



Estudo de Tintas Intumescentes na Protecção de Elementos Estruturais em Condições de Incêndio

Tiago Manuel Carvalho Gomes Pinto

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em:

Engenharia Industrial

ramo Engenharia Mecânica

Novembro 2008

Estudo de tintas intumescentes na protecção de elementos estruturais em condições de incêndio

Tiago Manuel Carvalho Gomes Pinto

Dedico este trabalho à minha mãe e à Marisa.

Agradecimentos

Este trabalho só seria possível graças à conjugação de esforços e boa vontade de diversas pessoas. Assim, gostaria de manifestar os meus agradecimentos a todos os que, de alguma forma, contribuíram para a sua realização. Agradeço o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, projecto PTDC/EME-PME/64913/2006, “Avaliação do Comportamento de um Material Intumescente na Protecção Passiva de Elementos Estruturais Submetidos a Incêndio”.

Deixo uma palavra de especial reconhecimento ao meu orientador Professor Paulo Piloto, pelos conselhos, encorajamento e dedicação com que orientou este trabalho.

Ao Professor Luís Mesquita por todos os ensinamentos e pelo apoio prestado sempre que solicitado.

Aos colegas Eng.^a Maria José Alves, Eng.^o Simão Geraudes e Eng.^a Luísa Barreira pela disponibilidade, e auxílio sempre que encontrei dificuldades.

À minha família, pelo tempo que não lhe pude dispensar e pelo apoio, motivação e carinho demonstrados ao longo de todo o trabalho.

“Estudo de tintas intumescentes na protecção de elementos estruturais em condições de incêndio”

por

Tiago Manuel Carvalho Gomes Pinto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do 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 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, não descrevendo o comportamento real deste material, em situação de incêndio. Pretende-se com este trabalho efectuar a caracterização do comportamento deste tipo de materiais, determinando as suas principais características, utilizando metodologias experimentais e numéricas. Pretende-se ainda efectuar um estudo paramétrico dos factores que influenciam esse comportamento, nomeadamente, a espessura de protecção, a dimensão do substrato, o fluxo de calor /temperatura e a taxa de aquecimento.

Foi construída uma instalação experimental para realização de ensaios à escala reduzida, com o objectivo de determinar o comportamento de diferentes elementos sujeitos à acção do fogo. A característica inovadora deste trabalho está reflectida na apresentação de uma nova solução de cálculo simplificado para determinação da evolução da temperatura em perfis metálicos protegidos com tinta intumescente em situação de incêndio.

Palavras-chave: Resistência ao fogo, tinta intumescente.

“Study of intumescent paint for structural elements protection under fire condition”

by

Tiago Manuel Carvalho Gomes Pinto

Thesis submitted for the fulfilment of Ms.C 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. Numerical and experimental tests are expected to assess the intumescent volume expansion and thermal conductivity.

An experimental set-up will be installed for test reduced-scale specimens to assess the material performance.

The innovative characteristic of this work is reflected in the presentation of a new simplified solution method to obtain temperature development for protected steel members with intumescent paint, under fire conditions.

Key words: Fire resistance, intumescent paint

Nomenclatura

Os símbolos são definidos ao longo do texto à medida que se apresentam. No entanto para facilitar a consulta remissiva, apresentam-se em seguida a definição de alguns dos principais símbolos que são utilizados neste trabalho.

Letras do alfabeto latino

| | |
|-------------------|---|
| A | Área |
| A_d | Valores de cálculo de acções indirectas de exposição ao fogo |
| A_p | Área da superfície interior da protecção |
| A_m/V | Factor da secção transversal do perfil não protegido |
| $[A_m/V]_b$ | Factor da secção transversal do perfil protegido |
| C_a | Calor específico do aço |
| C_p | Calor específico da protecção |
| d_p | Espessura de protecção |
| d_a | Massividade térmica; factor da secção de aço |
| E_θ | Módulo 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 |
| $f_{y,\theta}$ | Tensão de cedência |
| G | Módulo de rigidez |
| G_k | Valor característico das acções permanentes |
| h_c | Coefficiente de transferência de calor por convecção |
| h_r | Coefficiente de transferência de calor por radiação |
| \dot{h}_{net} | Densidade de fluxo de calor incidente na superfície fronteira do elemento |
| $\dot{h}_{net,r}$ | Densidade de fluxo de calor incidente na superfície por radiação |
| $\dot{h}_{net,c}$ | Densidade de fluxo de calor incidente na superfície por convecção |
| k | Coefficiente de transferência de calor por condução |
| K_{sh} | Facto de correcção para ter em conta o factor de sombra |

| | |
|----------------|---|
| k_{θ} | Factor de redução da propriedade em função da temperatura θ |
| $-\dot{m}$ | A taxa de perda de massa requerida |
| Q | Fluxo de calor |
| $Q_{k,1}$ | Valor característico da acção variável principal ou dominante |
| $Q_{k,i}$ | Valores característicos das restantes acções variáveis |
| Q_c | Quantidade de calor |
| \dot{q}_b | Metano fornecido |
| $\dot{q}(t)$ | A taxa de libertação do calor |
| $\dot{q}''(t)$ | A taxa de libertação do calor por unidade de área |
| q'' | A libertação de calor total durante a combustão |
| $q_{f,k}$ | Densidade de carga de incêndio |
| q | Fluxo de calor através da área |
| q_c | Fluxo de calor por convecção |
| q_r | Fluxo de calor por radiação |
| 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 |
| T | Temperatura |
| T_g | Temperatura prescrita na superfície da protecção exposta, |
| $t_{fi,d}$ | Valor de cálculo da resistência ao fogo |
| $t_{fi,requ}$ | Valor nominal requerido de resistência ao fogo |
| T_0 | Temperatura ambiente no instante inicial |
| T_f | Temperatura do fluido |
| T_w | Temperatura da superfície |
| t | Tempo |
| T_m | Temperatura máxima |
| T_a | Temperatura ambiente |

| | |
|-------------------|---|
| T_e | Temperatura absoluta do gás no medidor de orifício |
| $X_{d,\tilde{f}}$ | Valor de projecto da propriedade em condição de incêndio |
| $X_{k,\theta}$ | Valor característico das propriedades em situação de incêndio |
| X_k | Valor característico da propriedade mecânica à temperatura ambiente |
| X_{o_2} | Leitura do analisador de oxigénio, fracção molar |
| $X_{o_2}^0$ | Valor inicial da leitura do analisador de oxigénio |
| V | Volume do perfil por unidade de comprimento |

Letras do alfabeto grego

| | |
|------------------------|---|
| Δl | Aumento de comprimento |
| $\Delta h_c / r_0$ | Quociente entre o calor de combustão líquido e o valor de oxigénio estequiométrico por massa de combustível |
| $\Delta h_{c,eff}$ | Calor de combustão efectivo |
| ΔP | Diferencial de pressão do medidor de orifício |
| $\Delta \theta_{a,t}$ | Aumento da temperatura |
| α_{th} | Coefficiente de dilatação do material |
| α_c | Coefficiente de convecção |
| $\Delta \theta_{a,t}$ | Evolução da temperatura do aço |
| ε | Emissividade |
| ε_m | Emissividade do elemento |
| ε_{th} | Deformação térmica |
| ε_f | Emissividade do compartimento de incêndio |
| ϕ | Factor de forma |
| Φ | Relaciona a capacidade para armazenar sempre sobre perda de calor entre o material de protecção e o aço |
| $\gamma_{M,\tilde{f}}$ | Factor parcial de segurança para a propriedade em causa em situação de incêndio |
| γ_G | Coefficiente parcial de segurança para acções permanentes à temperatura ambiente |

| | |
|-----------------|--|
| γ_Q | Coefficiente parcial de segurança para a acção variável principal. |
| η_{fi} | Factor de redução para o valor de cálculo do nível de carregamento em situação de incêndio |
| λ_a | Condutividade térmica do aço |
| μ | Coefficiente de <i>Poisson</i> |
| θ_a | Temperatura do aço |
| $\theta_{cr,d}$ | Temperatura crítica |
| θ_d | Valor de cálculo da temperatura |
| θ | Temperatura |
| θ_g | Temperatura dos gases na vizinhança do elemento, temperatura de incêndio |
| θ_r | Valor da temperatura de radiação na vizinhança do elemento |
| θ_m | Temperatura na superfície do elemento |
| ρ | Massa específica |
| ρ_a | Massa específica do aço |
| ρ_p | Massa específica da protecção |
| $\psi_{1,1}$ | Combinação associada à variável principal ou dominante |
| $\psi_{2,i}$ | Coefficiente de combinação associado às restantes acções variáveis |

Índice

| | |
|---|------|
| 1.1. Introdução..... | 1.3 |
| 1.2. Estado da arte..... | 1.3 |
| 1.3. Objectivos da investigação | 1.5 |
| 1.4. Sumário dos capítulos | 1.6 |
| 1.5. Referências..... | 1.7 |
| 2.1. Elemento a proteger | 2.3 |
| 2.1.1. Propriedades térmicas do aço | 2.4 |
| 2.1.1.1. Calor específico..... | 2.5 |
| 2.1.1.2. Condutividade térmica..... | 2.6 |
| 2.1.2. Propriedades mecânicas..... | 2.7 |
| 2.1.2.1. Coeficiente de dilatação térmica..... | 2.10 |
| 2.1.2.2. Módulo de elasticidade..... | 2.12 |
| 2.1.2.3. Tensão de cedência..... | 2.13 |
| 2.1.2.4. Tensão limite de proporcionalidade..... | 2.14 |
| 2.2. Elemento de protecção..... | 2.15 |
| 2.2.1. Processo de intumescência..... | 2.15 |
| 2.2.2. Propriedades térmicas..... | 2.16 |
| 2.3. Conclusões..... | 2.17 |
| 2.4. Referências..... | 2.18 |
| 3.1. Introdução..... | 3.3 |
| 3.2. Projecto de elementos estruturais em condições de incêndio..... | 3.3 |
| 3.3. Acções em elementos estruturais em situação de incêndio..... | 3.6 |
| 3.3.1. Acções térmicas..... | 3.6 |
| 3.3.1.1. Mecanismo de transferência de calor..... | 3.6 |
| 3.3.1.2. Transferência de calor por convecção..... | 3.7 |
| 3.3.1.3. Transferência de calor por condução..... | 3.7 |
| 3.3.1.4. Transferência de calor por radiação..... | 3.8 |
| 3.3.1.5. Curvas de incêndio nominais..... | 3.8 |
| 3.3.1.5.1. Curva de incêndio padrão, ISO 834..... | 3.9 |
| 3.3.1.5.2. Curva de incêndio para elementos estruturais exteriores..... | 3.10 |
| 3.3.1.5.3. Curva de incêndio para hidrocarbonetos..... | 3.10 |
| 3.3.1.6. Curva de incêndio paramétricas..... | 3.11 |
| 3.3.1.7. Aproximação de curvas de incêndio BFD..... | 3.13 |
| 3.3.2. Acções mecânicas..... | 3.14 |
| 3.4. Protecção passiva de elementos estruturais..... | 3.16 |
| 3.4.1. Betão..... | 3.18 |
| 3.4.2. Gesso..... | 3.18 |
| 3.4.3. Tintas intumescentes..... | 3.18 |
| 3.4.4. Vermiculite e Perlite..... | 3.19 |
| 3.4.5. Fibras minerais..... | 3.20 |
| 3.4.5.1. Mantas Cerâmicas..... | 3.20 |
| 3.4.5.2. Placas de Lã de Rocha..... | 3.21 |
| 3.4.6. Argamassa por projecção..... | 3.21 |
| 3.5. Conclusões..... | 3.22 |
| 3.6. Referências..... | 3.22 |
| 4.1. Introdução..... | 4.3 |

| | |
|---|------|
| 4.2. Modelo Térmico..... | 4.4 |
| 4.3. Ensaio normalizados..... | 4.5 |
| 4.3.1. Método de ensaio..... | 4.6 |
| 4.3.2. Equipamento..... | 4.6 |
| 4.3.2.1. Radiómetro eléctrico do calorímetro de cone..... | 4.7 |
| 4.3.2.2. Protector da radiação..... | 4.8 |
| 4.3.2.3. Controle da irradiação..... | 4.8 |
| 4.3.2.4. Dispositivo de pesagem..... | 4.8 |
| 4.3.2.5. Suporte do provete..... | 4.8 |
| 4.3.2.6. Estrutura auxiliar de retenção..... | 4.9 |
| 4.3.3. Materiais dimensionalmente instáveis..... | 4.9 |
| 4.3.4. Construção dos provetes e preparação..... | 4.10 |
| 4.3.4.1. Provetes de ensaio..... | 4.10 |
| 4.3.4.2. Acondicionamento dos provetes..... | 4.10 |
| 4.3.5. Preparação..... | 4.11 |
| 4.3.5.1. Envolvimento do provete..... | 4.11 |
| 4.3.5.2. Montagem do provete..... | 4.11 |
| 4.3.5.3. Calibração..... | 4.12 |
| 4.3.6. Procedimento..... | 4.12 |
| 4.3.7. Cálculos..... | 4.12 |
| 4.3.7.1. Cálculos para o provete em ensaio..... | 4.13 |
| 4.3.8. Relatório..... | 4.14 |
| 4.4. Método experimental..... | 4.15 |
| 4.4.1. Preparação dos ensaios..... | 4.15 |
| 4.4.2. Procedimento de ensaio..... | 4.17 |
| 4.4.3. Resultados do calorímetro de cone..... | 4.18 |
| 4.4.4. Evolução do processo térmico..... | 4.33 |
| 4.4.5. Evolução do processo de intumescência..... | 4.35 |
| 4.5. Conclusões..... | 4.40 |
| 4.6. Referências..... | 4.41 |
| ANEXOS..... | 4.42 |
| 5.1. Introdução..... | 5.3 |
| 5.2. Método simplificado..... | 5.5 |
| 5.2.1. Elementos estruturais não protegidos..... | 5.5 |
| 5.2.2. Elementos estruturais protegidos..... | 5.8 |
| 5.3. Método avançado de cálculo..... | 5.9 |
| 5.3.1. Problema unidimensional de transferência de calor..... | 5.9 |
| 5.3.1.1. Modelo unidimensional 1.1..... | 5.10 |
| 5.3.1.2. Modelo unidimensional 1.2..... | 5.11 |
| 5.3.2. Discretização pelo método das diferenças finitas..... | 5.11 |
| 5.3.2.1. Aproximação pela série de Taylor..... | 5.11 |
| 5.3.2.2. Discretização do modelo unidimensional..... | 5.14 |
| 5.3.3. Problema inverso de condução de calor..... | 5.18 |
| 5.3.3.1. Definição de problema inverso..... | 5.18 |
| 5.3.3.2. Determinação..... | 5.19 |
| 5.3.4. Algoritmo computacional..... | 5.20 |
| 5.4. Resultados numéricos..... | 5.21 |
| 5.4.1. Método simplificado..... | 5.21 |

| | |
|---|------|
| 5.4.2. Modelo 1.1..... | 5.22 |
| 5.4.2.1. Crank-Nicolson..... | 5.23 |
| 5.4.2.2. Método implícito..... | 5.23 |
| 5.4.2.3. Comparação e determinação do erro..... | 5.24 |
| 5.4.3. Modelo 1.2..... | 5.25 |
| 5.4.3.1. Crank-Nicolson..... | 5.25 |
| 5.4.3.2. Método implícito..... | 5.26 |
| 5.4.3.3. Comparação e determinação do erro..... | 5.27 |
| 5.5. Resultados experimentais..... | 5.28 |
| 5.5.1. Resultado experimental com silicato de cálcio..... | 5.28 |
| 5.5.1.1. Preparação do ensaio..... | 5.29 |
| 5.5.1.2. Resultados experimentais..... | 5.31 |
| 5.5.1.3. Comparação e determinação do erro..... | 5.32 |
| 5.5.2. Resultado experimental com tinta intumescente..... | 5.32 |
| 5.5.2.1. IPE100 com tinta intumescente..... | 5.33 |
| 5.5.2.1.1. Preparação do ensaio..... | 5.33 |
| 5.5.2.1.2. Resultado experimental..... | 5.35 |
| 5.5.2.1.3. Comparação..... | 5.35 |
| 5.5.2.2. IPE220 com tinta intumescente..... | 5.37 |
| 5.5.2.2.1. Preparação do ensaio..... | 5.37 |
| 5.5.2.2.2. Resultado experimental..... | 5.40 |
| 5.5.2.2.3. Ensaio experimental termográfico..... | 5.41 |
| 5.5.2.2.4. Comparação..... | 5.42 |
| 5.6. Conclusões..... | 5.44 |
| 5.7. Referências..... | 5.44 |
| ANEXOS..... | 5.46 |

Índice de figuras

Figura 1.1 - Instalação laboratorial para ensaios de resistência de elementos estruturais (vigas e pilares) em condições de incêndio, protegidos com tinta intumescente.

Figura 1.2 - Determinação da temperatura no elemento estrutural com protecção.

Figura 2.1 - Exemplo de amostras ampliadas 500 x; a) metalografia à temperatura ambiente; b) metalografia à temperatura ambiente depois de submetida a ensaio de 600 [°C], com arrefecimento natural.

Figura 2.2 - Calor específico do aço em função da temperatura.

Figura 2.3 - Variação da condutividade do aço com a temperatura.

Figura 2.4 – Conversão das curvas tensão – deformação dos ensaios transientes.

Figura 2.5 - Fases da relação tensão deformação, com e sem endurecimento.

Figura 2.6 - Variação do coeficiente de dilatação térmica com a temperatura.

Figura 2.7 - Factor de redução do módulo de elasticidade para aços.

Fig.2.8 - Factor de redução da tensão de cedência para aços.

Figura 2.9 - Factor de redução da tensão limite de proporcionalidade, para aços.

Figura 2.10 - Reacção da tinta intumescente.

Figura 2.11 – Reacções químicas de intumescência

Figura 3.1 - Domínios de verificação da resistência ao fogo.

Figura 3.2. – Curvas nominais para a acção do fogo.

Figura 3.3. – Forno de ensaios de resistência ao fogo, em laboratório.

Figura 3.4. – Estrutura resistente colocada no exterior do edifício, em Barcelona.

Figura 3.5 – Ensaio em laboratório de fogo externo.

Figura 3.6 – Incêndio com hidrocarbonetos, após a colisão dos aviões nas torres WTC, Nova Iorque, 2001.

Figura 3.7 - Fases de um incêndio natural.

Figura 3.8 – Curva incêndio BFD.

Figura 3.9 – Representação simbólica das diferentes geometrias de protecção ao fogo dos elementos estruturais (em caixão e no contorno).

Figura 3.10 - Protecção parcial das secções.

Figura 3.11 - Protecção total de um elemento estrutural.

Figura 3.12 - Protecção por resguardos.

Figura 3.13 – Circulação de água para arrefecimento da estrutura

Figura 3.14 - Perfil metálico protegido com placas rígidas dispostas em caixão.

Figura 3.15 - Perfil metálico protegido com fibra mineral projectada.

Figura 3.16 – Aplicação do intumescente e controlo de espessura.

Figura 3.17 - Reacção da tinta intumescente.

Figura 3.18 – Placa de vermiculite e aplicação em spray como protecção de uma estrutura.

Figura 3.19 – Mantas compostas de fibra cerâmica.

Figura 3.20 – Vista geral e detalhes da fixação da manta em fibra cerâmica num perfil soldado, por meio de pinos.

Figura 3.21 – Mantas compostas de lã de rocha.

Figura 3.22 – Exemplo de fixação de placa de lã de rocha por meio de pino.

Figura 4.0. - Modelo térmico unidimensional.

Figura 4.1. a) - Representação esquemática do calorímetro de cone.

Figura 4.1. b) - Representação esquemática do calorímetro de cone.

Figura 4.2. - Secção recta do sistema de aquecimento.

Figura 4.3 - Escudo protector da radiação.

Figura 4.4 - Suporte horizontal do provete.

Figura 4.4 Provete de ensaio.

Figura 4.5 – Sistema de acondicionamento de provetes

Figura 4.6 – Envolvimento do provete com folha de alumínio.

Figura 4.7 – Preparação das placas de aço.

Figura 4.8 - Pontos de medição controlo de espessura.

Figura 4.9 – Preparação do ensaio no calorímetro de cone.

Figura 4.10 – Sistema de registo de imagem utilizado nos ensaios.

Figura 4.11 - Valor da perda de massa, no conjunto de ensaio A35405 e B35405.

Figura 4.12 - Valores da (SEA) Área específica da extinção de fumo no ensaio A35405 e B35405.

Figura 4.13 - Valores de (\dot{q}) taxa de libertação de calor, no conjunto de ensaio A35405 e B35405.

Figura 4.14 -Valores de ($\Delta h_{c,eff}$) calor de combustão efectivo, no conjunto de ensaio A35405 e B35405.

Figura 4.15 -Valores de monóxido de carbono, no conjunto de ensaio A35405 e B35405.

Figura 4.16 -Valores de dióxido de carbono, no conjunto de ensaio A35405 e B35405.

Figura 4.17 e 4.18 - Ensaio A3540532 e B354053.

Figura 4.19 - Valor da perda de massa, no conjunto de ensaios A35415 e B35415.

Figura 4.20 - Valores da (SEA) Área específica da extinção de fumo, no ensaio A35415 e B35415.

Figura 4.21 - Valores de (\dot{q}) taxa de libertação de calor, no conjunto de ensaio A35415 e B35415.

Figura 4.22 - Valores de ($\Delta h_{c,eff}$) calor de combustão efectivo, no conjunto de ensaio A35415 e B35415.

Figura 4.23 - Valores de monóxido de carbono, no conjunto de ensaio A35415 e B35415.

Figura 4.24 - Valores de dióxido de carbono, no conjunto de ensaio A35415 e B35415.

Figura 4.25 - Valor da perda de massa, no conjunto de ensaios A35425 e B35425.

Figura 4.26 - Valores da (SEA) Área específica da extinção de fumo, no ensaio A35425 e B35425.

Figura 4.27 - Valores de (\dot{q}) taxa de liberação de calor, no conjunto de ensaio A35425 e B35415.

Figura 4.28 - Valores de ($\Delta h_{c,eff}$) calor de combustão efectivo, no conjunto de ensaio A35425 e B35425.

Figura 4.29 - Valores de monóxido de carbono, no conjunto de ensaio A35425 e B35425.

Figura 4.30 - Valores de dióxido de carbono, no conjunto de ensaio A35425 e B35425.

Figura 4.31 - Valor da perda de massa, no conjunto de ensaios A75405 e B75405.

Figura 4.32 - Valores da (SEA) Área específica da extinção de fumo, no conjunto de ensaios A75405 e B75405.

Figura 4.33 - Valores de (\dot{q}) taxa de liberação de calor, no conjunto de ensaios A75405 e B75405.

Figura 4.34 - Valores de ($\Delta h_{c,eff}$) calor de combustão efectivo, no conjunto de ensaios A75405 e B75405.

Figura 4.35 - Valores de monóxido de carbono, no conjunto de ensaios A75405 e B75405.

Figura 4.36 - Valores de dióxido de carbono, no conjunto de ensaios A75405 e B75405.

Figura 4.37 - Valor da perda de massa, no conjunto de ensaios A75415 e B75415.

Figura 4.38 - Valores da (SEA) Área específica da extinção de fumo, no conjunto de ensaios A75415 e B75415.

Figura 4.39 - Valores de (\dot{q}) taxa de liberação de calor, no conjunto de ensaios A75415 e B75415.

Figura 4.40 - Valores de ($\Delta h_{c,eff}$) calor de combustão efectivo, no conjunto de ensaios A75415 e B75415.

Figura 4.41 - Valores de monóxido de carbono, no conjunto de ensaios A75415 e B75415.

Figura 4.42 - Valores de dióxido de carbono, no conjunto de ensaios A75415 e B75415.

Figura 4.43 - Valor da perda de massa, no conjunto de ensaios A75425 e B75425.

Figura 4.44 - Valores da (SEA) Área específica da extinção de fumo, no ensaio A75425 e B75425.

Figura 4.45 - Valores de (\dot{q}) taxa de liberação de calor, no conjunto de ensaio A75425 e B75425.

Figura 4.46 - Valores de ($\Delta h_{c,eff}$) calor de combustão efectivo, no conjunto de ensaio A75425 e B75425.

Figura 4.47 - Valores de monóxido de carbono, no conjunto de ensaio A75425 e B75425.

Figura 4.48 - Valores de dióxido de carbono, no conjunto de ensaio A75425 e B75425.

Figura 4.49 - Leitura das temperatura com termopar tipo K.

Figura 4.50 - Valor de temperatura no aço, nas placas de CaSi e no ambiente, nos ensaios A3540513 e B354052.

Figura 4.51 - Valor de temperatura no aço, nas placas de CaSi e no ambiente, no ensaio A354152 e B354152.

Figura 4.52 - Valor de temperatura no aço, nas placas de CaSi e no ambiente, no ensaio A3542512 e B354252.

Figura 4.53 - Valor de temperatura no aço, nas placas de CaSi e no ambiente, no ensaio A356051 e B356051.

Figura 4.54 - Valor de temperatura no aço, nas placas de CaSi e no ambiente, no ensaio A754053 e B754052.

Figura 4.55 - Valor de temperatura no aço, nas placas de CaSi e no ambiente, no ensaio A754153 e B754152.

Figura 4.56 - Valor de temperatura no aço, nas placas de CaSi e no ambiente, no ensaio A754252 e B754252.

Figura 4.57 - Valor de temperatura no aço, nas placas de CaSi e no ambiente, no ensaio A756051 e B756051.

Figura 4.58 – Calibração de pixéis para mm.

Figura 4.59 – Especificação do número de pontos a seleccionar

Figura 4.60 – Desenvolvimento da intumescência em diferentes fotogramas.

Figura 4.61 - Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354152.

Figura 4.62 - Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio A354152.

Figura 4.63 - Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354252.

Figura 4.64 - Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio A354252.

Figura 4.65 - Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A754153.

Figura 4.66 - Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio A754153.

Figura 4.67 - Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A754252.

Figura 4.68 - Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio A754252.

Figura 4.69 - Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B354153.

Figura 4.70 - Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio B354153.

Figura 4.71 - Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B354253.

Figura 4.72 - Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio B354253.

Figura 4.73 - Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B754152.

Figura 4.74 - Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio B754152.

Figura 4.75 - Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B754252.

Figura 4.76 - Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio B754252.

Figura 5.1 – Forno de Ensaio de Resistência ao Fogo, IPB.

Figura 5.2 – Modelo unidimensional 1.1.

Figura 5.3- Modelo unidimensional 1.2.

Figura 5.4. – Malha no domínio.

Figura 5.5. – Malha de diferenças finitas centrais

Figura 5.6. – Diferenças finitas para o método combinado.

Figura 5.7 – Malha no tempo.

Figura 5.8 – Representação esquemática de problemas directo e inverso.

Figura 5.9 – Programa Steel Fire Pro, [5.16].

Figura 5.10 – Evolução de temperatura para diferentes elementos estruturais em $x=0$.

Figura 5.13 – Evolução de temperatura para diferentes elementos estruturais em $x=0$, aplicando o método de Crank-Nicolson.

Figura 5.14 – Evolução de temperatura para diferentes elementos estruturais em $x=0$, aplicando o método implícito.

Figura 5.15 a – Comparação entre método Crank-Nicolson e o método simplificado, para o perfil IPE100.

Figura 5.15 b – Comparação entre método Implícito e o método simplificado, para o perfil IPE100.

Figura 5.16 – Evolução de temperatura para diferentes elementos estruturais em $x=0$ e $x=L$, aplicando o método de Crank-Nicolson.

Figura 5.17 – Evolução de temperatura do IPE100 com protecção em $x=0$ e $x=L$.

Figura 5.18 – Evolução de temperatura para diferentes elementos estruturais em $x=0$ e $x=L$, aplicando o método Implícito.

Figura 5.19 – Evolução de temperatura do IPE100 com protecção em $x=0$ e $x=L$.

Figura 5.20 a – Comparação entre método Crank-Nicolson e o método simplificado, para o perfil IPE100.

Figura 5.20 b – Comparação entre método Implícito e o método simplificado, para o perfil IPE100.

Figura 5.21 – Elemento estrutural com protecção em silicato de cálcio.

Figura 5.22 – Posição dos termopares para leitura das temperaturas no IPE100

Figura 5.23 – Processo de soldadura de termopares no elemento estrutural.

Figura 5.24 – Isolamento do elemento estrutural em silicato de cálcio.

Figura 5.25 – Visualização dos elementos estruturais com e sem protecção no interior do forno.

Figura 5.26 – Elementos estruturais com e sem protecção sujeitos à acção do fogo.

Figura 5.27- Resultado experimental de um perfil IPE100 sem protecção.

Figura 5.28- Resultado experimental de um perfil IPE100 com protecção, P1.

Figura 5.29 – Resultado experimental de um perfil IPE100 com protecção, P2.

Figura 5.30 – Comparação de um perfil IPE100 com protecção, P1 entre o ensaio experimental e o analítico.

Figura 5.31 - Posição dos termopares para leitura das temperaturas no IPE100.

Figura 5.32 - Posição dos termopares para leitura das temperaturas no IPE100

Figura 5.33 - Elemento estrutural protegido com tinta intumescente do tipo A e controlo de espessura de protecção.

Figura 5.34 - Acondicionamento do elemento estrutural.

Figura 5.35 – Elementos estruturais com e sem protecção no forno de ensaios.

Figura 5.36 – Elementos estruturais com e sem protecção no forno de ensaios.

Figura 5.37 - Evolução da condutividade térmica ao longo da temperatura média.

Figura 5.38 – Evolução da espessura de protecção ao longo do tempo.

Figura 5.39 – Elemento estrutural com e sem protecção no forno de ensaios.

Figura 5.40 – Elemento estrutural com protecção obtido pelo método simplificado segundo o EC3.

Figura 5.41 – Comparação entre o ensaio experimental e os resultados obtidos pelo método simplificado, para o perfil IPE100.

Figura 5.42 – Curva ISO834 e temperatura à superfície do intumescente.

Figura 5.43 – Posição dos termopares para leitura das temperaturas no IPE220

Figura 5.44 – Calha em inox para proteger os fios termopar.

Figura 5.45 – Control de espessura na cama de protecção.

Figura 5.46 – Acondicionamento do elemento com protecção.

Figura 5.47 – Protecção dos fios termopar com alumínio.

Figura 5.48 – Antes, durante e depois do ensaio.

Figura 5.49 – Resultado experimental de um perfil IPE220.

Figura 5.50 –Leitura do termopar de placa do forno no resultado experimental de um perfil IPE220.

Figura 5.51 – Imagem de uma câmara termográfica no interior do forno.

Figura 5.52 – 2º ensaio de um IPE220 com e sem protecção no forno de ensaios.

Figura 5.53 – IPE220 com e sem protecção no forno de ensaios.

Figura 5.54 – 2º ensaio de um IPE220 com e sem protecção no forno de ensaios.

Figura 5.55 – Comparação entre o ensaio experimental e os resultados obtido analiticamente, para o perfil IPE220.

Figura 5.56 - Comparação entre o ensaio experimental e os resultados obtido analiticamente, para o perfil IPE220

Figura 5.57 - Elemento estrutural com protecção obtido pelo metodo simplificado segundo o EC3

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Valores do coeficiente de redução do módulo de elasticidade

Tabela 2.2 - Valores do coeficiente de redução da tensão de cedência.

Tabela 3.1- Coeficientes de combinação ψ_1 e ψ_2 .

Tabela 4.1 - Apresentação das diferentes massas e da espessura de tinta A, para cada ensaio.

Tabela 4.2 - Apresentação das diferentes massas e da espessura de tinta B, para cada ensaio.

Tabela 4.3 – Comparação de massa residual para os dois tipos de tinta com 0.5 [mm] de protecção e sujeitas a um fluxo de 35 [kW/m²].

Tabela 4.4 – Comparação de massa residual para a 2ª série de ensaios e para dois instantes.

Tabela 4.5 – Comparação de massa residual para a 3ª série de ensaios e para dois instantes.

Tabela 4.6 – Comparação de massa residual para a 1ª série de ensaios e para dois instantes.

Tabela 4.7 – Comparação de massa residual para a 2ª série de ensaios e para dois instantes.

Tabela 4.8 – Comparação de massa residual para a 3ª série de ensaios e para dois instantes.

Tabela 5.1- Perfis para ensaios experimentais.

Tabela 5.2 – Factor da secção A_m/V para alguns perfis não protegidos em aço.

Tabela 5.3 – Definição do factor de secção.

Tabela 5.4 - Factores de secção A_m/V para elementos estruturais com protecção de material contra incêndio.

Tabela 5.5- Função $T(x)$ tabelada.

Tabela 5.6- Valores de factor de secção para diferentes elementos estruturais.

Tabela 5.7- Valores do erro relativo em $x=0$ para os diversos elementos estruturais.

Tabela 5.8- Valores do erro relativo em $x=0$ para os diversos elementos estruturais.

Tabela 5.9 – controlo de espessura de tinta de protecção.

Capítulo 1

Introdução

| | |
|--------------------------------------|-----|
| 1.1. Introdução | 1.3 |
| 1.2. Estado da arte | 1.3 |
| 1.3. Objectivos da investigação..... | 1.5 |
| 1.4. Sumário dos capítulos | 1.6 |
| 1.5. Referências..... | 1.7 |

1.1. Introdução

O incêndio sempre constituiu um risco considerável à propriedade e à segurança humana. Quando ocorre de forma descontrolada pode ocasionar consequências devastadoras.

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 no carregamento 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 importante porque, antes da aplicação 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 justifica o valor definido como a temperatura máxima, ou crítica, que um elemento de uma estrutura suporta antes de atingir o colapso, [1.2]. Este conceito conduzia à utilização, nem sempre racional, de medidas passivas de protecção ao fogo para limitar o aquecimento dos elementos estruturais, como placas de gesso, sprays ou tintas intumescentes, representando aproximadamente 23% do custo total da construção, [1.3]. No entanto 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, segundo o método apresentado na secção 2.3.1. No domínio da temperatura, o cálculo da temperatura crítica do elemento é efectuada com base na relação com o grau de utilização.

Este trabalho apresenta um estudo de um tipo de material utilizado na protecção passiva de elementos metálicos, em condições de incêndio e apresenta uma proposta original inovadora para a determinação de temperatura no elemento protegido.

1.2. Estado da arte

O custo de protecção ao fogo pode representar uma parte importante nos custos globais da construção, sendo mais significativo no caso da construção em aço, exigindo a aplicação de um material isolante.

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

De acordo com a formulação apresentada no Eurocódigo 3 parte 1.2, [1.4] a temperatura do elemento protegido é determinada por uma equação simplificada, baseada num modelo unidimensional de transferência de calor, assumindo as propriedades materiais de isolamento constantes.

A evolução dos processos químicos do intumescente, não sofreu grande alteração com o decorrer dos anos, sendo quase todos os revestimentos baseados em quatro componentes genéricos, uma fonte ácida, fonte carbonados, espuma e uma pasta de resina, [1.5]. A primeira reacção que ocorre é a decomposição da fonte ácida, geralmente fosfórico de amónio, na amónia e no ácido fosfórico. Para altas temperaturas entre 200 e 300 [°C], o ácido reage com o agente carbonífero. Os gases formados expandirão, logo, se inicia o começo do intumescente sob a forma de um elemento carbonizado. Esse volume criado pela expansão do intumescente é associado com a perda de massa do material de protecção.

Diferentes modelos apresentam o comportamento do intumescente como um problema de transferência térmica. Embora estes modelos forneçam uma boa descrição dos mecanismos de protecção térmica, são incapazes de explicar a sequência complexa do fenómeno físico, químico e térmico que caracterizam o comportamento do intumescente, ou o efeito das propriedades dos materiais no desempenho do intumescente, [1.6].

Estudos cinéticos da degradação térmica, ou pirólise, foram estudados por diversos investigadores, utilizando diferentes modelos matemáticos, incluindo fenómenos de transferência e reacções químicas, Staggs, [1.7-1.9]. Este autor estudou a física da transferência de calor e de massa no carvão mineral, no contexto da camada formada. O modelo é baseado na decomposição do polímero para produzir o carvão e gás, temporários, durante uma única etapa.

Di Blasi, [1.10-1.12], apresentou simulações numéricas da pirólise, tomado em consideração a variação das propriedades, os fenómenos de transferência por convecção e por condução de calor através do sólido virgem e a camada fundida. Estes estudos são baseados em equações de conservação, escritas para as fases virgens e fundidas do polímero. Di Balsi, apresentou uma revisão do estado da arte em 1993, sofrendo uma actualização em 2000, [1.13].

Dehghan e Cannon, [1.14-1.16], apresentaram modelos matemáticos, para solucionar problemas de fronteira, utilizando aproximações por diferenças finitas.

Publicações recentes, sobre protecção passiva apresentam resultados analíticos baseados na solução simplificada da equação diferencial parabólica, para a condução de calor, [1.17-1.21], cujo resultados apontam para determinar uma solução aproximada para a temperatura no aço. Ensaios experimentais, [1.22-1.23], apresentam a variação da condutibilidade efectiva com a temperatura usando a mesma equação simplificada.

Outros estudos experimentais, [1.5,1.24], focalizam a aplicação estrutural comum, referenciando aplicação em estaleiro, ao comportamento do intumescente e ao dano causado pelo uso de elementos de protecção e materiais mecânicos do isolamento, como a dureza, resistência ao risco e impacto.

O estado actual do conhecimento, no comportamento térmico e mecânico deste material necessita de mais conhecimento. Esta situação, limita a determinação de soluções termo mecânicas para os elementos estruturais submetidos às condições de incêndio, levando a soluções sobredimensionadas, originando custos mais elevados da protecção ao fogo.

1.3. Objectivos da investigação

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 simplificada para 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, não descrevendo o comportamento real deste material, em situação de incêndio, ver equação (1.1).

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V}{d_p C_a \rho_a} \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (1.1)$$

Nesta expressão, $\Delta\theta_{a,t}$, representa a evolução da temperatura do aço (considerada uniforme em toda a secção do elemento), quando submetida a uma variação de temperatura exterior, baseada em curvas de incêndio normalizadas, $\Delta\theta_{g,t}$, [1.4]. A informação sobre a evolução da protecção passiva deverá actualizar os valores da condutividade e da espessura de protecção, durante a situação de incêndio, isto é, introduzindo a variação de $\lambda_p(t)$ (condutividade) e de $d_p(t)$ (espessura de protecção) com o tempo, ou com a temperatura média do intumescente.

Pretende-se com este trabalho efectuar a caracterização do comportamento deste tipo de materiais, determinando as suas principais características, utilizando metodologias experimentais e numéricas. Foi efectuado um estudo paramétrico dos factores que influenciam esse comportamento, nomeadamente, a espessura de protecção, a dimensão do substrato, a geometria do substrato, o fluxo de calor / temperatura e a taxa de aquecimento. Foi construída uma instalação experimental para realização de ensaios, com o objectivo de validar este comportamento, na protecção passiva de elementos estruturais em aço, conforme instalação laboratorial, representado na figura 1.1



Figura 1.1 – Instalação laboratorial para ensaios de resistência de elementos estruturais (vigas e pilares) em condições de incêndio, protegidos com tinta intumescente.

A característica inovadora deste trabalho está reflectida na apresentação de uma nova formulação de cálculo simplificado para determinação da evolução da temperatura em perfis metálicos em situação de incêndio, semelhante às curvas definidas com protecção. Na figura 1.2 estão apresentados os valores da evolução da temperatura no elemento protegido com silicato de cálcio.

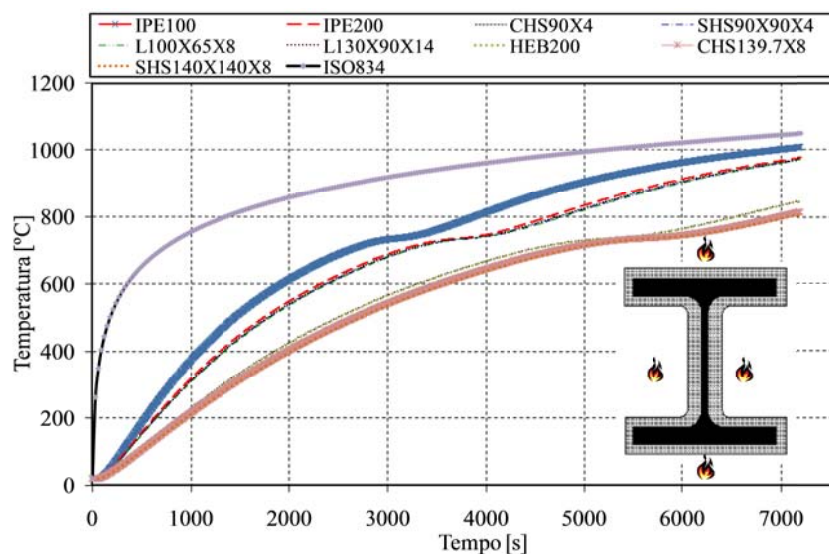


Figura 1.2 – Determinação da temperatura no elemento estrutural com protecção.

1.4. Sumário dos capítulos

No capítulo 2 é apresentada a caracterização das propriedades térmicas e mecânicas do material a temperaturas elevadas. É apresentada a variação destas propriedades com a temperatura, e a caracterização do material de protecção (tinta intumescente). É também descrito todo o processo de intumescência.

No capítulo 3 são apresentados os mecanismos de transferência de calor por convecção, radiação e condução. É também apresentada de forma de cálculo da temperatura de um perfil exposto à acção do fogo, verificando a proporcionalidade em relação ao factor de secção.

No capítulo 4 é apresentado o processo experimental e os ensaios experimentais efectuados. Apresentado um conjunto de resultados experimentais obtidos no calorímetro de cone. O princípio deste teste é baseado na suposição que o calor de combustão está relacionado directamente com a quantidade de oxigénio utilizada para a combustão.

No capítulo 5 são apresentados os resultados dos modelos numéricos para determinação de temperatura no elemento protegido e a comparação com ensaios experimentais.

Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões retiradas do estudo efectuado e apresentados alguns tópicos que carecem mais desenvolvimento.

1.5. Referências

- [1.1]. Kaitila, O., “Cold- Formed Steel Structures in Fire Conditions”, Seminar on Steel Structures, Helsinki University of Tecnology, 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; EN 1993-1-2; Eurocode 3, Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, April 2005.
- [1.5]. Longton, P.J.; Houyoux, C; Zhao, B.; Chico, B.;”Development of alternative techlogies for off-site applied intumescent coatings”, Technical Steel Research, ISBN 92-894-9165-5,2005.
- [1.6]. Horrocks, A.R., Price, D.,”Fire retardant materials – Gamino, G., Lomakin, S., ch.10 Intumescent materials”, CRC Press.
- [1.7]. Staggs, J.E.J., “Modelling thermal degradation of polymers using single-step first-order kinetics”, Fire S Safety Journal, 32, pp. 17-34, 1999.
- [1.8]. Staggs, JEJ,” Simple mathematical models of char-forming polymers”, Polymer International 49, pp.1147-1152, 2000.
- [1.9]. Staggs, J.E.J.; “Heat and mass transport in developing chars”, Polymer Degradation and Stability N° 82, pp. 297–307, 2003.
- [1.10]. Di Blasi, C., “Linear pyrolysis of cellulosic and plastic waste”, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 40-41, pp. 463-479, 1997.
- [1.11]. Di Blasi, C., “Modeling the effects of high radiative heat fluxes on intumescent material decomposition”, J. Anal. Appl. Pyrolysis, 71 pp. 721–737, 2004.
- [1.12]. Di Blasi, C., “Transition between regimes in the degradation of thermoplastic polymers”, Polymer Degradation and Stability, 64, pp.359-367, 1999.
- [1.13]. Di Blasi, C., “The state of the art of transport models for charrinr solid degradation”, Polymer Degradation, 49, pp. 1133-1146, 2000.
- [1.14]. Dehghan, M., “Second-order schemes for a boundary value problem with Neumann’s boundary conditions”, Journal of Computational and applied Mathematics 138, pp. 173-184, 2002.

- [1.15]. Dehghan, M., “On The Numerical Solution Of The One-Dimensional Convection-Diffusion Equation”, Mathematics Problems in Engineering, nº1 pp. 61-74, 2005.
- [1.16]. Cannon, J.R., Hill, C.D., “Remarks on a –stefan Problem”, Journal of Mathematics and Mechanics, Vol. 17, nº 5, 1967.
- [1.17]. Wong, M.b.; Ghajel, J.I.; “Sensitivity analysis of heat transfer formulations for insulated structural components”, Fire Safety Journal, 38 pp 187-201, Elsevier, 2003.
- [1.18]. Tan, K.h.; Wang. Z.; Au, S.K.; “Heat transfer analysis for steelwork insulated by intumescent paint exposed o standard fire conditions”, Third international workshop Structures in fire, Ottawa, Maio 2004.
- [1.19]. 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 27, pp1551–1562, Elsevier, 2005.
- [1.20]. Silva, Vadir Pignatta; “Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process-a simple derivation”, Engineering Structures 27, pp2036–2043; Elsevier, 2005.
- [1.21]. Wang, Zhi-Hua; Tan, Kang Hai; “Sensitivity study of time delay coefficient oh heat transfer formulations for insulated steel members exposed to fire”, Fire Safety Journal, 41, pp31-38, Elsevier, 2005.
- [1.22]. Mesquita, L.M.R.; Piloto, P.A.G.; Vaz, M.A.P; Vila Real, P.M.M.; “Ensaio de resistência ao fogo de vigas em aço protegidas com tinta intumescente”; artigo apresentado nas actas do 6º Congresso Nacional de Mecânica Experimental; ISBN nº 972-8826-09-5, pp 22-24; Ponta Delgada – Universidade dos Açores, 27-29 de Julho de 2005.
- [1.23]. Mesquita, L.M.R.; Piloto, P.A.G.; Vaz, M.A.P.; Vila Real, P.M.M.; Ramos F.; “Comportamento de vigas em aço protegidas com tinta intumescente”; artigo apresentado nas actas do V Congresso de Construção Metálica e Mista; ISBN nº 972-98376-7-8, pp 509-520; Lisboa, Centro de congressos, 24-25 de Novembro de 2005.
- [1.24]. Bailey, Colin; “Indicative fire tests to investigate the behaviour of cellular beams protected with intumescent coatings” Fire Safety Journal, 39 pp698-709, Elsevier, 2004.

Capítulo 2

Propriedades dos Materiais

| | |
|---|------|
| 2.1. Elemento a proteger | 2.3 |
| 2.1.1. Propriedades térmicas do aço..... | 2.4 |
| 2.1.1.1. Calor específico..... | 2.5 |
| 2.1.1.2. Condutividade térmica | 2.6 |
| 2.1.2. Propriedades mecânicas | 2.7 |
| 2.1.2.1. Coeficiente de dilatação térmica | 2.10 |
| 2.1.2.2. Módulo de elasticidade..... | 2.12 |
| 2.1.2.3. Tensão de cedência | 2.13 |
| 2.1.2.4. Tensão limite de proporcionalidade | 2.14 |
| 2.2. Elemento de protecção | 2.15 |
| 2.2.1. Processo de intumescência..... | 2.15 |
| 2.2.2. Propriedades térmicas | 2.16 |
| 2.3. Conclusões | 2.16 |
| 2.4. Referências..... | 2.17 |

2.1. Elemento a proteger

As estruturas metálicas, quando submetidas à acção do fogo, perdem rigidez e estabilidade. A degradação das propriedades mecânicas é um dos factores que mais influencia esta diminuição de capacidade resistente. É necessário avaliar a resistência das estruturas metálicas nestas condições, tendo em consideração que o objectivo principal, da segurança contra incêndios nos edifícios, é a limitação do risco para as pessoas e bens.

A verificação de resistência pode ser efectuada experimentalmente (fornos de resistência ao fogo) impondo uma variação de temperatura na fornalha, de acordo com uma curva normalizada. Em alternativa, existem métodos analíticos e numéricos que permitem efectuar o dimensionamento dos elementos e dos seus conjuntos (estruturas) nestas condições.

Em alternativa ao método de cálculo simplificado preconizado nos Eurocódigos, podem ser utilizados métodos de cálculo avançados, método dos elementos finitos/diferenças finitas, para avaliar o comportamento de estruturas sob a acção do fogo, utilizando leis constitutivas do comportamento material. Nestas leis as propriedades térmicas e mecânicas do aço apresentam uma influência muito significativa no comportamento real deste material.

O método de dimensionamento de elementos/estruturas metálicas, em situação de incêndio, Eurocódigo 3, parte 1.2, [2.3], difere do método utilizado para dimensionar à temperatura ambiente, Eurocódigo 3, parte 1.1, pelo facto de se utilizarem factores de, redução, responsáveis pela influência de temperatura nas propriedades do material.

As propriedades térmicas e mecânicas do aço são apresentadas no Eurocódigo 3 parte 1.2 e no Eurocódigo 3 parte 1.1, sendo consideradas como valores característicos.

Os valores de cálculo das propriedades em situação de incêndio identificadas pelo subíndice “d” devem ser determinados pela expressão 2.1, sempre que a variação da propriedade tenha efeito favorável. Quando o aumento da propriedade produza um efeito desfavorável, o valor da propriedade deverá ser calculado de acordo a expressão 2.2.

$$X_{d,fi} = \frac{X_{k,\theta}}{\gamma_{M,fi}} \quad (2.1)$$

Onde $X_{k,\theta}$ representa o valor característico das propriedades em situação de incêndio, função da temperatura θ e $\gamma_{M,fi}$ representa o factor parcial de segurança, para a propriedade em causa, em situação de incêndio (valor unitário para todas as propriedades).

$$X_{d,fi} = \gamma_{M,fi} X_{k,\theta} \quad (2.2)$$

No caso das propriedades mecânicas, $X_{k,\theta}$ é expresso pela seguinte expressão.

$$X_{k,\theta} = k_{\theta} X_k \quad (2.3)$$

em que X_k representa o valor característico da propriedade mecânica à temperatura ambiente e k_{θ} , o respectivo factor de redução da propriedade em função da temperatura.

Quando o aço é submetido a um aumento de temperatura, apresenta uma perda progressiva da sua rigidez devido, em parte, à diminuição do módulo de elasticidade. Por outro lado, numa análise global de uma estrutura, o aumento de temperatura pode introduzir dilatações térmicas, mais ou menos constrangidas, pelos elementos adjacentes. Estes constrangimentos criam tensões adicionais, equivalentes a um aumento das solicitações exteriores. Este conceito explica a expressão que contabiliza o efeito da acção de acidente do fogo no eurocodigo. Sempre que a temperatura sobe acima dos 450 [°C] pode ser necessário ter em consideração as deformações induzidas pela fluência do material, [2.4].

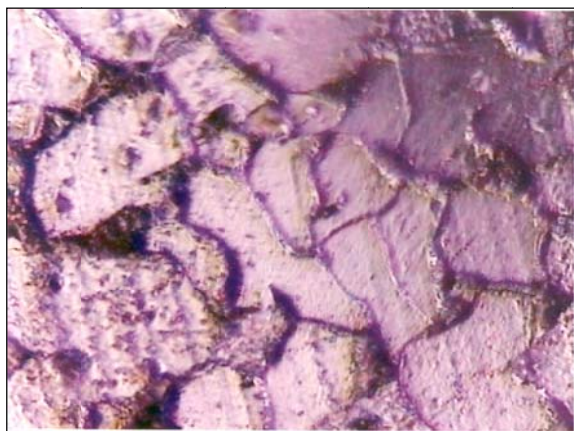
Todas as propriedades consideradas neste trabalho terão como referência as propostas pelos Eurocódigos, [2.3].

2.1.1. Propriedades térmicas do aço

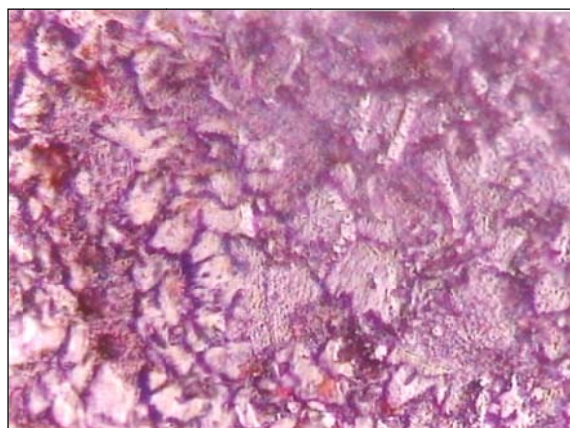
O calor propaga-se no aço por condução, sendo a equação diferencial que rege o fenómeno, em corpos sólidos bidimensionais, descrita em 2.4. Esta equação faz intervir três propriedades dos materiais, a massa volúmica ρ , o calor específico C e a condutividade λ .

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.4)$$

No intervalo de temperaturas em que se deverá verificar uma variação significativa das propriedades térmicas, verifica-se um fenómeno de transformação metalúrgica, predominante entre os 600 e 800 [°C], correspondente uma transformação alotrópica, responsável pela alteração de fase do material em estudo. Na figura 2.1 está representada uma alteração metalográfica de uma amostra de material submetido a temperaturas elevadas.



a)



a)

Figura 2.1 - Exemplo de amostras ampliadas 500 x; a) metalografia à temperatura ambiente; b) metalografia à temperatura ambiente depois de submetida a ensaio de 600 [°C], com arrefecimento natural.

O refinamento do grão implica um número mais elevado de interfaces que irão aumentar a resistência aos movimentos das microestruturas, podendo assim aumentar a resistência mecânica do material. Este fenómeno verifica-se em caso de um arrefecimento, pós aquecimento superior a 600 [°C]. Para temperaturas superiores a este valor, o aumento da resistência depende do tipo de aço. Informações adicionais específicas sobre este assunto poderão ser encontradas em referência especializada, como Behets, [2.1] e Dehaan, [2.2].

2.1.1.1. Calor específico

O calor específico de um material representa a capacidade para armazenar calor sob a forma de energia. Quantitativamente, representa a energia necessária para elevar em um grau centígrado, a massa correspondente a 1 [Kg] do metal.

