



**Desenvolvimento Experimental e Numérico do comportamento de Tintas
Intumescentes na Protecção de Elementos Estruturais em Condições de
Incêndio**

Alexandre Augusto Pereira

Dissertação para a obtenção de grau de Mestre em:

Engenharia Industrial

ramo **Engenharia Mecânica**

Novembro 2009

Agradecimentos

Os meus sinceros agradecimentos ao Prof. Doutor Paulo Piloto e Prof. Luís Mesquita pela motivação, desempenho e dedicação com que orientaram este trabalho.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança pelas facilidades concedidas à elaboração do presente trabalho.

Aos técnicos dos laboratórios de Oficinas Mecânicas e de Estruturas e Resistência dos Materiais da Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Técnico Abílio e Eng.^a Luísa Barreira o agradecimento devido pela disponibilidade sempre demonstrada.

Agradeço à minha família e aos meus amigos pelo apoio que sempre me deram para a elaboração deste trabalho.

“Estudo Experimental e Simulação numérica do Comportamento de Tintas Intumescentes na Protecção de Elementos Estruturais em Condições de Incêndio”

Por

Alexandre Augusto Pereira

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos de grau de Mestre em:

Engenharia Industrial – Ramo Engenharia Mecânica

pela Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança

Realizada sob a supervisão de:

Prof. Doutor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Resumo

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 a verificação de segurança preconizada nas normas europeias (Eurocódigos), não tem em consideração o aumento da espessura do material protector, nem a variação das propriedades térmicas e físicas com o aumento da temperatura. Com este trabalho pretende-se efectuar a caracterização do comportamento deste tipo de materiais, determinando as suas principais características, utilizando metodologias experimentais.

Foram realizados ensaios experimentais em perfis metálicos com diferentes secções e diferentes valores de massividade. Foi caracterizado o perfil de intumescência para cada secção e medida a evolução da temperatura de cada perfil em diferentes pontos.

Palavras-chave: Resistência ao fogo, tinta intumescente, efeito de bordo.

**“Numerical Simulation and Experimental Study of Behavior Intumescent Paint of the Protection of
Structural Elements in Fire Conditions**

By

Alexandre Augusto Pereira

Thesis submitted for the fulfillment of Master of Science degree in:

Industrial Engineering branch **Mechanical Engineering** of the

School of Technology and Management, Polytechnic Institute of Bragança

Supervised by:

Prof. Doutor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto

Abstract

The increasing fire protection requirements for elements or structures may involve the employment of passive protection measures. The knowledge of reaction materials, such as intumescent paints, requires the physical and thermal material characterization under fire conditions. Due to the high conductivity of steel section profiles and the reduction of load bearing capacity associated, Intumescent paint plays an important role in reducing temperature on steel. This protection mechanism is responsible for increasing thermal resistance, rising structural fire resistance time.

The current methodology for safety verification, prescribed in European standards, does not take into consideration the increase of thickness protection material, neither thermal nor physical properties development with temperature. This method does not express the real protection behavior under fire conditions. Experimental tests are expected to access the Intumescent volume expansion and thermal conductivity.

Different steel section profiles and section factors were experimentally tested. The intumescence was characterized for each section and temperature evolution was measured in different points.

Key word: Fire Resistance, intumescent paint, board effect.

Nomenclatura

Os símbolos são definidos ao longo do texto à medida que se apresentam. Para facilitar a consulta apresenta-se em seguida a definição de cada um deles:

Letras do alfabeto latino

A	Área
A_d	Valores de cálculo de acções indirectas de exposição do fogo
C_a	Calor específico do aço
E_θ	Modulo de Elasticidade à temperatura θ
$E_{fi,d,t}$	Valor de cálculo do efeito das acções durante a exposição ao fogo
$f_{p,\theta}$	Tensão Limite de proporcionalidade
$f_{u,\theta}$	Tensão última
$f_{y,\theta}$	Tensão de cedência
G_k	Valor característico das acções permanentes
$\dot{h}_{net,c}$	Densidade de fluxo de calor incidente de convecção
$\dot{h}_{net,r}$	Densidade de fluxo de calor incidente por radiação
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção
h_r	Coefficiente de transferência de calor por radiação
k_θ	Factor de redução da propriedade em função da temperatura θ
Q	Fluxo de calor
$Q_{k,l}$	Valor característico da acção variável principal
$Q_{k,i}$	Valor característico das restantes acções variáveis
$q_{f,k}$	Densidade de carga de incêndio
R_{EH}	Tensão de cedência superior
R_{eL}	Tensão de cedência inferior
$R_{fi,d,t}$	Valor de cálculo da capacidade resistente durante a exposição ao fogo
$X_{fi,d}$	Valor de projecto da propriedade em condição de incêndio
$X_{k,0}$	Valor característico das propriedades em situação de incêndio
X_k	Valor característico das propriedades mecânicas à temperatura ambiente
t_{fid}	Valor de cálculo da resistência ao fogo
$t_{fi,requ}$	Valor nominal requerido de resistência ao fogo
T	Temperatura
T_a	Temperatura ambiente
T_m	Temperatura máxima

Letras do alfabeto grego

α_c	Coeficiente de convecção
α_{th}	Coeficiente de dilatação do material
Δl	Aumento de comprimento
$\varepsilon_{\theta\theta}$	Emissividade
ε_{th}	Deformação térmica
ε_{res}	Coeficiente de emissividade resultante
λ_a	Condutividade térmica do aço
$\gamma_{Q,l}$	Coeficiente parcial de segurança da acção variável principal à temperatura ambiente
$\gamma_{M,fi}$	Factor parcial de segurança para a propriedade em causa em situação de incêndio
η_{fi}	Factor de redução para o valor de cálculo do nível de carregamento em situação de incêndio
$\psi_{1,1}$	Combinação associada à variável principal ou variante
$\psi_{2,i}$	Coeficiente de combinação associado às restantes acções variáveis
ρ_a	Massa volúmica do aço
θ_a	Temperatura do aço
θ_g	Temperatura dos gases na vizinhança do elemento, temperatura de incêndio
θ_m	Temperatura na superfície do elemento
θ_r	Temperatura de radiação na vizinhança do elemento

Índice Geral

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Nomenclatura	iv
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Introdução	2
1.2 Objectivos da investigação	3
1.3 Estado da arte	3
1.4 Sumário dos Capítulos	4
1.5 Referências	5
Capítulo 2	6
Propriedades dos materiais	6
2.1. Introdução	7
2.1.1. Propriedades térmicas do aço	7
2.1.1.1 Calor específico	7
2.1.1.2 Condutividade térmica	9
2.1.2 Propriedades mecânicas	9
2.1.2.1 Coeficiente de dilatação térmica	13
2.1.2.2 Tensão de cedência	14
2.1.2.3 Módulo de Elasticidade	15
2.1.2.4 Tensão limite de proporcionalidade	16
2.2. Elemento de protecção do material	17
2.2.1 Intumescência	17
2.3 Propriedades Térmicas	18
2.4. Conclusão	18
2.5 Referências	18
Capítulo 3	20
Acções em elementos estruturais nas condições de incêndio	20
3.1. Introdução	21
3.2 Elementos estruturais em condições de incêndio	21

3.2.1 Domínio da resistência	22
3.2.2 Domínio da Temperatura.....	23
3.2.3 Domínio do Tempo	23
3.3 Acções em estruturas em situação de incêndio	24
3.3.1 Acções Térmicas	24
3.3.1 Mecanismos de transferência de calor	25
3.3.1.2 Curvas de incêndio nominais	27
3.3.1.3 Curvas de incêndio Paramétricas	29
3.3.1.4 Incêndio Natural	30
3.3.1.5 Curvas de incêndio BFD	31
3.4 Protecção passiva de elementos estruturais	33
3.4.1 Gesso	34
3.4.2 Betão	35
3.4.3 Fibras minerais	36
3.4.3.1 Placas de lã de rocha	36
3.4.3.2 Placas de lã de vidro	37
3.4.4 Tintas intumescentes	38
3.4.5 Argamassa projectada.....	39
3.5 Conclusões	39
3.6 Referências	40
Capítulo 4.....	41
Ensaaios Experimentais	41
4.1 – Introdução	42
4.2 Método experimental	43
4.2.1 IPE100 com tinta Intumescente.....	43
4.2.1.1 Preparação do Ensaio	44
4.2.1.2 Resultado Experimental	45
4.2.1.2 Evolução da intumescência do perfil	47
4.2.2 IPE220 com tinta Intumescente.....	51
4.2.2.1 Preparação do ensaio.....	52
4.2.2.2 Resultado Experimental	52

4.2.2.3 Evolução intumescência no perfil	55
4.2.3 HEB220 com tinta Intumescente.....	59
4.2.3.1 Preparação do Ensaio	59
4.2.3.2 Evolução das temperaturas no perfil	60
4.2.3.3 Evolução intumescência no perfil	63
4.2.4 SHS100x100x4 com tinta intumescente.....	66
4.2.4.1 Preparação do ensaio.....	67
4.2.4.2 Evolução das temperaturas no perfil	67
4.2.4.3 Evolução da intumescência no perfil	70
4.2.5 L100x60x8 com tinta Intumescente	74
4.2.5.1 Preparação do ensaio.....	74
4.2.5.2 Evolução das temperaturas no perfil	75
4.2.5.3 Evolução da Intumescência no perfil	77
4.3 Conclusões.....	81
4.4 Referências	81
Capítulo 5.....	82
Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros	82
5.1 Conclusões.....	83
5.2 Perspectivas de trabalhos futuros.....	83
Anexos	i
Anexo I	ii
Dry film thickness measurement	ii
Anexo II.....	xii
Rotinas em Matlab.....	xii

Índice de figuras

Figura 2.1 Calor específico do aço em função da temperatura.....	2.3
Figura 2.2 Variação da condutividade do aço com a temperatura.....	2.9
Figura 2.3 Conversão das curvas de tensão – deformação dos ensaios transientes.....	2.10
Figura 2.4 Fases da relação tensão – deformação.....	2.11
Figura 2.5 Variação do coeficiente de dilatação térmica com a temperatura.....	2.14
Figura 2.6 Factor de redução da tensão de cedência.....	2.15
Figura 2.7 Factor de redução do módulo de elasticidade.....	2.15
Figura 2.8 Tensão limite de proporcionalidade para aços.....	2.16
Figura 2.9 Reacção da tinta intumescente.....	2.17
Figura 2.9 Reacção química de intumescência.....	2.17
Figura 3.1 critérios de separação dos elementos estruturais.....	3.3
Figura 3.2 Domínios de verificação da resistência ao fogo.....	3.4
Figura 3.3 Transferência de calor por condução.....	3.6
Figura 3.4 Transferência de calor por convecção.....	3.7
Figura 3.5 Transferência de calor por radiação.....	3.8
Figura 3.6 Elementos estruturais para elementos exteriores.....	3.9
Figura 3.7 Incêndio com hidrocarbonetos.....	3.10
Figura 3.8 Curvas nominais para a acção do fogo.....	3.10
Figura 3.9 Curvas paramétricas.....	3.11
Figura 3.10 Fases do incendio natural.....	3.12
Figura 3.11 Comparação entre curva ISO e BFD.....	3.13
Figura 3.12 Comparação entre curva ASTM e BFD.....	3.14
Figura 3.13 Comparação entre curva hidrocarbonetos e BFD.....	3.14
Figura 3.14 Comparação entre curva externa e BFD.....	3.14
Figura 3.15 Placa de gesso.....	3.17
Figura 3.16 Betão.....	3.17
Figura 3.17 Perfil protegido com fibra mineral projectada.....	3.18
Figura 3.18 Placa de lã de rocha.....	3.19
Figura 3.19 Placa de lã de vidro.....	3.19
Figura 3.20 Perfil protegido com tinta intumescente.....	3.20
Figura 4.1 Forno de ensaios de resistência ao fogo.....	4.3
Figura 4.2 Posição dos termopares para a leitura das temperaturas no IPE100.....	4.4
Figura 4.3 pontos para controlo da espessura nas secções do perfil IPE100.....	4.4
Figura 4.4 Gráfico da evolução das temperaturas do teste T1- IPE100.....	4.5
Figura 4.5 Gráfico da evolução das temperaturas do teste T2- IPE100.....	4.5
Figura 4.6 Gráfico da evolução das temperaturas do teste T3- IPE100.....	4.6
Figura 4.7 Gráfico da evolução das temperaturas do perfil IPE100.....	4.6
Figura 4.8 Calibração para converter pixels em mm.....	4.7
Figura 4.9 Gráfico da evolução da intumescência do teste T1- IPE100.....	4.8

Figura 4.10 Gráfico da intumescência da superfície do teste T1- IPE100	4.8
Figura 4.11 Gráfico da evolução da intumescência do teste T2- IPE100.....	4.9
Figura 4.12 Gráfico da intumescência da superfície do teste T2- IPE100	4.9
Figura 4.13 Gráfico da evolução da intumescência do teste T3- IPE100.....	4.10
Figura 4.14 Gráfico da intumescência da superfície do teste T3- IPE100	4.10
Figura 4.15 Posição dos termopares para a leitura das temperaturas no IPE220	4.11
Figura 4.16 Pontos para controlo da espessura nas secções do perfil IPE220.....	4.12
Figura 4.17 Gráfico da evolução das temperaturas do teste T7- IPE220	4.13
Figura 4.18 Gráfico da evolução das temperaturas do teste T8- IPE220	4.13
Figura 4.19 Gráfico da evolução das temperaturas do teste T9- IPE220	4.14
Figura 4.20 Gráfico da evolução das temperaturas do perfil IPE220.....	4.14
Figura 4.21 Gráfico da evolução da intumescência do teste T7- IPE220.....	4.16
Figura 4.22 Gráfico da intumescência da superfície do teste T7- IPE220	4.16
Figura 4.23 Gráfico da evolução da intumescência do teste T8- IPE220.....	4.17
Figura 4.24 Gráfico da intumescência da superfície do teste T8- IPE220	4.17
Figura 4.25 Gráfico da evolução da intumescência do teste T9- IPE220.....	4.18
Figura 4.26 Gráfico da intumescência da superfície do teste T9- IPE220	4.18
Figura 4.27 Posição dos termopares para a leitura das temperaturas no HEB220	4.19
Figura 4.28 Pontos para controlo da espessura nas secções do perfil HEB220.....	4.20
Figura 4.29 Gráfico da evolução das temperaturas do teste T13- HEB220	4.21
Figura 4.30 Gráfico da evolução das temperaturas do teste T14- HEB220	4.21
Figura 4.31 Gráfico da evolução das temperaturas do teste T15- HEB220	4.22
Figura 4.32 Gráfico da evolução das temperaturas do perfil HEB220.....	4.22
Figura 4.33 Gráfico da evolução da intumescência do teste T13- HEB220.....	4.23
Figura 4.34 Gráfico da intumescência da superfície do teste T13- IHEB220	4.24
Figura 4.35 Gráfico da evolução da intumescência do teste T14- HEB220.....	4.24
Figura 4.36 Gráfico da intumescência da superfície do teste T14- IHEB220	4.25
Figura 4.37 Gráfico da evolução da intumescência do teste T15- HEB220.....	4.25
Figura 4.38 Gráfico da intumescência da superfície do teste T15- IHEB220	4.26
Figura 4.39 Posição dos termopares para a leitura das temperaturas no SHS100x100x4	4.26
Figura 4.40 Pontos para controlo da espessura nas secções do perfil SHS100x100x4	4.27
Figura 4.41 Gráfico da evolução das temperaturas do teste T19- SHS	4.28
Figura 4.42 Gráfico da evolução das temperaturas do teste T20- SHS	4.28
Figura 4.43 Gráfico da evolução das temperaturas do teste T21- SHS	4.29
Figura 4.44 Gráfico da evolução das temperaturas do perfil SHS100x100x4	4.29
Figura 4.45 Gráfico da evolução da intumescência do teste T19- SHS100x100x4	4.30
Figura 4.46 Gráfico da intumescência da superfície do teste T19- SHS100x100x4	4.31
Figura 4.47 Gráfico da evolução da intumescência do teste T20- SHS100x100x4	4.31
Figura 4.48 a) Gráfico da intumescência da superfície do teste T20- SHS100x100x4	4.32
Figura 4.48 b) Gráfico da intumescência da superfície do teste T20- SHS100x100x4	4.32

Figura 4.49 Gráfico da evolução da intumescência do teste T21- SHS100x100x4	4.33
Figura 4.50 Gráfico da intumescência da superfície do teste T21- SHS100x100x4	4.33
Figura 4.51 Posição dos termopares para a leitura das temperaturas no perfil L100x60x8	4.34
Figura 4.52 Pontos para controlo da espessura nas secções do perfil L100x60x8	4.35
Figura 4.53 Gráfico da evolução das temperaturas do teste T31- L100x60x8	4.35
Figura 4.54 Gráfico da evolução das temperaturas do teste T32- L100x60x8	4.36
Figura 4.55 Gráfico da evolução das temperaturas do teste T33- L100x60x8	4.36
Figura 4.56 Gráfico da evolução das temperaturas do perfil L100x60x8	4.37
Figura 4.57 Gráfico da evolução da intumescência do teste T31 L100x60x8	4.38
Figura 4.58 Gráfico da intumescência da superfície do teste T31- L100x60x8	4.38
Figura 4.59 Gráfico da evolução da intumescência do teste T32 L100x60x8	4.39
Figura 4.60 Gráfico da intumescência da superfície do teste T32- L100x60x8	4.39
Figura 4.61 Gráfico da evolução da intumescência do teste T33 L100x60x8	4.40
Figura 4.62 Gráfico da intumescência da superfície do teste T33- L100x60x8	4.40

Índice de tabelas

Tabela 1 Valores do coeficiente de redução da tensão de cedência	2.9
Tabela 2 Valores do Coeficiente de redução do módulo de elasticidade.	2.11

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução

O incêndio constituiu sempre um risco considerável à segurança humana e à propriedade. Quando ocorre de uma forma descontrolada pode originar consequências muito graves.

O fogo pode ser classificado como uma reacção química de oxidação-redução fortemente exotérmica, passando a incêndio sempre que se desenvolva de forma desordenada e incontrolável.

A verificação da resistência ao fogo é parte essencial do projecto de elementos estruturais. Esta é o garante da segurança dos ocupantes do edifício e da equipa de combate ao incêndio, fornecendo a protecção adequada da estrutura e dos bens existentes no seu interior.

O critério comum utilizado na definição da resistência ao fogo de um edifício é o “tempo de resistência ao fogo”, [1.1]. O seu valor é obtido com base na temperatura máxima atingida e na carga que cada elemento suporta, representando, em termos de uma curva de incêndio padrão, o tempo ocorrido entre a ignição e o instante em que é atingida a temperatura crítica do elemento estrutural.

A resistência do aço a temperaturas elevadas encontra-se definida com grande detalhe, sendo conhecido que a 550 [°C] o aço estrutural possui somente 60 % da sua capacidade resistente à temperatura ambiente. Este valor é historicamente importante, porque antes do conceito de estado limite último, quando o dimensionamento era baseado no método da tensão admissível, a tensão máxima admissível era considerada de valor aproximadamente igual a 60% da resistência à temperatura ambiente. Este pressuposto vai de encontro ao valor aceitável de que a temperatura máxima, ou crítica, que uma estrutura suporta antes de atingir o colapso era de 550 [°C], [1.2]. Este conceito conduz à utilização de medidas passivas de protecção ao fogo de modo a limitar o aquecimento dos respectivos elementos estruturais, como por exemplo, sprays, placas de gessos ou tintas intumescentes e que representam aproximadamente 23% do custo total da construção, [1.3].

Estudos de investigação, que deram origem aos códigos de projecto internacionais, mostraram que a temperatura crítica depende essencialmente do grau de utilização do elemento estrutural.

A publicação dos códigos Europeus de projecto de estruturas ao fogo, Eurocódigo 3 parte 1.2, [1.4], veio proporcionar aos projectistas um conjunto de métodos simplificados para o dimensionamento e verificação da segurança de elementos sob a acção do fogo. A verificação pode ser efectuada no domínio da resistência, domínio da temperatura ou do tempo. No domínio da temperatura, o cálculo da temperatura crítica do elemento é efectuado com base na relação com o grau de utilização.

O presente trabalho apresenta um estudo de um tipo de material utilizado na protecção passiva de elementos metálicos em condições de incêndio, a tinta intumescente.

1.2 Objectivos da investigação

A fim de satisfazer as exigências regulamentares estruturais de segurança contra incêndios, as estruturas metálicas utilizam mecanismos de protecção passiva nomeadamente a utilização de tintas intumescentes. Esta protecção define-se como um material reactivo, que altera as propriedades e as características térmicas e físicas, aumentando a resistência térmica da protecção. Com este tipo de protecção, a resistência ao fogo das estruturas metálicas vai aumentar necessariamente.

Com este trabalho pretende-se efectuar ensaios experimentais sobre o processo de intumescência em perfis à escala real, onde irá ser efectuado um estudo paramétrico da influência da espessura e do efeito de bordo da tinta nos perfis.

Posteriormente vai ser efectuado a caracterização do processo de intumescência e integridade estrutural bem como simulações numéricas dos ensaios realizados utilizando modelos numéricos com fronteira móvel.

1.3 Estado da arte

A utilização de materiais de protecção passiva é uma das medidas que é adoptada para prescrever a resistência ao fogo. A temperatura crítica do elemento estrutural protegido é um dos principais parâmetros de projecto e depende das propriedades dos materiais de protecção e da temperatura de incêndio.

Na formulação apresentada no Eurocódigo 3 parte 1.2, [1.4] pode verificar-se que a temperatura do elemento protegido é determinada por uma equação simplificada, baseada num modelo unidimensional de transferência de calor e com propriedades materiais de isolamento constantes.

Alguns estudos cinéticos de degradação térmica ou pirólise foram estudados por alguns investigadores, utilizando diferentes modelos matemáticos, incluindo reacções químicas e os fenómenos de transferência. Staggs, [1.5-1.6] estudou a massa de carvão mineral bem como a física da transferência de calor. O modelo baseia-se sobretudo na decomposição do polímero para produzir o carvão e gases durante uma única etapa.

Di Blasi, [1.7-1.10] apresentou diversas simulações numéricas da pirólise tendo em consideração as variações das propriedades, os fenómenos de transferência, quer por condução quer por convecção, de calor através da camada sólida virgem e da camada fundida. Este autor apresentou uma revisão do estado da arte em 1993, tendo sido actualizado no ano de 2000.

Outros investigadores tais como Cannon e Dehghan, [1.11-1.13] elaboraram modelos matemáticos para poderem solucionar problemas de fronteira utilizando aproximações por diferenças finitas.

Algumas publicações recentes sobre protecção passiva apresentam resultados analíticos baseados numa solução simplificada da equação diferencial parabólica para a condução de calor, em que os resultados mostram uma solução aproximada para a temperatura do aço, [1.14-1.17].

1.4 Sumário dos Capítulos

No capítulo 2 vai ser apresentada a caracterização das propriedades mecânicas e térmicas dos materiais envolvidos para condições de temperaturas elevadas. Vai ser apresentada a variação destas propriedades com a temperatura. É ainda descrito neste capítulo o processo de intumescência.

No capítulo 3 são apresentados os mecanismos de transferência de calor por condução, convecção e radiação. São apresentados, igualmente, as acções em elementos estruturais em condições de incêndio, bem como a protecção passiva de elementos estruturais.

No capítulo 4 é apresentado a preparação dos ensaios, bem como os resultados experimentais obtidos dentro do forno de resistência. Serão efectuadas comparações dos resultados para diferentes tipos de perfis (IPE100, IPE220, HEB220, SHS 100x100x4, L 100x60x8).

Finalmente no capítulo 5 são apresentadas as conclusões retiradas do estudo efectuado e apresentados alguns tópicos para trabalhos futuros.

1.5 Referências

- [1.1] Kaitila, O., “Cold – Formed Steel Structures in Fire Conditions”, Seminar on Steel Structures, Helsinki university of Technology, 2000.
- [1.2] Corus Construction & Industrial, “Fire resistance of steel framed buildings”, 2001.
- [1.3] Bailey, C. G.; Burgess, I. W., Plank, R. J.; “Analyses of the effects of cooling and fire spread on steel-framed buildings”, Fire Safety Journal, Vol. 26, pp 273-293, 1996.
- [1.4]. CEN ENV 1993-1-2; “Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design”; 1995.
- [1.5] Staggs, J.E.J, “Modelling Thermal degradation of polymers using single.step first order kinetics”, Fire Safety Journal, vol.32, pp. 17-34, 1999.
- [1.6] Staggs, J.E.J, “Heat and mass transport in developing chars”, Polymer Degradation and Stability, vol82, pp 297-307, 2003.
- [1.7] Di Blasi, C., “Transition between regimes in the degradation of thermoplastics polymers”, Polymer Degradation and Stability, vol.64, pp 359-367, 1999.
- [1.8] Di Blasi, C., “Linerar pyrolysis of cellulosic and plastic waste”, Journal of analytical and Applied Pyrolysis, vol.40-41, pp 463-479, 1997.
- [1.9] Di Blasi, C., “Modelling the effects of high radiative heat fluxes on Intumescent material decomposition”, Journal of analytical and Applied Pyrolysis, vol.71, pp 721-737, 2004.
- [1.10] Di Blasi, C., “The state of the art of transport models for charring solid degradation”, Polymer international, vol 49, pp 1133 – 1146, 2000.
- [1.11] Cannon, J.R., Hill, C.D., “Remarks on a Stefan Problem”, Journal of Mathematics and Mechanics, vol 17, nº 5, 1967.
- [1.12] Deghan, M., “On the numerical Solution of the one – dimensional Convection-Diffusion Equation”, Mathematics Problems in Engineering, nº1 pp 61-74, 2005.
- [1.13] Deghan, M., “Second-order schemes for a boundary value problem with Newmann’s boundary conditions”, Journal of computational and Applied Mathematics, vol 138, pp 173-184, 2002.
- [1.14] Wong, M.B; Ghajel, J.I. “Sensivity analysis of heat transfer formulations for insulated structural components”, Fire Safety Journa, vol 38, pp 187-201, 2003.
- [1.15] Silva, Valdir Pignatta “Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process- a single derivation”, Engineering Structures, vol 27, pp 2036-2043, 2005.
- [1.16] Wang, Zhi-Hua; Au, Siu Kui; Tan,Kang Hai, “ Heat Transfer analysis using a green’s function approach for uniformly steel members subjected to fire”, Engineering Structures, vol 27, pp 1551-1562, 2005.
- [1.17] Wang, Zhi-Hua; Tan,Kang Hai, “ Sensivity study of time delay coefficient on heat transfer formulations for simulated steel members expose to fire”, Fire Safety Journal, vol 41, pp31-38, 2005.

Capítulo 2

Propriedades dos materiais

2.1. Introdução

As estruturas metálicas quando submetidas ao fogo dependem de vários factores, estes incluem a degradação das propriedades a temperaturas elevadas e a rigidez da estrutura na envolvente ao compartimento de incêndio.

A verificação da resistência pode ser efectuada experimentalmente, nomeadamente fornos de resistência ao fogo, em que se impõe uma variação de temperatura de acordo com a curva normalizada. Existem igualmente métodos analíticos e numéricos que servem como alternativa ao caso do forno e que permitem efectuar o dimensionamento tanto dos elementos como os seus conjuntos (estruturas).

O método de dimensionamento preconizado pelo Eurocódigo 3 Parte 1.2, [2.1] em situação de incêndio é semelhante ao utilizado à temperatura ambiente, sendo que a capacidade de carga terá de ser modificada, utilizando os factores de redução da tensão de cedência do aço e do módulo de elasticidade para se contabilizar as perdas de resistência quando submetido a temperaturas elevadas.

2.1.1. Propriedades térmicas do aço

O calor propaga-se no aço por condução. A equação diferencial que rege o fenómeno atrás referido em corpos sólidos bidimensionais está descrita pela seguinte equação:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_a \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial y}{\partial y} \left(\lambda_a \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \rho_a C_a \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

Esta equação diferencial faz intervir três propriedades importantes para definir o comportamento deste material quando sujeito a transferência de calor por condução: a massa volúmica ρ_a , o calor específico C_a e a condutividade λ_a .

2.1.1.1 Calor específico

O calor específico de um material representa a capacidade para armazenar energia sob a forma de calor. Quantitativamente é energia necessária para elevar num grau centígrado a massa correspondente a 1 [kg] do metal. É das propriedades térmicas cuja variação com a temperatura é mais acentuada, provocada pela transformação alotrópica do material (mudança de fase cristalina, criação da fase γ).

Segundo o Eurocódigo 3 parte 1.2, [2.1] a variação com a temperatura é dada pelas expressões que se seguem, em que θ_a representa a temperatura do aço:

$$C_a = 425 + 0.773\theta_a - 1.69 \times 10^{-3}\theta_a^2 + 2.22 \times 10^{-6}\theta_a^3; 20 < \theta_a \leq 600 [^{\circ}\text{C}] \quad (2.2)$$

$$C_a = 666 - \left[\frac{13000}{\theta_a - 731} \right]; 600 < \theta_a \leq 735 [^{\circ}\text{C}] \quad (2.3)$$

$$C_a = 545 + \left[\frac{17820}{\theta_a - 731} \right]; 735 < \theta_a \leq 900 [^{\circ}\text{C}] \quad (2.4)$$

$$C_a = 650; 900 < \theta_a \leq 1200 [^{\circ}\text{C}] \quad (2.5)$$

Na versão de 1995 no Eurocódigo 3 parte 1.2 nos modelos de cálculo simplificado o calor específico poderia ser considerado um valor constante, independentemente da temperatura, como se poderá ver na equação que se segue:

$$C_a = 600; 20^{\circ}\text{C} < \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad (2.6)$$

Na versão actual do mesmo Eurocódigo não refere esta possibilidade, no entanto menciona-se que para uma gama de temperaturas usuais, o erro cometido no cálculo da temperatura é diminuto quando se utiliza este valor constante.

A variação gráfica do calor específico está representada na figura que se segue:

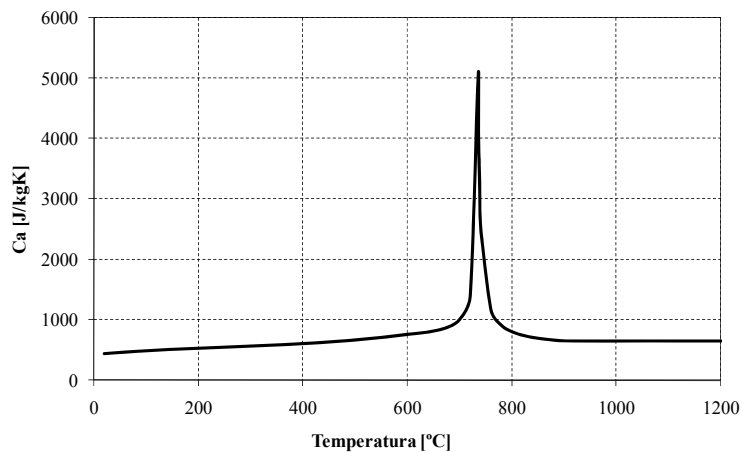


Figura 2.1 Calor específico do aço em função da temperatura.

A descontinuidade apresentada no gráfico está relacionada com a transformação cristalográfica próxima dos 735°C. A evolução desta propriedade é reversível para o caso de se querer efectuar uma análise posterior de arrefecimento.

2.1.1.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica varia ligeiramente com o tipo de aço e tende a diminuir com o aumento da temperatura como se verifica na figura.

As expressões analíticas utilizadas para representar a evolução gráfica são dadas pelas equações que seguem:

$$\lambda_a = 54 - 3.33 \left(\frac{\theta_a}{100} \right) \quad ; 20 < \theta_a \leq 800 [^{\circ}\text{C}] \quad (2.7)$$

$$\lambda_a = 27.3 \quad ; 800 < \theta_a \leq 1200 [^{\circ}\text{C}] \quad (2.8)$$

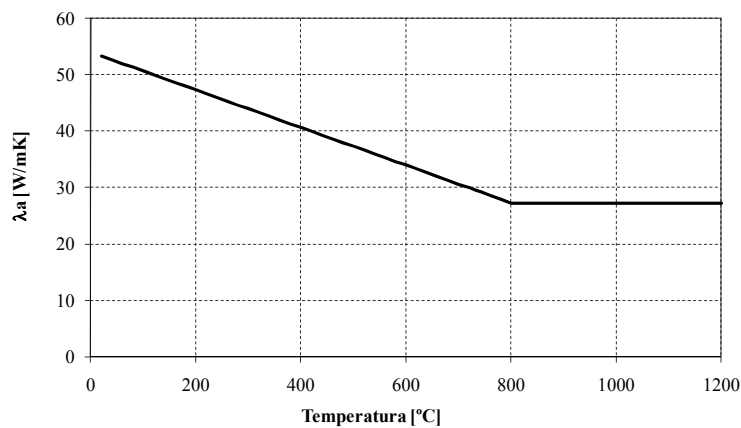


Figura 1.2 Variação da condutividade do aço com a temperatura.

A figura anterior apresenta a evolução da condutividade térmica e pode ser considerada como reversível, no caso de um pós arrefecimento.

2.1.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas são dos parâmetros mais importantes e são substancialmente afectadas pela temperatura, pelo que é necessário dar especial atenção a temperaturas a partir de 95 $^{\circ}\text{C}$, [2.2].

Sob a acção de cargas constantes, os elementos podem sofrer deformações contínuas no tempo, fenómeno designado por fluência do material. À temperatura ambiente e para estados de tensão pouco elevados a fluência poderá ser desprezada, enquanto que para níveis de tensões e temperaturas superiores este fenómeno não deverá ser desprezado. O processo de fabrico e a composição química influenciam o comportamento à fluência, o que torna difícil fazer uma distinção entre os diferentes aços. A fluência só pode ser medida sob condições estacionárias, em que a deformação de fluência pode ser separada das deformações térmicas e das originadas pelo estado de tensão, [2.3].

Os primeiros modelos estabelecidos para descrever o comportamento do aço, numa situação de incêndio, foram os métodos de cálculo simplificado. Este método consistia em extrapolar o comportamento do aço à temperatura ambiente para a situação de temperaturas elevadas. A curva de tensão deformação utilizada à temperatura de 20°C elástica-perfeitamente plástica e os parâmetros necessários para a sua descrição, o módulo de elasticidade e o limite de elasticidade são as propriedades que variam com a temperatura.

O modelo elástico-perfeitamente plástico foi dos modelos mais utilizados no início do estudo da influência da temperatura nas propriedades.

Testes efectuados por Rubert e Schauman em perfis IPE80 e IPE120 e que serviram de base para os resultados dos Eurocódigos, utilizaram taxas de aquecimento entre 2,67 e 32 °C/min e permitiram obter expressões analíticas do tipo elíptico que antecede a cedência do material. Nesse modelo a expressão analítica escolhida corresponde à curva elasto-elíptico-perfeitamente plástica, [2.4].

Outinem e Mäkeläinen realizaram ensaios de tracção transientes e estacionários com provetes de material S355, S420 e S460 para um intervalo de temperaturas compreendido entre 20 e 700°C, [2.5] [2.6] [2.7].

