a tinta inicia o seu processo de intumescência.

Esta tinta permite a aplicação em interiores e também em exteriores. Obtém-se uma alta espessura por demãos, sendo de relativa facilidade a sua aplicação, e permite a repintura entre camadas da mesma tinta.

O fabricante recomenda que a superfície pintada entre demãos não se molhe, para tal deve ser efectuada a pintura em locais protegidos de chuva ou salpicos de água. As condições do ambiente na aplicação da tinta devem rondar entre 5 a 45 [°C], uma humidade relativa entre 0 e 85 [%], ainda deve-se garantir que a superfície de pintura esteja 3°C acima do ponto de orvalho.

Na Tabela 6 encontram-se descritas as características físicas da tinta intumescente, segundo os dados do fabricante.

**Tabela 6 – Características físicas da tinta intumescente.**

Acabamento	Mate
Cor	Branco
Substrato	Aço protegido
Componente	1
Mecanismos Secagem	Evaporação de água
Sólidos volume	60 % (segundo ASTM D2697 mod.) (a)
Espessura seca	300 – 800 µm (b)
N.º de demãos	1 - 2 segundo sistema de aplicação.
Compostos Orgânicos	
Voláteis (COV)	Médio (8,00 – 24,99%)
Rendimento teórico	2,23 m²/L para 250 µm 0,93 m²/L para 600 µm
Rendimento prático	Considerar os factores de perda apropriados: aplicação, irregularidades da superfície, etc.
Processo de aplicação	Pistola convencional e airless, trincha ou rolo.
Tempo secagem e repintura (23°C) e a 300 µm:	
Total	1,5 – 2 horas
Repintura	Min: 24 horas
A secagem depende da temperatura e espessura da película.	
Massa Volúmica	1,410 g/ml
Diluyente	Água
Diluyente de limpeza	Água
Ponto inflamação (vaso fechado)	
Produto	Não inflamável
Solvente	Não inflamável
Diluyente limpeza	Não inflamável
Forma fornecimento	Embalagens de 20 L
Peso de envio	29 Kg. Aprox.
Estabilidade	1 ano desde a data de envio, armazenado em local seco e fresco, nas embalagens originais, entre 5 e 40°C.
(a) Segundo ASTM D2697 mod./ UNE-48090. Pequenas variações (±3%) podem ocorrer devido a diferenças entre cores e às imprecisões do método.	
(b) A espessura à aplicar depende da massividade dos perfis a proteger e da Estabilidade ao Fogo requerida. A espessura de película seca é determinado a partir das tabelas com os resultados oficiais de Estabilidade ao Fogo (Certificado de ensaios). Dependendo do método de aplicação podem obter-se as seguintes espessuras secas por demão: Espessura (µm): Airless (Até 800); Trincha (400); Rolo (200).	

## 5. Ensaios de resistência à flexão.

Os ensaios de resistência à flexão realizados no LERM (Estig-IPB), tinham como objectivo a comparação entre os valores obtidos pelo EC3 (2), (1), e os resultados experimentais, para assim podermos conhecer a diferença entre um método de análise simplificado e um método experimental. Na Figura 4 está representado o modelo do elemento simplesmente apoiado, com o sistema de eixos considerado e dimensões. De salientar que o comprimento efectivo do elemento exposto ao fogo ( $l_f$ ) é diferente do comprimento entre apoios ( $l$ ), e diferente ainda do comprimento total do elemento ( $l_t$ ), necessário para assegurar as condições de apoio e o seu deslocamento devido à deformação, como explicarei com maior pormenor ainda dentro deste ponto.

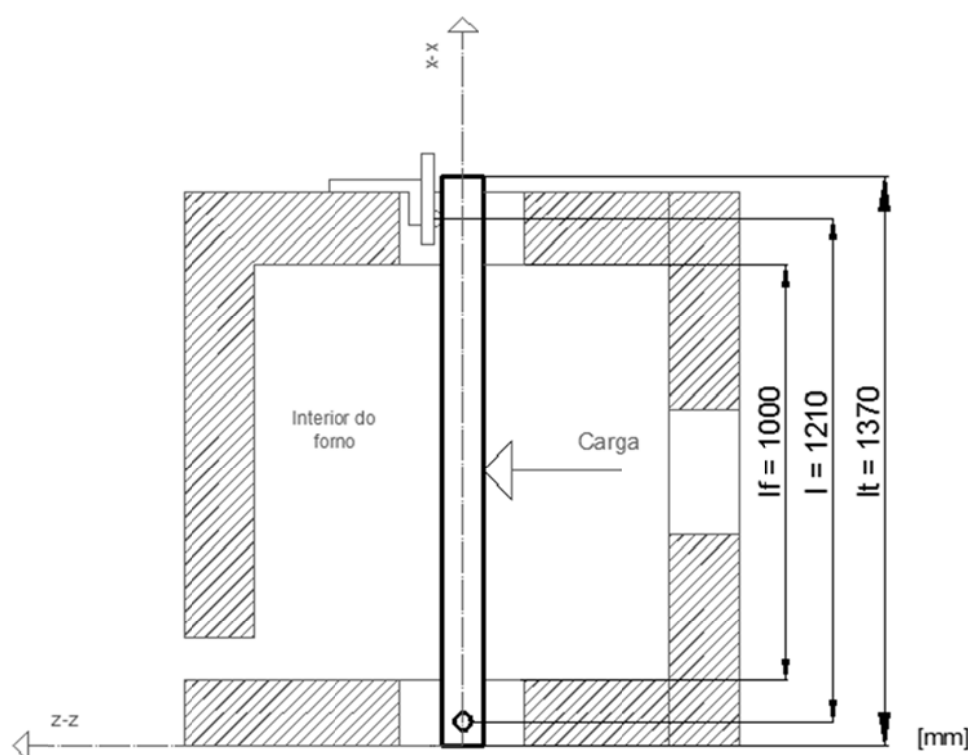


Figura 4 - Esquema de aplicação de carga, com dimensões do elemento e eixos.

A construção deste esquema 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, contendo já três aberturas, que nos serviram de apoio à colocação deste esquema. A construção do apoio duplo foi pensada com a elaboração de uma rótula que coincide com a furação a executar na viga, introduzindo um veio que possibilita a rotação no eixo “y-y”. Na construção do apoio simples fica impedida a rotação em torno do eixo “x-x” (torção), e os deslocamentos nas direcções “y-y” e “z-z”, ver Figura 5.



Figura 5 - 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 para simular a aplicação de uma carga pontual, ver Figura 6.



Figura 6 - 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", com processamento de dados "Catman easy". A Figura 7 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 8.



Figura 7 - Posição dos LVDT's no elemento.

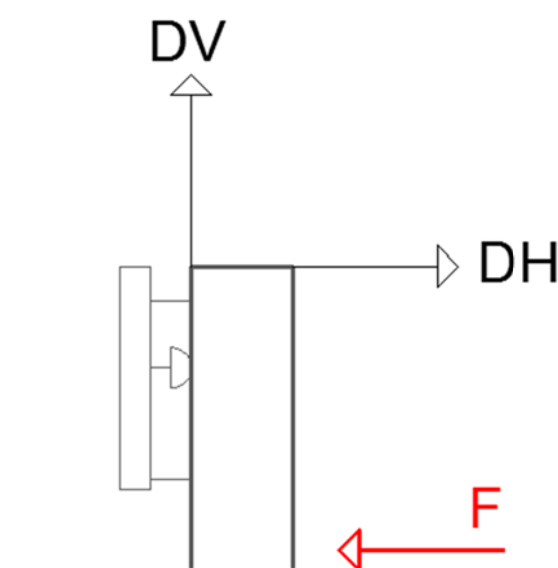


Figura 8 - Esquema de leitura dos deslocamentos dos LVDT's

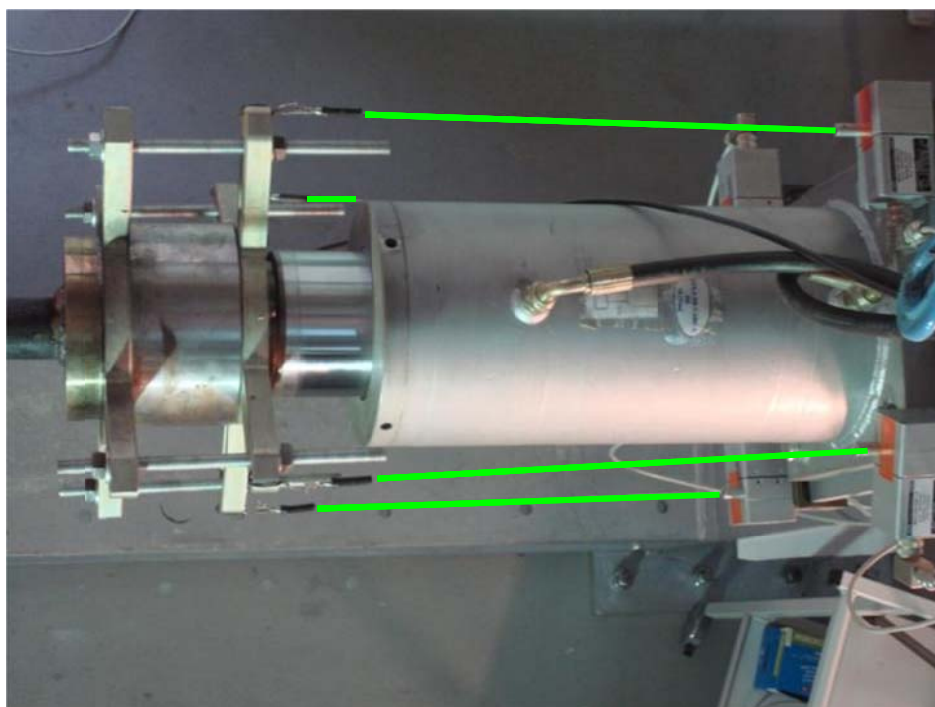
O deslocamento transversal ( $\delta$ ) foi medido a meio vão do elemento, utilizando quatro sensores. Este deslocamento é medido no ponto de aplicação da carga, segundo a direcção “z-z”. Este deslocamento permite determinar o estado limite último, por utilização do critério de deslocamento e velocidade de deslocamento do ponto de aplicação da carga, previstos na norma EN 1363-1 (4), e descritos no ponto 6.

O controlado do sistema de carga (F) e deslocamento ( $\delta$ ) foi efectuado através de um controlador Siemens e de um programa dedicado.

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



Na Figura 9, mostra os medidores de deslocamento ( $\delta$ ) e a célula de carga, acoplados ao cilindro óleo-hidráulico.



**Figura 9 – Cilindro acoplado dos medidores de deslocamento ( $\delta$ ) e célula de carga.**

Todos os elementos para ensaio de flexão foram cortados, como se pode observar na Figura 10, 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 10 podemos ainda observar a furação dos elementos com uma broca craneana de diâmetro 40 [mm], localizado a 60 [mm] da extremidade inferior.





Figura 10 - Corte e furação dos elementos.

### 5.1. Aquisição de Dados.

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

Na Tabela 7, é apresentada uma listagem de sensores utilizados nos ensaios, suas resoluções e características.

Tabela 7 – características dos sensores utilizados nos ensaios.

Sensor	Resolução/capacidade máxima	Representação (foto)
Transdutor de deslocamento por fio potenciométrico	+/- 0,1[mm] /	
Transdutor de deslocamento electromagnético LVDT (Linear variable differential transformer)	+/- 0,01[mm] / 200 [mm]	
Transdutor de força, célula de carga	+/- 0,1 [N] / 100 [kN]	
Transdutor de temperatura, termopar de fio K, com diâmetro de 0,711 [mm]	+/- 0,01[°C] /	
Transdutor de temperatura, termopar placa, fio tipo K, bainha de revestimento de 1 [mm]	+/- 0,001[°C] /	
Transdutor de deformação, extensómetros 1-LY11-3/120 (HBM)		
Medidor de espessura de tinta seca em ligas ferrosas (Elcometer 456)	<b>Sonda F1:</b> +/- 0,1[μm] / 1500 [μm]	
	<b>Sonda F2:</b> +/- 0,01[μm] / 5000 [μm]	



Na Figura 11, encontra-se representado um corte longitudinal do forno, com todos os intervenientes de um ensaio.

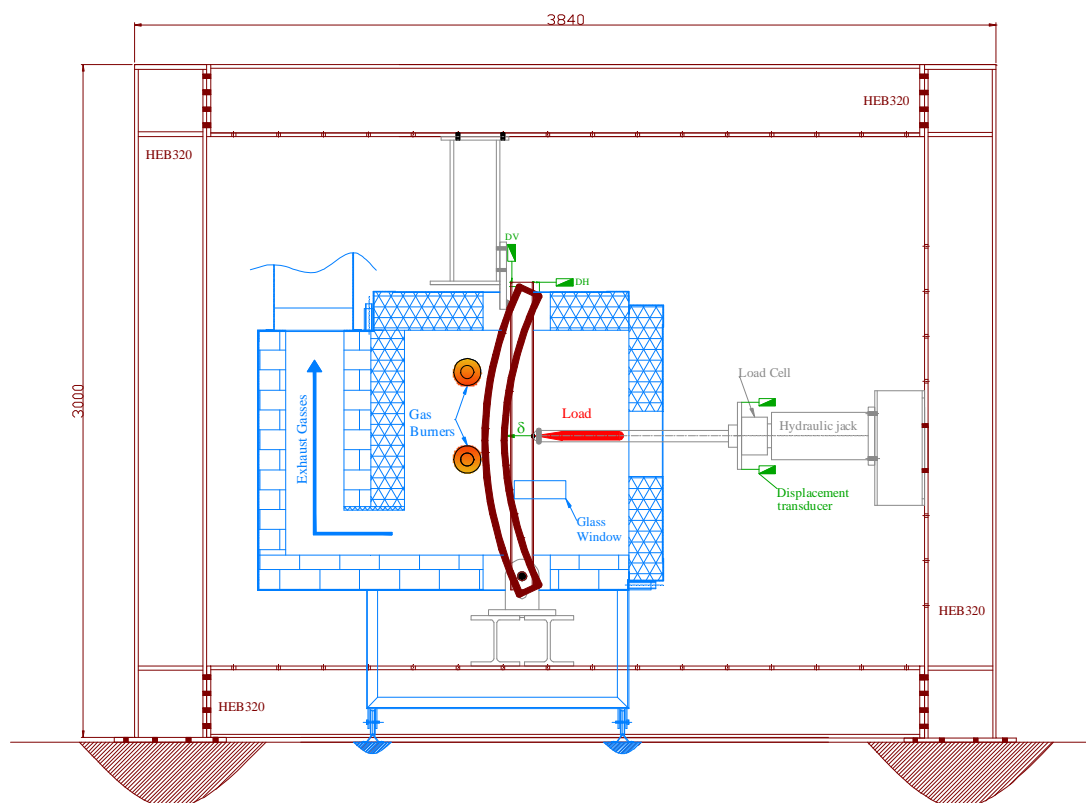


Figura 11 – Esquema geral do ensaio.

## 5.2. À temperatura ambiente.

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 12.

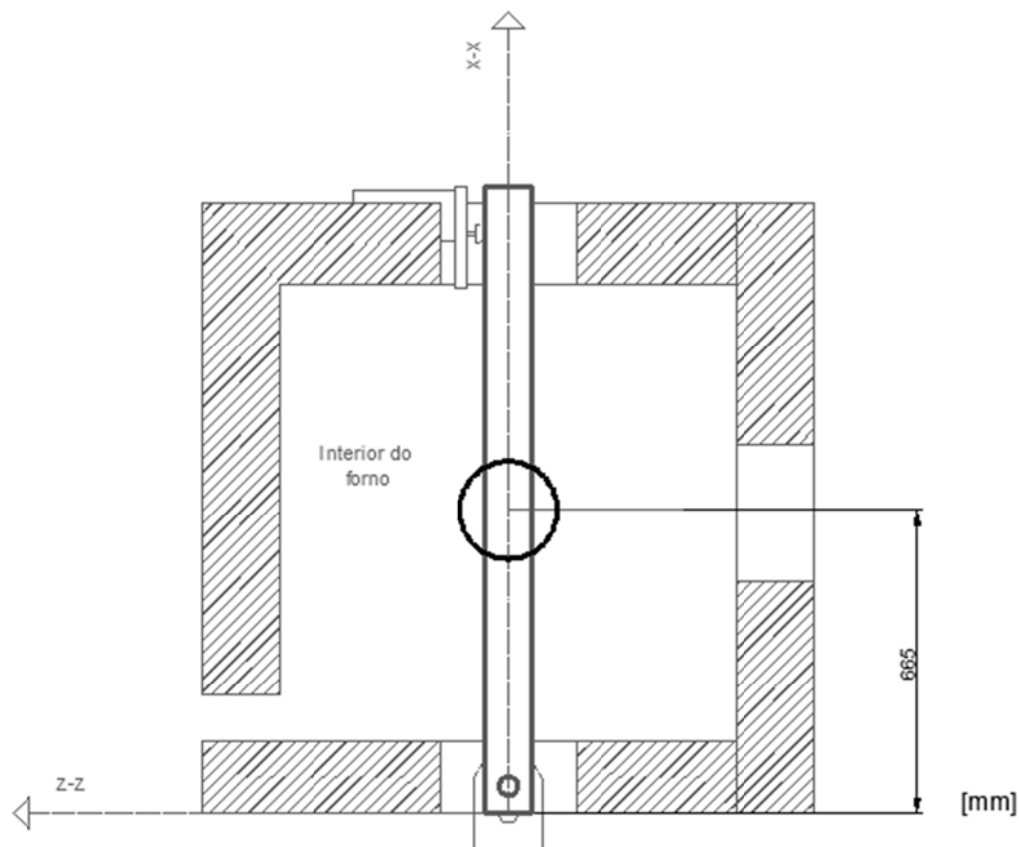
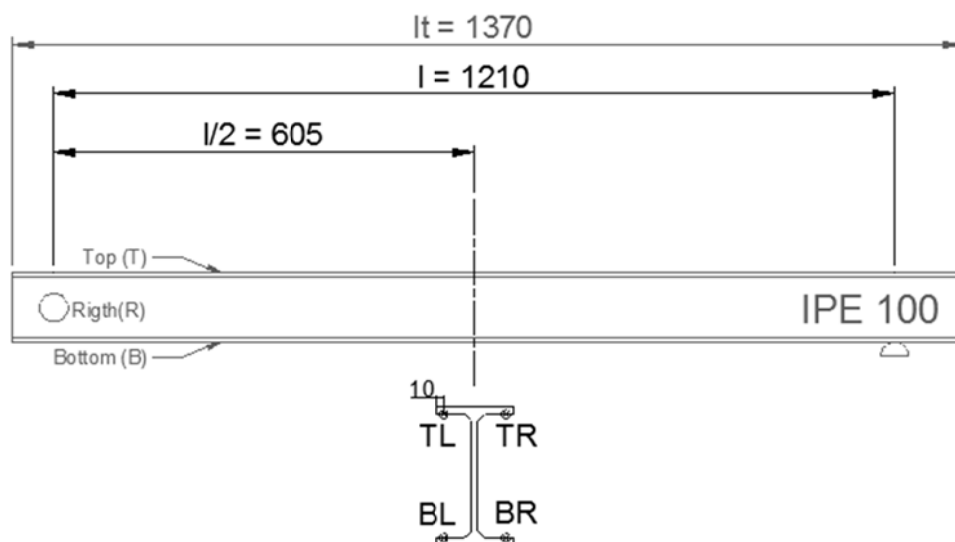


Figura 12 - Posição da estação de leitura de deformações no elemento.

Na Figura 13 está representada a posição e o número de sensores utilizados para medição da deformação na direcção axial dos elementos “x-x”.



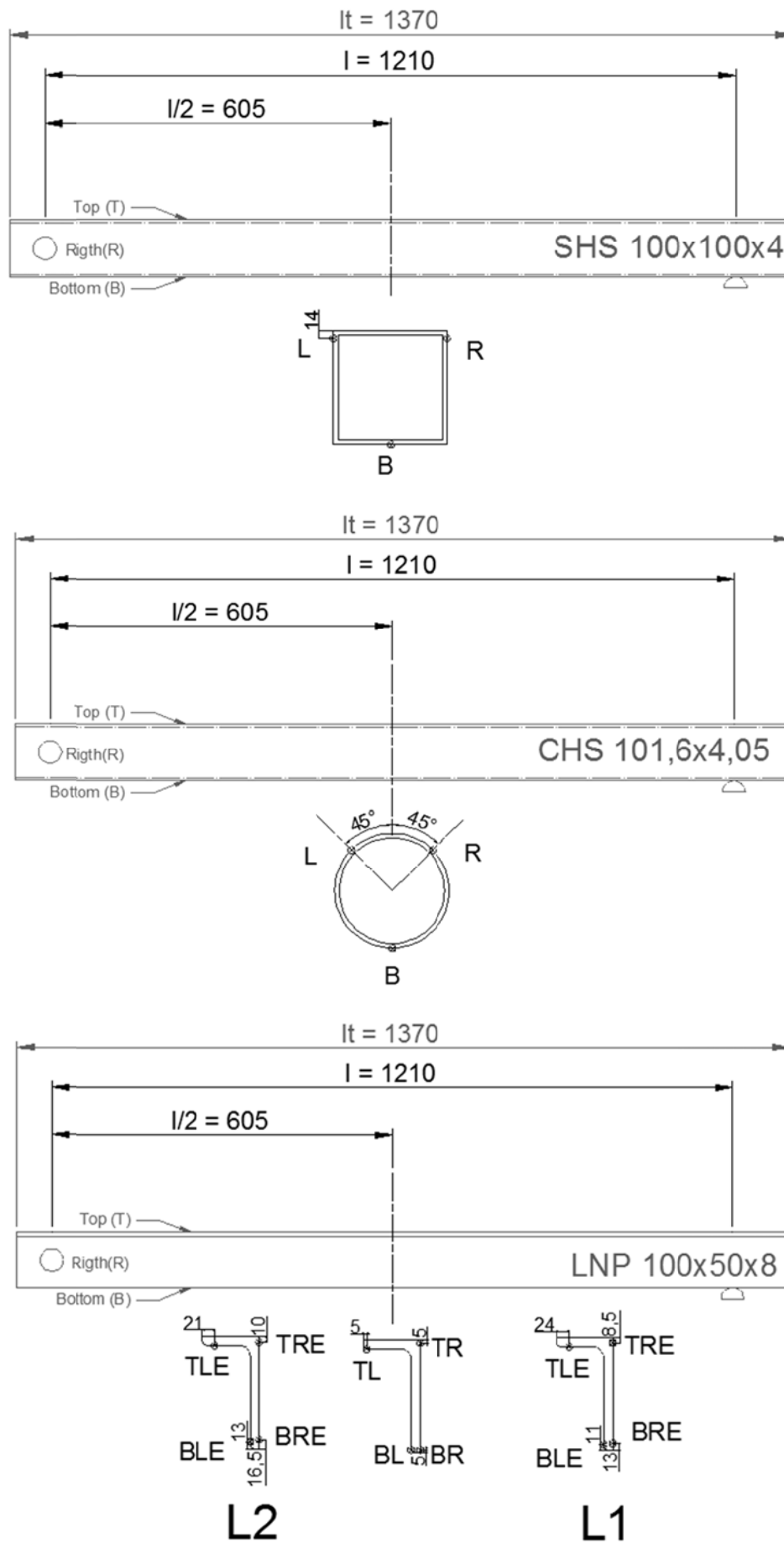


Figura 13 - Localização dos extensómetros nos elementos para as várias secções transversais.

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

Todo o procedimento utilizado na colocação desta instrumentação é descrito noutra relatório.

Estes extensómetros encontravam-se ligados a um PC, através de um sistema de aquisição de dados, “Spyder”. Os dados foram processados num programa de tratamento de dados Catman Easy.

Na Figura 14 mostra os elementos com os extensómetros já instalados, prontos a levar para o ensaio.

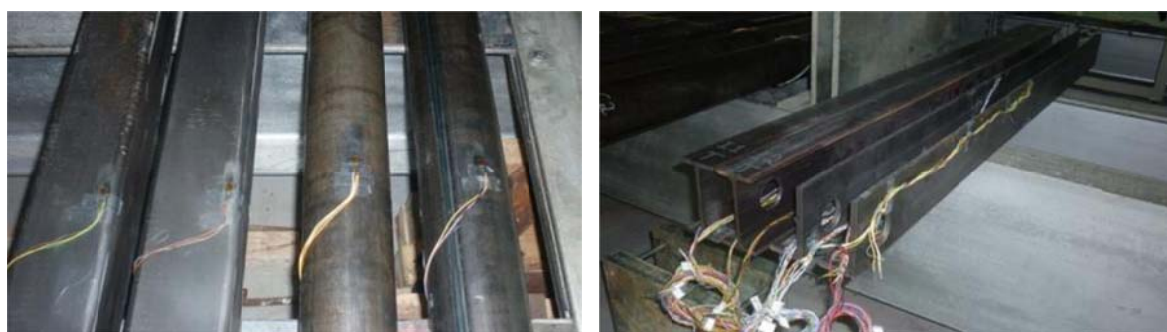


Figura 14 – Elementos com extensómetros instalados.

### 5.3. Em condições de incêndio

Os elementos utilizados nestes ensaios foram instrumentados com sensores de temperatura, termopares. A colocação destes termopares será descrita num **capítulo próprio (dizer o capítulo)** que descreve todo o processo de instrumentação, incluindo a pintura dos elementos.

Todos os termopares foram colocados de acordo com a norma prEN 13382-8 (6), considerando um elemento do tipo coluna. A localização destes termopares é adoptada em três secções, conforme descrito na Figura 15, e nas diferentes secções foram instalados em quatro ou cinco pontos, consoante a forma da secção transversal do elemento, ver Figura 16.

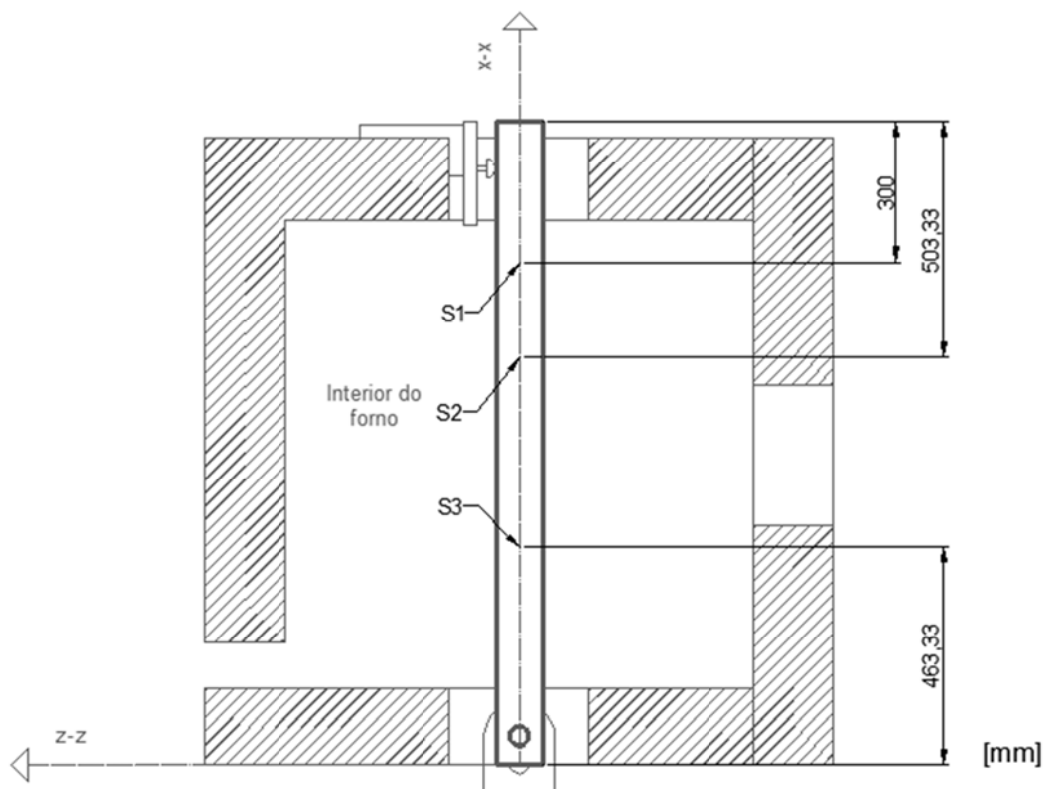
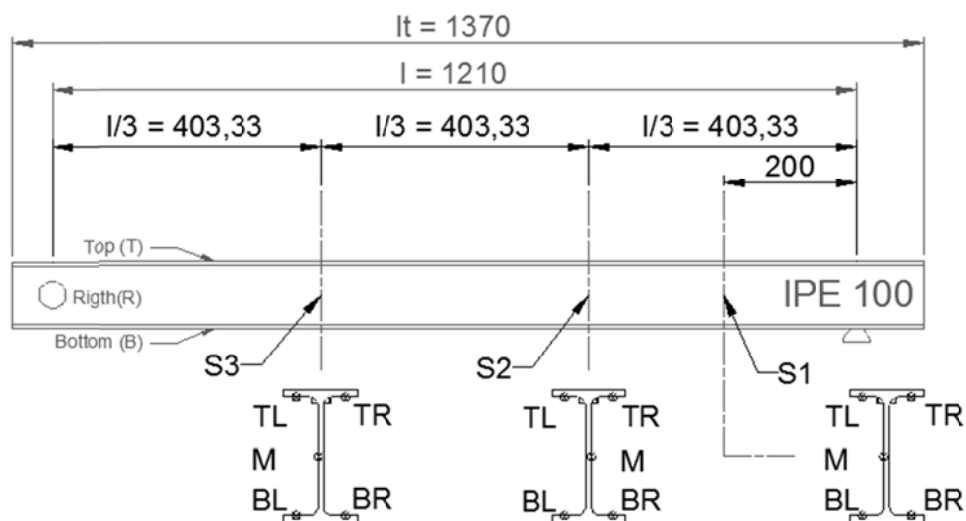


Figura 15 - localização das secções de leitura de temperaturas no aço



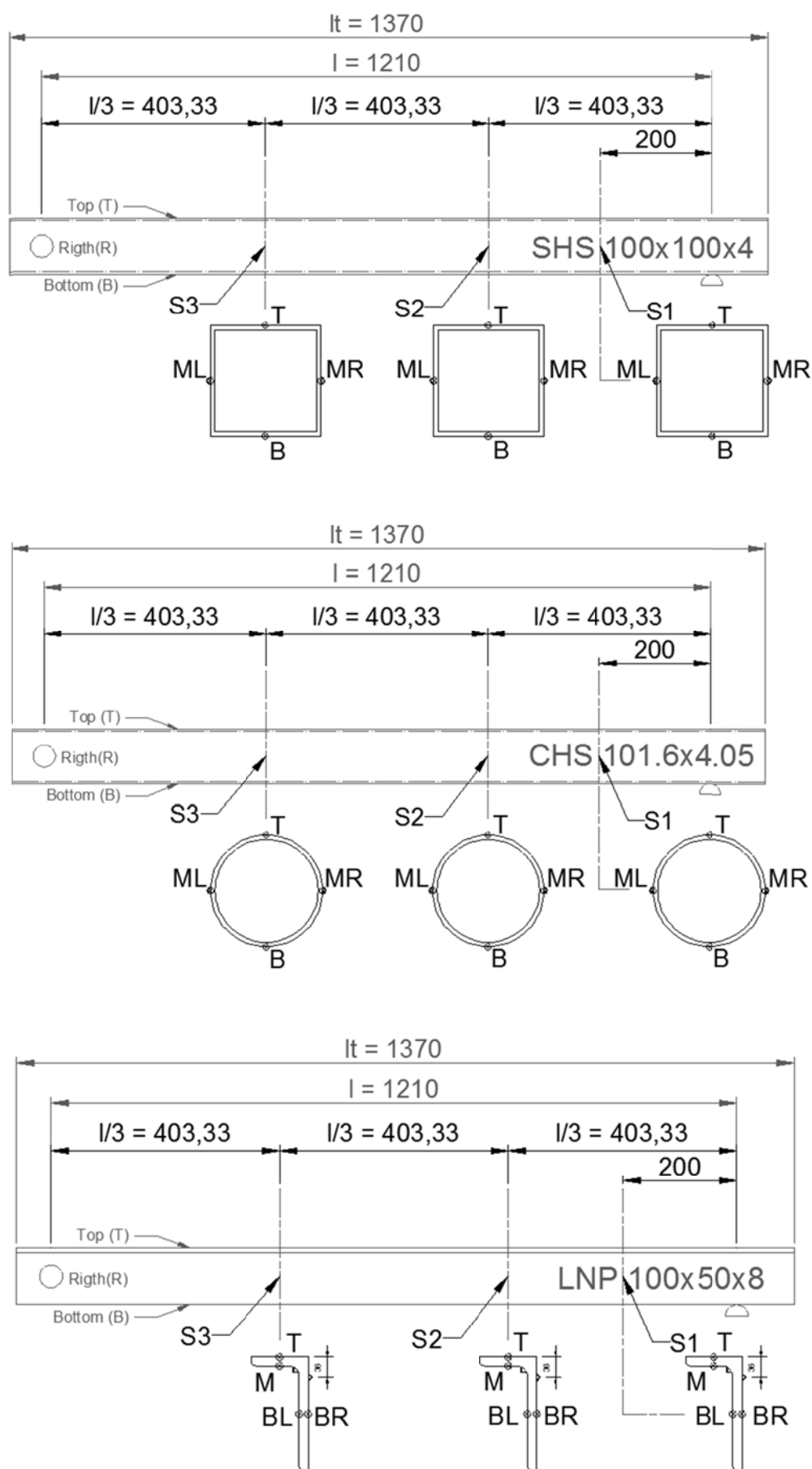


Figura 16 - Localização dos sensores de temperatura (termopares) nas diferentes secções.

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 (4).

Na Figura 17 mostra alguns elementos com os sensores de temperatura instalados e esses sensores protegidos com as cantoneiras.



Figura 17 – Elementos com sensores de temperaturas (termopares) instalados e protegidos.

A pintura destas vigas foi elaborada dentro das condições exigidas e recomendadas pelo fabricante. Foi efectuada num espaço exterior, utilizando um



suporte, mantendo os elementos suspensos. A espessura média da secção foi sendo controlada até se atingir o valor pretendido. 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 18, estão representadas todas as fases descritas anteriormente, incluindo a pintura, controlo dimensional e acondicionamento.



Figura 18 – Fases de pintura dos elementos (pintura, controlo dimensional e acondicionamento).



#### 5.4. Procedimento de ensaio

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

A medição de espessura dos elementos foi elaborada de acordo com a norma prEN 13381-8 (6), sendo definidas 5 secções para a verificação da espessura conforme representados na Figura 19.

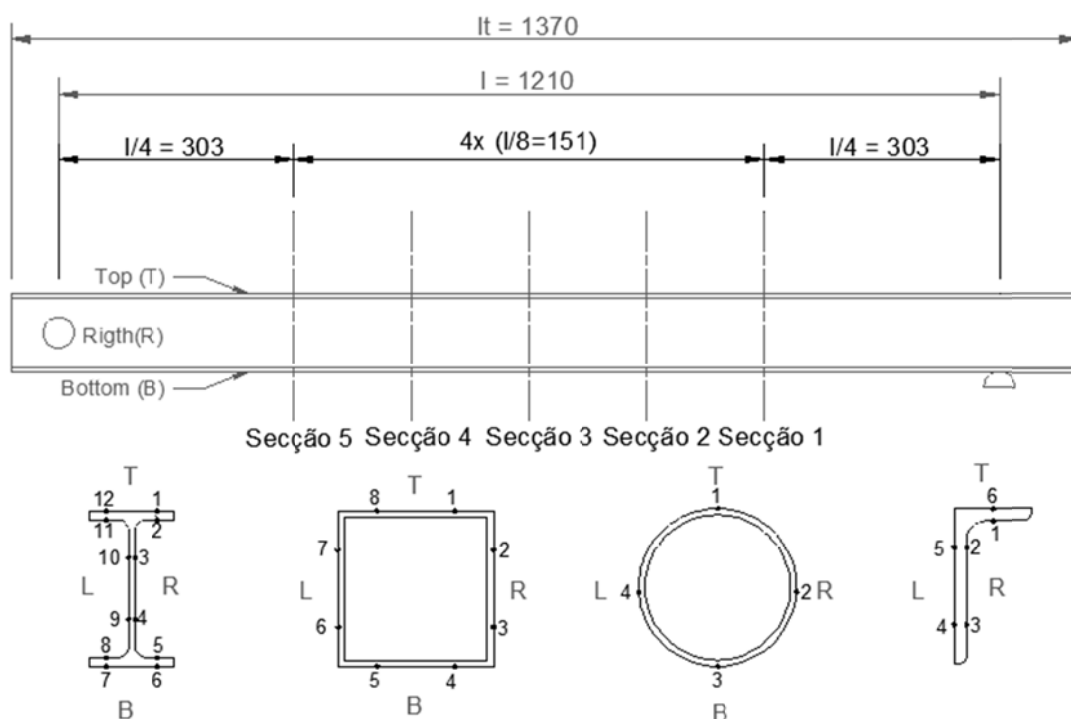


Figura 19 - Localização dos pontos de controlo de espessura de tinta nas várias secções.



Figura 20 – Observação do controlo dimensional da espessura de tinta nos elementos.

Na Figura 20 pode-se observar o controlo dimensional da espessura de tinta nos elementos, momentos antes de ser iniciado os ensaios.

Em cada procedimento de controlo dimensional da espessura de tinta elaborou-se um estudo estatístico com as leituras nos diferentes pontos definidos na Figura 19. Este estudo estatístico foi definido em média (DFT), desvio padrão, valor máximo e valor mínimo. Na Tabela 8 podemos ver um exemplo relativo aos dados obtidos na avaliação de espessura de tinta no elemento I6.

**Tabela 8 – Valores de espessura de tinta para o elemento I6 em [μm].**

Ponto	S1	S2	S3	S4	S5	Média	Variância	Desvio Padrão	Valor Máximo	Valor Mínimo
1	2000	1900	1950	1760	1580	1838	28820	170	2000	1580
2	1720	1700	1800	1920	1680	1764	9680	98	1920	1680
3	1750	1890	1950	1970	1810	1874	8680	93	1970	1750
4	1930	2000	2020	1920	1840	1942	5120	72	2020	1840
5	1970	1900	1890	1930	1850	1908	2020	45	1970	1850
6	1820	2060	1920	1840	1830	1894	10180	101	2060	1820
7	1730	2000	1840	1960	1880	1882	11220	106	2000	1730
8	1750	1790	1590	1920	1870	1784	16180	127	1920	1590
9	1720	1790	1780	1800	1730	1764	1330	36	1800	1720
10	1590	1680	1580	1490	1520	1572	5370	73	1680	1490
11	1440	1810	1590	1700	1610	1630	18850	137	1810	1440
12	1950	2050	2030	2140	2020	2038	4670	68	2140	1950
<b>Média</b>	1781	1881	1828	1863	1768	<b>1824</b>				
<b>Variância</b>	27336	16772	27070	26602	21361		<b>24184</b>			
<b>Desvio padrão</b>	165	130	165	163	146			<b>156</b>		
<b>Valor Maior</b>	2000	2060	2030	2140	2020				<b>2140</b>	
<b>Valor menor</b>	1440	1680	1580	1490	1520					<b>1440</b>

Na Tabela 9 encontram-se definidos os valores medidos de espessura de tinta seca, DFT (em inglês: Dry Film Thickness) é o valor de espessura médio registado ao longo do elemento, para todos os elementos com protecção de tinta intumescente. Ainda podemos observar o estudo estatístico obtido na leitura dos pontos (média (DFT), desvio padrão, valor máximo e valor mínimo).

Tabela 9 – Valores registados do controlo dimensional da espessura de tinta.

Section	Name	Average thickness of the specimen [ $\mu\text{m}$ ]			
		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 medida a imperfeição geométrica, com o auxílio de um feixe laser, ver Figura 21, e com o auxílio de uma régua é observada o afastamento do perfil a meio vão, em relação ao feixe laser.



Figura 21 – 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 encontravam-se desalinhados. Na Tabela 10 podemos observar os resultados da análise sobre a imperfeição geométrica medida nos elementos de secção transversal IPE e LNP.

Tabela 10 – 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	--

Antes de iniciar o ensaio era efectuada uma verificação em todo o sistema de aquisição de dados, era verificado a verticalidade do elemento (nível), o bom

isolamento dos apoios e era efectuado a aproximação do sistema de carga com o elemento, ver Figura 22.



**Figura 22 – Demonstração do isolamento nos apoios das extremidades.**

Na Figura 23 observa-se o estado inicial para um ensaio em condições de incêndio.

Todo o procedimento de ensaio encontra-se de acordo o estipulado nas normas de ensaio em condições de incêndio para elementos com protecção reactiva, (4) e (6).



**Figura 23 – Sistema pronto a iniciar um ensaio ao fogo.**



A carga foi incrementada até atingir o valor definido para cada grau de utilização.

O forno está programado para seguir uma curva de incêndio normalizada, ISO834, fazendo a leitura da temperatura dentro do forno através de um termopar de placa assegurando as condições de ensaio definidas para a curva de fogo normalizada.

Na Figura 24 encontra-se representado todo o equipamento utilizado nos ensaios.



Figura 24 - Durante um ensaio com todo o equipamento utilizado.

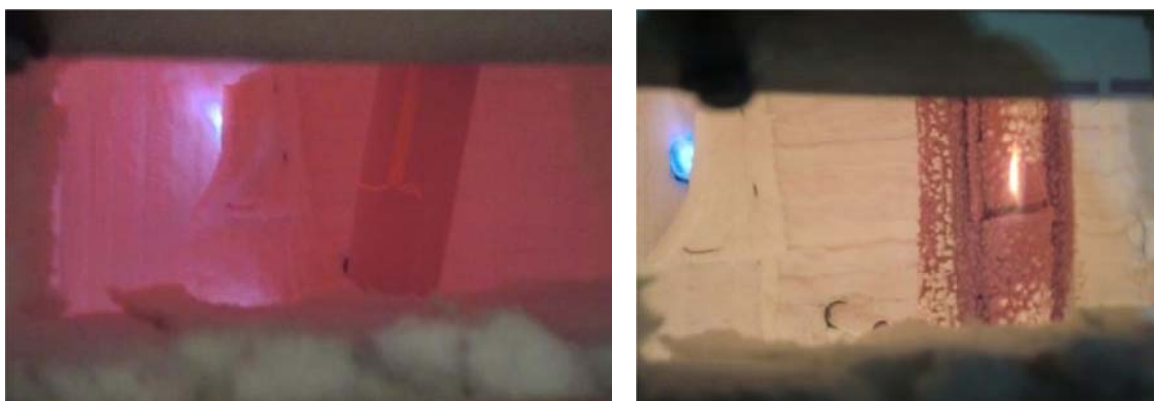


Figura 25 – Representação de dois instantes referentes a dois ensaios C4 e I6.

Na Figura 25 observam-se dois instantes em 2 ensaios distintos, à esquerda está representado um elemento de secção transversal CHS sem protecção, à direita um elemento de secção IPE protegido com tinta intumescente em que se pode observar a evolução de tinta intumescente à superfície do elemento.

O final do ensaio foi determinado para ultrapassar as condições impostas pela norma (4). Tendo em consideração o deslocamento e a velocidade do ponto de aplicação da carga, o ensaio foi terminado quando já se tinham ultrapassados os valores referidos, estes valores encontram-se descritos no ponto 6.

Na Figura 26 estão representados dois ensaios distintos logo após a curva de fogo ter sido desligada, mas com os queimadores do forno ainda em funcionamento. 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).

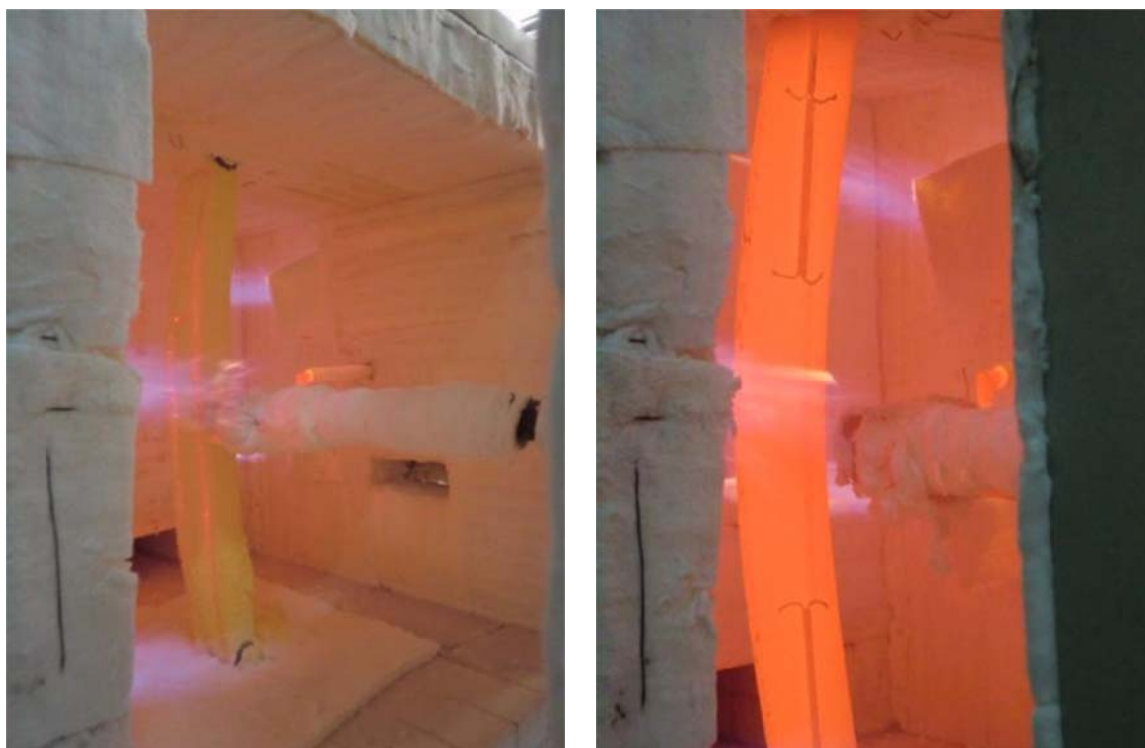


Figura 26 – Representação do final de dois ensaios (I6 e L3) ainda com os queimadores ligados.

Na Figura 27 observam-se dois estados limites últimos diferentes, à esquerda uma ruptura por encurvadura lateral (I3), e à direita uma ruptura por rótula plástica (S6).



Figura 27 – Estado limite último do ensaio I3 e do ensaio S6.

### 5.5. Critério para determinação de resistência ao fogo.

O critério utilizado para determinar o tempo de resistência ao fogo está definido na norma europeia EN 1362-1 (4). 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, as seguintes condições:

Limite de deslocamento a meio vão:

$$\delta = \frac{l^2}{400d} \text{ [mm]} \quad (1)$$

Limite de taxa de deslocamento (velocidade):

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



Em que  $d$  representa o valor da distância entre a fibra mais comprimida e a fibra mais traccionada no, elemento em condições de temperatura ambiente;  $l$  representa o comprimento inicial do elemento a ser testado.

No nosso caso o valor de limite de deslocamento é constante, pois o valor de  $l$  e  $d$  são constantes e este valor é atingido antes do valor de  $l/30$ , logo o valor de limite de taxa de deslocamento é que define o limite de resistência ao fogo, depois de ter-se atingido valores superiores a  $l/30$ .

Ainda foi representada uma comparação entre os critérios adoptados nos ensaios propostos em EN 1362 (4), e os critérios propostos pela norma Britânica de testes de resistência ao fogo BS 476:Parte 20 (5). 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 (5), é atingido assim que um destes parâmetros seja ultrapassado:

Deslocamento a meio vão:

$$\delta = \frac{l}{20} \text{ [mm]} \quad (3)$$

Taxa de deslocamento (velocidade):

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{l^2}{9000d} \text{ [mm/min]} \text{ quando } (\delta > l/30) \quad (4)$$

Em que  $d$  representa o valor da profundidade transversal do elemento estrutural;  $l$  representa o comprimento inicial do elemento a ser testado.

## 6. Resultados experimentais.

### 6.1. À temperatura ambiente.

#### 6.1.1. Ensaio I1.

Este elemento de secção transversal IPE 100 (S275), foi testado à flexão em condições de temperatura ambiente, a 12-05-2010, foram aplicados incrementos de carga de 5000 [N].

No Gráfico 5 está representada a taxa de variação de força com o tempo.

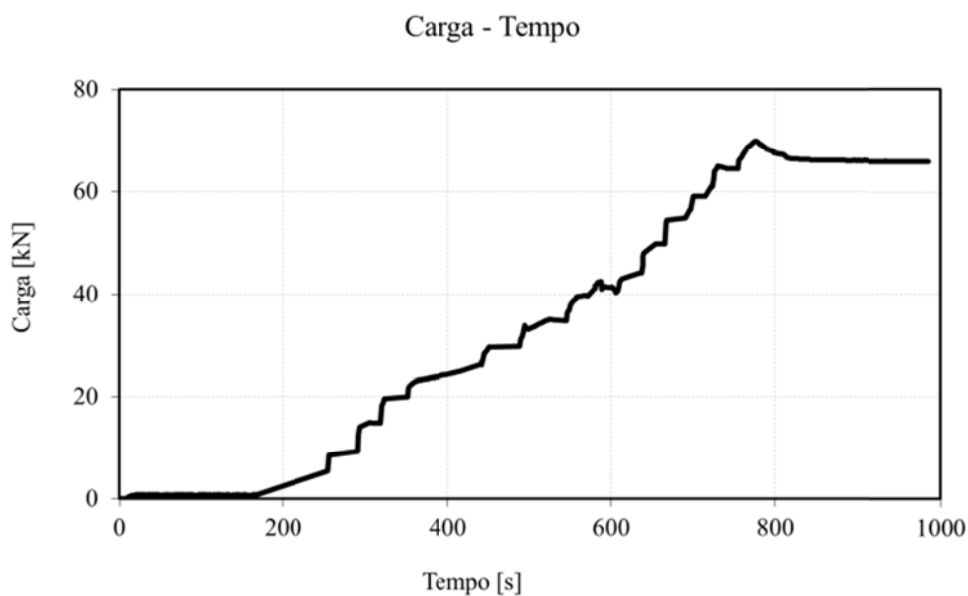


Gráfico 5 - Patamares de aplicação da carga no ensaio I1.

No Gráfico 6 estão representados os deslocamentos (DV e DH), em conjunto com a evolução de força aplicada.

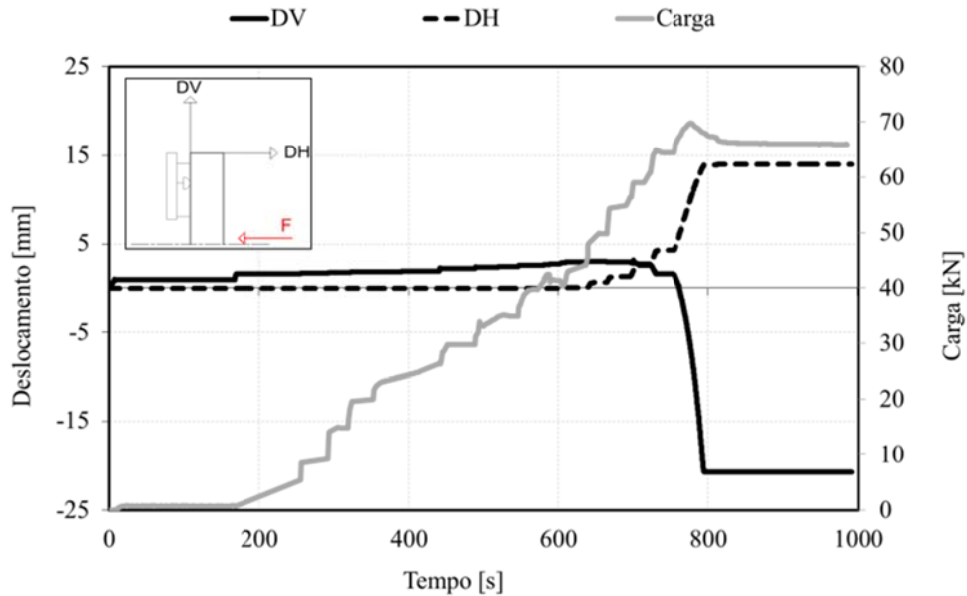


Gráfico 6 - Leitura dos LVDT's para o ensaio I1.

No Gráfico 7, estão representadas os valores das deformações até ao momento a que se procede o dano do próprio extensómetros (falta de aderência, deformação excessiva, etc.) a par da força aplicada.

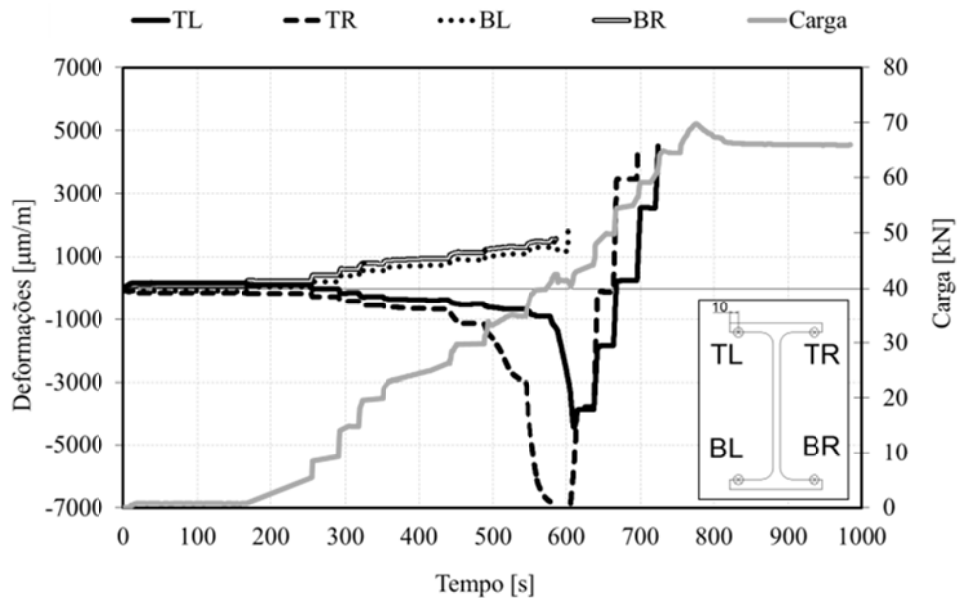


Gráfico 7 - leitura das deformações para o ensaio I1.

No Gráfico 8, representa-se a variação do deslocamento com a carga, verificando-se um fenómeno de instabilidade lateral torsional, como se pode ver representada na Figura 28.

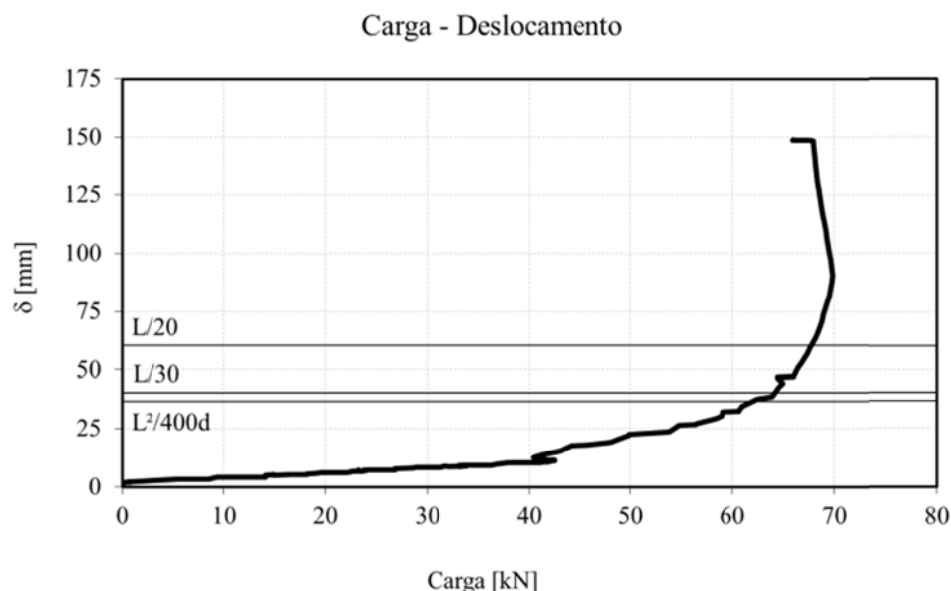


Gráfico 8 - Carga/deslocamento para o ensaio I1.

No Gráfico 9, estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento, em função da carga aplicada. De notar que inicialmente a secção sofre rotação no apoio e provoca um DV positivo, alterando posteriormente o valor para negativo provocado pelo deslocamento do elemento no apoio, devido à encurvadura lateral torsional a meio vão.

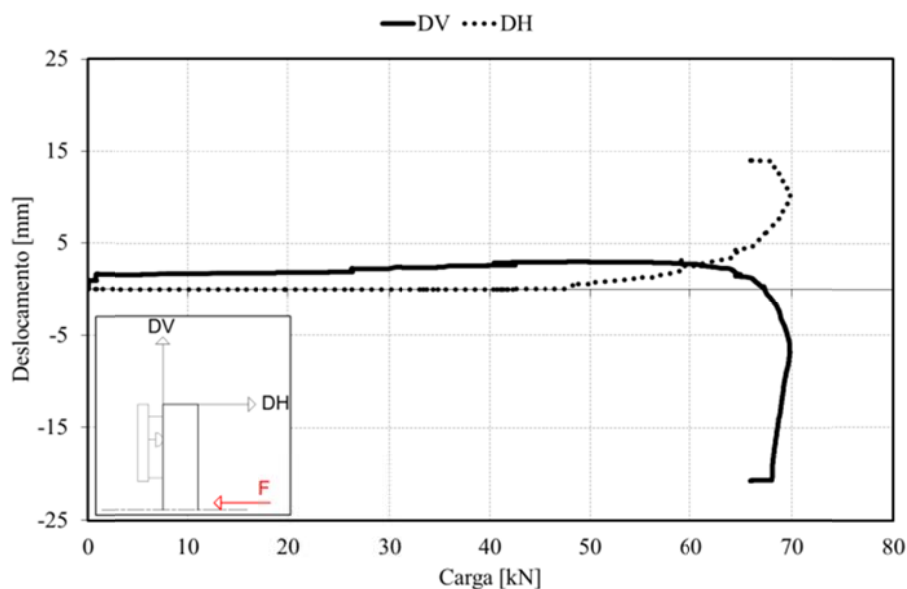


Gráfico 9 - Carga/LVDT's para o ensaio I1.

No Gráfico 10, estão representadas as deformações em função do valor de carga aplicada. Importa referir que as deformações identificadas por TL e TR

alteram o seu estado de compressão para tracção. Esta alteração deve-se ao movimento da secção (lateral e rotação).

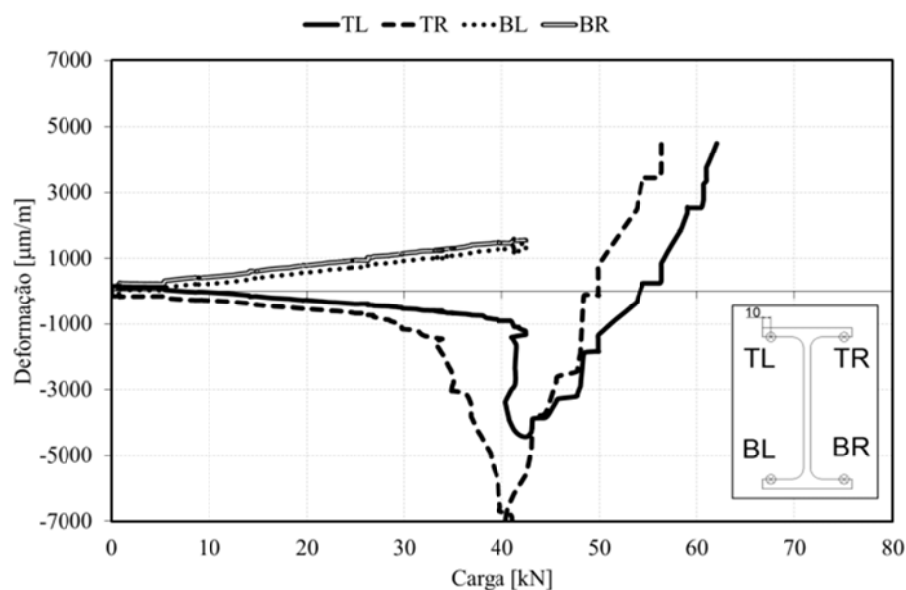


Gráfico 10 - Deformações/carga para o ensaio I1.



Figura 28 - Fotos da deformação sofrida no ensaio I1.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, conforme se pode observar na Figura 28. O ensaio foi realizado dentro do forno de resistência, mas sem qualquer acção térmica.

### 6.1.2. Ensaio I2.

Este perfil foi testado à flexão, em condições de temperatura ambiente a 13-05-2010, foram aplicados incrementos de carga de 5000N.

No Gráfico 11, está representada a taxa de variação de força com o tempo.

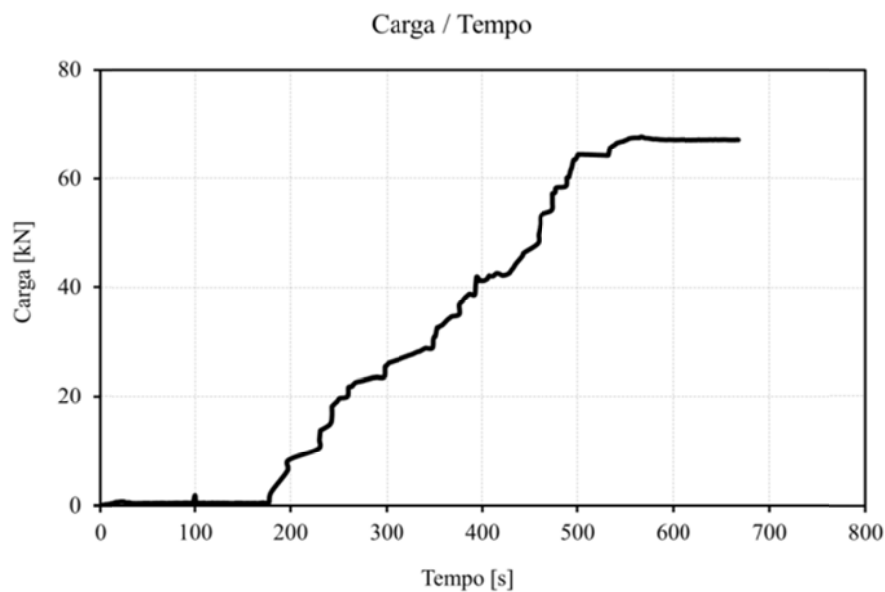


Gráfico 11 - Patamares de aplicação da carga no ensaio I2.

No Gráfico 12 estão representados os deslocamentos (DV e DH), em conjunto com a evolução de força aplicada.

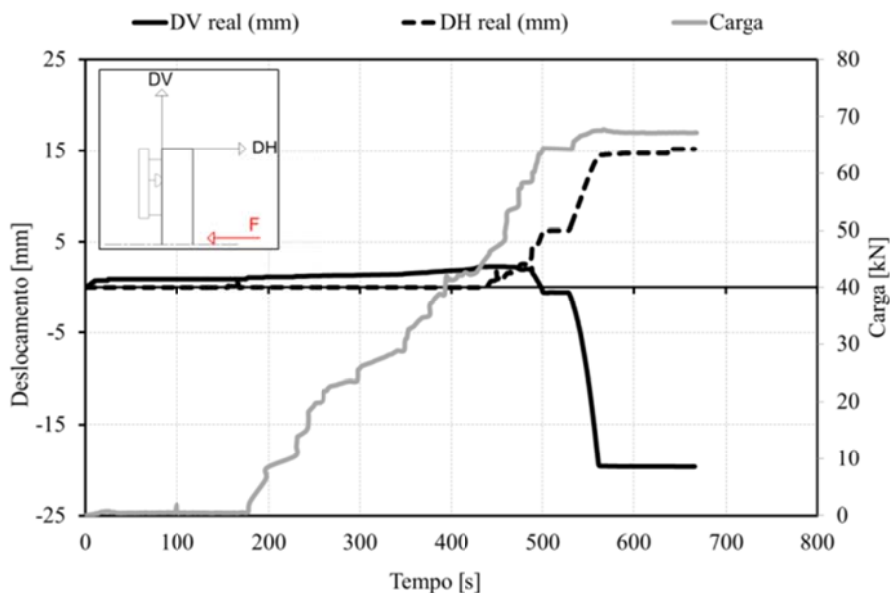


Gráfico 12 - Leitura dos LVDT's para o ensaio I2.

No Gráfico 13, estão representadas os valores das deformações até ao momento a que se procedo o dano do próprio extensómetros (falta de aderência, deformação excessiva, etc.), a par da força aplicada.

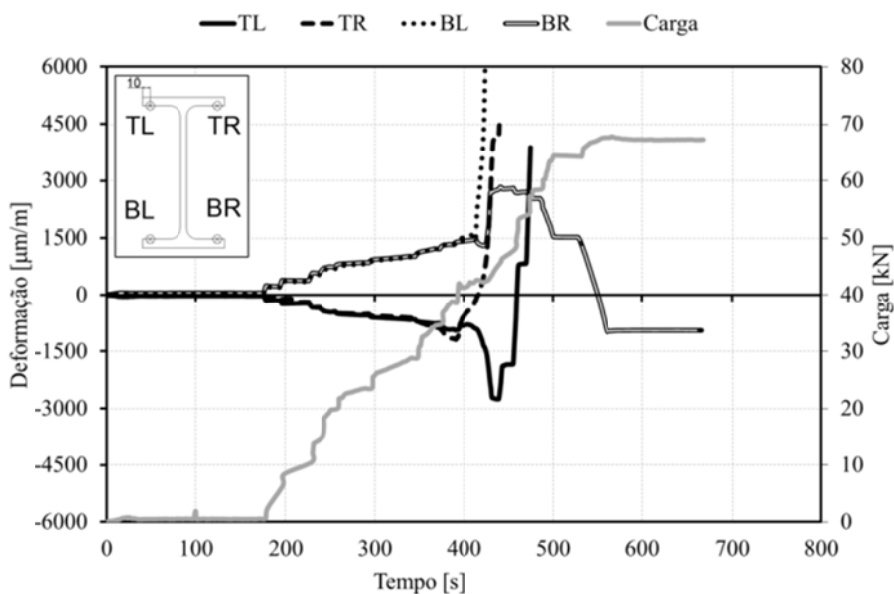


Gráfico 13 - Leitura das deformações para o ensaio I2.

No Gráfico 14, representa-se a variação do deslocamento com a carga, verificando-se mais uma vez, um fenómeno de instabilidade lateral torsional.

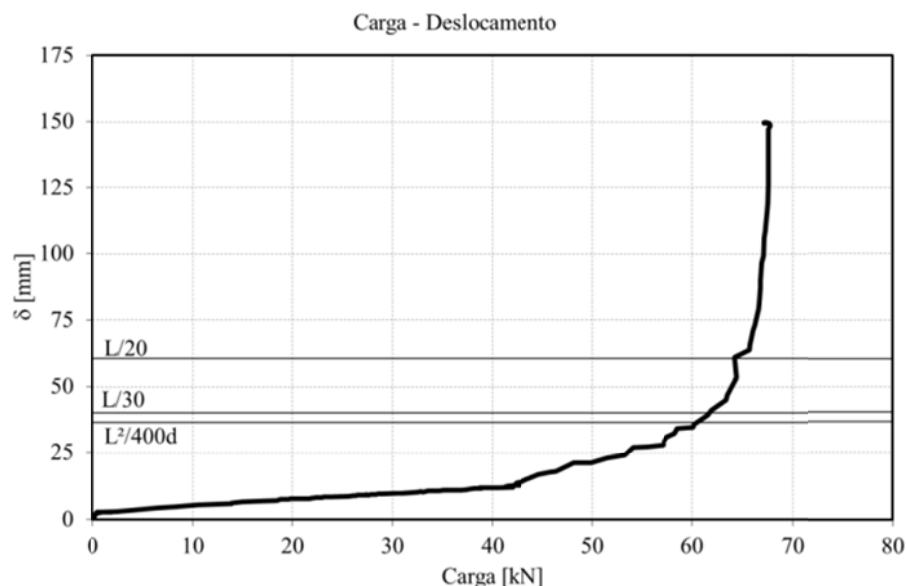


Gráfico 14 - Carga/deslocamento para o ensaio I2.

No Gráfico 15, estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento, em função da carga aplicada. De notar um comportamento idêntico a I1, devido à encurvadura lateral torsional.

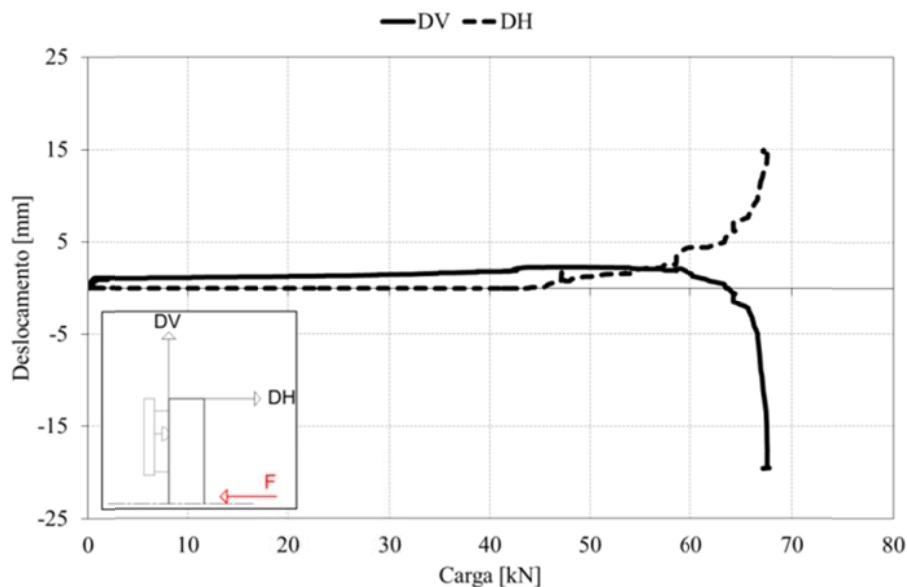
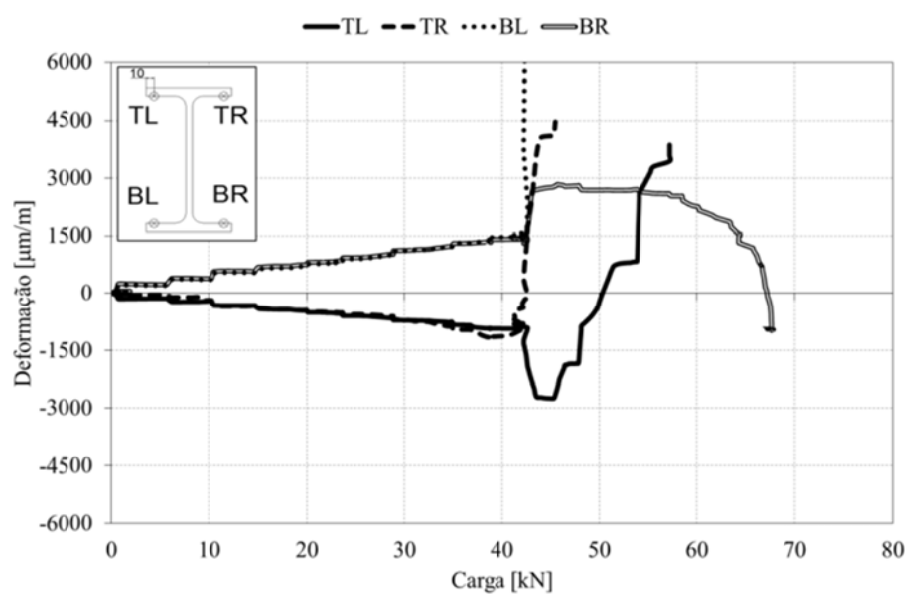


Gráfico 15 - Carga/LVDT's para o ensaio I2.

No Gráfico 16, estão representadas as deformações em função do valor de carga aplicada. Importa referir que as deformações identificadas por TL e TR alteram o seu estado de compressão para tracção. Esta alteração deve-se ao movimento da secção (lateral e rotação). O extensómetros de BR poderá ter



perdido a sua capacidade de leitura, outro motivo desconhece-se para passar a um estado de compressão.



**Gráfico 16 - Deformações/carga para o ensaio I2.**



**Figura 29 - Fotos da deformação sofrida no ensaio I2.**

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, conforme se pode observar na Figura 29. O ensaio foi realizado dentro do forno de resistência, mas sem qualquer acção térmica.

### 6.1.3. Ensaio S1.

Este elemento de secção transversal SHS 100x100x4 (S235), foi testado à flexão à temperatura ambiente a 14-05-2010, foram aplicados incrementos de carga de 5000 [N].

No Gráfico 18, está representada a taxa de variação de força com o tempo.

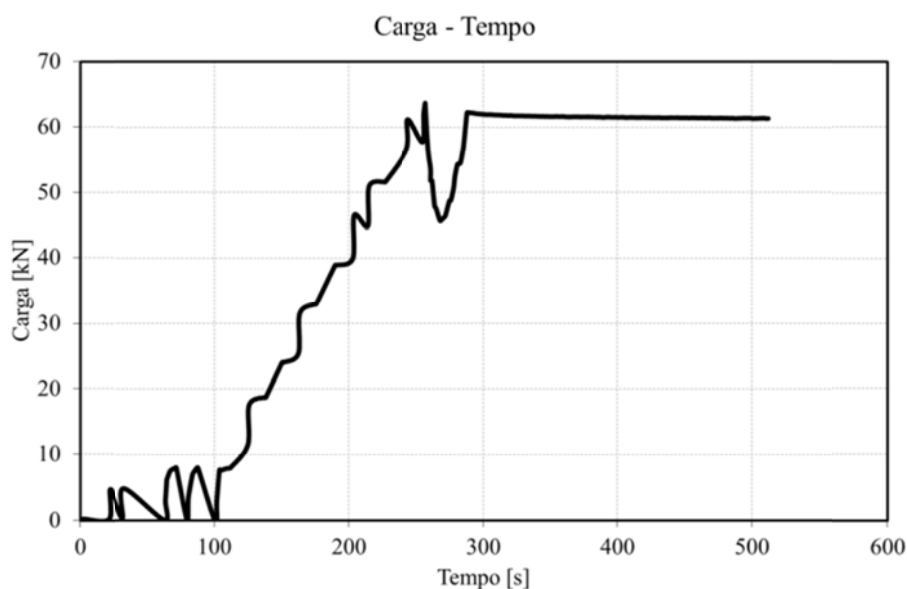


Gráfico 17 - Patamares de aplicação da carga no ensaio S1.

No Gráfico 18 estão representados os deslocamentos (DV e DH), em conjunto com a evolução de força aplicada.

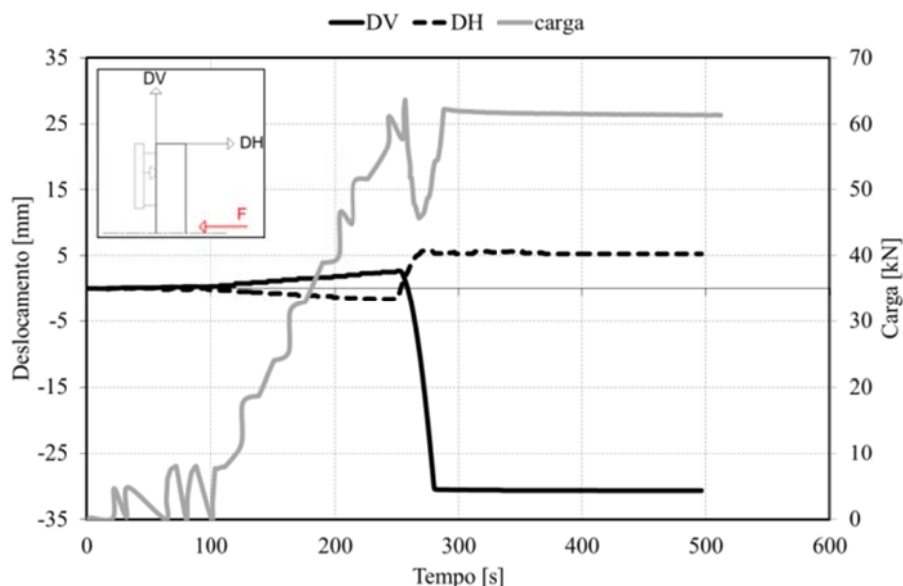


Gráfico 18 - Leitura dos LVDT's para o ensaio S1.

No Gráfico 19, estão representadas os valores das deformações na secção, até ao momento que o extensómetro deixou de ter capacidade de leitura, por falta de planeza ou falta de aderência. A par das deformações representa-se ainda o nível de carga ao longo do tempo.

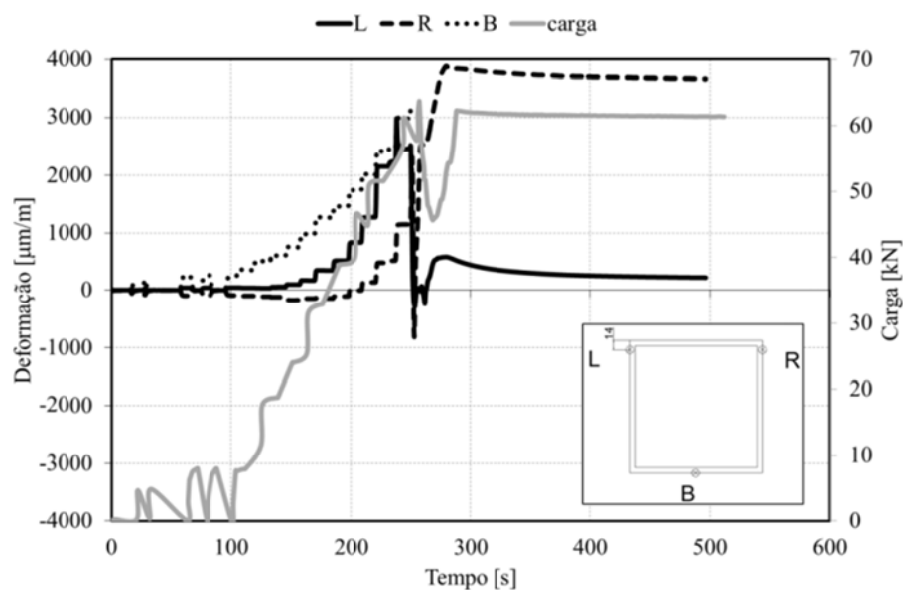


Gráfico 19 - Leitura das deformações para o ensaio S1.

No Gráfico 20, está representada o deslocamento a meio vão consoante o nível de força aplicado, até ao momento da formação da rótula plástica.

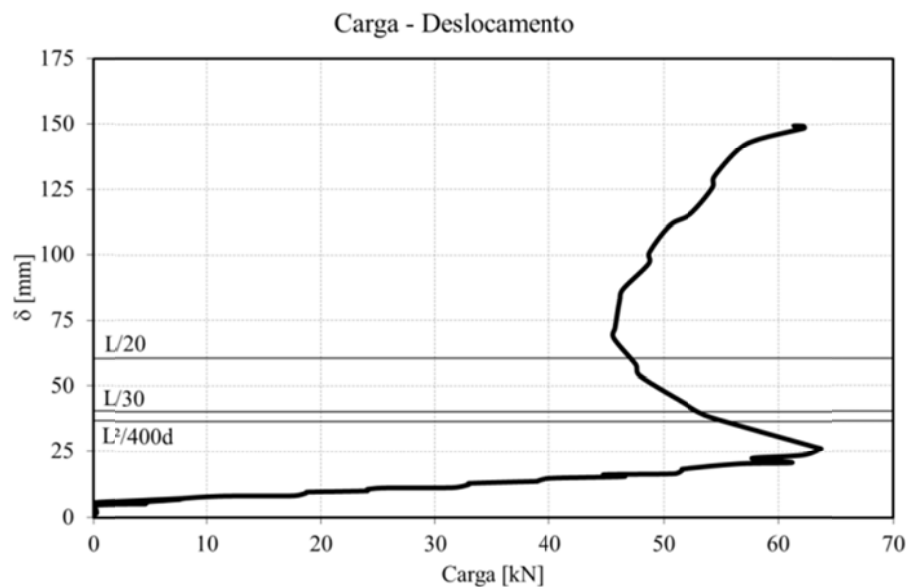


Gráfico 20 - Carga/deslocamento para o ensaio S1.

No Gráfico 21, estão representados os valores de deslocamento sofridos na extremidade do elemento em função da carga aplicada.

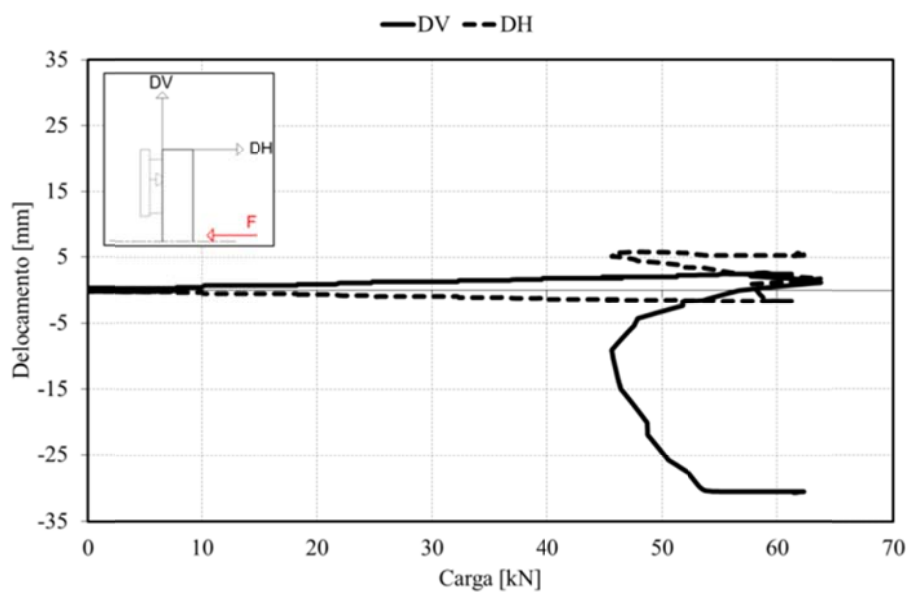


Gráfico 21 - Carga/LVDT's para o ensaio S1.

No Gráfico 22, estão representados os valores de deformação em função da carga aplicada.

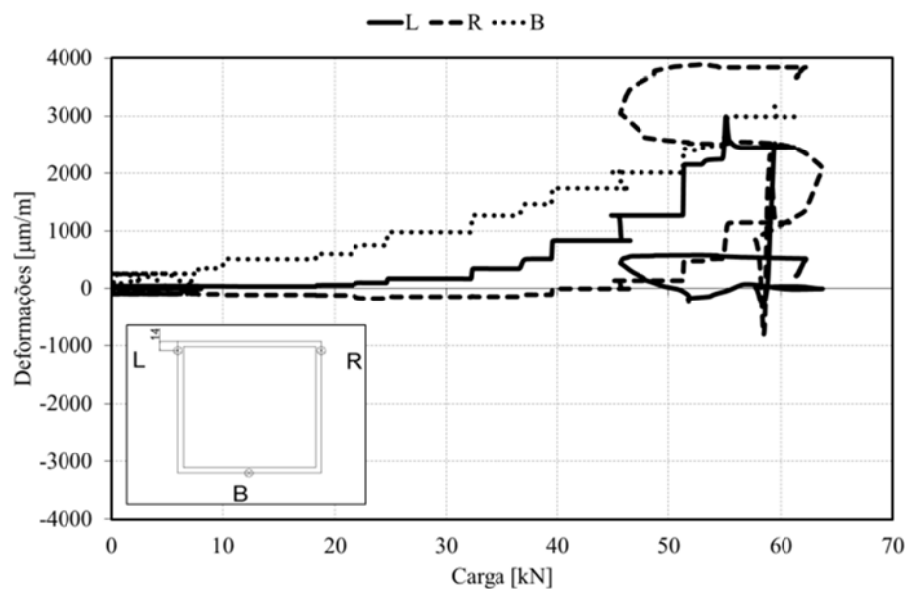


Gráfico 22 - Deformações/carga para o ensaio S1.



Figura 30 - Fotos da deformação sofrida no ensaio S1.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica como é visível na Figura 30. O ensaio foi realizado dentro do forno de resistência, mas sem qualquer acção térmica.

#### 6.1.4. Ensaio S2.

Este perfil foi testado à flexão, à temperatura ambiente a 17-05-2010, foram aplicados incrementos de carga de 5000 [N].

No Gráfico 23, está representada a taxa de variação da carga ao longo do tempo.

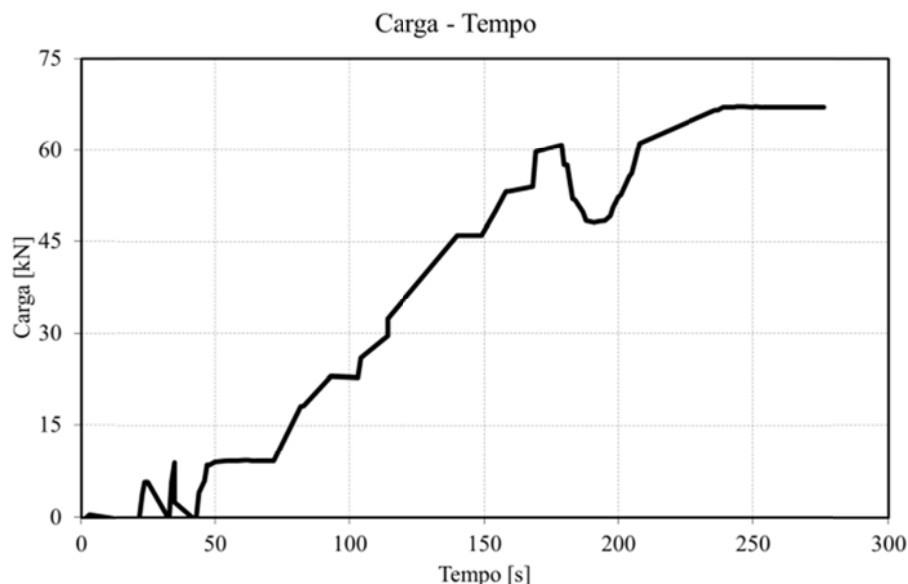


Gráfico 23 - Patamares de aplicação da carga no ensaio S2.

No Gráfico 24, estão representados os valores de deslocamento no topo do elemento ao longo do tempo, a par da variação de carga.

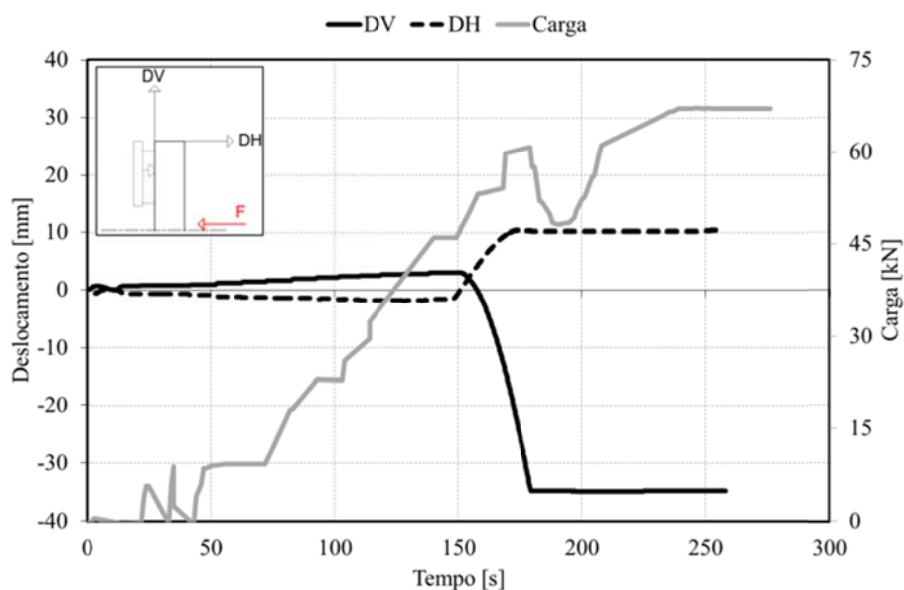


Gráfico 24 - Leitura dos LVDTs para o ensaio S2.

No Gráfico 25, estão representadas as leituras dos extensómetros ao longo do tempo, até ao momento que o extensómetro deixa de ter capacidade de leitura, devido à deformação excessiva da superfície de leitura no elemento.

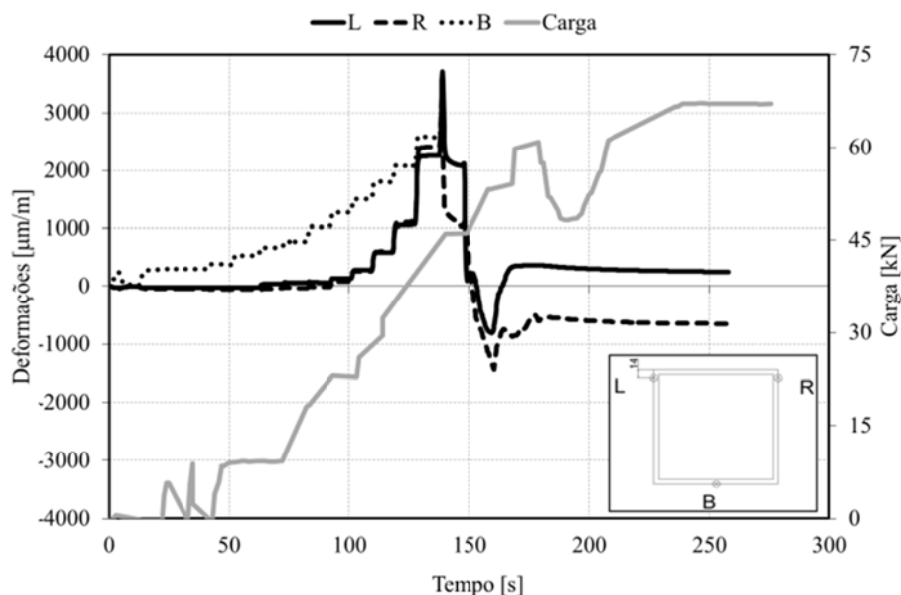


Gráfico 25 - Leitura das deformações para o ensaio S2.

No Gráfico 26, está representado o valor do deslocamento a meio vão ao longo da intensidade de carga aplicada. De notar a instabilidade local ocorrida nas faces laterais que originou uma rótula plástica, provocando a perda de capacidade para suportar a carga aplicada.

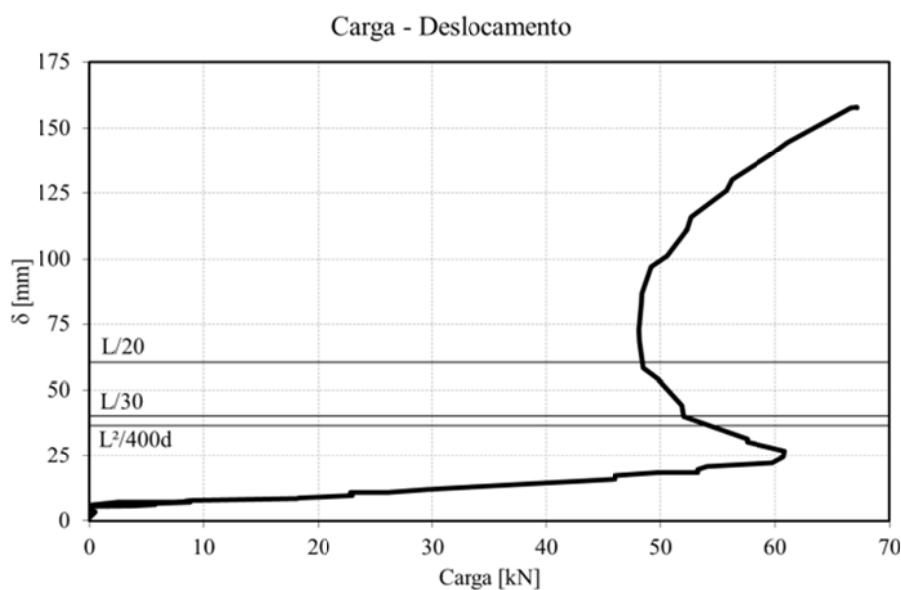


Gráfico 26 - Carga/deslocamento para o ensaio S2.

No Gráfico 27, estão representados os valores de deslocamento na extremidade do elemento, ao longo da intensidade de carga aplicada. Nota-se um registo progressivo de deslocamento negativo no DH, provavelmente devido a uma pequena deformação elástica sofrida pelo apoio superior.

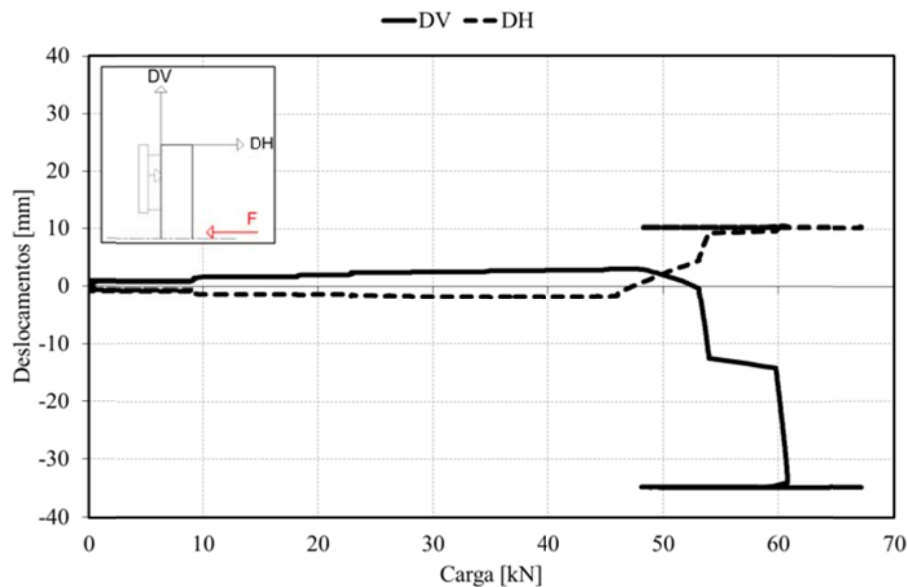


Gráfico 27 - Carga/LVDT's para o ensaio S2.

No Gráfico 28, observa-se o registo dos valores de deformação ao longo da intensidade de carga aplicada. De notar que os extensómetros R e L registam inicialmente valores de tracção, passam depois para valores de compressão.

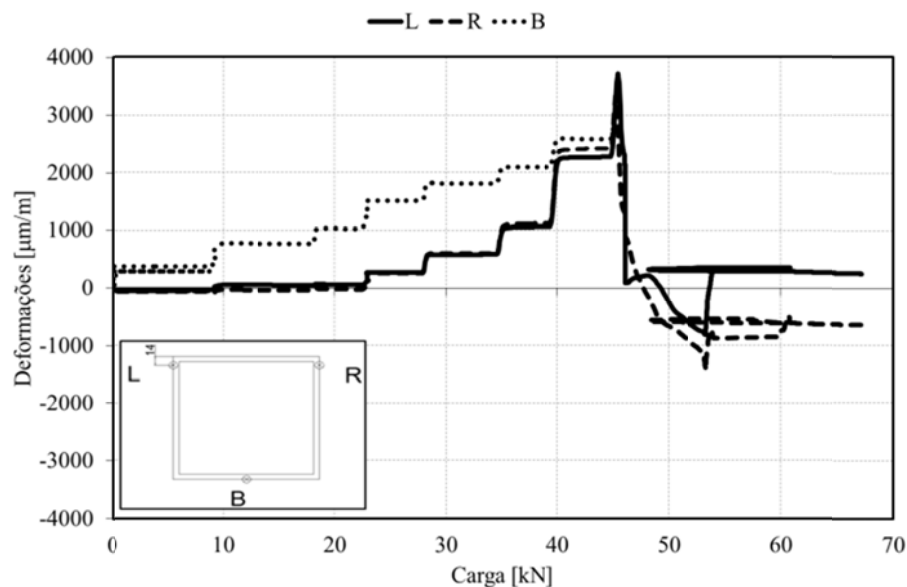


Gráfico 28 - Deformações/carga para o ensaio S2.



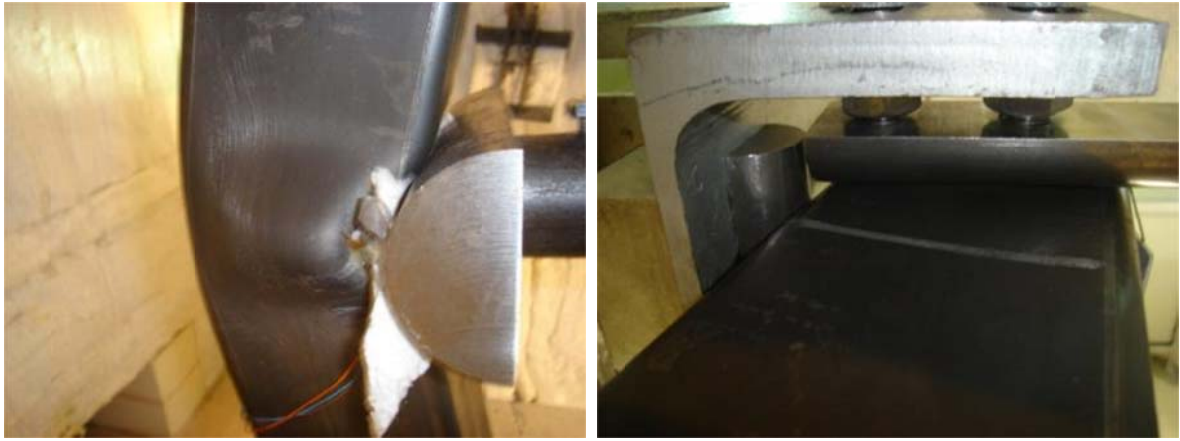


Figura 31 - Fotos da deformação sofrida no ensaio S2.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, como se pode observar na Figura 31 à esquerda, à direita está representado o deslocamento do elemento na extremidade superior, as marcas no elemento representam a posição inicial no apoio.

#### 6.1.5. Ensaio C1.

Este elemento de secção transversal CHS 101,6x4,05 (S235), foi testado à flexão à temperatura ambiente a 17-05-2010, foram aplicados incrementos de carga de 2000 [N].

No Gráfico 29, está representada a taxa de variação de força com o tempo.

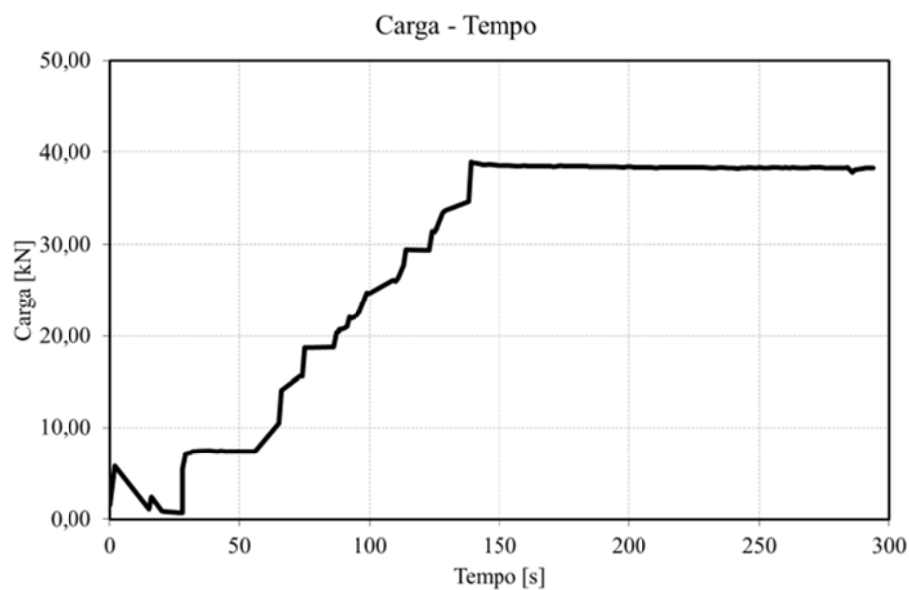


Gráfico 29 - Patamares de aplicação da carga no ensaio C1.

No Gráfico 30 estão representados os deslocamentos (DV e DH) no topo do elemento, a par da incrementação de carga.

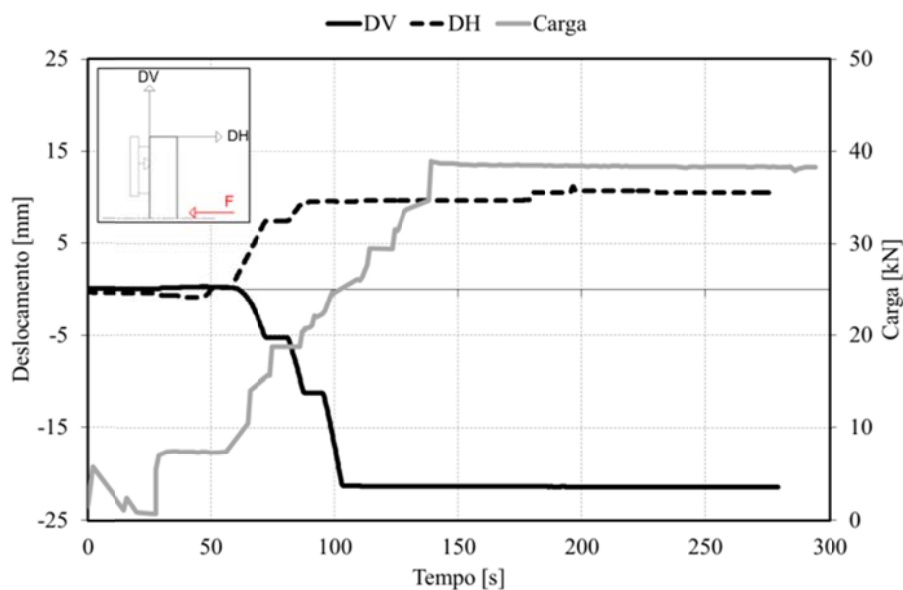


Gráfico 30 - Leitura dos LVDT's para o ensaio C1.

No Gráfico 31, estão representadas os valores das deformações na secção. A par das deformações representa-se ainda o nível de carga ao longo do tempo. No Gráfico 32, está representado um pormenor do Gráfico 31, até ao momento que o extensómetro deixou de ter capacidade de leitura, por falta de planeza ou falta de aderência.

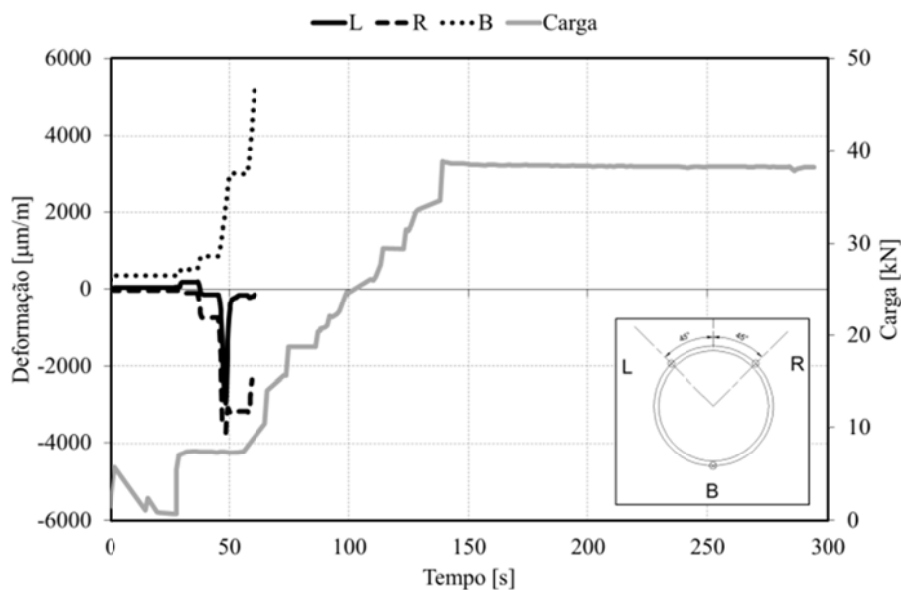


Gráfico 31 - Leitura das deformações para o ensaio C1.

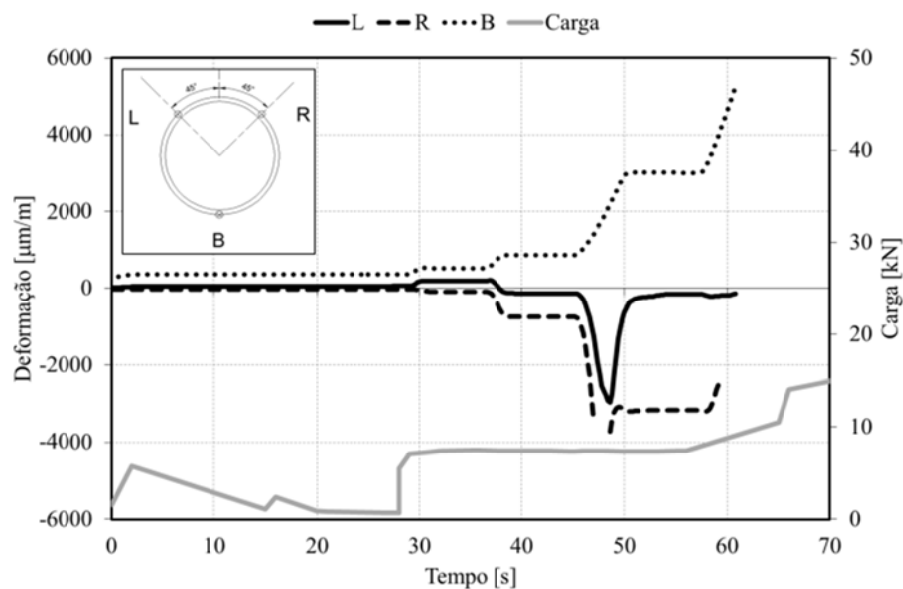


Gráfico 32 – Pormenor sobre as leituras das deformações para o ensaio C1.

No Gráfico 33, está representada o deslocamento a meio vão consoante o nível de força aplicado, até ao momento da formação da rótula plástica.

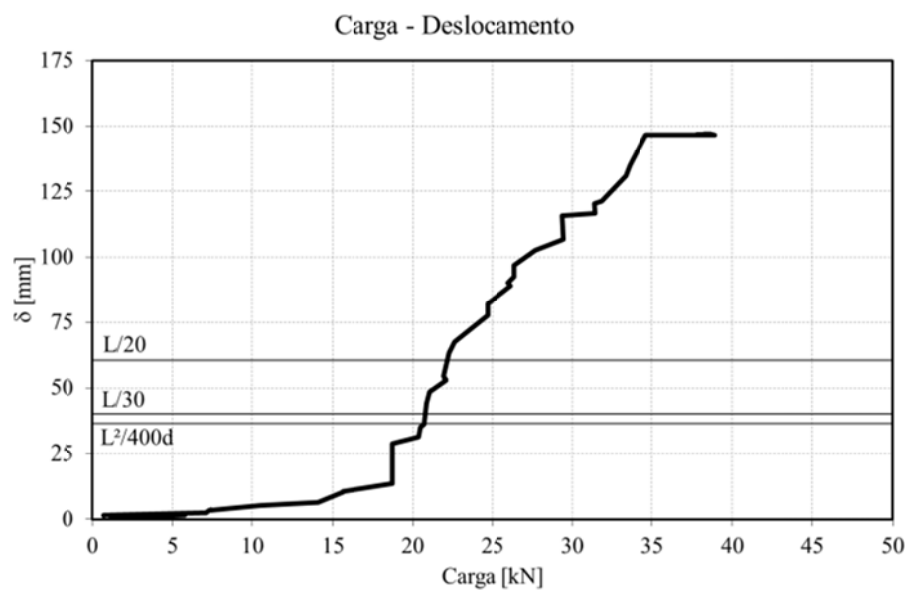


Gráfico 33 - Carga/deslocamento para o ensaio C1.

No Gráfico 34, estão representados os valores de deslocamento sofridos na extremidade do elemento em função da carga aplicada.

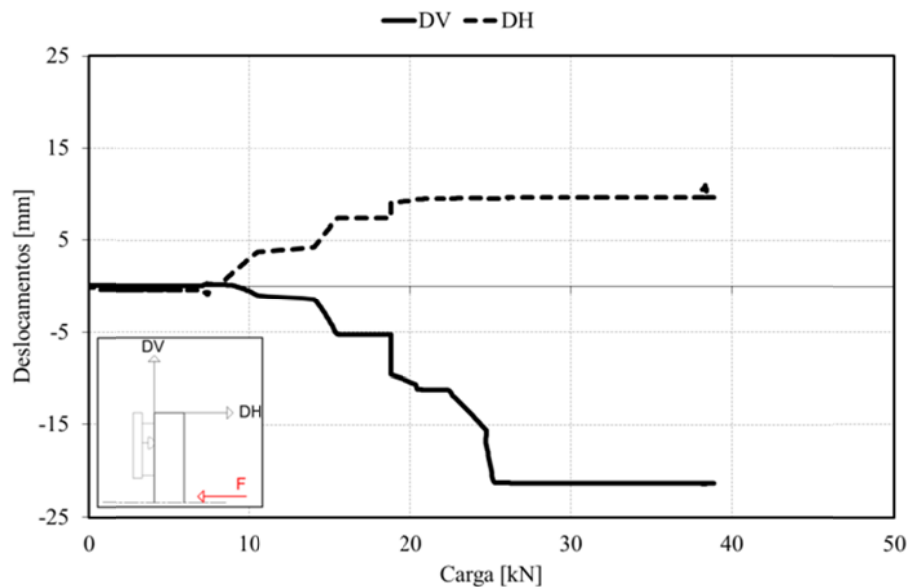


Gráfico 34 - Carga/LVDT's para o ensaio C1.

No Gráfico 35, estão representados os valores de deformação em função da carga aplicada. No Gráfico 36, está representado um pormenor do Gráfico 35, até ao momento que os extensómetros perderam capacidade de registar deformações.

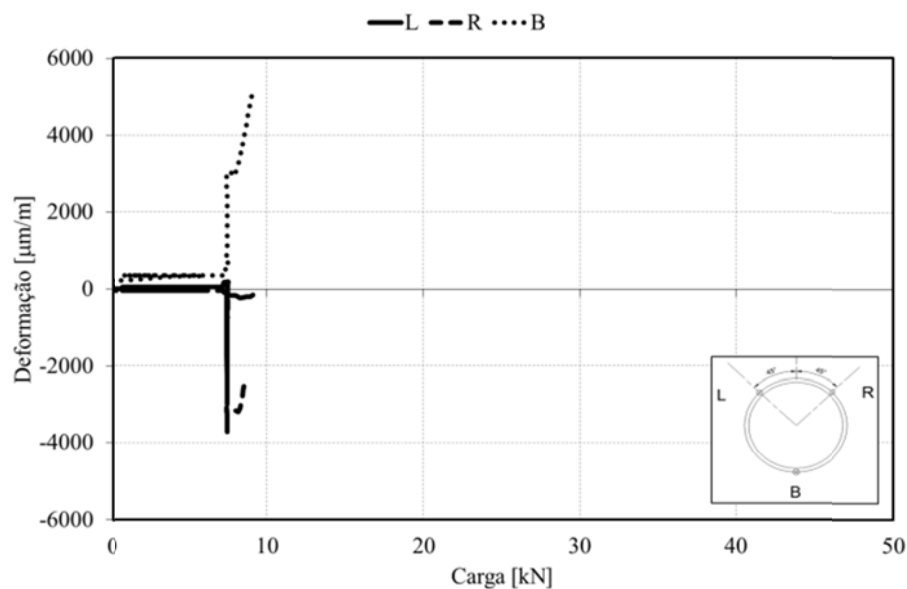


Gráfico 35 - Deformações/carga para o ensaio C1.

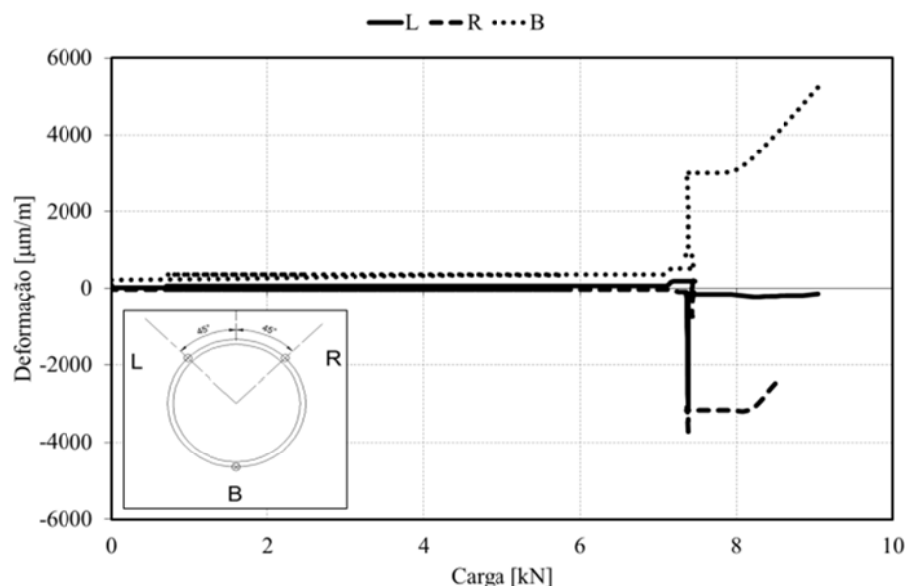


Gráfico 36 – Pormenor de deformações/carga para o ensaio C1.



Figura 32 - Fotos da deformação sofrida no ensaio C1.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica como é visível na Figura 32, em que à esquerda observa-se a deformação a meio vão, à direita observa-se o deslocamento sofrido no topo do elemento, relativamente ao apoio simples (as marcas representam a posição inicial e a posição final). O ensaio foi realizado dentro do forno de resistência, mas sem qualquer acção térmica.

#### 6.1.6. Ensaio C2.

Este perfil foi testado à flexão, à temperatura ambiente a 18-05-2010, foram aplicados incrementos de carga de 2000 [N].

No Gráfico 37, está representada a taxa de variação da carga ao longo do tempo.

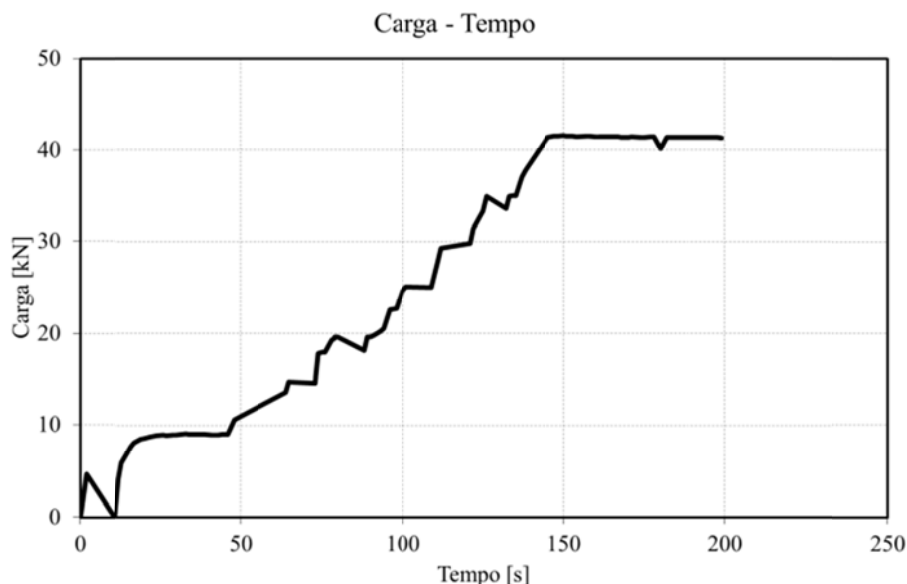


Gráfico 37 - Patamares de aplicação da carga no ensaio C2.

No Gráfico 38, estão representados os valores de deslocamento no topo do elemento ao longo do tempo, a par da variação de carga.

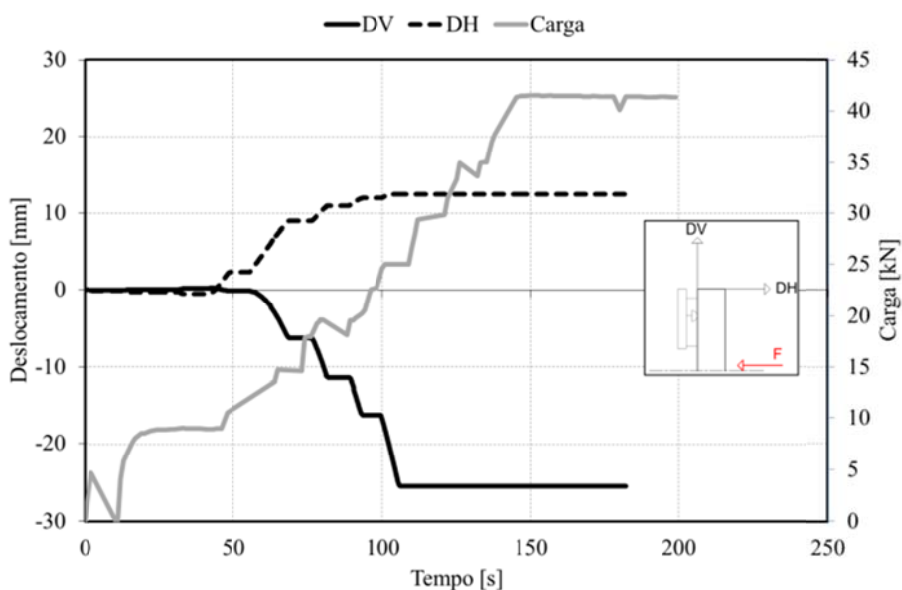


Gráfico 38 - Leitura dos LVDTs para o ensaio C2.