É das propriedades térmicas com dependência de temperatura mais acentuada. O teor em carbono não é determinante, sendo a sua variação analítica representada segundo o Eurocódigo 3 parte 1.2, pelas expressões 2.5, [2.3], onde θ_a representa a temperatura do material.

$$\begin{aligned}
 C_a &= 425 + 7.73 \times 10^{-1} (\theta_a) - 1.69 \times 10^{-3} (\theta_a)^2 + 2.22 \times 10^{-6} (\theta_a)^3; \quad 20 < \theta_a \leq 600 \text{ [°C]} \\
 C_a &= 666 - \left[\frac{13000}{\theta_a - 738} \right]; \quad 600 < \theta_a \leq 735 \text{ [°C]} \\
 C_a &= 545 + \left[\frac{17820}{\theta_a - 731} \right]; \quad 735 < \theta_a \leq 900 \text{ [°C]} \\
 C_a &= 650; \quad 900 < \theta_a \leq 1200 \text{ [°C]}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Segundo a versão de 1995 da Parte 1.2 do Eurocódigo 3, nos modelos de cálculo simplificado, o calor específico podia ser considerado independentemente da temperatura do aço, equação 2.6.

$$C_a = 600; \quad 20^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200 [^\circ\text{C}] \tag{2.6}$$

A versão actual do Eurocódigo 3, [2.3], não refere esta possibilidade. No entanto, optou-se por mencioná-la pois, para a 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 do aço é representada pela curva da figura 2.2.

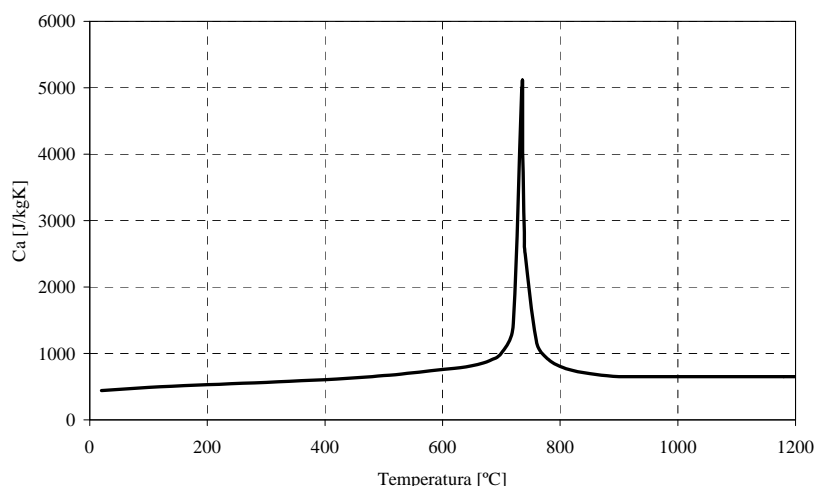


Figura 2.2 - Calor específico do aço em função da temperatura.

A descontinuidade que se apresenta no gráfico de figura está relacionada com a uma transformação cristalográfica, endotérmica, próxima dos 735 [°C], correspondentes a um valor de 5000 [J/kgK]. Para os elementos estruturais poucos solicitados e com temperaturas de ruína perto destas temperaturas, esta alteração pode provocar um efeito não desprezável na duração da resistência ao fogo.

A evolução desta propriedade é reversível para o caso de se pretender efectuar uma análise posterior de arrefecimento, [2.5].

2.1.1.2. Condutividade térmica

A condutividade térmica do aço é elevada em relação aos outros materiais utilizados na construção de edifícios, contudo este valor tende a diminuir assim que a temperatura do material aumenta, conforme figura 2.3. As expressões analíticas utilizadas para representar a evolução gráfica bi-linear são dadas pelas expressões (2.6), verificando-se um comportamento monótono decrescente desde 53,3 até 27,3 [W/mK], numa primeira fase, seguida de um comportamento constante para além dos 800[°C].

$$\lambda_a = 54 - 3.33 \left(\frac{\theta_a}{100} \right); \quad 20 < \theta_a \leq 800 \text{ [°C]} \quad (2.6)$$

$$\lambda_a = 27.3; \quad 800 < \theta_a \leq 1200 \text{ [°C]}$$

De acordo com a versão de 1995 da Parte 1.2 do Eurocódigo 3, a condutividade térmica podia ser considerada com um valor constante e igual a $\lambda_a = 45$ [W/mK]; $20 < \theta_a \leq 1200$ [°C]. Para as situações de cálculo simplificado, a versão actual, [2.3], não refere esta possibilidade.

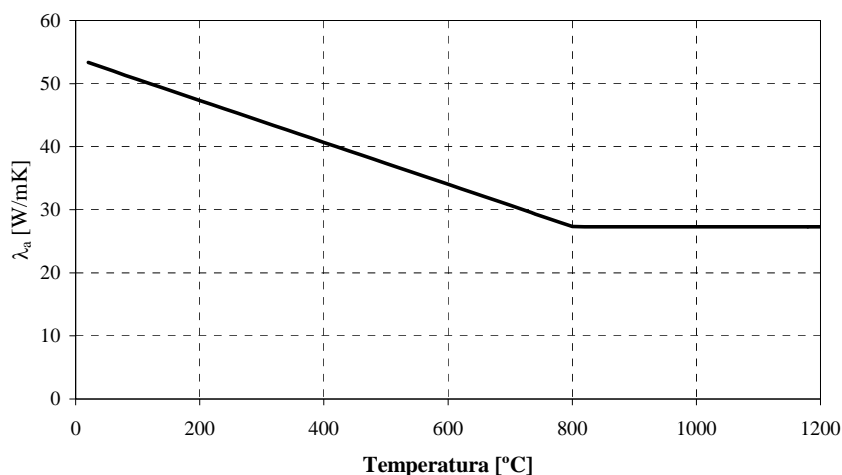


Figura 2.3 - Variação da condutividade do aço com a temperatura.

A figura anterior, apresenta a evolução desta propriedade. Também pode ser considerada como reversível, no caso de um pós arrefecimento.

2.1.2. Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas são substancialmente afectadas pela temperatura. Deve ser dada uma especial atenção para todos os elementos estruturais submetidos a temperaturas superiores a 95 [°C], [2.8].

Sob a acção de cargas constantes, os elementos podem sofrer deformações contínuas no tempo, evidenciando a fluência de material. À temperatura ambiente e para estados de tensão não muito elevados, a fluência pode ser desprezada. Para níveis de tensões e de temperaturas superiores, este fenómeno pode ser significativo. A composição química e o processo de fabrico influenciam o comportamento à fluência, pelo que se torna difícil fazer uma distinção para todos os tipos de 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, [2.9][2.10].

Os primeiros modelos estabelecidos para representar o comportamento do aço numa situação de incêndio, utilizavam métodos de cálculo simplificado. Os primeiros trabalhos sobre este assunto consistiam em extrapolar o comportamento do aço observado à temperatura ambiente para a situação de elevadas temperaturas. A curva de tensão deformação, utilizada a 20[°C], elástica perfeitamente plástica e os parâmetros necessários à sua descrição, o módulo de elasticidade e o limite de elasticidade, eram as propriedades que variavam com a temperatura e que seria necessário estudar. Foram estabelecidos valores de deformação específica de 0.2%, 0.5% e 2% para definir a cedência do material, conforme o tipo de estrutura, o tipo de solicitação e o método de cálculo, [2.5].

O modelo elástico perfeitamente plástico foi dos modelos mais utilizados no início do estudo da influência da temperatura nas propriedades, contudo, e de acordo com [2.6], o modelo bi linear seria o que proporcionava melhores resultados.

Rubert e Schaumann, nos trabalhos que serviram de base aos resultados apresentados nos Eurocódigos, estabeleceram um modelo de comportamento, onde a fluência do material seria considerada de uma forma implícita. Os ensaios instacionários de flexão efectuados sobre vigas IPE80 e IPE120, submetidos

a uma taxa de aquecimento variável entre 2.67 e 32 [°C/min], permitiram estabelecer uma expressão analítica do tipo elíptico que antecede a cedência do material. Nessa lei, a expressão analítica escolhida corresponde à curva elasto-elíptico, perfeitamente plástica [2.11].

Outinen e Mäkeläinen, [2.12][2.13][2.14], realizaram ensaios de tracção transientes e estacionários em provetes de material S355, S420M e S460M para um intervalo de temperaturas entre 20 e 700 [°C]. Segundo estes autores, os ensaios transientes fornecem resultados mais próximos do comportamento real, especialmente para aços carbono. Os ensaios transientes foram executados com a aplicação de uma carga constante nos provetes sujeitos a uma taxa de aquecimento constante. Durante o ensaio são medidos os valores da temperatura e da deformação, estabelecendo-se curvas temperatura – deformação, Figura 2.4 a). Os resultados foram convertidos em curvas tensão – deformação, às quais são subtraídas as deformações térmicas Figura 2.4 b). As curvas tensão – deformação obtidas permitem a obtenção dos valores do módulo de elasticidade e da tensão de cedência.

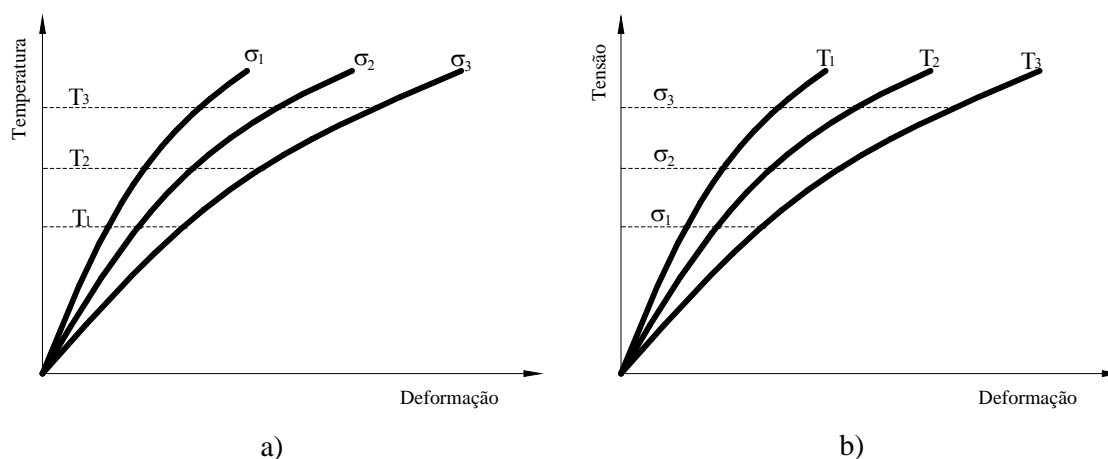


Figura 2.4 – Conversão das curvas tensão – deformação dos ensaios transientes.

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} . Em alternativa poderá ser utilizado um valor de referência de deformação permanente, sendo o mais comum 0.2%. Como 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 estrutura, do tipo de solicitação ou método de calculo, [2.5].

A relação entre a tensão e a deformação que rege o comportamento para os aços de construção, utiliza a curva que se representa a seguir, sendo possível identificar quatro ou cinco fases fisicamente distintas, [2.3].

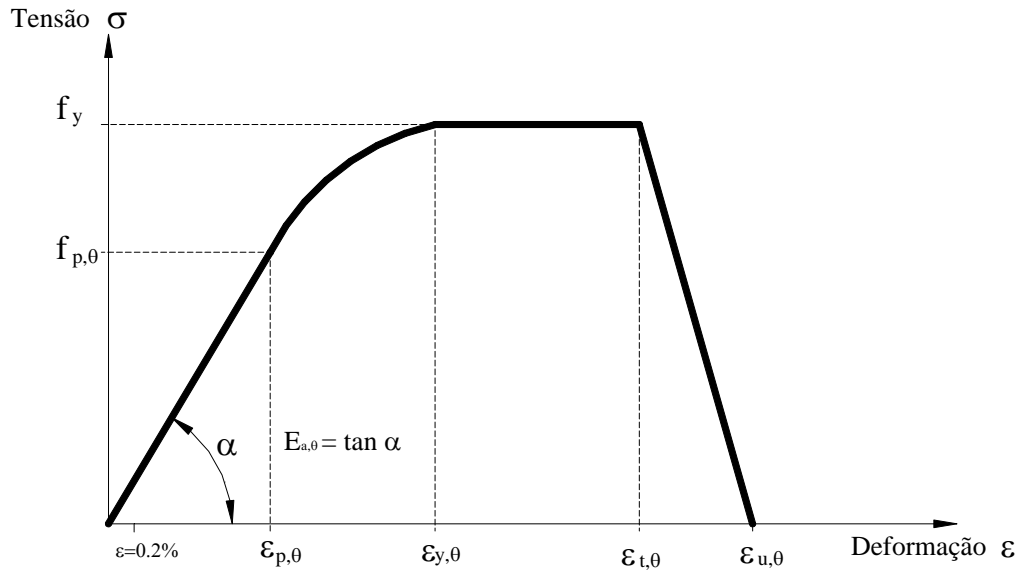


Figura 2.5 - Fases da relação tensão deformação, com e sem endurecimento.

A primeira fase representa a proporcionalidade entre tensão e deformação, caracterizada pelo valor $f_{p,\theta}$, tensão limite de proporcionalidade à temperatura θ e pelo valor E_θ , que representa o módulo de elasticidade, correspondente à inclinação do segmento de recta desta fase. A relação tensão deformação pode ser expressa através da lei de Hook, pela equação seguinte.

$$\sigma_{a,\theta} = E_{a,\theta} \times \epsilon_{a,\theta} \quad (2.8)$$

A segunda fase, caracterizada pelo início da cedência do material, zona de transição, é formalmente parametrizada por $f_{y,\theta}$, tensão de cedência. A relação tensão deformação nesta zona da curva é dada pela expressão que se segue.

$$\sigma_{a,\theta} = f_{p,\theta} - c + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (\epsilon_{y,\theta} - \epsilon)^2} \quad (2.9)$$

Os valores dos parâmetros a, b, c são representados pelas funções das expressões 2.10.

$$a^2 = (\epsilon_{y,\theta} - \epsilon_{p,\theta}) \left(\epsilon_{y,\theta} - \epsilon_{p,\theta} + \frac{c}{E_{a,\theta}} \right) \quad (2.10.a)$$

$$b^2 = E_{a,\theta} (\epsilon_{y,\theta} - \epsilon_{p,\theta}) c + c^2 \quad (2.10.b)$$

$$c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{E_{a,\theta}(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})} \quad (2.10.c)$$

Esta fase elíptica é limitada pela deformação $\varepsilon_{y,\theta} = 2\%$. Finalmente o módulo de elasticidade pode ser determinado pela expressão seguinte.

$$E_{a,\theta} = \frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a\sqrt{a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2}} \quad (2.11)$$

A terceira fase é caracterizada pelo patamar de tensão constante, sendo desprezado 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. Neste caso o patamar é definido por uma tensão máxima dada por $f_{u,\theta}$, dependente da temperatura do aço.

A última fase, e para não se obter uma ductilidade numericamente infinita, foi adicionada uma zona linear decrescente, entre os 15% e os 20% de deformação, sendo caracterizada pela deformação última, $\varepsilon_{u,\theta}$. Neste caso os parâmetros podem ser escritos na seguinte expressão:

$$\sigma_{a,\theta} = f_{y,\theta} \left[1 - \frac{(\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta})}{(\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta})} \right] \quad (2.12)$$

2.1.2.1. Coeficiente de dilatação térmica

Na ausência de qualquer carregamento mecânico a aplicar num elemento estrutural, o aço de construção deforma-se por acção da temperatura.

Por definição, o coeficiente de dilatação térmica será obtido, matematicamente, através da derivada da deformação térmica ε_{th} , em ordem à temperatura, conforme equação 2.13,

$$\frac{d\varepsilon_{th}}{dT} = \alpha_{th} \quad (2.13)$$

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

Para temperaturas inferiores a 100 [°C] pode ser assumido um valor constante para α_{th} , perto dos 10^{-5} [°C⁻¹]. Para valores de temperatura em situação de incêndio, ou seja, para intervalos de 20 a 1200 [°C],

este coeficiente não pode ser considerado constante. A integração da expressão 2.13 não é imediata, podendo determinar-se o valor de deformação térmica pela expressão 2.14.

$$\varepsilon_{th} = \int_{T_0}^T \alpha_{th}(T) dT \quad (2.14)$$

A utilização do coeficiente de dilatação térmica apresenta pouco interesse prático. Com efeito, experimentalmente, a única grandeza acessível para medição é a deformação térmica do material em função da temperatura, [2.7].

As relações entre a deformação térmica, proveniente da acção térmica, e a temperatura, prescritas pelo Eurocódigo 3 Parte 1.2, são apresentadas na equação 2.15, sendo que Δl representa o aumento de comprimento induzido pela temperatura, em relação, ao comprimento inicial l .

$$\begin{aligned} \frac{\Delta l}{l} &= 1.2 \times 10^{-5} \times \theta_a + 0.4 \times 10^{-8} \times \theta_a^2 - 2.416 \times 10^{-4}; \quad 20 < \theta_a \leq 750 [^\circ \text{C}] \\ \frac{\Delta l}{l} &= 1.1 \times 10^{-2}; \quad 750 < \theta_a \leq 860 [^\circ \text{C}] \\ \frac{\Delta l}{l} &= 2.0 \times 10^{-5} \times \theta_a - 6.2 \times 10^{-3}; \quad 860 < \theta_a \leq 1200 [^\circ \text{C}] \end{aligned} \quad (2.15)$$

A Figura 2.6 apresenta a variação da deformação térmica com a temperatura. A dilatação térmica aumenta linearmente até aproximadamente 700 [°C], instante correspondente ao início da transformação de fase. Esta transformação de fase origina uma contracção do material, de cerca 15% da expansão ocorrida entre 20 e 700 [°C], representada simplificada pelo patamar representado na figura. Após a transformação de fase do material, a deformação térmica assume novamente uma variação linear.

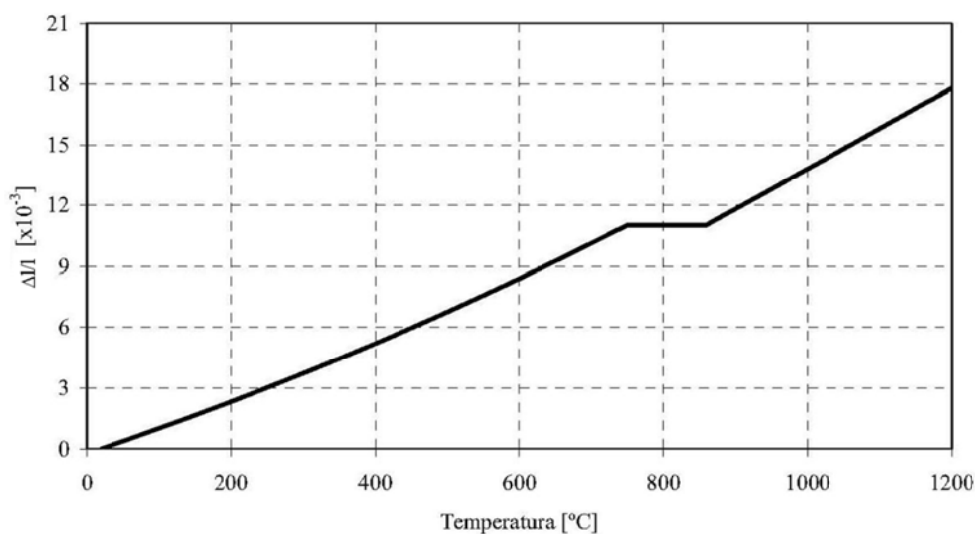


Figura 2.6 - Variação do coeficiente de dilatação térmica com a temperatura.

Nos modelos de cálculo simplificado, segundo a versão de 1995 da Parte 1.2 do Eurocódigo 3, a relação entre deformação térmica e a temperatura pode ser considerada com constante, sendo a deformação dada por

$$\frac{\Delta l}{l} = 14 \times 10^{-6} (\theta_a - 20). \text{ Contudo a versão actual deste documento, [2.3] não refere esta possibilidade.}$$

2.1.2.2. Módulo de elasticidade

Esta propriedade do aço foi estudada por diversos investigadores, nomeadamente por Anderberg, [2.6], sendo de realçar que o seu valor decresce com o aumento da temperatura, e de uma forma menos acentuada que o limite de elasticidade. Esta variação é menos significativa para valores elevados de temperatura. Para uma temperatura de solitação igual a 600 [°C], este material possui apenas 30% do valor correspondente à temperatura ambiente.

A figura 2.7 mostra a variação desta propriedade através do factor de redução, K_E . Este factor representa o quociente entre o valor da propriedade a uma determinada temperatura e o valor da propriedade à temperatura de referência de 20 [°C], [2.3].

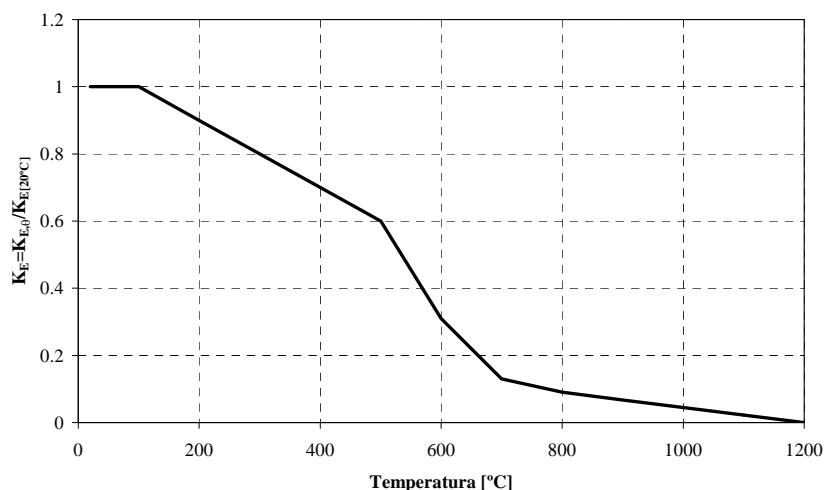


Figura 2.7 - Factor de redução do módulo de elasticidade para aços.

Sobre a variação desta propriedade podem ser consultados vários trabalhos experimentais desenvolvidos por Anderberg, [2.6].

A variação proposta para o módulo de elasticidade pelo Eurocódigo resulta de valores tabelados, entre 20 a 1200 [°C], admitindo-se uma variação linear entre os valores apresentados na tabela 2.1.

| Temperatura [°C] | $k_{E,\theta}$ |
|------------------|----------------|
| 20 | 1.0000 |
| 100 | 1.0000 |
| 200 | 0.9000 |
| 300 | 0.8000 |
| 400 | 0.7000 |
| 500 | 0.6000 |
| 600 | 0.3100 |
| 700 | 0.1300 |
| 800 | 0.0900 |
| 900 | 0.0675 |
| 1000 | 0.0450 |
| 1100 | 0.0225 |
| 1200 | 0.0000 |

Tabela 2.1 - Valores do coeficiente de redução do módulo de elasticidade

2.1.2.3. Tensão de cedência

Tendo em consideração o comportamento não linear do aço, é definido um limite de elasticidade para um valor de deformação plástica que lhe corresponde. Para valores de temperatura normais, a tensão de cedência pode ser definida para um valor de 0.2% de deformação, enquanto que para temperaturas elevadas é normal utilizar o valor diferente, [2.4].

A capacidade resistente do aço diminui drasticamente com o aumento da temperatura. Os valores propostos no Eurocódigo apresentam-se na figura 2.8, sendo de referir que esta propriedade sofre uma diminuição acentuada, a partir dos 400 [°C], [2.3].

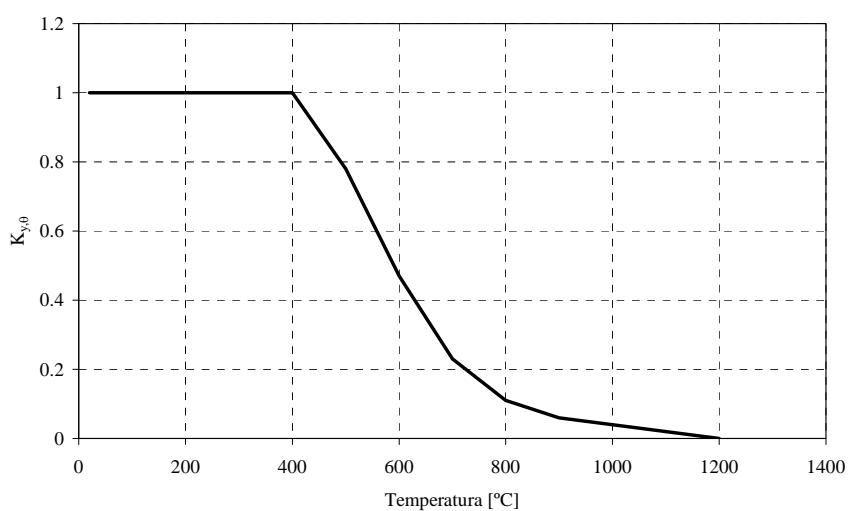


Fig.2.8 - Factor de redução da tensão de cedência para aços.

Os valores representados foram obtidos a partir de dados tabelados em [2.3], ver tabela 2.2.

| Temperatura [°C] | $k_{y,\theta}$ |
|------------------|----------------|
| 20 | 1.0000 |
| 100 | 1.0000 |
| 200 | 1.0000 |
| 300 | 1.0000 |
| 400 | 1.0000 |
| 500 | 0.7800 |
| 600 | 0.4700 |
| 700 | 0.2300 |
| 800 | 0.1100 |
| 900 | 0.0600 |
| 1000 | 0.0400 |
| 1100 | 0.0200 |
| 1200 | 0.0000 |

Tabela 2.2 - Valores do coeficiente de redução da tensão de cedência.

Estes valores de $k_{y,\theta}$ apresentado na tabela 2.2 podem, segundo a versão belga da Parte 1.2 do Eurocódigo 3, ser substituídos pelos valores determinados pela equação 2.16, desde que a temperatura do aço, θ_a , seja inferior a 775 [°C].

$$k_{y,\theta} = \left[0,9674 \left(e^{\frac{\theta_a - 482}{39,19}} + 1 \right) \right]^{-1/3,833} \leq 1 \quad (2.16)$$

2.1.2.4. Tensão limite de proporcionalidade

Esta propriedade tem como principal função definir o módulo de elasticidade do material. Para valores de deformação muito pequenos, verifica-se uma proporcionalidade entre o valor tensão e o valor da deformação.

A figura 2.9 apresenta uma diminuição acentuada a partir dos 100 [°C], que naturalmente coincide com o valor da temperatura para a qual se verifica a diminuição do módulo de elasticidade.

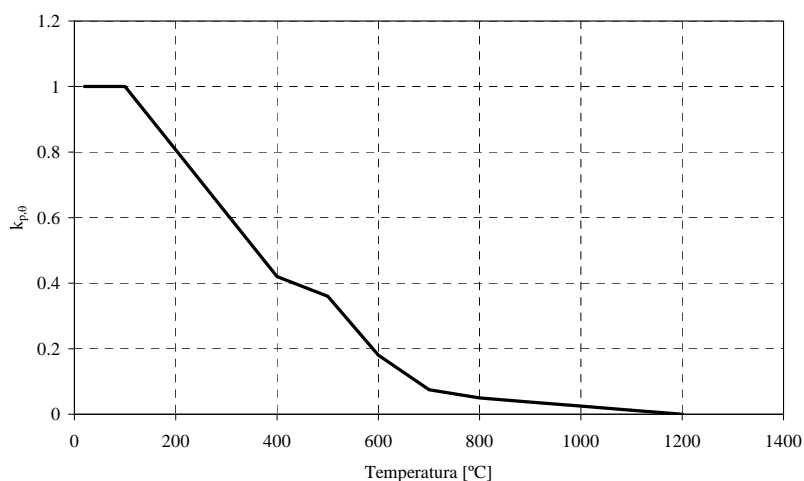


Figura 2.9 - Factor de redução da tensão limite de proporcionalidade, para aços.

2.2. Elemento de protecção

2.2.1. Processo de intumescência

As tintas intumescentes são materiais reactivos formulados com uma série de componentes activos, que sob a acção de um incêndio reagem quimicamente entre si formando uma espuma carbonosa, originando um aumento de volume tipicamente entre 40 a 50 vezes, ver a figura 2.10, comporta-se como uma camada protectora que reduz o aumento da temperatura no aço, [2.15].



Figura 2.10 - Reacção da tinta intumescente.

Os componentes activos formadores da intumescência são o catalisador ou agente desidratante ácido, geralmente polifosfato de amónio, o agente carbonífero, como o pentaeritritol e o agente expensor, constituído por compostos nitrogenados como a melamina. De entre as reacções químicas que ocorrem durante o processo da intumescência, destaca-se a decomposição do catalisador aproximadamente aos 150 [°C], reacção 1 da figura 2.11. A uma temperatura superior, o ácido formado vai reagir com o agente carbonífero, reacção 2 da figura 2.11 e a uma temperatura entre os 200 e os 300 [°C], reacção 3 da figura 2.11, dependendo do agente expensor, dá-se a decomposição deste formando-se gases que vão expandir o resíduo carbonoso gerando uma espuma de cor preta. Para temperaturas próximas de 700 [°C] a camada superficial transforma-se numa camada cerâmica porosa de cor branca e de baixa condutividade térmica, [2.16].

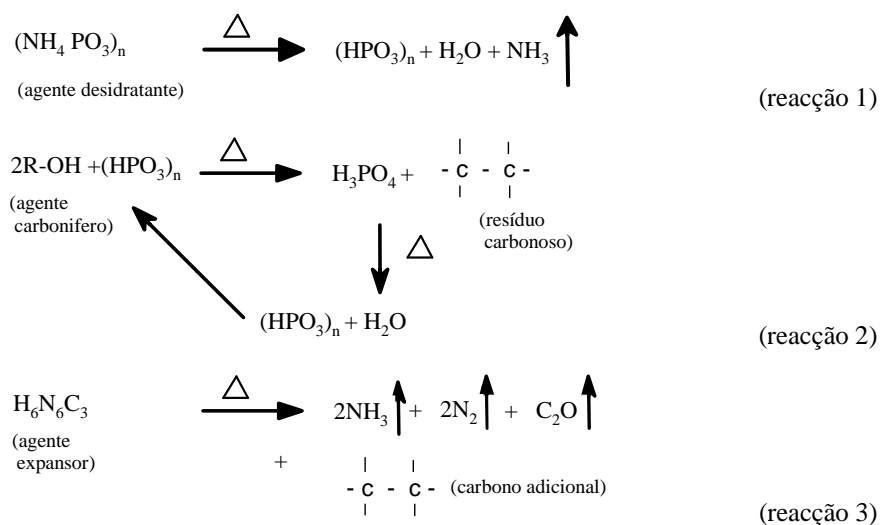


Figura 2.11 – Reacções químicas de intumescência

2.2.2. Propriedades térmicas

Estudos cinéticos da degradação térmica, ou pirólise, foram estudados por diversos investigadores, utilizando diferentes modelos matemáticos, incluindo fenómenos de transferência e reacções químicas, Staggs, [2.19-2.21]. Este autor estudou a física da transferência de calor e de massa no carvão mineral, no contexto da camada formada. O modelo é baseado na decomposição do polímero para produzir o carvão e gás, temporários, durante uma única etapa.

Di Blasi, [2.22-2.24], apresentou simulações numéricas da pirólise, tomado em consideração a variação das propriedades, os fenómenos de transferência por convecção e por condução de calor através do sólido virgem e a camada fundida. Estes estudos são baseados em equações de conservação, escritas para as fases virgens e fundidas do polímero. Di Balsi, apresentou uma revisão do estado da arte em 1993, sofrendo uma actualização em 2000, [2.25].

Dehghan e Cannon, [2.26-2.28], apresentaram modelos matemáticos, para solucionar problemas de fronteira, utilizando aproximações por diferenças finitas.

Publicações recentes, sobre protecção passiva apresentam resultados analíticos baseados na solução simplificada da equação diferencial parabólica, para a condução de calor, [2.29-2.33], cujo resultados apontam para determinar uma solução aproximada para a temperatura no aço. Ensaaios experimentais, [2.34-2.35], apresentam a variação da condutibilidade efectiva com a temperatura usando a mesma equação simplificada.

Outros estudos experimentais, [2.36,2.37], focalizam a aplicação estrutural comum, referenciando aplicação em estaleiro, ao comportamento do intumescente e ao dano causado pelo uso de elementos de protecção e materiais mecânicos do isolamento, como a dureza, resistência ao risco e impacto.

O estado actual do conhecimento, no comportamento térmico e mecânico deste material necessita de mais conhecimento. Esta situação, limita a determinação de soluções termo mecânicas para os elementos estruturais submetidos às condições de incêndio, levando a soluções sobredimensionadas, originando custos mais elevados da protecção ao fogo.

2.3. Conclusões

Foram apresentadas as propriedades térmicas e mecânicas do aço, tomando como referencia as recomendações publicadas nos Eurocódigos. Estas propriedades variam significativamente com a temperatura e decorrem de estudos e contribuições de diversos autores, que têm vindo a ser colectadas ao longo de anos e que revelam alguma discrepância no que diz respeito aos fenómenos presentes. A este respeito será importante verificar o intervalo de temperatura, durante o qual se verifica o processo de transformação metalúrgica, não coincide para algumas das propriedades apresentadas. Acresce a este facto o tipo de valores tabelados e discretos que se verificam para certas propriedades. A sugestão de interpolação linear entre estes pode influenciar os cálculos que envolvem estas propriedades, nomeadamente no que diz respeito à determinação da resistência ao fogo.

Diversos autores demonstraram que para situações de acidente com temperaturas elevadas, registadas entre meia a duas horas, o efeito da fluência dependeria pouco da velocidade de aquecimento, [2.5]. Este fenómeno aparece introduzido, de forma implícita, nas propriedades e na variação destas com a temperatura, através de um amaciamento da relação tensão-deformação, pelo que o factor tempo não aparece explicitamente no comportamento da estrutura. Assim é possível desacoplar os dois efeitos, térmico e mecânico, e disponibilizar fórmulas ou tabelas que relacionam a carga admissível em função da temperatura, ou eventualmente ao contrário. Seguindo este raciocínio, o tempo necessário para atingir a temperatura em causa não introduziria qualquer variação no resultado. Caso o tempo interviesse de maneira explícita sobre os modelos, seria impossível estabelecer todos os métodos práticos de dimensionamento, uma vez que para cada elemento estrutural metálico e para cada taxa de carregamento, a temperatura crítica seria função da qualidade do material, de um eventual produto de protecção térmica empregue, da sua espessura, bem como da curva de incêndio utilizada. Cada caso passaria a ser analisado em particular. Acresce ainda o facto de que numa situação de incêndio real numa estrutura, a evolução da temperatura ser bastante diferente da produzida pelo efeito das curvas normalizadas.

O material de protecção, intumescente, destaca-se pelo menor peso introduzido na estrutura, em comparação com outras medidas de protecção. A possibilidade de aplicação em estaleiro e a obtenção de um bom acabamento superficial, são factores determinantes para a escolha deste processo de protecção passiva, podendo ser melhorado com a aplicação de filmes decorativos. Por outro lado, a sua aplicação exige uma elevada experiência, com um elevado controlo de qualidade e medidas de espessura frequentes, pelo que a sua aplicação em obra só é possível com boas condições atmosféricas, originando interrupções na montagem da estrutura, que são susceptíveis de gerar um aumento do custo total de protecção ao fogo, [2.17].

Com o objectivo de se obter uma redução no custo total de protecção ao fogo, através da aplicação da tinta intumescente em estaleiro, Longton et al, [2.18], fizeram um estudo que incidiu na análise das propriedades das tintas intumescentes actuais e sua adequação para a aplicação em estaleiro. É ainda apresentada uma reformulação para aplicação em obra no mesmo dia, através de uma cura rápida e com elevada durabilidade. Segundo estes autores, a redução do dano produzido pelo manuseamento dos elementos estruturais protegidos, durante o seu armazenamento (carregamento e descarregamento) e posteriormente aquando da construção da estrutura, pode ser conseguido através da correcção das propriedades do intumescente, como a tenacidade, resistência ao impacto e a sua resistência ao risco. Serão necessários cuidados adicionais nos casos em que o dano torna o substrato (aço) visível, já que os ensaios produzidos mostram que o intumescente possui uma expansão lateral quase nula.

2.4. Referências

- [2.1]- Behets, J.F.; “Étude de la resistance au feu des éléments métalliques protégés. Addendum n°1: Caracteristiques de l’acier après refroidissement “; Convention IRSIA n°1982; C.B.L.I.A.; 1975.
- [2.2]- Dehaan, J. D.; “Kirk’s Fire Investigation”; John Wiley & Sons Inc.; New York; 1983.
- [2.3]- CEN EN 1993-1-2; “Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1.2: General rules – Structural fire design”; 2005.

- [2.4]- Piloto, P.A.G.; “Análise experimental e numérica do comportamento de estruturas metálicas sujeitas à acção do fogo” – Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica; Porto; Portugal; Setembro, 2000.
- [2.5]- Franssen, Jean - Marc; “Contribution a la modelisation des incendes dans les batiments et de leur effects sur les structures”; Thèse présentée en vue de l’obtention du grade de d’Agrégé de l’enseignement Supérieur Année académique 1997-1998.
- [2.6]- Anderberg, Y.; “Behaviour of steel at high temperatures”; Rilem-Committee 44-PHT; 1983.
- [2.7]- Franssen, Jean - Marc; “Étude du comportement au feu des structures mixtes acier – béton”; Thèse présentée à la faculté des sciences appliquées de l’université de Liège en vue de l’obtention du grade scientifique de docteur en sciences appliquées; 1986.
- [2.8]- Lee, J. H., Mahendran, M., Makelainen, P.; “Prediction of mechanical properties of light gauge steels at elevated temperatures”; Journal of Constructional Steel Research, 59, pp 1517-1532, 2003.
- [2.9]- Lamont, S.; “The behaviour of multi-story composite steel framed structures in fire response to compartment fires”; Thesis submitted for Doctor of Philosophy. Degree, University of Edinburgh, 2001.
- [2.10]- Zeng, J.L., Tan K.H., Huang, Z.F., “Primary creep buckling of steel columns in fire”, Journal of Constructional Steel Research, 59, pp 951-970, 2003.
- [2.11]- Ruge J., Winkelmann O.; “Deformation behaviour of reinforcing and structural steel at high temperatures”; Sonderforschungsbereich 148, Brandverhalten von Bauteilen; Arbeitsbericht 1978; Part II; Braunschweig; 1980.
- [2.12]- Outinen, Jyri; Kaitila, Olli; Mäkeläinen; “High-temperature testing of structural steel and modeling of structures at fire temperatures - Research report”; Helsinki University of Technology laboratory of steel structures publications - TKK-TER-23; Espoo 2001.
- [2.13]. Outinen, J.; Kesti, J.; Mäkeläinen, P.; “Fire design model for structural steel S355 based upon transient state tensile test results”, Journal of Constructional Steel Research, 42, N° 3, pp 161-169, 1997.
- [2.14]. Mäkeläinen, P.; Outinen, J.; Kesti, J.; “Fire design model for structural steel S420M based upon transient-state tensile
- [2.15]. Dowling, John; Designing for fire protection; Construton news suplement, pp 14-15, 2003.
- [2.16]. Ramos, F.A.F.M.; Gonçalves, C.M.; “Os revestimentos intumescentes na protecção passiva ao fogo de aço estrutural”, Corrosão e Protecção de Materiais, Vol. 19, N° 1, 2000.
- [2.17]. Mesquita, L.M.R.; Piloto, P.A.G.; Vaz, M.A.P.; Vila Real, P.M.M.; Ramos F.; “Comportamento de vigas em aço protegidas com tinta intumescente”; artigo apresentado nas actas do V Congresso de Construção Metálica e Mista; ISBN nº 972-98376-7-8, pp 509-520; Lisboa, Centro de congressos, 24-25 de Novembro de 2005.
- [2.18]. Longton, P.J.; Houyoux, C.; Zhao, B.; Chico, B.; “Development of alternative technologies for off-site applied intumescent coatings”, Technical Steel Research, ISBN 92-894-9165-5, 2005.
- [2.19]. Staggs, J.E.J., “Modelling thermal degradation of polymers using single-step first-order kinetics”, Fire S Safety Journal, 32, pp. 17-34, 1999.
- [2.20]. Staggs, JEJ,” Simple mathematical models of char-forming polymers”, Polymer International 49, pp.1147-1152, 2000.

- [2.21]. Staggs, J.E.J.; "Heat and mass transport in developing chars", *Polymer Degradation and Stability* N° 82, pp. 297–307, 2003.
- [2.22]. Di Blasi, C., "Linear pyrolysis of cellulosic and plastic waste", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 40-41, pp. 463-479, 1997.
- [2.23]. Di Blasi, C., "Modeling the effects of high radiative heat fluxes on intumescent material decomposition", *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 71 pp. 721–737, 2004.
- [2.24]. Di Blasi, C., "Transition between regimes in the degradation of thermoplastic polymers", *Polymer Degradation and Stability*, 64, pp.359-367, 1999.
- [2.25]. Di Blasi, C., "The state of the art of transport models for charrinr solid degradation", *Polymer Degradation*, 49, pp. 1133-1146, 2000.
- [2.26]. Dehghan, M., "Second-order schemes for a boundary value problem with Neumann's boundary conditions", *Journal of Computational and applied Mathematics* 138, pp. 173-184, 2002.
- [2.27]. Dehghan, M., "On The Numerical Solution Of The One-Dimensional Convection-Diffusion Equation", *Mathematics Problems in Engineering*, nº1 pp. 61-74, 2005.
- [2.28]. Cannon, J.R., Hill, C.D., "Remarks om a –stefan Problem", *Journal of Mathematics and Mechanics*, Vol. 17, nº 5, 1967.
- [2.29]. Wong, M.b.; Ghojel, J.I.; "Sensivity analysis of heat transfer formulations for insulated structural components", *Fire Safety Journal*, 38 pp 187-201, Elsevier, 2003.
- [2.30]. Tan, K.h.; Wang. Z.; Au, S.K.;"Heat transfer analysis for steelwork insulated by intumescent paint exposed o standard fire conditions", *Third international workshop Structures in fire*, Ottawa, Maio 2004.
- [2.31]. 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* 27, pp1551–1562, Elsevier, 2005.
- [2.32]. Silva, Vadir Pignatta;"Determination of the steel fire protection material thickness by an analytical process-a simple derivation", *Engineering Structures* 27, pp2036–2043; Elsevier, 2005.
- [2.33]. Wang, Zhi-Hua; Tan, Kang Hai; "Sensivity study of time delay coefficient oh heat transfer formulations for insulated steel members exposed to fire", *Fire Safety Journal*, 41, pp31-38, Elsevier, 2005.
- [2.34]. Mesquita, L.M.R.; Piloto, P.A.G.; Vaz, M.A.P; Vila Real, P.M.M.; "Ensaio de resistência ao fogo de vigas em aço protegidas com tinta intumescente"; artigo apresentado nas actas do 6º Congresso Nacional de Mecânica Experimental; ISBN nº 972-8826-09-5, pp 22-24; Ponta Delgada – Universidade dos Açores, 27-29 de Julho de 2005.
- [2.35]. Mesquita, L.M.R.; Piloto, P.A.G.; Vaz, M.A.P.; Vila Real, P.M.M.; Ramos F.; "Comportamento de vigas em aço protegidas com tinta intumescente"; artigo apresentado nas actas do V Congresso de Construção Metálica e Mista; ISBN nº 972-98376-7-8, pp 509-520; Lisboa, Centro de congressos, 24-25 de Novembro de 2005.
- [2.36]. Longton, P.J.; Houyoux, C; Zhao, B.; Chico, B.;"Development of alternative techlogies for off-site applied intumescent coatings", *Technical Steel Research*, ISBN 92-894-9165-5,2005.

- [2.37]. Bailey, Colin; "Indicative fire tests to investigate the behaviour of cellular beams protected with intumescent coatings" Fire Safety Journal, 39 pp698-709, Elsevier, 2004.

Capítulo 3

*Acções em elementos estruturais nas
condições de incêndio*

| | |
|--|------|
| 3.1. Introdução | 3.3 |
| 3.2. Projecto de elementos estruturais em condições de incêndio | 3.3 |
| 3.3. Acções em elementos estruturais em situação de incêndio | 3.6 |
| 3.3.1. Acções térmicas | 3.6 |
| 3.3.1.1. Mecanismo de transferência de calor | 3.6 |
| 3.3.1.2. Transferência de calor por convecção | 3.7 |
| 3.3.1.3. Transferência de calor por condução | 3.7 |
| 3.3.1.4. Transferência de calor por radiação | 3.8 |
| 3.3.1.5. Curvas de incêndio nominais | 3.8 |
| 3.3.1.5.1. Curva de incêndio padrão, ISO 834 | 3.9 |
| 3.3.1.5.2. Curva de incêndio para elementos estruturais exteriores | 3.10 |
| 3.3.1.5.3. Curva de incêndio para hidrocarbonetos | 3.10 |
| 3.3.1.6. Curva de incêndio paramétricas | 3.11 |
| 3.3.1.7. Aproximação de curvas de incêndio BFD | 3.13 |
| 3.3.2. Acções mecânicas | 3.14 |
| 3.4. – Protecção passiva de elementos estruturais | 3.16 |
| 3.4.1. Betão | 3.18 |
| 3.4.2. Gesso | 3.18 |
| 3.4.3. Tintas intumescentes | 3.18 |
| 3.4.4. – Vermiculite e Perlite | 3.19 |
| 3.4.5. Fibras minerais | 3.20 |
| 3.4.5.1. Mantas Cerâmicas | 3.20 |
| 3.4.5.2. Placas de Lã de Rocha | 3.21 |
| 3.4.6. Argamassa por projecção | 3.21 |
| 3.5. Conclusões | 3.21 |
| 3.6. Referências | 3.22 |

3.1. Introdução

As estruturas de aço são amplamente utilizadas na construção de edifícios devido à sua elevada resistência mecânica, boa ductilidade e rápida execução da obra. No entanto, devido à deterioração das propriedades mecânicas com a temperatura, é fundamental que toda a estrutura e os seus elementos possuam a resistência necessária para prevenir um eventual colapso, causado pela ocorrência de um incêndio.

Um dos procedimentos utilizados para dotar uma estrutura com a capacidade de resistência ao fogo pretendida é proceder-se ao seu dimensionamento sem a utilização de protecção adicional, recorrendo à utilização de perfis de gama superior, de aços de melhor qualidade ou de elevada resistência ao fogo. Em alternativa, é comum a aplicação de sistemas de protecção passiva, como o betão, placas de gesso, fibras minerais ou tintas intumescentes, dotando os elementos estruturais de uma protecção ao fogo total ou parcial, [3.1].

Os parâmetros físicos que determinam as condições de acção do fogo são muitos e complexos. Cada um deles intervém na duração do fogo, na sua violência, e na maneira como vai afectar termicamente a estrutura. Dos factores mais importantes podem ser citados, a densidade da carga de incêndio, as características de combustão dos materiais, as dimensões e formas do local, as condições de ventilação e as propriedades térmicas da envolvente.

3.2. Projecto de elementos estruturais em condições de incêndio

A resistência ao fogo de um elemento estrutural é definida como sendo o intervalo de tempo transcorrido desde o início do incêndio normalizado até ao momento em que o elemento atinja a sua temperatura crítica, temperatura a partir da qual o elemento deixa de satisfazer as funções de suporte de cargas para que terá sido projectado. Esta temperatura crítica depende do grau de carregamento do elemento, [3.2].

O método de dimensionamento preconizado pelo Eurocódigo 3 Parte 1.2, [3.3], em situação de incêndio é semelhante ao utilizado à temperatura ambiente. Contudo, a capacidade de carga é modificada, sendo utilizados factores de redução do módulo de elasticidade e da tensão de cedência do aço, para contabilizar a perda de resistência a temperaturas elevadas.

Os valores de cálculo das propriedades térmicas em situação de incêndio são expressos a partir da expressão genérica (3.1), sempre que um aumento da propriedade tenha efeito favorável. As propriedades térmicas e mecânicas do aço são apresentadas no Eurocódigo 3 parte 1.2, [3.3], e no Eurocódigo 3 parte 1.1, [3.4], sendo consideradas como valores característicos. Os valores de cálculo das propriedades em situação de incêndio podem ser expressos a partir da expressão seguinte:

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

Quando um aumento da propriedade tem um efeito desfavorável, o valor da propriedade deverá ser calculada de acordo com a expressão (3.2), em que $X_{k,\theta}$ representa o valor característico das propriedades

3.4

em situação de incêndio, função da temperatura θ , onde $\gamma_{M,fi}$ representa o factor parcial de segurança para a propriedade em causa, em situação de incêndio.

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

No caso das propriedades mecânicas, $X_{k,\theta}$ é expresso pela seguinte equação.

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

X_k representa o valor característico da propriedade mecânica à temperatura ambiente e k_{θ} , o respectivo factor de redução da propriedade em função da temperatura.

3.2.1. Domínio do tempo

No domínio do tempo, o valor de cálculo do tempo resistente ao fogo, segundo a curva de incêndio padrão ISO834, ou outra curva de incêndio nominal, define-se como o tempo necessário para que o elemento em aço atinja a temperatura crítica. Este deve ser inferior ao tempo requerido pelo regulamento. Se cumprir a inequação 3.4, o elemento terá resistência suficiente, caso contrário é necessário escolher um novo elemento ou protegê-lo com um material termicamente isolante.

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad (3.4)$$

Nesta inequação, $t_{fi,d}$ representa o valor de cálculo da resistência ao fogo, medido nas unidades de tempo e $t_{fi,requ}$ representa o valor nominal requerido de resistência ao fogo, na mesma unidade.

3.2.2. Domínio da resistência

A resistência ao fogo de um elemento estrutural pode ser definido como o intervalo de tempo transcorrido desde o início de um incêndio normalizado, até ao instante em que atinge a temperatura crítica, isto é, a partir da qual deixa de satisfazer as funções para que foi projectado. A verificação recorre ao domínio da resistência estrutural, através da inequação 3.5.

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t} \quad (3.5)$$

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

3.2.3. Domínio da temperatura

O projecto de elementos estruturais, em condições de incêndio, pode ainda ser verificado no domínio da temperatura, impondo que esta não ultrapasse o valor de temperatura crítica, $\theta_{cr,d}$. Na expressão 3.6, θ_d representa o valor de cálculo da temperatura, enquanto $\theta_{cr,d}$ representa a temperatura crítica do elemento.

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d} \quad (3.6)$$

A Figura 3.1 representa a relação entre os vários domínios de verificação de resistência ao fogo.

Os números representados estão relacionados com o nível de segurança apresentado para tempo (1), resistência (2) e temperatura (3).

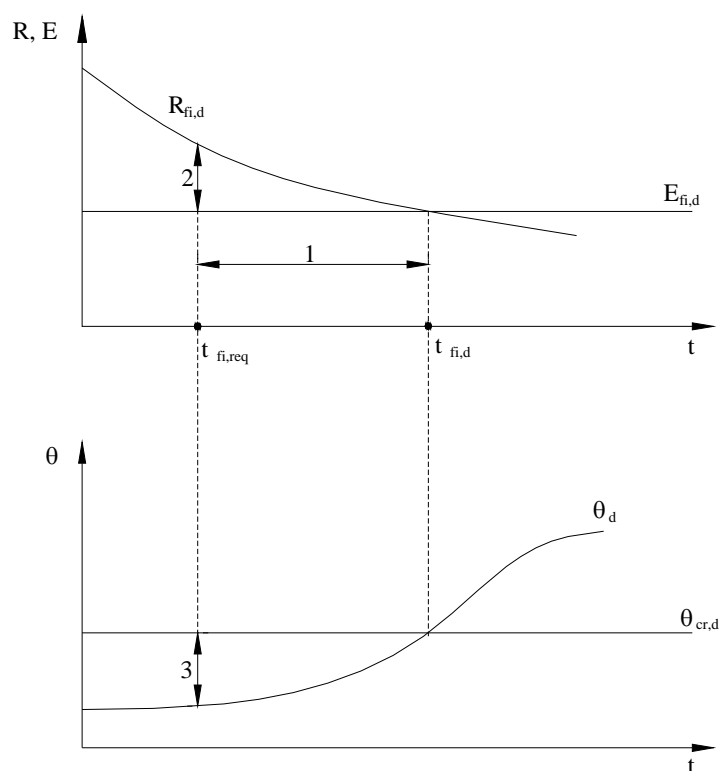


Figura 3.1 - Domínios de verificação da resistência ao fogo.

3.3. Acções em elementos estruturais em situação de incêndio

As acções em elementos estruturais em condições de incêndio são classificadas como acções acidentais. Estas podem ser divididas em directas e indirectas.

Acções indirectas devem ter em consideração o efeito do constrangimento à expansão térmica do elemento da estrutura (ex: colunas numa estrutura multi andar com paredes rígidas), o efeito de diferentes coeficientes de expansão térmica dentro de elementos da estrutura e o efeito de gradientes térmicos na secção recta do componente, que originam tensões internas. Os valores de cálculo para acções indirectas (A_d) devem 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 acção do fogo, ver equação 3.15.

As acções directas devem ser combinadas e verificadas em simultâneo, tendo em consideração que estas devem ser consideradas como no projecto à temperatura ambiente. Valores representativos de acções variáveis para situações acidentais de exposição ao fogo devem ser tomadas em consideração e o decréscimo de cargas impostas provocadas pela combustão não deverá ser considerado, [3.5].

3.3.1. Acções térmicas

O fogo é considerado uma acção de acidente, e os seus parâmetros de comportamento são muito complexos. No entanto um dos factores que mais influencia esse mesmo comportamento é o tipo de combustível existente, a dimensão do compartimento e a ventilação do espaço. Estes factores combinados definem a densidade de carga de incêndio, $q_{f,k}$.

O efeito da acção do fogo numa estrutura elevará a temperatura dos elementos que a constituem, alterando a sua rigidez e resistência, bem como os deslocamentos e as cargas que estes suportam. Estas alterações poderão provocar a ruína ou colapso, sendo essencial determinar a evolução do campo da temperatura em regime transiente e simultaneamente determinar o tempo de resistência da estrutura, ao efeito do fogo, [3.5].

3.3.1.1. Mecanismo de transferência de calor

As acções térmicas são definidas em termos de uma densidade de fluxo de calor incidente na superfície fronteira do elemento (\dot{h}_{net} [W/m²]) comportando duas parcelas, uma devida à radiação ($\dot{h}_{net,r}$) e outra devida à convecção ($\dot{h}_{net,c}$), de e para o ambiente de fogo, [3.3]. A densidade de fluxo é determinada de acordo com o Eurocódigo 3, através de:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,r} + \dot{h}_{net,c} \left[W / m^2 \right] \quad (3.7)$$

Os fluxos de calor superficiais, são calculados através das expressões, bem conhecidas, da transferência de calor por condução, convecção e por radiação.

3.3.1.2. Transferência de calor por convecção

Quando não for possível determinar qual a acção variável dominante deve cada uma delas ser considerada dominante originando mais combinações possíveis.