Segundo estes autores os ensaios fornecem resultados muito próximos do comportamento real principalmente nos aços carbono. Estes foram executados com a aplicação de uma carga constante nos respectivos provetes sujeitos a uma taxa de aquecimento constante. Durante o ensaio foram medidos os valores da temperatura e da deformação, estabelecendo-se curvas temperatura – deformação, figura 2.2a).

Os resultados obtidos foram convertidos em curvas tensão – deformação às quais são subtraídas as deformações térmicas, ver figura 2.2b):

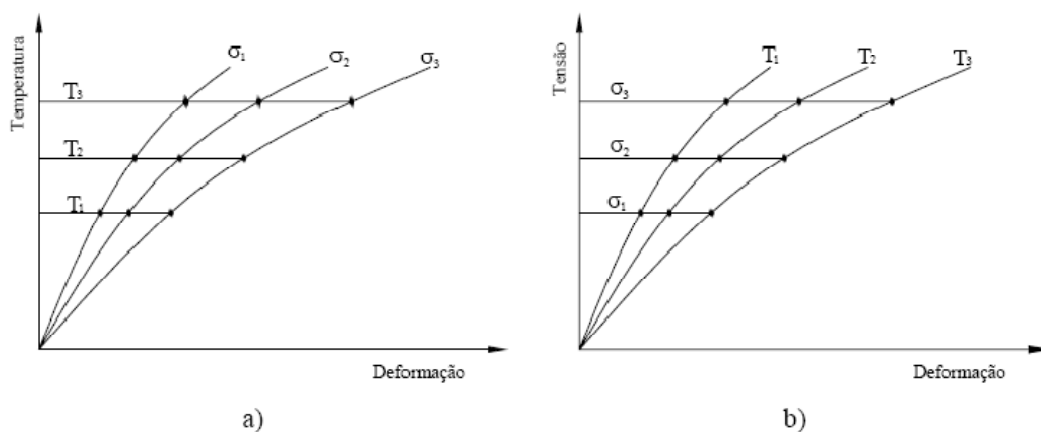


Figura 2.2 Conversão das curvas de tensão – deformação dos ensaios transientes.

As curvas tensão – deformação obtidas permitem a obtenção dos valores do módulo de elasticidade e da tensão de cedência.

À temperatura ambiente é frequente utilizar-se como referência o patamar de cedência para definir a tensão de cedência superior, R_{eH} , e a tensão de cedência inferior, R_{eL} . Como alternativa pode ser utilizado um valor referência de deformação permanente, sendo o mais comum o valor de 0.2.%.

Para temperaturas elevadas, as curvas tensão – deformação são altamente não lineares, não existindo um patamar de cedência bem definido, o valor da tensão de cedência a temperaturas elevadas é obtida com base numa deformação de referência. A selecção do valor de referência, de 0.2% a 0.5% ou 2%, depende do tipo de elemento estrutural, do tipo de solicitação e do método de cálculo, [2.8].

A relação entre a tensão e a deformação que rege o comportamento para os aços de construção, utiliza uma curva, que pode representar dividida em cinco fases, ver figura 2.3, [2.1].

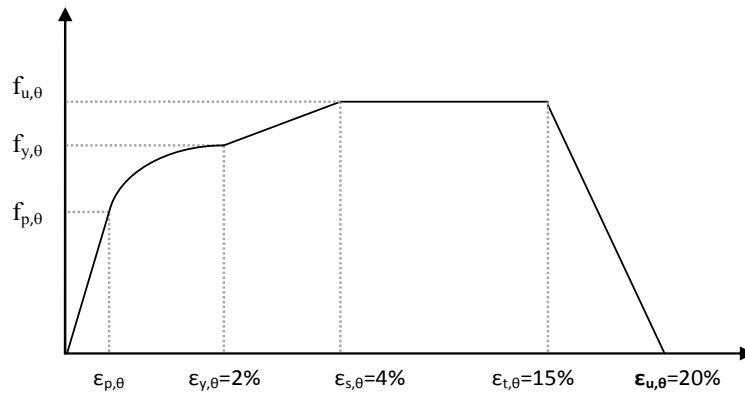


Figura 2.3 Fases da relação tensão – deformação.

A primeira fase estabelece o limite de proporcionalidade, entre a deformação e a tensão. É caracterizada pelo valor $f_{p,θ}$, tensão limite de proporcionalidade à temperatura $θ$ e pelo valor $E_{aθ}$ que representa o módulo de elasticidade. A relação tensão - deformação é expressa pela lei de Hooke através da equação que se segue:

$$\sigma_{a,θ} = E_{a,θ} \times \varepsilon_{a,θ} \quad (2.9)$$

A segunda fase é caracterizada como o início da cedência do material, formalmente parametrizada por $f_{y,\theta}$, tensão de cedência.

A relação da tensão - deformação nesta zona é dada pela seguinte expressão elíptica:

$$\sigma_{a,\theta} = f_{p,\theta} - c + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2} \quad (2.10)$$

Em que os valores dos parâmetros a, b e c são representados pelas seguintes expressões:

$$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) \left(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + \frac{c}{E_{a,\theta}} \right) \quad (2.11)$$

$$b^2 = E_{a,\theta} (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) c + c \quad (2.12)$$

$$c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{E_{a,\theta} (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})} \quad (2.13)$$

Esta fase elíptica é limitada por $\varepsilon_{y,\theta} = 2\%$. O módulo de Elasticidade irá ser obtido pela seguinte expressão:

$$E_{a,\theta} = \frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2}} \quad (2.14)$$

A terceira fase pode ser caracterizada pelo patamar de tensão constante, desprezando o endurecimento por deformação. Para temperaturas inferiores a 400°C o Eurocódigo 3 parte 1.2 estabelece expressões alternativas para esta fase, incorporado o endurecimento por deformação. O patamar pode ser definido por uma tensão máxima dada por $f_{u,\theta}$, dependente da temperatura do aço.

A tensão última $f_{u,\theta}$ pode ser determinada para temperaturas inferiores a 400°C, de acordo com as seguintes expressões:

$$f_{u,\theta} = 1.25 f_{y,\theta} \quad ; \theta_a < 300^\circ\text{C} \quad (2.15)$$

$$f_{u,\theta} = f_{y,\theta} (2 - 0,0025 \theta_a) \quad ; 300^\circ\text{C} \leq \theta_a < 400^\circ\text{C} \quad (2.16)$$

$$f_{u,\theta} = f_{y,\theta} \quad ; \theta_a > 400^\circ\text{C} \quad (2.17)$$

Finalmente a quarta e última fase foi definida para não se obter uma ductilidade numericamente infinita, foi adicionada uma zona linear decrescente, entre $\varepsilon_{t,\theta} = 15\%$ e $\varepsilon_{u,\theta} = 20\%$ de deformação. Neste caso a tensão é dada pela expressão que se segue:

$$\sigma_{a,\theta} = f_{y,\theta} \left[1 - \frac{(\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta})}{(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta})} \right] \quad (2.18)$$

2.1.2.1 Coeficiente de dilatação térmica

Os elementos estruturais de aço quando são sujeitos a um processo de aquecimento sofrem uma dilatação térmica, relacionada com a deformação térmica do material com a temperatura. Por definição o coeficiente de dilatação térmica é obtido através da derivada da deformação térmica ε_{th} em relação à temperatura, como se verifica na expressão seguinte:

$$\alpha_{th} = \frac{d\varepsilon_{th}}{dT} \quad (2.19)$$

em que α_{th} é o coeficiente de dilatação do material. Considera-se que o valor do coeficiente é independente da qualidade do aço.

Para temperaturas inferiores a 100°C o aço possui um coeficiente de dilatação térmica constante aproximadamente $1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Para valores de temperatura em situação de incêndio, isto é, para intervalos de 20 a 1200°C o coeficiente não pode ser constante, pelo que a integração da expressão anteriormente descrita não irá ser imediata, podendo ser determinado o valor da dilatação térmica através da expressão que se segue:

$$\varepsilon_{th} = \int_{T_0}^T \alpha_{th}(T) dT \quad (2.20)$$

As relações entre a deformação térmica, proveniente da dilatação térmica e a temperatura, prescritas pelo Eurocódigo 3 Parte 1.2 são apresentadas nas equações que se seguem, sendo que Δl representa o comprimento introduzido pela temperatura em relação ao comprimento inicial l :

$$\frac{\Delta l}{l} = 1.2 \times 10^{-5} \times \theta_a + 0.4 \times 10^{-8} \times \theta_a^2 - 2.416 \times 10^{-4}; 20 < \theta_a \leq 750 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.21)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 1.1 \times 10^{-2}; 750 < \theta_a \leq 860 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.22)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 2.0 \times 10^{-5} \times \theta_a - 6.2 \times 10^{-3}; 860 < \theta_a \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.23)$$

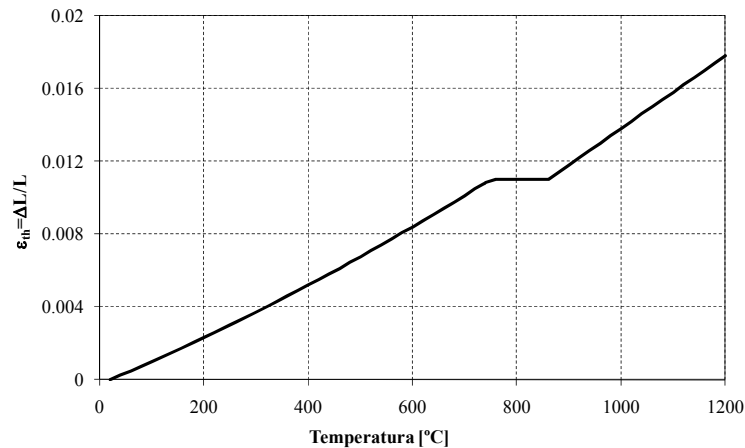


Figura 2.4 Variação do coeficiente de dilatação térmica com a temperatura.

A figura 2.4 representa a variação do coeficiente de dilatação térmica com a temperatura. A dilatação térmica aumenta linearmente até cerca dos 700°C instante correspondente ao início transformação de fase. Esta transformação origina uma contracção do material cerca de 15% da expansão ocorrida entre os 20 e 700°C representada simplificada pelo patamar que está representado na figura. Após a transformação da fase do material assume de novo uma variação linear.

2.1.2.2 Tensão de cedência

A capacidade resistente do aço diminui drasticamente com o consequente aumento da temperatura. A tabela que se segue fornece a variação da tensão de cedência do aço em função da temperatura, definida através de um factor de redução $k_{y,\theta}$, onde podemos constatar que a 700°C o aço possui cerca de 23% da capacidade resistente à temperatura ambiente. Para uma temperatura de 800°C já só possui cerca de 11% e para uma temperatura de 900°C possui cerca de 6%, [2.1].

Tabela 1 Valores do coeficiente de redução da tensão de cedência.

Temp.(°C)	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$K_{y,\theta}$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.78	0.47	0.23	0.11	0.06	0.04	0.02	0.00

A representação gráfica da tabela anteriormente definida na figura seguinte onde se realça que até aos 400°C a tensão de cedência mantém-se constante e que esta propriedade sofre uma diminuição acentuada a partir da temperatura atrás referida.

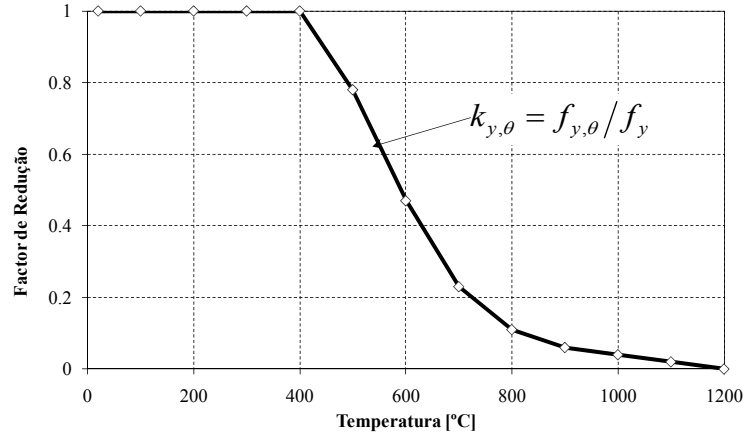


Figura 2.5 Factor de redução da tensão de cedência.

Os valores de $k_{y,\theta}$ da tabela podem ser substituídos por valores obtidos através da equação que se segue desde que obedeça às condições apresentadas

$$k_{y,\theta} = \left[0,9674 \left(e^{\frac{\theta_a - 482}{39,19}} + 1 \right) \right]^{-1/3,833} \quad \wedge \quad k_{y,\theta} \leq 1 \quad (2.24)$$

2.1.2.3 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade diminui com a temperatura. Esta variação é menos significativa para valores mais elevados de temperatura.

Na figura que se segue está representada a variação desta propriedade através de um factor de redução. Este factor representa o quociente entre o valor da propriedade a uma determinada temperatura e o valor da propriedade à temperatura de referência nomeadamente a 20°C.

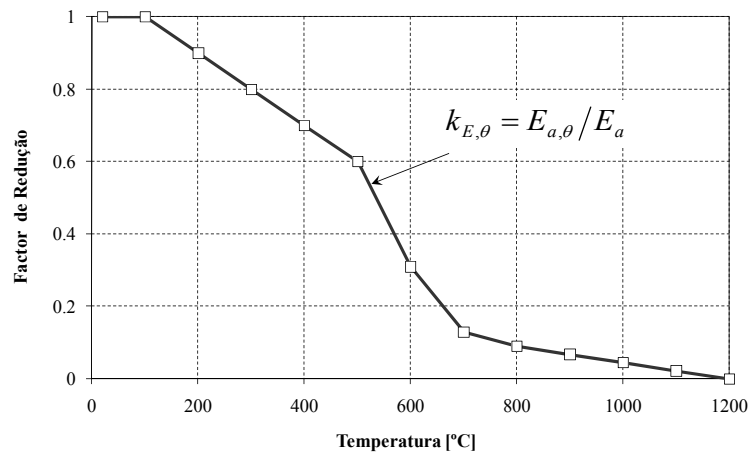


Figura 2.6 Factor de redução do módulo de elasticidade.

Na figura 2.6 podemos constatar que para uma temperatura de 400°C, o valor do módulo de elasticidade é de cerca de 70% do seu valor à temperatura ambiente.

A variação proposta pelo Eurocódigo para o módulo de elasticidade resulta dos valores tabelados entre 20 e 1200°C admitindo uma variação linear entre os valores que são apresentados na tabela que se segue:

Tabela 2 Valores do Coeficiente de redução do módulo de elasticidade.

Temp.(°C)	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$K_{E,\theta}$	1.00	1.00	0.90	0.80	0.70	0.60	0.31	0.130	0.090	0.0675	0.0450	0.0225	0.00

Em alternativa aos valores de $k_{E,\theta}$ tabelados, estes podem ser substituídos pela equação (2.16), desde que obedçam às condições apresentadas:

$$k_{E,\theta} = \frac{1.1 - 0.001\theta_a}{e^{(\theta_a - 500)}} + 220 \frac{e^{(-0.006\theta_a - 3)}}{e^{(500 - \theta_a)} + 1} \quad \wedge \quad k_{E,\theta} \leq 1.0 \quad (2.25)$$

2.1.2.4 Tensão limite de proporcionalidade

A tensão limite de proporcionalidade tem como a principal função definir o módulo de elasticidade dos materiais. Para valores de deformação relativamente pequenos podemos verificar que existe uma proporcionalidade entre o valor da deformação e o respectivo valor da tensão.

Na figura que se segue podemos verificar que existe uma diminuição muito acentuada para temperaturas superiores a 100°C. Esta variação coincide com o valor de temperatura para o qual se verifica uma diminuição do módulo de elasticidade.

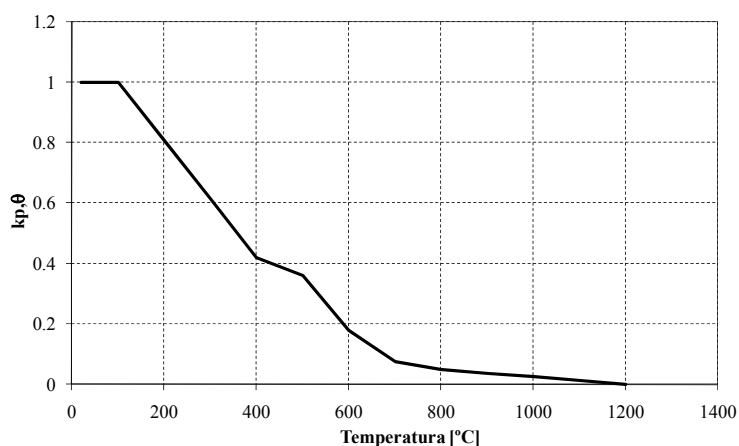


Figura 2.7 Tensão limite de proporcionalidade para aços.

2.2. Elemento de protecção do material

2.2.1 Intumescência

As tintas intumescentes são materiais reactivos que são formulados com uma série de componentes activos que quando estão sob a acção do fogo reagem quimicamente entre si, formando uma espuma carbonosa, originado um aumento de volume que se comporta como uma camada protectora que vai reduzir o aumento de temperatura no aço, [2.9] como se verifica na figura que se segue.

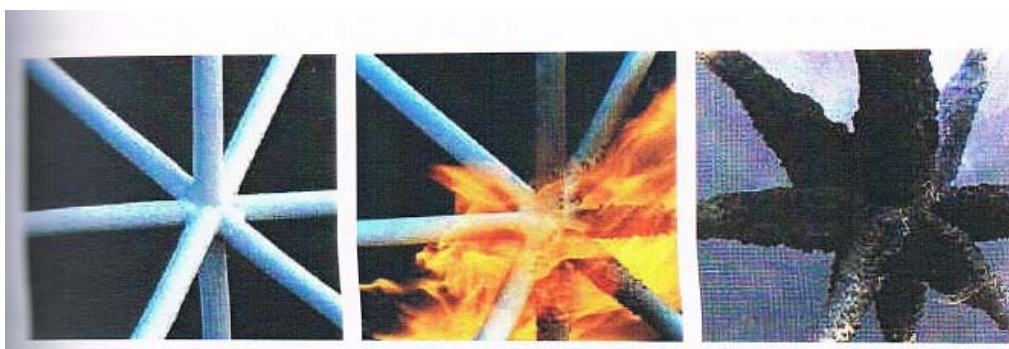


Figura 2.8 Reacção da tinta intumescente.

Os componentes activos da intumescência são: o agente desidratante ou o catalisador que normalmente é o polifosfato de amónio, um agente carbonífero como o pentaeritritol e um agente expensor que é constituído por compostos nitrogenados. Durante o processo de intumescência das reacções químicas que irão ocorrer há que salientar a decomposição do agente desidratante a uma temperatura próxima dos 150°C como se pode verificar na reacção I da figura 2.10. Para uma temperatura superior, o ácido formado vai reagir com o agente carbonífero, reacção II da figura 2.10. Para uma temperatura entre os 200 e os 300°C, aparece nova reacção e dependendo do agente constituído por nitrogenados dá-se a decomposição deste agente formando gases e gerando uma espuma de cor preta. Para temperaturas próximas de 700°C essa camada vai transformar-se numa camada cerâmica porosa de cor branca e com uma baixa condutividade térmica, ver figura seguinte.

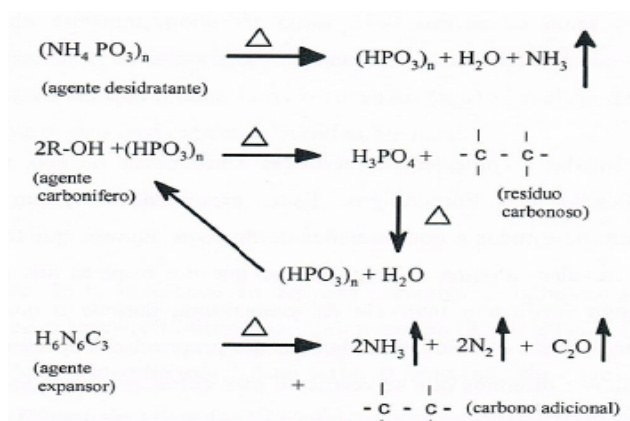


Figura 2.10 Reacções químicas de intumescência.

2.3 Propriedades Térmicas

Alguns investigadores fizeram estudos cinéticos da pirólise ou degradação térmica, em que utilizaram diferentes modelos matemáticos. O modelo apresentado pelo autor Staggs é baseado essencialmente na decomposição do polímero para produzir durante uma única etapa o carvão e ao gás temporários, [2.10-2.12].

Um outro autor, Di Blasi,[2.13-2.15] fez uma apresentação de simulações numéricas de pirólise em que tinha em consideração a variação das propriedades, os fenómenos de transferência por condução e convecção de calor através do sólido e da camada fundida. Foram estudos baseados em equações de conservação escritas para as fases fundidas e virgens do polímero. De referir que este autor apresentou uma revisão do estudo da arte em 1993 e que foi actualizado em 2000.

Para solucionar problemas de fronteira utilizando aproximações por diferenças finitas, Dehghan e Cannon apresentaram modelos matemáticos, [2.16-2.18].

Publicações apresentadas recentemente sobre a protecção passiva mostram que os resultados são baseados na solução da equação diferencial parabólica simplificada para a condução de calor.

2.4. Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as propriedades mecânicas do aço tomando como referência as recomendações que se encontram nos Eurocódigos. Estas propriedades vão variando com a temperatura.

Alguns autores verificaram que em situações de acidente com temperaturas elevadas, registadas entre 30 a 120 minutos, o efeito da fluência depende da velocidade de aquecimento.

2.5 Referências

- [2.1] CEN EN 1993-1-2; "Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1.2: General rules – Structural fire design"; 2005.
- [2.2] Lee, J.H., Mahendran, M., Makelainen, P.; "Prediction of mechanical properties of light gauge steels at elevated temperatures"; Journal of Constructional Steel Research, vol 59, pp 1517-1532, 2003.
- [2.3] Zeng, J.L., Tan K.H., Huang, Z.F., "Primary creep buckling of steel columns in fire", Journal of Constructional Steel Research, vol 59, pp 951-970, 2003.
- [2.4] Ruge J., Winkelmann O., "Deformation behavior of reinforcing and structural steel at high temperatures"; Sonderforschungsbereich 148, Brandverhalten von Bauteilen; Arbeitsbericht 1978; Part II; Braunschweig.
- [2.5] Outinen, Jyri; Kaitila, Olli; Makelainen; "High-temperature testing of structural steel and modeling of structures at fire temperatures – Research report"; Helsinki University of Technology laboratory of steel structures publications – TLK-TER-23; 2001.

- [2.6] Makelainen, P.; Outinem, J.; Kesti, J. "Fire design model for structural steel S420M based upon transient-state tensile.
- [2.7] Outinem, J.; Kesti, J.; Makelainen, P.; " Fire design model for structural steel S355 based upon transient state tensile results", Journal of Constructional Steel Research, vol 42, N°3, pp 161-169, 1997.
- [2.8] Franssen, Jean – Marc; " Étude du comportement au feu des structures mixtes acier – béton"; Thèse présenté à la faculté des sciences appliqués de l'université de Liege en vue de l'obtention du grade scientifique de docteur en sciences appliqués, 1986.
- [2.9] Dowling, John; "Designing for fire protection", Construction news supplement, pp 14-15, 2003.
- [2.10] Staggs, JEJ, "Modelling thermal degradation of polymers using single-step first order kinetics", Fire Safety Journal, vol 32, pp 17-34, 1999.
- [2.11] Staggs, JEJ "Simple mathematical models of char-forming polymers", Polymer International, vol 49, pp 1147-1152, 2000.
- [2.12] Staggs, JEJ "Heat and mass transport in developing chars", Polymer Degradation and Stability, vol. 82, pp 297-307.
- [2.13] Di Blasi, C. "modeling the effects of high radiative heat fluxes on intumescent material decomposition", Journal Anal. Appl. Pyrolysis, vol 71 pp 721-737, 2004.
- [2.14] Di Blasi, C. "Linear pyrolysis of cellulosic and plastic waste", Journal Analytical and Applied. Pyrolysis, vol 40-41 pp 463-479, 1997.
- [2.15] Di Blasi, C. "Transition between regimes in the degradation of thermoplastic polymers", Polymer degradation and stability, vol 64 pp 359-367, 2004.

Capítulo 3

Ações em elementos estruturais nas condições de incêndio

3.1. Introdução

As estruturas de aço são utilizadas na construção de edifícios devido à sua elevada resistência mecânica, boa ductilidade e rapidez na execução de uma determinada obra.

Existe uma variedade de parâmetros físicos, que são muitos e complexos, que determinam as condições de acção ao fogo. Cada parâmetro vai intervir na duração do fogo, na maneira como irá afectar a sua estrutura termicamente e na violência na duração do fogo.

Os factores mais importantes na acção dos fogos em estruturas são: a densidade de carga de incêndio, as dimensões e as formas do local, as características de combustão dos diversos materiais, as propriedades térmicas e as condições de ventilação.

3.2 Elementos estruturais em condições de incêndio

A resistência ao fogo de um elemento estrutural pode ser definida como um intervalo de tempo, Δt , transcorrido desde o início do fogo normalizado, isto é, até ao momento em que o elemento estrutural atinja a temperatura crítica, para o qual o elemento deixa de satisfazer as funções de suporte de carga. A temperatura crítica depende do grau de carregamento existente no elemento estrutural, [3.1].

O método de dimensionamento de estruturas metálicas em situação de incêndio proposto pelo Eurocódigo 3 parte 1.2 é semelhante ao método utilizado à temperatura ambiente, no entanto a capacidade resistente é modificada. São utilizados factores de redução da tensão de cedência e do módulo de elasticidade para contabilizar o efeito da alteração destas propriedades dos materiais. As propriedades mecânicas e as propriedades térmicas do aço são apresentadas no Eurocódigo atrás referido e também na parte 1.1 do Eurocódigo 3, [3.2] [3.3].

Os valores de cálculo das propriedades em situação de incêndio são expressos de acordo com a seguinte expressão:

$$X_{fi,d} = \frac{X_{k,\theta}}{\gamma_{M,fi}} \quad (3.1)$$

Em que $X_{k,\theta}$ representa o valor característico das propriedades em situação de incêndio em função da temperatura θ e onde $\gamma_{M,fi}$ representa o factor de segurança parcial para a propriedade em causa em condição de incêndio.

$$X_{k\theta} = X_{fi,d} \times \gamma_{M,fi} \quad (3.2)$$

Para as propriedades mecânicas, $X_{k\theta}$ é expresso pela seguinte expressão:

$$X_{k,\theta} = k_{\theta} \times X_k \quad (3.3)$$

Em que X_k é o valor característico da propriedade mecânica à temperatura ambiente e k_0 representa o factor de redução da propriedade em função da temperatura.

Os elementos estruturais podem utilizar alguns critérios de separação entre os quais o critério R, em que a função de suporte de carga é mantida durante o tempo necessário de exposição ao fogo, designada de resistência mecânica. Com a curva de hidrocarbonetos, a exposição ao fogo devem aplicar-se os mesmos critérios mencionados, no entanto nesta curva a referência deve ser identificadas com as letras HC, como mostra a figura

Os critérios E em que a integridade é a habilidade de um determinado elemento de separação na construção civil que quando exposto ao fogo num dos lados faz impedir a passagem das chamas e dos gases e evita a ocorrência de chamas nas laterais.

No critério I o isolamento é a habilidade de um determinado elemento de separação que quando estiver exposto ao fogo num dos lados restringe o aumento da temperatura da face que não está exposta abaixo do nível especificado.

Na figura que se segue podemos ver os critérios atrás referidos, fazendo corresponder R a EF (Estável ao fogo), E a PC (Pára – chamas) e EI a CF (Corta-fogo).

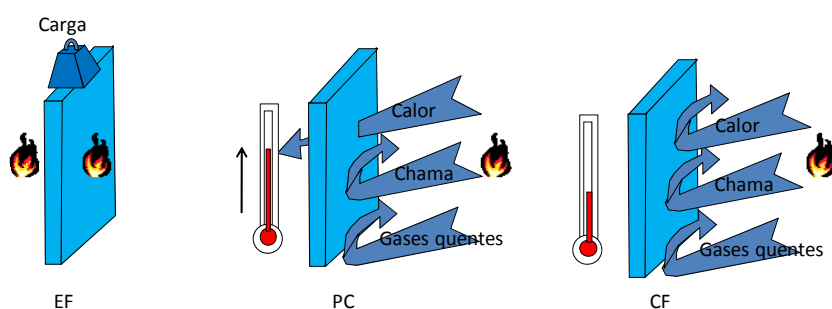


Figura 3.1 Critérios de separação dos elementos estruturais.

3.2.1 Domínio da resistência

A resistência ao fogo de um elemento estrutural é definida como o intervalo de tempo transcorrido desde o início de um incêndio normalizado, até ao momento em que o elemento atinge a sua temperatura crítica, ou seja a temperatura a partir da qual deixa de satisfazer as funções de suporte da carga para que foi projectado, verificando a condição de segurança da inequação:

$$E_{fi,d,t} \leq R_{fi,d,t} \quad (3.4)$$

Em que $E_{fi,d,t}$ representa o valor de calculo do efeito das acções no instante t e $R_{fi,d,t}$ representa o valor de cálculo da capacidade resistente durante a exposição ao fogo nas mesmas condições.

3.2.2 Domínio da Temperatura

A resistência ao fogo pode também ser verificada no domínio da temperatura desde que não ultrapasse a temperatura crítica como se pode verificar na figura 3.2, na qual representa os vários domínios de verificação ao fogo e em que os números representados estão relacionados com o nível de segurança apresentado. Os números apresentados são representativos do nível de segurança existente numa estrutura de elementos.

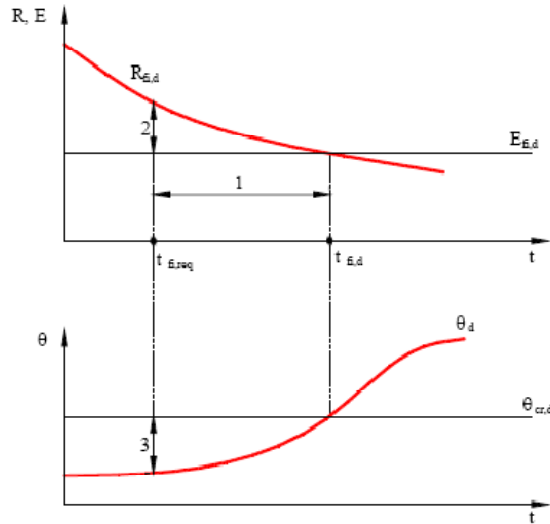


Figura 3.2 Domínios de verificação da resistência ao fogo.

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d}$$

3.2.3 Domínio do Tempo

No domínio do tempo, o valor de cálculo de tempo é o tempo necessário para que o elemento em aço atinja a temperatura crítica. De acordo com a inequação que se segue e se cumprir com a mesma então o elemento deverá ter resistência suficiente. Caso isso não aconteça vai ser necessário escolher um novo elemento ou protege-lo com um material termicamente isolante.

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad (3.5)$$

Na inequação acima referida, $t_{fi,d}$ representa o valor de cálculo da resistência ao fogo e que é medido nas unidades de tempo e $t_{fi,requ}$ representa o valor nominal requerido de resistência ao fogo medido nas mesmas unidades.

3.3 Acções em estruturas em situação de incêndio

As acções em estruturas em condições de incêndio são normalmente classificadas de acções acidentais e poderão ser divididas em acções directas e indirectas.

As acções directas deverão ser combinadas e verificadas em simultâneo, devendo estas ser consideradas como no projecto à temperatura ambiente.

As acções indirectas devem considerar o efeito do constrangimento à expansão térmica do elemento da estrutura, bem como o efeito dos diferentes coeficientes de expansão térmica dentro dos elementos da estrutura e o efeito dos gradientes térmicos na secção recta que irão originar tensões internas. Os valores calculados para as acções indirectas (A_d) deverão ser determinados com base nos valores de cálculo das propriedades térmicas e mecânicas dos materiais de acordo com as partes do Eurocódigo relacionadas com o projecto de estruturas sujeitas à situação do fogo, como se poderá verificar na seguinte equação:

$$E_{fid,t} = \sum G_k + \psi_{1,i} * Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} + Q_{ki} + \sum A_d \quad (3.6)$$

G_k – Valor característico das acções permanentes

$Q_{k,1}$ – Valor característico da acção variável principal ou dominante

$\psi_{1,i}$ – Coeficiente de combinação associado à acção variável principal

$\psi_{2,i}$ – Coeficiente de combinação associado às restantes acções variáveis

A_d – valor de cálculo das acções indirectas de incêndio a que correspondem os esforços resultantes das restrições às dilatações térmicas englobando também o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas do aço.

As acções são classificadas relativamente à variação com o tempo. No caso do vento e da neve são classificadas como variáveis, no caso das cargas relacionadas com o peso próprio da estrutura são classificadas como permanentes.

3.3.1 Acções Térmicas

O fogo é considerado uma acção de acidente, apesar dos seus parâmetros de comportamento serem muito complexos. Um dos factores que poderá influenciar esse comportamento é o tipo de combustível que possa existir, a dimensão do compartimento e a ventilação que possa existir no espaço. Uma combinação destes factores define a densidade de carga de incêndio, q_{fk} .

As acções térmicas estão definidas na parte 1.2 do Eurocódigo 1 em termos de uma densidade de fluxo de calor que incide na fronteira do elemento $\dot{h}_{\text{net,d}}$, contendo duas parcelas, uma devida a convecção $\dot{h}_{\text{net,c}}$ e outra devida a radiação $\dot{h}_{\text{net,r}}$.

A temperatura dos gases no compartimento de incêndio, θ_g , da qual dependem as densidades de fluxo de calor anteriormente referidas está referida no Eurocódigo 1 através de curvas de aquecimento nominais e modelos de fogo natural. As curvas de incêndio nominais são curvas que podem ser expressas por uma fórmula simples idêntica qualquer que seja a dimensão e a ocupação do compartimento de incêndio, [3.4]

3.3.1 Mecanismos de transferência de calor

A transmissão de calor pode ser definida como a propagação de energia de uma região para outra de um meio sólido, líquido ou gasoso, como resultado da diferença de temperaturas entre elas.

A energia transmitida pelo fluxo de calor não pode ser medida directamente, mas o seu conceito tem significado físico pois está relacionado com uma quantidade mensurável que é a temperatura.

Quando existe uma diferença de temperaturas num sistema, o calor flui da região com temperatura mais elevada para a de temperatura mais baixa. Nas trocas de calor podem ser identificados três modos de transferência, condução, convecção e radiação.

A transferência de calor por condução é a forma típica de transmissão nos corpos sólidos, na qual o calor passa através da própria substância do corpo, como se poderá verificar na figura 3.3.

Este modo de transferência é importante no caso do estudo de gradientes de temperatura na secção recta de um determinado elemento, seja com ou sem protecção térmica, quando exposto à acção do fogo.

Para perfis com protecção passiva a condução é um modo de transferência de calor importante, já que o aço não está directamente exposto à acção do fogo ou em contacto directo com os gases.