No Gráfico 39, estão representadas as leituras dos extensómetros ao longo do tempo. No Gráfico 40, está representado um pormenor de leitura das deformações, até ao momento que o extensómetro deixa de ter capacidade de leitura, devido à deformação excessiva da superfície de leitura no elemento

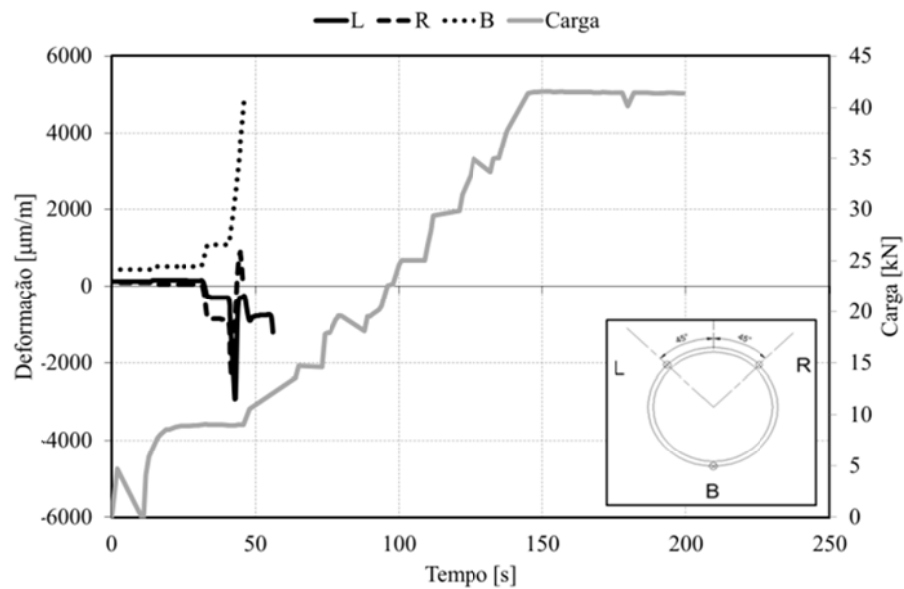


Gráfico 39 - Leituras das deformações para o ensaio C2.

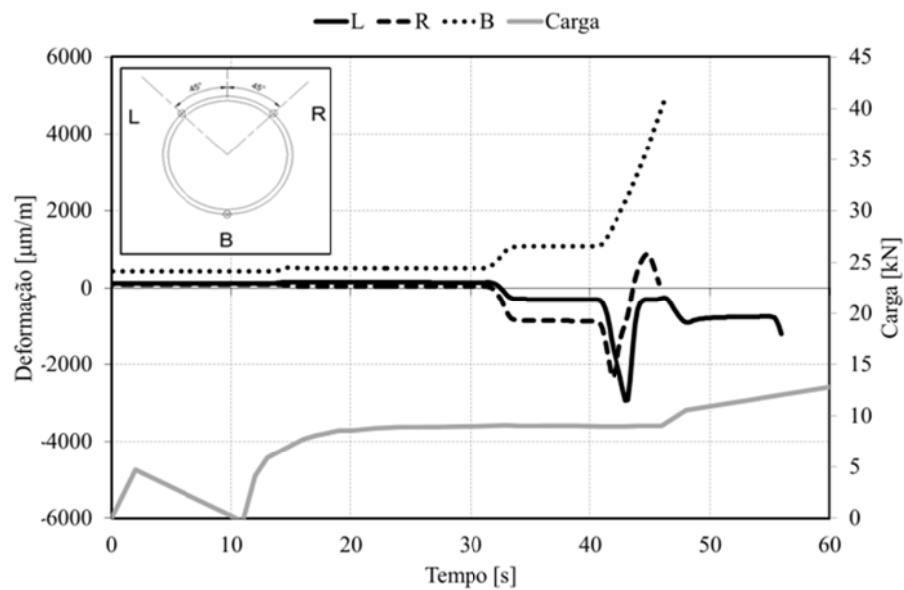


Gráfico 40 – Pormenor de leitura das deformações para o ensaio C2.

No Gráfico 41, está representado o valor do deslocamento a meio vão ao longo da intensidade de carga aplicada. De notar a instabilidade local ocorrida nas faces laterais que originou uma rótula plástica, provocando a perda de capacidade para suportar a carga aplicada.

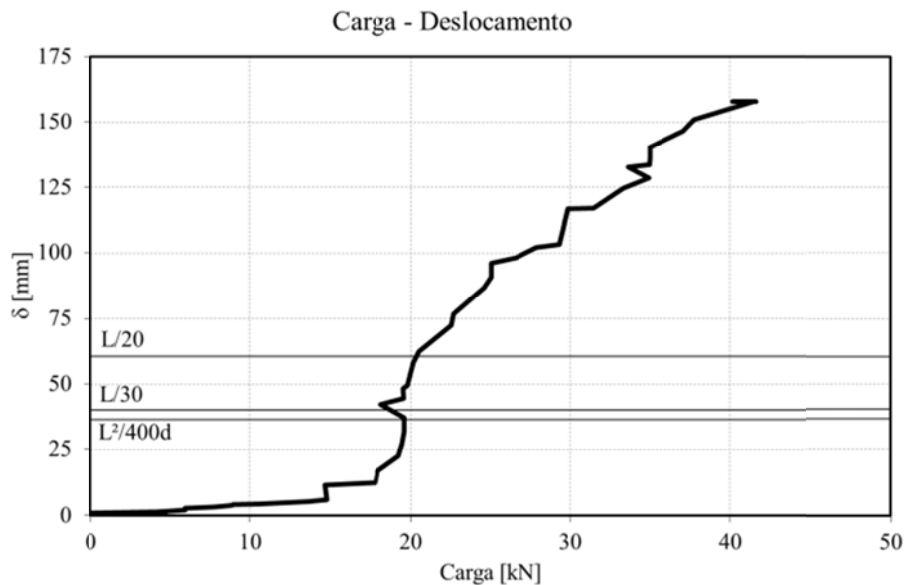


Gráfico 41 - Carga/deslocamento para o ensaio C2.

No Gráfico 42, estão representados os valores de deslocamento na extremidade do elemento, ao longo da intensidade de carga aplicada. Nota-se um registo progressivo de deslocamento negativo no DH, provavelmente devido a uma pequena deformação elástica sofrida pelo apoio superior.

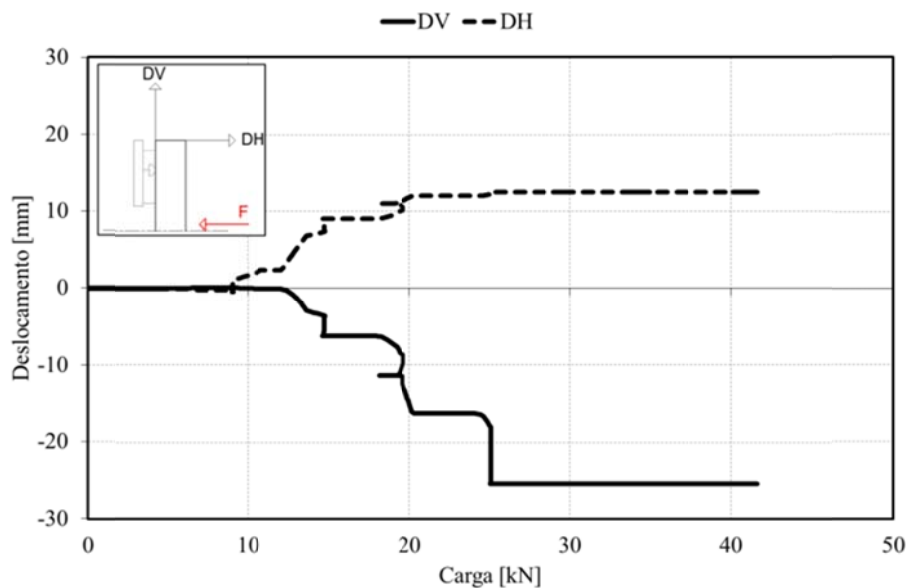


Gráfico 42 - Carga/LVDT's para o ensaio C2.

No Gráfico 43, observa-se o registo dos valores de deformação ao longo da intensidade de carga aplicada. No Gráfico 44 está representado um pormenor do Gráfico 43, até ao momento em que os extensómetros perderam capacidade de leitura.



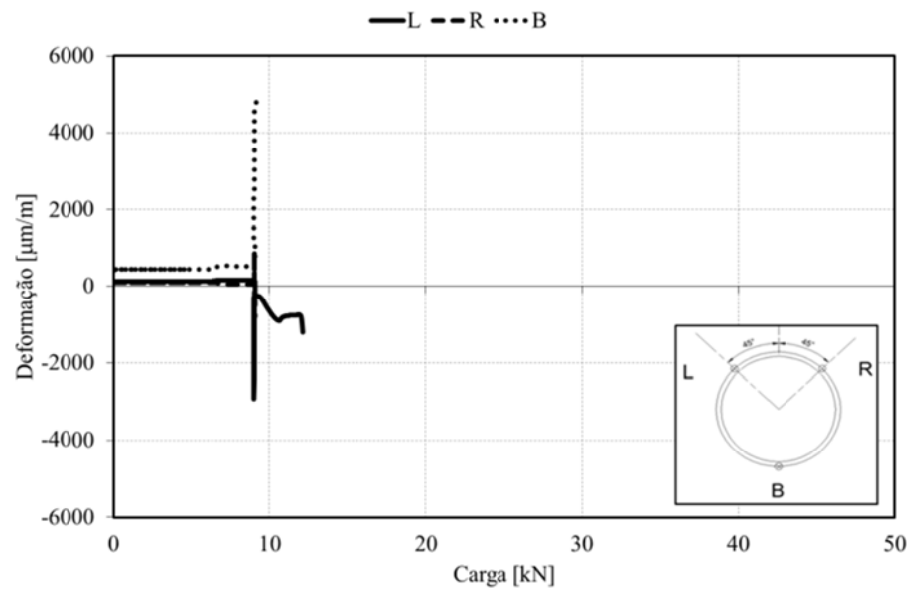


Gráfico 43 - Deformações/carga para o ensaio C2.

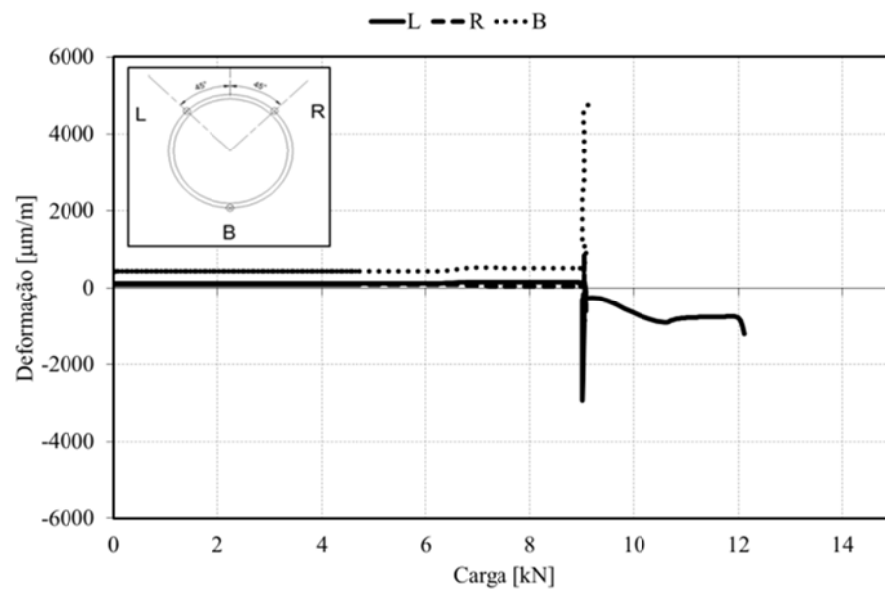


Gráfico 44 - Pormenor de deformações/carga para o ensaio C2.

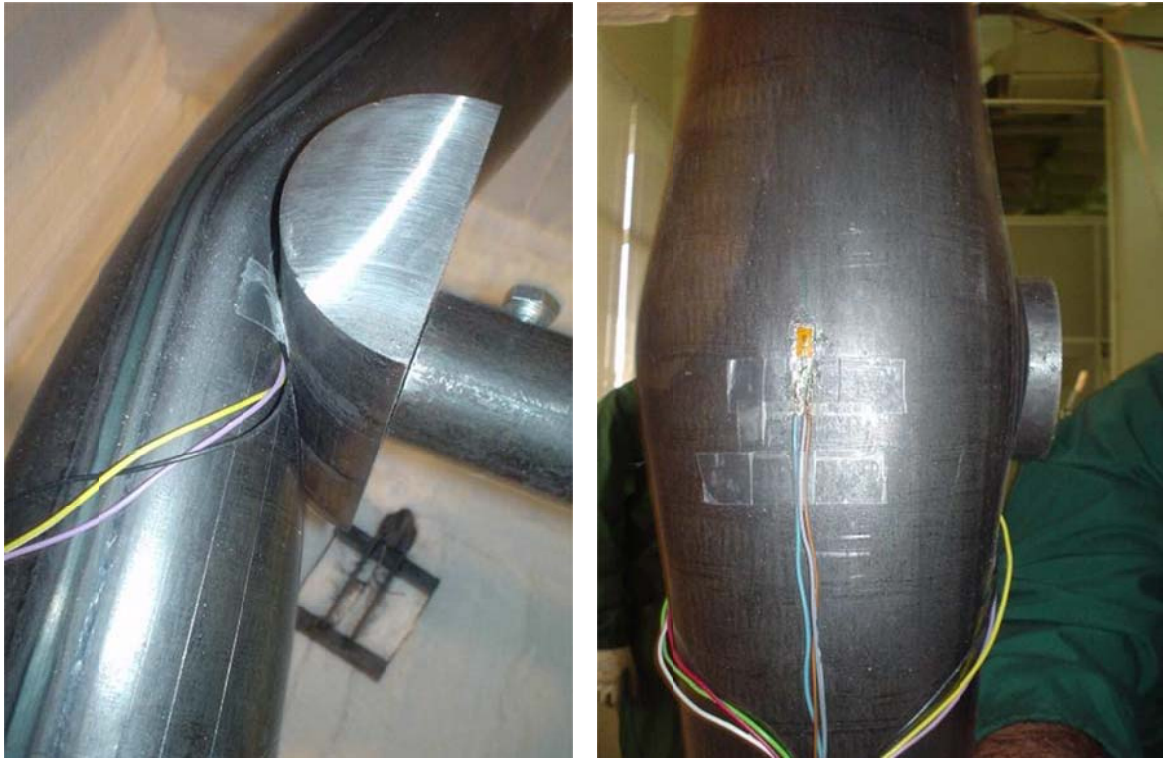


Figura 33 - Fotos da deformação sofrida no ensaio C2.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, como se pode observar na Figura 33.

#### 6.1.7. Ensaio L1.

Este elemento de secção transversal LNP 100x50x8 (S275), foi testado à flexão em condições de temperatura ambiente, a 20-05-2010, foram aplicados incrementos de carga de 5000 [N].

No Gráfico 45 está representada a taxa de variação de força com o tempo.

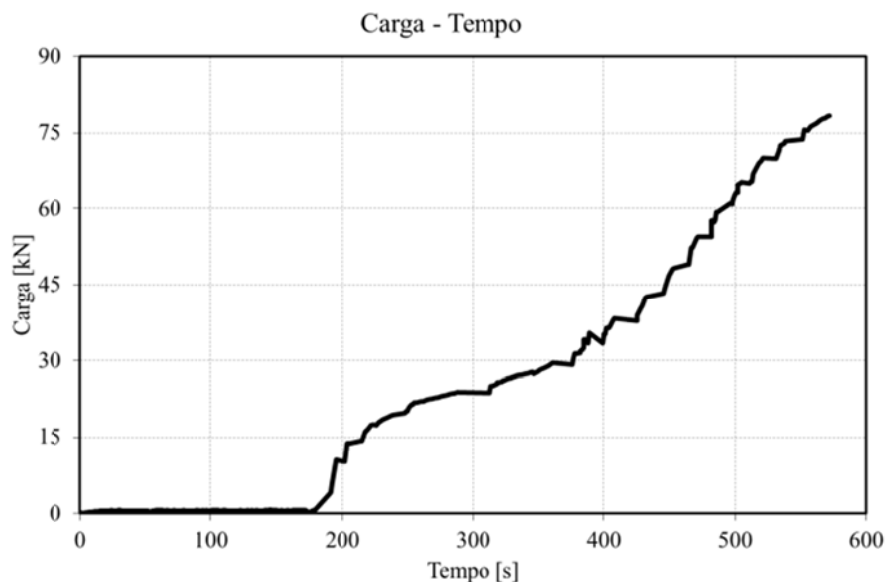


Gráfico 45 - Patamares de aplicação da carga no ensaio L1.

No Gráfico 46 estão representados os deslocamentos (DV e DH) no topo do elemento, em conjunto com a evolução de força aplicada.

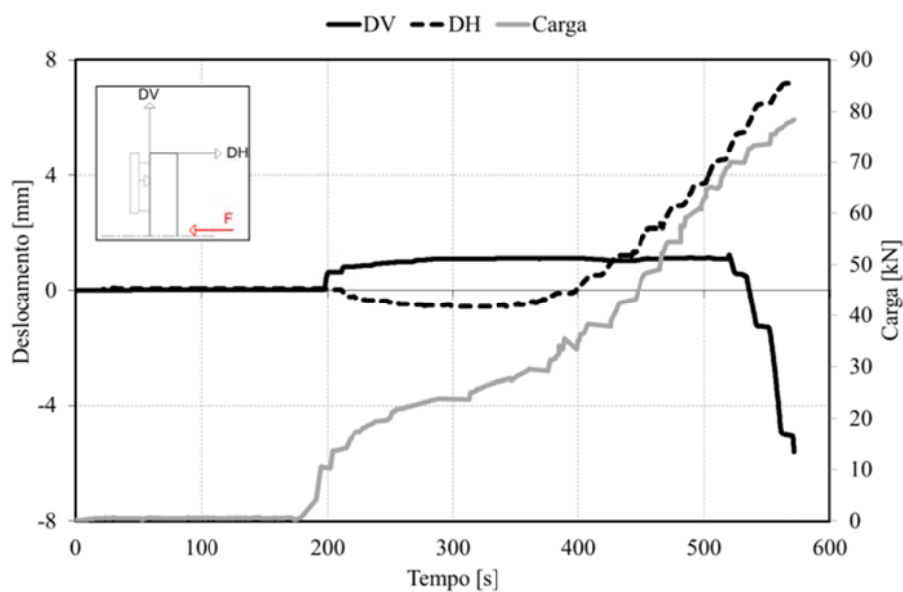


Gráfico 46 - Leitura dos LVDT's para o ensaio L1.

No Gráfico 47, estão representadas os valores das deformações até ao momento a que se procedo o dano do próprio extensómetros (falta de aderência, deformação excessiva, etc) a par da força aplicada.

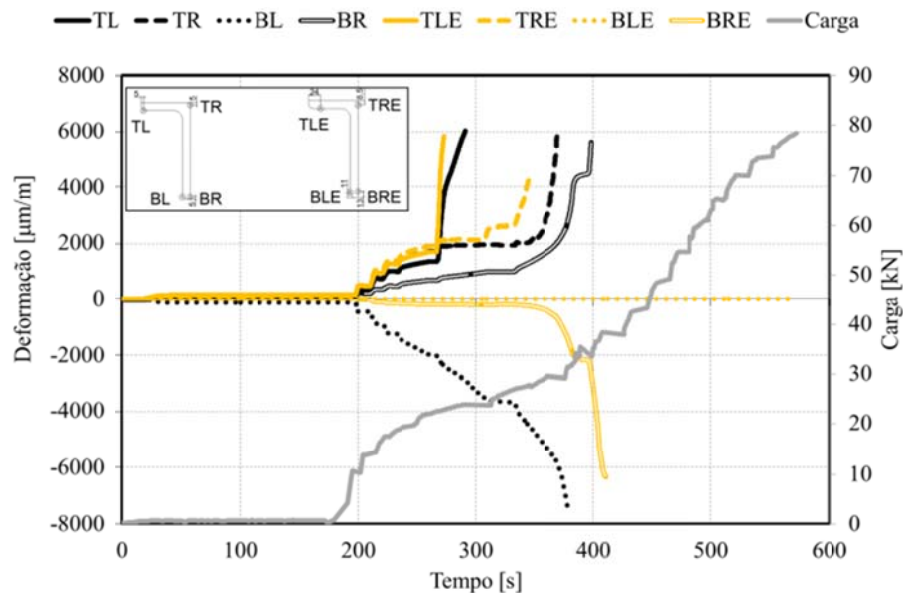


Gráfico 47 - Leituras das deformações para o ensaio L1.

No Gráfico 48, representa-se a variação do deslocamento com a carga, verificando-se um fenómeno de instabilidade lateral torsional, como se pode ver representada na Figura 34.

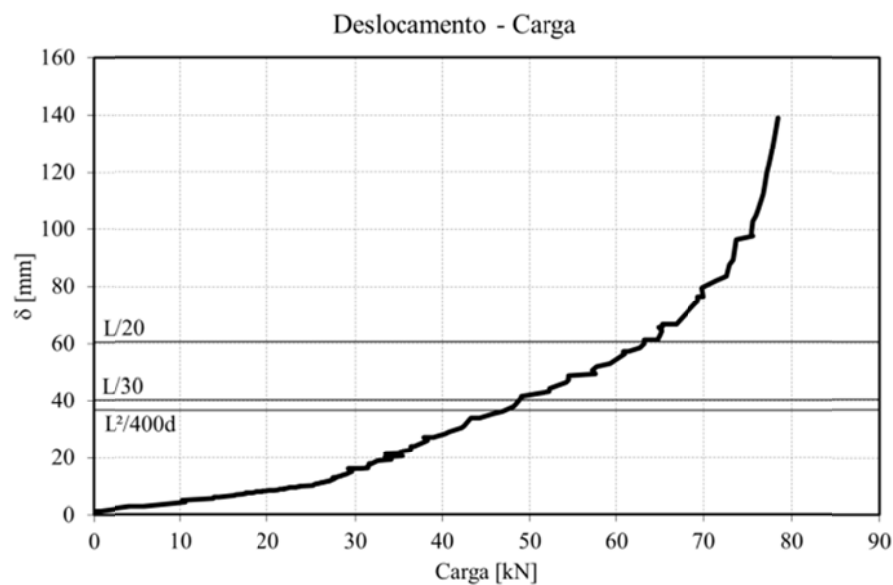


Gráfico 48 - Carga/deslocamento para o ensaio L1.

No Gráfico 49, estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento, em função da carga aplicada.

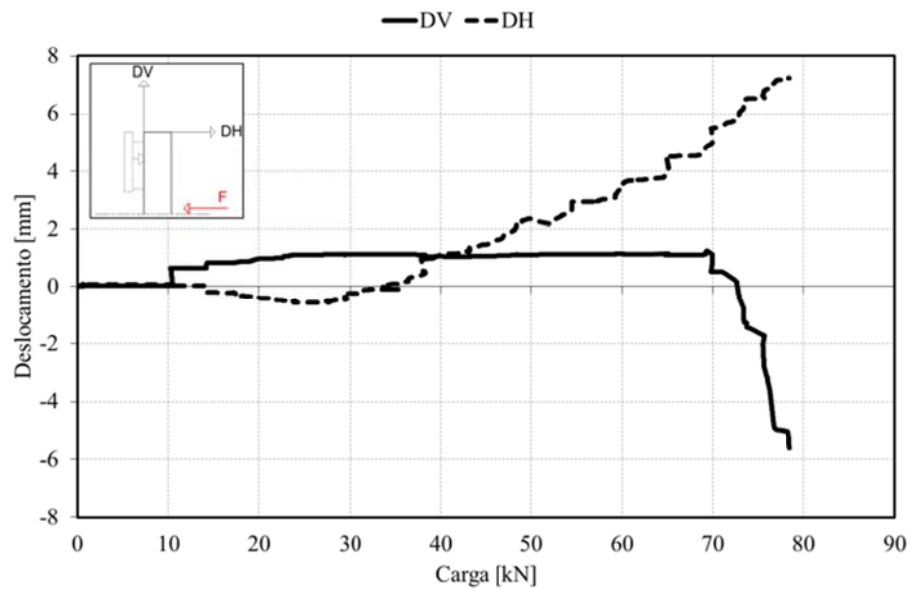


Gráfico 49 - Carga/LVDT's para o ensaio L1.

No Gráfico 50, estão representadas as deformações em função do valor de carga aplicada. De referir que os únicos a sofrer compressão são BL e BRE, devido à posição do eixo neutro.

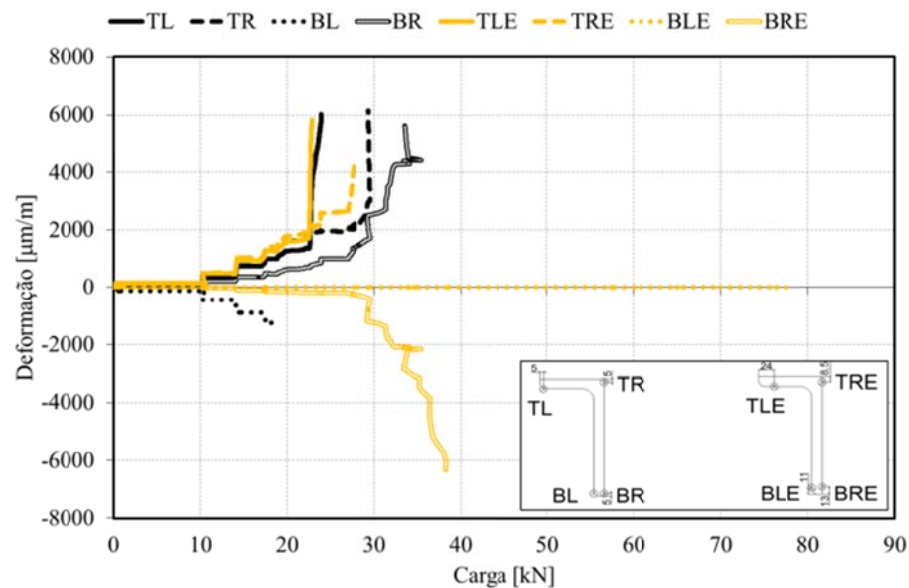


Gráfico 50 - Deformações/carga para o ensaio L1.



Figura 34 - Fotos da deformação sofrida no ensaio L1.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, conforme se pode observar na Figura 34. O ensaio foi realizado dentro do forno de resistência, mas sem qualquer acção térmica.

#### 6.1.8. Ensaio L2.

Este perfil foi testado à flexão, em condições de temperatura ambiente a 20-05-2010, foram aplicados incrementos de carga de 5000N.

No Gráfico 51, está representada a taxa de variação de força com o tempo.

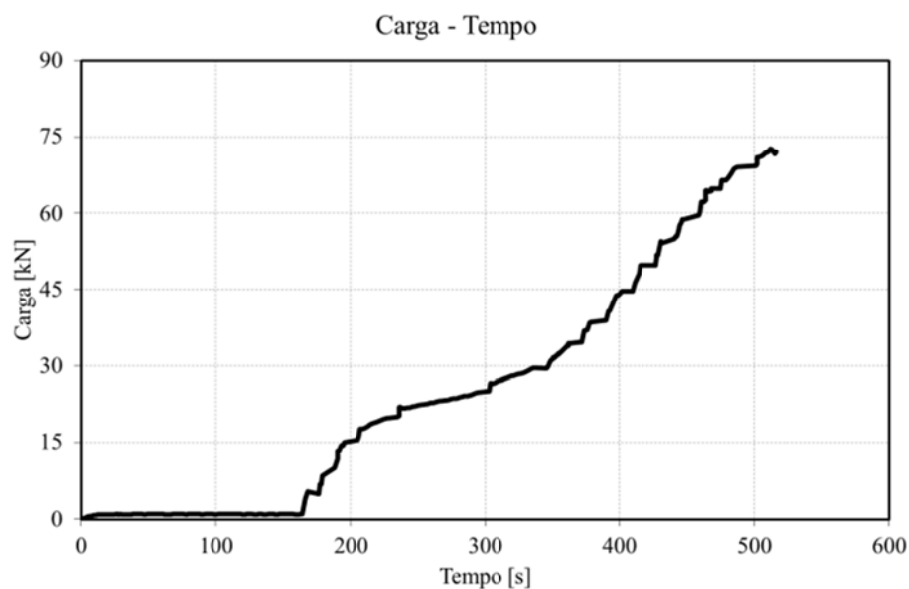


Gráfico 51 - Patamares de aplicação da carga no ensaio L2.

No Gráfico 52 estão representados os deslocamentos (DV e DH) na extremidade do elemento, em conjunto com a evolução de força aplicada.

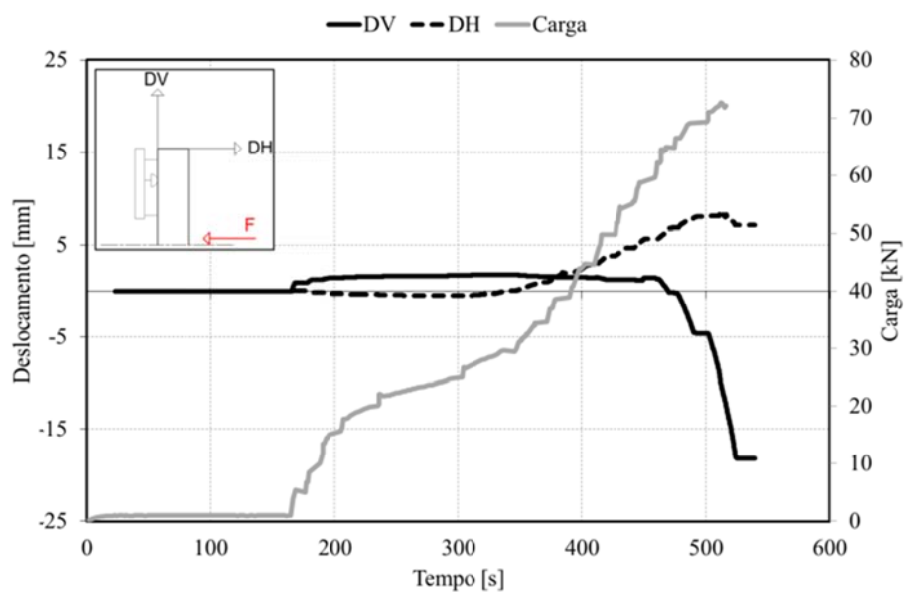


Gráfico 52 - Leitura dos LVDT's para o ensaio L2.

No Gráfico 53, estão representadas os valores das deformações até ao momento a que se procedo o dano do próprio extensómetros (falta de aderência, deformação excessiva, etc.), a par da força aplicada.

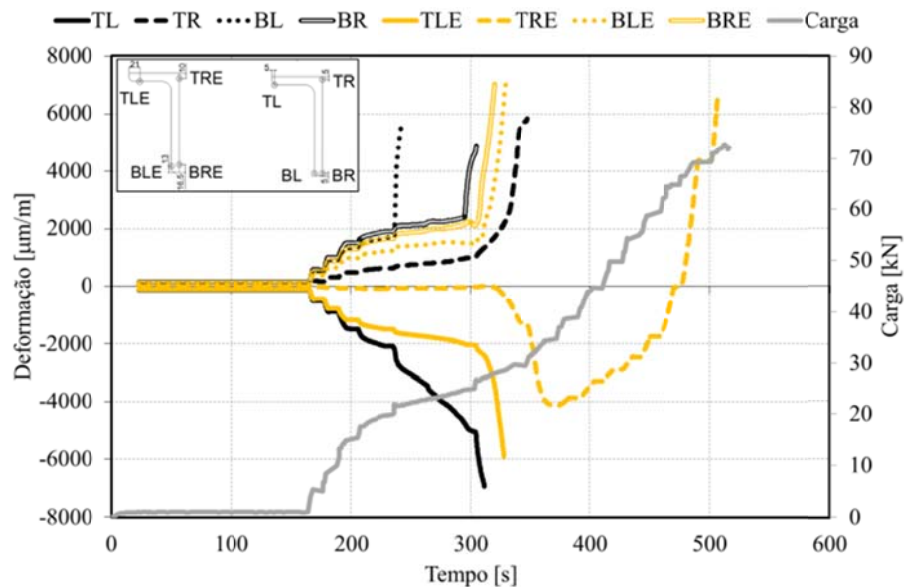


Gráfico 53 - Leitura das deformações para o ensaio L2.

No Gráfico 54, representa-se a variação do deslocamento com a carga, verificando-se mais uma vez, um fenómeno de instabilidade lateral torsional.

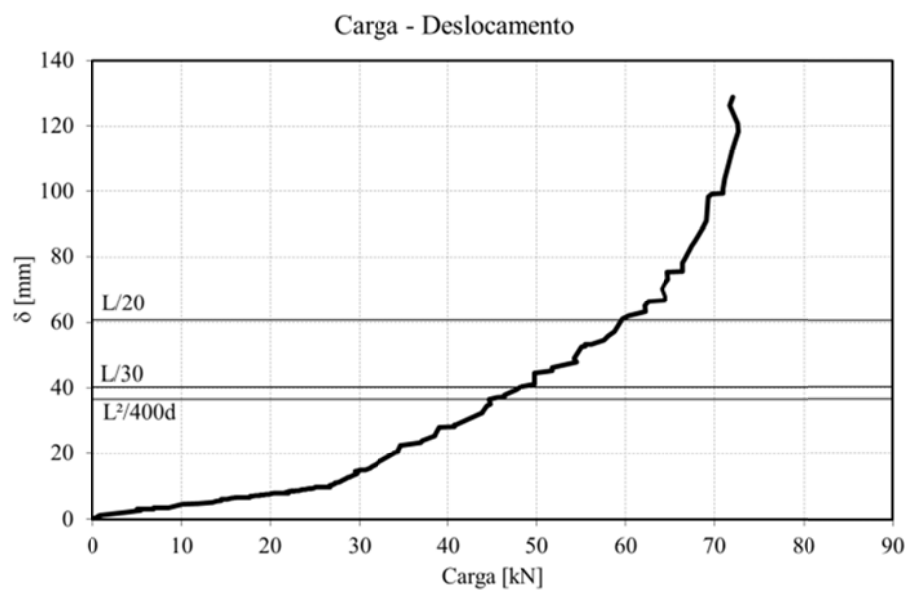


Gráfico 54 - Carga/deslocamento para o ensaio L2.

No Gráfico 55, estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento, em função da carga aplicada. De notar um comportamento idêntico a L1.



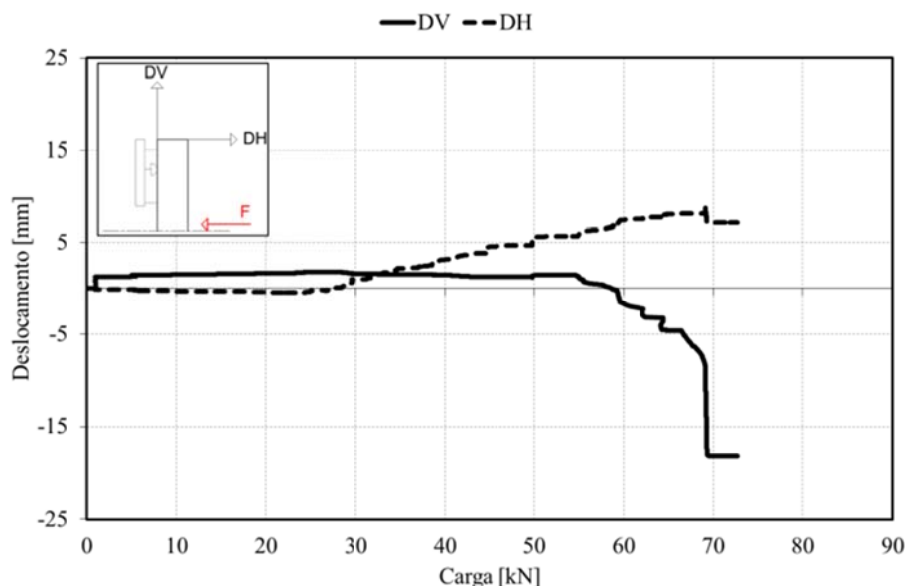


Gráfico 55 - Carga/LVDT's para o ensaio L2.

No Gráfico 56, estão representadas as deformações em função do valor de carga aplicada. De referir que TL, TLE e TRE apresentam valores de tracção e TRE passa depois a registar valores de compressão, devido ao fenómeno de encurvadura lateral torsional.

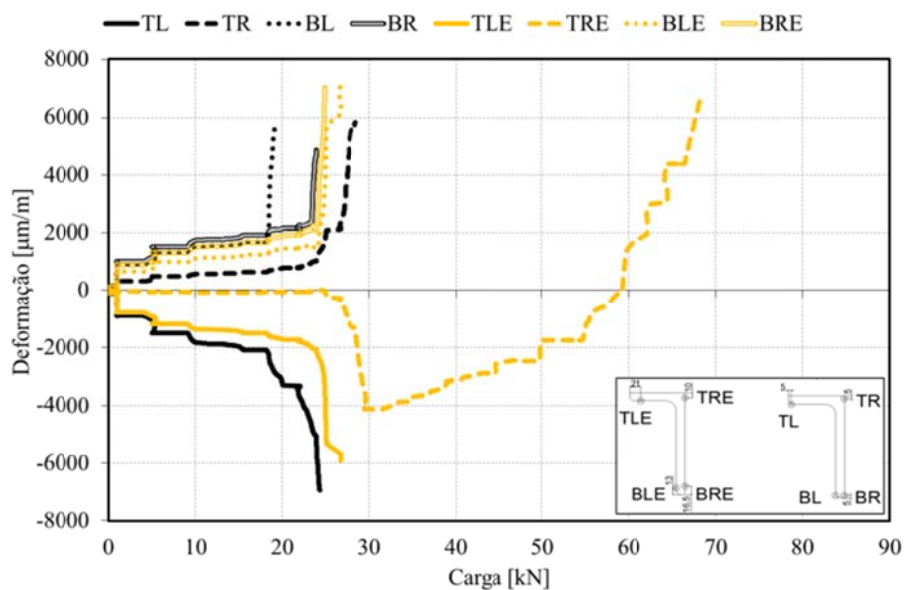


Gráfico 56 - Deformações/carga para o ensaio L2.



Figura 35 - Fotos da deformação sofrida no ensaio L2.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, conforme se pode observar na Figura 35. O ensaio foi realizado dentro do forno de resistência, mas sem qualquer acção térmica.

## 6.2. Ao fogo sem protecção.

### 6.2.1. Ensaio I3 ( $\mu=30\%$ )

Este ensaio foi realizado a 25-07-2010, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo Eurocódigo 3 parte 1-2 (1), para um grau de utilização de  $\mu=30\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 663,78 [°C]. A resistência última equivale a uma força de 5340 [N]. Esta força foi exercida na viga de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizado o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

No Gráfico 57, está registado o histograma do valor da força durante o ensaio.

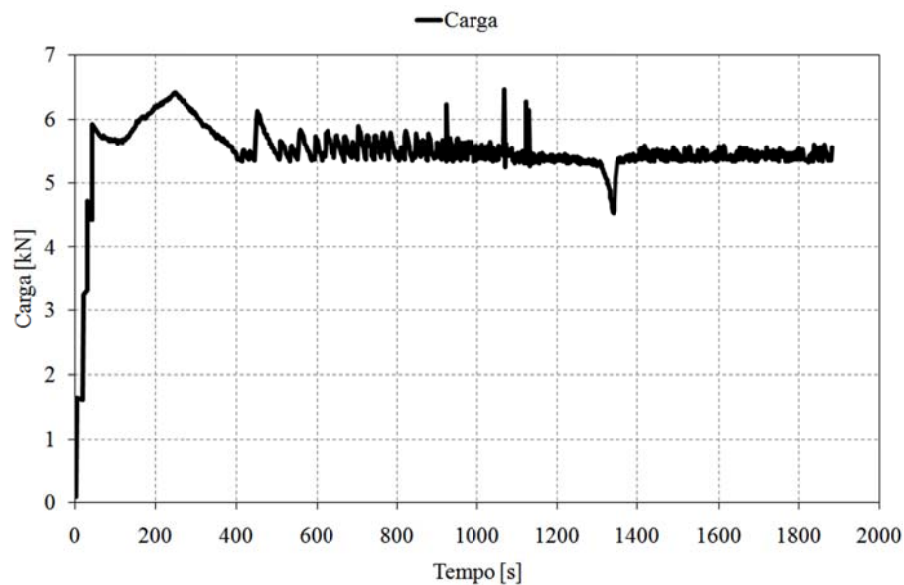
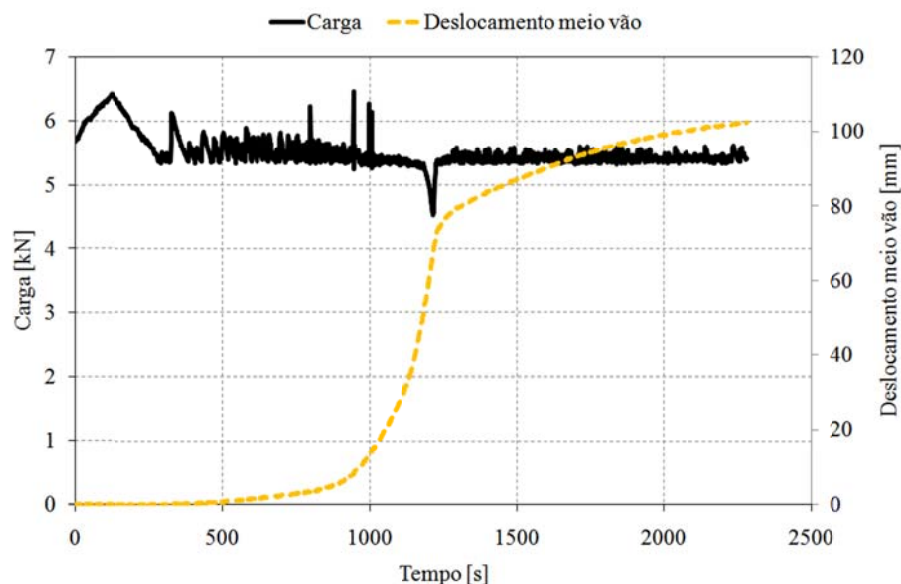


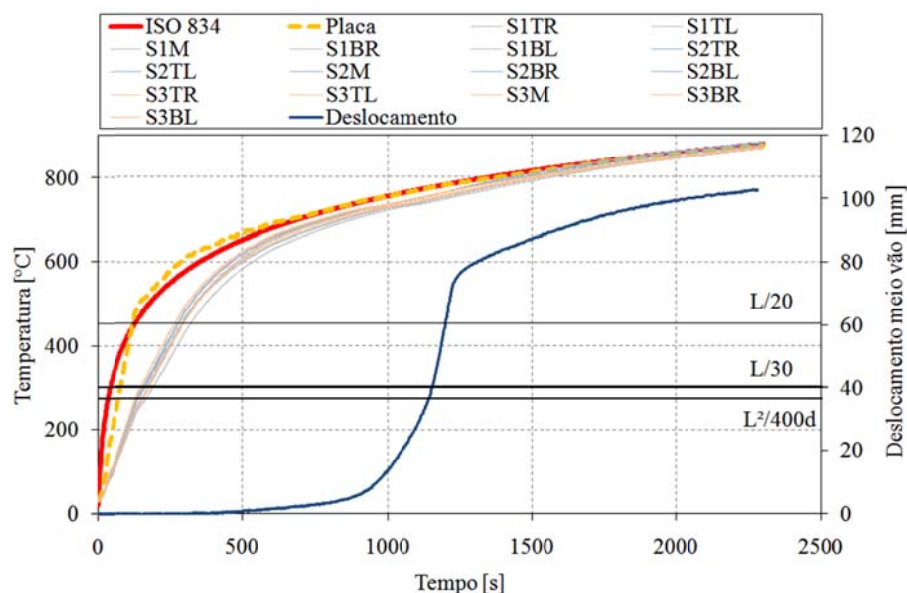
Gráfico 57 - Registo da intensidade da carga ao longo do tempo no ensaio I3.

No Gráfico 58 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma pequena perturbação.



**Gráfico 58 - Registro da carga e deslocamento a meio vão, assim que ligada a curva de incêndio, para o ensaio I3.**

No Gráfico 59 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.



**Gráfico 59 - Registro da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio I3.**

No Gráfico 60 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de

deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

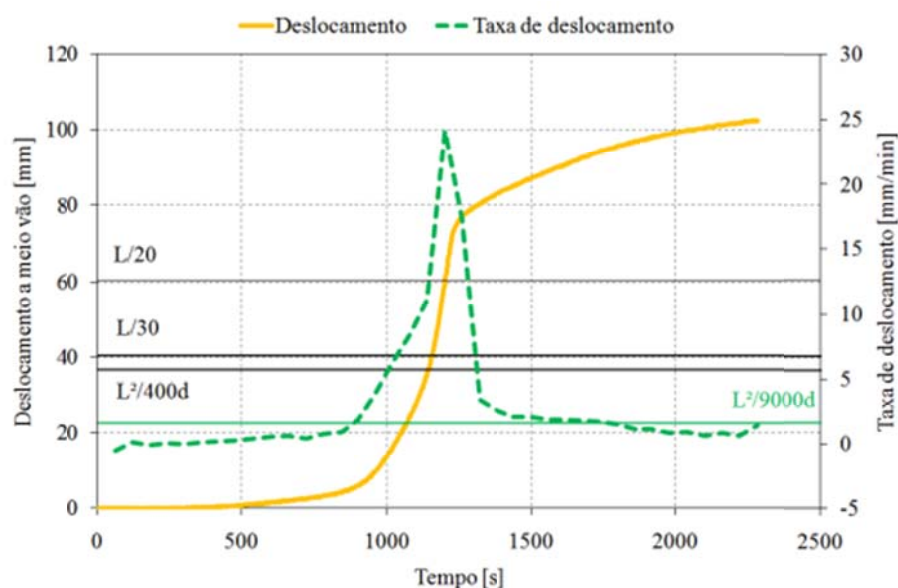


Gráfico 60 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I3.

No Gráfico 61 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 59, a curva de fogo ISO834, coincide com a temperatura média dentro do forno de resistência.

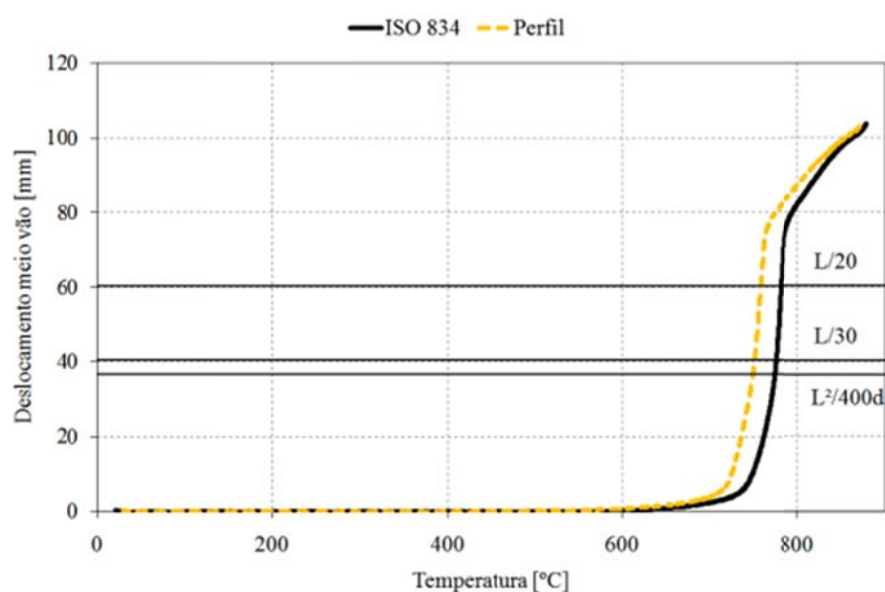


Gráfico 61 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I3.

No Gráfico 62 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil.

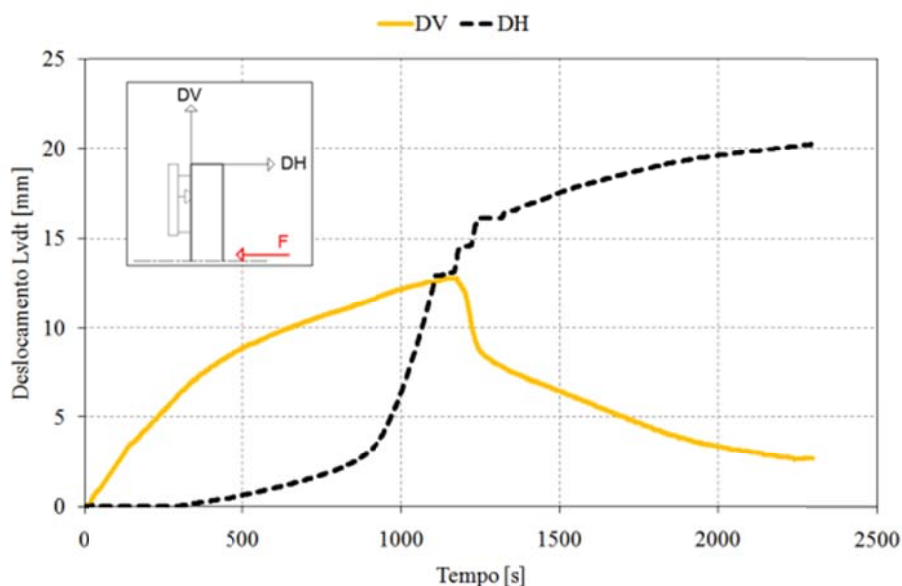


Gráfico 62 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I3.

No Gráfico 63 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite validar a hipótese de que a temperatura é uniforme em todo o perfil, em qualquer instante de tempo.

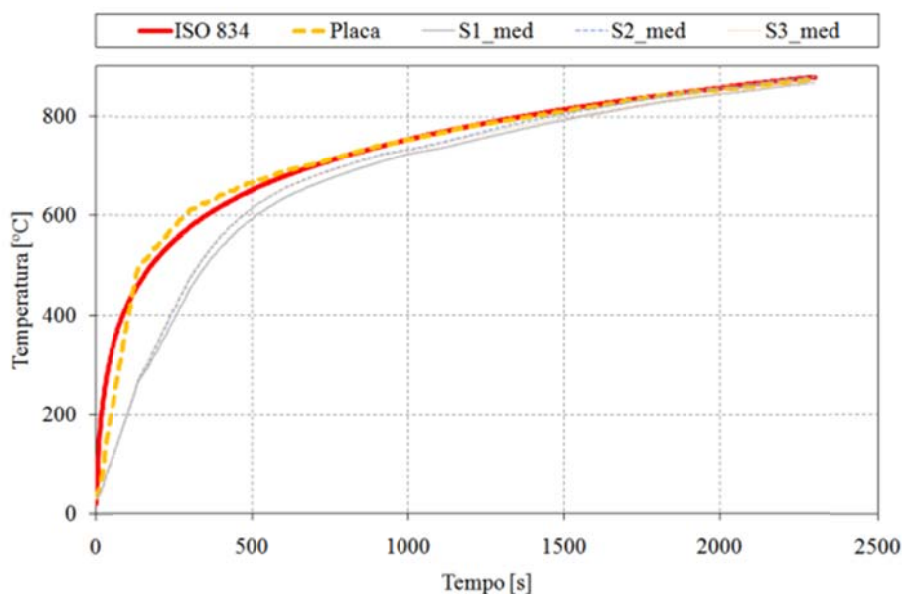


Gráfico 63 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I3.



No Gráfico 64 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

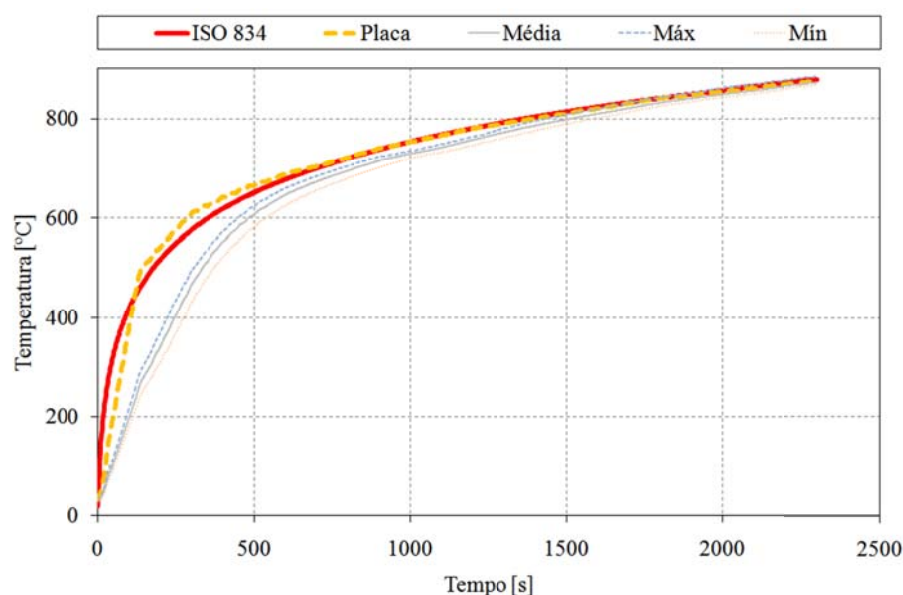


Gráfico 64 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I3.



Figura 36 - Fotos da evolução no ensaio I3.

Na Figura 36 estão representados dois instantes do ensaio I3. À esquerda observa-se um instante de tempo durante a curva de fogo ISO834 ligada, à direita observa-se um instante de tempo logo após a curva de fogo ter sido desligada.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 19 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 751,20 [°C].

A temperatura crítica determinada pelo método simplificado de cálculo, utiliza dados nominais de resistência e dados nominais do perfil utilizado. Estes dados proporcionam valores inferiores aos resultados experimentais. Para uma temperatura crítica de 663,78 [°C], seria expectável um tempo de resistência ao fogo de 12 minutos (em minutos completos).

### 6.2.2. Ensaio I4 ( $\mu=50\%$ )

Este ensaio foi realizado a 25-07-2010, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo Eurocódigo 3 parte 1-2 (1), para um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 9180 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

No Gráfico 65, está registado o histograma do valor da força durante o ensaio.

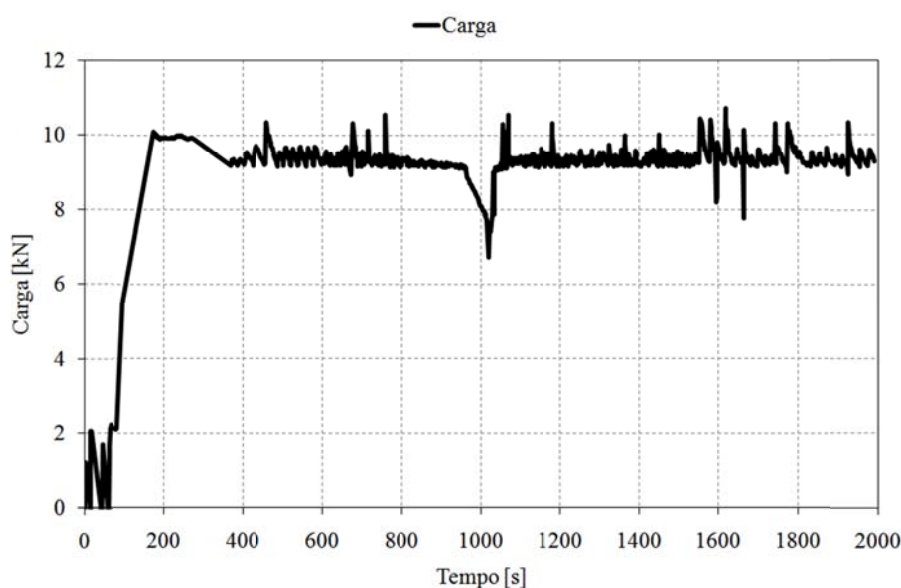
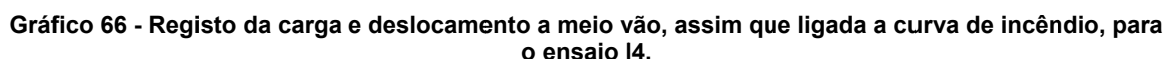


Gráfico 65 - Registo da intensidade da carga ao longo do tempo no ensaio I4.

No Gráfico 66 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma pequena perturbação.





No Gráfico 168 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de

deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

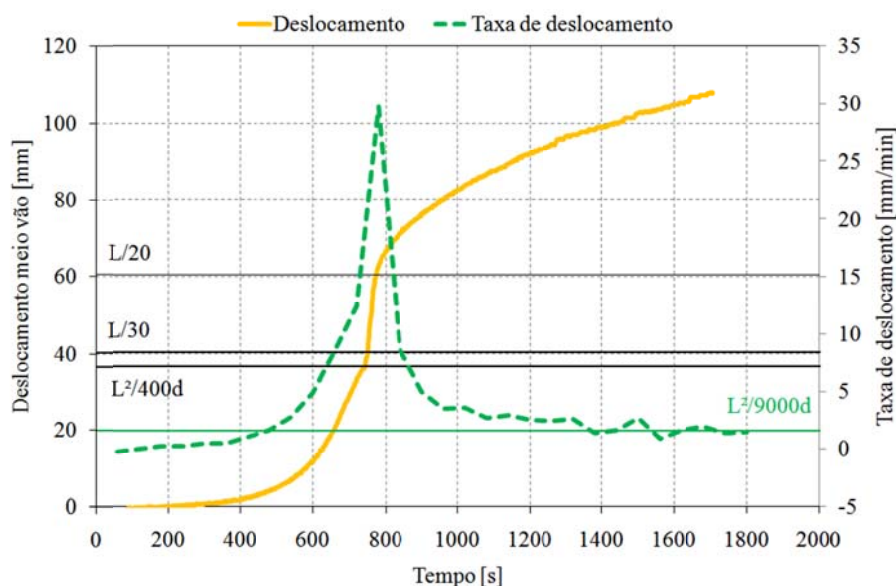


Gráfico 68 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I4.

No Gráfico 69 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834.

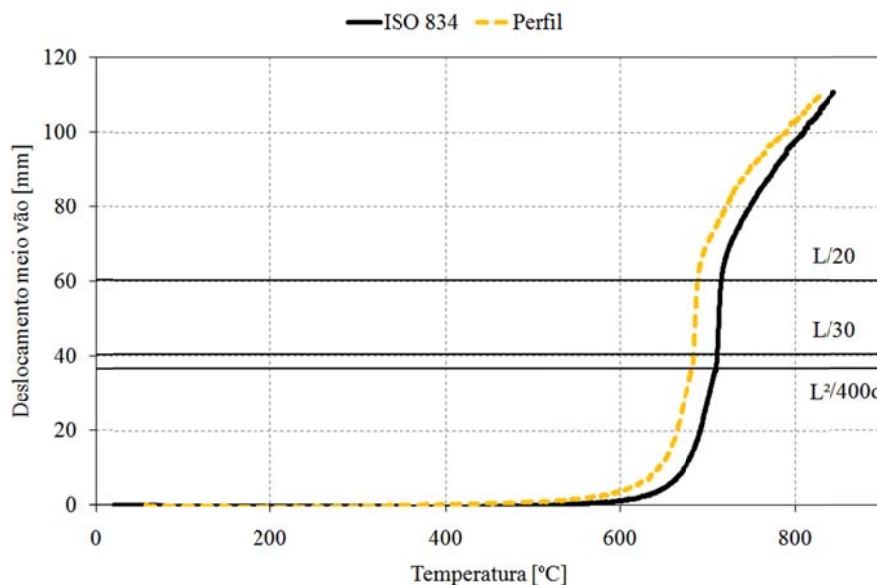


Gráfico 69 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I4.

No Gráfico 70 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil.

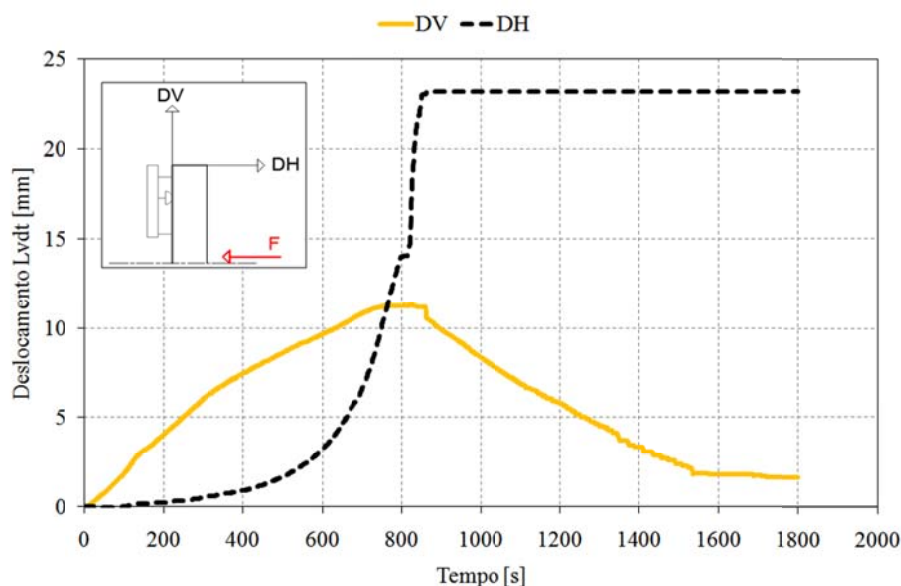


Gráfico 70 - Registro dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I4.

No Gráfico 71 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite validar a hipótese de que a temperatura é uniforme em todo o perfil, em qualquer instante de tempo.

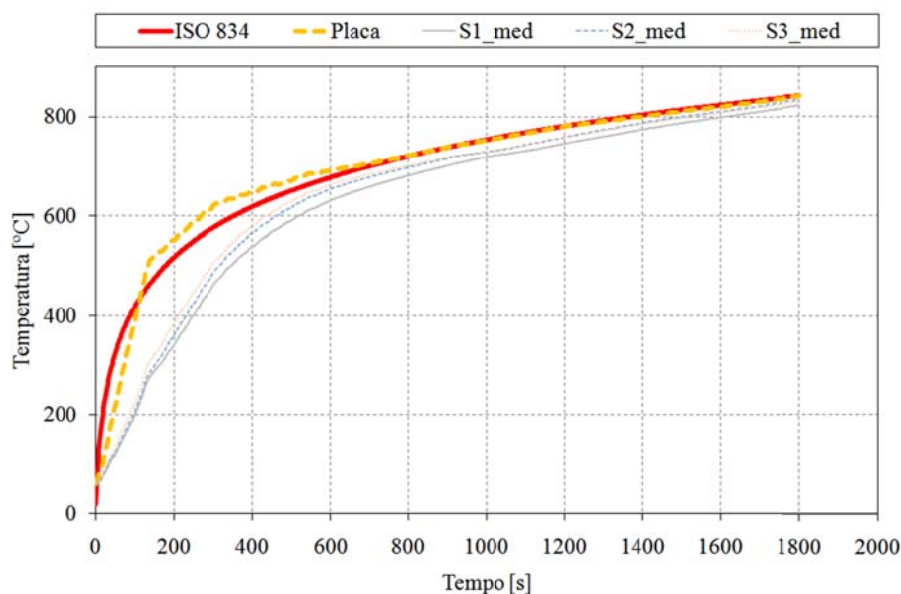


Gráfico 71 - Registro da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I4.

No Gráfico 72 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

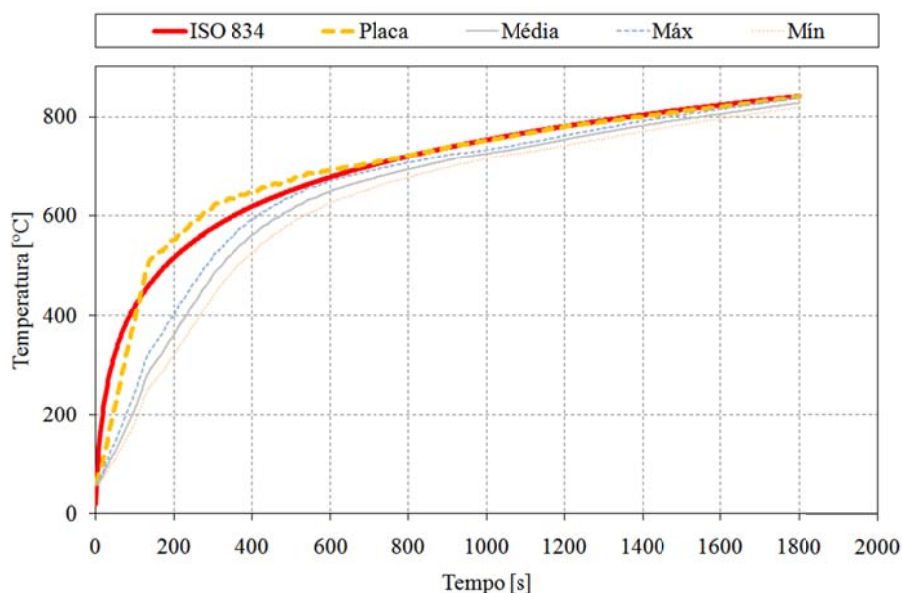


Gráfico 72 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I4.



Figura 37 - Fotos da deformada sofrida no ensaio I4.

Na Figura 37 está representada a deformada sofrida pelo elemento no final do ensaio.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 12 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 684,47 [°C].

A temperatura crítica determinada pelo método simplificado de cálculo, utiliza dados nominais de resistência e dados nominais do perfil utilizado. Estes dados proporcionam valores inferiores aos resultados experimentais. Para uma temperatura crítica de 584,67 [°C], seria expectável um tempo de resistência ao fogo de 9 minutos (em minutos completos).

### 6.2.3. Ensaio I5 ( $\mu=70\%$ )

Este ensaio foi realizado a 26-07-2010, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo Eurocódigo 3 parte 1-2 (1), para um grau de utilização de  $\mu=70\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 525,78 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 12940 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

No Gráfico 73, está registado o histograma do valor da força durante o ensaio.

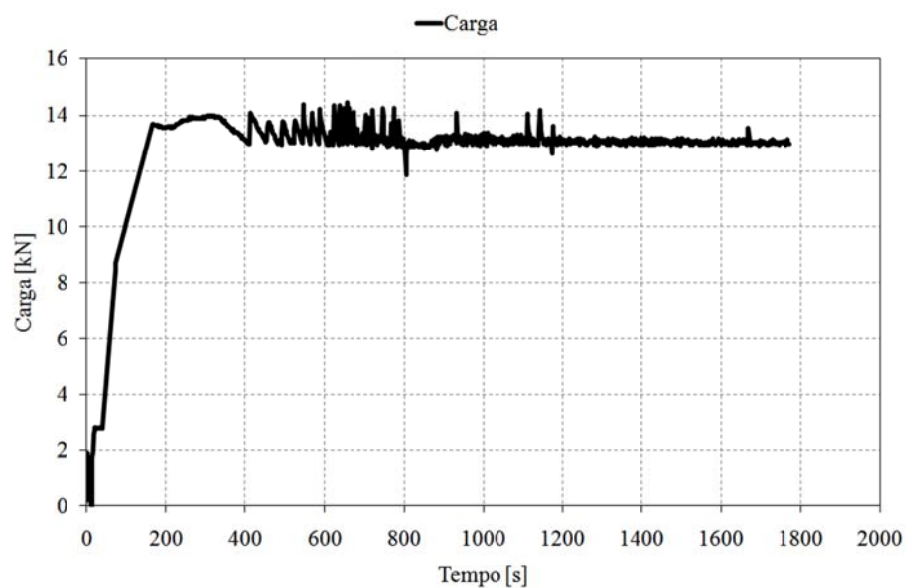
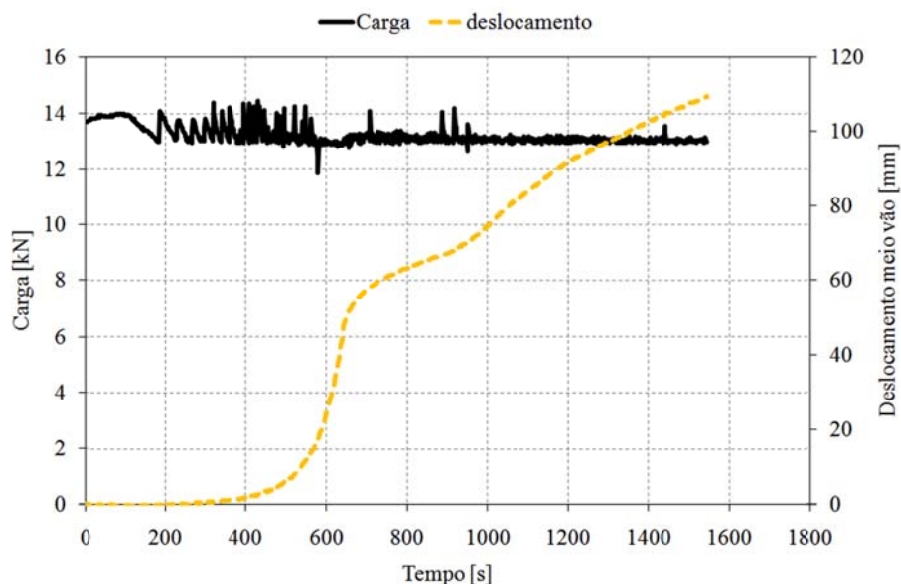


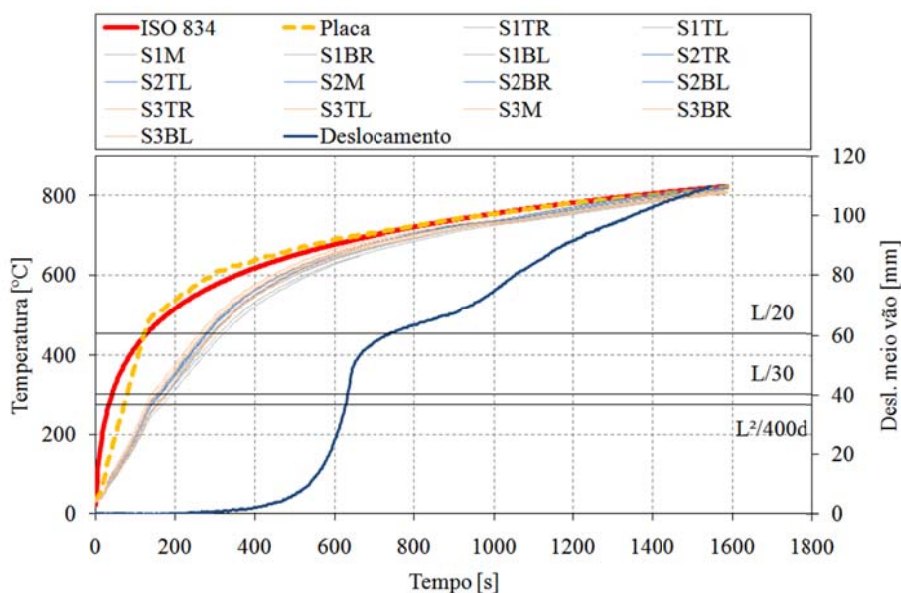
Gráfico 73 - Registo da intensidade da carga ao longo do tempo no ensaio I4.

No Gráfico 74 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio.



**Gráfico 74 - Registro da carga e deslocamento a meio vão ao longo do tempo após o início de incêndio para o ensaio I5.**

No Gráfico 75 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.



**Gráfico 75 - Registro da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio I5.**

No Gráfico 76 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de



deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

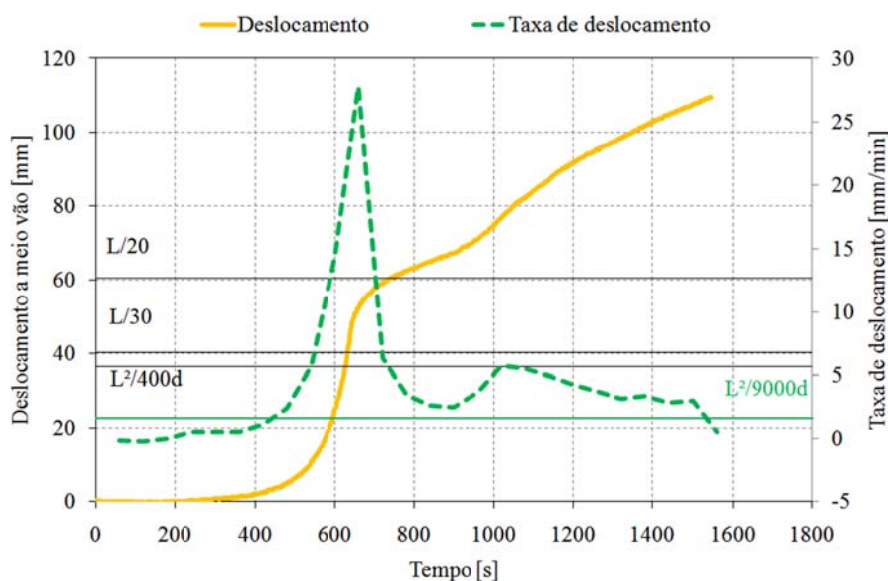


Gráfico 76 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I5.

No Gráfico 77 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834.

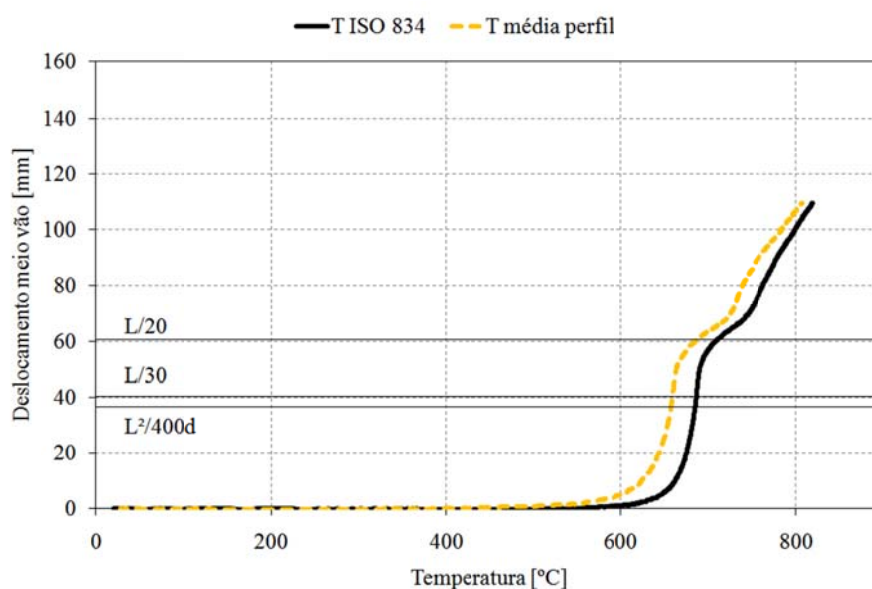


Gráfico 77 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I5.

No Gráfico 78 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil.

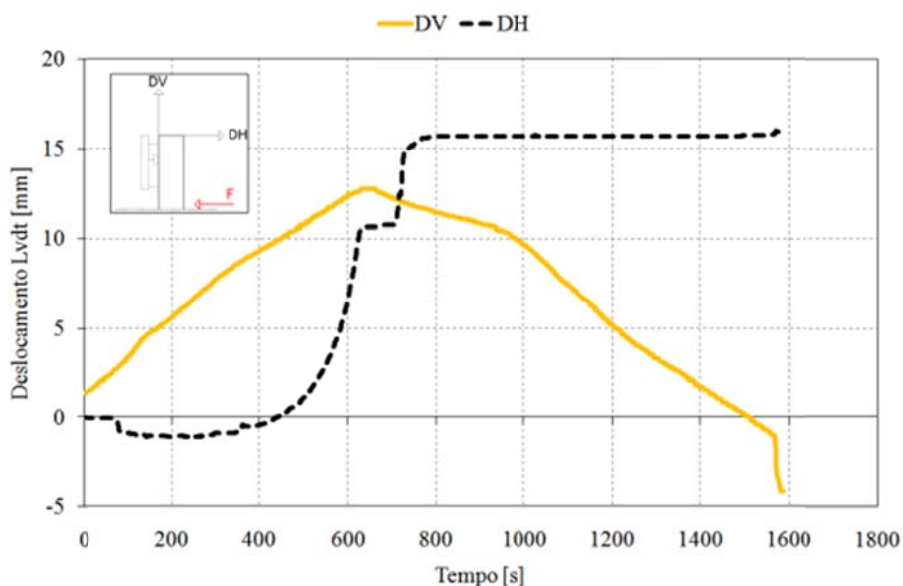


Gráfico 78 - Registro dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I5.

No Gráfico 79 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite validar a hipótese de que a temperatura é uniforme em todo o perfil, em qualquer instante de tempo.

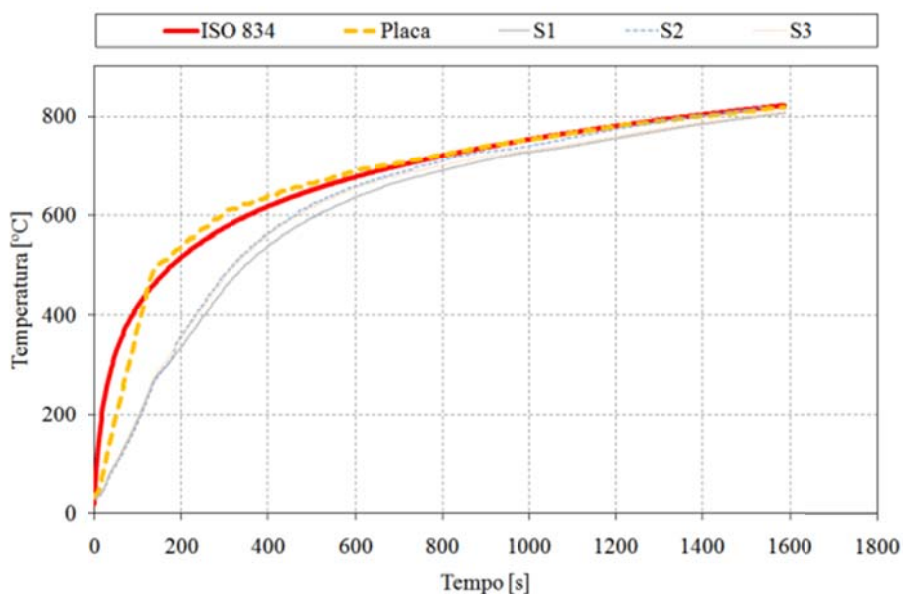
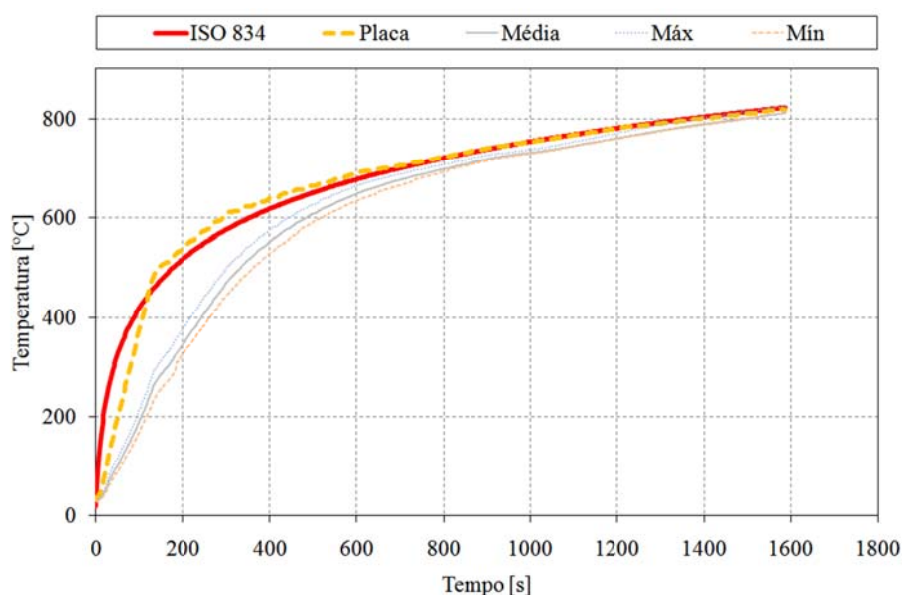


Gráfico 79 - Registro da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I5.



No Gráfico 80 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.



**Gráfico 80 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I5.**

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 10 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 659,01 [°C].

A temperatura crítica determinada pelo método simplificado de cálculo, utiliza dados nominais de resistência e dados nominais do perfil utilizado. Estes dados proporcionam valores inferiores aos resultados experimentais. Para uma temperatura crítica de 535,78 [°C], seria expectável um tempo de resistência ao fogo de 7 minutos (em minutos completos).

#### 6.2.4. Ensaio S3 ( $\mu=30\%$ )

Este ensaio foi realizado a 26-07-2010, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo Eurocódigo 3 parte 1-2 (1), para um grau de utilização de  $\mu=30\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 663,78 [°C]. A resistência última equivale a uma força de 13620 [N]. Esta força foi exercida na viga de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizado o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

No Gráfico 81, está registado o histograma do valor da força durante o ensaio.

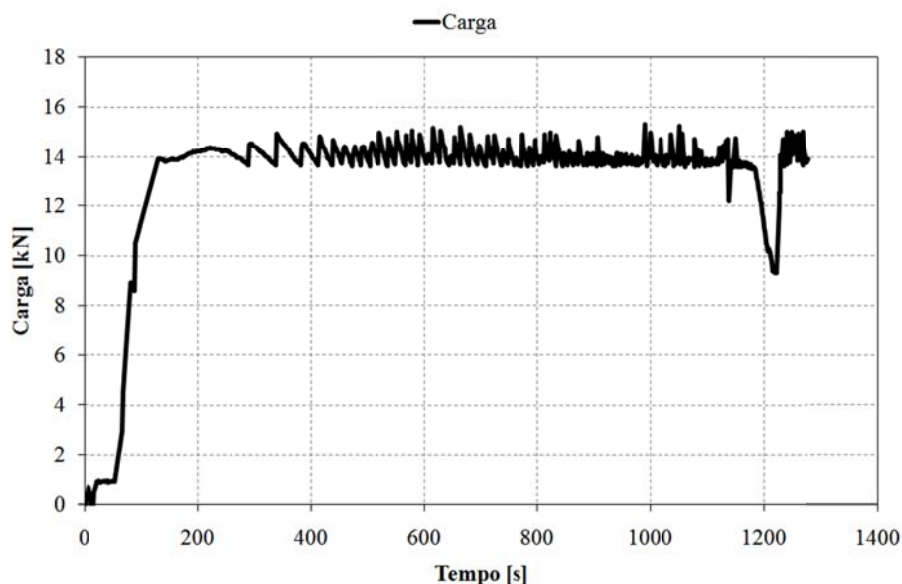


Gráfico 81 - Registro da intensidade da carga ao longo do tempo no ensaio S3.

No Gráfico 82 foi sobreposto o registro de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma perturbação.

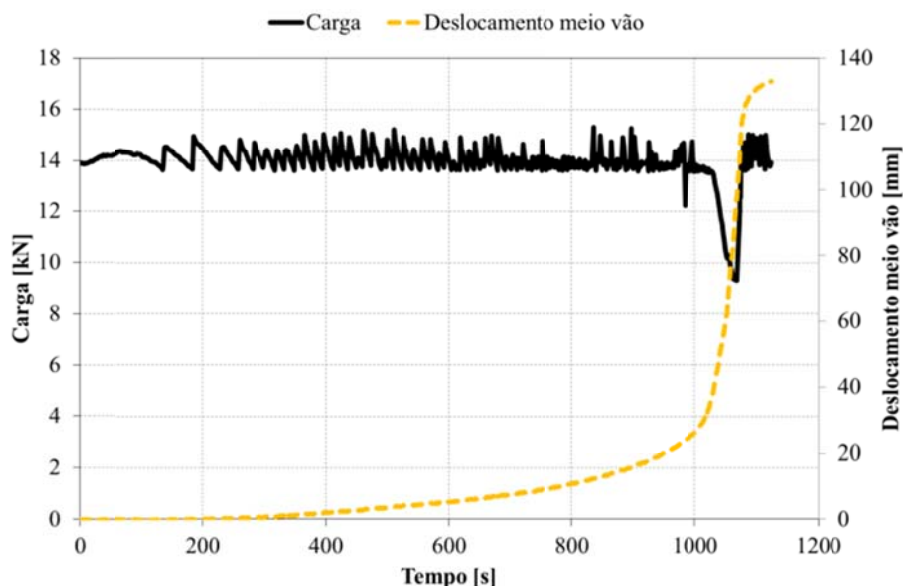
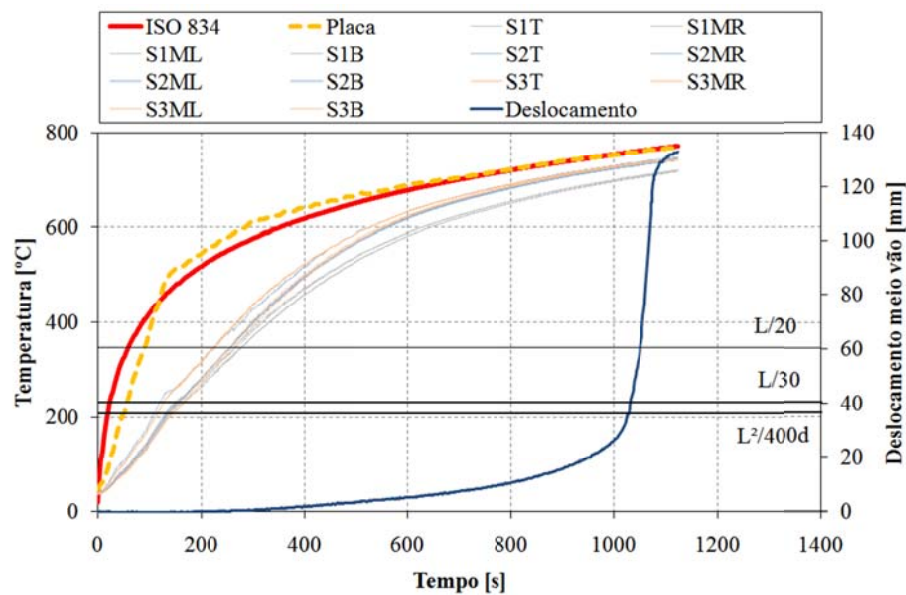


Gráfico 82 - Registro da carga e deslocamento a meio vão ao longo do tempo após o início de incêndio para o ensaio S3.

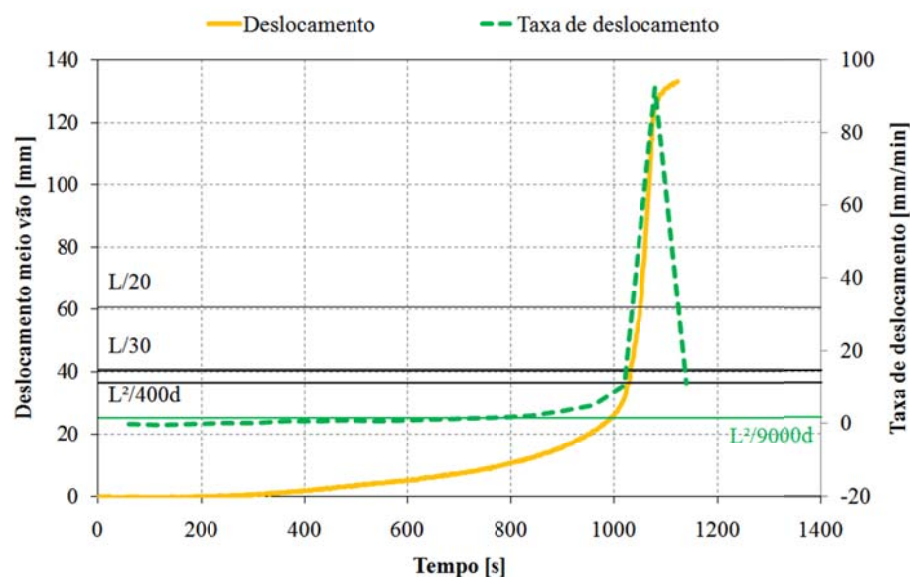
No Gráfico 83 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da

norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.



**Gráfico 83 - Registro da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio S3.**

No Gráfico 84 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registro da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.



**Gráfico 84 - Registro da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S3.**

No Gráfico 85 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 83, a curva de fogo ISO834, coincide com a temperatura média dentro do forno de resistência.

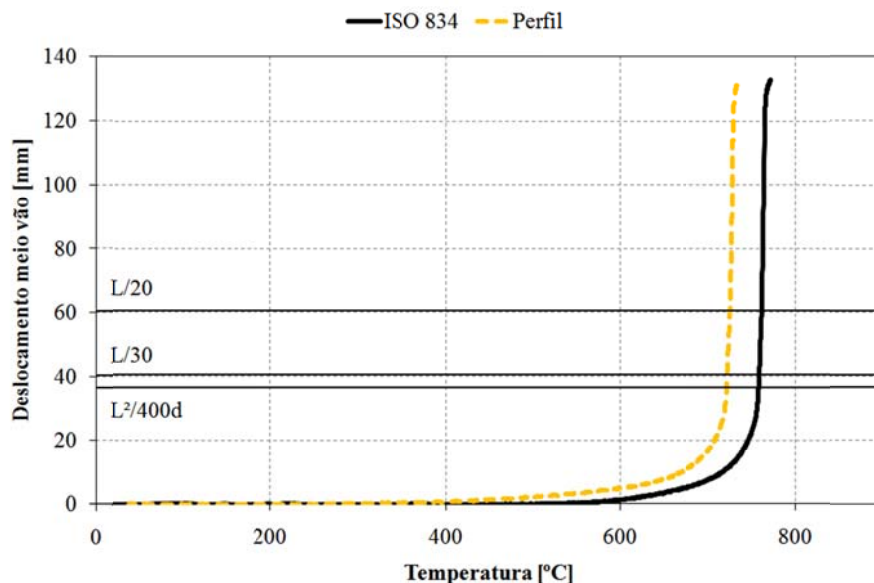


Gráfico 85 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S3.

No Gráfico 86 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil.

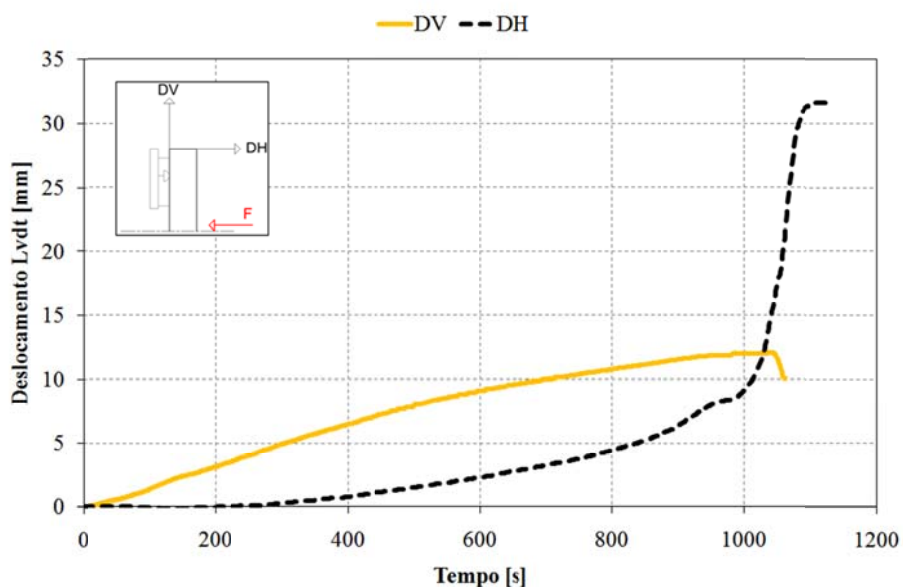


Gráfico 86 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S3.

No Gráfico 87 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite validar a hipótese de que a temperatura é uniforme em todo o perfil, em qualquer instante de tempo.

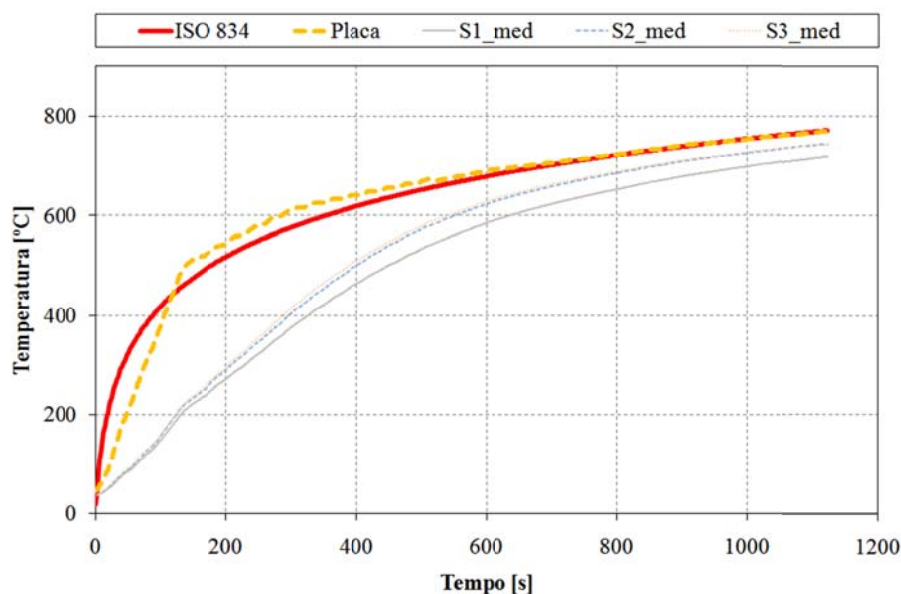


Gráfico 87 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S3.

No Gráfico 88 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

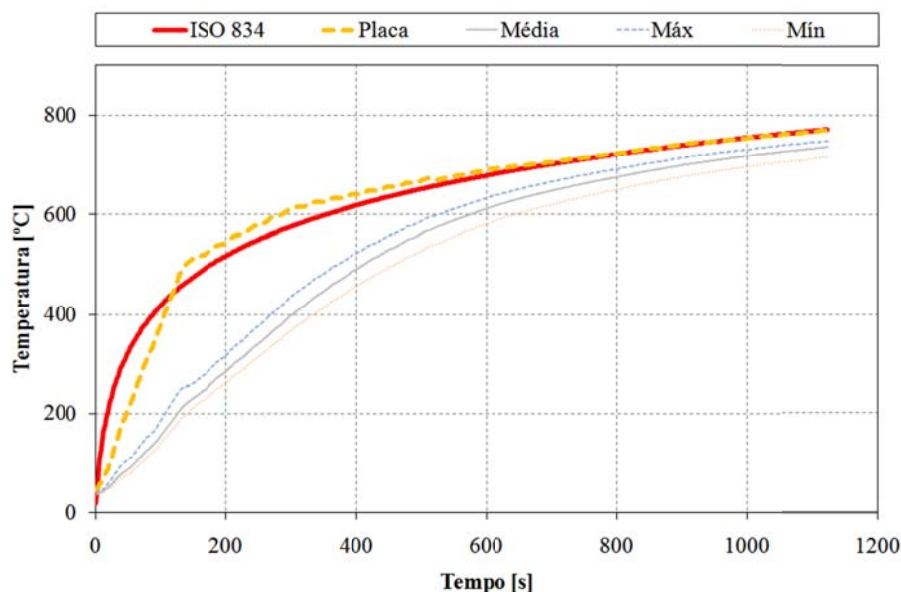


Gráfico 88 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S3.



**Figura 38 - Fotos da evolução no ensaio S3.**

Na Figura 38 observa-se um instante de tempo durante a curva de fogo ISO834 ligada.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 17 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 722,56 [°C].

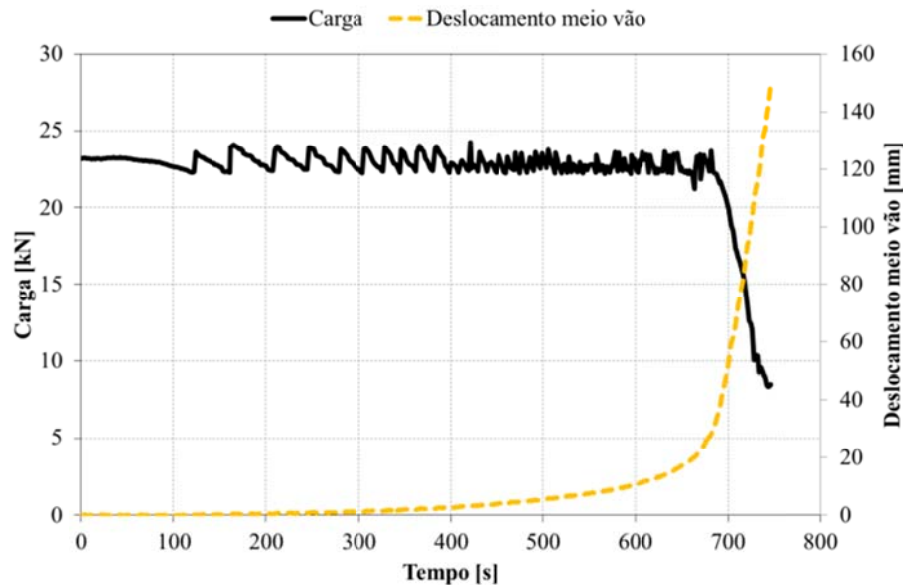
A temperatura crítica determinada pelo método simplificado de cálculo, utiliza dados nominais de resistência e dados nominais do perfil utilizado. Estes dados proporcionam valores inferiores aos resultados experimentais. Para uma temperatura crítica de 663,78 [°C], seria expectável um tempo de resistência ao fogo de 12 minutos (em minutos completos).

#### 6.2.5. Ensaio S4 ( $\mu=50\%$ )

Este ensaio foi realizado a 27-07-2010, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo Eurocódigo 3 parte 1-2 (1), para um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 22250 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

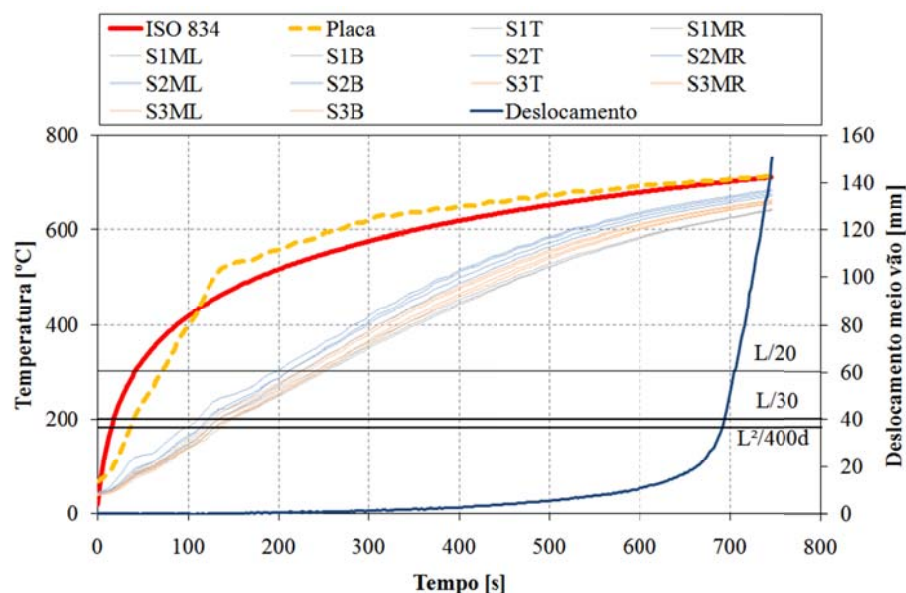
No Gráfico 89 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma grande perturbação.





**Gráfico 89 - Registo da carga e deslocamento a meio vão ao longo do tempo após o início de incêndio para o ensaio S4.**

No Gráfico 90 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.



**Gráfico 90 - Registo da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio S4.**

No Gráfico 91 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de

deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

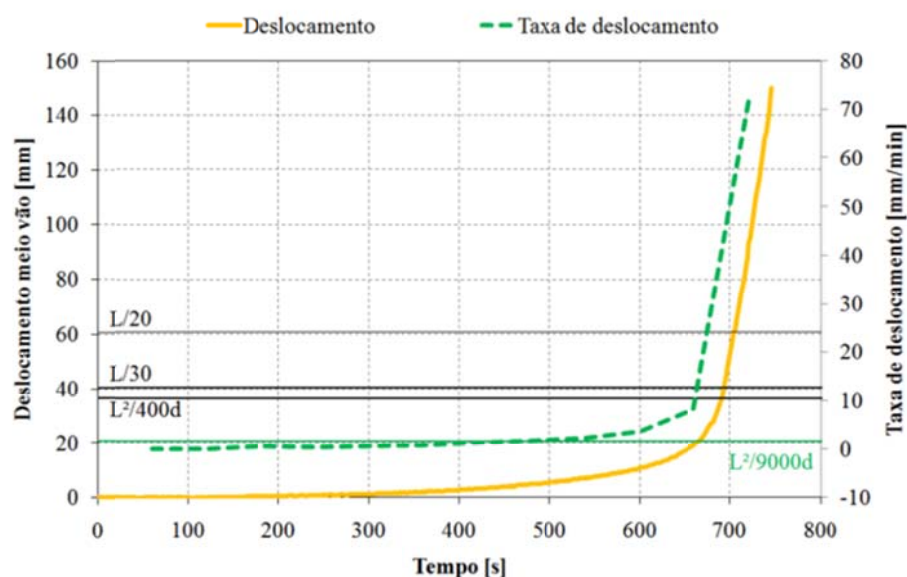


Gráfico 91 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S4.

No Gráfico 92 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834.

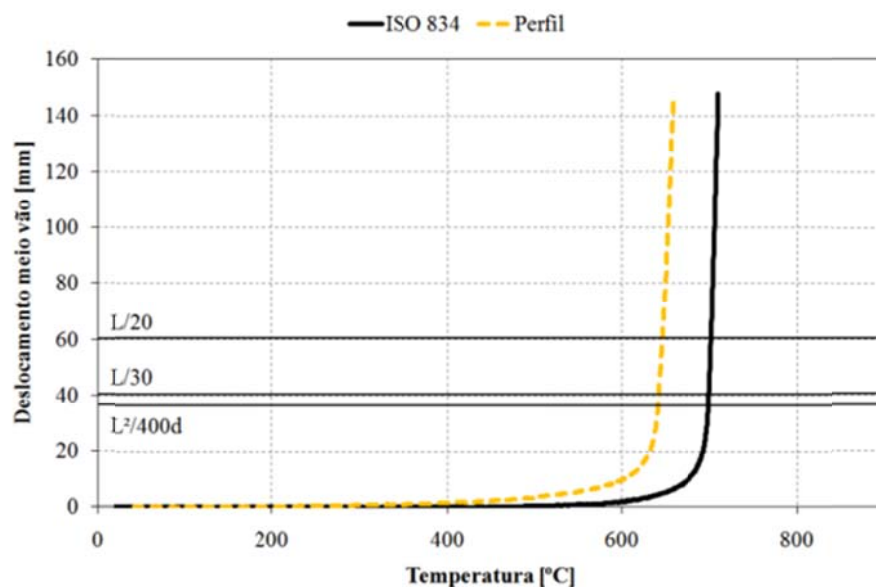


Gráfico 92 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S4.



No Gráfico 93 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. A existência de uma linha de tendência auxilia a percepção da falha técnica que impossibilitou o sistema de registar dados durante um dado instante.

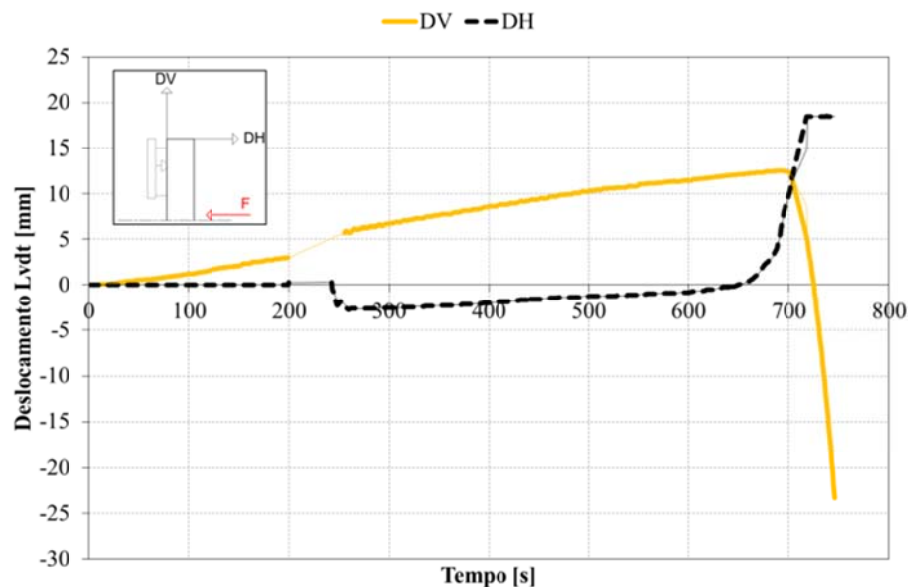


Gráfico 93 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S4.

No Gráfico 94 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite validar a hipótese de que a temperatura é uniforme em todo o perfil, em qualquer instante de tempo.

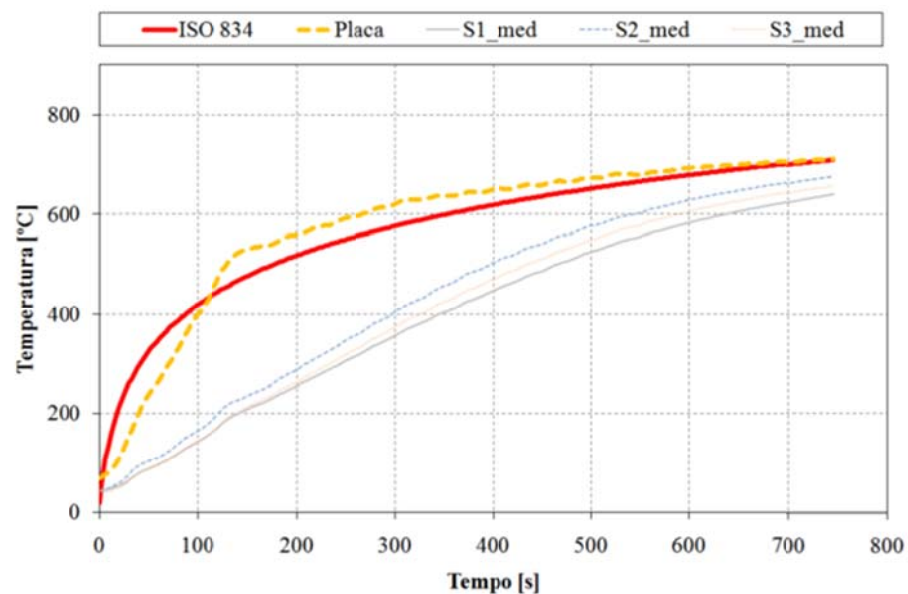


Gráfico 94 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S4.

No Gráfico 95 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

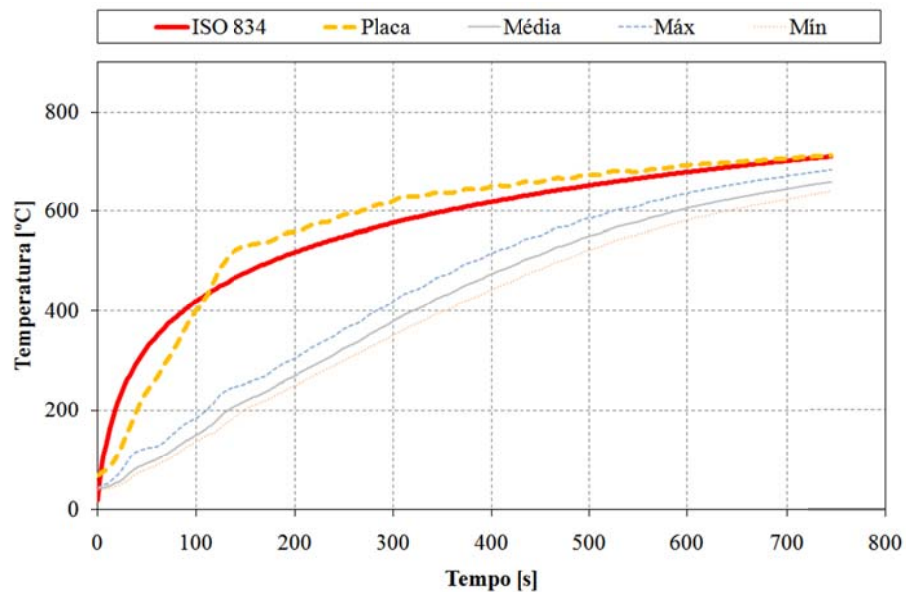


Gráfico 95 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S4.



Figura 39 - Fotos da deformada sofrida no ensaio S4

Na Figura 39 está representada a deformada sofrida pelo elemento no final do ensaio.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 11 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 641,95 [°C].

A temperatura crítica determinada pelo método simplificado de cálculo, utiliza dados nominais de resistência e dados nominais do perfil utilizado. Estes dados proporcionam valores inferiores aos resultados experimentais. Para uma temperatura crítica de 584,67 [°C], seria expectável um tempo de resistência ao fogo de 9 minutos (em minutos completos).

#### 6.2.6. Ensaio S5 ( $\mu=70\%$ )

Este ensaio foi realizado a 27-07-2010, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo Eurocódigo 3 parte 1-2 (1), para um grau de utilização de  $\mu=70\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 525,78 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 30090 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

No Gráfico 96 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De notar que com um rápido aumento da velocidade de deslocamento do ponto de aplicação de carga, acompanha uma grande perturbação do histograma da carga.

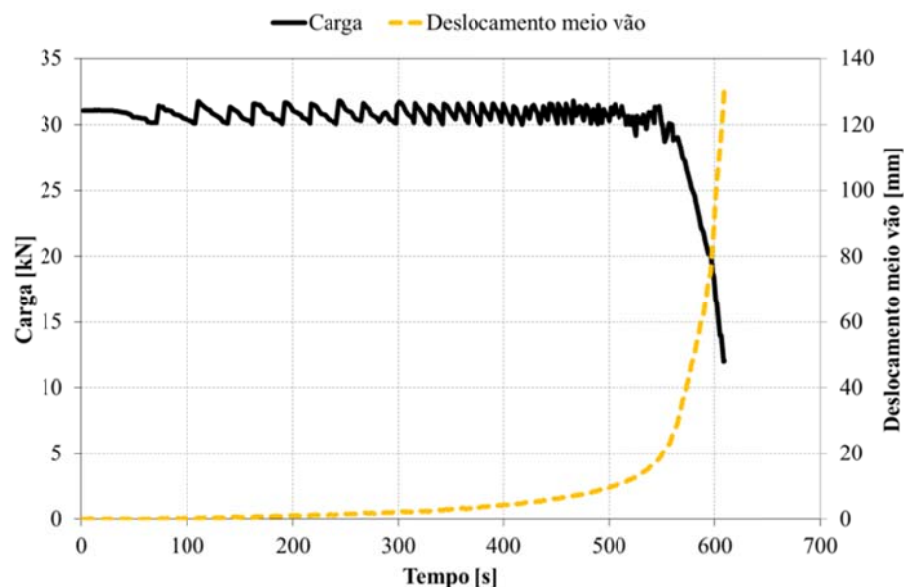
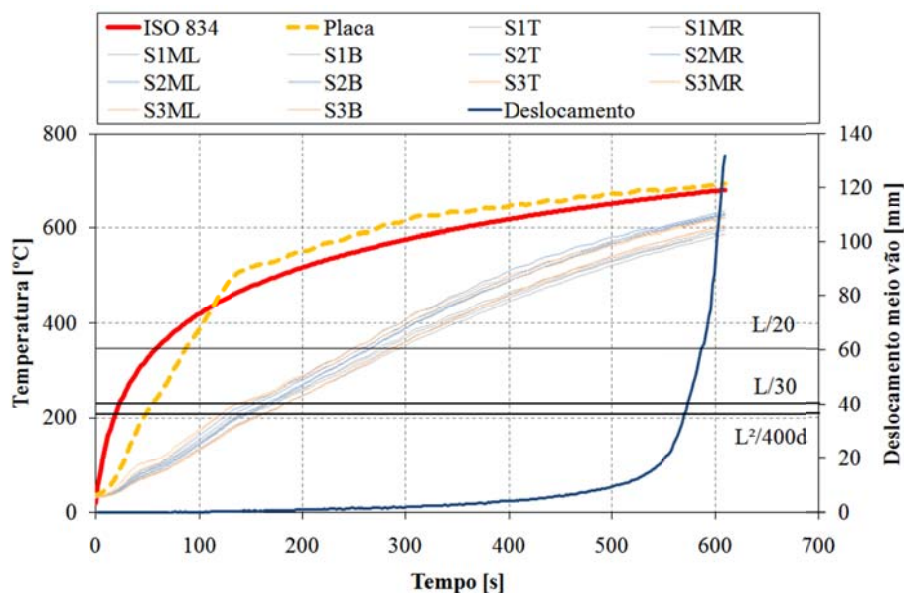


Gráfico 96 - Registo da carga e deslocamento a meio vão ao longo do tempo após o início de incêndio para o ensaio S5.

No Gráfico 97 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.



**Gráfico 97 - Registo da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio S5.**

No Gráfico 98 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, a par dos valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

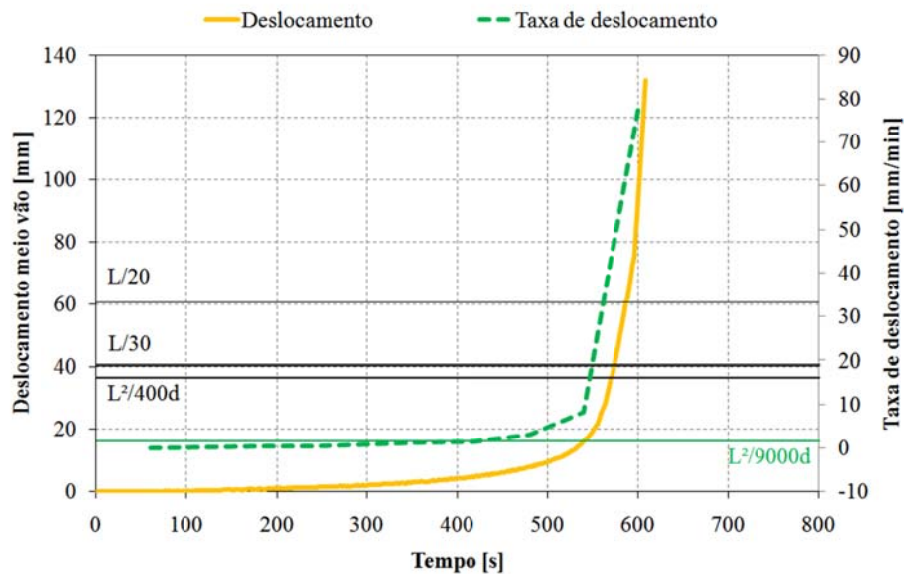


Gráfico 98 - Registro da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S5.

No **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834.

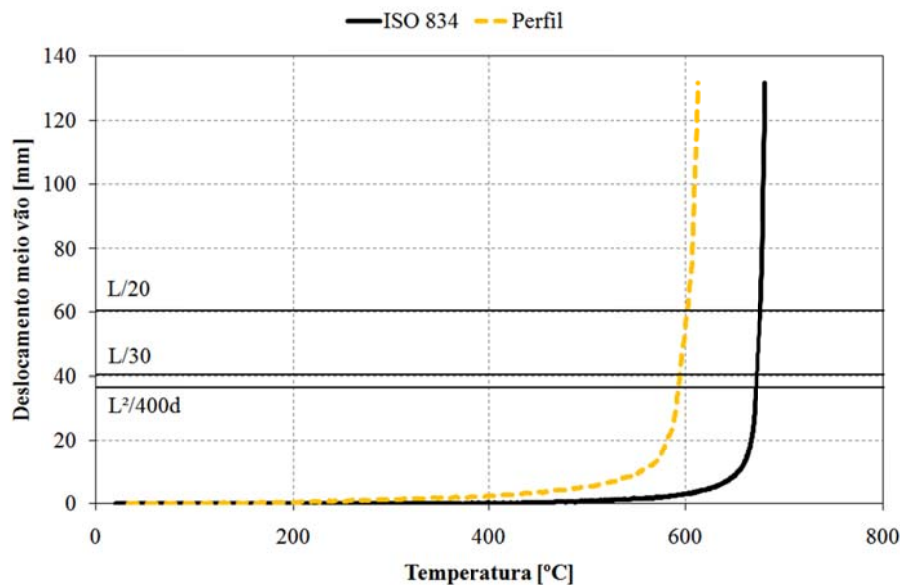


Gráfico 99 - Evolução do deslocamento ao longo do registro de temperaturas para o ensaio S5.

No Gráfico 100 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. O DH terá sofrido uma distorção do registro, devido a uma falha técnica.

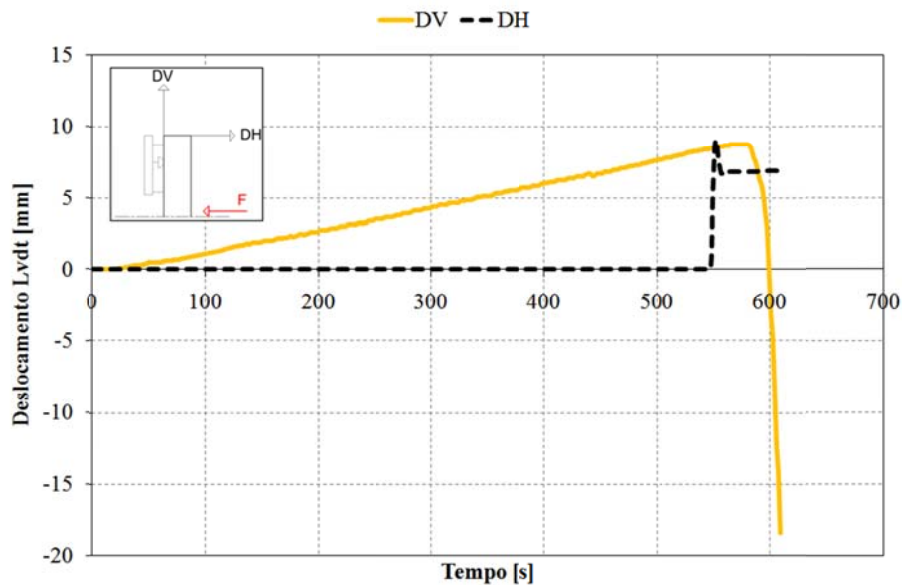


Gráfico 100 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S5.