O fenómeno de transferência de calor por convecção natural surge da mistura de fluidos, líquidos ou gasosos, que se encontram a temperaturas distintas, resultando diferentes densidades com o consequente movimento de matéria. O fenómeno de transferência de calor por convecção forçada, resulta da mistura de fluidos, líquidos ou gasosos, velocidades induzidas por acção de meios externos. Em situação de incêndio, a transferência de calor por convecção envolve gases quentes do incêndio que passam por um elemento estrutural inicialmente frio, transferindo calor ou energia. A taxa de aquecimento depende da velocidade do fluido à superfície do objecto, propriedades térmicas do fluido e do sólido, bem como da temperatura do sólido, [3.6].

A fórmula geral de transferência de calor por convecção é dada por:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad \left[W/m^2 \right] \quad (3.8)$$

Na equação 3.8, θ_g traduz a variação da temperatura dos gases na vizinhança do elemento, a qual poderá possuir várias formas de evolução e α_c representa o coeficiente de convecção a definir em função do tipo de curva de incêndio. O Eurocódigo 1, [3.7], estabelece o valor igual a 25 [W/m²k], para a curva de incêndio padrão e para a curva de incêndio de elementos exteriores e ainda o valor de 50 [W/m²k], para a curva de incêndio de hidrocarbonetos.

3.3.1.3. Transferência de calor por condução

As trocas de calor por condução envolvem a interacção entre um ou mais materiais sólidos com contacto físico de superfícies. O fluxo de calor por condução ocorre pelo facto de se verificarem colisões entre átomos e moléculas de uma substância ou material e a subsequente transferência de energia cinética. Em tais colisões, os átomos rápidos perdem velocidade enquanto os mais lentos ganham velocidade, recebendo alguma energia pela transferência de energia do lado quente para o lado frio. Este modo de transferência é importante no caso do estudo dos gradientes de temperatura na secção recta de um elemento, com ou sem protecção térmica, quando exposto à acção do fogo. Para perfis com protecção passiva (tintas intumescentes ou placas de protecção) a condução é um modo de transferência de calor importante, já que o aço não se encontra exposto à directa acção do fogo ou em contacto directo com os seus gases, [3.6].

3.3.1.4. Transferência de calor por radiação

Transferência de calor por radiação é uma forma de transferência de calor, das mais importantes no processo térmico de aquecimento, especialmente a temperaturas elevadas, porque a energia transferida entre corpos está relacionada com a potência de grau quatro da temperatura.

O fenómeno da radiação num incêndio apresenta complexidade acrescida, uma vez que neste modo intervêm as posições relativas das chamas. No caso da modelação numérica, será considerada a temperatura dos gases como temperatura ambiente, aproximada pela lei de Stefan – Boltzmann, [3.5].

Assim, no caso de transferência de calor por radiação, o fluxo de calor é expresso pela equação 3.9.

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \cdot \varepsilon_{res} \times 5,67 \times 10^{-8} \left[(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right] \quad \left[W/m^2 \right] \quad (3.9)$$

O parâmetro ϕ , representa o factor de forma, que deve assumir o valor unitário, ε_m , representa a emissividade do elemento, de valor igual a 0.7 para aços ao carbono e 0.4 para aços inoxidáveis. A emissividade do compartimento de incêndio, ε_f é considerada com o valor unitário, [3.2], pelo que

$\varepsilon_{res} = \varepsilon_m \times \varepsilon_f$ pode variar de caso para caso.

A temperatura θ_r representa o valor da temperatura de radiação na vizinhança do elemento em unidade de grau célsius, podendo considerar-se igual a θ_g , enquanto que θ_m deverá representar a temperatura na superfície do elemento, resultante de um cálculo térmico. A temperatura de incêndio θ_g pode ser dada em termos de curvas nominais temperatura - tempo ou sob a forma de curvas paramétricas.

3.3.1.5. Curvas de incêndio nominais

As curvas nominais são representações convencionais que podem ser definidas por uma fórmula simples e que não dependem do tipo ou dimensão dos edifícios. Na figura 3.2, são apresentadas as evoluções dos tipos de curvas principais. Estas curvas, e principalmente a curva de incêndio normalizado ISO834, estabelecem um padrão de temperatura para determinação e a comparação da resistência ao fogo das estruturas. Esta resistência poderá ser obtida por meio de ensaios experimentais, por meio de cálculo analítico simplificado ou numérico.

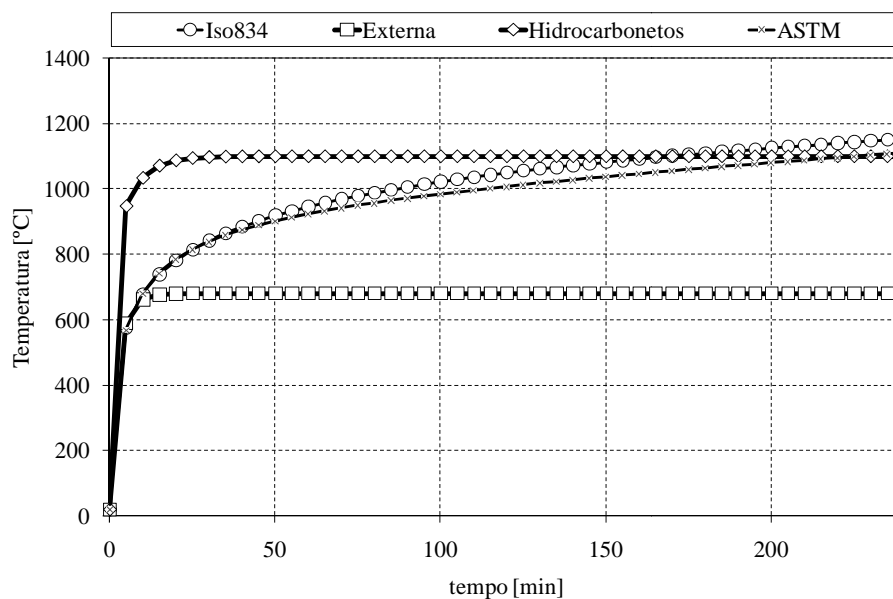


Figura 3.2. – Curvas nominais para a acção do fogo.

3.3.1.5.1. Curva de incêndio padrão, ISO 834

Na equação 3.10 esta representada a curva de incêndio padrão ISO 834. Nesta condição, α_c , o coeficiente de correcção deverá ser considerado igual a 25 [W/m²°C] e o tempo em unidades de minuto.

$$\theta_g = 20 + 345 \times \log_{10}(8t + 1) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.10)$$

Esta expressão normalizada, pode ser utilizada em laboratório (ensaio) ou em projecto analítico e ou numérico, considerando os elementos de um compartimento submetidos a estas condições térmicas, ver figura 3.3.

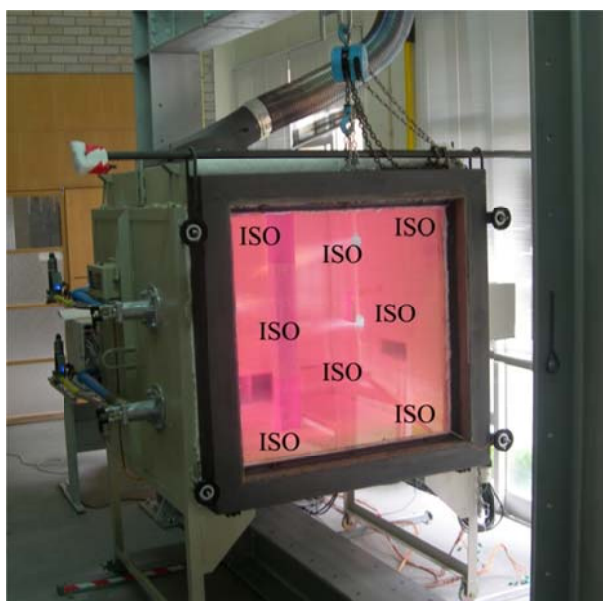


Figura 3.3. – Forno de ensaios de resistência ao fogo, em laboratório.

3.3.1.5.2. Curva de incêndio para elementos estruturais exteriores

A curva de incêndio utilizada para análise de elementos exteriores, considera o mesmo valor para o coeficiente de convecção $\alpha_c = 25 \text{ [W/m}^2\text{°C]}$, e as mesmas unidades para o parâmetro tempo. A temperatura do gás poderá ser determinada pela equação (3.11).

$$\theta_g = 20 + 660 \times \left(1 - 0,687 \times e^{-0,32t} - 0,31 \times e^{-3,8t} \right) \text{ [°C]} \quad (3.11)$$

Existem exemplos de elementos estruturais expostos pelo exterior do edifício que devem ser avaliados com esta curva normalizada, ver figura 3.4.

Esta expressão normalizada, pode ser utilizada em laboratório (ensaio) ou em projecto analítico e ou numérico, considerando os elementos de um compartimento submetidos a estas condições térmicas, ver figura 3.5.



Figura 3.4. – Estrutura resistente colocada no exterior do edifício, em Barcelona.



Figura 3.5 – Ensaio em laboratório de fogo externo.

3.3.1.5.3. Curva de incêndio para hidrocarbonetos

Para a curva de hidrocarbonetos deverá ser considerado um coeficiente de convecção, α_c , igual a 50 $\text{[W/m}^2\text{°C]}$, o dobro em relação à ISO834, podendo a temperatura ser determinada através da expressão 3.12.

$$\theta_g = 20 + 1080 \times \left(1 - 0,325 \times e^{-0,167t} - 0,675 \times e^{-2,5t} \right) \text{ [°C]} \quad (3.12)$$

Um exemplo de aplicação da curva de incêndio normalizado com hidrocarbonetos pode ser utilizado para avaliar o comportamento de elementos submetidos a um incêndio parecido como o ocorrido no dia 11 de Setembro de 2001, ver figura 3.6.



Figura 3.6 – Incêndio com hidrocarbonetos, após a colisão dos aviões nas torres WTC, Nova Iorque, 2001.

3.3.1.6. Curva de incêndio paramétricas

As curvas paramétricas são fornecidas no Eurocódigo 1, [3.3], como anexo informativo. Elas distinguem-se das anteriores por possuírem fases de arrefecimento. As curvas paramétricas são válidas para compartimentos até 500 [m²] de área em planta, sem aberturas nos telhados e para uma altura máxima do compartimento de 4 [m]. Representam a evolução da temperatura média de um incêndio em compartimentos reais, são definidas em função da densidade de carga de incêndio. A densidade de carga de incêndio utilizada nos cálculos deve ser um valor de cálculo decorrente de medições ou, em casos especiais, baseado nos requisitos de resistência ao fogo constantes dos regulamentos. A densidade de carga de incêndio consiste na quantidade de material combustível existente num compartimento e a forma como se apresenta tem uma importância fulcral no desenvolvimento do incêndio.

O cálculo térmico simplificado possibilita determinar a máxima temperatura do compartimento sujeito ao incêndio, o tamanho e as temperaturas das chamas das aberturas, bem como os parâmetros de convecção e radiação. Este método considera uma situação de regime permanente para os vários parâmetros, durante um período de 1200 [s].

O incêndio padrão é considerado como base de referência para estabelecer o conceito de “referência ao fogo regulamentar” dos elementos estruturais. A maior parte dos regulamentos de segurança contra

incêndios, adopta este conceito e estabelece os valores da resistência ao fogo dos elementos estruturais como sendo o tempo, durante o qual, estes elementos desempenham as funções de suporte de carga para que foram projectados, quando sujeitos ao incêndio padrão [3.2].

As curvas paramétricas representam a evolução da temperatura média de um incêndio em compartimentos reais, pelo que preconiza a existência de aberturas no compartimento e a densidade de carga de incêndio, [3.5].

Na curva de incêndio natural, o incêndio identifica-se como sendo uma combustão incontrolada que para se desenvolver e completar as suas fases, necessita da presença de materiais combustíveis, ver figura 3.7.

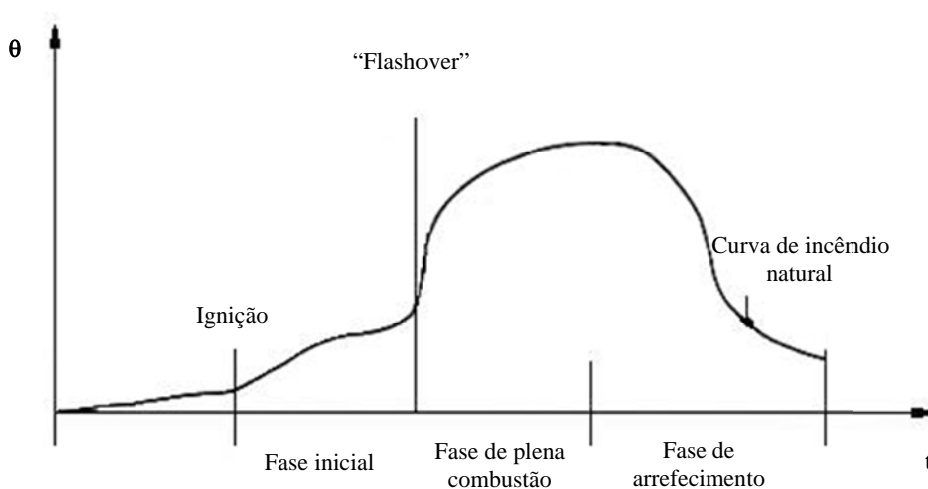


Figura 3.7 - Fases de um incêndio natural.

O início de um incêndio é marcado sempre pela ignição do material contido no ambiente. A ventilação do ambiente, a natureza, fonte da ignição, os factores relacionados com as propriedades dos materiais envolvidos e o desempenho quando expostos a altas temperaturas (inflamabilidade, libertação de calor, propagação das chamas, entre outros) interagem na fase inicial. Após atingirem um nível suficiente de radiação, todos os materiais combustíveis do compartimento entram em ignição, envolvendo todo o compartimento, configurando desta forma, o ponto mais crítico do incêndio. A inflamação generalizada ou "Flashover" representa a transição entre a fase de aquecimento e a fase de queima. Durante a segunda fase, a temperatura eleva-se de forma brusca e o incêndio propaga-se rapidamente. A combustão pode ser controlada pela ventilação através da ausência de ar ou pode ser controlada pelas propriedades dos materiais combustíveis existentes no local. A queima dos materiais é determinada pela quantidade, porosidade e forma. O combate de um incêndio nesta fase torna-se mais difícil porque a energia térmica libertada é elevada, o que torna geralmente os recursos e esforços de combate insuficientes. A resistência do edifício ou a resistências do elemento estrutural é vital para prevenir o alastramento do fogo e o colapso estrutural no período posterior a esta fase. A terceira fase de um incêndio corresponde à sua extinção. Com a queima do combustível existente, não há fornecimento continuado de energia térmica para o ambiente. Desta forma, a temperatura desce e quebra-se a cadeia de elementos necessários à ocorrência do fogo (calor, combustível, comburente)

conhecidos como triângulo do fogo. Na fase final, poderá ser necessário avaliar a resistência residual dos materiais.

3.3.1.7. Aproximação de curvas de incêndio BFD

Nesta secção é apresentada uma forma alternativa para as curvas apresentadas, utilizando uma expressão paramétrica. Esta expressão é designada por BFD, pode ser utilizada como aproximação das curvas de incêndio internacionais tempo-temperatura, ISO 834, ASTM 119, elementos estruturais exteriores e a curva de hidrocarbonetos, etc, [3.8].

A expressão paramétrica que produz esta curva, BFD é a seguinte:

$$T = T_m e^{-Z} + T_a \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.13)$$

T_m , representa a temperatura máxima e T_a ($^\circ\text{C}$), a temperatura ambiente. O parâmetro Z depende do tempo e de uma constante S_c .

$$Z = \frac{(\log t - \log t_m)^2}{S_c} \quad (3.14)$$

Para a substituição da curva ISO834 pela curva BFD, nas equações 3.13 e 3.14, devem ser utilizados os seguintes valores, $T_m=1418$ [$^\circ\text{C}$], $t_m=10000$ [min] e $S_c=62$. Na figura 3.8a é feita uma comparação entre a curva ISO e a correspondente BFD.

Para substituição de curva de elementos estruturais exteriores, devem ser utilizados os seguintes valores para os parâmetros, $T_m=660$ [$^\circ\text{C}$], $t_m=50$ [min] e $S_c=150$. Na figura 3.8b é feita a comparação entre a curva normalizada e a correspondente BFD.

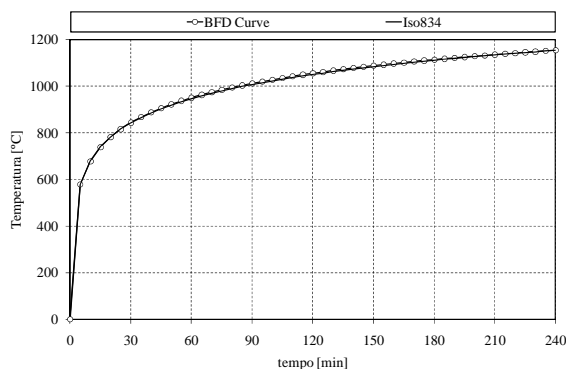


Figura 3.8a Comparação entre curva ISO834 e BFD.

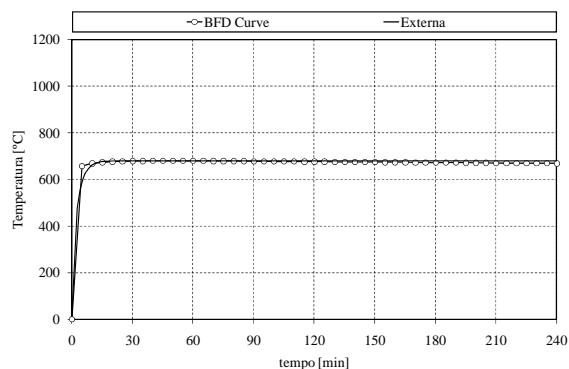


Figura 3.8b Comparação entre curva Externa e BFD.

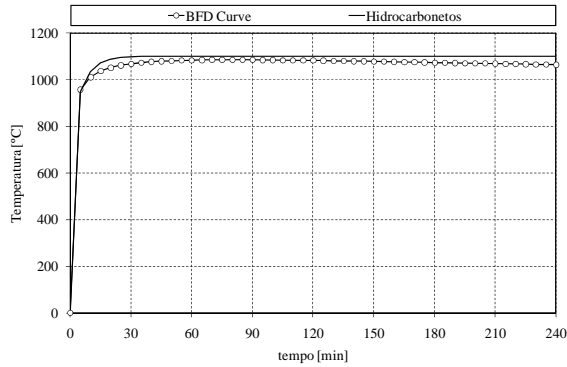


Figura 3.8c Comparação entre curva Hidrocarbonetos e BFD.

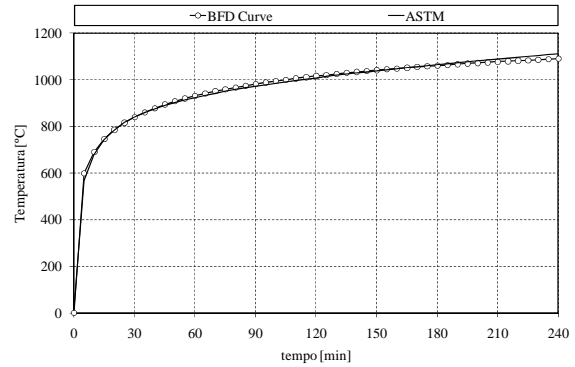


Figura 3.8d Comparação entre curva ASTM e BFD.

Figura 3.8 – Curva incêndio BFD.

Na figura 3.8c é apresentada a comparação entre a curva normalizada de hidrocarbonetos e a correspondente BFD. Para estes casos são utilizados os seguintes valores de parâmetros $T_m = 1065[^\circ\text{C}]$, $t_m = 80$ [min] e $S_c = 60$.

Na figura 3.8d é apresentada a comparação entre a curva normalizada ASTM a correspondente BFD. Para estes casos são utilizados os seguintes valores de parâmetros $T_m = 1211[^\circ\text{C}]$, $t_m = 3500$ [min] e $S_c = 58$, [3.9].

3.3.2. Acções mecânicas

Um incêndio é considerado como uma acção accidental. Para determinar o valor de cálculo dos efeitos das acções em situação de incêndio $E_{fi,d}$, deve ser utilizada a seguinte combinação de acidente de acordo com a referência [3.3].

$$E_{fi,d} = \sum G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} + \sum A_d \quad (3.15)$$

Nesta expressão, 3.15, G_k representa o valor característico das acções permanentes, $Q_{k,1}$ o valor característico da acção variável principal ou dominante, $Q_{k,i}$ os valores característicos das restantes acções variáveis e A_d os valores de cálculo de acções de exposição ao fogo. O coeficiente $\psi_{1,1}$ representa a combinação relacionada com a acção variável principal ou dominante, enquanto que o $\psi_{2,i}$ representa o coeficiente de combinação associado às restantes acções variáveis.

As acções podem ser classificadas relativamente à sua variação com o tempo em permanentes, no caso das cargas relacionadas com o peso próprio da estrutura, classificadas como variáveis, no caso do vento e da neve. O exemplo mais frequente para acções de acidente são o fogo e as explosões.

Sempre que não seja necessário considerar as acções indirectas de incêndio, a combinação de acções é feita apenas para $t = 0$ e supõe-se constante durante todo o incêndio. É a hipótese que se adopta também para o cálculo dos efeitos das acções nos apoios, aquando de uma análise por partes da estrutura ou por elementos.

Em alternativa à combinação de acidente definida na equação 3.15 é possível, como simplificação, calcular os efeitos das acções em situação de incêndio, $E_{fi,d}$, como uma percentagem, η_{fi} , dos efeitos das acções obtidos a partir da combinação fundamental à temperatura ambiente, E_d , previamente definida no dimensionamento à temperatura ambiente.

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} E_d \quad (3.16)$$

Em que η_{fi} representa o factor de redução para o valor de cálculo do nível de carregamento em situação de incêndio, dado pela seguinte equação.

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} G_k + \psi_{1,l} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_{k,1}} \quad (3.17)$$

γ_G representa o coeficiente parcial de segurança para acções permanentes à temperatura ambiente e γ_Q o coeficiente parcial de segurança para a acção variável principal.

Na tabela 3.1 estão representados alguns valores utilizados para os coeficientes de combinação, [3.4].

| Acções variáveis | ψ_0 | ψ_1 | ψ_2 |
|--|----------|----------|----------|
| Sobrecarga nos edifícios | | | |
| Categoria A: edifícios de habitação | 0.7 | 0.5 | 0.3 |
| Categoria B: escritórios | 0.7 | 0.5 | 0.3 |
| Categoria C: locais públicos | 0.7 | 0.7 | 0.6 |
| Categoria D: edifícios comerciais | 0.7 | 0.7 | 0.6 |
| Categoria E: armazém | 1.0 | 0.9 | 0.8 |
| Categoria F: peso dos veículos até 30 kN | 0.7 | 0.7 | 0.6 |
| Categoria G: peso dos veículos de 30 kN a 160 kN | 0.7 | 0.5 | 0.3 |
| Categoria H: sobrecarga em coberturas | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Neve | 0.5 | 0.2 | 0.0 |
| Vento | 0.6 | 0.2 | 0.0 |
| Temperatura não resultante de incêndio | 0.6 | 0.5 | 0.0 |

Tabela 3.1- Coeficientes de combinação ψ_1 e ψ_2 .

De acordo com o Eurocódigo 4, [3.10], pressupõe-se a utilização do valor $\eta_{fi} = 0.6$, para edifícios correntes em estrutura mista e $\eta_{fi} = 0.7$, para edifícios da categoria E (armazéns, etc.).

A combinação está formulada tendo em conta a especificidade do estado limite considerado e a probabilidade da actuação simultânea das acções intervenientes, por utilização adequada dos valores de combinação ψ . Os valores reduzidos de acções variáveis serão obtidos a partir do correspondente valor característico, multiplicado pelos coeficientes ψ . Para a acção variável de valor característico F_k , deverão ser utilizados os coeficientes ψ_0 para o valor da combinação, ψ_1 para o valor frequente e ψ_2 para a parcela

quase permanente da acção. As acções variáveis apenas deverão estar presentes nas combinações, no caso do seu efeito ser considerado desfavorável para a estrutura, [3.5].

No caso de a estrutura estar sujeita a acções de peso próprio (G), do vento (W), da sobrecarga (Q), da neve (S) e ainda, a uma situação accidental, de incêndio, a verificação à segurança deverá testar as combinações possíveis, [3.5].

No caso da acção combinada accidental, o coeficiente de segurança aplicado à acção permanente, deverá tomar o valor unitário. Os coeficientes associados representam o efeito cumulativo das combinações de acções variáveis em situação de acidente, implicando uma acção variável dominante e acções variáveis reduzidas, conforme exemplo da tabela 3.1.

3.4. – Protecção passiva de elementos estruturais

A resistência mecânica do aço diminui drasticamente com o aumento da temperatura. O tempo de resistência ao fogo para estruturas metálicas não protegidas raramente é superior a 30 minutos, [3.2]. Dificilmente estas estruturas satisfazem os requisitos regulamentares de resistência ao fogo sem uma protecção térmica adicional ou outra medida alternativa de projecto. Estas medidas podem passar pelo aumento da secção recta dos elementos. A este aumento da área de secção recta corresponde um aumento da massividade térmica. Esta característica física é inversamente proporcional ao factor de secção dos perfis, também por vezes designado por massividade, [3.13]. Esta solução é mais dispendiosa em comparação com a utilização de materiais de protecção térmica. Com a utilização de diferentes tipos de materiais de protecção térmica, é possível aumentar a resistência ao fogo, dos trinta minutos para as quatro horas, consoante a natureza e espessura do material de protecção utilizado, [3.1].

Na figura 3.9 estão representados diferentes métodos e sistemas de protecção. A protecção poderá ser parcial ou total. A protecção total consiste em envolver completamente o perfil com material de protecção. As soluções mistas de aço e betão podem ser utilizadas para aumentar a resistência ao fogo, ver figura 3.10. No caso de protecção parcial, o betão é colocado entre a alma e as faces interiores dos banzos dos perfis metálicos, ver figura 3.11.

A protecção no contorno consiste na aplicação no perfil a proteger de uma pintura intumescente ou de materiais projectados, como mostra a figura 3.15.

Na figura 3.14 está representado outro sistema de protecção. Trata-se de protecção em caixão, que utiliza placas rígidas pré fabricadas de betão celular. Este processo exige cuidados especiais na ligação do material com o perfil metálico para evitar que os gases quentes penetrem nas juntas das superfícies dos materiais.

A protecção com material flexível, (lã de rocha, fibra cerâmica, etc.) também pode ser utilizado sendo necessário utilizar em sistema de pinos previamente soldados no perfil.

Os sistemas de circulação de água representados na figura 3.13, podem também servir como elementos de protecção, utilizando os movimentos naturais de circulação, ascendentes de água quente e descendentes de água fria.

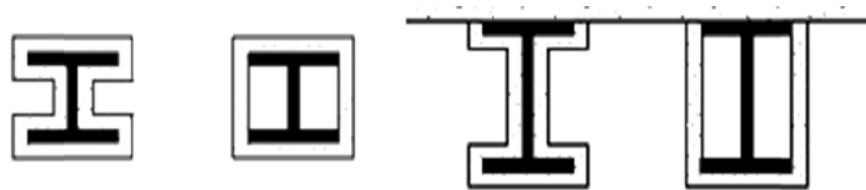


Figura 3.9 – Representação simbólica das diferentes geometrias de protecção ao fogo dos elementos estruturais (em caixão e no contorno).

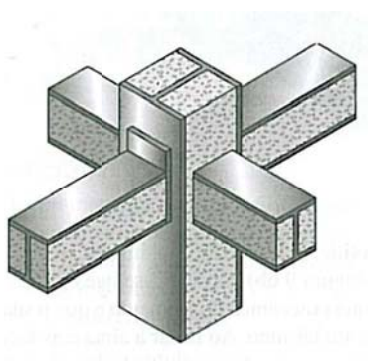


Figura 3.10 - Protecção parcial das secções.

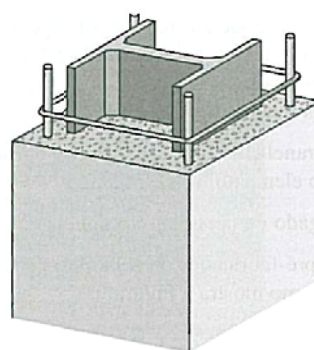


Figura 3.11 - Protecção total de um elemento estrutural.

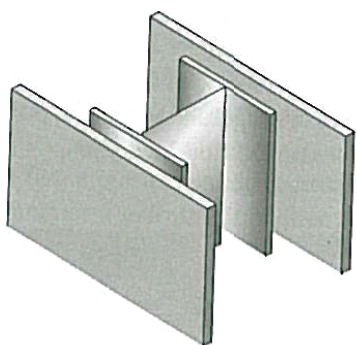


Figura 3.12 - Protecção por resguardos.

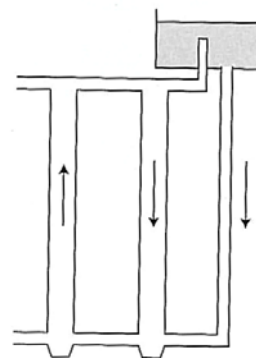


Figura 3.13 – Circulação de água para arrefecimento da estrutura.



Figura 3.14 - Perfil metálico protegido com placas rígidas



Figura 3.15 - Perfil metálico protegido com fibra mineral

dispostas em caixão.

projectada.

Os materiais utilizados em protecção de elementos estruturais em condições de incêndio, devem possuir baixa condutividade térmica, possuir boa resistência mecânica ao choque e ao impacto, como também uma boa aderência aos elementos a proteger, evitando a separação do material protegido com o material de protecção.

Nas secções seguintes são apresentadas alguns dos materiais utilizados na protecção passiva de elementos estruturais.

3.4.1. Betão

O betão pode ser utilizado como material de protecção em elementos estruturais. É um material com grande capacidade térmica, absorvendo grande quantidade de calor, com baixa condutividade térmica. Possui uma difusividade térmica reduzida, retardando assim o aquecimento dos elementos estruturais a proteger.

Embora sendo um bom isolante térmico, este material pode ser aplicado para aumentar a resistência mecânica de secção, ver figura 3.10 e 3.11.

3.4.2. Gesso

O gesso é uma substância à base de sulfato de cálcio, que no estado seco contém cerca de 20% de água cristalizada, produzida a partir do mineral gipsita, composto de sulfato de cálcio hidratado. Devido à sua facilidade em absorver água, mantém a humidade do ar em áreas fechadas, além de apresentar isolamento térmico e um modesto isolamento acústico.

A comercialização pode ser feita em placas, às quais é adicionada fibra de vidro, e, em alguns casos, vermiculita, como suporte na utilização, evitando a sua desagregação. O gesso da placa perde moléculas de água de hidratação durante o aquecimento, mantendo baixa a temperatura do aço. A placa é mantida, de modo geral, visível em estruturas, por motivos estéticos, ver figura 3.12 e 3.14.

3.4.3. Tintas intumescentes

As tintas intumescentes apresentam como principal característica a expansão do seu volume para intervalos de temperatura entre 100 e 300 [°C], formando uma espuma, que isola, eficientemente os gases quentes gerados durante um incêndio. As tintas intumescentes são materiais reactivos que reagem com a acção de um incêndio, originando um aumento de volume, tipicamente entre 40 a 50 vezes, ver figura 3.17, comportando-se como uma camada protectora que reduz o aumento da temperatura no aço, [3.11]. Este material destaca-se pelo menor peso introduzido na estrutura, em comparação com outras medidas de protecção, a fácil aplicação em estaleiro e a obtenção de um bom acabamento superficial, que pode ser melhorado com a aplicação de filmes decorativos. Por outro lado, a sua aplicação exige uma elevada

experiência com um elevado controlo de qualidade e com medição de espessura frequentes, ver figura 3.16, [3.12].



Figura 3.16 – Aplicação do intumescente e controlo de espessura.

Antes da aplicação da tinta, a superfície deverá ser preparada com um primário compatível. Como esta tinta não apresenta grande resistência química e física, ela deve ser recoberta por uma película acrílica ou poliuretânica, ao critério do utilizador.

Esta tinta pode ser aplicada a pincel, rolo ou spray “airless”, sendo em qualquer caso, a aparência final deste sistema de protecção muito boa.

As tintas intumescentes são compostas, de modo geral, por sais de fósforo, por amidos, demelamina e resinas orgânicas. Na figura 3.17 podemos ver a reacção do intumescente quando aplicado numa estrutura em condições de incêndio.



Figura 3.17 - Reacção da tinta intumescente.

3.4.4. – Vermiculite e Perlite

Pertence à família das micas, a vermiculite é uma rocha mineral que se apresenta sob a forma de lâminas finas separadas, uma das outras, por partículas microscópicas de água, apresentando um aspecto esfoliado.

A vermiculite expandida, que consiste num processo de esfoliação, isto é quando o material é elevado a altas temperaturas as partículas de água transformam-se em vapor e afastam as lamelas, a dimensão dos grãos de vermiculite aumenta 20 a 30 vezes, confinando um ar desidratado entre as suas paredes, ver figura 3.18.

A perlite é um material muito semelhante ao anterior, pois trata-se de um agregado mineral que possui a faculdade de se expandir sob a acção do calor, sendo a sua aplicação efectuada de modo semelhante à vermiculite.



Figura 3.18 – Placa de vermiculite e aplicação em spray como protecção de uma estrutura.

3.4.5. Fibras minerais

Produtos de baixa e média densidade, contendo basicamente fibras obtidas a partir de rocha basáltica (ou resíduos de alto-forno) como principal ingrediente. Estas fibras são misturadas com resíduos de alto-forno (20 a 30% do peso seco total) para criar uma mistura de baixa densidade. A protecção utiliza as propriedades isolantes da fibra para proteger o perfil metálico. Esta mistura é habitualmente projectada sobre a estrutura, ver figura 3.15.

3.4.5.1. Mantas Cerâmicas

Produtos formados a partir de fibras silico-aluminosas, muito flexíveis, presas à estrutura através da utilização de pinos de aço soldados, ver figura 3.19 e 3.20.



Figura 3.19 – Mantas compostas de fibra cerâmica.



Figura 3.20 – Vista geral e detalhes da fixação da manta em fibra cerâmica num perfil soldado, por meio de pinos.

3.4.5.2. Placas de Lã de Rocha

São painéis de baixa densidade, rígidos ou flexíveis, feitos de materiais fibrosos, aglomerados pela adição de resinas termo-endurecíveis. A matéria-prima básica utilizada na confecção das placas é o basalto. São fixadas com pinos de aço soldados à estrutura metálica, ver figura 3.21. Na figura 3.22 representa-se o esquema de fixação de placas de lã de rocha num perfil metálico.



Figura 3.21 – Mantas compostas de lã de rocha.

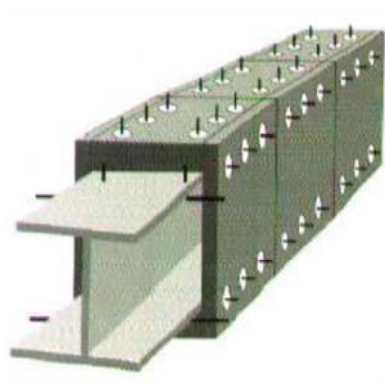


Figura 3.22 – Exemplo de fixação de placa de lã de rocha por meio de pino.

3.4.6. Argamassa por projecção

A argamassa é um produto com alto conteúdo de aglomerantes que, quando misturados com água, geram uma massa fluida que pode ser bombeada. São apresentados como produtos de baixa, média ou alta densidade, e são constituídos basicamente de gesso (aproximadamente 80% do peso seco), cimento (em materiais de média e alta densidade), resinas acrílicas e cargas inertes, tais como poliestireno expandido e celulose. Os aços não pintados apresentam a melhor condição de aderência dos materiais, dispensando a utilização de elementos de ancoragem, salvo peças de excessiva altura. Nestas, a utilização de algum tipo de ancoragem mecânica pode ser necessária, 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 alteração, liberando água. A protecção está relacionada com a massa do produto e índice de vazios. Esta reacção absorve a energia da acção do fogo, que seria conduzida para o aço. Este processo permite ao aço manter uma temperatura relativamente baixa por 20 a 30 minutos, durante a primeira hora crítica do incêndio. A mesma consideração é aplicada para placas de gesso acartonado, [3.14].

3.5. Conclusões

Um incêndio é considerado como uma acção accidental. Foram apresentadas as acções térmicas e mecânicas a considerar no projecto de uma estrutura em situação de incêndio. Relativamente às acções térmicas, apresentaram-se as várias curvas que traduzem a evolução do aquecimento do compartimento de incêndio. Para as acções mecânicas, foi apresentado a combinação de acidente a utilizar no processo de dimensionamento estrutural.

A resistência mecânica do aço diminui drasticamente com o aumento da temperatura, contudo a protecção térmica de elementos estruturais é o meio mais utilizado na protecção passiva contra incêndio.

3.6. Referências

- [3.1]. Mesquita, L.M.R.; Piloto, P.A.G.; Vaz, M.A.P.; Vila Real, P.M.M.; Ramos F.; “Comportamento de vigas em aço protegidas com tinta intumescente”; artigo apresentado nas actas do V Congresso de Construção Metálica e Mista; ISBN nº 972-98376-7-8, pp 509-520; Lisboa, Centro de congressos, 24-25 de Novembro de 2005.
- [3.2]. Vila Real, P.M.M.; “Incêndio em Estruturas Metálicas - Cálculo Estrutural”; Edições Orion; 2003.
- [3.3]. CEN ENV 1993-1-2, “Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1.2: General Rules - Structural Fire Design”, 2005.
- [3.4]. CEN ENV 1991-1-1, Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-1: General actions – Densities, self-weight and imposed loads, 2002
- [3.5]. Piloto, P.A.G.; “Análise experimental e numérica do comportamento de estruturas metálicas sujeitas à acção do fogo” – Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica; Porto; Portugal; Setembro, 2000.
- [3.6]. Lewis, K.R., “Fire Design of Steel Members”, Fire Engineering Research Report, University of Canterbury, ISSN 1173-5996, March 2000.
- [3.7]. CEN ENV 1991-1-2 “Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1.2: General actions – Actions on structures exposed to fire”; 2002.
- [3.8]. Barnett CR. BFD curve: a new empirical model for fire compartment temperatures. Fire Safety J 2002;37:437–63.
- [3.9]. Barnett CR. BFD curve: Replacing international temperature–time curves with BFD curve. Fire Safety Journal 42 (2007) 321–327.
- [3.10]. CEN ENV 1994- 1-2; “Eurocode 4 Design of composite steel and concrete structures. Part 1.2: Structural Fire Design”; November 1993.
- [3.11]. Dowling, John; Designing for fire protection; Construton news suplement, pp 14-15, 2003.
- [3.12]. Mesquita, L.M.R.; Piloto, P.A.G.; Vaz, M.A.P; Vila Real, P.M.M.; “Ensaio de resistência ao fogo de vigas em aço protegidas com tinta intumescente”; revista Mecânica Experimental, Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET); volume 12, pp 129-137; ISSN 122 922, 2006.
- [3.13]. Franssen, Jean-Marc; Zaharia, Raul; “Design of steel structures subjected to fire- Background and design guide to Eurocode 3” Les Editions de L’Université de Liège, 2005, Belgique.
- [3.14]. Pannoni, Fábio Domingos; “Coletânea do uso do aço - Princípios da protecção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio” 2ª edição, volume 2, 2004.

Capítulo 4

Análise termo-física do intumescente

| | |
|---|------|
| 4.1. Introdução | 4.3 |
| 4.2. Modelo Térmico..... | 4.4 |
| 4.3. Ensaaios normalizados..... | 4.5 |
| 4.3.1. Método de ensaio | 4.6 |
| 4.3.2. Equipamento | 4.6 |
| 4.3.2.1. Radiómetro eléctrico do calorímetro de cone..... | 4.7 |
| 4.3.2.2. Protector da radiação | 4.8 |
| 4.3.2.3. Controle da irradiação | 4.8 |
| 4.3.2.4. Dispositivo de pesagem..... | 4.8 |
| 4.3.2.5. Suporte do provete | 4.8 |
| 4.3.2.6. Estrutura auxiliar de retenção..... | 4.9 |
| 4.3.3. Materiais dimensionalmente instáveis..... | 4.9 |
| 4.3.4. Construção dos provetes e preparação | 4.10 |
| 4.3.4.1. Provetes de ensaio | 4.10 |
| 4.3.4.2. Acondicionamento dos provetes | 4.10 |
| 4.3.5. Preparação..... | 4.11 |
| 4.3.5.1. Envolvimento do provete | 4.11 |
| 4.3.5.2. Montagem do provete | 4.11 |
| 4.3.5.3. Calibração | 4.12 |
| 4.3.6. Procedimento | 4.12 |
| 4.3.7. Cálculos..... | 4.12 |
| 4.3.7.1. Cálculos para o provete em ensaio | 4.13 |
| 4.3.8. Relatório..... | 4.14 |
| 4.4. Método experimental | 4.15 |
| 4.4.1. Preparação dos ensaios..... | 4.15 |
| 4.4.2. Procedimento de ensaio..... | 4.17 |
| 4.4.3. Resultados do calorímetro de cone..... | 4.17 |
| 4.4.4. Evolução do processo térmico..... | 4.31 |
| 4.4.5. Evolução do processo de intumescente | 4.34 |
| 4.5. Conclusões | 4.38 |
| 4.6. Referências..... | 4.39 |
| ANEXOS | 4.40 |

4.1. Introdução

Neste capítulo será apresentado um conjunto de resultados experimentais com tinta intumescente, obtidos no calorímetro de cone. Estes ensaios são efectuados com uma repetibilidade para três amostras, para dois tipos diferentes de tinta e fluxo de calor. O princípio deste teste é baseado na suposição que o calor de combustão está relacionado directamente com a quantidade de oxigénio exigida para a combustão.

Durante o ensaio, os provetes no teste são ensaiados em condições de ar ambiental, submetidos a um fluxo de calor externo predeterminado. As medições essenciais são a concentração de oxigénio e a taxa do fluxo do gás de exaustão. São ainda efectuadas outras medições, tais como a taxa de perda de massa, o tempo para manter a ignição e a densidade de fumo.

Os ensaios foram realizados segundo a norma internacional ISO560. Esta norma designa-se por “Testes de Reacção ao fogo: Liberação de calor, produção do fumo e taxa da perda da massa. Parte 1: Taxa de liberação do calor (método do calorímetro do cone)”, [4.1].

O equipamento do teste é constituído por um calorímetro eléctrico radiante cónico, capaz de orientação horizontal ou vertical, dois suportes para provetes em função das duas orientações, um sistema de exaustão de gás com monitorização do oxigénio e instrumentação para medição do fluxo, ligação eléctrica com ignição por faísca, um sistema de aquisição de dados e análise, e uma célula de carga para medir a perda de massa do provete.

As placas em aço foram obtidas e cortadas pela empresa Farboque (Bragança) e as tintas intumescentes fornecidas pela empresa A e B.

Os ensaios foram realizados no INEGI que dispõe do laboratório de ensaios de reacção ao fogo do laboratório de fumo e fogo (LFF), nas instalações do INEGI.

4.2. Modelo Térmico.

O calorímetro de cone é um instrumento importante na escala laboratorial, do campo de testes ao fogo, porque permite efectuar medidas equivalentes às condições de incêndio real. Permite avaliar as propriedades do material a ser ensaiado durante um processo de reacção ao fogo. Os resultados podem ser utilizados como dados importantes na modelação matemática de fenómenos deste tipo.

O modelo térmico unidimensional utilizado quantifica a transferência de calor por condução e as perdas por radiação e convecção, ver figura 4.0, [4.2].

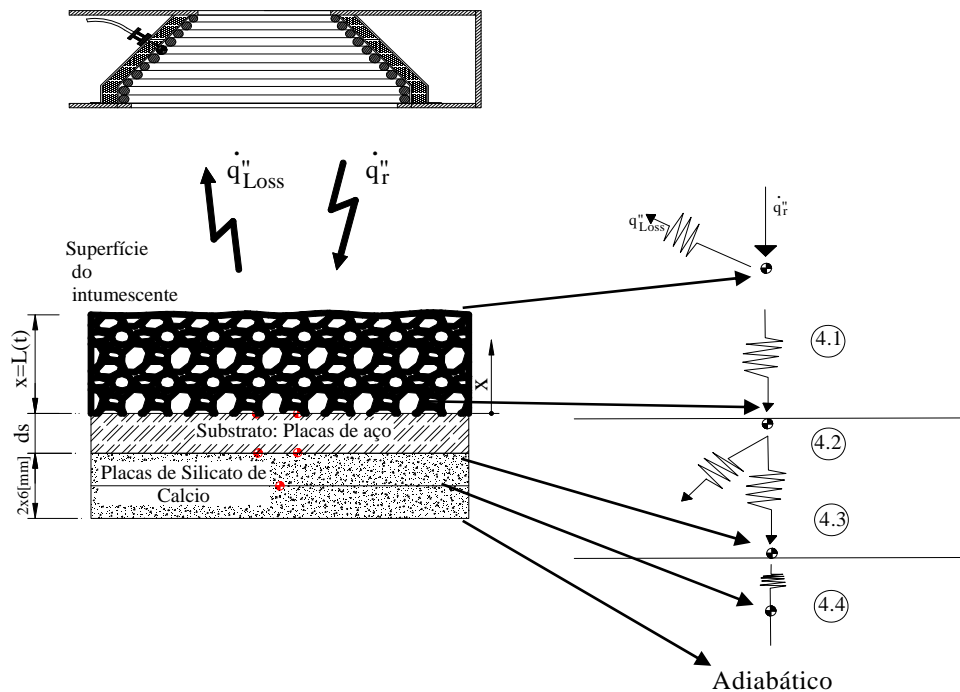


Figura 4.0. - Modelo térmico unidimensional.

O fluxo de calor que entra por condução no material de protecção é igual ao calor irradiado pela superfície do calorímetro de cone, subtraído pelo calor de perdas.

$$K \frac{\partial T}{\partial x} = q_r - q_{loss} \quad (4.1)$$

O calor que entra por condução no substrato de aço é igual ao calor retido no aço, mais o fluxo de calor que passa para o silicato de cálcio.

$$q_0 = q_{aço} + q_{SiCa} \quad (4.2)$$

O calor no substrato (aço) e o calor no silicato de cálcio, é dado pelas seguintes expressões.

$$q_{aço} = \rho \cdot cp \cdot d_s \frac{\partial T}{\partial t}_{aço} \quad (4.3)$$

$$q_{SiCa} = \rho \cdot cp \cdot d_{SiCa} \frac{\partial T}{\partial t}_{SiCa} \quad (4.4)$$

4.3. Ensaaios normalizados

Os ensaios foram realizados segundo a norma internacional ISO560. Esta norma designa-se por “Testes de Reacção ao fogo: Liberação de calor, produção do fumo e taxa da perda da massa. Parte 1: Taxa de liberação do calor (método do calorímetro do cone)”, [4.1]. Esta parte da norma especifica um método de teste, avaliando a taxa de liberação de calor de uma amostra exposta a uma acção térmica controlada na posição horizontal, com níveis definidos de irradiação aplicados por dispositivo de ignição externo.

Este método de teste é utilizado para determinar a inflamabilidade, as taxas de liberação de calor, as taxas de perda de massa, o calor de combustão efectivo, e o desenvolvimento visível do fumo dos materiais e dos produtos. A taxa de liberação de calor é determinada pela medição do consumo do oxigénio.

Esta Norma deve ser utilizada para medir e descrever a resposta de produtos dos materiais, ou conjuntos em aquecimento e chama, sob condições controladas e não deve ser utilizada para descrever ou avaliar o perigo de incêndio ou o risco de incêndio de materiais, de produtos, ou de conjuntos sob condições de fogo.

A taxa de liberação do calor é determinada pela medição do consumo de oxigénio, derivado da sua concentração e da taxa de fluxo do produto da combustão. O tempo de ignição também deverá ser medido, utilizando a definição de chama sustentada (chama sobre a superfície da amostra por períodos superiores a 10 [s]).

A taxa de liberação de calor é uma das variáveis mais importantes, em muitos casos a mais importante, para determinar o risco de um incêndio. Esta taxa de liberação de calor é a taxa total que varia em função do tempo.

Nos ensaios experimentais realizados foram utilizadas duas taxas de irradiação, de 35 [kW/m^2] e 75 [kW/m^2]. A relação entre a taxa de liberação de calor à escala reduzida e a taxa de libertação de calor à escala real, estabelece um valor de teste de irradiação que deve considerar, o facto do produto à escala real ser exposto a diferentes fluxos de calor em comparação com os ensaios à escala reduzida.

A medição de fluxo de calor em análise térmica é difícil de efectuar sem perder alguma quantidade. No entanto, é simples medir todos os produtos da combustão sem perder esses produtos e medir os níveis de oxigénio nesse fluxo. A liberação de calor pode ser determinada a partir das medições efectuadas considerando o princípio do consumo do oxigénio. Este princípio indica que, para a maioria dos combustíveis comuns, é libertada uma quantidade de calor conhecida por cada quilograma de oxigénio consumido do fluxo de ar. Esta constante varia aproximadamente $\pm 5\%$ para a maioria de combustíveis comuns, [4.3].

O calor de combustão efectivo é constante durante a combustão de provetes homogéneos, possuindo uma única forma de degradação e é menor que o valor teórico de combustão. Para os materiais que possuem mais de uma forma de degradação, materiais compósitos ou materiais não homogéneos, o calor de combustão efectivo não é necessariamente constante.

A medição simultânea da taxa de perda de massa do provete, em combinação com a taxa de libertação de calor permite determinar o calor de combustão efectivo pelo quociente entre a medição de calor libertado e o valor de perda de massa durante um período de tempo específico.

O fluxo de aquecimento é determinado pelo fluxo incidente imposto externamente pelo calorímetro no provete, no início do teste.

A taxa de liberação do calor é o calor transformado a partir do provete, por unidade de tempo.

4.3.1. Método de ensaio

O princípio deste teste é baseado no pressuposto que o calor de combustão está relacionado com a quantidade de oxigénio, exigida para a combustão. A relação entre as quantidades é, aproximadamente, $13.1 \times 10^3 [kJ]$ de calor libertado por cada quilograma do oxigénio consumido.

Os provetes são queimados em condições de ar ambiental, submetidos a um fluxo de calor externo predeterminado, que pode ser ajustado. As medições necessárias para análise térmica são a concentração de oxigénio e a taxa do fluxo do gás de exaustão. São ainda efectuadas outras medições, tais como a taxa de perda de massa, o tempo para manter a ignição e a eliminação de fumo.

4.3.2. Equipamento

O equipamento do teste é constituído por um calorímetro eléctrico radiante cónico, capaz de orientação horizontal ou vertical, dois suportes para provetes em função das duas orientações, um sistema de exaustão de gás com monitorização do oxigénio e instrumentação para medição do fluxo, ligação eléctrica com ignição por faísca, um sistema de aquisição de dados e análise, e uma célula de carga para medir a perda de massa do provete. Na figura 4.1. a) e 4.1. b) é apresentada uma representação esquemática do sistema.

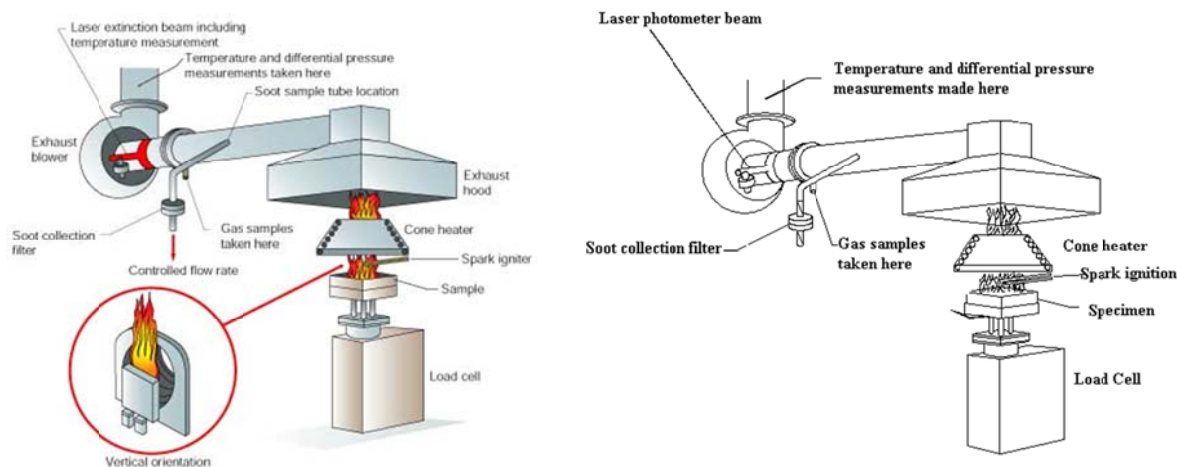


Figura 4.1. a) - Representação esquemática do calorímetro de cone.

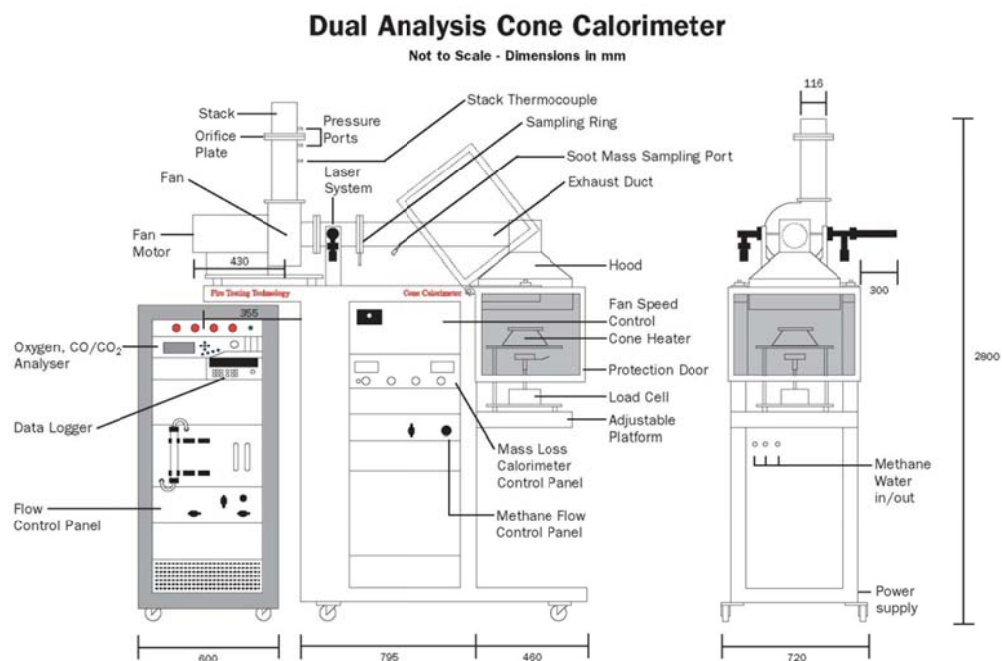


Figura 4.1. b) - Representação esquemática do calorímetro de cone.