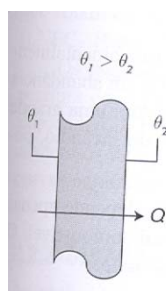


Figura 3.3 Transferência de calor por condução.

A transferência de calor por convecção é uma forma de transmissão no interior de um fluido (líquido ou gasoso) ou entre este e uma superfície sólida na qual o calor é transmitido pelo movimento do fluido como se pode ver na figura 3.4.

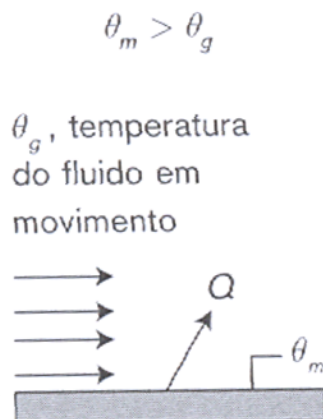


Figura 3.4 Transferência de calor por convecção.

A formula geral da transferência de calor por convecção é dada por:

$$\dot{h}_{\text{net,c}} = \alpha_c(\theta_g - \theta_m) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.7)$$

Numa situação de incêndio é usual considerar $\alpha_c=9 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ para superfícies não expostas e $\alpha_c=25 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ para superfícies expostas da curva ISO. Para curvas de incêndio de elemento externo são utilizados os mesmos valores. Para superfícies expostas a curvas de incêndio de hidrocarbonetos é utilizado um valor de $\alpha_c=50 \text{ [W/m}^2\text{K]}$.

Na equação anterior θ_g traduz a variação da temperatura dos gases na vizinhança do elemento, na qual pode possuir várias formas de evolução e α_c representa o coeficiente de convecção a definir em cada curva de incêndio.

A transferência de calor por radiação: não necessita de qualquer suporte material e na qual o calor é transmitido por radiação electromagnética como se verifica na figura 3.5.

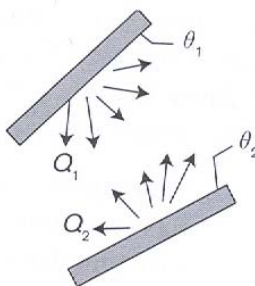


Figura 3.5 Transferência de calor por Radiação.

O fenómeno da radiação num incêndio apresenta complexidade acrescida, pois neste modo intervêm as posições relativas das chamas e dos elementos estruturais. Na modelação numérica será considerada a temperatura dos gases como temperatura ambiente aproximada pela lei de Stefan Boltzmann.

Na radiação o fluxo de calor é expresso pela equação que se segue:

$$\dot{h}_{\text{net},r} = \varphi \cdot \varepsilon_{\text{res}} \times 5.67 \times 10^{-8} [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.8)$$

O parâmetro θ_r representa o valor da temperatura de radiação na vizinhança do elemento expressa em graus célsius, o mesmo acontece com o parâmetro θ_g . O parâmetro θ_m representa a temperatura na superfície do elemento resultante de um cálculo térmico. O parâmetro ε_{res} representa o coeficiente de emissividade resultante, que poderá assumir 0.5 para o aço e de 0.56 para os restantes materiais.

3.3.1.2 Curvas de incêndio nominais

As curvas de incêndio nominais são curvas convencionais que podem ser definidas por uma fórmula simples e que não dependem da dimensão ou tipo de edifícios. Neste documento são definidas 3 curvas nominais:

Curva de incêndio padrão, ISO 834 em que é obtida através da seguinte expressão:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)^\circ\text{C} \quad (t \text{ em minutos}) \quad (3.9)$$

A expressão anterior poderá ser utilizada em ensaios de laboratório bem como em projectos analíticos e ou numéricos em que os elementos de um compartimento sejam submetidos a estas condições térmicas.

Curva de incêndio para elementos exteriores são obtidas através da seguinte equação

$$\theta_g = 660(1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t}) + 20^\circ\text{C} \quad (t \text{ em minutos}) \quad (3.10)$$

Existem alguns exemplos estruturais para elementos exteriores do edifício que são avaliados a partir desta curva normalizada. Esta pode ser utilizada em ensaios de laboratório ou em simulações numéricas ou em métodos simplificados de cálculo.



Figura 3.6 elementos estruturais para elementos exteriores.

Curva de incêndio para hidrocarbonetos a temperatura pode ser determinada pela seguinte expressão.

$$\theta_g = 1080(1 - 0.325e^{-167t} - 0.675e^{-2.5t}) + 20^\circ\text{C} \quad (t \text{ em minutos}) \quad (3.11)$$

Um exemplo típico com este tipo de curva normalizada com hidrocarbonetos é avaliar o comportamento de elementos submetidos a um incêndio muito energéticos. Um exemplo recorrente deste tipo de acidente ocorreu no dia 11 de Setembro de 2001, quando dois aviões comerciais foram desviados e forçados a embater no edifício das torres gémeas de Nova York.



Figura 3.7 Incêndio com hidrocarbonetos.

Na figura seguinte podemos verificar o desenvolvimento das 3 curvas, as quais como se poderá verificar não possuem a fase de ignição nem a fase de extinção ou arrefecimento. Esta característica torna estas curvas úteis para comparar ensaios de resistência ao fogo.

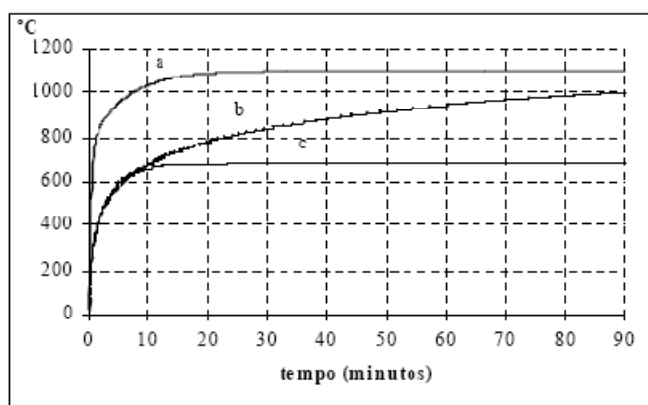


Figura 3.8 Curvas nominais para a acção do fogo.

O incêndio padrão é tomado como base de referência para estabelecer o conceito de “resistência ao fogo regulamentar”, $t_{fi\ requ}$, dos elementos estruturais. A maior parte dos regulamentos de segurança contra incêndios em edifícios adotam este conceito e estabelecemos valores da resistência ao fogo dos elementos estruturais.

3.3.1.3 Curvas de incêndio Paramétricas

As curvas paramétricas tempo - temperatura definidas no Anexo A da parte 1.2 do Eurocódigo 1 são também curvas de evolução da temperatura em função do tempo, mas contrariamente às curvas nominais, dependem de certos parâmetros físicos, entre os quais: a densidade de carga de incêndio (quanto maior a carga de incêndio maior a duração do incêndio); as condições de arejamento, dependentes, principalmente, da geometria, dimensões e distribuição das aberturas do compartimento (grandes aberturas de ventilação conduzem a incêndios rápidos mas mais severos, ver figura); as propriedades das paredes envolventes do compartimento de incêndio (paredes que absorvem energia limitam a temperatura do incêndio).

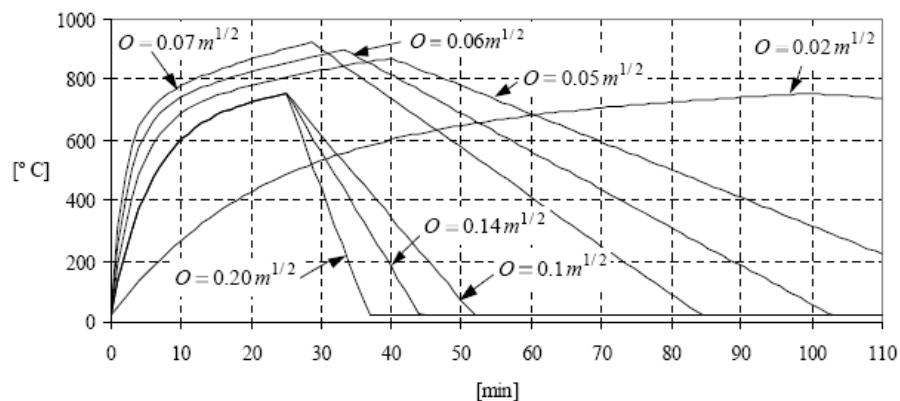


Figura 3.9 Curvas paramétricas.

A figura mostra que as curvas de incêndio paramétricas distinguem-se das curvas de incêndio nominais pois estas já possuem a fase de arrefecimento. Estas curvas traduzem de modo mais apropriado os incêndios que existem na realidade e têm em conta os principais parâmetros que influenciam a extensão e o desenvolvimento dos incêndios, [3.1].

3.3.1.4 Incêndio Natural

Para que haja incêndio é necessária a existência simultânea de 3 factores essenciais: uma fonte de calor, um combustível e o comburente, no caso o oxigénio. O início do incêndio dá-se quando a mistura combustível/oxigénio esta suficientemente quente para que ocorra a combustão.

A figura que se segue representa a curva de incêndio natural típica, no qual se poderão observar quatro fases: fase inicial ou de ignição, fase de propagação, fase de desenvolvimento pleno e a fase de extinção ou de arrefecimento.

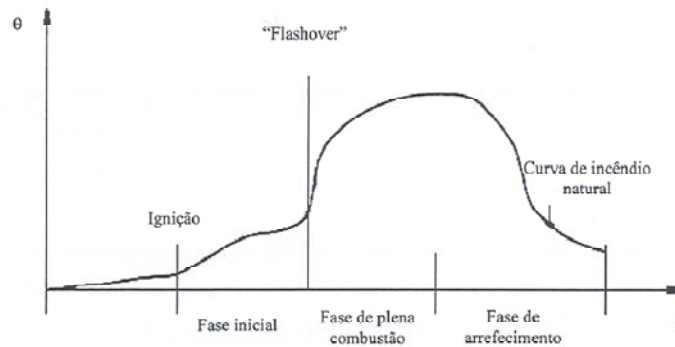


Figura 3.10 Fases do incêndio natural.

Na fase de ignição as temperaturas permanecem baixas, não tendo nenhuma influência no comportamento estrutural dos edifícios. Após se atingir um nível suficiente de radiação, os materiais combustíveis entram em ignição envolvendo todo o compartimento configurando o ponto que seja mais crítico do incêndio. O “Flashover” representa a transição entre a fase de aquecimento e a fase da queima. A fase de propagação é a fase na qual o fogo se espalha por radiação ou contacto directo dando-se em determinado tempo a inflamação súbita dos gases e o incêndio generaliza-se a todo o compartimento.

Na fase de desenvolvimento pleno decorre a queima do material combustível, mantendo-se as temperaturas praticamente uniformes comportamento de incêndio.

Por fim a fase de extinção em que há uma diminuição progressiva das temperaturas, quer seja pela falta de combustível ou oxigénio ou pela intervenção de bombeiros ou outros.

3.3.1.5 Curvas de incêndio BFD

Existe um outro tipo de curvas designadas de BFD que pode ser utilizada como uma aproximação das curvas de incêndio internacionais Tempo – Temperatura, ISO834, ASTM119, curva de hidrocarbonetos e curva de elementos estruturais exteriores.

A expressão básica da curva BFD é a seguinte:

$$T = T_m e^{-z} + T_a \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.12)$$

em que T_m representa a temperatura máxima e T_a a temperatura ambiente ambas em $^\circ\text{C}$.

O parâmetro z depende do tempo e de uma constante S_c como se pode verificar na seguinte expressão:

$$z = \frac{(\log t - \log t_m)^2}{S_c} \quad (3.13)$$

Para a substituição da curva ISO pela correspondente BFD foram utilizados os seguintes valores: T_m de 1418°C , t_m de 10000 min e um S_c de 62.

Na figura que se segue pode verificar-se a comparação entre as duas curvas acima referidas.

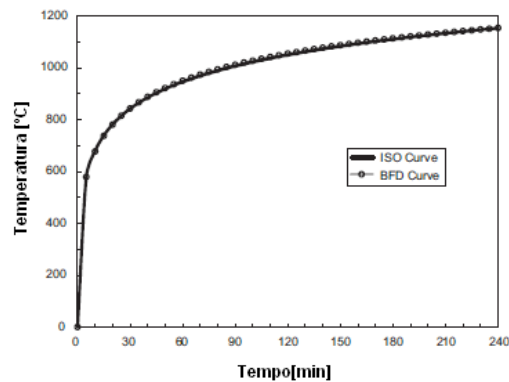


Figura 3.11 Comparação entre curva ISO e BFD.

Na figura se segue podemos verificar a comparação entre a curva normalizada ASTM e a correspondente BFD, neste caso são utilizados os seguintes valores: $T_m=1211^\circ\text{C}$, $t_m=3500$ min e um $S_c=58$.

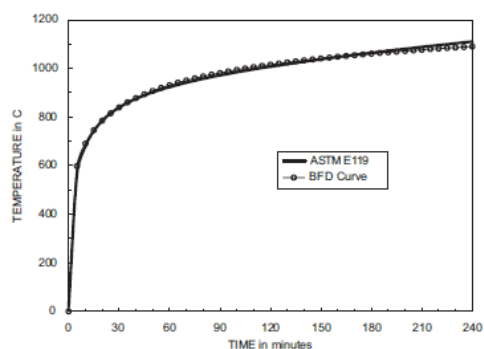


Figura 3.12 Comparação entre curva ASTM e BFD.

Para o caso da curva de hidrocarbonetos foram utilizados os seguintes valores: $T_m=1065^{\circ}\text{C}$, $t_m=80\text{ min}$ e $S_c=60$. É apresentada na figura a comparação entre este tipo de curva e a correspondente BFD.

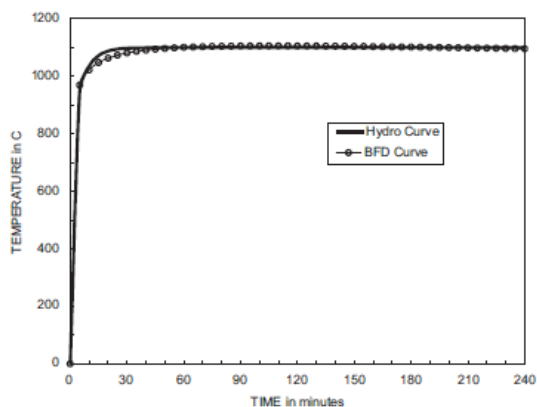


Figura 3.13 Comparação entre curva Hidrocarbonetos e BFD

Para a substituição da curva de elementos exteriores pela curva BFD deverão ser utilizados os parâmetros $T_m=660^{\circ}\text{C}$, $t_m=50\text{ min}$ e $S_c=150$, a comparação destas duas curvas poderá verificar-se na figura seguinte:

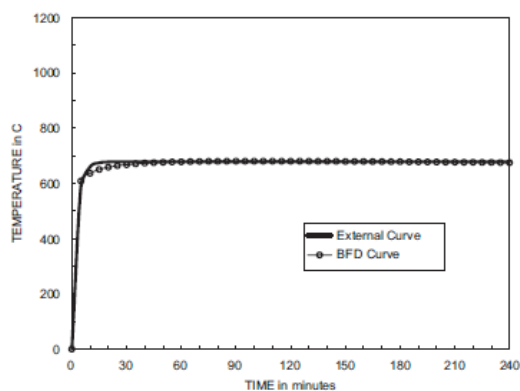


Figura 3.14 Comparação entre curva Externa e BFD

3.3.1 Acções Mecânicas

O fogo é considerado uma acção de acidente pelo que o valor de cálculo dos efeitos das acções em situação de incêndio, $E_{fi,d,t}$, deve ser obtido usando a seguinte combinação de acidente:

Com o objectivo de simplificação dos cálculos, reduzindo o número de combinações de acções a considerar, a parte 1.2 do Eurocódigo 3, prEN 1993-1-2, permite obter o valor de cálculo dos efeitos das acções em situação de incêndio $E_{fi,d,t}$ como uma percentagem η_{fi} do valor de cálculo dos efeitos das acções determinado à temperatura ambiente E_d :

$$E_{fi,d,t} = \eta_{fi} E_d \quad (3.14)$$

Em que η_{fi} – é o factor de redução para o valor de cálculo do nível de carregamento em situação de incêndio e que é dado pela seguinte equação:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{1,1} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (3.15)$$

Em que γ_G é o coeficiente parcial de segurança da acção permanente à temperatura ambiente com um valor de 1,35. O $\gamma_{Q,1}$ é o coeficiente parcial de segurança da acção variável principal à temperatura ambiente, com o valor de 1,5.

3.4 Protecção passiva de elementos estruturais

A protecção passiva consiste na utilização de métodos cuja eficácia deve estar sempre presente sem desenvolver qualquer acção directa sobre o incêndio.

A protecção passiva contra o fogo compreende todos aqueles materiais, sistemas e técnicas, projectados para prevenir a aparição de um incêndio, impedir ou atrasar a sua propagação e facilitar por ultimo a sua extinção. A protecção passiva assume um papel de relevo no âmbito geral da protecção contra incêndio de um edifício.

O seu projecto e aplicação implicam conhecimentos adequados sobre reacção ao fogo, resistência ao fogo, compartimentação e desenfumagem

Em termos de análise do comportamento ao fogo, os materiais são classificados na base da reacção ao fogo, enquanto os elementos na base da resistência ao fogo.

A resistência ao fogo é o tempo (em minutos) durante o qual um determinado sistema construtivo mantém, em condições de fogo normalizado, as exigências que lhes são solicitadas em termos de estabilidade/capacidade. A estanqueidade à passagem de chamas e gases quentes e resistência térmica suficiente para impedir que na face não exposta se alcancem temperaturas superior às estabelecidas pela norma. A resistência do aço diminui drasticamente com o aumento da temperatura. Há estruturas cuja resistência ao fogo é reduzida se não forem devidamente protegidas como por exemplo estruturas de madeira e as estruturas metálicas, [3.1].

Como os materiais diminuem a sua capacidade resistente com o aumento da temperatura, a protecção obtém-se de um modo geral interpondo entre o incêndio e o elemento estrutural um material que atrase no tempo o aumento de temperatura na estrutura metálica.

Aos materiais usados na protecção de estruturas contra incêndio devem ser exigidas as seguintes propriedades: elevada temperatura de fusão, boa capacidade para se deformarem sob a acção do calor; resistência às acções de origem térmica, condições de perfeita aderência às estruturas em que são aplicados, resistência ao longo do tempo aos agentes atmosféricos, químicos, choques, etc.

Entende-se por compartimentação as medidas construtivas adoptadas com o objectivo de limitar a sua propagação, incluindo fumos e gases de combustão. Um compartimento corta-fogo é, essencialmente, constituído por paredes e pavimentos resistentes ao fogo com capacidade de o circunscrever durante determinado período de tempo, o que implica que todos os vãos e atravessamentos na fronteira do compartimento corta-fogo mantenham as mesmas características de resistência. A finalidade da compartimentação é, também, fragmentar a carga de incêndio e facilitar a evacuação rápida dos ocupantes. Simultaneamente, limitam-se os prejuízos e facilita-se a intervenção das forças exteriores de socorro.

O fumo apresenta perigo para as pessoas e para os bens patrimoniais. Esta espécie possui elevada temperatura, opacidade, toxicidade e corrosividade. Para que estes perigos não atinjam valores críticos é fundamental uma correcta desenfumagem dos espaços, quer de modo passivo, quer de modo activo.

Este controlo de fumo vai garantir a praticabilidade das vias de evacuação, permitir a visibilidade ao longo dos percursos e nos locais, evitar o perigo de intoxicação dos ocupantes ou das equipas de intervenção e baixar a temperatura do fumo e dos gases, para protecção das pessoas e da construção.

A utilização da protecção passiva permite a obtenção de resistências ao fogo que poderá ir desde os 30 minutos até as 4 horas, consoante a espessura do material de protecção utilizado e a natureza.

Os vários métodos e sistemas de protecção utilizados podem agrupar-se em irrigação do aço, protecção com resguardos ou ecrãs, protecção envolvendo o elemento: pintura intumescente, materiais projectados, envolvimento por betão.

Os materiais que são utilizados na protecção dos elementos estruturais em condição de incêndio deverão possuir uma boa resistência mecânica ao impacto e ao choque, possuir uma boa aderência aos elementos a proteger e possuir uma condutividade térmica baixa.

Existe uma variedade de materiais utilizados na protecção passiva de elementos estruturais tais como; gesso, betão, fibras minerais, tintas intumescentes, argamassa por projecção, placas de lâ de Rocha;

3.4.1 Gesso

O gesso é um material constituído por sulfato de cálcio que quando se encontra no estado seco contem cerca de 20% de água cristalizada e quando sujeito a altas temperaturas transforma-se num sulfato de cálcio anidro, com absorção de uma grande quantidade de energia. Quando sujeito ao fogo, absorve uma grande quantidade de calor e o gesso vai atrasar a passagem do fluxo térmico funcionando como um material de protecção térmica, [3.1].

A utilização do gesso vai exigir a utilização de um suporte adequado a fim de evitar a sua degradação. Pode utilizar-se uma rede metálica ou uma fibra de vidro como se poderá ver na figura que se segue:

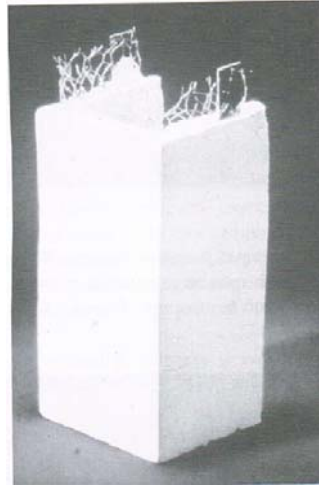


Figura 3.15 Placa de Gesso.

3.4.2 Betão

Quer o betão normal quer o betão leve têm sido muito utilizados como materiais de protecção térmica, envolvendo totalmente o perfil a proteger ou no caso de perfis tubulares enchendo o seu interior como se pode ver na figura a seguir: [3.1].



Figura 3.16 Betão.

O betão leve é um material que possui uma baixa condutividade térmica enquanto que o betão normal é um material pesado com uma grande capacidade térmica e que absorve uma grande quantidade de calor.

Uma das vantagens na utilização do betão envolvendo os elementos de aço é a excelente durabilidade em ambientes agressivos e é um bom isolante térmico.

Trata-se de um material que é um bom isolante térmico, no entanto não tem sido muito utilizado em virtude dos elevados custos da sua aplicação, existindo no mercado processos alternativos na protecção térmica que são mais económicos.

3.4.3 Fibras minerais

As fibras minerais são materiais obtidos artificialmente fazendo passar uma corrente de vapor através de um líquido constituído por rochas ou escórias vulcânicas fundidas, dependendo da natureza das fibras da composição das rochas utilizadas no seu fabrico. Entre as várias fibras minerais podemos designar a fibra ou lã de rocha que é fabricada a partir das escórias do alto-forno e a fibra ou lã de vidro que é obtida a partir da fusão de uma composição de vidro particular;

Normalmente estes materiais aplicam-se por projecção pneumática mas também existem em placas rígidas ou semi-rígidas. Como se poderá ver na figura que se segue:



Figura 3.17 Perfil protegido com fibra mineral projectada.

3.4.3.1 Placas de lã de rocha

As placas de lã de rocha provêm de fibras minerais de rochas vulcânicas, entre elas o basalto e o calcário. São fibras naturais de rocha vulcânica e que são apresentados em forma de placas ou mantas, são totalmente imunes à acção do fogo e têm excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico. Possuem uma baixa densidade e a matéria-prima utilizada na confecção das placas é o basalto.

As mantas de lã de rocha são normalmente utilizadas para isolamento de equipamentos e superfícies cilíndricas, quer sejam planas ou irregulares. Estas mantas são revestidas numa das faces com uma tela metálica como se poderá ver na figura seguinte:



Figura 3.18 Placa de Lã de rocha.

3.4.3.2 Placas de lã de vidro

A origem da lã de vidro como se poderá ver figura provém de uma substância líquida inorgânica obtida através de um composto básico de vários elementos: a sílica, em forma de areia, que assume o papel de vitrificante, o carbonato de sódio, sulfato de sódio e potássio, para que a temperatura de fusão seja mais baixa, e o carbonato de cálcio e magnésio, como estabilizantes para conferirem a este material uma elevada resistência à humidade.

A lã de vidro, pelas suas propriedades físicas e químicas, é um dos mais tradicionais isolantes térmicos usados no mundo



Figura 3.19 Placa de lã de vidro.

3.4.4 Tintas intumescentes

Um dos materiais que se utiliza para a protecção do fogo de estrutura, principalmente de estruturas metálicas é a tinta intumescente.

O método de protecção de estruturas por tinta intumescente é um método de utilização relativamente recente. Consiste na aplicação de uma tinta, com características especiais, sobre a superfície a proteger, [3.1].

Estas tintas são derivados celulósicos que, pela adição de ligantes orgânicos especiais e agentes dilatadores, tendem a aumentar de volume, neste caso a crescer em espessura, formando uma camada que pode atingir várias dezenas de vezes a espessura inicial. Essa camada funciona como um isolante térmico.

A aplicação deste tipo de tintas exige cuidados especiais na preparação da superfície a pintar (decapagem) e na aplicação do primário. A pintura deve ser renovada periodicamente, total ou parcialmente, em virtude da resistência mecânica e química da pintura ser limitada.

As principais desvantagens das tintas intumescentes são o custo elevado quando comparado com as outras formas de protecção, requer condições atmosféricas favoráveis (além de necessitar várias demãos para atingir a espessura necessária). Outra desvantagem é que o tempo de protecção apresentado pela maior parte destas tintas não vai além de 60 minutos. Um número limitado de tintas intumescentes pode ser usado por períodos mais longos, tais como 90 e 120 minutos, mas o custo total é consideravelmente mais elevado do que a aplicação para 60 minutos.

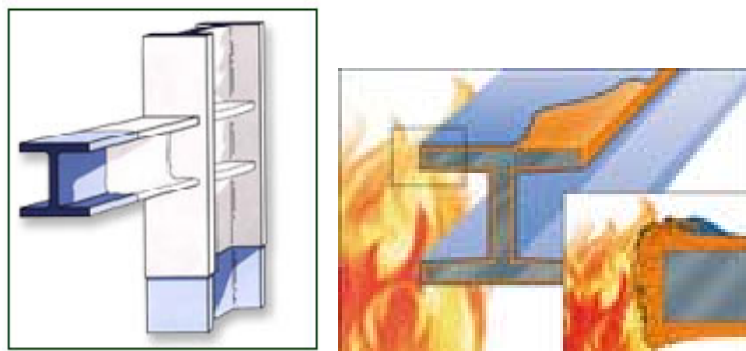


Figura 3.20 Perfil protegido com tinta intumescente.

3.4.5 Argamassa projectada

A argamassa projectada é um produto com alto conteúdo de aglomerantes que quando são misturados com água gera-se uma massa fluida que poderá ser facilmente bombeada. Normalmente são apresentados como produtos de alta, média ou baixa densidade e são construídos basicamente de gesso, aproximadamente 80% do peso seco, cimento, principalmente em materiais de alta e média densidade, cargas inertes tais como poliestireno expandido, celulose e preservantes.

Materiais de baixa densidade são aplicados de um modo geral em obras internas. Os de média densidade são utilizados em obras internas com requisitos de alguma resistência ao impacto e à humidade, enquanto o de alta densidade são geralmente utilizados em obras externas onde o risco de impacto é muito elevado, assim como a humidade.

Os aços não pintados apresentam uma melhor condição de aderência dos materiais, podendo dispensar a utilização de elementos de ancoragem, salvo peças de excessiva altura. No caso de peças de excessiva altura poderá ser necessário algum tipo de ancoragem mecânica, como por exemplo a utilização de telas de fixação.

Quando a temperatura ambiente atinge 90°C – 150°C, as ligações químicas existentes no gesso hidratado sofrem algumas alterações, liberando água de hidratação. Esta reacção absorve a energia do fogo, que seria conduzida ao aço. Este processo permite ao aço manter uma temperatura relativamente baixa entre 20 a 30 minutos durante a primeira hora crítica do incêndio. A mesma consideração é aplicada para placas de gesso acartonado, [3.1].

3.5 Conclusões

O incêndio é considerado uma acção accidental e neste capítulo foram apresentadas as acções mecânicas e acções térmicas a considerar numa estrutura em situação de incêndio. Nas acções mecânicas foi mostrado a combinação do acidente que será utilizado no dimensionamento estrutural. Relativamente as acções térmicas foram mostradas várias curvas que representam a evolução do aquecimento do compartimento de incêndio.

Desta forma poderá concluir-se que com o aumento da temperatura, a resistência do aço diminui, no entanto a protecção térmica é o meio que mais se utiliza na protecção passiva contra incêndios.

3.6 Referências

- [3.1] Vila Real, P.M.M.; "Incêndio em Estruturas Metálicas – Cálculo Estrutural"; Edições Orion; 2003
- [3.2] CEN ENV 1993-1-2, "Eurocode 3; Design of Steel structures – Part 1.2; General Rules – Structural Fire Design, 2005
- [3.3] CEN ENV 1991-1-1, "Eurocode 3; Actions on structures – Part 1.1; General actions – Densities weight and imposed loads, 2002
- [3.4] Vila Real, P.M.M "A Influência das Medidas de Protecção Activas no Cálculo da Resistência ao Fogo das Estruturas Metálicas"

Capítulo 4

Ensaaios Experimentais

4.1 – Introdução

A capacidade de resistência ao fogo de um elemento estrutural pode ser obtida através de ensaios executados num forno, sob a acção de carregamento mecânico e com as condições prescritas pela curva ISO834. A resistência ao fogo segundo a curva anteriormente referida pode ser comparada com as curvas naturais, em função da densidade carga de incêndio e da ventilação do compartimento.

O principal objectivo deste capítulo é estudar a evolução da temperatura bem como a evolução da intumescência para análise de elementos estruturais, quando submetidos à acção do fogo. Foi um estudo efectuado por via experimental, pressupondo que o elemento de construção é sujeito a uma variação de temperatura de incêndio, segundo as curvas normalizadas.

A curva ISO834 é utilizada em ensaios experimentais para se determinar a resistência ao fogo em elementos estruturais. Esta curva permite, sobretudo, padronizar os ensaios experimentais possibilitando fazer uma comparação dos resultados da resistência ao fogo obtidos em laboratórios diferentes, quer no país ou fora do país. O incêndio padrão não é mais que uma base para estabelecer o conceito de referência ao fogo regulamentar dos elementos estruturais. A maior parte dos regulamentos de segurança contra os incêndios adoptou este conceito e estabeleceu os valores da resistência ao fogo, como o tempo durante o qual estes elementos poderão desempenhar funções de suporte de carga para os quais foram projectados, quando sujeitos ao incêndio padrão, [4.1].

Para a análise térmica de elementos estruturais em condições de incêndio, os ensaios foram efectuados num forno de ensaios de resistência ao fogo do Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais do Instituto Politécnico de Bragança, que possui um volume útil de 1m^3 . Tem um revestimento exterior de aço e é isolado com tijolos refractários e outros materiais, que serão os mais adequados para altas temperaturas como a fibra refractária. Possui quatro queimadores de gás com uma potência de 90 [kW] cada. O combustível é controlado de forma que a temperatura do forno monitorizada por uma disposição de termopares do tipo K possa seguir toda a curva prescrita de acordo com a norma, [4.2] [4.3].

4.2 Método experimental

Os ensaios foram preparados e programados a partir de perfis curtos em aço, tais como IPE100, IPE220, HEB220, SHS 100x100x4, L 100x50x8 com um comprimento de 0.5 [m].

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Resistências dos Materiais (LERM) no forno de ensaios de resistência ao fogo com um volume de 1m³ como mostra a figura 4.1.

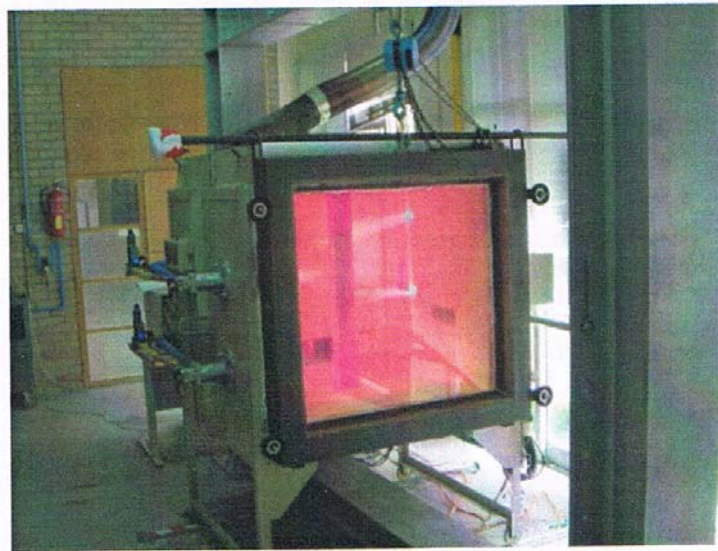


Figura 4.1 Forno de ensaios de Resistência ao Fogo

Foi utilizada uma tinta intumescente do tipo A aplicada em cada um dos perfis curtos. Para cada perfil foram efectuados três testes com uma espessura de 500 [μm].

A espessura de tinta foi controlada entre as várias camadas de tinta com um medidor de espessura seca.

4.2.1 IPE100 com tinta Intumescente

Dos elementos estruturais disponíveis, foram cortados três troços de perfil IPE 100 com um comprimento de 0.5 [m]. Foram soldados seis fios termopar do tipo K de acordo com a norma UNE23820 3 PrEN 13381-8:2007 com a posição representada na figura 4.2. Nesta figura, FT1 e FT2 representa a medição da temperatura no topo do banzo do perfil, WT e WM representa a medição das temperaturas na alma do perfil e FM1 e FM2 representa a medição das temperaturas no banzo inferior do perfil.

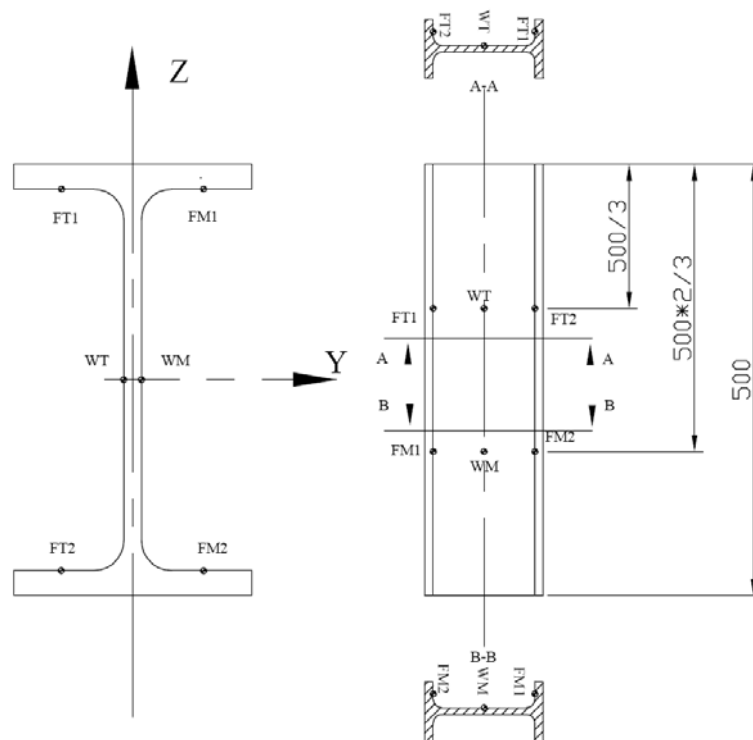


Figura 4.2 Posição dos termopares para a leitura das temperaturas no IPE100.