No Gráfico 101 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite validar a hipótese de que a temperatura é uniforme em todo o perfil, em qualquer instante de tempo.

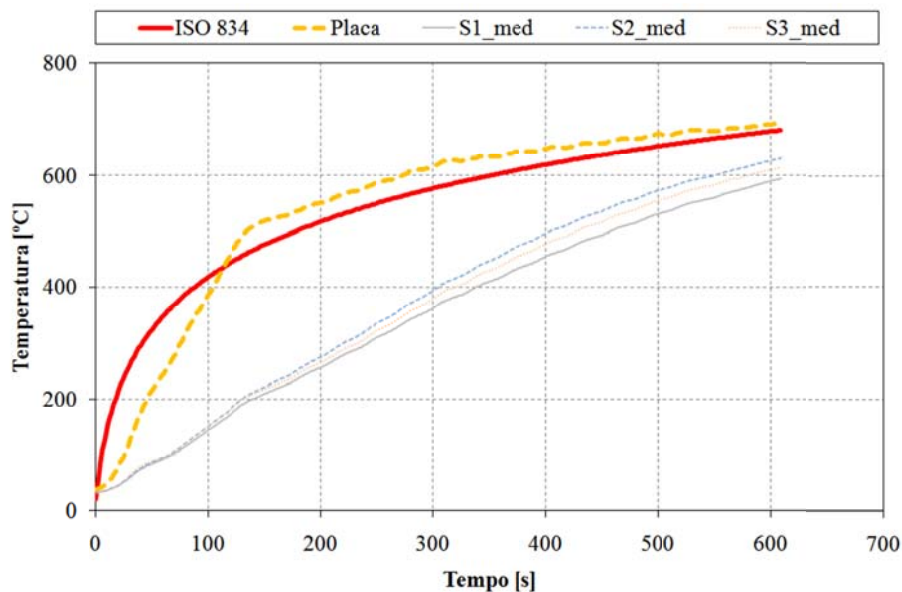
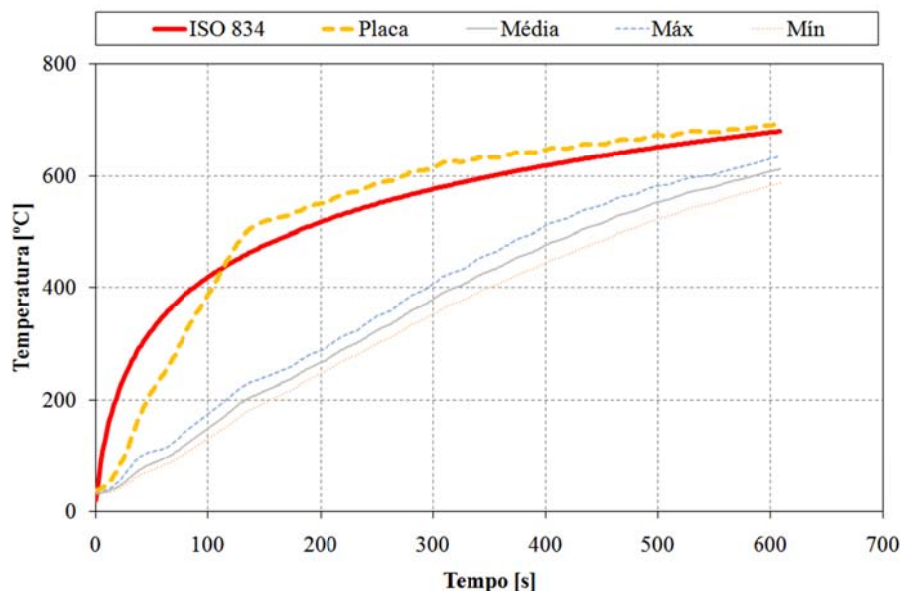


Gráfico 101 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S5.

No Gráfico 102 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.





**Gráfico 102 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S5.**

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 9 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 594,02 [°C].

A temperatura crítica determinada pelo método simplificado de cálculo, utiliza dados nominais de resistência e dados nominais do perfil utilizado. Estes dados proporcionam valores inferiores aos resultados experimentais. Para uma temperatura crítica de 535,78 [°C], seria expectável um tempo de resistência ao fogo de 8 minutos (em minutos completos).

#### 6.2.7. Ensaio C3 ( $\mu=30\%$ )

Este ensaio foi realizado a 10-08-2010, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo Eurocódigo 3 parte 1-2 (1), para um grau de utilização de  $\mu=30\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 663,78 [°C]. A resistência última equivale a uma força de 9310 [N]. Esta força foi exercida na viga de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizado o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

No Gráfico 103, está registado o histograma do valor da carga durante o ensaio.

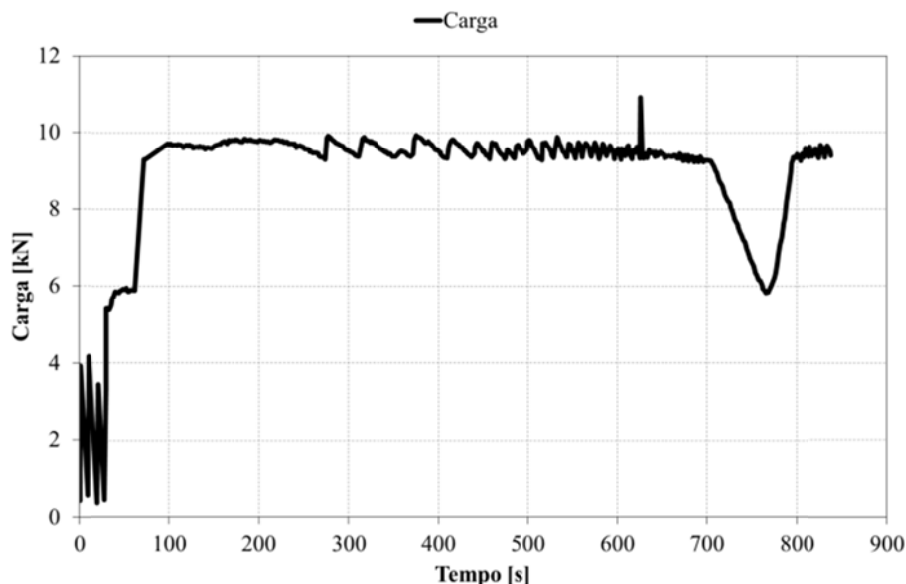


Gráfico 103 - Registro da intensidade da carga ao longo do tempo no ensaio C3.

No Gráfico 104 foi sobreposto o registro de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga registra uma perturbação.

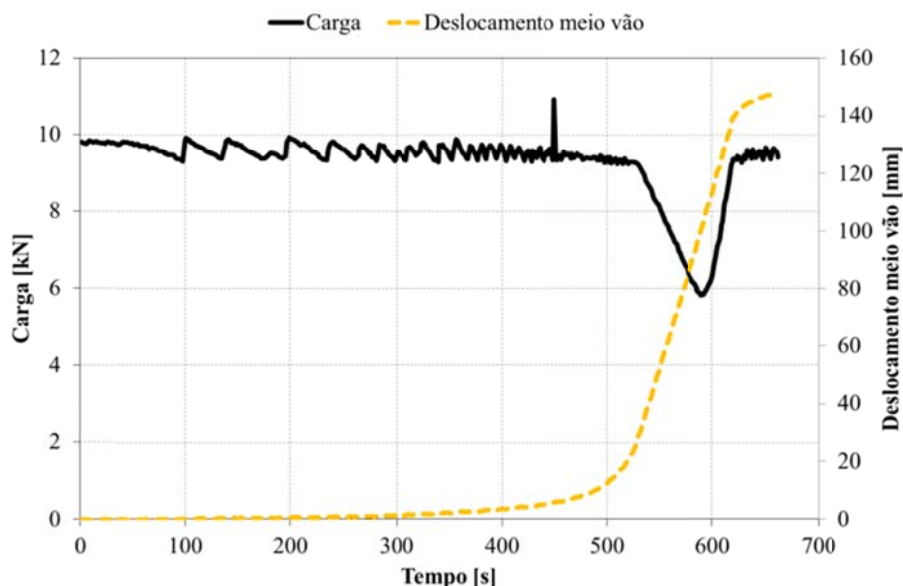


Gráfico 104 - Registro da carga e deslocamento a meio vão ao longo do tempo após o início de incêndio para o ensaio C3.

No Gráfico 105 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites





No Gráfico 107 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 105, a curva de fogo ISO834, coincide com a temperatura média dentro do forno de resistência.

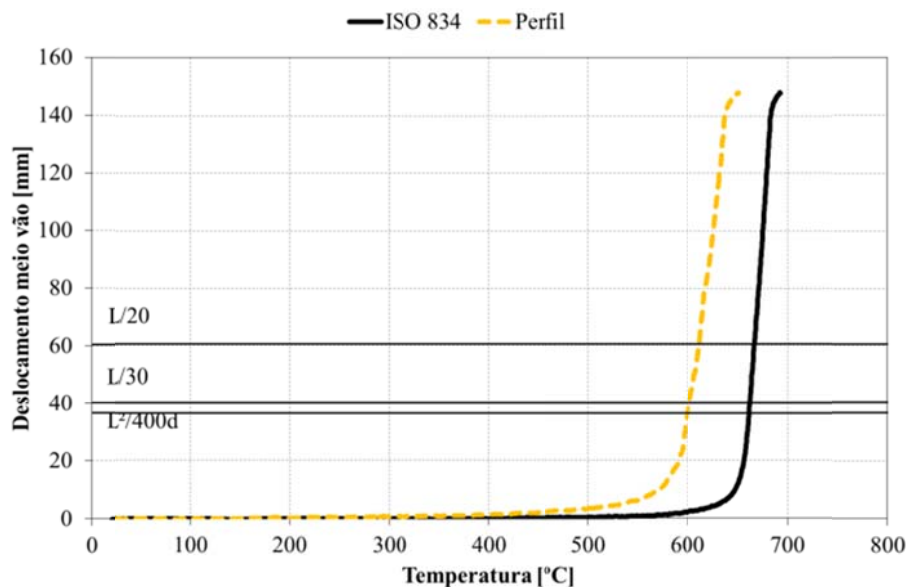


Gráfico 107 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C3.

No Gráfico 108 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil.

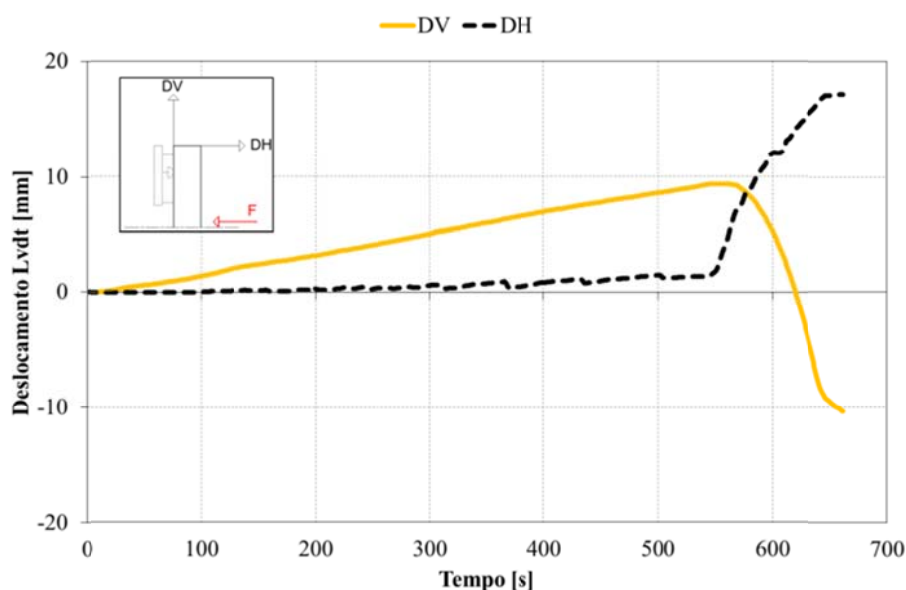


Gráfico 108 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C3.

No Gráfico 109 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite validar a hipótese de que a temperatura é uniforme em todo o perfil, em qualquer instante de tempo.

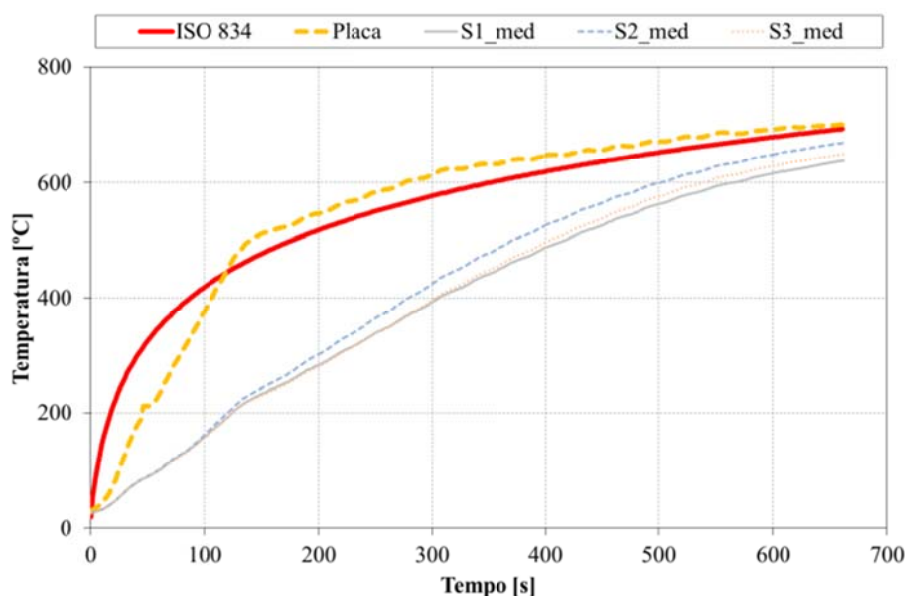


Gráfico 109 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C3.

No Gráfico 110 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

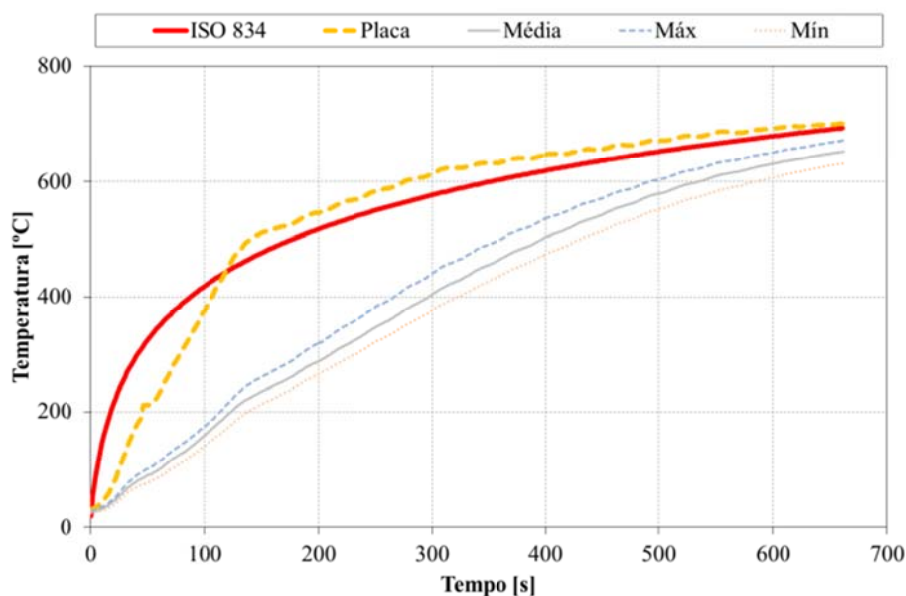


Gráfico 110 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C3.



Figura 40 - Fotos da evolução no ensaio C3.

Na Figura 40 estão representados dois instantes do ensaio C3. À esquerda observa-se um instante de tempo durante a curva de fogo ISO834 ligada, à direita observa-se um instante de tempo logo após a curva de fogo ter sido desligada.

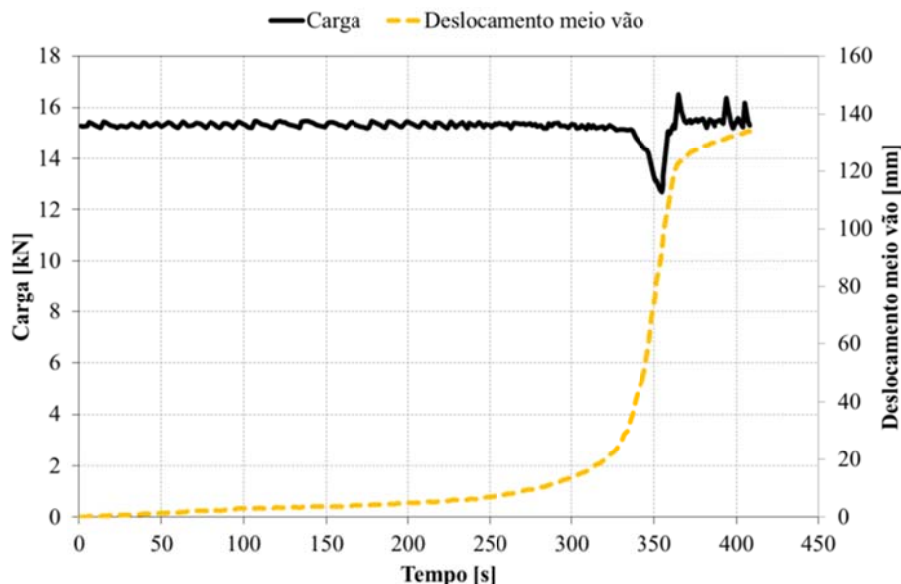
O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 9 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 602,27 [°C].

A temperatura crítica determinada pelo método simplificado de cálculo, utiliza dados nominais de resistência e dados nominais do perfil utilizado. Estes dados proporcionam valores superiores aos resultados experimentais. Para uma temperatura crítica de 663,78 [°C], seria expectável um tempo de resistência ao fogo de 12 minutos (em minutos completos).

#### 6.2.8. Ensaio C4 ( $\mu=50\%$ )

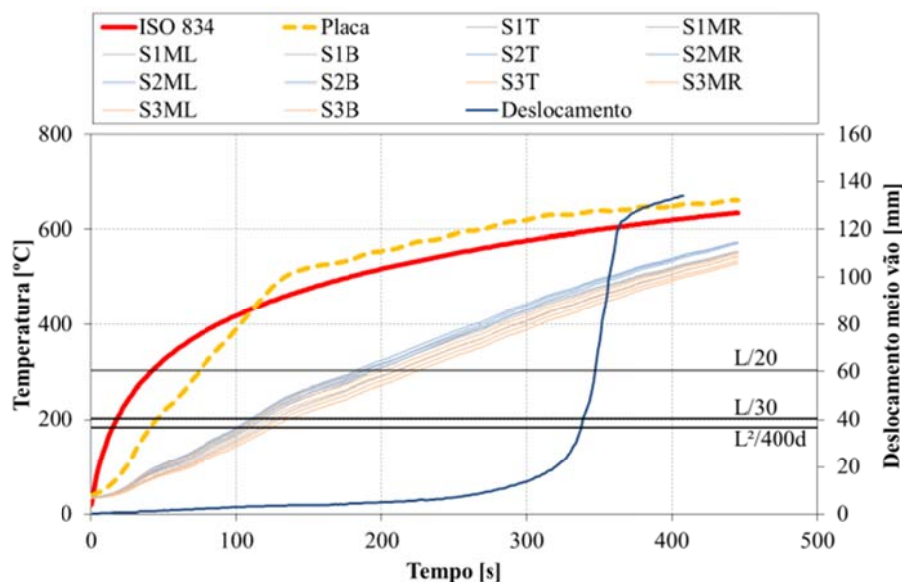
Este ensaio foi realizado a 10-08-2010, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo Eurocódigo 3 parte 1-2 (1), para um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 15200 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

No Gráfico 111 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma pequena perturbação.



**Gráfico 111 - Registro da carga e deslocamento a meio vão ao longo do tempo após o início de incêndio para o ensaio C4.**

No Gráfico 112 estão registradas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.



**Gráfico 112 - Registro da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio C4.**

No Gráfico 113 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de

deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

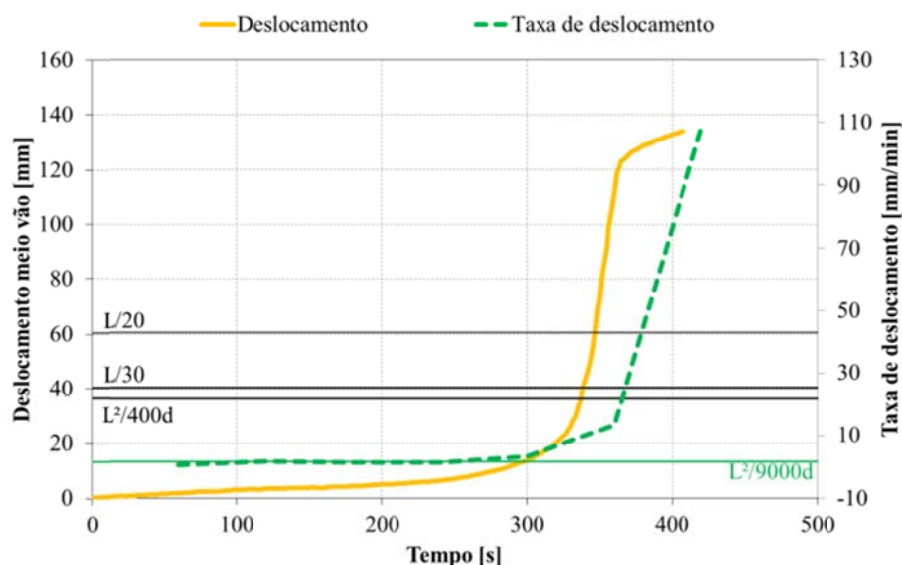


Gráfico 113 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C4.

No Gráfico 114 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834.

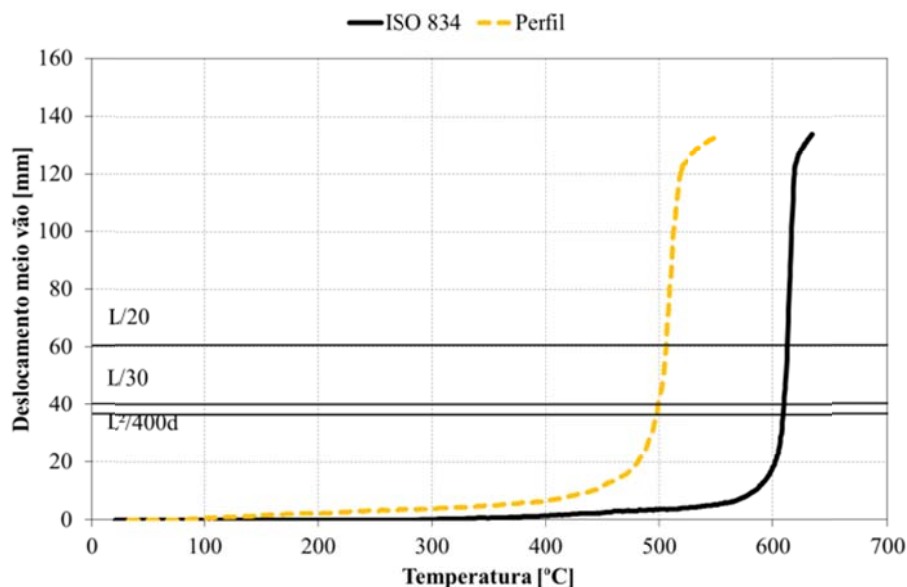


Gráfico 114 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C4.

No Gráfico 115 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil.

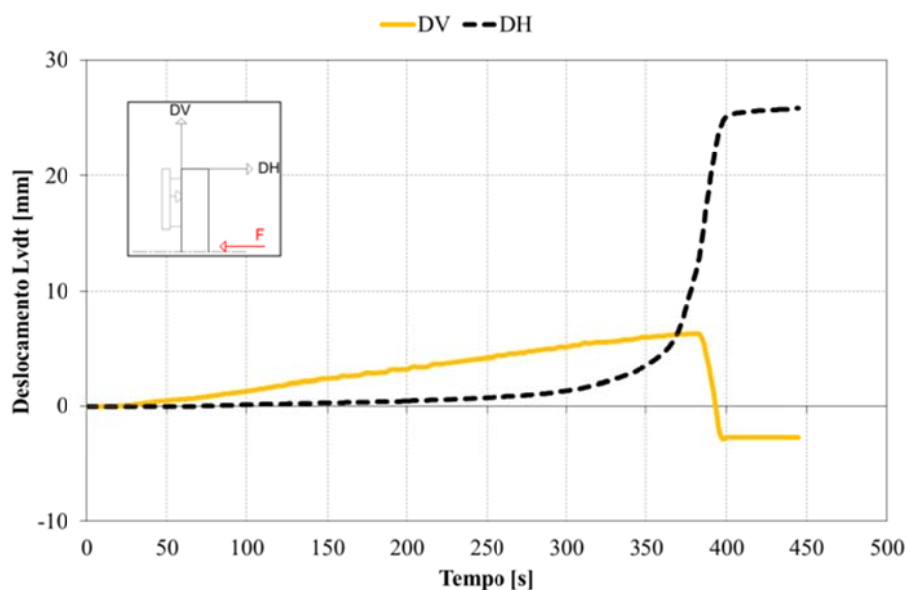


Gráfico 115 - Registro dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C4.

No Gráfico 116 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite validar a hipótese de que a temperatura é uniforme em todo o perfil, em qualquer instante de tempo.

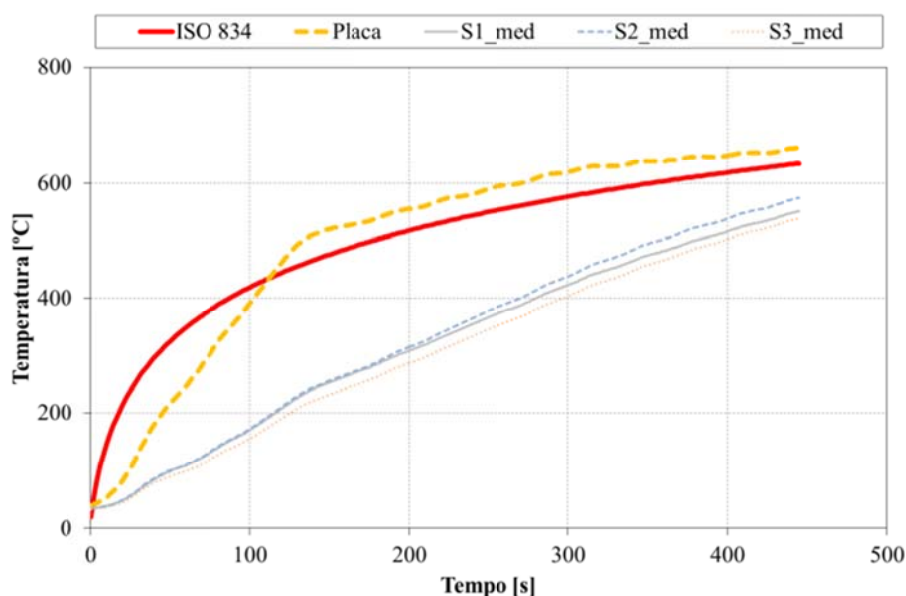


Gráfico 116 - Registro da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C4.



No Gráfico 117 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

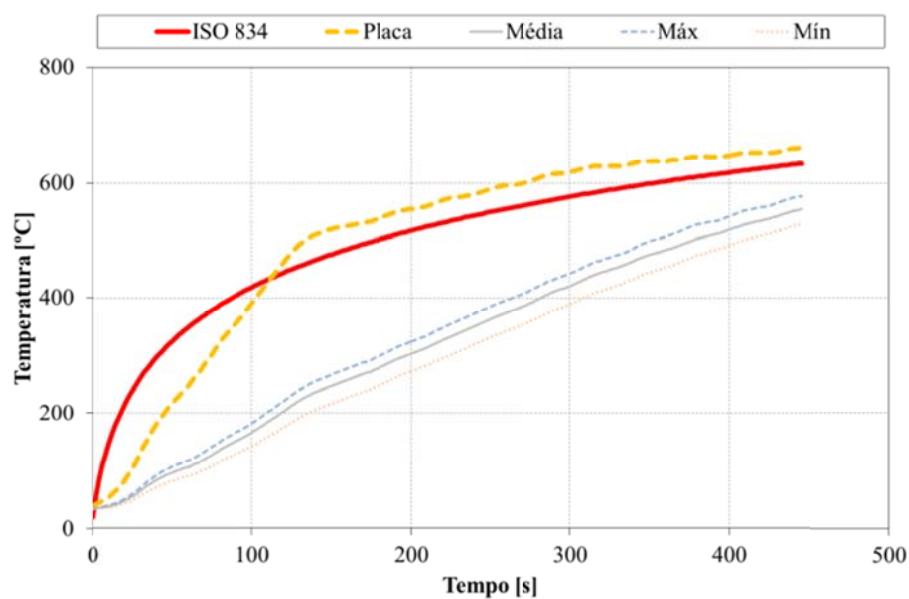


Gráfico 117 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C4.



Figura 41 - Fotos da deformada sofrida no ensaio C4

Na Figura 41 está representada a deformada sofrida pelo elemento no final do ensaio.



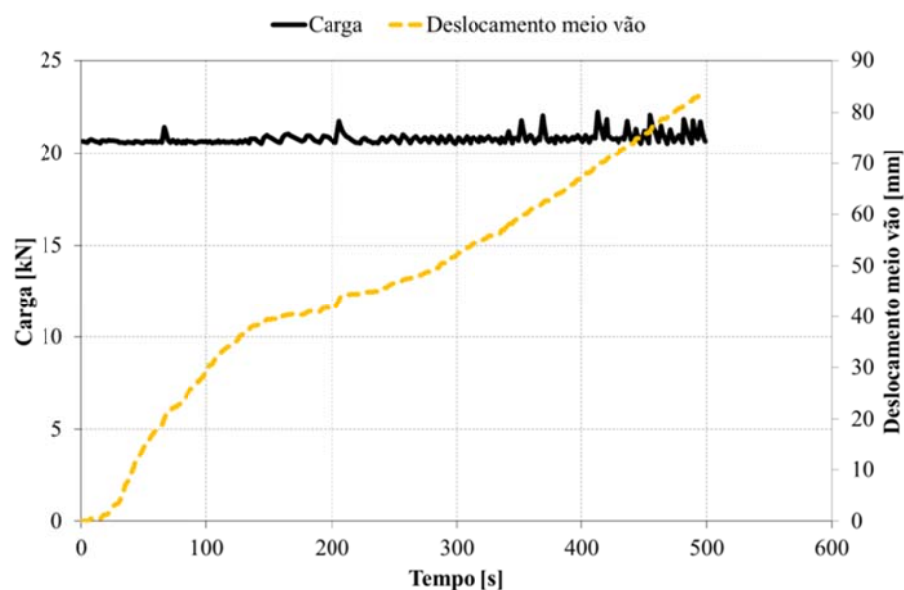
O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 6 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 499,42 [°C].

A temperatura crítica determinada pelo método simplificado de cálculo, utiliza dados nominais de resistência e dados nominais do perfil utilizado. Estes dados proporcionam valores inferiores aos resultados experimentais. Para uma temperatura crítica de 584,67 [°C], seria expectável um tempo de resistência ao fogo de 9 minutos (em minutos completos).

#### 6.2.9. Ensaio C5 ( $\mu=70\%$ )

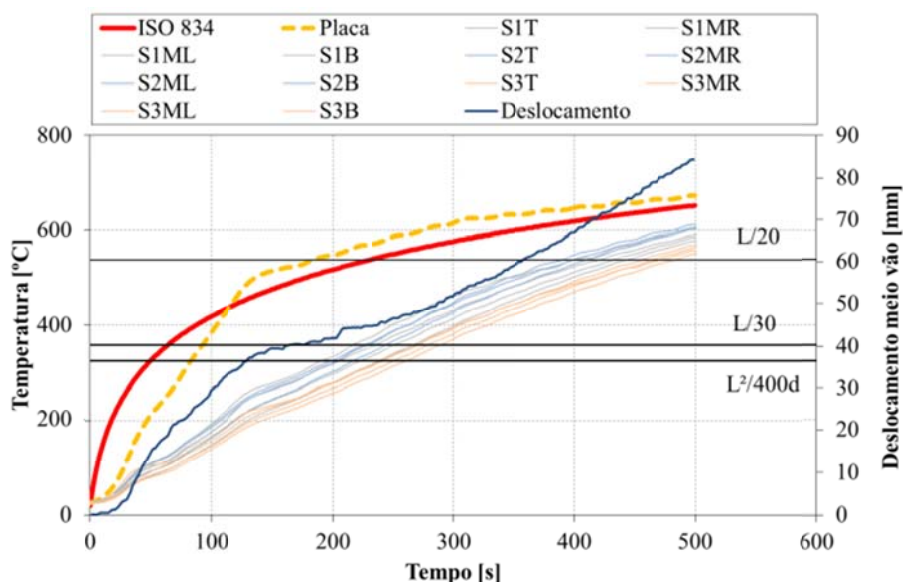
Este ensaio foi realizado a 11-08-2010, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo Eurocódigo 3 parte 1-2 (1), para um grau de utilização de  $\mu=70\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 525,78 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 20560 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

No Gráfico 118 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De notar, um deslocamento continuo do ponto de aplicação da carga durante todo o ensaio. Como se pode observar nos Gráfico 33 e Gráfico 41, o patamar de L/30 (cedência do elemento) ocorre para cargas muito próximas à carga aplicada neste elemento, sendo assim deduzível que este grau de utilização ( $\mu=70\%$ ) coloca este elemento muito perto da sua resistência última. Este fenómeno poderá ter origem nos dados nominais.



**Gráfico 118 - Registo da carga e deslocamento a meio vão ao longo do tempo após o início de incêndio para o ensaio C5.**

No Gráfico 119 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.



**Gráfico 119 - Registo da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio C5.**

No Gráfico 120 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, a par dos valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento encontra-se em todo o ensaio com valores superiores ao limite de estabilidade do elemento, não atingindo nenhum momento, valores de relevância.

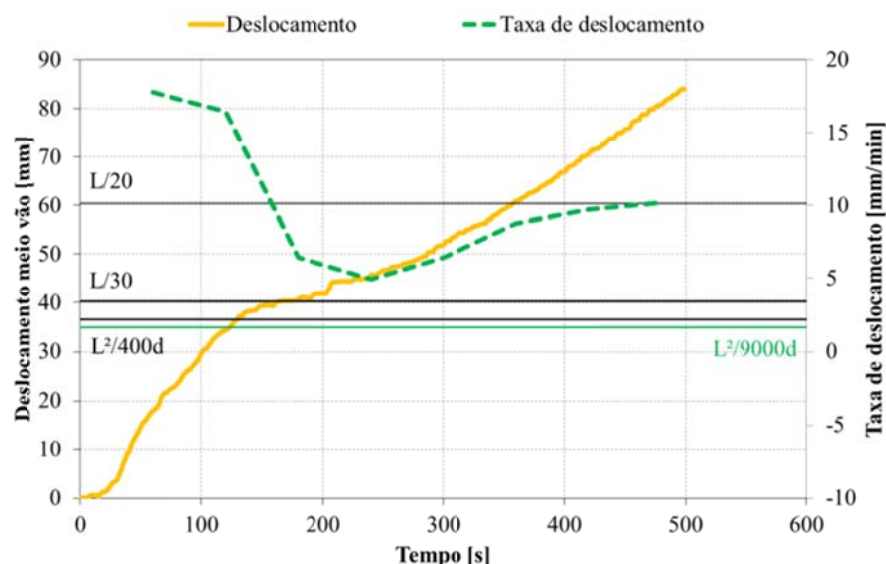


Gráfico 120 - Registro da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C5.

No Gráfico 121 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834.

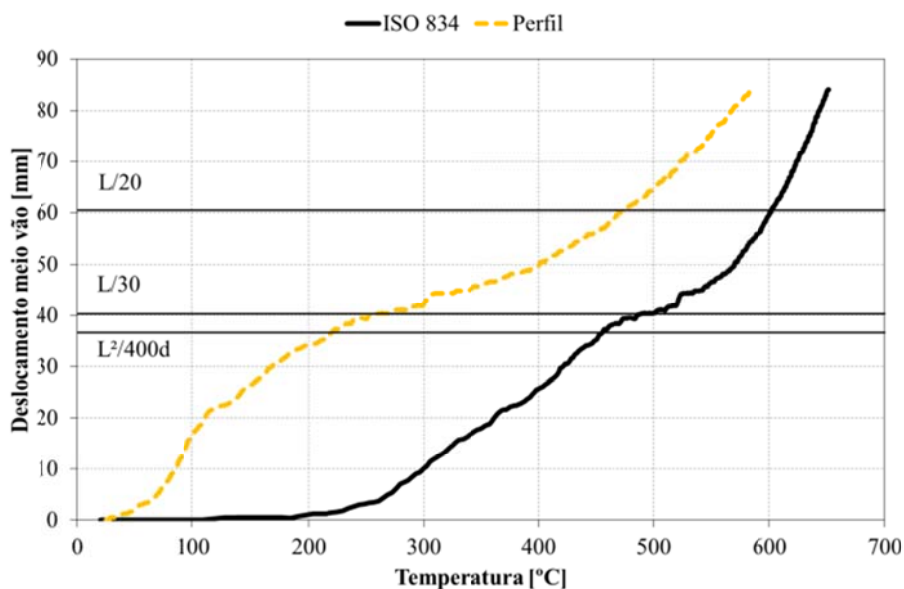


Gráfico 121 - Evolução do deslocamento ao longo do registro de temperaturas para o ensaio C5.

No Gráfico 122 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. De notar que o elemento se deforma ao longo do aquecimento a que é sujeito, por esse motivo a extremidade do elemento acompanha a deformação no ponto de aplicação da carga.

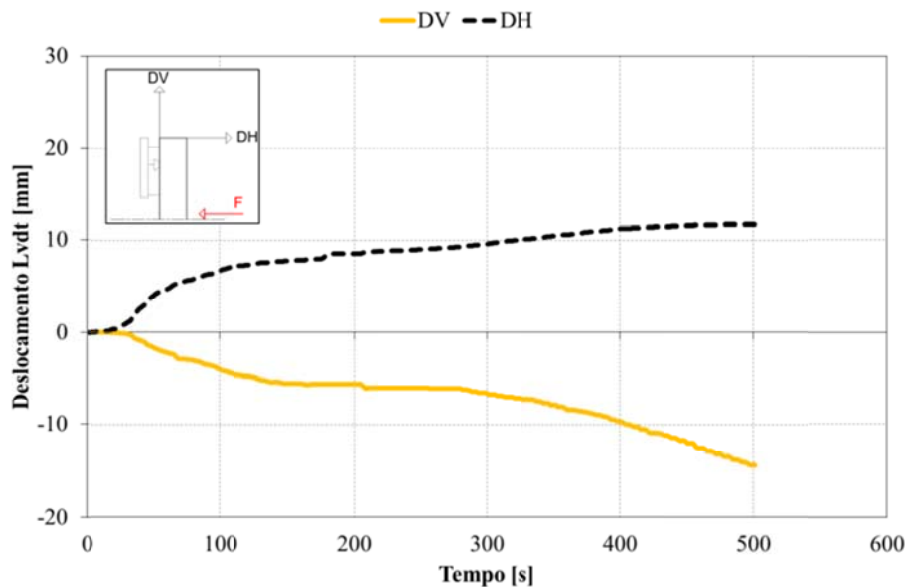


Gráfico 122 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C5.

No Gráfico 123 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite validar a hipótese de que a temperatura é uniforme em todo o perfil, em qualquer instante de tempo.

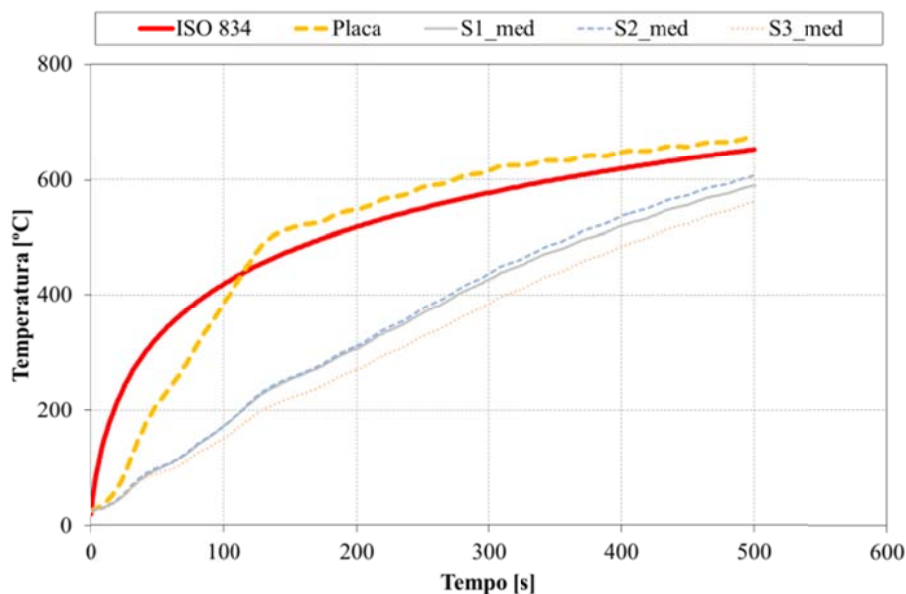


Gráfico 123 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C5.

No Gráfico 124 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

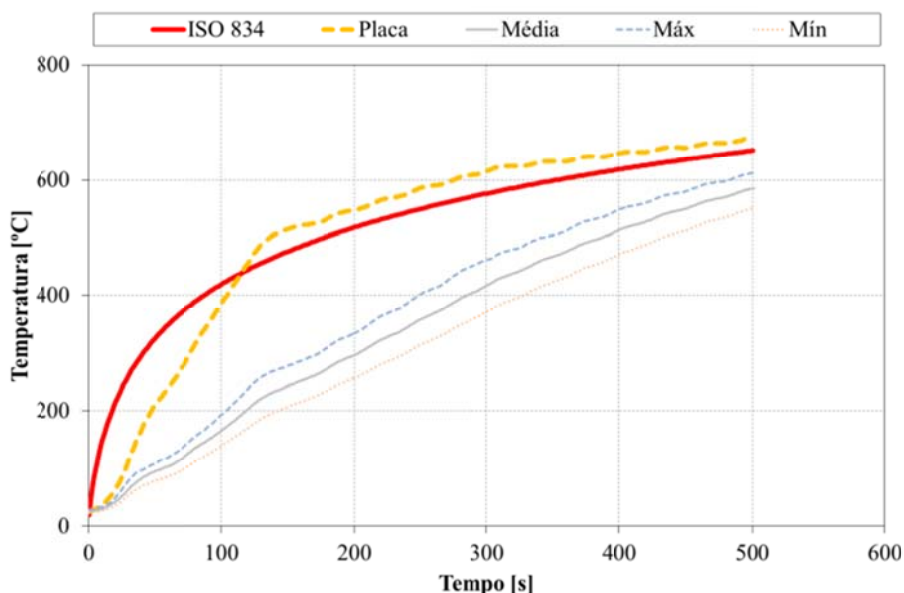


Gráfico 124 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C5.



Figura 42 – Foto da deformada sofrida no ensaio C5.

Na Figura 42 observa-se a deformada do elemento, no final do ensaio.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 2 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 255,64 [°C].

A temperatura crítica determinada pelo método simplificado de cálculo, utiliza dados nominais de resistência e dados nominais do perfil utilizado. Estes dados proporcionam valores inferiores aos resultados experimentais. Para uma

temperatura crítica de 535,78 [°C], seria expectável um tempo de resistência ao fogo de 8 minutos (em minutos completos).

#### 6.2.10. Ensaio L3 ( $\mu=30\%$ )

Este ensaio foi realizado a 11-08-2010, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo Eurocódigo 3 parte 1-2 (1), para um grau de utilização de  $\mu=30\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 663,78 [°C]. A resistência última equivale a uma força de 5840 [N]. Esta força foi exercida na viga de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizado o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

No Gráfico 125, está registado o histograma do valor da carga durante o ensaio.

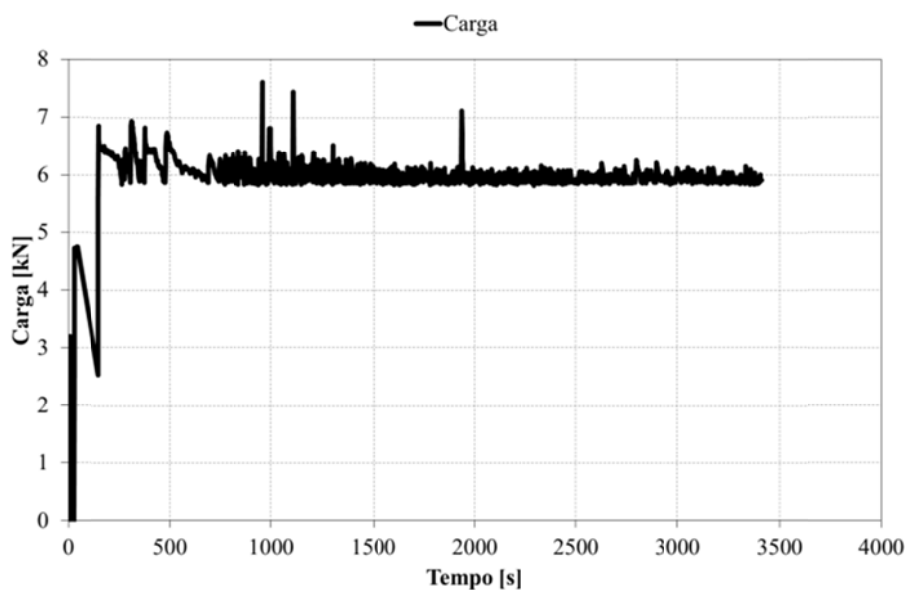


Gráfico 125 - Registro da intensidade da carga ao longo do tempo no ensaio L3.

No Gráfico 126 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio.





deslocamento desse ponto. Observa-se uma grande resistência ao deslocamento no ponto de aplicação da carga. A taxa de deslocamento não obtém valores muito elevados e por poucos instantes de tempo atinge o limite de estabilidade.

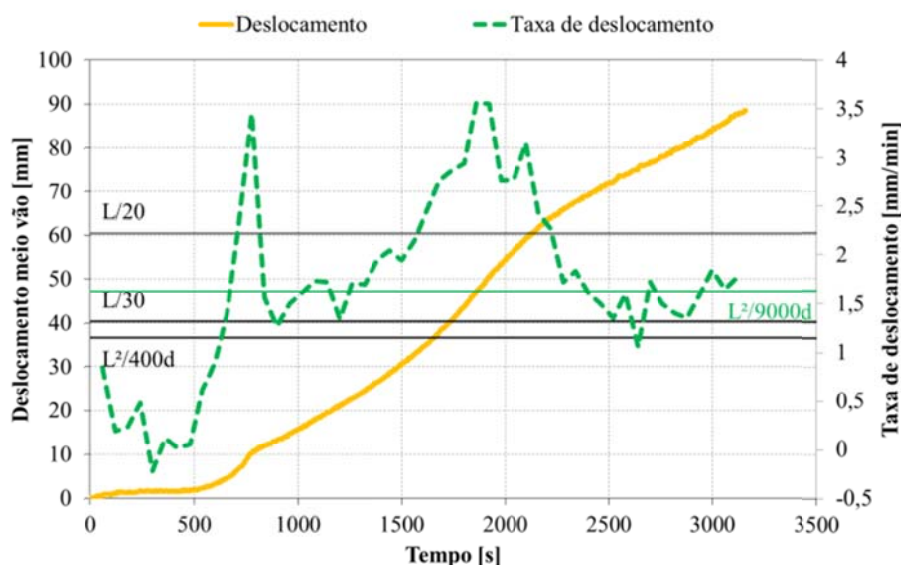


Gráfico 128 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L3.

No Gráfico 129 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 127, a curva de fogo ISO834, coincide com a temperatura média dentro do forno de resistência. De notar que as temperaturas da curva (forno) e do perfil aproximam-se no final.

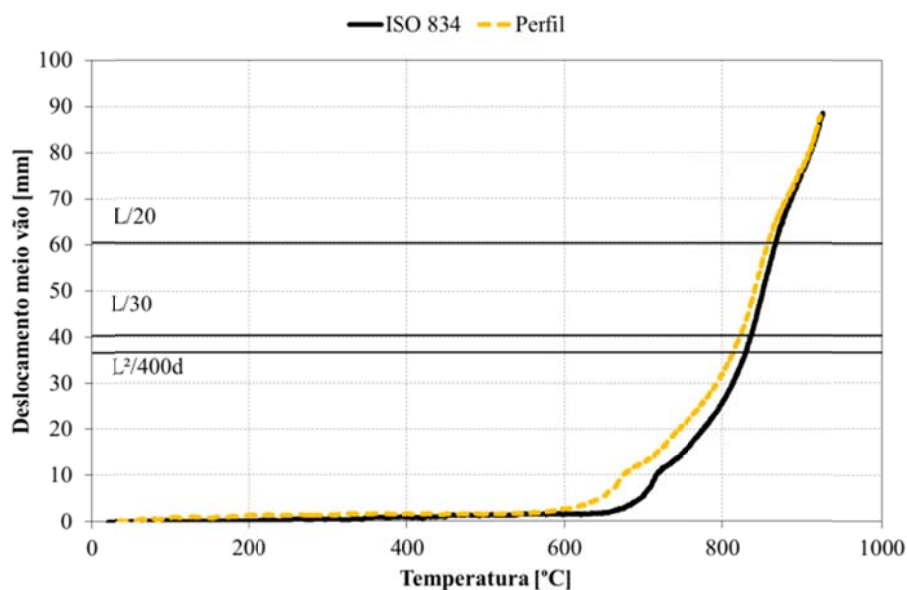


Gráfico 129 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L3.

No Gráfico 130 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil.

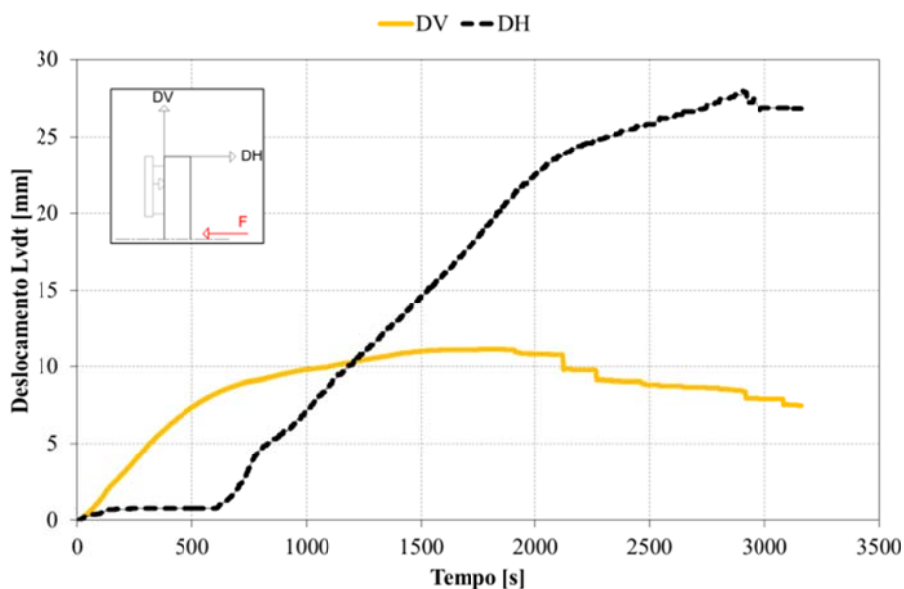


Gráfico 130 - Registro dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L3.

No Gráfico 131 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite validar a hipótese de que a temperatura é uniforme em todo o perfil, em qualquer instante de tempo.

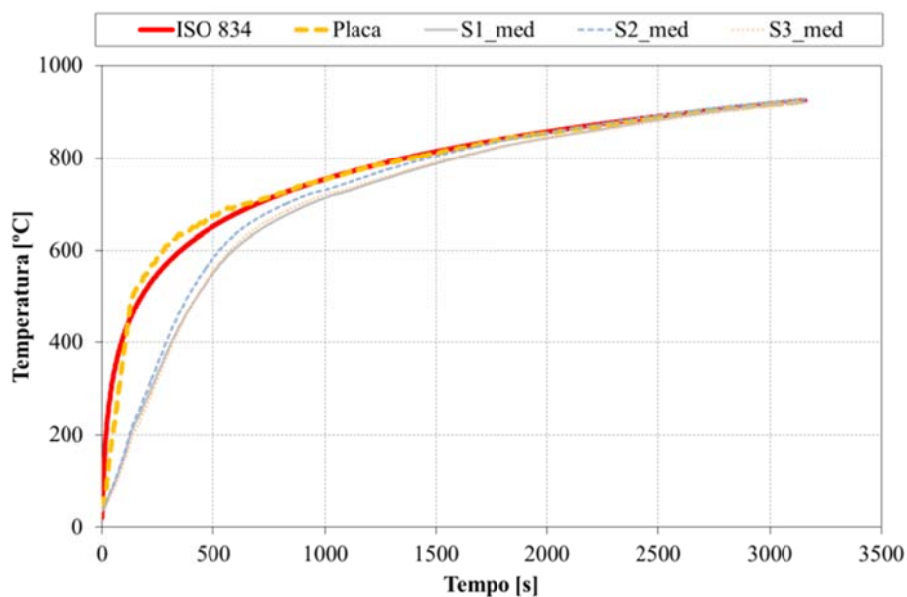


Gráfico 131 - Registro da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L3.

No Gráfico 132 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

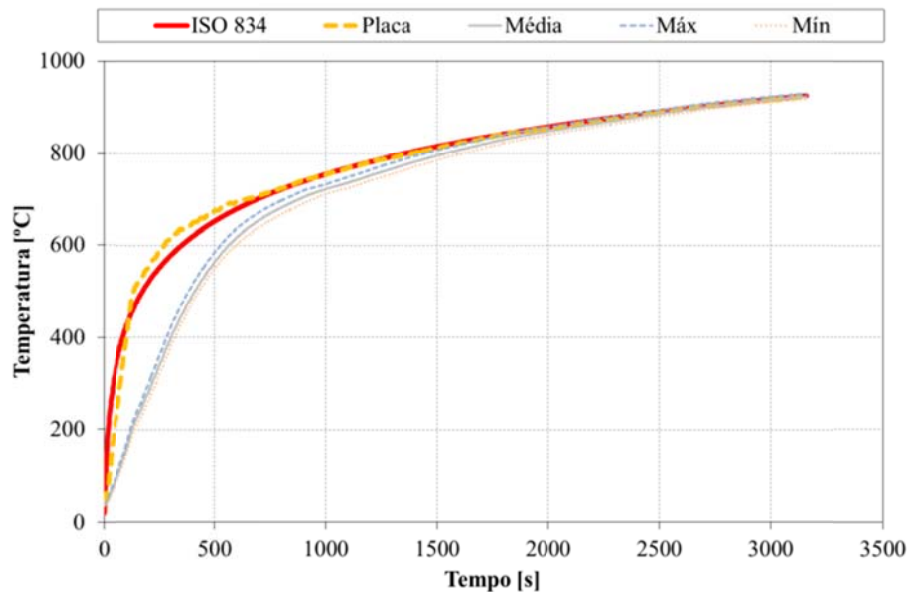


Gráfico 132 - Registro das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L3.



Figura 43 - Fotos da evolução no ensaio L3.

Na Figura 43 estão representados dois instantes do ensaio I3. À esquerda observa-se um instante de tempo durante a curva de fogo ISO834 ligada, à direita observa-se um instante de tempo logo após a curva de fogo ter sido desligada.

Na Figura 44 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio. À esquerda ainda com os queimadores do forno de resistência ligados, à direita posteriormente quando o ambiente do forno de resistência já se encontrava estabilizado.



Figura 44 - Fotos da deformada sofrida no ensaio L3.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 29 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 822,55 [°C].

A temperatura crítica determinada pelo método simplificado de cálculo, utiliza dados nominais de resistência e dados nominais do perfil utilizado. Estes dados proporcionam valores inferiores aos resultados experimentais. Para uma temperatura crítica de 663,78 [°C], seria expectável um tempo de resistência ao fogo de 12 minutos (em minutos completos).

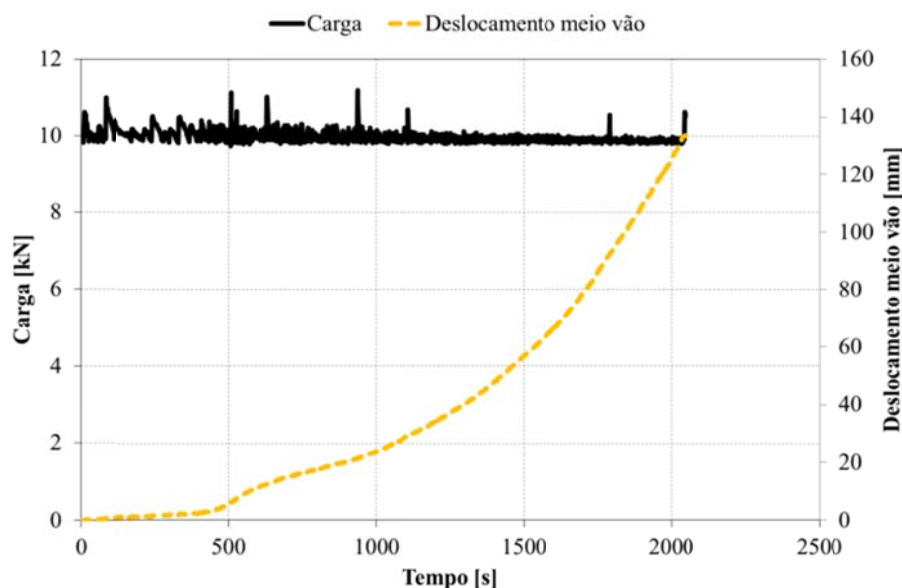
De concluir que a carga aplicada neste elemento poderá estar a induzir um grau de utilização inferior ao pretendido, observando os Gráfico 48 e Gráfico 54 prevê-se que a carga de 5840 [N] é pouco influente na capacidade última de resistência do elemento. O motivo deverá permanecer nos dados nominais de resistência e dados nominais do perfil utilizado.

#### 6.2.11. Ensaio L4 ( $\mu=50\%$ )

Este ensaio foi realizado a 12-08-2010, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo

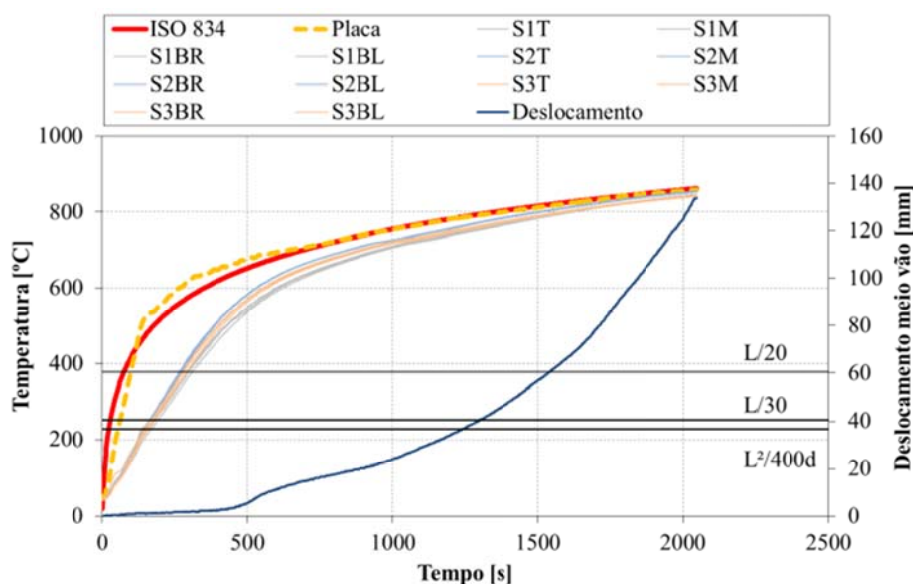
Eurocódigo 3 parte 1-2 (1), para um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 9830 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

No Gráfico 133 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De notar que o deslocamento no ponto de aplicação não provoca reacção significativa no histograma de carga.



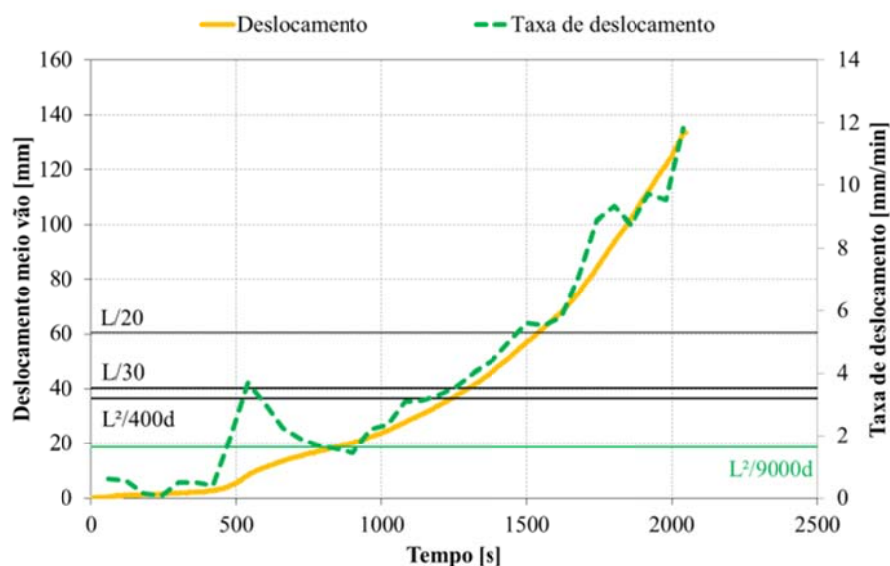
**Gráfico 133 - Registo da carga e deslocamento a meio vão, assim que ligada a curva de incêndio, para o ensaio L4.**

No Gráfico 134 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.



**Gráfico 134 - Registo da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio L4.**

No Gráfico 135 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma perturbação com uma velocidade paralela à intensidade de deslocamento do ponto de aplicação da carga, durante esse aumento linear de deslocamento e taxa de deslocamento é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.



**Gráfico 135 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L4.**

No Gráfico 136 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834.

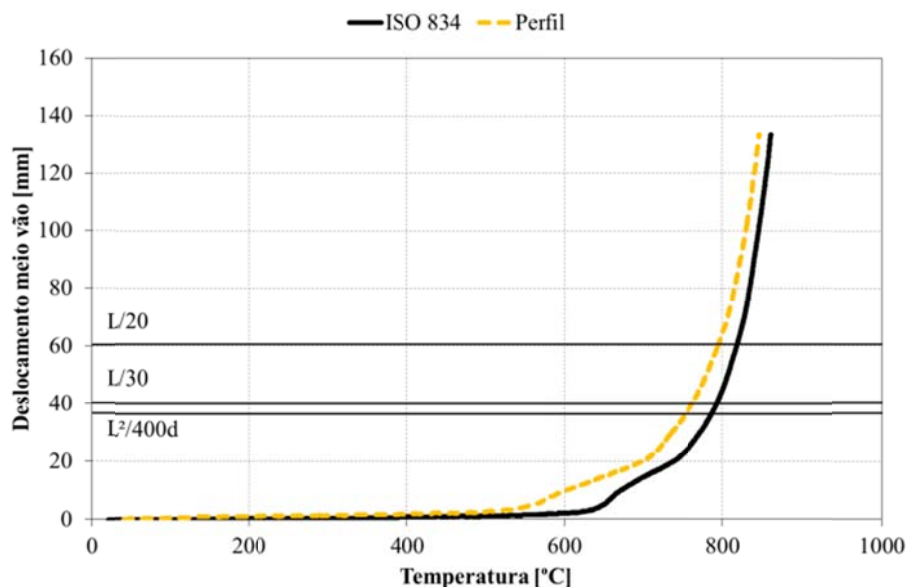


Gráfico 136 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L4.

No Gráfico 137 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil.

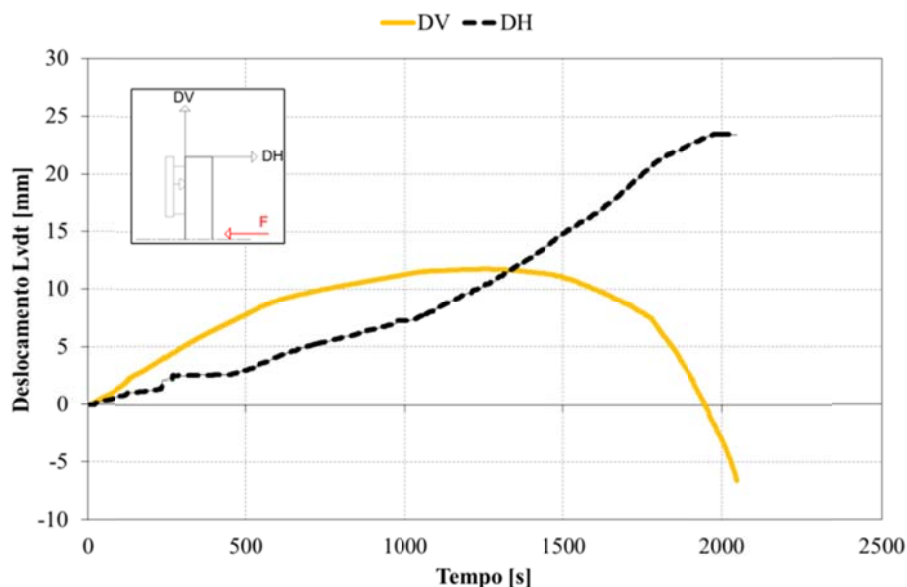


Gráfico 137 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L4.



No Gráfico 138 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite validar a hipótese de que a temperatura é uniforme em todo o perfil, em qualquer instante de tempo.

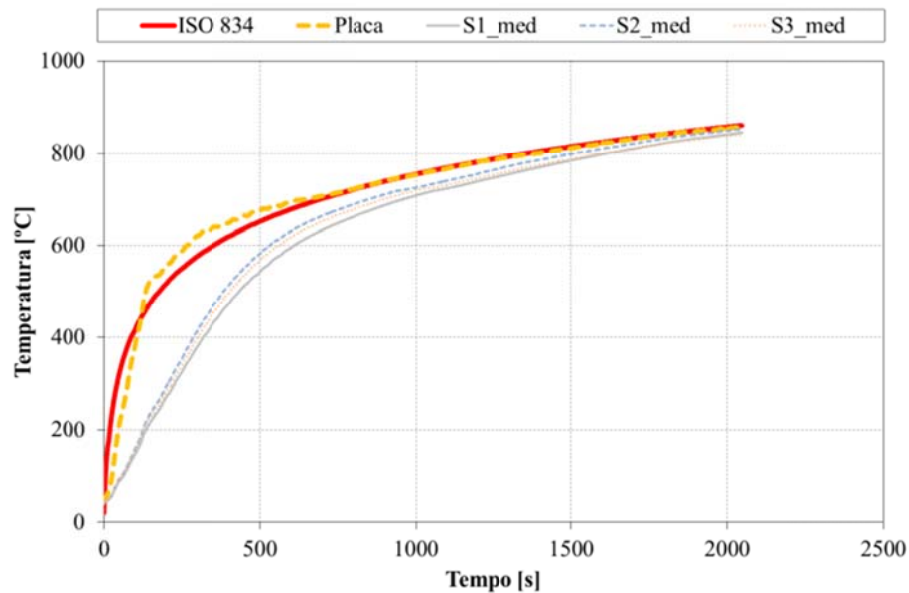


Gráfico 138 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L4.

No Gráfico 139 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

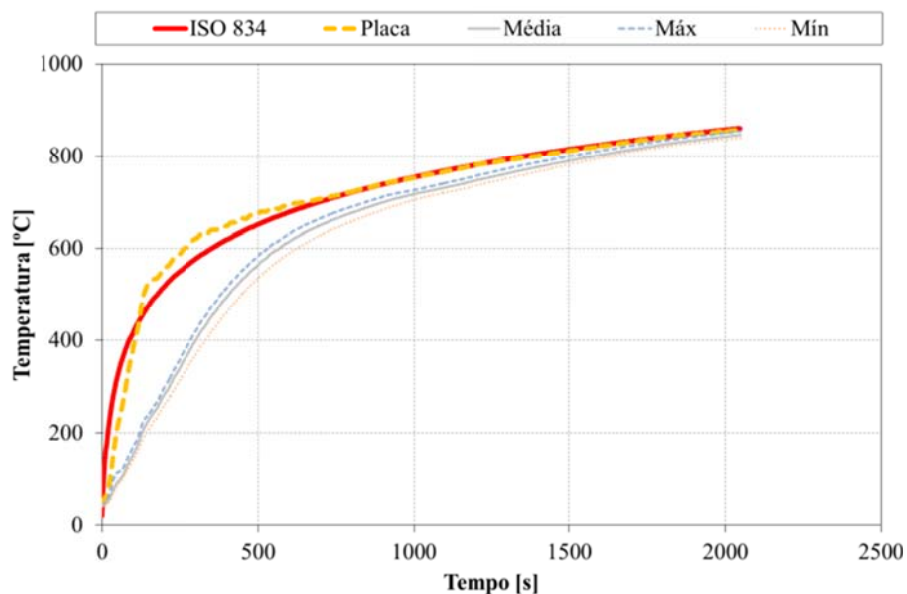


Gráfico 139 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L4.

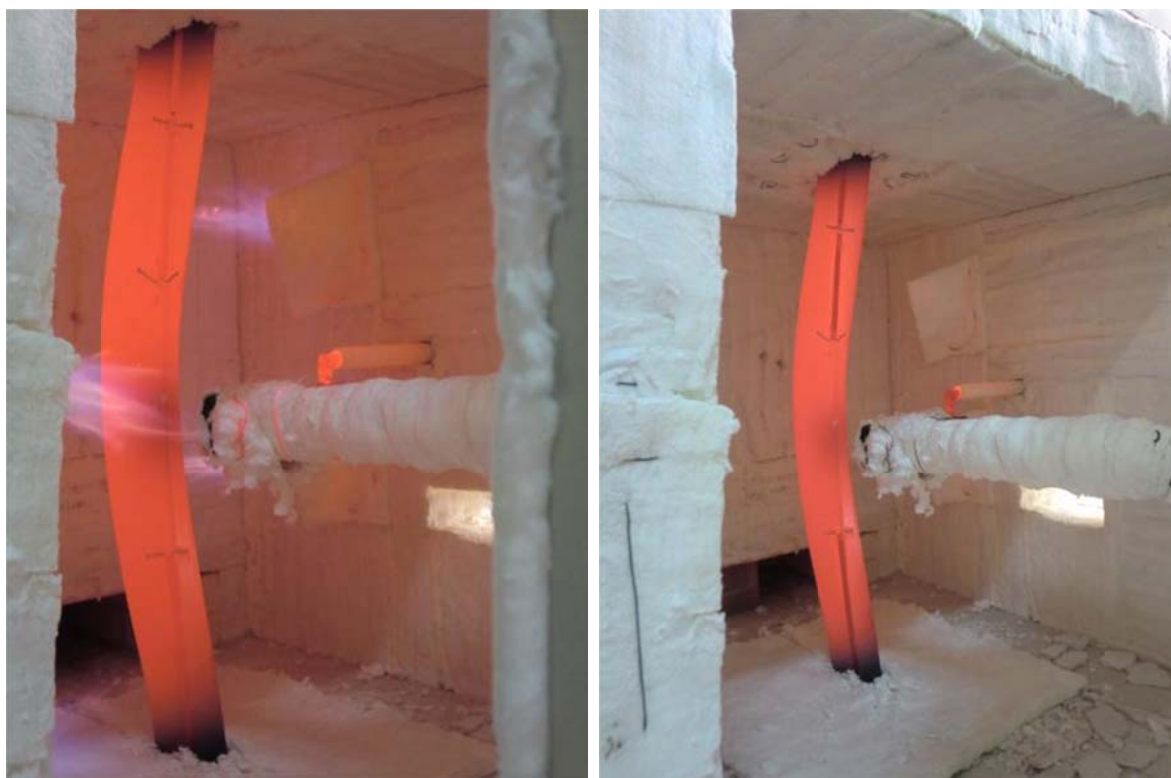


Figura 45 - Fotos da deformada sofrida no ensaio L4.

Na Figura 44 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio. À esquerda ainda com os queimadores do forno de resistência ligados, à direita posteriormente com os queimadores desligados.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 21 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 761,68 [°C].

A temperatura crítica determinada pelo método simplificado de cálculo, utiliza dados nominais de resistência e dados nominais do perfil utilizado. Estes dados proporcionam valores inferiores aos resultados experimentais. Para uma temperatura crítica de 584,67 [°C], seria expectável um tempo de resistência ao fogo de 9 minutos (em minutos completos).

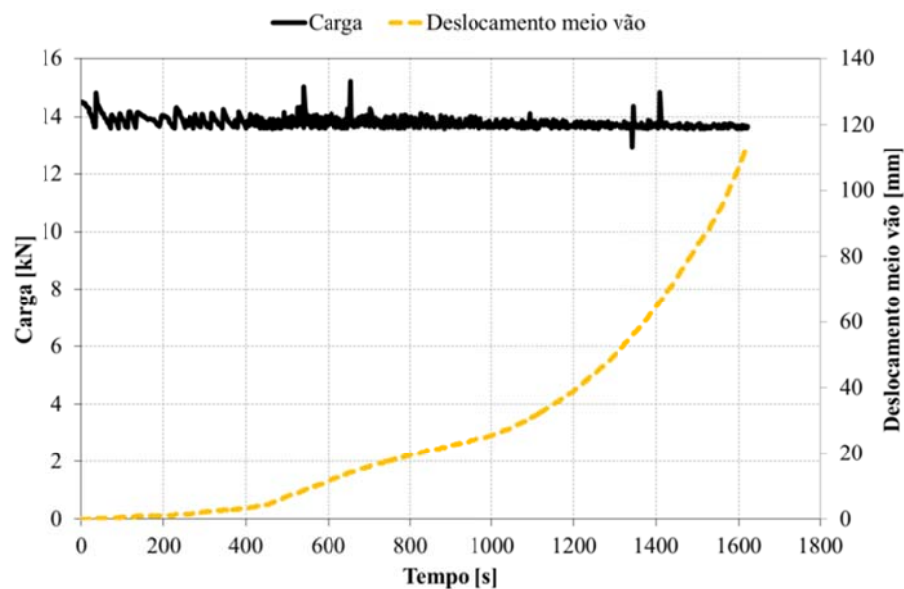
De concluir que a carga aplicada neste elemento poderá estar a induzir um grau de utilização inferior ao pretendido.

#### 6.2.12. Ensaio L5 ( $\mu=70\%$ )

Este ensaio foi realizado a 12-08-2010, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo Eurocódigo 3 parte 1-2 (1), para um grau de utilização de  $\mu=70\%$ , determina-se

uma temperatura crítica de 525,78 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 13610 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

No Gráfico 140 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De notar nenhuma perturbação do histograma de carga com o aumento do valor de deslocamento no ponto de aplicação da carga.



**Gráfico 140 - Registo da carga e deslocamento a meio vão ao longo do tempo após o início de incêndio para o ensaio L5.**

No Gráfico 141 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.

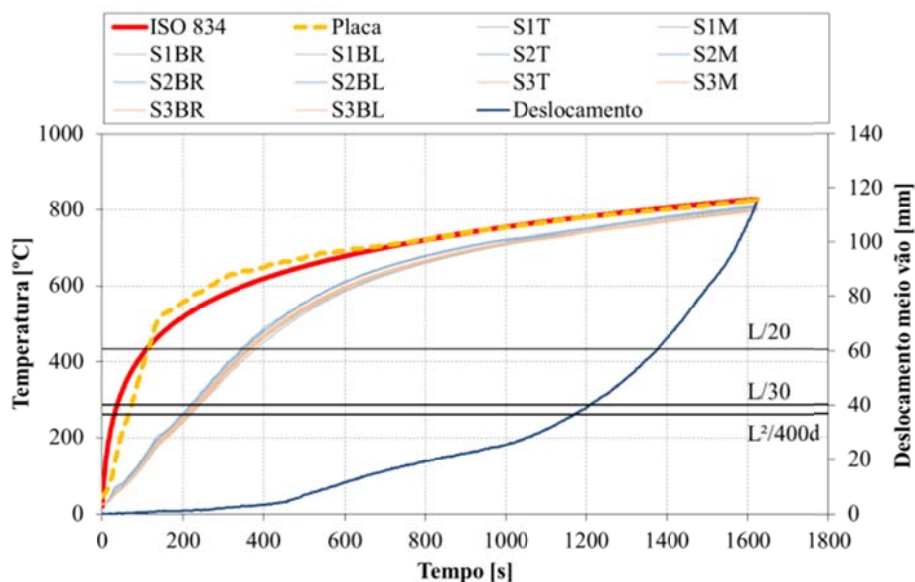


Gráfico 141 - Registro da evolução das temperaturas e do deslocamento a meio vão ao longo da curva de incêndio no ensaio L5.

No Gráfico 142 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registro da taxa de deslocamento sofre uma perturbação com uma velocidade paralela à intensidade de deslocamento do ponto de aplicação da carga, durante esse aumento linear de deslocamento e taxa de deslocamento é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

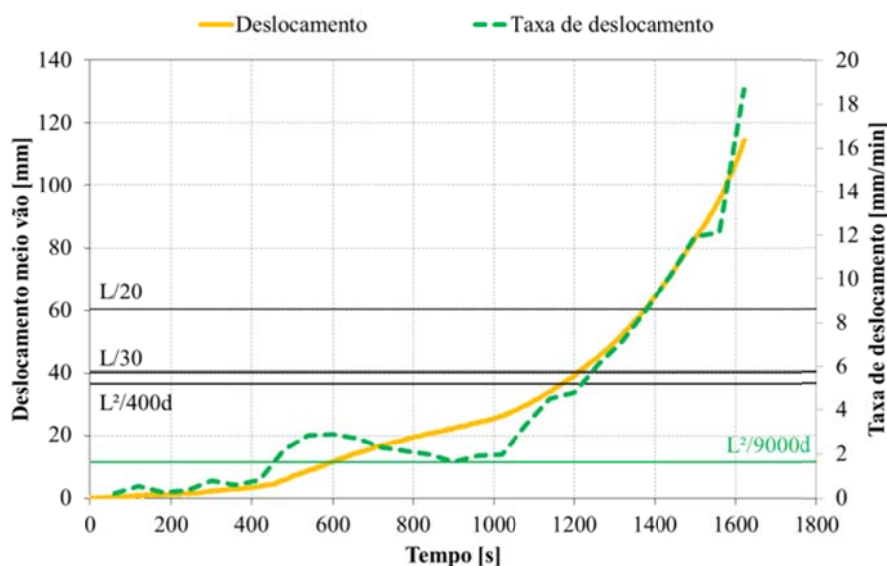


Gráfico 142 - Registro da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L5.

No Gráfico 143 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834.

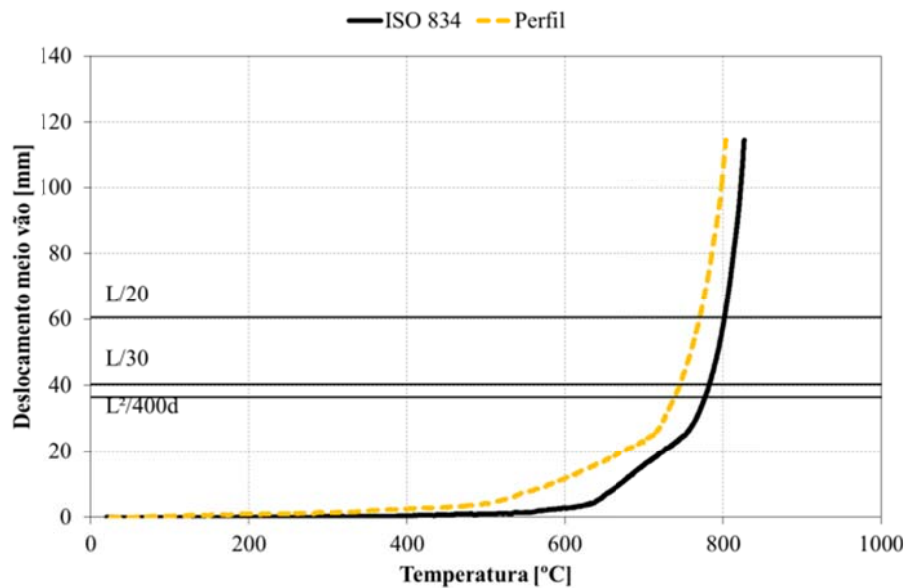


Gráfico 143 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L5.

No Gráfico 144 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil.

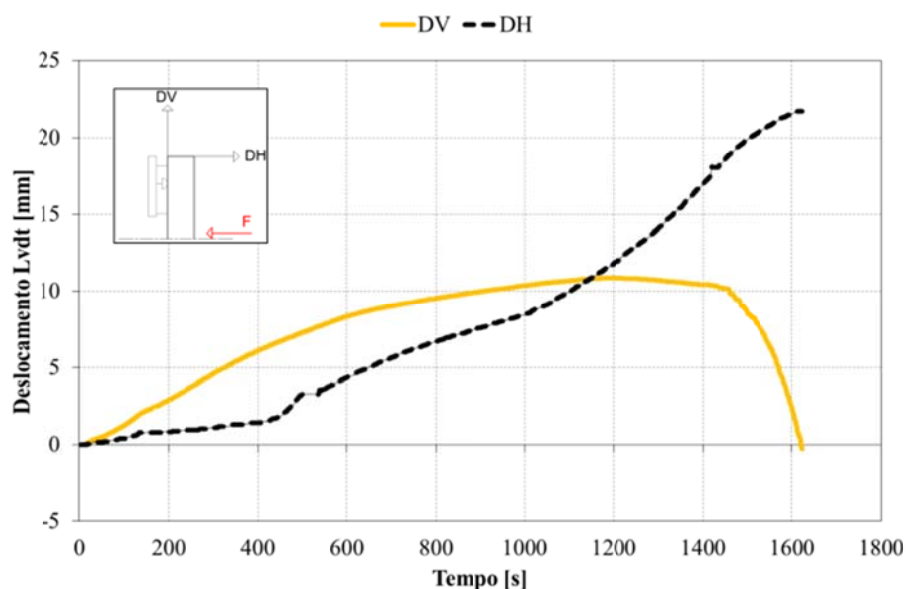


Gráfico 144 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L5.

No Gráfico 145 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite validar a hipótese de que a temperatura é uniforme em todo o perfil, em qualquer instante de tempo.

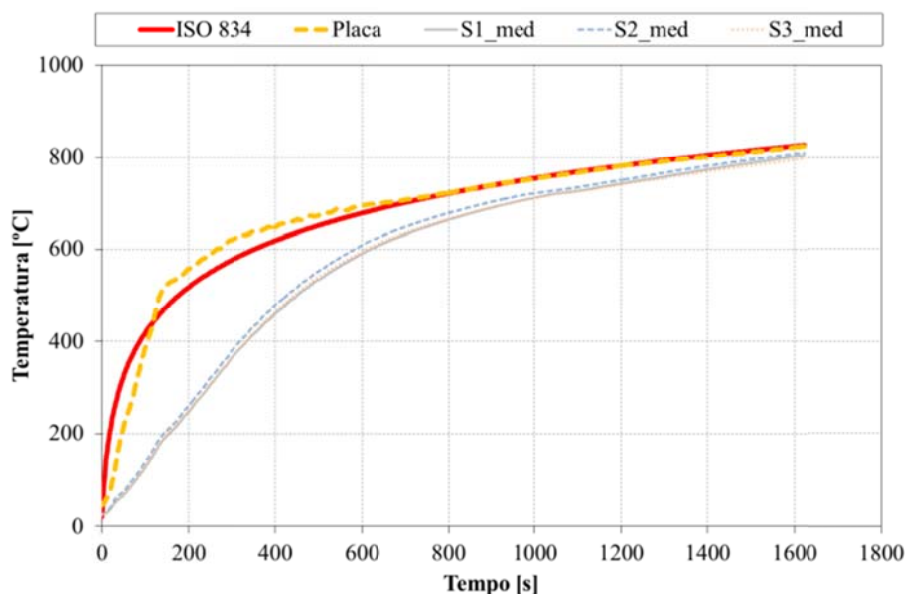


Gráfico 145 - Registro da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L5.

No Gráfico 146 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

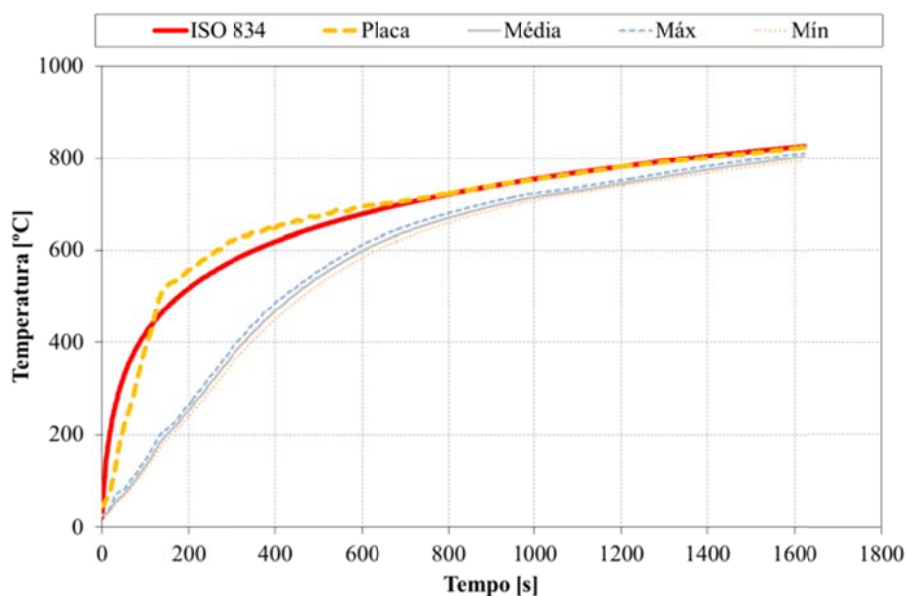


Gráfico 146 - Registro das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L5.



**Figura 46 – Foto da deformada sofrida no ensaio L5.**

Na Figura 46 observa-se a deformada do elemento, no final do ensaio, ainda com os queimadores ligados.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 20 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 745,66 [°C].

A temperatura crítica determinada pelo método simplificado de cálculo, utiliza dados nominais de resistência e dados nominais do perfil utilizado. Estes dados proporcionam valores inferiores aos resultados experimentais. Para uma temperatura crítica de 535,78 [°C], seria expectável um tempo de resistência ao fogo de 7 minutos (em minutos completos).

De concluir que a carga aplicada neste elemento poderá estar a induzir um grau de utilização inferior ao pretendido.



### 6.3. Ao fogo com protecção.

#### 6.3.1. Ensaio I6 ( $\mu=30\%$ , protecção a 1 [mm])

O ensaio I6 foi o primeiro teste à flexão de elementos sujeitos a condições de incêndio, com protecção de tinta intumescente. Este elemento foi ensaiado a 17-08-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=30\%$  determina-se uma temperatura crítica de 663,78°C. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 5340 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 11 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

Tabela 11 – Valores de protecção para ensaio I6.

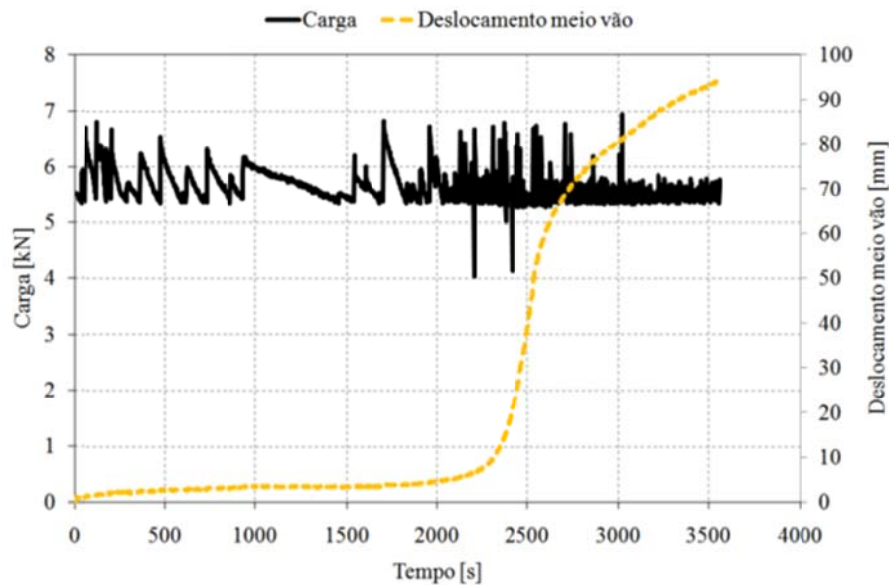
Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx.	Mín.
974	193	1253	445

Na Figura 47 é apresentado o perfil antes do ensaio com o isolamento das extremidades e a posição final no apoio superior.



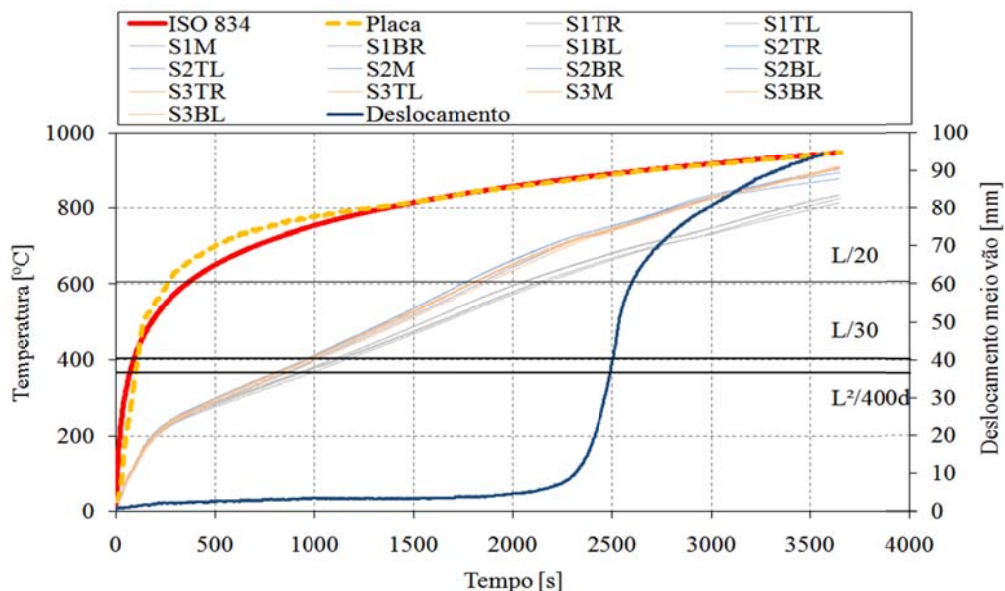
**Figura 47 - Fotos antes do início do ensaio I6.**

No Gráfico 147 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma pequena perturbação.



**Gráfico 147 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio I6.**

No Gráfico 148 estão registradas as temperaturas medidas nas três seções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.



**Gráfico 148 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio I6.**

No Gráfico 149 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento

sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

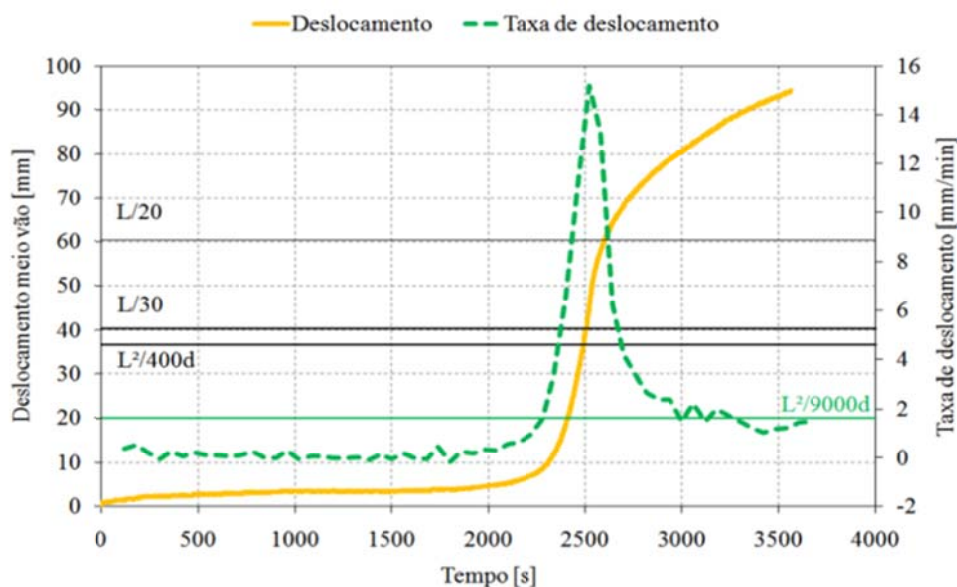


Gráfico 149 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I6.

No Gráfico 150 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 148, a curva de fogo ISO834, coincide com a temperatura média dentro do forno de resistência.

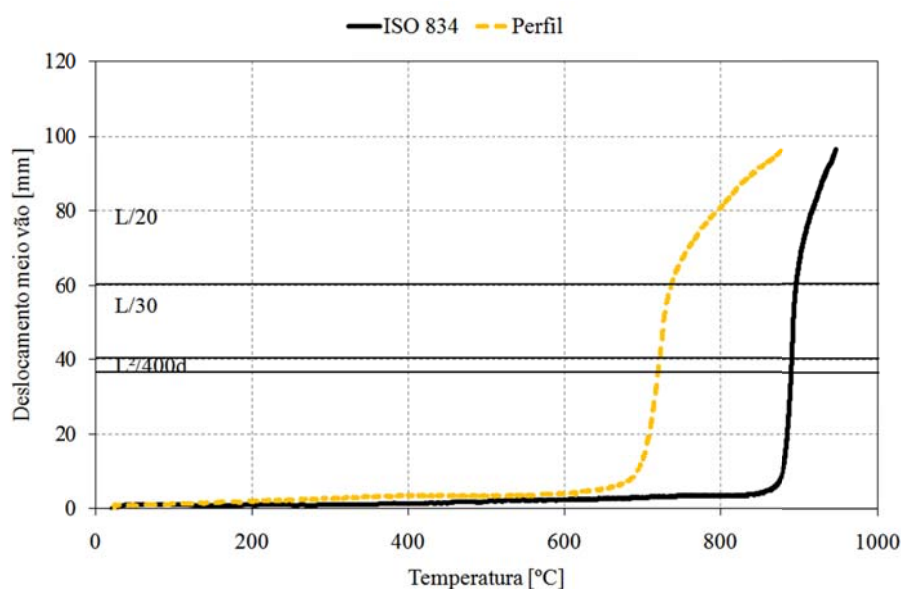


Gráfico 150 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I6.

No Gráfico 151 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio.

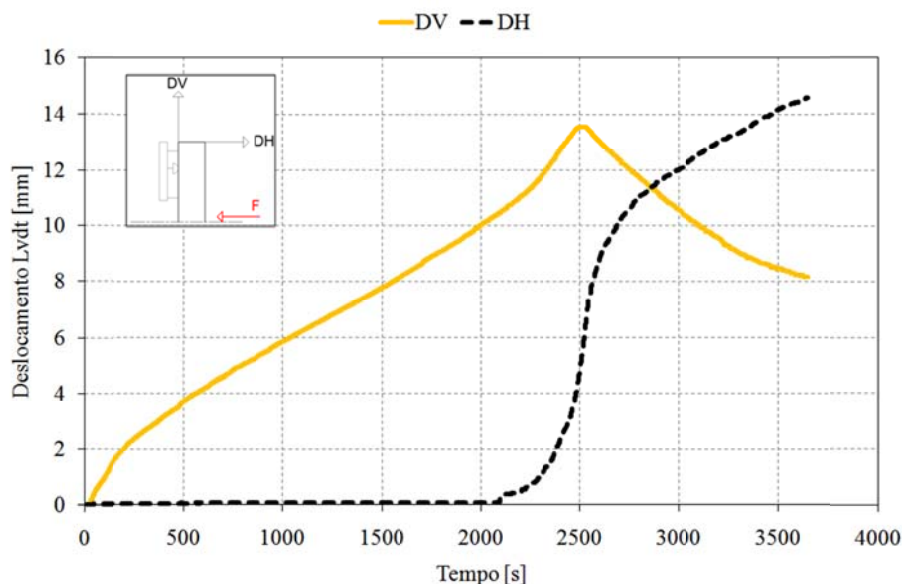


Gráfico 151 - Registro dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I6.

No Gráfico 152 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

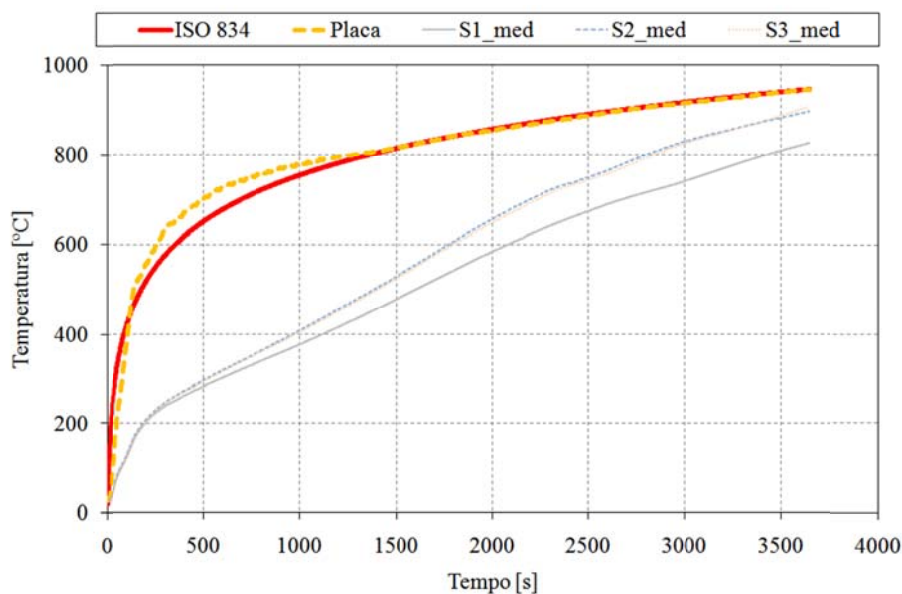


Gráfico 152 - Registro da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I6.

No Gráfico 153 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

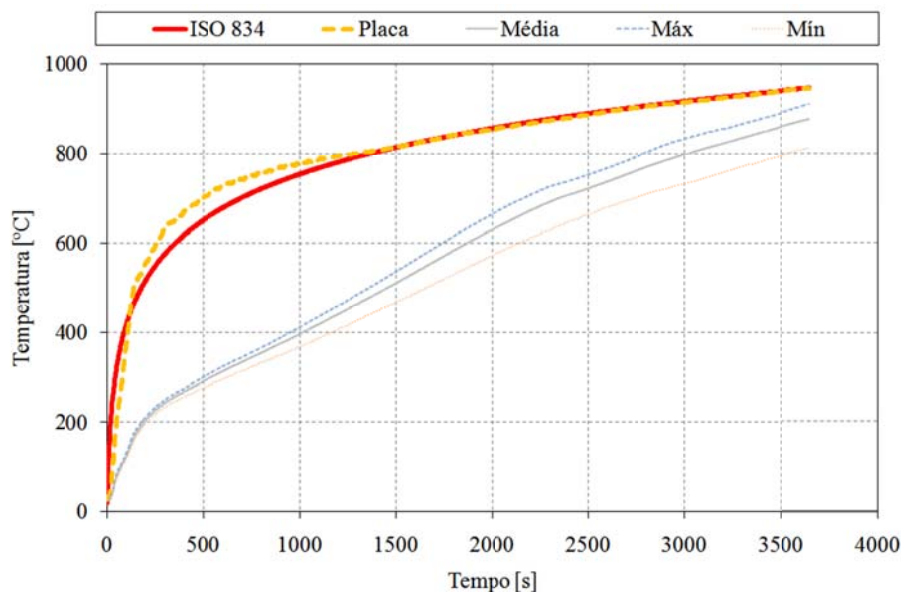


Gráfico 153 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I6.

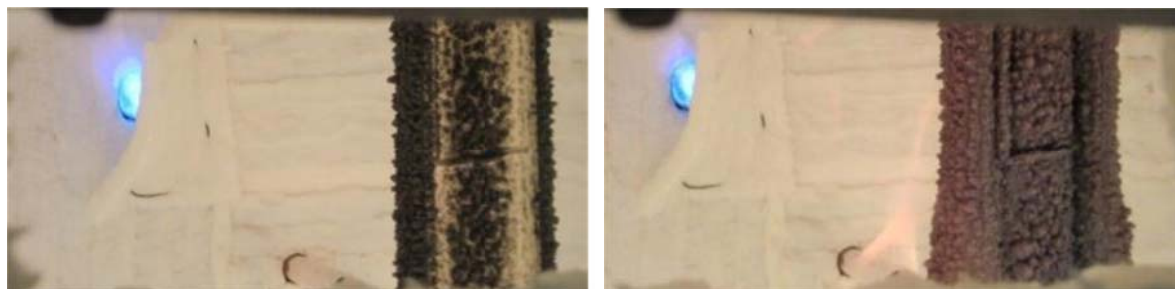


Figura 48 – Evolução do ensaio I6.

Na Figura 48 estão representados dois instantes do ensaio, à esquerda o início da intumescência pouco depois da curva de fogo ter sido activada, à direita a representação da intumescência numa fase posterior.





Figura 49 – Deformada no ensaio I6.

Na Figura 49 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio. À esquerda ainda com os queimadores do forno de resistência ligados, à direita posteriormente quando o ambiente do forno de resistência já se encontrava estabilizado.

Na Figura 50 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio, em comparação com elementos rectos (chão e nível de bolha)





Figura 50 – Deformada sofrida no ensaio I6.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 41 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 722,71 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (I3), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 19 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 751,20 [°C].

#### 6.3.2. Ensaio I7 ( $\mu=30\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 18-08-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=30\%$  determina-se uma temperatura crítica de 663,78°C. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 5340 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 12 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

Tabela 12 – Valores de protecção para ensaio I7.

Espessura de tinta medida [µm]			
DFT	Desv. Padrão	Máx.	Mín.
975	170	1287	576

No Gráfico 154 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que que o histograma de carga regista uma pequena perturbação.

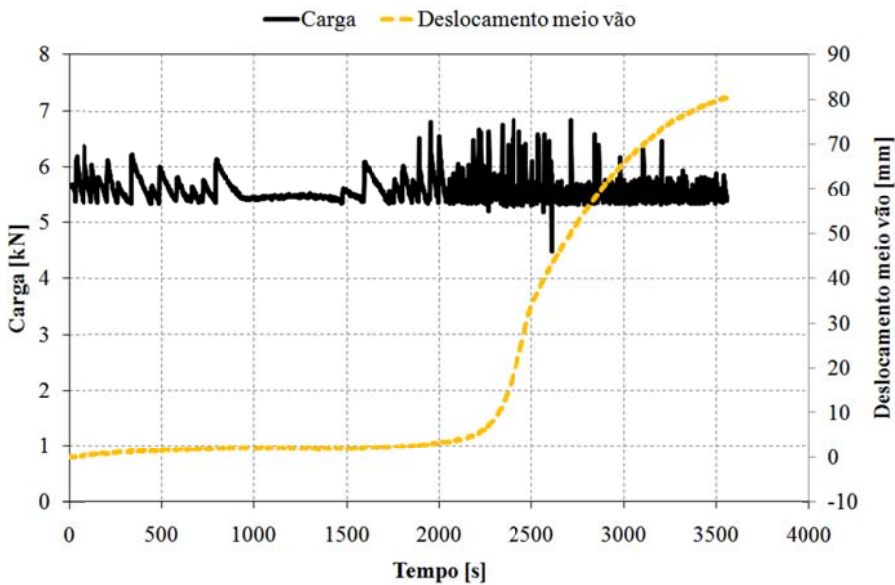


Gráfico 154 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio I7.

No Gráfico 155 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.

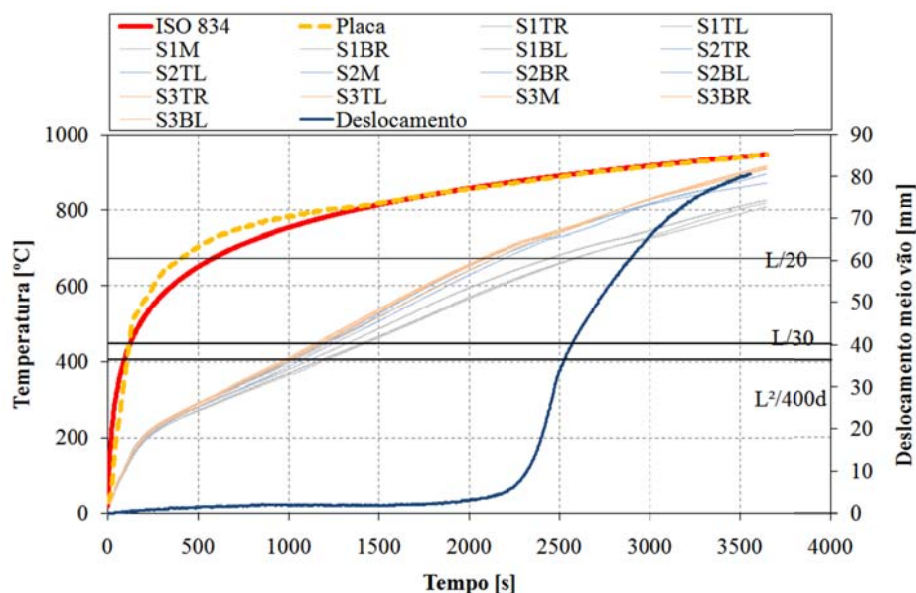


Gráfico 155 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio I7.

No Gráfico 156 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

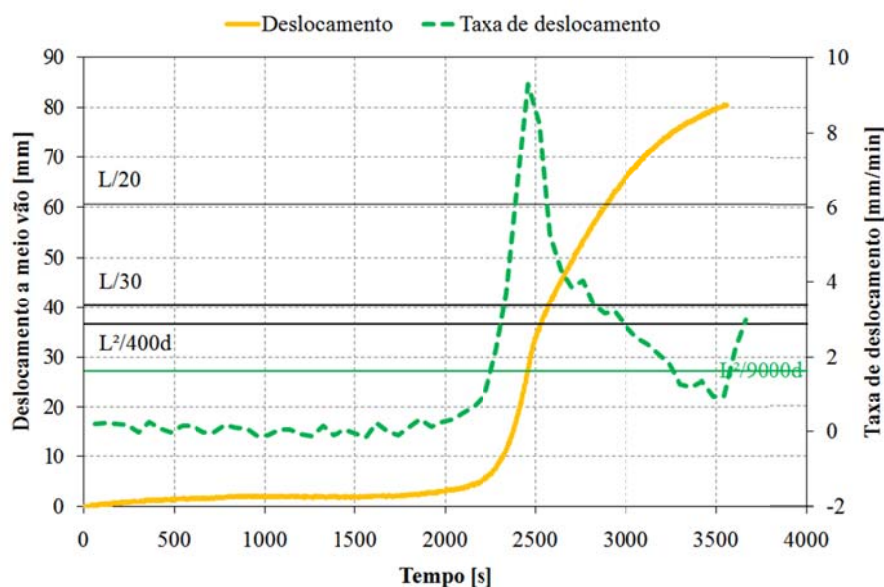


Gráfico 156 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I7.

No Gráfico 157 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da

curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 155, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência.

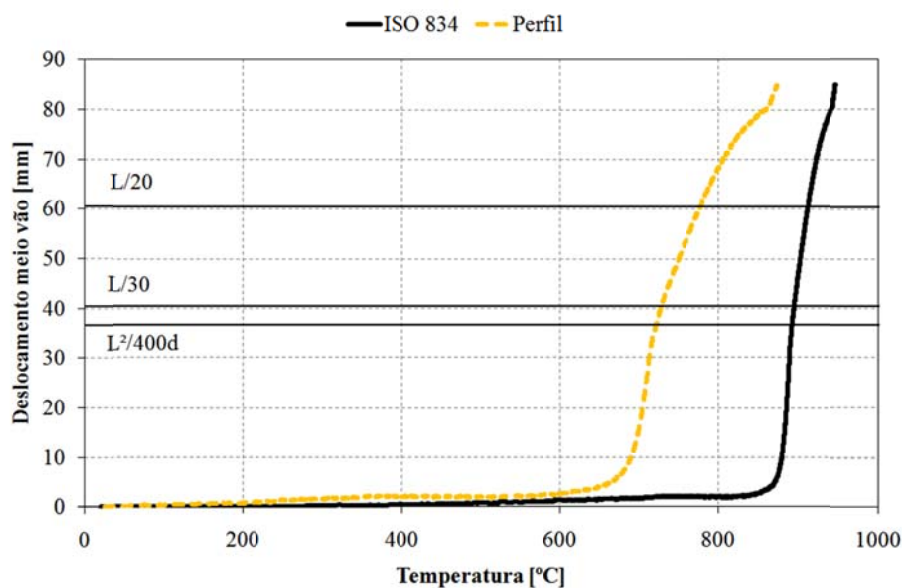


Gráfico 157 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I7.

No Gráfico 158 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior.

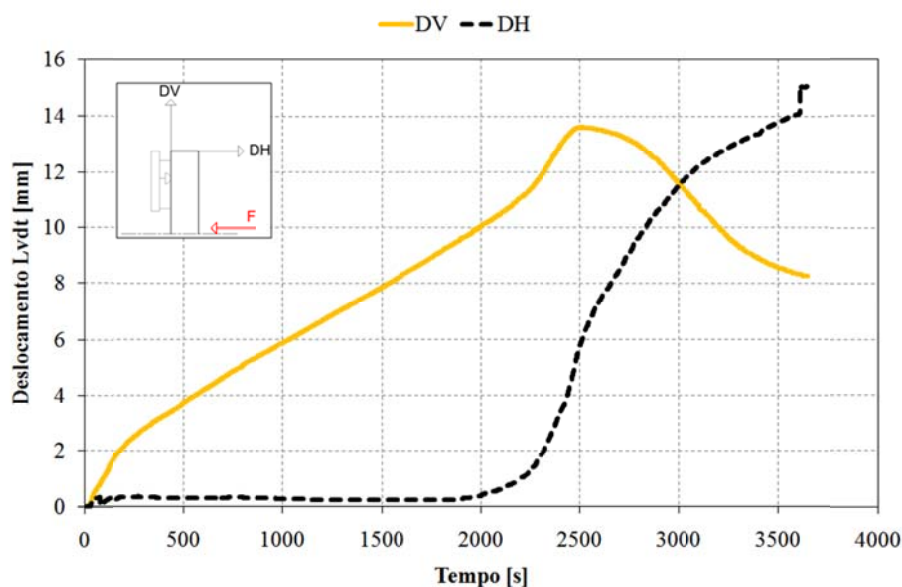


Gráfico 158 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I7.

No Gráfico 159 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

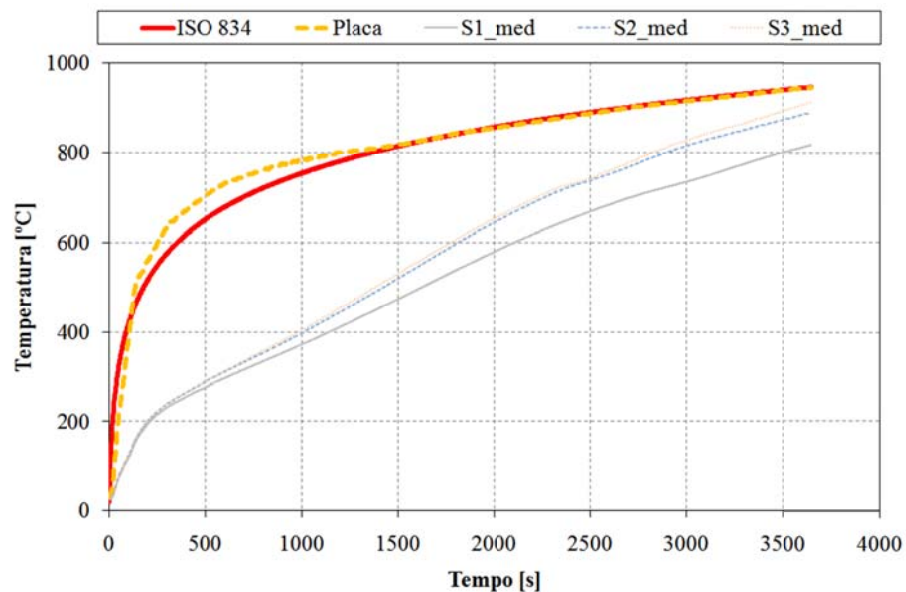


Gráfico 159 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I7.

No Gráfico 160 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

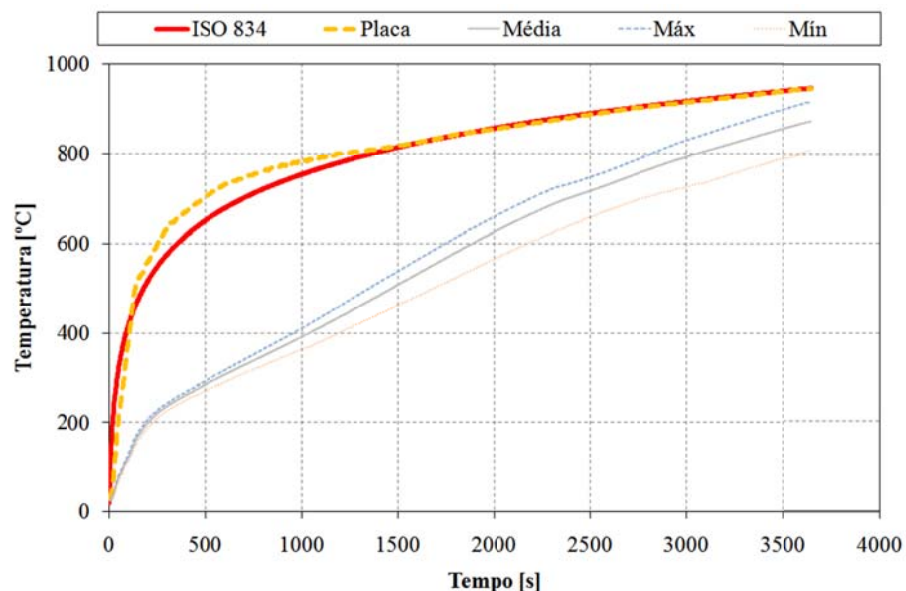


Gráfico 160 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I7.



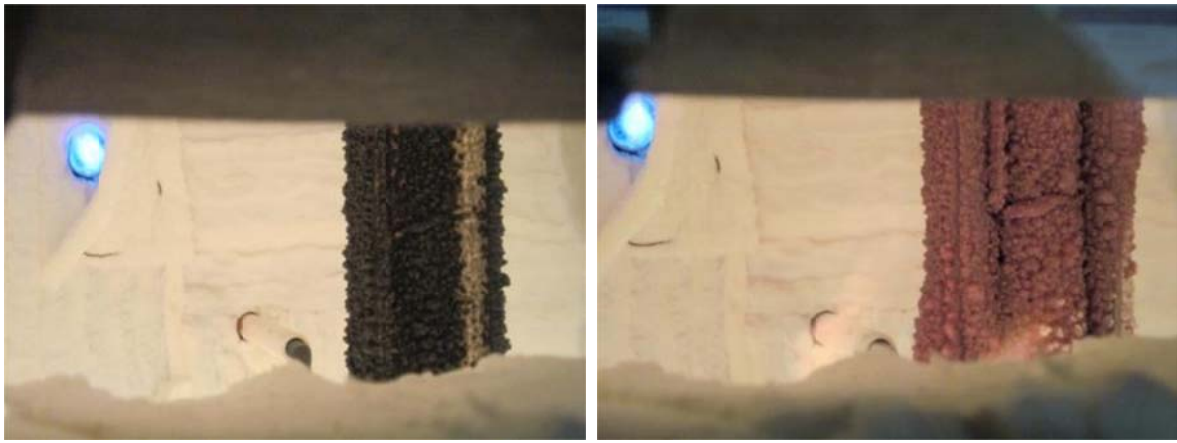


Figura 51 – Evolução do ensaio I7.

Na Figura 51 estão representados dois instantes do ensaio, à esquerda o início da intumescência pouco depois da curva de fogo ter sido activada, à direita a representação da intumescência numa fase posterior.



Figura 52 – Deformada no ensaio I7.

Na Figura 52 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio. À esquerda ainda com os queimadores do forno de resistência ligados, à direita posteriormente quando o ambiente do forno de resistência já se encontrava estabilizado.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 42 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 727,57 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (I3), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 19 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 751,20 [°C].

### 6.3.3. Ensaio I8 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 18-08-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 9180 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 13 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

Tabela 13 - Valores de protecção para ensaio I8.

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1012	185	1342	560

No Gráfico 161 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma pequena perturbação.