Os componentes individuais são descritos em detalhe nas secções seguintes.

4.3.2.1. Radiómetro eléctrico do calorímetro de cone

O elemento activo do calorímetro de cone consiste numa haste de radiómetro eléctrico (1), com potência de 5000 [W], que funciona a 240 [V], ajustado firmemente na forma de um cone truncado (2), ver figura 4.2. A irradiação do calorímetro é mantida num nível ajustado por meio de um controlador de temperatura e um termopar tipo K (3) com revestimento em aço inoxidável, simetricamente colocado e em contacto com o elemento do calorímetro, mas não soldado.

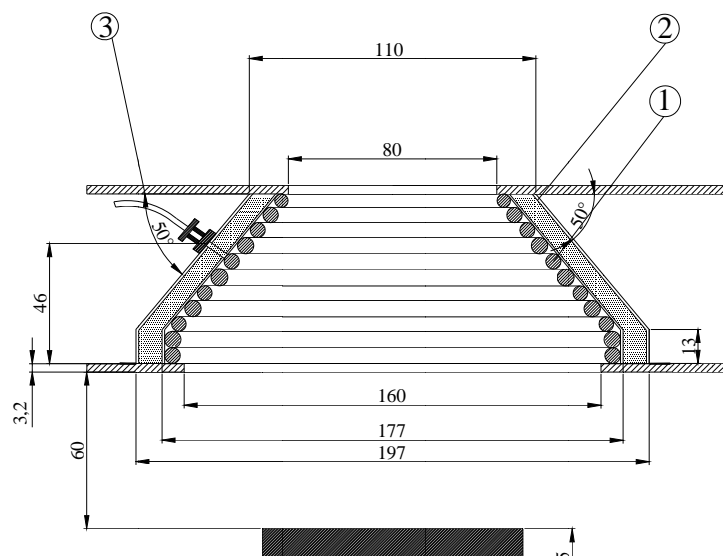


Figura 4.2. - Secção recta do sistema de aquecimento.

4.3.2.2. Protector da radiação

O calorímetro de cone possui um escudo de protecção removível para proteger o provete da irradiação antes de cada ensaio. Esse escudo será, de um material não combustível, com uma espessura total que não excede 12 [mm]. O protector poderá ser constituído por um sistema arrefecido a água e revestido com material preto, com superfície baça, com uma emissividade de $\varepsilon = 0.95 \pm 0.05$, ou através de um sistema não arrefecido, que pode ser de metal com uma superfície superior reflexiva ou cerâmico, para minimizar a transferência de calor por radiação. Esta última solução foi utilizada na realização dos ensaios.

O escudo de protecção será equipado com um punho ou outros meios apropriados para colocações e remoções rápidas. A placa baixa do calorímetro de cone será equipada com um mecanismo para mover o escudo protector na posição, ver figura 4.3.

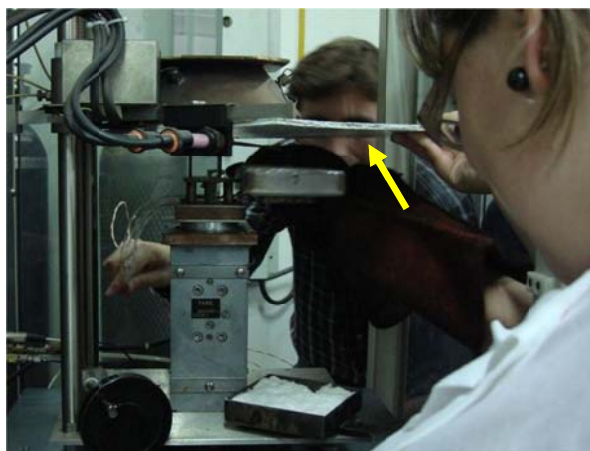


Figura 4.3 - Escudo protector da radiação.

4.3.2.3. Controle da irradiação

O sistema de controle da irradiação será ajustado correctamente de modo que mantenha a temperatura média dos pares termoelectricos do calorímetro entre $\pm 10^{\circ}\text{C}$ durante a calibração.

4.3.2.4. Dispositivo de pesagem

Este dispositivo terá uma resolução de ± 0.1 [g], medida de acordo com o procedimento da calibração. Terá como função medir a evolução da massa dos provetes, [4.1].

4.3.2.5. Suporte do provete

O suporte do provete, terá a forma de uma bandeja quadrada, com uma área de abertura quadrada 106 ± 0.1 [mm] \times 106 ± 0.1 [mm] na parte superior, e uma profundidade com 25 ± 0.1 [mm]. O suporte será construído em aço inoxidável com uma espessura 2.4 ± 0.15 [mm]. Incluirá um punho, para facilitar a inserção e remoção, e um mecanismo para assegurar a posição central do provete sob o calorímetro e proporcionar o correcto alinhamento sobre a balança do calorímetro. A parte inferior do suporte será alinhada

com uma camada de material isolante, de baixa densidade (densidade nominal $65 \text{ [kg/m}^3\text{]}$), cobertor refractário de fibra, com uma espessura pelo menos de 13 [mm] . A distância entre a superfície inferior do cone do calorímetro e a parte superior do provete será ajustados para $25 \pm 0.1 \text{ [mm]}$, à excepção dos materiais dimensionalmente instáveis, para quais a distância poderá ser $60 \pm 0.1 \text{ [mm]}$, ver figura 4.2.

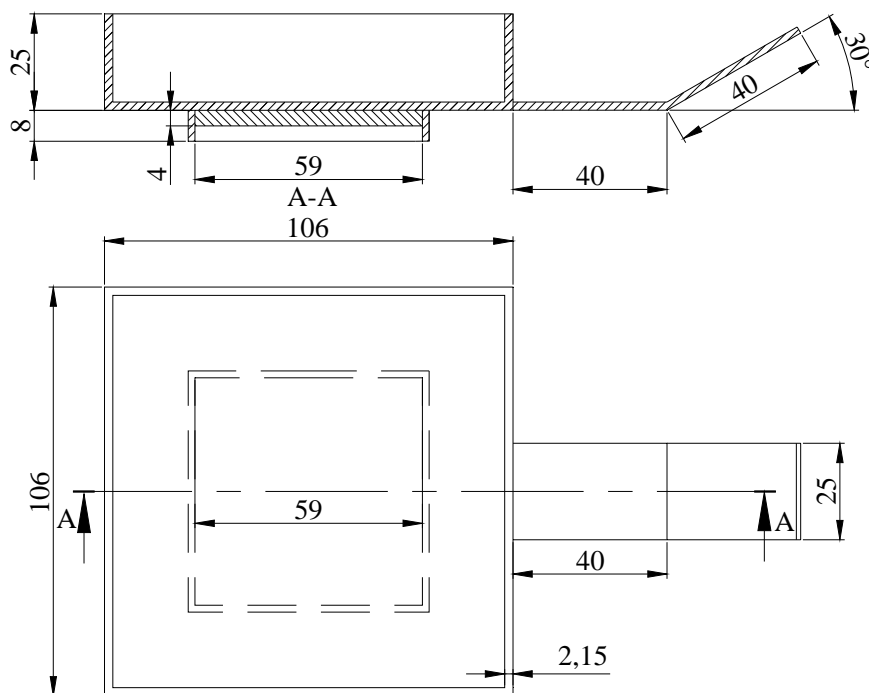


Figura 4.4 - Suporte horizontal do provete.

4.3.2.6. Estrutura auxiliar de retenção

Uma estrutura de retenção em malha de arame deve ser utilizada aquando se pretender testar provetes de intumescência na posição horizontal. Esta estrutura é construída em aço inoxidável com uma espessura $1.9 \pm 0.1 \text{ [mm]}$, na forma de uma caixa com uma dimensão interna de cada lado $111 \pm 1 \text{ [mm]}$ e uma altura $54 \pm 1 \text{ [mm]}$. A abertura para a superfície do provete será de $94.0 \pm 0.5 \text{ [mm}^2\text{]}$. Este sistema não foi utilizado durante os ensaios.

4.3.3. Materiais dimensionalmente instáveis

Todas as amostras de intumescente que reagem ou se deformam, podem entrar em contacto com o sistema a ignição eléctrica por faísca, ou em contacto com a superfície inferior do calorímetro de cone. Nestes casos as amostras deverão ser testadas com uma separação de 60 [mm] , entre a superfície inferior do calorímetro de cone e a superfície superior do provete, ver figura 4.2.

A calibração do calorímetro será executada, neste caso, com o medidor de fluxo do calor posicionado abaixo da placa. O tempo de ignição medido com uma separação de 60 [mm] não é comparável àquele medido com a separação de 25 [mm].

Outros produtos dimensionalmente instáveis, como por exemplo os produtos que modifiquem a forma durante o ensaio, deverão ser contidos. Utilizando-se quatro fios de aço. Nestes casos serão utilizados fios de metal com 1.0 ± 0.1 [mm] de diâmetro e com 350 [mm] de comprimento.

4.3.4. Construção dos provetes e preparação

A menos que especificado de outra forma, devem ser testados três provetes, para diferentes níveis de irradiação e para diferentes superfícies expostas, para garantir a possibilidade de comparar resultados.

4.3.4.1. Provetes de ensaio

Os provetes de ensaio deverão possuir uma geometria adequada ao suporte, com dimensão 100 [mm²] em área, com espessura máxima de 50 [mm], cortados de uma zona representativa do produto em análise, ver figura 4.4.

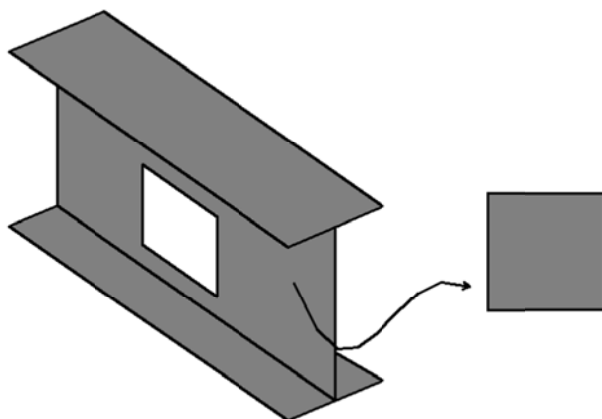


Figura 4.4 Provette de ensaio.

Estes provetes deverão ser colocados no suporte do provete, de acordo com as regras definidas em norma.

4.3.4.2. Acondicionamento dos provetes

Os provetes serão acondicionados para equilíbrio da humidade (peso constante), para uma temperatura ambiental de 23 ± 2 [°C] e uma humidade relativa de $50 \pm 5\%$, [4.4], ver figura 4.5.

Os materiais, tais como as poliamida, que exigem mais de uma semana no sistema de acondicionamento para atingir o equilíbrio podem ser testados após o acondicionamento, [4.5]. Este período será superior a uma semana, e deverá ser descrito no relatório de teste.



Figura 4.5 – Sistema de acondicionamento de provetes.

4.3.5. Preparação

4.3.5.1. Envolvimento do provete

O provete deverá ser acondicionado com uma única camada de folha de alumínio, com espessura compreendida entre 0.025 [mm] e 0.04 [mm] de espessura, utilizando o lado mais brilhante para o provete. A folha do alumínio será cortada de forma a cobrir toda parte inferior e parte da superfície superior, com um recobrimento de 3 [mm] . A folha de alumínio será cortada e deverá ser dobrada em torno dos cantos. Após o envolvimento, o provete está em condições para ser colocado no suporte e coberto pela estrutura de retenção, se for o caso, ver figura 4.6.



Figura 4.6 – Envolvimento do provete com folha de alumínio.

4.3.5.2. Montagem do provete

A parte inferior do suporte horizontal do provete será alinhada com uma camada de material de baixa densidade (massa específica $65 \text{ [kg / m}^3\text{]}$), em fibra refractária, com uma espessura de pelo menos 13 [mm] . A distância entre a superfície inferior do calorímetro de cone e a parte superior do provete será ajustada para uma distância de 60 [mm] .

O fluxómetro do calor total será do tipo de Gardon (lâmina) ou de Schmidt-Boelter (termopilha), com um intervalo de funcionamento de $100 \pm 10 [kW / m^2]$.

4.3.5.3. Calibração

A calibração da liberação de calor será executada no início de cada dia de ensaio. Utiliza-se o metano (com grau de pureza pelo menos de 99.5%) numa calibração de queima, com taxa de fluxo de calor correspondente a $5 \pm 0.5 [kW]$, baseado no calor de combustão do metano, $50.0 \times 10^3 [kJ / kg]$, utilizando um medidor de fluxo pré-calibrado.

4.3.6. Procedimento

É efectuado um ajuste da taxa de fluxo da exaustão para $0.024 \pm 0.002 [m^3 / s]$, que nas condições de temperatura ambiente corresponde a um fluxo de massa de $30 [g / s]$.

Quando o provete estiver pronto para ensaiar, remove-se antecipadamente o suporte vazio do provete. Coloca-se o provete, posicionado no suporte apropriado no lugar, dando-se início à aquisição de dados. Os intervalos de aquisição de dados deverão ser inferiores ou iguais a 5 [s]. O suporte deve estar inicialmente à temperatura ambiente.

Na fase seguinte é efectuado a ligação do programador de ignição. No caso de ser utilizada ignição externa, a vela de ignição deve ser deslocada para a posição adequada e efectuada a ligação do interruptor de ignição.

A menos que especificado para o material em análise ou para o comportamento normalizado, devem ser efectuados três ensaios para as mesmas condições. A média das leituras da taxa de liberação do calor ($t=180 [s]$) será comparada para os três ensaios. Se qualquer das leituras médias diferir mais de 10% da média das três leituras, será realizada uma nova série de três ensaios. No caso de ser necessário utilizar nova série de ensaios, deverá ser efectuada a média para seis leituras.

4.3.7. Cálculos

O processo de calibração foi efectuado diariamente, utilizando metano para verificar o funcionamento apropriado do instrumento e para compensar pequenas alterações na determinação do fluxo. Uma calibração superior a 5% significa funcionamento deficiente do equipamento. A constante de calibração, C, deve ser determinada a partir da equação básica da liberação de calor, ver equação 4.1.

$$\dot{q}_b = (12.54 \times 10^3) (1.10) C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \frac{(X_{O_2}^0 - X_{O_2})}{1.105 - 1.5X_{O_2}} \Leftrightarrow C = \frac{\dot{q}_b}{(12.54 \times 10^3)(1.10) \sqrt{\frac{T_e}{\Delta P}}} \frac{1.105 - 1.5X_{O_2}}{(X_{O_2}^0 - X_{O_2})} \quad (4.1)$$

No segundo membro da equação corresponde ao fluxo de calor libertado pelo metano, \dot{q}_b [kW], o factor 12.54×10^3 representa o quociente entre o calor de combustão líquido e o valor de oxigénio estequiométrico por massa de combustível $\Delta h_c / r_0$.

Na equação 4.1, T_e representa a temperatura absoluta do gás no medidor de orifício [K], X_{o_2} representa a leitura do analisador de oxigénio, fracção molar [-], $X_{o_2}^0$ representa o valor inicial da leitura do analisador de oxigénio [-], ΔP representa o diferencial de pressão do medidor de orifício [Pa], para o metano e o valor 1.10 corresponde ao quociente do peso molecular entre o oxigénio e o ar.

4.3.7.1. Cálculos para o provete em ensaio

4.3.7.1.1. Liberação de calor

A diferença de tempo provocada pelo analisador de oxigénio é introduzida na seguinte equação, tendo em consideração a leitura do analisador de oxigénio, antes da correcção de tempo do atraso $X_{o_2}^1$ e o tempo de atraso de analisador do oxigénio t_d [s].

$$X_{o_2}(t) = X_{o_2}^1(t + t_d) \quad (4.2)$$

A taxa de liberação do calor, $\dot{q}(t)$, é determinada pela expressão 4.3.

$$\dot{q}(t) = \frac{\Delta h_c}{r_0} 1.10 C \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \frac{(X_{o_2}^0 - X_{o_2}(t))}{1.105 - 1.5 X_{o_2}(t)} \quad [kW] \quad (4.3)$$

O valor de $\Delta h_c / r_0$ é ajustado para o provete de teste, 13.1×10^3 [kJ / kg], a menos que seja conhecido um valor diferente para o material a ensaiar.

A taxa de libertação do calor por unidade de área, $\dot{q}''(t)$, é determinada em função da área inicialmente exposta $A_s = 0.01 [m^2]$, no caso da estrutura de retenção não ser utilizada.

$$\dot{q}''(t) = \frac{\dot{q}(t)}{A_s} \quad [kW / m^2] \quad (4.4)$$

A liberação de calor total durante a combustão, q'' , é determinada pela soma dos valores determinados em cada intervalo de tempo, como enunciado na equação 4.5.

$$q'' = \sum \dot{q}_i''(t) \Delta t \quad [kJ / m^2] \quad (4.5)$$

4.3.7.1.2. Perda de massa e calor de combustão efectivo

A taxa de perda de massa requerida, $-\dot{m}$, deve ser determinada para cada intervalo de tempo, utilizando cinco pontos para a diferenciação numérica. As equações 4.6 devem ser utilizadas para aproximação numérica.

$$\begin{aligned}
 -[\dot{m}]_{i=0} &= \frac{25m_0 - 48m_1 + 36m_2 - 16m_3 + 3m_4}{12\Delta t} \\
 -[\dot{m}]_{i=1} &= \frac{3m_0 + 10m_1 - 18m_2 + 6m_3 - m_4}{12\Delta t} \\
 -[\dot{m}]_{1 < i < n-1} &= \frac{-m_{i-2} + 8m_{i-1} - 8m_{i+1} + m_{i+2}}{12\Delta t} \\
 -[\dot{m}]_{i=n-1} &= \frac{-3m_n - 10m_{n-1} + 18m_{n-2} - 6m_{n-3} + m_{n-4}}{12\Delta t} \\
 -[\dot{m}]_{i=n} &= \frac{-25m_n + 48m_{n-1} - 36m_{n-2} + 16m_{n-3} - 3m_{n-4}}{12\Delta t}
 \end{aligned} \tag{4.6}$$

O calor de combustão efectivo médio pode ser determinado em função da variação de massa, equação 4.7, utilizando o somatório, durante a realização do teste, onde m_s , representa a massa do provete a quando da presença de chama e m_f , representa a massa do provete no final do ensaio.

$$\Delta h_{c,eff} = \frac{\sum_i \dot{q}_i(t) \Delta t}{m_s - m_f} [MJ / kg] \tag{4.7}$$

A mesma quantidade pode ser determinada em função do tempo, utilizando os valores instantâneos da taxa de libertação e o valor da perda de massa, $-\dot{m}$.

$$\Delta h_{c,eff}(t) = \frac{\dot{q}_i(t)}{-\dot{m}} [MJ / kg] \tag{4.8}$$

4.3.8. Relatório

O relatório deverá conter a informação sobre código de identificação do provete, fabricante, data do teste, composição ou identificação genérica, espessura do provete e informação sobre a massa do provete. Deverá ser complementado com informação da análise térmica nomeadamente: fluxo de aquecimento, taxa de fluxo do sistema da exaustão, curva da taxa de libertação do calor (por a área de unidade), valor máximo \dot{q}'' e valor médio \dot{q}'' , para os primeiros 60, 180 e 300 s após a ignição. O calor total liberado pelo provete, o valor de média, $\Delta h_{c,eff}$, para o teste inteiro, a curva de $\Delta h_{c,eff}$, massa que permanece após o teste e a perda de massa do provete, também deverão fazer parte deste documento, ver anexo I.

4.4. Método experimental

4.4.1. Preparação dos ensaios

Os ensaios foram programados e preparados a partir de placas de aço quadradas, com 100 [mm] de lado, com dois grupos distintos da espessura, 4 e 6 [mm]. Foram utilizados quatro fios de termopar soldados, na placa para efectuar a medição das temperaturas na superfície superior e inferior de cada provete. Na figura 4.7 estão representados alguns dos provetes ensaiados sem protecção e um exemplo de provete colocado no suporte.



Figura 4.7 – Preparação das placas de aço.

Foram utilizadas duas pinturas intumescentes diferentes, intumescente A, fornecida pela empresa A e a intumescente B, fornecida pela empresa B.

A tinta intumescente foi aplicada na superfície superior das placas de aço. Foram testadas com três espessuras distintas de protecção 500, 1500 e 2500 [μm]. Os valores da espessura foram controlados em 16 pontos de medição, utilizando o medidor de espessura, Elcometer 456, como representado em figura 4.8.

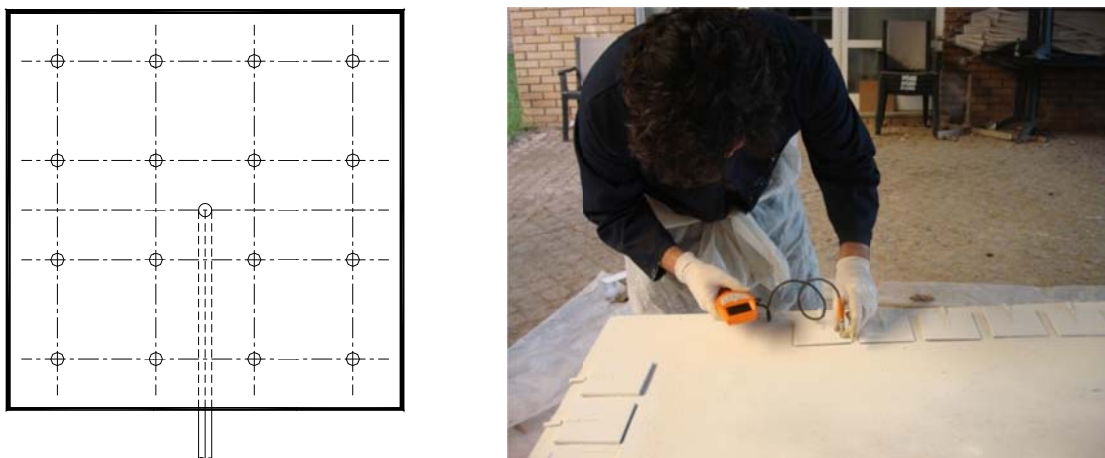


Figura 4.8 - Pontos de medição controlo de espessura.

Para identificação de cada provete, foi utilizado uma referência tendo em consideração as diferentes características de cada ensaio. Primeiro é identificada a tinta intumescente a ser testada (A ou B), seguida pela identificação do fluxo de calor utilizado (35 ou 75 [W/m²]), seguida pela espessura do substrato ou placa (4 ou 6 [mm]), seguida pela espessura inicial do intumescente (0.5, 1.5 ou 2.5 [mm]) e, finalmente, o número do ensaio (1,2 ou 3).

Os provetes foram pesados antes e depois da pintura do intumescente. A espessura de protecção foi medida e controlada em cada fase de aplicação, tendo originado os seguintes valores médios, tabelas 4.1 e 4.2.

| Referencia do provete | | | | | Massa inicial [g] | Massa final [g] | Massa de tinta [g] | espessura media \bar{X} [μm] | σ (SD) [μm] | Valor Máximo [μm] | Valor Mínimo [μm] |
|-----------------------|----|---|-----|---|----------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------|----------------------|----------------------|
| A | 35 | 4 | 0.5 | 1 | 363,77 | 373,56 | 9,79 | 575 | 47,3 | 647 | 468 |
| A | 35 | 4 | 0.5 | 2 | 363,82 | 373,35 | 9,53 | 574 | 56,4 | 672 | 464 |
| A | 35 | 4 | 0.5 | 3 | 364,54 | 373,19 | 8,65 | 528 | 60,4 | 624 | 427 |
| A | 35 | 4 | 1.5 | 1 | 361,10 | 387,74 | 26,64 | 1670 | 107 | 1860 | 1500 |
| A | 35 | 4 | 1.5 | 2 | 362,17 | 388,06 | 25,89 | 1610 | 72,2 | 1750 | 1500 |
| A | 35 | 4 | 1.5 | 3 | 361,38 | 385,42 | 24,04 | 1450 | 84,9 | 1580 | 1280 |
| A | 35 | 4 | 2.5 | 1 | 362,81 | 403,37 | 40,56 | 2530 | 149 | 2710 | 2200 |
| A | 35 | 4 | 2.5 | 2 | 365,81 | 407,89 | 42,08 | 2590 | 122 | 2790 | 2310 |
| A | 35 | 4 | 2.5 | 3 | 363,49 | 415,12 | 51,63 | 2590 | 121 | 2730 | 2349 |
| A | 75 | 4 | 0.5 | 1 | 363,46 | 372,34 | 8,88 | 549 | 60,3 | 639 | 425 |
| A | 75 | 4 | 0.5 | 2 | 363,58 | 373,20 | 9,62 | 581 | 61,1 | 691 | 473 |
| A | 75 | 4 | 0.5 | 3 | 368,44 | 377,85 | 9,41 | 582 | 48,6 | 657 | 466 |
| A | 75 | 4 | 1.5 | 1 | 369,59 | 394,82 | 25,23 | 1510 | 83,7 | 1660 | 1390 |
| A | 75 | 4 | 1.5 | 2 | 371,11 | 396,24 | 25,13 | 1530 | 87,7 | 1720 | 1380 |
| A | 75 | 4 | 1.5 | 3 | 364,87 | 391,13 | 26,26 | 1620 | 98,7 | 1820 | 1450 |
| A | 75 | 4 | 2.5 | 1 | 366,97 | 407,71 | 40,74 | 2590 | 122 | 2760 | 2330 |
| A | 75 | 4 | 2.5 | 2 | 365,11 | 404,90 | 39,79 | 2590 | 134 | 2800 | 2350 |
| A | 75 | 4 | 2.5 | 3 | 370,60 | 410,77 | 40,17 | 2530 | 167 | 2810 | 2260 |
| A | 35 | 6 | 0.5 | 1 | 527,37 | 535,05 | 7,68 | 476 | 33,1 | 518 | 403 |
| A | 35 | 6 | 2.5 | 1 | 526,65 | 565,71 | 39,06 | 2420 | 150 | 2610 | 2130 |
| A | 75 | 6 | 0.5 | 1 | 522,90 | 530,58 | 7,68 | 494 | 33,9 | 561 | 434 |
| A | 75 | 6 | 2.5 | 1 | 525,71 | 564,89 | 39,18 | 2490 | 112 | 2670 | 2290 |

Tabela 4.1 - Apresentação das diferentes massas e da espessura de tinta A, para cada ensaio.

| Referencia do provete | | | | | Massa inicial [g] | Massa final [g] | Massa de tinta [g] | Espessura media \bar{X} [μm] | σ (SD) [μm] | Valor Máximo [μm] | Valor Mínimo [μm] |
|-----------------------|----|---|-----|---|----------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------|----------------------|----------------------|
| B | 35 | 4 | 0.5 | 1 | 366,73 | 375,36 | 8,63 | 571 | 41,6 | 665 | 506 |
| B | 35 | 4 | 0.5 | 2 | 365,38 | 374,88 | 9,5 | 626 | 38,6 | 698 | 563 |
| B | 35 | 4 | 0.5 | 3 | 364,95 | 373,95 | 9 | 603 | 49,5 | 710 | 481 |
| B | 35 | 4 | 1.5 | 1 | 365,63 | 390,10 | 24,47 | 1510 | 70,2 | 1610 | 1400 |
| B | 35 | 4 | 1.5 | 2 | 365,82 | 391,42 | 25,6 | 1570 | 64,1 | 1670 | 1470 |
| B | 35 | 4 | 1.5 | 3 | 364,80 | 390,67 | 25,87 | 1580 | 66,5 | 1710 | 1470 |
| B | 35 | 4 | 2.5 | 1 | 365,49 | 409,85 | 44,36 | 2640 | 90,9 | 2750 | 2460 |
| B | 35 | 4 | 2.5 | 2 | 366,29 | 409,12 | 42,83 | 2560 | 89,0 | 2660 | 2400 |
| B | 35 | 4 | 2.5 | 3 | 366,40 | 407,77 | 41,37 | 2510 | 85,7 | 2660 | 2350 |
| B | 75 | 4 | 0.5 | 1 | 362,92 | 371,94 | 9,02 | 581 | 35,9 | 653 | 518 |
| B | 75 | 4 | 0.5 | 2 | 366,00 | 375,97 | 9,97 | 662 | 53,9 | 817 | 599 |
| B | 75 | 4 | 0.5 | 3 | 367,53 | 377,53 | 10 | 631 | 31,2 | 707 | 583 |
| B | 75 | 4 | 1.5 | 1 | 366,27 | 390,71 | 24,44 | 1530 | 79,5 | 1720 | 1440 |
| B | 75 | 4 | 1.5 | 2 | 364,69 | 389,63 | 24,94 | 1550 | 67,8 | 1690 | 1450 |
| B | 75 | 4 | 1.5 | 3 | 359,09 | 384,05 | 24,96 | 1560 | 74,9 | 1740 | 1450 |
| B | 75 | 4 | 2.5 | 1 | 359,79 | 399,66 | 39,87 | 2520 | 211 | 2840 | 2170 |
| B | 75 | 4 | 2.5 | 2 | 364,28 | 405,30 | 41,02 | 2520 | 91,4 | 2690 | 2350 |
| B | 75 | 4 | 2.5 | 3 | 364,80 | 404,97 | 40,17 | 2490 | 126 | 2760 | 2340 |
| B | 35 | 6 | 0.5 | 1 | 528,60 | 537,10 | 8,5 | 533 | 56,7 | 663 | 431 |
| B | 35 | 6 | 2.5 | 1 | 528,91 | 571,74 | 42,83 | 2570 | 105 | 2720 | 2360 |
| B | 75 | 6 | 0.5 | 1 | 525,47 | 534,86 | 9,39 | 607 | 65,9 | 799 | 528 |
| B | 75 | 6 | 2.5 | 1 | 529,04 | 570,00 | 40,96 | 2610 | 75,8 | 2760 | 2500 |

Tabela 4.2 - Apresentação das diferentes massas e da espessura de tinta B, para cada ensaio.

4.4.2. Procedimento de ensaio

Os ensaios decorreram no laboratório de ensaios de reacção ao fogo, INEGI, após a preparação dos provetes e acondicionamento com 7 dias, [4.6]. A superfície inferior dos provetes foi protegida com alumínio, e os provetes colocados no calorímetro de cone, da forma apresentada na Figura 4.9.

Os provetes foram ensaiados sem a grelha de protecção e fio do retentor. A distância entre a superfície da amostra e o calorímetro de cone foi de 60 [mm], de acordo com norma ISO 5660-1, [4.1]. Todos os ensaios foram gravados com uma câmara digital, com processamento de imagem em Matlab. O desenvolvimento do intumescente foi medido em função do tempo, ver figura 4.10.

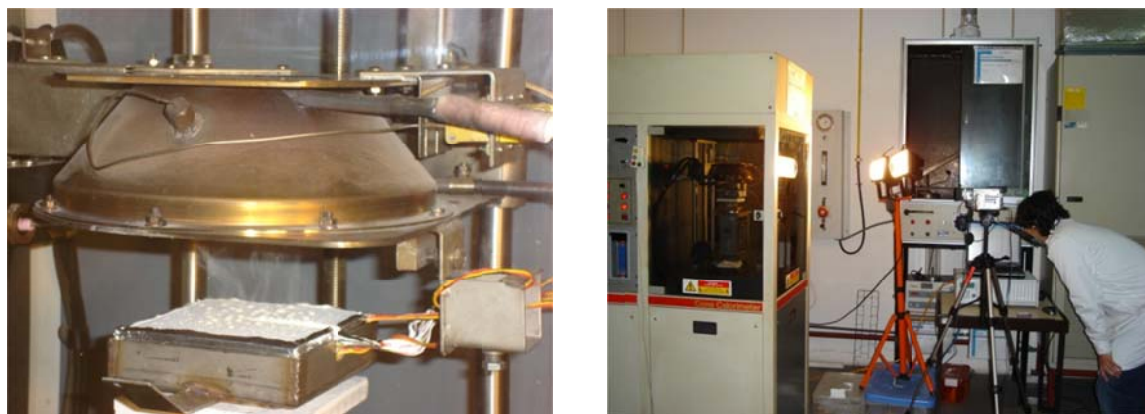


Figura 4.9 – Preparação do ensaio no calorímetro de cone.



Figura 4.10 – Sistema de registo de imagem utilizado nos ensaios.

4.4.3. Resultados do calorímetro de cone

Nesta secção serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados no calorímetro de cone. Serão apresentados os valores da perda de massa, área específica de extinção de fumo, taxa de libertação de calor, calor de combustão efectivo e analisador de oxigénio com sensor paramagnético de alta estabilidade de monóxido e dióxido de carbono.

Foi necessário acrescentar uma nova referência para alguns ensaios, relacionado com factores imprevistos decorridos durante a realização dos ensaios, tais como, falta de energia eléctrica e falha do sistema de aquisição de dados.

Os primeiro casos ensaiados, foram o conjunto de ensaios com 0.5[mm] de espessura de protecção e com um fluxo de calor de 35 [kW/m²], para dois tipos diferentes de tinta. Este conjunto engloba três ensaios. Referenciados por, A3540513, A3540523 e A3540532 para a tinta do tipo A, e por B354051, B354052 e B354053, relativos à tinta do tipo B.

Na figura 4.11 está representada a evolução da massa durante os ensaios, tomando como referência inicial, o valor da massa m_0 . Na figura 4.12 estão representados os valores determinados para a área específica da extinção de fumo. A figura 4.13 apresenta valores de taxa de liberação de calor, (\dot{q}). A figura 4.14 apresenta valores para o calor de combustão efectivo, ($\Delta h_{c,eff}$). As figura 4.15 e figura 4.16 apresentam valores de libertação de monóxido e dióxido de carbono.

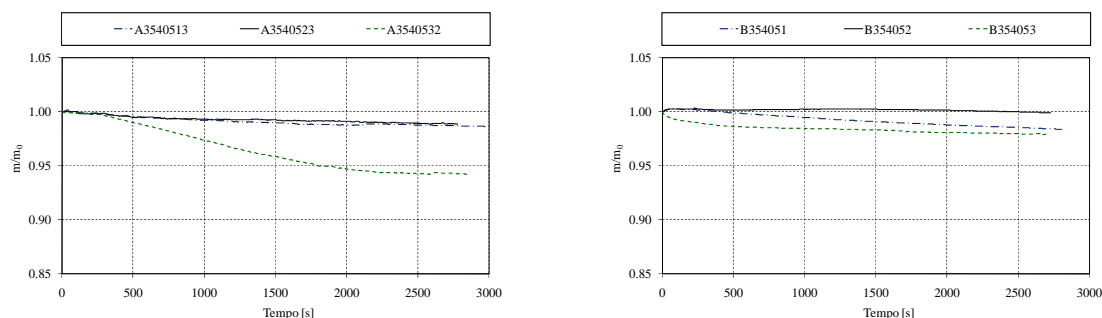


Figura 4.11 - Valor da perda de massa, no conjunto de ensaio A35405 e B35405.

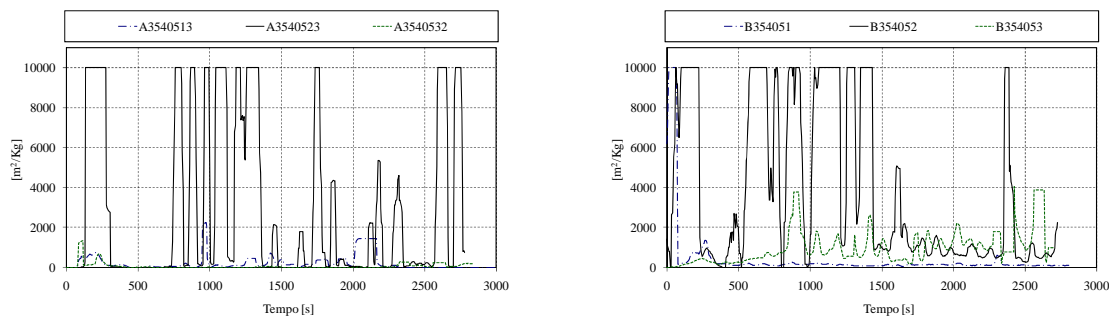


Figura 4.12 - Valores da (SEA) Área específica da extinção de fumo no ensaio A35405 e B35405.

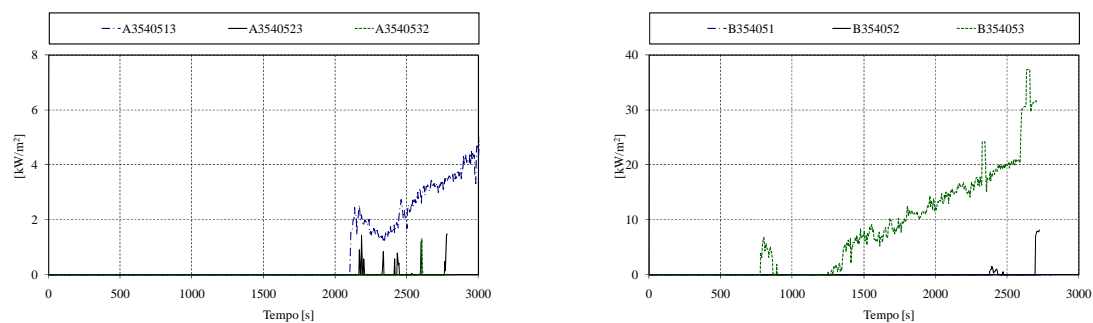


Figura 4.13 - Valores de (\dot{q}) taxa de libertação de calor, no conjunto de ensaio A35405 e B35405.

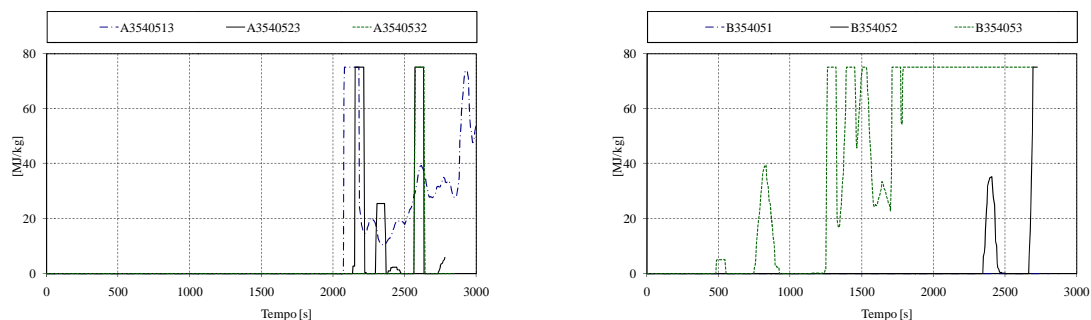


Figura 4.14 -Valores de ($\Delta h_{c,eff}$) calor de combustão efectivo, no conjunto de ensaio A35405 e B35405.

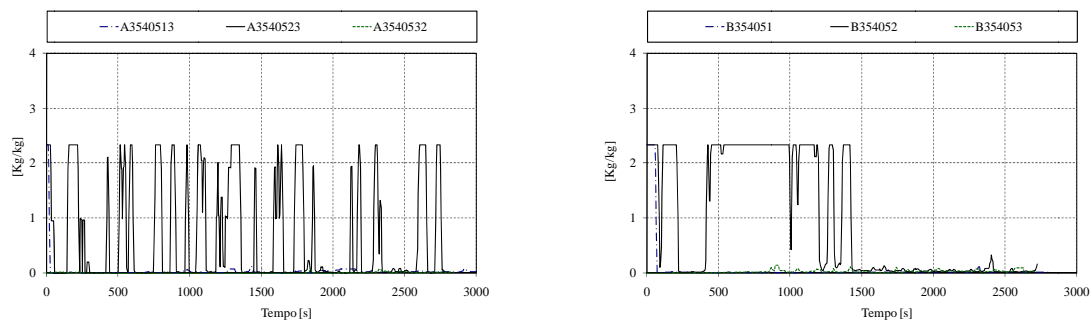


Figura 4.15 -Valores de monóxido de carbono, no conjunto de ensaio A35405 e B35405.

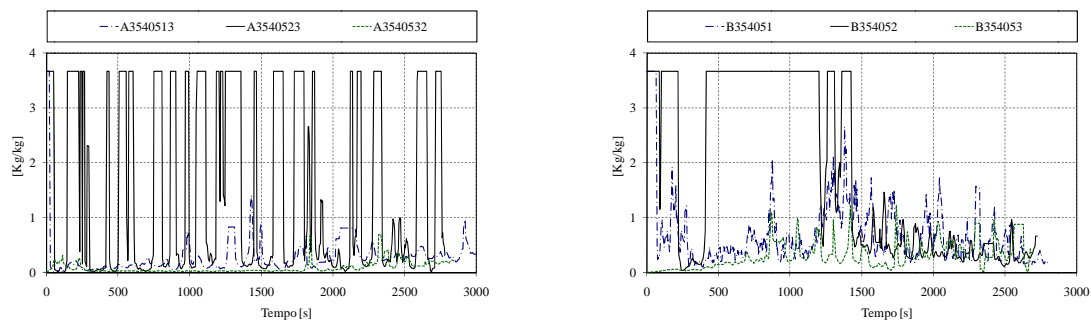


Figura 4.16 -Valores de dióxido de carbono, no conjunto de ensaio A35405 e B35405.

No que diz respeito ao valor de perda de massa no ensaio relativo à tinta A, verifica-se que os dois primeiros ensaios, A3540513 e A3540523, têm um comportamento linear muito semelhante. O ensaio A3540532 apresenta uma maior perda de massa, contudo no decorrer do ensaio notou-se que a tinta parecia não ter reagido de forma homogénea, ver figuras 4.17 e 4.18.



Figura 4.17 e 4.18 - Ensaio A3540532 e B354053.

Em relação ao valor da perda de massa da tinta B, no ensaio B354051 não se verifica perda de massa significativa, comparativamente com os restantes, B354052 e B354053.

Alguns resultados, como a área específica da extinção de fumo são determinados indirectamente, apresentam valores instáveis, pelo motivo de apresentarem perda de massa muito reduzida.

Nota-se que neste conjunto, a tinta B liberta maiores valores de dióxido de carbono, possui maior área específica de extinção de fumo e maior quantidade de taxa de libertação de calor.

A tabela 4.3 apresenta um resumo para o valor de massa residual (m/m_0), para o conjunto de ensaios com 0.5 [mm] de espessura de protecção e para um fluxo de calor de 35 [kW/m²], para instantes de tempo correspondentes aos 900 segundos (15 minutos) e 1800 segundos (30 minutos).

| Referência do ensaio | 900 segundos (15 minutos) | 1800 segundos (30 minutos) |
|----------------------|------------------------------|-------------------------------|
| A3540513 | 0.992 | 0.988 |
| A3540523 | 0.993 | 0.992 |
| A3540532 | 0.977 | 0.950 |
| B354051 | 0.996 | 0.989 |
| B354052 | 1.000 | 1.000 |
| B354053 | 0.985 | 0.981 |

Tabela 4.3 – Comparação de massa residual para os dois tipos de tinta com 0.5 [mm] de protecção e sujeitas a um fluxo de 35 [kW/m²].

Para a série de ensaios realizados com uma espessura de 1.5 [mm] e com um fluxo de calor de 35 [kW/m²], são apresentados os resultados para os dois tipos diferentes de tinta. Este conjunto engloba três ensaios que são designados por, A354151, A354152 e A354153 para a tinta do tipo A, e mais três ensaios designados por B354151, B354152 e B354153, para a tinta do tipo B.

Na figura 4.19 está representada a evolução da massa durante os ensaios, tomando como referência o valor inicial m_0 de cada tinta aplicada nas diferentes amostras. A figura 4.20 apresenta os valores para a área específica da extinção de fumo. A figura 4.21 apresenta valores de taxa de libertação de calor, (\dot{q}). A figura 4.22 apresenta valores de calor de combustão efectivo, ($\Delta h_{c,eff}$). As figura 4.23 e figura 4.24 apresentam valores de libertação de monóxido e dióxido de carbono.

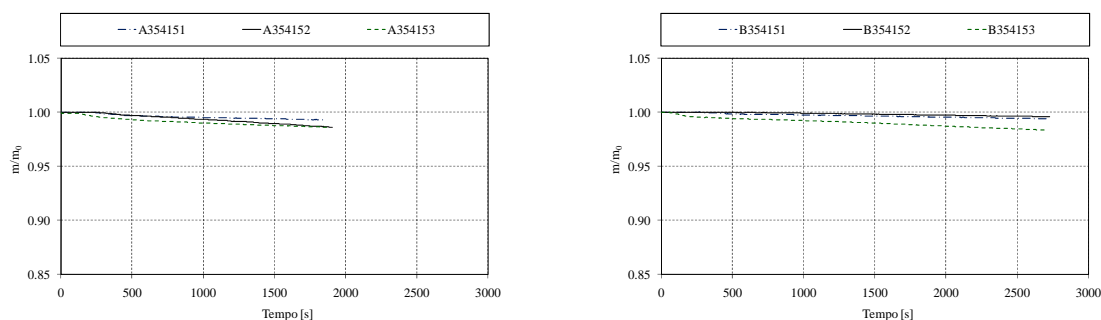


Figura 4.19 - Valor da perda de massa, no conjunto de ensaios A35415 e B35415.

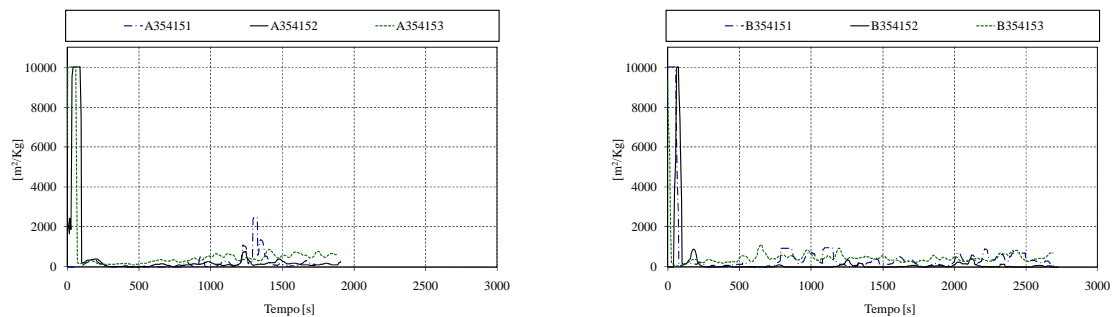


Figura 4.20 - Valores da (SEA) Área específica da extinção de fumo, no ensaio A35415 e B35415.

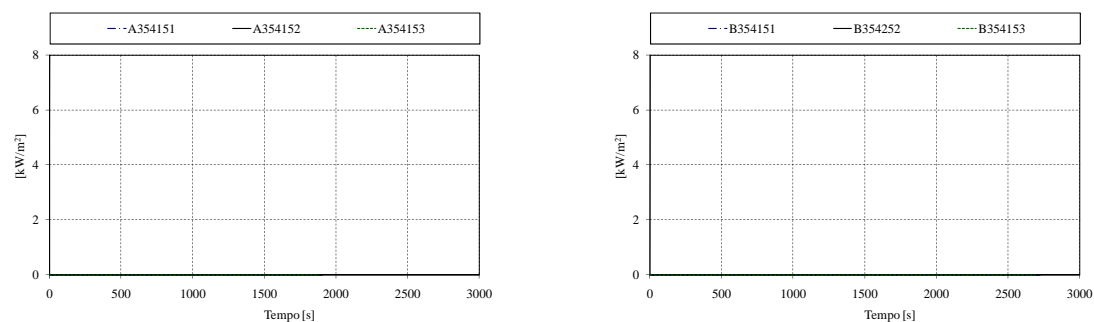


Figura 4.21 - Valores de (\dot{q}) taxa de liberação de calor, no conjunto de ensaio A35415 e B35415.

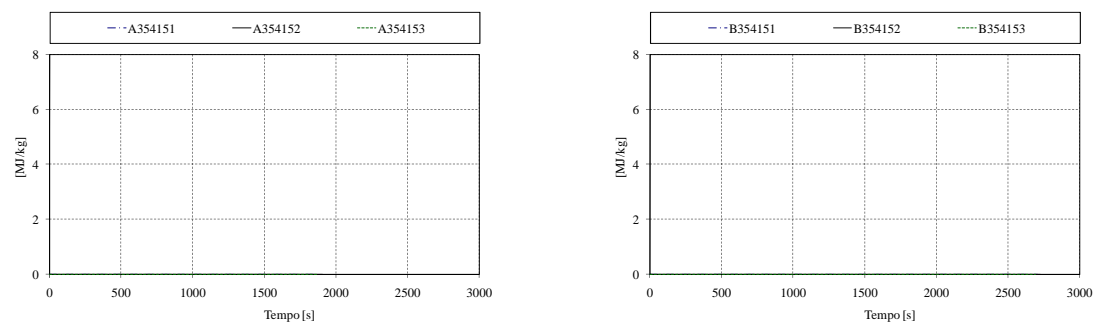


Figura 4.22 - Valores de ($\Delta h_{c,eff}$) calor de combustão efectivo, no conjunto de ensaio A35415 e B35415.

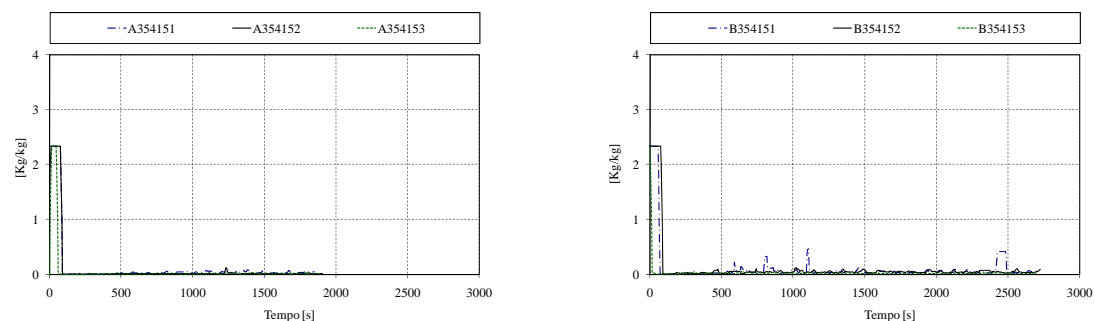


Figura 4.23 - Valores de monóxido de carbono, no conjunto de ensaio A35415 e B35415.

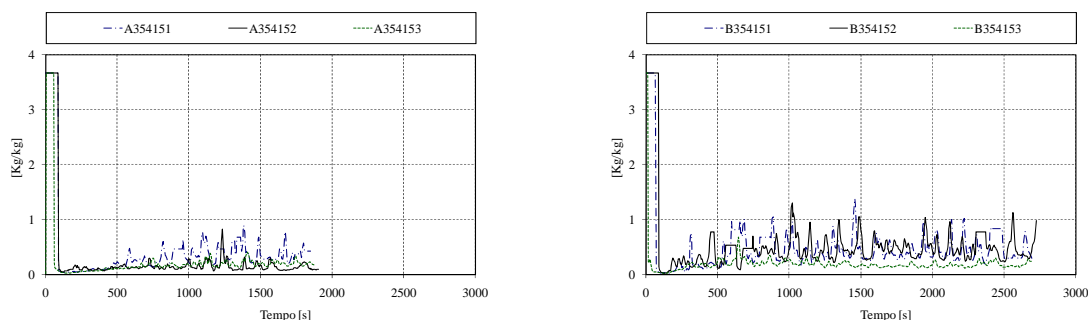


Figura 4.24 - Valores de dióxido de carbono, no conjunto de ensaio A35415 e B35415.

Nesta série de ensaios com uma espessura de 1.5 [mm], verifica-se que a perda de massa é linear e apresenta valores muito semelhantes entre si. Nota-se que, para a tinta do tipo B, a produção de dióxido de carbono é mais significativa, e ainda que nesta série, o calor de combustão efectivo e a taxa de libertação de calor apresentam valores nulos.

A tabela 4.4 apresenta um resumo para o valor da massa residual (m/m_0), para o conjunto de ensaios com 1.5 [mm] de espessura de protecção e sujeito a fluxo de calor de 35 [kW/m²], para instantes de tempo correspondentes aos 900 segundos (15 minutos) e 1800 segundos (30 minutos).

| Referência do ensaio | 900 segundos (15 minutos) | 1800 segundos (30 minutos) |
|----------------------|------------------------------|-------------------------------|
| A354151 | 0.996 | 0.993 |
| A354152 | 0.995 | 0.987 |
| A354153 | 0.991 | 0.987 |
| B354151 | 0.998 | 0.996 |
| B354152 | 1.000 | 0.998 |
| B354153 | 0.993 | 0.989 |

Tabela 4.4 – Comparação de massa residual para a 2ª série de ensaios e para dois instantes.

A última série de ensaios realizados com o fluxo de calor de 35 [kW/m²], diz respeito a provetes com 2,5[mm] de espessura de protecção e para os mesmo dois tipos diferentes de tinta. Esta série engloba três ensaios que são designados por, A3542512, A354252 e A3542532 para a tinta tipo A e três ensaios designados por B354251, B354252 e B354253 para a tinta do tipo B.

Na figura 4.25 está representada a evolução da massa durante os ensaios, tomando como referência o valor inicial, m_0 , de cada tinta aplicada nos diferentes provetes. A figura 4.26 apresenta os valores para a área específica de extinção de fumo. A figura 4.27 apresenta valores de taxa de libertação de calor, (\dot{q}). A figura 4.28 apresenta os valores de calor de combustão efectivo, ($\Delta h_{c,eff}$). As figura 4.29 e figura 4.30 apresentam valores de libertação de monóxido e dióxido de carbono.