4.2.1.1 Preparação do Ensaio

A evolução da espessura foi controlada em cinco secções distintas identificadas por si, com 12 pontos de controlo, identificados pela numeração representada na figura 4.3., em que posteriormente se calculou o valor médio da espessura de tinta para o perfil em estudo a fim de obter um valor uniforme em todo o perfil.

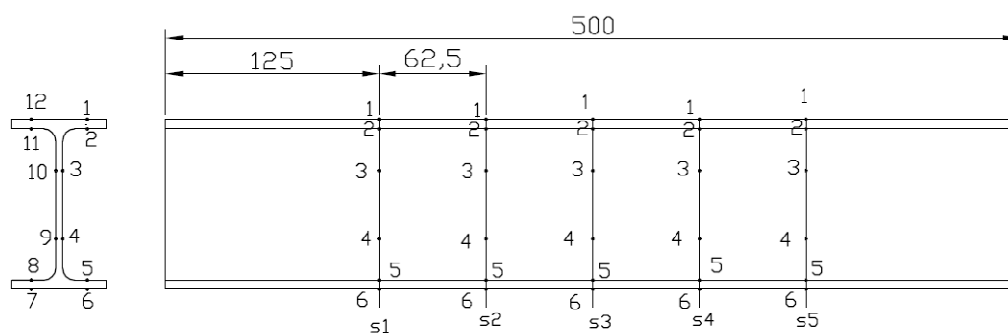


Figura 4.3 pontos para controlo da espessura nas secções do perfil IPE100.

Os valores das espessuras controlados em cada uma das secções e o valor médio de cada um dos perfis em estudo, estão registados no Anexo I do presente capítulo. Estando estes passos atrás descritos, foram efectuados os referidos testes no forno de ensaios de resistência ao fogo. Foram efectuados três testes para o perfil com a mesma espessura de tinta intumescente.

4.2.1.2 Resultado Experimental

Os gráficos das figuras 4.4, 4.5, 4.6, representam a evolução das temperaturas medidas nos seis termopares anteriormente descritos durante os ensaios realizados nos perfis IPE100, quando submetidos à acção da curva ISO834. Em todos os gráficos está representada a curva de referência do forno.

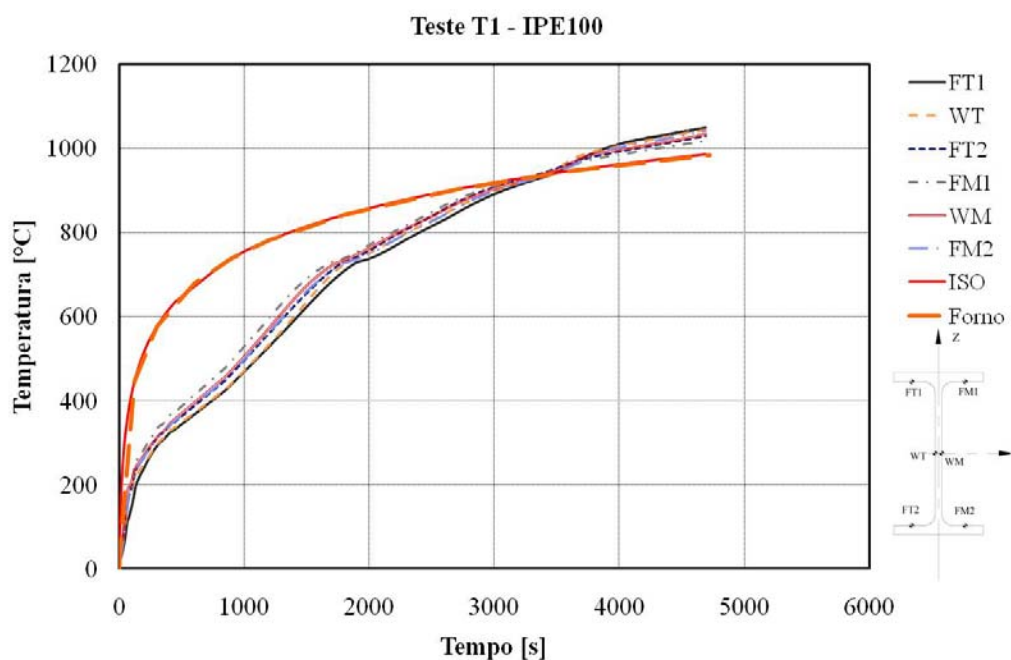


Figura 4.4- Gráfico da evolução das temperaturas do teste T1- IPE100.

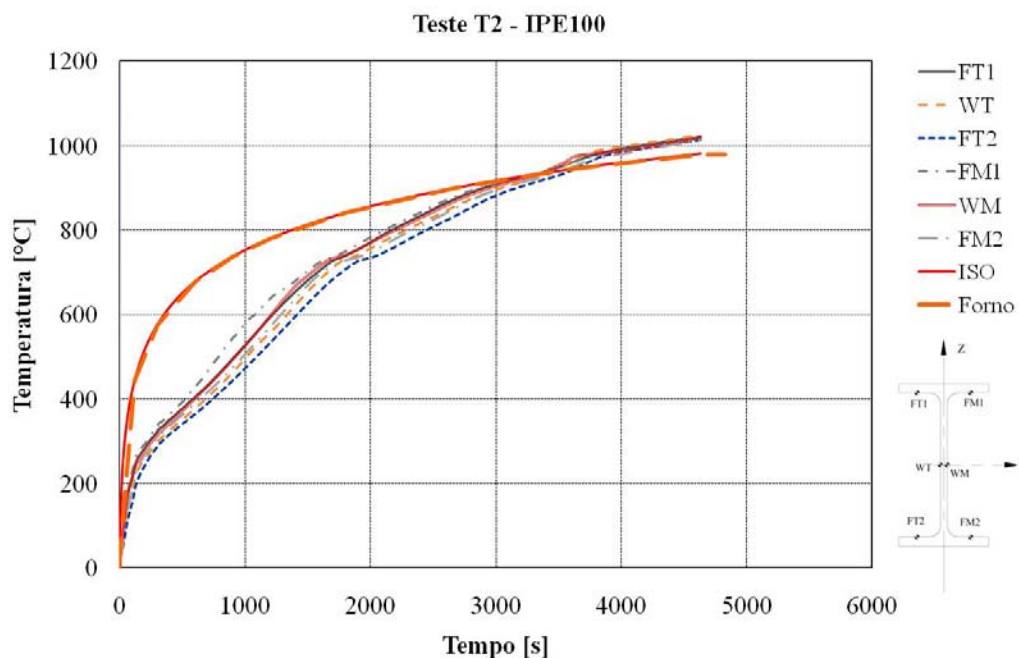


Figura 4.5- Gráfico da evolução das temperaturas do teste T2- IPE100.

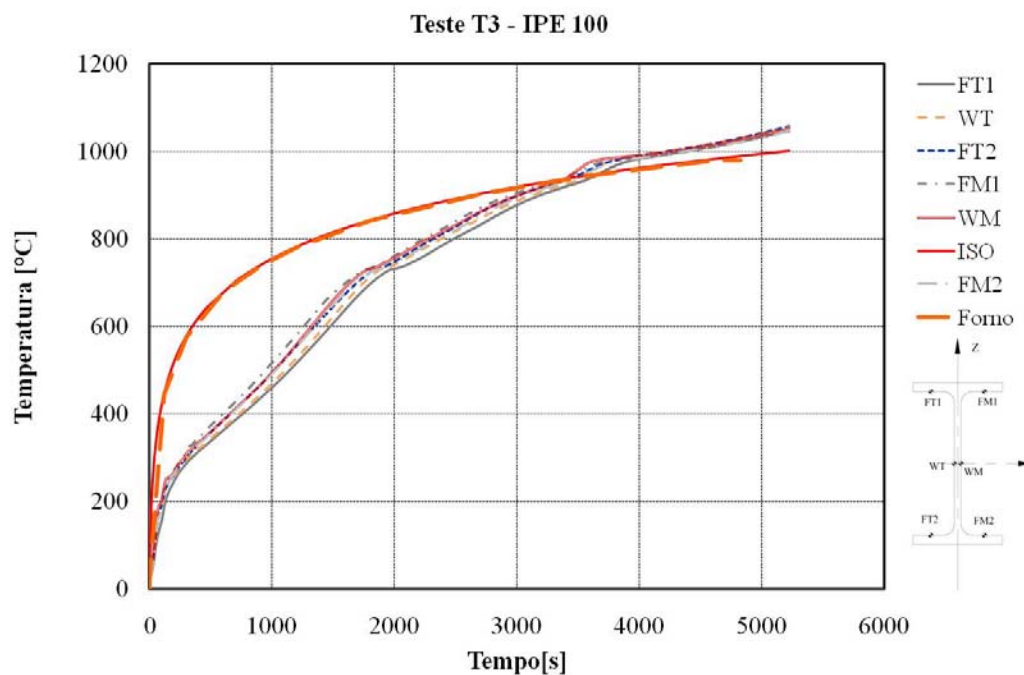


Figura 4.6- Gráfico da evolução das temperaturas do teste T3- IPE100.

Na figura 4,7 estão representados todos os valores das temperaturas para os três ensaios. A evolução é qualitativamente idêntica, sendo possível identificar intervalos de tempo coincidentes com transformação química da protecção do elemento a proteger. As temperaturas medidas são inferiores à temperatura de referência até 3600 [s].

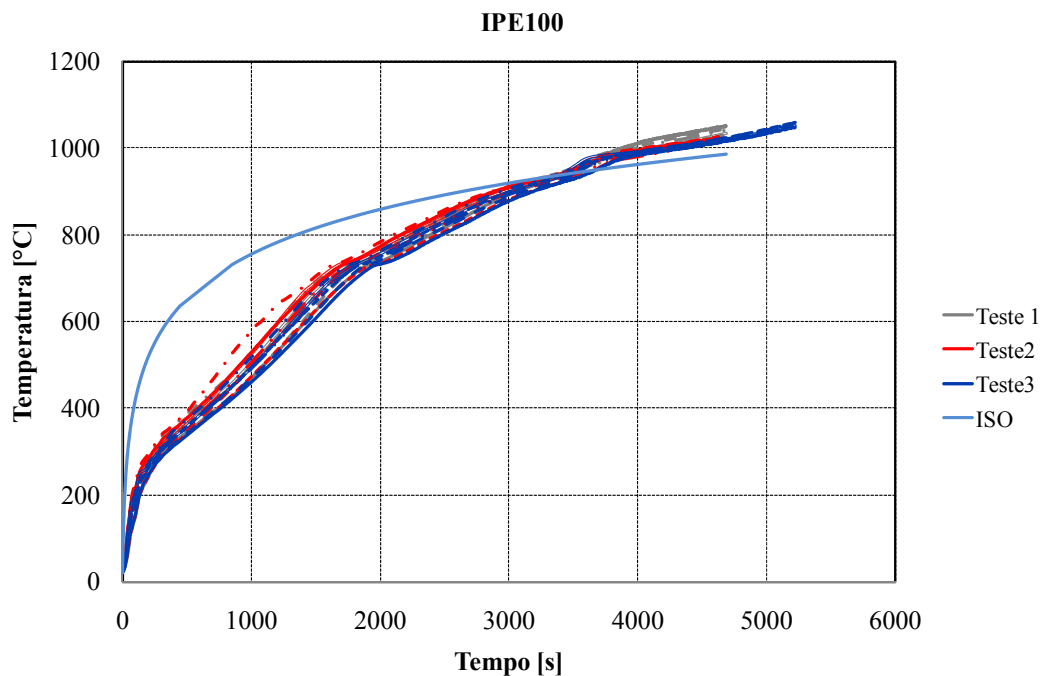


Figura 4.7- Gráfico da evolução das temperaturas do perfil IPE100.

4.2.1.2 Evolução da intumescência do perfil

Nesta secção serão apresentados os resultados da evolução do intumescente em cada um dos perfis testados no forno. Essa evolução foi medida com processamento de imagem em Matlab. Através dos fotogramas criados no registo de cada ensaio, em média cerca de 180 fotogramas, foi possível obter um gráfico da evolução tempo-espessura para cada ensaio.

O processo de imagem começa pela fase de calibração, que consiste em converter pixéis numa distância em [mm], dx e dy conforme se representa na figura seguinte.

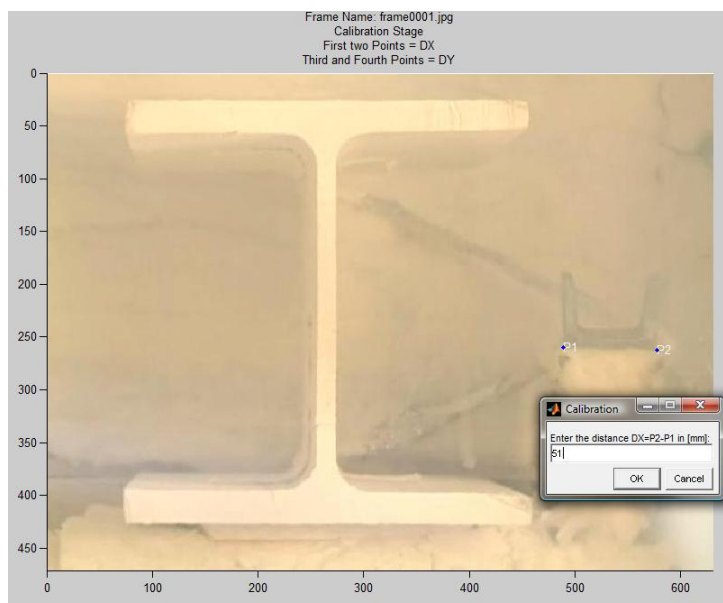


Figura 4.8- Calibração para converter pixéis em mm

A medição da reacção de tinta pode ser efectuada pelo controlo da intumescência, definindo polígonos de contorno, para cada intervalo de tempo predefinido.

Após o registo do último fotograma de cada perfil, os resultados correspondentes à evolução do intumescente são guardados num ficheiro.

Nas figuras seguintes podemos verificar a evolução da espessura da intumescência ao longo do tempo bem como a intumescência da superfície do perfil IPE100 para cada um dos ensaios realizados no forno de resistência. Os valores da espessura da intumescência do perfil são calculados sempre no meio de cada um dos banzos, superior quer inferior, e no meio da alma do perfil, esquerdo ou direito ao longo do tempo.

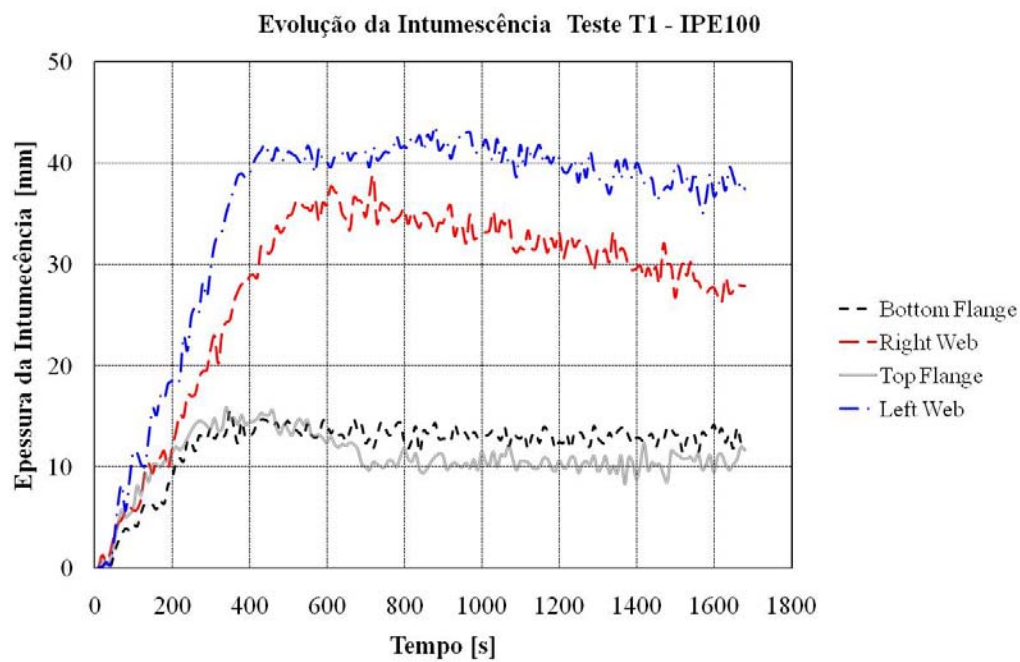


Figura 4.9- Gráfico da evolução da intumescência do teste T1- IPE100.

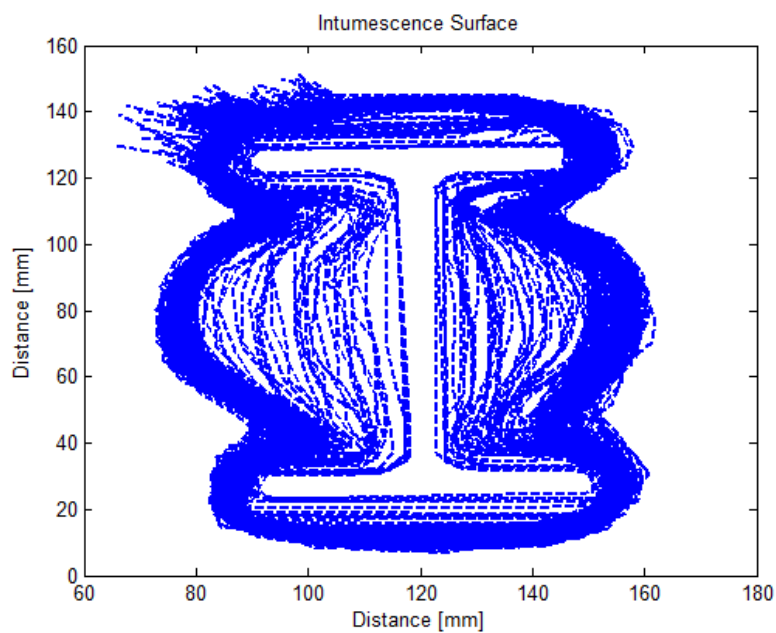


Figura 4.10 – Gráfico da intumescência da superfície do teste T1 – IPE100.

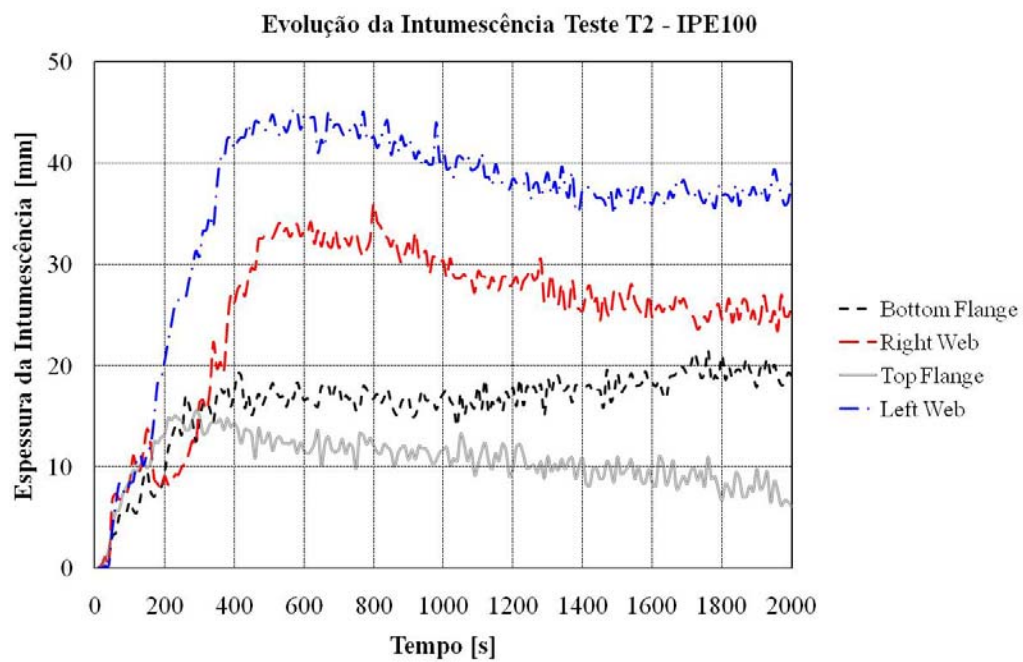


Figura 4.11- Gráfico da evolução da intumescência do teste T2- IPE100.

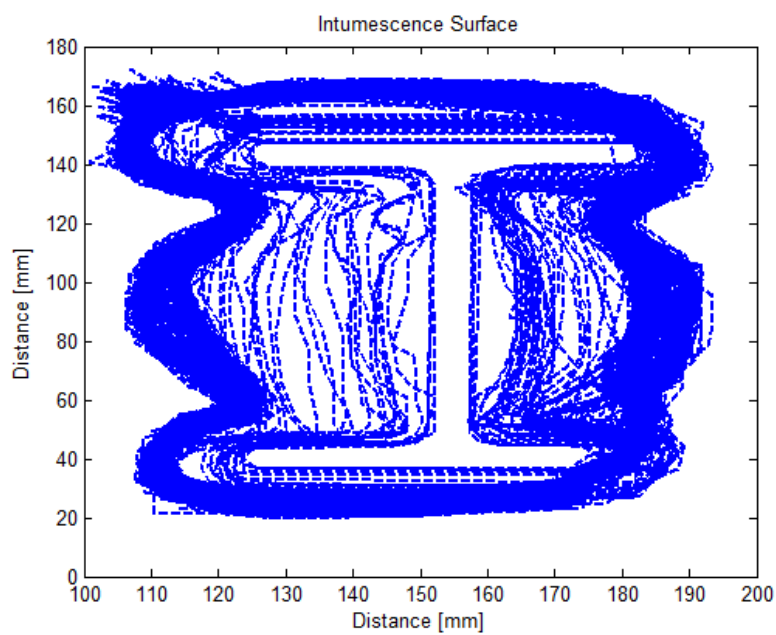


Figura 4.12 – Gráfico da Intumescência da superfície do teste T2 – IPE100.

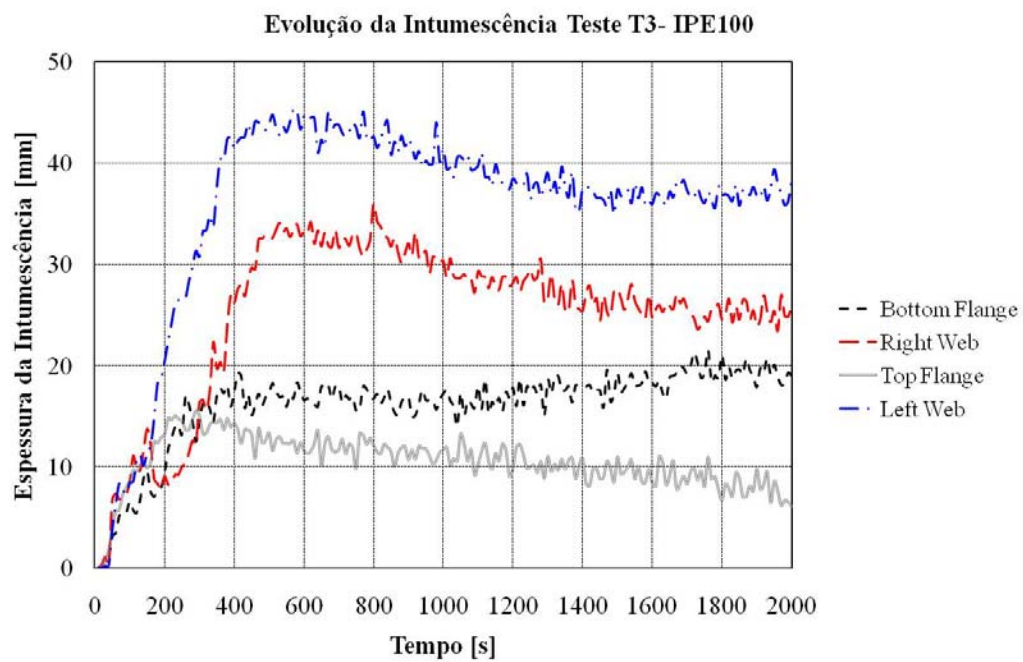


Figura 4.13- Gráfico da evolução da intumescência do teste T3- IPE100.

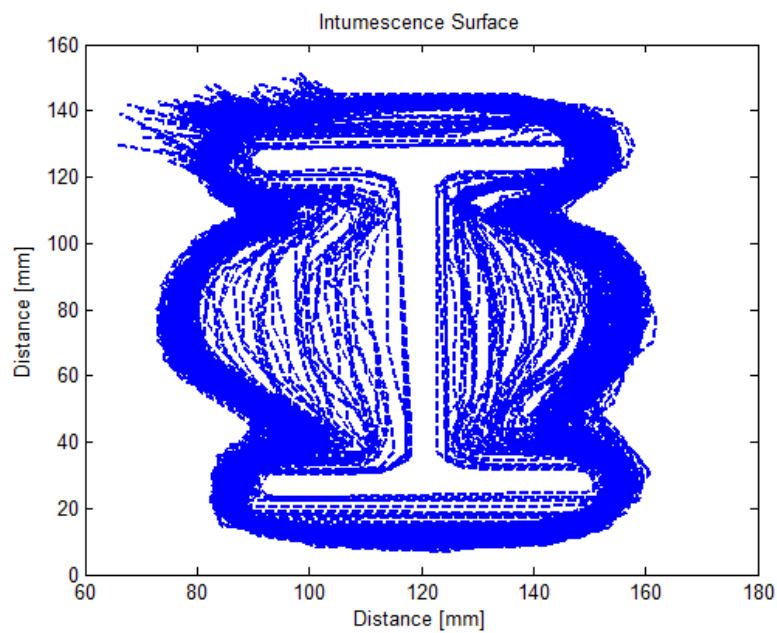


Figura 4.14 – Gráfico da Intumescência da superfície do teste T3 – IPE100.

A intumescência na alma está dependente do efeito da reacção da tinta na parte interior dos banzos. A evolução da intumescência na zona interna dos banzos é fortemente condicionada pela evolução da intumescência nas almas. A evolução da intumescência na parte superior e inferior externa dos banzos é sempre inferior ao valor medido na alma de ambos os lados.

A intumescência no exterior dos banzos aumenta ligeiramente com o tempo até atingir o valor máximo de expansão. A partir desse valor a espessura diminui progressivamente devido às transformações a que o material fica submetido.

4.2.2 IPE220 com tinta Intumescente

Na figura 4.15 apresenta-se a instrumentação realizada no perfil IPE220. Foram colocados seis termopares tipo K identificados como FT1, FT2, WT, FM1, FM2 e WM.

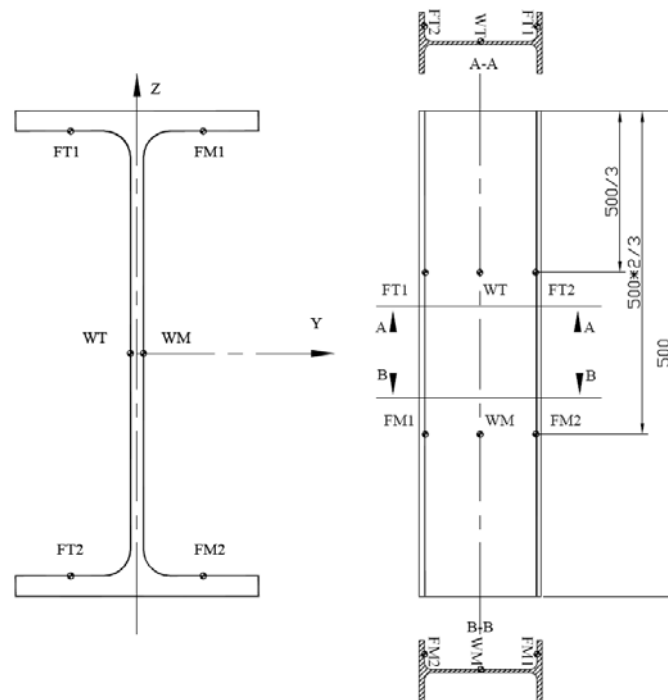


Figura 4.15 Posição dos termopares para a leitura das temperaturas no IPE220.

4.2.2.1 Preparação do ensaio

A evolução da espessura foi controlada para este perfil em cinco secções com doze pontos de controlo tal como nos mostra a figura 4.16. Foi calculado o valor médio da evolução da espessura a fim de obter um valor uniforme próximo do valor que foi estipulado para a execução dos testes. O valor controlado das espessuras e respectivo valor médio para o perfil em estudo encontra-se no Anexo I do presente capítulo.

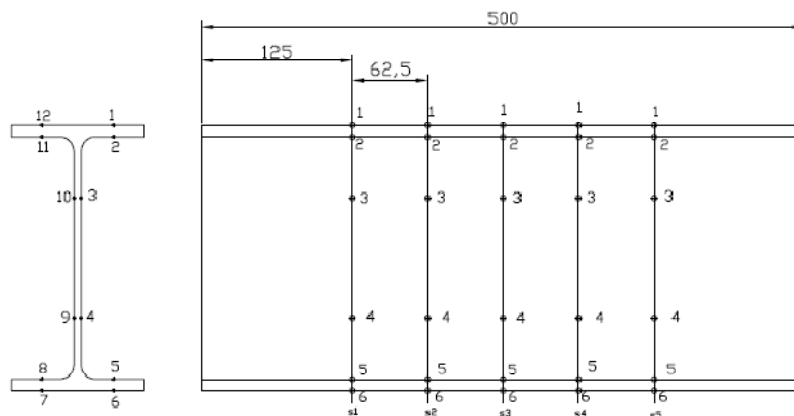


Figura 4.16 Pontos para controlar a espessura IPE220.

4.2.2.2 Resultado Experimental

Os gráficos das figuras 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20, representam a evolução das temperaturas na superfície externa dos elementos curtos, em secção IPE220, depois de protegidos com uma espessura de 500 [µm]. Estes elementos foram submetidos à acção da curva de incêndio normalizada ISO834.

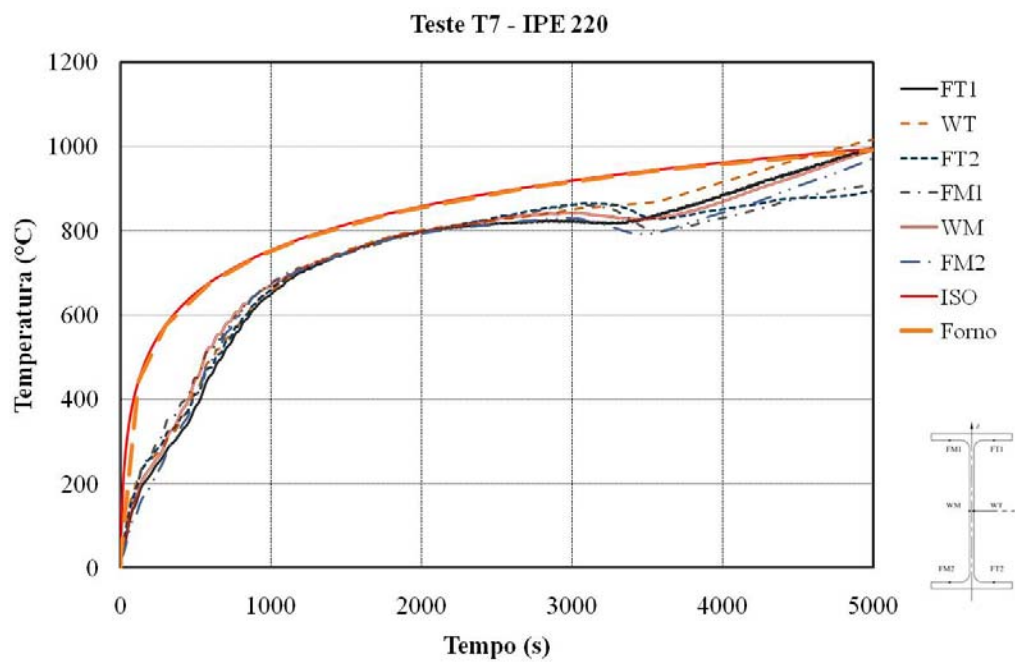


Figura 4.17 Gráfico da evolução das temperaturas no teste T7-IPE220.