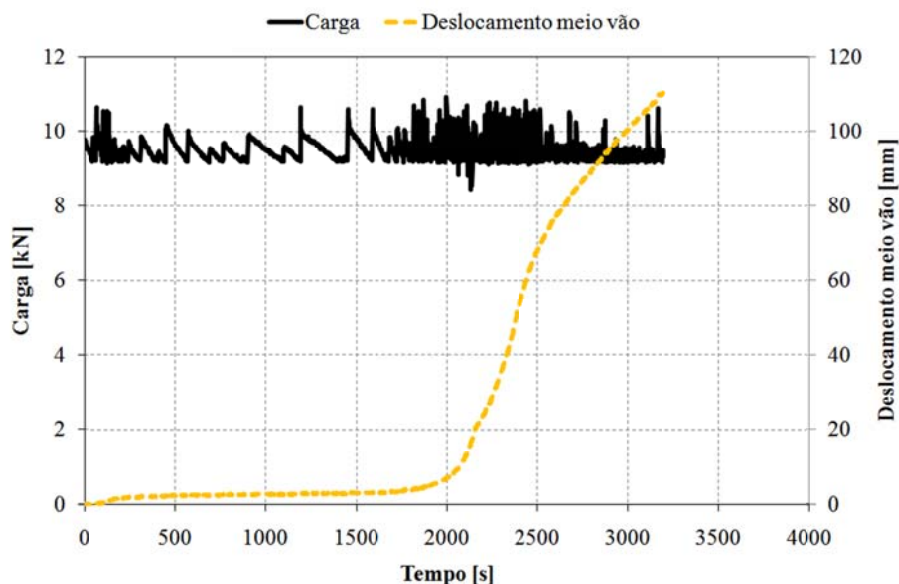


Gráfico 161 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio I8.

No Gráfico 162 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.

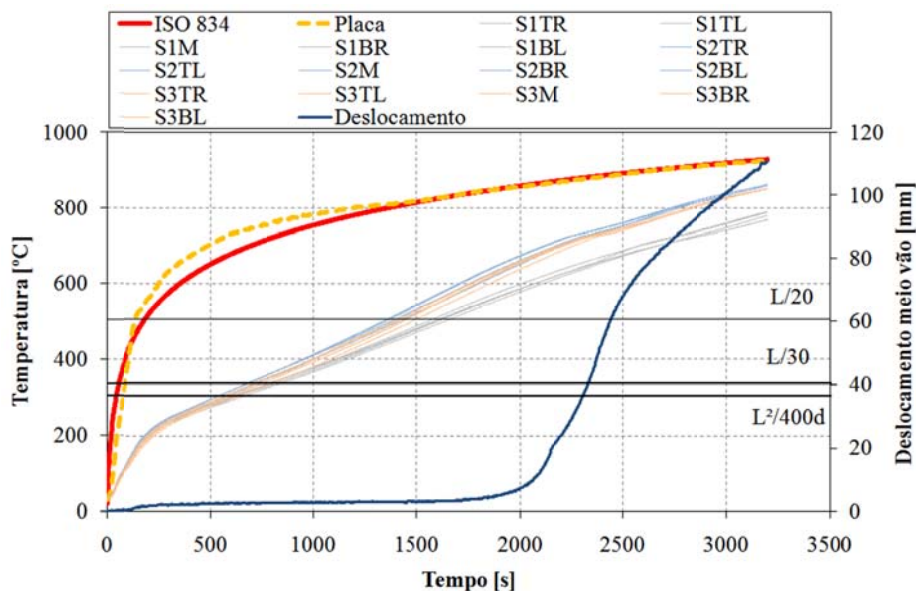


Gráfico 162 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio I8.

No Gráfico 163 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento

sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

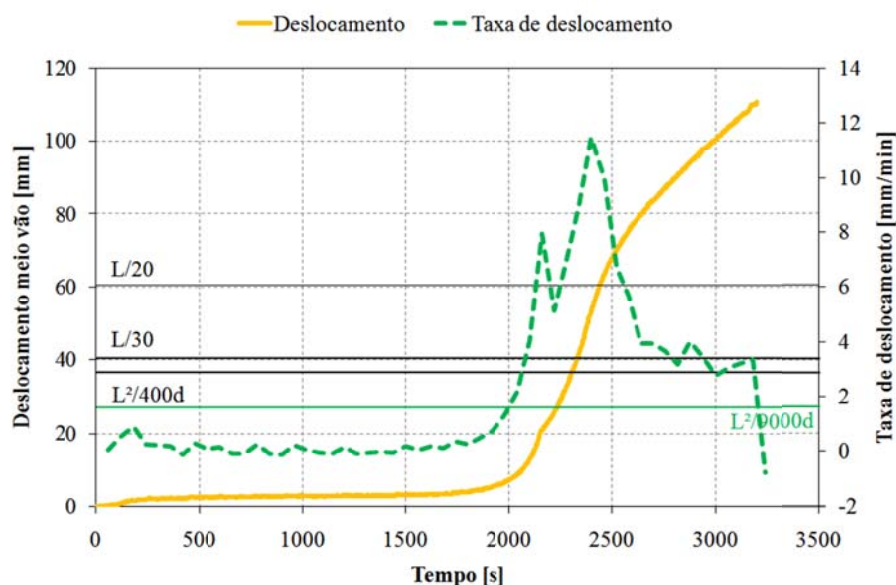


Gráfico 163 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I8.

No Gráfico 164 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 162, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência.

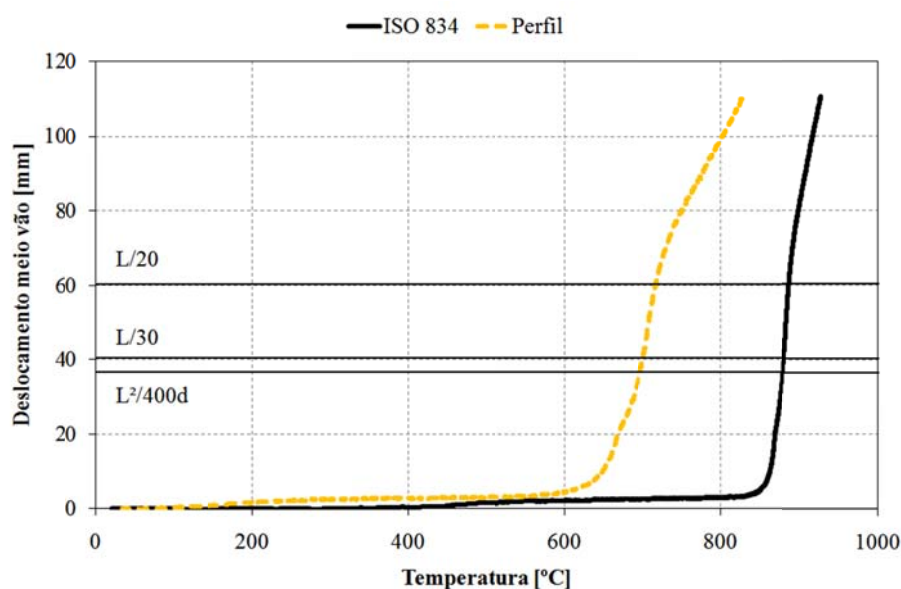


Gráfico 164 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I8.

No Gráfico 165 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior.

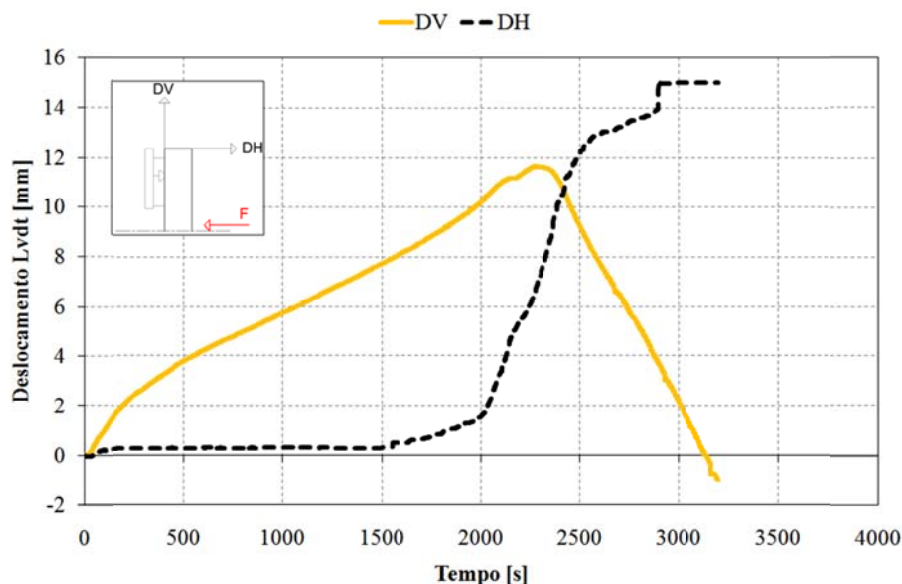


Gráfico 165 - Registro dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I8.

No Gráfico 166 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

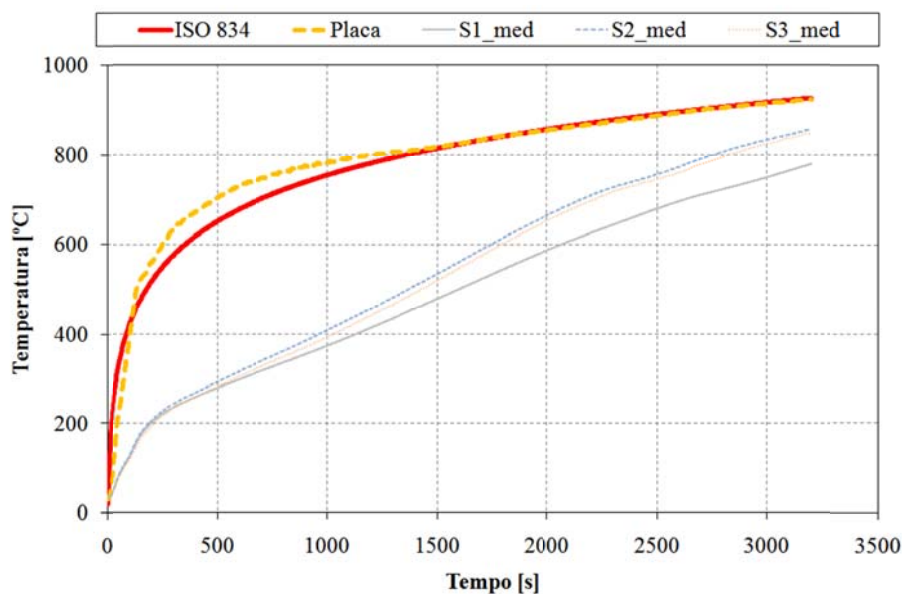


Gráfico 166 - Registro da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I8.

No Gráfico 167 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

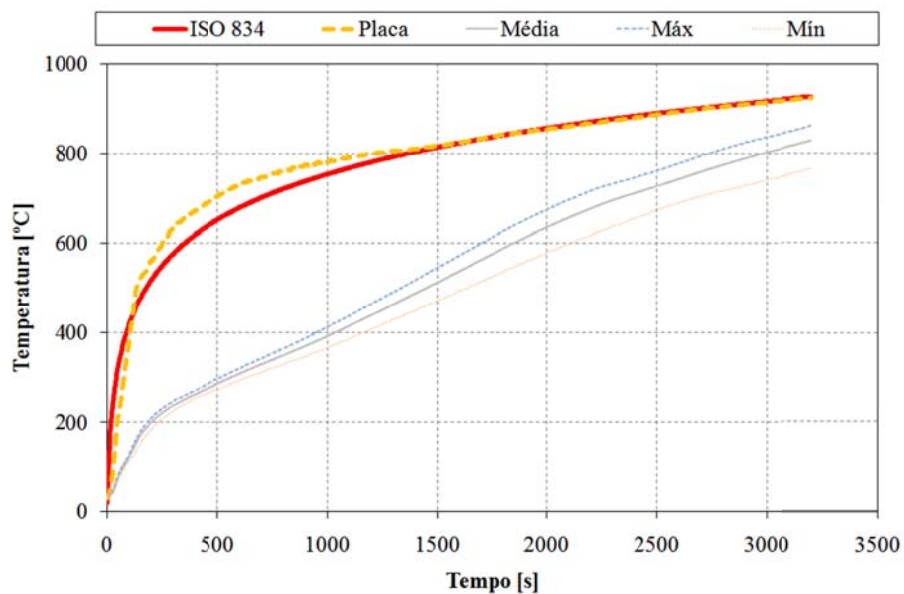


Gráfico 167 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I8.

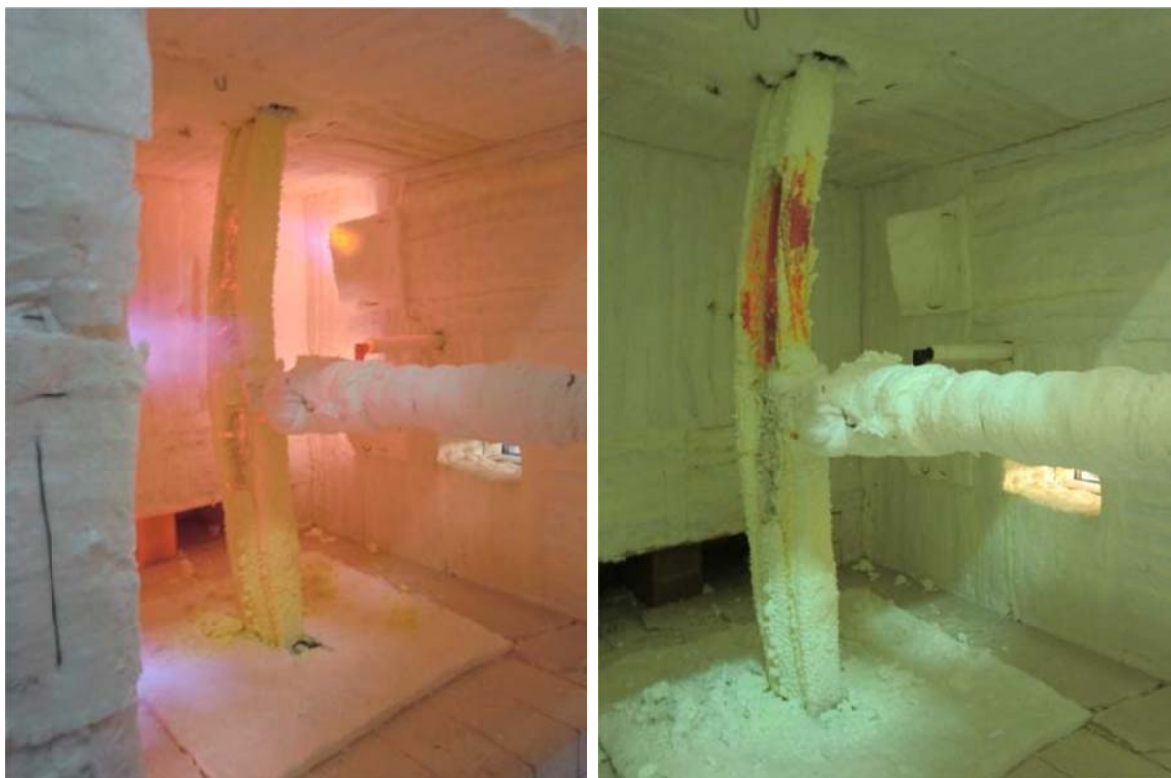


Figura 53 – Deformada sofrida no ensaio I8.

Na Figura 53 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio. À esquerda ainda com os queimadores do forno de resistência ligados, à direita posteriormente quando o ambiente do forno de resistência já se encontrava estabilizado.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 38 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 701,02 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (I4), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 12 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 684,47 [°C].

#### 6.3.4. Ensaio I9 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 19-08-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 9180 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 14 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 14 - Valores de protecção para ensaio I9.**

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1055	202	1528	490

No Gráfico 168 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma pequena perturbação.



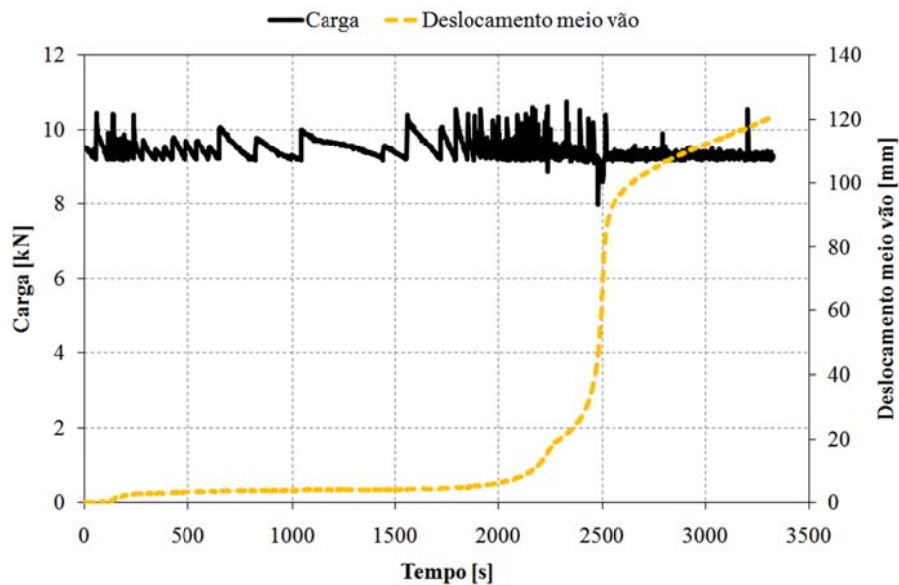


Gráfico 168 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio I9.

No Gráfico 169 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.

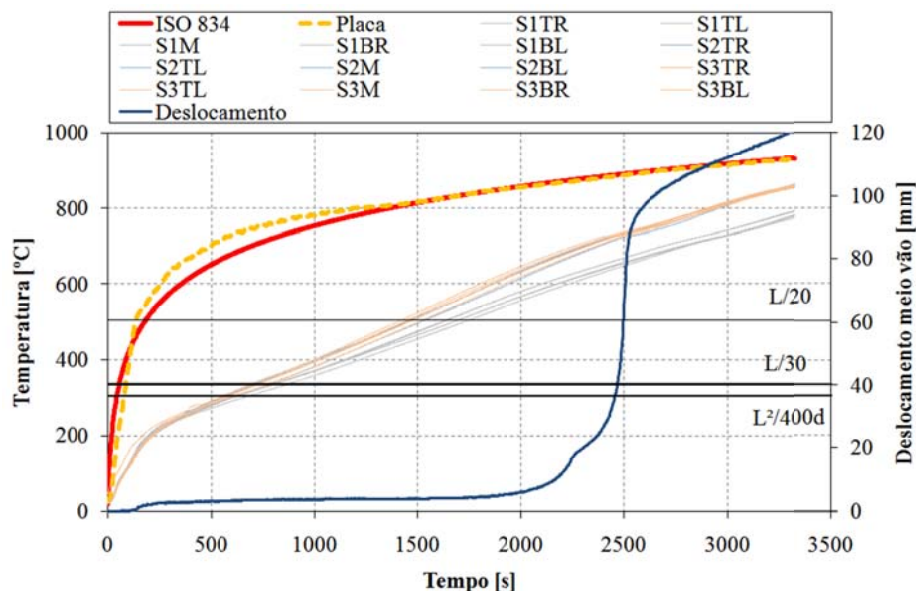


Gráfico 169 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio I9.

No Gráfico 170 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento

sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

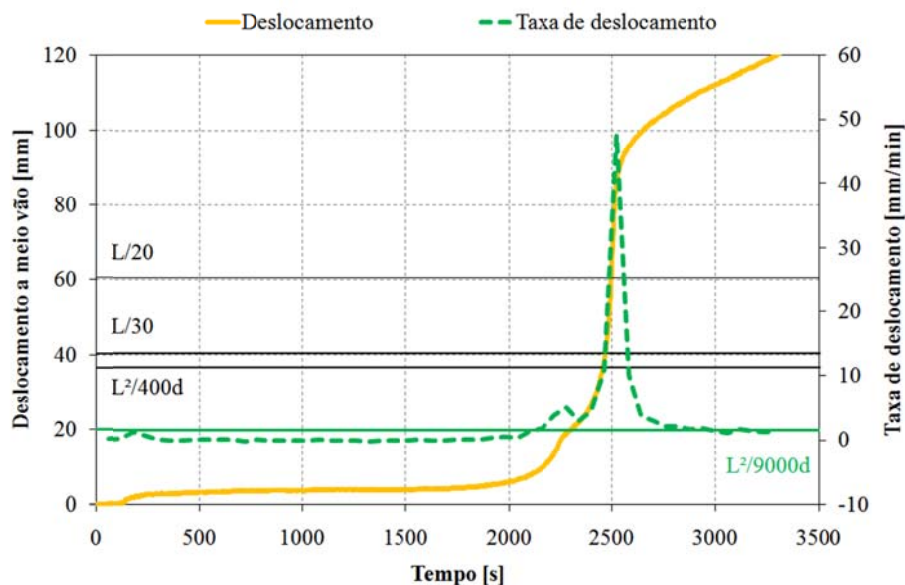


Gráfico 170 - Registro da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I9.

No Gráfico 171 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 169, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência.

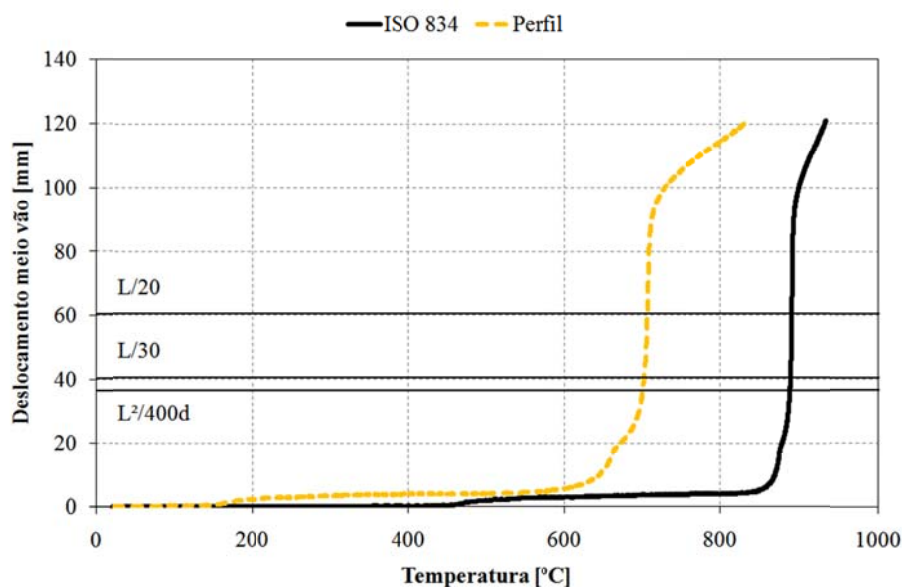


Gráfico 171 - Evolução do deslocamento ao longo do registro de temperaturas para o ensaio I9.



No Gráfico 172 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior.

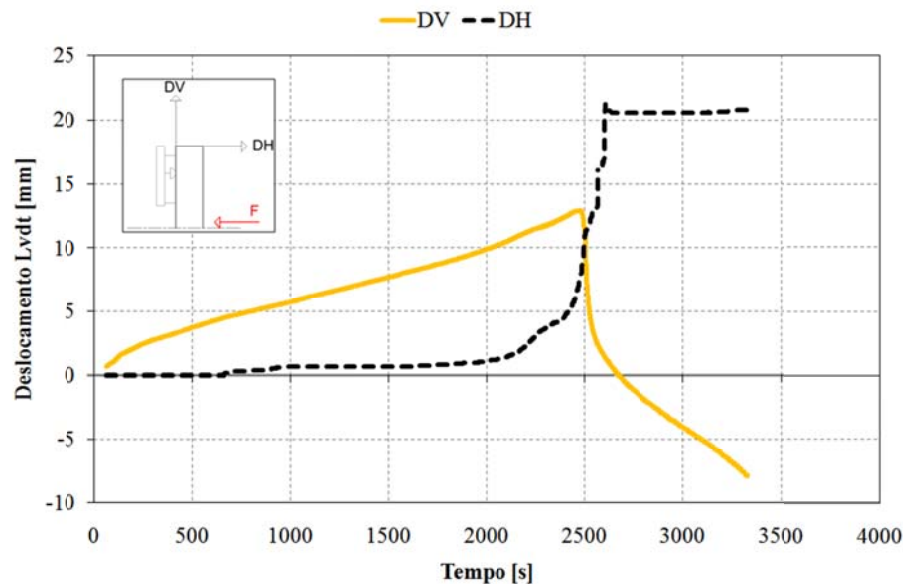


Gráfico 172 - Registro dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I9.

No Gráfico 173 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

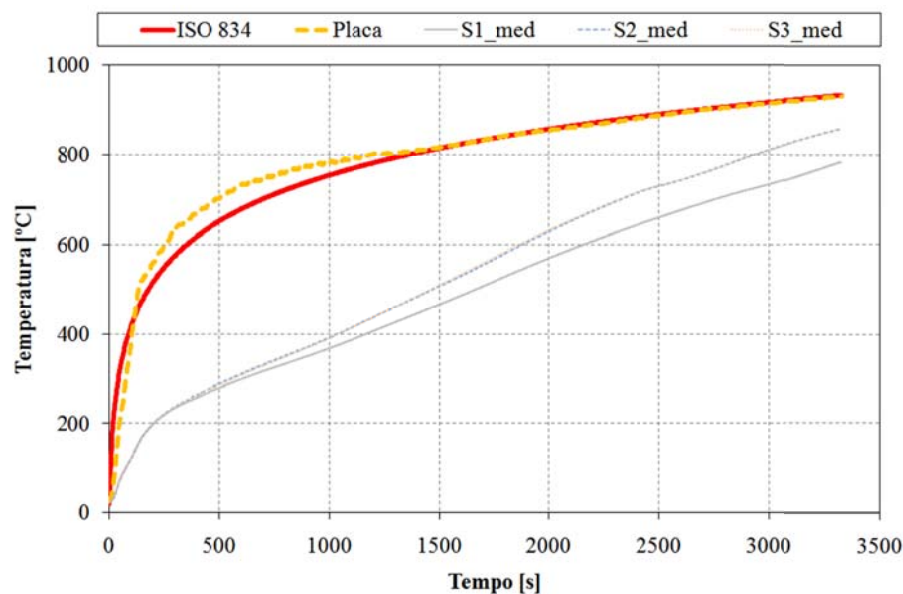


Gráfico 173 - Registro da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I9.

No Gráfico 174 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

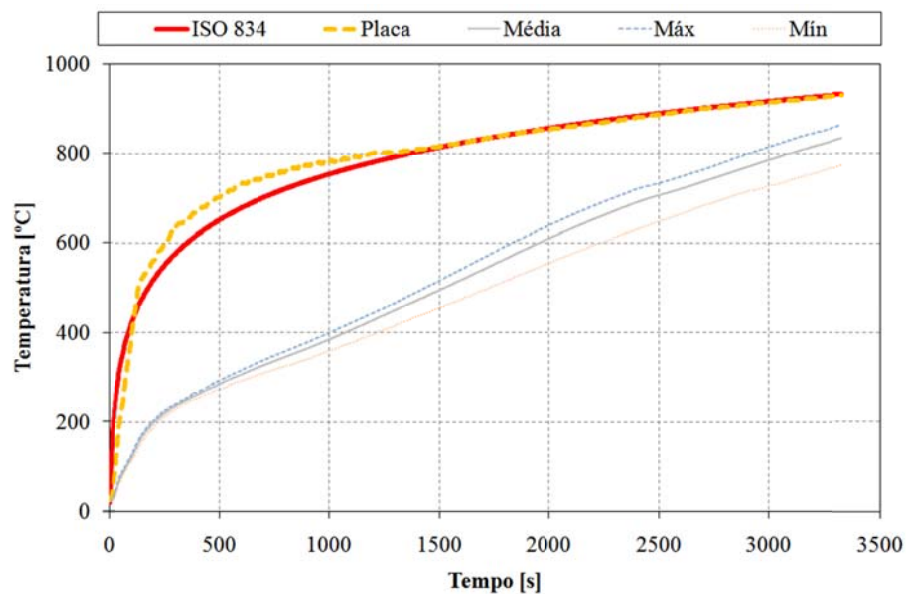


Gráfico 174 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I9.



Figura 54 – Deformação sofrida no ensaio I9.

Na Figura 54 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio. À esquerda ainda com os queimadores do forno de resistência ligados, à direita posteriormente com a intumescência removida.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 41 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 701,88 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (I4), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 12 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 684,47 [°C].

#### 6.3.5. Ensaio I10 ( $\mu=70\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 19-08-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=70\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 525,78 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 12940 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 15 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 15 – Valores de protecção para ensaio I10.**

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
998	148	1268	653

No Gráfico 175 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio.

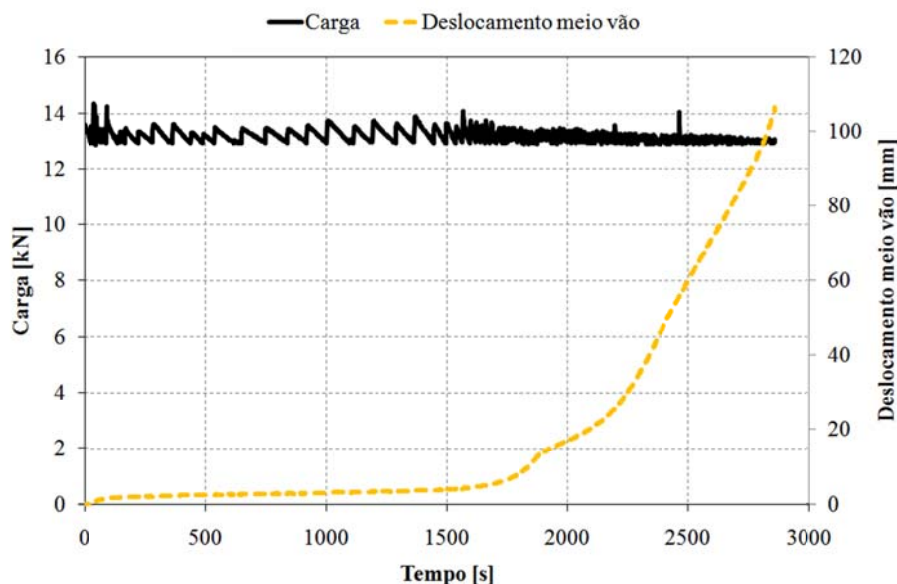


Gráfico 175 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio I10.

No Gráfico 176 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.

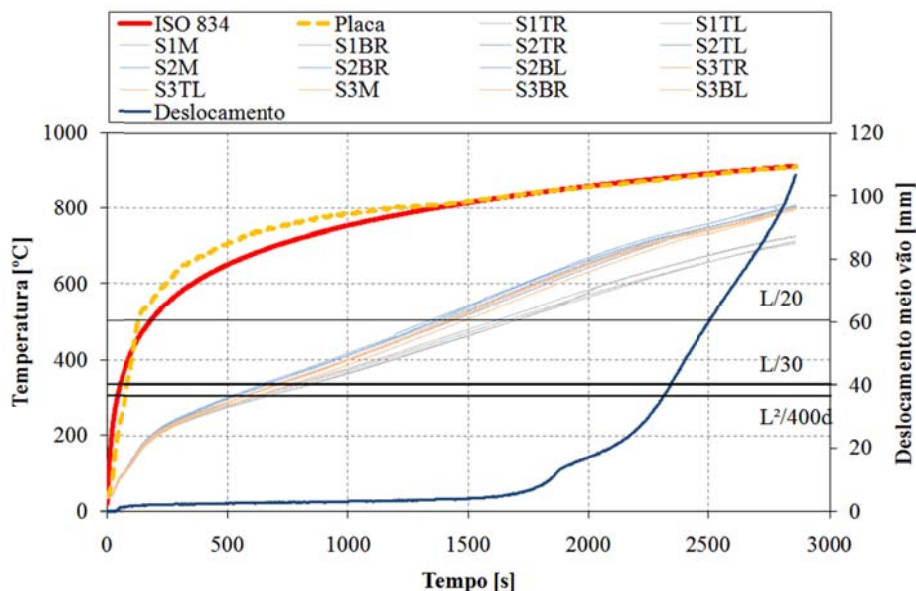


Gráfico 176 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio I10.

No Gráfico 177 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento

aumenta com grande intensidade ao mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

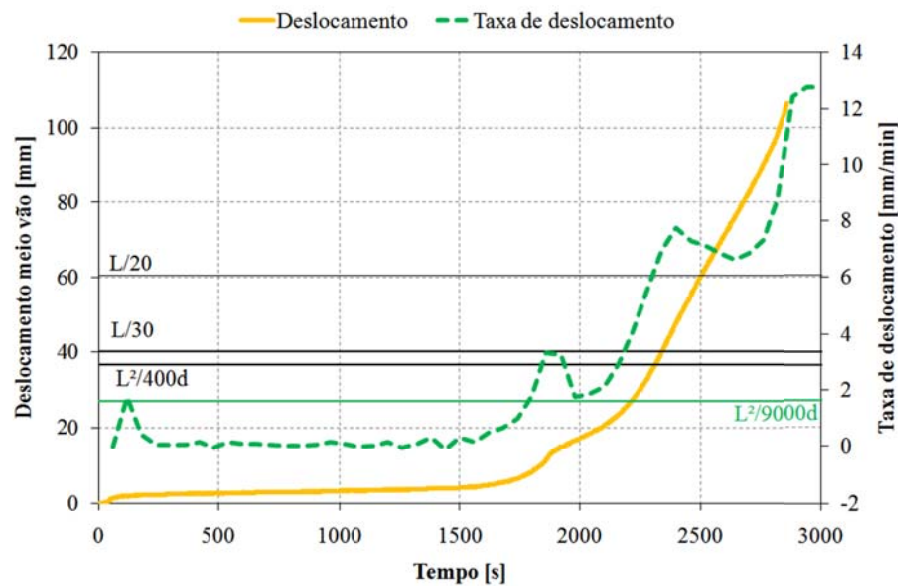


Gráfico 177 - Registro da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I10.

No Gráfico 178 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 176, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência.

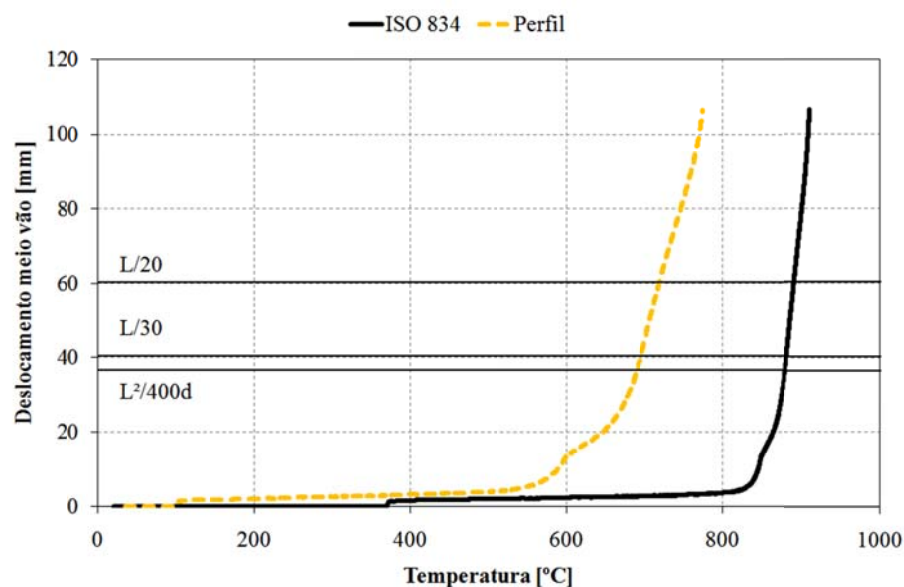


Gráfico 178 - Evolução do deslocamento ao longo do registro de temperaturas para o ensaio I10.

No Gráfico 179 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior.

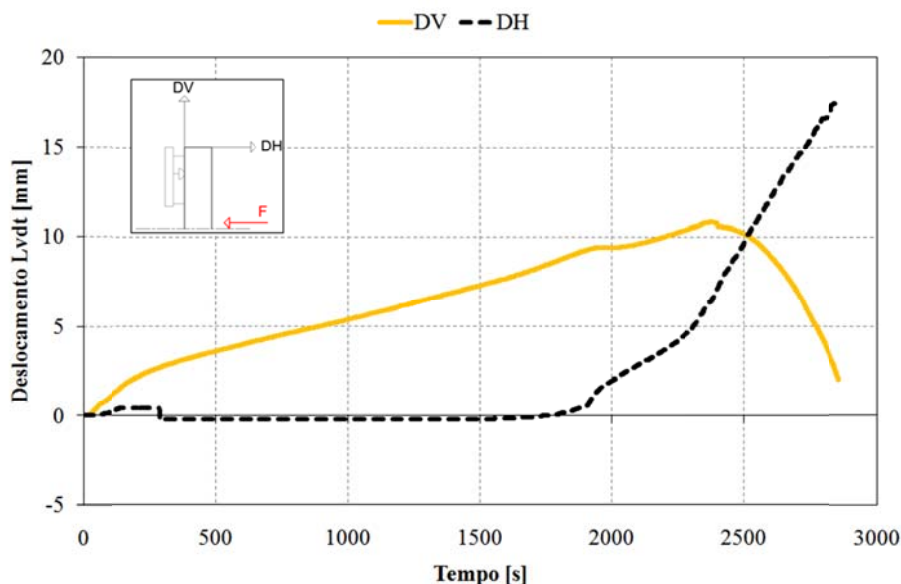


Gráfico 179 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I10.

No Gráfico 180 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

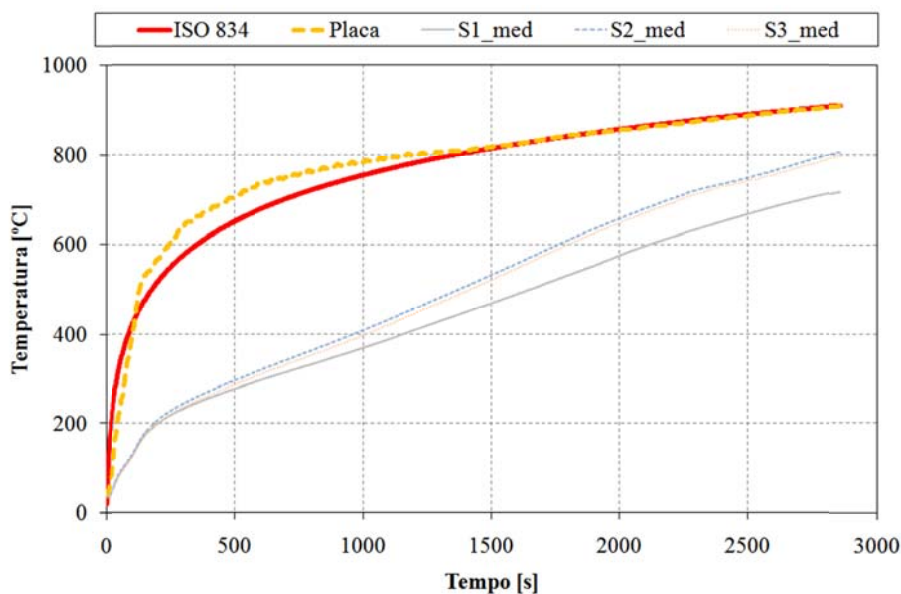


Gráfico 180 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I10.



No Gráfico 181 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

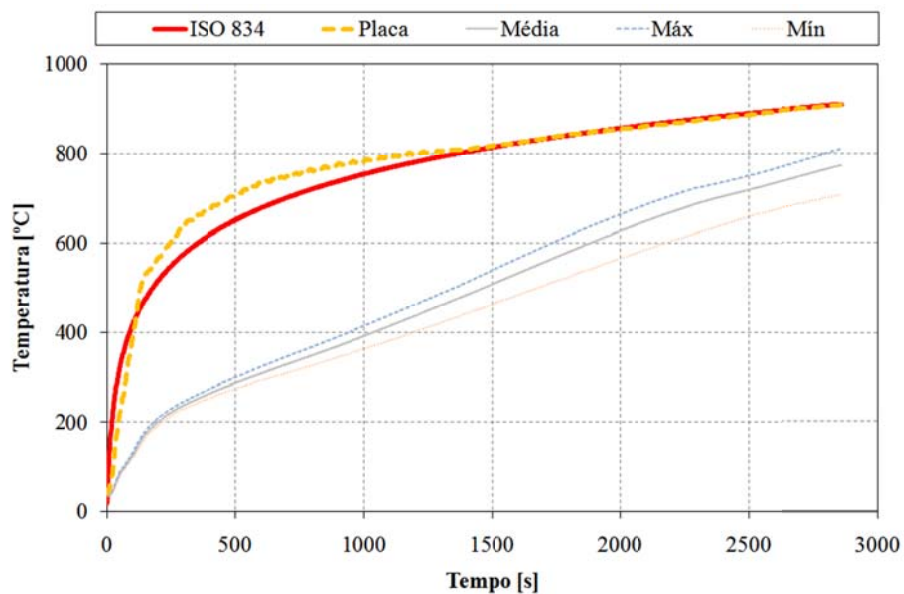


Gráfico 181 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I10.

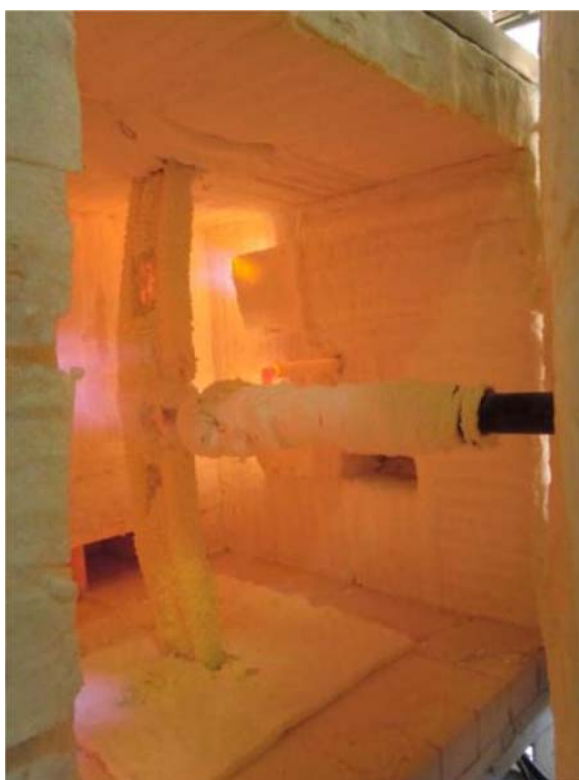


Figura 55 – Deformação sofrida no ensaio I10.

Na Figura 55 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio.



O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 39 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 695,31 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (I5), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 10 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 659,01 [°C].

#### 6.3.6. Ensaio I11 ( $\mu=70\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 24-08-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=70\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 525,78 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 12940 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

Tabela 16 – Valores de protecção para ensaio I11.

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
989	193	1360	501

No Gráfico 182 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio.



No Gráfico 184 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento

aumenta com grande intensidade ao mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

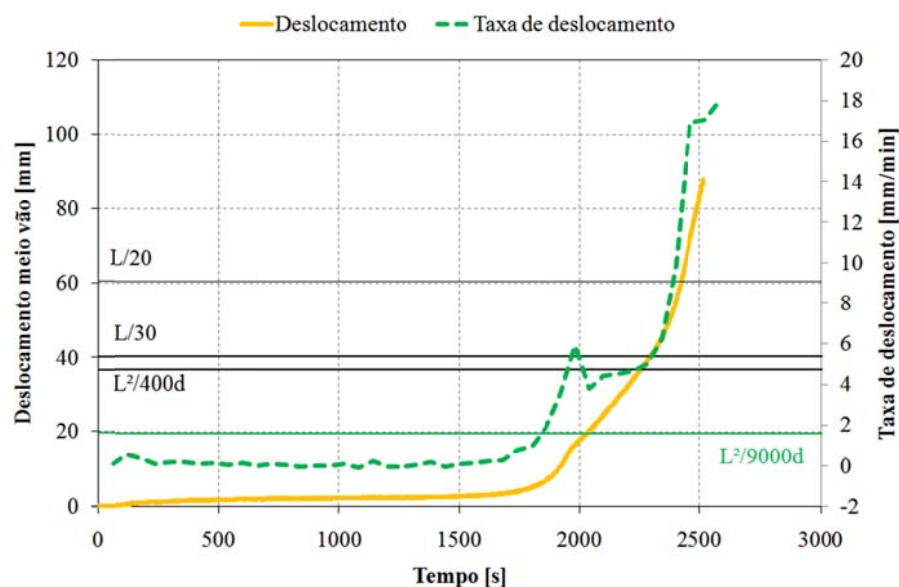


Gráfico 184 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I11.

No Gráfico 185 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 183, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência.

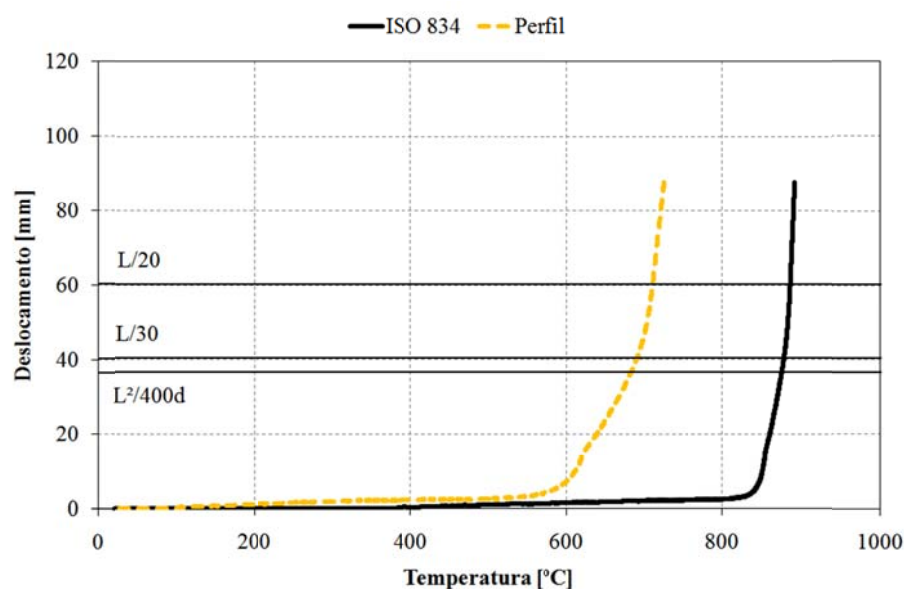


Gráfico 185 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I11.

No Gráfico 186 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior.

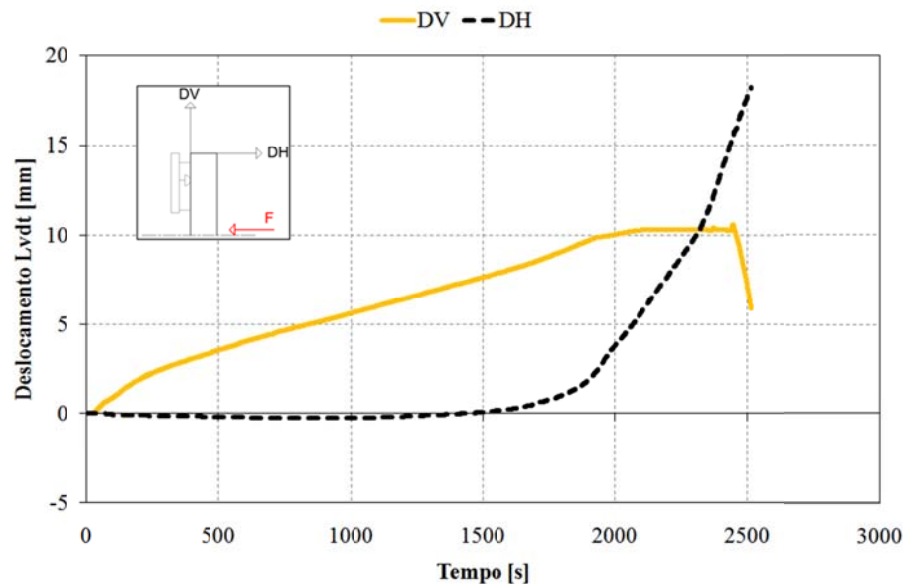


Gráfico 186 - Registro dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I11.

No Gráfico 187 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

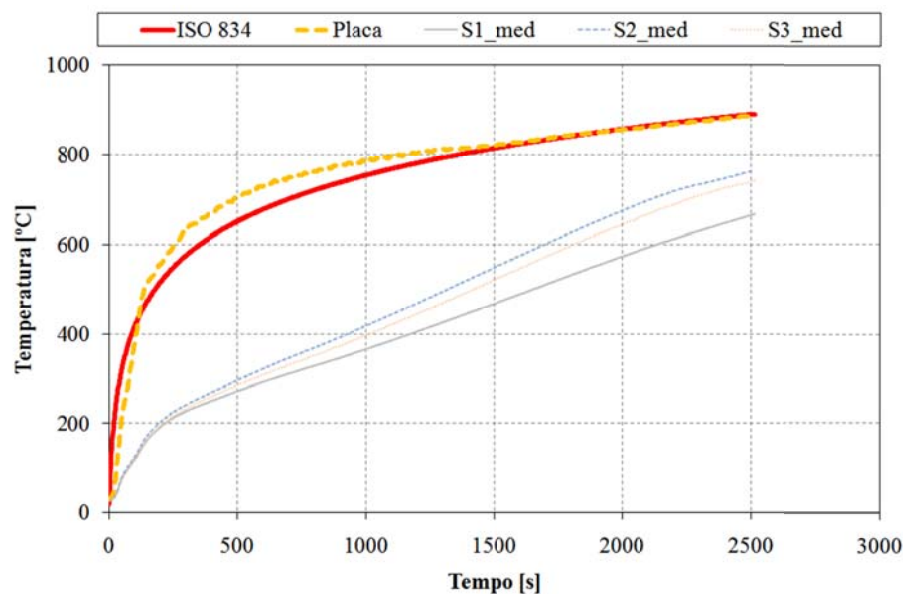


Gráfico 187 - Registro da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I11.

No Gráfico 188 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

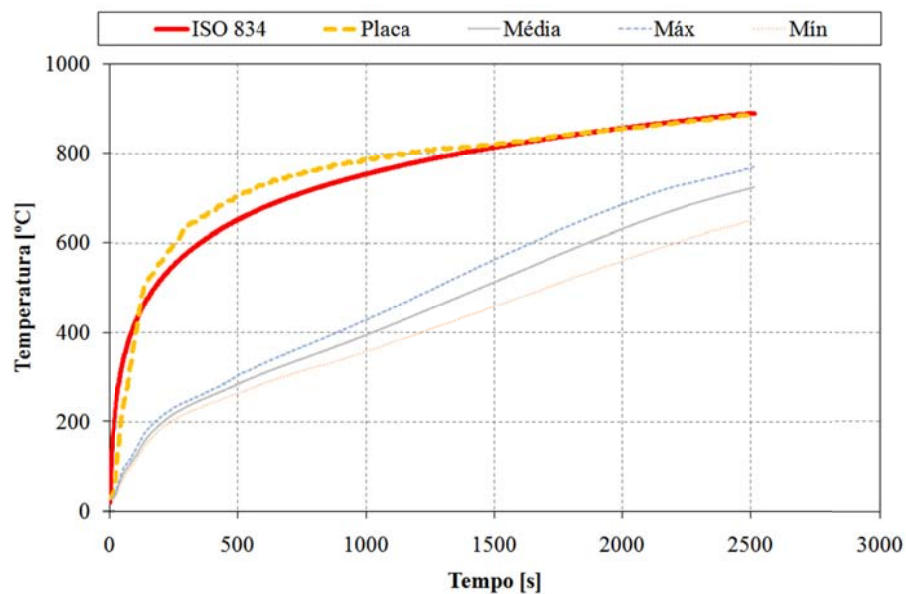


Gráfico 188 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I11.



Figura 56 – Deformação sofrida no ensaio I11.

Na Figura 56 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 38 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 690,21 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (I5), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 10 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 659,01 [°C].

#### 6.3.7. Ensaio I12 ( $\mu=50\%$ , protecção a 2 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 19-10-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 9180 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 17 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 17 - Valores de protecção para ensaio I12.**

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1824	156	2140	1440

No Gráfico 189 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De notar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma pequena perturbação. Ainda se registou um fenómeno de parábola no histograma de carga, este fenómeno, pensa-se que se deve à evolução da intumescência da camada de protecção.

O registo do ensaio evolui-se até aos 5000 [s], para se poder comparar com o ensaio I13, podendo ser analisado os registos do ensaio no ponto seguinte.

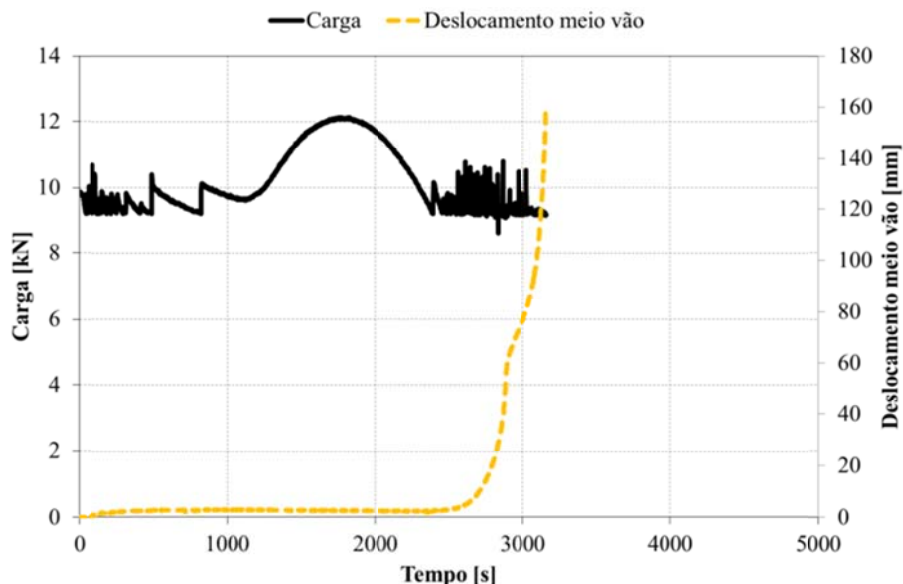


Gráfico 189 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio I12.

No Gráfico 190 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo. De notar a importância da temperatura no colapso do elemento, assim que foi atingido um patamar de temperatura o elemento perdeu muito rapidamente capacidade resistente. De salientar ainda uma evolução anormal dos pontos TR e TL da Secção 2, ver Figura 15 e Figura 16.

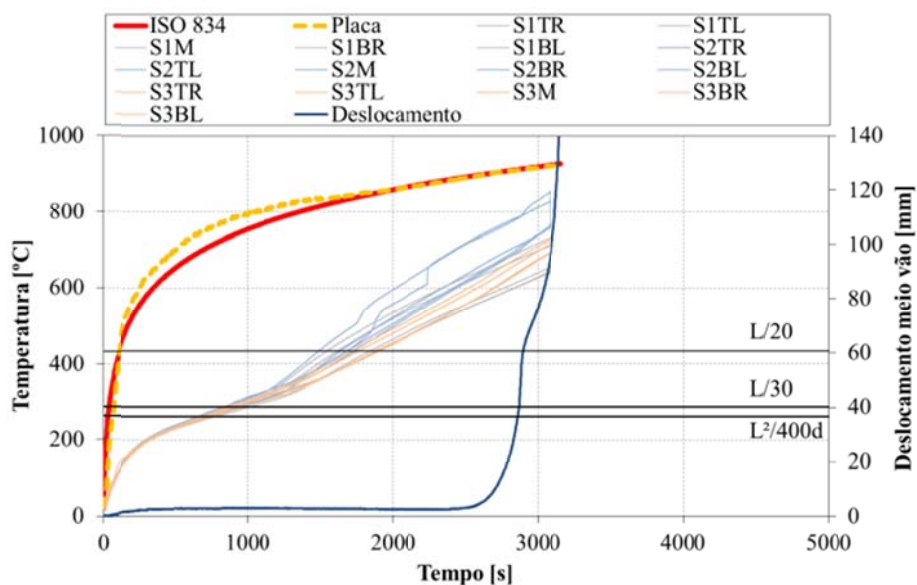
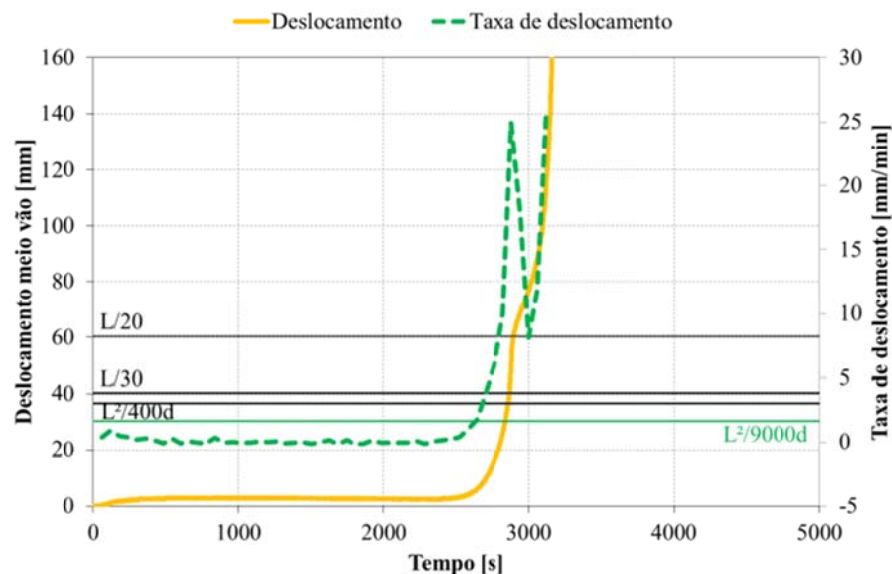


Gráfico 190 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio I12.



No Gráfico 191 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.



**Gráfico 191 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para l12.**

No Gráfico 192 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 190, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência. Pode-se ainda observar muito facilmente o ponto da temperatura crítica para este elemento, ele perdeu as suas capacidades resistentes ao fogo provocando assim, uma perpendicular ao eixo das temperaturas no valor de deslocamento do ponto de aplicação da carga.

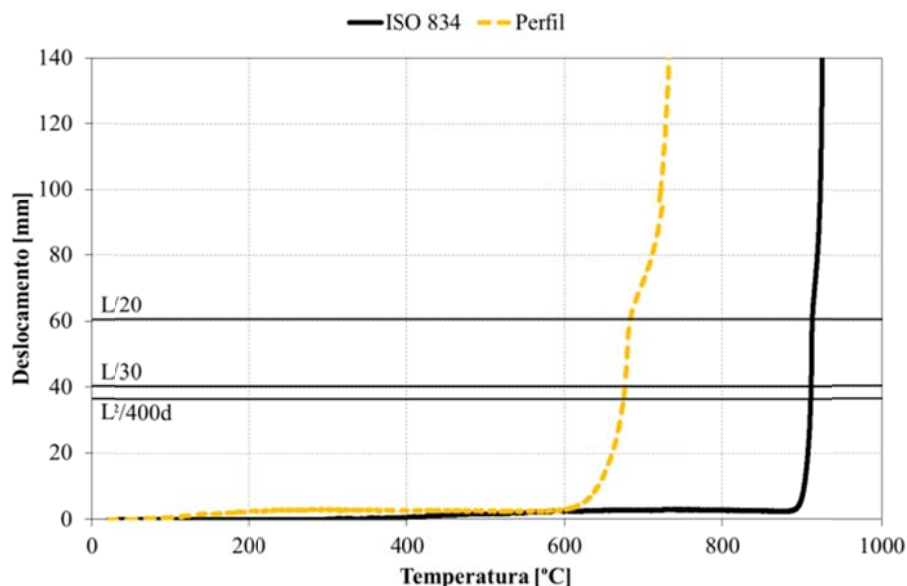


Gráfico 192 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I12.

No Gráfico 193 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior.

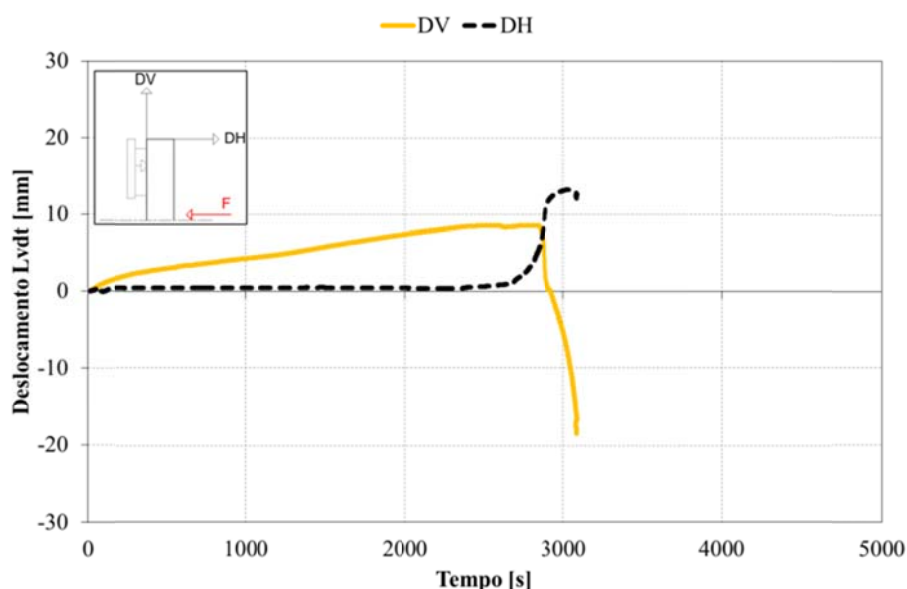


Gráfico 193 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I12.

No Gráfico 194 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Neste gráfico pode-se ainda observar uma evolução anormal da temperatura na Secção 2. Este fenómeno deve-se à exposição localizada desta

zona, ocorrendo um desprendimento da grande camada de intumescência, observa-se a representação deste fenómeno na Figura 58.

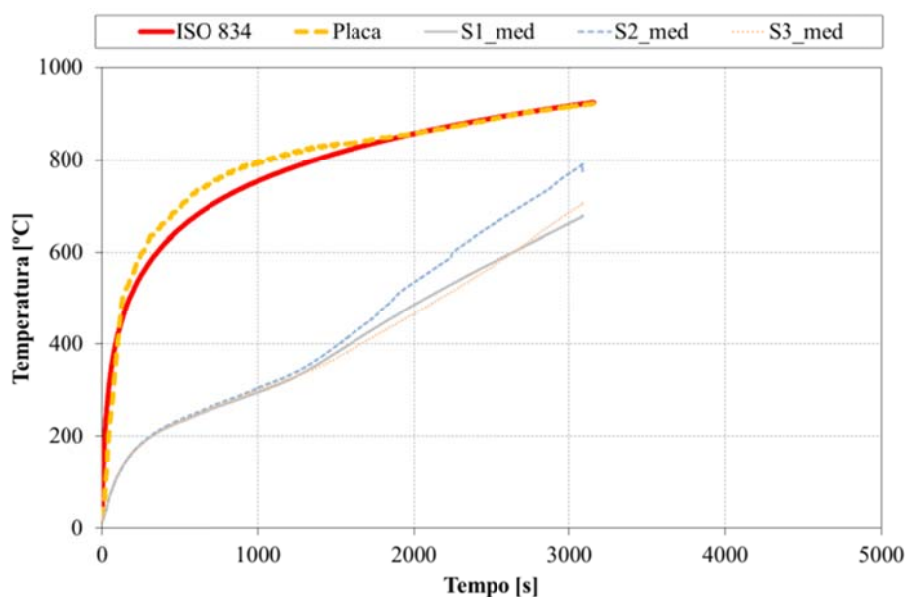


Gráfico 194 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I12.

No Gráfico 195 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

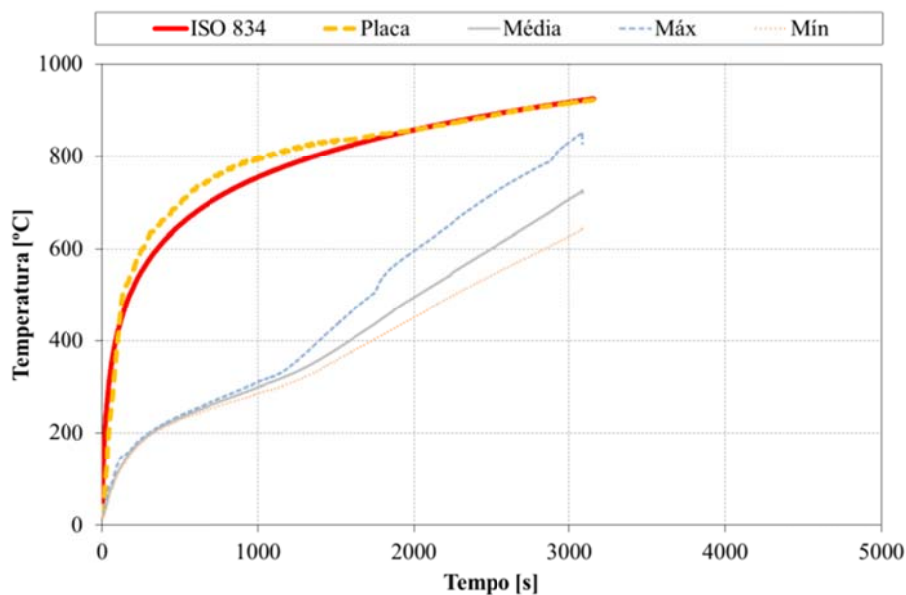
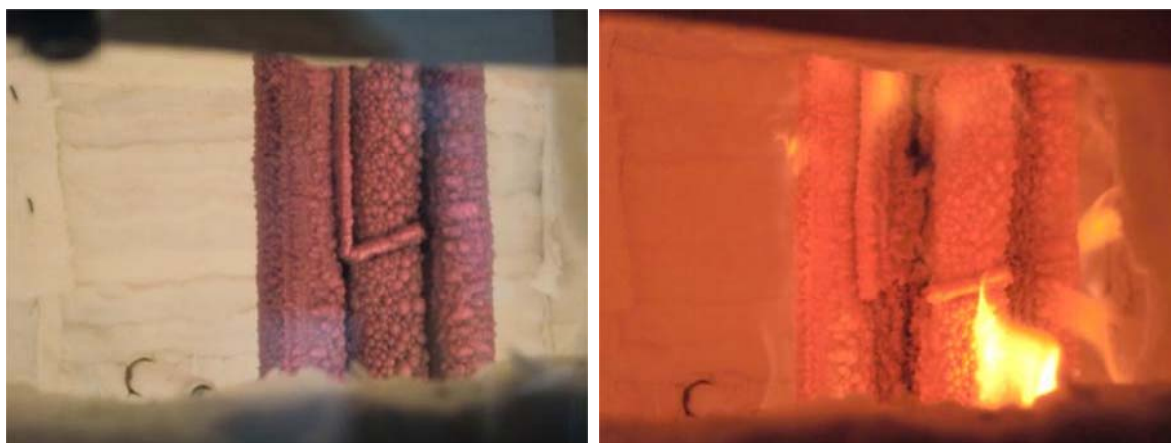


Gráfico 195 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I12.



**Figura 57 – Evolução do ensaio I12.**

Na Figura 57 estão representados dois instantes do ensaio, à esquerda o início da intumescência pouco depois da curva de fogo ter sido activada, à direita a representação da intumescência numa fase posterior. Observa-se ainda a grande camada de intumescência a evoluir.



**Figura 58 – Deformada no ensaio I12.**

Na Figura 58 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio. Pode-se ainda observar o fenómeno de desprendimento da camada de intumescência.

Na Figura 59 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio. Esta deformação terá sido provocada por um fenómeno de encurvadura localizada, situado acima do ponto de aplicação de carga, sendo o estado limite ultimo determinado por este modo de colapso. Este fenómeno teve a sua origem na exposição do perfil à acção do fogo, em algumas zonas. Essa exposição ocorreu devido ao grande desenvolvimento da intumescência.



Figura 59 – Deformada sofrida no ensaio I12.

O modo de colapso deste elemento foi por fenómeno de encurvadura localizada, com um valor de resistência ao fogo de 47 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 676,52 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (I4), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 12 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 684,47 [°C].

#### 6.3.8. Ensaio I13 ( $\mu=50\%$ , protecção a 2 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 20-10-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 9180 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 18 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

Tabela 18 - Valores de protecção para ensaio I13.

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1832	194	2270	1440

No Gráfico 196 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De notar um fenómeno de parábola no histograma de carga, este fenómeno, pensa-se que se deve à evolução da intumescência da camada de protecção.

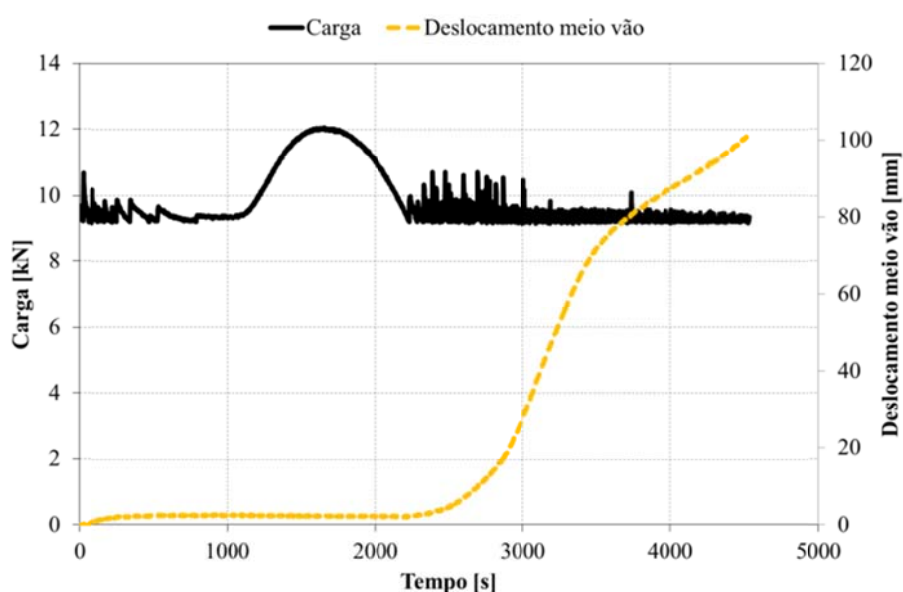


Gráfico 196 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio I13.

No Gráfico 197 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.



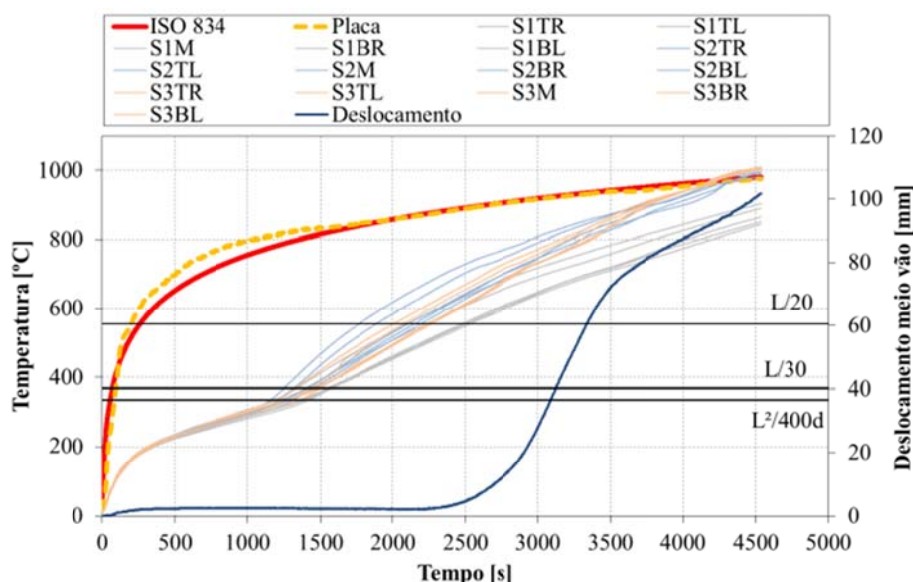


Gráfico 197 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio I13.

No Gráfico 198 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma perturbação considerável, no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

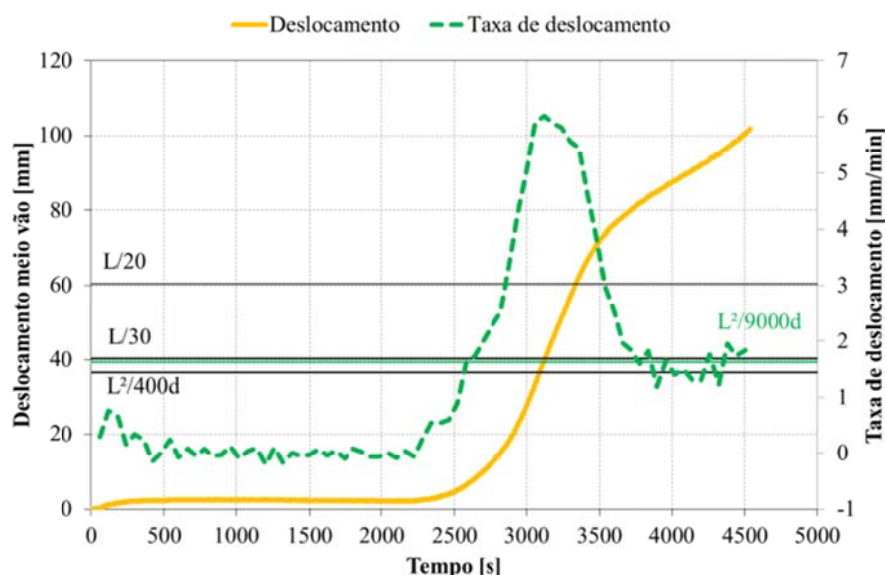


Gráfico 198 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para I13.

No Gráfico 199 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da



curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 197, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência. De notar que no final do ensaio as temperaturas tendem a aproximarem-se para um mesmo valor de deslocamento do ponto de carga.

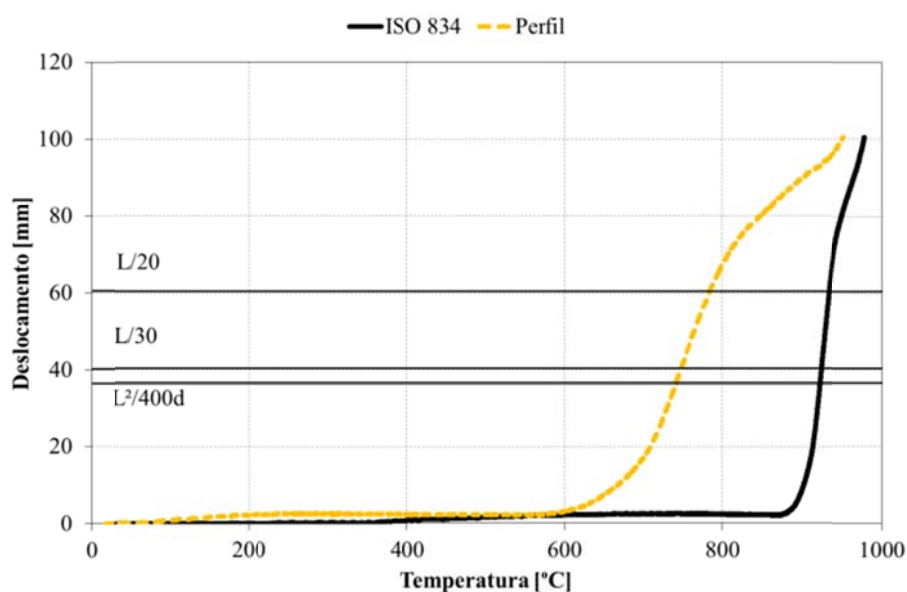


Gráfico 199 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio I13.

No Gráfico 193 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior.

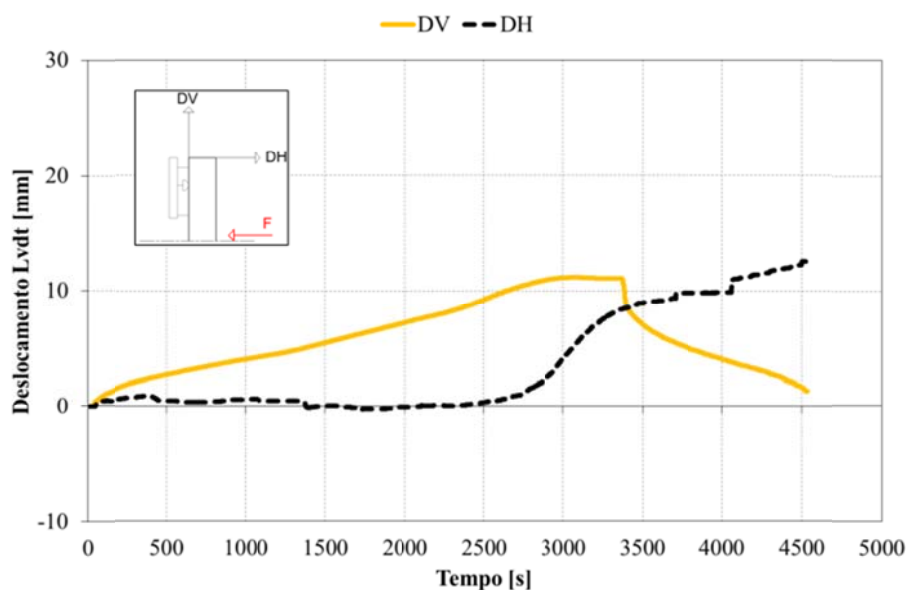


Gráfico 200 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio I13.

No Gráfico 201 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. De notar que a secção 1, ver Figura 15, apresenta valores inferiores de aquecimento, relativamente às outras secções (S2 e S3) provavelmente devido à sua localização.

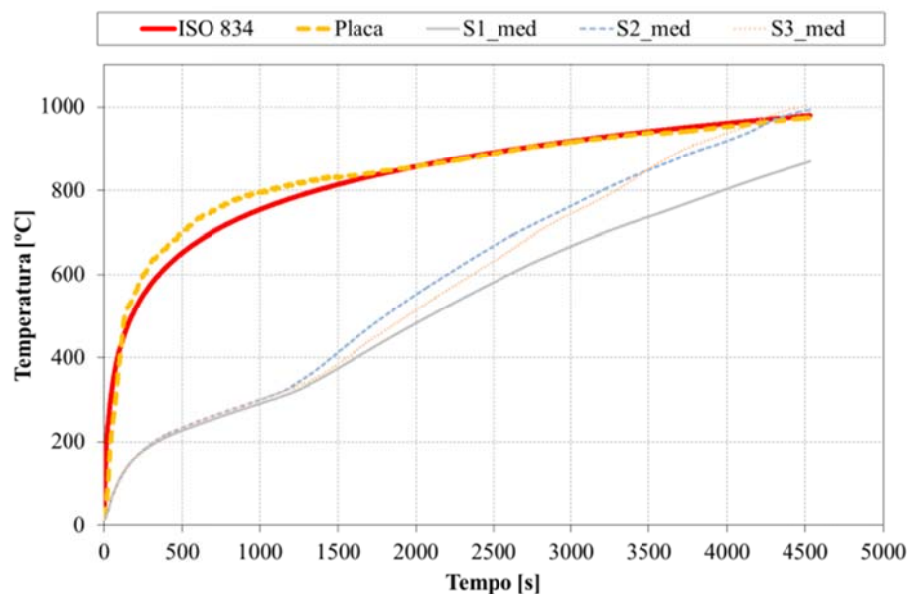


Gráfico 201 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para I13.

No Gráfico 202 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil. De notar que até um certo instante de tempo, a temperatura é uniforme no perfil.

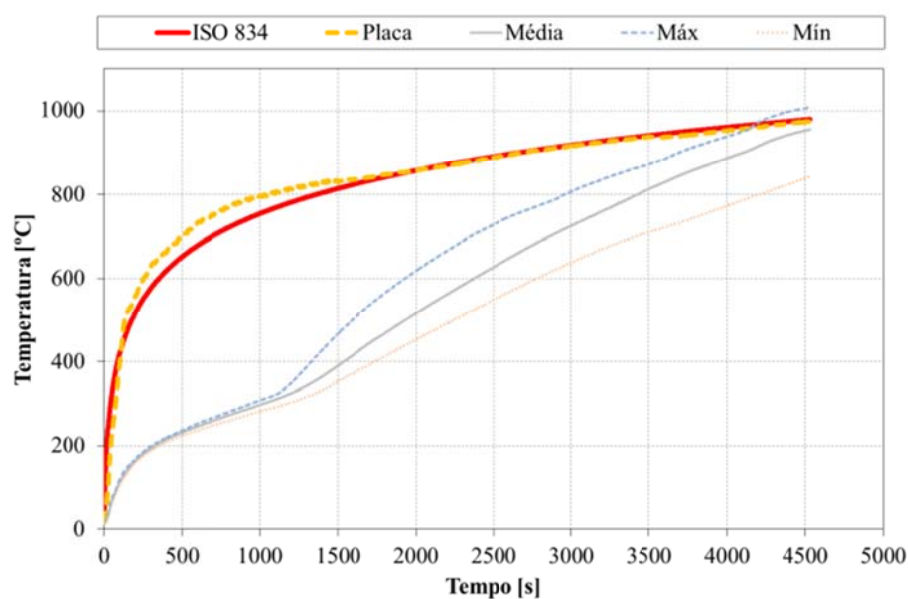


Gráfico 202 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio I13.

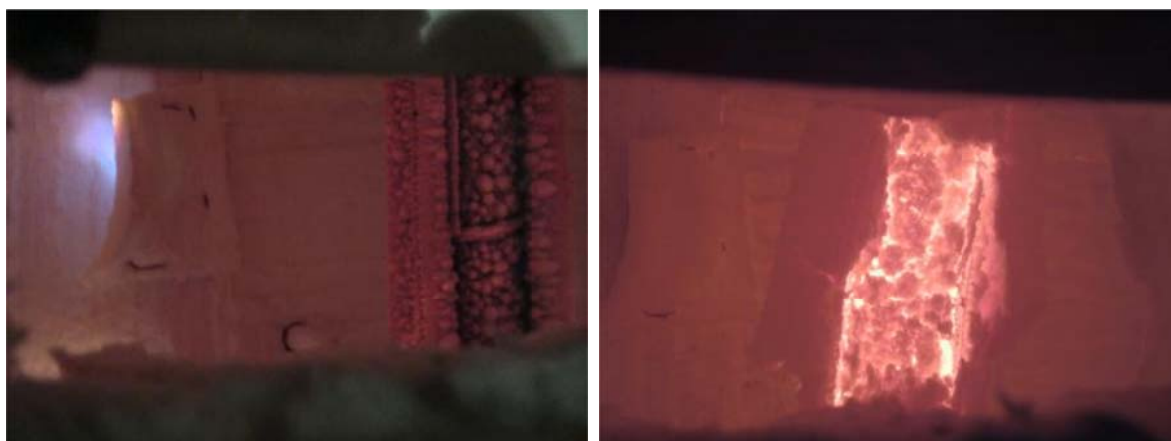


Figura 60 – Evolução do ensaio I12.

Na Figura 60 estão representados dois instantes do ensaio, à esquerda o início da intumescência quando ligada a curva de fogo, à direita a representação da intumescência numa fase final. Observa-se ainda a camada de intumescência a evoluir.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 52 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 747,46 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (I4), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 12 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 684,47 [°C].

#### 6.3.9. Ensaio S6 ( $\mu=30\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 25-08-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=30\%$  determina-se uma temperatura crítica de 663,78°C. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 13620 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 19 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

Tabela 19 – Valores de protecção para ensaio S6.

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx.	Mín.
1105	115	1310	854

No Gráfico 203 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma pequena perturbação.

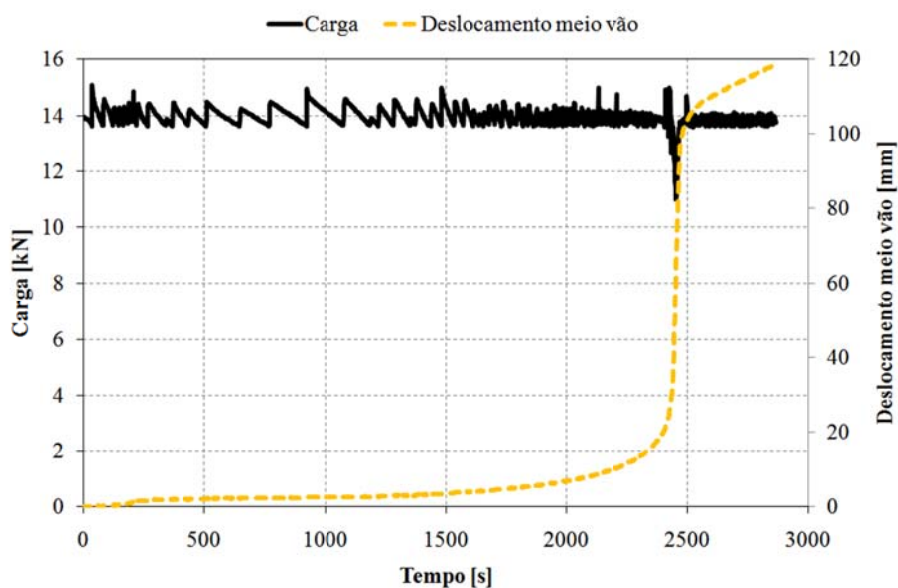


Gráfico 203 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio S6.

No Gráfico 204 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.

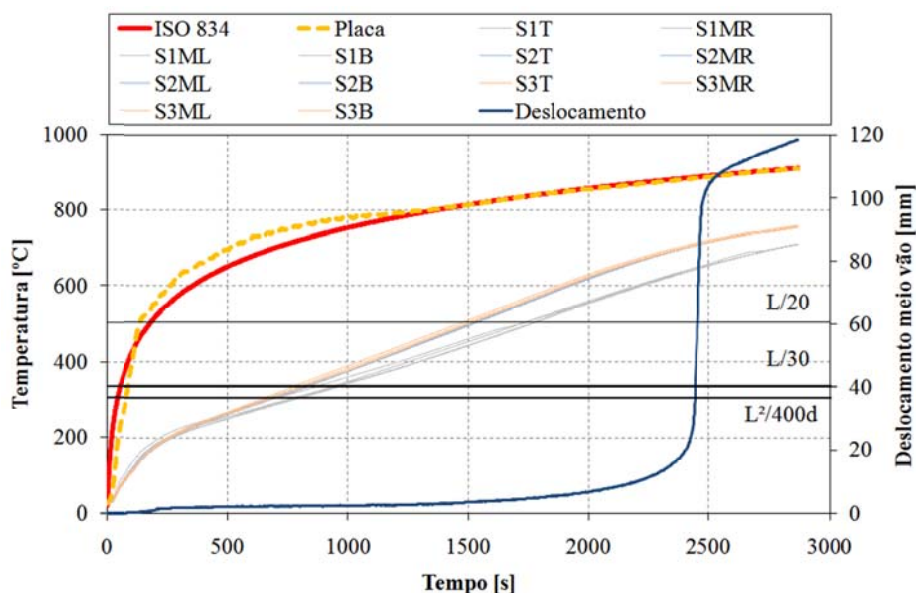


Gráfico 204 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio S6.

No Gráfico 205 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

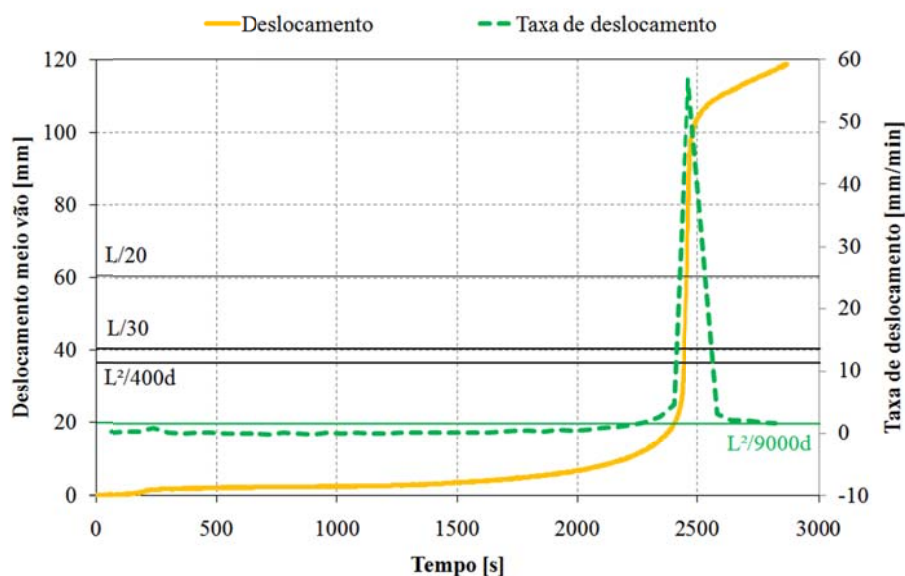


Gráfico 205 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S6.

No Gráfico 206 está representada a evolução do deslocamento no ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da

curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 204, a curva de fogo ISO834, coincide com a temperatura média dentro do forno de resistência. A temperatura crítica do elemento é definida com uma perpendicular do valor de deslocamento, ao eixo das temperaturas.

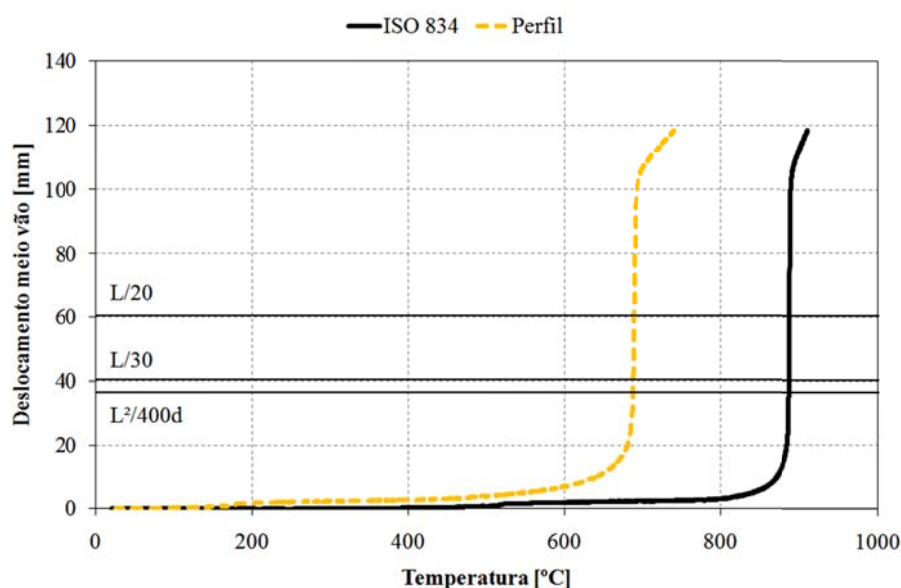


Gráfico 206 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S6.

No Gráfico 207 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio, vincando o momento de colapso do elemento.

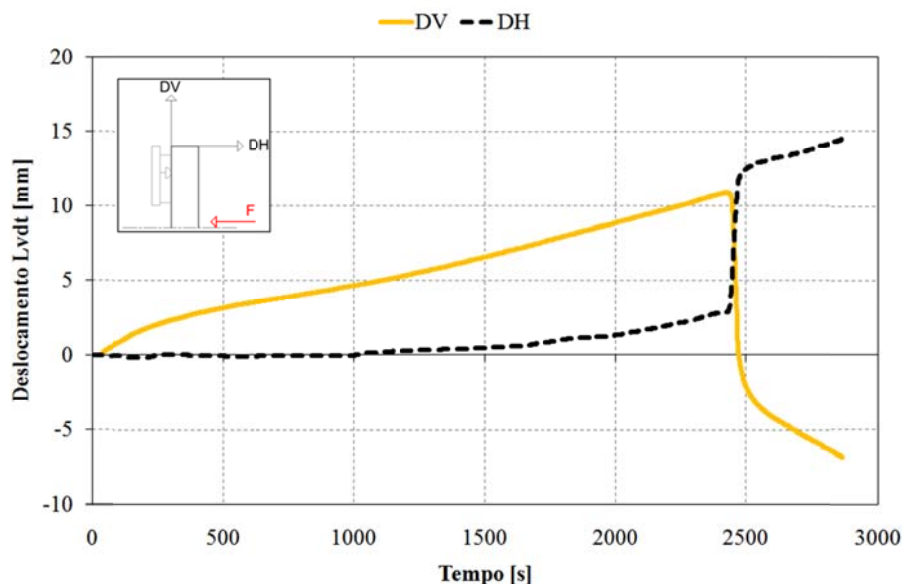


Gráfico 207 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S6.

No Gráfico 208 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

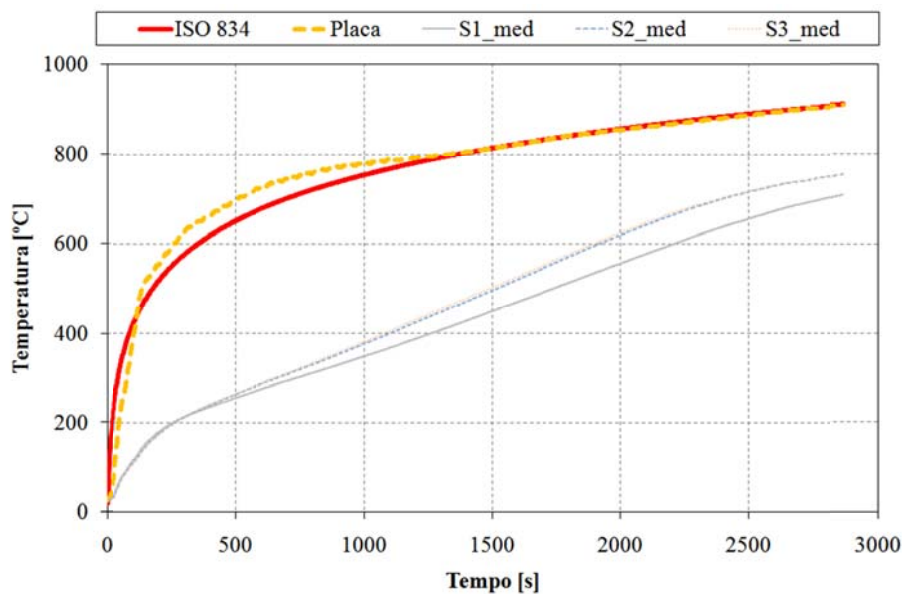


Gráfico 208 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S6.

No Gráfico 209 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.



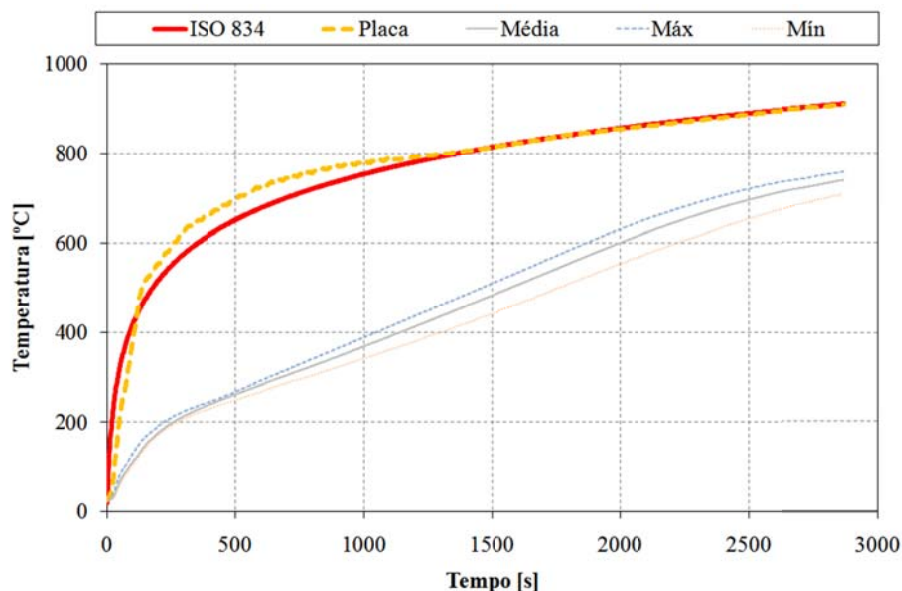


Gráfico 209 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S6.

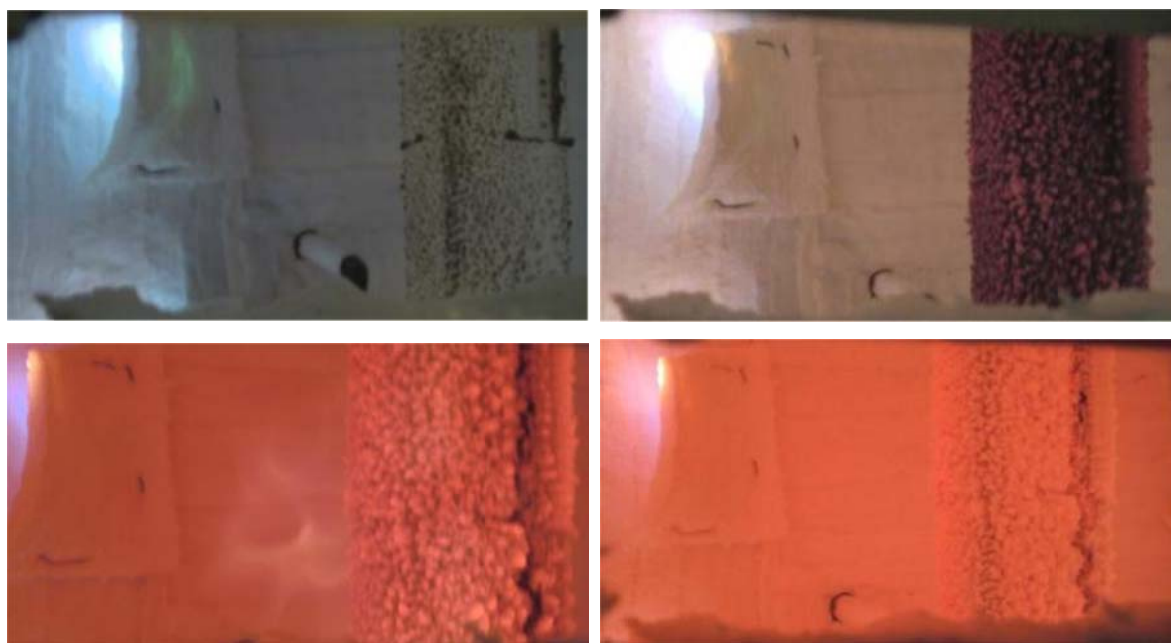


Figura 61 – Evolução do ensaio S6.

Na Figura 61 estão representados quatro instantes do ensaio, representando as fases da evolução na intumescência da tinta. Pode-se observar a pequena linha de ruptura da camada intumescente, contudo este fenómeno não influenciou o modo de ruptura do elemento, nem alterações na evolução da temperatura no perfil.



Figura 62 – Deformada sofrida no ensaio S6.

Na Figura 62 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio. À esquerda ainda com os queimadores do forno de resistência ligados, à direita posteriormente quando o ambiente do forno de resistência já estabilizado.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 40 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 687,79 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (S3), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 17 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 722,56 [°C].

#### 6.3.10. Ensaio S7 ( $\mu=30\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 01-09-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=30\%$  determina-se uma temperatura crítica de 663,78°C. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 13620 [N]. A carga foi exercida no

elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 20 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

Tabela 20 – Valores de protecção para ensaio S7.

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx.	Mín.
1094	113	1338	777

No Gráfico 210 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma pequena perturbação.

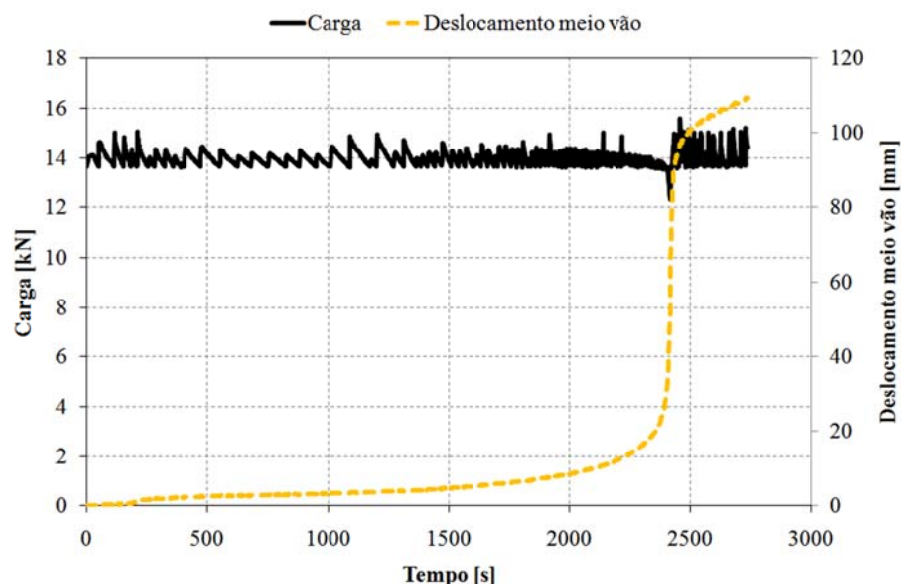


Gráfico 210 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio S7.

No Gráfico 211 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.

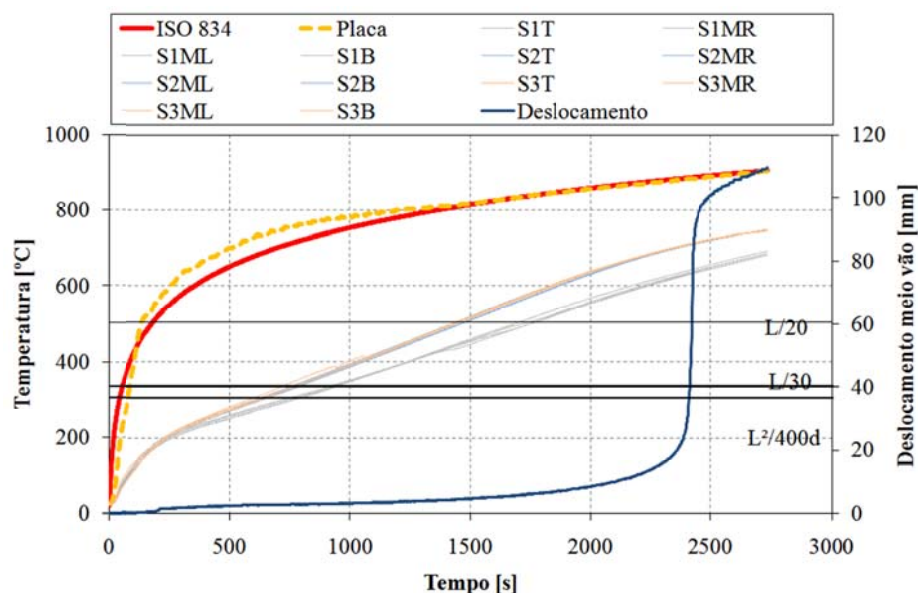


Gráfico 211 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio S7.

No Gráfico 212 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

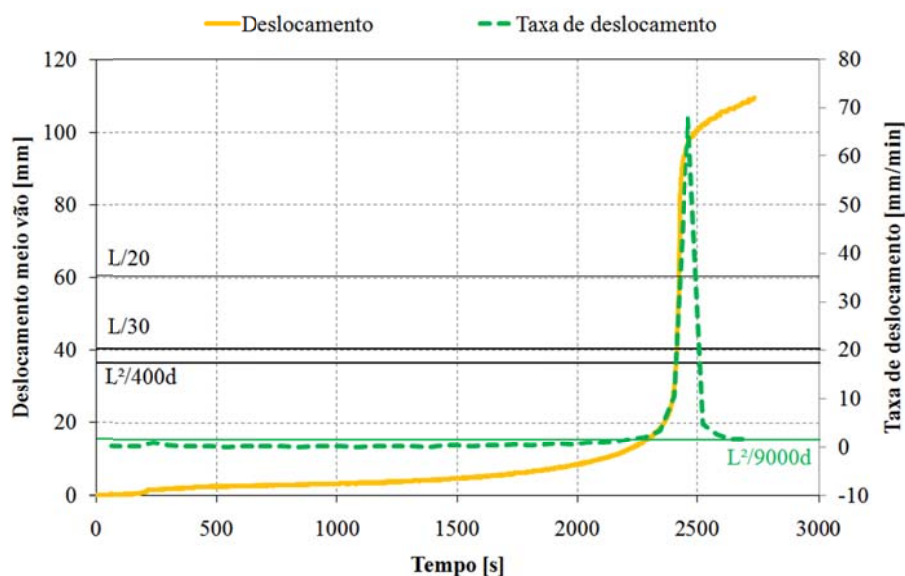


Gráfico 212 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S7.

No Gráfico 213 está representada a evolução do deslocamento no ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da

curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 211, a curva de fogo ISO834, coincide com a temperatura média dentro do forno de resistência. A temperatura crítica do elemento é definida com uma perpendicular do valor de deslocamento, ao eixo das temperaturas.

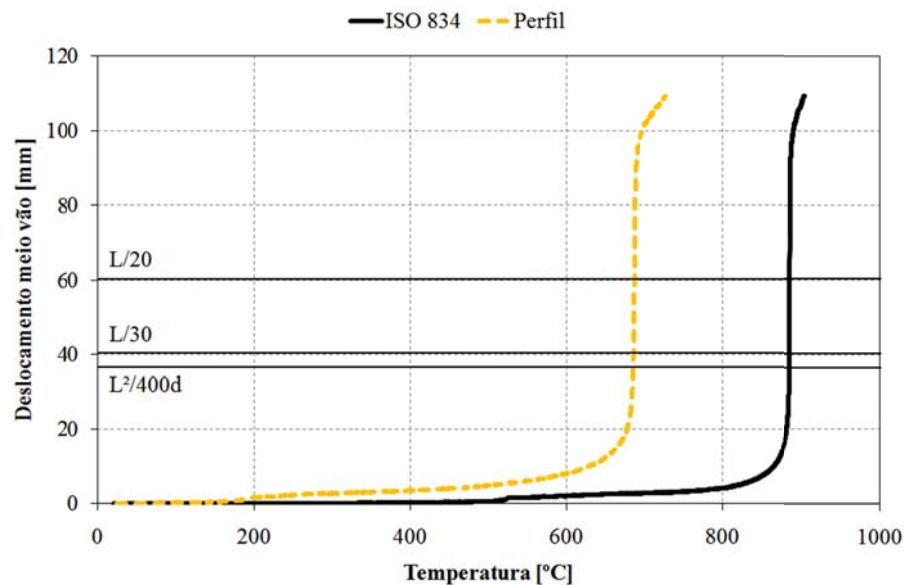


Gráfico 213 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S7.

No Gráfico 214 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio, vincando o momento de colapso do elemento.

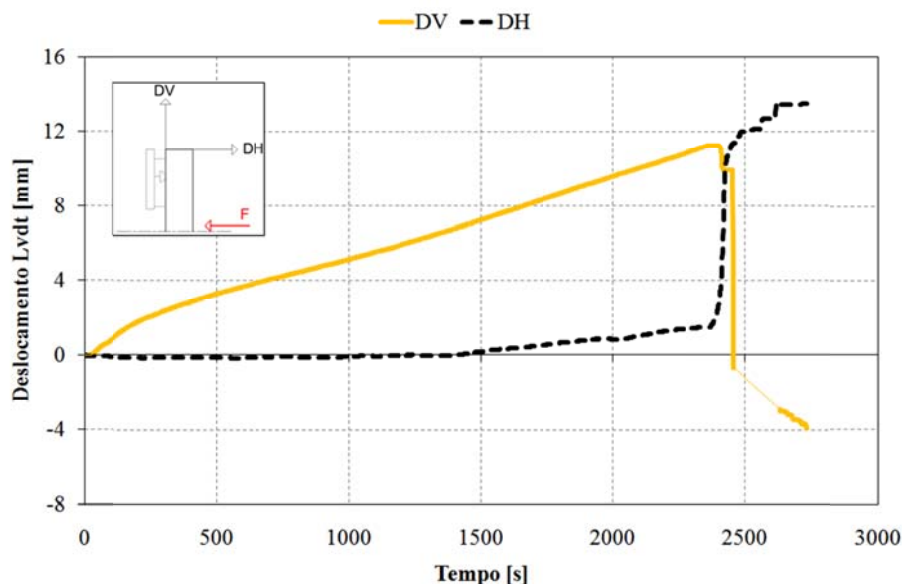


Gráfico 214 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S7.

No Gráfico 215 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

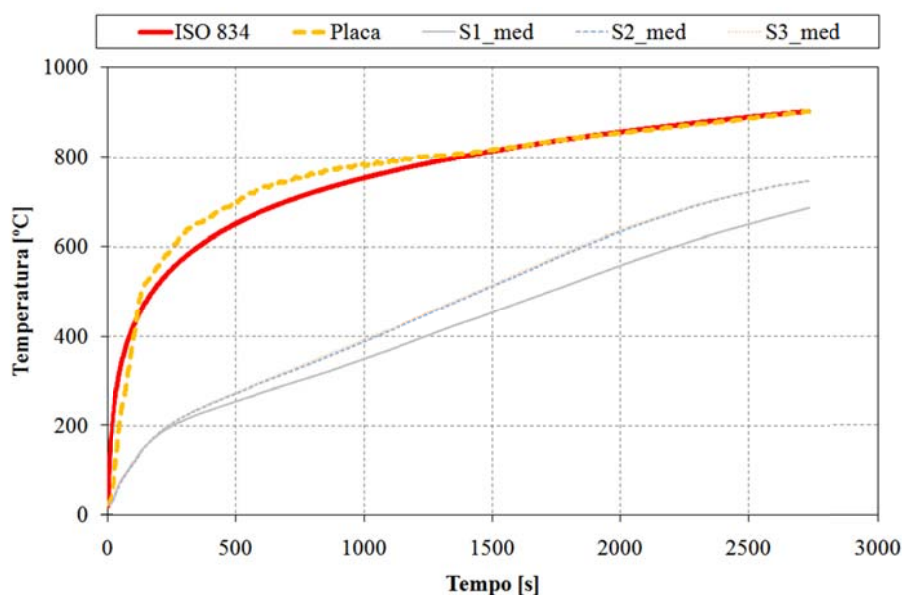


Gráfico 215 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S7.

No Gráfico 216 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.



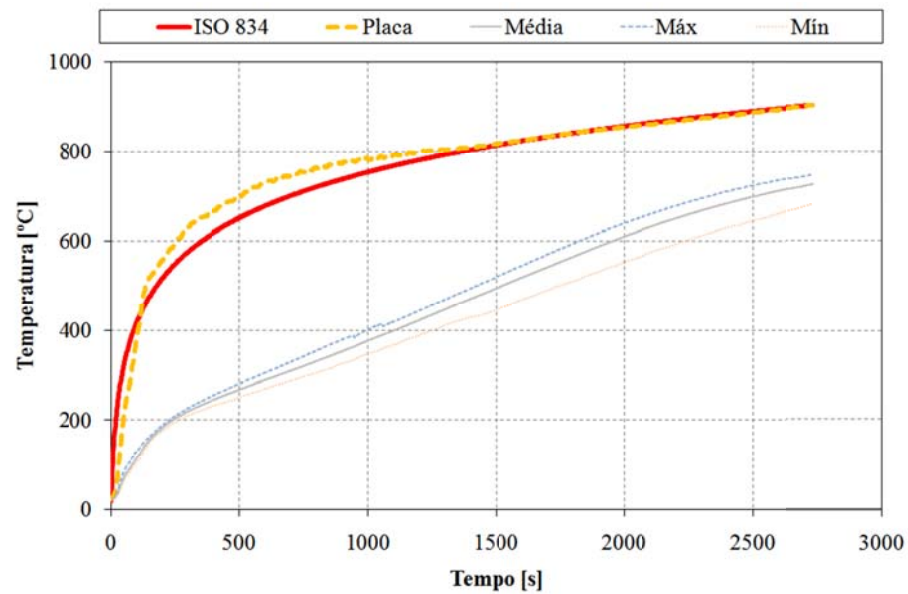


Gráfico 216 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S7.



Figura 63 – Evolução do ensaio S7.

Na Figura 63 estão representados dois instantes no decorrer do ensaio.





Figura 64 – Deformada sofrida no ensaio S7.

Na Figura 64 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 40 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 685,53 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (S3), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 17 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 722,56 [°C].

#### 6.3.11. Ensaio S8 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm])

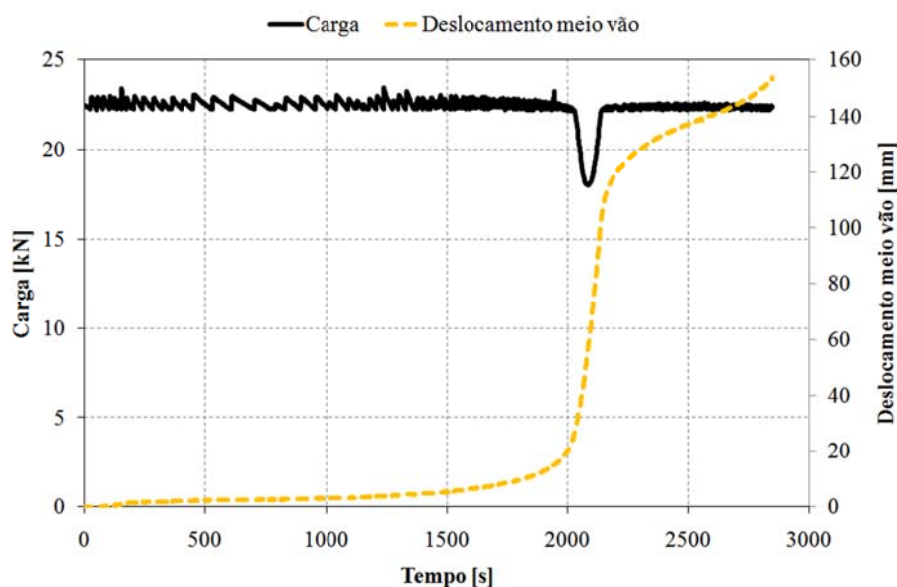
Este elemento foi ensaiado a 02-09-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 22250 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 21 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 21 - Valores de protecção para ensaio S8.**

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1141	100	1309	944

No Gráfico 217 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma pequena perturbação.



**Gráfico 217 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio S8.**

No Gráfico 218 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.

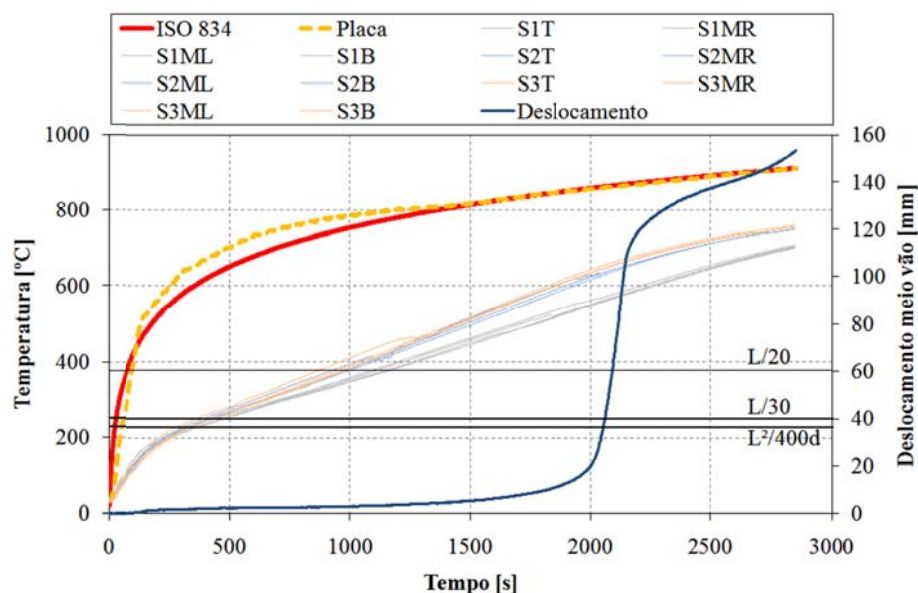


Gráfico 218 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio S8.

No Gráfico 219 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

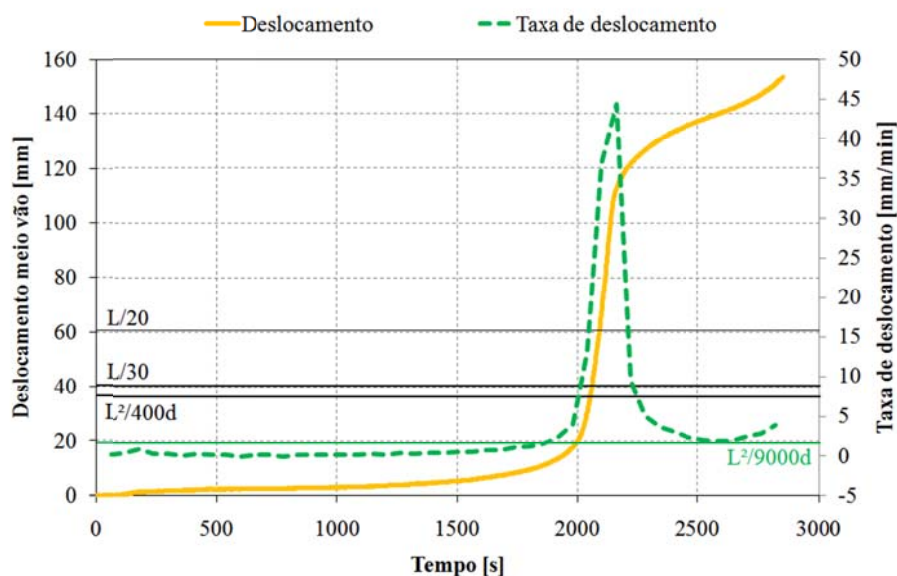


Gráfico 219 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S8.

No Gráfico 220 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da

curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 162, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência. No instante de colapso do elemento regista-se uma perpendicular ao eixo das temperaturas, referente ao valor de deslocamento no ponto de aplicação de carga, registando assim o valor da temperatura crítica.