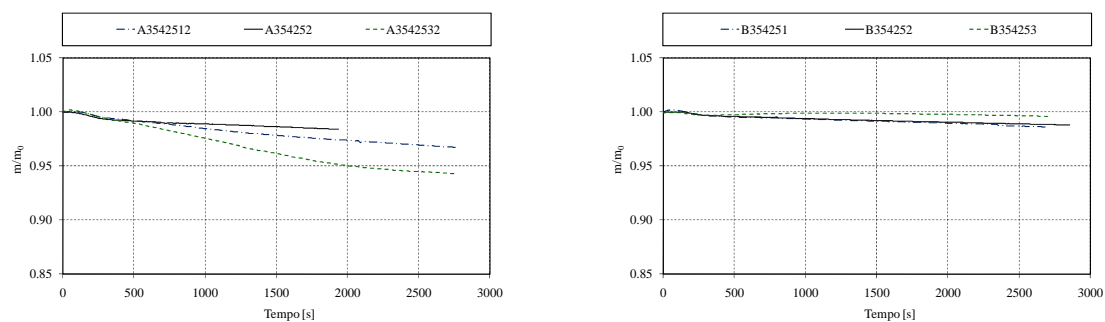


Figura 4.25 - Valor da perda de massa, no conjunto de ensaios A35425 e B35425.

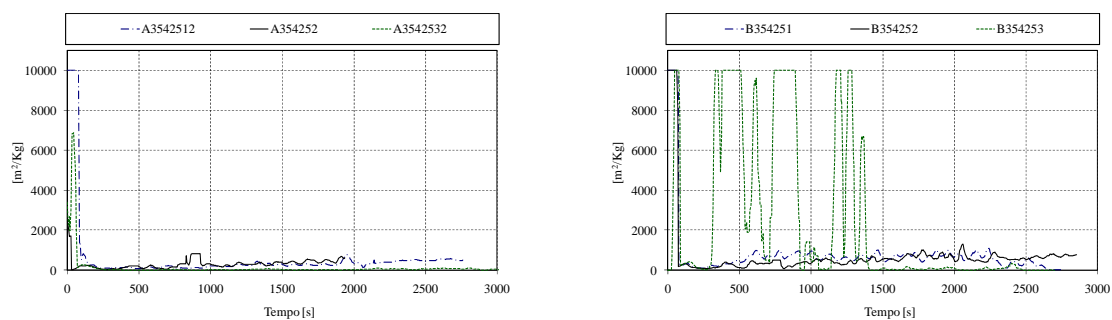


Figura 4.26 - Valores da (SEA) Área específica da extinção de fumo, no ensaio A35425 e B35425.

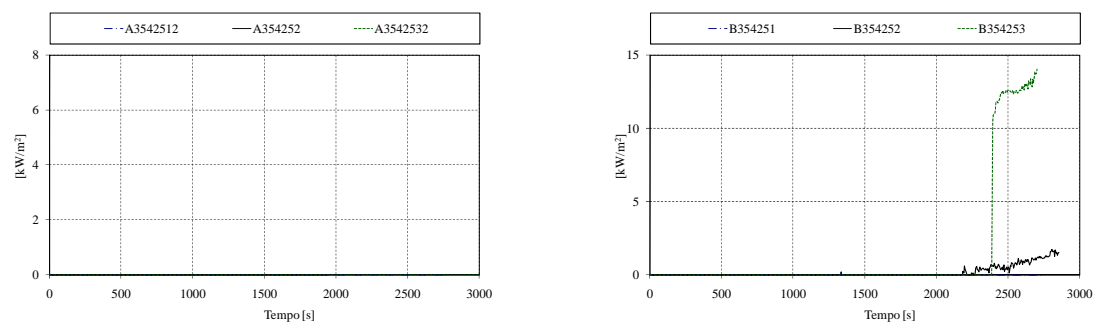


Figura 4.27 - Valores de (\dot{q}) taxa de liberação de calor, no conjunto de ensaio A35425 e B35415.

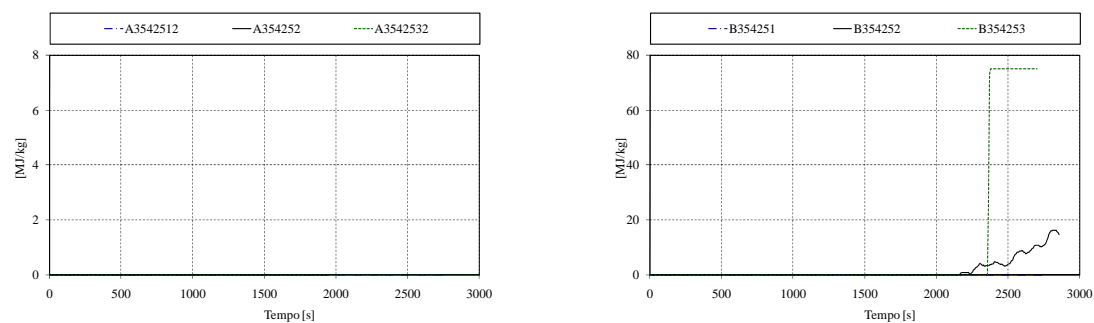


Figura 4.28 - Valores de $(\Delta h_{c,eff})$ calor de combustão efectivo, no conjunto de ensaio A35425 e B35425.

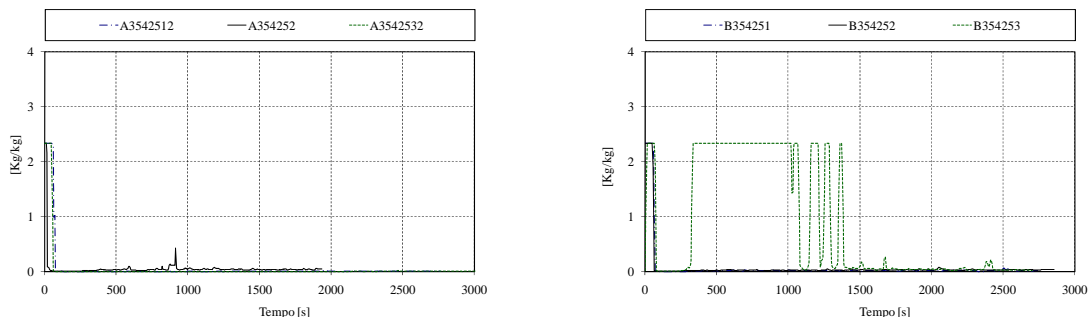


Figura 4.29 - Valores de monóxido de carbono, no conjunto de ensaio A35425 e B35425.

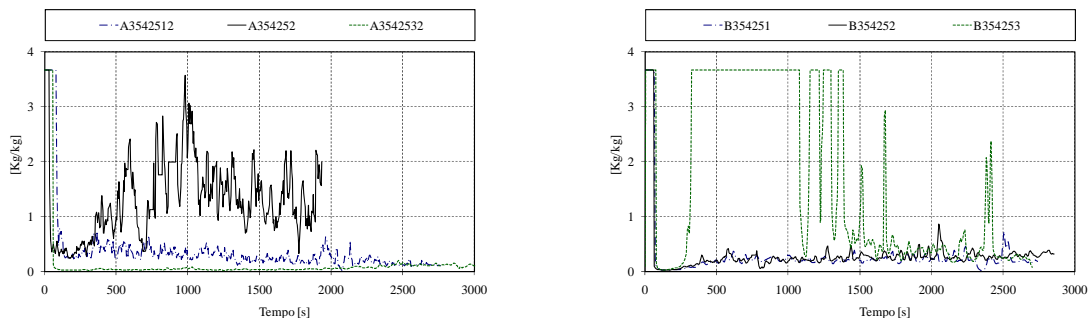


Figura 4.30 - Valores de dióxido de carbono, no conjunto de ensaio A35425 e B35425.

Analisando os resultados da tinta do tipo A, verifica-se uma maior perda de massa nos provetes A3542512 e A3542532 pelo facto de que foram ensaiados sem o devido condicionamento, já o segundo ensaio, A354252 teve uma perda de massa menor quando comparando com os anteriores. Na tinta do tipo B, a perda de massa decorreu de forma linear para dois dos ensaios, apenas o último ensaio da série teve um comportamento distinto, não perdendo massa significativa.

Na fase inicial desta série verifica-se uma elevada produção de monóxido e de dióxido de carbono, motivo pelo qual teve início a intumescência. De realçar a produção de dióxido de carbono do ensaio A354252 em que se produziram valores muito elevados. O ensaio B354253, apresenta valores diferentes dos restantes, em termos de monóxido e dióxido de carbono e restantes parâmetros, motivado pela reduzida perda de massa.

A tabela 4.5 apresenta um resumo para o valor de massa residual (m/m_0), para o conjunto de ensaios com 2.5 [mm] de espessura de protecção e um fluxo de calor de 35 [kW/m²], para instantes de tempo correspondentes aos 900 segundos (15 minutos) e 1800 segundos (30 minutos).

| Referência do ensaio | 900 segundos (15 minutos) | 1800 segundos (30 minutos) |
|----------------------|------------------------------|-------------------------------|
| A3542512 | 0.988 | 0.976 |
| A354252 | 0.990 | 0.985 |
| A3542532 | 0.981 | 0.954 |
| B354251 | 0.994 | 0.991 |
| B354252 | 0.996 | 0.991 |
| B354253 | 0.999 | 0.998 |

Tabela 4.5 – Comparação de massa residual para a 3ª série de ensaios e para dois instantes.

Os primeiros ensaios a serem realizados para o fluxo de calor de $75 \text{ [kW/m}^2\text{]}$, foram os provetes com 0.5 [mm] de espessura de protecção, para dois tipos diferentes de tinta. Este conjunto engloba três ensaios que são designados por, A754051, A754052 e A754053 para a tinta do tipo A e três ensaios designados por B754051, B754052 e B754053 para a tinta do tipo B.

Na figura 4.31 está representado a evolução da massa durante os ensaios, tomando como referência o valor inicial m_0 de cada tinta aplicada nas diferentes amostras. A figura 4.32 apresenta os valores área específica da extinção de fumo. A figura 4.33 apresenta valores de taxa de libertação de calor, (\dot{q}) . A figura 4.34 apresente valores de calor de combustão efectivo, $(\Delta h_{c,eff})$. As figuras 4.35 e 4.36 apresentam valores de libertação de monóxido e dióxido de carbono.

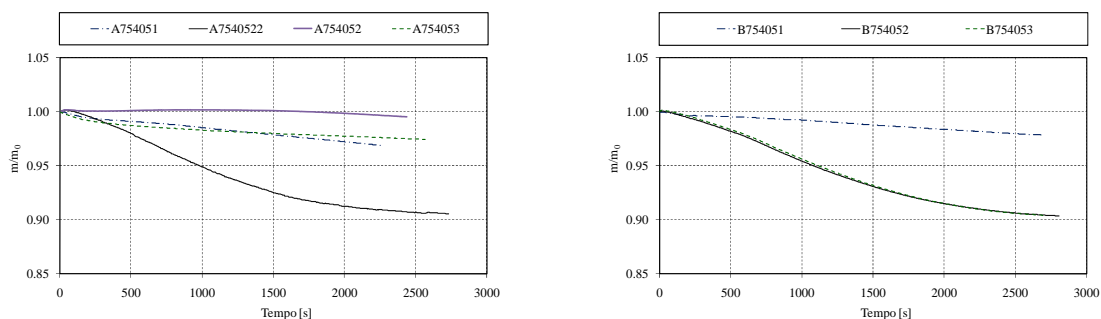


Figura 4.31 - Valor da perda de massa, no conjunto de ensaios A75405 e B75405.

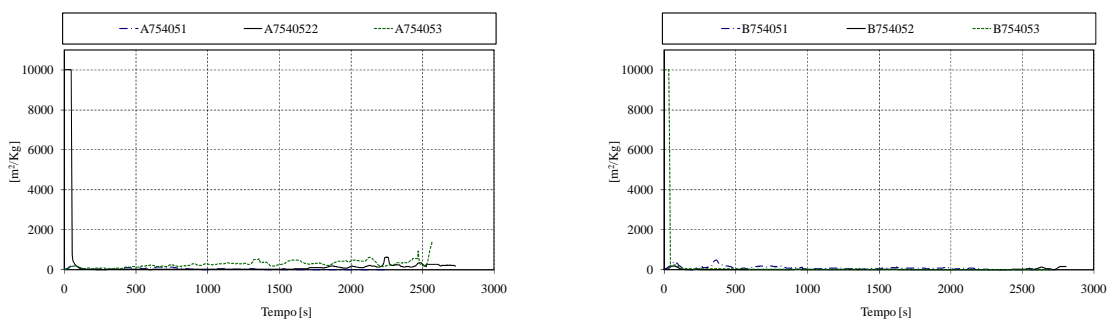


Figura 4.32 - Valores da (SEA) Área específica da extinção de fumo, no conjunto de ensaios A75405 e B75405.

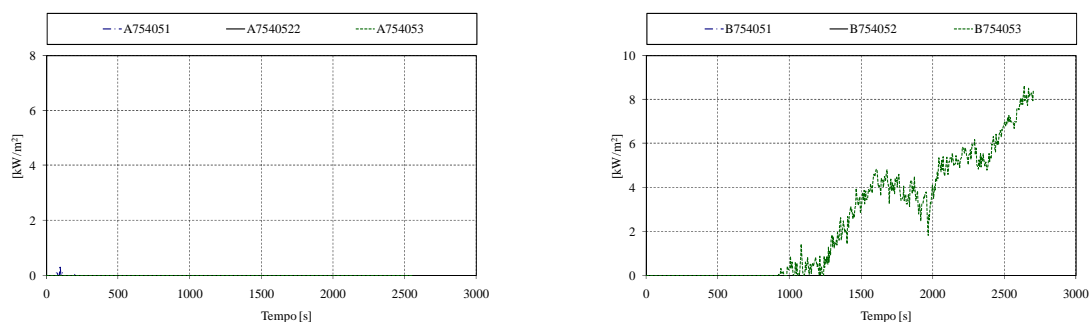


Figura 4.33 - Valores de (\dot{q}) taxa de libertação de calor, no conjunto de ensaios A75405 e B75405.

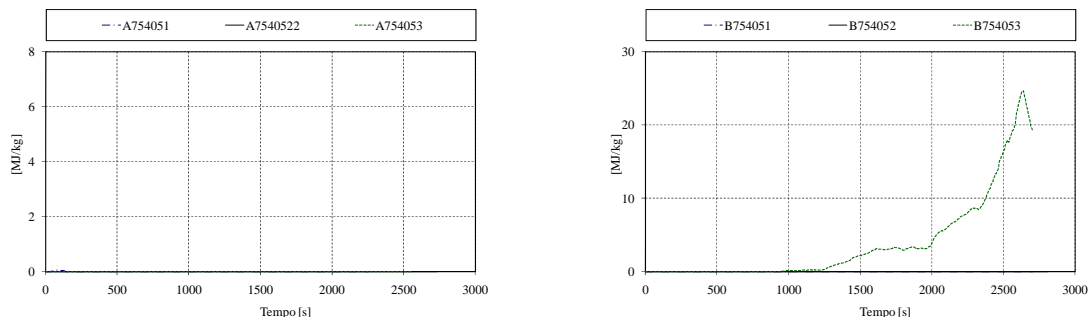


Figura 4.34 - Valores de ($\Delta h_{c,eff}$) calor de combustão efectivo, no conjunto de ensaios A75405 e B75405.

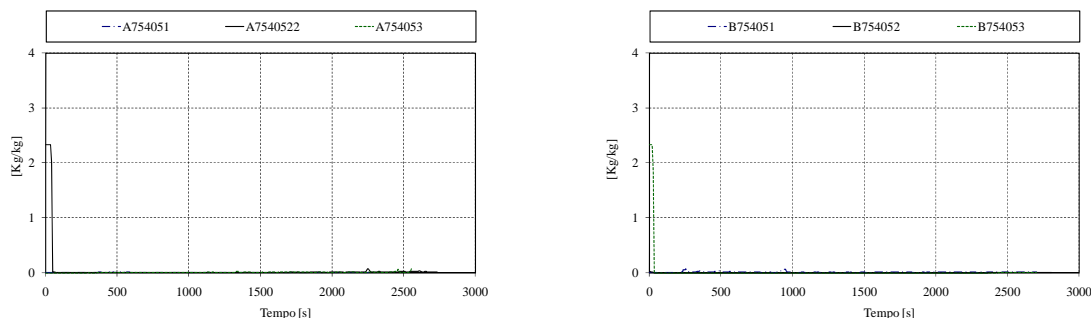


Figura 4.35 - Valores de monóxido de carbono, no conjunto de ensaios A75405 e B75405.

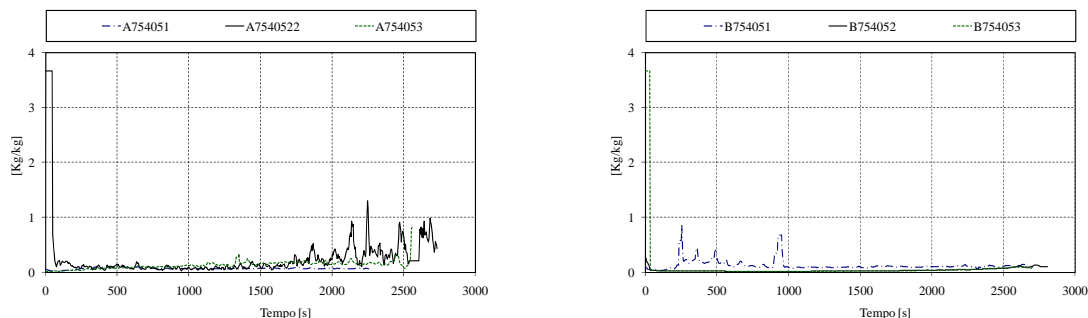


Figura 4.36 - Valores de dióxido de carbono, no conjunto de ensaios A75405 e B75405.

Na série de ensaios realizados com a tinta A, verificou-se um comportamento muito semelhante para o primeiro e terceiro ensaio, já o segundo teve de ser repetido (A754052) pelo simples facto de a variação de massa apresentar comportamento não normalizado, contudo o ensaio repetido, (A7540522), teve comportamento diferente das restantes, pelo facto de não ter sofrido condicionamento.

Na série de ensaios realizados com a tinta B, verifica-se um comportamento anormal em relação ao ensaio B754051, pelo facto de se ter verificado uma descolagem, pela influência das várias demãos, já os restantes ensaio tiveram um resultado esperado e muito semelhantes.

Nota-se na fase inicial dos seis ensaios uma elevada produção de monóxido e de dióxido de carbono, relacionado com o início do processo de intumescência.

A tinta do tipo A, durante o ensaio, teve valores mais elevados, ao nível de dióxido de carbono. No entanto na fase inicial, a tinta do tipo B, teve uma produção mais elevado, tendo a diminuir e estabilizar.

A tabela 4.6 apresenta um resumo para o valor da massa residual (m/m_0), para o conjunto com 0.5 [mm] de espessura de protecção para um fluxo de calor de 75 [kW/m²], nos instantes 900 segundos (15 minutos) e 1800 segundos (30 minutos).

| Referência do ensaio | 900 segundos (15 minutos) | 1800 segundos (30 minutos) |
|----------------------|------------------------------|-------------------------------|
| A754051 | 0.987 | 0.975 |
| A754052 | 1.00 | 1.00 |
| A754053 | 0.983 | 0.978 |
| B754051 | 0.992 | 0.985 |
| B754052 | 0.960 | 0.920 |
| B754053 | 0.962 | 0.921 |

Tabela 4.6 – Comparação de massa residual para a 1ª série de ensaios e para dois instantes.

Os seguintes ensaios a serem realizados para o fluxo de calor de $75 \text{ [kW/m}^2\text{]}$, foram os provetes com 1.5 [mm] de espessura de protecção, para dois tipos diferentes de tinta. Este conjunto engloba uma série de três ensaios que são designados por, A754151, A754152 e A754153 para a tinta do tipo A, e uma série de três ensaios designados por B754151, B754152 e B754153 para a tinta do tipo B.

Na figura 4.37 está representado a evolução da massa durante os ensaios tomando como referencia o valor inicial m_0 de cada tinta aplicada nas diferentes amostras. A figura 4.38 apresenta os valores área específica da extinção de fumo. A figura 4.39 apresenta valores de taxa de liberação de calor, (\dot{q}) . A figura 4.40 apresente valores de calor de combustão efectivo, $(\Delta h_{c,eff})$. A as figuras 4.41 e 4.42 apresentam valores de libertação de monóxido e dióxido de carbono.

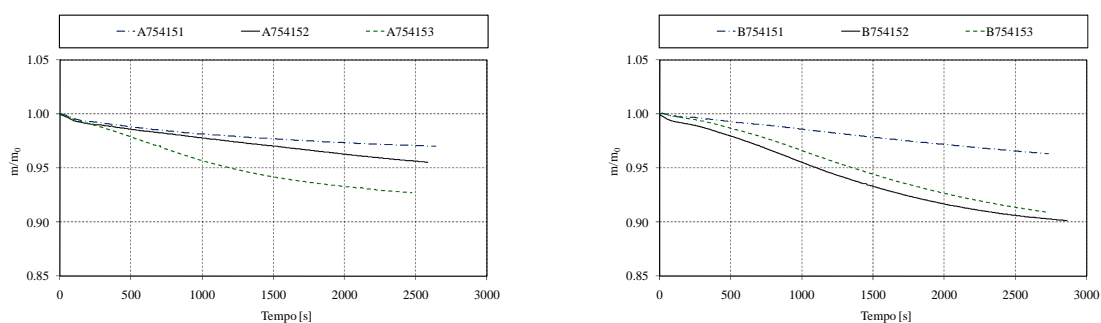
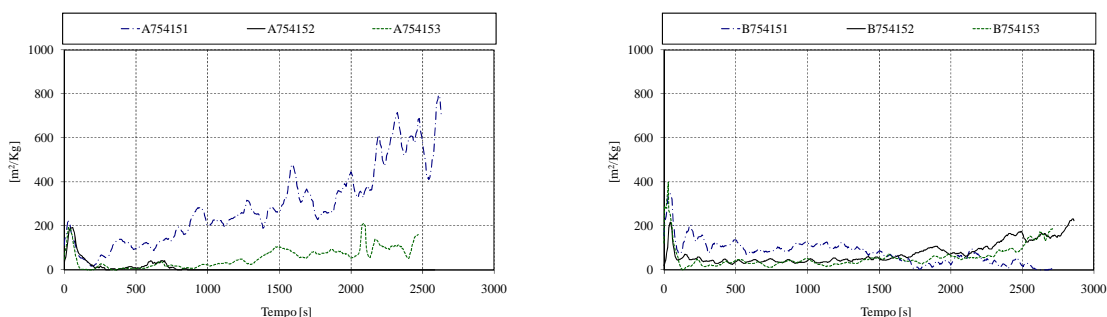


Figura 4.37 - Valor da perda de massa, no conjunto de ensaios A75415 e B75415.



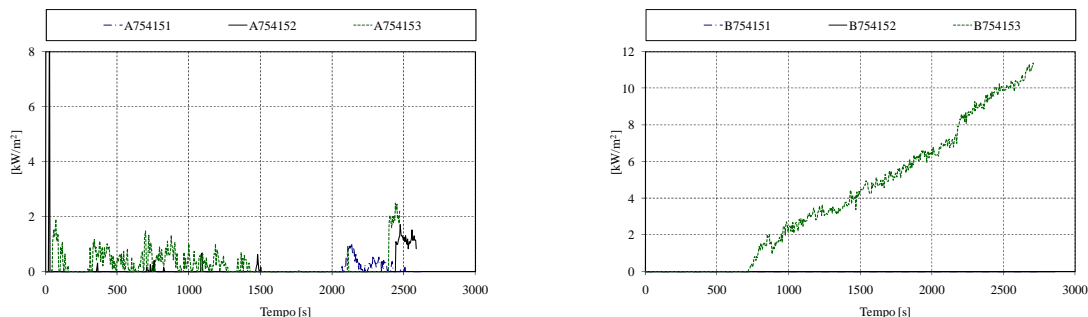


Figura 4.39 - Valores de (\dot{q}) taxa de liberação de calor, no conjunto de ensaios A75415 e B75415.

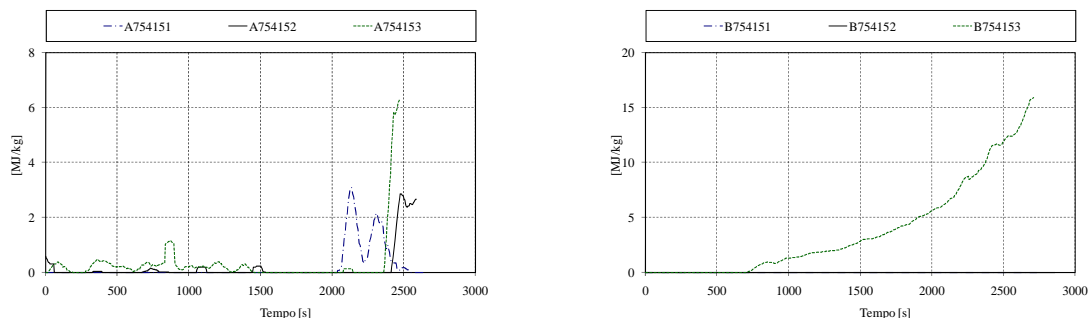


Figura 4.40 - Valores de ($\Delta h_{c,eff}$) calor de combustão efectivo, no conjunto de ensaios A75415 e B75415.

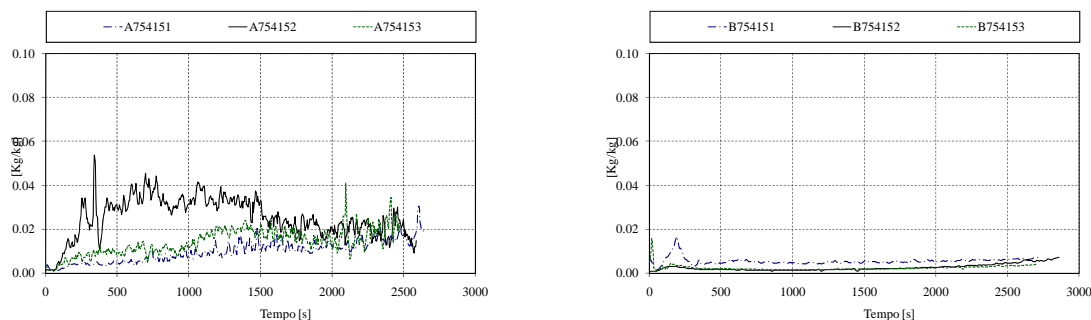


Figura 4.41 - Valores de monóxido de carbono, no conjunto de ensaios A75415 e B75415.

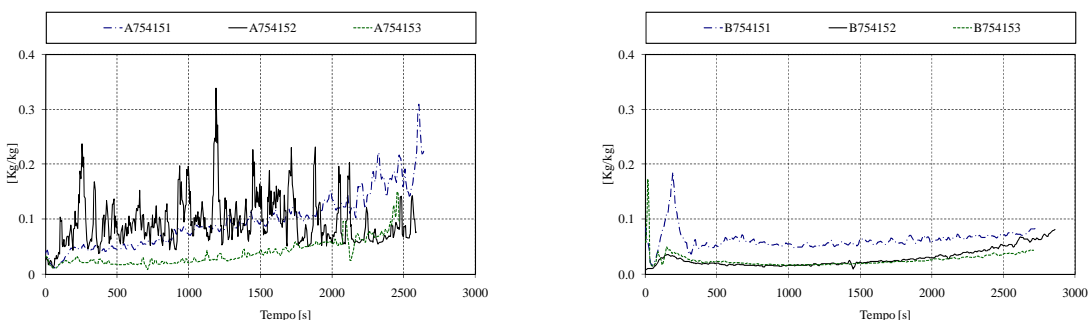


Figura 4.42 - Valores de dióxido de carbono, no conjunto de ensaios A75415 e B75415.

A perda de massa no primeiro ensaio da tinta B apresenta uma perda de massa linear enquanto os restantes ensaios têm um comportamento muito semelhante. No ensaio B754153, o provete ficou colocado um pouco inclinado na base do cone, não assentando bem na base de silicato.

Para esta potência e espessura de protecção, é realçar o facto de a tinta do tipo A apresentar valores mais elevados de libertação de monóxido e dióxido de carbono, comparando com os resultados do tipo B, embora na fase inicial do ensaio, os valores de dióxido de carbono sejam substancialmente maiores na tinta tipo B.

A tabela 4.7 apresenta um resumo para o valor da massa residual (m/m_0), para o conjunto com 1,5 [mm] de espessura de protecção e para um fluxo de calor de 75 [kW/m²] aos instantes 900 segundos (15 minutos) e 1800 segundos (30 minutos)

| Referência do ensaio | 900 segundos (15 minutos) | 1800 segundos (30 minutos) |
|----------------------|------------------------------|-------------------------------|
| A754151 | 0.983 | 0.975 |
| A754152 | 0.979 | 0.966 |
| A754153 | 0.961 | 0.936 |
| B754151 | 0.988 | 0.975 |
| B754152 | 0.960 | 0.922 |
| B754153 | 0.971 | 0.933 |

Tabela 4.7 – Comparação de massa residual para a 2ª série de ensaios e para dois instantes.

Para finalizar os ensaios, apresentam-se os ensaios realizados com um fluxo de calor de 75 [kW/m²], para provetes com 2.5 [mm] de espessura de protecção, para os mesmos dois tipos de tinta. Este conjunto engloba três ensaios que são designados por, A754251, A754252 e A754253 para a tinta do tipo A e os ensaios designados por B754251, B754252 e B754253 para a tinta do tipo B.

Na figura 4.43 está representado a evolução da massa durante os ensaios tomando como referência o valor inicial m_0 de cada tinta aplicada nas diferentes amostras. A figura 4.44 apresenta os valores de área específica de extinção de fumo. A figura 4.45 apresenta valores de taxa de liberação de calor, (\dot{q}). A figura 4.46 apresente valores de calor de combustão efectivo, ($\Delta h_{c,eff}$). As figuras 4.47 e 4.48 apresentam valores de monóxido e dióxido de carbono.

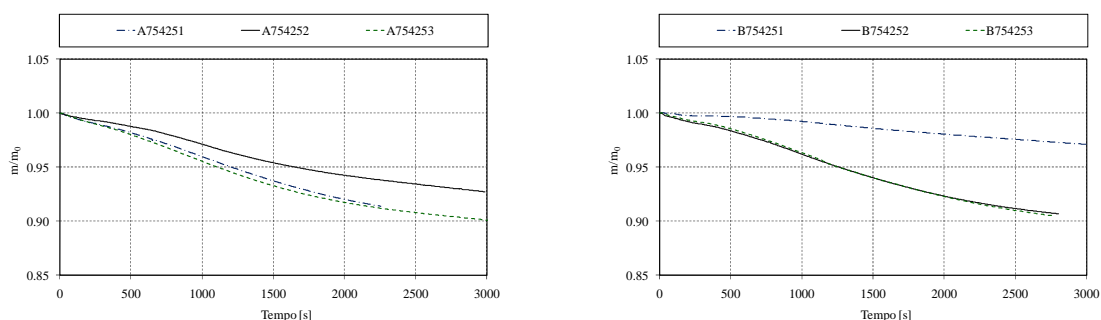


Figura 4.43 - Valor da perda de massa, no conjunto de ensaios A75425e B75425.

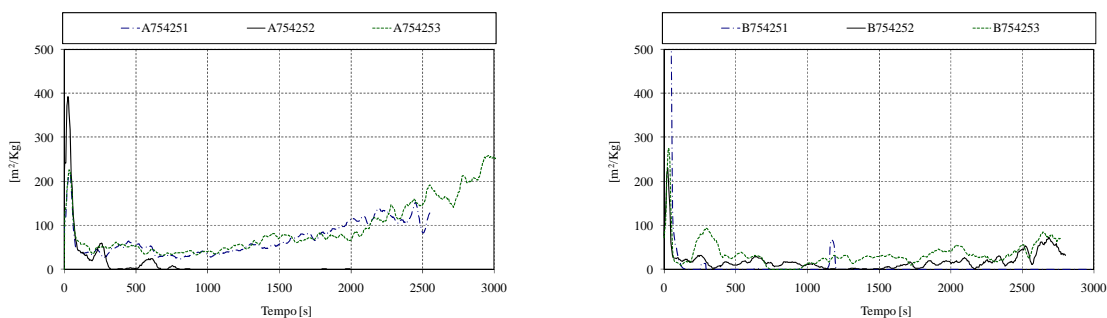


Figura 4.44 -Valores da (SEA) Área específica da extinção de fumo, no ensaio A75425 e B75425.

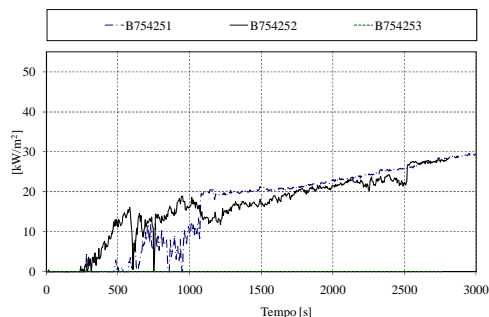
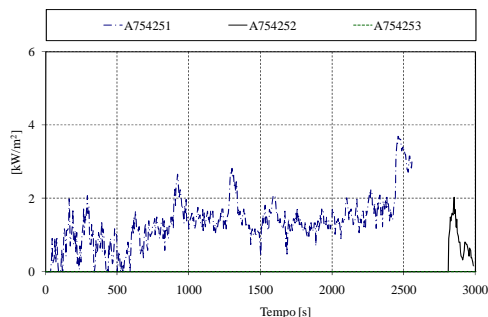


Figura 4.45 -Valores de (\dot{q}) taxa de liberação de calor, no conjunto de ensaio A75425 e B75425.

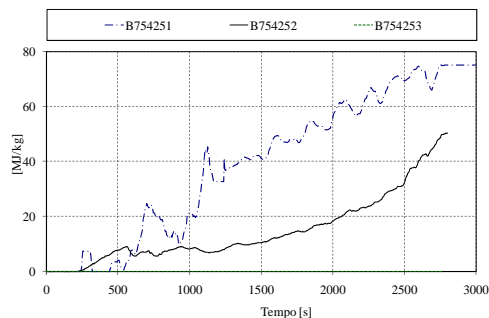
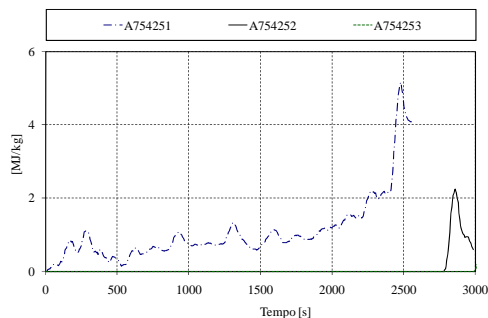


Figura 4.46 -Valores de ($\Delta h_{c,eff}$) calor de combustão efectivo, no conjunto de ensaio A75425 e B75425.

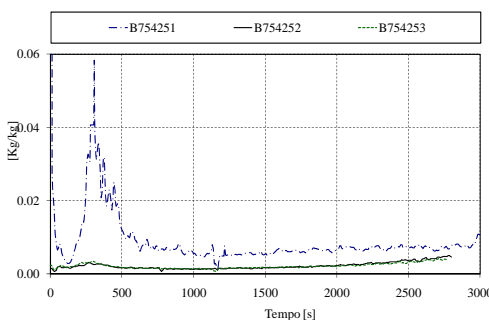
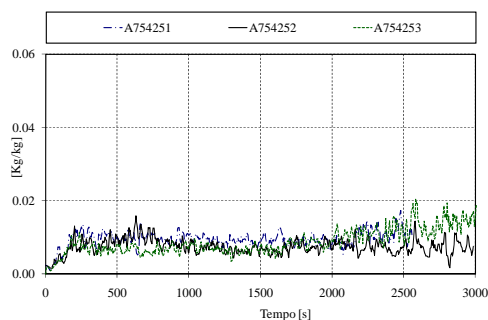


Figura 4.47 -Valores de monóxido de carbono, no conjunto de ensaio A75425 e B75425.

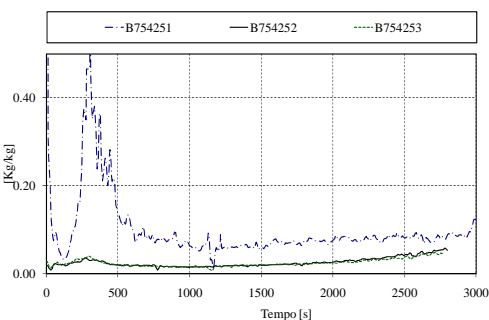
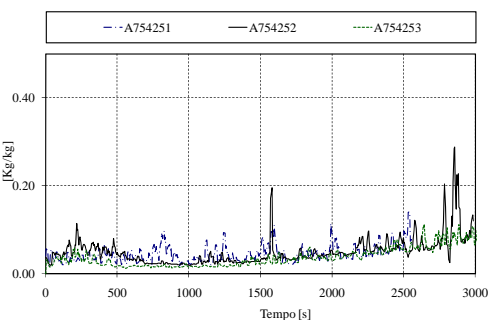


Figura 4.48 -Valores de dióxido de carbono, no conjunto de ensaio A75425 e B75425.

O comportamento da perda de massa em ambos os ensaios apresentam resultados muito idênticos ao esperado, com a excepção de um ensaio para cada série, A754252 e B754251.

Para esta potência e espessura de protecção em análise, é realçar o facto da tinta A apresentar valores mais elevados de libertação de monóxido e dióxido de carbono, comparando com os resultados da tinta B, embora na fase inicial dos ensaios, os valores de dióxido de carbono sejam substancialmente maiores na tinta tipo B.

Nota-se também que a tinta do tipo B apresenta maiores valores de taxa de libertação de calor e de calor de combustão efectivo.

A tabela 4.8 apresenta um resumo para o valor da massa residual (m/m_0), para as duas séries de ensaios com 2.5 [mm] de espessura de protecção e um fluxo de calor de 75 [kW/m²], nos instantes 900 segundos (15 minutos) e 1800 segundos (30 minutos).

| Referência do ensaio | 900 segundos (15 minutos) | 1800 segundos (30 minutos) |
|----------------------|------------------------------|-------------------------------|
| A754251 | 0.965 | 0.926 |
| A754252 | 0.975 | 0.947 |
| A754253 | 0.960 | 0.923 |
| B754251 | 0.993 | 0.983 |
| B754252 | 0.967 | 0.929 |
| B754253 | 0.968 | 0.929 |

Tabela 4.8 – Comparação de massa residual para a 3ª série de ensaios e para dois instantes.

Depois da análise de todas as séries dos ensaios, verifica-se que quanto maior for a potência utilizada no ensaio, maior será o valor da perda de massa e maior será a taxa de libertação de calor

Verifica-se que quanto maior a espessura de protecção, maior será a perda de massa. O comportamento é muito semelhante para os dois tipos de tinta utilizados.

Relativamente ao monóxido e dióxido de carbono libertado a tinta que origina maior produção, foi a tinta do tipo A. Com o aumento da radiação térmica e espessura a sua produção tende a diminuir.

A maior variabilidade que se verifica nos ensaios está relacionado com o condicionamento do provete.

4.4.4. Evolução do processo térmico

Nesta secção serão apresentados os resultados da análise térmica baseada nas medições das temperaturas registadas pelo sistema de aquisição MGCplus. As temperaturas foram adquiridas através de quatro termopares soldados na superfície superior, (TOP1, TOP2) e inferior, (BOT1, BOT2), de cada provete. Foi ainda efectuado uma medição da temperatura na placa de silicato de cálcio, (T_{CaSi}) e registando o valor da temperatura ambiente, (T_{amb}), através de um termopar colocado dentro do calorímetro de cone, ver figura 4.49.

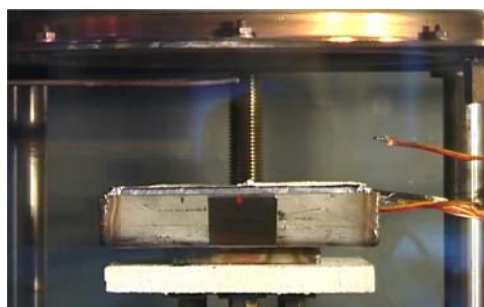
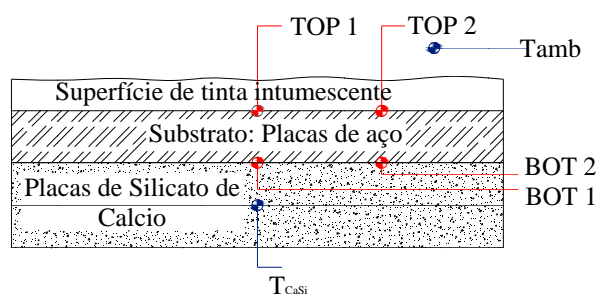


Figura 4.49 - Leitura das temperatura com termopar tipo K.

Nas figuras 4.50 a 4.53 estão representados os resultados correspondentes a um ensaio de cada série, realizados para um fluxo de 35 [kW/m²]. Todos os restantes encontram-se registados no anexo II.

Em todos os resultados se verifica que a temperatura no ambiente do cone, (T_{amb}) tende para um valor constante, entre 100 e 200 [°C]. A evolução das temperaturas nos restantes locais depende da eficiência e comportamento da protecção.

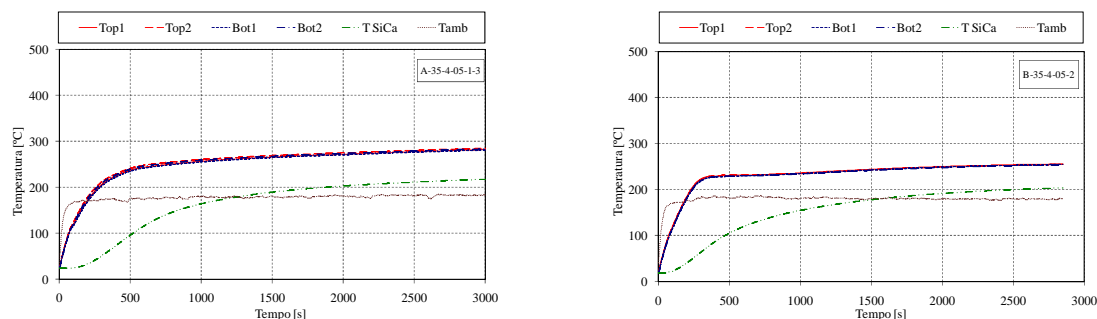


Figura 4.50 - Valor de temperatura no aço, nas placas de CaSi e no ambiente, nos ensaios A3540513 e B354052.

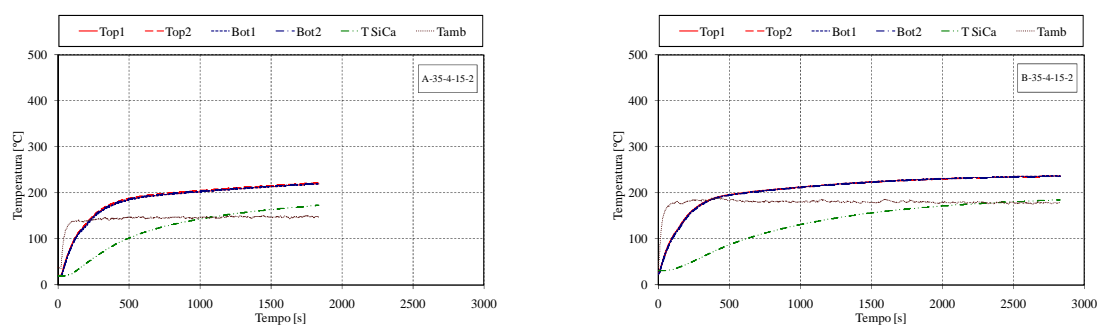


Figura 4.51 - Valor de temperatura no aço, nas placas de CaSi e no ambiente, no ensaio A354152 e B354152.

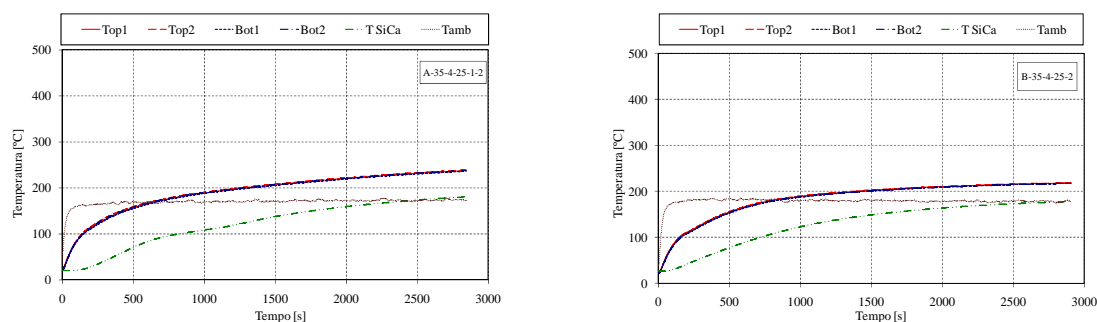


Figura 4.52 - Valor de temperatura no aço, nas placas de CaSi e no ambiente, no ensaio A3542512 e B354252.

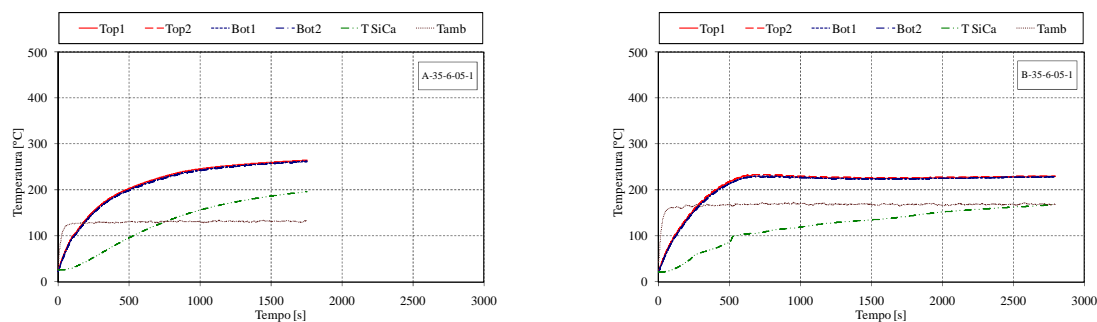


Figura 4.53 - Valor de temperatura no aço, nas placas de CaSi e no ambiente, no ensaio A356051e B356051.

Nas figuras 4.54 a 4.57 estão representados os resultados correspondentes a um ensaio de cada série, realizados para um fluxo de 75 [kW/m²]. Em todos os ensaios se verifica que a temperatura ambiente é superior aos ensaios realizados com um fluxo inferior. Os valores das temperaturas no aço têm comportamento diferente nas duas tintas. Na tinta B a temperatura parece estabilizar e fica mais controlada. Pelo contrário, com a protecção da tinta A, a temperatura do aço é crescente, sendo a protecção, aparentemente menos eficiente.

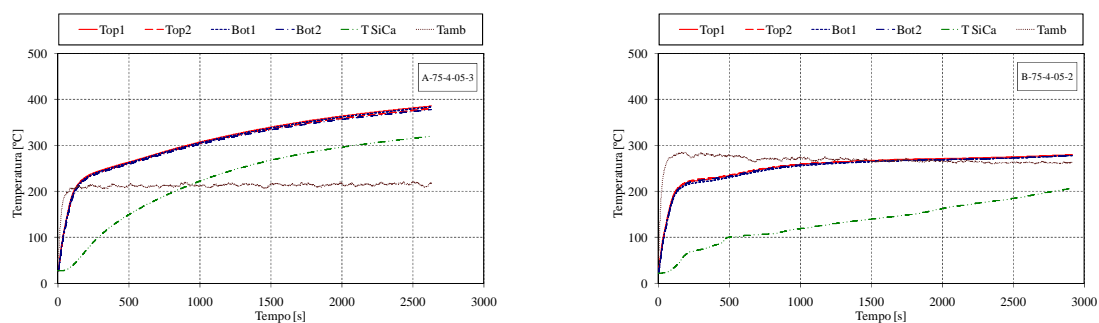


Figura 4.54 - Valor de temperatura no aço, nas placas de CaSi e no ambiente, no ensaio A754053 e B754052.

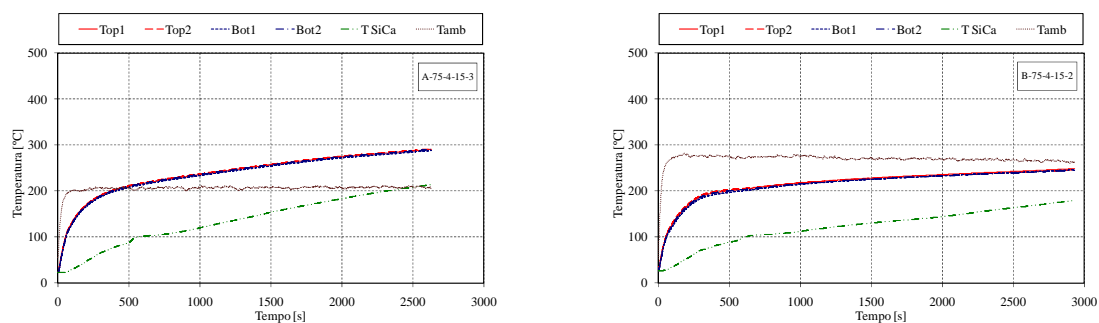


Figura 4.55 - Valor de temperatura no aço, nas placas de CaSi e no ambiente, no ensaio A754153 e B754152.

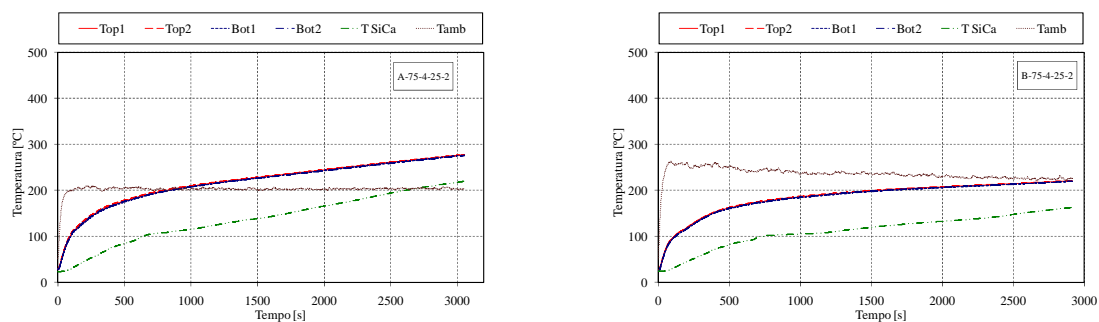


Figura 4.56 - Valor de temperatura no aço, nas placas de CaSi e no ambiente, no ensaio A754252 e B754252.

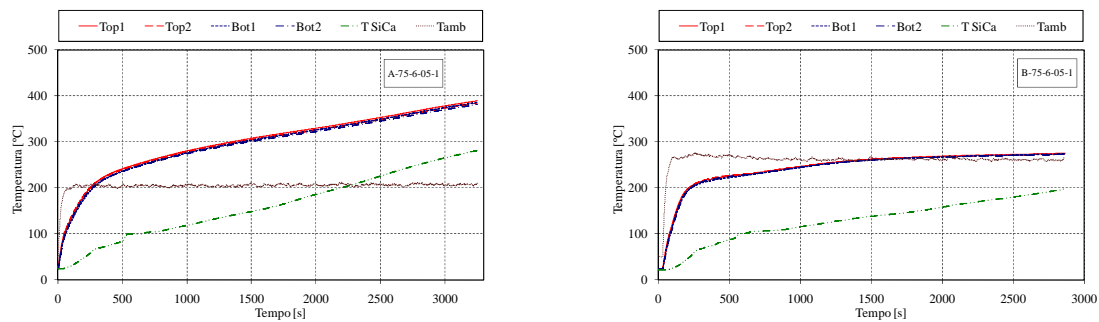


Figura 4.57 - Valor de temperatura no aço, nas placas de CaSi e no ambiente, no ensaio A756051 e B756051.

Tanto para a gama de ensaios realizada com fluxo de calor de 75 [kW/m²], como para a gama analisada anteriormente, 35 [kW/m²], e considerando diferentes espessuras de protecção, verifica-se que a tinta do tipo B proporciona uma melhor protecção do substrato. Esta evidência é maior na gama correspondente aos ensaios realizados com 75 [kW/m²], onde se verifica uma diferença de 100 °C na temperatura da superfície do aço.

4.4.5. Evolução do processo de intumescente

Nesta secção serão apresentados os resultados da evolução do intumescente. Esta evolução foi medida com processamento de imagem em Matlab, tendo sido efectuado o registo de cada ensaio com uma câmara digital.

Para obtenção da evolução do intumescente, utilizou-se uma rotina de Matlab, [4.2]. Através dos fotogramas criados no registo de cada ensaio, em média de 200 fotogramas, foi possível obter um gráfico de evolução tempo-temperatura para cada um dos ensaios.

O processo de imagem começa pela fase de calibração, que consiste em converter pixéis em distância [mm], dx e dy, ver figura 4.58. Posteriormente e depois de convertidas as dimensões efectua-se a medição da superfície do intumescente, especificando o número de pontos a seleccionar, ver figura 4.59.

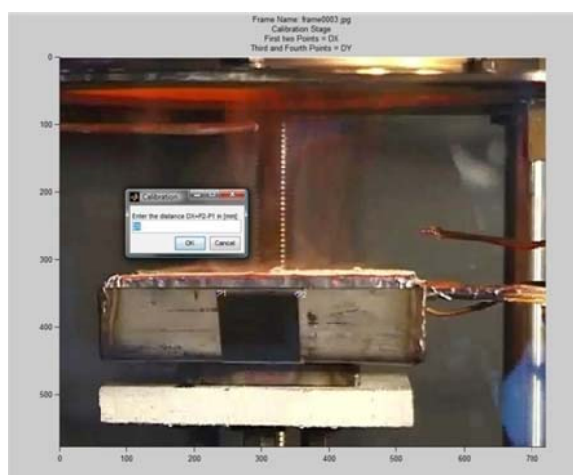


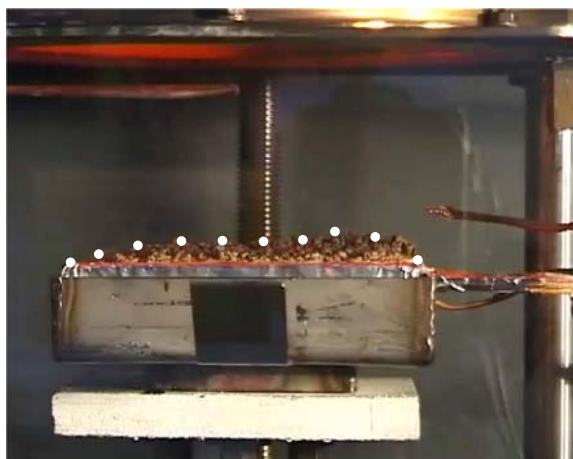
Figura 4.58 – Calibração de pixéis para mm.