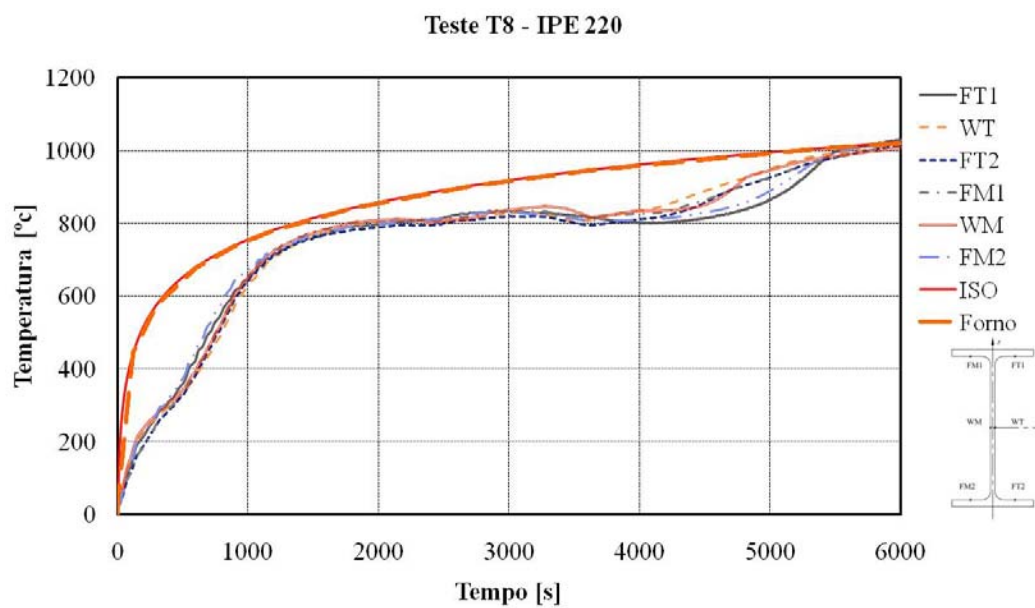
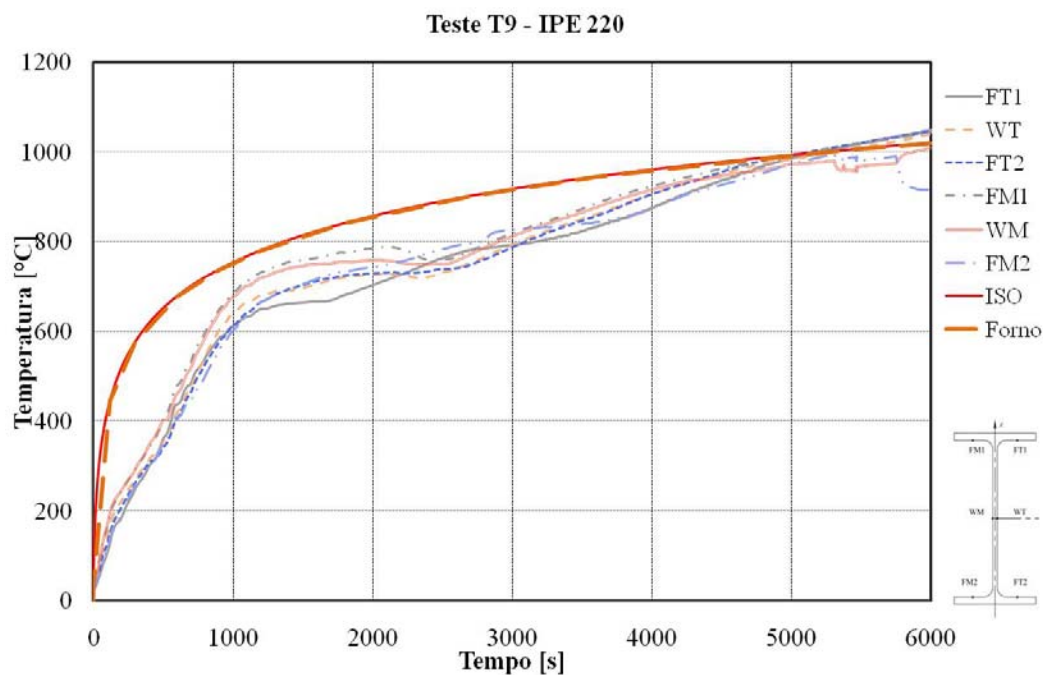
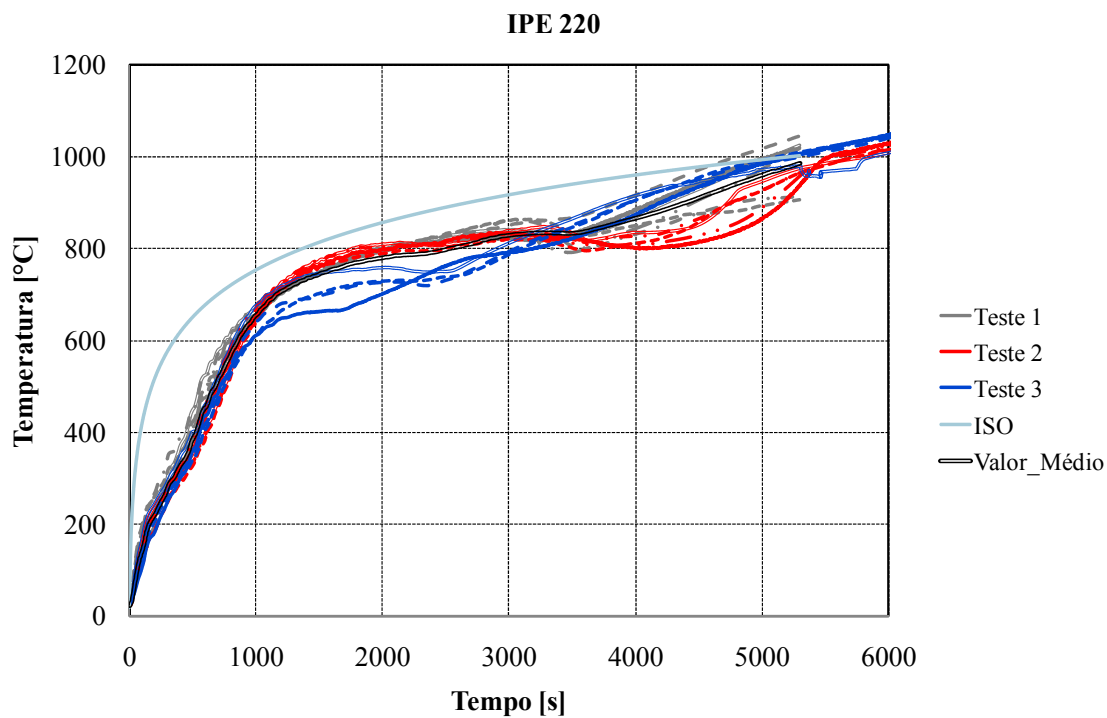


Figura 4.18 Gráfico da evolução das temperaturas no teste T8-IPE220.



Após análise da figura 4.20, podemos constatar que a evolução da temperatura é semelhante. Pode observar-se que há uma ligeira diminuição da temperatura no perfil do teste 8 que está representada pela figura 4.18, a partir dos 4500 [s]. Verifica-se ainda que a partir dos 5000 [s] de ensaio a temperatura dos perfis aproximam-se da curva ISO834.



Comparando os resultados da evolução das temperaturas do perfil IPE100 com o perfil IPE220 para o instante $t=1000$ [s], verifica-se no caso do IPE100 possui uma temperatura aproximadamente de 500 [°C], enquanto que para o mesmo instante no perfil IPE220 o valor é aproximadamente de 650 [°C].

4.2.2.3 Evolução intumescência no perfil

Nas figuras que se seguem estão representados os resultados da evolução da intumescência para cada um dos testes efectuados nos perfis IPE220. Nestes gráficos verifica-se que a intumescência não processa de modo uniforme.

No primeiro ensaio desta série (T7) verificou-se uma separação da tinta, para o instante $t=\Delta x$ [s], motivo pelo qual o desenvolvimento da intumescência do lado esquerdo ser diferente do desenvolvimento do lado direito.

Os valores da evolução da intumescência dos ensaios efectuados, são calculados sempre no meio dos banzos, superior e inferior e no meio da alma do perfil, esquerdo e direito.

O comportamento típico da evolução da intumescência é mantido, isto significa que há um aumento proporcional numa primeira fase com diminuição progressiva após ter atingido o valor máximo.

De realçar que a evolução da espessura nos banzos é inferior à evolução da intumescência na alma.

A intumescência na alma depende do efeito da reacção da tinta na parte interior dos banzos. A evolução da intumescência no exterior dos banzos aumenta ligeiramente com o tempo ate atingir o valor máximo de expansão, diminuindo posteriormente devido a uma transformação que o material do perfil está submetido. A intumescência na parte superior e na parte inferior é ligeiramente inferior ao valor medido de ambos os lados. Verifica-se que a evolução da intumescência na zona interna dos banzos é condicionada pela evolução da intumescência na alma.

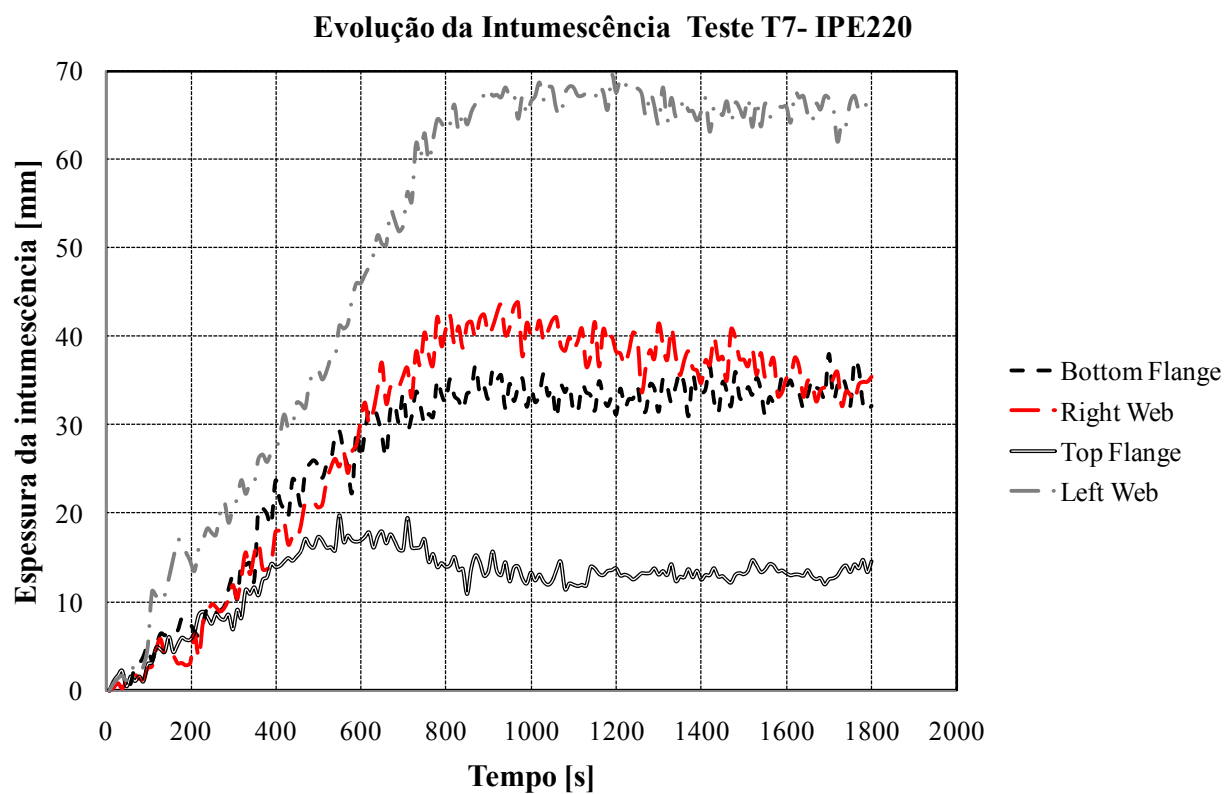


Figura 4.21 Gráfico da evolução da intumescência no teste T7-IPE220.

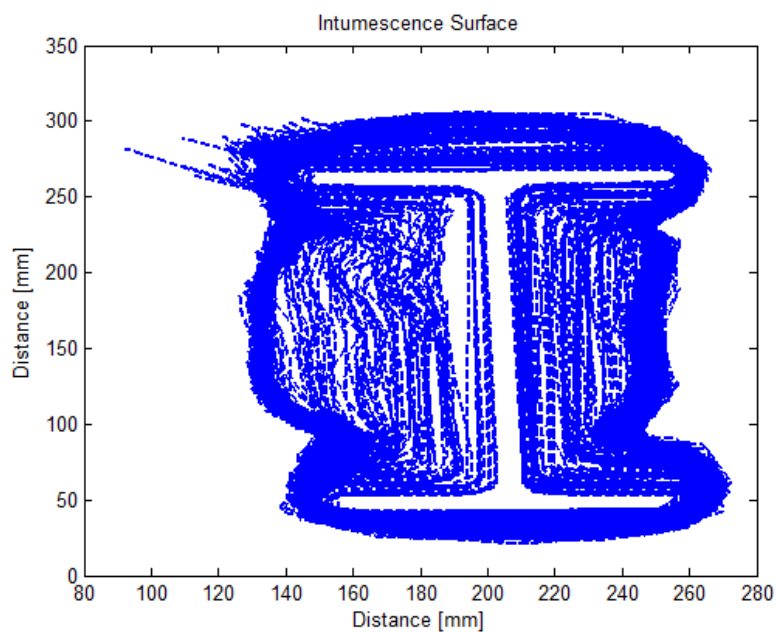


Figura 4.22 – Gráfico da intumescência da superfície do teste T7 – IPE220.

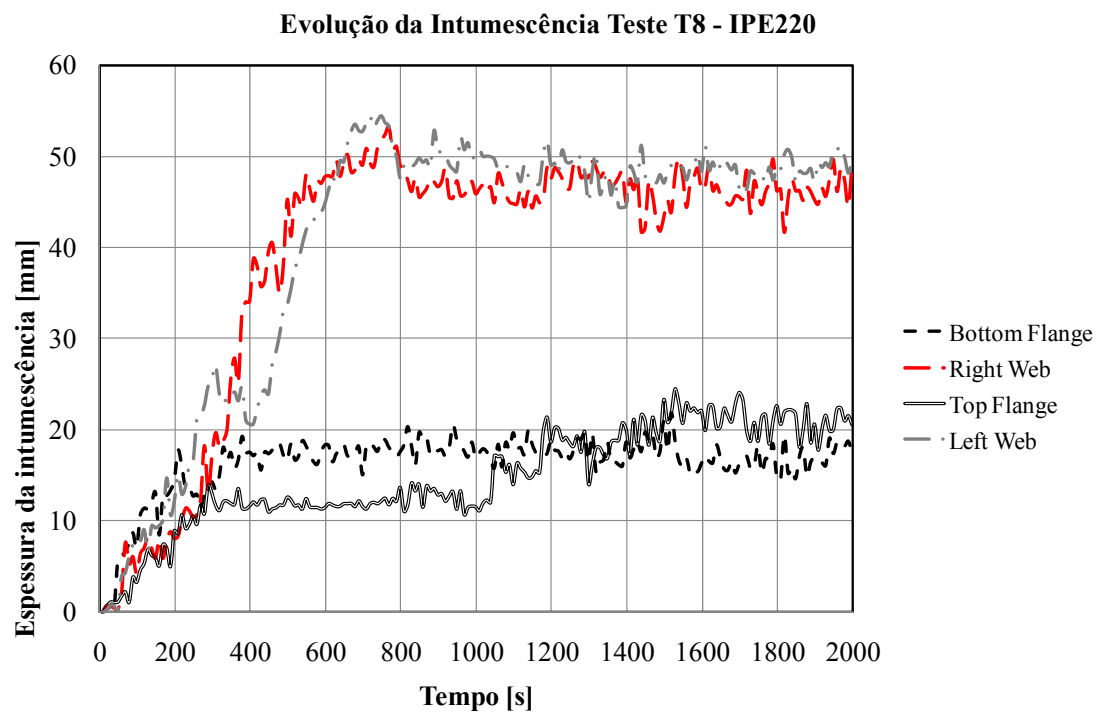


Figura 4.23 Gráfico da evolução da intumescência noteste T8-IPE220.

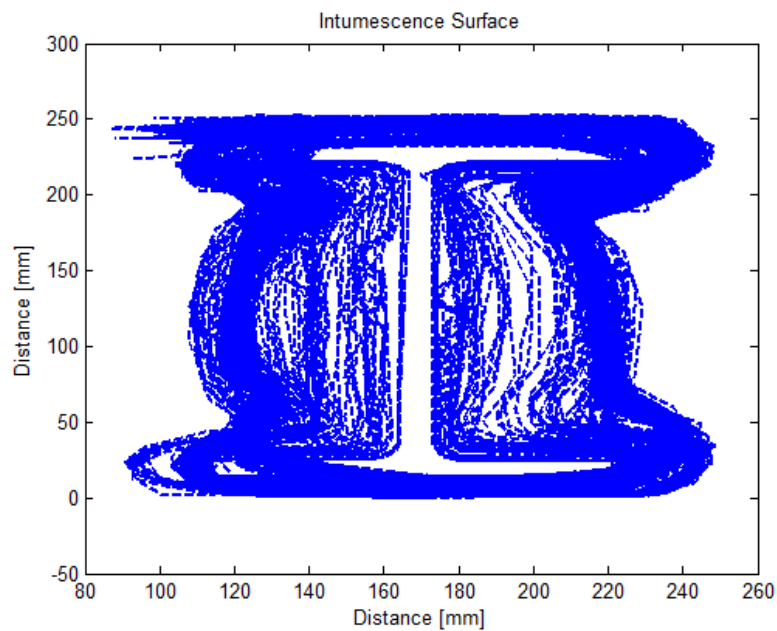


Figura 4.24 – Gráfico da Intumescência da superfície do teste T8 – IPE220.

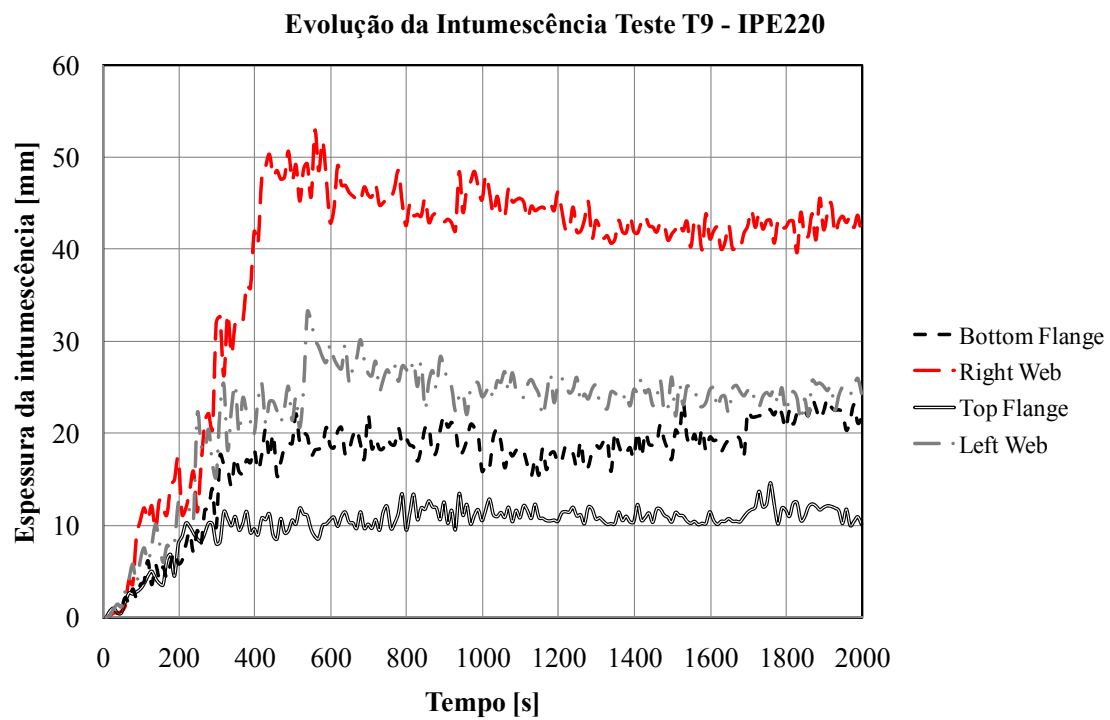


Figura 4.25 Gráfico da evolução da intumescencia noteste T9-IPE220.

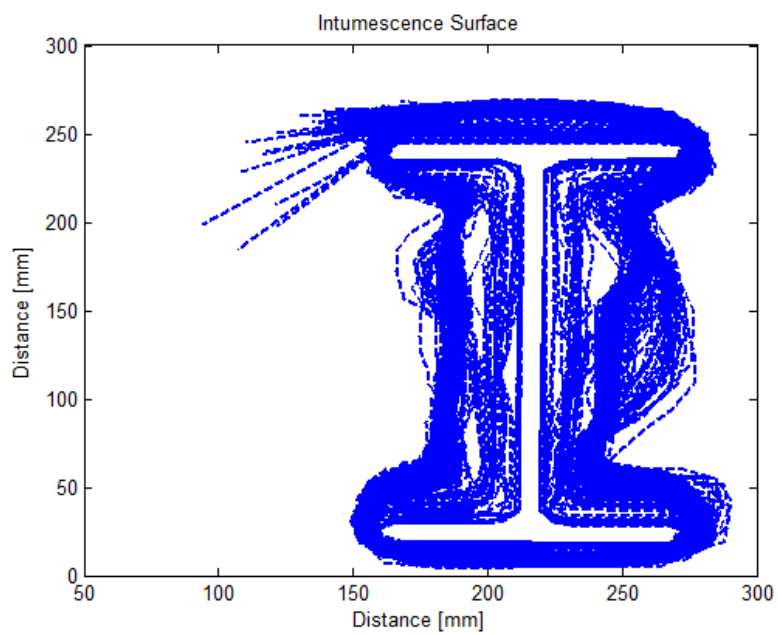


Figura 4.26 – Gráfico da intumescência da superfície do teste T9 – IPE220.

4.2.3 HEB220 com tinta Intumescente

Na figura 4.27 apresenta-se a instrumentação realizada no perfil HEB220. Foram colocados seis termopares do tipo K, identificados com FT1,WT,FT2,FM1,WM,FM2 respectivamente.

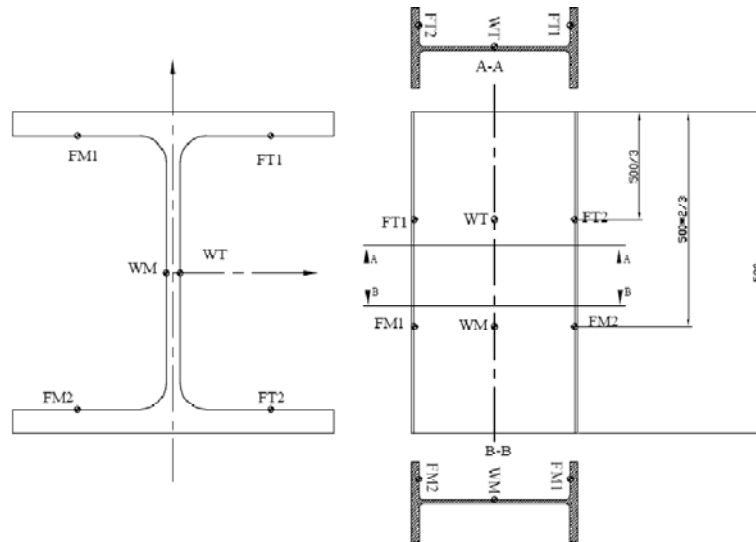


Figura 4.27 posição dos termopares no perfil HEB220.

4.2.3.1 Preparação do Ensaio

Neste ensaio foram ensaiados três elementos curtos HEB220, onde foi utilizada uma tinta intumescente do tipo A para proteger os referidos elementos em estudo. A evolução da espessura foi controlada ao longo de 12 pontos em cada um dos três ensaios efectuados ao perfil HEB220 e obteve-se o valor médio afim de saber qual o valor da espessura de tinta seca para cada ensaio do elemento em estudo. Como tal para o ensaio (T13) temos um valor médio de espessura de 698,7 [µm], para o teste T14 temos cerca de 685.9 [µm] e para o teste T15 temos um valor médio de 620 [µm].

Os valores da espessura controlados poderão ser observados no anexo I do presente capítulo.

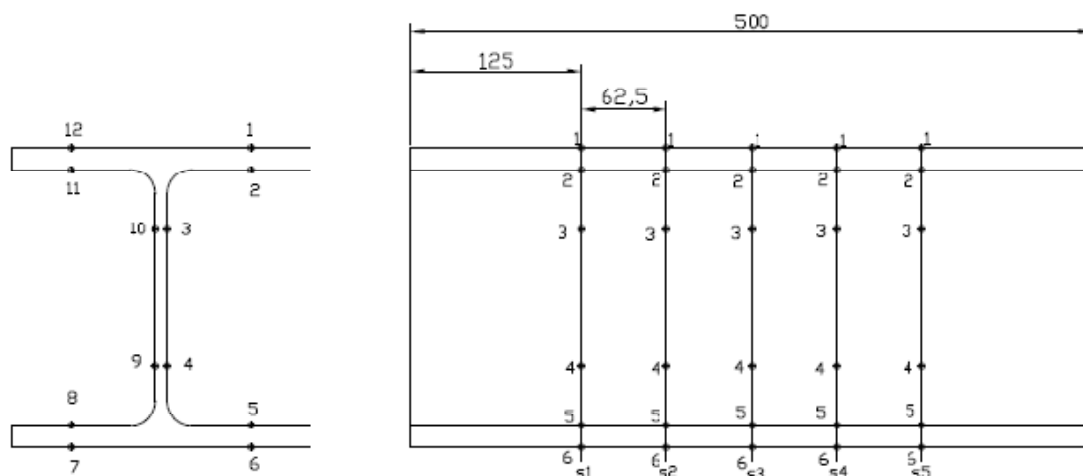
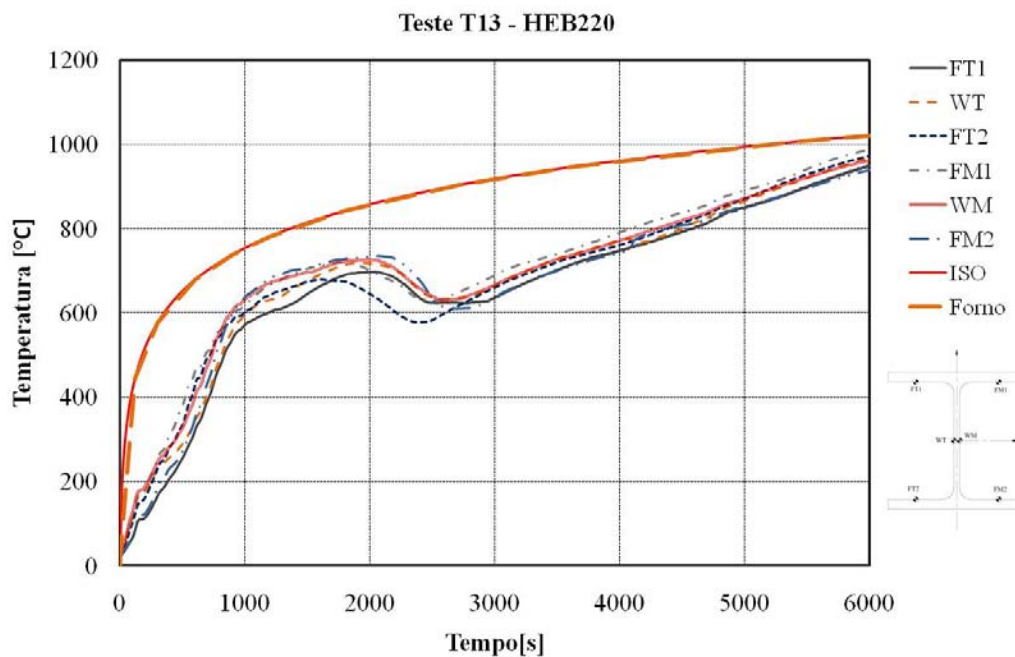


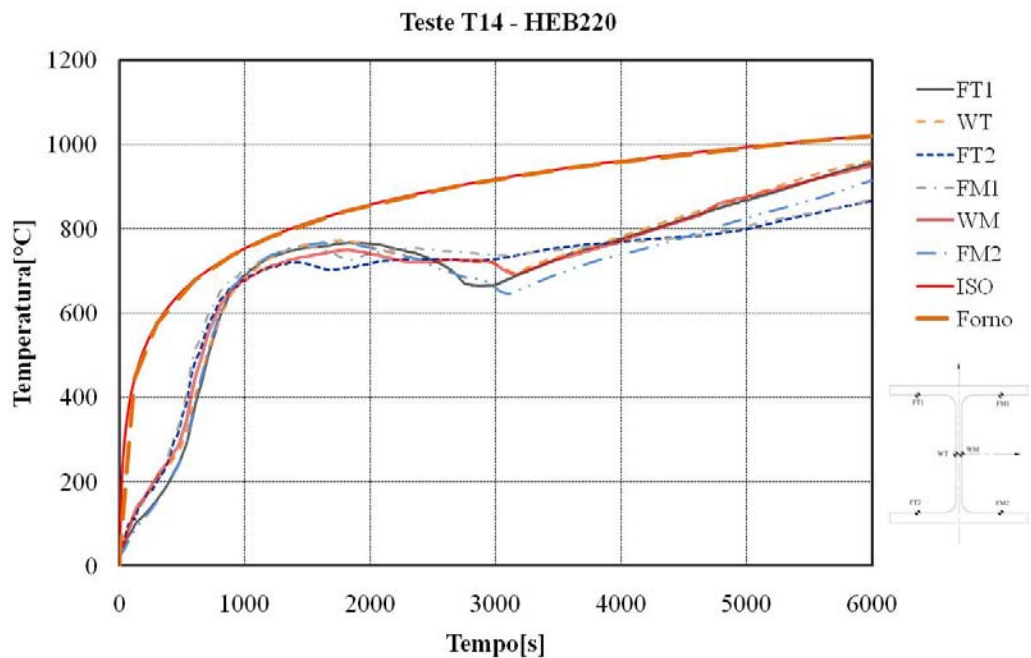
Figura 4.28 controle da espessura nos pontos do perfil HEB220

4.2.3.2 Evolução das temperaturas no perfil

Os gráficos apresentados nas figuras seguintes representam a evolução das temperaturas medidas nos pontos medidos em cada elemento durante o ensaio, bem como o valor da temperatura do termopar de placa do forno de resistência e a função teórica da curva ISO834. Os resultados foram representados até ao instante final de 6000 [s].



A inflexão da evolução da temperatura registada pode estar relacionada com a transformação metalúrgica que se verifica no aço com absorção de grande quantidade de energia, associada a outra transformação do material de protecção. Este fenómeno foi mais pronunciado no primeiro ensaio. Todos os outros apresentam uma inflexão menos pronunciada.



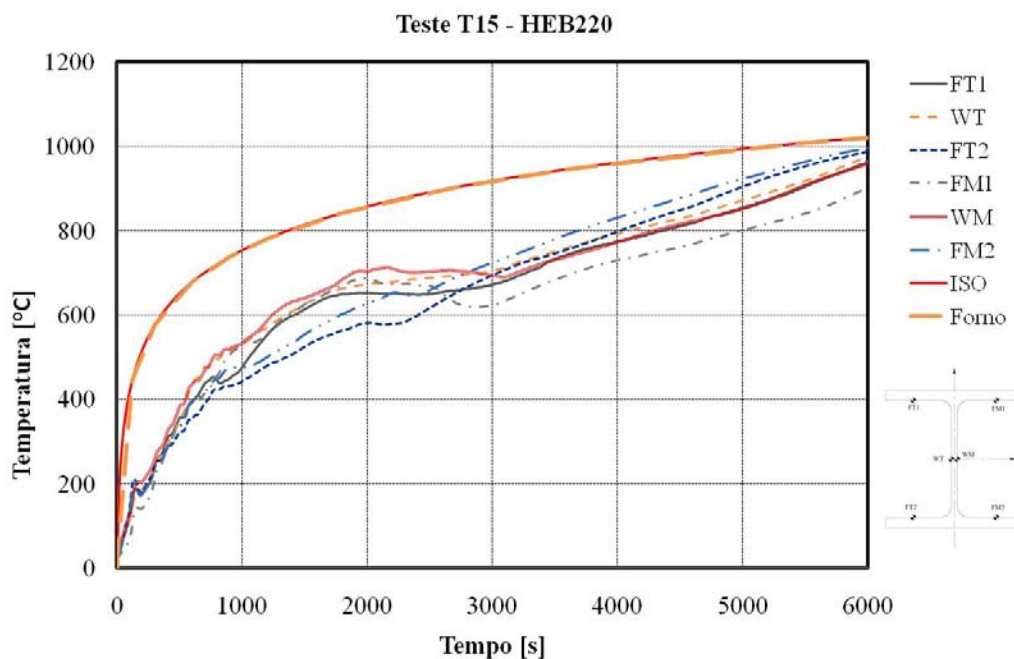


Figura 4.31 Gráfico da evolução das temperaturas no HEB220

Podemos realçar que as temperaturas nos ensaios deste elemento curto são aproximadamente iguais de ensaio para ensaio, como se pode observar no gráfico da figura 4. Para o intervalo de tempo compreendido entre 1000 e 3000 [s], foram registadas diminuições de temperaturas em alguns pontos. Essa diminuição pode ser justificada com uma eventual absorção de energia durante a transformação metalúrgica do material.

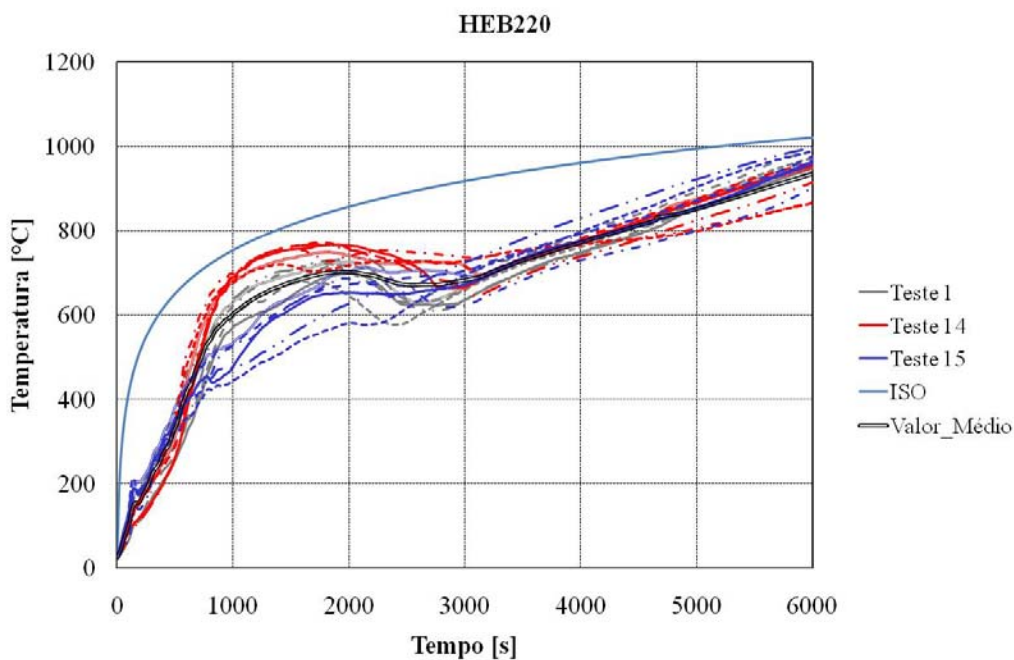


Figura 4.32 Gráfico da evolução das temperaturas no HEB220

4.2.3.3 Evolução intumescência no perfil

Os gráficos apresentados nas figuras seguintes mostram a evolução da intumescência para cada um dos ensaios efectuados neste tipo de perfil.

A evolução da intumescência nos banzos é inferior à evolução da intumescência da alma. O desenvolvimento da intumescência na zona interior dos banzos é influenciado pelo desenvolvimento da intumescência na alma do perfil.

O valor da espessura de intumescência é calculado sempre em toda a volta do perfil no meio dos banzos, inferior e superior e no meio de cada um dos lados da alma do perfil.

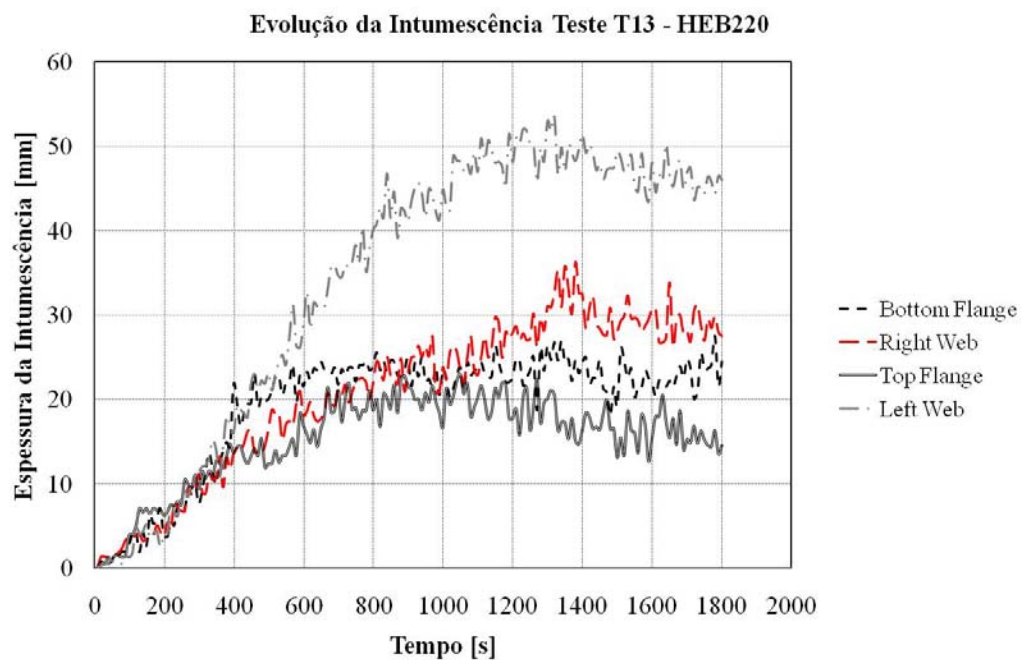


Figura 4.33 Gráfico da evolução das intumescencia no teste T13-HEB220.