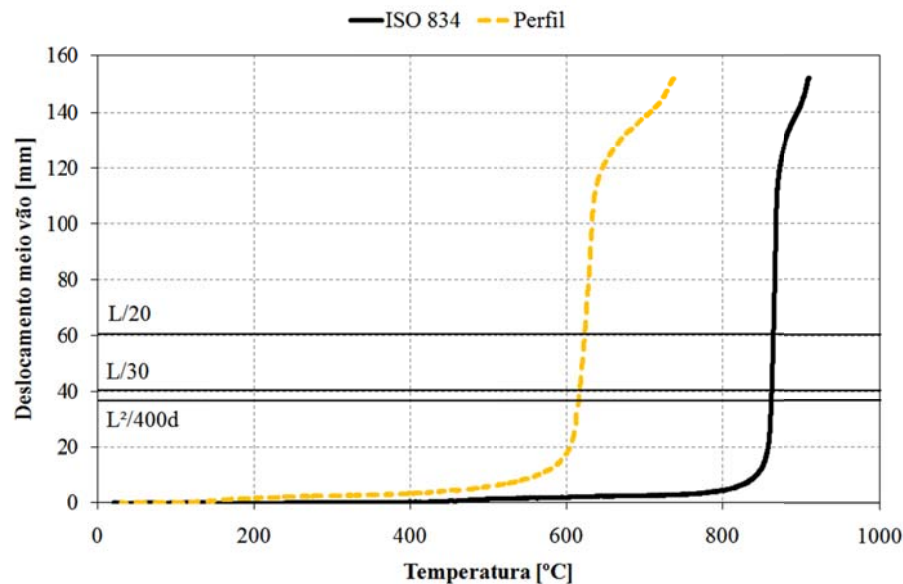


Gráfico 220 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S8.

No Gráfico 221 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior, registando aí a sua perda de capacidade de resistência ao fogo.

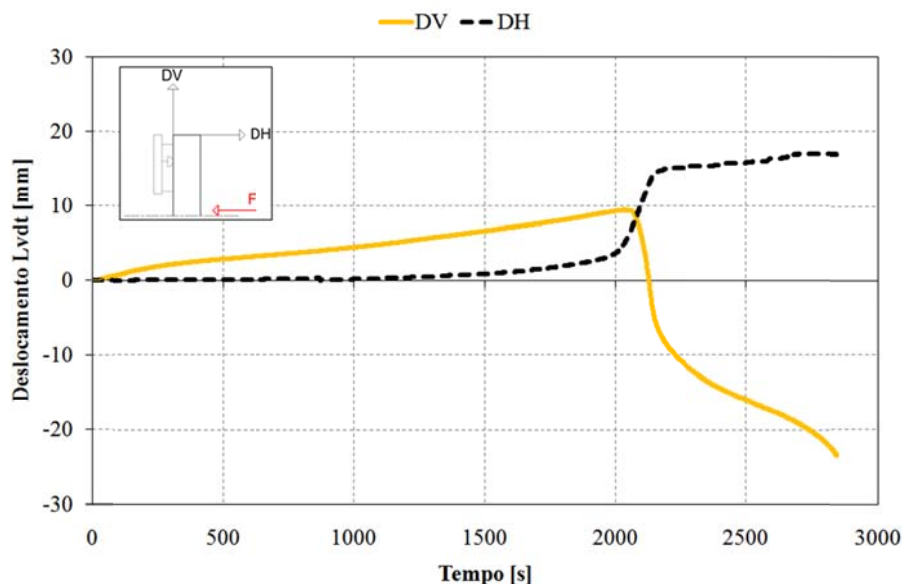


Gráfico 221 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S8.

No Gráfico 222 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

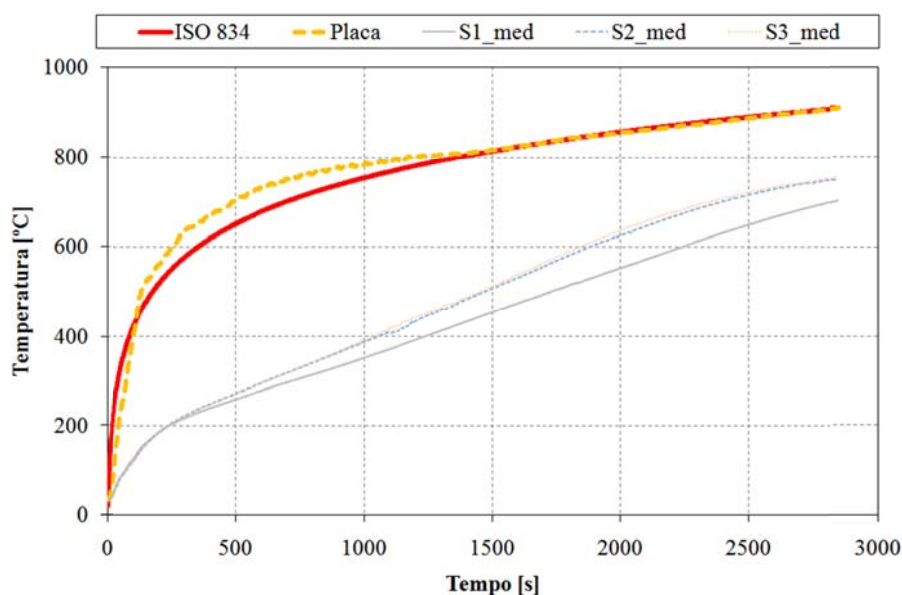


Gráfico 222 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S8.

No Gráfico 223 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

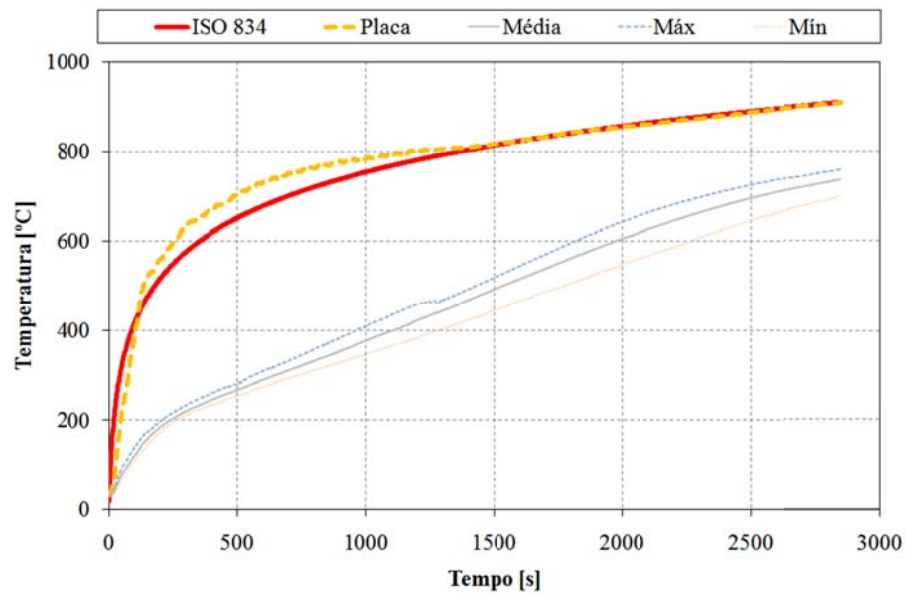


Gráfico 223 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S8.



Figura 65 – Deformada sofrida no ensaio S8.

Na Figura 65 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 34 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 617,08 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (S4), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 11 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 641,95 [°C].

#### 6.3.12. Ensaio S9 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 03-09-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 22250 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 22 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 22 - Valores de protecção para ensaio S9.**

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1141	104	1350	909

No Gráfico 224 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma pequena perturbação.



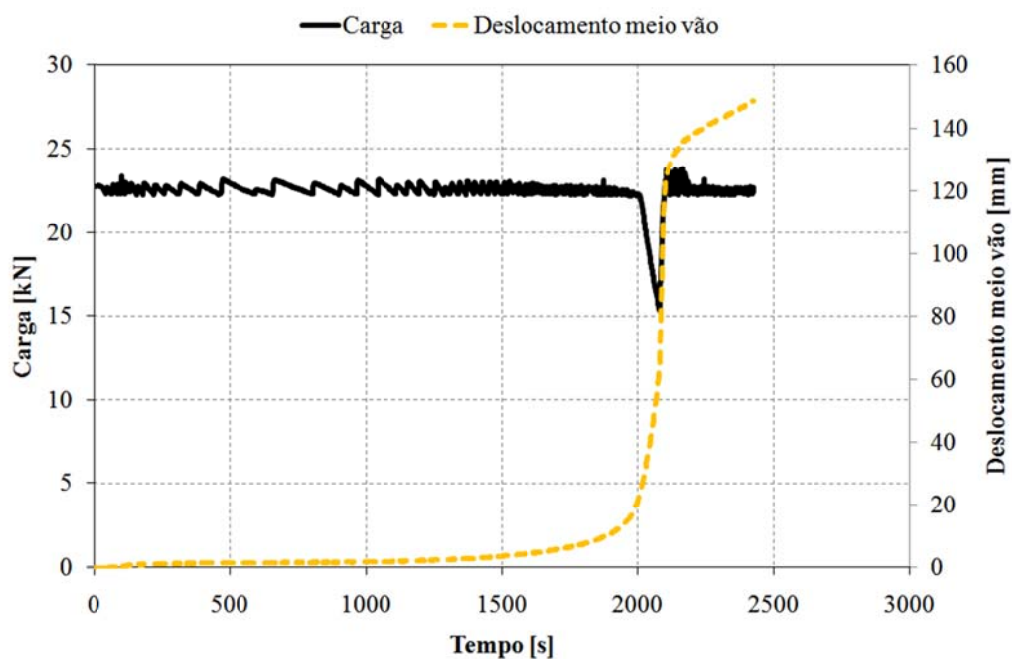


Gráfico 224 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio S9.

No Gráfico 225 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.

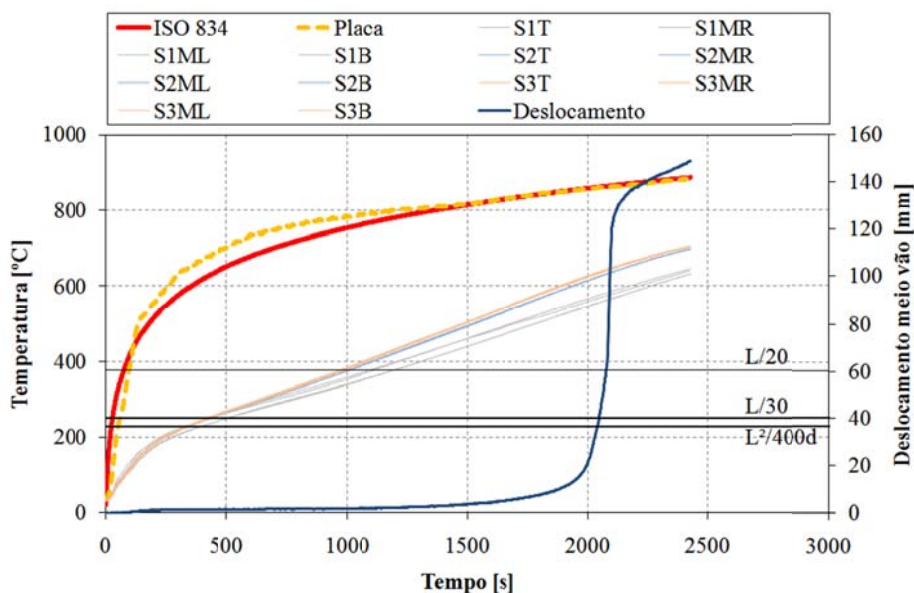


Gráfico 225 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio S9.

No Gráfico 226 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

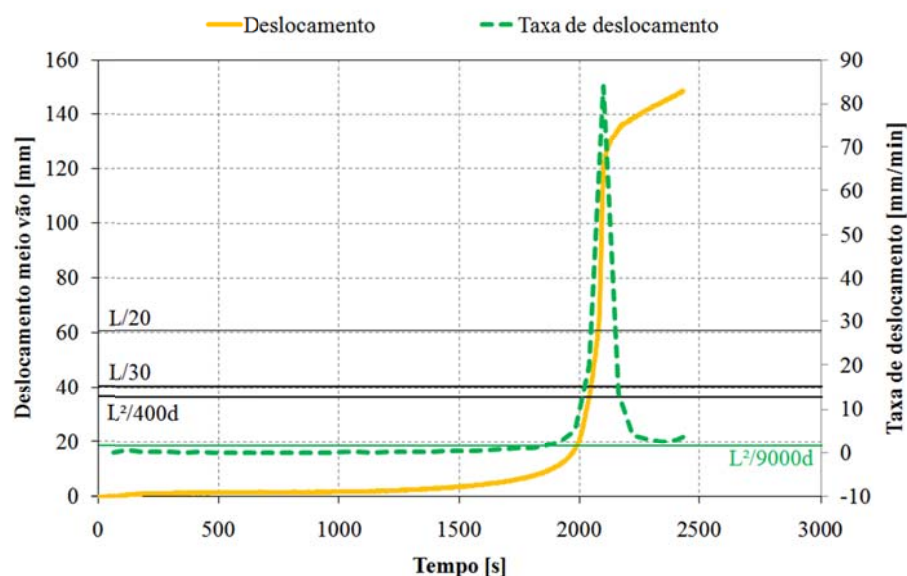


Gráfico 226 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S9.

No Gráfico 227 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 225, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência. No instante de colapso do elemento regista-se uma perpendicular ao eixo das temperaturas, referente ao valor de deslocamento no ponto de aplicação de carga, registando assim o valor da temperatura crítica.

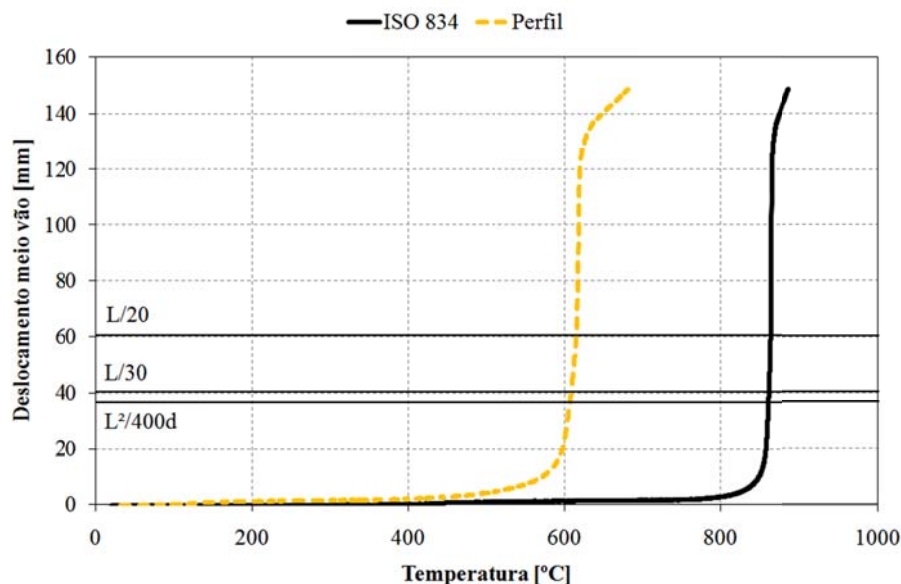


Gráfico 227 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S9.

No Gráfico 228 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior, registando aí a sua perda de capacidade de resistência ao fogo.

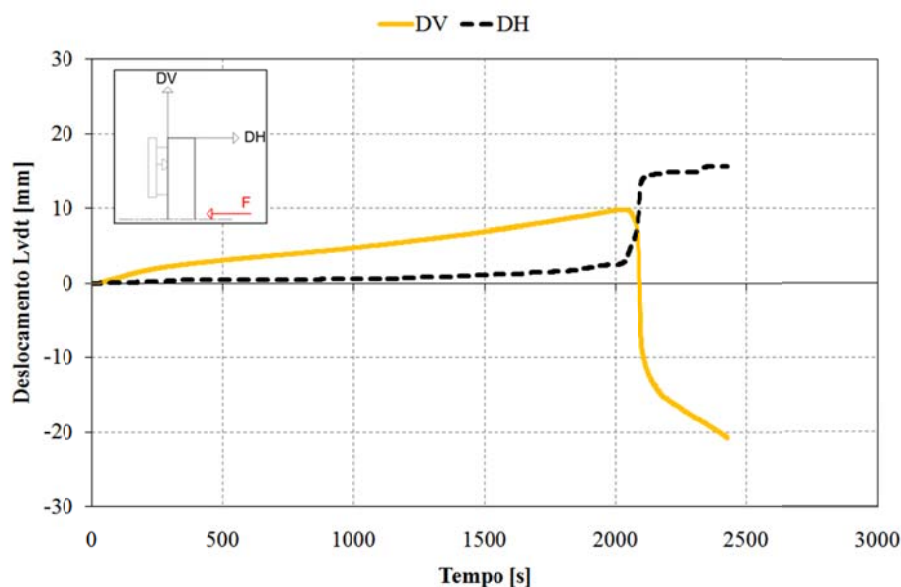


Gráfico 228 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S9.

No Gráfico 229 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto

de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

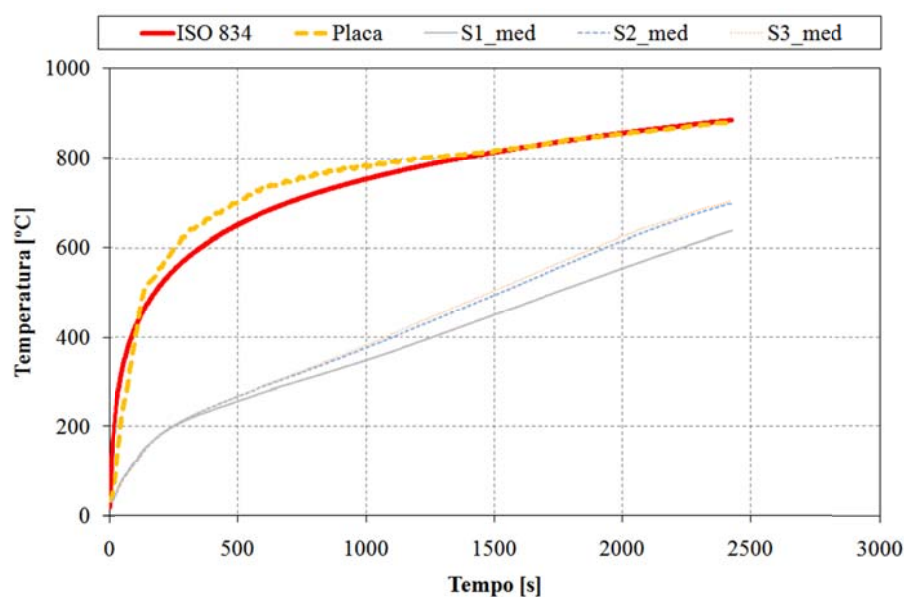


Gráfico 229 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S9.

No Gráfico 230 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

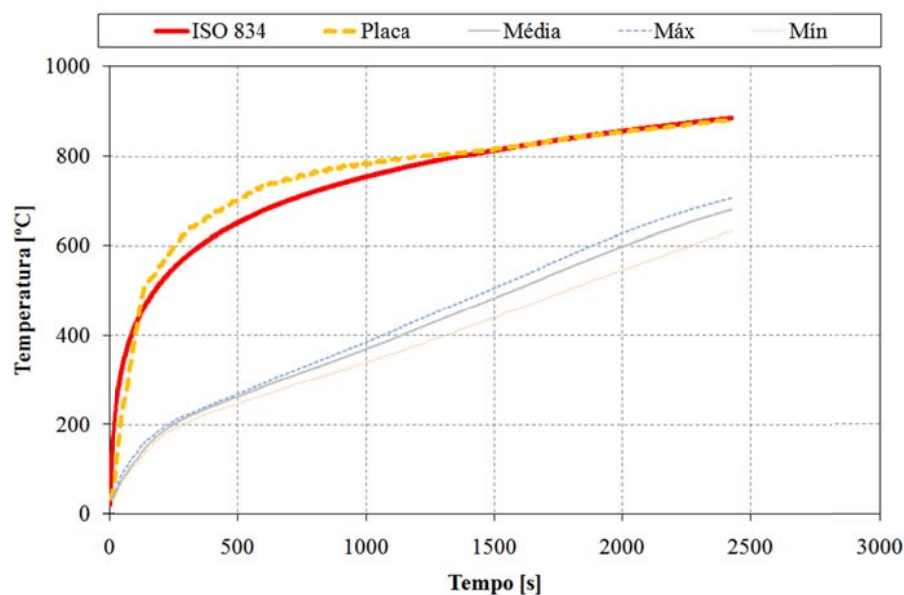
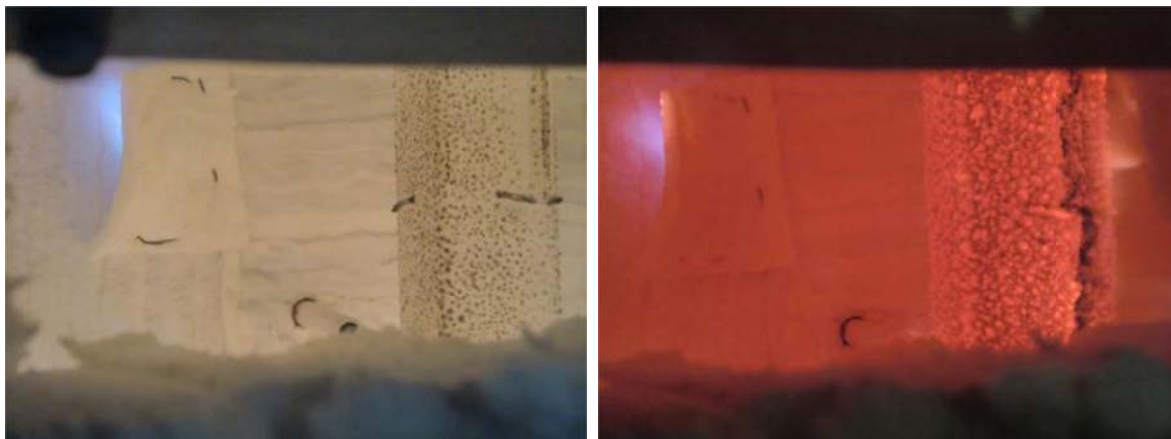


Gráfico 230 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S9.



**Figura 66 – Evolução do ensaio S9.**

Na Figura 66 estão representados dois instantes do ensaio, representando as fases da evolução na intumescência da tinta. Pode-se observar a pequena linha de ruptura da camada intumescente, contudo este fenómeno não influenciou o modo de ruptura do elemento, nem alterações na evolução da temperatura no perfil.



**Figura 67 – Deformada sofrida no ensaio S9.**

Na Figura 67 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio, ainda com os queimadores do forno de resistência ligados.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 34 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 608,73 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (S4), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 11 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 641,95 [°C].

#### 6.3.13. Ensaio S10 ( $\mu=70\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 02-09-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 525,78 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 30090 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 23 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 23 - Valores de protecção para ensaio S10.**

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1144	114	1482	1144

No Gráfico 231 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma pequena perturbação.



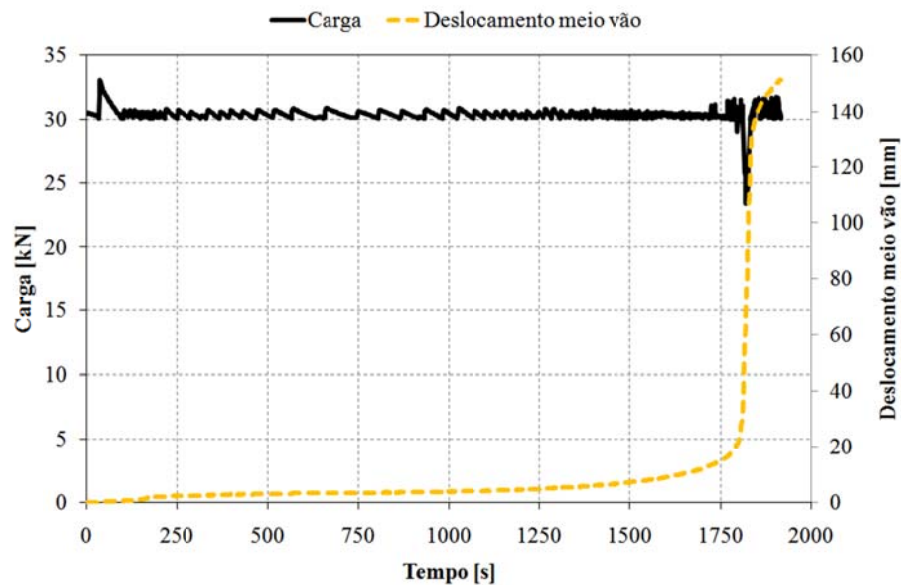


Gráfico 231 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio S10.

No Gráfico 232 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.

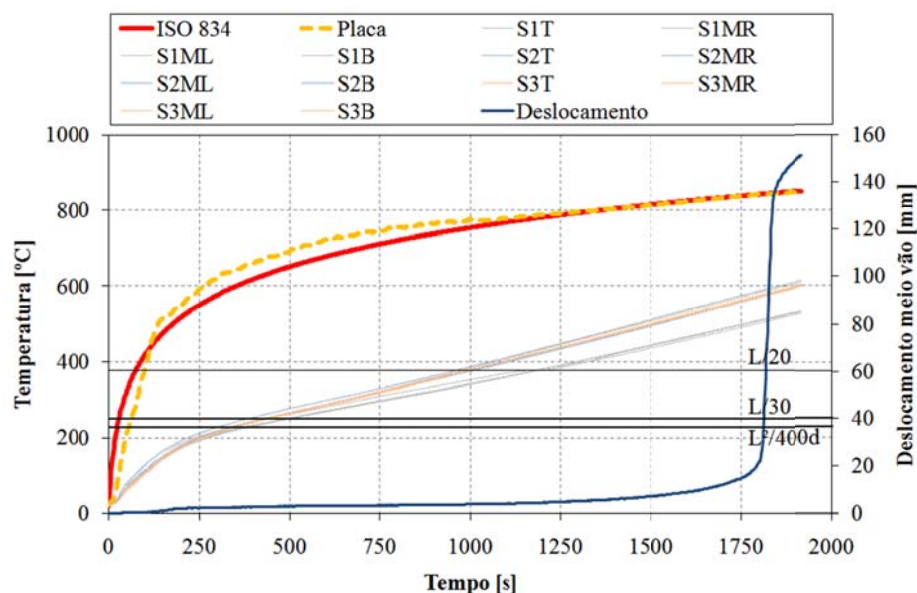


Gráfico 232 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio S10.

No Gráfico 226 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de



deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

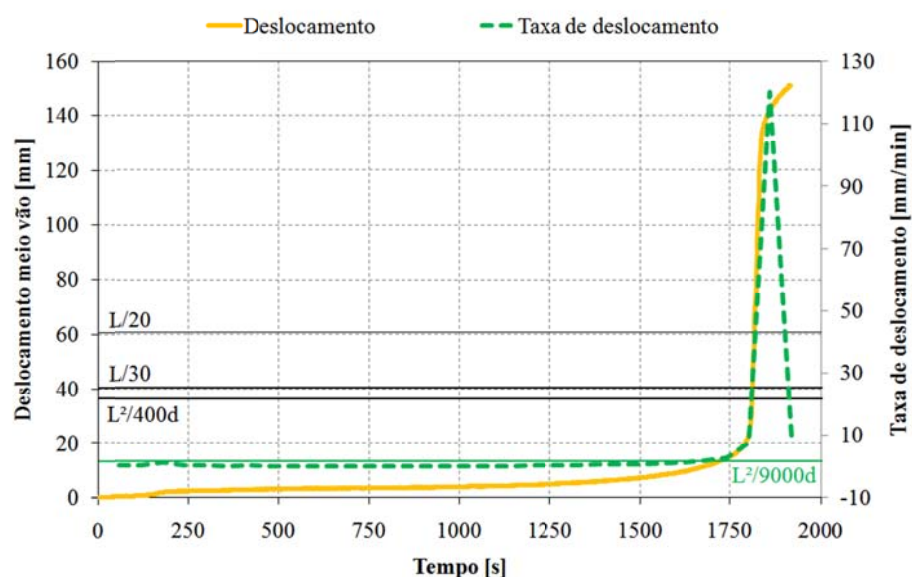


Gráfico 233 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S10.

No Gráfico 234 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 232, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência. No instante de colapso do elemento regista-se uma perpendicular ao eixo das temperaturas, referente ao valor de deslocamento no ponto de aplicação de carga, registando assim o valor da temperatura crítica.

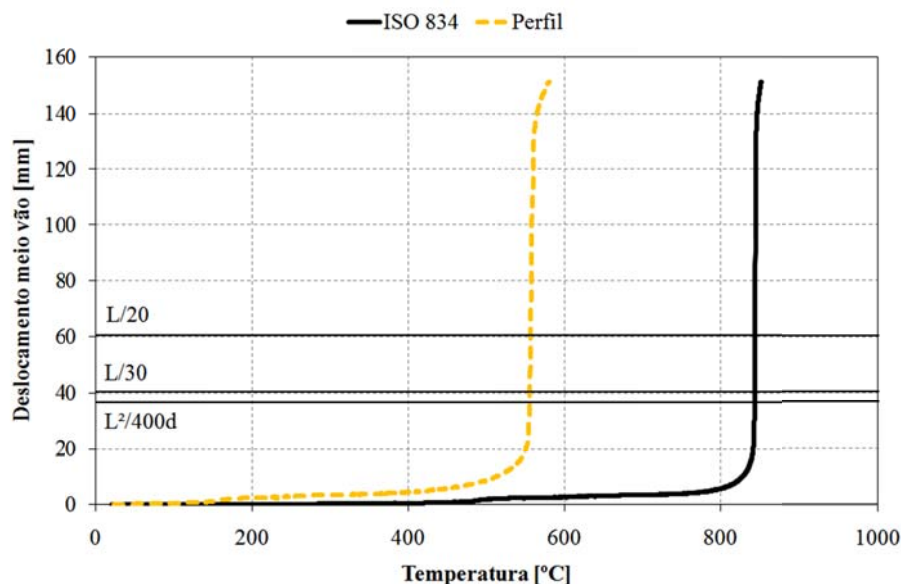


Gráfico 234 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S10.

No Gráfico 235 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior, registando aí a sua perda de capacidade de resistência ao fogo.

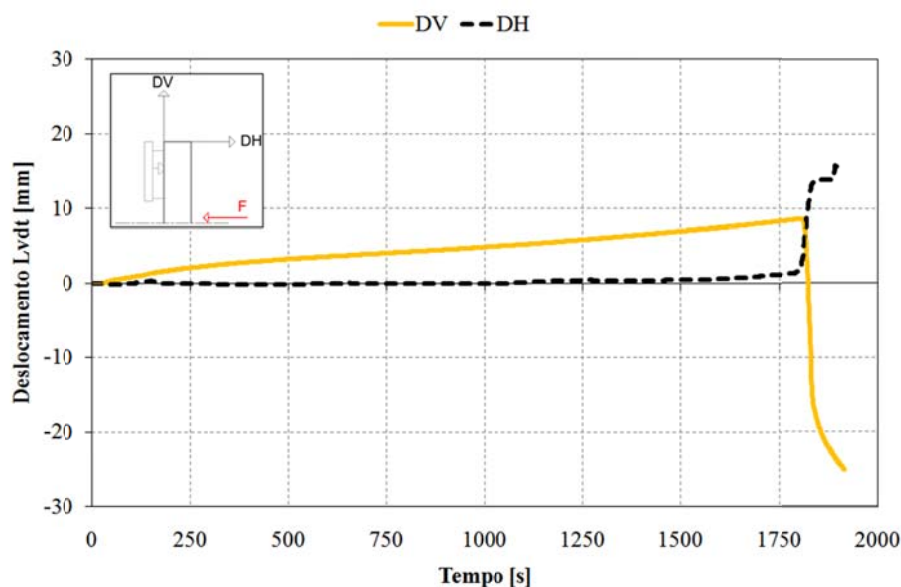
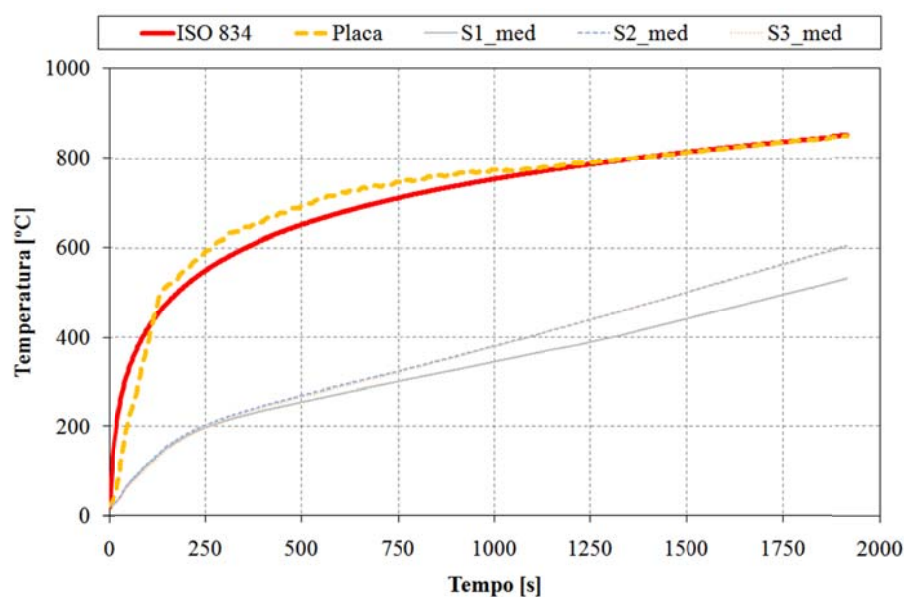


Gráfico 235 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S10.

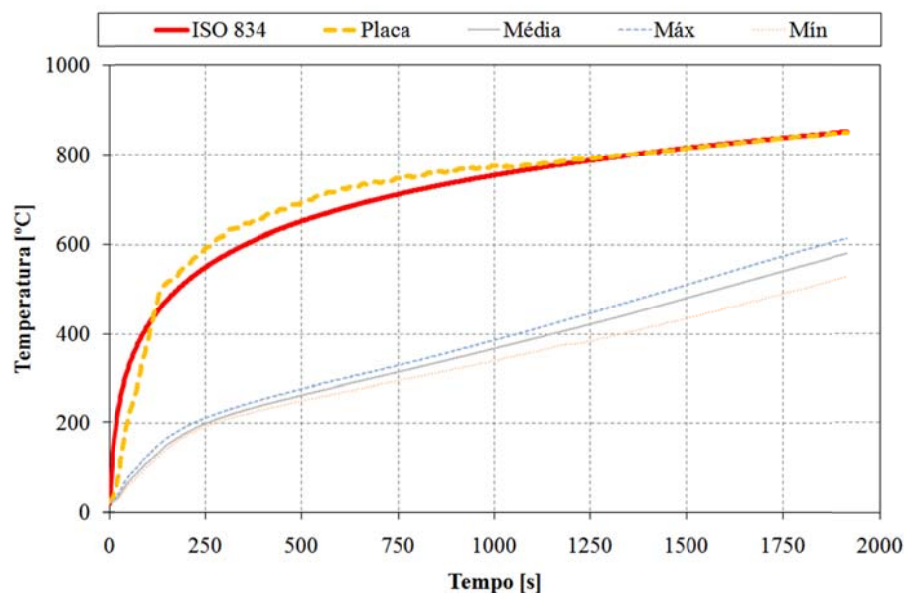
No Gráfico 236 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto

de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.



**Gráfico 236 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S10.**

No Gráfico 237 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.



**Gráfico 237 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S10.**



Figura 68 – Deformada sofrida no ensaio S10.

Na Figura 67 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio, ainda com os queimadores do forno de resistência ligados.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 30 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 555,69 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (S5), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 9 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 594,02 [°C].

#### 6.3.14. Ensaio S11 ( $\mu=70\%$ , protecção a 1 [mm])

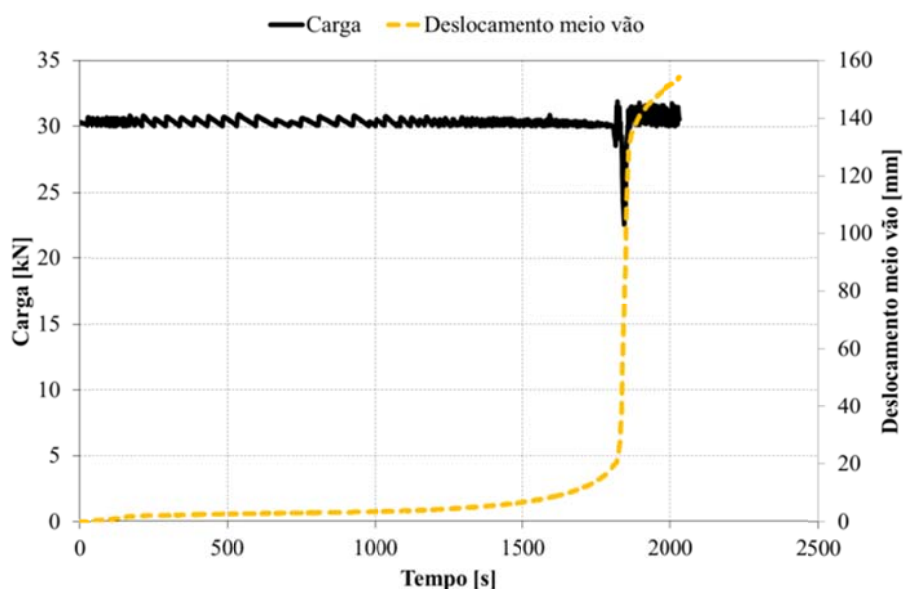
Este elemento foi ensaiado a 03-09-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 525,78 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 30090 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 24 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 24 - Valores de protecção para ensaio S11.**

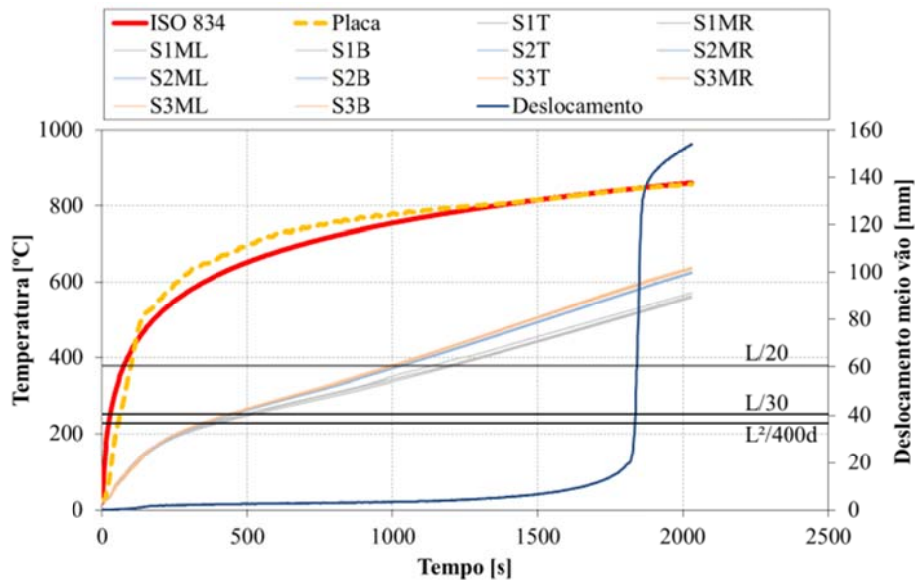
Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1131	92	1270	854

No Gráfico 238 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma pequena perturbação.



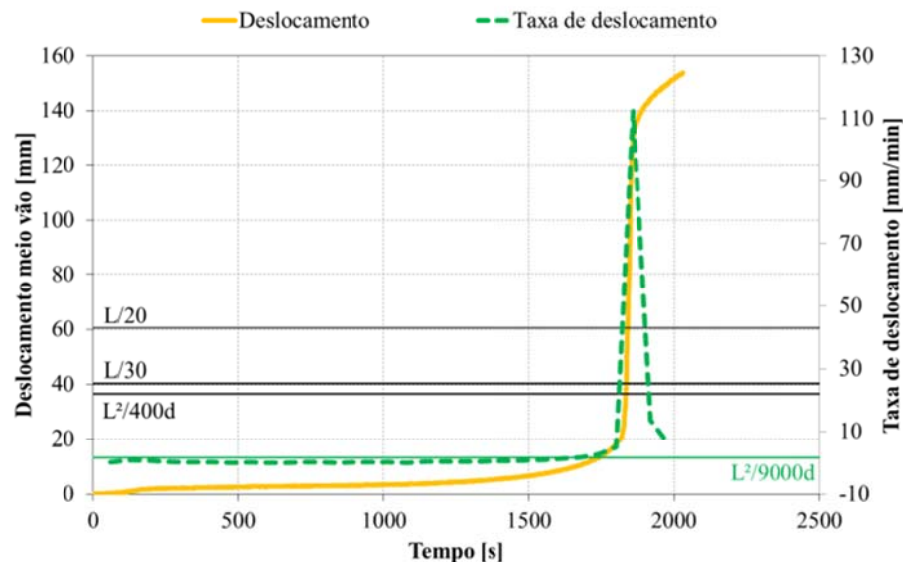
**Gráfico 238 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio S11.**

No Gráfico 239 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.



**Gráfico 239 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio S11.**

No Gráfico 226 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.



**Gráfico 240 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S11.**

No Gráfico 241 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 232, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência. No instante de colapso do elemento regista-se uma perpendicular ao eixo das temperaturas, referente ao valor de deslocamento no ponto de aplicação de carga, registrando assim o valor da temperatura crítica.

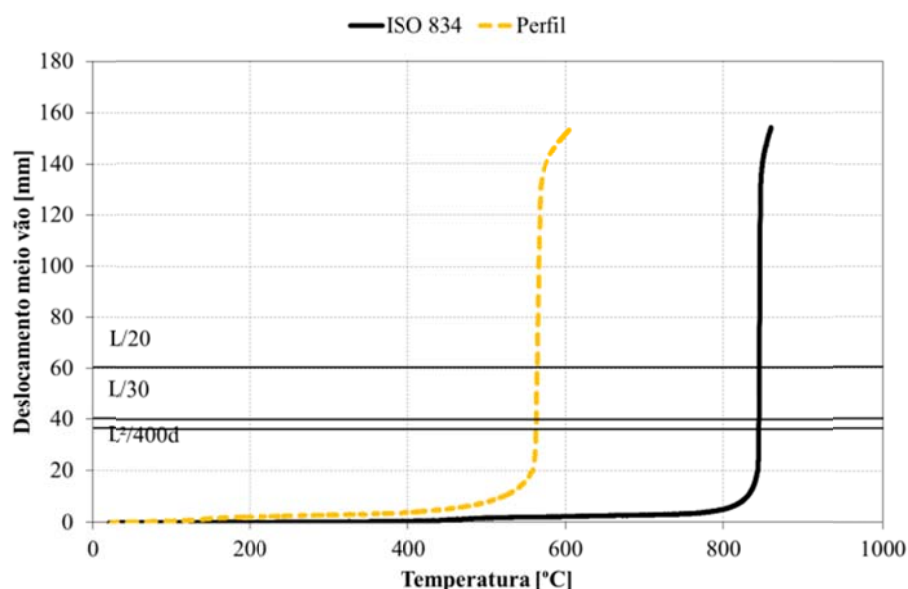


Gráfico 241 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S11.

No Gráfico 242 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior, registrando aí a sua perda de capacidade de resistência ao fogo.



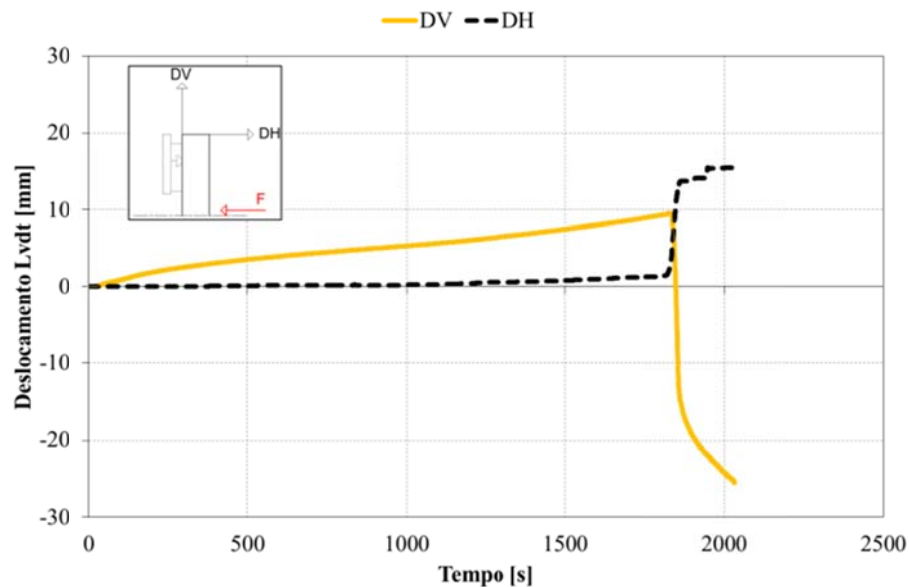


Gráfico 242 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S11.

No Gráfico 243 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

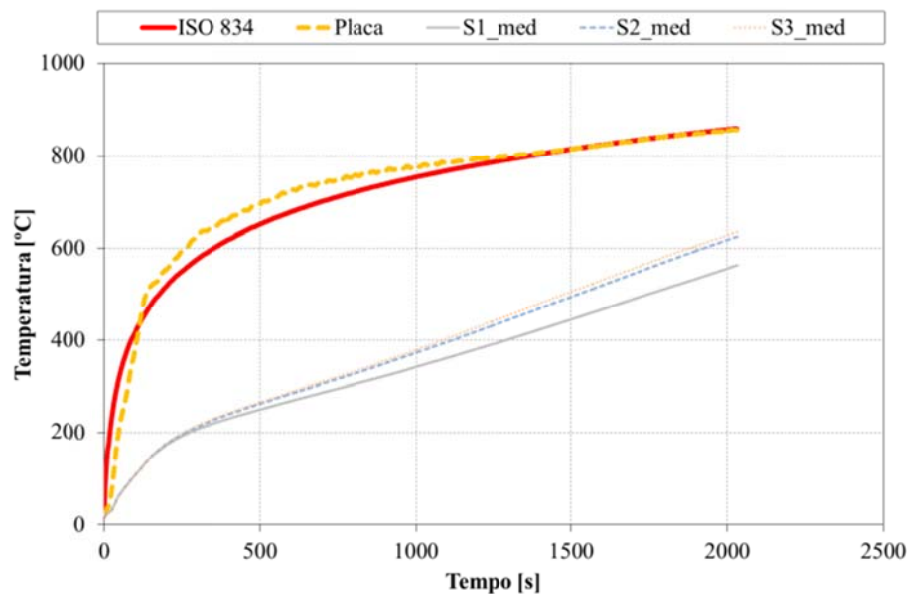


Gráfico 243 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S11.

No Gráfico 244 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

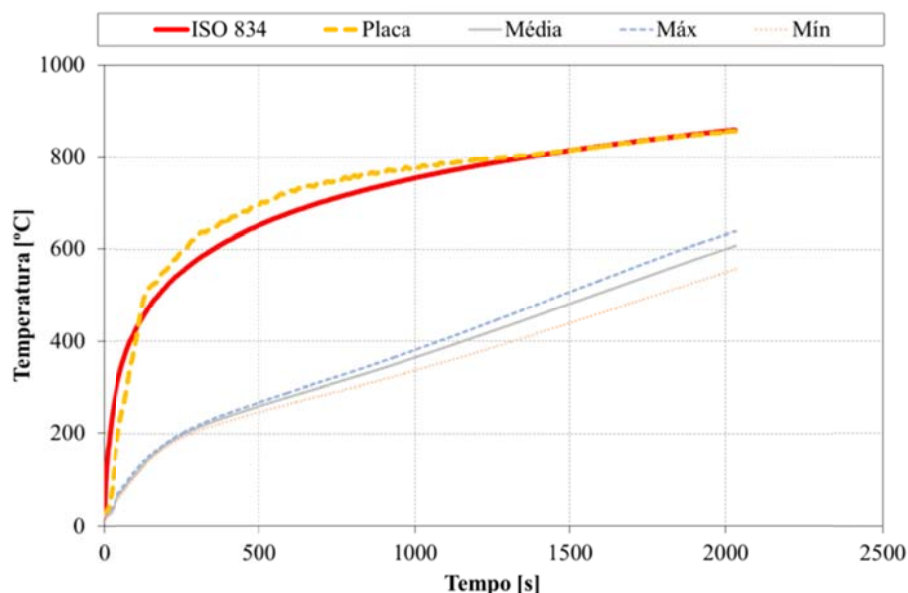


Gráfico 244 - Registro das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S11.

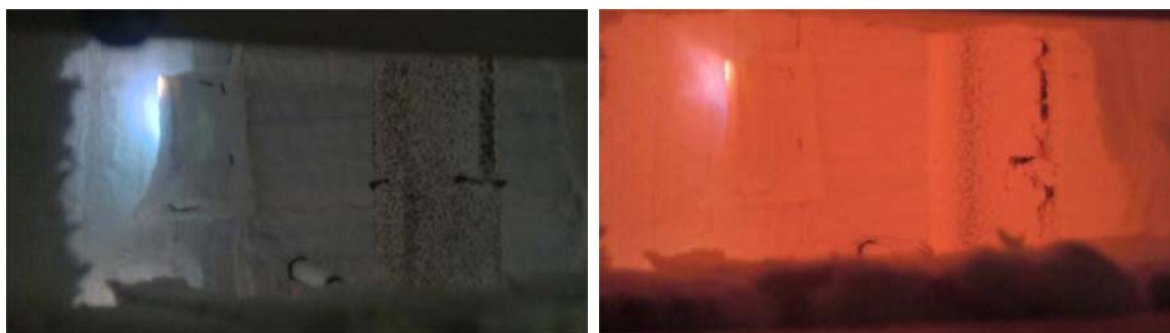


Figura 69 – Evolução do ensaio S11.

Na Figura 69 estão representados quatro instantes do ensaio, representando as fases da evolução na intumescência da tinta. Pode-se observar a pequena linha de ruptura da camada intumescente, contudo este fenómeno não influenciou o modo de ruptura do elemento, nem alterações na evolução da temperatura no perfil.



Figura 70 – Deformada sofrida no ensaio S11.

Na Figura 70 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio. À esquerda ainda com os queimadores do forno de resistência ligados, à direita posteriormente quando a intumescência já tinha sido removida.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 30 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 562,24 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (S5), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 9 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 594,02 [°C].

#### 6.3.15. Ensaio S12 ( $\mu=50\%$ , protecção a 2 [mm])

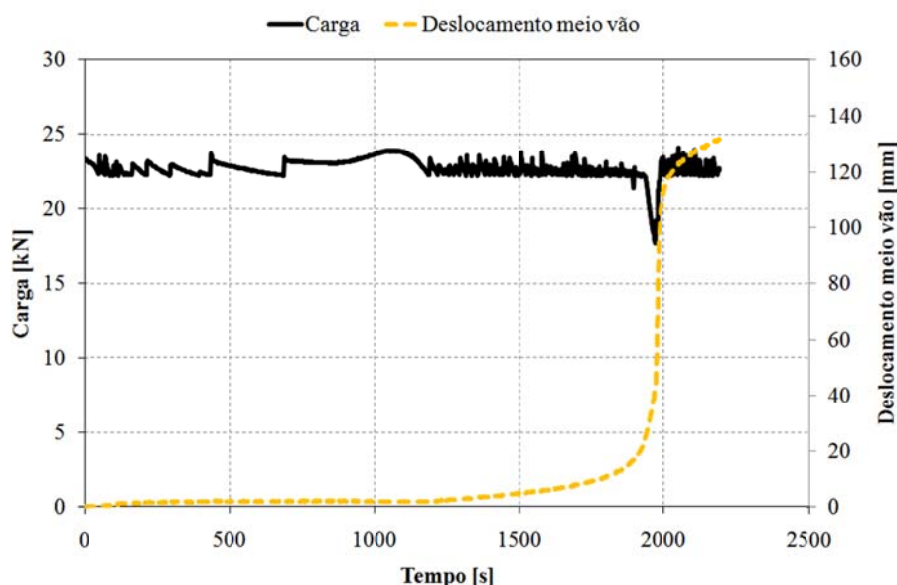
Este elemento foi ensaiado a 08-10-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 22250 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 25 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 25 - Valores de protecção para ensaio S12.**

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1932	112	2210	1730

No Gráfico 245 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma pequena perturbação.



**Gráfico 245 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio S12.**

No Gráfico 246 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo. De registar uma perturbação no registo das temperaturas, no momento em que se observou um descolamento considerável da intumescência no aço.

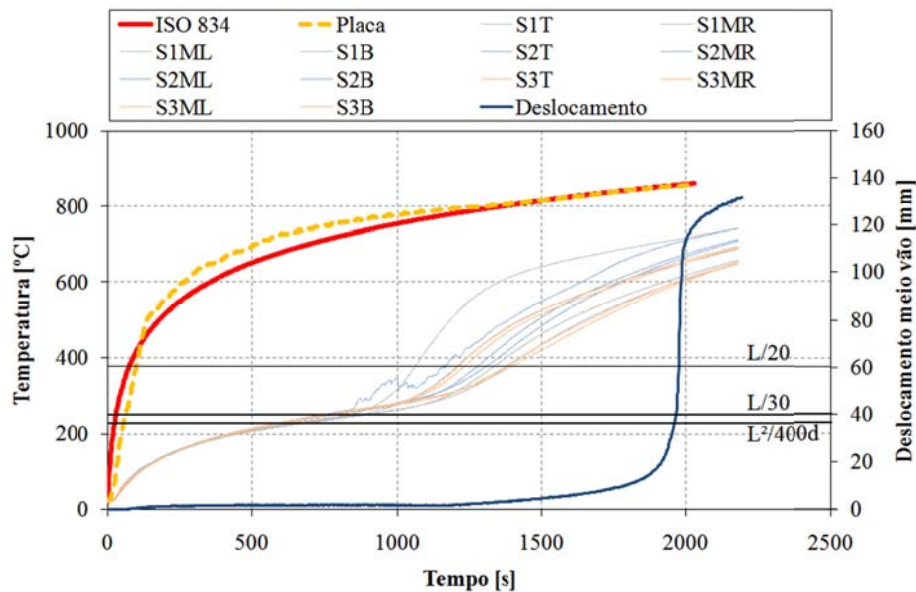


Gráfico 246 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio S12.

No Gráfico 247 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

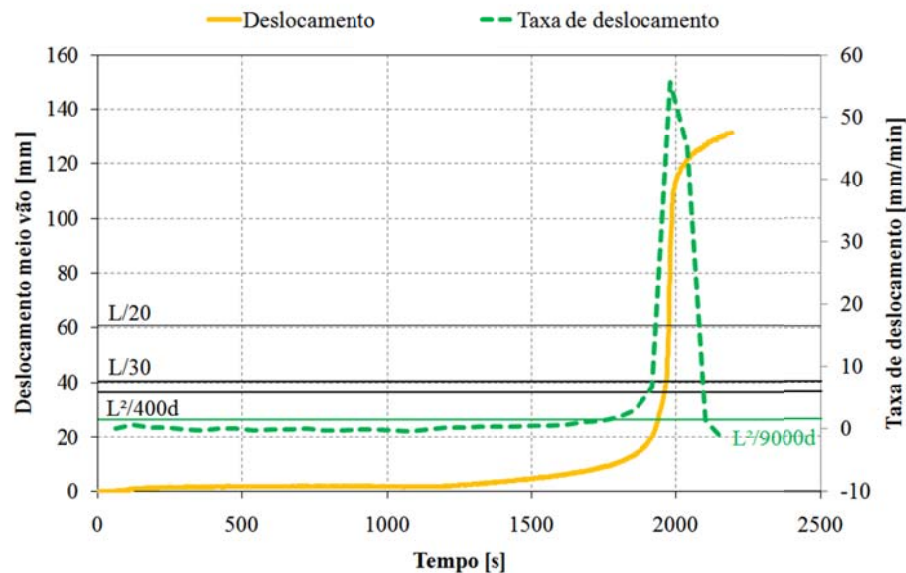


Gráfico 247 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S12.

No Gráfico 248 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 246, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência. No instante de colapso do elemento regista-se uma perpendicular ao eixo das temperaturas, referente ao valor de deslocamento no ponto de aplicação de carga, registrando assim o valor da temperatura crítica.

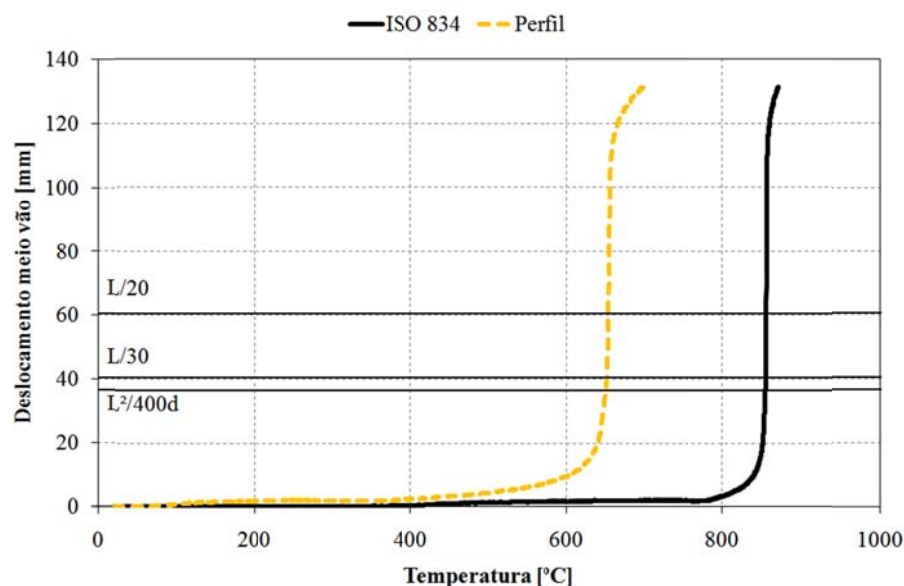


Gráfico 248 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S12.

No Gráfico 249 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior, registrando aí a sua perda de capacidade de resistência ao fogo.



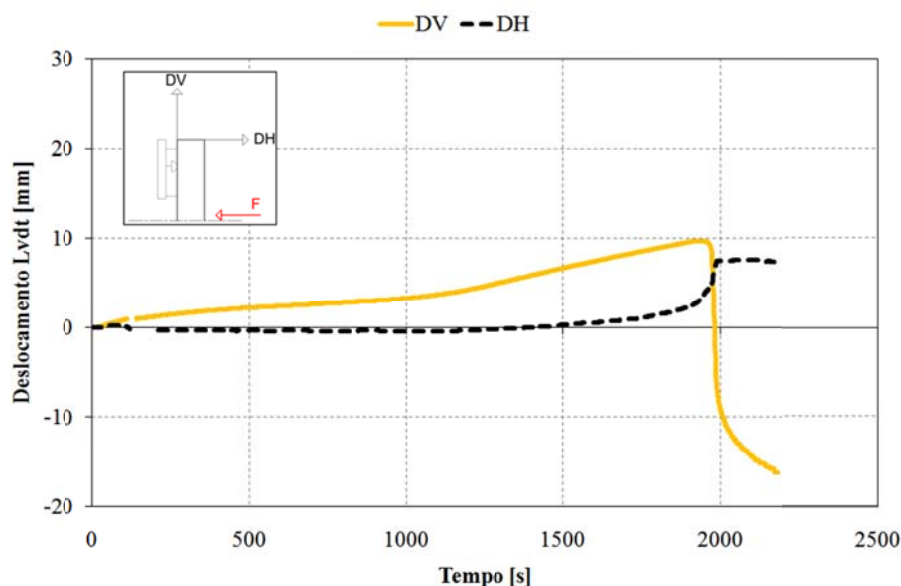


Gráfico 249 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S12.

No Gráfico 250 estão representados os valores médios, medidos nas três secções.

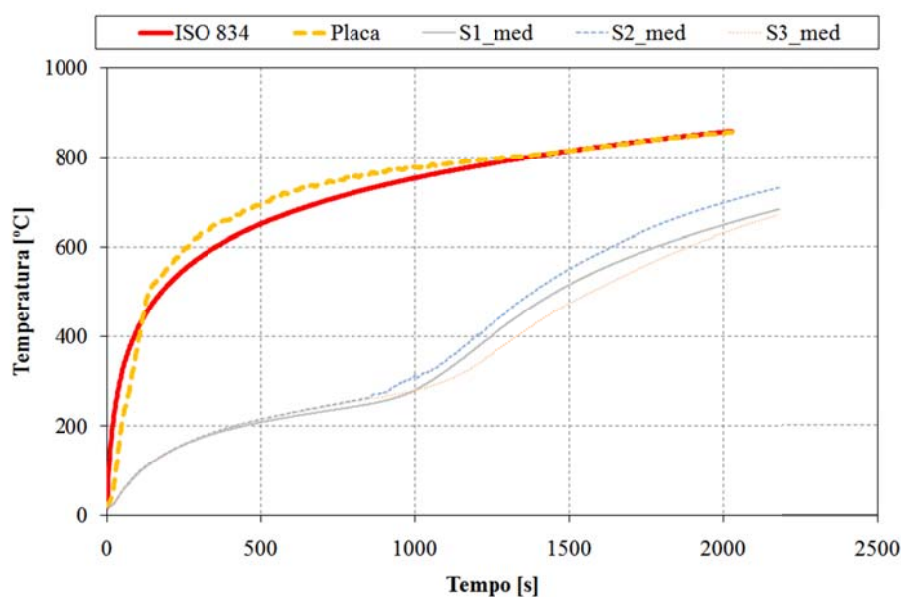
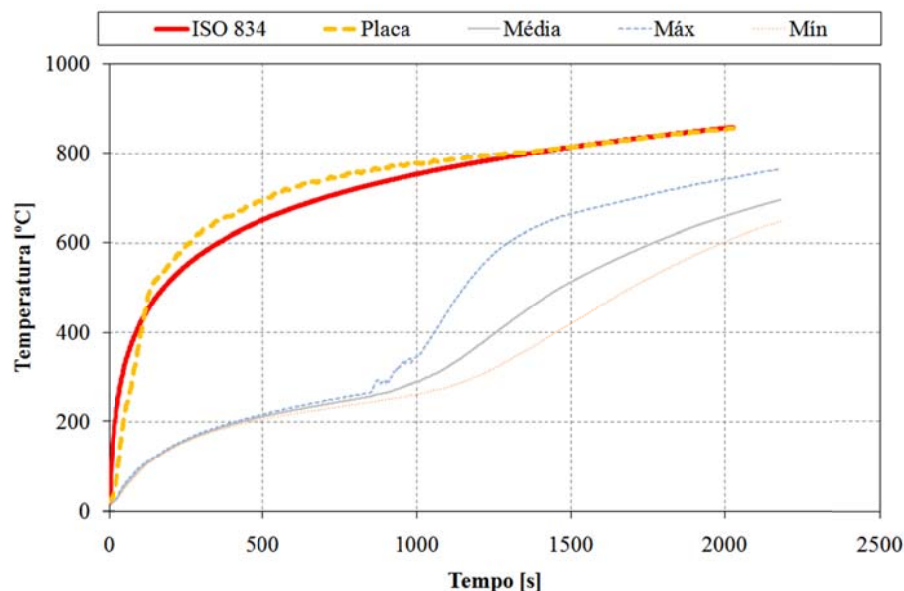


Gráfico 250 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S12.

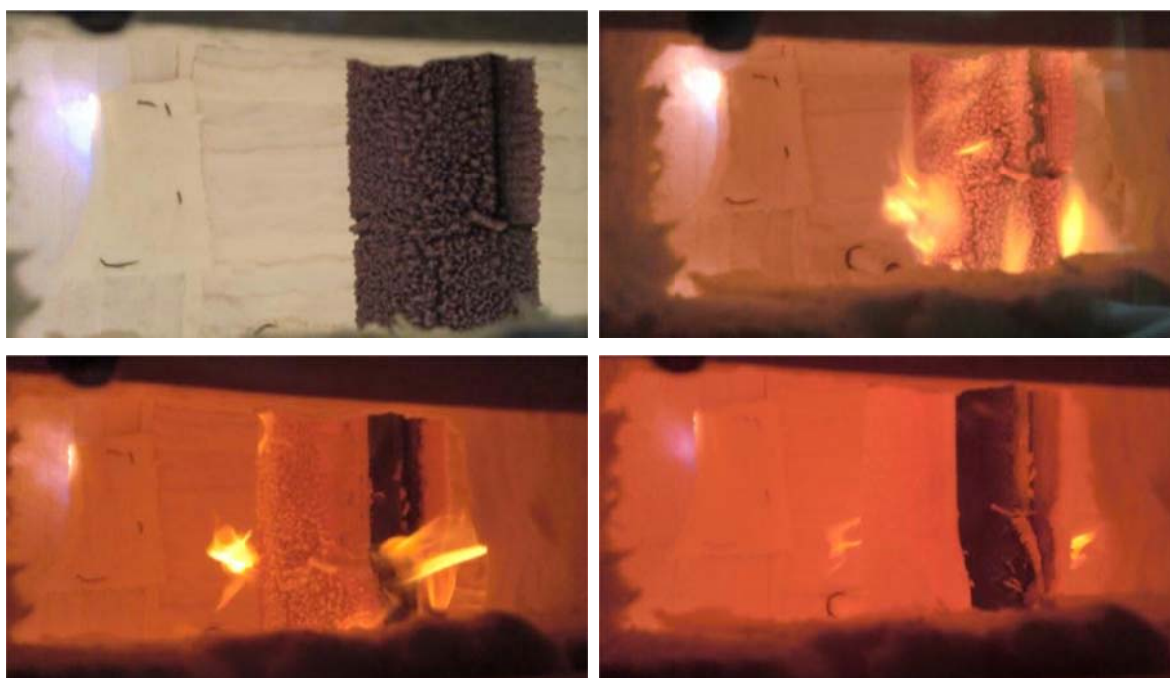
No **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.





**Gráfico 251 - Registro das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S12.**

O registro das temperaturas é fortemente influenciado pelo fenómeno de descolamento/destacamento e retracção da tinta sobre o aço. Como se pode observar na Figura 71, o ensaio inicia-se de forma idêntica aos antecessores, registrando depois uma abertura visível na camada intumescente, passando depois a retrair, expondo partes do perfil ao fogo. Com este fenómeno o elemento é fortemente solicitado de elevadas temperaturas, levando-o rapidamente ao seu estado limite ultimo de resistência em condições de fogo.



**Figura 71 – Evolução do ensaio S12.**

Na Figura 71 estão representados quatro instantes do ensaio, representando as fases da evolução na intumescência da tinta. Pode-se observar o fenómeno de retracção da camada intumescente de protecção.



Figura 72 – Deformada sofrida no ensaio S12.

Na Figura 72 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio. Observa-se aqui o estado da camada intumescente no final do ensaio, a retracção da tinta expôs o elemento às altas temperaturas com a exposição de partes do aço ao fogo, levando depois à queda da intumescência e por último à ruptura do mesmo.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 32 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 651,64 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (S4), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 11 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 641,95 [°C].

#### 6.3.16. Ensaio S13 ( $\mu=50\%$ , protecção a 2 [mm])

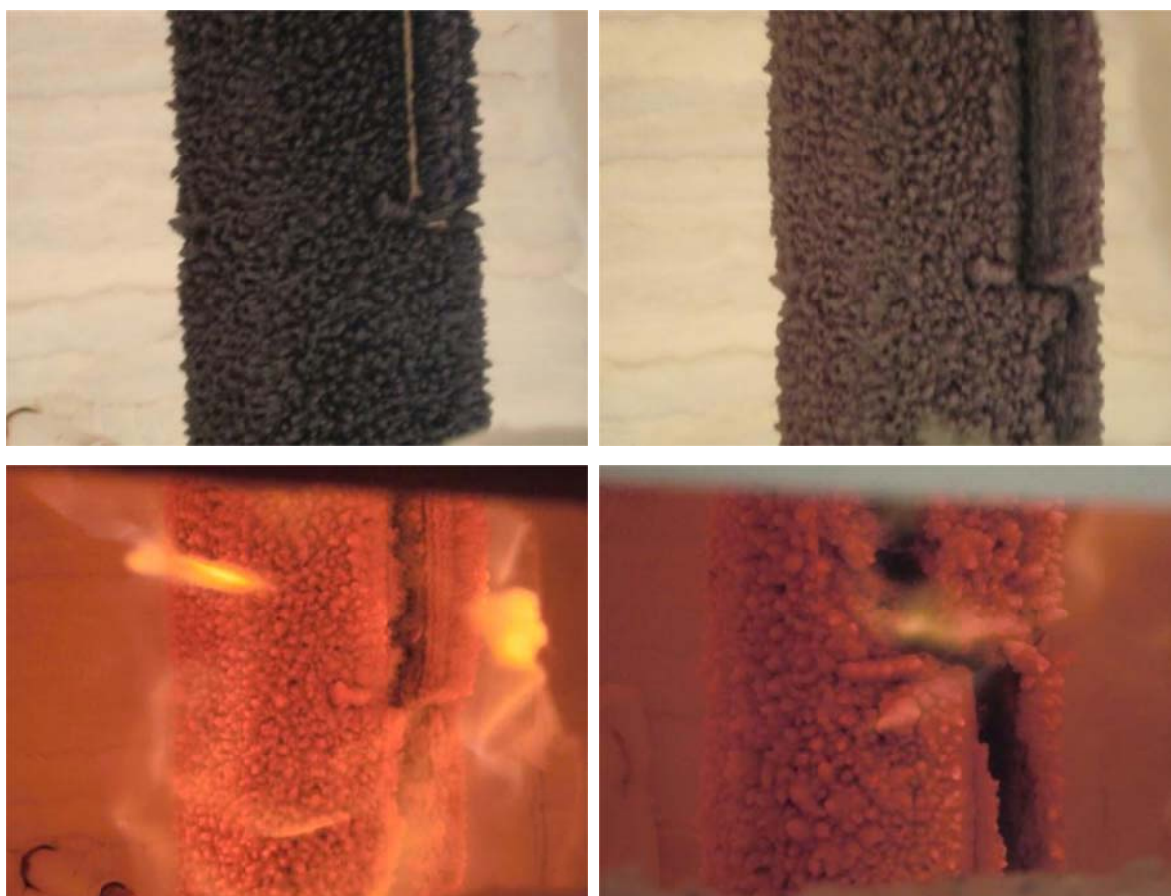
Este elemento foi ensaiado a 11-10-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 22250 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 26 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

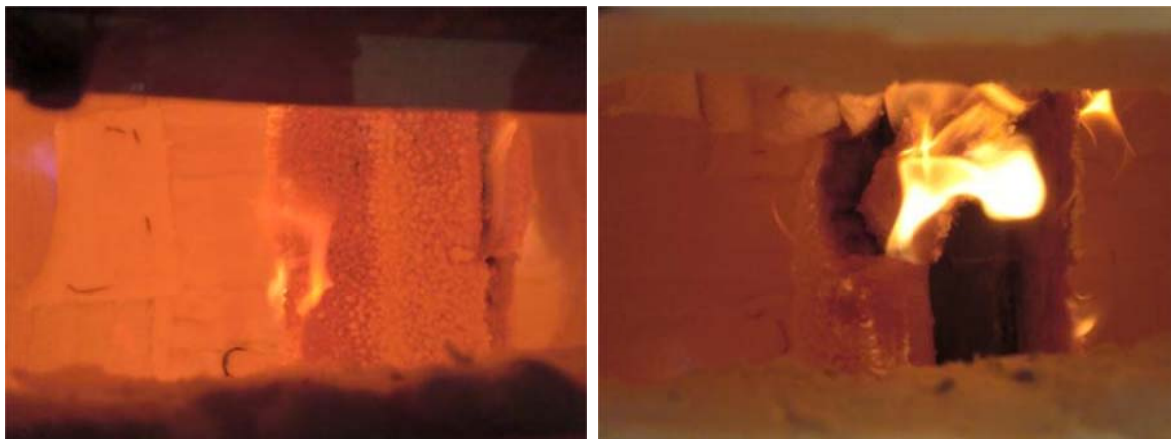
**Tabela 26 - Valores de protecção para ensaio S13.**

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1933	144	2310	1700

Neste ensaio, houve uma preocupação em observar se o fenómeno de retracção da camada intumescente se repetiria, levando assim a um rápido colapso do elemento. Na Figura 73 e Figura 74 pode-se observar a evolução do ensaio.







**Figura 73 – Evolução do ensaio S13.**

Na Figura 73 estão representados seis instantes do ensaio, representando as fases da evolução na intumescência da tinta. Pode-se observar o fenómeno de retracção da camada intumescente de protecção.

Ao observar o fenómeno de retracção pela segunda vez, decidiu-se parar o ensaio, restando para comparação os resultados iniciais.



**Figura 74 – Retracção da intumescência sofrida no ensaio S13.**

Na Figura 74 observa-se a camada de intumescência depois do ensaio. Verifica-se um grande volume de intumescência retraída.

No Gráfico 252 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio.

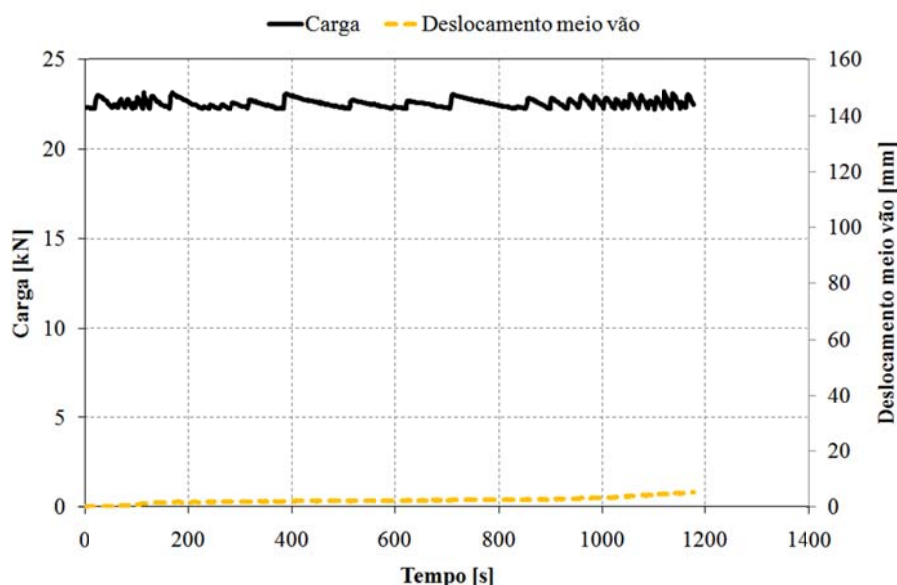


Gráfico 252 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio S13.

No Gráfico 253 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo. Pode-se observar o ponto em que existem zonas expostas às elevadas temperaturas por falha do sistema de protecção.

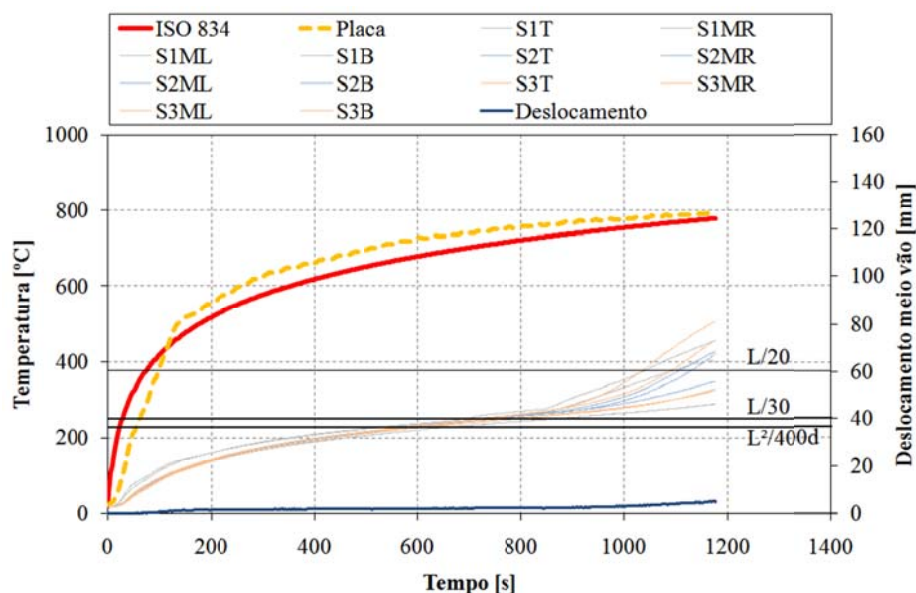


Gráfico 253 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio S13.

No Gráfico 254 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto.

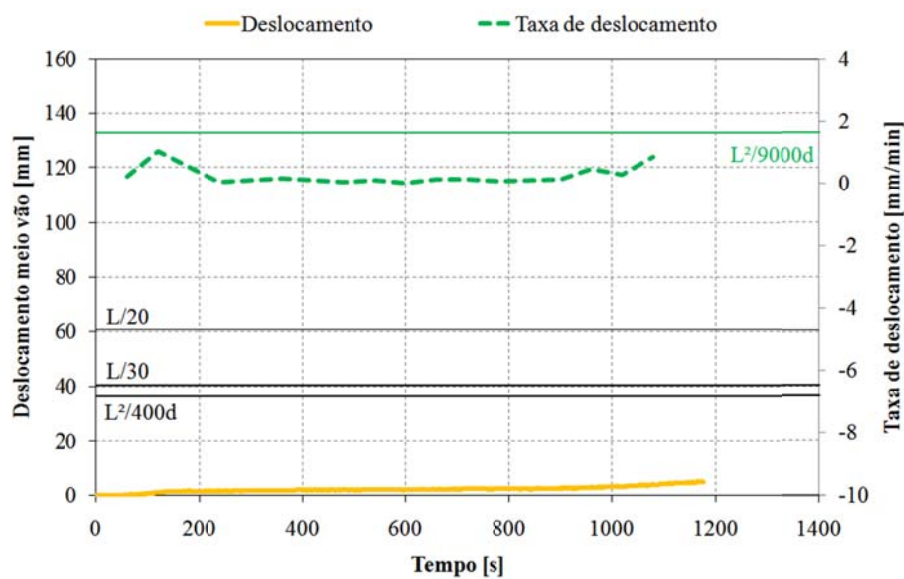


Gráfico 254 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para S13.

No Gráfico 255 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 253, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência.

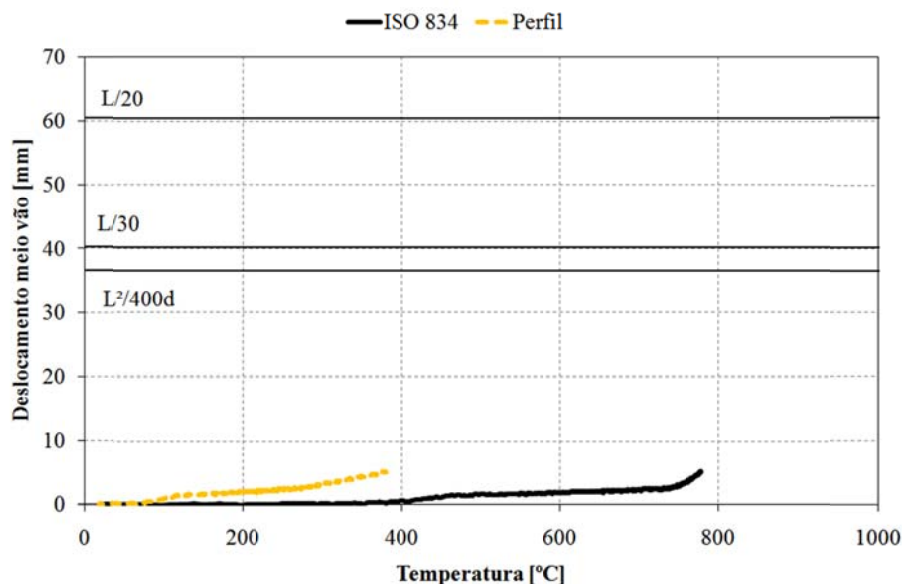


Gráfico 255 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio S13.

No Gráfico 256 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV.

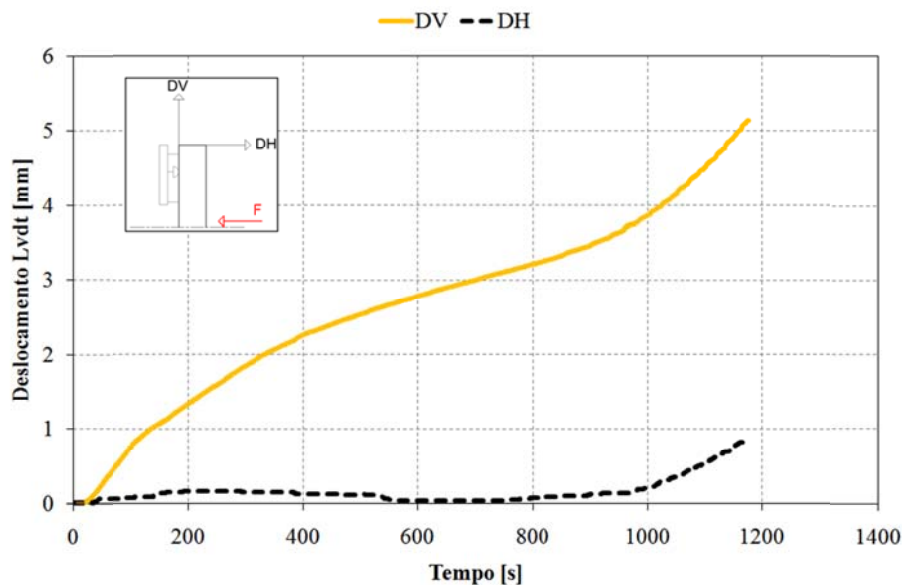


Gráfico 256 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio S13.

No Gráfico 257 estão representados os valores médios, medidos nas três secções.



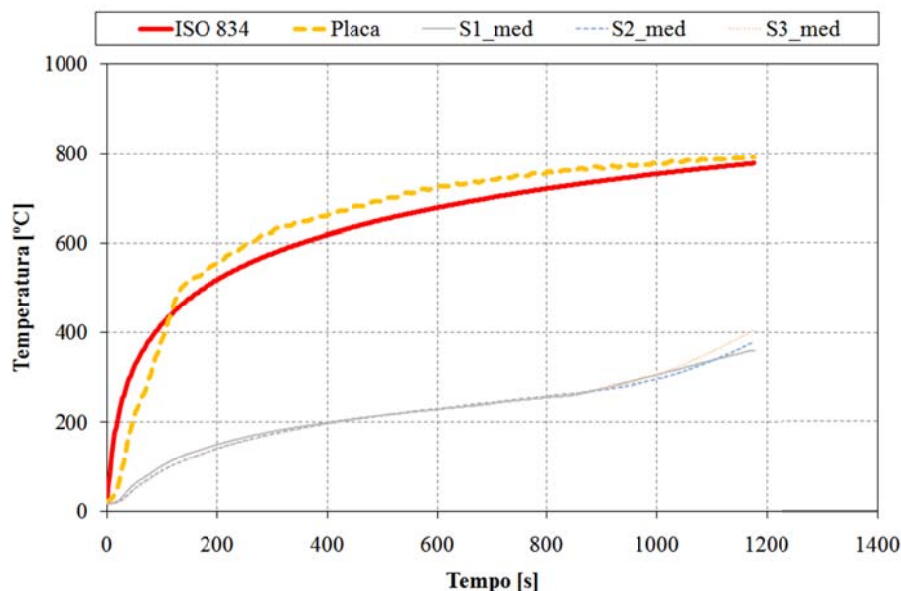


Gráfico 257 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para S13.

No Gráfico 258 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

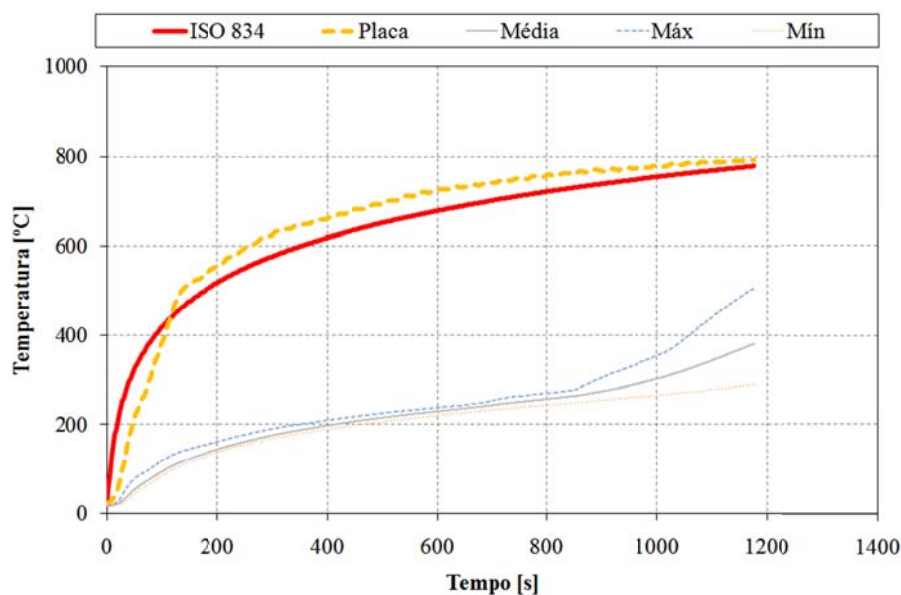


Gráfico 258 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio S13.

#### 6.3.17. Ensaio C6 ( $\mu=30\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 11-10-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização

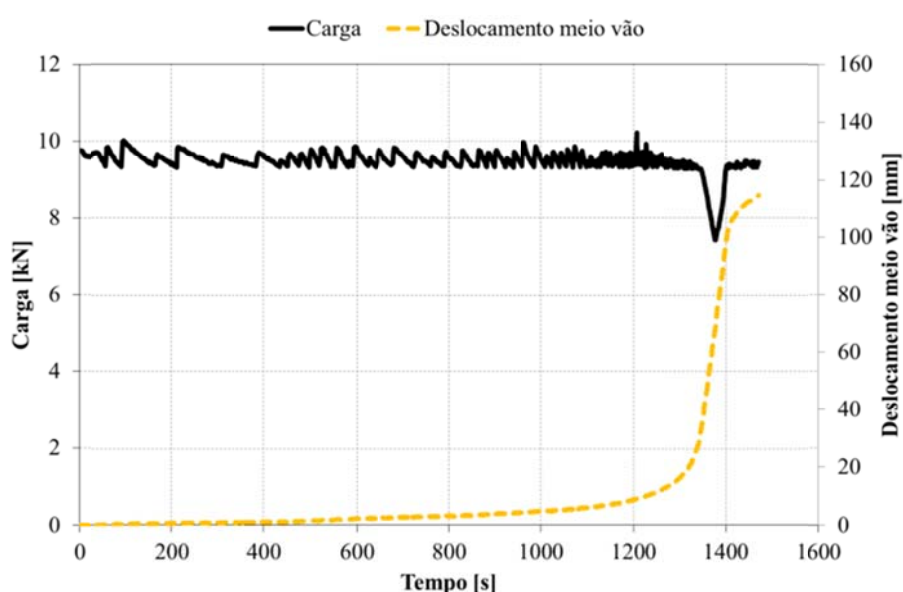
de  $\mu=30\%$  determina-se uma temperatura crítica de  $663,78^{\circ}\text{C}$ . A sua resistência última é o equivalente a uma força de  $9310\text{ [N]}$ . A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 27 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 27 – Valores de protecção para ensaio C6.**

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx.	Mín.
997	114	1270	800

No Gráfico 259 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma pequena perturbação.



**Gráfico 259 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio C6.**

No Gráfico 260 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo. De notar uma alteração na linearidade da evolução das temperaturas, causada pelo fenómeno de retracção da intumescência, como se pode observar na Figura 75 e Figura 76.

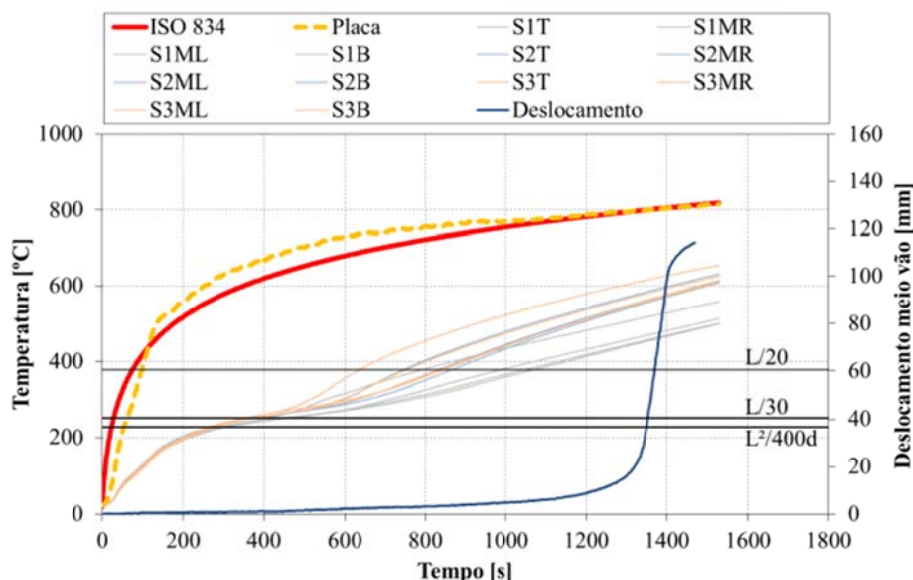


Gráfico 260 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio C6.

No Gráfico 261 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

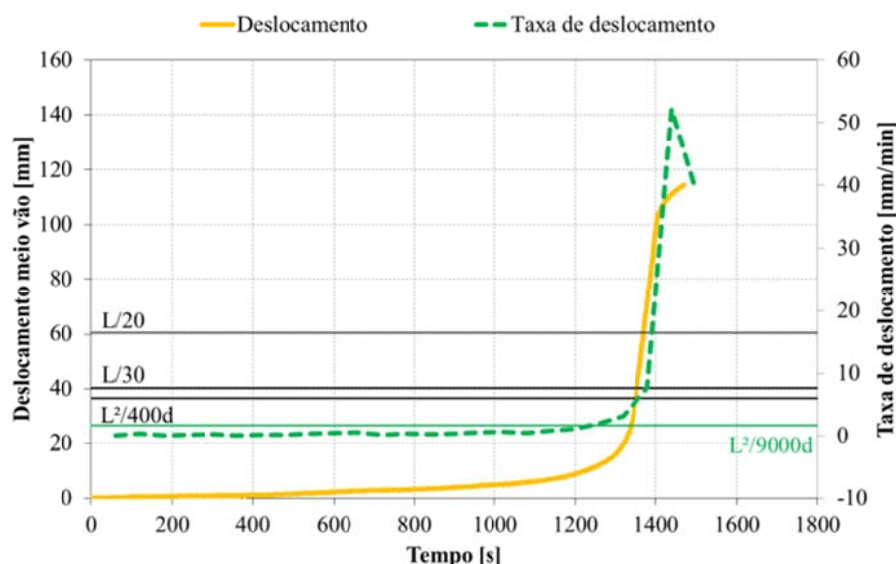


Gráfico 261 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C6.

No Gráfico 262 está representada a evolução do deslocamento no ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da

curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 260, a curva de fogo ISO834, coincide com a temperatura média dentro do forno de resistência. A temperatura crítica do elemento é definida com uma perpendicular do valor de deslocamento, ao eixo das temperaturas.

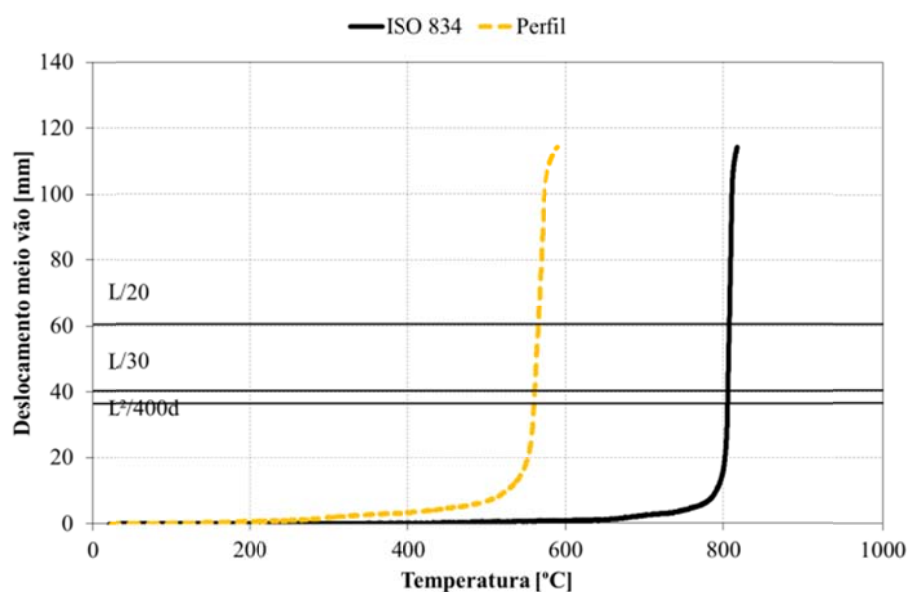


Gráfico 262 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C6.

No Gráfico 263 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio, vincando o momento de colapso do elemento.

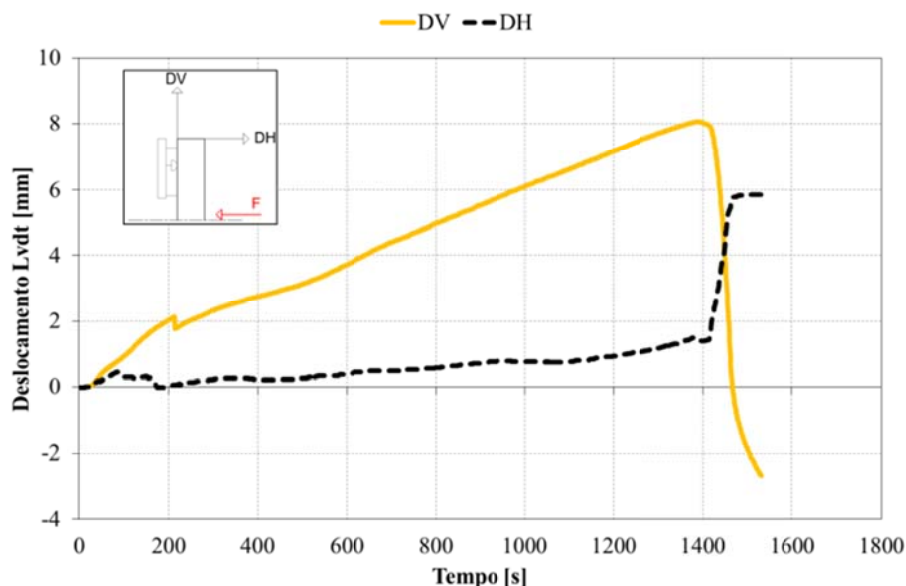


Gráfico 263 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C6.

No Gráfico 264 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

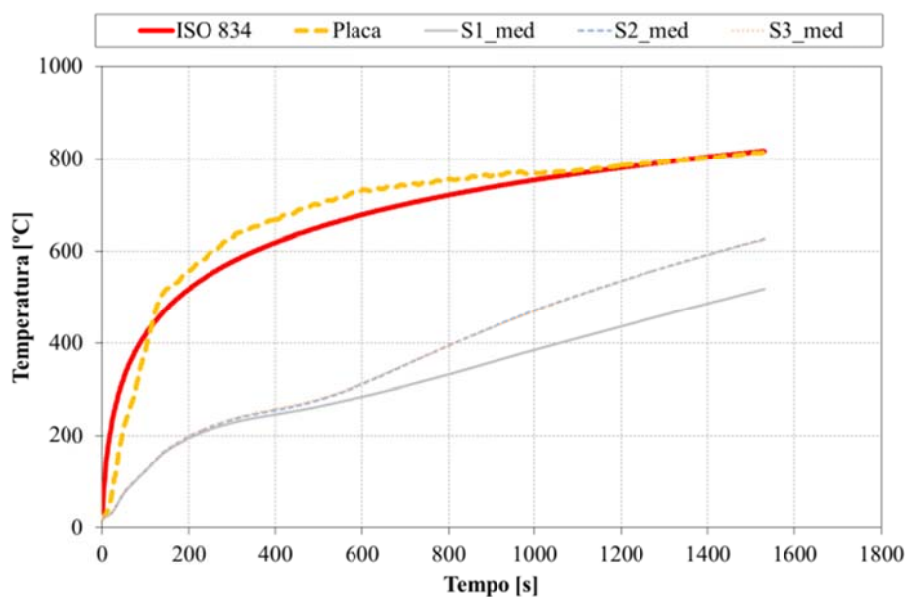


Gráfico 264 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C6.

No Gráfico 265 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

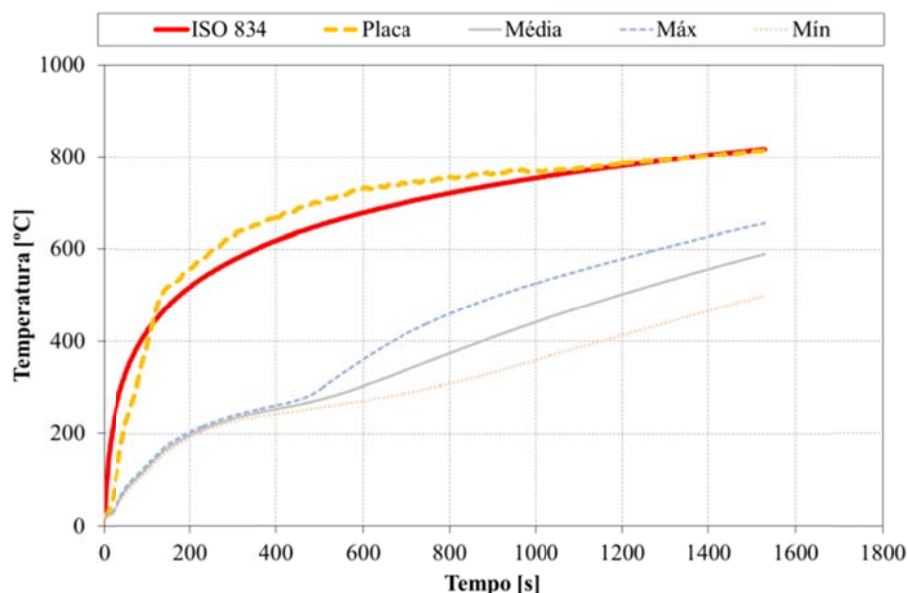


Gráfico 265 - Registro das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C6.

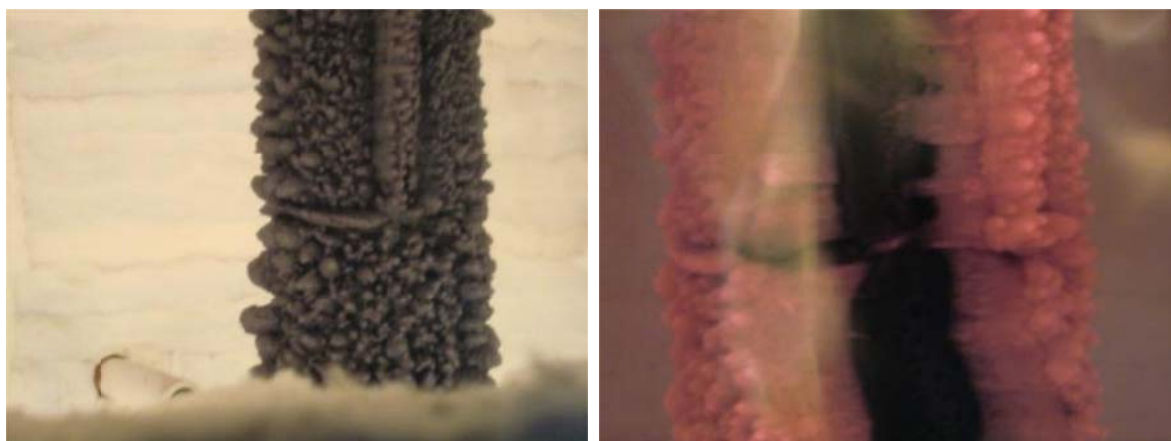


Figura 75 – Evolução do ensaio C6.

Na Figura 75 estão representados dois instantes do ensaio, representando as fases da evolução na intumescência da tinta. Pode-se observar à esquerda uma evolução sem anormalidades, à direita observa-se o momento em que a retracção da intumescência expõe zonas do aço às altas temperaturas.





Figura 76 – Deformada sofrida e a retracção da camada intumescente no ensaio C6.

Na Figura 62 observa-se a par da deformação imposta no elemento, o fenómeno de retracção da intumescência ao longo do elemento.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 23 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 560,26 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (C3), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 9 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 602,27 [°C].

#### 6.3.18. Ensaio C7 ( $\mu=30\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 24-11-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=30\%$  determina-se uma temperatura crítica de 663,78°C. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 9310 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.



Na Tabela 28 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

Tabela 28 – Valores de protecção para ensaio C7.

Espessura de tinta medida [μm]			
DFT	Desv. Padrão	Máx.	Mín.
1004	111	1187	818

No Gráfico 266 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio.

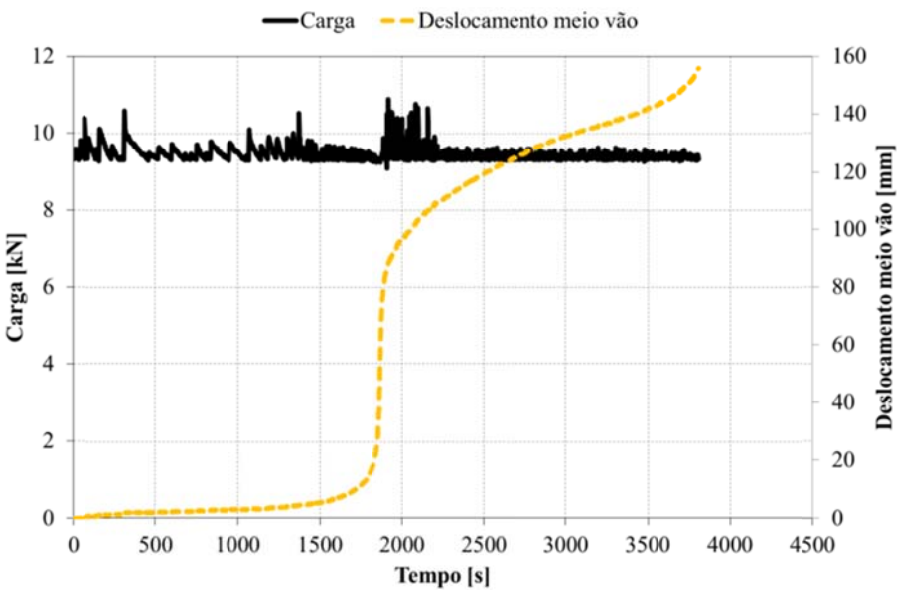


Gráfico 266 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio C7.

No Gráfico 267 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.

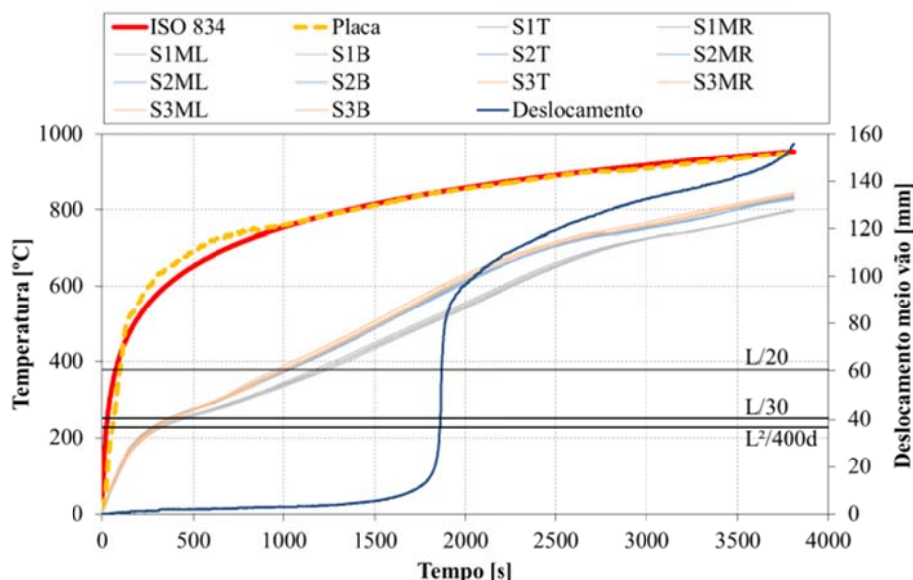


Gráfico 267 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio C7.

No Gráfico 268 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

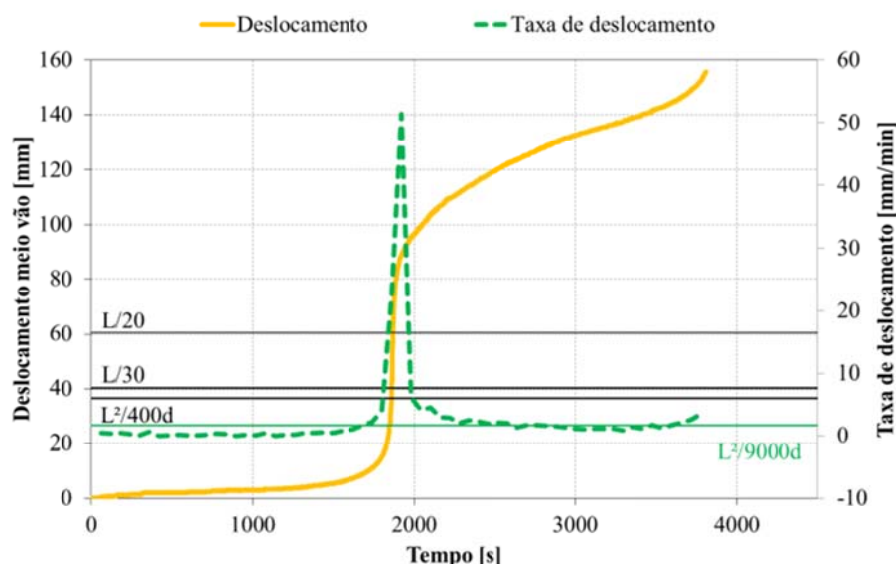


Gráfico 268 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C7.

No Gráfico 269 está representada a evolução do deslocamento no ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da

curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 267, a curva de fogo ISO834, coincide com a temperatura média dentro do forno de resistência.

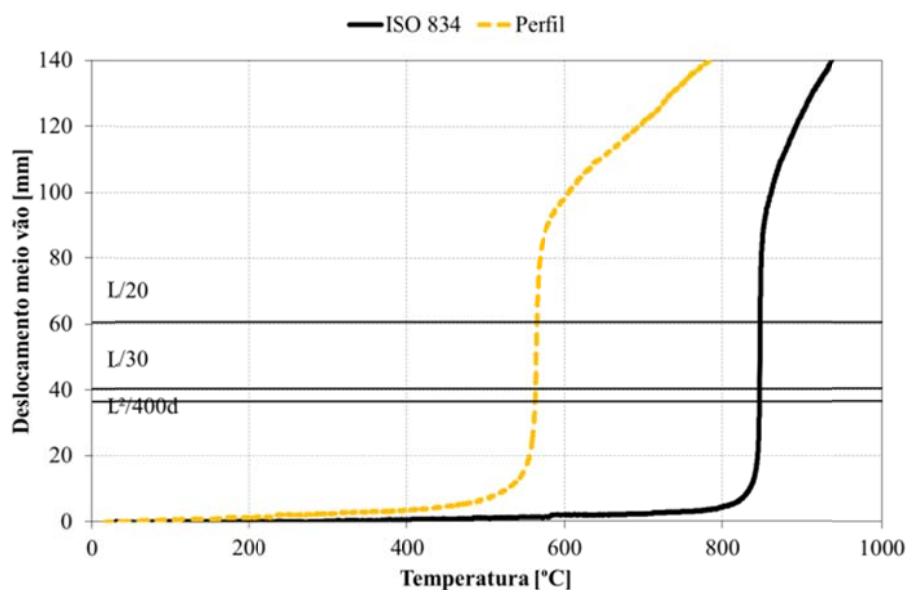


Gráfico 269 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C7.

No Gráfico 270 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio, vincando o momento de colapso do elemento.

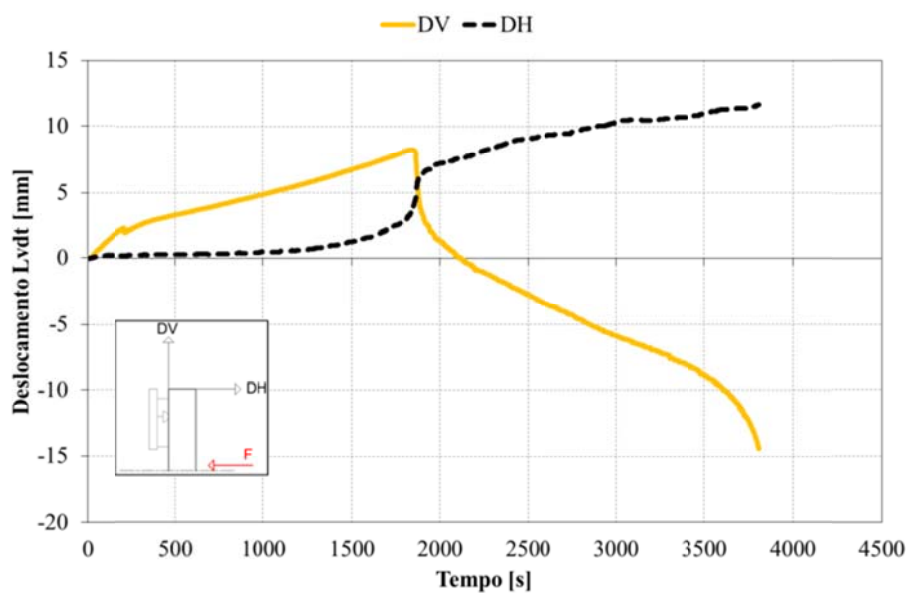


Gráfico 270 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C7.

No Gráfico 271 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

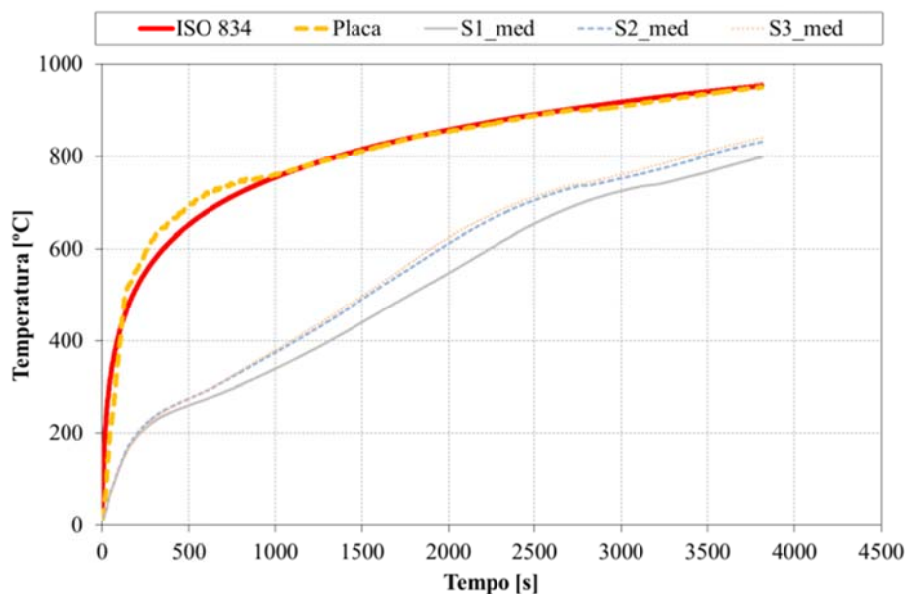


Gráfico 271 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C7.

No Gráfico 272 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

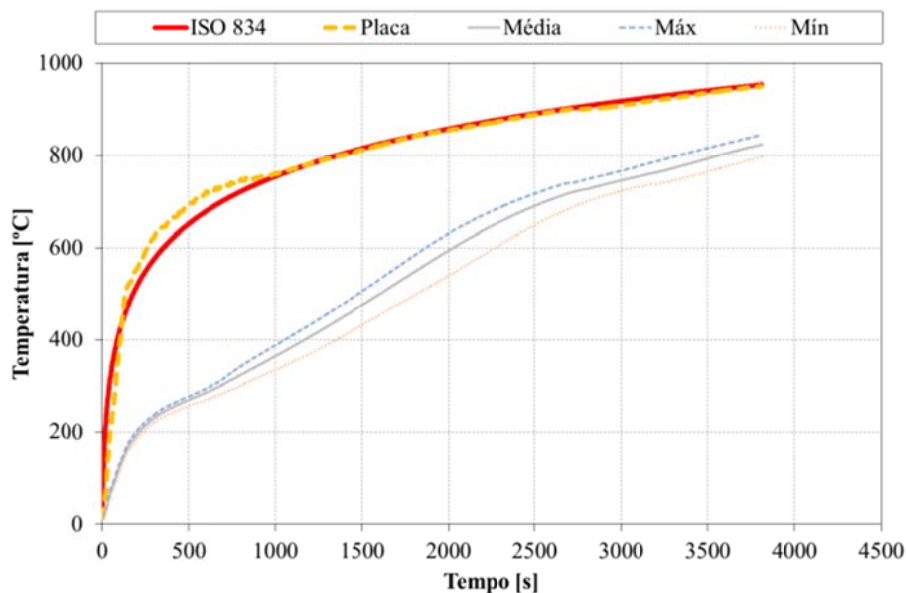


Gráfico 272 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C7.

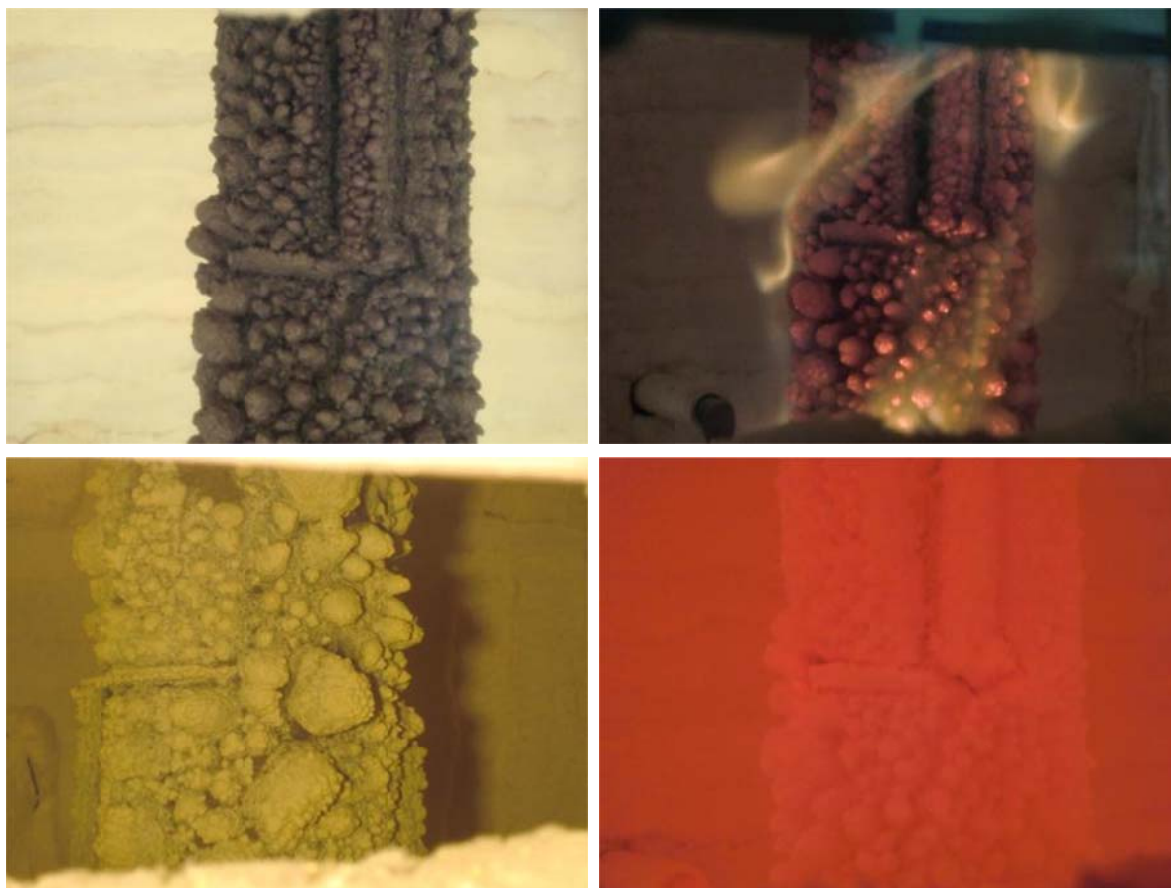


Figura 77 – Evolução do ensaio C7.

Na Figura 77 estão representados quatro instantes do ensaio, representando as fases da evolução na intumescência da tinta. Contrariamente aos antecessores e precedentes, neste elemento, a intumescência teve um evolução pouco regular (bolbos), mas sem a existência do fenómeno de retracção.



Figura 78 – Deformada sofrida no ensaio C7.

Na Figura 78 está representada a deformação imposta no elemento, logo após o final do ensaio, ainda com os queimadores ligados, e posteriormente com o ambiente do forno já controlado.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 31 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 562,23 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (C3), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 9 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 602,27 [°C].