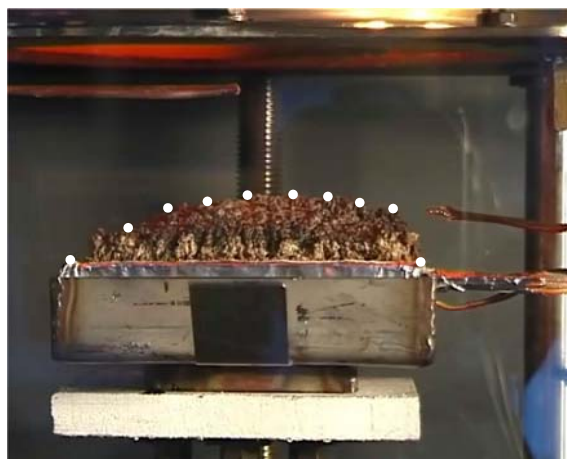
Figura 4.59 – Especificação do número de pontos a seleccionar.

Na fase seguinte são distribuídos os pontos pelo perfil do provete que vão servir para determinar a evolução do intumescente.

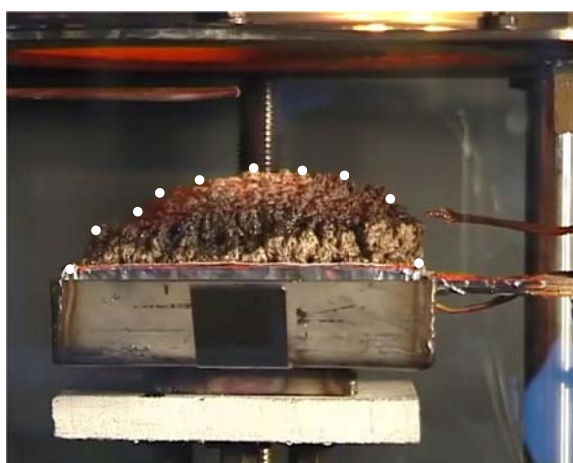
Na figura 4.60 apresenta-se a selecção dos pontos em cada fotograma, que serviram de referência para as medições.



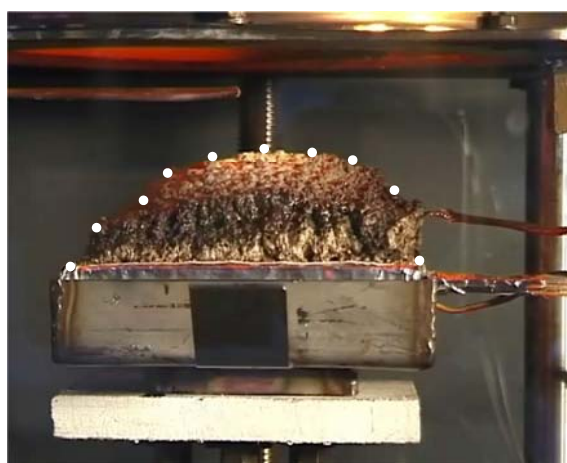
Fotograma 10



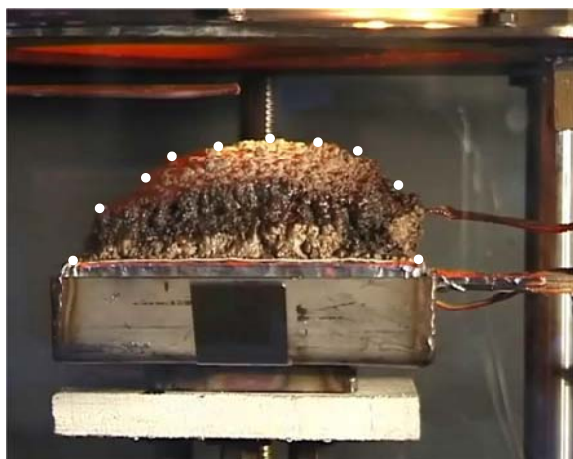
Fotograma 50



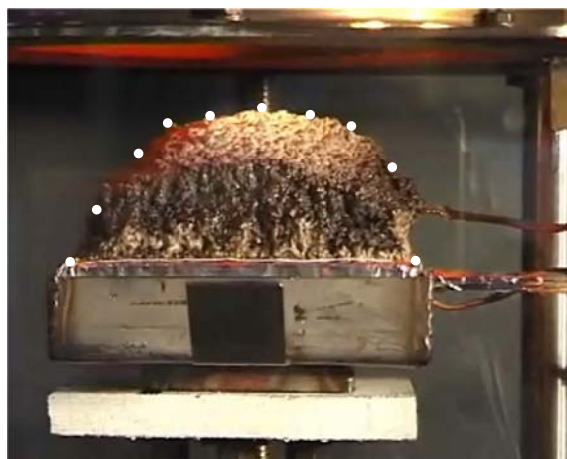
Fotograma 100



Fotograma 150



Fotograma 200



Fotograma 344

Figura 4.60 – Desenvolvimento da intumescência em diferentes fotogramas.

Após o registo do último fotograma, os valores correspondentes à evolução da superfície do intumescente são guardados num ficheiro.

Nesta secção foram escolhidos, aleatoriamente, quatro ensaios de cada tipo de tinta, respectivamente dois com fluxo de calor de $35 \text{ [kW/m}^2\text{]}$ e dois com $75 \text{ [kW/m}^2\text{]}$, com espessura de protecção de 1.5 [mm] e 2.5 [mm] . Em anexo estão enunciados os resultados para todos os ensaios, ver anexo III.

Na figura 4.61 está representado o resultado da análise efectuada ao segundo ensaio da segunda série, ver tabela 4.1. Este ensaio, foram utilizados 182 fotogramas, tendo-se efectuado a discretização do perfil do intumescente com 10 pontos.

A figura 4.62 representa a evolução do perfil do intumescente, tendo em consideração os quatro pontos centrais utilizados na discretização. Nesta imagem pode ainda ser verificado o valor do desvio padrão e o valor da média, como resultado dos valores registados nestes quatro pontos centrais. Neste gráfico da figura 4.62, nota-se um grande desvio padrão motivado pela rugosidade do intumescente. A camada de protecção não se encontrava com a mesma condição superficial.

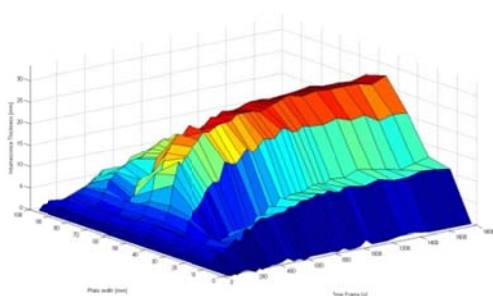


Figura 4.61 - Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354152.

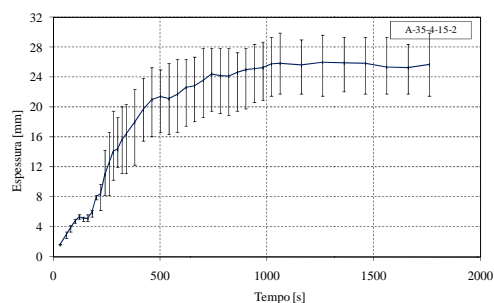


Figura 4.62 - Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio A354152.

As figuras seguintes representam a evolução do perfil do intumescente, tendo consideração os quatro pontos centrais utilizados na discretização. Pode ser verificado o valor do desvio padrão e o valor médio determinado com estes pontos centrais. Nestes gráficos, observa-se um pequeno desvio padrão, devido ao facto de a camada de protecção apresentar igual condição superficial..

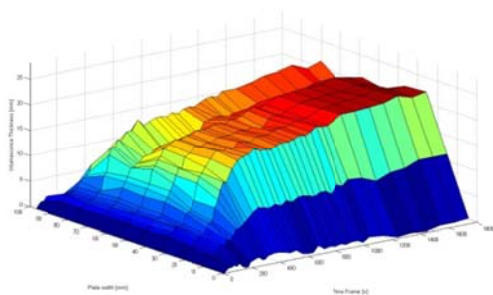


Figura 4.63 - Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354252.

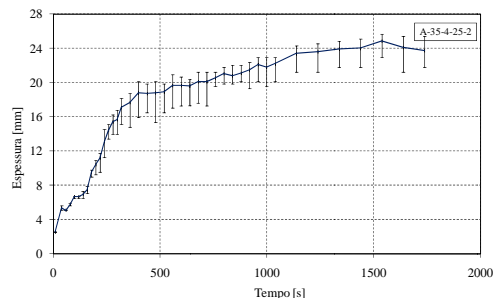


Figura 4.64 - Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio A354252.

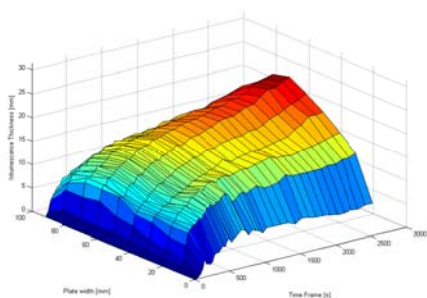


Figura 4.65 - Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A754153.

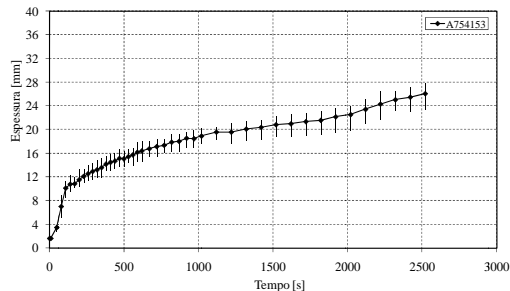


Figura 4.66 - Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio A754153.

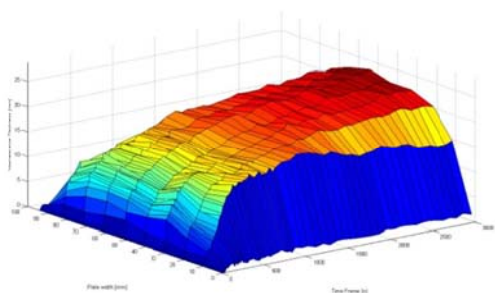


Figura 4.67 - Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A754252.

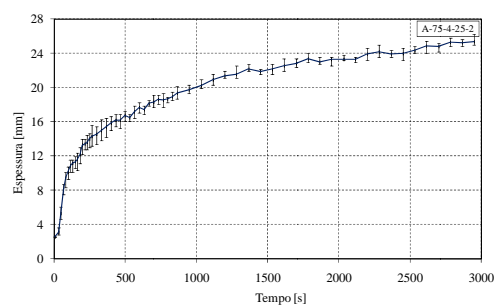


Figura 4.68 - Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio A754252.

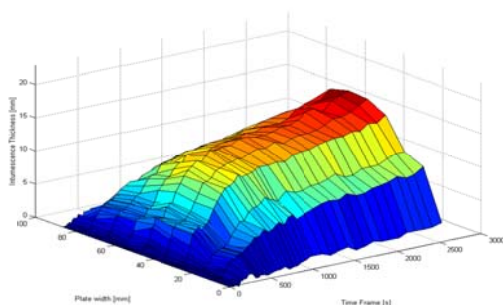


Figura 4.69 - Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B354153.

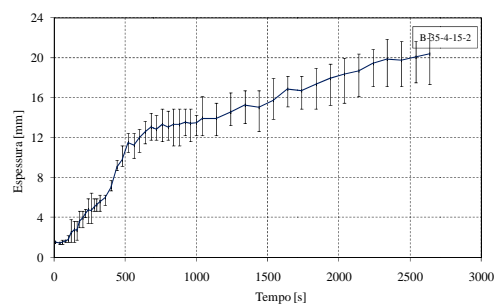


Figura 4.70 - Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio B354153.

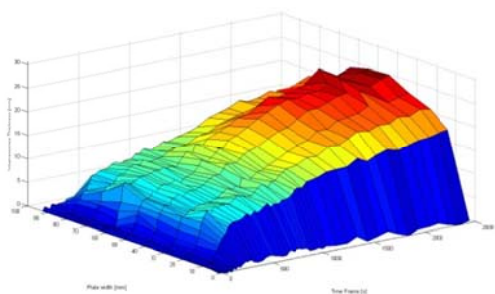


Figura 4.71 - Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B354253.

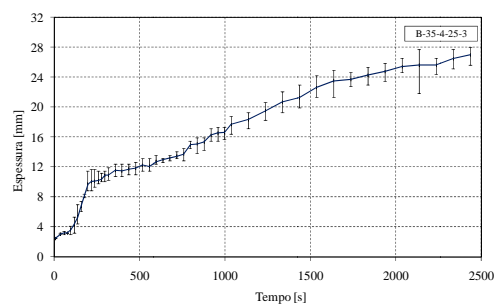


Figura 4.72 - Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio B354253.

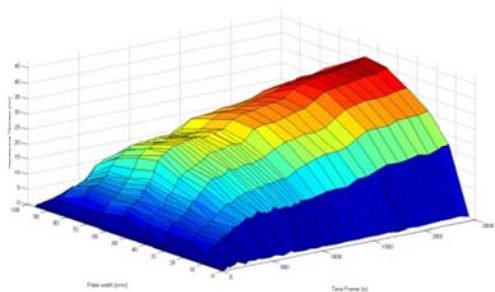


Figura 4.73 - Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B754152.

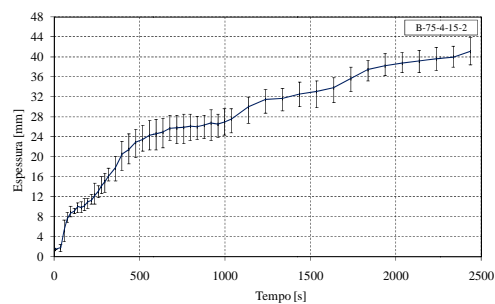


Figura 4.74 - Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio B754152.

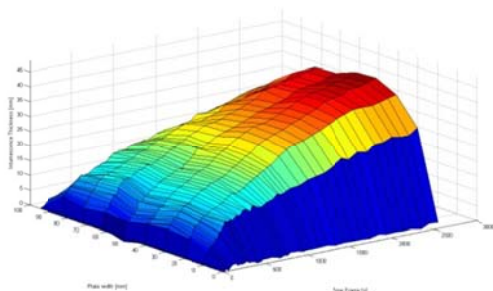


Figura 4.75 - Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B754252.

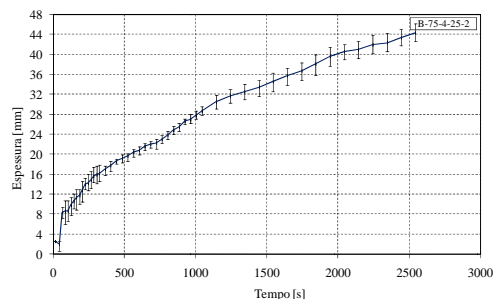


Figura 4.76 - Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio B754252.

Com a tinta do tipo B foi possível obter uma condição superficial mais uniforme, facto que se evidencia com resultados que apresentam menor desvio padrão.

4.5. Conclusões

Apresentaram-se os resultados correspondentes aos ensaios normalizados no calorímetro de cone. Apresentaram-se os valores da perda de massa, área específica de extinção de fumo, taxa de libertação de calor, calor de combustão efectivo e os valores de monóxido e dióxido de carbono. Foi apresentado um resumo para o valor de massa residual para os diversos conjuntos de ensaios.

Foram apresentados os resultados das temperaturas medidos pelo sistema de aquisição, MGCplus para medição das temperaturas no aço ao longo do tempo.

Apresentaram-se e analisaram-se os resultados determinados pelo calorímetro de cone, tendo-se verificado que quanto maior for a espessura de protecção, maior será a perda de massa e verificou-se ainda que, com o aumento da espessura de protecção e da potência térmica, a produção de monóxido e dióxido de carbono tende a diminuir.

Foi ainda registado a evolução da temperatura nas amostras ao longo do tempo. Notou-se, que na tinta do tipo B, a temperatura estabiliza e fica mais controlada, em comparação com a tinta A, para a qual, a temperatura no aço é crescente sendo a protecção aparentemente menos eficiente.

As medições efectuadas na tinta B apresentam um menor valor do desvio padrão, como resultado do estado superficial desta protecção. Verificou-se ainda que a reacção da tinta é mais significativa para os provetes com Maios espessura.

4.6. Referências

- [4.1]. ISO 5660-1:2002, Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate. Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method), International Organization for Standardization, 2002.
- [4.2]. Luís M.R. Mesquita, Paulo A.G. Piloto, Mário A.P. Vaz and Tiago M.G. Pinto; “Numerical estimation for intumescent thermal protection using one-dimensional IHCP”; 8th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) in conjunction with 5th. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), June 30 – July 5, 2008, Venice, Italy.
- [4.3]. Huggett, C., “Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements,” Fire and Materials, Vol 4, 1980, pp. 61-65.
- [4.4]. ISO 554, Standard atmospheres for conditioning and/or testing; Specifications, International Organization for Standardization, 1976
- [4.5]. ISO291 Plastics - Standard atmospheres for conditioning and testing, International Organization for Standardization, 1997.
- [4.6]. UNE-EN 1363-1 – Ensayos de Resistencia al fuego. Parte 1: Requisitos generales, Octubre 2000.

ANEXOS

Capítulo 5

*Análise térmica de elementos protegidos em
condições de incêndio*

| | |
|--|------|
| 5.1. Introdução | 5.3 |
| 5.2. Método simplificado | 5.5 |
| 5.2.1. Elementos estruturais não protegidos..... | 5.5 |
| 5.2.2. Elementos estruturais protegidos | 5.8 |
| 5.3. Método avançado de cálculo | 5.9 |
| 5.3.1. Problema unidimensional de transferência de calor | 5.9 |
| 5.3.1.1. Modelo unidimensional 1.1..... | 5.10 |
| 5.3.1.2. Modelo unidimensional 1.2..... | 5.11 |
| 5.3.2. Discretização pelo método das diferenças finitas..... | 5.11 |
| 5.3.2.1. Aproximação pela serie de Taylor..... | 5.11 |
| 5.3.2.2. Discretização do modelo unidimensional..... | 5.14 |
| 5.3.3. Problema inverso de condução de calor | 5.18 |
| 5.3.3.1. Definição de problema inverso..... | 5.18 |
| 5.3.3.2. Determinação da condutividade térmica | 5.19 |
| 5.3.4. Algoritmo computacional..... | 5.20 |
| 5.4. Resultados numéricos | 5.21 |
| 5.4.1. Método simplificado | 5.21 |
| 5.4.2. Modelo 1.1 | 5.22 |
| 5.4.2.1. Crank-Nicolson | 5.23 |
| 5.4.2.2. Método implícito..... | 5.23 |
| 5.4.2.3. Comparação e determinação do erro | 5.24 |
| 5.4.3. Modelo 1.2 | 5.25 |
| 5.4.3.1. Crank-Nicolson | 5.25 |
| 5.4.3.2. Método implícito..... | 5.26 |
| 5.4.3.3. Comparação e determinação do erro | 5.27 |
| 5.5. Resultados experimentais..... | 5.28 |
| 5.5.1. Resultado experimental com silicato de cálcio | 5.28 |
| 5.5.1.1. Preparação do ensaio..... | 5.29 |
| 5.5.1.2. Resultados experimentais..... | 5.31 |
| 5.5.1.3. Comparação e determinação do erro | 5.32 |
| 5.5.2. Resultado experimental com tinta intumescente | 5.32 |
| 5.5.2.1. IPE100 com tinta intumescente..... | 5.33 |
| 5.5.2.1.1. Preparação do ensaio..... | 5.33 |
| 5.5.2.1.2. Resultado experimental..... | 5.35 |
| 5.5.2.1.3. Comparação..... | 5.35 |
| 5.5.2.2. IPE220 com tinta intumescente..... | 5.37 |
| 5.5.2.2.1. Preparação do ensaio..... | 5.37 |
| 5.5.2.2.2. Resultado experimental..... | 5.40 |
| 5.5.2.2.3. Ensaio experimental termográfico..... | 5.41 |
| 5.5.2.2.4. Comparação..... | 5.42 |
| 5.6. Conclusões | 5.44 |
| 5.7. Referências..... | 5.44 |
| ANEXOS | 5.46 |

5.1. Introdução

A capacidade de resistência ao fogo de um elemento estrutural, pode ser obtida através de ensaios executados em fornalhas, sob a acção de um carregamento mecânico e com as condições de aquecimento baseadas na curva ISO 834. A resistência ao fogo é determinada após a ocorrência de um deslocamento ou taxa de deslocamento especificado (máximos). Este deslocamento corresponde a um valor limite para preservar a integridade da fornalha e do equipamento de carga. A resistência ao fogo, segundo a curva ISO834, pode ser comparada com as curvas de incêndio naturais, em função da densidade de carga de incêndio e da ventilação do compartimento.

Devido ao facto de os ensaios experimentais, a temperaturas elevadas, serem dispendiosos, requerendo a existência de fornalhas, é comum a utilização de ferramentas analíticas e numéricas para validar os resultados dos ensaios experimentais existentes e o desenvolvimento de métodos analíticos simplificados, [5.1].

Elementos estruturais metálicos, como vigas, colunas ou treliças, são extensivamente utilizados na construção metálica e na engenharia estrutural em geral. Muitas razões contribuíram para o aumento destas estruturas. As principais razões incluem o desenvolvimento dos processos industriais de elementos obtidos por laminagem que permitem o projecto da secção desejada, o recurso a aços de elevada qualidade permitindo o aumento da tensão de cedência, acompanhado pela redução na espessura e no peso dos elementos, o desenvolvimento de métodos numéricos, o desenvolvimento de códigos de projecto para os projectistas e engenheiros e melhores soluções para os problemas de corrosão e ligações, [5.2].

O objectivo de uma análise termo-mecânica, para elementos sujeitos a condições de incêndio, é a determinação de campos de temperatura, que permite actualizar as propriedades do material e simultaneamente, a determinação de tensões térmicas. Em vários domínios e especialidades de engenharia é necessária a análise do comportamento térmico de materiais ou componentes, garantindo a segurança, mesmo em condições de estabilidade estrutural.

É objectivo deste capítulo estudar a evolução da temperatura, para análise elementos estruturais submetidos à acção do fogo. Este estudo foi efectuado por via experimental e por via numérica, pressupondo que o elemento de construção é sujeito a uma variação da temperatura de incêndio, segundo curvas normalizadas.

Neste trabalho utilizou-se o programa desenvolvido para determinação dos campos de temperatura em regime transiente, utilizando elementos finitos unidimensionais e a equação simplificada apresentada no Eurocódigo 3, [5.3].

De acordo com o Eurocódigo 3 Parte 1.2, [5.3], o cálculo estrutural ao fogo pode ser feito através da utilização de tabelas de ensaios experimentais efectuados em fornalhas, por métodos avançados de cálculo e por métodos simplificados de cálculo. Este último é válido somente para elementos estruturais isolados, sendo desprezada a interacção entre os mesmos.

A temperatura de incêndio θ_g pode ser definida em termos de curvas nominais, temperatura – tempo, ou sob a forma de curvas paramétricas. Os documentos em referência, [5.4], definem três curvas nominais, já referidas no capítulo 3.

5.4

A curva de incêndio padrão ISO834, é utilizada em ensaios experimentais para determinação da resistência ao fogo em elementos estruturais. Embora com pouca realidade física, ela permite unificar ou padronizar os ensaios experimentais, possibilitando a comparação dos resultados da resistência ao fogo, obtidos em laboratórios diferentes, no mesmo país ou em países diferentes.

O incêndio padrão é considerado como base de referência para estabelecer o conceito de “referência ao fogo regulamentar” dos elementos estruturais. A maior parte dos regulamentos de segurança contra incêndios, adopta este conceito e estabelece os valores da resistência ao fogo dos elementos estruturais como sendo o tempo, durante o qual, estes elementos desempenham as funções de suporte de carga para que foram projectados, quando sujeitos ao incêndio padrão, [5.5].

Os ensaios realizados para análise térmica de elementos estruturais em condições de incêndio foram efectuados no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais (LERM), da Escola de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, (IPB), num forno de ensaios de resistência ao fogo, ver figura 5.1.

O IPB possui, desde 2008, um dos únicos fornos de ensaios de resistência ao fogo de elementos de construção existentes em Portugal. Utilizando o regime térmico normalizado (curva ISO 834) procedemos a ensaios de modelos com dimensões máximas limitadas ao volume disponível de 1 [m] x 1 [m] x 1 [m]. O forno, possui um volume nominal de 1[m³], tem um revestimento de aço e é isolado com tijolos refractários e outros materiais adequados para altas temperaturas, como fibra refractaria. Possui quatro queimadores de gás propano/gás natural. O consumo de combustível é controlado de modo que a temperatura do forno (monitorizada por uma disposição de termopares de tipo K) possa seguir toda a curva prescrita, de acordo com a norma, [5.6].



Figura 5.1 – Forno de Ensaio de Resistência ao Fogo, IPB.

Depois dos ensaios realizados em amostras, à escala reduzida, realizados no calorímetro de cone, serão apresentados resultados sobre o efeito térmico da acção do fogo em elementos estruturais protegidos. O conhecimento das propriedades térmicas e físicas do material de protecção assume grande importância para a correcta previsão da temperatura do elemento protegido. Esta informação é indispensável para efectuar a previsão da temperatura do aço durante a fase de aquecimento e para efectuar a apresentação de uma formulação de cálculo simplificado, para elementos protegidos com tinta intumescente.

Este estudo contou com a colaboração da empresa J. Soares e Correia, tendo oferecido um conjunto de perfis abertos e fechados com secções distintas, ver tabela 5.1. Deste conjunto de perfis foi possível efectuar ensaios com as secções IPE100 e IPE220.

| Quantidade | Secção recta | Material | Comprimento [m] |
|------------|-------------------|----------|-----------------|
| 10 | IPE 100 | S275 | 6 |
| 10 | IPE 220 | S275 | 6 |
| 10 | SHS 100 – 100 - 4 | S235 | 6 |
| 10 | CHS 101,6 – 4,05 | S235 | 6 |
| 10 | L 100 – 100-60- 8 | S275 | 6 |

Tabela 5.1- Perfis para ensaios experimentais.

5.2. Método simplificado

Tendo em consideração a elevada condutividade térmica do aço é possível admitir que a temperatura, no interior de uma dada secção seja uniforme, pode ser aproximada por uma equação de condução de calor simplificada, conforme proposto, no Eurocódigo 3, [5.3].

Utilizando o conceito do número de Biot, responsável pela comparação entre a resistência térmica do fluxo de calor por condução em relação à resistência térmica do fluxo de calor que chega pela acção do fogo (considerando apenas o efeito de convecção), pode considerar-se uma distribuição uniforme de temperatura no perfil, para cada instante de tempo.

Para avaliar o comportamento das estruturas metálicas em situação de incêndio é necessário calcular a condução de calor em regime transiente, nas secções dos seus elementos estruturais. Não se dispondo de soluções analíticas, é possível fazer um tratamento quase estacionário, fazendo-se a análise em sucessivos intervalos de tempo Δt . Conforme proposto no Eurocódigo 3, o campo de temperaturas mantém-se uniforme no interior do perfil metálico, sendo representado em função da equação simplificada.

5.2.1. Elementos estruturais não protegidos

A equação 5.1, representa a variação da temperatura no perfil em aço, quando a sua superfície é submetida à acção provocada por uma evolução de temperatura de uma curva normalizada.

$$\Delta\theta_{a,t} = K_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad [^{\circ}C] \quad (5.1)$$

O aumento da temperatura no perfil não protegido durante o intervalo de tempo Δt , que nunca pode ser maior do que 5 [s], é dado por $\Delta\theta_{a,t}$, A_m/V representa o factor da secção transversal do perfil não protegido [m^{-1}], conforme a tabela 5.2. O factor de secção representa o quociente entre a área do perfil exposta ao fogo por unidade de comprimento, [m^2/m], e o volume do perfil por unidade de comprimento [m^3/m], c_a representa o calor específico do aço em [J/KgK], ρ_a representa a massa volúmica do aço, considera constante e igual a 7850 [Kg/m^3].

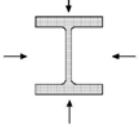
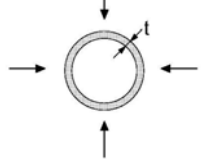
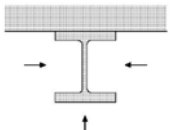
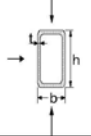
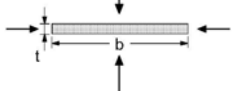
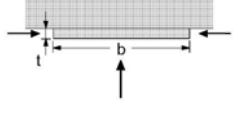
| | |
|---|---|
| <p>Perfil em I com 4 lados expostos ao fogo:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{perímetro}}{\text{área da secção recta}}$  | <p>Tubo exposto ao fogo: $A_m/V = 1/t$</p>  |
| <p>Perfil em I com 3 lados expostos ao fogo:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{superfície de exposição ao fogo}}{\text{área da secção recta}}$  | <p>Perfil de secção aberta (ou secção soldada com espessuras uniformes) exposto ao fogo:</p> <p>Se $t \ll b$: $A_m/V = 1/t$</p>  |
| <p>Barra com 4 lados exposta ao fogo:</p> $A_m/V = 2(b+t)/(bt)$ <p>Se $t \ll b$: $A_m/V = 2/t$</p>  | <p>Barra com 3 lados exposta ao fogo:</p> $A_m/V = (b+2t)/(bt)$ <p>Se $t \ll b$: $A_m/V = 1/t$</p>  |

Tabela 5.2 – Factor da secção A_m/V para alguns perfis não protegidos em aço.

A acção térmica do fogo é traduzida por um fluxo de calor que incide na superfície do elemento, referenciado por $\dot{h}_{net,d}$. Este fluxo representa o valor de cálculo da densidade de fluxo de calor por unidade de área, $[W/m^2]$, e deve ser determinado pela soma de duas parcelas, uma devida à radiação $\dot{h}_{net,r}$ e outra devida à convecção $\dot{h}_{net,c}$.

$$\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,r} + \dot{h}_{net,c} \quad [W / m^2] \quad (5.2)$$

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad [W / m^2] \quad (5.3)$$

$$\dot{h}_{net,r} = \phi \cdot \varepsilon_f \cdot \varepsilon_m \cdot 5,64 \times 10^{-8} \cdot (\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \quad [W / m^2] \quad (5.4)$$

Na equação 5.3, relacionada com a troca de calor por convecção, α_c representa o coeficiente de calor por convecção, θ_g representa a temperatura ambiente, isto é a temperatura dos gases no compartimento de incêndio em $^{\circ}C$ e θ_m representa a temperatura do perfil metálico.

Na equação 5.4, relacionada com a troca de calor por radiação, ε_f representa a emissividade das chamas, de valor igual a 1, ε_m representa a emissividade da superfície do perfil metálico, podendo ser considerado igual a 0.7 para o caso do aço ao carbono e 0.4 para o caso do aço inoxidável, θ_r representa a

temperatura de radiação na vizinhança do perfil podendo assumir-se $\theta_r = \theta_g$. O factor de forma, é representado por ϕ , de valor igual a 1, ou eventualmente menor, para contabilizar o efeito de exposição indirecta da superfície à acção do fogo, [5.4].

O significado físico do factor de forma pode, no caso da superfície de radiação apresentar temperatura e emissividade constantes, ser definido como sendo o ângulo sólido dentro do qual o ambiente de radiação pode ser visto a partir de uma área infinitesimal particular, dividindo por 2π [rad].

O fluxo de calor de radiação incidente numa área infinitesimal de um elemento convexo é determinado pela posição e tamanho do incêndio, (efeito de posição). No caso do fluxo de calor de radiação ser incidente numa área infinitesimal de um elemento côncavo, (zonas materiais das abas dos perfis metálicos), este depende do efeito de posição mencionado e do fluxo de radiação de outras áreas do próprio elemento (efeito de sombra).

Para secções em I, sujeitas a curvas de incêndio nominais, o factor de correcção para contabilizar o efeito de sombra é dado na equação 5.5a, onde $[A_m/V]_b$ representa o factor da secção, ver tabela 5.3. Onde A, representa a secção transversal do aço.

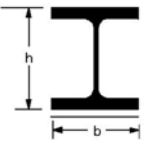
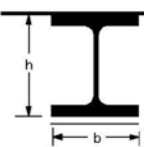
| Esquema | Factor de secção A_m/V |
|---|--------------------------|
|  | $\frac{2(b+h)}{A}$ |
|  | $\frac{2h+b}{A}$ |

Tabela 5.3 – Definição do factor de secção.

$$K_{sh} = 0,9 \frac{[A_m/V]_b}{A_m/V} \quad (5.5a)$$

Em todos os outros casos, o valor de k_{sh} deverá ser determinado pela equação 5.5 b.

$$K_{sh} = \frac{[A_m/V]_b}{A_m/V} \quad (5.5b)$$

Num ensaio normalizado, o coeficiente de transferência de calor por convecção deve ser determinado de acordo com o Eurocódigo 1 [5.4], para superfícies expostas ao fogo, utilizando indiferenciadamente a equação 5.6 para curvas normalizadas ISO 834 ou para elementos exteriores dispostos externamente à acção do fogo.

$$h_c = 25 \left[\frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ C \right] \quad (5.6)$$

No caso de se considerar a acção da curva de hidrocarbonetos, o valor considerado para o coeficiente de transferência de calor é o dobro do anterior, equação 5.7.

$$h_c = 50 \left[\frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ C \right] \quad (5.7)$$

5.2.2. Elementos estruturais protegidos

Para que os elementos estruturais em aço verifiquem as exigências de resistência ao incêndio, por vezes, torna-se necessário proteger os perfis com material termicamente isolante, disposto no contorno do perfil ou em caixão.

Para perfis protegidos, o aumento da temperatura $\Delta\theta_{a,t}$, durante o intervalo de tempo Δt , pode ser determinado segundo o Eurocódigo 3 parte 1.2, de acordo com a equação 5.8. a aplicação desta equação está sujeita as condições ($\Delta\theta_{a,t} \geq 0$ se $\Delta\theta_{g,t} \geq 0$), sendo que o incremento de tempo, Δt , deverá ser inferior a 30 [s], [5.3].

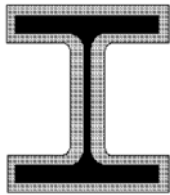
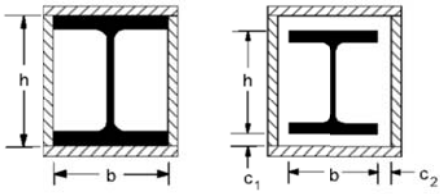
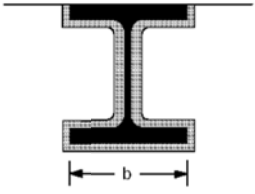
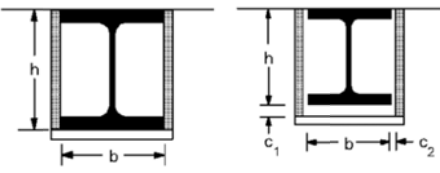
$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p / V (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p c_a \rho_a (1 + \Phi/3)} \Delta t - (e^{\Phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad [^\circ C] \quad (5.8)$$

O parâmetro Φ , relaciona a capacidade para armazenar, sobre forma de calor entre o material de protecção e o aço, sendo dado por:

$$\Phi = \frac{d_p c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \cdot \frac{A_p}{V} \quad (5.9)$$

Para as equações 5.8 e 5.9, A_m/V representa o factor de secção do perfil protegido, [m^{-1}], onde A, representa a área de secção transversal do aço, ver tabela 5.4, em que V representa o volume do perfil por unidade de comprimento, [m^3/m] e A_p caracteriza a área da superfície interior da protecção, correspondente à superfície de exposição ao incêndio, por unidade de comprimento, [m^2/m]. A condutividade térmica é representada por λ_p , [$W/m.K$], d_p representa a espessura da protecção, em [m], c_a representa o calor específico do aço, em unidades de [$J/Kg.K$] e ρ_a o peso volúmico do aço, 7850 [Kg/m^3]. O calor específico e massa específica do material de protecção são representados por c_p e ρ_p , respectivamente.

O desenvolvimento desta equação presuppões que se considera que a temperatura na superfície do material da protecção deverá ser igual à temperatura do ciclo térmico θ_g .

| Esquema | Descrição | Factor de secção A_m/V |
|---|---|---|
|  | Revestimento de contorno com espessura uniforme | $\frac{\text{perímetro do aço}}{A}$ |
|  | Revestimento em caixão com espessura uniforme ¹ | $\frac{2(b+h)}{A}$ |
|  | Revestimento de contorno com espessura uniforme, exposto ao fogo em três lados | $\frac{\text{perímetro do aço} - b}{A}$ |
|  | Revestimento em caixão com espessura uniforme, exposto ao fogo em três lados ¹ | $\frac{2h+b}{A}$ |

¹Normalmente as dimensões da folga c_1 e c_2 não devem exceder $h/4$.

Tabela 5.4 - Factores de secção A_m/V para elementos estruturais com protecção de material contra incêndio.

5.3. Método avançado de cálculo

5.3.1. Problema unidimensional de transferência de calor

Nesta secção serão apresentados dois modelos térmicos, com as respectivas hipóteses simplificativas inerentes ao modelo unidimensional. No primeiro modelo, figura 5.2, a acção do fogo é substituída pela imposição da temperatura prescrita, T_g na superfície disposta da protecção, $x = L$, ver equação 5.10. No segundo modelo, figura 5.3, a acção do fogo é substituída pela troca de calor por radiação e convecção entre o ambiente e a superfície da protecção.

$$T_g = 20 + 345 \times \log_{10}(8t + 1), \quad T [^\circ C], \quad t [\text{min}] \quad (5.10)$$

A aplicação do método das diferenças finitas, permite determinar a evolução de temperatura do aço em regime transiente.

A equação 5.11 representa a equação diferencial de equilíbrio da energia no domínio da protecção.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_p \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho C_a \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.11)$$

Na figura 5.2 e 5.3, α_p representa a difusividade térmica da protecção ($= k_p / \rho_p c_p$), em que c_p representa o calor específico da protecção, k_p a condutividade da protecção e ρ_p a massa volúmica da protecção.

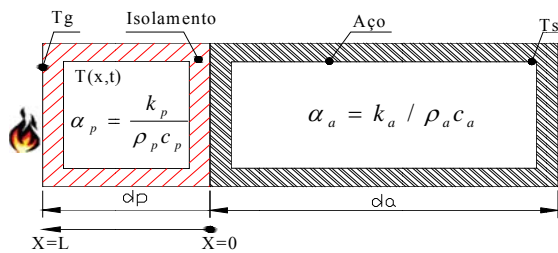


Figura 5.2 – Modelo unidimensional 1.1.

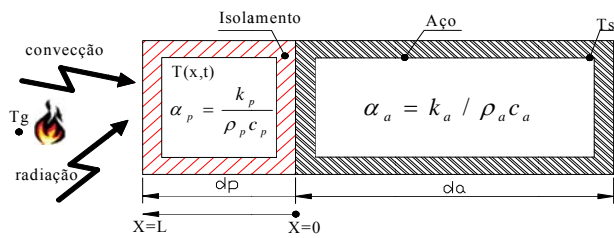


Figura 5.3- Modelo unidimensional 1.2.

Utilizando a definição do factor da secção, como refere o EC3, d_a pode ser aproximado pela expressão 5.12, onde A_p e V representam respectivamente o perímetro do aço, área da secção transversal do aço, [5.3]. Outros autores designam, d_a como massividade térmica, [5.7].

$$d_a = \frac{1}{A_p/V} = \frac{V}{A_p} = \frac{1}{m} \quad (5.12)$$

5.3.1.1. Modelo unidimensional 1.1.

O modelo unidimensional 1.1, esta representado na figura 5.3. A equação de equilíbrio de balanço térmico para o modelo, equação 5.13, representa-se da seguinte forma.

$$\frac{\partial}{\partial x} k_p \frac{\partial T}{\partial x} = \rho C_a \frac{\partial T}{\partial t} \quad 0 < x < L \quad (5.13)$$

É assumido a existência de um contacto térmico perfeito entre a camada de protecção e a placa de aço, pelo que:

$$T(x, t) = T_{aço}(t) \quad , \quad x = 0 \quad (5.14)$$

$$\left(k_{eff} \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right)_{isolamento} = [\rho C_a d_a]_{aço} \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \quad , \quad x = 0$$

As condições de fronteira do problema especificam a temperatura do ambiente relacionado com a acção do fogo e a condição de massa térmica concentrada.

O termo utilizado, k_{eff} , representa a condutividade térmica efectiva do material de protecção (tinta intumescente), determinado por método inverso.

$$T|_{x=L(t)} = T_g \quad x = L(t) \quad (5.15)$$

$$\left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} \Big|_{isolamento} = [\rho C d_a]_{aço} \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{aço} \quad x = 0 \quad (5.16)$$

O sistema está, ainda, sujeito à condição inicial de temperatura uniforme em todo o domínio.

$$T(x,0) = T_a \quad (5.17)$$

5.3.1.2. Modelo unidimensional 1.2.

O modelo unidimensional 1.2, está representado na figura 5.4. A equação de equilíbrio de balanço térmico para o modelo, equação 5.13, representa-se de igual forma.

Entre a camada de protecção e a placa de aço será assumida a existência de um contacto térmico perfeito, equação 5.14. Para este modelo unidimensional são consideradas diferentes condições de fronteira, equação 5.18, que traduzem o efeito da acção térmica, assumindo troca de calor por radiação e convecção e ainda a condição de modelo de massa térmica concentrada, equação 5.19.

$$k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L(t)} = h_c (T - T_a) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \quad x = L(t) \quad (5.18)$$

$$k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = [\rho C d_a]_{aço} \frac{\partial T_{aço}}{\partial t} \quad x = 0 \quad (5.19)$$

O sistema está sujeito à mesma condição inicial, isto é, temperatura uniforme em todo o domínio.

5.3.2. Discretização pelo método das diferenças finitas

5.3.2.1. Aproximação pela serie de Taylor

Para substituição da equação diferencial do comportamento térmico, por um sistema de equações algébricas, MDF, é necessário efectuar a aproximação das derivadas por uma função, assumindo que a função temperatura é conhecida num conjunto de pontos discretos (i,j,...etc), conforme tabela 5.5.

| ponto | Coordenada x | T(x) |
|-------|--------------|-----------|
| 0 | 0 | T_1 |
| ... | ... | ... |
| i-1 | X_{i-1} | T_{i-1} |
| i | X_i | T_i |
| i+1 | X_{i+1} | T_{i+1} |
| ... | ... | ... |
| L | L | T_L |

Tabela 5.5- Função T(x) tabelada.

Na figura 5.4 estão, representados os pontos utilizados para discretizar o domínio ($0 \leq i \leq L$), para as quais deve ser determinado o valor da temperatura. O afastamento dos pontos foi considerado uniforme de valor Δx conforme a expressão seguinte.

$$x_i - x_{i-1} = x_k - x_{k-1} = \dots = \Delta x \quad (5.20)$$

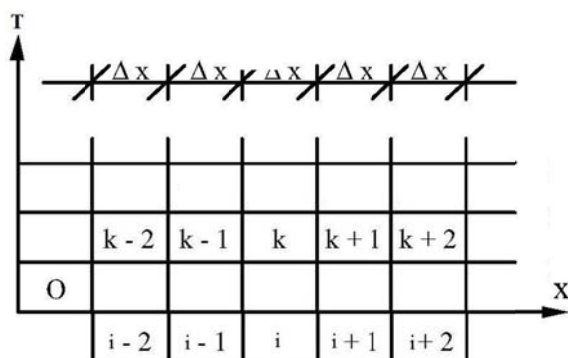


Figura 5.4. – Malha no domínio.

A derivada da função $T(x)$, em ordem a x , deve ser determinada de acordo com a definição de derivada parcial, num ponto, isto é:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (5.21)$$

No caso de se considerar um intervalo Δx suficientemente pequeno, pode considerar-se que:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \cong \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (5.22)$$

Considerando válida esta aproximação, 5.22, para a função apresentada na tabela 5.5 e a distribuição dos pontos no domínio representado na figura 5.5, a derivada da função $T(x)$ em ordem a x , no ponto i , pode determinar-se, pela derivada efectuada à frente.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_i \cong \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x} \quad (a)$$

Em alternativa a este tipo de aproximação, pode ser utilizado um método de derivação central.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_i \cong \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2\Delta x} \quad (b) \quad (5.23)$$

A derivação para trás pode ser utilizada, recorrendo ao valor de função no ponto anterior.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_i \cong \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x} \quad (c)$$

Destas três hipóteses possíveis para a determinação do valor aproximado da 1ª derivada da função T , em ordem a x , no ponto k , a designada diferença central 5.23c, conduz, em geral, a uma melhor aproximação, [5.15].

A determinação das derivadas parciais de 2ª ordem, pode ser feita de modo análogo. Nesta equação, os subsidieis D e E representam pontos intermédios, localizados a meia distância dos intervalos $i, i+1$ e $i-1, i$, respectivamente. As derivadas podem ser calculadas considerando uma das três hipóteses 5.23a, 5.23b e 5.23c. Para as diversas hipóteses, obtêm-se expressões que correspondem a aproximações, distintas.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)}{\Delta x} \cong \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_D - \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_E}{\Delta x} \quad (5.24)$$

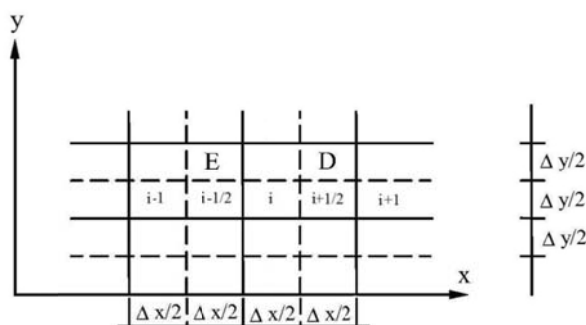


Figura 5.5. – Malha de diferenças finitas centrais

Considerando que o cálculo das derivadas de 1ª ordem, nos pontos D e E, é feito recorrendo à expressão 5.23b, diferenças centrais, é possível determinar a primeira derivada nestes pontos intermédios.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_D \cong \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x} \quad \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_E \cong \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x} \quad (5.25)$$

Substituindo estas aproximações de primeira ordem nas fórmulas 5.24, obtém-se uma aproximação para a segunda derivada.

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_i \cong \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{\Delta x^2} \quad (5.26)$$

5.3.2.2. Discretização do modelo unidimensional

O campo da temperatura pode ser determinado pelo método das diferenças finitas, utilizando o método combinado, programado em Matlab, como se apresenta em anexo, [5.8].

Foi considerada a equação não-linear, 5.10.

A derivada da temperatura em ordem ao tempo pode ser aproximada pela equação 5.27 e a segunda derivada em ordem à posição x toma o valor da equação 5.28. A posição do ponto genérico “i” é dado por $x_i = i \Delta x$ e k é definida pela condutividade térmica.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (5.27)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} k \frac{\partial T}{\partial x} = k_i \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} \quad (5.28)$$

Substituindo as aproximações de primeira ordem na equação diferencial é possível escrever:

$$(\rho C_a d_a) \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = k_i \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} \quad (5.30)$$

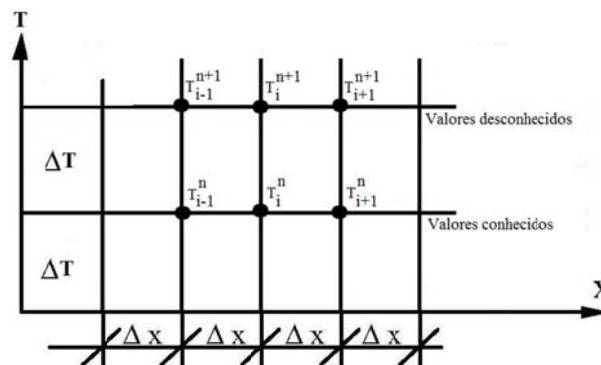


Figura 5.6. – Diferenças finitas para o método combinado.

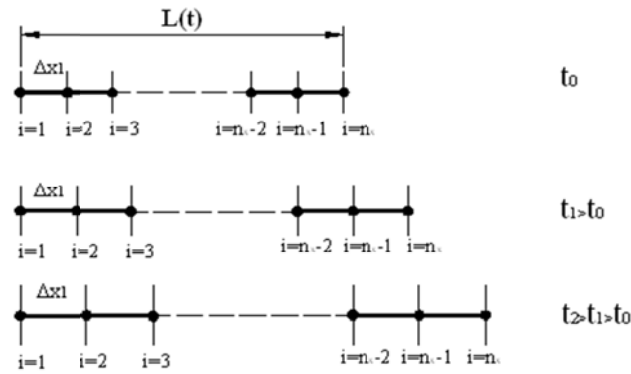


Figura 5.7 – Malha no tempo.

As condições de fronteira do problema da condução de calor podem ser temperatura determinada, fluxo de calor determinado, condição convectiva na fronteira e ou radiação na fronteira. Para os dois modelos apresentados foram utilizadas, condições de temperatura na fronteira, $X=L$, secção 5.3.1.1, para um outro modelo considerou-se a condição convectiva e de radiação na fronteira, $X=L$, secção 5.3.1.2.

Para p primeiro modelo, foi assumida a existência de contacto térmico perfeito, entre a camada de protecção e a placa de aço, pelo que:

$$T(x, t) = T_{aço}(t) \quad , \quad x = 0 \quad (5.31)$$

$$\left(k_i \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right)_{\text{isolamento}} = [\rho C_a d_a]_{aço} \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \quad , \quad x = 0$$

Onde estão sujeitas as seguinte condições de fronteira,

$$\left(k_i \frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} \Big|_{\text{isolamento}} = [\rho C d_a]_{aço} \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{aço} \quad x = 0 \quad (5.32)$$

$$T \Big|_{x=L(t)} = T_g \quad x = L(t) \quad (5.33)$$

Utilizando as condições de fronteira das equações 5.32 e 5.33, nas equações 5.34 e 5.35 obtém-se a representação por diferenças finitas à frente e atrás respectivamente.

$$k_i \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x} = (\rho C_a d_a) \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta t} \quad x = 0 \quad (5.34)$$

$$T_i^{n+1} = T_g \quad x = L \quad (5.35)$$

5.16

Para o segundo modelo, foi utilizada a mesma equação geral de balanço térmico, equação 5.13 ou 5.27.

Entre a camada de protecção e a placa de aço será assumida a existência de um contacto térmico perfeito, equação 5.14. Para este modelo serão consideradas as seguintes condições de fronteira, equações 5.34 e 5.35.

$$k_p \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = [\rho C d_a]_{aço} \frac{\partial T_{aço}}{\partial t} \quad x = 0 \quad (5.36)$$

$$k_p \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L(t)} = h_c (T - T_a) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \quad x = L(t) \quad (5.37)$$

Utilizando as condições de fronteira das equações 5.36 e 5.37, nas equações 5.38 e 5.39 obtém-se a representação por diferenças finitas à frente e atrás respectivamente.

$$k_i \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x} = (\rho C_a d_a) \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta t} \quad x = 0 \quad (5.38)$$

$$k_p \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x} = h_c (T - T_a) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \quad x = L \quad (5.39)$$

A equação 5.30 em conjunto com as equações 5.34 e 5.35 ou 5.38 e 5.39, proporcionam (L) equações algébricas, 5.40, para determinação de L valores de temperatura T_i ($i=1, \dots, L$).

$$[A] \{T\} = \{B\} \quad (5.40)$$

Esta equação é resolvida no instante de tempo (n), sendo posteriormente efectuado o incremento de tempo para resolver o problema transiente.

O sistema de equações algébricas representa a determinação de L valores de temperatura T_i ($i=1, \dots, L$), para o modelo unidimensional 1.1.

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \dots & A_{i-1} & A_i \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1^{n+1} \\ T_2^{n+1} \\ \vdots \\ T_{i-1}^{n+1} \\ T_i^{n+1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ T_g \end{Bmatrix} \quad (5.41)$$

A equação 5.13, pode ser descrita utilizando o método das diferenças finitas. Foi utilizado o método combinado pela de sua versatilidade, assumindo a possibilidade de utilização do método implícito, explícito e do Crank-Nicolson, por um ajuste do coeficiente, θ .

A representação da diferença finita da equação 5.13, com o método combinado entre o método explícito e o método implícito é dada pela equação 5.42.

$$(\rho C_p d_a)_i \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \theta \left[k_{i-1/2} \frac{T_{i-1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{(\Delta x)^2} + k_{i+1/2} \frac{T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1}}{(\Delta x)^2} \right] + (1-\theta) \left[k_{i-1/2} \frac{T_{i-1}^n - T_i^n}{(\Delta x)^2} + k_{i+1/2} \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{(\Delta x)^2} \right] \quad (5.42)$$

O parâmetro θ , representa um valor compreendido entre 0 e 1, designado o factor de ponderação que representa o grau implícito. Na equação 5.45 está representado o método para diferentes valores deste procedimento.

As propriedades térmicas do aço e o valor de $k_{i\pm 1/2}$ dependem da temperatura, a equação 5.42 pode ser descrita de forma mais compacta, com expressa a equação 5.43.

$$T_i^{n+1} - T_i^n = \theta [A_i T_{i-1}^{n+1} - 2B_i T_i^{n+1} + D_i T_{i+1}^{n+1}] + (1-\theta) [A_i T_{i-1}^n - 2B_i T_i^n + D_i T_{i+1}^n] \quad (5.43)$$

Na equação 5.43 são considerados os parâmetros A, B e D, representados pelas expressões 5.44 e 5.45.