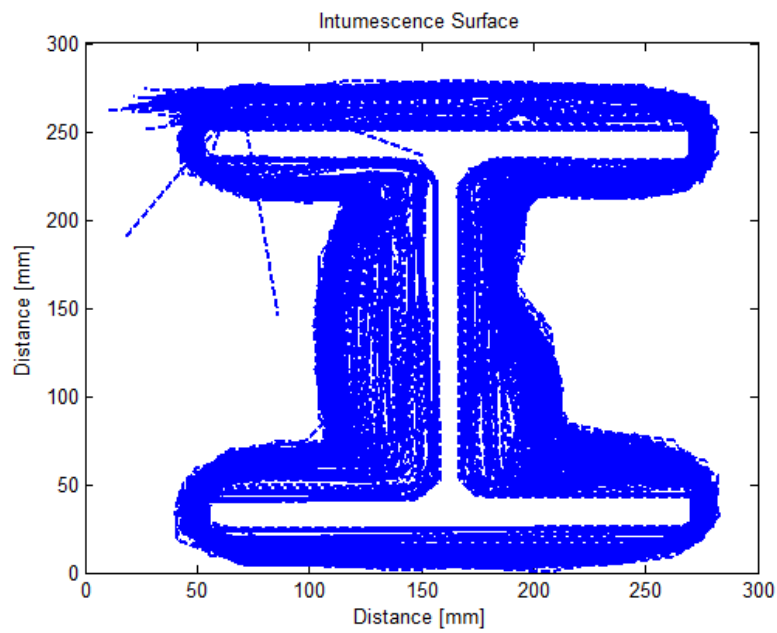


Figura 4.34 – Gráfico da intumescência da superfície do teste T13 – IHEB220.

Os resultados do segundo ensaio são semelhantes com a exceção que o desenvolvimento da intumescência na alma apresenta uma evolução geométrica com simetria quase perfeita.

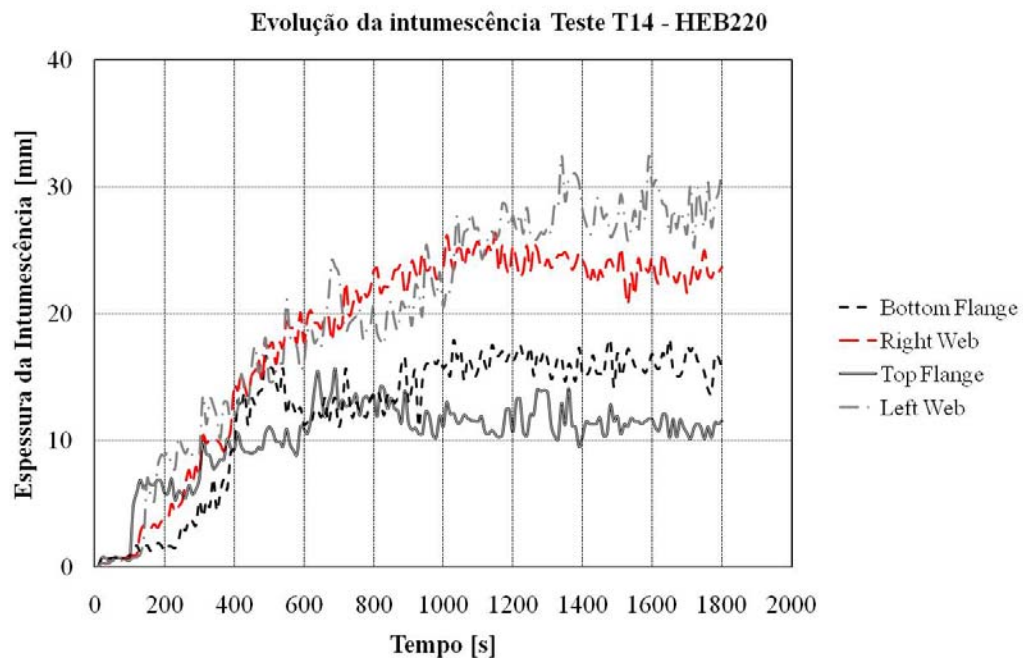


Figura 4.35 Gráfico da evolução da intumescência no teste T14-HEB220.

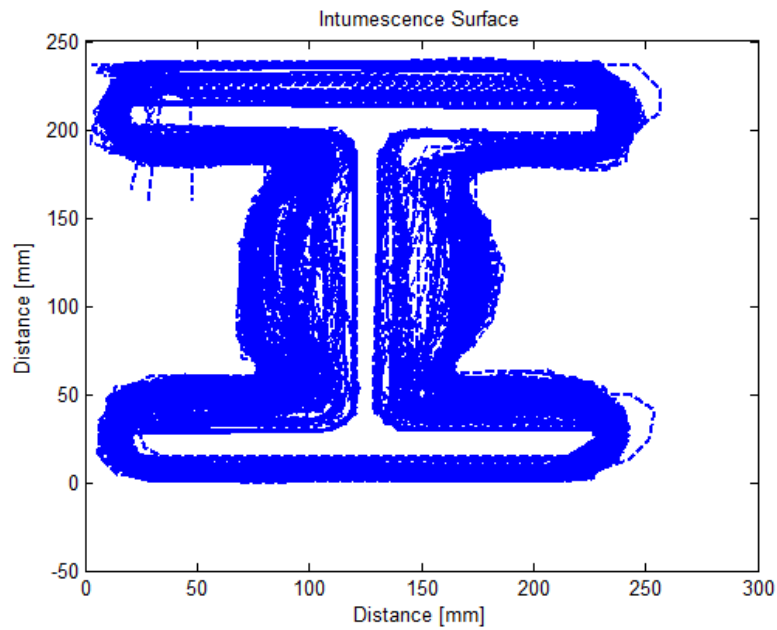


Figura 4.36 – Gráfico da intumescência da superfície do teste T14 – HEB220.

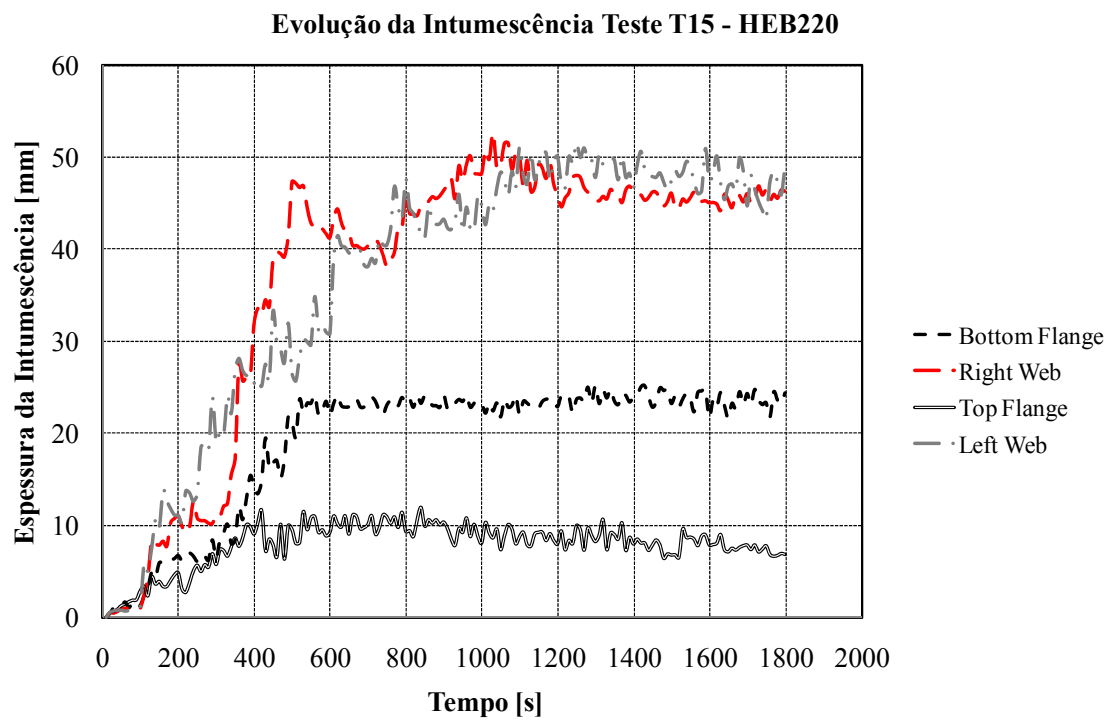


Figura 4.37 Gráfico da evolução da intumescência no teste T15-HEB220.

4.2.4.1 Preparação do ensaio

Na preparação do ensaio referente a este elemento foram testados três perfis SHS, protegidos com tinta intumescente adoptando uma espessura média de 544.6 [μm] para o primeiro ensaio, 588 [μm] para o segundo e 563.3 [μm] para o terceiro.

A espessura foi controlada em oito pontos e em cinco secções, de acordo com a figura 4.40.

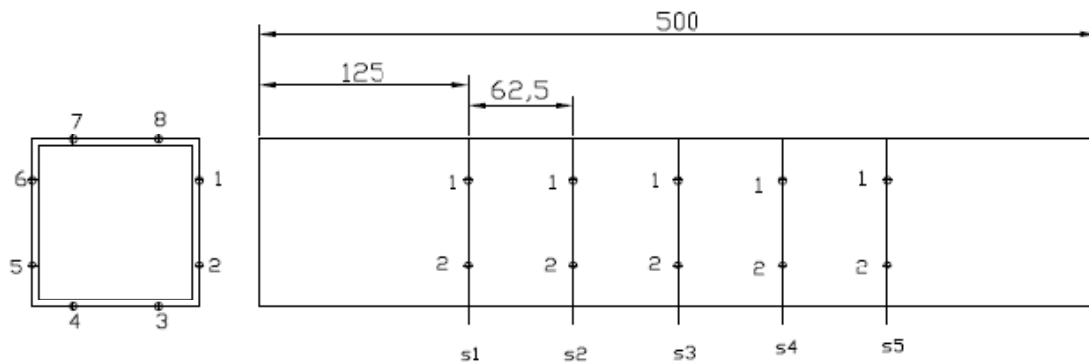


Figura 4.40 Medição dos pontos para controlo da espessura.

No Anexo I estão registados os valores das espessuras da tinta intumescente, em cada um dos pontos e em cada secção.

4.2.4.2 Evolução das temperaturas no perfil

Nas figuras 4.42 – 4.44 está representada a evolução da temperatura no elemento em aço protegido. Tratando-se de um perfil com um factor de secção igual 250 [m²], deverá possuir uma curva de aquecimento semelhante.

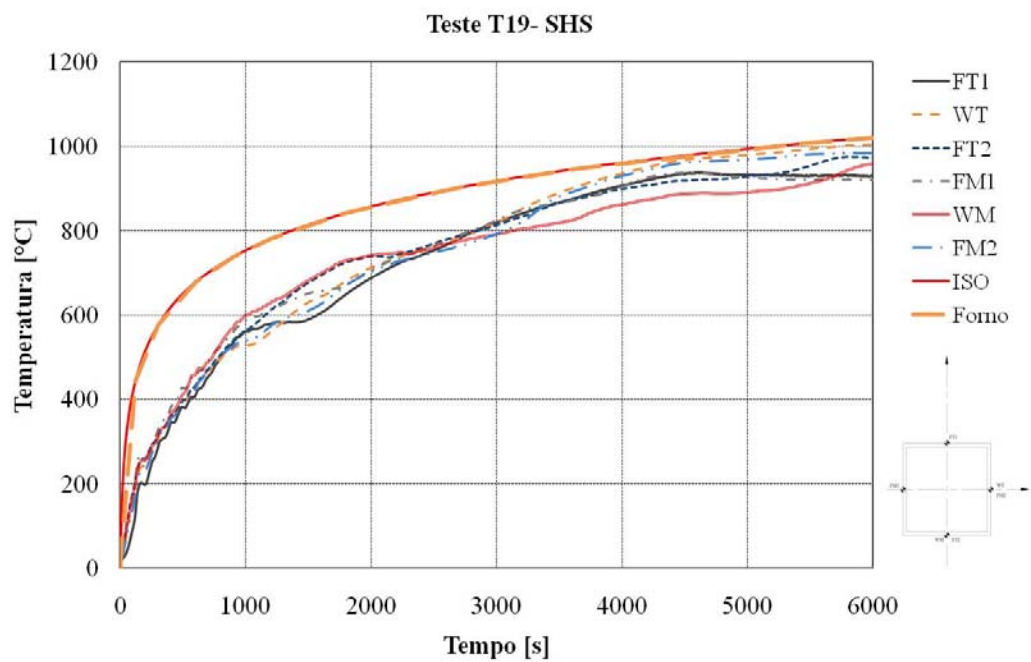


Figura 4.41 Gráfico da evolução das temperaturas no T19 SHS100x100x4.

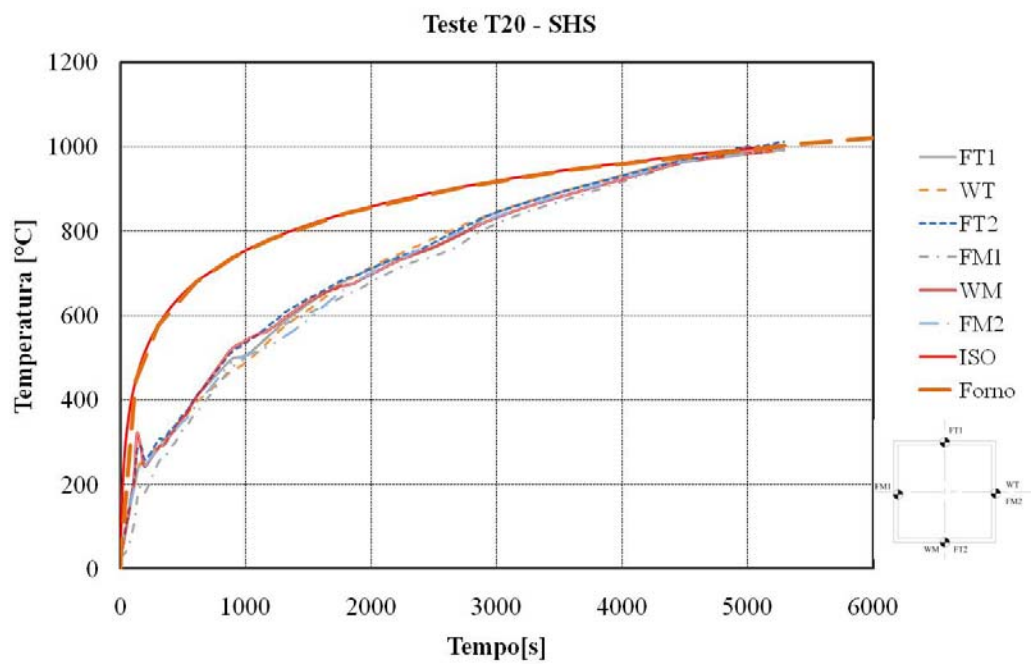


Figura 4.42 Gráfico da evolução das temperaturas no T20-SHS100x100x4.

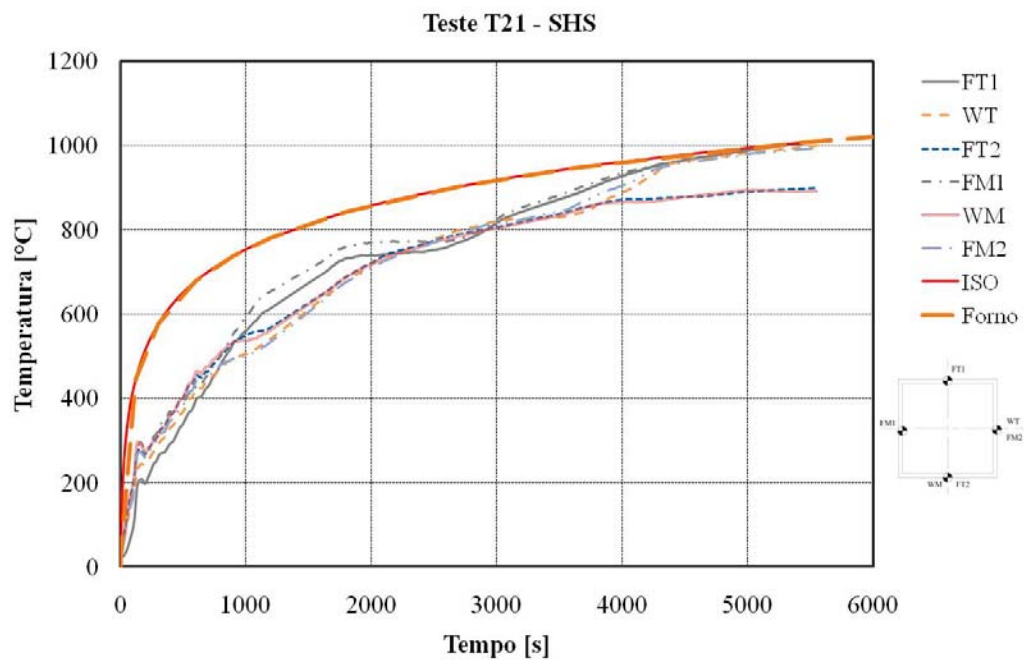


Figura 4.43 Gráfico da evolução das temperaturas no T21-SHS100x100x4.

Na figura 4.45 está representada a variação de temperatura no perfil, para todos os ensaios realizados.

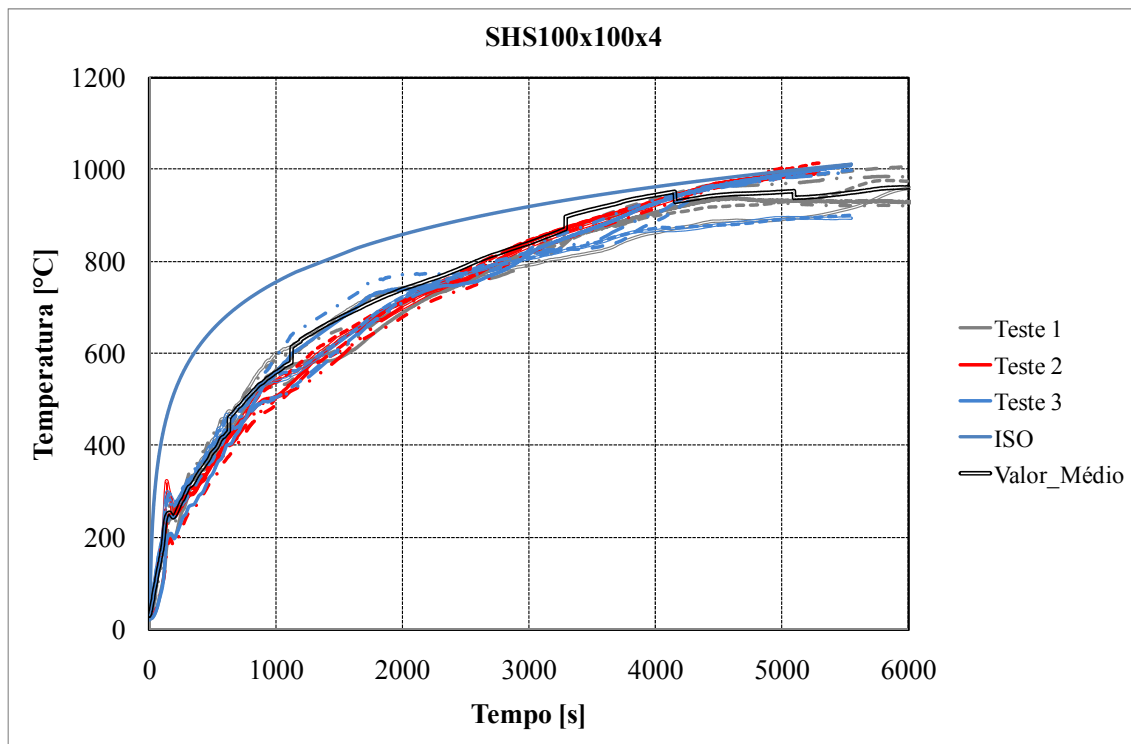


Figura 4.44 Gráfico da evolução das temperaturas no SHS100x100x4

4.2.4.3 Evolução da intumescência no perfil

Nas figuras seguintes está representada a evolução da intumescência para o perfil SHS100x100x4.

A espessura da intumescência dos ensaios ao perfil SHS é medida sempre no centro de cada um dos lados do perfil.

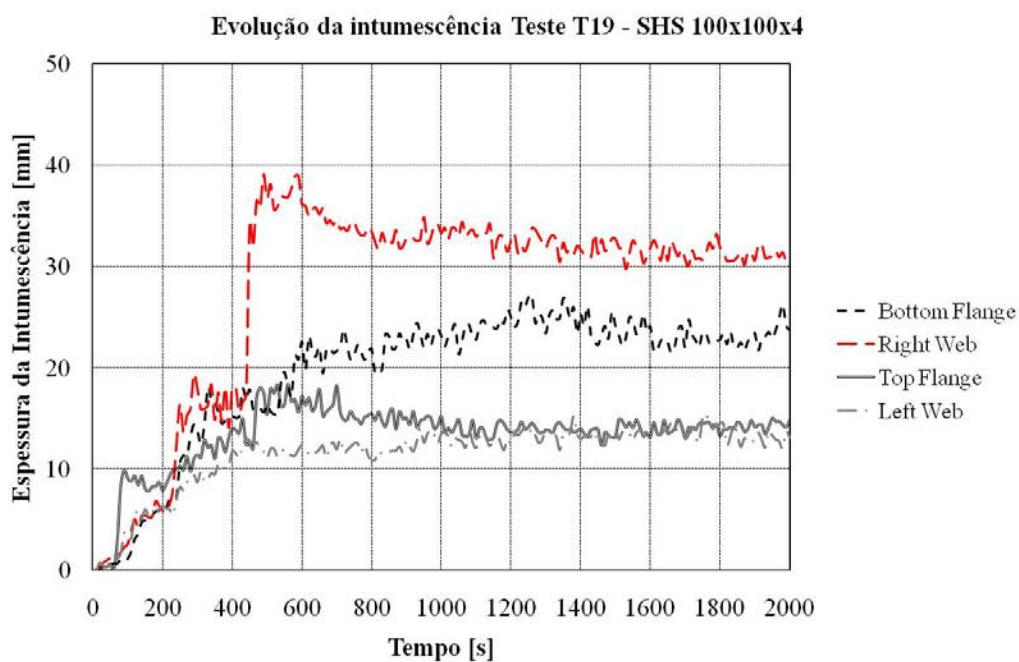


Figura 4.45 Gráfico da evolução da intumescência no teste T19-SHS100x100x4.

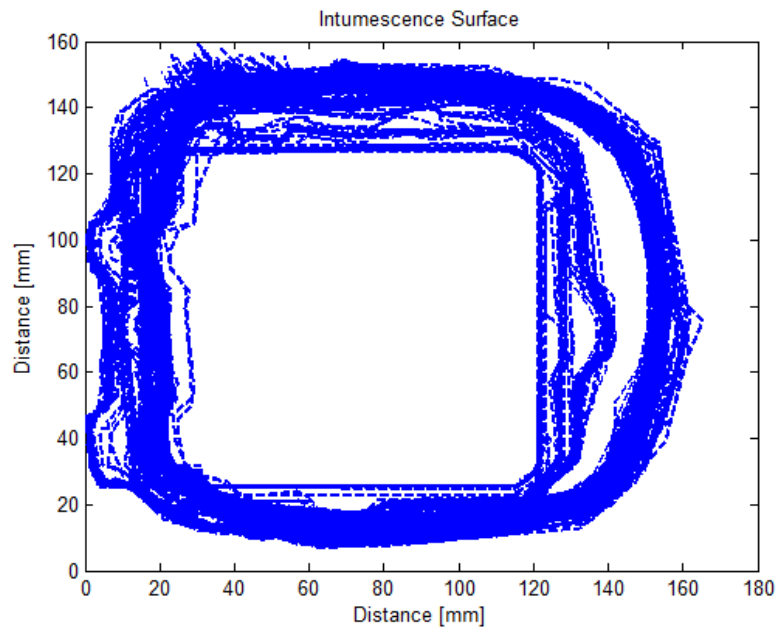


Figura 4.46 – Gráfico da intumescência da superfície do teste T19 – SHS100x100x4

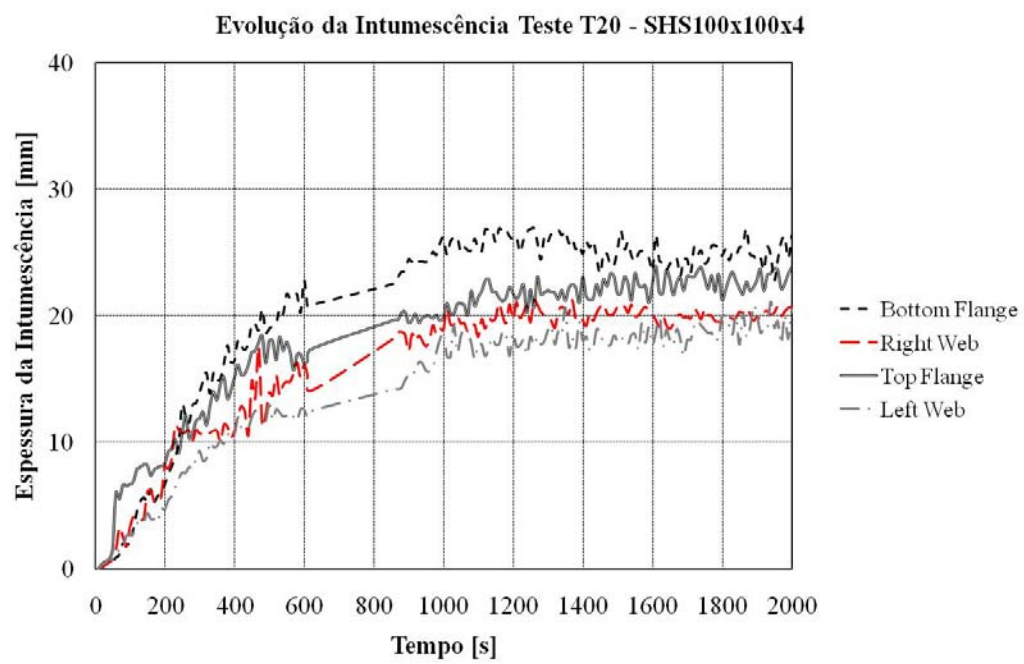


Figura 4.47 Gráfico da evolução da intumescência no teste T20-SHS100x100x4

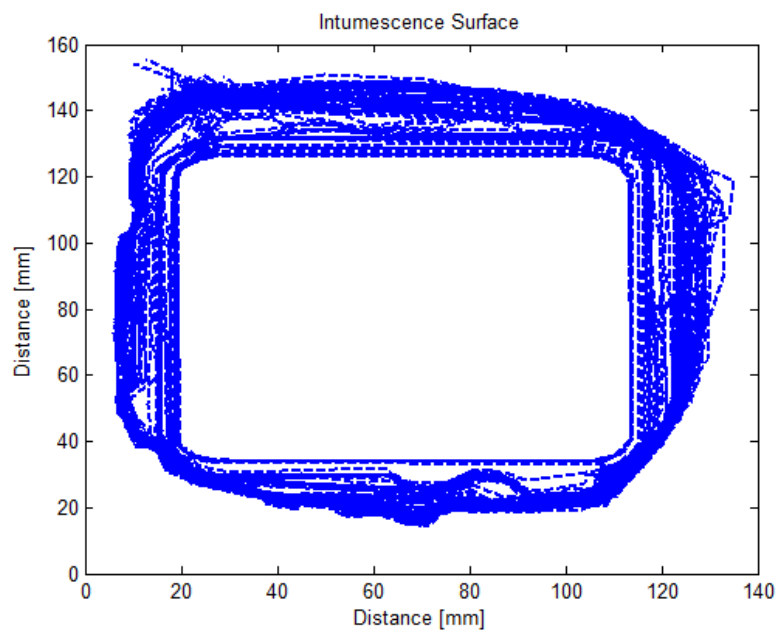


Figura 4.48a) – Gráfico da intumescência da superfície do teste T20 – SHS100x100x4.

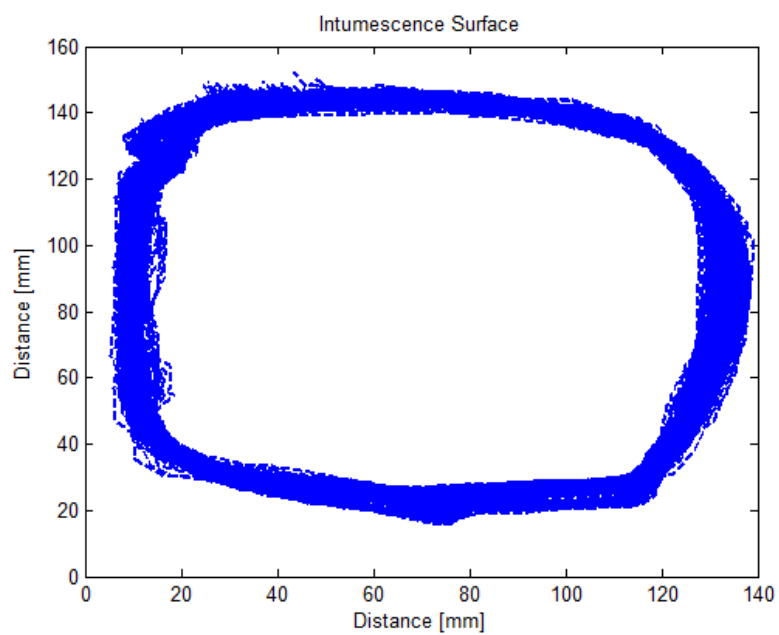


Figura 4.48b) – Gráfico da intumescência da superfície do teste T20 – SHS100x100x4.

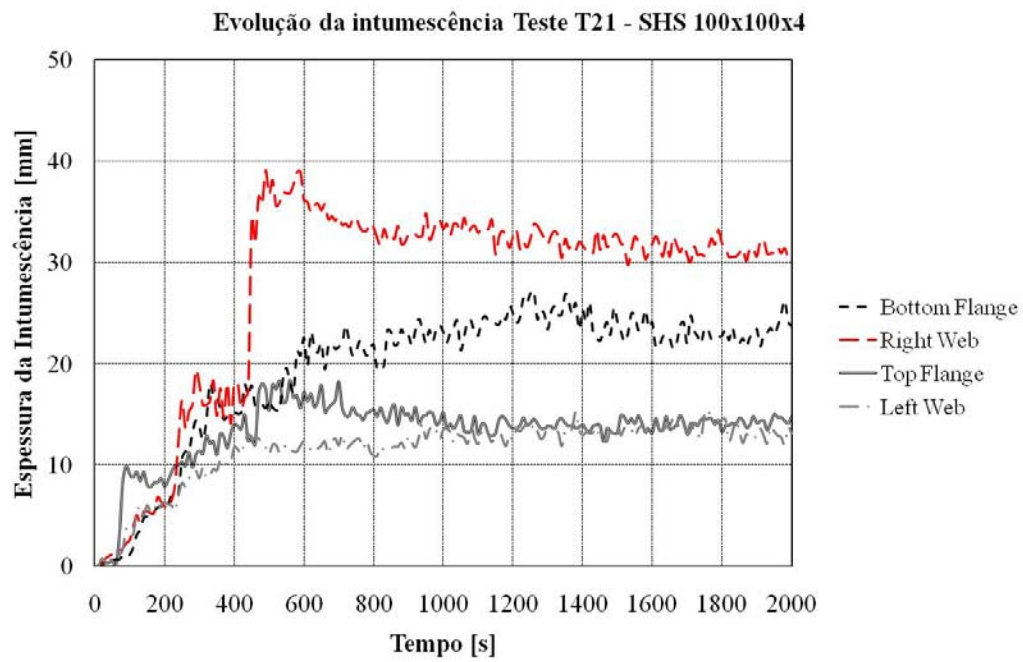


Figura 4.49 Gráfico da evolução da intumescência do teste T21-SHS100x100x4.

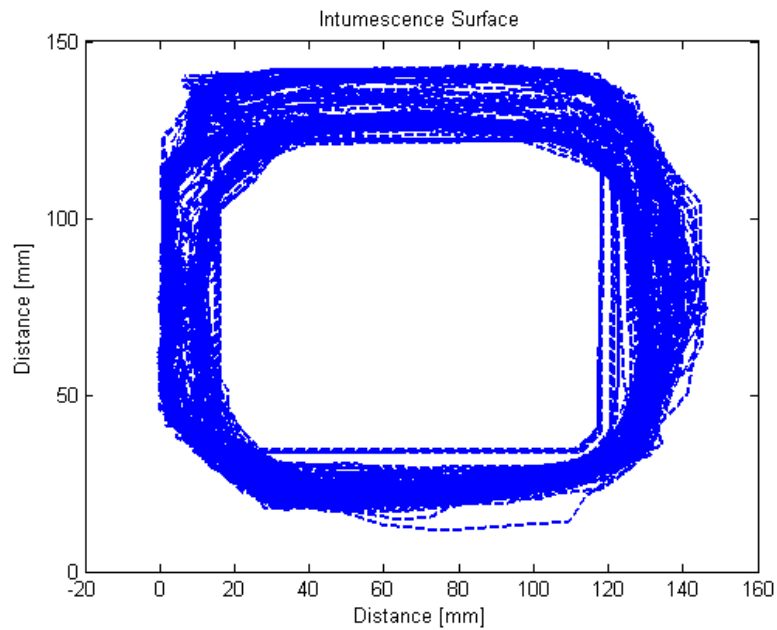


Figura 4.50 – Gráfico da intumescência da superfície do teste T21 – SHS100x100x4.

A evolução da intumescência em cada um dos ensaios efectuados é praticamente uniforme em todos os lados do perfil.

A intumescência aumenta ligeiramente com o tempo até ser atingido o valor máximo de expansão. Atingido esse valor a espessura vai diminuindo substancialmente devido as transformações a que o material fica sujeito.

O comportamento típico da evolução da intumescência é mantido, isto significa que há um aumento proporcional numa primeira fase com diminuição progressiva após ter atingido o valor máximo.