#### 6.3.19. Ensaio C8 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 12-10-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 15200 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

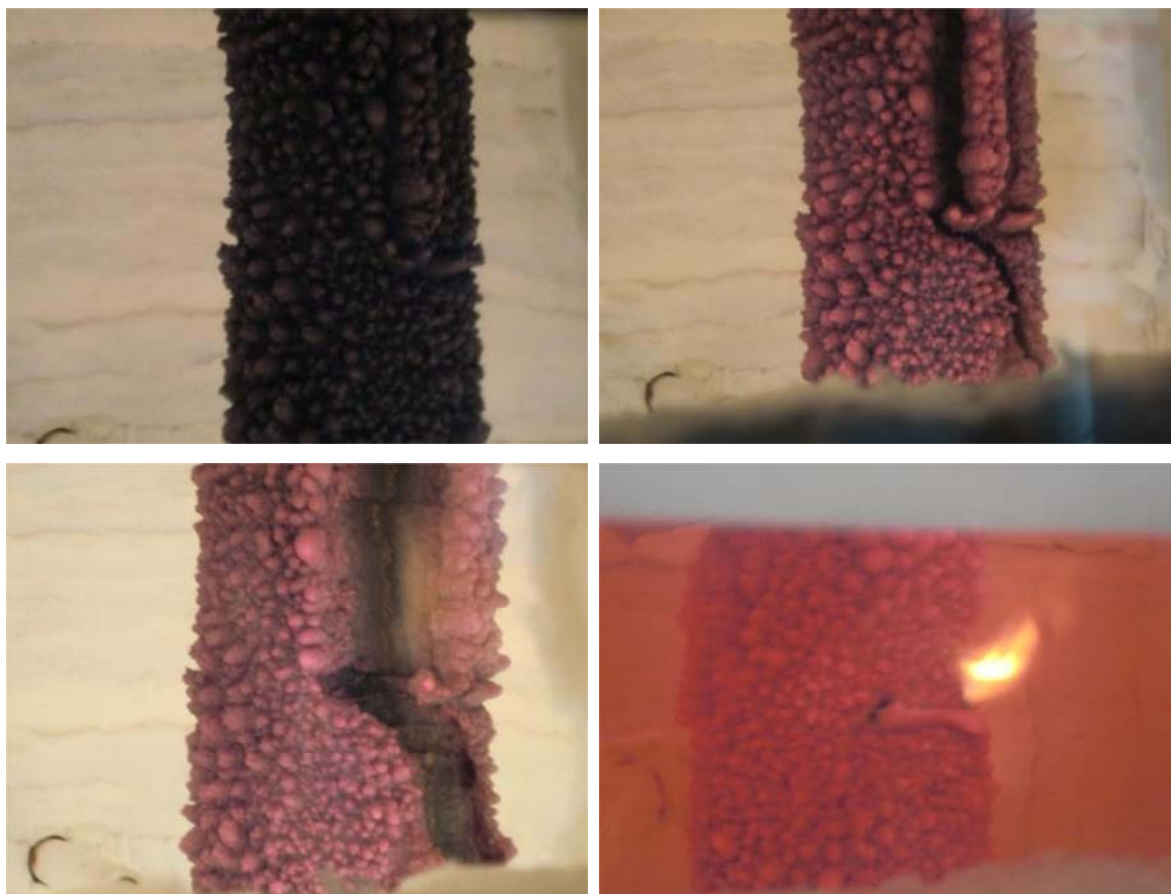


Na Tabela 29 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 29 - Valores de protecção para ensaio C8.**

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1026	143	1330	770

Neste ensaio, ouve uma preocupação em observar se o fenómeno de retracção da camada intumescente se repetiria, levando assim a um rápido colapso do elemento. Na Figura 79 e Figura 80 pode-se observar a evolução do ensaio.



**Figura 79 – Evolução do ensaio C8.**

Na Figura 79 estão representados quatro instantes do ensaio, representando as fases da evolução na intumescência da tinta. Pode-se observar o fenómeno de retracção da camada intumescente de protecção.



Ao observar o fenómeno de retracção pela segunda vez, decidiu-se dar como findo o ensaio, antes do colapso, restando para comparação os resultados iniciais.



**Figura 80 – Retracção da intumescência sofrida no ensaio C8.**

Na Figura 80 observa-se a camada de intumescência depois do ensaio. Verifica-se um grande volume de intumescência retraída.

No Gráfico 273 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio.

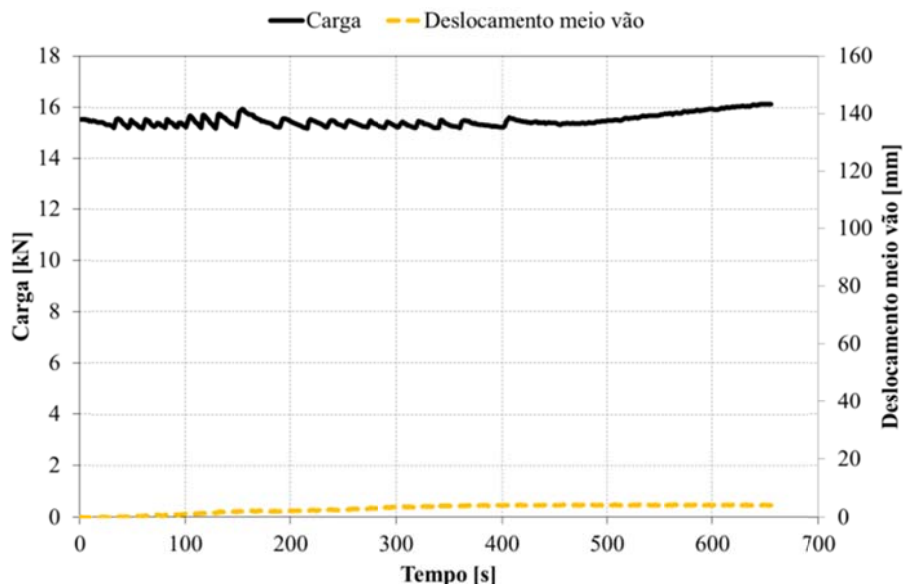


Gráfico 273 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio C8.

No Gráfico 274 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo. Pode-se observar o ponto em que existem zonas expostas às elevadas temperaturas por falha do sistema de protecção.

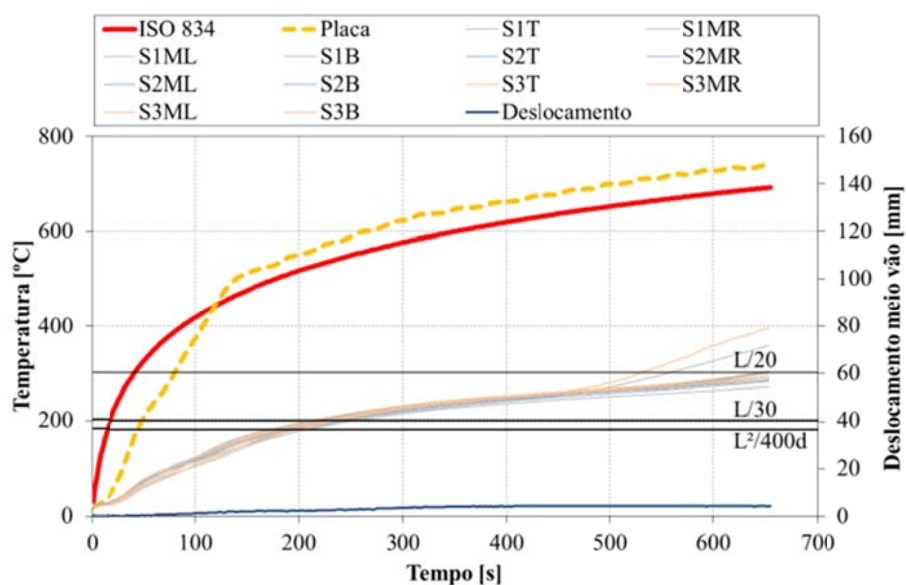


Gráfico 274 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio C8.

No Gráfico 275 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto.

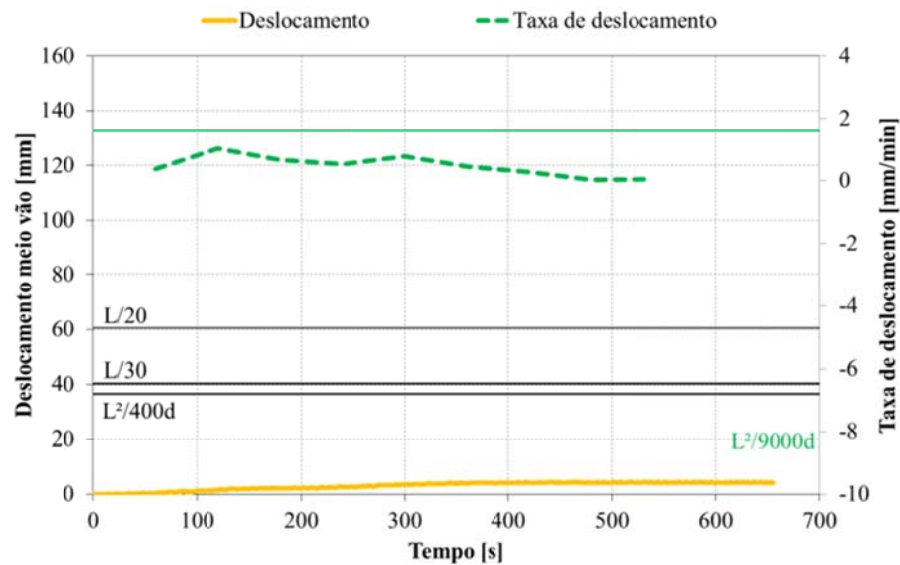


Gráfico 275 - Registro da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C8.

No Gráfico 276 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 274, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência.

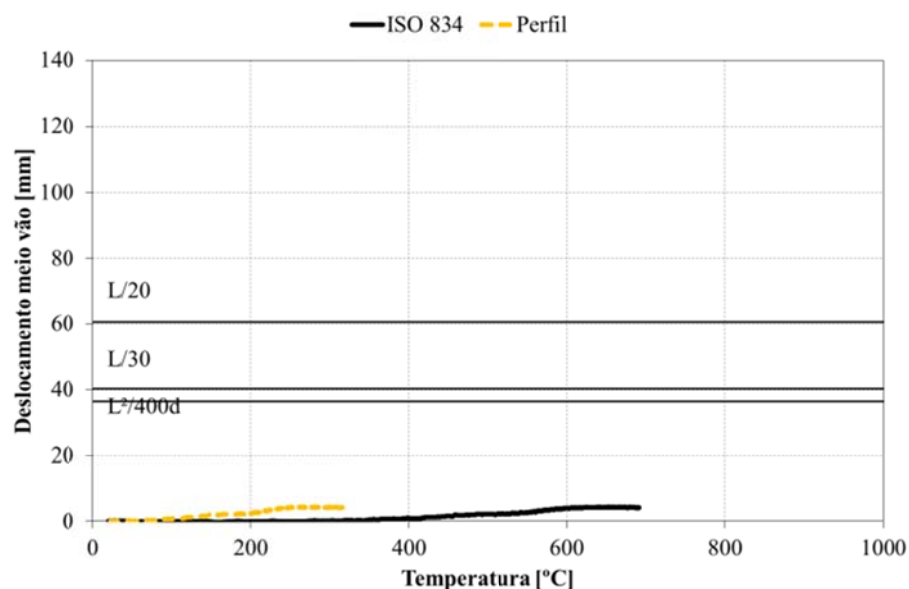


Gráfico 276 - Evolução do deslocamento ao longo do registro de temperaturas para o ensaio C8.

No Gráfico 277 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV.

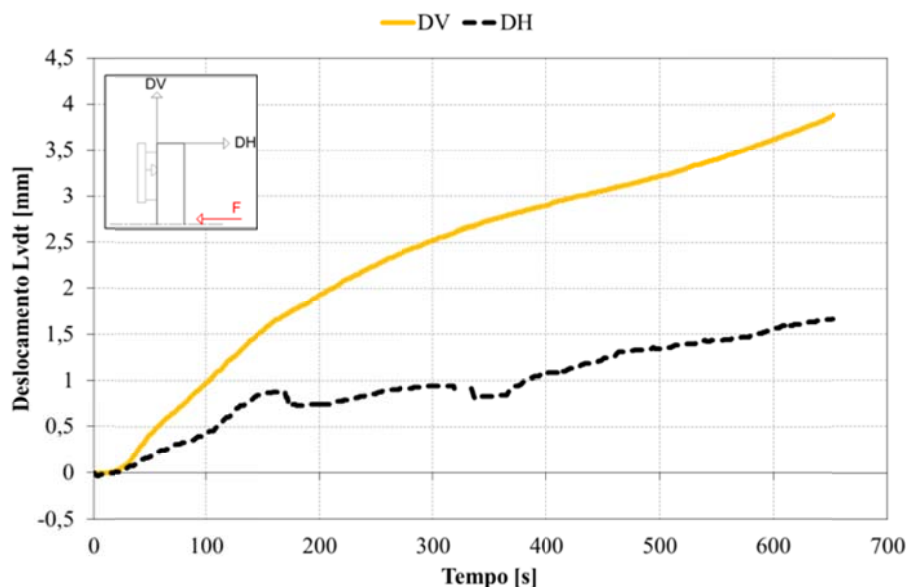


Gráfico 277 - Registro dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C8.

No Gráfico 278 estão representados os valores médios, medidos nas três secções.

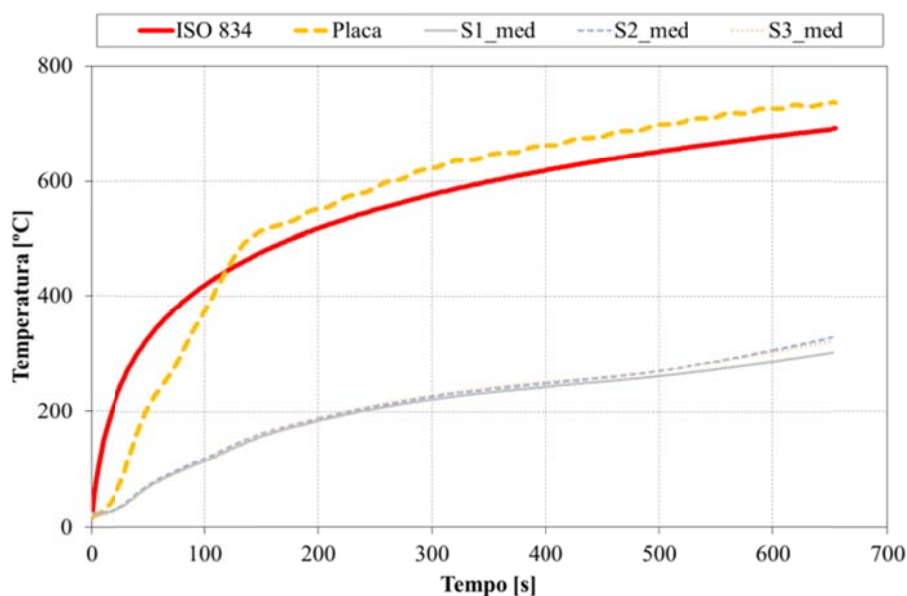


Gráfico 278 - Registro da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C8.

No Gráfico 279 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

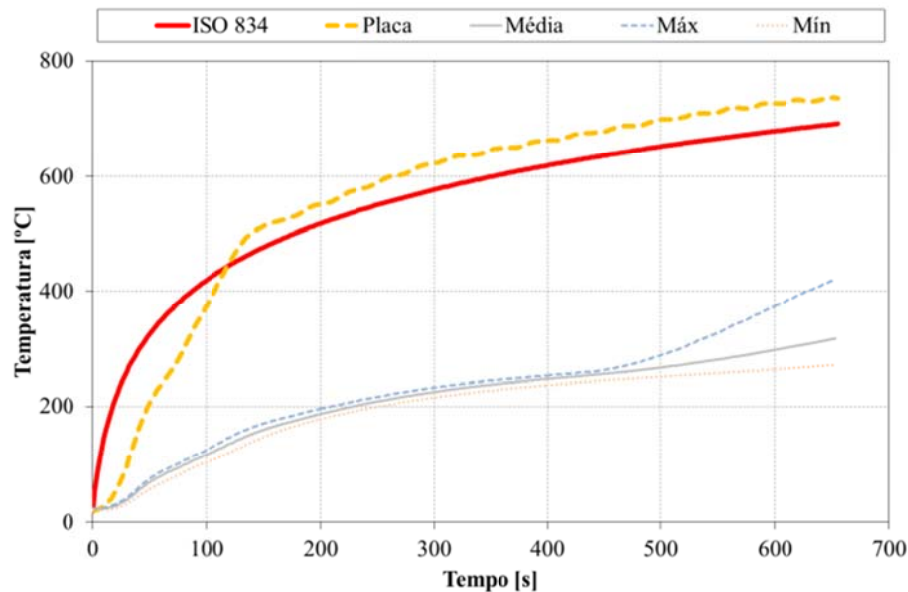


Gráfico 279 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C8.

#### 6.3.20. Ensaio C9 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 23-11-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 15200 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 30 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

Tabela 30 - Valores de protecção para ensaio C9.

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1006	93	1140	810

No Gráfico 280 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio.

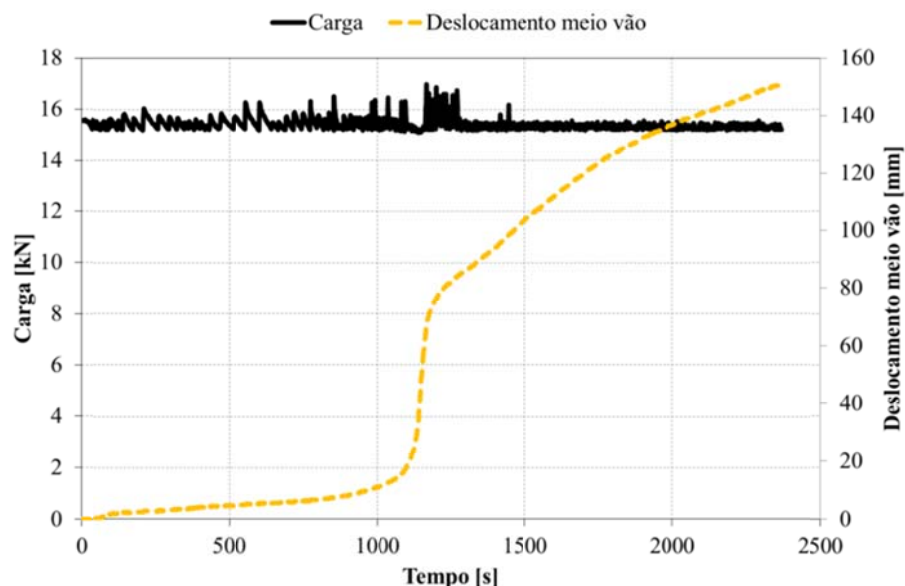


Gráfico 280 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio C9.

No Gráfico 281 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo. De notar uma alteração na linearidade da evolução das temperaturas, causada pelo fenómeno de retracção da intumescência, como se pode observar na Figura 81 e Figura 82.

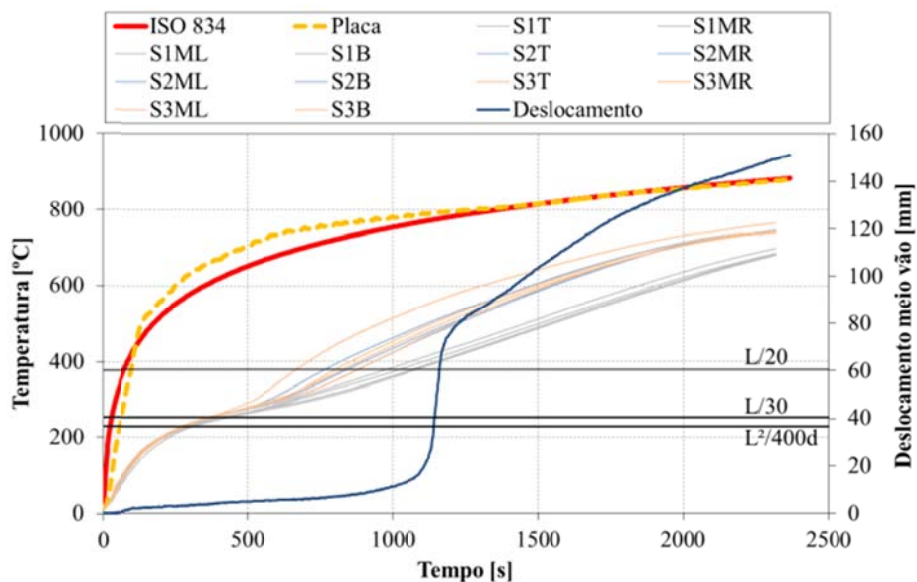


Gráfico 281 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio C9.

No Gráfico 282 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

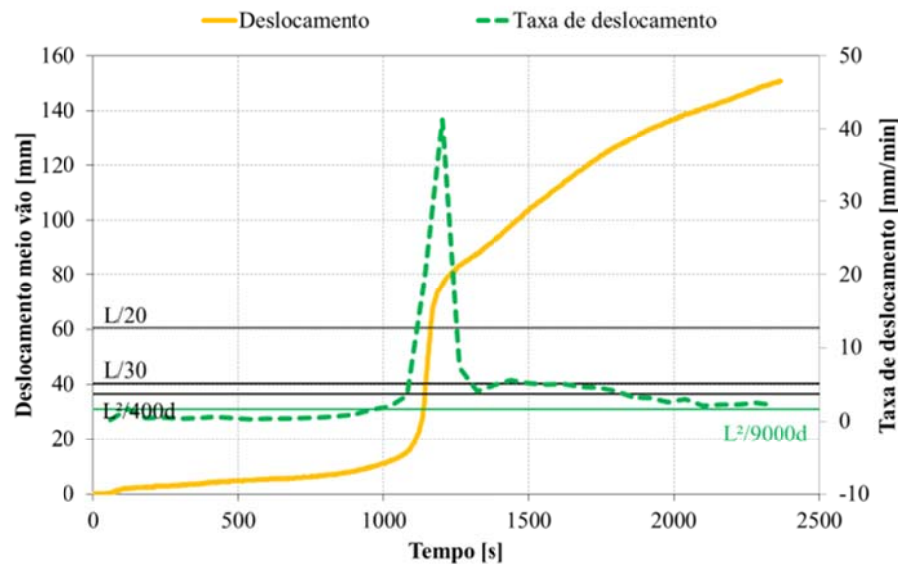


Gráfico 282 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C9.

No Gráfico 283 está representada a evolução do deslocamento no ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 281, a curva de fogo ISO834, coincide com a temperatura média dentro do forno de resistência. A temperatura crítica do elemento é definida com uma perpendicular do valor de deslocamento, ao eixo das temperaturas.



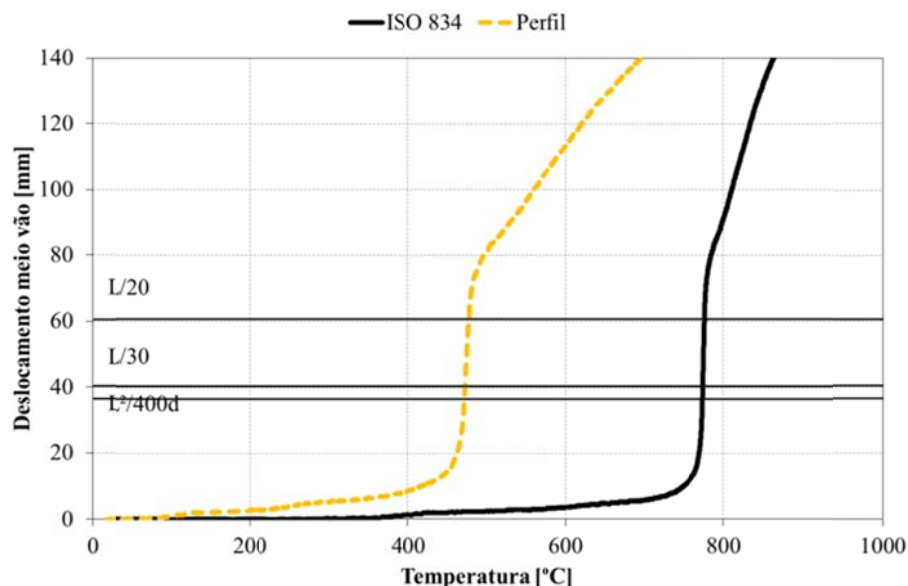


Gráfico 283 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C9.

No Gráfico 284 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio, vincando o momento de colapso do elemento.

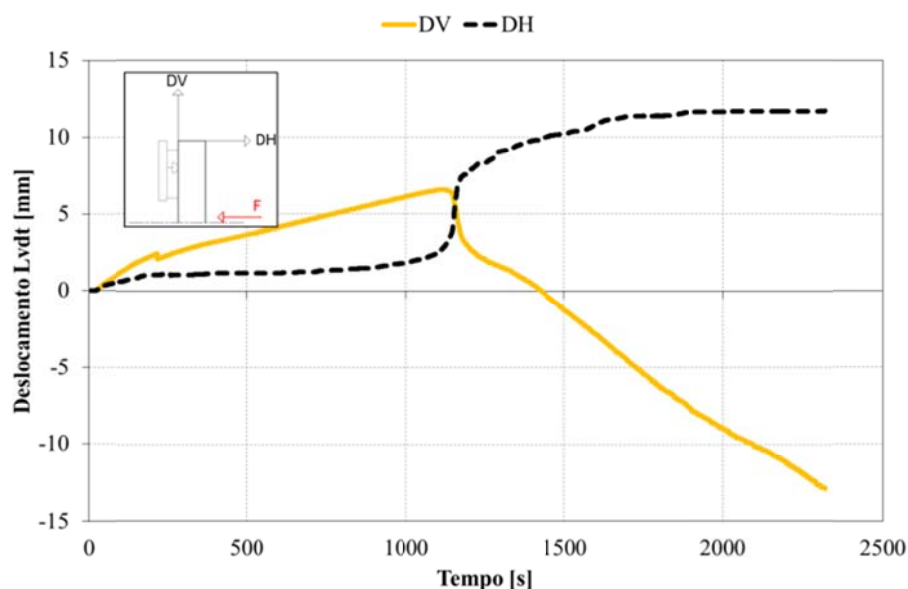


Gráfico 284 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C9.

No Gráfico 285 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto

de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

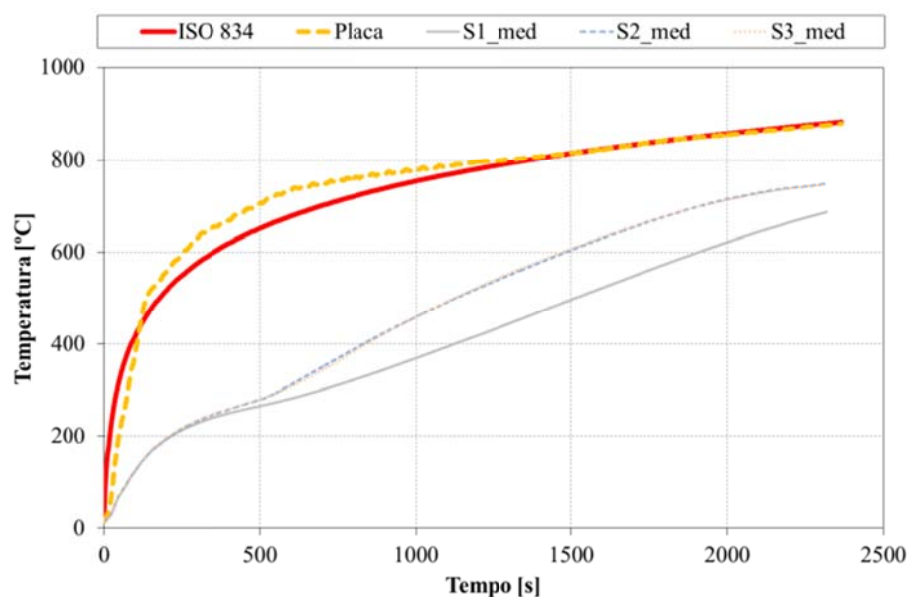


Gráfico 285 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C9.

No Gráfico 286 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

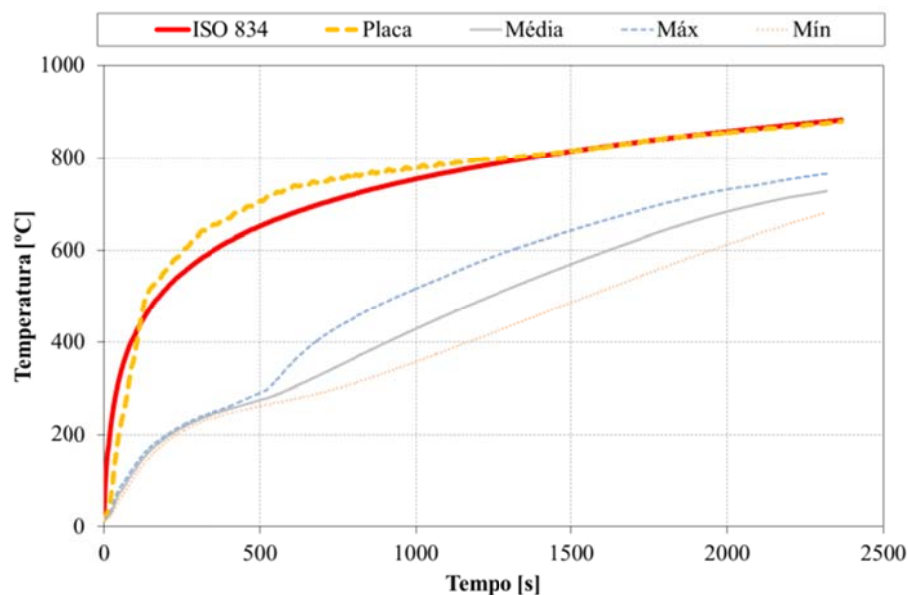


Gráfico 286 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C9.

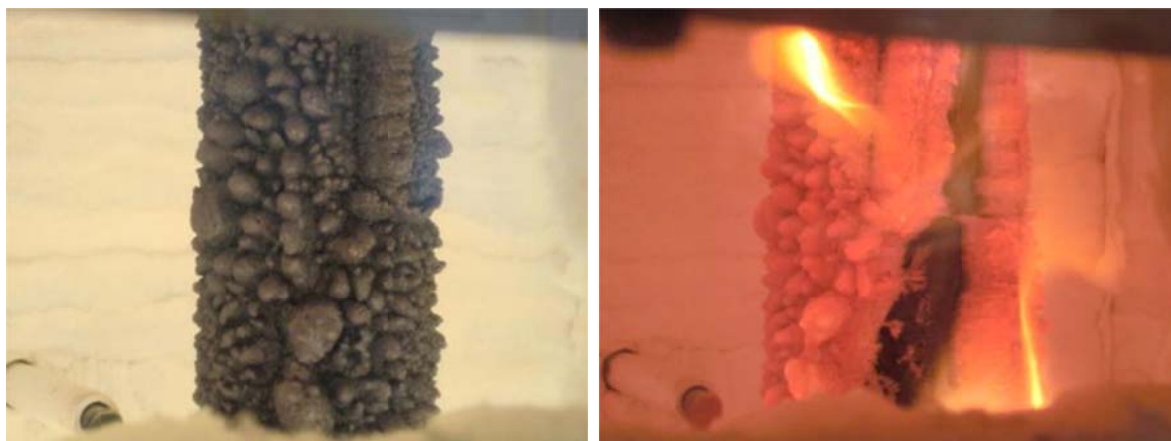


Figura 81 – Evolução do ensaio C9.

Na Figura 81 estão representados dois instantes do ensaio, representando as fases da evolução na intumescência da tinta. Pode-se observar à esquerda uma evolução sem anormalidades, à direita observa-se o momento em que a retracção da intumescência expõe zonas do aço às altas temperaturas.



Figura 82 – Deformada sofrida e retracção da camada intumescente no ensaio C9.

Na Figura 82 observa-se a par da deformação imposta no elemento, o fenómeno de retracção da intumescência ao longo do elemento.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 19 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 472,24 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (C4), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 6 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 499,42 [°C].

#### 6.3.21. Ensaio C10 ( $\mu=70\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 19-10-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 525,78 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 20560 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 31 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 31 - Valores de protecção para ensaio C10.**

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1071	143	1306	754

No Gráfico 287 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma pequena perturbação. De realçar o comportamento de C5, ver pag.149, este elemento encontra-se com um grau de utilização perto do seu estado limite de resistência ao fogo, no presente gráfico observa-se uma grande velocidade de deslocamento logo após a curva de fogo ter sido iniciada.

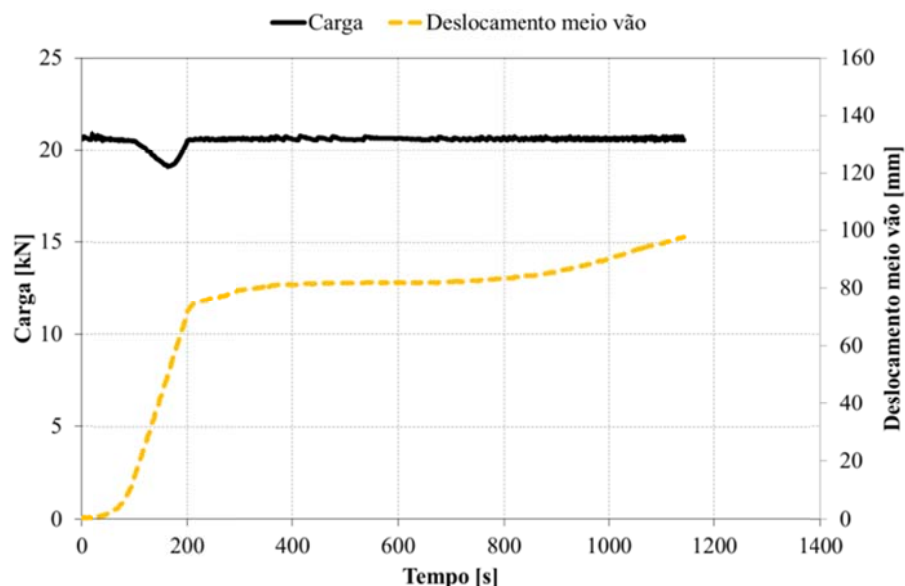


Gráfico 287 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio C10.

No Gráfico 288 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo. É visível o momento de retracção da camada intumescente, já depois de atingido o ponto de colapso, provocando um aumento do valor de temperatura em alguns pontos.

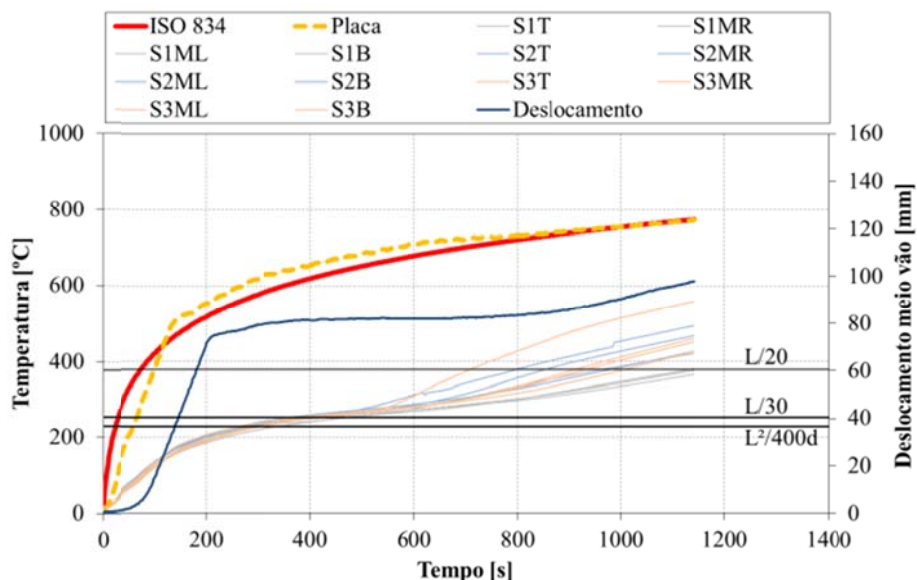


Gráfico 288 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio C10.

No Gráfico 289 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

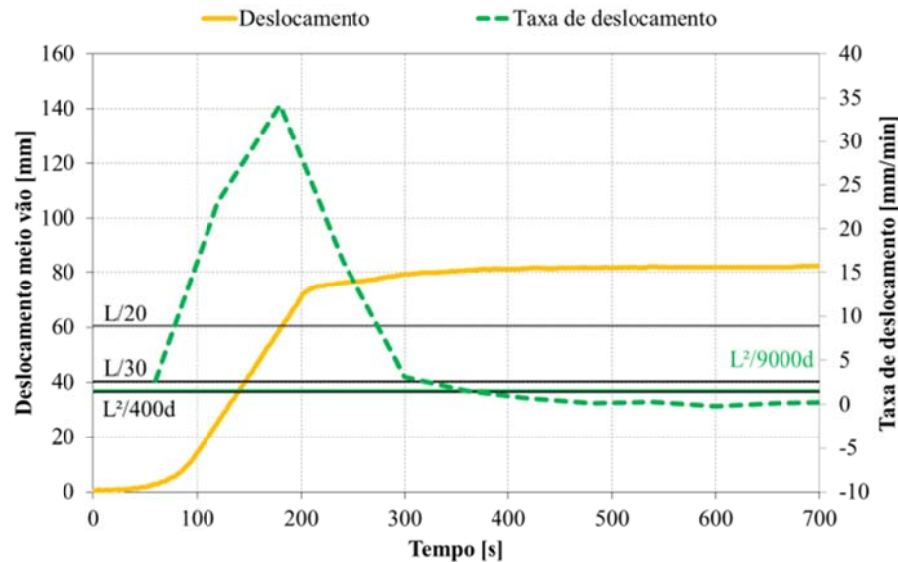


Gráfico 289 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C10.

No Gráfico 290 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 288, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência.



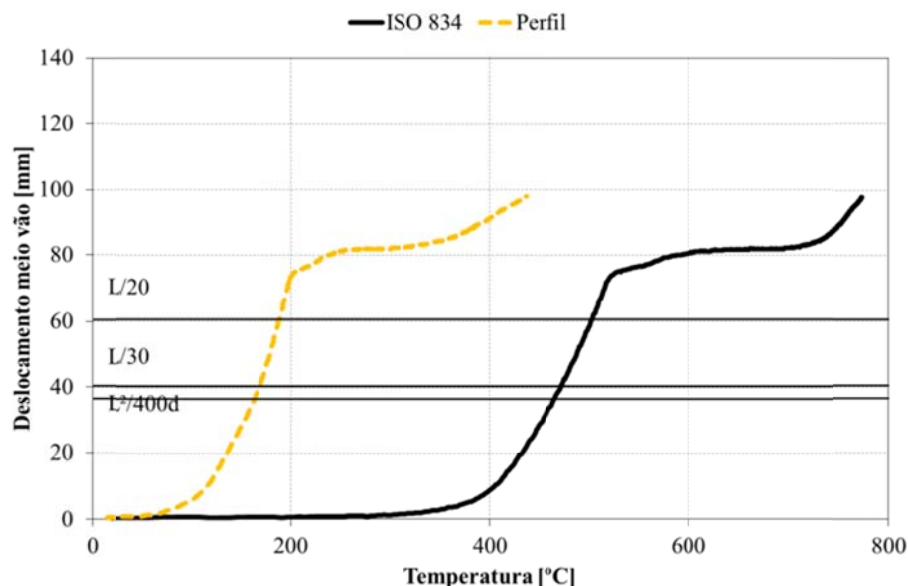


Gráfico 290 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C10.

No Gráfico 291 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. O elemento inicialmente expande, provocando um aumento do perfil, elevando o valor de DV, devido à deformação imposta pela carga o perfil desce e roda sobre o apoio superior, provocando a diminuição de DV e o aumento de DH.

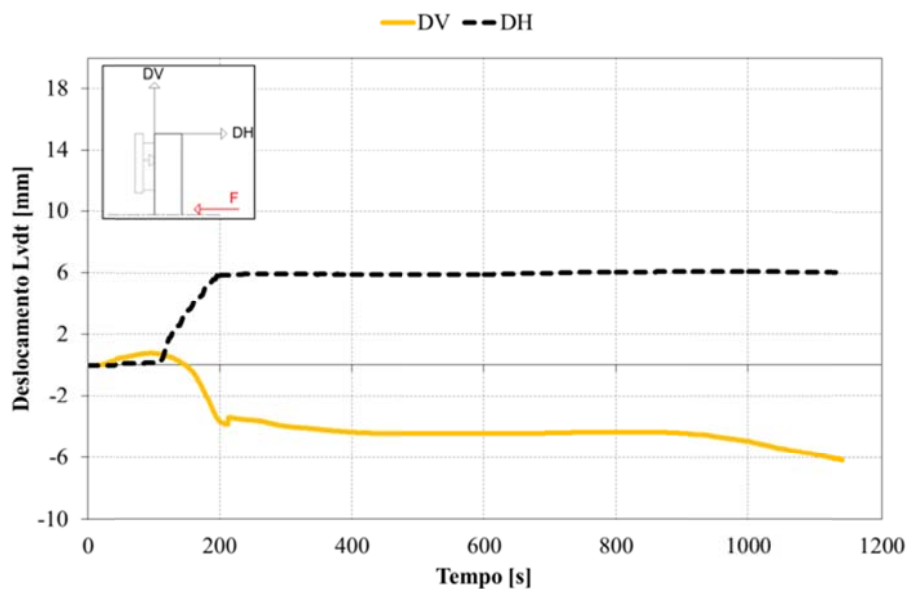
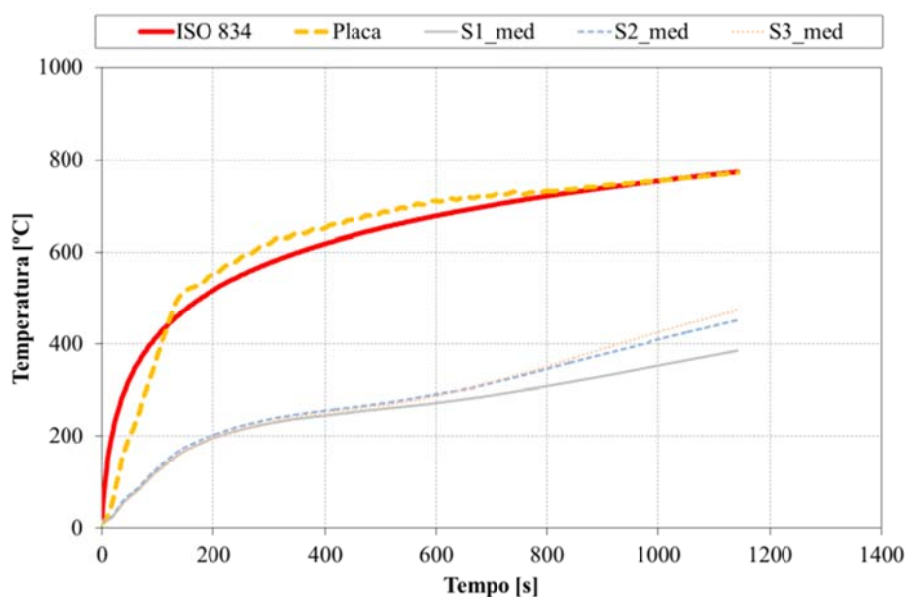


Gráfico 291 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C10.

No Gráfico 292 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto

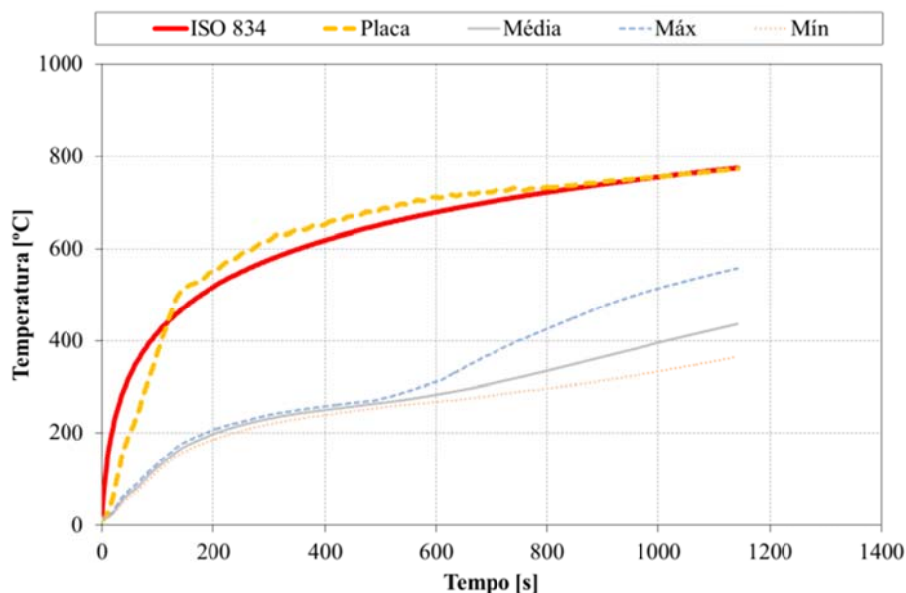


de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.



**Gráfico 292 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C10.**

No Gráfico 293 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.



**Gráfico 293 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C10.**



Figura 83 – Deformada sofrida e retracção da camada intumescente no ensaio C10.

Na Figura 83 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio, a par da retracção da camada de intumescência.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 2 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 169,12 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (C5), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 2 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 255,64 [°C].

O elemento encontra-se com um grau de utilização muito próximo da sua capacidade resistente à flexão, em condições de temperatura ambiente. O fenómeno de retracção da camada intumescente provocou um tempo de resistência em condições de incêndio muito próximo do elemento sem protecção.

#### 6.3.22. Ensaio C11 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm])

Decidiu-se alterar o grau de utilização do elemento C11, já que em C10 o estado limite de utilização foi atingido antes da reacção de intumescência da

tinta. Alterou-se o grau de utilização para  $\mu=50\%$ , já que C8 e C9 tinham sido afectados pelo fenómeno de retracção da camada de intumescência.

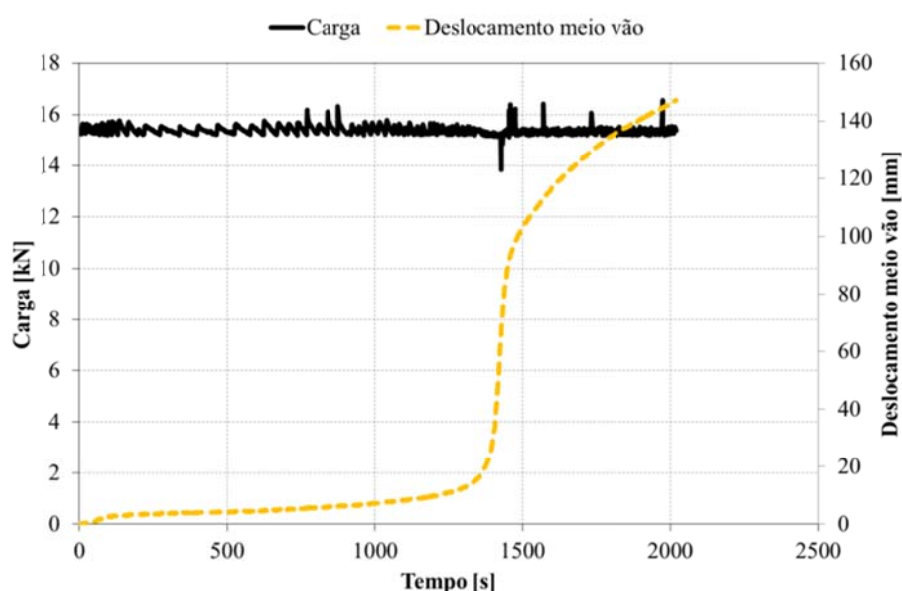
Este elemento foi ensaiado a 26-11-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 15200 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 32 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 32 - Valores de protecção para ensaio C11.**

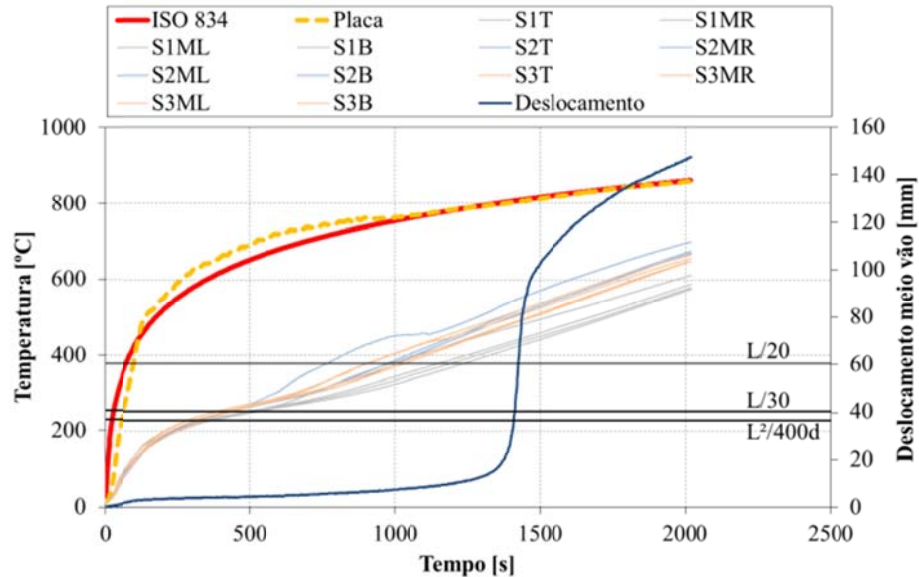
Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1120	178	1439	785

No Gráfico 294 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De notar que no momento que se regista uma grande velocidade do ponto de aplicação da carga, coincide com uma pequena perturbação do histograma de carga.



**Gráfico 294 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio C11.**

No Gráfico 295 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo. De notar uma alteração na linearidade da evolução das temperaturas, causada pelo fenómeno de retracção da intumescência, como se pode observar na Figura 84.



**Gráfico 295 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio C11.**

No Gráfico 296 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

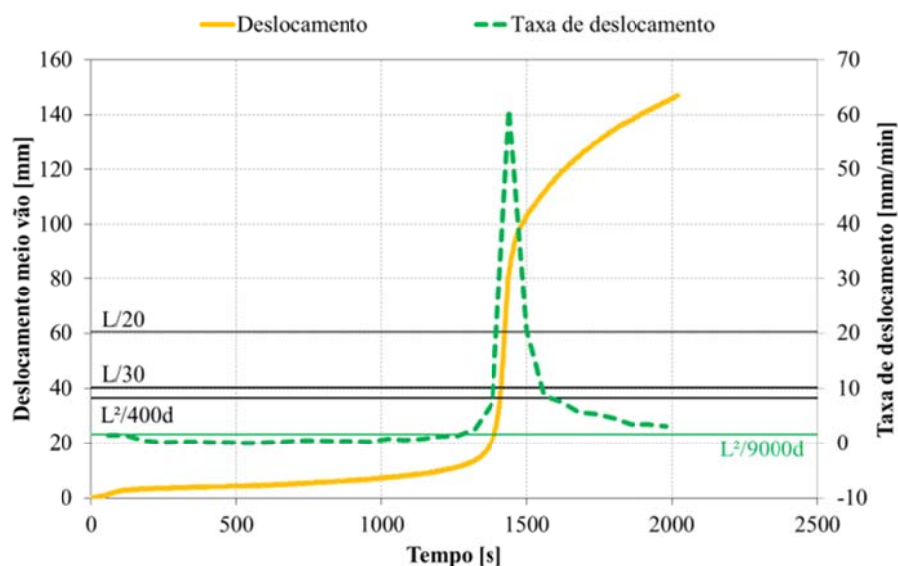


Gráfico 296 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C11.

No Gráfico 297 está representada a evolução do deslocamento no ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 295, a curva de fogo ISO834, coincide com a temperatura média dentro do forno de resistência. A temperatura crítica do elemento é definida com uma perpendicular do valor de deslocamento, ao eixo das temperaturas.

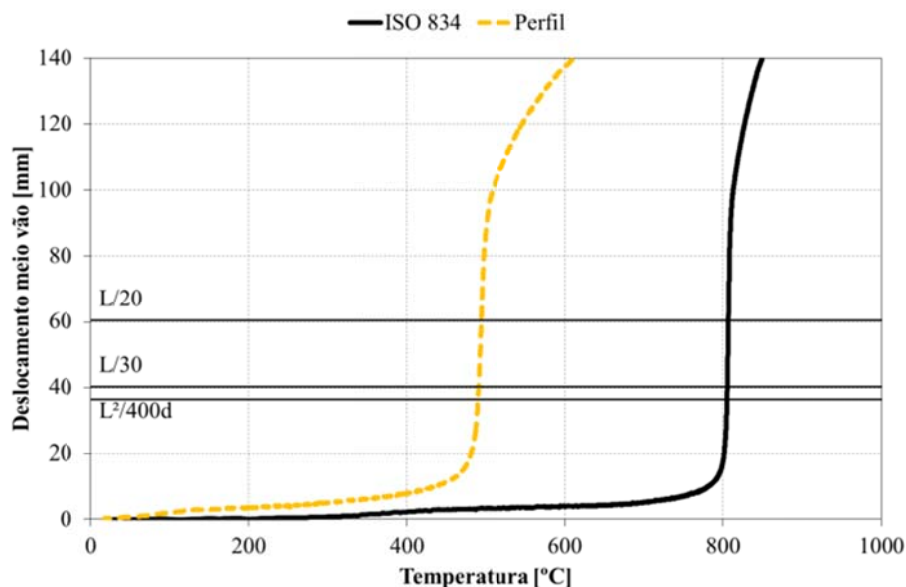


Gráfico 297 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C11.

No Gráfico 298 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o

aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio, vincando o momento de colapso do elemento.

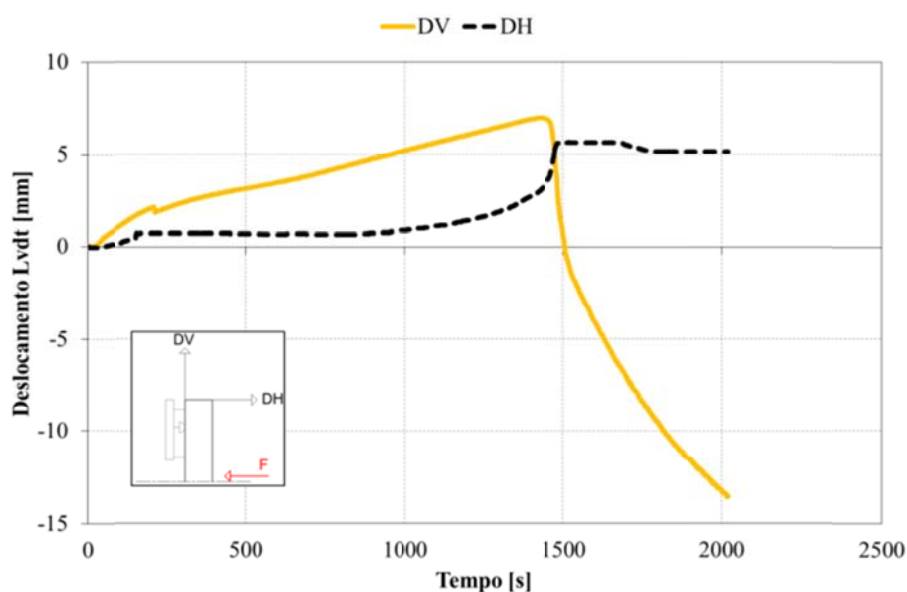


Gráfico 298 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C11.

No Gráfico 299 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

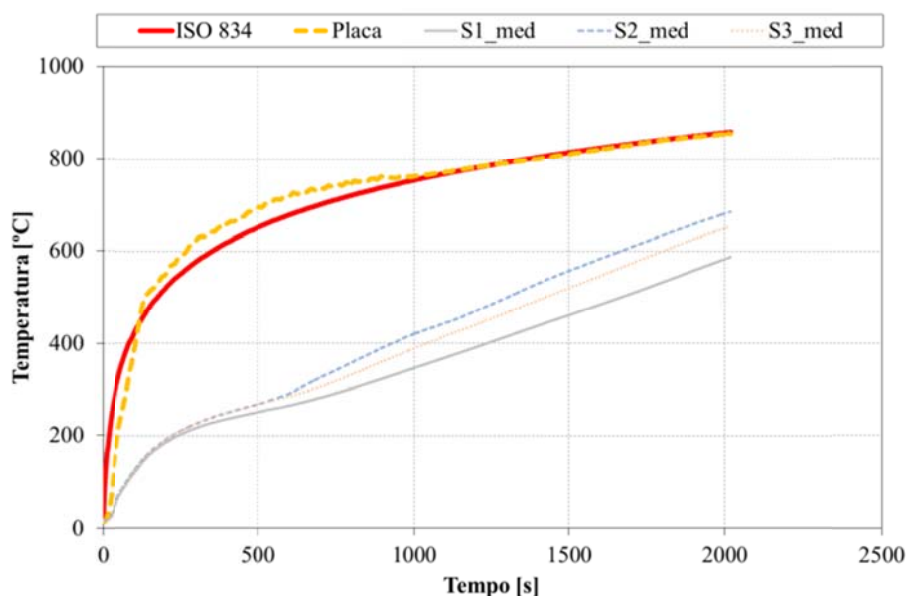


Gráfico 299 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C11.



No Gráfico 300 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

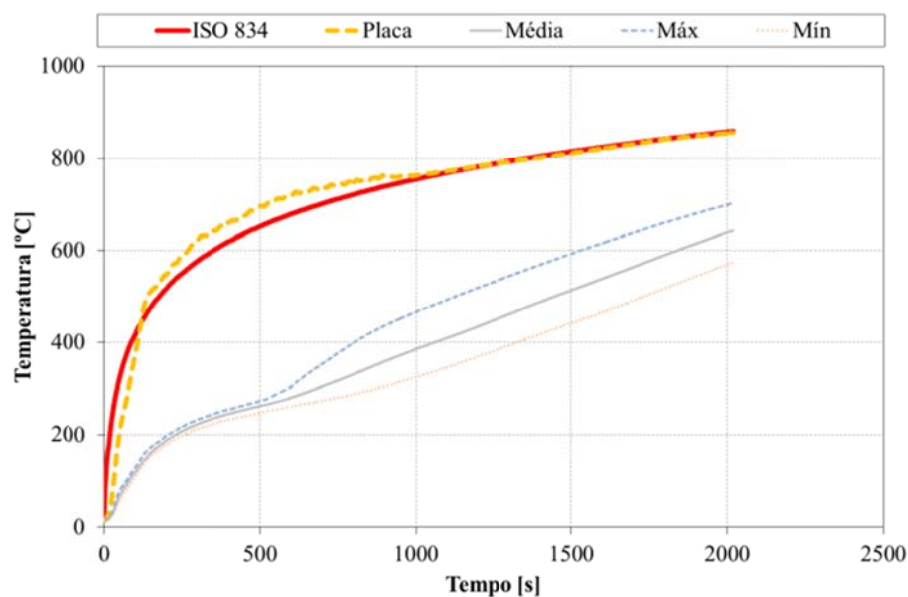


Gráfico 300 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C11.



Figura 84 – Evolução do ensaio C11.

Na Figura 84 estão representados dois instantes do ensaio, representando as fases da evolução na intumescência da tinta. Pode-se observar à esquerda uma evolução sem anormalidades, à direita observa-se o momento em que a retracção da intumescência expõe zonas do aço às altas temperaturas.





Figura 85 – Deformada sofrida no ensaio C11.

Na Figura 85 observa-se a par da deformação imposta no elemento, o fenómeno de retracção da intumescência ao longo do elemento.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 23 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 490,75 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (C4), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 6 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 499,42 [°C].

Verificou-se que apesar do fenómeno de retracção da camada intumescência, o elemento não foi demasiadamente exposto às altas temperaturas.

#### 6.3.23. Ensaio C12 ( $\mu=50\%$ , protecção a 2 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 19-11-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 15200 [N]. A carga foi exercida

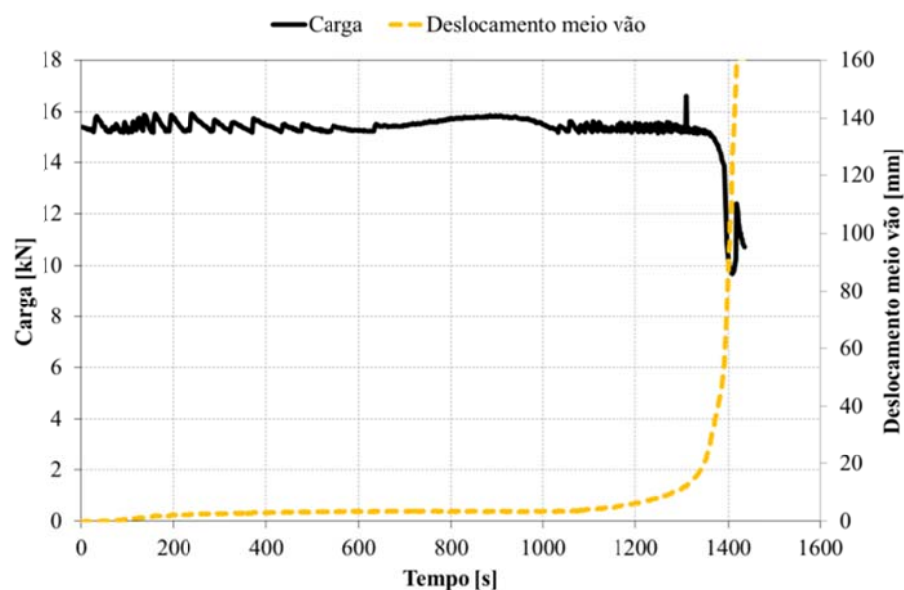
no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 33 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 33 - Valores de protecção para ensaio C12.**

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1896	200	2190	1490

No Gráfico 301 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De realçar que no período de tempo em que se registou uma grande velocidade do ponto de aplicação de carga coincide com o momento que o histograma de carga regista uma perturbação.



**Gráfico 301 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio C12.**

No Gráfico 302 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo. De registar uma perturbação no registo das temperaturas, no momento em que se observou a retracção da intumescência, observável nas Figura 86 e Figura 87.

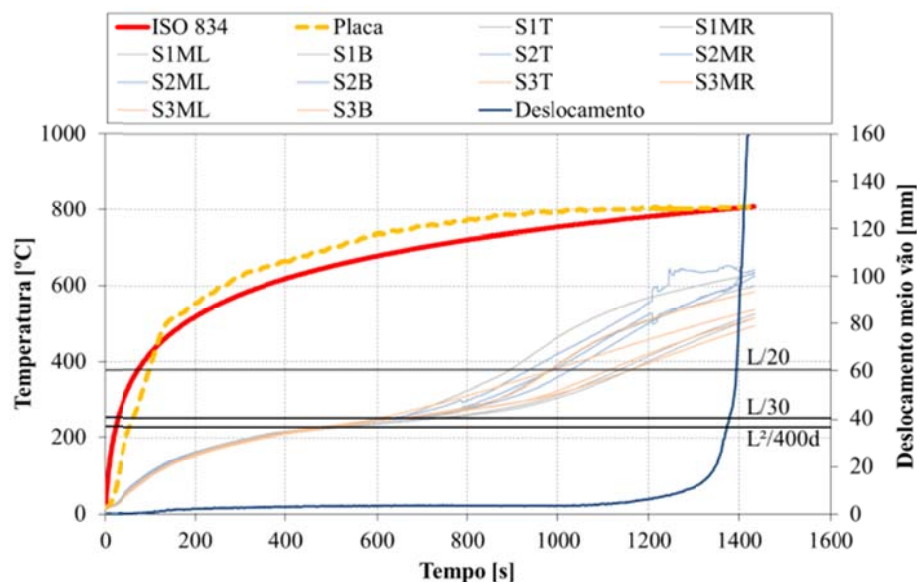


Gráfico 302 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio C12.

No Gráfico 303 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto com os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

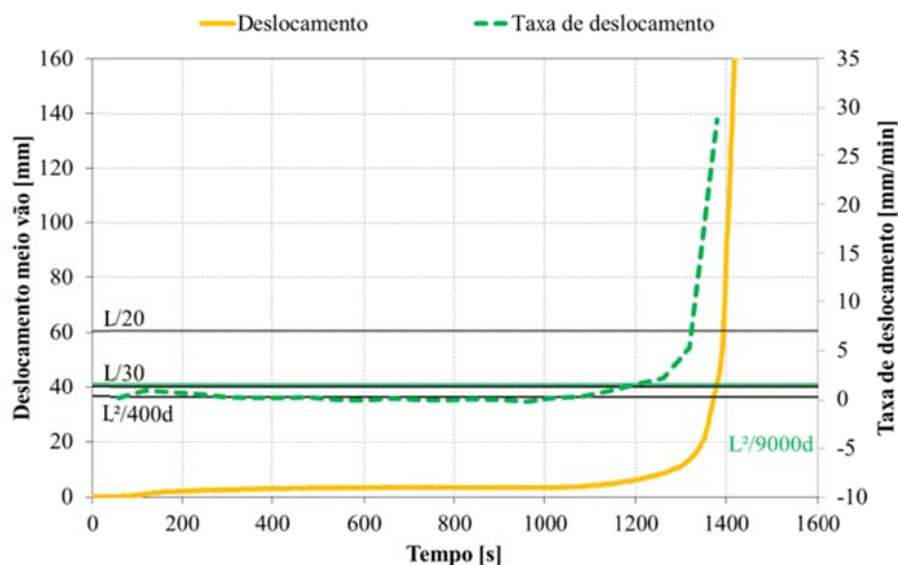


Gráfico 303 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C12.

No Gráfico 304 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 302, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência. No instante de colapso do elemento regista-se uma perpendicular ao eixo das temperaturas, referente ao valor de deslocamento no ponto de aplicação de carga, registando assim o valor da temperatura crítica.

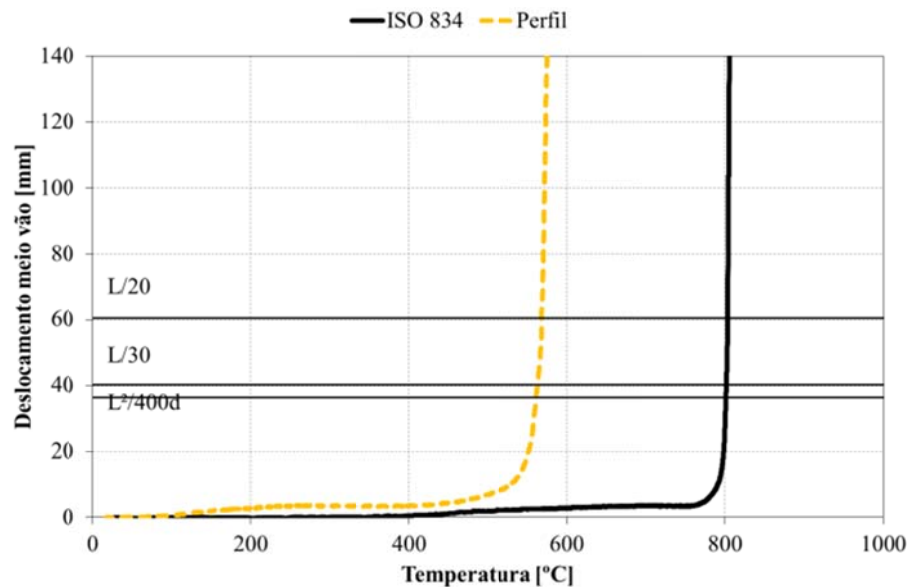


Gráfico 304 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C12.

No Gráfico 305 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior, registando aí a sua perda de capacidade de resistência ao fogo.

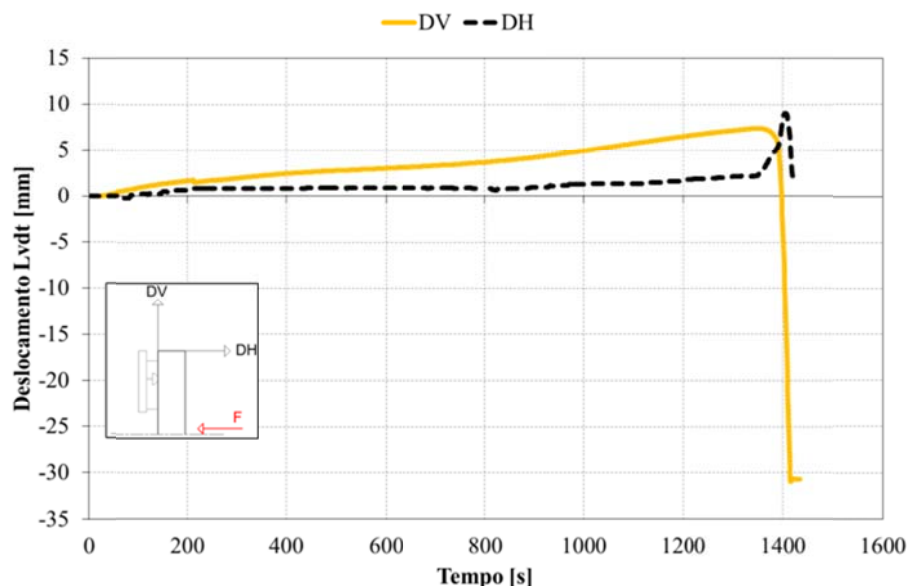


Gráfico 305 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C12.

No Gráfico 306 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. De salientar um aquecimento diferenciado da secção 2, devido à retracção da intumescência ter exposto as zonas do aço acima do ponto de aplicação da carga. Este fenómeno provocou uma rótula plástica diferenciada do ponto de aplicação da carga

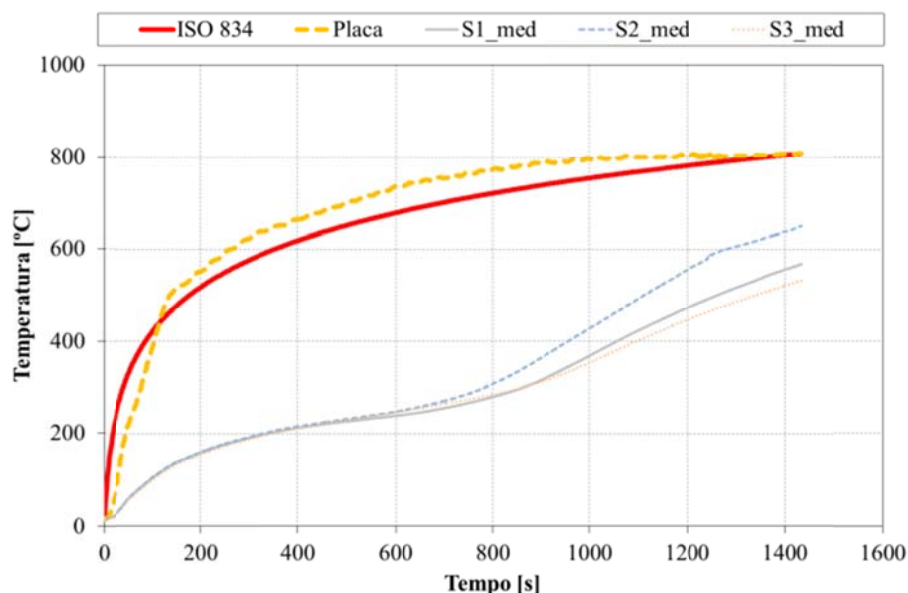


Gráfico 306 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C12.

No Gráfico 307 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

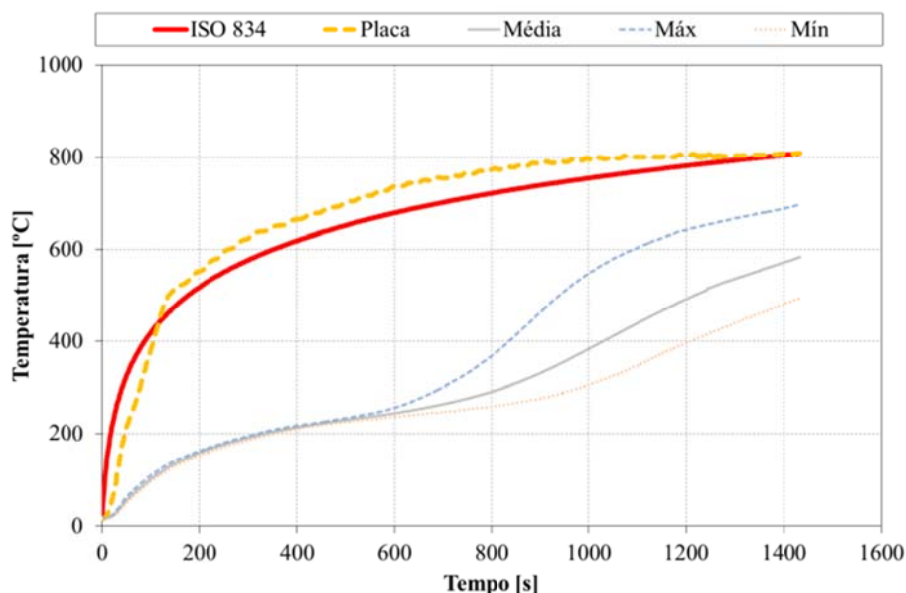


Gráfico 307 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C12.

O registo das temperaturas é fortemente influenciado pelo fenómeno de retracção da camada intumescente sobre o aço. Como se pode observar na Figura 86, o ensaio inicia-se de forma idêntica aos antecessores, registando depois uma abertura visível na camada intumescente, passando depois a retrair, expondo partes do perfil ao fogo. Com este fenómeno o elemento é fortemente solicitado de elevadas temperaturas, levando-o rapidamente ao seu estado limite ultimo de resistência em condições de fogo.

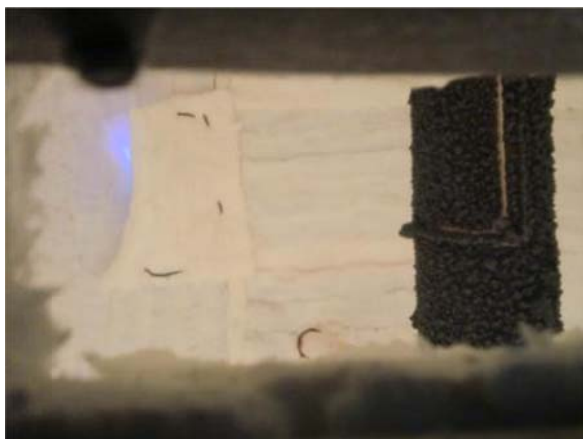






Figura 86 – Evolução do ensaio C12.

Na Figura 86 estão representados quatro instantes do ensaio, representando as fases da evolução na intumescência da tinta. Pode-se observar o fenómeno de retracção da camada intumescente de protecção e a exposição do aço às altas temperaturas.



Figura 87 – Deformada sofrida e retracção da camada intumescente no ensaio C12.

Na Figura 87 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio. Observa-se aqui o estado da camada intumescente no final do ensaio, a retracção da tinta expôs a zona de aço, junto à secção 2, levando depois à queda da intumescência e por último à ruptura do elemento acima do ponto de aplicação da carga.



O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 22 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 563,47 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (C4), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 6 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 499,42 [°C].

#### 6.3.24. Ensaio C13 ( $\mu=50\%$ , protecção a 2 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 22-11-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 15200 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 34 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 34 - Valores de protecção para ensaio C13.**

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1807	210	2270	1430

No Gráfico 308 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio.

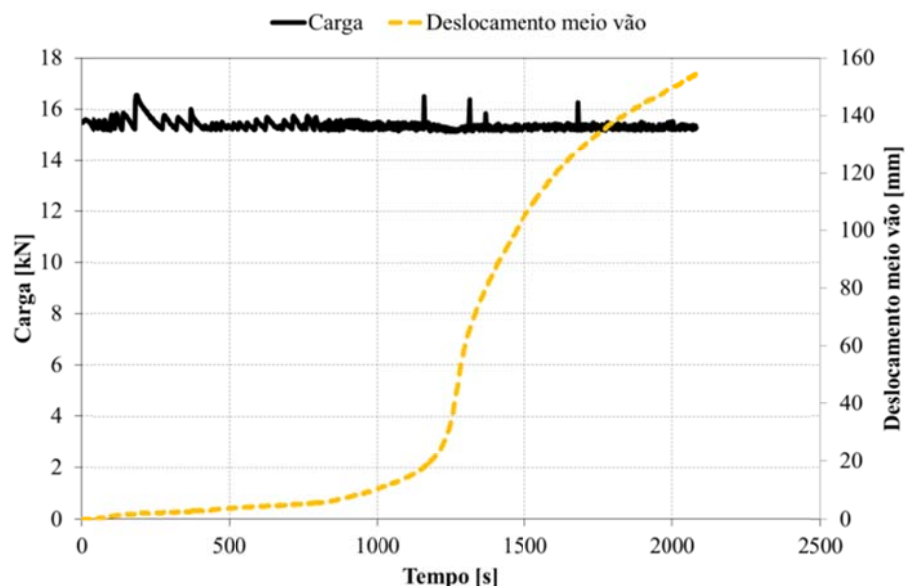


Gráfico 308 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio C13.

No Gráfico 309 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo. De registar uma perturbação no registo das temperaturas, no momento em que se observou a retracção da intumescência, observável nas Figura 88 e Figura 89.

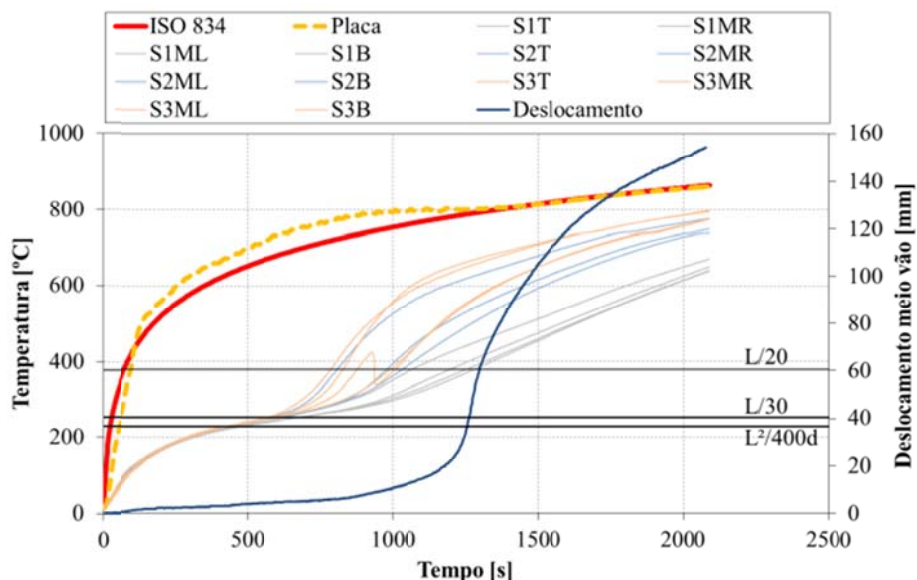


Gráfico 309 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio C13.

No Gráfico 310 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto com os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

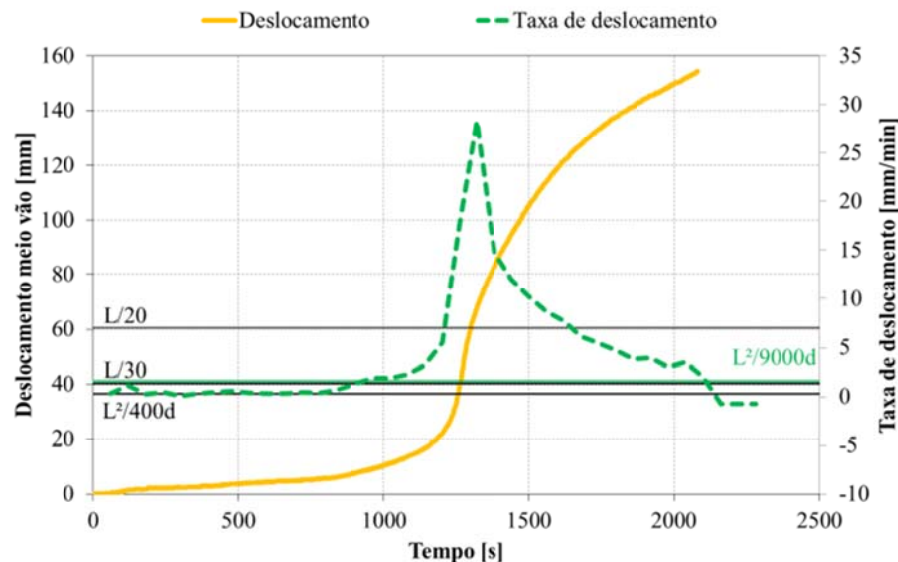


Gráfico 310 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para C13.

No Gráfico 311 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 318, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência. No instante de colapso do elemento regista-se uma perpendicular ao eixo das temperaturas, referente ao valor de deslocamento no ponto de aplicação de carga, registando assim o valor da temperatura crítica.

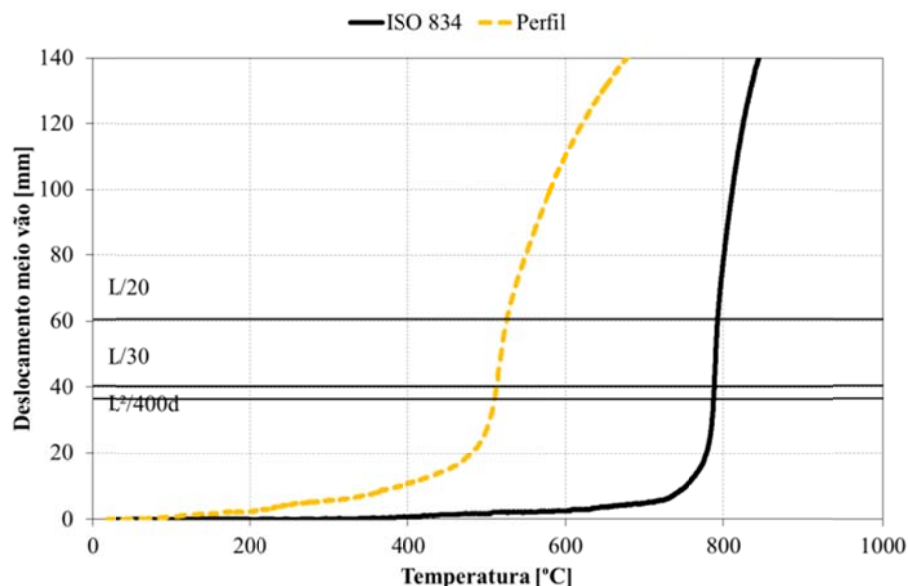


Gráfico 311 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio C13.

No Gráfico 312 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior, registando aí a sua perda de capacidade de resistência ao fogo.

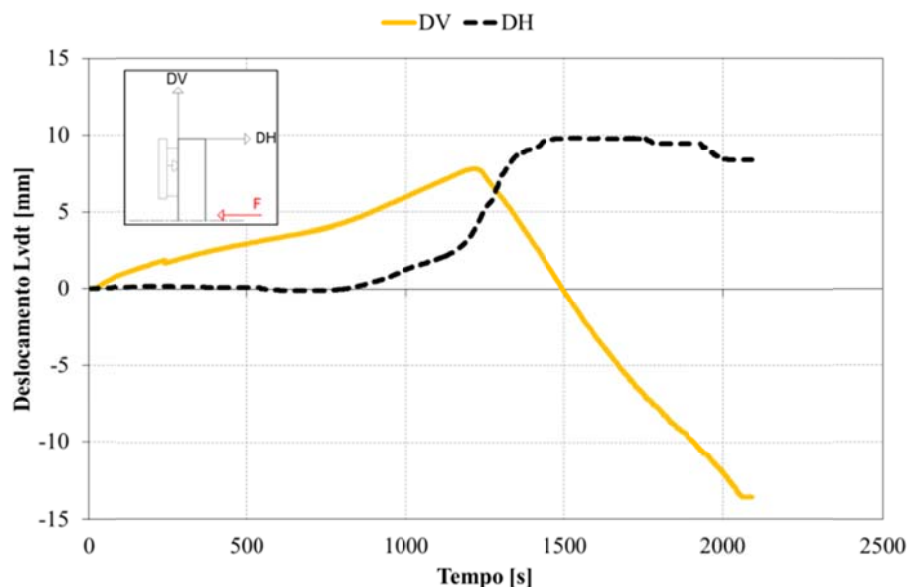
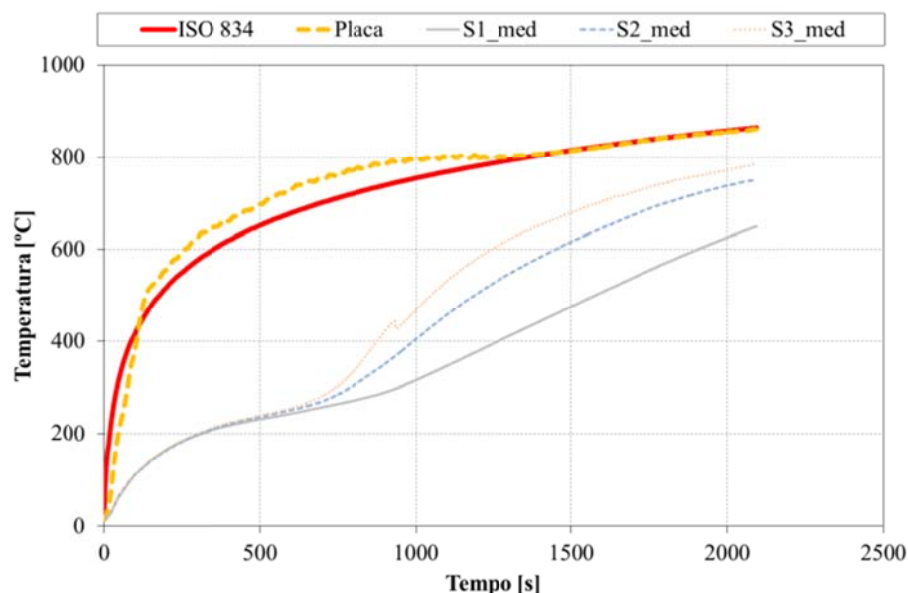


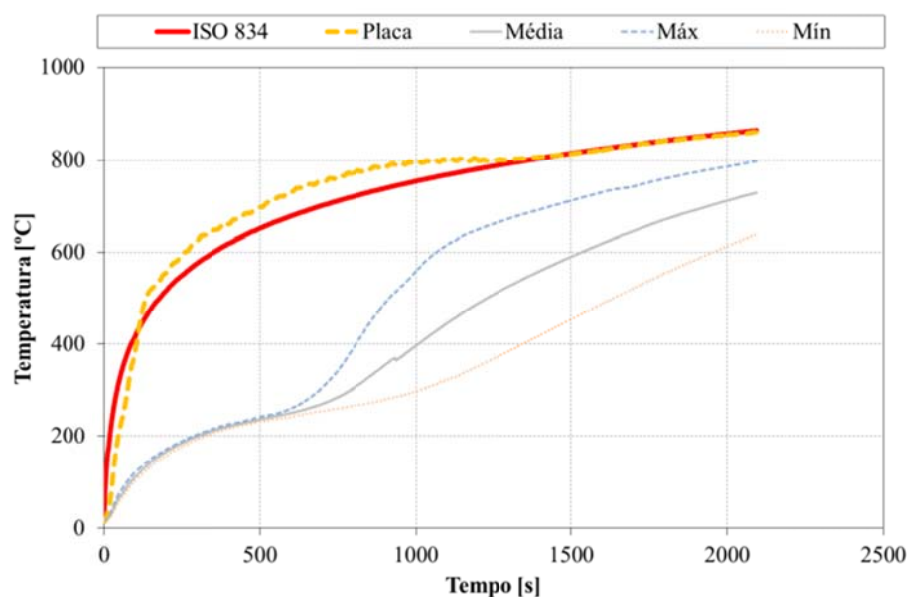
Gráfico 312 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio C13.

No Gráfico 313 estão representados os valores médios, medidos nas três secções.



**Gráfico 313 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para C13.**

No Gráfico 314 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.



**Gráfico 314 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio C13.**

O registo das temperaturas é fortemente influenciado pelo fenómeno de retracção da camada intumescente sobre o aço. Como se pode observar na Figura 88, o ensaio inicia-se de forma idêntica aos antecessores, registando depois uma abertura visível na camada intumescente, passando depois a retrair, expondo partes do perfil ao fogo. Com este fenómeno o elemento é fortemente

solicitado de elevadas temperaturas, levando-o rapidamente ao seu estado limite ultimo de resistência em condições de fogo.

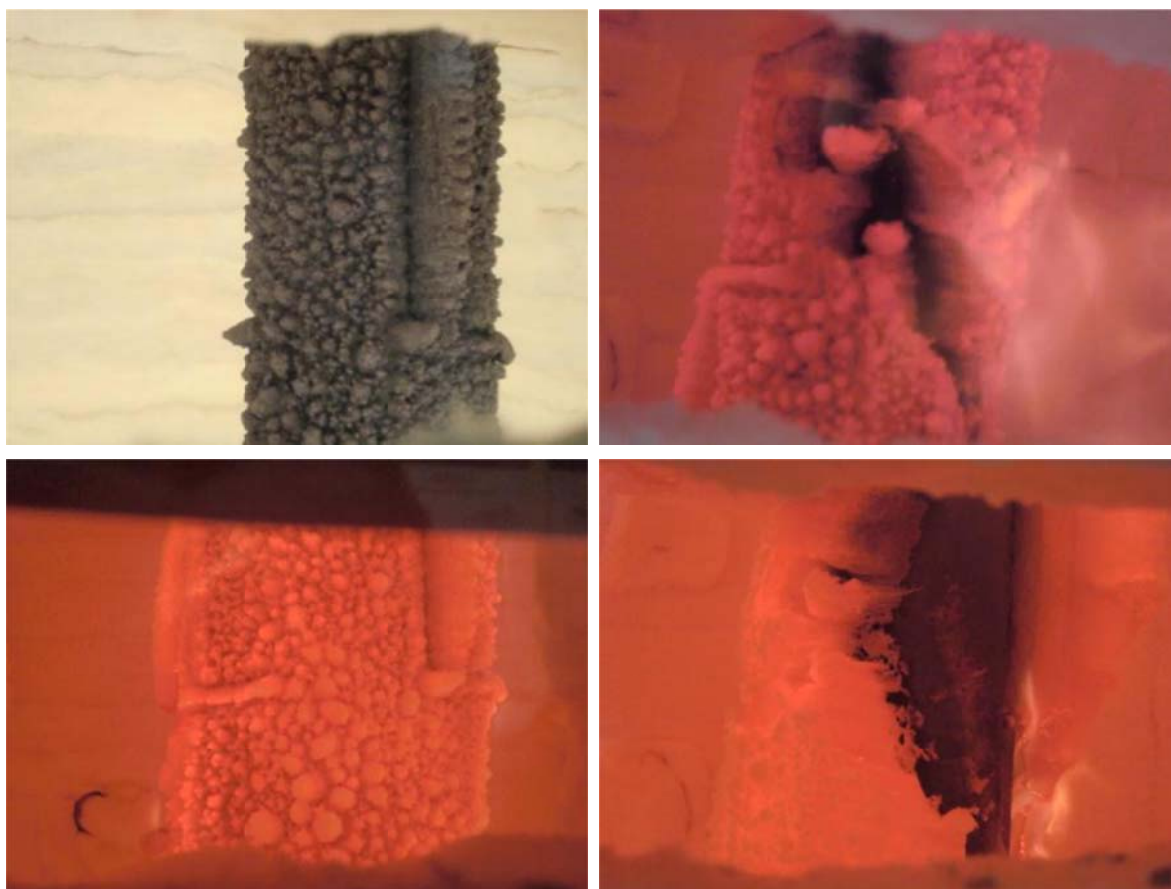


Figura 88 – Evolução do ensaio C13.

Na Figura 88 estão representados quatro instantes do ensaio, representando as fases da evolução na intumescência da tinta. Pode-se observar o fenómeno de retracção da camada intumescente de protecção e a exposição do aço às altas temperaturas.





Figura 89 – Deformada sofrida e retracção da camada intumescente no ensaio C13.

Na Figura 89 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio. Observa-se aqui o estado da camada intumescente no final do ensaio, a retracção da tinta expondo zonas do aço às altas temperaturas, levando depois à queda da intumescência e por último à ruptura do elemento.

O modo de colapso deste elemento foi por rótula plástica, com um valor de resistência ao fogo de 21 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 512,00 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (C4), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 6 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 499,42 [°C].

#### 6.3.25. Ensaio L6 ( $\mu=30\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 06-09-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=30\%$  determina-se uma temperatura crítica de 663,78°C. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 5840 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

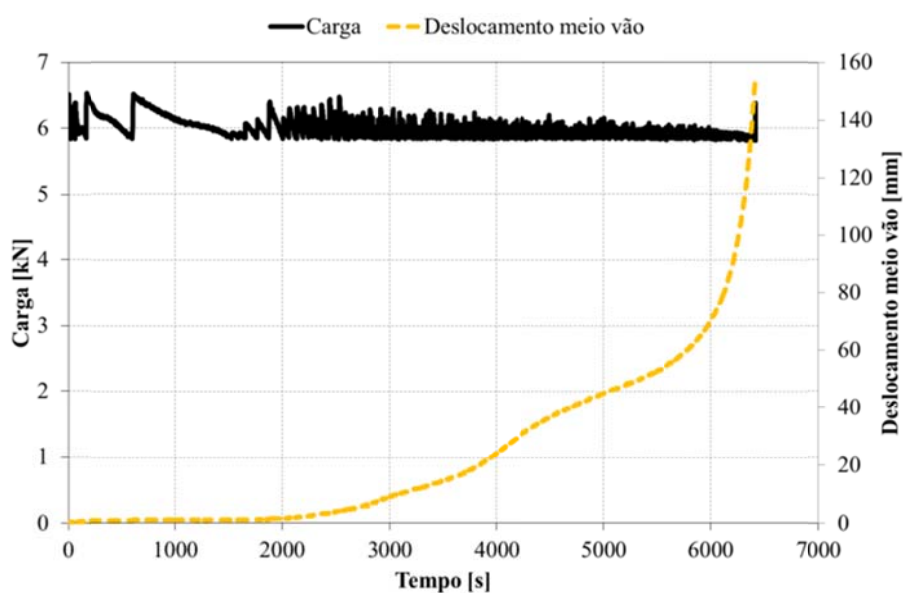


Na Tabela 35 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 35 – Valores de protecção para ensaio L6.**

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx.	Mín.
1041	91	1205	898

No Gráfico 315 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio.



**Gráfico 315 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio L6.**

No Gráfico 316 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.

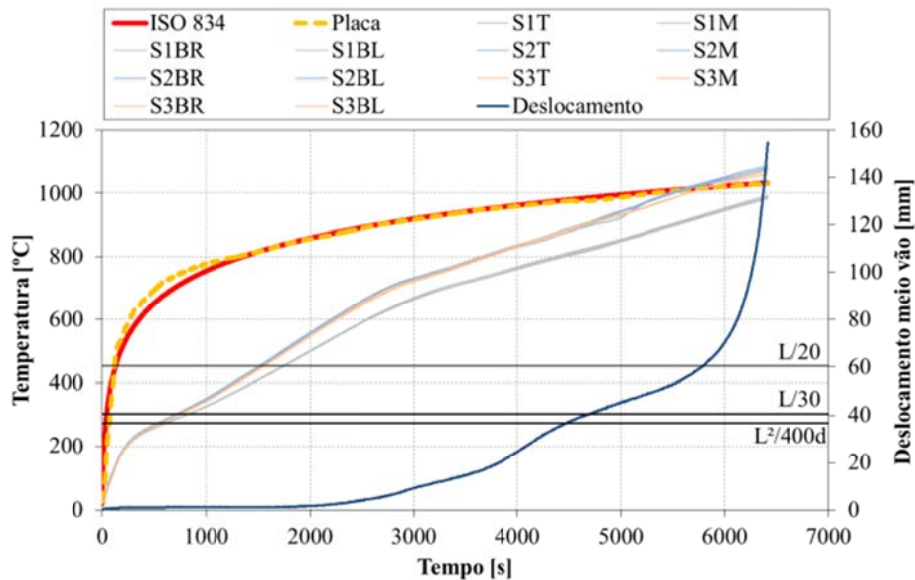


Gráfico 316 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio L6.

No Gráfico 317 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De notar que o limite de deslocamento a meio vão é atingido com baixa velocidade de deslocamento, salientando que o limite de taxa de deslocamento é atingido antes do critério de deslocamento do ponto de carga, tornando este o limite de resistência do elemento ao fogo.

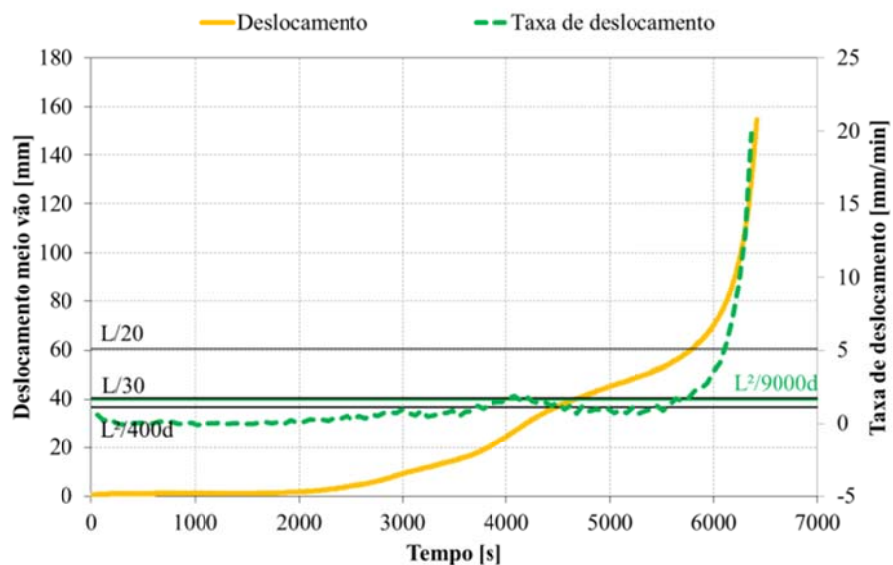


Gráfico 317 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L6.

No Gráfico 318 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da

curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 319, a curva de fogo ISO834, coincide com a temperatura média dentro do forno de resistência.

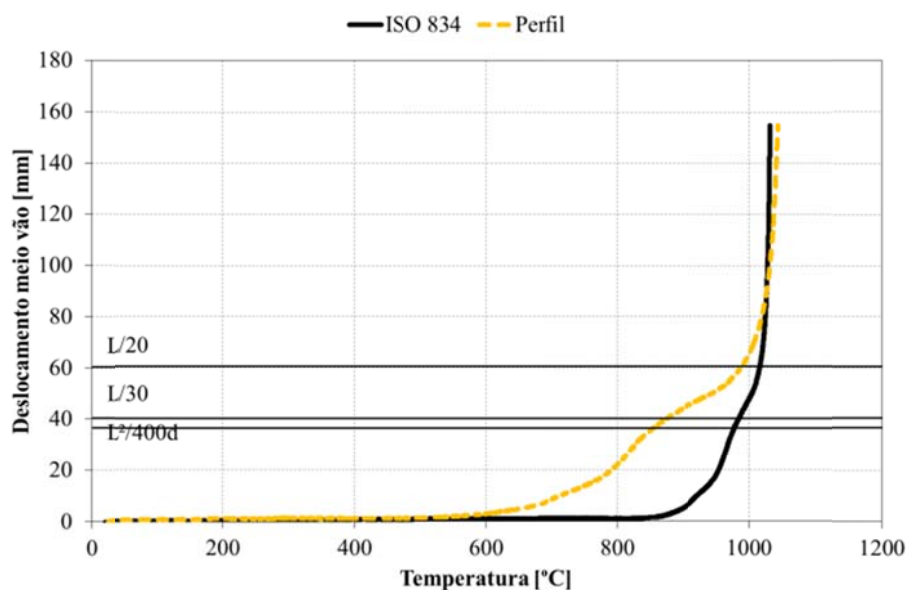


Gráfico 318 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L6.

No Gráfico 319 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio.

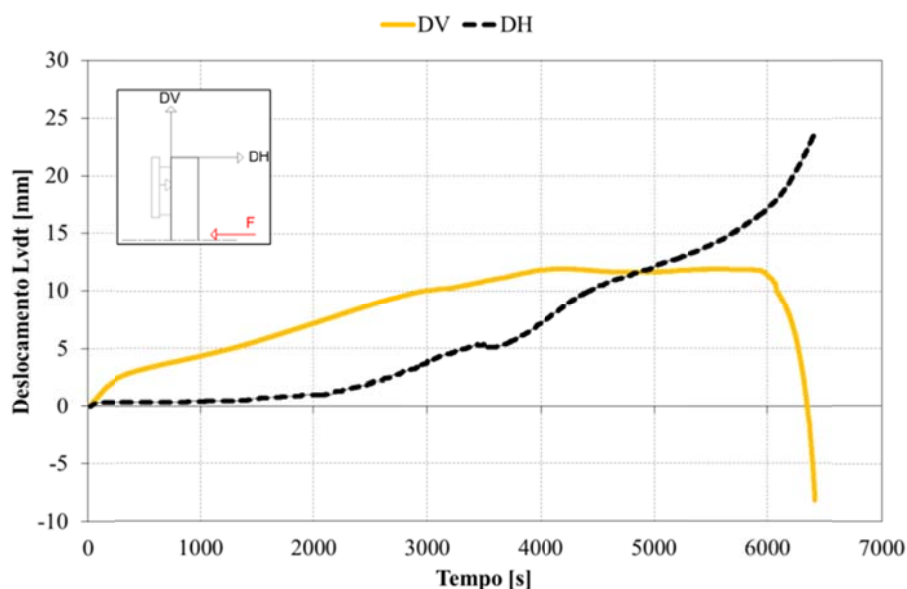


Gráfico 319 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L6.

No Gráfico 320 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

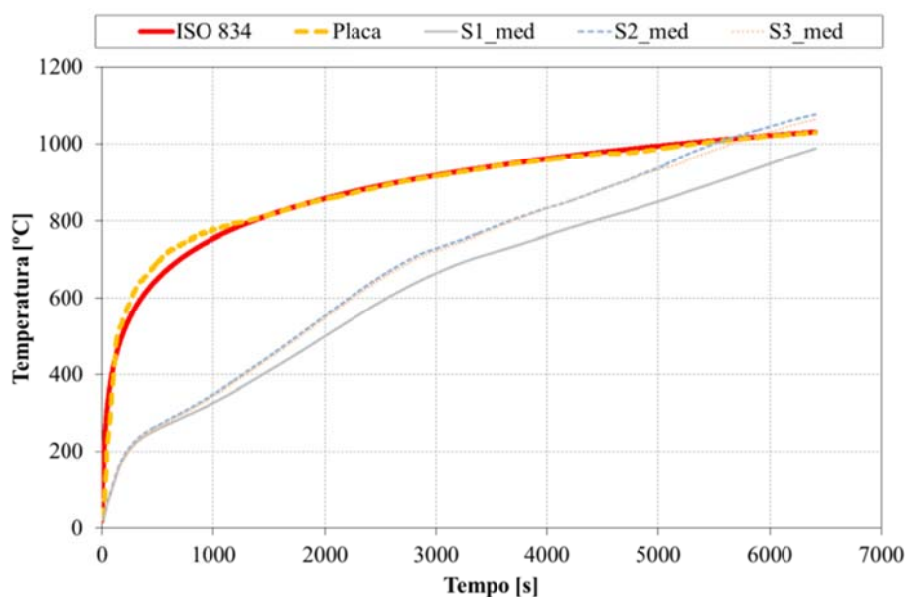


Gráfico 320 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L6.

No Gráfico 321 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

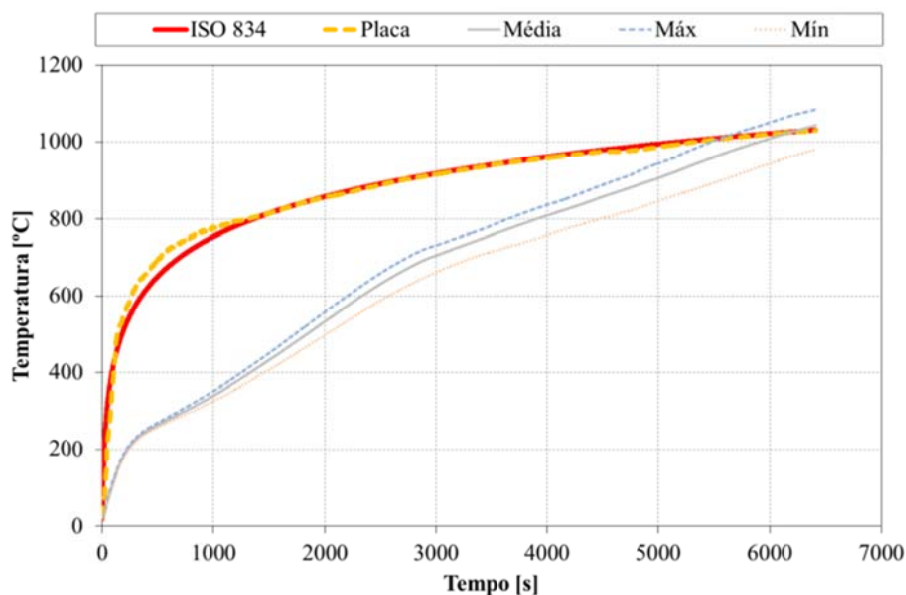


Gráfico 321 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L6.

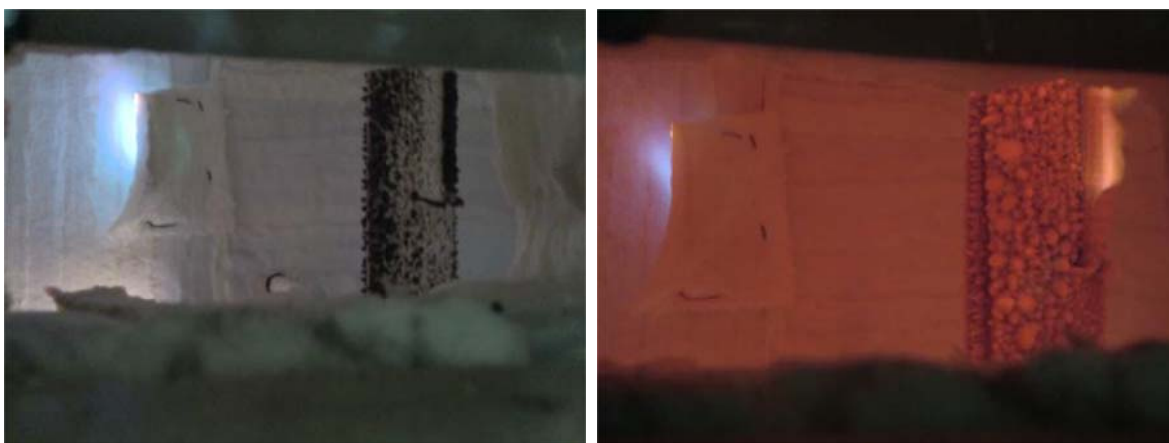


Figura 90 – Evolução do ensaio L6.

Na Figura 90 estão representados dois instantes do ensaio, à esquerda o início da intumescência pouco depois da curva de fogo ter sido activada, à direita a representação da intumescência numa fase posterior.



Figura 91 – Deformada sofrida no ensaio L6.

Na Figura 91 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio. À esquerda ainda com os queimadores do forno de resistência ligados, à direita posteriormente quando o ambiente do forno de resistência já se encontrava estabilizado.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 78 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 875,50 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (L3), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 29 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 822,55 [°C].

#### 6.3.26. Ensaio L7 ( $\mu=30\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 29-11-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=30\%$  determina-se uma temperatura crítica de 663,78°C. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 5840 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 36 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 36 – Valores de protecção para ensaio L7.**

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx.	Mín.
1026	107	1309	850

No Gráfico 322 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio.

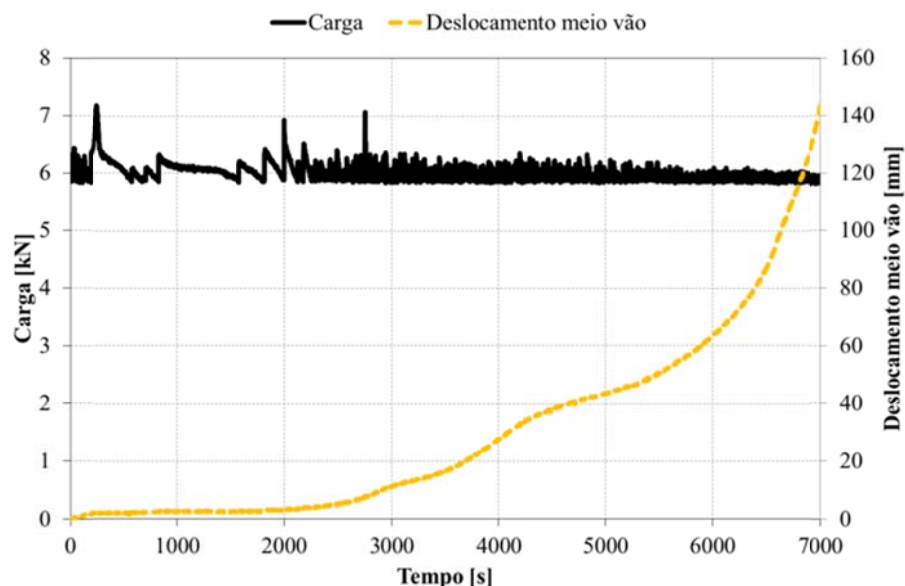


Gráfico 322 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio L7.

No Gráfico 323 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.

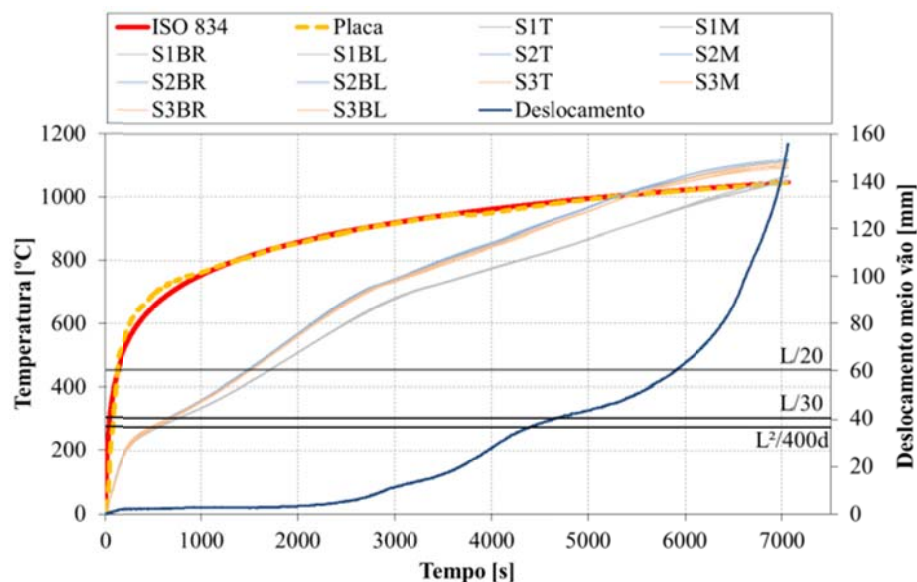


Gráfico 323 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio L7.

No Gráfico 324 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De notar que o limite de deslocamento a meio vão é



atingido com baixa velocidade de deslocamento, salientando que o limite de taxa de deslocamento é atingido antes do critério de deslocamento do ponto de carga, tornando este o limite de resistência do elemento ao fogo.

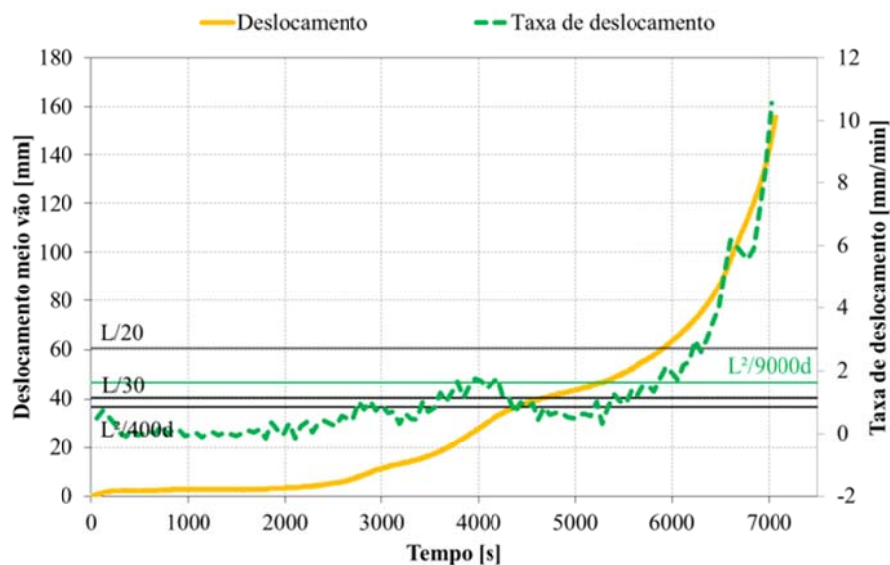


Gráfico 324 - Registro da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L7.

No Gráfico 325 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 323, a curva de fogo ISO834, coincide com a temperatura média dentro do forno de resistência.

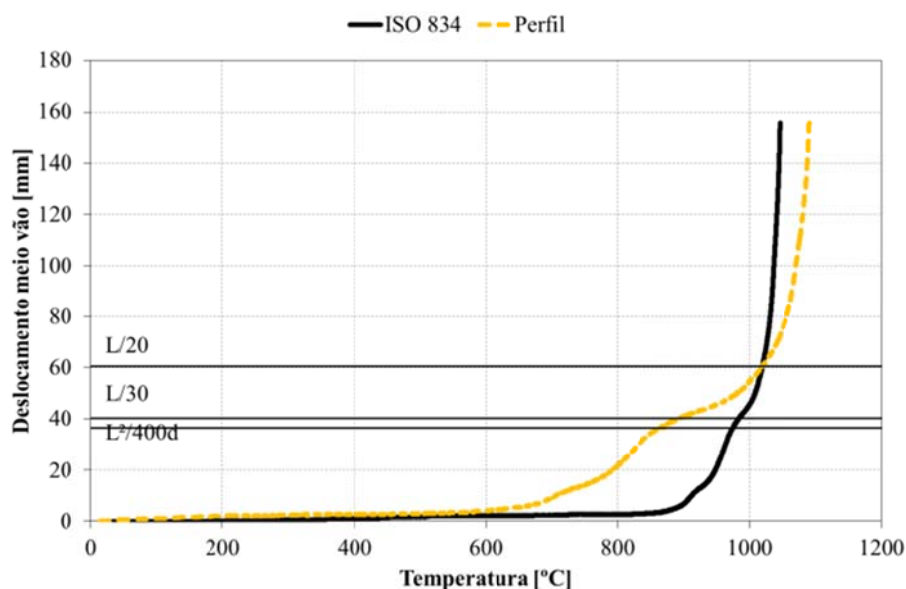


Gráfico 325 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L7.

No Gráfico 326 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio.

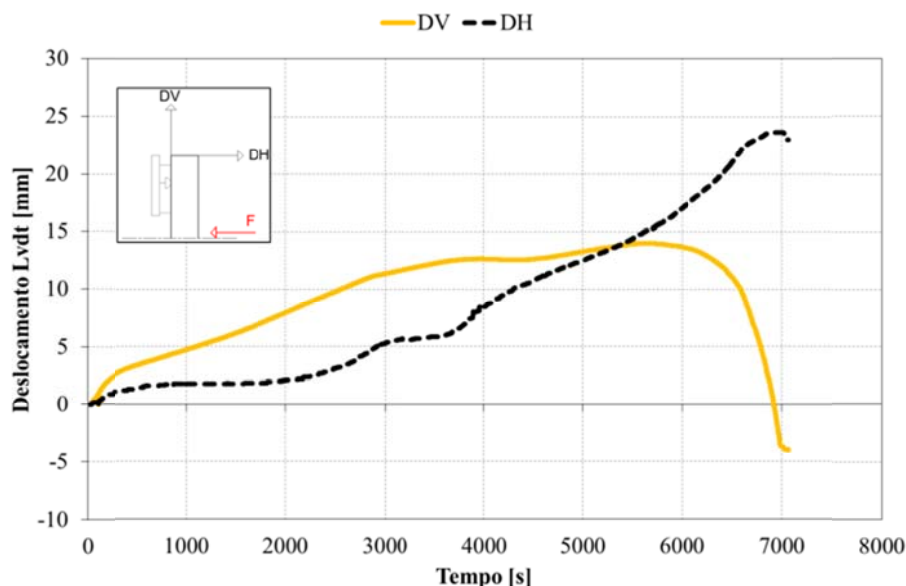


Gráfico 326 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L7.

No Gráfico 327 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

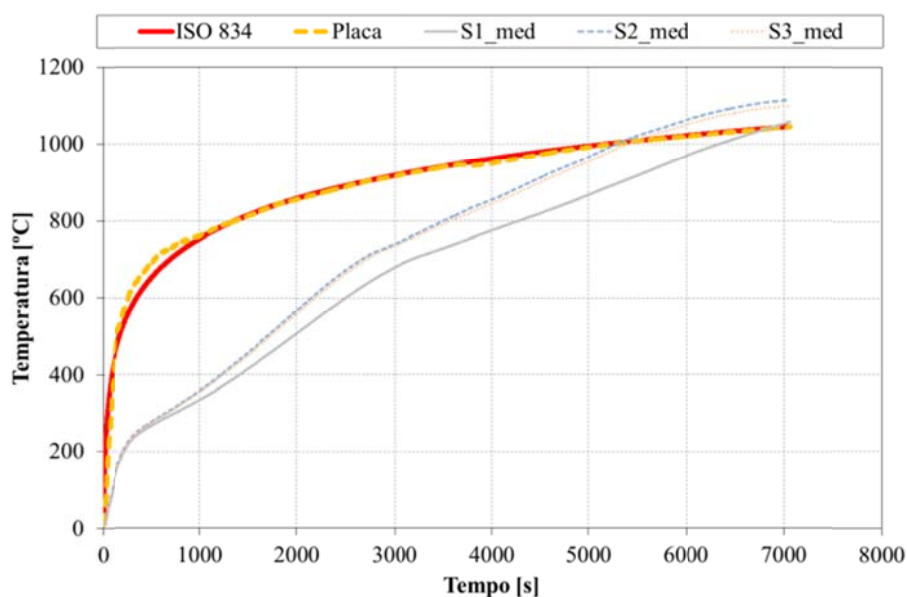


Gráfico 327 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L7.