Para $i=1$, $x=0$

$$A_i = \frac{k_{i-1/2}}{(\rho C_p)_i} \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$$

$$D_i = \frac{k_{i+1/2}}{(\rho C_p)_i} \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$$

$$B_i = \frac{1}{2}(A_i + D_i) = \frac{1}{2} \left(\frac{k_{i-1/2} + k_{i+1/2}}{(\rho C_p)_i} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \right)$$

$\theta = 0$ Explicit scheme

$\theta = 1/2$ Crank-Nicolson scheme (5.44 e 5.45)

$\theta = 1$ Implicit scheme

A equação 5.43, pode ser trabalhada de modo que todas as temperaturas desconhecidas apareçam num membro da equação e todas as temperaturas conhecidas apareçam no outro membro.

$$-\theta A_i T_{i-1}^{n+1} + (1 + 2\theta B_i) T_i^{n+1} - \theta D_i T_{i+1}^{n+1} = [(1-\theta) A_i] T_{i-1}^n + [1 - 2(1-\theta) B_i] T_i^n + [(1-\theta) D_i] T_{i+1}^n \quad (5.46)$$

$$T_{i-1}^{n+1} = T_{i+1}^{n+1} - \frac{2\Delta x}{k_i \Delta t} \rho C_p d_a (T_i^{n+1} - T_i^n) \quad (5.47)$$

Substituindo T_{i-1}^{n+1} da equação 5.47, na equação geral 5.46, possibilita a obtenção de:

$$-\theta A_i \left[T_{i+1}^{n+1} - \frac{2\Delta x}{k_i \Delta t} \rho C_p d_a (T_i^{n+1} - T_i^n) \right] + (1 + 2\theta B_i) T_i^{n+1} - \theta D_i T_{i+1}^{n+1} = \quad (5.48)$$

$$= (1 - \theta) A_i \left[T_{i+1}^n - \frac{2\Delta x}{k_i \Delta t} \rho C_p d_a (T_i^n - T_i^{n-1}) \right] + [1 - 2(1 - \theta) B_i] T_i^n + [(1 - \theta) D_i] T_{i+1}^n$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\begin{aligned} & \left[(1 + 2\theta B_i) + \theta A_i \frac{2\Delta x}{k_i \Delta t} \rho C_p d_a \right] T_i^{n+1} + [-\theta A_i - \theta D_i] T_{i+1}^{n+1} = \\ & = \left[1 - 2(1 - \theta) B_i - (1 - \theta) A_i \frac{2\Delta x}{k_i \Delta t} \rho C_p d_a + \theta A_i \frac{2\Delta x}{k_i \Delta t} \rho C_p d_a \right] T_i^n + [(1 - \theta) A_i + (1 - \theta) D_i] T_{i+1}^n + (1 - \theta) A_i \frac{2\Delta x}{k_i \Delta t} \rho C_p d_a T_i^{n-1} \end{aligned} \quad (5.49)$$

Para o modelo unidimensional 1.2, terá para $x = L$ a seguinte alteração em $i = n_x$.

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{k_{i-1/2}}{(\rho C_p)_i} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \\ D_i &= \frac{k_{i-1/2}}{(\rho C_p)_i} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \\ B_i &= \frac{1}{2} (A_i + D_i) = \frac{1}{2} \left(\frac{k_{i-1/2} + k_{i-1/2}}{(\rho C_p)_i} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \right) \end{aligned} \quad (5.50)$$

Esta alteração condiciona a equação de equilíbrio.

$$\begin{aligned} & -\theta (A_i + D_i) T_{i-1}^{n+1} + \left[(1 + 2\theta B_i) + \theta \frac{D_i 2\partial x}{k_i} (hc) \right] T_i^{n+1} = \\ & = [(1 - \theta) (A_i + D_i)] T_{i-1}^n + \left[(1 - 2(1 - \theta) B_i) - (1 - \theta) \frac{D_i 2\partial x}{k_i} (hc) \right] T_i^n + D_i \frac{2\partial x}{k_i} (q_{rad} + hc T_a + \varepsilon \sigma T_a^4) \end{aligned} \quad (5.51)$$

5.3.3. Problema inverso de condução de calor

O método que se apresenta pretende determinar o valor da condutividade térmica.

5.3.3.1. Definição de problema inverso

A resolução do problema inverso foi descoberto pelo astrofísico georgiano Viktor Amazaspovich Ambartsumian.

Na referência [5.14], é apresentada uma definição para resolução deste tipo de problemas. Resolver um problema inverso significa determinar causas desconhecidas através de efeitos desejados ou observados. Esta definição introduz, implicitamente, o conceito de optimização ou de projecto óptimo.

Em geral, as observações reais são imprecisas (dados contaminados com ruídos ou erros experimentais) e incompletas. Os problemas directos requerem um conhecimento completo e preciso das causas para a determinação dos efeitos. A figura 5.8 refere a relação entre problema directo e inverso. Causas, num modelo matemático, são as condições iniciais e de contorno, termo de fontes/sumidouro e

propriedades do sistema (material). Efeitos são as propriedades calculadas a partir de um modelo directo, como o campo de temperatura, concentração de partículas, corrente eléctrica, etc.

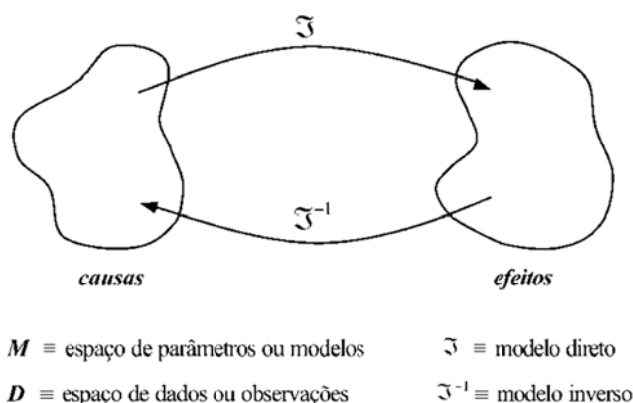


Figura 5.8 – Representação esquemática de problemas directo e inverso.

Em muitas situações dinâmicas da análise térmica, o fluxo de calor e as histórias das temperaturas, na superfície de um sólido devem ser determinadas das medidas transientes da temperatura em uma ou várias posições interiores.

Na solução do Problema Inverso, todas as outras quantidades existentes na formulação matemática do problema físico são consideradas conhecidas de forma exacta. Porém, as medidas de temperaturas podem conter erros experimentais. Na solução do problema inverso nenhuma hipótese é estabelecida no início sobre a forma funcional do termo-fonte desconhecido, a menos do espaço funcional ao qual a função pertence. A solução do problema inverso pode ser determinada pelo Método do Gradiente Conjugado com Problema Adjunto para a estimativa de função, no qual se assume que a função desconhecida pertence ao espaço de Hilbert de funções cujo quadrado é integrável no domínio de interesse, [5.18].

O problema inverso clássico em transferência de calor por condução é aquele associado à estimativa do fluxo de calor ou da distribuição de temperatura na superfície de contorno do meio sob análise. Porém, outros problemas inversos em condução, com aplicações tecnológicas relevantes, envolvem de forma independente ou de forma combinada a estimativa de condições iniciais, geometria, termos fonte e propriedades térmicas.

5.3.3.2. Determinação da condutividade térmica

A regularização é obtida pelo método da especificação da função, considerando uma e r etapas futuras de tempo, [5.9].

O método consiste em minimizar a soma dos erros esquadados de temperatura, T , e os valores medidos da temperatura, Y . M representa um incremento para cada intervalo de tempo.

$$S = \sum_{i=1}^r (Y_{M+i-1} - T_{M+i-1})^2 \quad S = [\mathbf{Y} - \mathbf{T}]^T [\mathbf{Y} - \mathbf{T}] \quad (5.52)$$

A minimização de função de erro, em relação à condutibilidade térmica efectiva, permite escrever:

$$\mathbf{X}^T [\mathbf{Y} - \mathbf{T}] = \mathbf{0} \quad (5.53)$$

Nesta equação, \mathbf{X}^T representa os coeficientes de sensibilidade.

$$\mathbf{X}^T = \nabla_{\mathbf{K}} \mathbf{T}^T \quad (5.54)$$

Fazendo a expansão de temperatura em série de Taylor, sobre valores experimentais: \mathbf{K}^ν

$$\mathbf{T}(\mathbf{K}^{\nu+1}) = \mathbf{T}^\nu + \mathbf{X}_{\mathbf{K}=\mathbf{K}^\nu} (\mathbf{K}^{\nu+1} - \mathbf{K}^\nu) \quad (5.55)$$

A variação da condutibilidade térmica e a condutibilidade térmica “nova” podem ser determinadas através de:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{K} &= (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T [\mathbf{Y} - \mathbf{T}^\nu] \\ \mathbf{K}^{\nu+1} &= \mathbf{K}^\nu + \Delta \mathbf{K} \end{aligned} \quad (5.56)$$

Os valores experimentais da temperatura, \mathbf{Y} , são iguais ao valor médio superior das temperaturas de aço.

O processo acima é aplicado somente na medida de um ponto para determinar o vector desconhecido \mathbf{K} , o vector \mathbf{K} . é considerado constante para as etapas de tempo futuras de r .

O processo iterativo termina quando a condição de erro é satisfeita, por exemplo quando $\varepsilon_i = 1e^{-4}$

$$\frac{\|\Delta \mathbf{K}\|}{\mathbf{K}^{\nu+1}} \leq \varepsilon_1 \quad \|\Delta \mathbf{K}\| \leq \varepsilon_2 \quad S^{\nu+1} \leq \varepsilon_3 \quad (5.57)$$

5.3.4. Algoritmo computacional

Assumindo um valor para a condutibilidade térmica efectiva inicial, $\mathbf{K}^0 = 0.01$, torna-se necessário resolver o problema directo e calcular o campo da temperatura do intumescente \mathbf{T}^ν . Na fase seguinte, determinam-se os coeficientes de sensibilidade, através do método de perturbação, assumindo uma pequena alteração de variável k .

$$\mathbf{X}^T = \nabla_{\mathbf{K}} \mathbf{T}^T = \frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial \mathbf{K}} = \frac{T_{i=1}^{n+1}((1 + \varepsilon_k)K^0) - T_{i=1}^{n+1}(K^0)}{\varepsilon_k K^0} \text{ com } \varepsilon_k = 1e^{-3} \quad (5.58)$$

O processo continua com a determinação de tempo ΔK , conhecendo \mathbf{X}^T e \mathbf{T}^v , usando as temperaturas experimentais no tempo actual. Na fase seguinte é necessário actualizar o valor de condutividade efectiva. Determinar \mathbf{K}^{v+1} , conhecendo ΔK e \mathbf{K}^v . O processo termina, se o valor for determinado.

5.4. Resultados numéricos

A tabela 5.6 apresenta as características térmicas e físicas para os diferentes elementos estruturais em análise (IPE100, IPE200, CHS90X4, SHS90X90X4, L100X65X8, L130X90X14, HEB200, CHS 139.7X8 e SHS140X140X8). O factor de secção é determinado pela hipótese de aquecimento na envolvente dos perfis, (quatro lados). Os factores de secção para os elementos estruturais IPE100,200 e HEB200 foram assumidos a partir do catálogo da empresa ArcelorMittal, [5.9].

Nesta secção serão apresentados resultados de simulação numérica de elementos protegidos com placas de silicato de cálcio. Para tal, foi utilizado um programa desenvolvido em Matlab, [5.13].

Nos programas desenvolvidos em Matlab, foram definidas as propriedades térmicas dos elementos estruturais a partir da referência, [5.3].

Para este estudo foram utilizados valores, como a espessura do material de protecção, (Silicato de Cálcio) com 12 [mm], o calor específico sendo de 1200 [J/kgK], a massa específica igual a 870 [Kg/m³] e a condutividade térmica com valor de 0.175 [W/mK], [Tria].

| Elemento Estrutural | Dimensões | Área da secção m ² | Perímetro m ² /m | Factor de Secção m ⁻¹ | ds |
|---------------------|--------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------|
| L | 100 x 65 x 8 | 0.001270 | 0.321 | 252.8 | 0.003956 |
| L | 130X90X14 | 0.002900 | 0.431 | 148 | 0.006757 |
| IPE100 | h=100; b=55 | 0.001030 | 0.400 | 387 | 0.002584 |
| IPE200 | h=220; b=110 | 0.002850 | 0.848 | 270 | 0.003704 |
| CHS | 90X4 | 0.001070 | 0.279 | 260.7 | 0.003836 |
| CHS | 139.7X8 | 0.003310 | 0.439 | 132.6 | 0.007541 |
| SHS | 90X90X4 | 0.001360 | 0.350 | 257.3 | 0.003887 |
| SHS | 140X140X8 | 0.004160 | 0.539 | 129.6 | 0.007718 |
| HEB200 | h=200; b=220 | 0.009100 | 1.270 | 147 | 0.006803 |

Tabela 5.6- Valores de factor de secção para diferentes elementos estruturais.

5.4.1. Método simplificado

O método simplificado foi utilizado aplicando a aplicação SteelFirePro, [5.16], que consiste num programa baseado em Matlab, [5.13]. SteelFirePro utiliza uma janela para introdução de dados e para apresentação de resultados. Este programa permite determinar a temperatura dos elementos de aço, protegidos, submetidos a condições de incêndio, o utilizador deve seleccionar o perfil em aço, as propriedades térmicas do aço e do isolamento pretendido, a espessura do isolamento, a temperatura inicial e a curva de incêndio normalizada, neste caso a curva ISO834. A figura 5.9 apresenta a interface do programa.

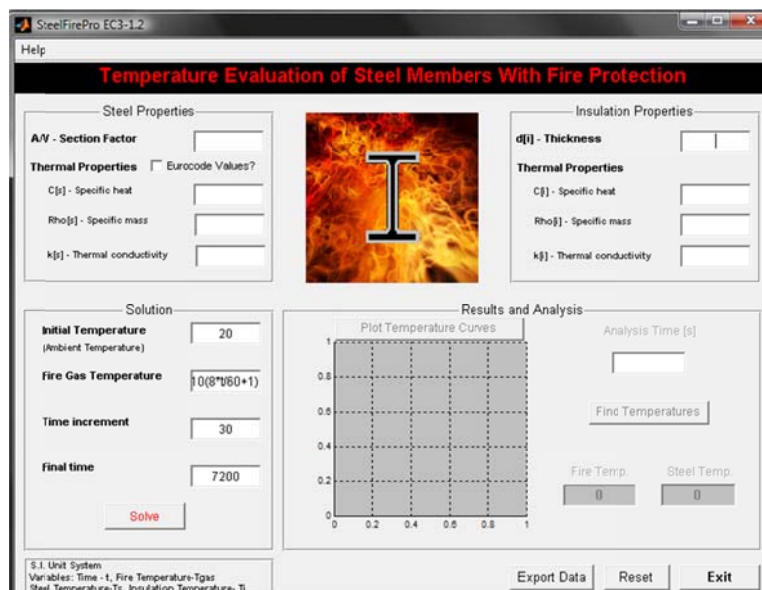


Figura 5.9 – Programa Steel Fire Pro, [5.16].

A figura 5.10 representa a evolução de temperatura em cada secção dos perfis, na posição $x=0$, de acordo com o regulamento europeu, deste $t=0$ até $t=7200$ [s], utilizando um incremento de tempo, $\Delta t = 3.75$ [s].

Estes resultados foram determinados para o sistema de protecção com silicato de cálcio.

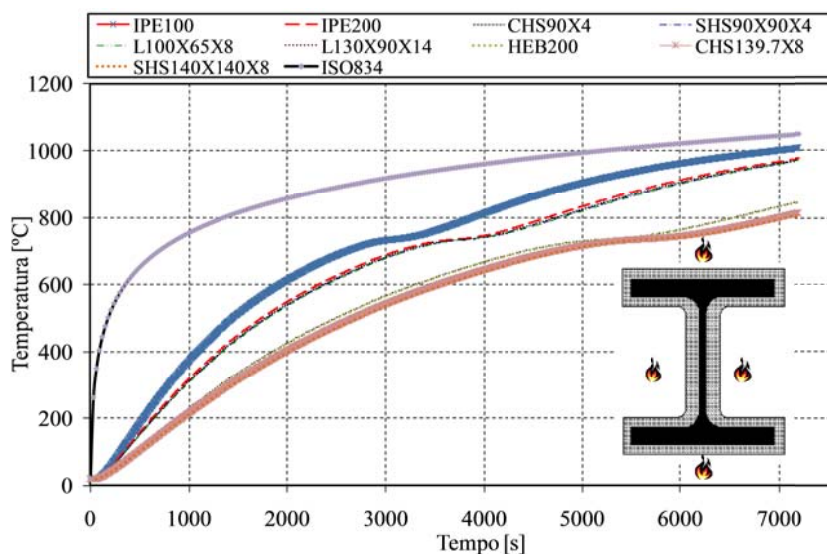


Figura 5.10 – Evolução de temperatura para diferentes secções de elementos estruturais em $x=0$.

5.4.2. Modelo 1.1

Nesta secção serão apresentados os resultados da evolução de temperatura, considerando o modelo 1.1, utilizando os dois métodos (Crank-Nicolson e implícito). No anexo I, está apresentada a rotina desenvolvida em Matlab.

5.4.2.1. Crank-Nicolson

Nesta secção estão apresentados os resultados do modelo 1.1 com recurso ao método de Crank-Nicolson, $\theta = 1/2$.

A figura 5.11, apresenta o resultado da evolução de temperatura para $x=0$, para todas as secções em estudo.

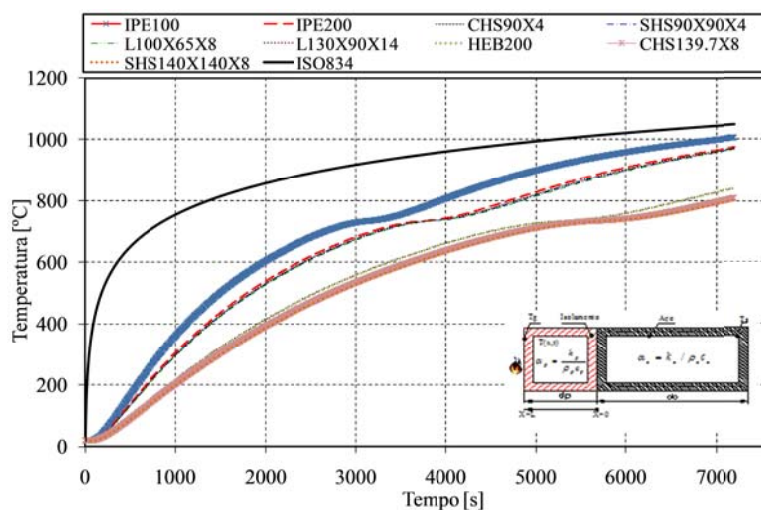


Figura 5.11 – Evolução de temperatura para diferentes elementos estruturais em $x=0$, aplicando o método de Crank-Nicolson.

5.4.2.2. Método implícito

Nesta secção estão representados os resultados do modelo 1.1 com recurso ao método de implícito, $\theta = 1$.

A figura 5.12 representa a evolução de temperatura para $X=0$, para todas as secções em estudo. A evolução da temperatura para cada secção é muito semelhante à evolução determinada pelo método anterior.

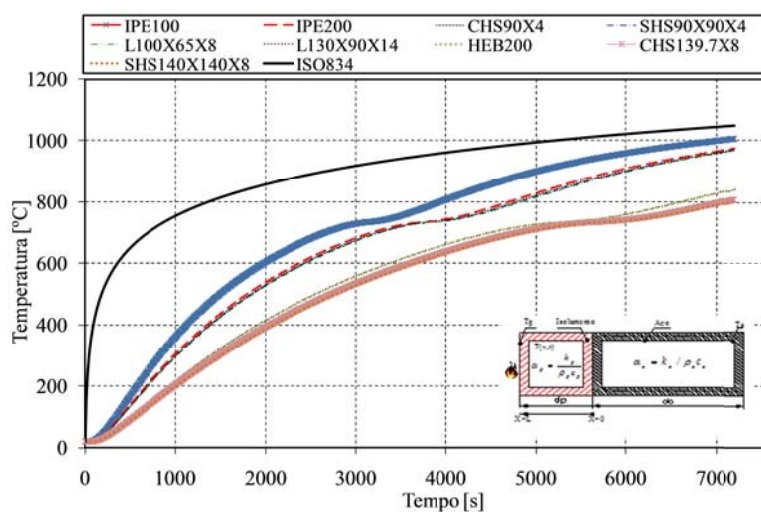


Figura 5.12 – Evolução de temperatura para diferentes elementos estruturais em $x=0$, aplicando o método implícito.

5.4.2.3. Comparação e determinação do erro

A tabela 5.7 apresenta o erro relativo, acumulado deste $t=0$ até $t=7200$ [s], considerando um um intervalo de tempo, $\Delta t = 3.75$ [s]. Os dois métodos, Crank-Nicolson e Implícito, obtidos numericamente são comparados com os resultados obtidos pelo programa Steel Fire Pro, utilizando o método simplificado. Na tabela 5.6, N1 refere o método Crank Nicolson e N2 o método Implícito.

| Elemento estrutural | Média do Erro N1 [%] | Média do Erro N2 [%] |
|---------------------|----------------------|----------------------|
| IPE100 | 1.898 | 1.858 |
| IPE200 | 2.324 | 2.284 |
| HEB200 | 2.735 | 2.698 |
| L 100 x 65 x 8 | 2.387 | 2.347 |
| L 130 x 90 x 14 | 2.732 | 2.695 |
| CHS 139.7X8 | 2.768 | 2.731 |
| SHS 140x140x8 | 2.787 | 2.751 |
| SHS 90x90x4 | 2.372 | 2.332 |
| CHS 90x4 | 2.358 | 2.317 |

Tabela 5.7- Valores do erro relativo em $x=0$ para os diversos elementos estruturais.

A figura 5.13 representa uma comparação da temperatura entre os dois métodos numéricos e os valores determinados pelo método simplificado, para 26 instantes de tempo, durante o processo de aquecimento normalizado, para um dos perfis de tabela, IPE100.

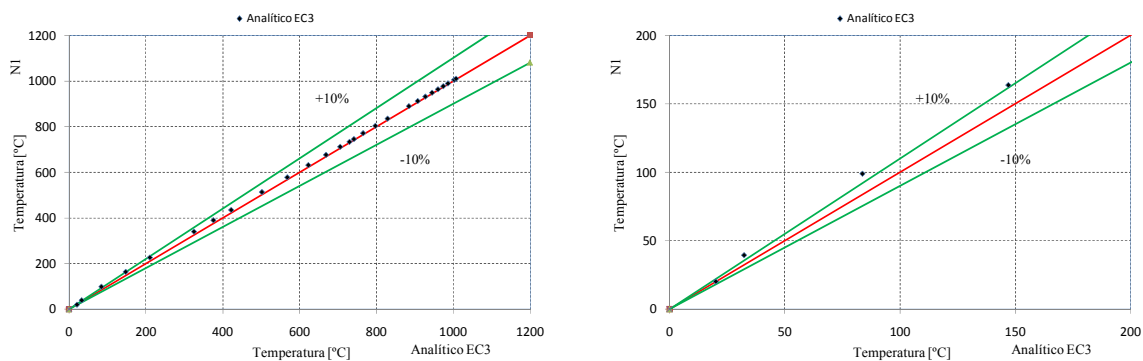


Figura 5.13 a – Comparação entre método Crank-Nicolson e o método simplificado, para o perfil IPE100.

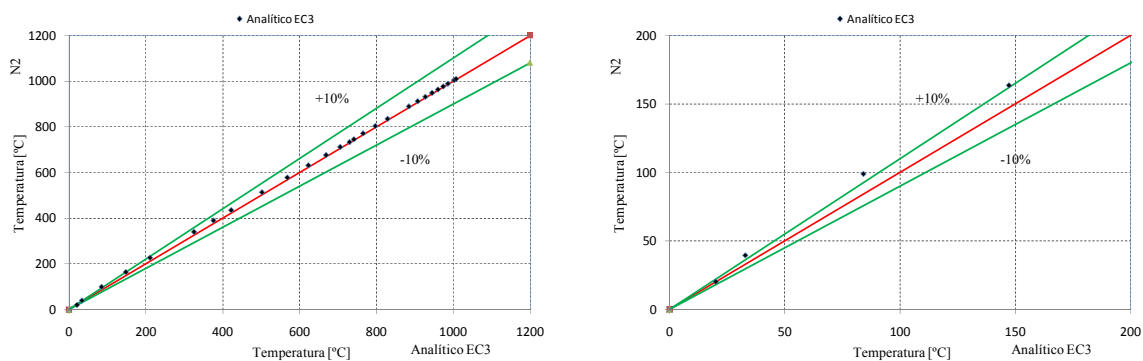


Figura 5.13 b – Comparação entre método Implícito e o método simplificado, para o perfil IPE100.

Nos gráficos de dispersão acima mencionados, verifica-se as diferenças entre as temperaturas determinadas no ensaio experimental e a previsão efectuada pelo método simplificado são inferiores a $\pm 10\%$, convergindo para valores muito próximos na fase final.

5.4.3. Modelo 1.2

Nesta secção serão apresentados os resultados da evolução de temperatura, considerando o modelo 1.2, utilizando os dois métodos (Crank-Nicolson e implícito). Este modelo também foi implementado em linguagem de programação, Matlab, ver anexo.

Este modelo permite determinar a variação de temperatura na superfície exposta da protecção, ($X=L$), considerando o fluxo de calor que entra por radiação e convecção. Foi utilizado o valor de 0.8 para a emissividade e de $25 \text{ [W/m}^2\text{]}$ para o coeficiente de transferência de calor por convecção.

5.4.3.1. Crank-Nicolson

Nesta secção estão apresentados os resultados do modelo 1.1 com recurso ao método de Crank-Nicolson, $\theta = 1/2$.

A figura 5.14, representa a evolução de temperatura entre o elemento estrutural e o elemento de protecção, $X=0$, para além da variação de temperatura na superfície exposta da protecção, $X=L$.

A figura 5.15 apresenta a evolução de temperatura em $X=0$ e $X=L$ para um IPE100 com um factor de secção de $387 \text{ [m}^{-1}\text{]}$.

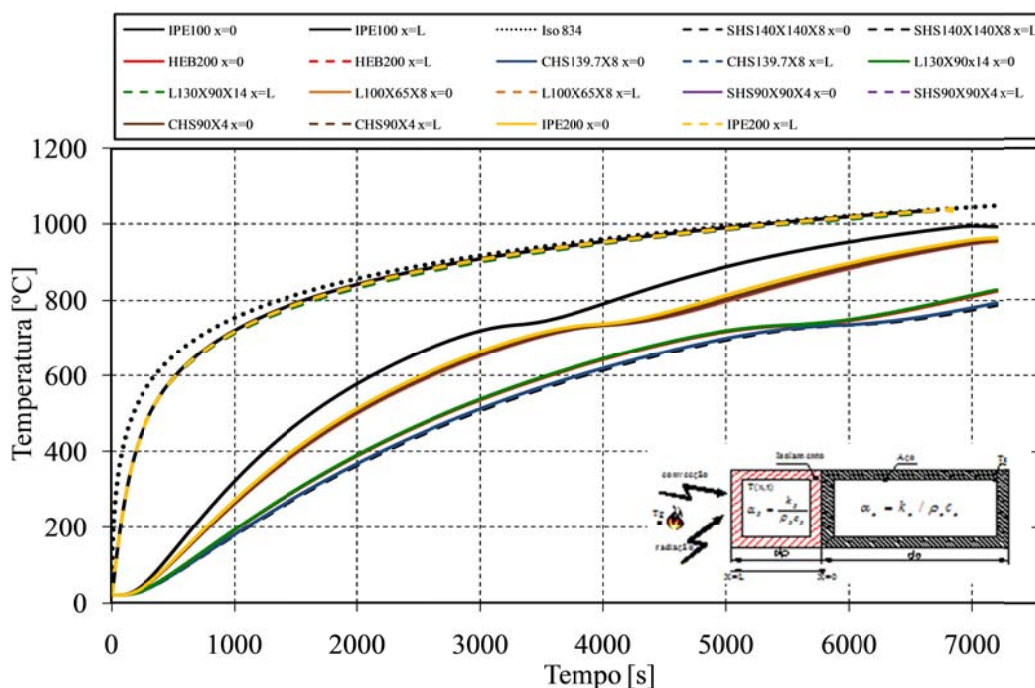


Figura 5.14 – Evolução de temperatura para diferentes elementos estruturais em $x=0$ e $x=L$, aplicando o método de Crank-Nicolson.

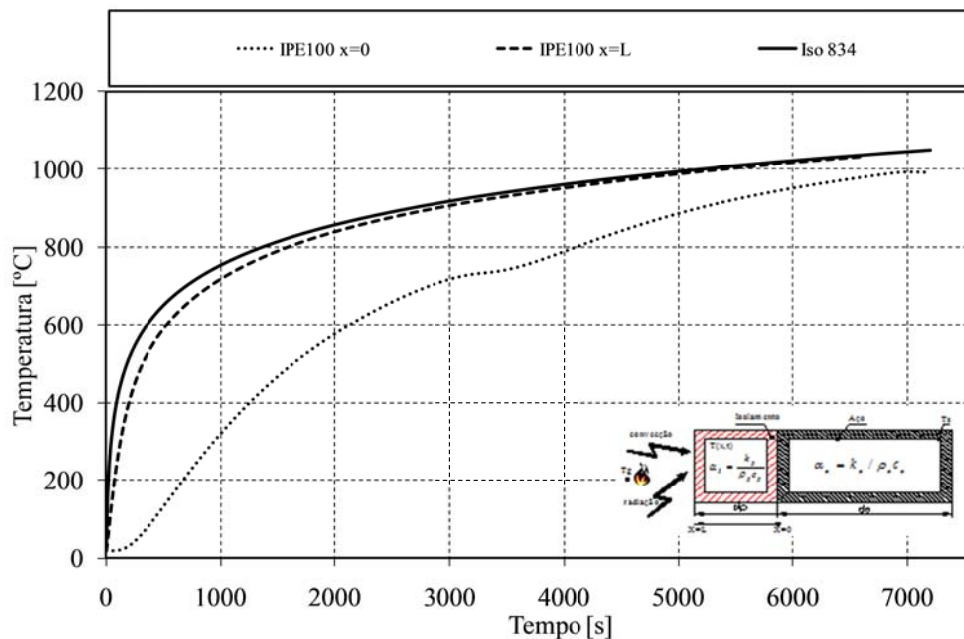


Figura 5.15 – Evolução de temperatura do IPE100 com protecção em $x=0$ e $x=L$.

5.4.3.2. Método implícito

Nesta secção estão representados os resultados do modelo 1.2 com recurso ao método de implícito, $\theta = 1$.

A figura 5.16, representa a evolução de temperatura entre o elemento estrutural e o elemento de protecção, $X=0$, a variação de temperatura na superfície exposta da protecção, $X=L$.

A evolução das temperaturas é muito semelhante à evolução obtida pelo método anterior.

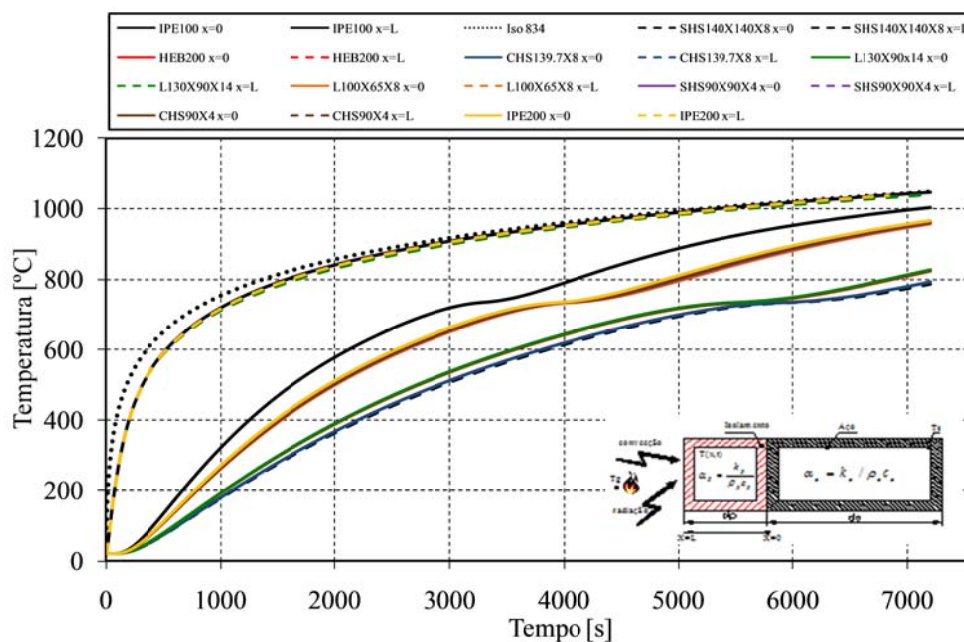


Figura 5.16 – Evolução de temperatura para diferentes elementos estruturais em $x=0$ e $x=L$, aplicando o método Implícito.

A figura 5.17, representa a evolução da temperatura na superfície exposta da protecção, ($X=L$) e no interior do perfil $X=0$, para um IPE100 com um factor de secção de $387 \text{ [m}^{-1}\text{]}$.

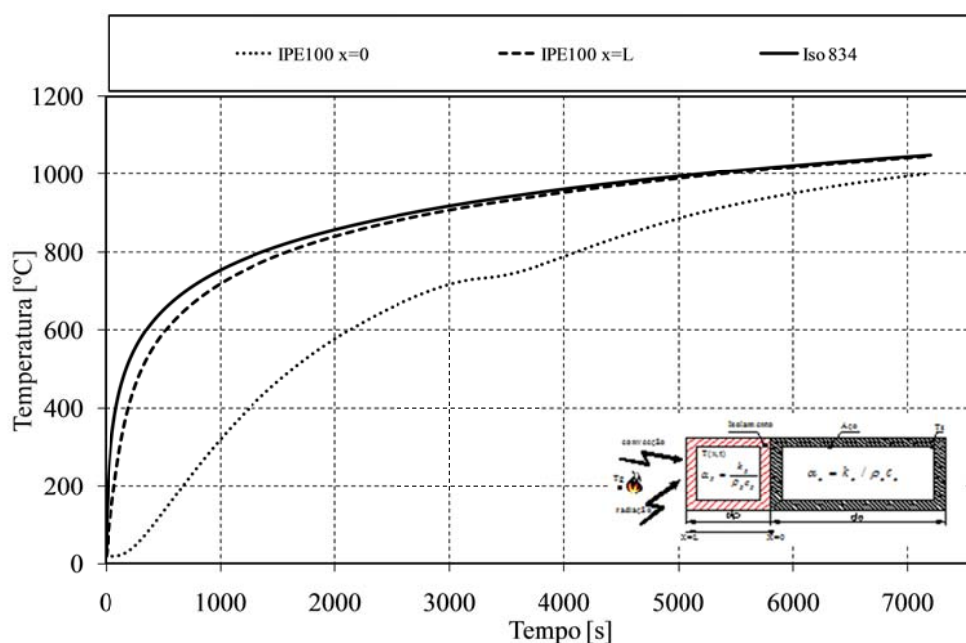


Figura 5.17 – Evolução de temperatura do IPE100 com protecção em $x=0$ e $x=L$.

5.4.3.3. Comparação e determinação do erro

A tabela 5.8 apresenta o erro relativo, acumulado deste $t=0$ até $t=7200 \text{ [s]}$, considerando um intervalo de tempo $\Delta t = 3.75 \text{ [s]}$. Os dois métodos, Crank-Nicolson e Implícito, obtidos numericamente, são comparados com os resultados obtidos pelo programa Steel Fire Pro, (método simplificado). Na tabela 5.6, N1 refere o método Crank Nicolson e N2 o método Implícito.

| Elemento estrutural | Média do Erro N1 [%] | Média do Erro N2 [%] |
|---------------------|----------------------|----------------------|
| IPE100 | 6.114 | 6.091 |
| IPE200 | 6.809 | 6.801 |
| HEB200 | 7.541 | 7.542 |
| L 100 x 65 x 8 | 6.921 | 6.914 |
| L 130 x 90 x 14 | 7.536 | 7.537 |
| CHS 139.7X8 | 7.598 | 7.600 |
| SHS 140x140x8 | 7.622 | 7.624 |
| SHS 90x90x4 | 6.889 | 6.886 |
| CHS 90x4 | 6.867 | 6.861 |

Tabela 5.8- Valores do erro relativo em $x=0$ para os diversos elementos estruturais.

A figura 5.18 representa uma comparação da temperatura entre os dois métodos numéricos e os valores determinados pelo método simplificado, para 26 instantes de tempo, durante o processo de aquecimento normalizado, para um dos perfis de tabela, IPE100.

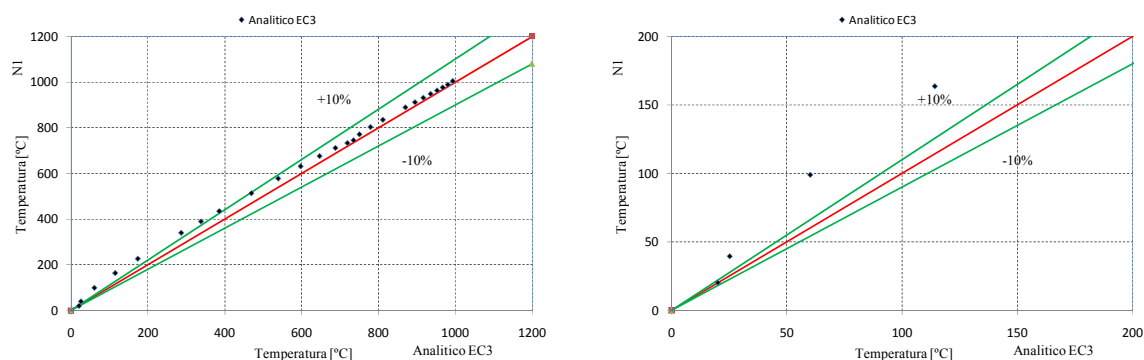


Figura 5.18 a – Comparação entre método Crank-Nicolson e o método simplificado, para o perfil IPE100.

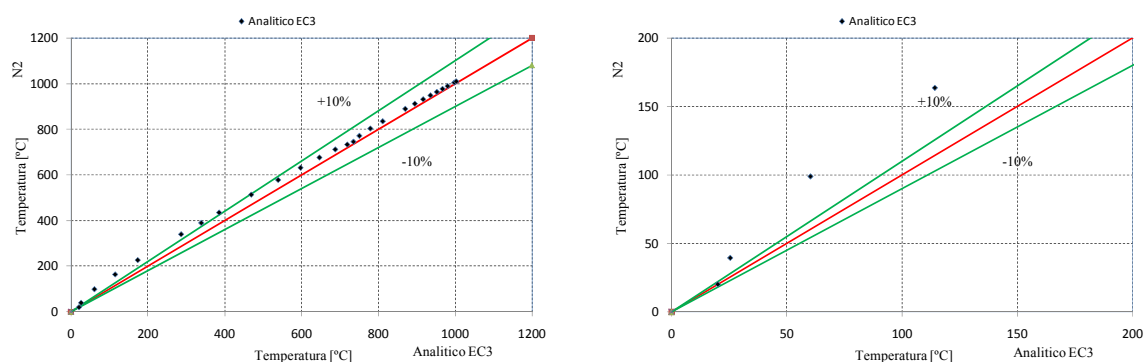


Figura 5.18 b – Comparação entre método Implícito e o método simplificado, para o perfil IPE100.

Nos gráficos de dispersão acima mencionados, as diferenças entre as temperaturas determinados no ensaio experimental e a previsão efectuada pelo método simplificado são inferiores a 20 %, convergindo para valores muito próximos na fase final.

5.5. Resultados experimentais

Os ensaios experimentais, foram realizados no Laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais (LERM), no forno de ensaios de resistência ao fogo. Foi realizado um ensaio com um elemento estrutural IPE100, com dimensões 300 [mm], com protecção de Silicato de Cálcio. Foram realizados três ensaios com perfis IPE100 e IPE220, com dimensão de 1 [m] e com protecção com tinta intumescente.

Nas secções seguintes serão apresentados em pormenor os ensaios efectuados.

5.5.1. Resultado experimental com silicato de cálcio

Para este ensaio experimental utilizaram-se três secções IPE100 com 300 [mm] cada. D elementos foram protegidos com placas de silicato de cálcio com uma espessura, d_i , 12 [mm], ver figura 5.19 e o terceiro elemento não foi protegido. A preparação das amostras e os resultados serão apresentados nas secções seguintes.

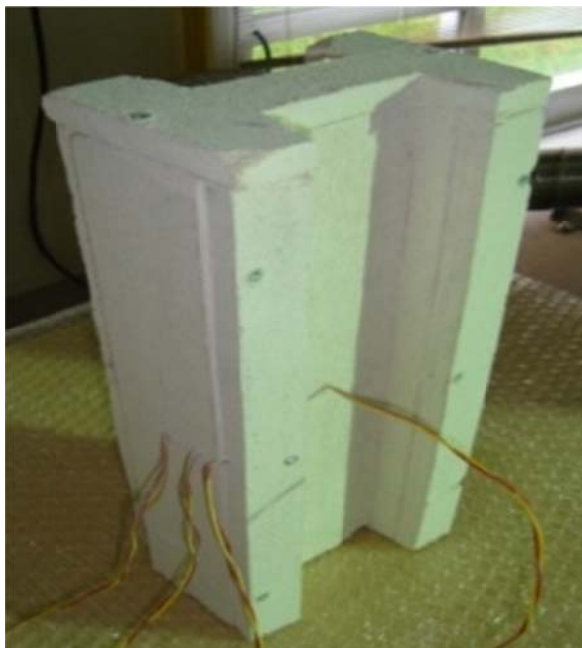


Figura 5.19 – Elemento estrutural com protecção de silicato de cálcio.

5.5.1.1. Preparação do ensaio

Dos elementos estruturais disponíveis, foram cortados três troços de perfil IPE100. Os fios de termopar foram soldados no perfil de acordo com a disposição representada na figura 5.20.

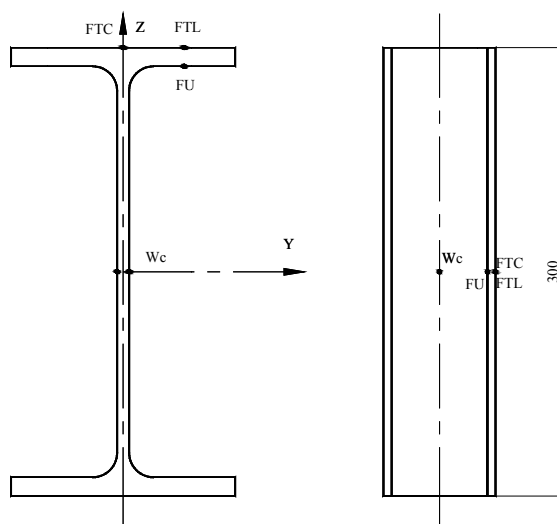


Figura 5.20 – Posição dos termopares para leitura das temperaturas no IPE100

Os termopares foram colocados nos três elementos de igual forma, permitindo efectuar leitura no topo do banzo (FCT e FTL), na zona interior do banzo (FU) e na zona média da alma do perfil (WC).

Na figura 5.21 está representado o equipamento de soldadura utilizado para soldar os termopares.

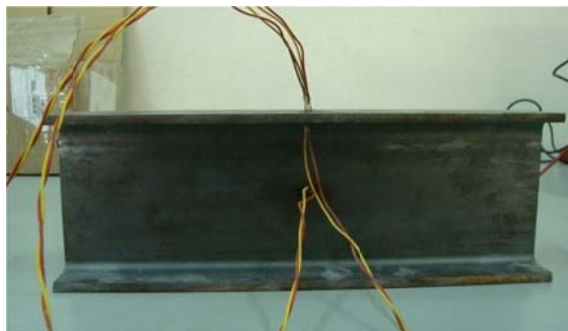


Figura 5.21 – Processo de soldadura de termopares no elemento estrutural.

A protecção em silicato de cálcio é colocada em todos os lados, ver figura 5.22, sendo as placas do material de protecção ligadas entre si por parafusos.



Figura 5.22 – Isolamento do elemento estrutural em silicato de cálcio.

Os três elementos foram colocados no forno de reacção ao fogo, figura 5.23. Os elementos foram ensaiados segundo a curva de incêndio ISO834, durante 60 [min]. A figura 5.24 mostra os perfis com e sem protecção sujeitos à acção do fogo.



Figura 5.23 – Visualização dos elementos estruturais com e sem protecção no interior do forno.

Durante a realização do ensaio verificou-se a separação de uma das placas de protecção da alma do perfil, ver figura 5.24.

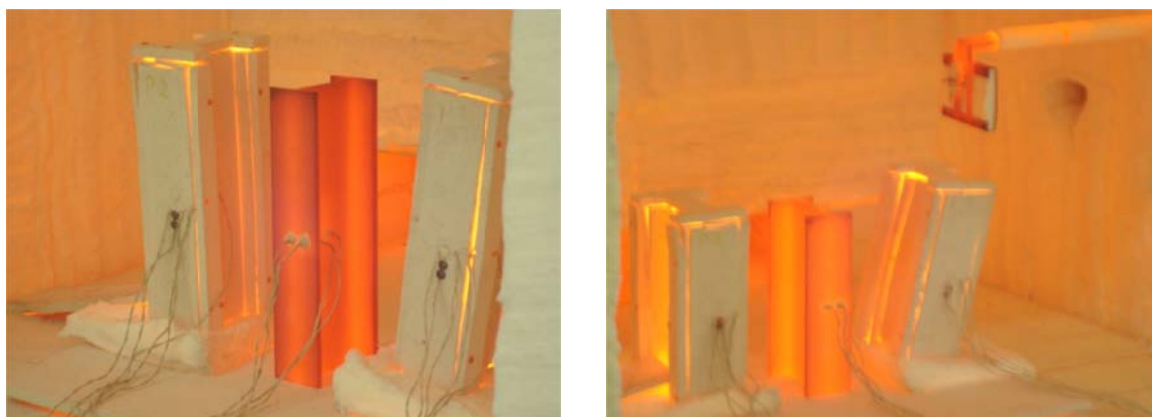


Figura 5.24 – Elementos estruturais com e sem protecção sujeitos à acção do fogo.

5.5.1.2. Resultados experimentais

Os gráficos apresentados nas figuras seguintes, representam a evolução das temperaturas medidas nos três elementos. Os resultados foram determinados até um instante final de 3600 [s].

Na Figura 5.25 estão representados os valores experimentais da temperatura medida no perfil sem protecção. Como se pode verificar, depois de $t=2000$ [s], o perfil desprotegido fica com temperatura idêntica à temperatura da acção do fogo, pelo facto de apresentar um valor de massividade térmica reduzido.

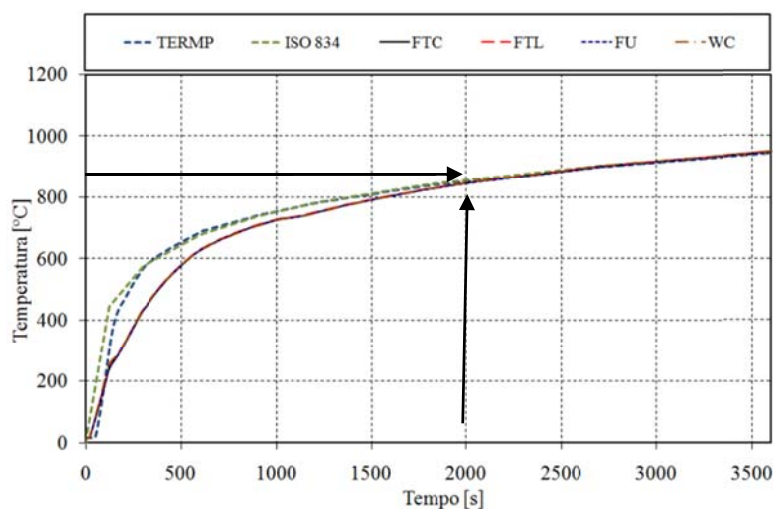


Figura 5.25- Resultado experimental de um perfil IPE100 sem protecção.

Nas Figura 5.26 e 5.27 estão representados os valores experimentais de dois perfis IPE100 com protecção de Silicato de Cálcio, respectivamente designado por P1 e por P2. Conforme referido na secção anterior, o perfil P2 perdeu a protecção da placa na alma do perfil, originando o aumento da temperatura do perfil no local e na secção do mesmo, ver figura 5.27.

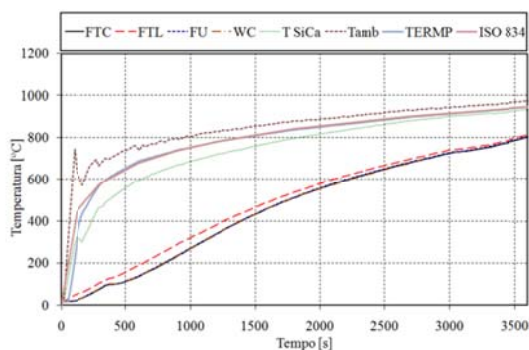


Figura 5.26- Resultado experimental de um perfil IPE100 com protecção, P1.

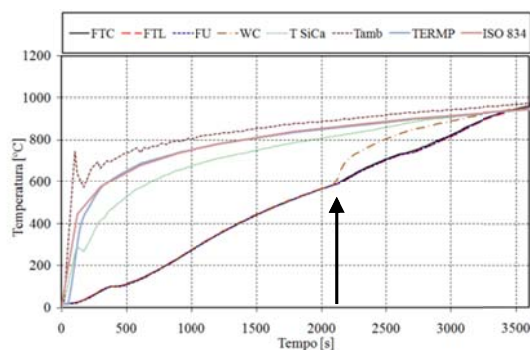


Figura 5.27 – Resultado experimental de um perfil IPE100 com protecção, P2.

5.5.1.3. Comparação e determinação do erro

A figura 5.28 apresenta uma comparação da temperatura do perfil protegido, P1 com os valores determinados pelo método simplificado, durante 16 instantes de tempo, considerando o valor das medições efectuadas na posição, FTC, ver figura 5.20.

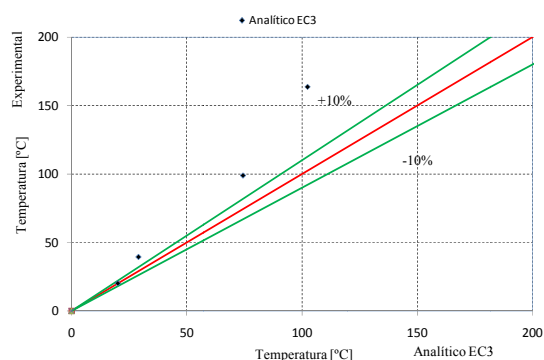
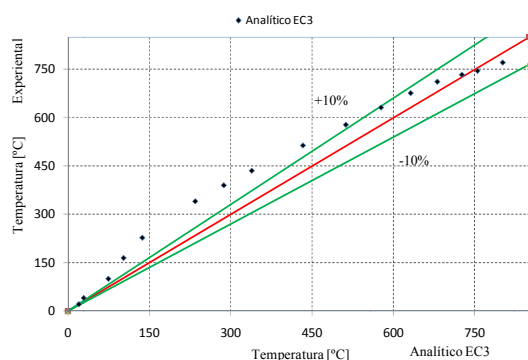


Figura 5.28 – Comparação de um perfil IPE100 com protecção, P1 entre o ensaio experimental e o analítico.

As diferenças entre as temperaturas medidas experimentalmente e a previsão efectuada pelo método simplificado são inferiores a 20 %, convergindo para valores muito próximos na fase final.

A protecção com Silicato de Cálcio foi eficiente, retardando o aumento da temperatura no aço, conforme esperado. Para $t=2000$ [s], a diferença de temperatura no aço protegido e no aço sem protecção é superior a 200 [°C].

5.5.2. Resultado experimental com tinta intumescente

Nas secções seguintes são apresentados os ensaios em dois tipos de perfis com protecção passiva de tinta intumescente.

5.5.2.1. IPE100 com tinta intumescente

Na figura 5.29 está representado um elemento IPE100, com 1 [m] de comprimento e com 1000 [μm] de protecção com tinta intumescente (valor medido com tinta seca).

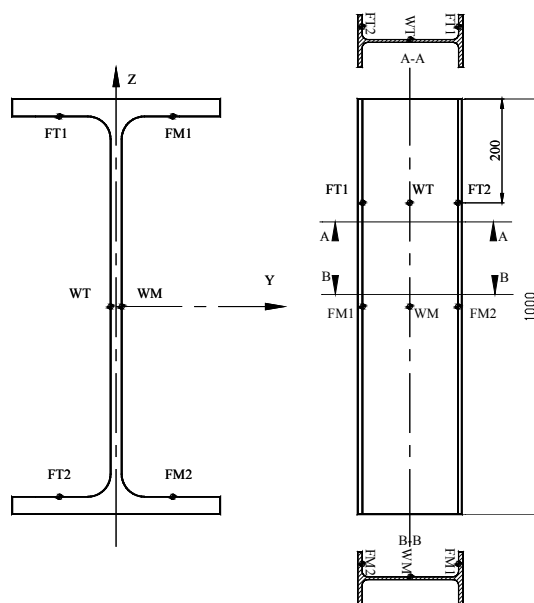


Figura 5.29 - Posição dos termopares para leitura das temperaturas no IPE100.

5.5.2.1.1. Preparação do ensaio

Neste ensaio foram utilizados dois elementos IPE100 (com e sem protecção passiva). Em cada elemento foram soldados seis termopares tipo K, de acordo com a norma UNE23820, [5.11], identificadas com as referências FT1 e FT2 para as leituras medidas no topo do banzo do perfil, identificadas com a referência WT para a leitura medida no topo da alma do perfil, identificada com a referência WM para as leituras medidas no centro da alma do perfil e identificadas com FL1 e FL2 para as leituras medidas no banzo ao centro do perfil. Foram colocadas quatro cantoneiras de protecção para termopares no elemento a ser protegido com tinta intumescente, ver figura 5.30.

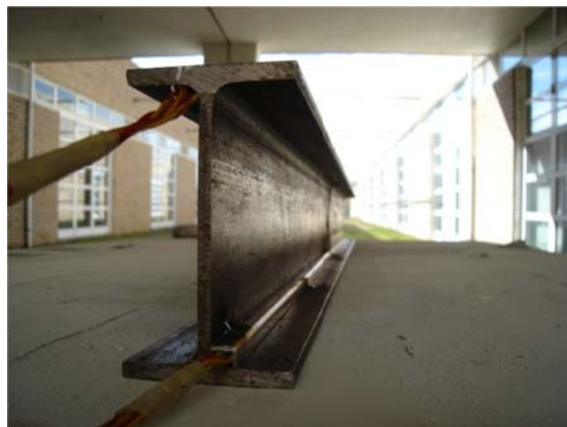


Figura 5.30 - Posição dos termopares para leitura das temperaturas no IPE100

No elemento protegido foi utilizada com tinta intumescente tipo A, do fornecedor A, ver figura 5.31.