4.2.5 L100x60x8 com tinta Intumescente

Na figura 4.52 está representada a instrumentação do perfil L100x60x8. Foram colocados seis termopares tipo K, nas posições referenciadas com FT1, WT, FT2, FM1, WM e FM2.

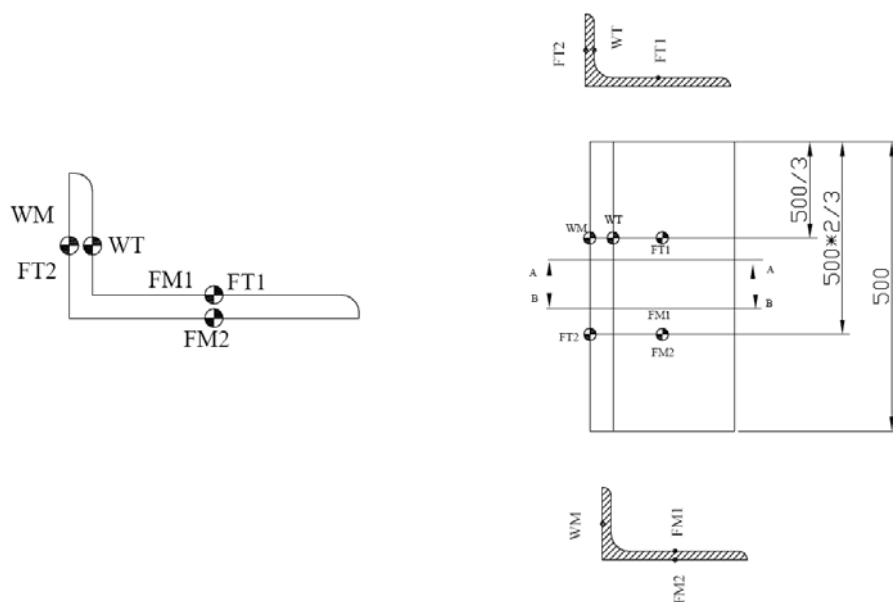


Figura 4.51 Posição dos termopares nos perfis L100x60x8.

4.2.5.1 Preparação do ensaio

Foram preparados três elementos curtos com secção L, protegidos com tinta intumescente, adoptando uma espessura de protecção 500 [µm]. A espessura foi controlada em seis pontos e cinco secções de acordo com a figura 4.53.

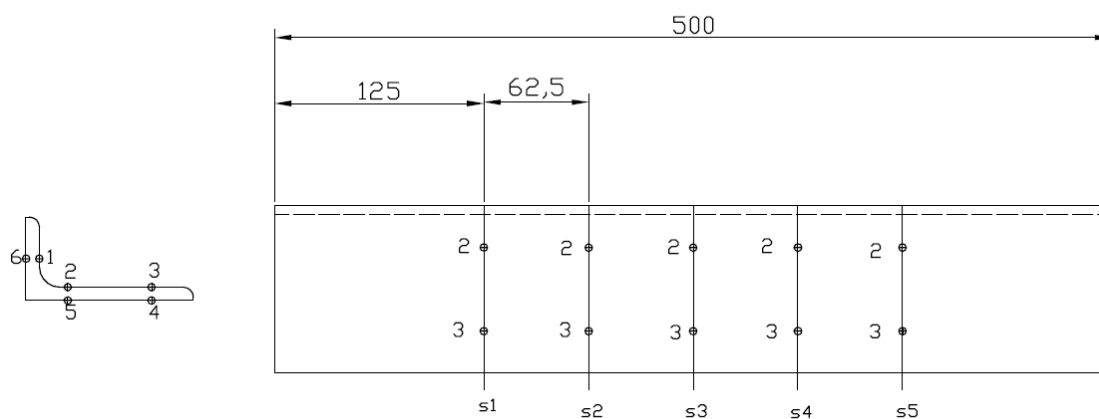


Figura 4.52 Medição dos pontos da para controlo espessura

Os valores controlados para a espessura poderão ser consultados no Anexo I do presente trabalho.

4.2.5.2 Evolução das temperaturas no perfil

Nas figuras 4.54-4.56 está representada a evolução da temperatura no perfil. Trata-se de um perfil com um factor de secção igual a $260 \text{ [m}^1\text{]}$. O fenómeno relacionado com a transformação alotrópica não aparece reproduzido em todos os ensaios para o mesmo instante de tempo. O ensaio T31 e T33 apresentam maior variação nos resultados.

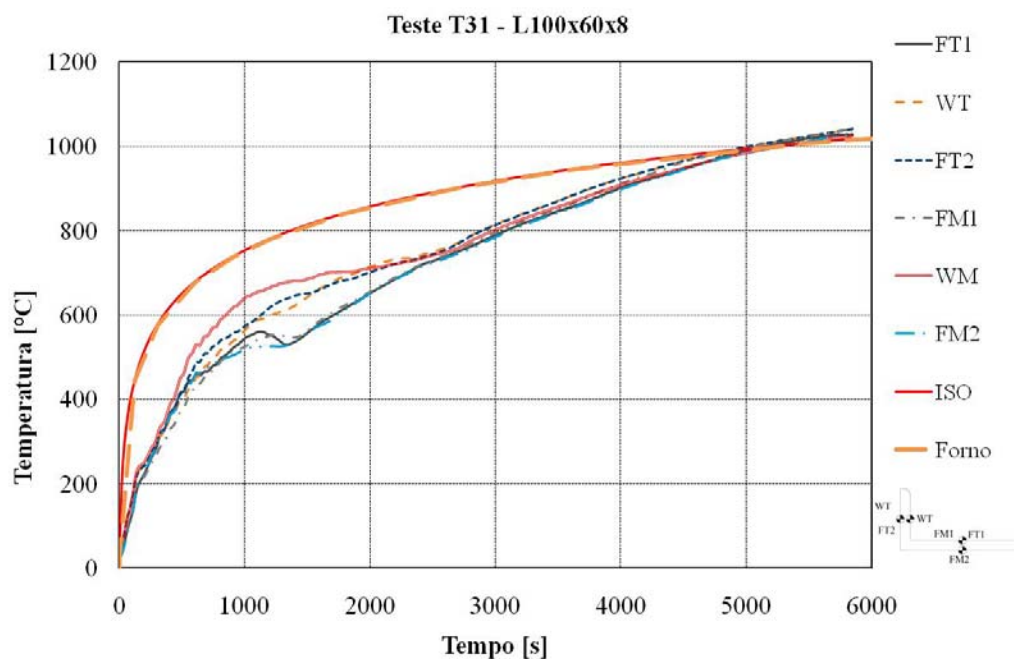


Figura 4.53 Gráfico da evolução das temperaturas no T31-L100x60x8.

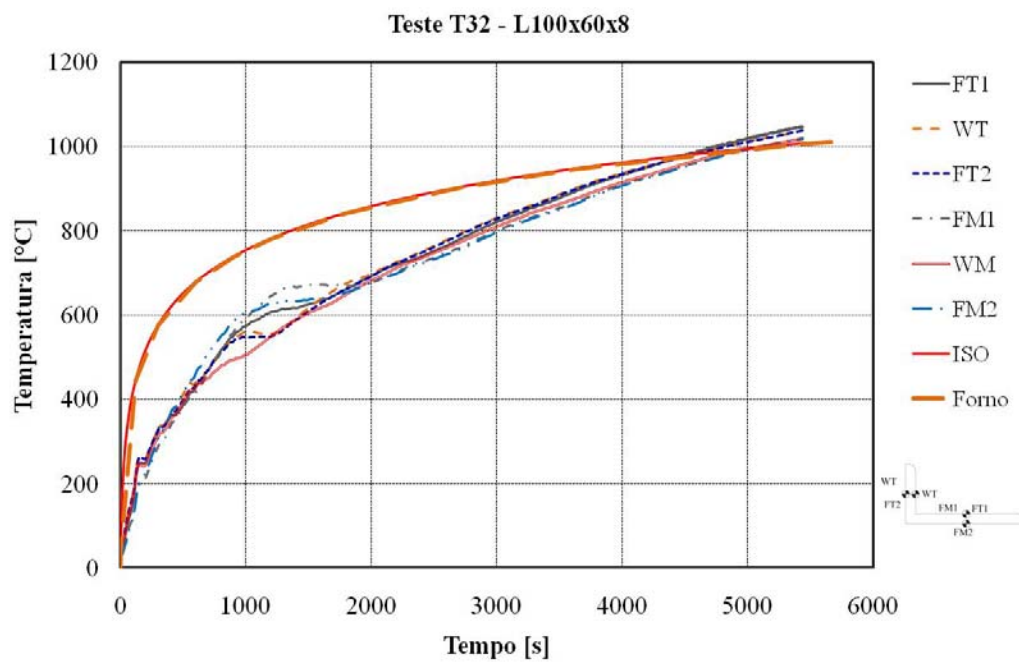


Figura 4.54 Gráfico da evolução das temperaturas no T32 –L100x60x8.

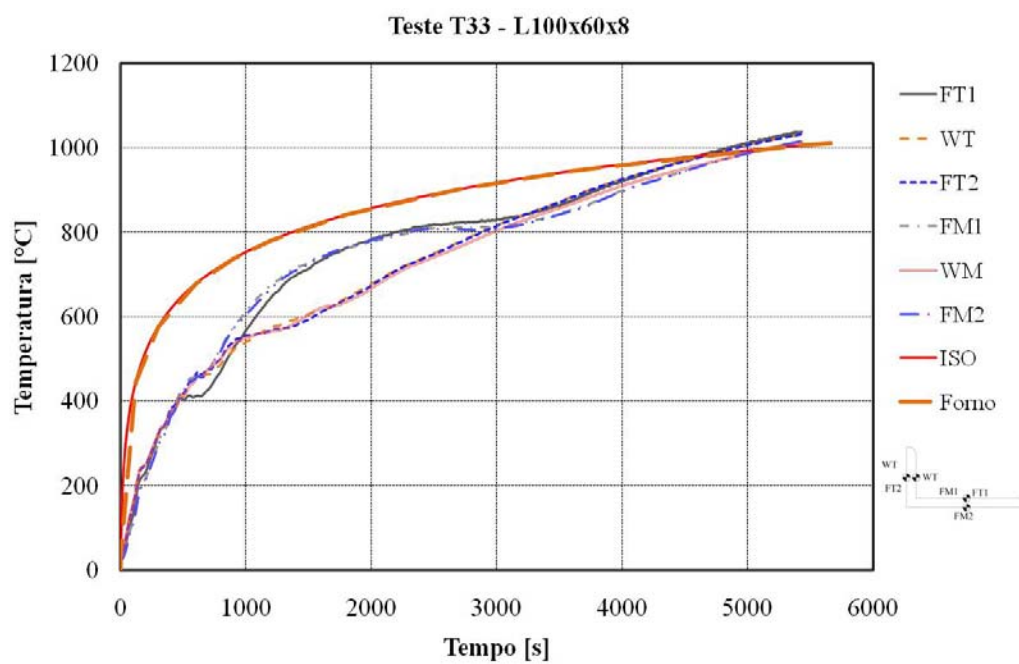


Figura 4.55 Gráfico da evolução das temperaturas no T33 –L100x60x8.

Na figura 4.57 está representada a variação da temperatura no perfil, para todos os ensaios realizados.

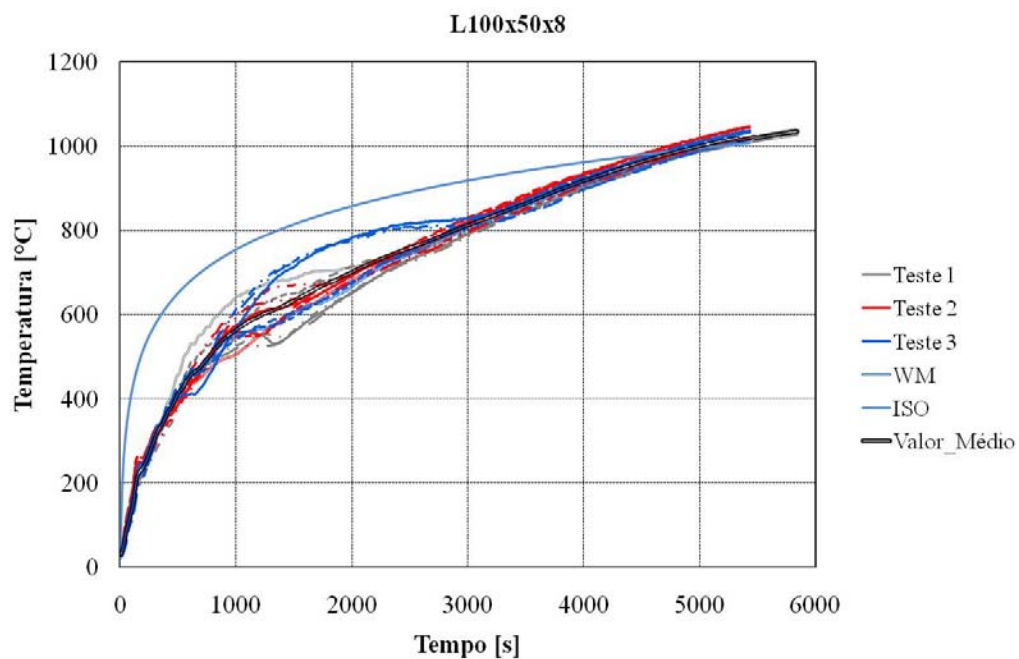


Figura 4.56 Gráfico da evolução das temperaturas no Perfil L100x60x8.

4.2.5.3 Evolução da Intumescência no perfil

Nas figuras seguintes está representada a evolução da intumescência para o perfil L100x100x60x8, quando submetido à curva nominal ISO834.

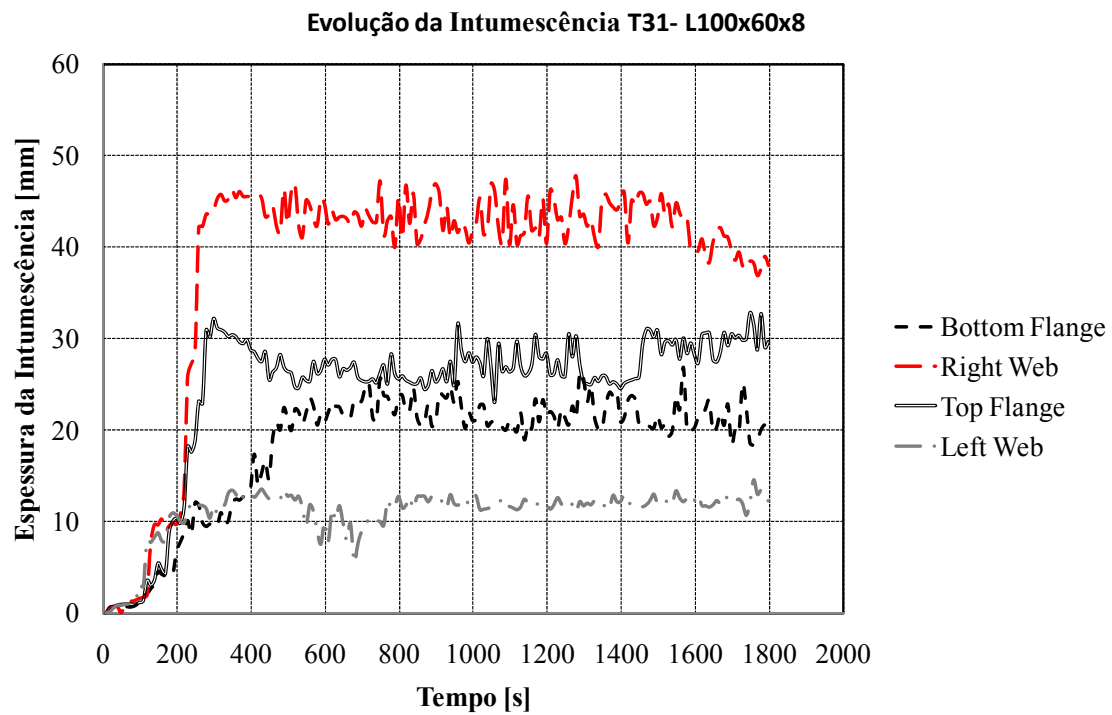


Figura 4.57 Gráfico da evolução da intumescência no teste T31-L100x60x8.

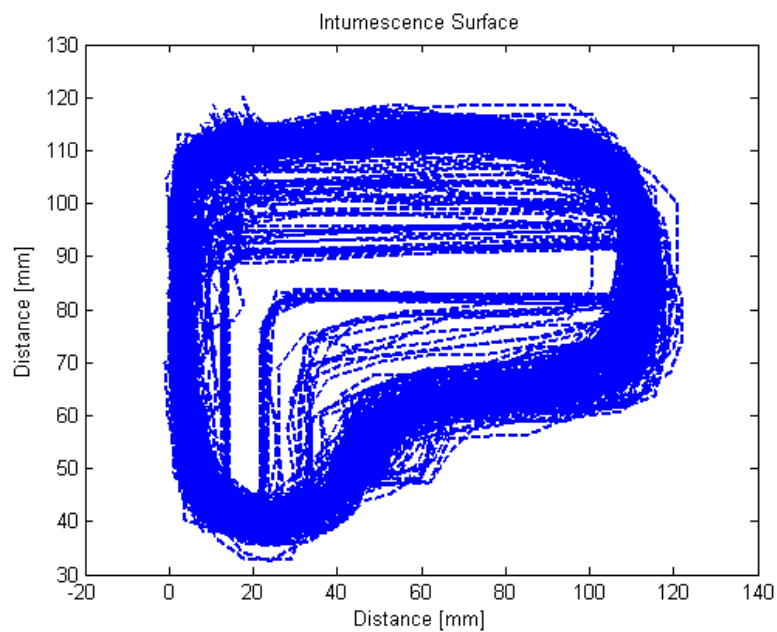


Figura 4.58 Gráfico da intumescência da superfície no teste T31-L100x60x8.

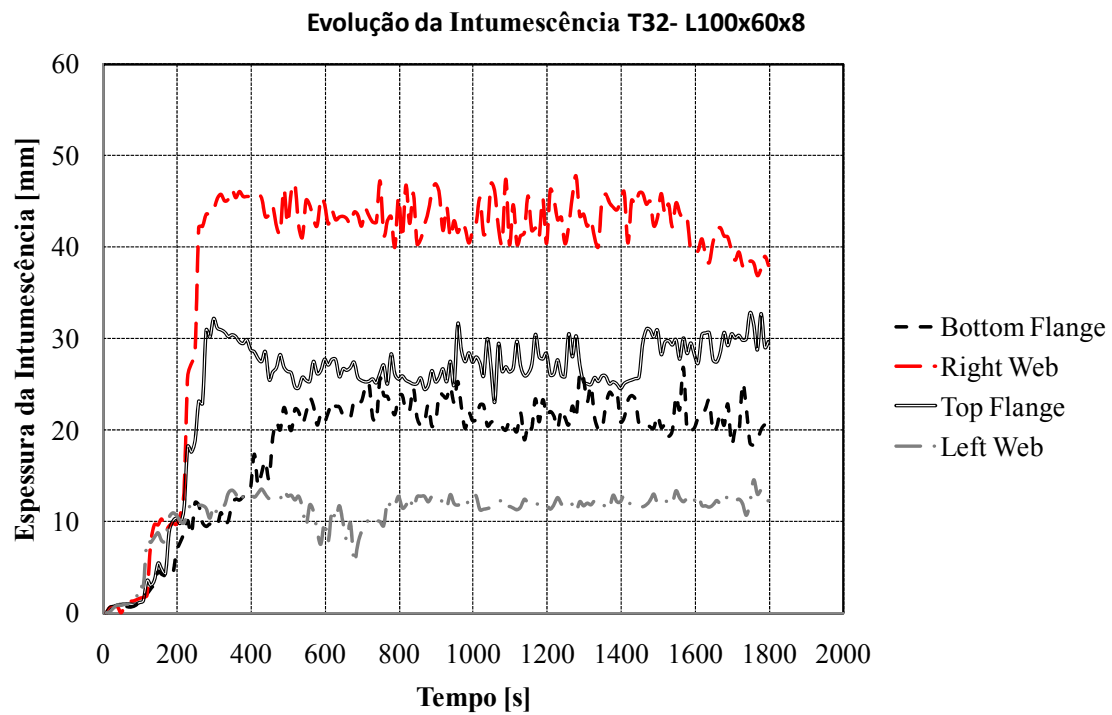


Figura 4.59 Gráfico da evolução da intumescência T32-L100x60x8.

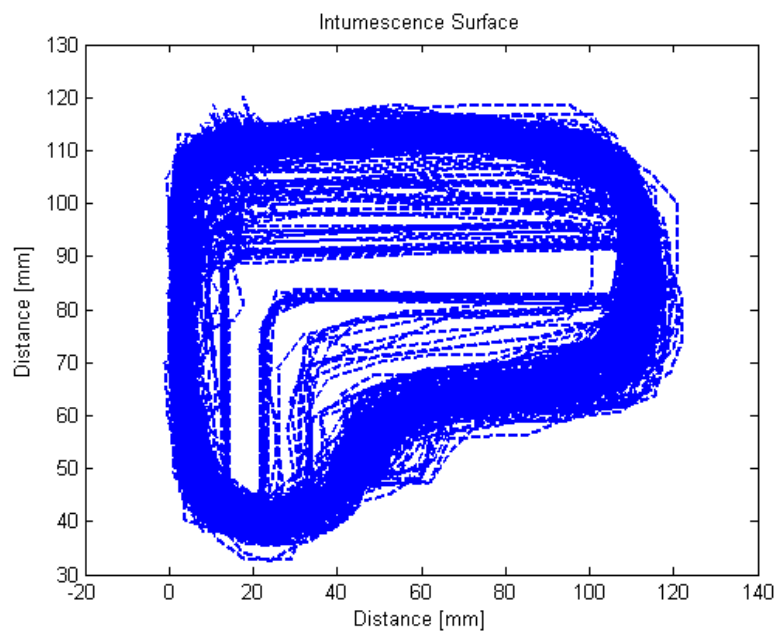


Figura 4.60 Gráfico da intumescência da superfície no teste T32-L100x60x8.

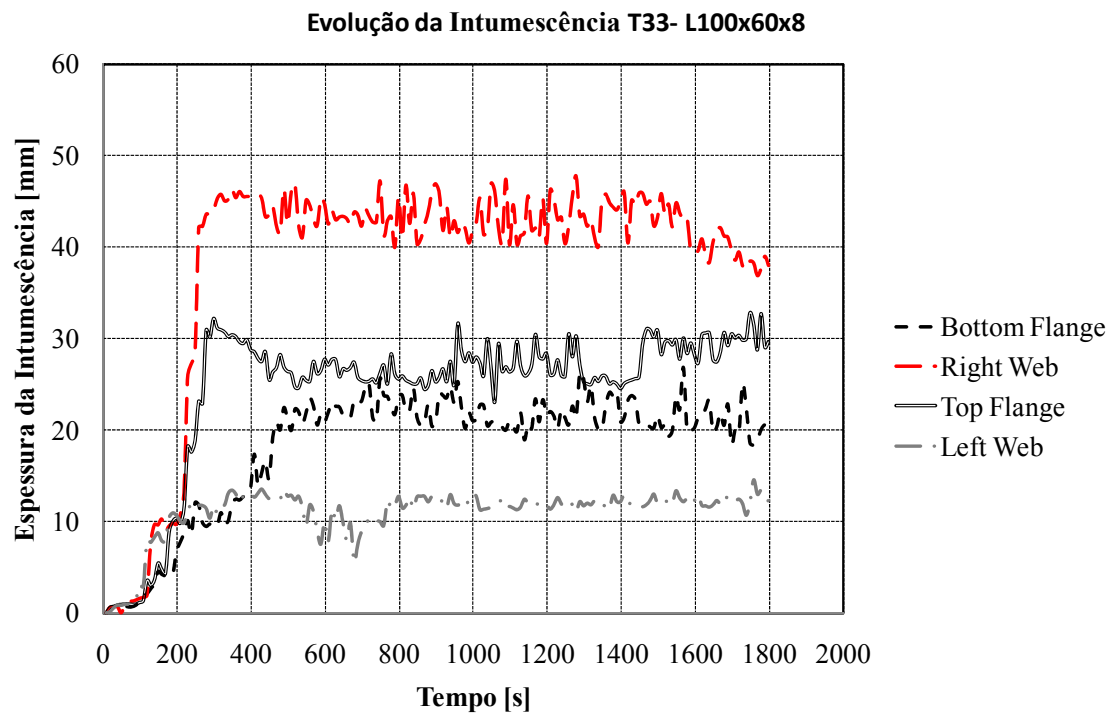


Figura 4.61 Gráfico da evolução da intumescência T33-L100x60x8.

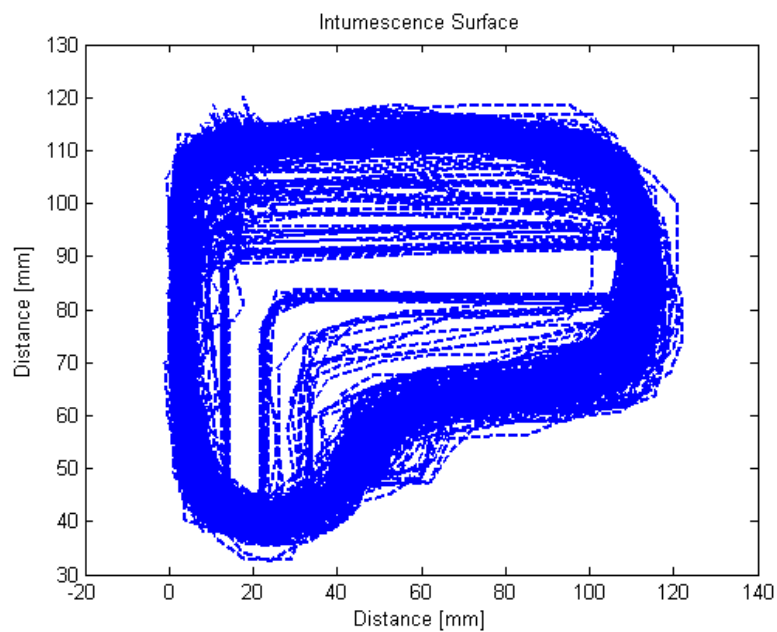


Figura 4.62 Gráfico da intumescência da superfície no teste T33-L100x60x8.

A intumescência aumenta ligeiramente com o tempo até ser atingido o valor máximo de expansão. Atingido esse valor a espessura vai diminuindo substancialmente devido as transformações a que o material fica sujeito.

A evolução da intumescência na parte direita do elemento estrutural em análise é sempre superior ao valor medido nas restantes partes do perfil.

A evolução da intumescência em cada um dos ensaios efectuados é praticamente uniforme em alguns dos lados do perfil.

O comportamento típico da evolução da intumescência é mantido, isto significa que há um aumento proporcional numa primeira fase com diminuição progressiva após ter atingido o valor máximo.

4.3 Conclusões

Foram apresentados os resultados correspondentes aos ensaios efectuados no forno, desde a evolução das temperaturas de cada elemento estrutural, em que se verifica que há uma diferença significativa em relação à curva nominal ISO834.

Foi igualmente apresentado e analisado os resultados obtidos na evolução da intumescência de cada um dos elementos estruturais, em que se verifica que esta evolução está dependente com o efeito da reacção da tinta. A intumescência aumenta ligeiramente com o tempo.

O comportamento típico da evolução da intumescência é mantido, há um ligeiro aumento proporcional numa primeira fase dos ensaios com diminuição progressiva após se atingir o valor máximo.

4.4 Referências

- [4.1] Vila Real, Paulo” incêndios em estruturas metálicas. Cálculo Estrutural” Edições Orion, Novembro 2003
- [4.2] EN 1363-1, “Ensayos de resistencia al Fuego. Parte 1: requisitos generales”CEN, Agosto de 1999
- [4.3] prEN 13381-8;2007

Capítulo 5

Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

5.1 Conclusões

Apresentou-se a evolução das temperaturas e a evolução da intumescência em cada um dos elementos estruturais propostos para a execução deste trabalho, em que podemos dizer que quanto maior for a espessura de protecção maior será o processo de intumescência.

A protecção de elementos estruturais em aço com tinta intumescente sujeitas a condições de incêndio atrasa o aumento da temperatura nos perfis.

De realçar que a evolução das temperaturas em cada um dos ensaios de cada um dos elementos estruturais foram idênticos.

Na evolução da intumescência podemos dizer que a intumescência está dependente do efeito da reacção da tinta. A espessura diminuíu progressivamente devido a transformações a que o material fica submetido.

5.2 Perspectivas de trabalhos futuros

No seguimento do trabalho desenvolvido na presente dissertação, apresentam-se algumas sugestões, tendo como objectivos futuros desenvolvimentos nesta área de investigação relacionada com o processo de intumescência, efectuar um estudo paramétrico da espessura e massividade na temperatura crítica dos diferentes elementos estruturais

Anexos

Anexo I

Dry film thickness measurement

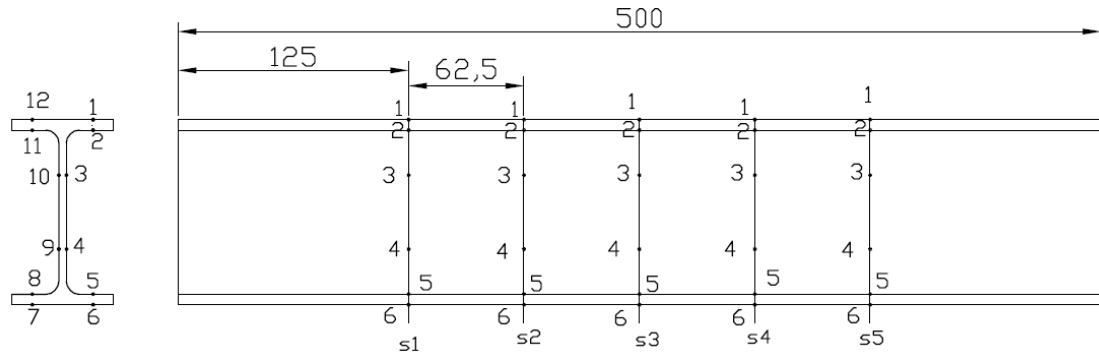


Figure 1: Section IPE 100

Section Point	S1	S2	S3	S4	S5	Mean	Stan. Desv	Higher	Smaller
1	586	629	676	685	555	626,2	56,2	685,0	555,0
2	312	325	383	351	355	345,2	27,7	383,0	312,0
3	501	520	545	551	585	540,4	32,0	585,0	501,0
4	534	505	564	601	577	556,2	37,5	601,0	505,0
5	380	363	411	400	395	389,8	18,7	411,0	363,0
6	477	521	517	607	519	528,2	47,7	607,0	477,0
7	472	491	556	646	573	547,6	69,5	646,0	472,0
8	380	427	446	382	441	415,2	32,0	446,0	380,0
9	588	622	637	639	650	627,2	24,1	650,0	588,0
10	506	564	649	752	675	629,2	96,2	752,0	506,0
11	372	335	376	359	369	362,2	16,5	376,0	335,0
12	606	676	588	566	661	619,4	47,3	676,0	566,0
Mean	476,17	498,17	529,00	544,92	529,58	515,6			
Stan. Desv	96,57	116,56	104,03	137,76	114,06		113,5		
Higher	606	676	676	752	675			752,0	
Smaller	312	325	376	351	355				312,0

Table 1 Dry film thickness measurement of Test1, (section IPE100) in [µm].

Section Point	S1	S2	S3	S4	S5	Mean	Stan. Desv	Higher	Smaller
1	421	366	466	455	440	429,6	39,4	466,0	366,0
2	430	419	454	477	488	453,6	29,5	488,0	419,0
3	608	627	679	641	640	639,0	26,0	679,0	608,0
4	548	673	721	754	583	655,8	88,2	754,0	548,0
5	337	407	481	431	385	408,2	53,5	481,0	337,0
6	441	535	589	560	487	522,4	58,9	589,0	441,0
7	502	483	519	511	467	496,4	21,2	519,0	467,0
8	385	314	380	458	388	385,0	51,0	458,0	314,0
9	501	589	709	732	763	658,8	110,1	763,0	501,0
10	534	557	672	622	615	600,0	55,0	672,0	534,0
11	370	357	389	371	329	363,2	22,3	389,0	329,0
12	467	483	482	472	444	469,6	15,8	483,0	444,0
Mean	462,00	484,17	545,08	540,33	502,42	506,8			
Stan. Desv	79,89	114,51	123,85	122,03	125,03		115,0		
Higher	608	673	721	754	763			763,0	
Smaller	337	314	380	371	329				314,0

Table 2 Dry film thickness measurement of Test2, (section IPE100) in [µm].

Section Point	S1	S2	S3	S4	S5	Mean	Stan. Desv	Higher	Smaller
1	568	677	748	654	616	652,6	67,4	748,0	568,0
2	583	459	460	446	440	477,6	59,5	583,0	440,0
3	853	831	772	781	862	819,8	41,2	862,0	772,0
4	662	733	634	574	659	652,4	57,3	733,0	574,0
5	504	480	466	518	530	499,6	26,4	530,0	466,0
6	579	594	551	672	566	592,4	47,2	672,0	551,0
7	625	607	567	674	634	621,4	39,1	674,0	567,0
8	470	408	419	359	396	410,4	40,3	470,0	359,0
9	557	604	625	530	542	571,6	41,0	625,0	530,0
10	546	763	742	700	676	685,4	85,1	763,0	546,0
11	495	471	443	487	507	480,6	24,8	507,0	443,0
12	573	681	768	664	673	671,8	69,2	768,0	573,0
Mean	584,58	609,00	599,58	588,25	591,75	594,6			
Stan. Desv	100,01	133,83	134,88	122,71	123,99		119,8		
Higher	853	831	772	781	862			862,0	
Smaller	470	408	419	359	396				359,0

Table 3 Dry film thickness measurement of Test3, (section IPE100) in [µm].