No Gráfico 328 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

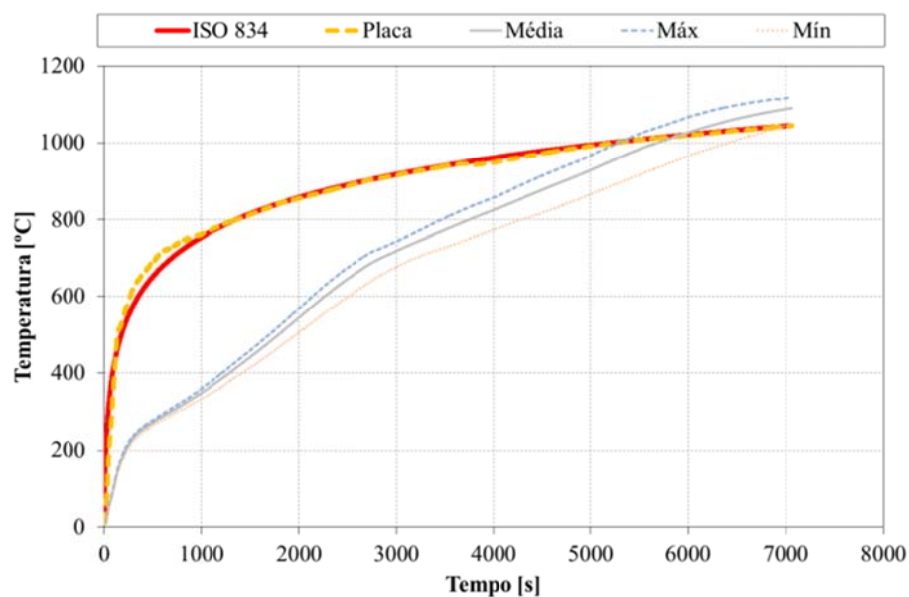


Gráfico 328 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L7.



Figura 92 – Deformada sofrida no ensaio L7.

Na Figura 92 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 77 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 893,25 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (L3), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 29 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 822,55 [°C].

#### 6.3.27. Ensaio L8 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 09-09-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 9830 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 37 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 37 - Valores de protecção para ensaio L8.**

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1053	108	1318	898

No Gráfico 329 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio.

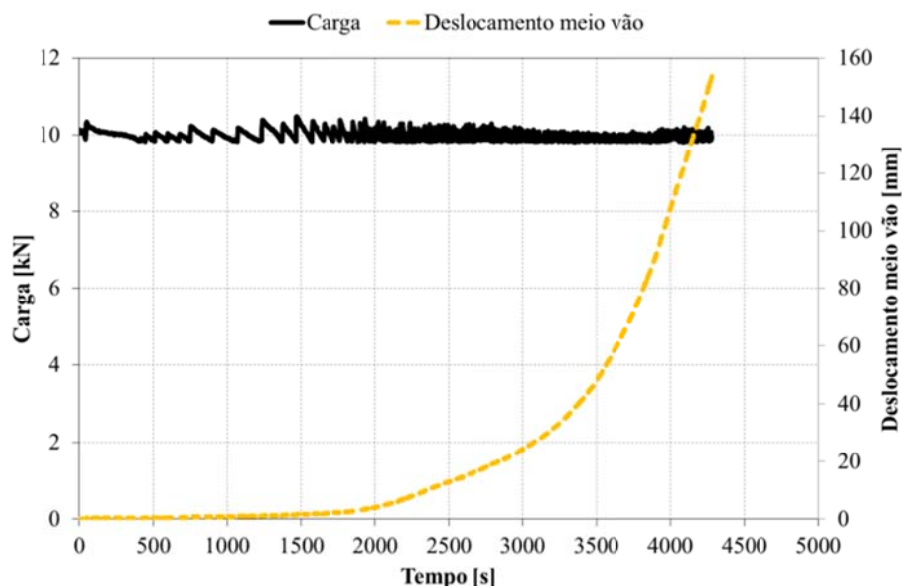


Gráfico 329 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio L8.

No Gráfico 330 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.

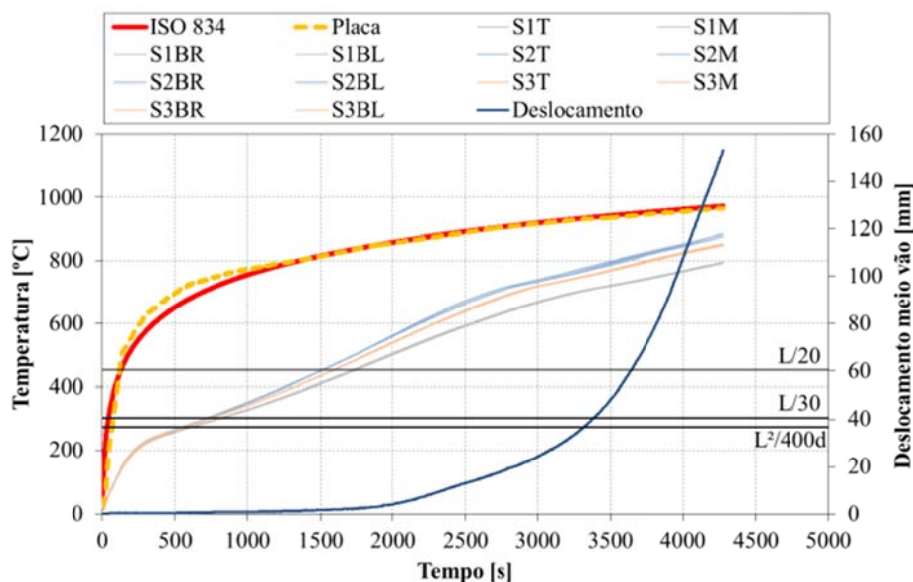


Gráfico 330 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio L8.

No Gráfico 331 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento

sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

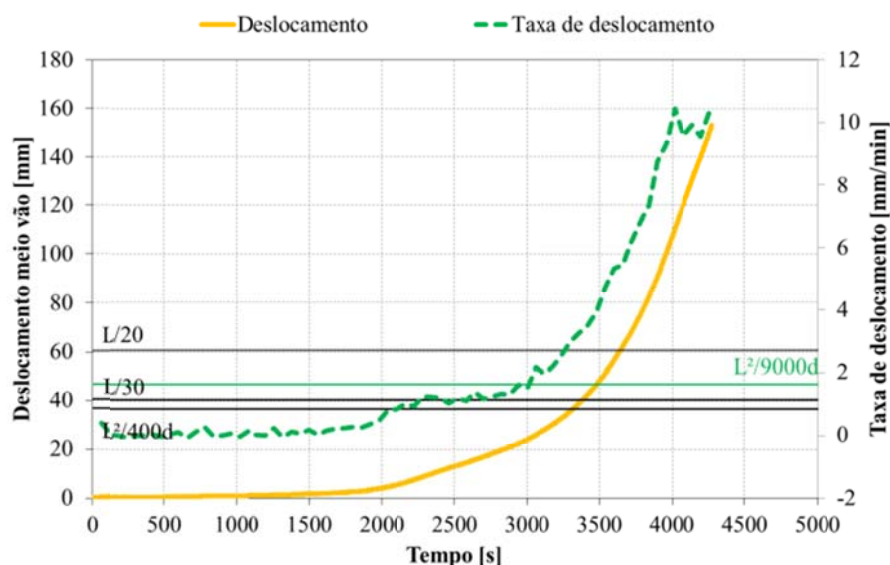


Gráfico 331 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L8.

No Gráfico 332 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 330, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência.

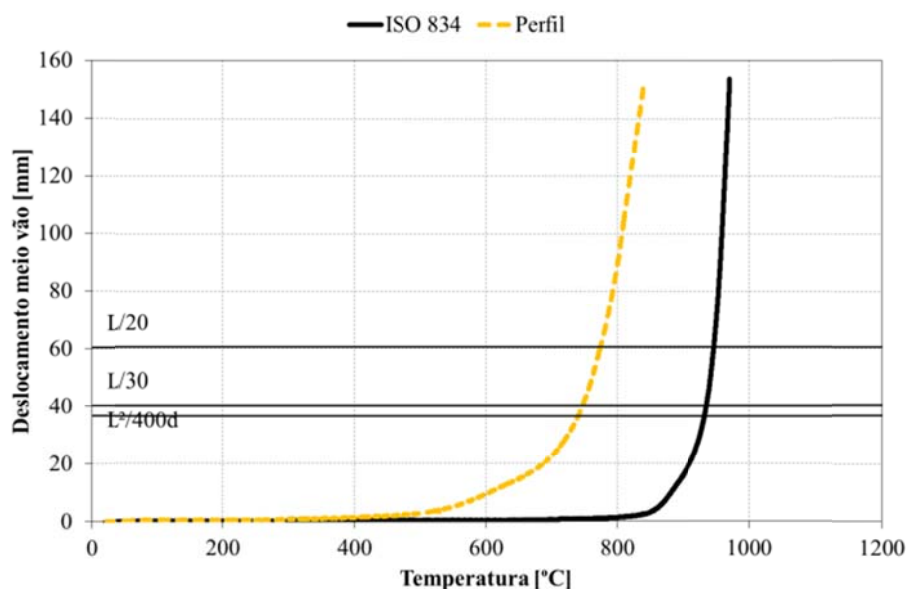


Gráfico 332 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L8.

No Gráfico 333 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior.

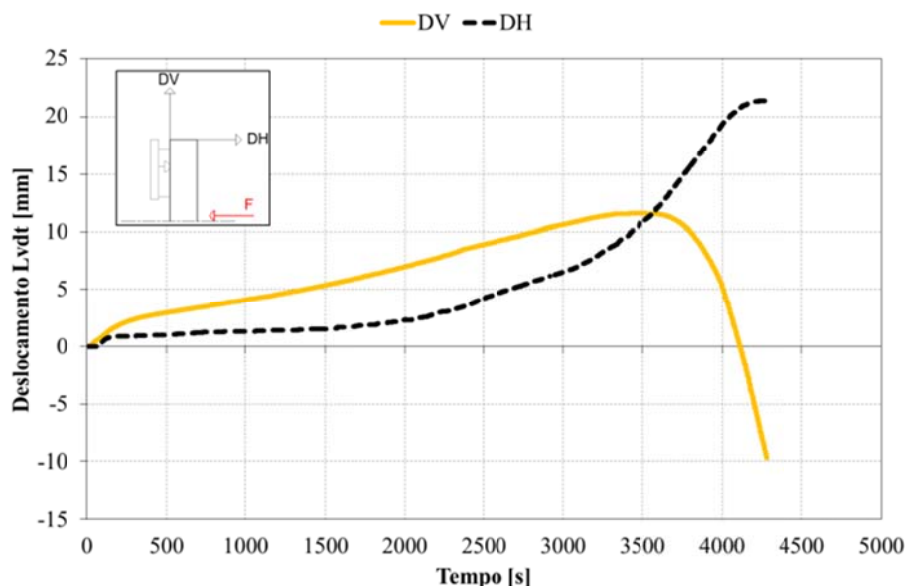


Gráfico 333 - Registro dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L8.

No Gráfico 334 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

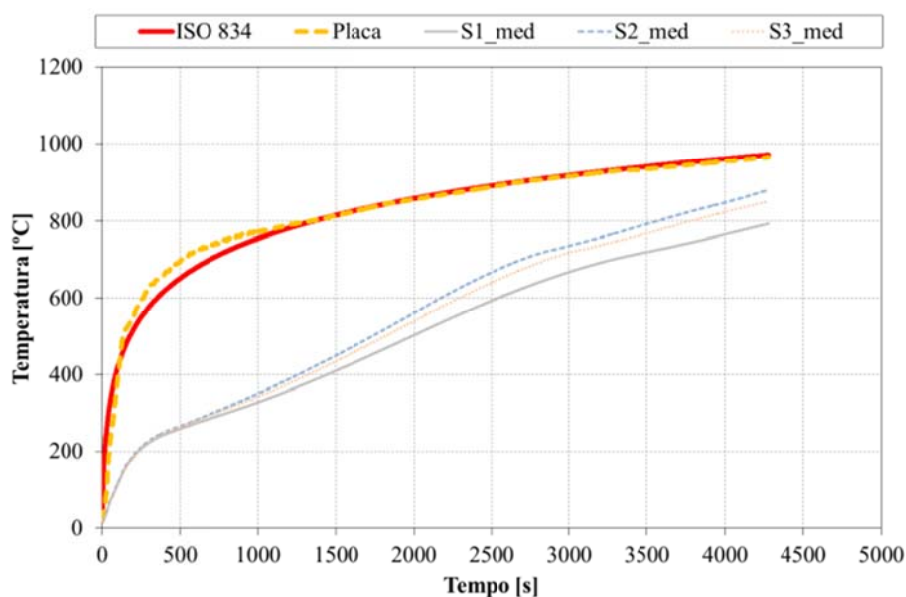


Gráfico 334 - Registro da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L8.



No Gráfico 335 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

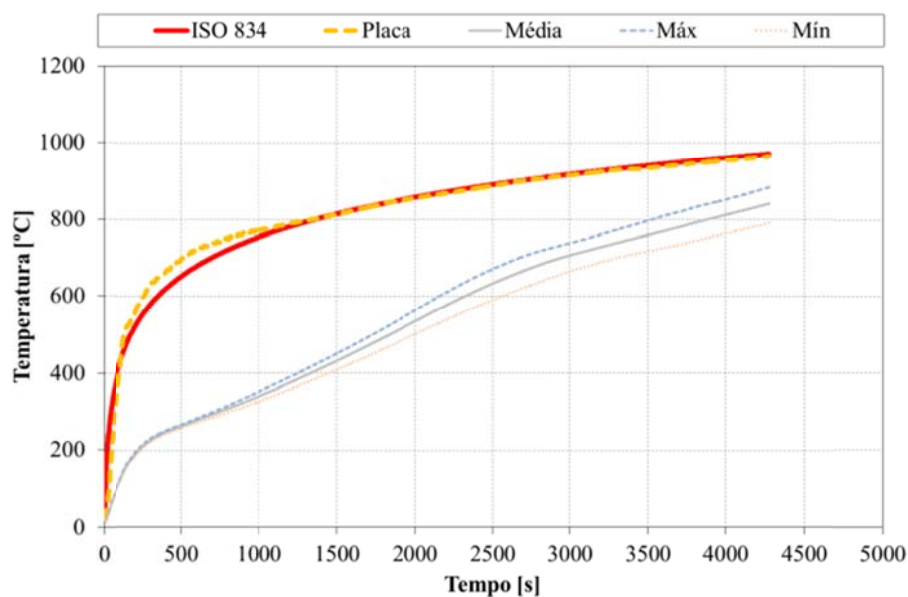


Gráfico 335 - Registro das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L8.

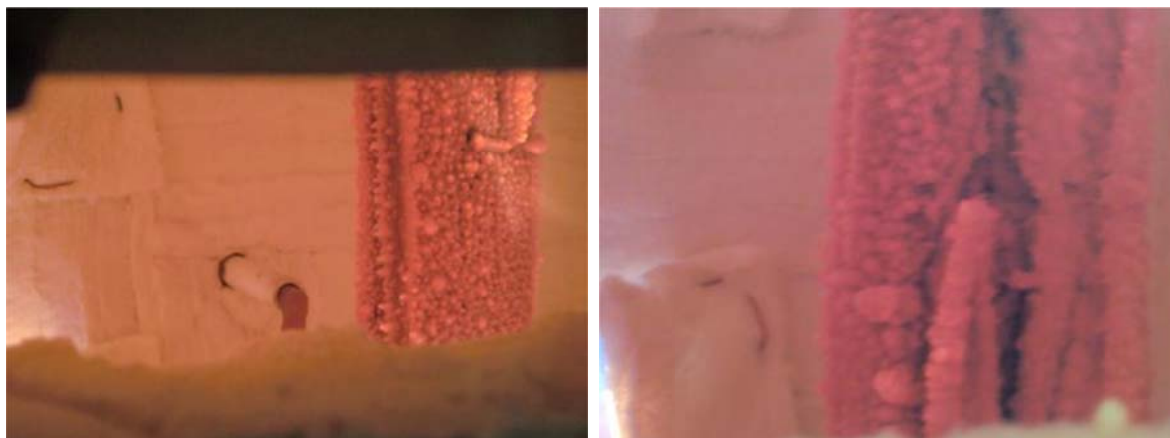


Figura 93 – Evolução do ensaio L8.

Na Figura 93 estão representados dois instantes do ensaio, à esquerda a vista do óculo esquerdo do forno e à direita a vista do óculo do lado direito.



Figura 94 – Deformada sofrida no ensaio L8.

Na Figura 94 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 56 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 747,38 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (L4), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 21 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 761,68 [°C].

#### 6.3.28. Ensaio L9 ( $\mu=50\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 08-09-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 584,67 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 9830 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 38 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

Tabela 38 - Valores de protecção para ensaio L9.

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1063	96	1271	825

No Gráfico 336 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio.

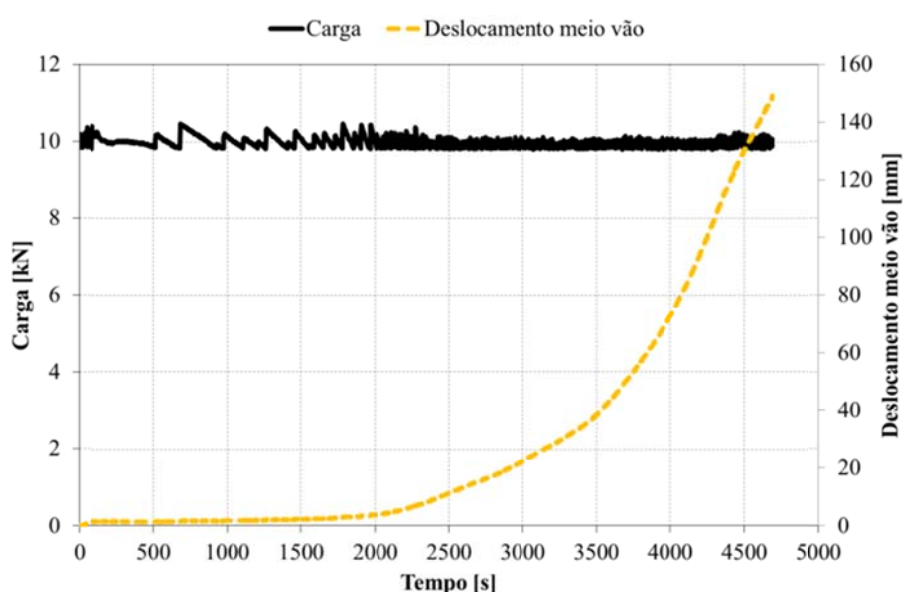


Gráfico 336 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio L9.

No Gráfico 337 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.

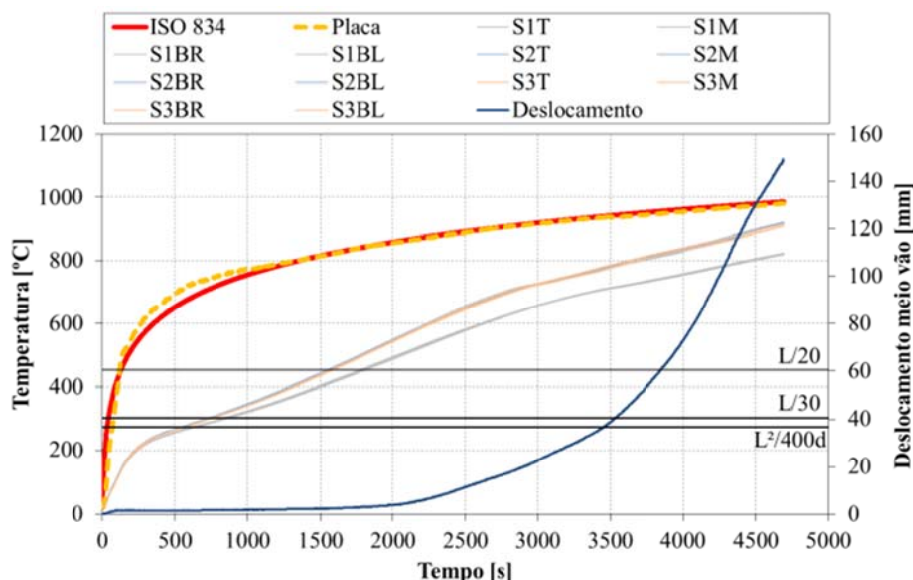


Gráfico 337 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio L9.

No Gráfico 338 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento sofre uma grande perturbação no mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

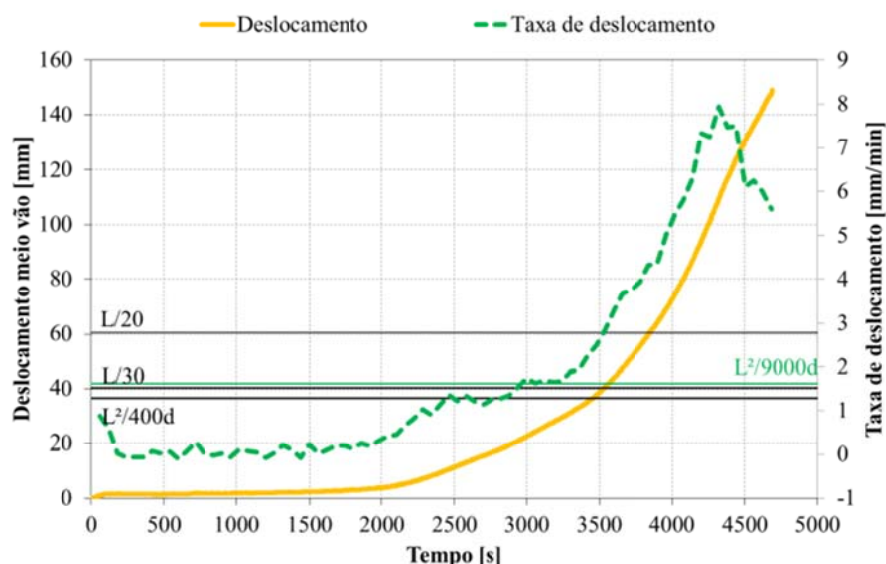


Gráfico 338 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L9.

No Gráfico 339 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da

curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 337, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência.

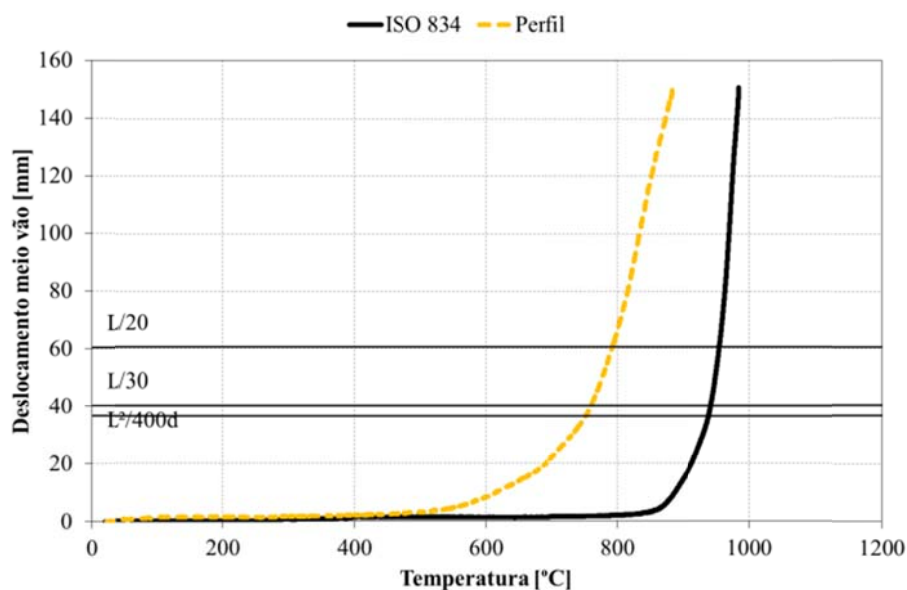


Gráfico 339 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L9.

No Gráfico 340 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior. A ocorrência de uma falha momentânea no registo de DV, é aproximadamente corrigida por uma linha de tendência representada no gráfico.

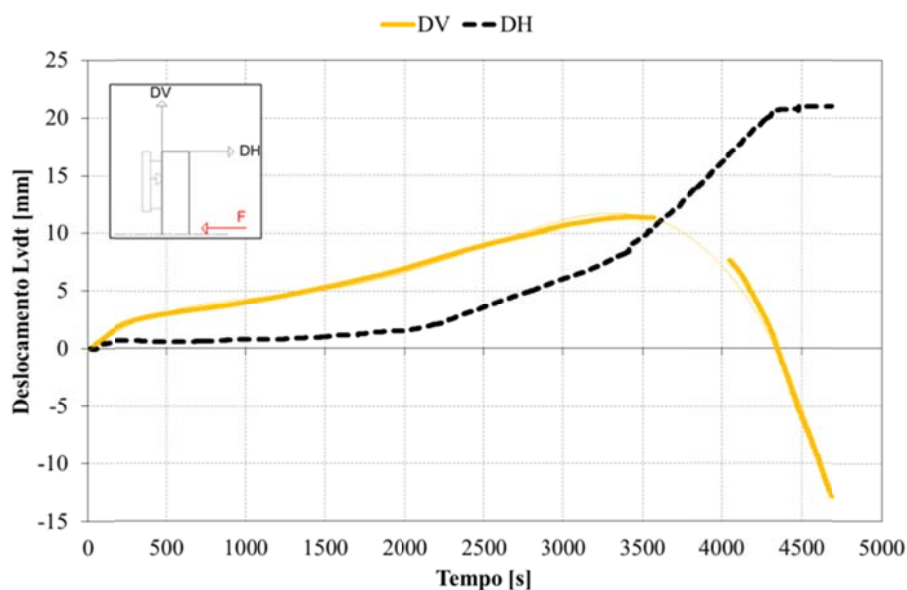


Gráfico 340 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L9.

No Gráfico 341 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

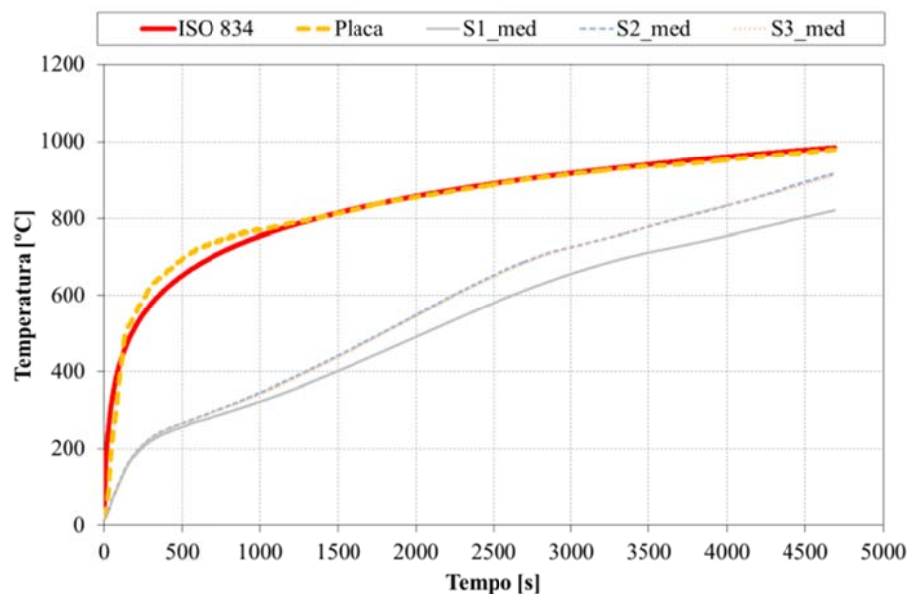


Gráfico 341 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L9.

No Gráfico 342 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

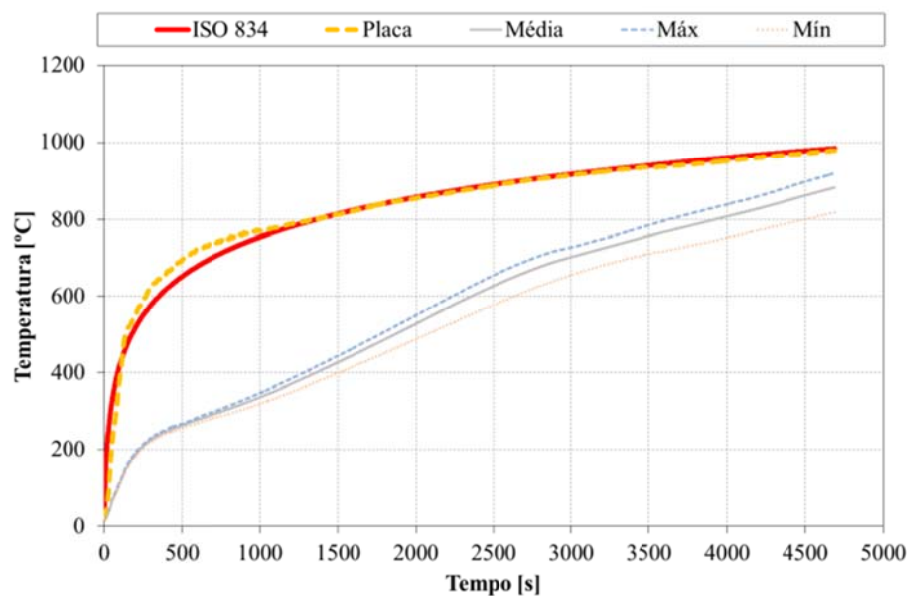
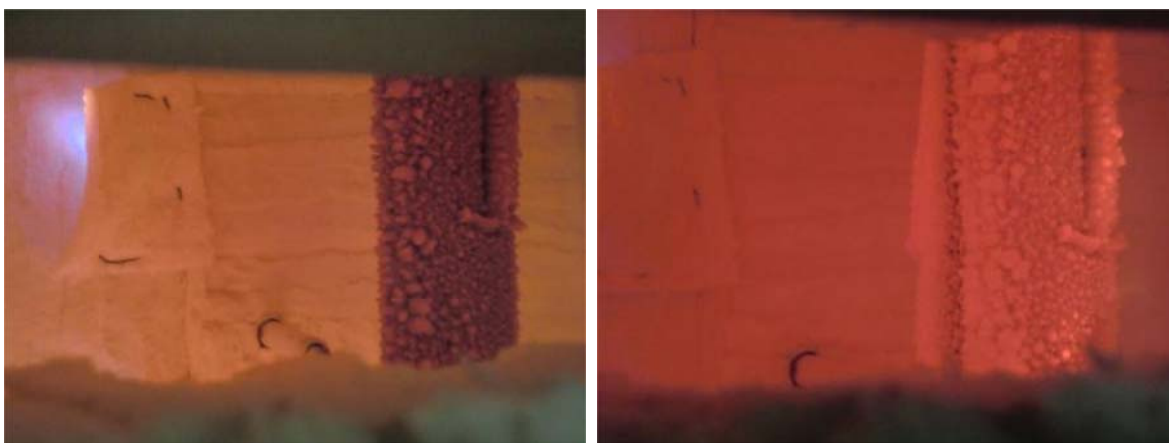


Gráfico 342 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L9.





**Figura 95 – Evolução do ensaio L9.**

Na Figura 95 estão representados dois instantes do ensaio, em que se pode observar a evolução da intumescência.



**Figura 96 – Deformada sofrida e camada de intumescência no ensaio L9.**

Na Figura 96 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio, observando-se a camada de intumescência formada.



O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 58 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 760,49 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (L4), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 21 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 761,68 [°C].

#### 6.3.29. Ensaio L10 ( $\mu=70\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 07-09-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=70\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 525,78 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 13610 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

Na Tabela 39 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 39 – Valores de protecção para ensaio L10.**

Espessura de tinta medida [ $\mu\text{m}$ ]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1135	118	1420	882

No Gráfico 343 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De registar uma perturbação no histograma de carga no momento em que o ponto de aplicação da carga sofre um grande aumento de velocidade (zona da pendente vertical).

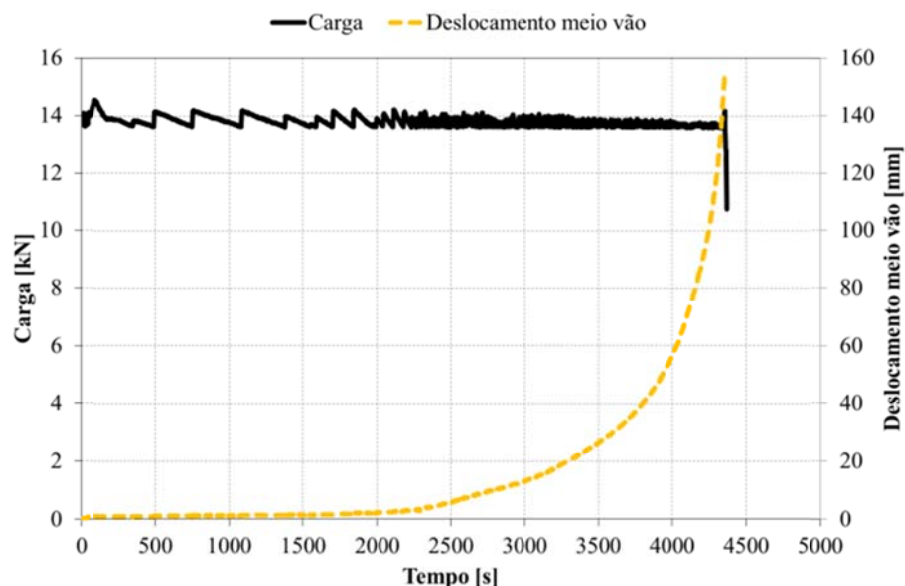


Gráfico 343 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio L10.

No Gráfico 344 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo.

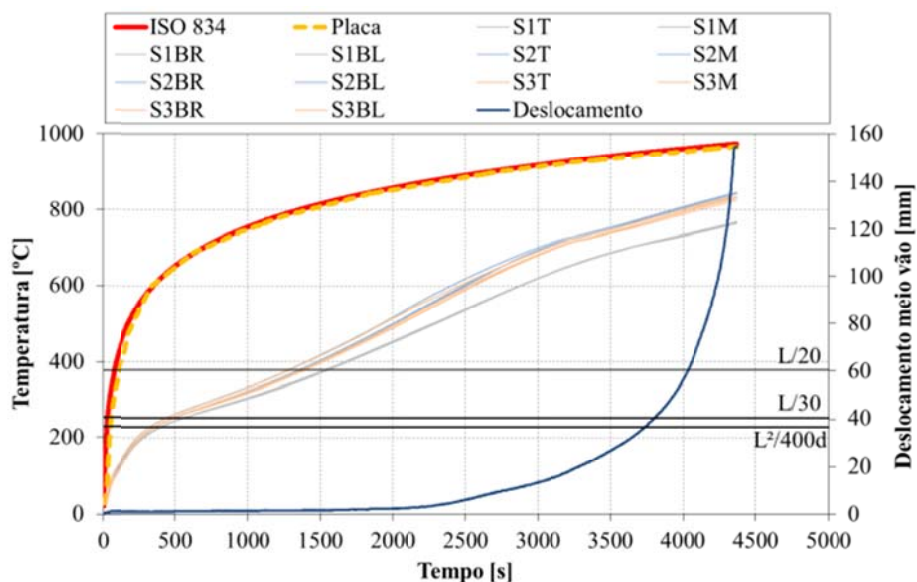


Gráfico 344 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio L10.

No Gráfico 345 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de

deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento aumenta com grande intensidade ao mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

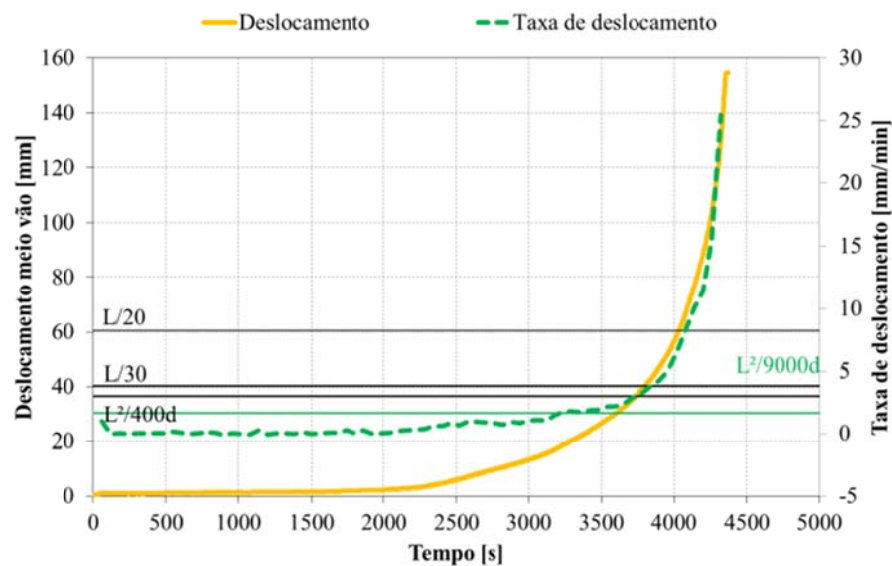


Gráfico 345 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L10.

No Gráfico 346 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 344, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência.

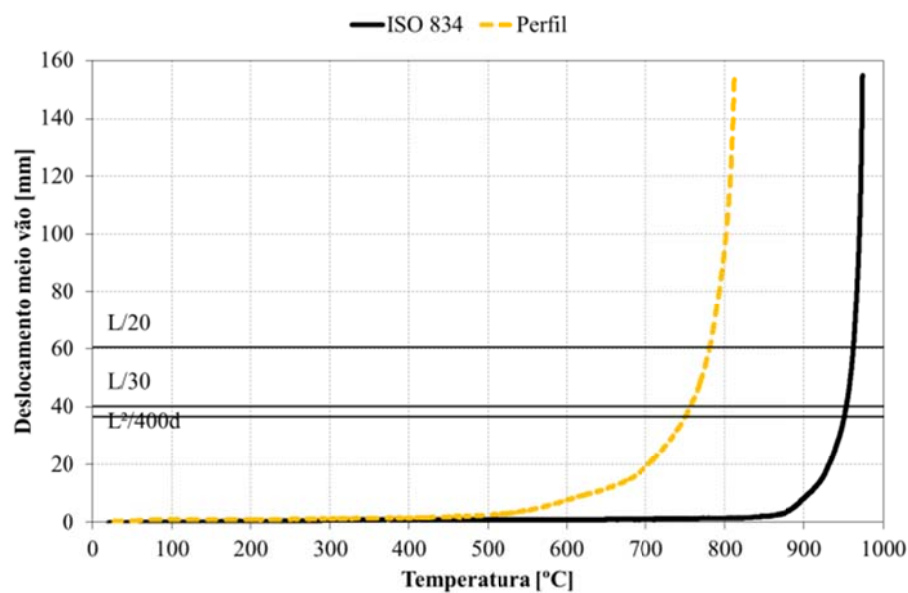


Gráfico 346 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L10.

No Gráfico 347 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior.

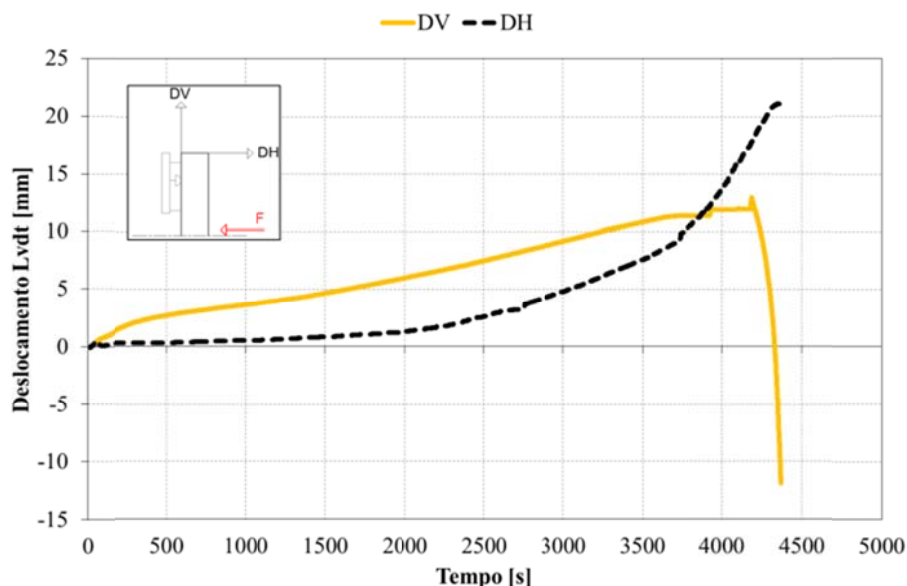


Gráfico 347 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L10.

No Gráfico 348 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Este resultado permite observar que na secção mais afastada do ponto de aplicação da carga (S1), tem uma evolução de temperatura inferior às duas restantes (S2 e S3), que estão localizadas próximas do meio vão, ver Figura 15.

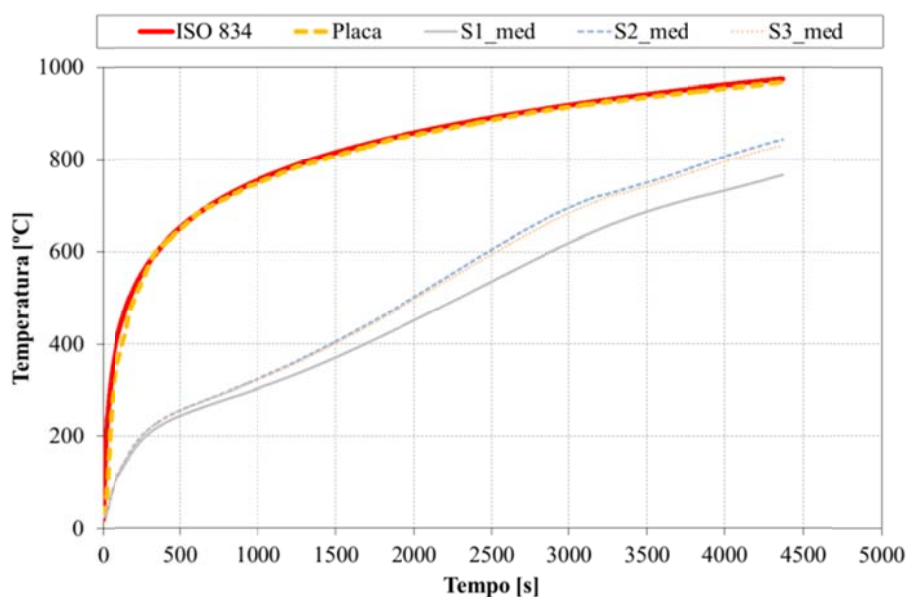


Gráfico 348 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L10.

No Gráfico 349 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

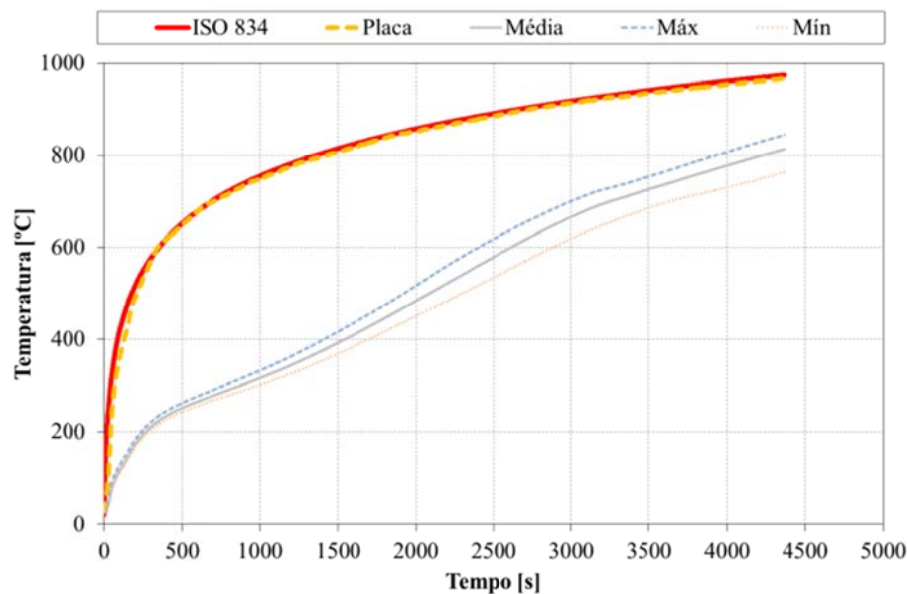
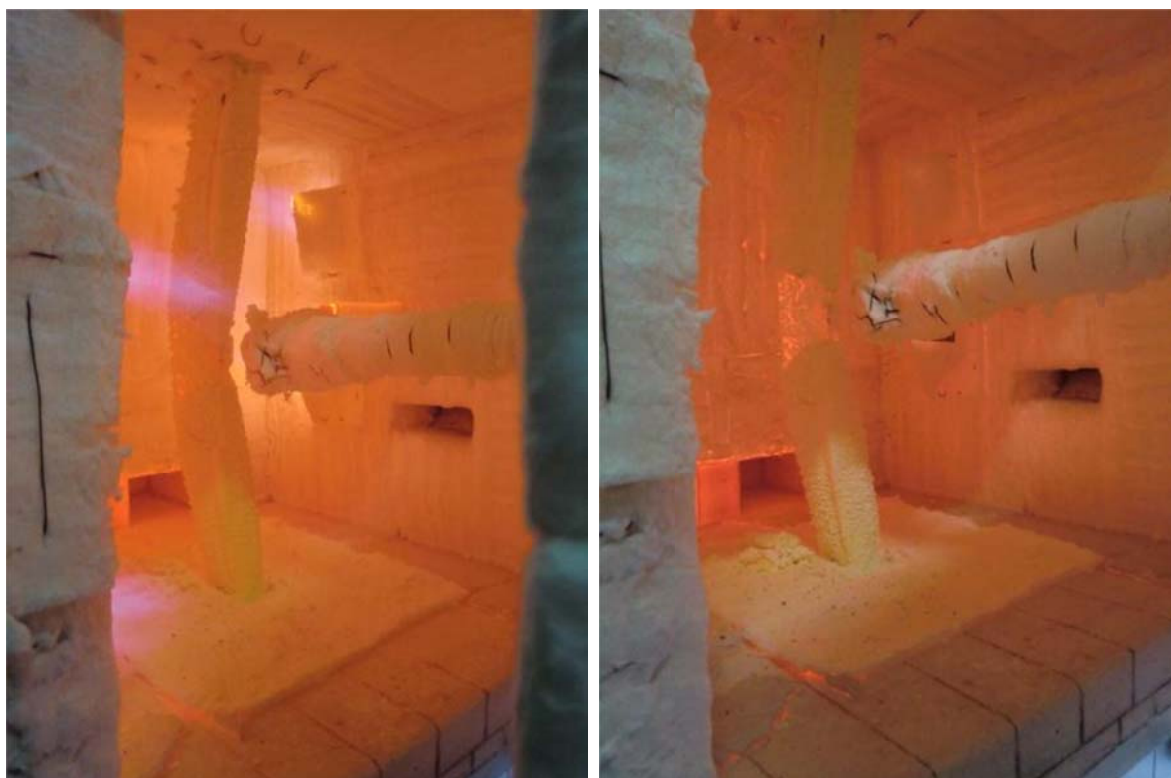


Gráfico 349 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L10.



Figura 97 – Evolução do ensaio L10.

Na Figura 97 estão representados dois instantes do ensaio, em que se pode observar a evolução da camada intumescente.



**Figura 98 – Deformada sofrida e camada formada de intumescência no ensaio L10.**

Na Figura 98 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio e a camada formada pelo processo de intumescência no perfil.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 63 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 756,97 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (L5), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 20 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 745,66 [°C].

#### 6.3.30. Ensaio L11 ( $\mu=70\%$ , protecção a 1 [mm])

Este elemento foi ensaiado a 07-09-2010 sujeito a uma curva de fogo padrão ISO834. Segundo os métodos simplificados de cálculo (1), um grau de utilização de  $\mu=70\%$ , determina-se uma temperatura crítica de 525,78 [°C]. A sua resistência última é o equivalente a uma força de 13610 [N]. A carga foi exercida no elemento de modo incremental estabelecida por patamares. Depois de estabilizada o valor da carga do ensaio, foi ligada a curva de fogo.

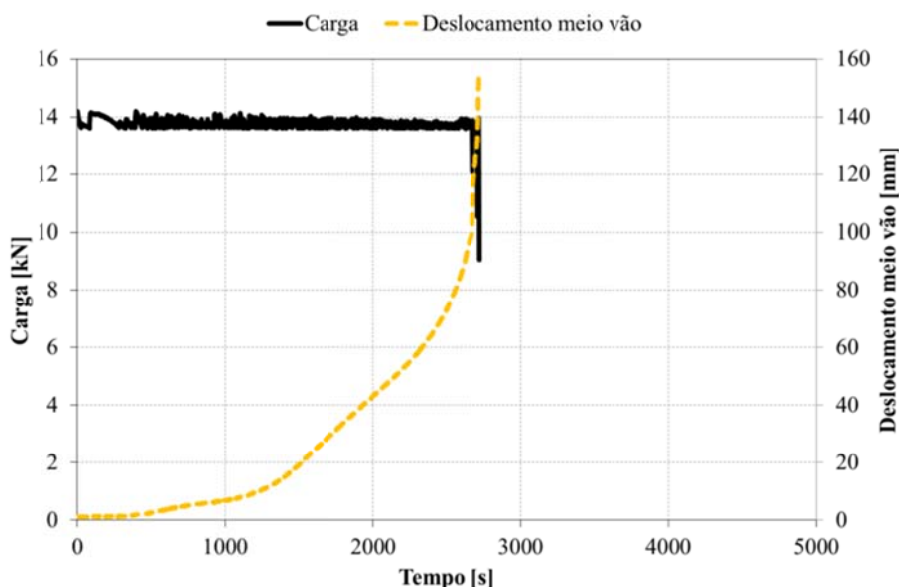


Na Tabela 40 estão descritos os valores de protecção de tinta, aplicado no elemento.

**Tabela 40 – Valores de protecção para ensaio L11.**

Espessura de tinta medida [ $\mu$ m]			
DFT	Desv. Padrão	Máx	Mín
1114	110	1377	953

No Gráfico 350 foi sobreposto o registo de deslocamento a meio vão com o histograma de carga desde o momento de ignição da curva de incêndio. De registar uma perturbação no histograma de carga no momento em que o ponto de aplicação da carga sofre um grande aumento de velocidade (zona da pendente vertical).



**Gráfico 350 - Evolução da carga e do deslocamento a meio vão ao longo do ensaio L11.**

No Gráfico 351 estão registadas as temperaturas medidas nas três secções do elemento. A curva de forno segue a curva de fogo ISO834, dentro dos limites da norma (4). Ainda a par das temperaturas, estão representados os valores de deslocamento do ponto de aplicação da carga e os patamares dos critérios de resistência ao fogo. Pode-se observar o momento em que o fenómeno de retracção da tinta teve efeito na evolução das temperaturas.



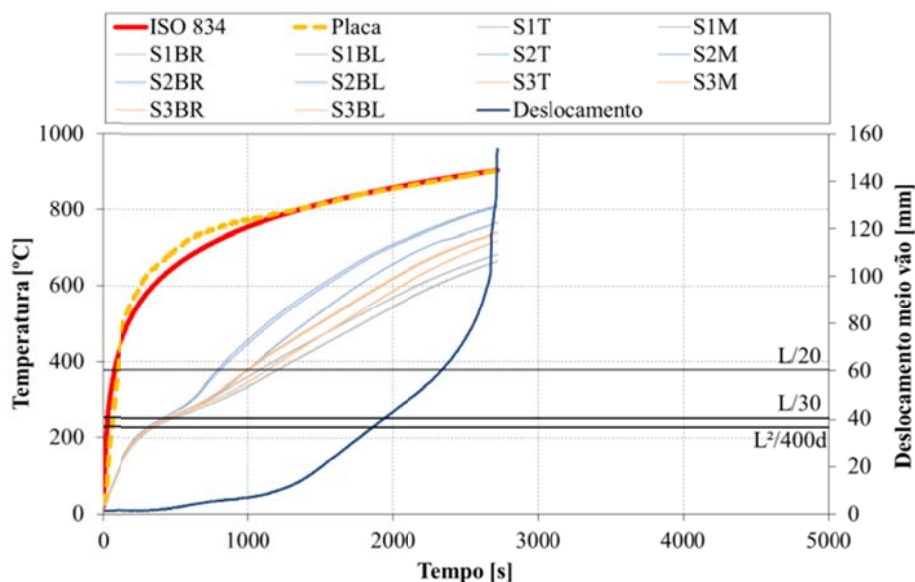


Gráfico 351 - Evolução das temperaturas na secção e do deslocamento a meio vão para o ensaio L11.

No Gráfico 352 está representada a taxa de deslocamento do ponto de aplicação de carga, localizado a meio vão, em conjunto os valores de deslocamento desse ponto. De salientar que o registo da taxa de deslocamento aumenta com grande intensidade ao mesmo momento em que se regista uma grande velocidade de deslocamento, ainda nesse instante é atingido o limite de resistência ao fogo do elemento.

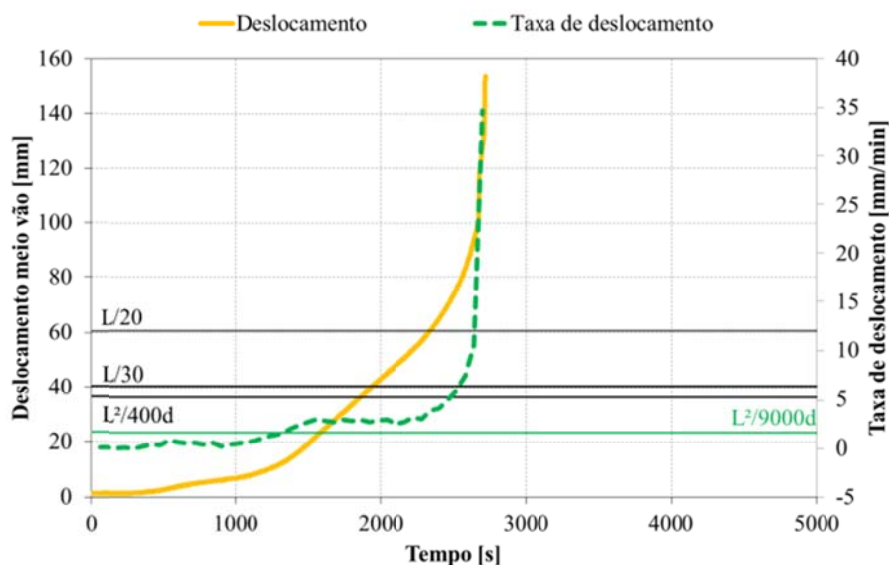


Gráfico 352 - Registo da taxa de deslocamento a meio vão ao longo do tempo para L11.

No Gráfico 353 está representada a evolução do deslocamento do ponto de aplicação de carga, em função da temperatura média no perfil e em função da curva de fogo ISO834. Como se observou no Gráfico 351, a curva de fogo ISO834, aproxima-se à temperatura média dentro do forno de resistência.

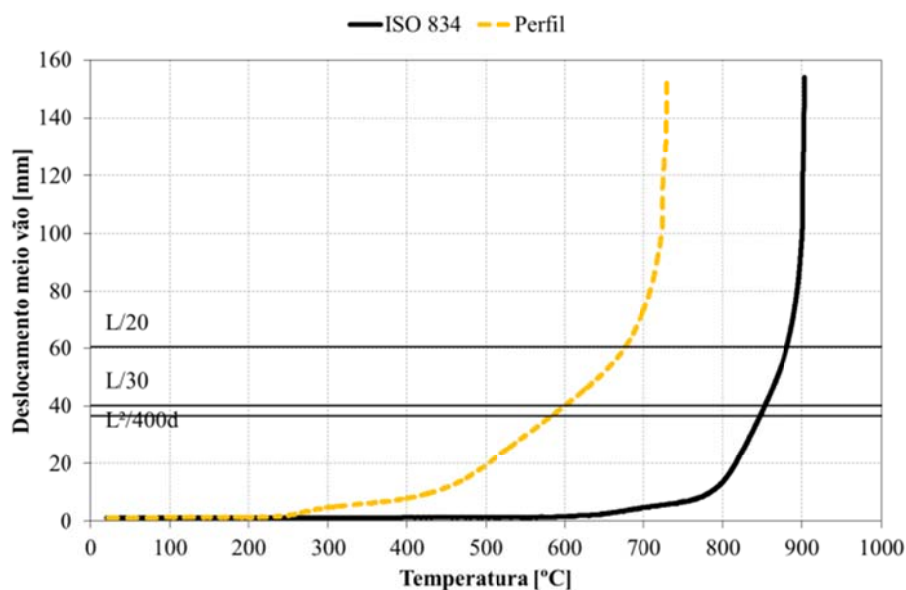


Gráfico 353 - Evolução do deslocamento ao longo do registo de temperaturas para o ensaio L11.

No Gráfico 354 estão representados os deslocamentos na extremidade do elemento. Devido ao aquecimento do elemento, ele expande, provocando o aumento de DV, posteriormente o valor diminui, provocado pelo estado de deformação imposto no perfil. Ao mesmo tempo que é imposta a deformação no perfil, o valor de DH aumenta, devido à rotação da secção no apoio superior.

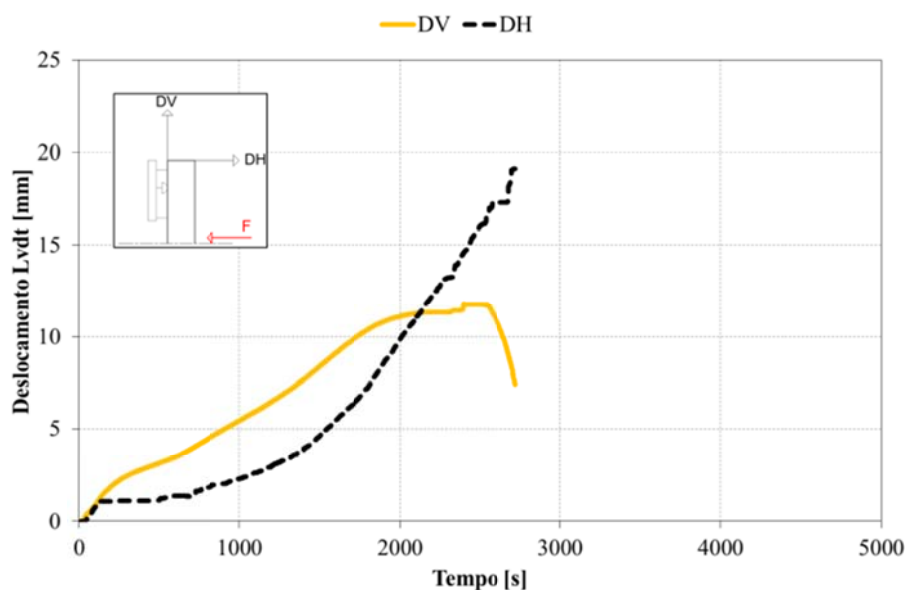


Gráfico 354 - Registo dos LVDT's ao longo do tempo para o ensaio L11.

No Gráfico 355 estão representados os valores médios, medidos nas três secções. Observa-se uma maior evolução da secção 2 devido ao fenómeno de retracção da tinta naquela zona.

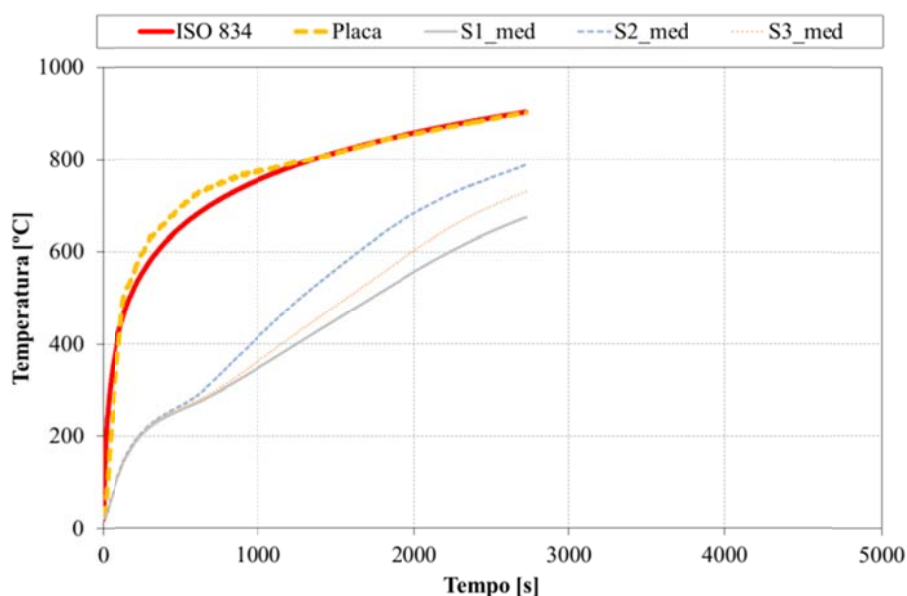


Gráfico 355 - Registo da evolução das temperaturas médias nas secções ao longo do tempo para L11.

No Gráfico 356 estão representados os valores máximos e mínimos, a par do valor médio de temperatura medida nas secções do perfil.

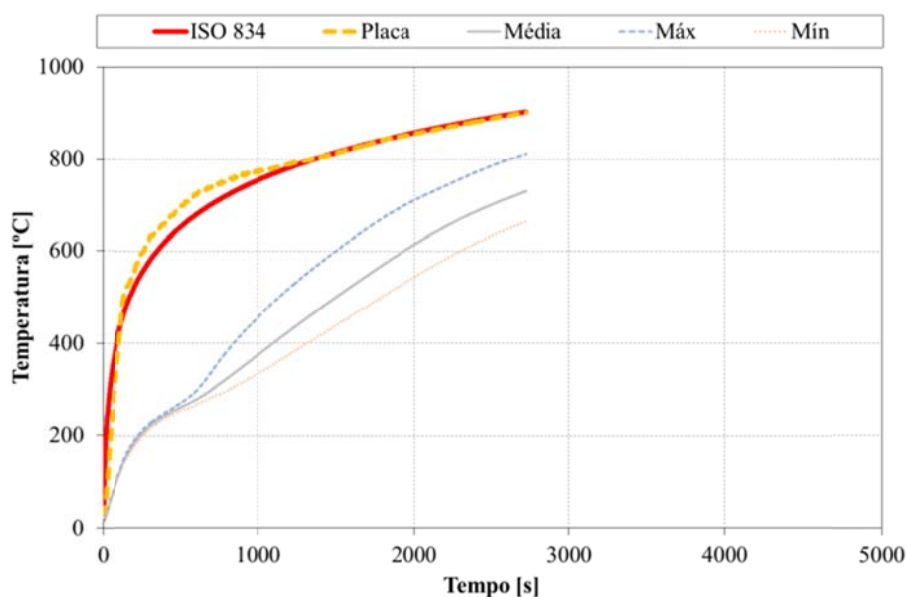


Gráfico 356 - Registo das temperaturas relevantes no perfil ao longo do tempo para o ensaio L11.

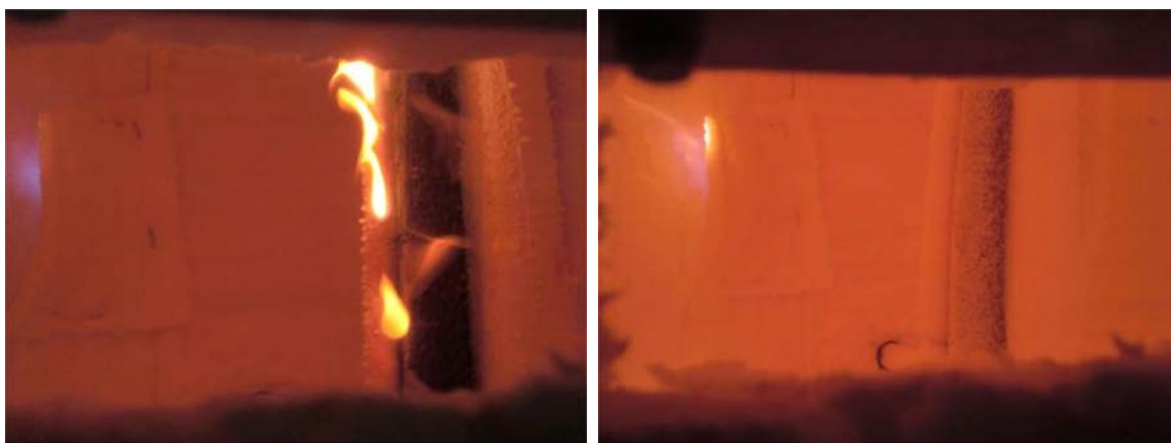


Figura 99 – Evolução do ensaio L11.

Na Figura 99 estão representados dois instantes do ensaio, em que se pode observar a evolução da camada intumescente, assim como o fenómeno de retracção da camada intumescente no banzo maior.



Figura 100 – Deformada sofrida no ensaio L11.

Na Figura 100 está representada a deformação imposta no elemento no final do ensaio e a camada formada pelo processo de intumescência no perfil.

Observa-se também o resultado do fenómeno de retracção da camada intumescente.

O modo de colapso deste elemento foi por encurvadura lateral torsional, com um valor de resistência ao fogo de 32 minutos (em minutos completos). A temperatura crítica foi determinada para o instante de colapso em 600,68 [°C].

No ensaio experimental sem protecção (L5), o elemento apresenta um valor de resistência ao fogo de 20 minutos (em minutos completos), e uma temperatura crítica para o instante de colapso de 745,66 [°C].

#### 6.3.31. Ensaio L12 ( $\mu=50\%$ , protecção a 2 [mm])

Este elemento não foi ensaiado, por falta de material de protecção.

#### 6.3.32. Ensaio L13 ( $\mu=50\%$ , protecção a 2 [mm])

Este elemento não foi ensaiado, por falta de material de protecção.

## 7. Comparação de resultados.

### 7.1. Ensaaios à temperatura ambiente.

#### 7.1.1. Secção IPE 100

Neste ponto apresenta-se uma comparação de dois ensaios da secção transversal IPE 100, à temperatura ambiente (I1 e I2).

Para estes ensaios, era esperada uma capacidade resistente à instabilidade por encurvadura lateral torsional de 31840 [N], determinada pelos cálculos nominais. Nos gráficos seguintes apresenta-se uma comparação de resultados nos dois ensaios realizados. A diferença que se verifique entre o método simplificado de cálculo (2) e os ensaios, pode ser justificada pela diferença das

propriedades nominais e reais dos materiais e secções, assim como pelo definido para o estado limite último (ELT).

No Gráfico 357 é representada a evolução da força no tempo. O ensaio I2 teve uma duração menor em comparação com o tempo de ensaio I1. De salientar que os incrementos de força nos dois ensaios foram semelhantes.

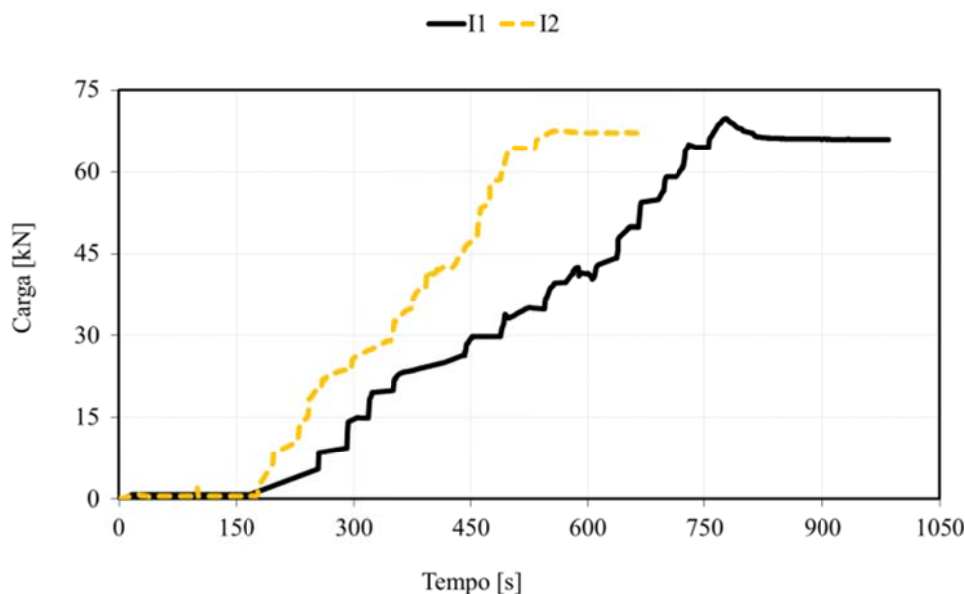


Gráfico 357 - Comparação entre patamares da aplicação de força para I1 e I2.

No Gráfico 358, apresenta-se os resultados de força versus deslocamento, que coincidem na sua evolução, com uma pequena diferença no valor de carga máxima.

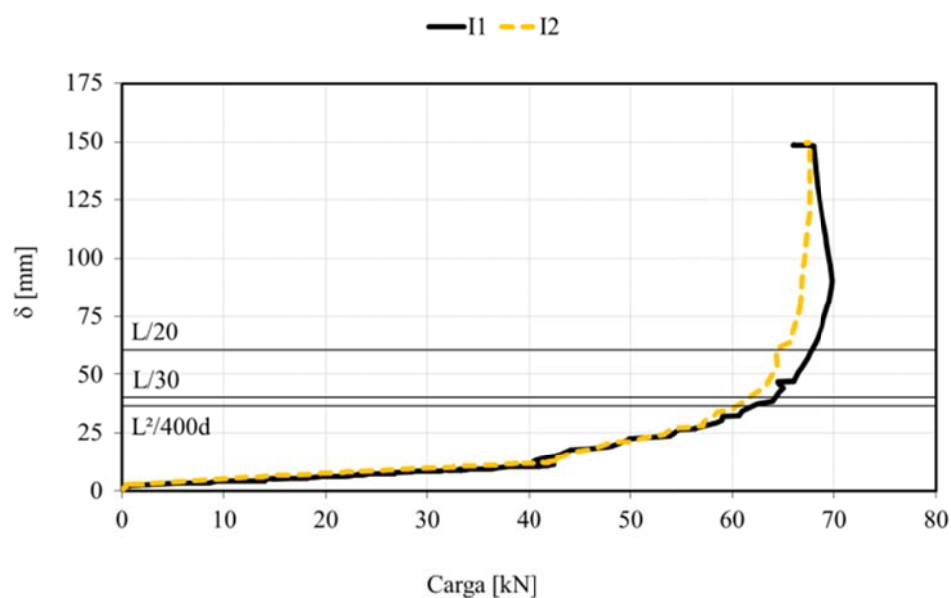
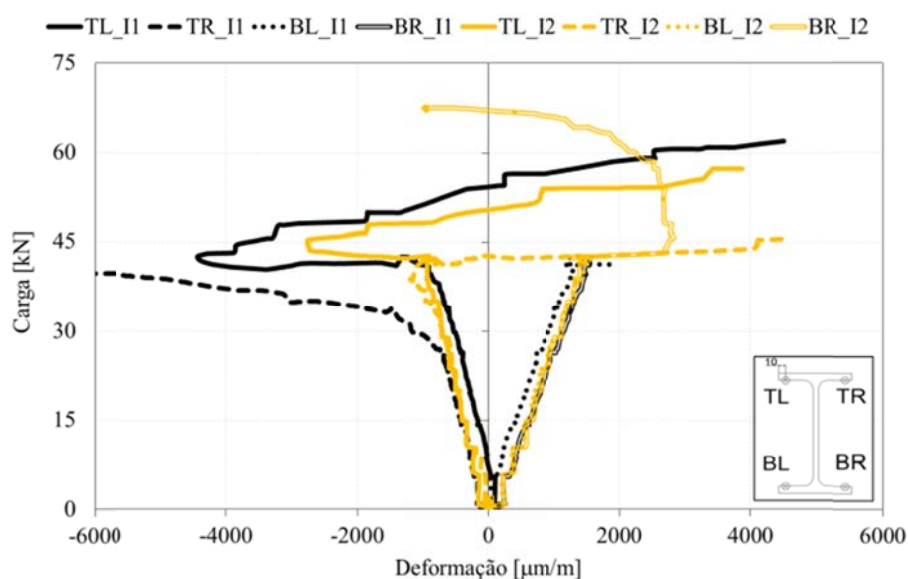


Gráfico 358 - Comparação entre I1 e I2 para força/deslocamento.

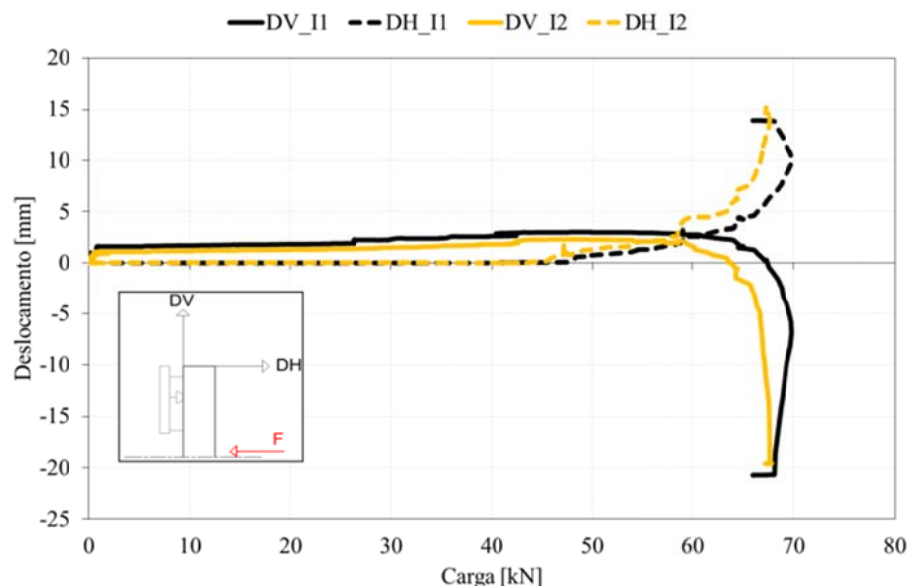
No Gráfico 359 é efectuada a comparação das deformações registadas durante os dois ensaios. Pela observação do gráfico, pode-se afirmar um comportamento semelhante, os valores de TL e TR encontram-se comprimidos inicialmente, passando depois a traccionados pelo fenómeno de encurvadura lateral torsional, os valores de BL e BR encontram-se sempre sujeitos a tracção.



**Gráfico 359 - Comparação entre as deformações nos ensaios I1 e I2.**

No Gráfico 360, apresenta-se a comparações dos resultados registados pelos LVDT's. Os registos foram idênticos 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 360 - Comparação entre os registos dos LVDT's em I1 e I2.**

O modo de colapso nos dois ensaios foi idêntico, tendo ocorrendo um fenómeno de encurvadura lateral torsional, a par de um deslocamento lateral da secção para a esquerda, visto do ponto de aplicação da carga. Na Figura 101, observa-se a comparação entre estes ensaios e o seu estado de deformação final.



**Figura 101 – Reunião dos ensaios I1 e I2.**

7.1.2. Secção SHS 100x100x4.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de dois ensaios da secção transversal SHS 100x100x4, à temperatura ambiente (S1 e S2).

Para estes ensaios, era esperada uma capacidade resistente à flexão de 42980 [N], determinada pelos cálculos nominais. Nos gráficos seguintes apresenta-se uma comparação de resultados nos dois ensaios realizados. A diferença que se verifique entre o método simplificado de cálculo (2) e os ensaios, pode ser justificada pela diferença das propriedades nominais e reais dos materiais e secções, assim como pelo definido para o estado limite último (ELT).

No Gráfico 361 é representada a evolução da força no tempo. O ensaio S2 teve uma duração menor em comparação com o tempo de ensaio S1. De salientar que os incrementos de força nos dois ensaios foram semelhantes.

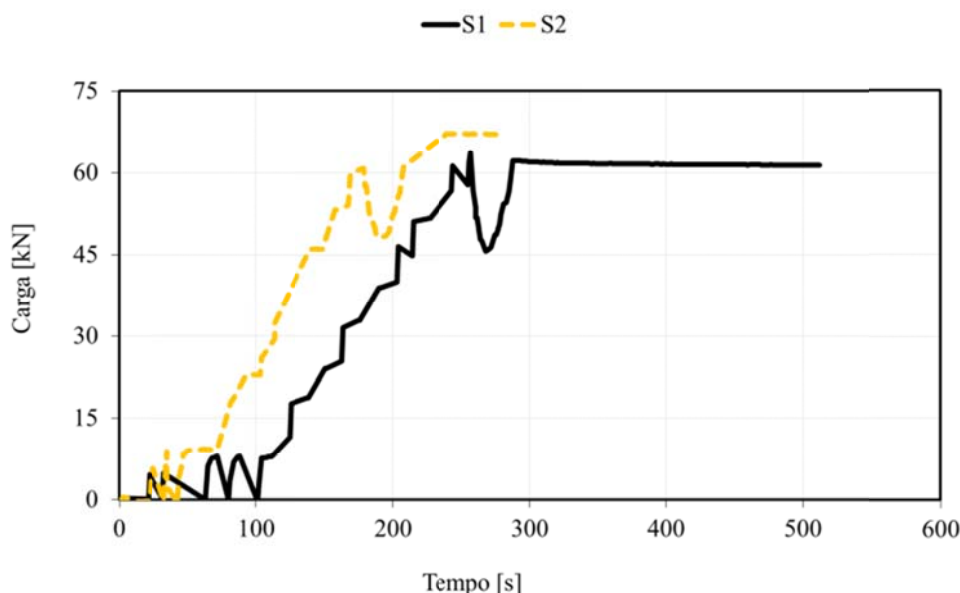
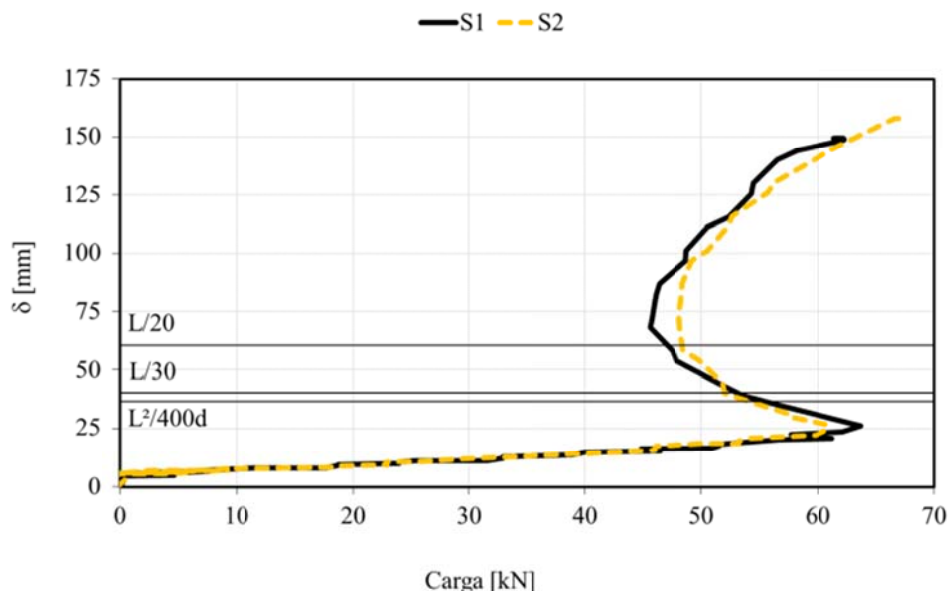


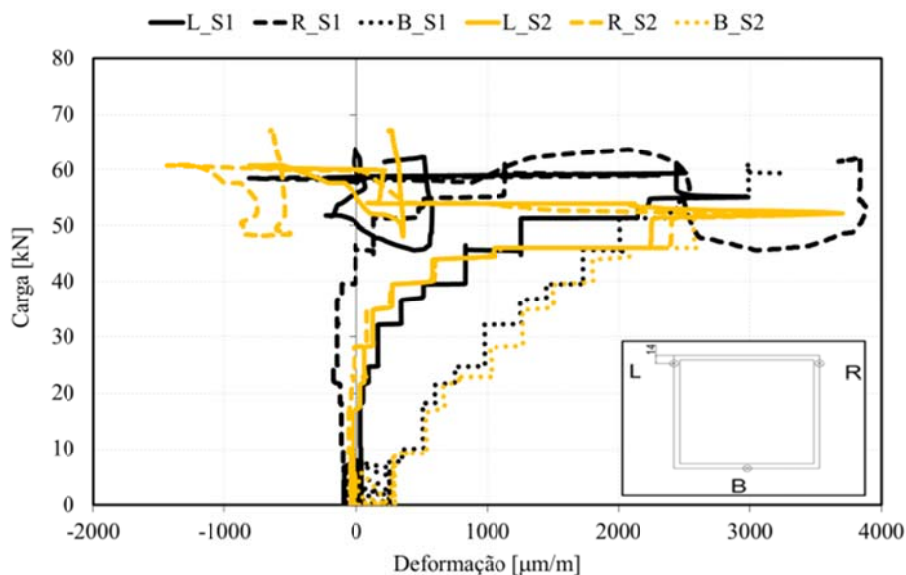
Gráfico 361 - Comparação entre patamares da aplicação de força para S1 e S2.

No Gráfico 374, apresenta-se os resultados de força versus deslocamento, que coincidem na sua evolução, com uma pequena diferença no valor de carga máxima.



**Gráfico 362 - Comparação entre S1 e S2 para força/deslocamento.**

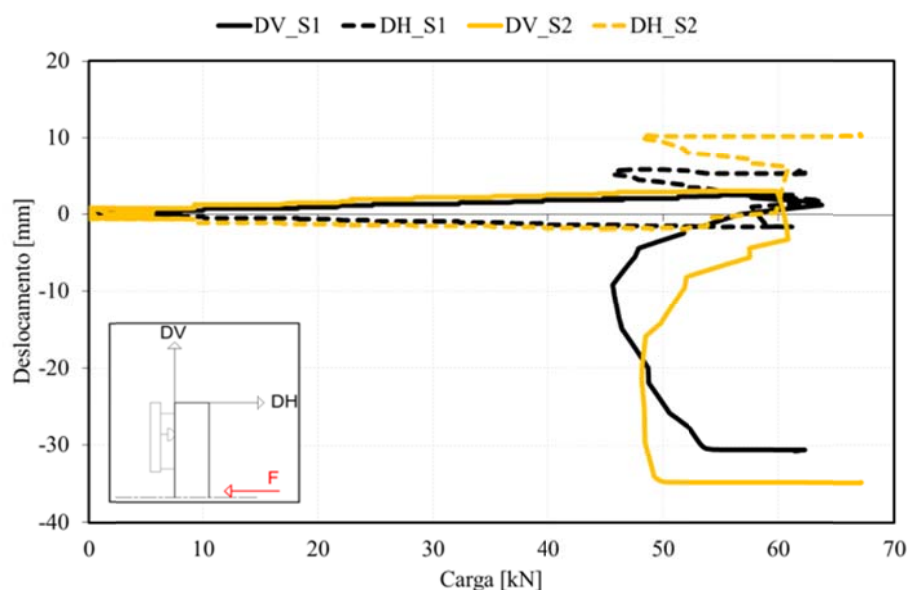
No Gráfico 375 é efectuada a comparação das deformações registadas durante os dois ensaios. Pela observação do gráfico, pode-se afirmar um comportamento semelhante, todos os pontos têm uma evolução para valores de tracção, exceptuando os valores de L e R que inicialmente apresentam valores de compressão.



**Gráfico 363 - Comparação entre as deformações nos ensaios S1 e S2.**

No Gráfico 364, apresenta-se a comparações dos resultados registados pelos LVDT's. Os registos foram idênticos 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 364 - Comparação entre os registos dos LVDT's em S1 e S2.**

O modo de colapso nos dois ensaios foi idêntico, tendo ocorrendo uma rótula plástica. Na Figura 102, observa-se a comparação entre estes ensaios e o seu estado de deformação final.



**Figura 102 – Reunião dos ensaios S1 e S2.**

### 7.1.3. Secção CHS 101,6x4,05.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de dois ensaios da secção transversal CHS 101,6x4,05, à temperatura ambiente (C1 e C2).

Para estes ensaios, era esperada uma capacidade resistente à flexão de 29370 [N], determinada pelos cálculos nominais. Nos gráficos seguintes apresenta-se uma comparação de resultados nos dois ensaios realizados. A diferença que se verifique entre o método simplificado de cálculo (2) e os ensaios, pode ser justificada pela diferença das propriedades nominais e reais dos materiais e secções, assim como pelo definido para o estado limite último (ELT).

No Gráfico 365 é representada a evolução da força no tempo. O ensaio C2 teve uma duração menor em comparação com o tempo de ensaio C1. De salientar que os incrementos de força nos dois ensaios foram semelhantes.

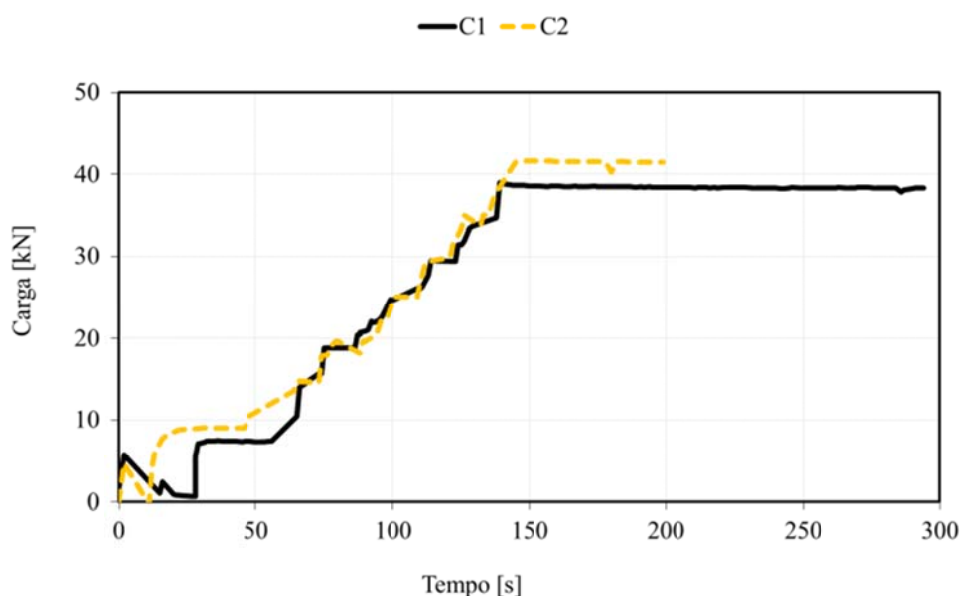


Gráfico 365 - Comparação entre patamares da aplicação de força para C1 e C2.

No Gráfico 366, apresenta-se os resultados de força versus deslocamento, que coincidem na sua evolução, com uma pequena diferença no valor de carga máxima.

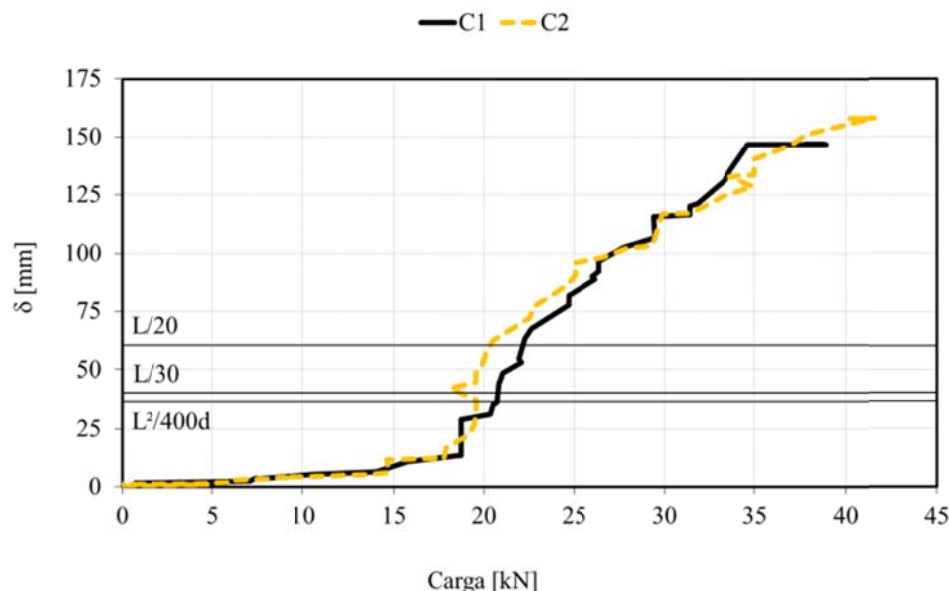


Gráfico 366 - Comparação entre C1 e C2 para força/deslocamento.

No Gráfico 367 é efectuada a comparação das deformações registadas durante os dois ensaios. Pela observação do gráfico, pode-se afirmar um comportamento semelhante, o ponto B tem uma evolução de tracção, os pontos L e R iniciam-se com valores de tracção e no final apresentam valores de compressão.

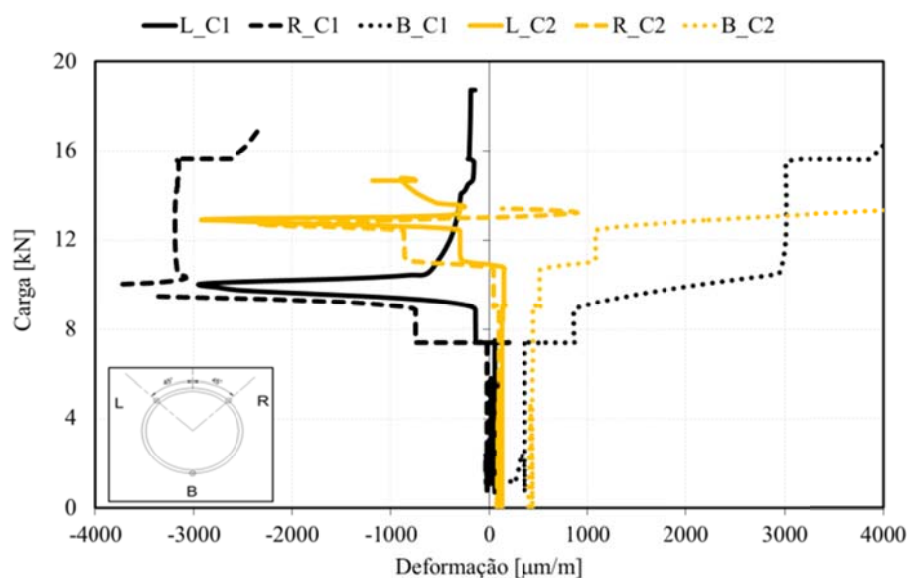


Gráfico 367 - Comparação entre as deformações nos ensaios C1 e C2.

No Gráfico 368, apresenta-se a comparações dos resultados registados pelos LVDT's. Os registos foram idênticos 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.

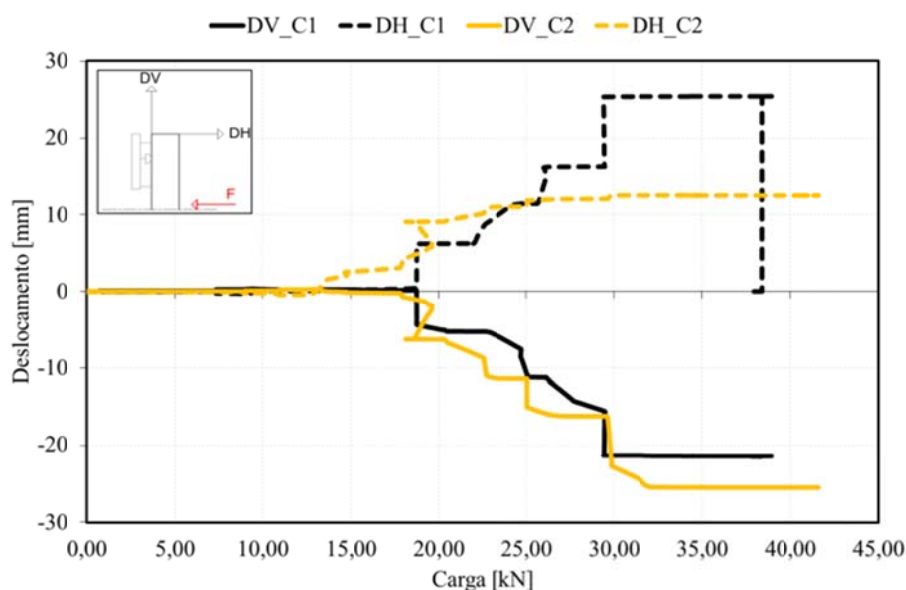


Gráfico 368 - Comparação entre os registos dos LVDT's em C1 e C2.

O modo de colapso nos dois ensaios foi idêntico, tendo ocorrendo uma rótula plástica. Na Figura 102, observa-se a comparação entre estes ensaios e o seu estado de deformação final.



Figura 103 – Reunião dos ensaios C1 e C2.

#### 7.1.4. Secção LNP 100x50x8

Neste ponto apresenta-se uma comparação de dois ensaios da secção transversal LNP 100x50x8, à temperatura ambiente (L1 e L2).



Para estes ensaios, era esperada uma capacidade resistente à instabilidade por encurvadura lateral torsional de 21690 [N], determinada pelos cálculos nominais. Nos gráficos seguintes apresenta-se uma comparação de resultados nos dois ensaios realizados. A diferença que se verifique entre o método simplificado de cálculo (2) e os ensaios, pode ser justificada pela diferença das propriedades nominais e reais dos materiais e secções, assim como pelo definido para o estado limite último (ELT).

No Gráfico 369 é representada a evolução da força no tempo. O ensaio L2 teve uma duração menor em comparação com o tempo de ensaio L1. De salientar que os incrementos de força nos dois ensaios foram semelhantes.

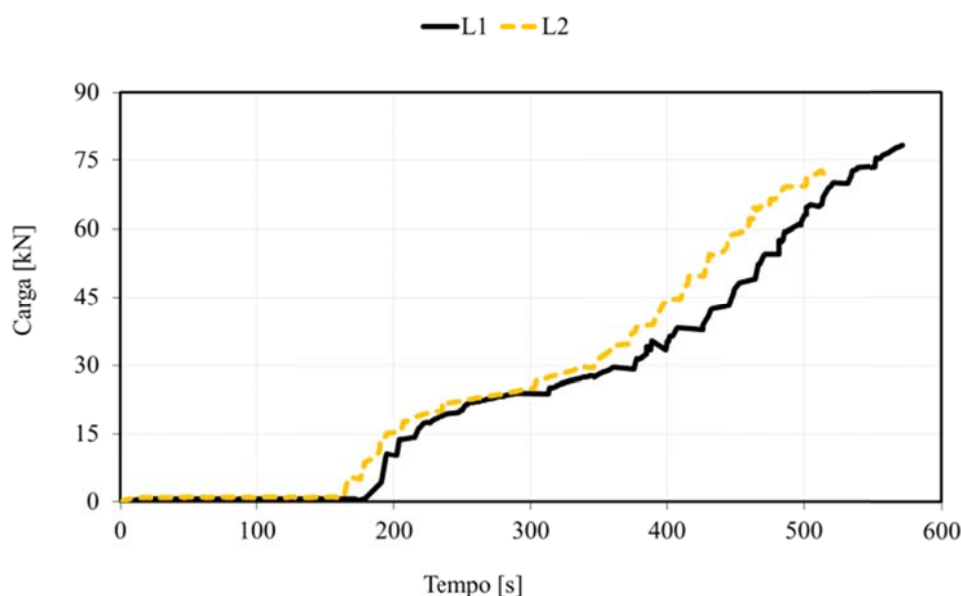


Gráfico 369 - Comparação entre patamares da aplicação de força para L1 e L2.

No Gráfico 370, apresenta-se os resultados de força versus deslocamento, que coincidem na sua evolução, com uma pequena diferença no valor de carga máxima.

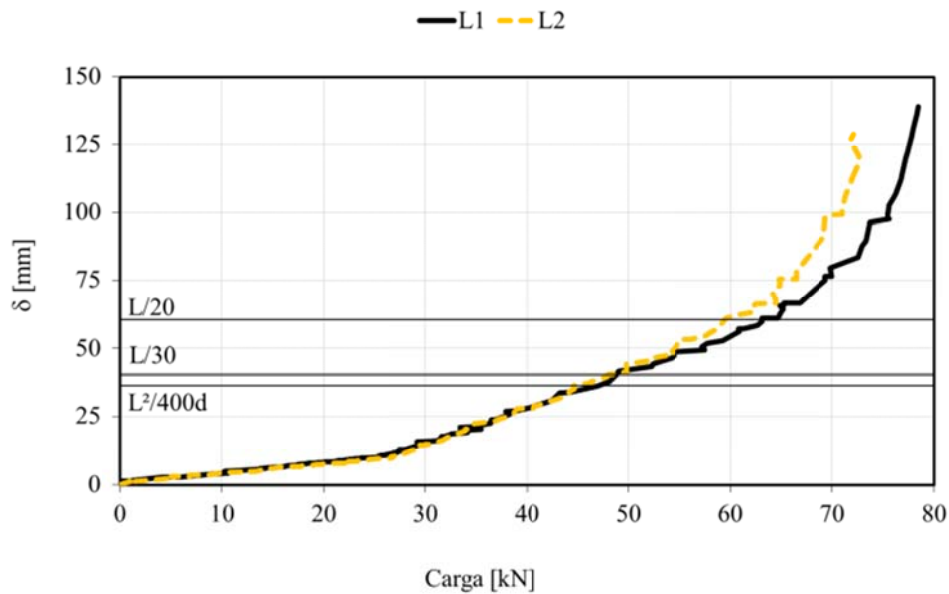


Gráfico 370 - Comparação entre L1 e L2 para força/deslocamento.

No Gráfico 371 é efectuada a comparação das deformações registadas durante os dois ensaios. Pela observação do gráfico, pode-se afirmar um comportamento semelhante, o valor de TL é o único que apresenta um valor de compressão, os restantes apresentam valores de tracção, sendo BL e BR os de maior intensidade.

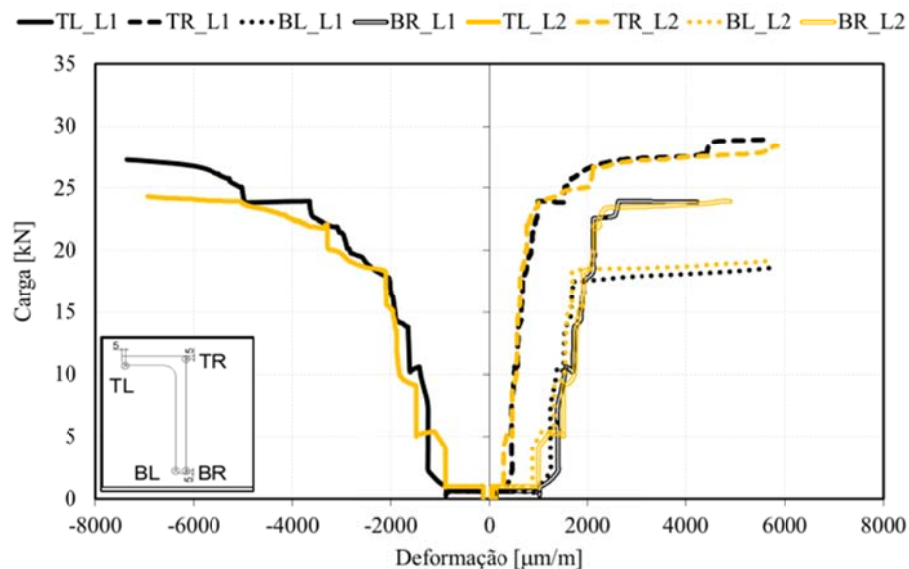
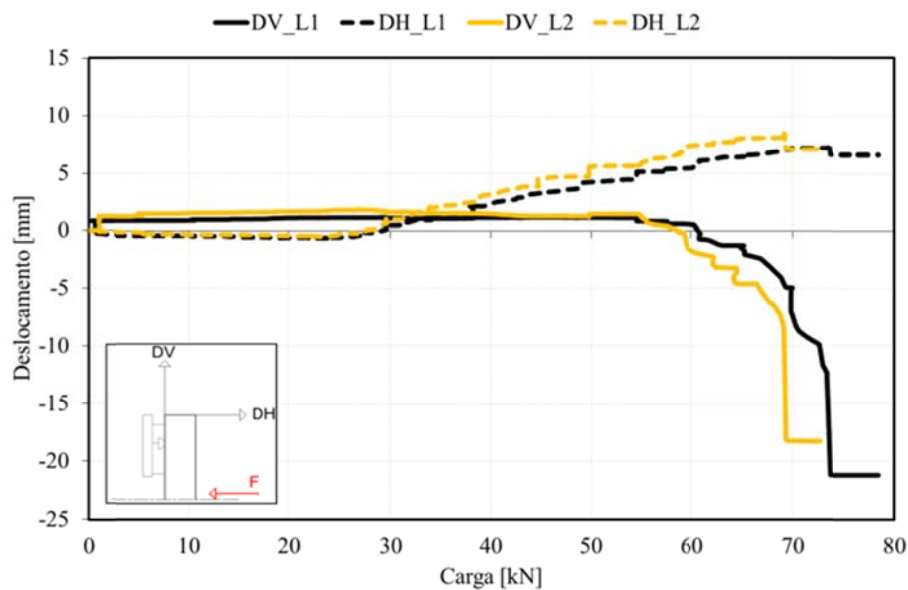


Gráfico 371 - Comparação entre as deformações nos ensaios L1 e L2.

No Gráfico 372, apresenta-se a comparações dos resultados registados pelos LVDT's. Os registos foram idênticos 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 372 - Comparação entre os registos dos LVDT's em L1 e L2.**

O modo de colapso nos dois ensaios foi idêntico, tendo ocorrendo um fenómeno de encurvadura lateral torsional, a par de um deslocamento lateral da secção para a direita, visto do ponto de aplicação da carga. Na Figura 104, observa-se a comparação entre estes ensaios e o seu estado de deformação final.



Figura 104 – Reunião dos ensaios L1 e L2.

## 7.2. Ensaio em condições de incêndio; sem protecção.

### 7.2.1. Secção IPE 100.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de três ensaios da secção transversal IPE 100, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834 (I3, I4 e I5).

Estes ensaios foram realizados em três graus de utilização, um para cada elemento,  $\mu=30\%$  para I3,  $\mu=50\%$  para I4 e  $\mu=70\%$  para I5. Para cada grau de utilização existe uma temperatura crítica,  $663,78\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $\mu=30\%$ ,  $584,67\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $\mu=50\%$  e  $525,78\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $\mu=70\%$ , foi depois determinada uma carga resistente a aplicar em função de cada temperatura crítica. Para esta secção as cargas a aplicar foram  $5340\text{ [N]}$  para I3,  $9180\text{ [N]}$  para I4 e  $12940\text{ [N]}$  para I5.

Nos gráficos seguintes apresenta-se uma comparação de resultados nos três ensaios realizados. A diferença que se verifique entre o método simplificado de cálculo (1) e os ensaios, pode ser justificada pela diferença das propriedades nominais e reais dos materiais e secções, assim como pelo definido para o estado limite último (ELT).

No Gráfico 373 está representado o histograma de carga utilizado em cada ensaio, assim como o deslocamento 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.

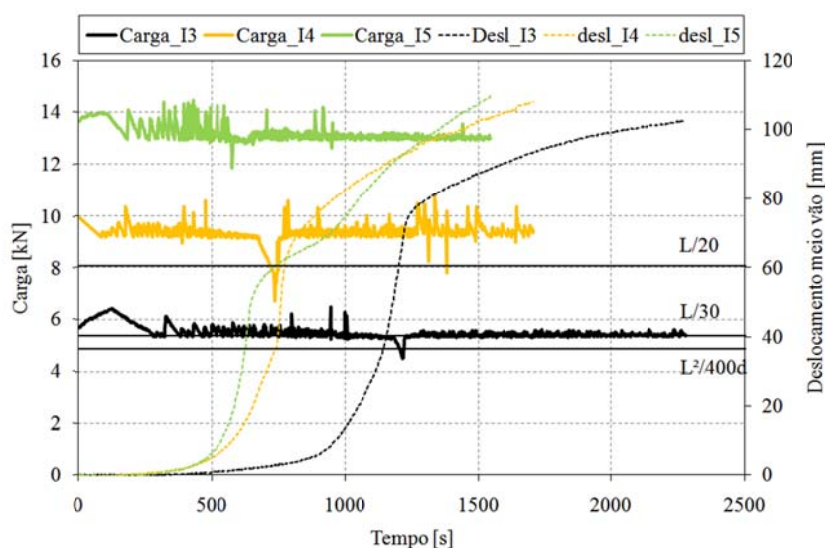


Gráfico 373 – Comparação entre I3, I4 e I5 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 374 observa-se a evolução das temperaturas em todo o ensaio, a par de evolução da temperatura nominal calculada pelos métodos simplificados (1). Pode-se aperceber a diferença entre o ensaio e o método simplificado. Ainda se encontram representados os deslocamentos do ponto de aplicação da carga para cada grau de utilização. A evolução das temperaturas nos diferentes graus de utilização é indiferente da sua condição, sendo os três da mesma secção.

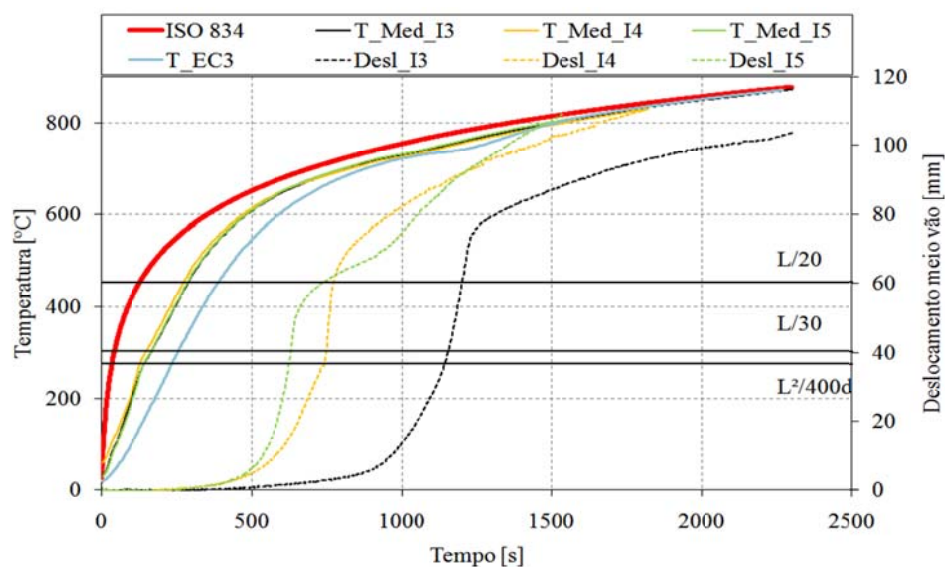


Gráfico 374 – Comparação entre I3, I4 e I5 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.

O deslocamento medido a meio vão, coincidente com o ponto de aplicação da carga, sofre uma grande variação quando o perfil atinge a temperatura crítica. Seguidamente a velocidade do ponto de aplicação da carga, diminui para um valor aproximadamente constante.

No Gráfico 375 apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura e o deslocamento a meio vão, para os diferentes graus de utilização. A temperatura crítica do elemento é determinada numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que o deslocamento para as temperaturas médias do perfil atinge o valor de  $L/30$ .

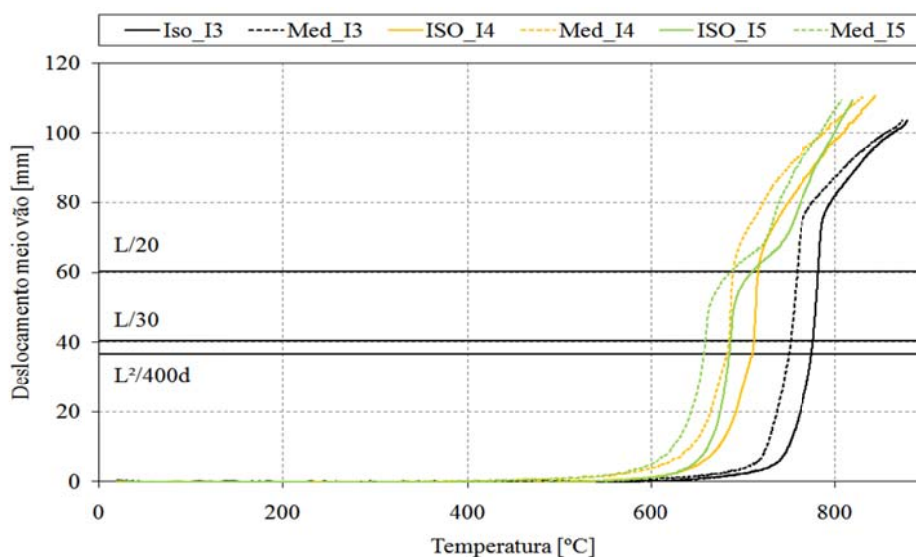


Gráfico 375 - Comparação entre I3, I4 e I5 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.

Todos os elementos atingiram um estado limite último por encurvadura lateral torsional, ver Figura 105.



Figura 105 - Deformação sofrida nos elementos IPE ao fogo, sem protecção.

#### 7.2.2. Secção SHS 100x100x4.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de três ensaios da secção transversal SHS 100x100x4, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834 (S3, S4 e S5).

Estes ensaios foram realizados em três graus de utilização, um para cada elemento,  $\mu=30\%$  para S3,  $\mu=50\%$  para S4 e  $\mu=70\%$  para S5. Para cada grau de utilização existe uma temperatura crítica, 663,78 [°C] para  $\mu=30\%$ , 584,67 [°C] para  $\mu=50\%$  e 525,78 [°C] para  $\mu=70\%$ , foi depois determinada uma carga resistente a aplicar em função de cada temperatura crítica. Para esta secção as cargas a aplicar foram 13620 [N] para S3, 22250 [N] para S4 e 30090 [N] para S5.

Nos gráficos seguintes apresenta-se uma comparação de resultados nos três ensaios realizados. A diferença que se verifique entre o método simplificado de cálculo (1) e os ensaios, pode ser justificada pela diferença das propriedades nominais e reais dos materiais e secções, assim como pelo definido para o estado limite último (ELT).

No Gráfico 376 está representado o histograma de carga utilizado em cada ensaio, assim como o deslocamento 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.

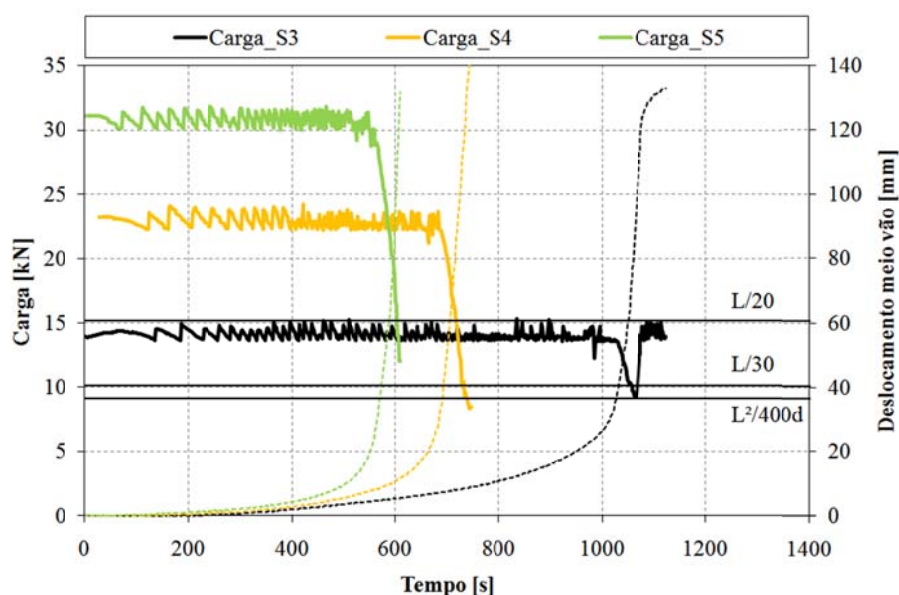


Gráfico 376 – Comparação entre S3, S4 e S5 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 377 observa-se a evolução das temperaturas em todo o ensaio, a par de evolução da temperatura nominal calculada pelos métodos simplificados (1). Pode-se aperceber a diferença entre o ensaio e o método simplificado. Ainda se encontram representados os deslocamentos do ponto de aplicação da carga para cada grau de utilização. A evolução das temperaturas nos diferentes graus de utilização é indiferente da sua condição, sendo os três da mesma secção.

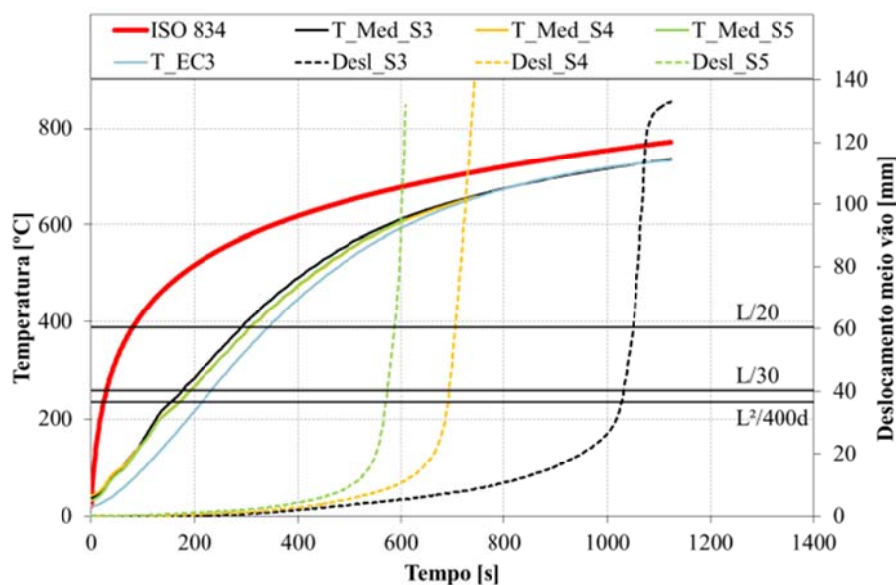


Gráfico 377 – Comparação entre S3, S4 e S5 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.

O deslocamento medido a meio vão, coincidente com o ponto de aplicação da carga, sofre uma grande variação quando o perfil atinge a temperatura crítica.

No **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura e o deslocamento a meio vão, para os diferentes graus de utilização. A temperatura crítica do elemento é determinada numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que o deslocamento para as temperaturas médias do perfil atinge o valor de  $L/30$ .

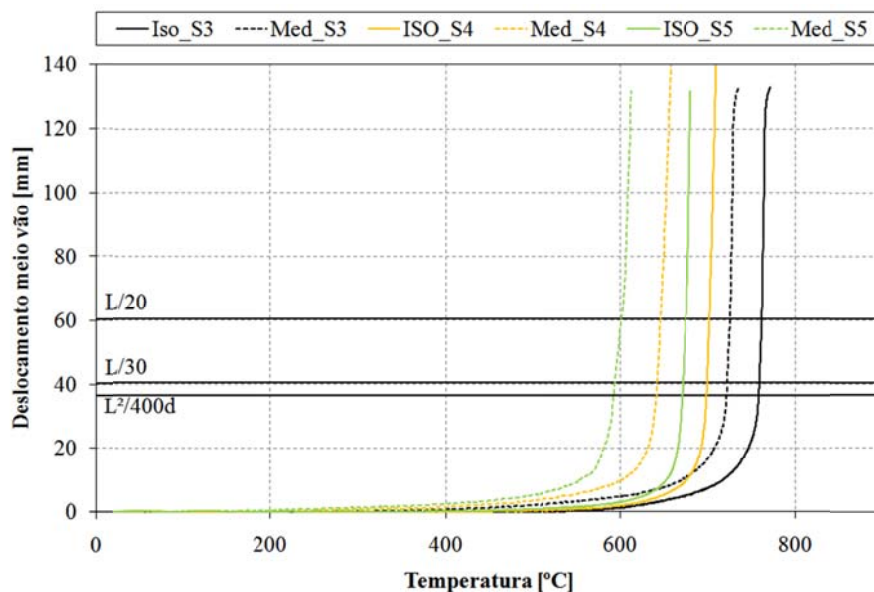


Gráfico 378 - Comparação entre S3, S4 e S5 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.

Todos os elementos atingiram um estado limite último por rótula plástica, ver Figura 106.



Figura 106 - Deformação sofrida nos elementos SHS ao fogo, sem protecção.

### 7.2.3. Secção CHS 101,6x4,05.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de três ensaios da secção transversal CHS 101,6x4,05, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834 (C3, C4 e C5).

Estes ensaios foram realizados em três graus de utilização, um para cada elemento,  $\mu=30\%$  para C3,  $\mu=50\%$  para C4 e  $\mu=70\%$  para C5. Para cada grau de utilização existe uma temperatura crítica, 663,78 [°C] para  $\mu=30\%$ , 584,67 [°C] para  $\mu=50\%$  e 525,78 [°C] para  $\mu=70\%$ , foi depois determinada uma carga resistente a aplicar em função de cada temperatura crítica. Para esta secção as cargas a aplicar foram 9310 [N] para C3, 15200 [N] para C4 e 20560 [N] para C5.

Nos gráficos seguintes apresenta-se uma comparação de resultados nos três ensaios realizados. A diferença que se verifique entre o método simplificado de cálculo (1) e os ensaios, pode ser justificada pela diferença das propriedades nominais e reais dos materiais e secções, assim como pelo definido para o estado limite último (ELT).

No Gráfico 379 está representado o histograma de carga utilizado em cada ensaio, assim como o deslocamento 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.

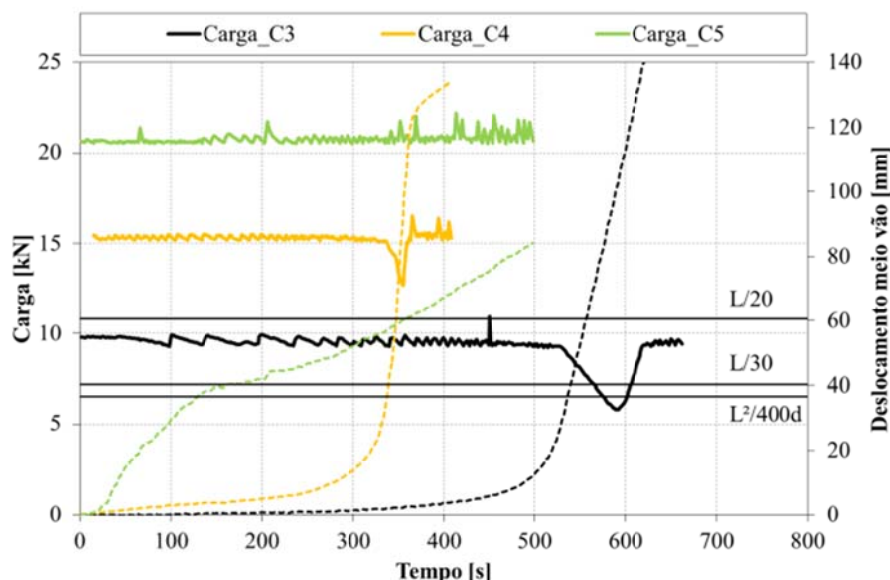


Gráfico 379 – Comparação entre C3, C4 e C5 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 380 observa-se a evolução das temperaturas em todo o ensaio, a par de evolução da temperatura nominal calculada pelos métodos simplificados

(1). Pode-se aperceber a diferença entre o ensaio e o método simplificado. Ainda se encontram representados os deslocamentos do ponto de aplicação da carga para cada grau de utilização. A evolução das temperaturas nos diferentes graus de utilização é indiferente da sua condição, sendo os três da mesma secção.

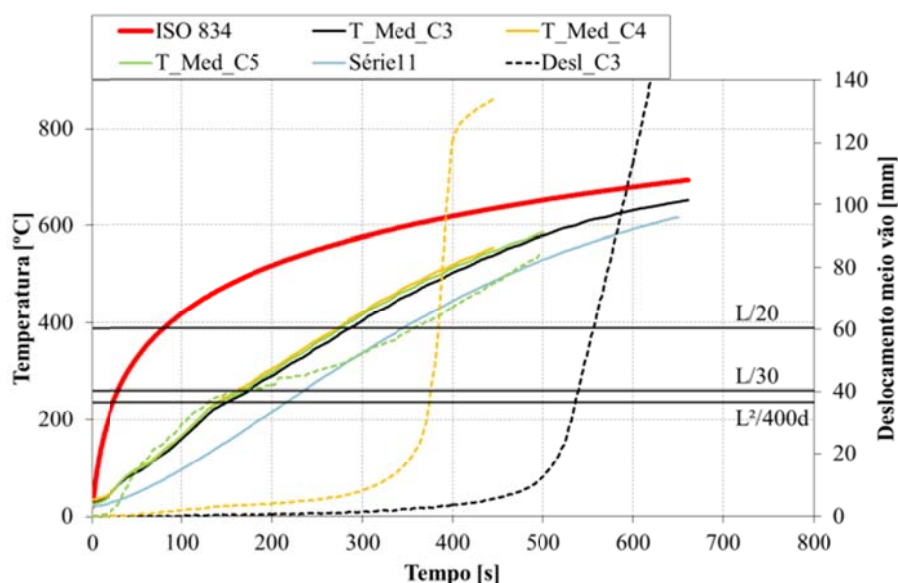


Gráfico 380 – Comparação entre C3, C4 e C5 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.

O deslocamento medido a meio vão, coincidente com o ponto de aplicação da carga, sofre uma grande variação quando o perfil atinge a temperatura crítica.

No Gráfico 381 apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura e o deslocamento a meio vão, para os diferentes graus de utilização. A temperatura crítica do elemento é determinada numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que o deslocamento para as temperaturas médias do perfil atinge o valor de  $L/30$ .

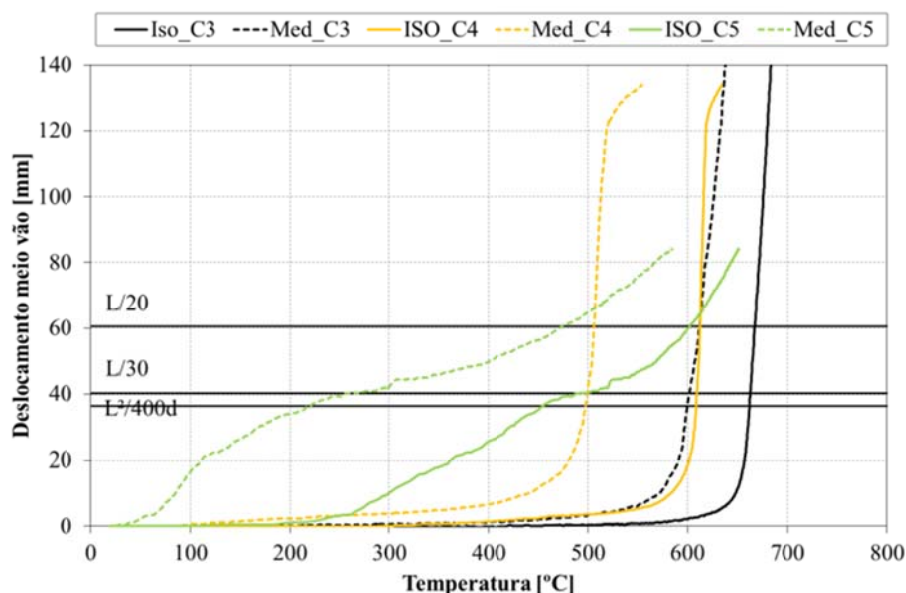


Gráfico 381 - Comparação entre C3, C4 e C5 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.

Todos os elementos atingiram um estado limite último por rótula plástica, ver Figura 107.



Figura 107 - Deformação sofrida nos elementos CHS ao fogo, sem protecção.

#### 7.2.4. Secção LNP 100x50x8.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de três ensaios da secção transversal LNP 100x50x8, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834 (L3, L4 e L5).

Estes ensaios foram realizados em três graus de utilização, um para cada elemento,  $\mu=30\%$  para L3,  $\mu=50\%$  para L4 e  $\mu=70\%$  para L5. Para cada grau de utilização existe uma temperatura crítica,  $663,78\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $\mu=30\%$ ,  $584,67\text{ }^{\circ}\text{C}$



para  $\mu=50\%$  e  $525,78\text{ }^{\circ}\text{C}$  para  $\mu=70\%$ , foi depois determinada uma carga resistente a aplicar em função de cada temperatura crítica. Para esta secção as cargas a aplicar foram  $5840\text{ [N]}$  para L3,  $9830\text{ [N]}$  para L4 e  $13610\text{ [N]}$  para L5.

Nos gráficos seguintes apresenta-se uma comparação de resultados nos três ensaios realizados. A diferença que se verifique entre o método simplificado de cálculo (1) e os ensaios, pode ser justificada pela diferença das propriedades nominais e reais dos materiais e secções, assim como pelo definido para o estado limite último (ELT).

No Gráfico 382 está representado o histograma de carga utilizado em cada ensaio, assim como o deslocamento 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.

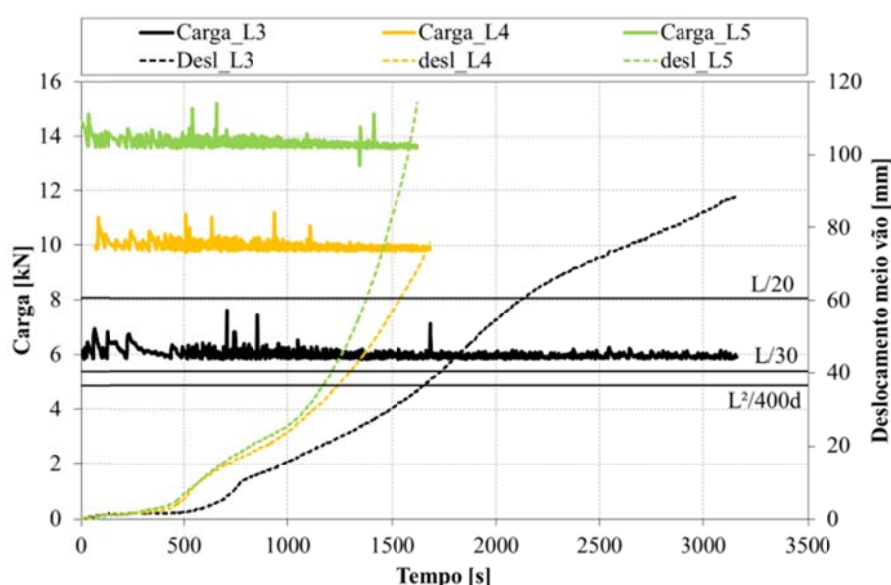


Gráfico 382 – Comparação entre L3, L4 e L5 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 383 observa-se a evolução das temperaturas em todo o ensaio, a par de evolução da temperatura nominal calculada pelos métodos simplificados (1). Pode-se aperceber a diferença entre o ensaio e o método simplificado. Ainda se encontram representados os deslocamentos do ponto de aplicação da carga para cada grau de utilização. A evolução das temperaturas nos diferentes graus de utilização é indiferente da sua condição, sendo os três da mesma secção.

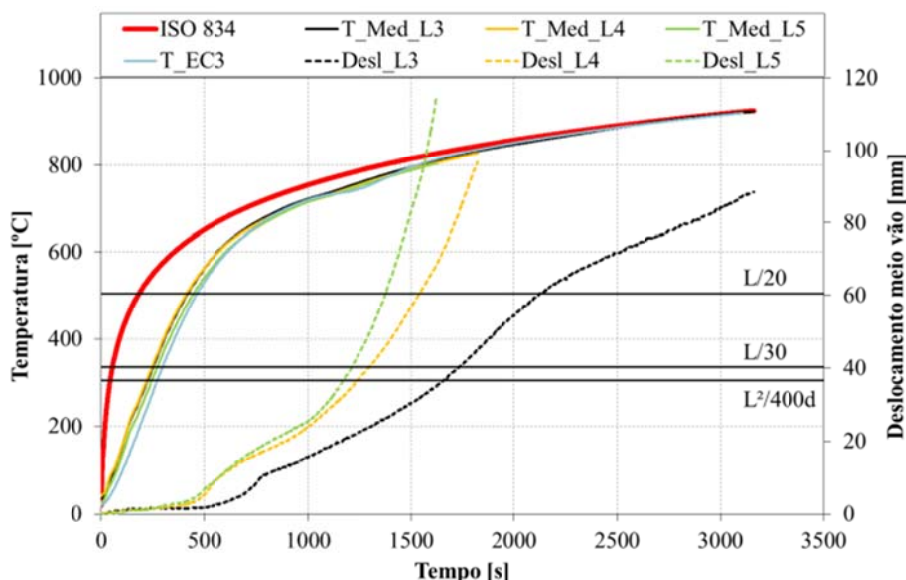


Gráfico 383 – Comparação entre L3, L4 e L5 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.

O deslocamento medido a meio vão, coincidente com o ponto de aplicação da carga, sofre uma grande variação quando o perfil atinge a temperatura crítica. Seguidamente a velocidade do ponto de aplicação da carga, diminui para um valor aproximadamente constante.

No Gráfico 384 apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura e o deslocamento a meio vão, para os diferentes graus de utilização. A temperatura crítica do elemento é determinada numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que o deslocamento para as temperaturas médias do perfil atinge o valor de L/30.

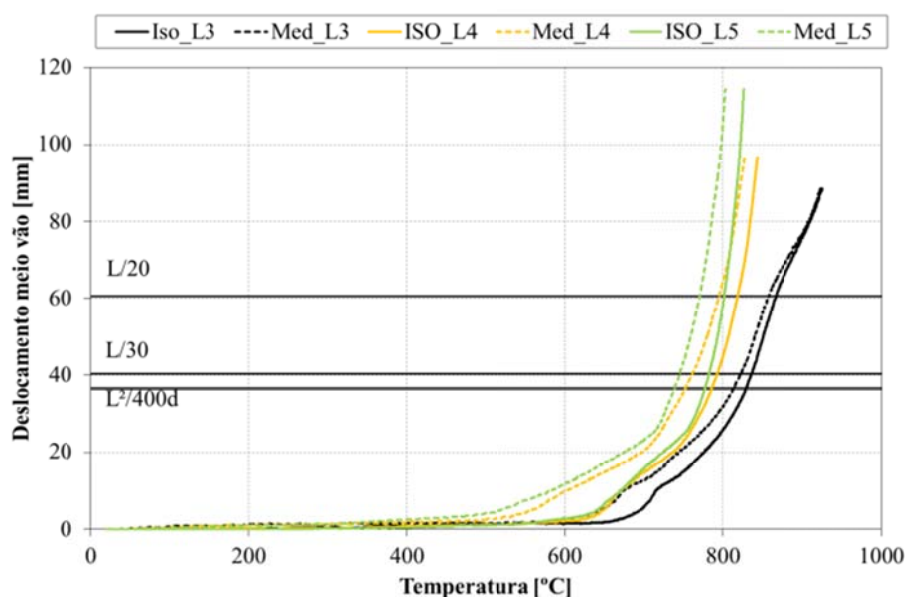


Gráfico 384 - Comparação entre L3, L4 e L5 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.



Todos os elementos atingiram um estado limite último por encurvadura lateral torsional, ver Figura 108.



Figura 108 - Deformação sofrida nos elementos LNP ao fogo, sem protecção.

### 7.3. Comparação entre ensaios a um grau de utilização de $\mu=30\%$ .

#### 7.3.1. Secção IPE 100.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de três ensaios a um grau de utilização de  $\mu=30\%$ , da secção transversal IPE 100, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834 (I3, I6 e I7). O primeiro elemento foi testado sem protecção, nos outros dois foi utilizado uma protecção de 1000 [ $\mu\text{m}$ ] de tinta intumescente.

No Gráfico 385 está representado o histograma de carga utilizado em cada ensaio, assim como o deslocamento medido no ponto de aplicação da carga. Verifica-se que a camada de protecção influencia directamente a duração do ensaio, afectando assim a longevidade da sua resistência em condições de incêndio.

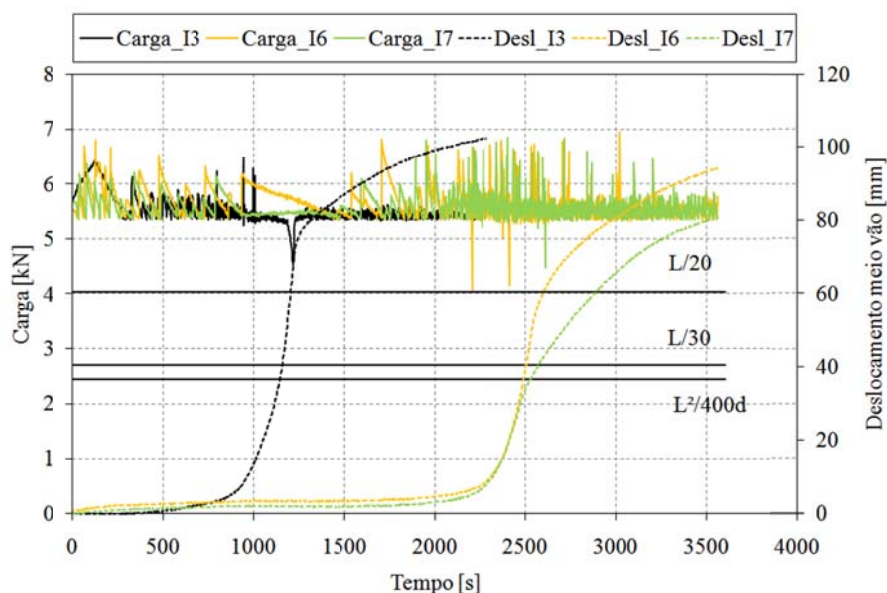


Gráfico 385 - Comparação entre I3, I6 e I7 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 387 observa-se a evolução das temperaturas em todo o ensaio, a par de evolução da temperatura nominal calculada pelos métodos simplificados (1), para o elemento sem protecção. Pode claramente distinguir-se a diferença entre os elementos com protecção e o elemento sem protecção, verificando um grande atraso na evolução das temperaturas do material protegido. Ainda se encontram representados os deslocamentos do ponto de aplicação da carga para cada grau de utilização.

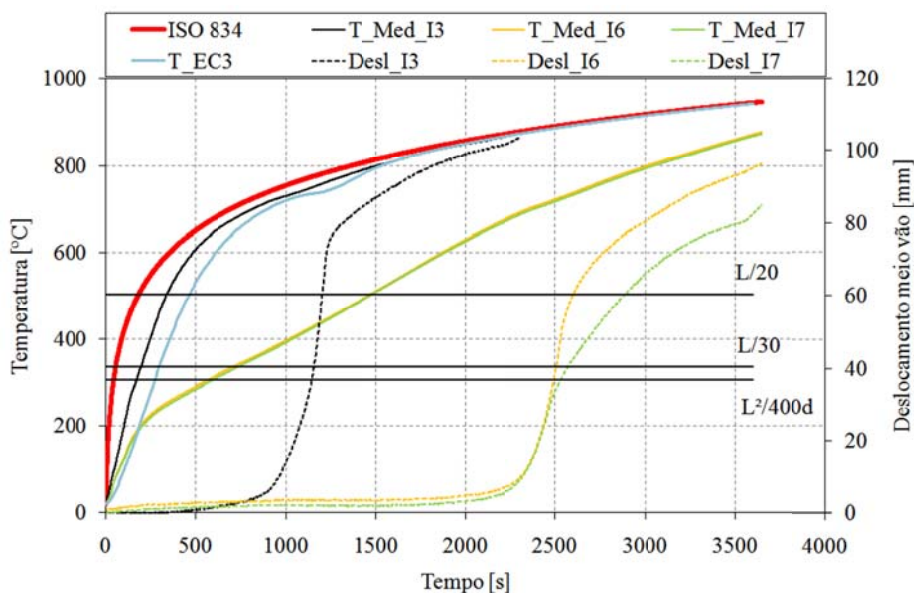


Gráfico 386 - Comparação entre I3, I6 e I7 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 387 apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura e o deslocamento a meio vão. A temperatura crítica do elemento é determinada numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que o deslocamento para as temperaturas médias do perfil atinge o valor de  $L/30$ . Verifica-se que no momento do colapso, a temperatura do forno é próxima da temperatura média no perfil, isto se o perfil for sem protecção. No caso dos perfis protegidos, essas temperaturas distanciam-se, quando o perfil atinge o seu estado limite ultimo a temperatura do forno é bastante mais elevada do que a do perfil.

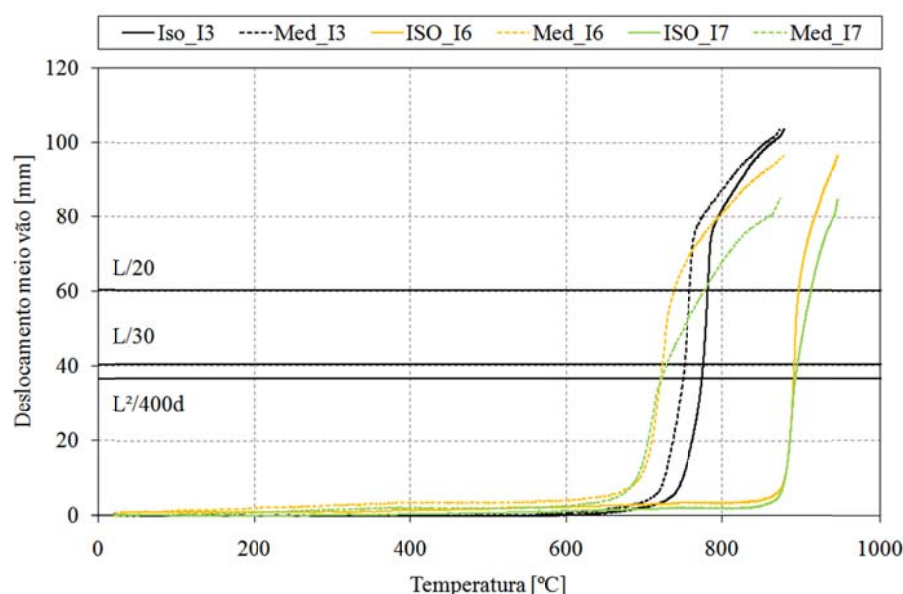


Gráfico 387 - Comparação entre I3, I6 e I7 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.

Na Tabela 41 é efectuada a comparação da resistência ao fogo do elemento no domínio das temperaturas e no domínio do tempo, com a resistência ao fogo determinado pelos métodos simplificados de cálculo e valores nominais. É comparado o elemento sem protecção I3 com os elementos protegidos a tinta intumescente com 1000  $\mu\text{m}$ , I6 e I7.

Tabela 41 - Valores de tempo conseguidos na secção IPE, para  $\mu=30\%$ .

Inf. Geral			Dados EC3 (1)			Dados experimentais			
Secção	Nome	Massividade	Métodos Simplificados (Nominal)			Espessura de tinta	$L^2/9000d$ [mm/min]	$L/30$ [mm]	Temperatura crítica determinada
		[m <sup>-1</sup> ]	Temperatura [°C]	Tempo [min]	Força [N]	DFT [ $\mu\text{m}$ ]	Tempo demorado a atingir [min]		Média. do perfil [°C]
IPE 100 S275	I3	387	663,78	12	5340	-	14	<b>19</b>	751,20
	I6	387	663,78		5340	974	38	<b>41</b>	722,71
	I7	387	663,78		5340	975	37	<b>42</b>	727,57

Comparando o tempo de resistência nos elementos com e sem protecção, conclui-se que a protecção aplicada aos elementos I6 e I7 (974 e 975  $\mu\text{m}$ ), confere um tempo de resistência de 22 e 23 minutos respectivamente, para 30% de grau de utilização e uma protecção média de 1  $\text{mm}$ .

### 7.3.2. Secção SHS 100x10x4.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de três ensaios a um grau de utilização de  $\mu=30\%$ , da secção transversal SHS 100x10x4, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834 (S3, S6 e S7). O primeiro elemento foi testado sem protecção, nos outros dois foi utilizado uma protecção de 1000  $\mu\text{m}$  de tinta intumescente.

No Gráfico 388 está representado o histograma de carga utilizado em cada ensaio, assim como o deslocamento medido no ponto de aplicação da carga. Verifica-se que a camada de protecção, influencia directamente a duração do ensaio, afectando assim a longevidade da sua resistência em condições de incêndio.

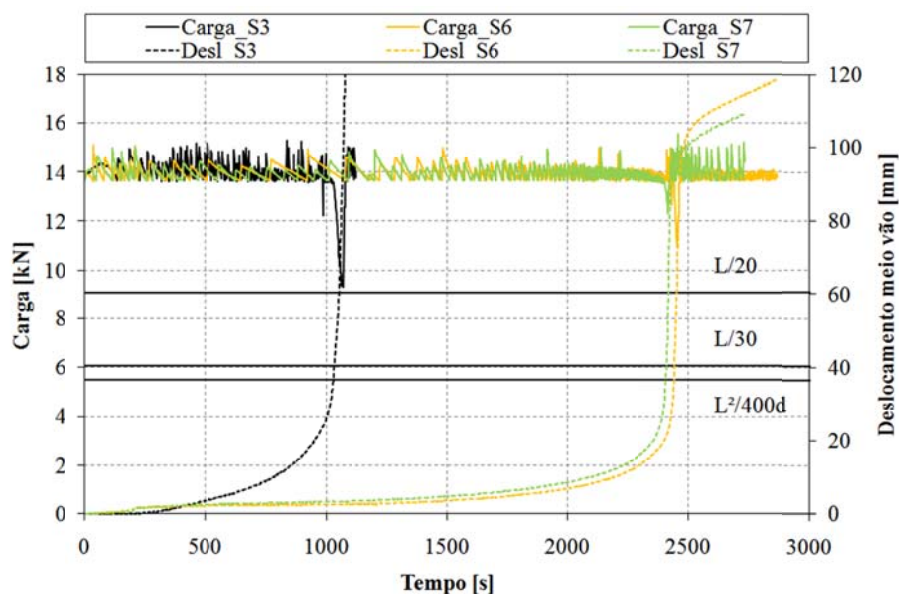
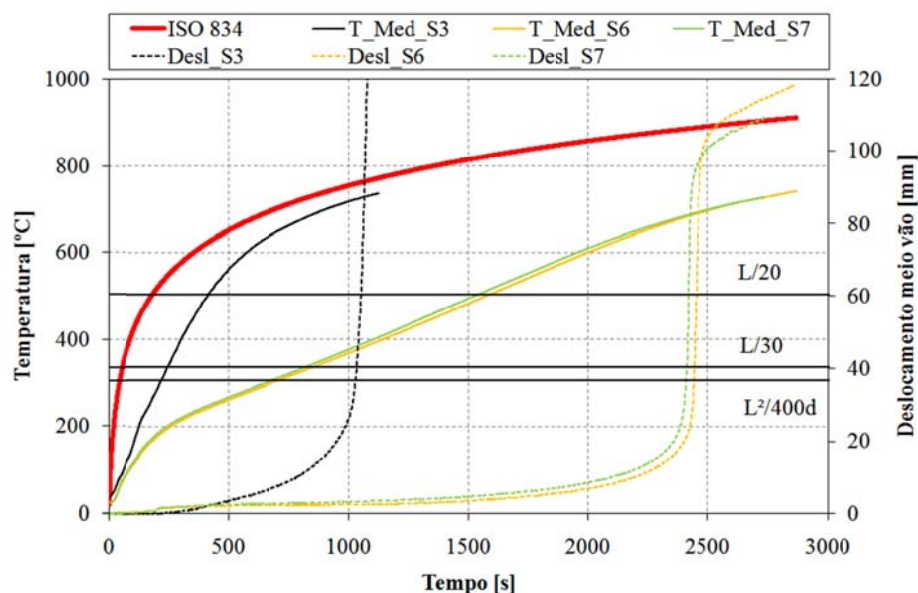


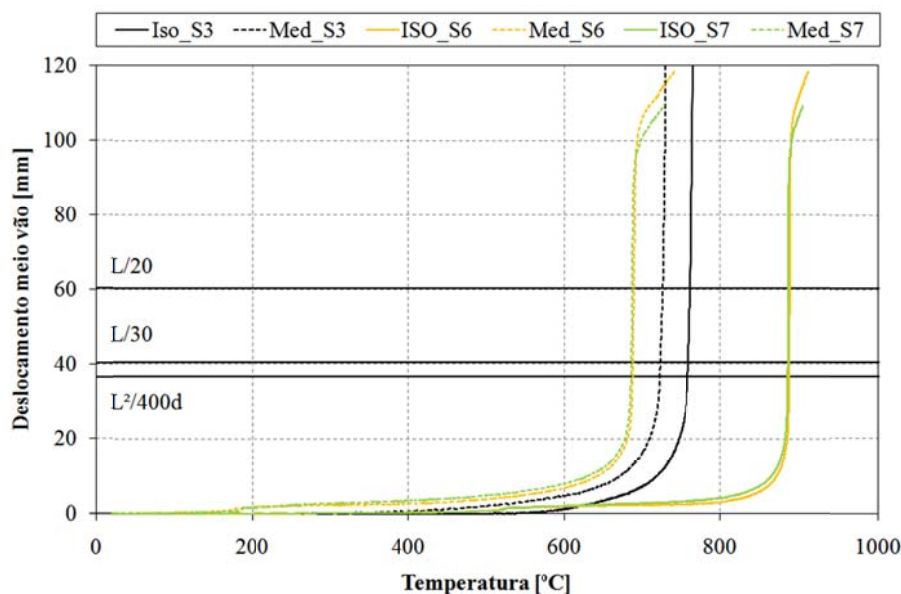
Gráfico 388 - Comparação entre S3, S6 e S7 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 389 observa-se a evolução das temperaturas em todo o ensaio. Pode claramente distinguir-se a diferença entre os elementos com protecção e o elemento sem protecção, verificando um grande atraso na evolução das temperaturas do material protegido. Ainda se encontram representados os deslocamentos do ponto de aplicação da carga para cada grau de utilização.



**Gráfico 389 - Comparação entre S3, S6 e S7 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.**

No Gráfico 390 apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura e o deslocamento a meio vão. A temperatura crítica do elemento é determinada numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que o deslocamento para as temperaturas médias do perfil atinge o valor de  $L/30$ . Verifica-se que no momento do colapso, a temperatura do forno é próxima da temperatura média no perfil, isto se o perfil for sem protecção. No caso dos perfis protegidos, essas temperaturas distanciam-se, quando o perfil atinge o seu estado limite ultimo a temperatura do forno é bastante mais elevada do que a do perfil.



**Gráfico 390 - Comparação entre S3, S6 e S7 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.**



Na Tabela 42 é efectuada a comparação da resistência ao fogo do elemento no domínio das temperaturas e no domínio do tempo, com a resistência ao fogo determinado pelos métodos simplificados de cálculo e valores nominais. É comparado o elemento sem protecção S3 com os elementos protegidos a tinta intumescente com 1000 [µm], S6 e S7.

**Tabela 42 - Valores de tempo conseguidos na secção SHS, para  $\mu=30\%$ .**

Inf. Geral			Dados EC3 (1)			Dados experimentais			
Secção	Nome	Massividade	Métodos Simplificados (Nominal)			Espessura de tinta	$L^2/9000d$ [mm/min]	L/30 [mm]	Temperatura crítica determinada
		[m <sup>-1</sup> ]	Temperatura [°C]	Tempo [min]	Força [N]	DFT [µm]	Tempo demorado a atingir [min]		Média. do perfil [°C]
SHS 100x100x4 S235	S3	250	663,78	12	13620	-	12	<b>17</b>	722,56
	S6	250	663,78		13620	1105	37	<b>40</b>	687,79
	S7	250	663,78		13620	1094	36	<b>40</b>	685,53

Comparando o tempo de resistência nos elementos com e sem protecção, conclui-se que a protecção aplicada aos elementos S6 e S7 (1105 e 1094 [µm]), confere um tempo de resistência de 23 minutos, para 30% de grau de utilização e uma protecção média de 1 [mm].

### 7.3.3. Secção CHS 101,6x4,05.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de três ensaios a um grau de utilização de  $\mu=30\%$ , da secção transversal CHS 101,6x4,05, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834 (C3, C6 e C7). O primeiro elemento foi testado sem protecção, nos outros dois foi utilizado uma protecção de 1000 [µm] de tinta intumescente.

No Gráfico 391 está representado o histograma de carga utilizado em cada ensaio, assim como o deslocamento medido no ponto de aplicação da carga. Verifica-se que a camada de protecção, influência directamente a duração do ensaio, afectando assim a longevidade da sua resistência em condições de incêndio. Tendo ocorrido o fenómeno de retracção da camada intumescente no ensaio C6, os ensaios com protecção, C6 e C7, não apresentam valores semelhantes. Contudo verifica-se que apesar do fenómeno de retracção, a camada protectora surtiu efeito na duração do ensaio.

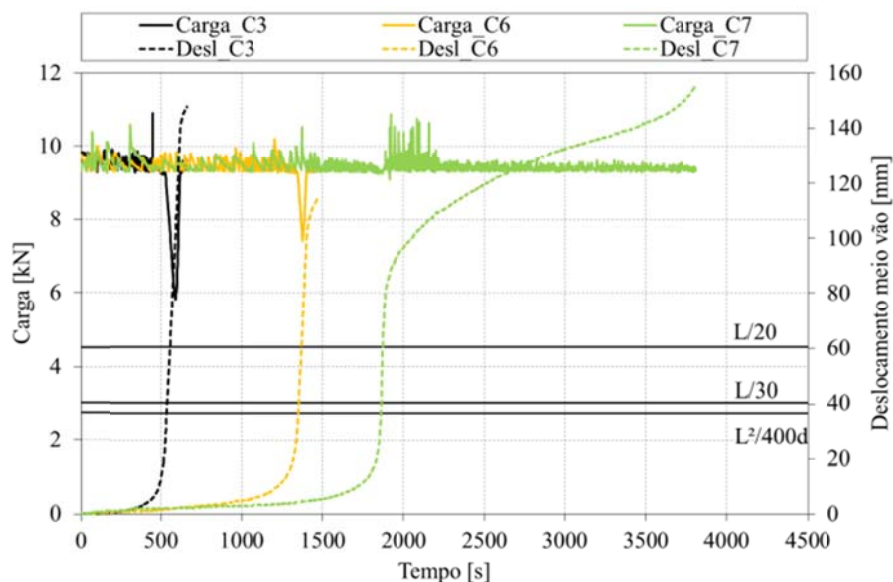


Gráfico 391 - Comparação entre C3, C6 e C7 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 392 observa-se a evolução das temperaturas em todo o ensaio, a par de evolução da temperatura nominal calculada pelos métodos simplificados (1), para o elemento sem protecção. Pode claramente distinguir-se a diferença entre os elementos com protecção e o elemento sem protecção, verificando um grande atraso na evolução das temperaturas do material protegido, sendo visível o ponto de retracção da tinta em C6. Ainda se encontram representados os deslocamentos do ponto de aplicação da carga para cada grau de utilização.

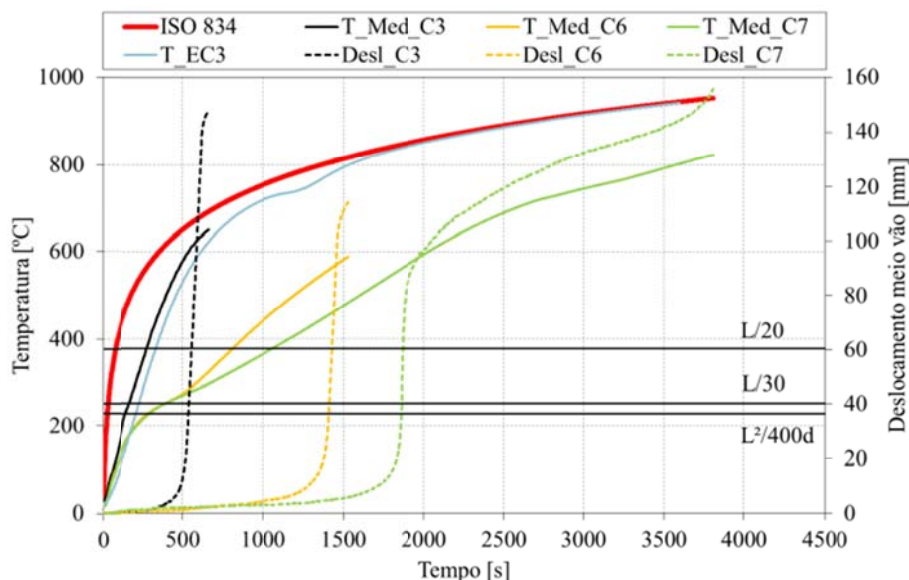


Gráfico 392 - Comparação entre C3, C6 e C7 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.



No Gráfico 393 apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura e o deslocamento a meio vão. A temperatura crítica do elemento é determinada numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que o deslocamento para as temperaturas médias do perfil atinge o valor de  $L/30$ . Verifica-se que no momento do colapso, a temperatura do forno é próxima da temperatura média no perfil, isto se o perfil for sem protecção. No caso dos perfis protegidos, essas temperaturas distanciam-se, quando o perfil atinge o seu estado limite ultimo a temperatura do forno é bastante mais elevada do que a do perfil.

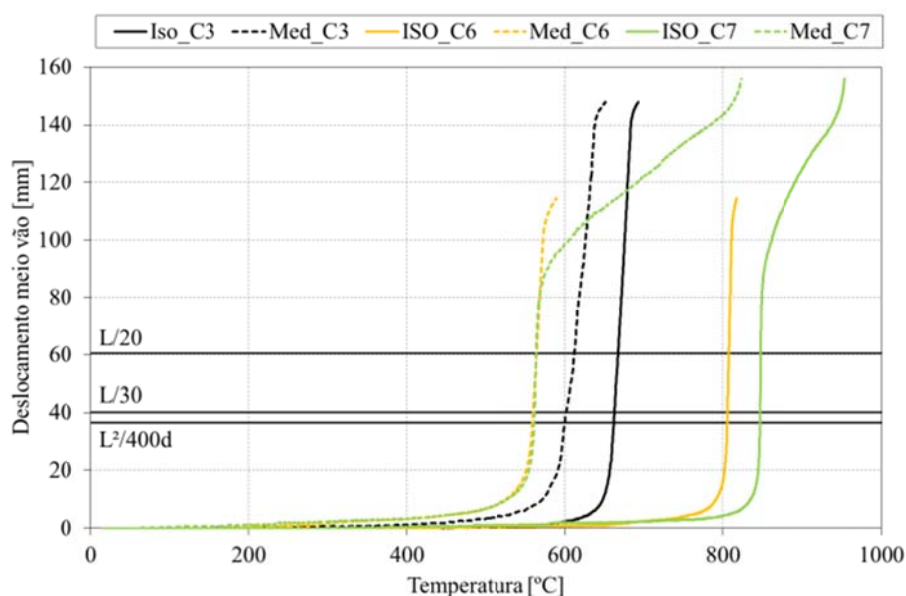


Gráfico 393 - Comparação entre C3, C6 e C7 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.

Na Tabela 43 é efectuada a comparação da resistência ao fogo do elemento no domínio das temperaturas e no domínio do tempo, com a resistência ao fogo determinado pelos métodos simplificados de cálculo e valores nominais. É comparado o elemento sem protecção C3 com os elementos protegidos a tinta intumescente com 1000  $\mu\text{m}$ , C6 e C7.

Tabela 43 - Valores de tempo conseguidos na secção CHS, para  $\mu=30\%$ .

Inf. Geral			Dados EC3 (1)				Dados experimentais			
Secção	Nome	Massividade	Métodos Simplificados (Nominal)			Espessura de tinta	$L^2/9000d$ [mm/min]	$L/30$ [mm]	Temperatura crítica determinada	
		[ $\text{m}^{-1}$ ]	Temperatura [°C]	Tempo [min]	Força [N]	DFT [ $\mu\text{m}$ ]	Tempo demorado a atingir [min]		Média. do perfil [°C]	
CHS 101,6x4,05 S235	C3	246,9	663,78	12	9.310	-	6	<b>9</b>	602,27	
	C6	246,9	663,78		9.310	997	20	<b>23</b>	560,26	
	C7	246,9	663,78		9.310	1004	28	<b>31</b>	562,23	

Comparando o tempo de resistência nos elementos com e sem protecção, conclui-se que a protecção aplicada aos elementos C6 e C7 (997 e 1004 [μm]), confere um tempo de resistência de 14 e 22 minutos, para 30% de grau de utilização e uma protecção média de 1 [mm].

#### 7.3.4. Secção LNP 100x50x8.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de três ensaios a um grau de utilização de  $\mu=30\%$ , da secção transversal LNP 100x50x8, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834 (L3, L6 e L7). O primeiro elemento foi testado sem protecção, nos outros dois foi utilizado uma protecção de 1000 [μm] de tinta intumescente.

No Gráfico 394 está representado o histograma de carga utilizado em cada ensaio, assim como o deslocamento medido no ponto de aplicação da carga. Verifica-se que a camada de protecção influencia directamente a duração do ensaio, afectando assim a longevidade da sua resistência em condições de incêndio.

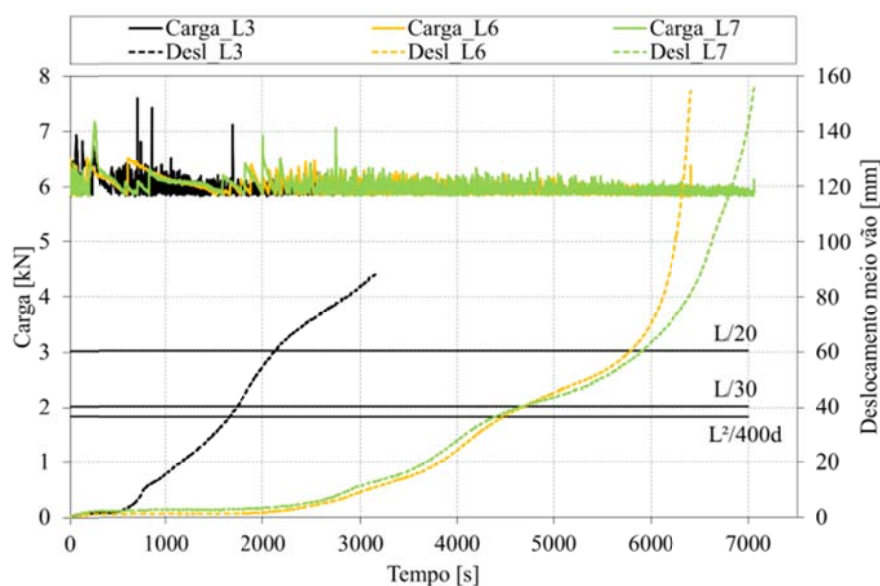
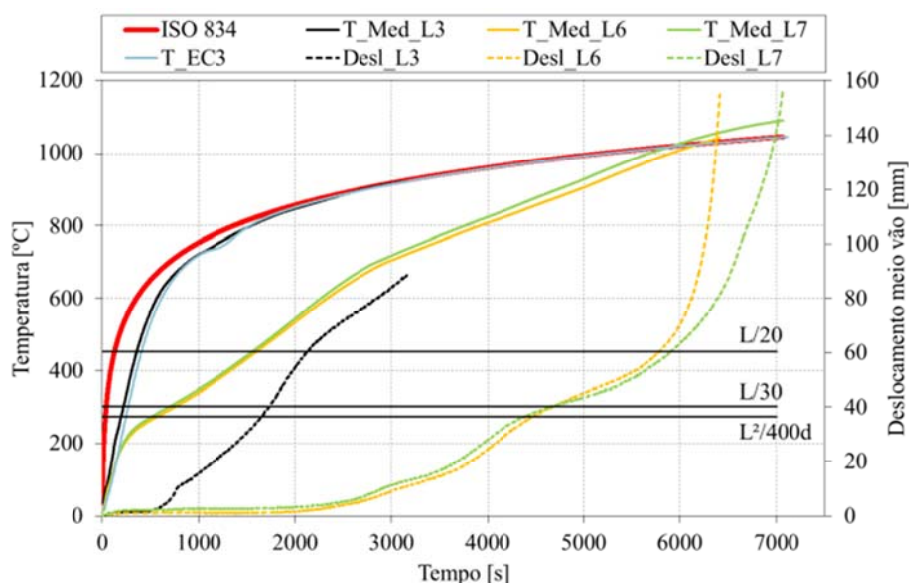


Gráfico 394 - Comparação entre L3, L6 e L7 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 395 observa-se a evolução das temperaturas em todo o ensaio, a par de evolução da temperatura nominal calculada pelos métodos simplificados (1), para o elemento sem protecção. Pode claramente distinguir-se a diferença entre os elementos com protecção e o elemento sem protecção, verificando um grande atraso na evolução das temperaturas do material protegido. Ainda se

encontram representados os deslocamentos do ponto de aplicação da carga para cada grau de utilização.



**Gráfico 395 - Comparação entre L3, L6 e L7 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.**

No Gráfico 396 apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura e o deslocamento a meio vão. A temperatura crítica do elemento é determinada numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que o deslocamento para as temperaturas médias do perfil atinge o valor de  $L/30$ . Verifica-se que no momento do colapso, a temperatura do forno é próxima da temperatura média no perfil, isto se o perfil for sem protecção. No caso dos perfis protegidos, essas temperaturas distanciam-se, quando o perfil atinge o seu estado limite ultimo a temperatura do forno é bastante mais elevada do que a do perfil.

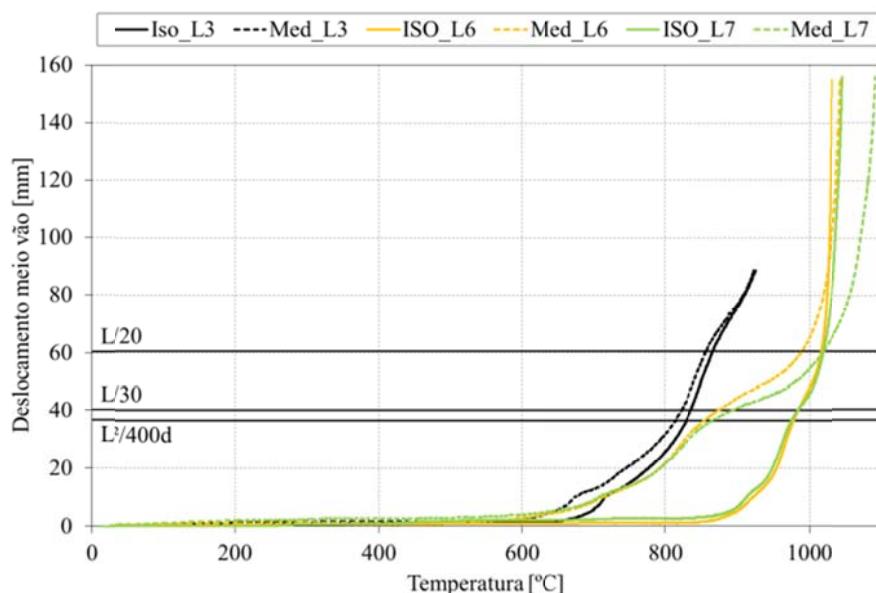


Gráfico 396 - Comparação entre L3, L6 e L7 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.

Na Tabela 44 é efectuada a comparação da resistência ao fogo do elemento no domínio das temperaturas e no domínio do tempo, com a resistência ao fogo determinado pelos métodos simplificados de cálculo e valores nominais. É comparado o elemento sem protecção L3 com os elementos protegidos a tinta intumescente com 1000  $\mu\text{m}$ , L6 e L7.

Tabela 44 - Valores de tempo conseguidos na secção LNP, para  $\mu=30\%$ .

Inf. Geral			Dados EC3 (1)			Dados experimentais			
Secção	Nome	Massividade	Métodos Simplificados (Nominal)			Espessura de tinta	$L^2/9000d$ [mm/min]	L/30 [mm]	Temperatura crítica determinada
		[m <sup>-1</sup> ]	Temperatura [°C]	Tempo [min]	Força [N]	DFT [ $\mu\text{m}$ ]	Tempo demorado a atingir [min]		Média. do perfil [°C]
LNP 100x50x8 S275	L3	250	663,78	12	5840	-	11	<b>29</b>	822,55
	L6	250	663,78		5840	1041	66	<b>78</b>	875,50
	L7	250	663,78		5840	1026	63	<b>77</b>	893,25

Comparando o tempo de resistência nos elementos com e sem protecção, conclui-se que a protecção aplicada aos elementos L6 e L7 (1041 e 1026  $\mu\text{m}$ ), confere um tempo de resistência de 49 e 48 minutos respectivamente, para 30% de grau de utilização e uma protecção média de 1 [mm].

#### 7.4. Comparação entre ensaios a um grau de utilização de $\mu=50\%$ .

#### 7.4.1. Secção IPE 100.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de cinco ensaios a um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , da secção transversal IPE 100, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834 (I4, I8, I9, I12 e I13). O primeiro elemento foi testado sem protecção (I4), os outros quatro foi utilizado uma protecção de 1000  $[\mu\text{m}]$  (I8 e I9), e 2000  $[\mu\text{m}]$  (I12 e I13) de tinta intumescente.

No Gráfico 397 está representado o histograma de carga utilizado em cada ensaio, assim como o deslocamento medido no ponto de aplicação da carga. Verifica-se que a camada de protecção influencia directamente a duração do ensaio, afectando assim a longevidade da sua resistência em condições de incêndio. Contudo não se verifica uma linearidade com tempo e espessura de protecção. De referir que o ensaio I12 sofreu uma encurvadura localizada, diminuindo assim o seu tempo de resistência, relativamente a I13.

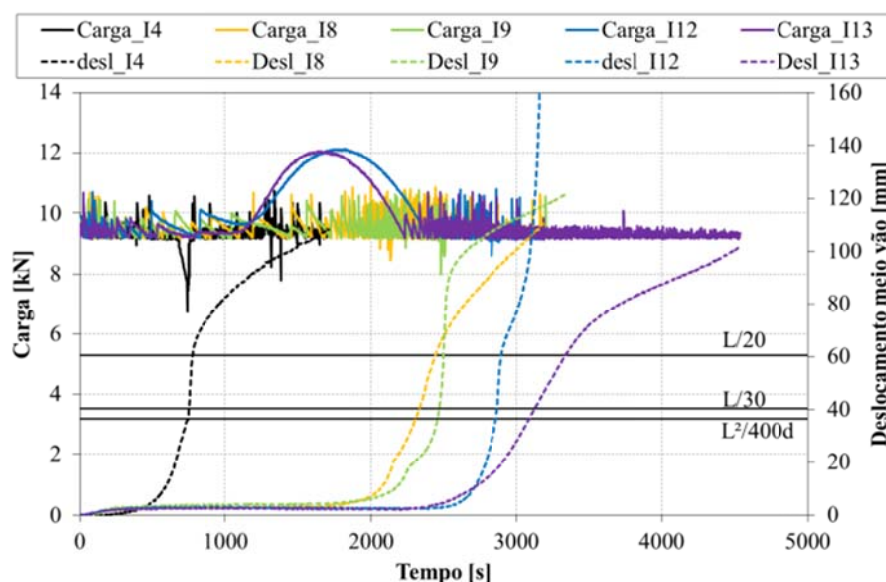


Gráfico 397 - Comparação entre I4, I8, I9, I12 e I13 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 398 observa-se a evolução das temperaturas em todo o ensaio, a par de evolução da temperatura nominal calculada pelos métodos simplificados (1), para o elemento sem protecção. Pode claramente distinguir-se a diferença entre os elementos com protecção e o elemento sem protecção, verificando um grande atraso na evolução das temperaturas do material protegido. Ainda se encontram representados os deslocamentos do ponto de aplicação da carga para cada grau de utilização.

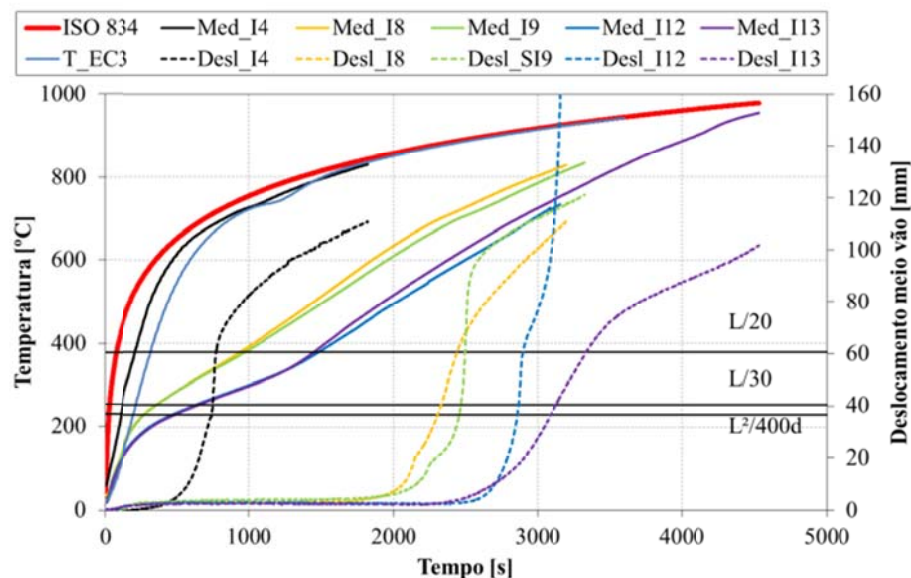


Gráfico 398 - Comparação entre I4, I8, I9, I12 e I13 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 399 apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura e o deslocamento a meio vão. A temperatura crítica do elemento é determinada numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que o deslocamento para as temperaturas médias do perfil atinge o valor de  $L/30$ . Verifica-se que no momento do colapso, a temperatura do forno é próxima da temperatura média no perfil, isto se o perfil for sem protecção. No caso dos perfis protegidos, essas temperaturas distanciam-se, quando o perfil atinge o seu estado limite ultimo a temperatura do forno é bastante mais elevada do que a do perfil, sendo ainda mais influenciado pela espessura de protecção utilizada.

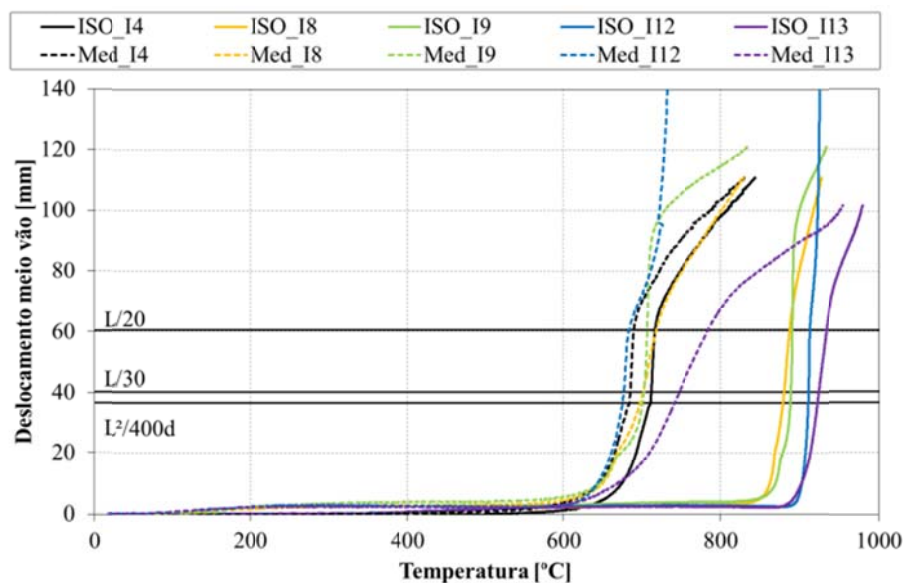


Gráfico 399 - Comparação entre I4, I8, I9, I12 e I13 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.



Na Tabela 45 é efectuada a comparação da resistência ao fogo do elemento no domínio das temperaturas e no domínio do tempo, com a resistência ao fogo determinado pelos métodos simplificados de cálculo e valores nominais. É comparado o elemento sem protecção I4 com os elementos protegidos a tinta intumescente com 1000 [ $\mu\text{m}$ ] (I8 e I9) e 2000 [ $\mu\text{m}$ ] (I12 e I13).

**Tabela 45 - Valores de tempo conseguidos na secção IPE, para  $\mu=50\%$ .**

Inf. Geral			Dados EC3 (1)			Dados experimentais			
Secção	Nome	Massividade	Métodos Simplificados (Nominal)			Espessura de tinta	$L^2/9000d$ [mm/min]	L/30 [mm]	Temperatura crítica determinada
		[ $\text{m}^{-1}$ ]							Média. do perfil [ $^{\circ}\text{C}$ ]
IPE 100 S275	I4	387	584,67	9	9180	-	8	<b>12</b>	684,47
	I8	387	584,67		9180	1012	36	<b>38</b>	701,02
	I9	387	584,67		9180	1055	36	<b>41</b>	701,88
	I12	387	584,67		9180	1824	43	<b>47</b>	676,52
	I13	387	584,67		9180	1832	42	<b>52</b>	747,46

Comparando o tempo de resistência nos elementos com e sem protecção, conclui-se que a protecção aplicada aos elementos I8 e I9 (1012 e 1055 [ $\mu\text{m}$ ]), confere um tempo de resistência de 26 e 29 minutos respectivamente, e a protecção aplicada aos elementos I12 e I13 (1824 e 1832 [ $\mu\text{m}$ ]), confere um tempo de resistência de 35 e 40 minutos respectivamente, para 50% de grau de utilização e uma protecção média de 1 [mm] e 2 [mm].

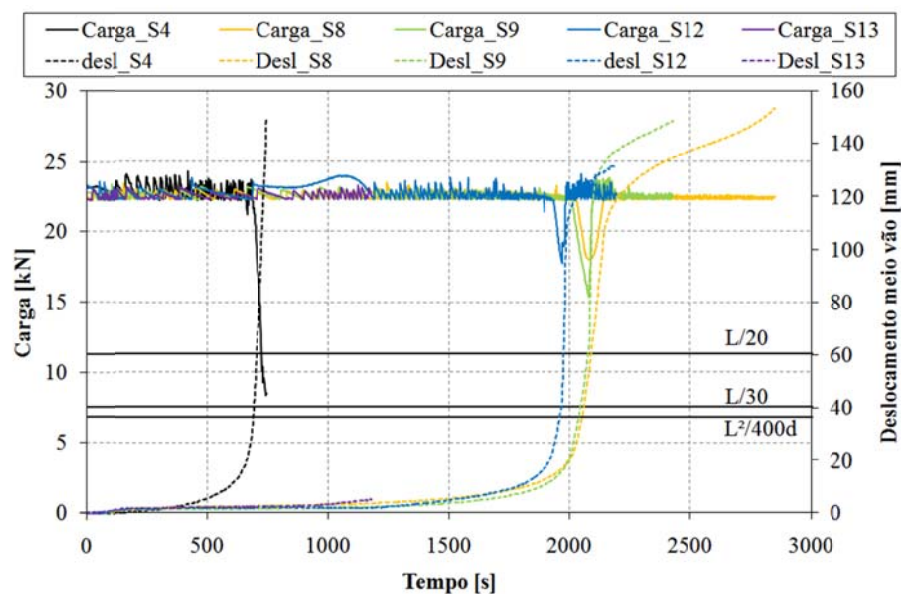
#### 7.4.2. Secção SHS 100x10x4.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de cinco ensaios a um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , da secção transversal SHS 100x10x4, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834 (S4, S8, S9, S12 e S13). O primeiro elemento foi testado sem protecção (S4), os outros quatro foi utilizado uma protecção de 1000 [ $\mu\text{m}$ ] (S8 e S9), e 2000 [ $\mu\text{m}$ ] (S12 e S13) de tinta intumescente.

No Gráfico 400 está representado o histograma de carga utilizado em cada ensaio, assim como o deslocamento medido no ponto de aplicação da carga. Verifica-se que a camada de protecção influencia directamente a duração do ensaio, afectando assim a longevidade da sua resistência em condições de incêndio. De referir que o ensaio S12 e S13 sofreram exposição de zonas de aço

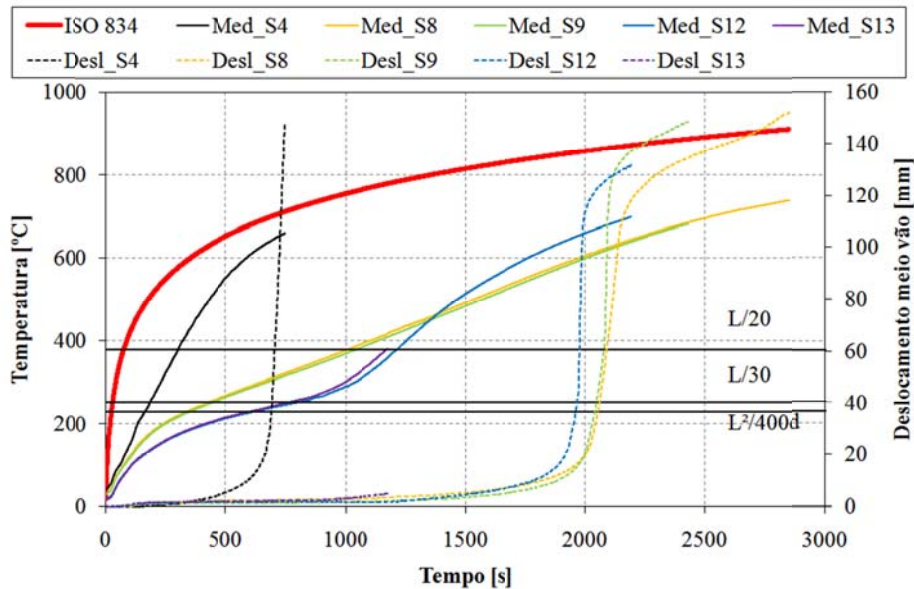


às altas temperaturas, devido à retracção da camada intumescente, diminuindo assim o seu tempo de resistência em condições de incêndio, quando comparados com S8 e S9. De referir ainda que o ensaio S13 não foi levado à sua ruptura.



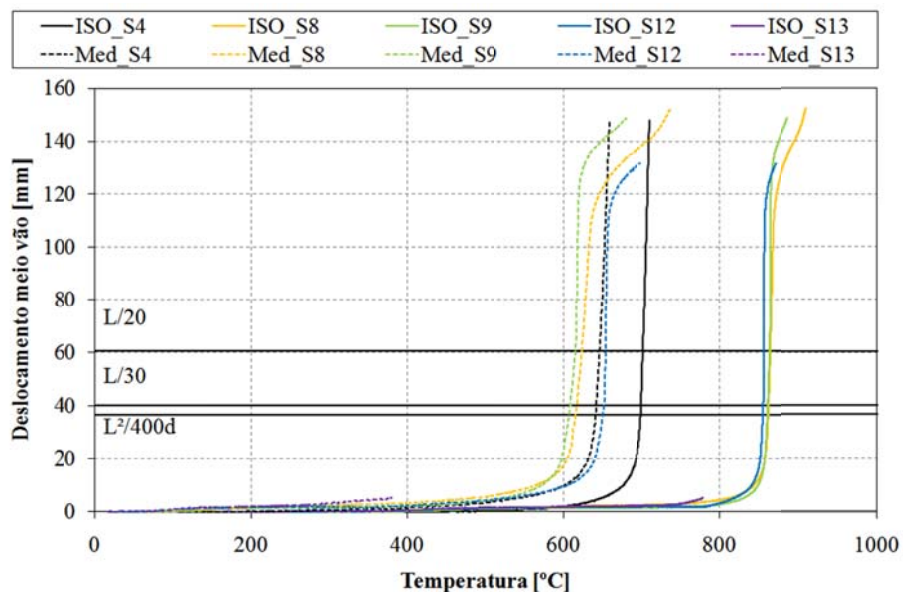
**Gráfico 400 - Comparação entre S4, S8, S9, S12 e S13 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.**

No Gráfico 401 observa-se a evolução das temperaturas em todo o ensaio, a par de evolução da temperatura nominal calculada pelos métodos simplificados (1), para o elemento sem protecção. Pode claramente distinguir-se a diferença entre os elementos com protecção e o elemento sem protecção, verificando um grande atraso na evolução das temperaturas do material protegido. Ainda se encontram representados os deslocamentos do ponto de aplicação da carga para cada grau de utilização.



**Gráfico 401 - Comparação entre S4, S8, S9, S12 e S13 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.**

No Gráfico 402 apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura e o deslocamento a meio vão. A temperatura crítica do elemento é determinada numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que o deslocamento para as temperaturas médias do perfil atinge o valor de  $L/30$ . Verifica-se que no momento do colapso, a temperatura do forno é próxima da temperatura média no perfil, isto se o perfil for sem protecção. No caso dos perfis protegidos, essas temperaturas distanciam-se, quando o perfil atinge o seu estado limite ultimo a temperatura do forno é bastante mais elevada do que a do perfil.



**Gráfico 402 - Comparação entre S4, S8, S9, S12 e S13 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.**

Na Tabela 46 é efectuada a comparação da resistência ao fogo do elemento no domínio das temperaturas e no domínio do tempo, com a resistência ao fogo determinado pelos métodos simplificados de cálculo e valores nominais. É comparado o elemento sem protecção S4 com os elementos protegidos a tinta intumescente com 1000  $[\mu\text{m}]$  (S8 e S9) e 2000  $[\mu\text{m}]$  (S12 e S13).

**Tabela 46 - Valores de tempo conseguidos na secção SHS, para  $\mu=50\%$ .**

Inf. Geral			Dados EC3 (1)			Dados experimentais			
Secção	Nome	Massividade	Métodos Simplificados (Nominal)			Espessura de tinta	$L^2/9000d$ [mm/min]	L/30 [mm]	Temperatura crítica determinada
		[m <sup>-1</sup> ]	Temperatura [°C]	Tempo [min]	Força [N]	DFT [μm]	Tempo demorado a atingir [min]		Média. do perfil [°C]
SHS 100x100x4 S235	S4	250	584,67	9	22250	-	7	<b>11</b>	641,95
	S8	250	584,67		22250	1141	31	<b>34</b>	617,08
	S9	250	584,67		22250	1141	30	<b>34</b>	608,73
	S12	250	584,67		22250	1932	29	<b>32</b>	651,64
	S13	250	584,67		22250	1933	Não atingiu ruptura.		

Comparando o tempo de resistência nos elementos com e sem protecção, conclui-se que a protecção aplicada aos elementos S8 e S9 (1141 e 1141  $[\mu\text{m}]$ ), confere um tempo de resistência de 23 minutos, e a protecção aplicada aos elementos S12 e S13 (1932 e 1933  $[\mu\text{m}]$ ), confere um tempo de resistência de 21 minutos respectivamente, para 50% de grau de utilização e uma protecção média de 1 [mm] e 2 [mm].

#### 7.4.3. Secção CHS 101,6x4,05.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de seis ensaios a um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , da secção transversal CHS 101,6x4,05, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834 (C4, C8, C9, C12 e C13). O primeiro elemento foi testado sem protecção (C4), os outros quatro foi utilizado uma protecção de 1000  $[\mu\text{m}]$  (C8 e C9), e 2000  $[\mu\text{m}]$  (C12 e C13) de tinta intumescente. Foi ainda acrescido a esta série, o elemento C11, alterando o seu grau de utilização de 70% para 50%.

No Gráfico 403 está representado o histograma de carga utilizado em cada ensaio, assim como o deslocamento medido no ponto de aplicação da carga.

Verifica-se que a camada de protecção influencia directamente a duração do ensaio, afectando assim a longevidade da sua resistência em condições de incêndio. Contudo não se verifica uma linearidade com tempo e espessura de protecção, sendo de referir que todos estes ensaios estiveram sujeitos ao fenómeno de retracção da camada de intumescência.

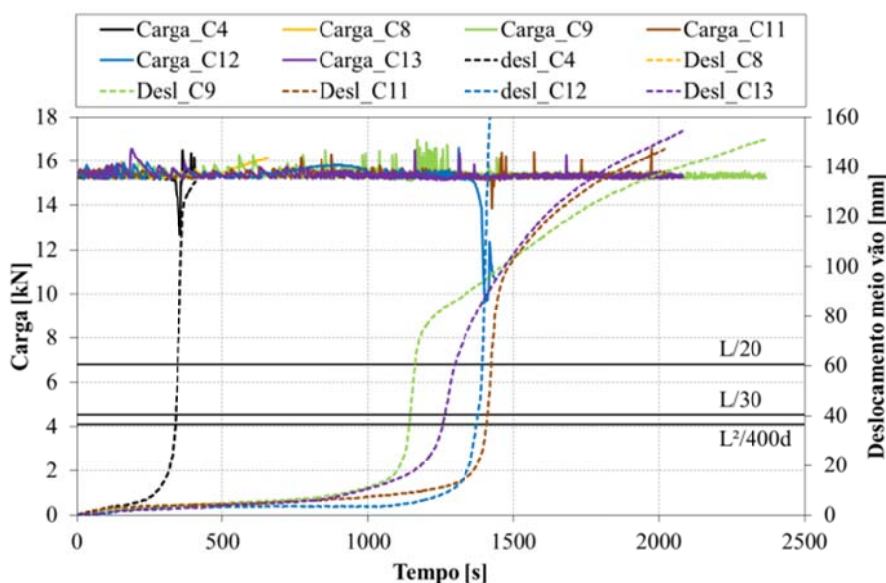
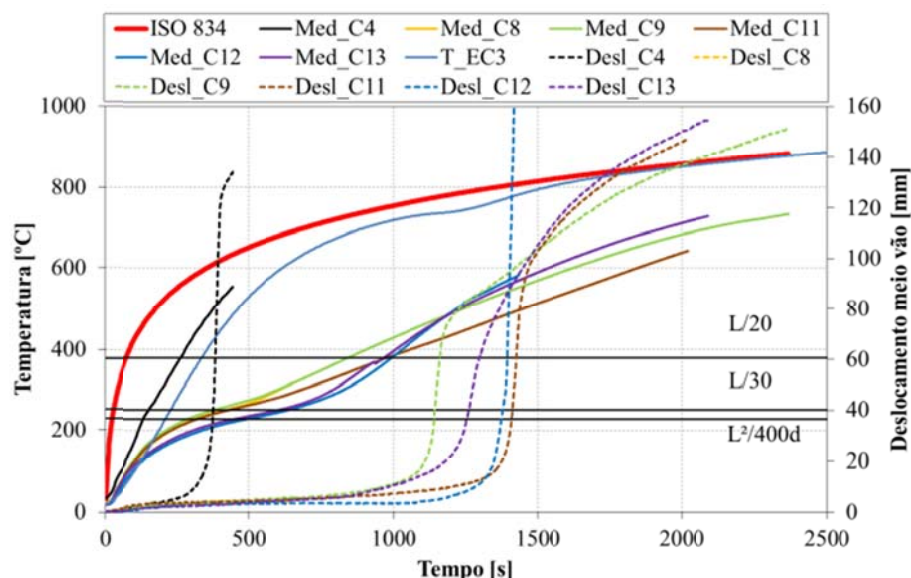


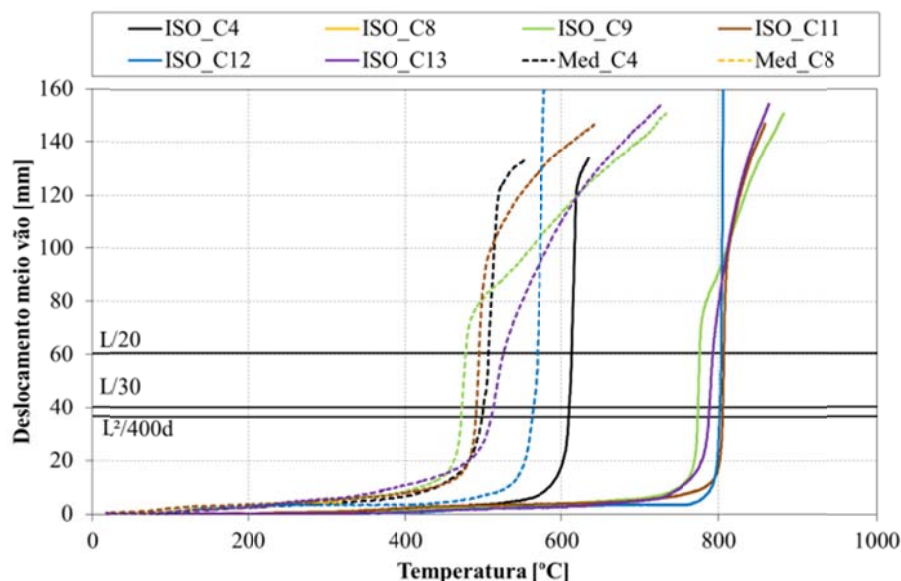
Gráfico 403 - Comparação entre C4, C8, C9, C11, C12 e C13 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 404 observa-se a evolução das temperaturas em todo o ensaio, a par de evolução da temperatura nominal calculada pelos métodos simplificados (1), para o elemento sem protecção. Pode claramente distinguir-se a diferença entre os elementos com protecção e o elemento sem protecção, verificando um grande atraso na evolução das temperaturas do material protegido. Ainda se encontram representados os deslocamentos do ponto de aplicação da carga para cada grau de utilização.



**Gráfico 404 - Comparação entre C4, C8, C9, C11, C12 e C13 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.**

No Gráfico 405 apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura e o deslocamento a meio vão. A temperatura crítica do elemento é determinada numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que o deslocamento para as temperaturas médias do perfil atinge o valor de  $L/30$ . Verifica-se que no momento do colapso, a temperatura do forno é próxima da temperatura média no perfil, isto se o perfil for sem protecção. No caso dos perfis protegidos, essas temperaturas distanciam-se, quando o perfil atinge o seu estado limite ultimo a temperatura do forno é bastante mais elevada do que a do perfil.



**Gráfico 405 - Comparação entre C4, C8, C9, C11, C12 e C13 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.**

Na Tabela 47 é efectuada a comparação da resistência ao fogo do elemento no domínio das temperaturas e no domínio do tempo, com a resistência ao fogo determinado pelos métodos simplificados de cálculo e valores nominais. É comparado o elemento sem protecção C4 com os elementos protegidos a tinta intumescente com 1000 [ $\mu\text{m}$ ] (C8, C9 e C11) e 2000 [ $\mu\text{m}$ ] (C12 e C13).

**Tabela 47 - Valores de tempo conseguidos na secção SHS, para  $\mu=50\%$ .**

Inf. Geral			Dados EC3 (1)			Dados experimentais			
Secção	Nome	Massividade	Métodos Simplificados (Nominal)			Espessura de tinta	$L^2/9000d$ [mm/min]	L/30 [mm]	Temperatura crítica determinada
		[ $\text{m}^{-1}$ ]	Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Tempo [min]	Força [N]	DFT [ $\mu\text{m}$ ]	Tempo demorado a atingir [min]		Média. do perfil [ $^{\circ}\text{C}$ ]
CHS 101,6x4,05 S235	C4	246,9	584,67	9	15200	-	4	6	499,42
	C8	246,9	584,67		15200	1026	Não atingiu a ruptura.		
	C9	246,9	584,67		15200	1006	16	19	472,24
	C11	246,9	584,67		15200	1120	21	23	490,75
	C12	246,9	584,67		15200	1896	20	22	563,47
	C13	246,9	584,67		15200	1807	15	21	512,00

Comparando o tempo de resistência nos elementos com e sem protecção, conclui-se que a protecção aplicada aos elementos C9 e C11 (1006 e 1120 [ $\mu\text{m}$ ]), confere um tempo de resistência de 13 e 17 minutos respectivamente, e a protecção aplicada aos elementos C12 e C13 (1896 e 1807 [ $\mu\text{m}$ ]), confere um tempo de resistência de 16 e 15 minutos respectivamente, para 50% de grau de utilização e uma protecção média de 1 [mm] e 2 [mm].

#### 7.4.4. Secção LNP 100x50x8.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de três ensaios a um grau de utilização de  $\mu=50\%$ , da secção transversal LNP 100x50x8, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834 (L4, L8 e L9). O primeiro elemento foi testado sem protecção, nos outros dois foi utilizado uma protecção de 1000 [ $\mu\text{m}$ ] de tinta intumescente.

No Gráfico 406 está representado o histograma de carga utilizado em cada ensaio, assim como o deslocamento medido no ponto de aplicação da carga. Verifica-se que a camada de protecção influencia directamente a duração do ensaio, afectando assim a longevidade da sua resistência em condições de incêndio.



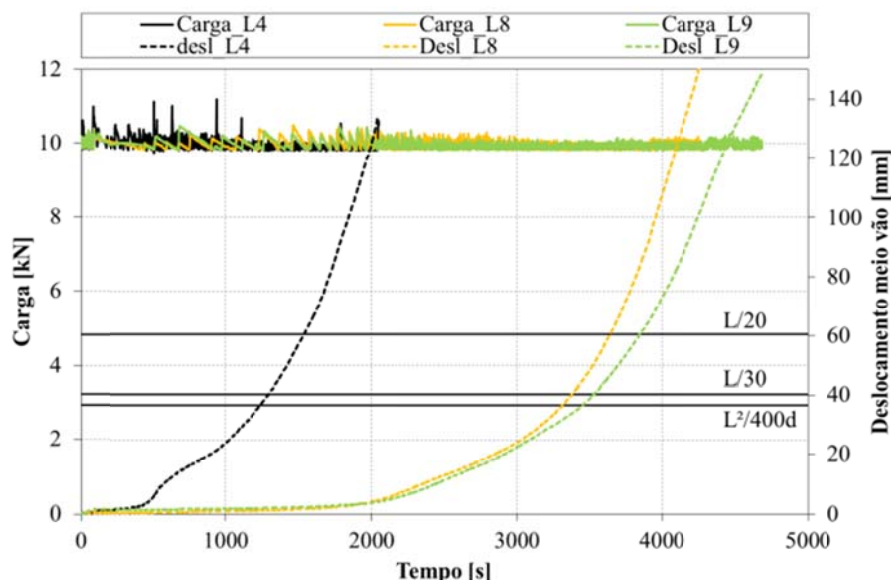


Gráfico 406 - Comparação entre L4, L8 e L9 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 407 observa-se a evolução das temperaturas em todo o ensaio. Pode claramente distinguir-se a diferença entre os elementos com protecção e o elemento sem protecção, verificando um grande atraso na evolução das temperaturas do material protegido. Ainda se encontram representados os deslocamentos do ponto de aplicação da carga para cada grau de utilização.

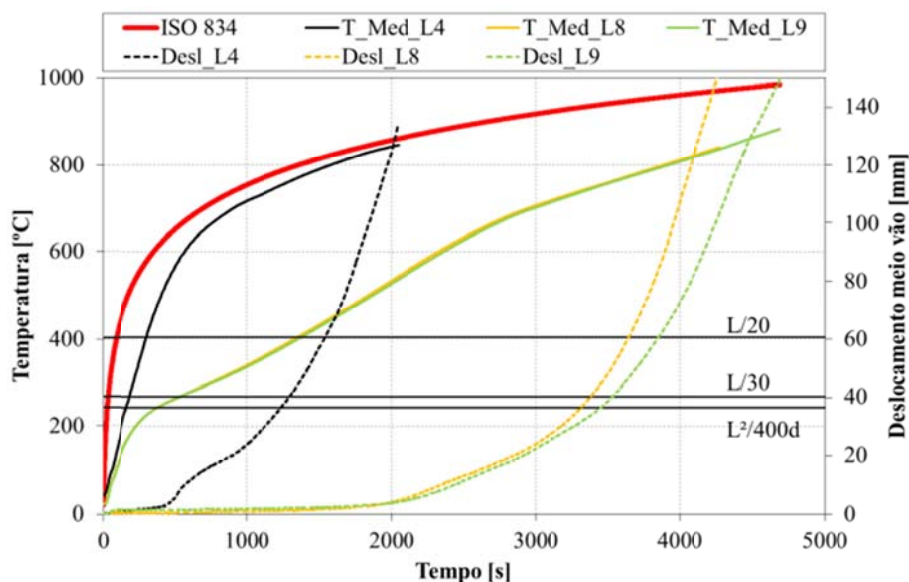


Gráfico 407 - Comparação entre L4, L8 e L9 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 408 apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura e o deslocamento a meio vão. A temperatura crítica do elemento é determinada



numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que o deslocamento para as temperaturas médias do perfil atinge o valor de  $L/30$ . Verifica-se que no momento do colapso, a temperatura do forno é próxima da temperatura média no perfil, isto se o perfil for sem protecção. No caso dos perfis protegidos, essas temperaturas distanciam-se, quando o perfil atinge o seu estado limite ultimo a temperatura do forno é bastante mais elevada do que a do perfil.

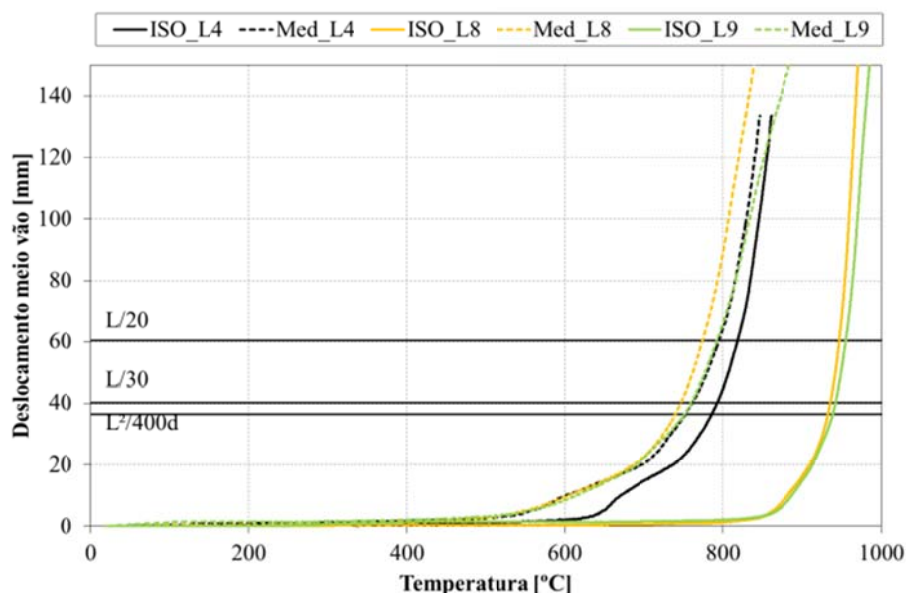


Gráfico 408 - Comparação entre L4, L8 e L9 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.

Na Tabela 48 é efectuada a comparação da resistência ao fogo do elemento no domínio das temperaturas e no domínio do tempo, com a resistência ao fogo determinado pelos métodos simplificados de cálculo e valores nominais. É comparado o elemento sem protecção L4 com os elementos protegidos a tinta intumescente com 1000  $\mu\text{m}$ , L8 e L9.

Tabela 48 - Valores de tempo conseguidos na secção LNP, para  $\mu=50\%$ .

Inf. Geral			Dados EC3 (1)			Dados experimentais			
Secção	Nome	Massividade	Métodos Simplificados (Nominal)			Espessura de tinta	$L^2/9000d$ [mm/min]	L/30 [mm]	Temperatura crítica determinada
		[ $\text{m}^{-1}$ ]	Temperatura [°C]	Tempo [min]	Força [N]	DFT [ $\mu\text{m}$ ]	Tempo demorado a atingir [min]		Média. do perfil [°C]
LNP 100x50x8 S275	L4	250	584,67	9	9830	-	7	<b>21</b>	761,68
	L8	250	584,67		9830	1053	50	<b>56</b>	747,38
	L9	250	584,67		9830	1063	51	<b>58</b>	760,49

Comparando o tempo de resistência nos elementos com e sem protecção, conclui-se que a protecção aplicada aos elementos L8 e L9 (1053 e 1063 [μm]), confere um tempo de resistência de 35 e 37 minutos respectivamente, para 30% de grau de utilização e uma protecção média de 1 [mm].

## 7.5. Comparação entre ensaios a um grau de utilização de $\mu=70\%$ .

### 7.5.1. Secção IPE 100.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de três ensaios a um grau de utilização de  $\mu=70\%$ , da secção transversal IPE 100, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834 (I5, I10 e I11). O primeiro elemento foi testado sem protecção, nos outros dois foi utilizado uma protecção de 1000 [μm] de tinta intumescente.

No Gráfico 409 está representado o histograma de carga utilizado em cada ensaio, assim como o deslocamento medido no ponto de aplicação da carga. Verifica-se que a camada de protecção influencia directamente a duração do ensaio, afectando assim a longevidade da sua resistência em condições de incêndio.

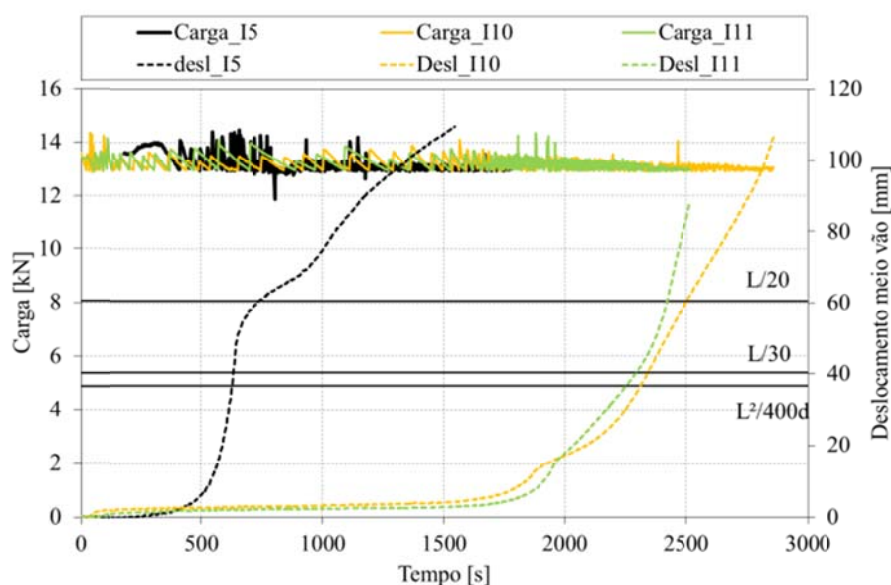


Gráfico 409 - Comparação entre I5, I10 e I11 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 410 observa-se a evolução das temperaturas em todo o ensaio, a par de evolução da temperatura nominal calculada pelos métodos simplificados

(1), para o elemento sem protecção. Pode claramente distinguir-se a diferença entre os elementos com protecção e o elemento sem protecção, verificando um grande atraso na evolução das temperaturas do material protegido. Ainda se encontram representados os deslocamentos do ponto de aplicação da carga para cada grau de utilização.

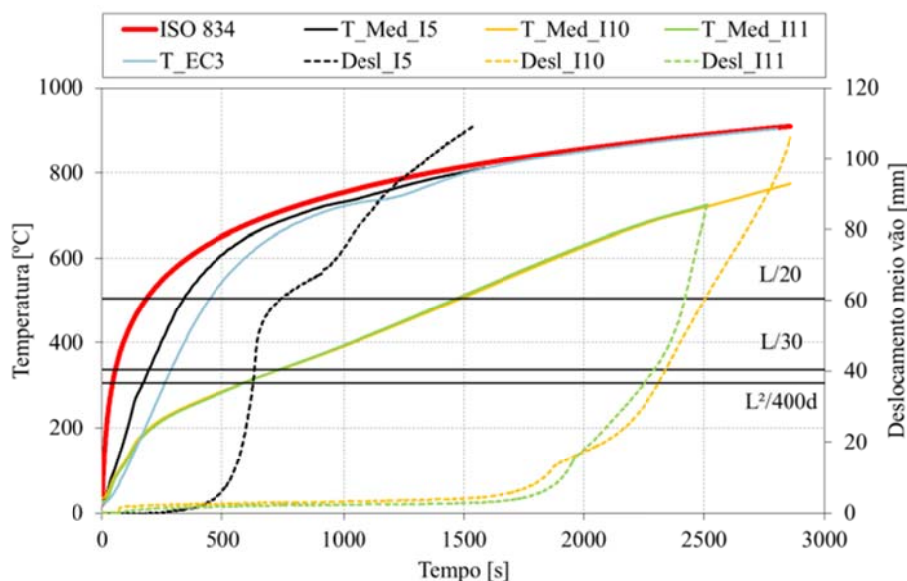


Gráfico 410 - Comparação entre I5, I10 e I11 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 411 apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura e o deslocamento a meio vão. A temperatura crítica do elemento é determinada numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que o deslocamento para as temperaturas médias do perfil atinge o valor de  $L/30$ . Verifica-se que no momento do colapso, a temperatura do forno é próxima da temperatura média no perfil, isto se o perfil for sem protecção. No caso dos perfis protegidos, essas temperaturas distanciam-se, quando o perfil atinge o seu estado limite ultimo a temperatura do forno é bastante mais elevada do que a do perfil.

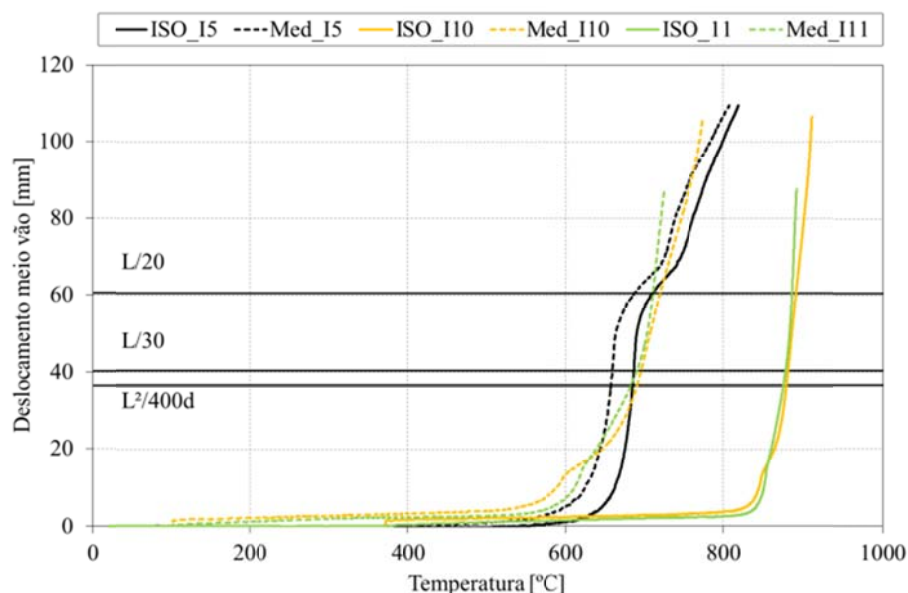


Gráfico 411 - Comparação entre I5, I10 e I11 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.

Na Tabela 49 é efectuada a comparação da resistência ao fogo do elemento no domínio das temperaturas e no domínio do tempo, com a resistência ao fogo determinado pelos métodos simplificados de cálculo e valores nominais. É comparado o elemento sem protecção I5 com os elementos protegidos a tinta intumescente com 1000  $\mu\text{m}$ , I10 e I11.

Tabela 49 - Valores de tempo conseguidos na secção IPE, para  $\mu=70\%$ .

Inf. Geral			Dados EC3 (1)			Dados experimentais			
Secção	Nome	Massividade	Métodos Simplificados (Nominal)			Espessura de tinta	$L^2/9000d$ [mm/min]	L/30 [mm]	Temperatura crítica determinada
		[m <sup>-1</sup> ]	Temperatura [°C]	Tempo [min]	Força [N]	DFT [ $\mu\text{m}$ ]	Tempo demorado a atingir [min]		Média. do perfil [°C]
IPE 100 S275	I5	387	525,78	7	12940	-	7	<b>10</b>	659,01
	I10	387	525,78		12940	998	29	<b>39</b>	695,31
	I11	387	525,78		12940	989	30	<b>38</b>	690,21

Comparando o tempo de resistência nos elementos com e sem protecção, conclui-se que a protecção aplicada aos elementos I10 e I11 (998 e 989  $\mu\text{m}$ ), confere um tempo de resistência de 29 e 28 minutos respectivamente, para 70% de grau de utilização e uma protecção média de 1 [mm].

#### 7.5.2. Secção SHS 100x10x4.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de três ensaios a um grau de utilização de  $\mu=70\%$ , da secção transversal SHS 100x10x4, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834 (S5, S10 e S11). O primeiro elemento foi testado sem protecção, nos outros dois foi utilizado uma protecção de 1000 [ $\mu\text{m}$ ] de tinta intumescente.

No Gráfico 412 está representado o histograma de carga utilizado em cada ensaio, assim como o deslocamento medido no ponto de aplicação da carga. Verifica-se que a camada de protecção, influencia directamente a duração do ensaio, afectando assim a longevidade da sua resistência em condições de incêndio.

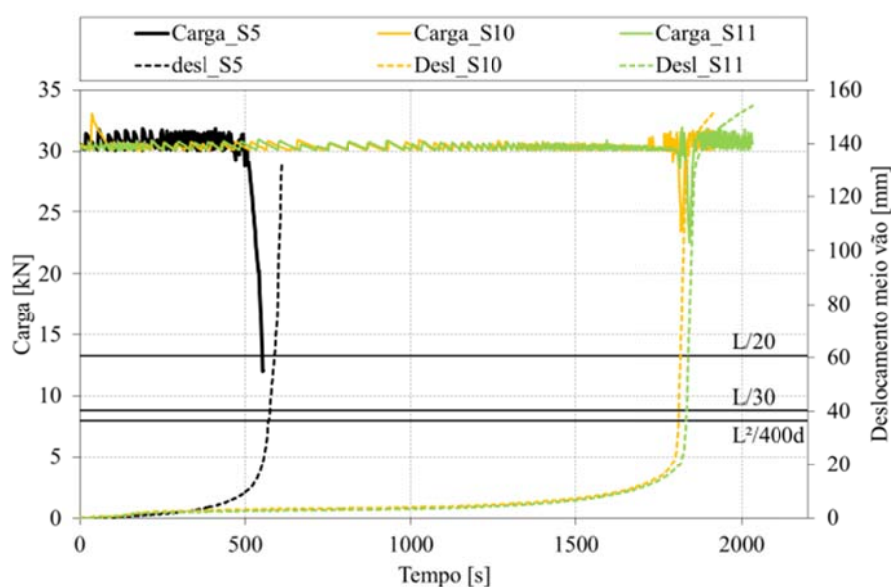
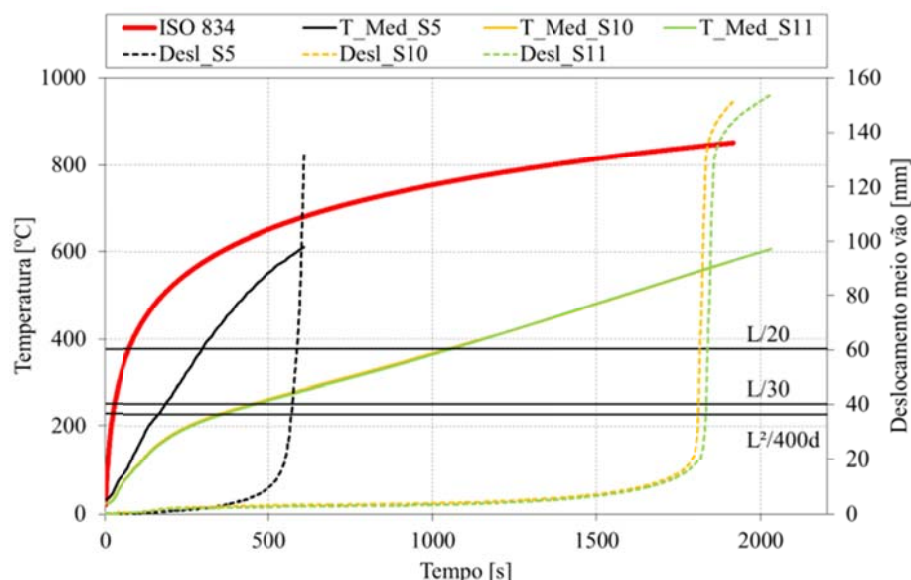


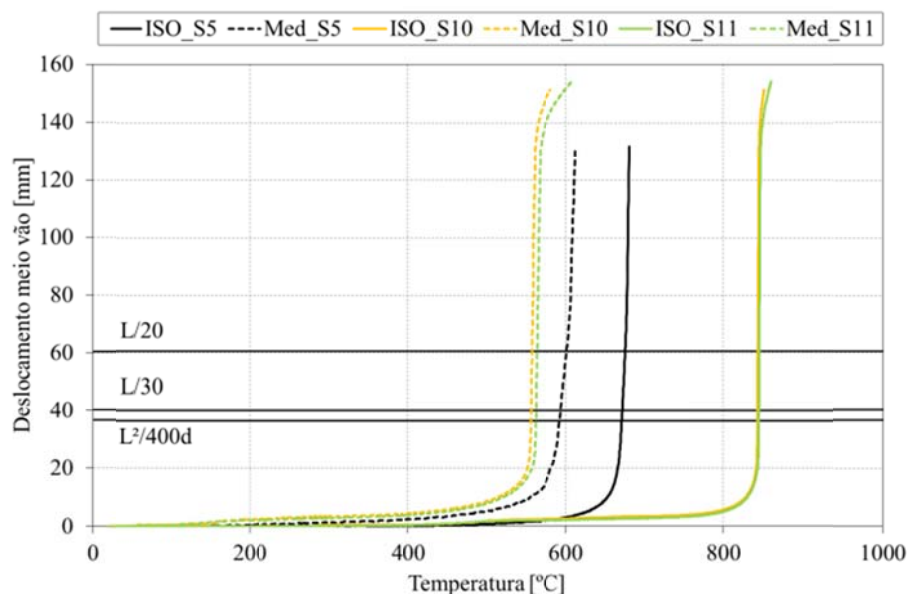
Gráfico 412 - Comparação entre S5, S10 e S11 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 413 observa-se a evolução das temperaturas em todo o ensaio. Pode claramente distinguir-se a diferença entre os elementos com protecção e o elemento sem protecção, verificando um grande atraso na evolução das temperaturas do material protegido. Ainda se encontram representados os deslocamentos do ponto de aplicação da carga para cada grau de utilização.



**Gráfico 413 - Comparação entre S5, S10 e S11 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.**

No Gráfico 414 apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura e o deslocamento a meio vão. A temperatura crítica do elemento é determinada numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que o deslocamento para as temperaturas médias do perfil atinge o valor de  $L/30$ . Verifica-se que no momento do colapso, a temperatura do forno é próxima da temperatura média no perfil, isto se o perfil for sem protecção. No caso dos perfis protegidos, essas temperaturas distanciam-se, quando o perfil atinge o seu estado limite ultimo a temperatura do forno é bastante mais elevada do que a do perfil.



**Gráfico 414 - Comparação entre S5, S10 e S11 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.**

Na Tabela 50 é efectuada a comparação da resistência ao fogo do elemento no domínio das temperaturas e no domínio do tempo, com a resistência ao fogo determinado pelos métodos simplificados de cálculo e valores nominais. É comparado o elemento sem protecção S5 com os elementos protegidos a tinta intumescente com 1000 [µm], S10 e S11.

**Tabela 50 - Valores de tempo conseguidos na secção SHS, para  $\mu=70\%$ .**

Inf. Geral			Dados EC3 (1)			Dados experimentais			
Secção	Nome	Massividade	Métodos Simplificados (Nominal)			Espessura de tinta	$L^2/9000d$ [mm/min]	L/30 [mm]	Temperatura crítica determinada
		[m <sup>-1</sup> ]				DFT [µm]	Tempo demorado a atingir [min]		Média. do perfil [°C]
SHS 100x100x4 S235	S3	250	525,78	8	30090	-	7	<b>9</b>	594,02
	S6	250	525,78		30090	1144	28	<b>30</b>	555,69
	S7	250	525,78		30090	1131	28	<b>30</b>	562,24

Comparando o tempo de resistência nos elementos com e sem protecção, conclui-se que a protecção aplicada aos elementos S10 e S11 (1144 e 1131 [µm]), confere um tempo de resistência de 21 minutos, para 70% de grau de utilização e uma protecção média de 1 [mm].

### 7.5.3. Secção CHS 101,6x4,05.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de dois ensaios a um grau de utilização de  $\mu=70\%$ , da secção transversal CHS 101,6x4,05, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834 (C5 e C10). O primeiro elemento foi testado sem protecção, no outro foi utilizado uma protecção de 1000 [µm] de tinta intumescente.

No Gráfico 415 está representado o histograma de carga utilizado em cada ensaio, assim como o deslocamento medido no ponto de aplicação da carga. Verifica-se que apesar da ocorrência do fenómeno de retracção em C10, a camada protectora não surtiu efeito na duração do ensaio, pois este entrou na ruptura antes da retracção da camada intumesciente.



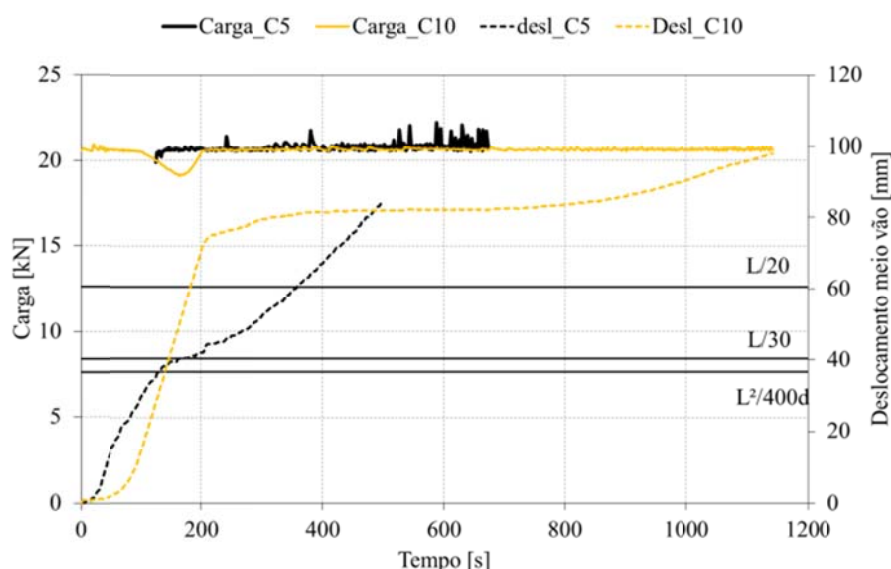


Gráfico 415 - Comparação entre C5 e C10 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 416 observa-se a evolução das temperaturas em todo o ensaio. Pode claramente distinguir-se a diferença entre os elementos com protecção e o elemento sem protecção, verificando um grande atraso na evolução das temperaturas do material protegido, sendo visível o ponto de retracção da tinta em C10. Ainda se encontram representados os deslocamentos do ponto de aplicação da carga para cada grau de utilização.

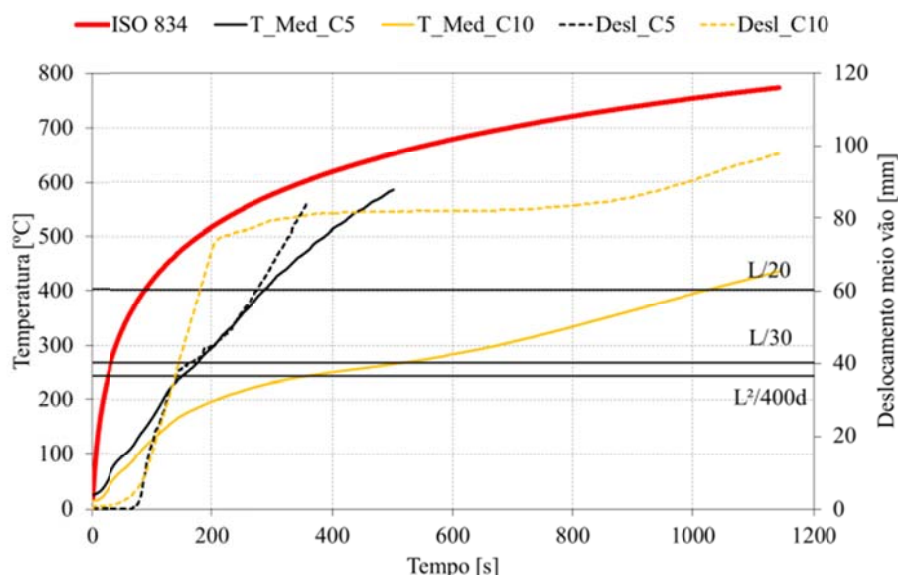


Gráfico 416 - Comparação entre C5 e C10 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 417 apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura e o deslocamento a meio vão. A temperatura crítica do elemento é determinada

numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que o deslocamento para as temperaturas médias do perfil atinge o valor de  $L/30$ . Verifica-se que no momento do colapso, a temperatura do forno é próxima da temperatura média no perfil, isto se o perfil for sem protecção. No caso dos perfis protegidos, essas temperaturas distanciam-se, quando o perfil atinge o seu estado limite ultimo a temperatura do forno é bastante mais elevada do que a do perfil.

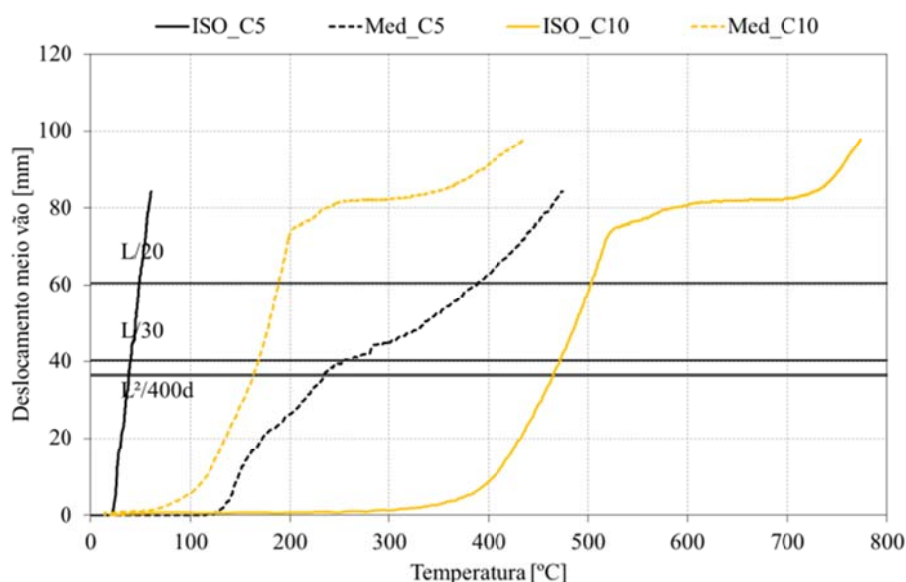


Gráfico 417 - Comparação entre C5 e C10 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.

Na Tabela 51 é efectuada a comparação da resistência ao fogo do elemento no domínio das temperaturas e no domínio do tempo, com a resistência ao fogo determinado pelos métodos simplificados de cálculo e valores nominais. É comparado o elemento sem protecção C5 com o elemento protegidos a tinta intumescente com 1000  $\mu\text{m}$ , C10.

Tabela 51 - Valores de tempo conseguidos na secção CHS, para  $\mu=70\%$ .

Inf. Geral			Dados EC3 (1)				Dados experimentais			
Secção	Nome	Massividade	Métodos Simplificados (Nominal)			Espessura de tinta	$L^2/9000d$ [mm/min]	$L/30$ [mm]	Temperatura crítica determinada	
		[m <sup>-1</sup> ]	Temperatura [°C]	Tempo [min]	Força [N]	DFT [ $\mu\text{m}$ ]	Tempo demorado a atingir [min]		Média. do perfil [°C]	
CHS 101,6x4,05 S235	C5	246,9	525,78	8	20560	-	0	2	255,64	
	C10	246,9	525,78		20560	1071	0	2	169,12	

Comparando o tempo de resistência nos elementos com e sem protecção, conclui-se que a protecção aplicada ao elemento C10 (1071 [μm]), não conferiu tempo de protecção, para 70% de grau de utilização e uma protecção média de 1 [mm].

De referir que a camada de protecção para um grau de utilização de 70%, não oferece maior resistência à flexão em condições de incêndio. Contudo influencia o registo de temperaturas no elemento, tornando-as menos elevadas ao nível do perfil.

#### 7.5.4. Secção LNP 100x50x8.

Neste ponto apresenta-se uma comparação de três ensaios a um grau de utilização de  $\mu=70\%$ , da secção transversal LNP 100x50x8, em condições de incêndio, utilizando a curva de fogo padrão ISO834 (L5, L10 e L11). O primeiro elemento foi testado sem protecção, nos outros dois foi utilizado uma protecção de 1000 [μm] de tinta intumescente.

No Gráfico 418 está representado o histograma de carga utilizado em cada ensaio, assim como o deslocamento medido no ponto de aplicação da carga. Verifica-se que a camada de protecção influencia directamente a duração do ensaio, afectando assim a longevidade da sua resistência em condições de incêndio. Verifica-se uma diferença entre L10 e L11, deve-se ao fenómeno de retracção da camada intumescente no banzo maior do elemento LNP (L11).

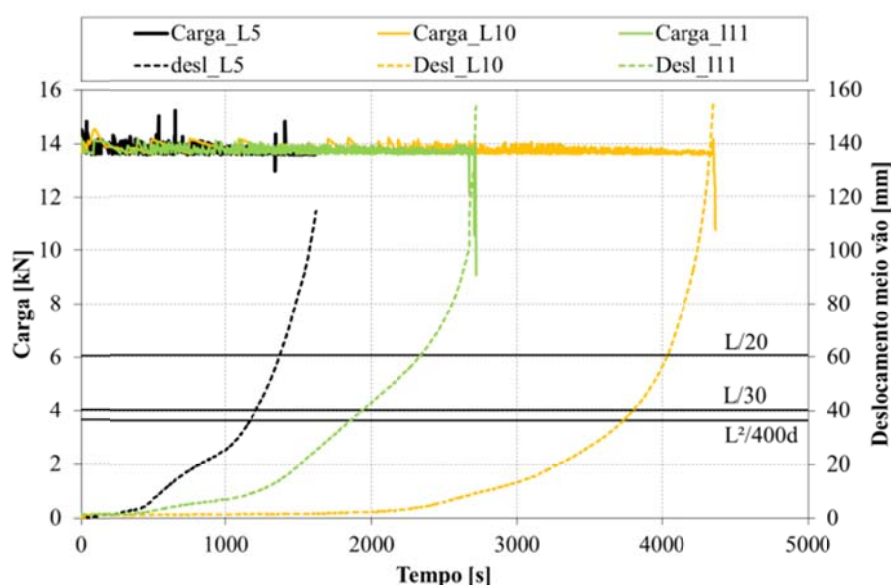


Gráfico 418 - Comparação entre L5, L10 e L11 no histograma de cargas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 419 observa-se a evolução das temperaturas em todo o ensaio, a par de evolução da temperatura nominal calculada pelos métodos simplificados (1), para o elemento sem protecção. Pode claramente distinguir-se a diferença entre os elementos com protecção e o elemento sem protecção, verificando um grande atraso na evolução das temperaturas do material protegido. Ainda se encontram representados os deslocamentos do ponto de aplicação da carga para cada grau de utilização. Verifica-se a influência da retracção da camada intumescente, resultando o aumento das temperaturas em L11.

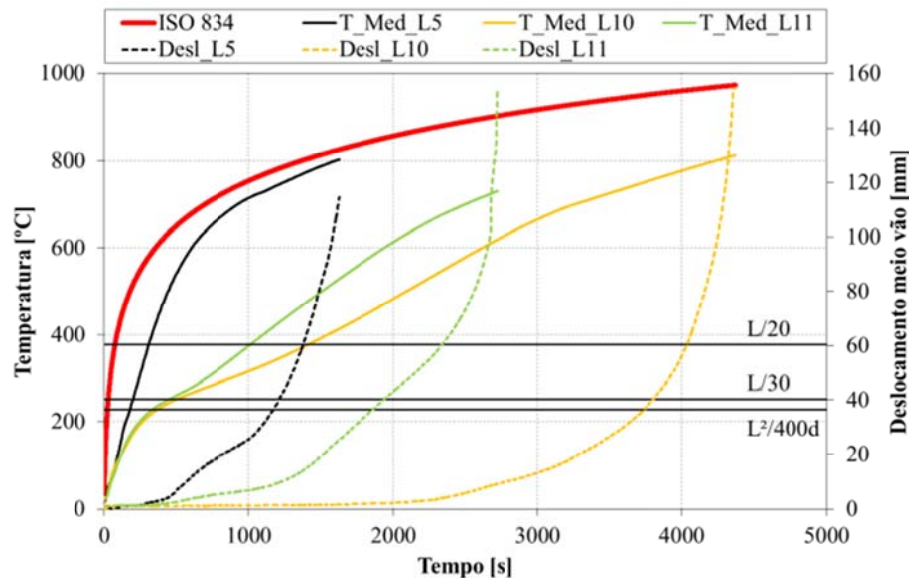


Gráfico 419 - Comparação entre L5, L10 e L11 na evolução das temperaturas e deslocamento a meio vão.

No Gráfico 420 apresenta-se a comparação entre a evolução da temperatura e o deslocamento a meio vão. A temperatura crítica do elemento é determinada numa perpendicular ao eixo das temperaturas, no momento em que o deslocamento para as temperaturas médias do perfil atinge o valor de L/30. Verifica-se que no momento do colapso, a temperatura do forno é próxima da temperatura média no perfil, isto se o perfil for sem protecção. No caso dos perfis protegidos, essas temperaturas distanciam-se, quando o perfil atinge o seu estado limite ultimo a temperatura do forno é bastante mais elevada do que a do perfil.

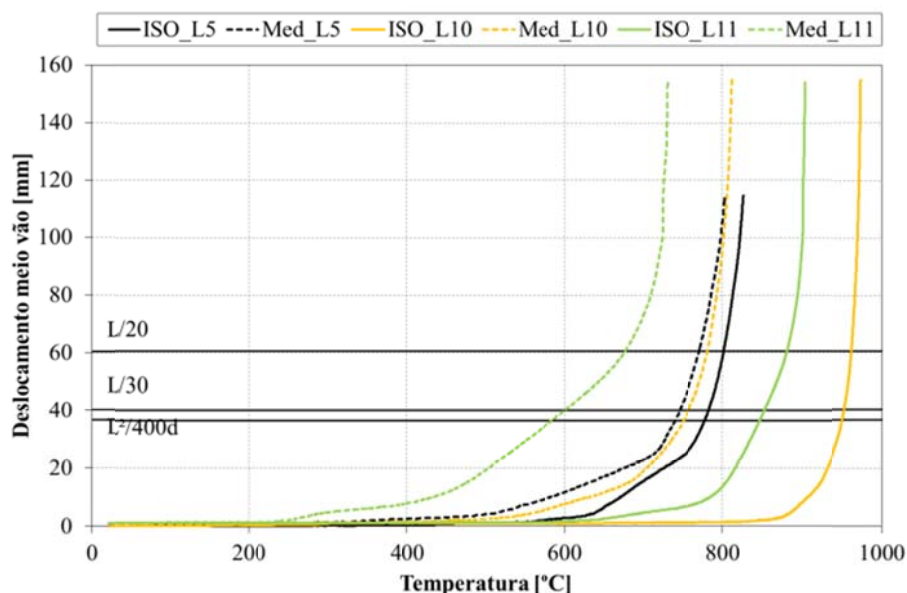


Gráfico 420 - Comparação entre L5, L10 e L11 no deslocamento a meio vão para temperaturas médias.

Na Tabela 52 é efectuada a comparação da resistência ao fogo do elemento no domínio das temperaturas e no domínio do tempo, com a resistência ao fogo determinado pelos métodos simplificados de cálculo e valores nominais. É comparado o elemento sem protecção L5 com os elementos protegidos a tinta intumescente com 1000 [µm], L10 e L11.

Tabela 52 - Valores de tempo conseguidos na secção LNP, para  $\mu=70\%$ .

Inf. Geral			Dados EC3 (1)			Dados experimentais			
Secção	Nome	Massividade	Métodos Simplificados (Nominal)			Espessura de tinta	$L^2/9000d$ [mm/min]	L/30 [mm]	Temperatura crítica determinada
		[m <sup>-1</sup> ]	Temperatura [°C]	Tempo [min]	Força [N]	DFT [µm]	Tempo demorado a atingir [min]		Média. do perfil [°C]
LNP 100x50x8 S275	L5	250	525,78	8	13610	-	7	<b>20</b>	745,66
	L10	250	525,78		13610	1135	53	<b>63</b>	756,97
	L11	250	525,78		13610	1114	22	<b>32</b>	600,68

Comparando o tempo de resistência nos elementos com e sem protecção, conclui-se que a protecção aplicada aos elementos L10 e L11 (1053 e 1063 [µm]), confere um tempo de resistência de 43 e 12 minutos respectivamente, para 30% de grau de utilização e uma protecção média de 1 [mm].

A diferença de tempos de resistência para as mesmas condições de ensaio, prende-se ao fenómeno de retracção ocorrido em L11.

## 8. Conclusão

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 da resistência ao fogo, com a aplicação de carga constante. Dos 42 elementos testados ao fogo, sobre a acção de uma curva padrão de incêndio ISO834, 12 foram testados sem qualquer tipo de protecção, 30 testados com a aplicação de 1 e 2 [mm] de protecção com 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 [ $\mu$ m]).

Os 8 elementos testados à temperatura ambiente tinham como objectivo comparar os resultados experimentais, com os métodos simplificados de cálculo (2) e valores nominais do material e do perfil. Verificou-se que os valores testados encontram-se próximos dos valores nominais para as secções IPE e SHS, já nas secções CHS e LNP os valores de ensaio distanciaram-se dos valores nominais, sendo que a secção CHS obteve valores inferiores e o LNP valores superiores, do que os valores nominais calculados. Esta diferença prende-se na diferença entre os valores nominais e reais.

Os 12 elementos testados em condições de incêndio com carga constante pretendiam uma comparação com os métodos simplificados de cálculo, Eurocódigo 3 parte 1-2 (1), com a utilização de três graus utilização (30%, 50% e 70%). Verificou-se uma grande aproximação do elemento SHS, o elemento IPE apresenta uma boa margem de segurança. O elemento CHS apresentou um comportamento débil para estes níveis de utilização, suscitando uma utilização demasiadamente elevada. A secção LNP testada nestes graus de utilização registou um tempo de resistência muito elevado, em comparação com o espectável pelo cálculo nominal.

Nos 40 elementos testados com diferentes níveis de protecção, verificou-se uma influência da espessura de protecção, influenciando o seu tempo de cedência em condições de incêndio. Na secção IPE 100 com o aumento da espessura, registou-se um aumento, não linear, do tempo de resistência ao fogo. Na secção SHS registou-se um aumento do tempo de resistência ao fogo com a protecção da tinta intumescente, sendo que a maior espessura de tinta registou



um fenómeno de retracção da camada intumescente, não oferecendo maior tempo de protecção relativamente a uma menor espessura de protecção. Na secção CHS verificou-se uma incidência do fenómeno de retracção da camada intumescente, exceptuando um elemento (C7), registando este uma protecção elevada do elemento, sendo de referir que apesar da retracção, todos os elementos ofereceram um melhor comportamento ao fogo com a protecção. Nos elementos de secção LNP registou-se um aumento considerável do tempo de resistência ao fogo, registando o maior tempo de protecção ao fogo dos elementos testados ( $\approx 50$  minutos), não se efectuou a comparações entre diferentes níveis de protecção para este elemento.

Na Figura 109 está representada a reunião de todos os elementos testados, organizados por secção, ainda os responsáveis por todo o trabalho executado.



Figura 109 – Reunião final de todos os elementos testados, incluindo os seus responsáveis.



## 9. Bibliografia

1. **CEN.** *EN 1993-1.2, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.* brussels : European Standard, April 2005.
2. **CEN.** *EN 1993-1.1, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.* Brussels : European Standard, 2005.
3. **Qualidade, Instituto Português.** *NP EN 100002-1; Materiais metálicos, Ensaio de tracção, Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente.* Portugal : Norma Portuguesa, 2006.
4. **CEN.** *EN 1363-1, (fire resistance tests, general requirements).* Europe : European Standard, 1999.
5. **Standard, British.** *Testes de fogo em Materiais de Construção e Estruturas Parte 20: Método para Determinação da Resistência ao Fogo de Elementos de Construção (Princípios Gerais).* Reino Unido, Londres : British Standard, 1987.
6. **CEN.** *pr-EN 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, 2009.