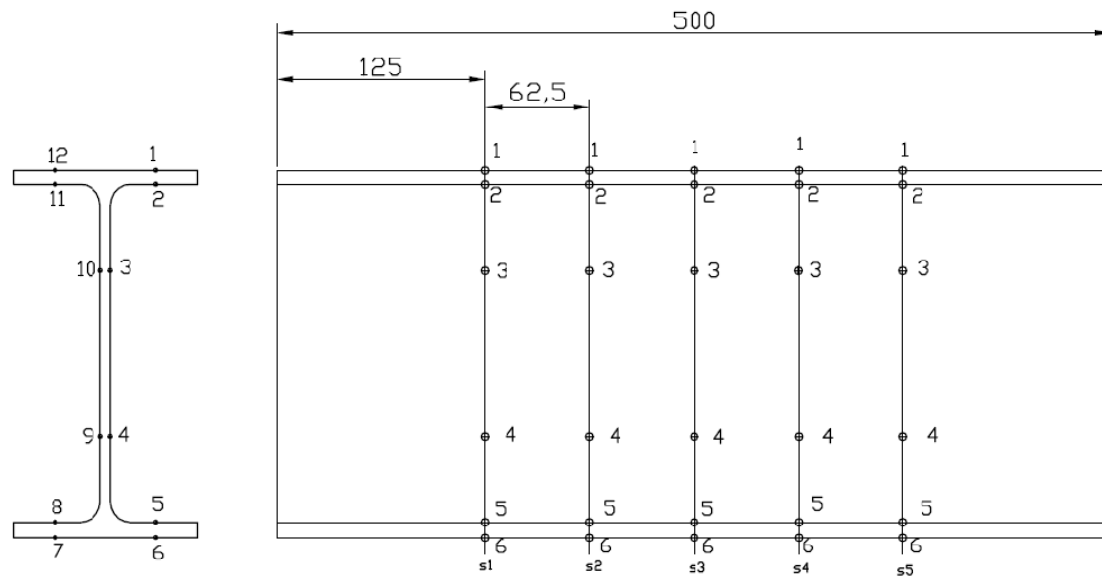


Figure 2 Section IPE 220

Section Point	S1	S2	S3	S4	S5	Mean	Stan. Desv	Higher	Smaller
1	652	637	683	628	600	640,0	30,6	683,0	600,0
2	652	622	700	799	787	712,0	79,1	799,0	622,0
3	575	759	703	693	555	657,0	88,0	759,0	555,0
4	810	771	785	788	870	804,8	39,0	870,0	771,0
5	518	541	512	535	720	565,2	87,3	720,0	512,0
6	704	526	630	609	623	618,4	63,5	704,0	526,0
7	658	773	741	633	770	715,0	65,3	773,0	633,0
8	604	609	597	633	642	617,0	19,5	642,0	597,0
9	1000	991	900	851	813	911,0	83,1	1000,0	813,0
10	985	929	763	618	769	812,8	146,2	985,0	618,0
11	585	649	758	870	996	771,6	165,9	996,0	585,0
12	525	561	616	568	550	564,0	33,3	616,0	525,0
Mean	689,00	697,33	699,00	685,42	724,58	699,1			
Stan. Desv	162,39	149,76	102,00	113,04	135,67		130,5		
Higher	1000	991	900	870	996			1000,0	
Smaller	518	526	512	535	550				512,0

Table 4 Dry film thickness measurement of Test7, (section IPE220) in [µm].

Section Point	S1	S2	S3	S4	S5	Mean	Stan. Desv	Higher	Smaller
1	807	872	683	628	600	718,0	117,1	872,0	600,0
2	667	591	700	799	787	708,8	86,5	799,0	591,0
3	622	659	703	693	555	646,4	60,2	703,0	555,0
4	625	626	785	788	870	738,8	108,9	870,0	625,0
5	490	501	512	535	720	551,6	95,6	720,0	490,0
6	739	732	630	609	623	666,6	63,4	739,0	609,0
7	723	747	741	633	770	722,8	52,9	770,0	633,0
8	610	517	597	633	642	599,8	49,6	642,0	517,0
9	765	784	900	851	813	822,6	54,1	900,0	765,0
10	866	831	763	618	769	769,4	95,0	866,0	618,0
11	677	656	758	870	996	791,4	141,9	996,0	656,0
12	970	892	616	568	550	719,2	196,8	970,0	550,0
Mean	713,42	700,67	699,00	685,42	724,58	704,6			
Stan. Desv	128,47	130,72	102,00	113,04	135,67		119,2		
Higher	970	892	900	870	996			996,0	
Smaller	490	501	512	535	550				490,0

Table 5 Dry film thickness measurement of Test8, (section IPE220) in [µm].

Section Point	S1	S2	S3	S4	S5	Mean	Stan. Desv	Higher	Smaller
1	443	491	537	509	533	502,6	38,2	537,0	443,0
2	493	528	643	558	550	554,4	55,6	643,0	493,0
3	547	612	610	662	673	620,8	50,2	673,0	547,0
4	554	639	707	696	628	644,8	61,3	707,0	554,0
5	674	657	823	581	579	662,8	99,4	823,0	579,0
6	510	543	598	582	580	562,6	35,6	598,0	510,0
7	617	593	639	647	657	630,6	25,7	657,0	593,0
8	345	431	490	415	430	422,2	51,8	490,0	345,0
9	520	528	526	586	679	567,8	67,7	679,0	520,0
10	533	521	570	527	633	556,8	46,7	633,0	521,0
11	519	527	582	702	633	592,6	76,5	702,0	519,0
12	376	402	415	473	568	446,8	76,5	568,0	376,0
Mean	510,92	539,33	595,00	578,17	595,25	563,7			
Stan. Desv	91,61	77,24	105,03	88,71	70,88		90,9		
Higher	674	657	823	702	679			823,0	
Smaller	345	402	415	415	430				345,0

Table 6 Dry film thickness measurement of Test9, (section IPE220) in [µm].

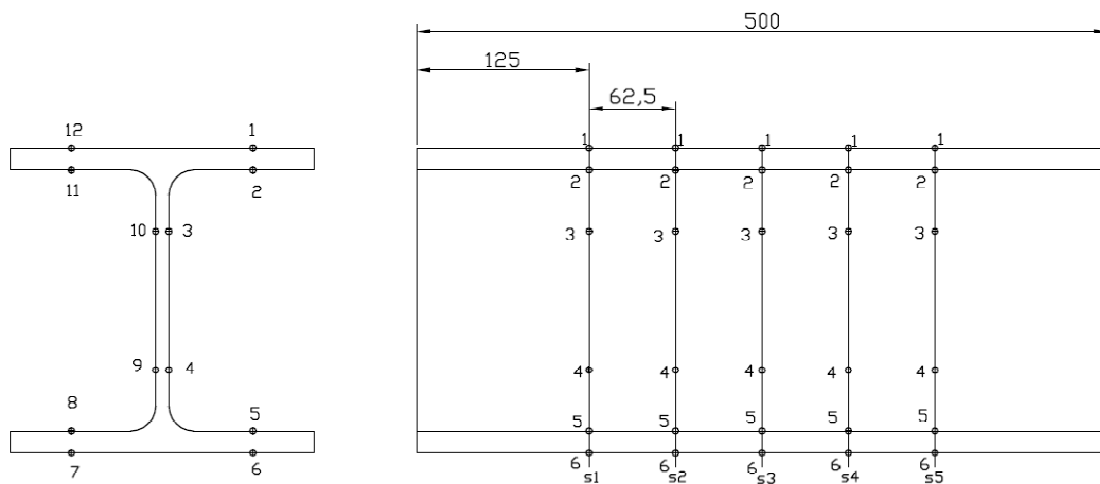


Figure 3 Section HEB 220

Section Point	S1	S2	S3	S4	S5	Mean	Stan. Desv	Higher	Smaller
1	644	644	707	728	888	722,2	100,0	888,0	644,0
2	698	699	689	588	715	677,8	51,1	715,0	588,0
3	760	753	850	717	727	761,4	52,6	850,0	717,0
4	561	593	648	579	584	593,0	32,9	648,0	561,0
5	685	615	713	725	706	688,8	43,7	725,0	615,0
6	523	598	625	626	662	606,8	52,1	662,0	523,0
7	690	806	627	644	706	694,6	70,2	806,0	627,0
8	586	717	686	780	837	721,2	95,4	837,0	586,0
9	823	708	752	787	749	614,0	49,1	823,0	708,0
10	726	847	822	809	781	797,0	46,3	847,0	726,0
11	702	726	731	747	739	729,0	17,1	747,0	702,0
12	625	697	583	612	678	639,0	47,3	697,0	583,0
Mean	668,58	700,25	702,75	695,17	668,58	698,7			
Stan. Desv	85,44	79,15	79,11	81,47	83,14		81,1		
Higher	823	847	850	809	888			888,0	
Smaller	523	593	583	579	584				523,0

Table 7 Dry film thickness measurement of Test13, (section HEB220) in [μm].

Section Point	S1	S2	S3	S4	S5	Mean	Stan. Desv	Higher	Smaller
1	635	757	633	673	672	674,0	50,2	757,0	633,0
2	632	585	683	671	891	692,4	117,4	891,0	585,0
3	454	475	678	808	570	597,0	147,6	808,0	454,0
4	645	822	640	674	648	685,8	77,3	822,0	640,0
5	676	559	725	791	772	704,6	92,8	791,0	559,0
6	593	568	508	487	526	536,4	43,5	593,0	487,0
7	834	639	730	729	678	722,0	73,3	834,0	639,0
8	611	648	701	711	867	707,6	97,9	867,0	611,0
9	780	849	663	654	732	735,6	81,8	849,0	654,0
10	630	554	637	841	851	702,6	134,9	851,0	554,0
11	779	653	715	820	881	769,6	88,9	881,0	653,0
12	591	611	887	800	628	703,4	132,2	887,0	591,0
Mean	655,00	643,33	683,33	721,58	726,33	685,9			
Stan. Desv	102,43	113,15	87,62	99,69	125,82		108,3		
Higher	834	849	887	841	891			891,0	
Smaller	454	475	508	487	526				454,0

Table 8 Dry film thickness measurement of Test14, (section HEB220) in [μm].

Section Point	S1	S2	S3	S4	S5	Mean	Stan. Desv	Higher	Smaller
1	488	489	687	568	510	548,4	84,0	687,0	488,0
2	513	540	520	593	680	569,2	69,4	680,0	513,0
3	638	573	492	566	645	582,8	62,3	645,0	492,0
4	739	761	742	712	725	735,8	18,5	761,0	712,0
5	498	642	459	563	627	557,8	79,4	642,0	459,0
6	528	639	658	810	665	660,0	100,5	810,0	528,0
7	595	593	612	605	615	604,0	9,8	615,0	593,0
8	665	587	706	738	663	671,8	56,7	738,0	587,0
9	597	691	726	745	671	686,0	57,6	745,0	597,0
10	620	653	701	723	681	675,6	40,4	723,0	620,0
11	572	693	584	568	673	618,0	60,0	693,0	568,0
12	442	638	503	499	573	531,0	75,7	638,0	442,0
Mean	574,58	624,92	615,83	640,83	644,00	620,0			
Stan. Desv	84,81	73,74	101,42	98,48	56,99		85,6		
Higher	739	761	742	810	725			810,0	
Smaller	442	489	459	499	510				442,0

Table 9 Dry film thickness measurement of Test15, (section HEB220) in [μm].

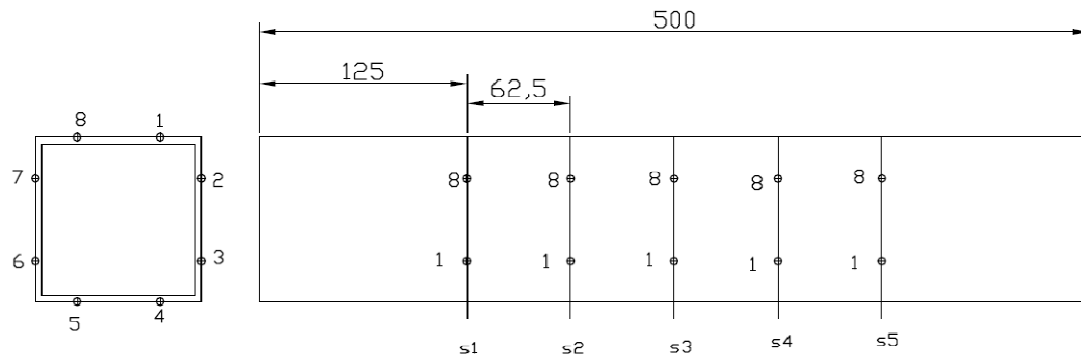


Figure 4 Section SHS100x100x4

Point	S1	S2	S3	S4	S5	Mean	Stan. Desv	Higher	Smaller
1	630	627	634	503	554	589,6	58,7	634,0	503,0
2	689	630	541	473	505	567,6	89,7	689,0	473,0
3	727	759	643	608	532	653,8	91,5	759,0	532,0
4	700	561	522	485	468	547,2	92,6	700,0	468,0
5	633	616	585	496	488	563,6	67,6	633,0	488,0
6	544	464	466	397	467	467,6	52,1	544,0	397,0
7	611	499	495	495	425	505,0	66,8	611,0	425,0
8	502	465	537	420	388	462,4	60,2	537,0	388,0
Mean	629,50	577,63	552,88	484,63	478,38	544,6			
Stan. Desv	77,40	101,14	63,22	63,00	54,31		90,7		
Higher	727	759	643	608	554			759,0	
Smaller	502	464	466	397	388				388,0

Table 10 Dry film thickness measurement of Test19, (section SHS100x100x4) in [μm].

Point	S1	S2	S3	S4	S5	Mean	Stan. Desv	Higher	Smaller
1	757	799	819	753	738	773,2	34,2	819,0	738,0
2	562	492	481	469	440	488,8	45,3	562,0	440,0
3	628	698	779	567	529	640,2	100,6	779,0	529,0
4	584	569	537	538	515	548,6	27,6	584,0	515,0
5	611	601	531	595	513	570,2	44,8	611,0	513,0
6	558	515	516	417	449	491,0	56,9	558,0	417,0
7	674	603	623	531	404	567,0	104,6	674,0	404,0
8	670	642	612	633	569	625,2	37,7	670,0	569,0
Mean	630,50	614,88	612,25	562,88	519,63	588,0			
Stan. Desv	67,56	99,33	125,03	102,71	103,49		104,6		
Higher	757	799	819	753	738			819,0	
Smaller	558	492	481	417	404				404,0

Table 11 Dry film thickness measurement of Test20, (section SHS100x100x4) in [μm].

Point	S1	S2	S3	S4	S5	Mean	Stan. Desv	Higher	Smaller
1	706	679	686	631	603	661,0	42,5	706,0	603,0
2	712	657	713	760	549	678,2	80,9	760,0	549,0
3	563	597	699	625	501	597,0	73,4	699,0	501,0
4	475	413	422	409	417	427,2	27,2	475,0	409,0
5	474	591	570	556	445	527,2	63,9	591,0	445,0
6	528	546	515	504	446	507,8	37,9	546,0	446,0
7	568	516	527	595	548	550,8	31,8	595,0	516,0
8	555	522	582	569	559	557,4	22,4	582,0	522,0
Mean	572,63	565,13	589,25	581,13	508,50	563,3			
Stan. Desv	91,72	85,25	103,17	102,09	66,60		90,7		
Higher	712	679	713	760	603			760,0	
Smaller	474	413	422	409	417				409,0

Table 12 Dry film thickness measurement of Test21, (section SHS100x100x4) in [μm].

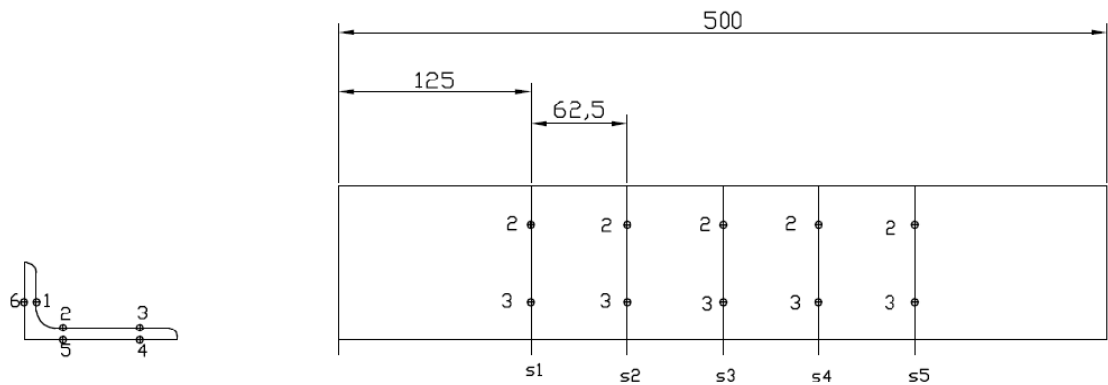


Figure 5 Section L100x60x8

Point	S1	S2	S3	S4	S5	Mean	Stan. Desv	Higher	Smaller
1	443	564	649	641	554	570,2	83,2	649,0	443,0
2	577	552	494	552	569	548,8	32,5	577,0	494,0
3	483	574	599	632	655	588,6	66,6	655,0	483,0
4	463	509	562	521	541	519,2	37,3	562,0	463,0
5	530	515	608	734	728	623,0	104,7	734,0	515,0
6	526	606	581	594	650	591,4	44,8	650,0	526,0
Mean	503,67	553,33	582,17	612,33	616,17	573,5			
Stan. Desv	49,66	36,75	52,15	75,27	73,35		69,5		
Higher	577	606	649	734	728			734,0	
Smaller	443	509	494	521	541				443,0

Table 13 Dry film thickness measurement of Test31, (section L100x60x8) in [μm]

Point	S1	S2	S3	S4	S5	Mean	Stan. Desv	Higher	Smaller
1	640	591	545	555	665	599,2	52,3	665,0	545,0
2	409	471	471	421	418	438,0	30,4	471,0	409,0
3	423	468	528	516	551	497,2	51,4	551,0	423,0
4	567	536	479	467	516	513,0	41,0	567,0	467,0
5	512	544	491	523	561	526,2	27,3	561,0	491,0
6	630	495	584	601	679	597,8	67,8	679,0	495,0
Mean	530,17	517,50	516,33	513,83	565,00	528,6			
Stan. Desv	99,88	48,09	43,88	63,55	97,18		71,8		
Higher	640	591	584	601	679			679,0	
Smaller	409	468	471	421	418				409,0

Table 14 Dry film thickness measurement of Test32, (section L100x60x8) in [μm].

Point	S1	S2	S3	S4	S5	Mean	Stan. Desv	Higher	Smaller
1	591	656	631	609	622	621,8	24,3	656,0	591,0
2	538	555	550	541	523	541,4	12,3	555,0	523,0
3	592	622	607	486	560	573,4	54,0	622,0	486,0
4	439	437	541	541	469	485,4	52,3	541,0	437,0
5	571	561	594	600	723	609,8	65,3	723,0	561,0
6	523	522	510	549	557	532,2	19,9	557,0	510,0
Mean	542,33	558,83	572,17	554,33	575,67	560,7			
Stan. Desv	57,84	77,01	45,78	45,01	87,86		61,6		
Higher	592	656	631	609	723			723,0	
Smaller	439	437	510	486	469				437,0

Table 15 Dry film thickness measurement of Test33, (section L100x60x8) in [μm].

Anexo II

Rotinas em Matlab

1.Criação de frames

```
%function creat_frames

% Function to read a "WMV" movie file. It creates sequential frames in
% time. The Function MMREAR must be in the same directory.
%lmesquita February, 2008

close all
% File Name to Read
[filename,PathName] = uigetfile('*.wmv','Select the WMV-file');

%filein=input('Name of the WMV movie file (Ex: ABC.WMV) = ');
%filename = num2str(filein, '.wmv')
%filename='A354251_2.wmv'
%initial frame

%Input parameters
fps=input('Number of frames per second from the movie aquisition (Ex:
25 fps) = ');
timei=input('Movie startTime (Ex: 1 s) = ');
timef=input('Movie stopTime (Ex: 3600 s) = ');
dt=input('Time increment to create Frames (Ex: 10 s) = ');

%data test
%fps=25
%timei=1
%timef=30000
%dt=10
%%%%

iframe=timei*fps-(fps-1); %Frame numero 1 do segundo
fframe=fps*timef;
dtframe=dt*fps;
nframe=(fframe+1-iframe)/dtframe; %numero de frames a criar
frmidx=[iframe:dtframe:fframe];
tindex=[timei:dt:timef];

[video, audio]=mmread(filename,frmidx,[],false,true);%Lê o filme
pretendido requer a função mmread
```

```

nframes=length(video.frames); %numero de frames criadas

%%%Gravação do instante de tempo de cada frame e seu numero

for ii=1:nframes
tempoi(1,ii)=ii;
tempoi(2,ii)=frmidx(1,ii);
tempoi(3,ii)=video.times(1,ii); %grava o tempo das frames pretendidas

FrameIndex=ii;
frameIndexname = num2str(FrameIndex,'%04d');
name=strcat('frame_orig_',frameIndexname,'.jpg');
image=(video.frames(1,ii).cdata);
imwrite(image,name); %grava as frames pretendidas
end
tempo=tempoi'
tempo=tempoi'
[filenameout,pathnameout] = uiputfile('FramesData.xls','Output Frame
Data');
%name of the file with the path
File = fullfile(pathnameout,filenameout)
%Write a Excel file with frame data
xlswrite(File,{'Frame','Frame Number in the movie','Time (s)'},
'folha1', 'A1')
xlswrite(File, tempo, 'folha1', 'A2')
close all

```

2-Evolução da intumescência

```

% file to measure the intumescence of n files (frames) in a directory.
% save the (x,y) coordinates of 2 pixels in the surface and the time
of the
% frame.
clear all
close all
%set(0,'defaulttextinterpreter','none');

%[FileName,PathName]= uigetfile('*.jpg','Select the JPG image file');
%[pathstr, name, ext, versn] = fileparts(FileName)

%dir_0='C:\software\'; % origen del programa
%dir_1=PathName; % origen de la imagenes
%dir_1='C:\Documents and Settings\Luis Mesquita\Desktop\teste do
film\Create Frames\'
% print files??
dir_1 =strcat(uigetdir(''),'\\')

formato='.jpg';
n_number=4; % número de dígitos para diferenciar
imagens
dig=input('Identifier Number of first image (frame0133.JPG = 133) =
');
imnumr=dig;

```



```

files=dir(strcat(dir_1,'*',formato));
nfiles=length(files) % numero de imagens no
directorio
s_raiz='frame';
%A=imread(strcat(dir_1,s_raiz,cero,num2str(dig),formato));
FramesData = xlsread('FramesData.xls', 'folha1');
%FramesNumr(:,1)=FramesData(:,1)
%FramesTime(:,1)=FramesData(:,3)
File = 'FramesData.xls'
xlswrite(File,{'Time (s)' 'Plate Width [mm]' 'Intumescent thickness'},
'dados', 'A1');

%print('s_raiz')
i=0;
n=1;
Nframe=1
while (n<nfiles+1) && (imnumr<nfiles+1)
    % especificação do nº de frames que avança

    %avança dn frames
    if imnumr<66
        dn=0
    elseif imnumr>66
        dn=0
    else
        dn=0
    end

    Image= n;
    n_zeros=n_number-length(num2str(imnumr)); %numero de
zeros no nome do ficheiro
    zero='0';
    length(zero);
    %zero=strcat(zero,'0')

    while (length(zero)<n_zeros),
        zero=strcat(zero,'0');
    end

    length(zero);
    %zero=strcat(zero,'0')
    si=strcat(s_raiz,cero,num2str(imnumr),formato);
    %
    si=strcat(s_raiz,cero,num2str(imnumr),formato) %nome do
ficheiro de imagem à entrada
    A=imread(strcat(dir_1,si)); %lê o
ficheiro de imagem à entrada

    %clicar na figura para medir a espessura
    % figure,
    %imshow(A),
    % title(['Frame Name: ', si]);
    % disp(' x y');
    %plot da figura com GRID sobreposta
if n<=1
    %Configuração do grafico
figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68],'OuterPosition',[0 0 3000
3000]);

```

```

% Create axes
[y_pix,x_pix,dim] = size(A);
axes1 = axes('Parent',figure1,'YGrid','off',...
    'YDir','reverse',...
    'XGrid','off',...
    'TickDir','out',...
    'Layer','top',...
    'DataAspectRatio',[1 1 1]);
xlim([0 x_pix]);
ylim([0 y_pix]);
%box('on');
title(['Frame Name: ', si,['Calibration Stage'],['First two Points = DX'],['Third and Fourth Points = DY']]);
hold('all');
%a=imread('frame0001.jpg');
% Create image
%imshow(A)
image(A,'Parent',axes1);

%calibração de pixel para milimetro
for np=1:4
    ptext=strcat('P',num2str(np));
    [x,y] = ginput(1);% Coordnadas do ponto
selecionado
    text(x,y,ptext,'Color',[0.9725 0.9725 0.9725])
    plot(x,y,'b.','MarkerSize',8)
    calib(:,np) = [x;y];
    if np==2
        dlg_title = 'Calibration';
        prompt = {'Enter the distance DX=P2-P1 in [mm]:'};
        num_lines = 1;
        def = {'25'};
        DXreali =
inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
        DXreal=str2double(DXreali);
        % DXreal = input('Enter the distance
DX=P2-P1 in [mm]= ');
    end
    end
    dlg_title = 'Calibration';
    prompt = {'Enter the distance DY=P3-P4 in [mm]:'};
    num_lines = 1;
    def = {'7.9'};
    DYreali = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
    DYreal=str2double(DYreali);
    % DYreal = input('Enter the distance DY=P3-P4 in [mm]= ');
    P2_P1=abs(calib(1,1)-calib(1,2));
    P3_P4=abs(calib(2,3)-calib(2,4)) ;
close figure 1
%% end of calibration stage

%%representação novamente da frame 1
figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68],'OuterPosition',[0 0 3000 3000]);
% Create axes
axes1 = axes('Parent',figure1,'YGrid','off',...
    'YDir','reverse',...
    'XGrid','off',...
    'TickDir','out',...
    'Layer','top',...

```



```

    'DataAspectRatio',[1 1 1]);
    xlim([0 x_pix]);
    ylim([0 y_pix]);
    %box('on');

% title(['Frame Name: ', si],'Pick N points in the intumescence
surface','To End click the Right mouse button'));
    title(['Frame Name: ', si],'Draw N Polylines in the
counterclockwise','Enter to END'));
hold('all');
image(A,'Parent',axes1);

%constantes de calibração. Para ter uma distância em mm, basta
multiplicar
%por calibx=calib(1,1) ou caliby=calib(2,1)
calibreal(1,1)=DXreal/P2_P1;
calibreal(2,1)=DYreal/P3_P4;
end %fim da análise da 1ª frame

%plot da figura com GRID sobreposta
if n>1
    %nlines=length(dp(:,2,1));
    %platewidth(1,1)=dp(1,1,1);
    %platewidth(1,2)=dp(1,2,1);
    %platewidth(2,1)=dp(nlines,1,1);
    %platewidth(2,2)=dp(nlines,2,1);
    %Configuração do grafico
    figure1 = figure('PaperSize',[20.98
29.68],'OuterPosition',[0 0 3000 3000]);
    %GRIDX=linspace(platewidth(1,1),platewidth(2,1),npoints);
    %GRIDY=linspace(0,580,30);
    % Create axes
    axes1 = axes('Parent',figure1,'YGrid','off',...
        'YDir','reverse',...
        'YColor',[0.9725 0.9725 0.9725],...
        'XGrid','off',...
        'XColor',[0.9725 0.9725 0.9725],...
        'TickDir','out',...
        'Layer','top',...
        'DataAspectRatio',[1 1 1]);
    xlim([0 x_pix]);
    ylim([0 y_pix]);
    %box('on');
    %
    title(['Frame Name: ', si],'Pick N points in the
intumescence surface','To End click the Right mouse button'));
    title(['Frame Name: ', si],'Draw N Polylines in the
counterclockwise','Enter to END'));
    hold('all');
    image(A,'Parent',axes1);
end

```

```

%%%%% Representação dos pontos na figura
j=0;
but = 1;
%if n<=1
%helpdlg('Pick 15 points from each frame ','Point Selection');
%           dlg_title = 'Points';
%           prompt = {'Enter the number of points to select in
each frame:'};
%           num_lines = 1;
%           def = {'10'};
%           npointsi = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
%           npoints=str2double(npointsi);
%end
%%%%%%%%%%%%
npoints=0
j=100; %delete for pick points
% while but == 1 && j<=npoints-1 %numero maximo de pontos
while j<=npoints-1 %numero maximo de pontos
    j = j+1;
    [x,y,but] = ginput(1);% Coordwnadas do ponto selecionado
    plot(x,y,'r.','MarkerSize',8);
    xy(:,j) = [x;y];
    dp(j,1,Nframe)=x;
    dp(j,2,Nframe)=y;
    dp(j,3,Nframe)=FramesData(n,3);

    % para representar grafico
    tgraph(j,Nframe)=FramesData(imnumr,3); %matriz com o tempo de
cada frame
    Xgraph(j,Nframe)=(dp(j,1,Nframe)-dp(1,1,1))*calibreal(1,1);
%matriz com as coordenadas x de cada ponto selecionado em mm
    Ygraph(j,Nframe)=(dp(j,2,1)-dp(j,2,Nframe))*calibreal(2,1);
%matriz com as coordenadas y de cada ponto selecionado em mm(espessura
do intumescete)

    Xgraph_c(j,Nframe)=(dp(j,1,Nframe))*calibreal(1,1); %matriz com
as coordenadas x de cada ponto selecionado em mm
    Ygraph_c(j,Nframe)=(dp(j,2,Nframe))*calibreal(2,1); %matriz com
as coordenadas y de cada ponto selecionado em mm(espessura do
intumescete)

%           if max(Xgraph(:,1))<100 && n<=1
%           if n<=1
%           warndlg1=warndlg({'The selected points give a plate width
of:',num2str(max(Xgraph(:,1)))},'Warning');
%           wait(warndlg1,3)
%           end

end

[x,y]=getline(figure1); %draw the intumescence contour and obtain the
x,y coordenates
px{1,Nframe}=x; %array para permitir ter colunas de diferentes
comprimentos.
py{1,Nframe}=y;

```

```

Xgraph_c{1,Nframe}=x.*calibreal(1,1);
Ygraph_c{1,Nframe}=y.*calibreal(2,1);
[mx,nx] = size(Ygraph_c{1,Nframe});
tgraph{1,Nframe}=FramesData(imnumr,3)*ones(mx); %matriz com o tempo
de cada frame

close figure 1;

% variable to writte in the xls file
dados{: ,Nframe*3-2}=FramesData(imnumr,3)*ones(mx,1);
dados{: ,Nframe*3-1}=Xgraph_c{1,Nframe};
dados{: ,Nframe*3}=Ygraph_c{1,Nframe};
%mean intumescence thickness values
%dmean(Nframe,1)=tgraph(1,Nframe);
%dmean(Nframe,2)=mean(Ygraph(:,Nframe));
%Write a Excel file with frame data
%nl=Nframe*3-1;
%lline=strcat('A',num2str(nl));
%lline2=strcat('A',num2str(Nframe+1));
%xlswrite(File, dados{: ,[Nframe*3-2:Nframe*3]}, 'dados', lline);
%xlswrite(File, dmean(Nframe,:), 'dmean',lline2);

xmin_initial=min(Xgraph_c{1,1})
xmax_initial=max(Xgraph_c{1,1})
ymin_initial=min(Ygraph_c{1,1})
ymax_initial=max(Ygraph_c{1,1})

% to measure the web thickness
web_center=(ymax_initial-ymin_initial)/2+ymin_initial
[r,c]=find( Ygraph_c{1,Nframe}<web_center) %encontra o primeiro e o
ultimo ponto >web center. define o centro da web à dir e esq
rdir=min(r)
resq=max(r)
web_dir(Nframe)=interp1(Ygraph_c{1,Nframe}(rdir-
1:rdir,1),Xgraph_c{1,Nframe}(rdir-1:rdir,1),web_center);
web_esq(Nframe)=interp1(Ygraph_c{1,Nframe}(resq:resq+1,1),Xgraph_c{1,N
frame}(resq:resq+1,1),web_center);
web_esq_thick(Nframe)=web_esq(1)-web_esq(Nframe);
web_dir_thick(Nframe)=web_dir(Nframe)-web_dir(1);

% to measure the flange thickness
flange_center=(xmax_initial-xmin_initial)/2+xmin_initial
[r,c]=find( Xgraph_c{1,Nframe}>flange_center)%encontra o primeiro e o
ultimo ponto >web center. define o centro da web à dir e esq
rd=min(r)
rt=max(r)
Flang_down(Nframe)=interp1(Xgraph_c{1,Nframe}(rd-
1:rd,1),Ygraph_c{1,Nframe}(rd-1:rd,1),flange_center)
Flang_top(Nframe)=interp1(Xgraph_c{1,Nframe}(rt:rt+1,1),Ygraph_c{1,Nfr
ame}(rt:rt+1,1),flange_center)
Flang_down_thick(Nframe)=Flang_down(Nframe)-Flang_down(1);
Flang_top_thick(Nframe)=Flang_top(1)-Flang_top(Nframe);

```

```

%variavel para escrever no excell
thick(Nframe,1)=FramesData(imnumr,3);
thick(Nframe,2)=Flang_down_thick(Nframe);
thick(Nframe,3)=web_dir_thick(Nframe);
thick(Nframe,4)=Flang_top_thick(Nframe);
thick(Nframe,5)=web_esq_thick(Nframe);

n=n+dn ;
imnumr=dig+n;
    if dn==0
        n=n+1
    end
Nframe=Nframe+1 %number of frames analysed
end % end of the frames cicle

Nframe=Nframe-1
% save all the data and variables
save data.mat
% writte the thickness in the excell file
xlswrite(File,{'Time (s)' 'Bottom Flange' 'Right Web' 'Top Flange'
'Left Web'}, 'thick', 'A1');
xlswrite(File, thick(:,,:), 'thick','A2');
%guardar todos os resultados no excel
%for j=1:Nframe*3
%DT{1,j}=dados{1,j}';
%end

for j=1:Nframe*3
lline=strcat('A',num2str(j));
xlswrite(File, dados{1,j}', 'dados', lline);
end

xlswrite(File, DT{1,:}, 'dados')

```

```

% pLOT THE INTUMESCENT thickness
figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68],'Color',[1 1 1]);
axes1 = axes('Parent',figure1);
nome=strcat('Intumescence Thickness','.tif');
plot(thick(1:Nframe,1),thick(1:Nframe,2),'-ok','LineWidth',2)
hold on
plot(thick(1:Nframe,1),thick(1:Nframe,3),'--sb','LineStyle','--',
'LineWidth',2)
hold on
plot(thick(1:Nframe,1),thick(1:Nframe,4),':*g','LineStyle',':', 'LineWi
dth',2)
hold on
plot(thick(1:Nframe,1),thick(1:Nframe,5),'-.dr','LineStyle','-',
', 'LineWidth',2)
xlabel({'Time [s]'});
ylabel('Intumescence Thickness [mm]');
legend('Bottom Flange','Right Web','Top Flange','Left Web',2)
I = getframe(gcf);
imwrite(I.cdata, nome);

```

```

figure2 = figure('PaperSize',[20.98 29.68],'Color',[1 1 1]);
axes1 = axes('Parent',figure2);
nome=strcat('Intumescence Profiles','.tif');
for i=1:Nframe
%plot(Xgraph_c{1,i}(:,1),Ygraph_c{1,i}(:,1),'Color',[(i/(1+i))^1
(i/(1+i))^2 (1/(1+i))^2],'LineWidth',2)
%set(findobj('Type','line'),'Color','k')
%set(gca,'Color',[1,0.4,0.6])
plot(Xgraph_c{1,i}(:,1),Ygraph_c{1,i}(:,1),'--','LineStyle','--',
'LineWidth',2)
hold on
end
xlabel({'Distance [mm]'});
ylabel('Distance [mm]');
title({'Intumescence Surface'});

%legend('Bottom Flange','Right Web','Top Flange','Left Web',2)
I = getframe(gcf);
imwrite(I.cdata, nome);

```

```

return

```

```

for j=1:Nframe
    plot3(Xgraph_c{1,j},Ygraph_c{1,j},tgraph{1,j}, 'LineWidth',2)
    hold on
end

```