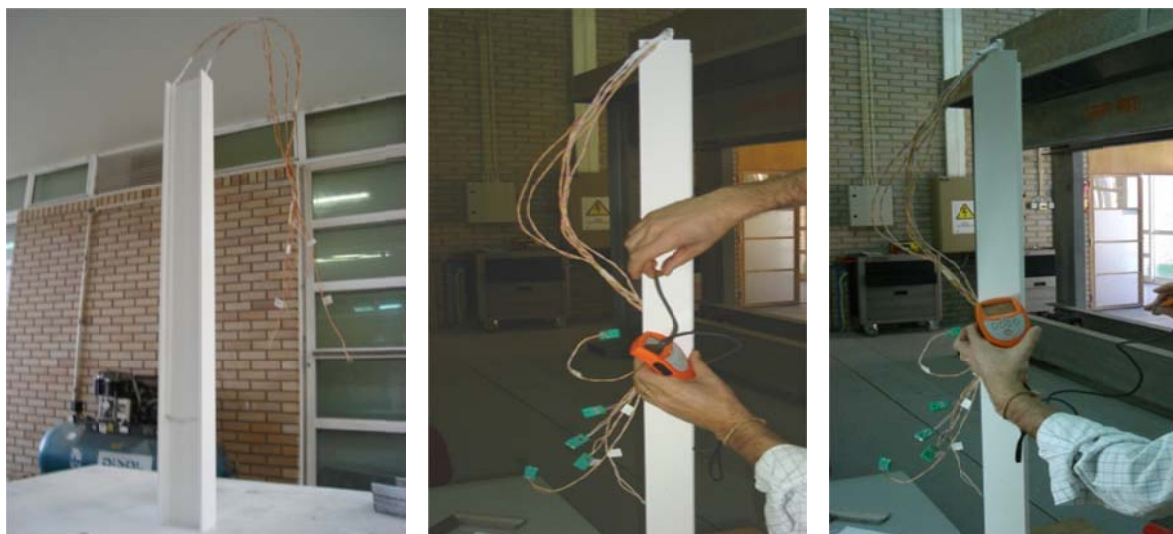


Figura 5.31 - Elemento estrutural protegido com tinta intumescente do tip A e control de espessura de protecção.

O elemento protegido teve um acondicionamento segundo a norma EN 1363-1, [5.12], utilizando uma temperatura de 23 ° com 50 % de humidade, ver figura 5.32.



Figura 5.32 - Acondicionamento do elemento estrutural.

Estes dois elementos foram ensaiados segundo a curva de incêndio ISO834, no forno de resistência ao fogo, ver figura 5.33.



Figura 5.33 – Elemento estruturais com e sem protecção no forno de ensaios.

5.5.2.1.2. Resultado experimental

O gráfico apresentado na figura 5.34, representa a evolução das temperaturas medidas, em seis partes de cada perfil, até um instante final de 3600 [s]. Como se pode verificar, para o perfil sem protecção, são medidos valores de temperatura muito próximos da curva ISO834. Para o perfil protegido com tinta intumescente podemos observar que a diferença de temperatura do perfil é significativa, demonstrando a eficiência da protecção.

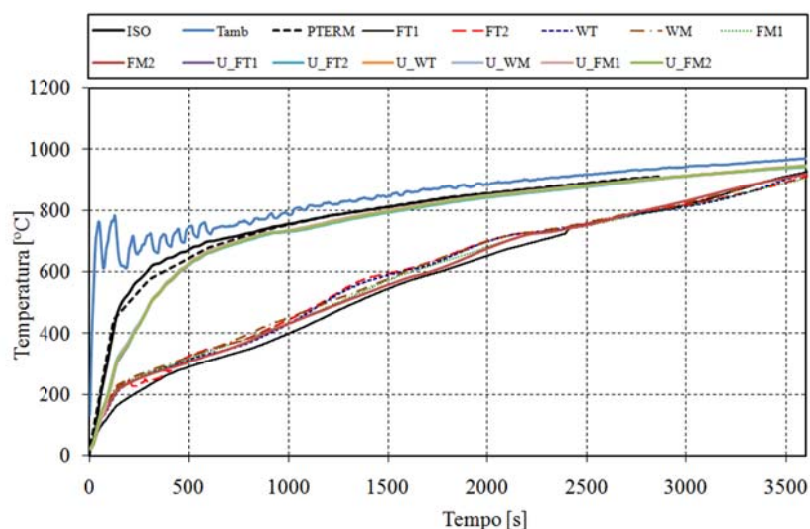


Figura 5.34 – Elemento estruturais com e sem protecção no forno de ensaios.

5.5.2.1.3. Comparação

Para comparação do ensaio experimental com os resultados determinados pelo método simplificado, foi utilizado o valor da condutividade térmica efectiva da tinta intumescente, obtida por via indirecta nos ensaios no calorímetro de cone, para uma espessura de protecção de 1.5 [mm] e para uma potência de 75 [kW/m²]. A curva da evolução da espessura de protecção foi obtida por via directa nas mesmas condições, [5.17].

Como resultado da análise do problema inverso de condução de calor, foi possível aproximar as propriedades termo-físicas do intumescente, concretamente a variação da condutividade térmica em função de temperatura média do intumescente e a evolução da espessura de protecção no tempo, ver figura 5.35 e 5.36, [5.17].

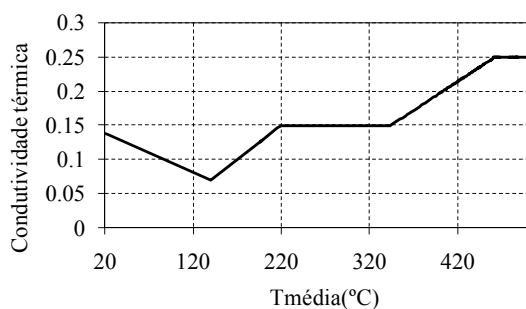


Figura 5.35 - Evolução da condutividade térmica ao longo da temperatura média.

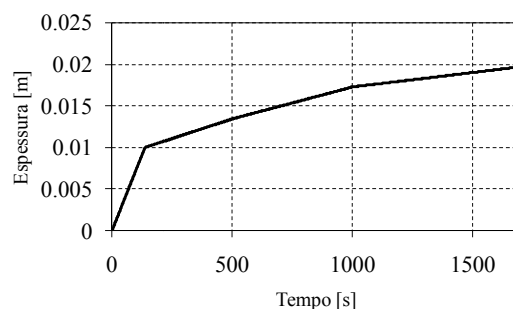


Figura 5.36 – Evolução da espessura de protecção ao longo do tempo.

Foi elaborado um programa em Matlab para determinar o incremento de temperatura de um elemento protegido, ver anexo. O resultado numérico é apresentado na figura 5.38 e o resultado do ensaio experimental é apresentado na figura 5.37.

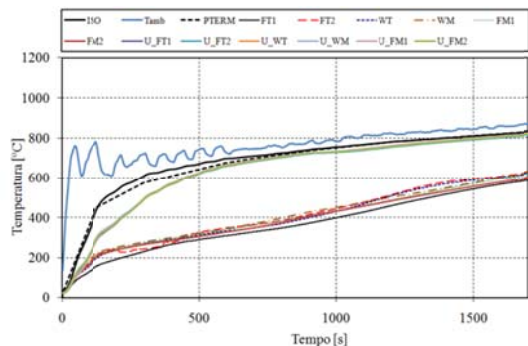


Figura 5.37 – Elemento estrutural com e sem protecção no forno de ensaios.

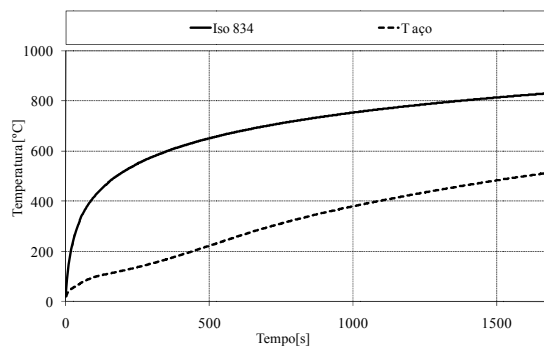


Figura 5.38– Elemento estrutural com protecção obtido pelo método simplificado segundo o EC3.

A figura 5.39, apresenta a comparação entre o método simplificado e o resultado experimental, sendo possível verificar que a fase inicial do ensaio apresenta uma grande dispersão de valores, da ordem dos 30-40 %, aproximando os valores para instantes de tempo posteriores. Uma explicação para justificar a dispersão dos valores está relacionada com as condições de simulação que são diferentes daquelas que deram origem ao valor das propriedades termo-físicas. Estas foram determinadas a partir de um ensaio realizado no calorímetro de cone, utilizando 1500 [μm] de protecção. Outra explicação para justificar a dispersão dos valores, está relacionada com a curva de aquecimento, que no ensaio experimental foi utilizada a curva padrão normalizada de incêndio ISO834 e no método simplificado, utilizou-se a temperatura à superfície do intumescente, [5.17]. Pode-se verificar que a curva utilizada no ensaio experimental é menos energética no seu início, quando comparada com a utilizado no método simplificado, ver na figura 5.40.

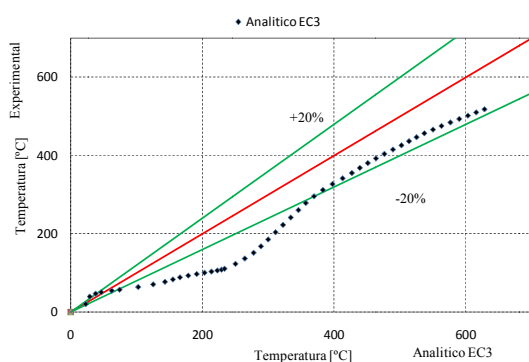


Figura 5.39 – Comparação entre o ensaio experimental e os resultados obtidos pelo método simplificado, para o perfil IPE100.

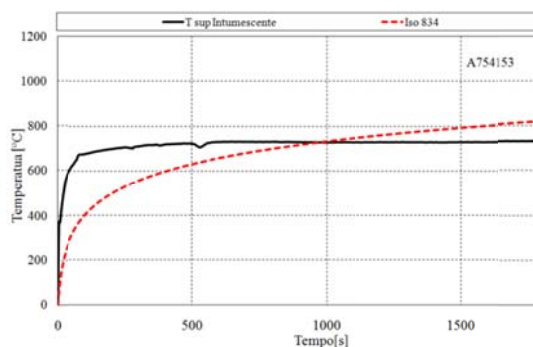


Figura 5.40 – Curva ISO834 e temperatura à superfície do intumescente.

5.5.2.2. IPE220 com tinta intumescente

Na figura 5.41 está representado um elemento IPE220, com 800 [mm] de comprimento e com uma espessura de protecção igual a 1000 [μm].

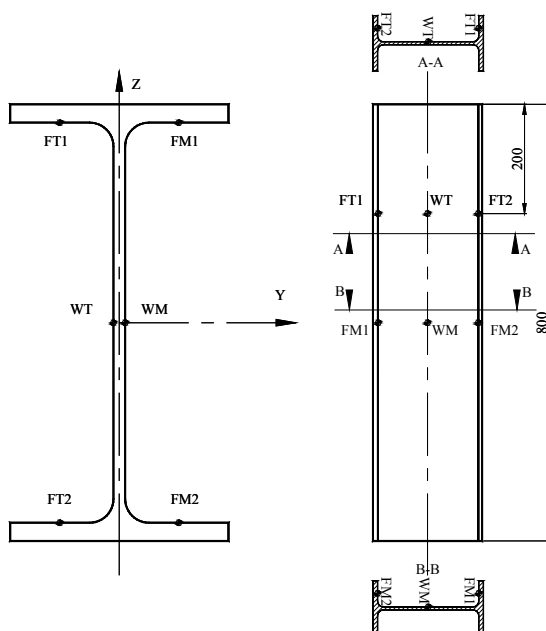


Figura 5.41 – Posição dos termopares para leitura das temperaturas no IPE220.

5.5.2.2.1. Preparação do ensaio

Neste ensaio foram utilizados dois elementos IPE220, com e sem protecção passiva. Em cada elemento foram soldados seis termopares tipo K, de acordo com a norma UNE23820, [5.11]. Foram identificadas as referências FT1 e FT2 para as leituras efectuadas no topo do banzo do perfil, identificada a referência WT para as leituras efectuadas no topo da alma do perfil, identificada a referência WM para as leituras efectuadas no centro da alma do perfil e FL1 e FL2 para as leituras efectuadas no banzo ao centro do perfil. Posteriormente procedeu-se à colocação de quatro cantoneiras de protecção para termopares no elemento protegido com tinta intumescente, ver figura 5.41.

Foram colocadas quatro cantoneiras de protecção para termopares no elemento a ser protegido com tinta intumescente, ver figura 5.42.

O elemento protegido, utilizou-se tinta intumescente tipo A, do fornecedor A.

Na tabela 5.8 é apresentada a evolução da espessura de protecção utilizada em cada demão, conforme processo representado na figura 5.43.



Figura 5.42 – Calha em inox para proteger os fios termopar.



Figura 5.43 – Control de espessura na cama de protecção.

A tabela seguinte refere as diferentes camadas de tinta que foi depositada sobre o elemento estrutural, apresentando o número de medições (N), em vários locais do perfil, como a alma e o banzo. Apresenta também a média de valores medidos (M), o desvio padrão (S), o maior (M_X) e menor (M_N) valor lido pelo equipamento ecometer. Depois de obter uma média de valores próxima da espessura de protecção pretendida, foi efectuado o acondicionamento, segundo a norma EN 1363-1, [5.12].

| | Alma Frente | Alma trás | Flange direita | Flange Esquerda | Banzo direito Frente | Banzo direito Trás | Banzo esquerda frente | Banzo esquerdo trás |
|----------|----------------|--------------|-------------------|--------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|
| N | 24 | 27 | 24 | 24 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Σ | 48.7 | 37.9 | 59 | 53.8 | 22.2 | 15.9 | 23.3 | 22.3 |
| M_N | 134 | 192 | 197 | 131 | 160 | 137 | 160 | 169 |
| M_X | 337 | 332 | 409 | 301 | 242 | 191 | 243 | 249 |
| M | 231 | 260 | 273 | 203 | 201 | 160 | 197 | 206 |
| N | 24 | 24 | 24 | 24 | 18 | 18 | 18 | 22 |
| Σ | 61.7 | 123.9 | 73.5 | 81.1 | 51.7 | 71.5 | 68.8 | 42.8 |
| M_N | 491 | 468 | 467 | 452 | 331 | 224 | 276 | 395 |
| M_X | 754 | 1013 | 737 | 770 | 530 | 406 | 581 | 554 |
| M | 607 | 668 | 603 | 577 | 411 | 318 | 378 | 450 |
| N | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| Σ | 77.7 | 65.8 | 94.6 | 78.2 | 61.7 | 112.9 | 80.3 | 72.8 |
| M_N | 767 | 763 | 638 | 687 | 526 | 574 | 577 | 623 |
| M_X | 1074 | 1036 | 988 | 1013 | 832 | 841 | 902 | 879 |
| M | 933 | 888 | 793 | 855 | 727 | 732 | 714 | 756 |
| N | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| Σ | 80.1 | 54 | 117.7 | 96.9 | 72.1 | 149.6 | 93.3 | 101.9 |
| M_N | 898 | 896 | 776 | 677 | 707 | 630 | 627 | 753 |
| M_X | 1234 | 1113 | 1217 | 1058 | 998 | 1149 | 1036 | 1130 |
| M | 1043 | 1011 | 954 | 906 | 805 | 864 | 859 | 902 |

Tabela 5.9 – controlo de espessura de tinta de protecção.

O elemento protegido teve acondicionamento segundo a norma EN 1363-1:1999, realizado a 23° com 50% de humidade, ver figura 5.44.



Figura 5.44 – Acondicionamento do elemento com protecção.

Os fios termopar foram protegidos em folha de alumínio, ver figura 5.45, tendo de seguida efectuado a colocação dos elementos no forno.

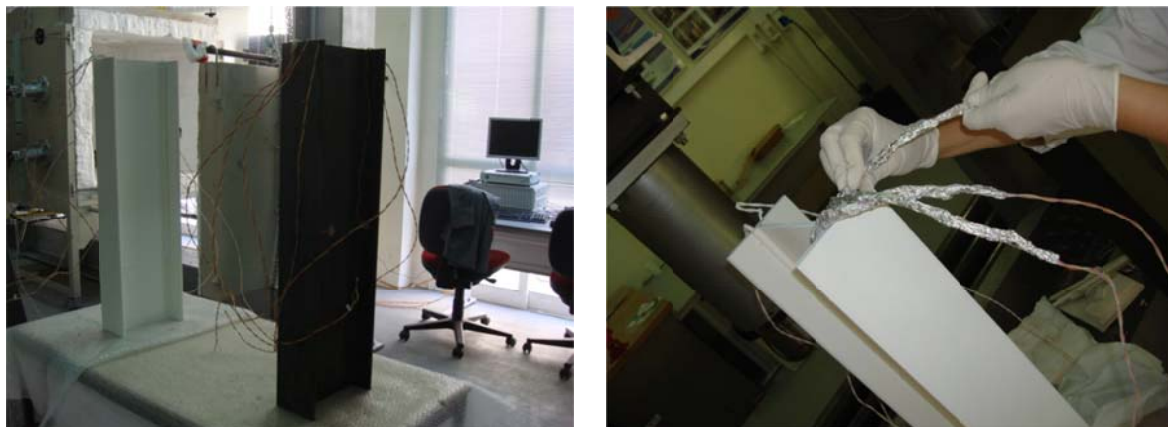


Figura 5.45 – Protecção dos fios termopar com alumínio.

Na figura 5.46 estão representadas três imagens, representativas do estado dos elementos, antes do ensaio, durante e no final.



Figura 5.46 – Antes, durante e depois do ensaio.

5.5.2.2.2. Resultado experimental

Os gráficos apresentados nas figuras seguintes, representam a evolução das temperaturas medidas em seis pontos de cada elemento estrutural durante o ensaio. Os resultados foram obtidos até um instante final de 3000 [s].

A temperatura no elemento em aço sem protecção é mais elevada que no elemento com protecção.

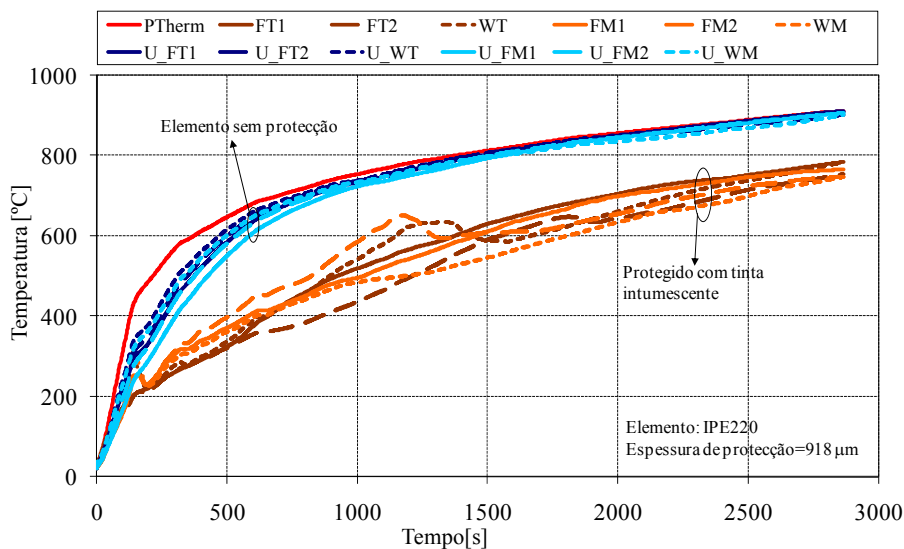


Figura 5.47 – Resultado experimental de um perfil IPE220.

Na Figura 5.48 estão representados os valores do termopar de placa do forno de resistência ao fogo e a função teórica da curva ISO834. Esta comparação valida o ensaio à semelhança dos ensaios anteriores.

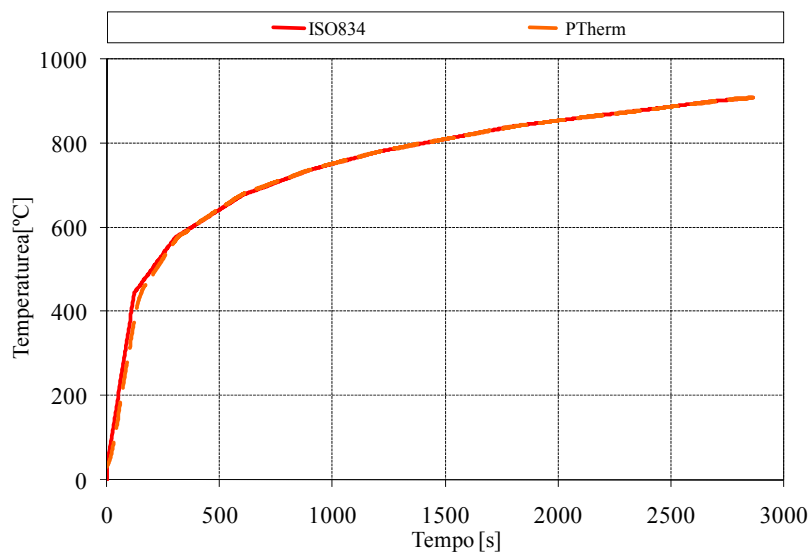


Figura 5.48 –Leitura do termopar de placa do forno no resultado experimental de um perfil IPE220.

5.5.2.2.3. Ensaio experimental termográfico

Foi realizado um ensaio experimental de um perfil IPE220, com e sem protecção com tinta intumescente. Este ensaio foi realizado para efectuar um teste de uma câmara termográfica como se representa na figura 5.49.

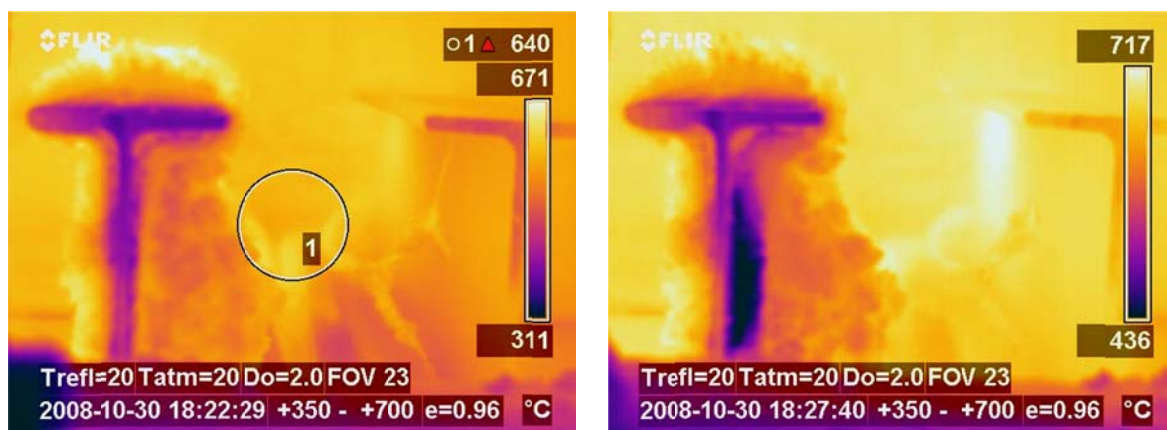


Figura 5.49 – Imagem de uma câmara termográfica no interior do forno.

O gráfico apresentado na figura seguinte, representa a evolução das temperaturas medidas em seis pontos durante o ensaio experimental. Os resultados foram obtidos até um instante final de 500 [s], limitado por um problema técnico na alimentação do forno.

A temperatura no elemento em aço sem protecção são mais elevadas que no elemento com protecção.

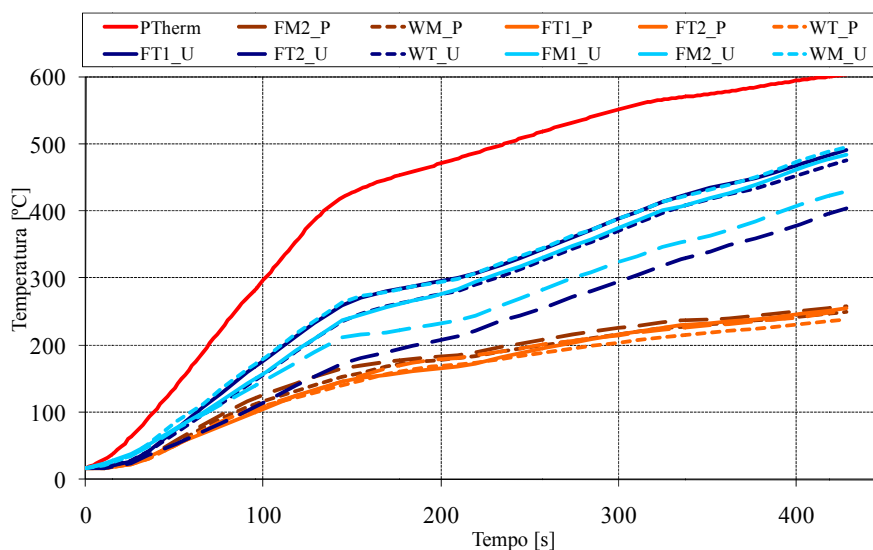


Figura 5.50 – 2º ensaio de um IPE220 com e sem protecção no forno de ensaios.

5.5.2.2.4. Comparação

As figuras 5.51 e 5.52, apresentam os resultados das temperaturas de dois ensaios experimentais, com e sem protecção. O segundo ensaio, figura 5.52, ficou limitado a 500 [s]. Os resultados utilizados no método simplificado foram calculados de acordo como descrito anteriormente na secção 5.5.2.1.3.

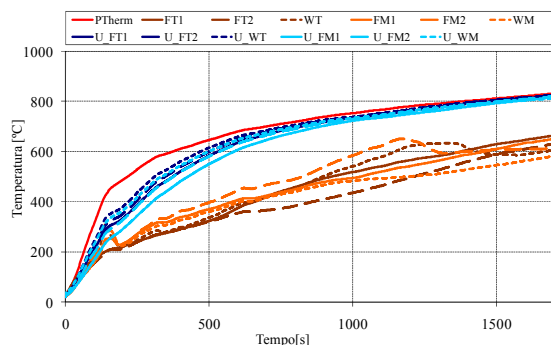


Figura 5.51 – IPE220 com e sem protecção no forno de ensaios.

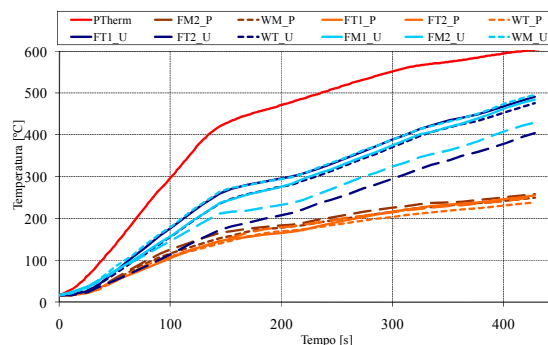


Figura 5.52 – 2º ensaio de um IPE220 com e sem protecção no forno de ensaios.

As figuras 5.53 e 5.54, apresentam a comparação entre o método simplificado e o resultado experimental. Verifica-se, uma grande dispersão, tendendo aproximadamente pelos 400 [°C] em convergir para valores na ordem dos 30 %.

Uma explicação para justificar a dispersão dos valores está relacionada com as condições de simulação que são diferentes daquelas que deram origem ao valor das propriedades termo-físicas. Estas foram determinadas a partir de um ensaio realizado no calorímetro de cone, utilizando 1500 [μm] de protecção. Outra explicação para justificar a dispersão dos valores, está relacionada com a curva de aquecimento, que no ensaio experimental foi utilizada a curva padrão normalizada de incêndio ISO834 e no método simplificado, utilizou-se a temperatura à superfície do intumescente, [5.17]. Pode-se verificar que a curva utilizada no ensaio experimental é menos energética no seu início, quando comparada com a utilizado no método simplificado, ver na figura 5.40.

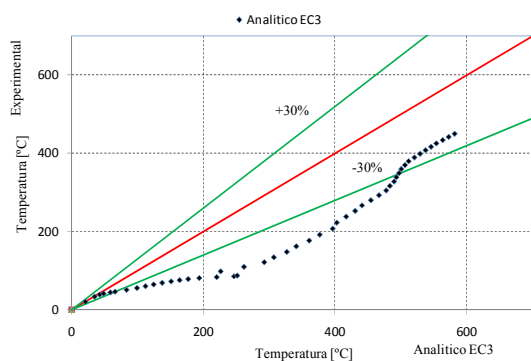


Figura 5.53 – Comparação entre o ensaio experimental e os resultados obtidos analiticamente, para o perfil IPE220.

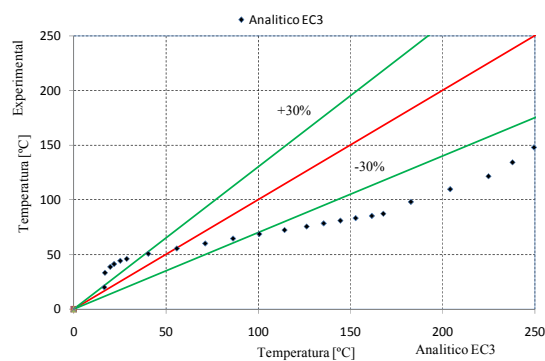


Figura 5.54 - Comparação entre o ensaio experimental e os resultados obtidos analiticamente, para o perfil IPE220

Depois de ser ter elaborado um programa em Matlab para resolver o incremento de temperatura de um incêndio para um elemento estrutural protegido, ver anexo. Este resultado pode ser verificado na figura 5.55.

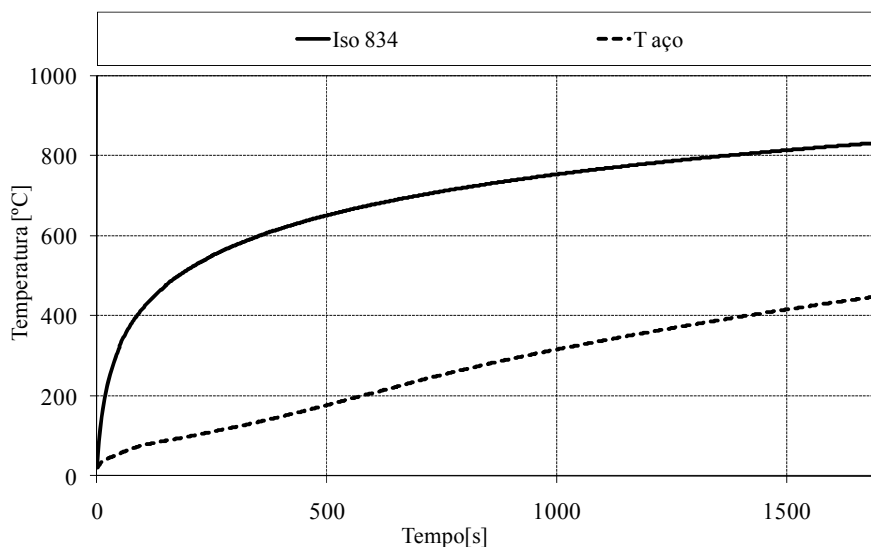


Figura 5.55 - Elemento estrutural com protecção obtido pelo metodo simplificado segundo o EC3.

5.6. Conclusões

A verificação da segurança dos elementos estruturais submetidos à acção de incêndio pode ser efectuada no domínio da temperatura. Esta situação pressupõe o conhecimento da temperatura no elemento estrutural em função do tempo.

Foi apresentado um procedimento numérico para a obtenção das temperaturas nos diferentes elementos estruturais com e sem protecção passiva. Foi analisada a influência da protecção de silicato de cálcio e a de tinta intumescente na temperatura do elemento a proteger. Apresentaram-se resultados para diferentes elementos protegidos em condições de incêndio. Apresentaram-se os resultados correspondentes à resolução de problemas termo-físicos tendo sido utilizado o programa de diferenças finitas, desenvolvido para análise de acção do fogo. Os resultados numéricos determinados para elementos com protecção passiva de silicato de cálcio, apresentam boa concordância com os resultados determinados pelo método simplificado e com os resultados determinados via experimental, em ensaios realizados no forno de resistência ao fogo.

Verificou-se que para elementos protegidos com tinta intumescente em condições de incêndio, a diferença de temperatura é significativa, demonstrando a eficiência da protecção.

5.7. Referências

- [5.1]. Talamona, D., Franssen, J.M., Schleich, J.B., Kruppa, J., “Stability of steel columns in case of fire: Numerical modeling”, Journal of Structural Engineering, vol. 123, N° 6, 1997.
- [5.2]. Mohri, F., Azrar, L., Potier-Ferry, M., “Flexural-torsional post-buckling analysis of thin-walled elements with open sections”, Journal of Constructional Steel Research, 39, pp 907-938, 2001.
- [5.3]. CEN, ENV 1993-1-2, “Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1.2: General Rules - Structural Fire Design”, April, 2005.

- [5.4]. CEN, ENV 1991-1-2, Eurocode 1: Actions in Structures, Part 1-2: “General Actions-Actions on structures exposed to fire”, November, 2002
- [5.5]. Vila Real, Paulo J. M. M.; “Incêndio em estruturas metálicas. Cálculo Estrutural”; Edições Orion; 1ª edição, Novembro de 2003.
- [5.6]. EN 1363-1, “Ensayos de resistencia al fuego – Parte 1: Requisitos generales” CEN, Agosto de 1999.
- [5.7]. Franssen, Jean-Marc; Zaharia, Raul; “Design of steel structures subjected to fire- Background and design guide to Eurocode 3” Les Editions de L’Université de Liège, 2005, Belgique.
- [5.8]. Ozisik, M.N., *Heat Conduction*, 2nd edition, John Wiley and Sons, N.Y., 1993.
- [5.9]. Beck, J. V., Blackwell, B. e St. Clair Jr., C. R., *Inverse Heat Conduction*, Wiley, New York, 1985.
- [5.10]. Arcelor sections commercial s.a.; “Beams, channels and merchant bars”; sales programme, Luxembourg.
- [5.11]. UNE 2382; “Método de ensayo para determinar la contribución a la, resistencia al fuego de los elementos estructurales, mediante la aplicación de protección a los elementos estructurales en acero.”, Septiembre, 1997.
- [5.12]. EN 1363-1; “Ensayos de resistencia al fuego. Parte 1: Requisitos generales.”, Octubre, 2000.
- [5.13]. Mathworks Inc. Student Edition of MATLAB Version 7.5 for Windows. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1997.
- [5.14]. Engl, H. W., Hanke, M. & Neubauer, A., 1996, *Regularization of Inverse Problems: Mathematics and its Applications*, Kluwer.
- [5.15]. L.Dinis; “Cap-4, O Método das Diferenças Finitas na Análise de Placas Rectangulares Finas”, Placas e Casca, FEUP, 2003/2004.
- [5.16]. Mesquite, L.; SteelfirePro: temperature Evolution of Steel Members with fire protections. Version 1.0; <http://www.ipb.pt/~lmesquita/SteelFirePro/>; 23/04/2007.
- [5.17]. Luís M.R. Mesquita, Paulo A.G. Piloto, Mário A.P. Vaz and Tiago M.G. Pinto; “Numerical estimation for intumescent thermal protection using one-dimensional IHCP”; 8th. World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) in conjunction with 5th. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008), June 30 – July 5, 2008, Venice, Italy.
- [5.18]. Özisik, M. N. and Orlande, H. R. B., *Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications*, New York, Taylor & Francis, 2000.

ANEXOS

Capítulo 6

Conclusões e perspectivas de desenvolvimentos futuros

| | |
|--|-----|
| 6.1. Conclusões..... | 6.2 |
| 6.2. Perspectivas de trabalhos futuros | 6.2 |

6.1. Conclusões

Desenvolveu-se um modelo numérico para análise térmica de elementos estruturais sujeitos a altas temperaturas, utilizando curvas normalizadas de incêndio.

Apresentaram-se os resultados correspondentes aos ensaios normalizados no calorímetro de cone. Foi apresentado um resumo da variação das propriedades termo físicas do intumescente,

Apresentaram-se e analisaram-se os resultados obtidos pelo calorímetro de cone, tendo se verificado que quanto maior for a espessura de protecção, maior será a perda de massa. Com o aumento da espessura de protecção e da potência térmica, a produção de monóxido e dióxido de carbono tende a diminuir. A evolução da temperatura nas amostras foi registada ao longo do tempo..

Estudou-se a evolução de dois tipos de intumescente ao longo do tempo, tendo-se verificado que com a tinta do tipo B, é mais fácil obter uma espessura de protecção mais uniforme, conferindo um desvio padrão da espessura de protecção mais baixo. Verificou-se também, como esperado, que quanto maior for a espessura de protecção maior será o processo de intumescência.

Apresentaram-se os resultados de análises térmicas em regime transiente, não linear, em diferentes situações de incêndio. Os resultados numéricos determinados para elementos protegidos com silicato de cálcio, foram comparados com os resultados dos ensaios experimentais, realizados em laboratório, verificando-se boa congruência.

Foi apresentado um procedimento numérico para a obtenção das temperaturas nos diferentes elementos estruturais com e sem protecção passiva. Foi analisada a influência dos diferentes materiais de protecção na temperatura do substrato. Apresentaram-se resultados para diferentes elementos em condições de incêndio, correspondentes à resolução de problemas termo-físicos, utilizando-se o código de diferenças finitas desenvolvido para estruturas submetidas à acção do fogo.

A protecção de elementos estruturais em aço com tinta intumescente sujeitas a condições de incêndio atrasa o aumento da temperatura nos perfis, demonstrando-se a eficiência deste sistema. Os resultados numéricos determinados nos elementos com protecção passiva de silicato de cálcio, apresentam boa concordância com os obtidos pelo método simplificado e determinados nos ensaios experimentais realizados no forno de resistência ao fogo.

6.2. Perspectivas de trabalhos futuros

No seguimento do trabalho desenvolvido na presente dissertação, apresentam-se resumidamente algumas sugestões, tendo como objectivo futuros desenvolvimentos nesta área de investigação relacionada com a caracterização numérica do processo de intumescência, desenvolvimento de um programa de aproximação numérica para estudo de equações, diferenciais parabólicas, com fronteiras não homogéneas, simulação do material intumescente sujeita a condições fronteira não uniformes, considerando a expansão volúmica, perda de massa, e integridade estrutural, para diferentes taxas de aquecimento, através de métodos

de fronteira móvel e um estudo paramétrico de diferentes soluções numéricas, com particular ênfase na espessura inicial da protecção e nos efeitos de bordo.

I. ANEXO

Resultados do calorímetro de cone.

TEST REPORT ON HEAT AND VISIBLE SMOKE RELEASE RATES FOR MATERIALS USING AN
OXYGEN CONSUMPTION CALORIMETER ACCORDING TO ASTM E 1354 - 90

Test account no. : 472
Material identification:
Date of test:

Test number: A754251
TINTA A
17th January 2008

Specimen thickness: 6.6 mm
Specimen initial mass: 407.7 g

Heat flux: 75.0 kW/m²
Exhaust duct flow rate: 0.025 m³/s
Orientation: Horizontal

Time to ignition: No ignition
Total heat evolved: 32.3 kJ
Mass loss: 37.0 g

Notes:

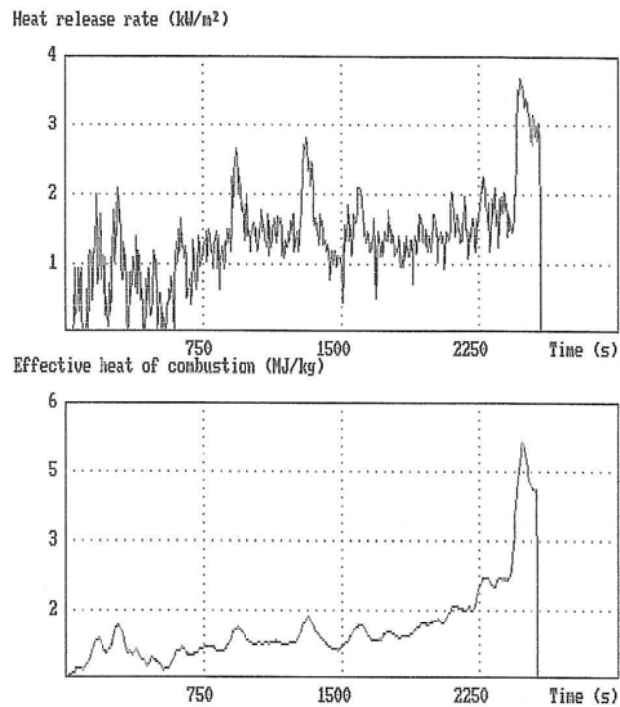
| <u>Peak and average values</u> | Peak | Time (s) | Average |
|--|--------|----------|---------|
| Heat release rate (kW/m ²): | 3.7 | 2465 | 1.3 |
| Eff. heat of comb. (MJ/kg): | 5.2 | 2480 | 0.9 |
| Specific ext. area (m ² /kg): | 220.3 | 45 | 63.9 |
| Carbon monoxide: (kg/kg): | 0.0174 | 2480 | 0.0093 |
| Carbon dioxide: (kg/kg): | 0.11 | 1995 | 0.04 |

Average during period from ignition to ignition plus...

| | 1 min | 2 min | 3 min | 4 min | 5 min | 6 min |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Heat release rate (kW/m ²): | 0.2 | 0.2 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.7 |
| Eff. heat of comb. (MJ/kg): | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.5 |
| Specific ext. area (m ² /kg): | 195.5 | 133.6 | 105.5 | 91.9 | 83.0 | 77.1 |
| Carbon monoxide: (kg/kg): | 0.0019 | 0.0034 | 0.0044 | 0.0057 | 0.0066 | 0.0070 |
| Carbon dioxide: (kg/kg): | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 |
| HCl: (kg/kg): | - | - | - | - | - | - |

Page 1 of 4

These results relate only to the behaviour of the product under the conditions of test - they are not intended to be the sole criterion for the assessment of performance under real fire conditions.

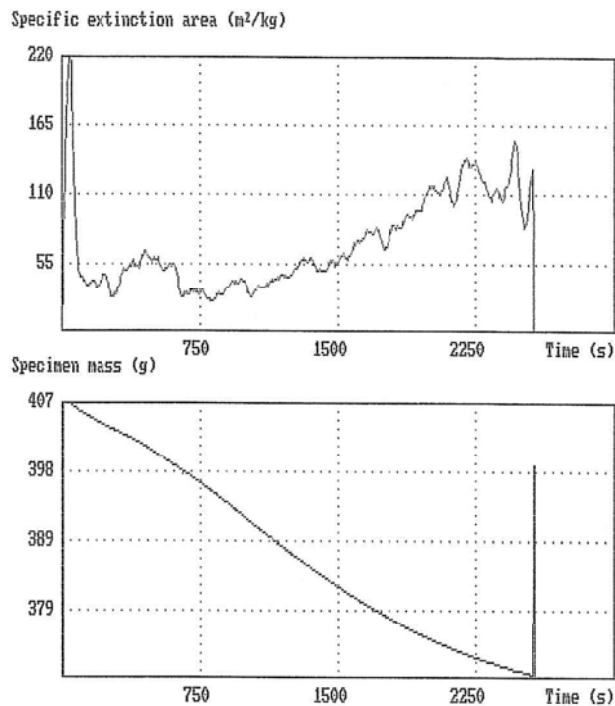


TEST REPORT ON HEAT AND VISIBLE SMOKE RELEASE RATES FOR MATERIALS USING AN
OXYGEN CONSUMPTION CALORIMETER ACCORDING TO ASTM E 1354 - 90

| | |
|--------------------------|------------------------|
| Test account no. : 472 | Test number: A754251 |
| Material identification: | TINTA A |
| Heat flux: | 75.0 kW/m ² |
| Orientation: | Horizontal |

Page 2 of 4

These results relate only to the behaviour of the product under the conditions of test - they are not intended to be the sole criterion for the assessment of performance under real fire conditions.

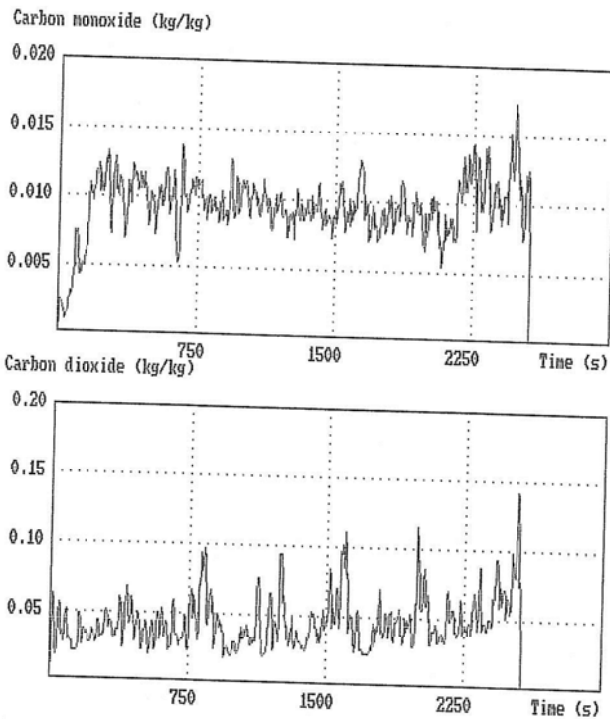


TEST REPORT ON HEAT AND VISIBLE SMOKE RELEASE RATES FOR MATERIALS USING AN
OXYGEN CONSUMPTION CALORIMETER ACCORDING TO ASTM E 1354 - 90

| | |
|--------------------------|------------------------|
| Test account no. : 472 | Test number: A754251 |
| Material identification: | TINTA A |
| Heat flux: | 75.0 kW/m ² |
| Orientation: | Horizontal |

Page 3 of 4

These results relate only to the behaviour of the product under the conditions of test - they are not intended to be the sole criterion for the assessment of performance under real fire conditions.



TEST REPORT ON HEAT AND VISIBLE SMOKE RELEASE RATES FOR MATERIALS USING AN
OXYGEN CONSUMPTION CALORIMETER ACCORDING TO ASTM E 1354 - 90

Test account no. : 472

Test number: A754251

Material identification:

TINTA A

Heat flux:

75.0 kW/m²

Orientation:

Horizontal

Page 4 of 4

These results relate only to the behaviour of the product under the conditions of test - they are not intended to be the sole criterion for the assessment of performance under real fire conditions.

II. ANEXO

Gráficos evolução do processi térmico (MGCPlus)

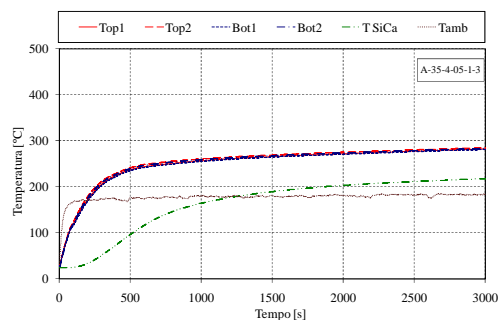


Figura II-1 Valor de temperatura no aço, nas placas de silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A35401-3.

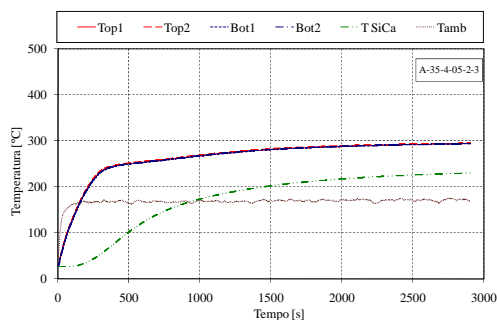


Figura II-2 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A35402-3.

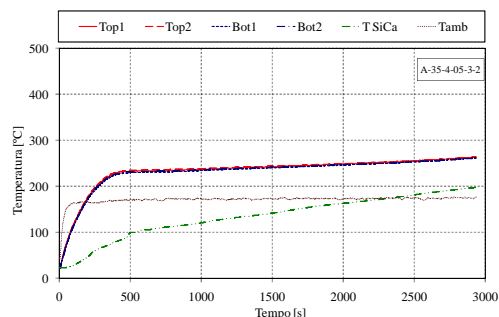


Figura II-3 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A354053-2.

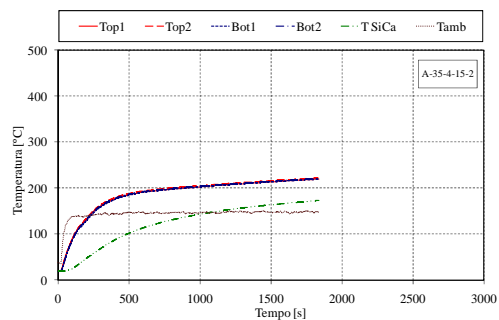


Figura II-4 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A354151.

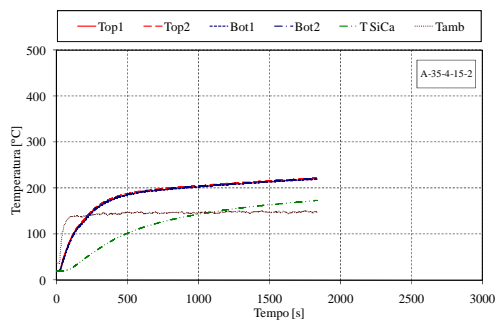


Figura II-5 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A354152.

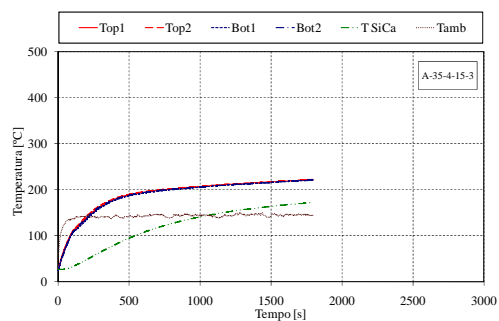


Figura II-6 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A354153.

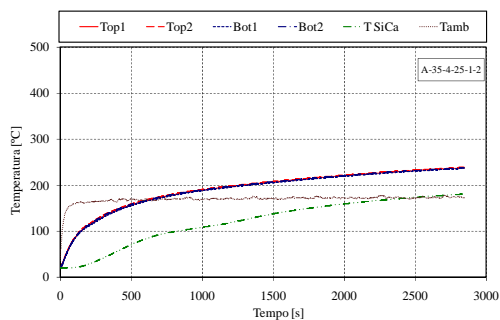


Figura II-7 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A354251-2.

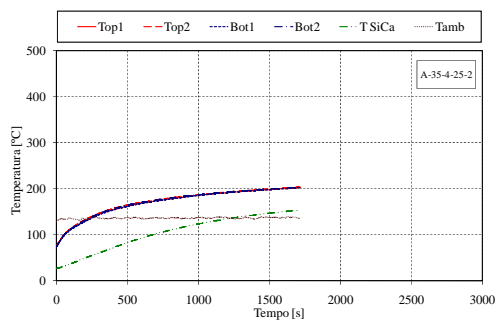


Figura II-8 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A354252.

Ensaio: A354253-2

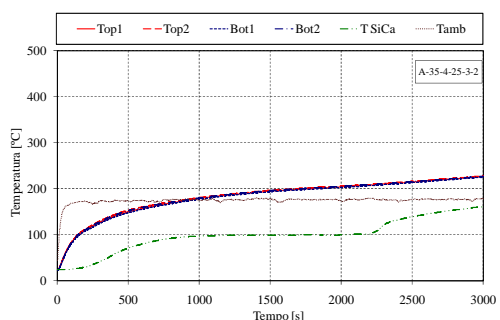


Figura II-9 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A354253-2.

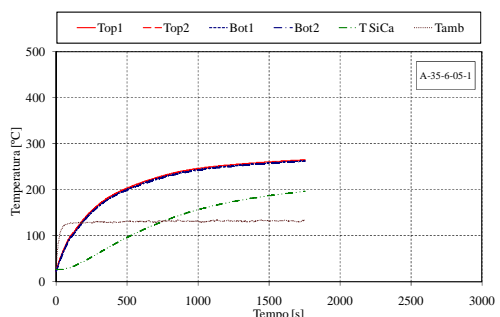


Figura II-10 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A356051.

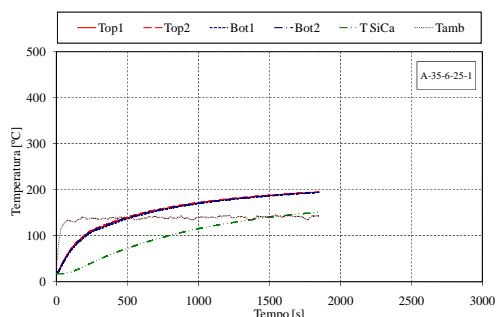


Figura II-11 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A356251.

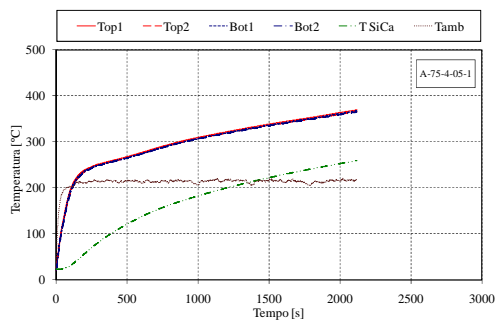


Figura II-12 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio a754051.

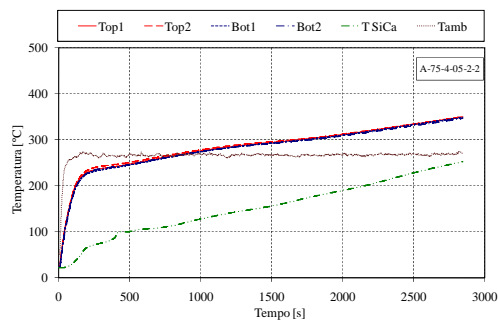


Figura II-13 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A754052-2.

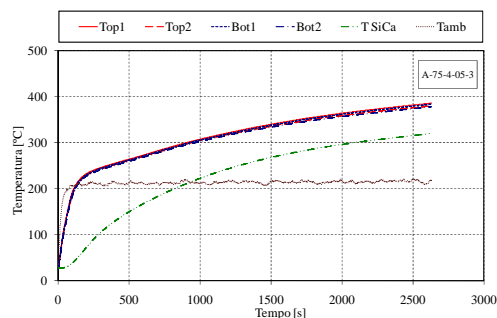


Figura II-14 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A754053.

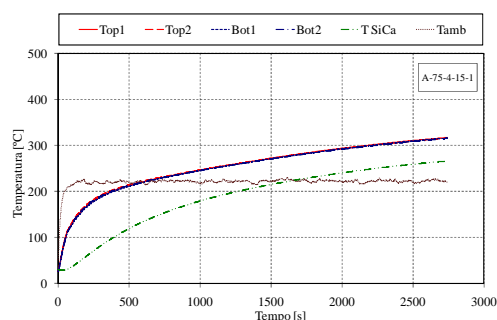


Figura II-15 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A754151.

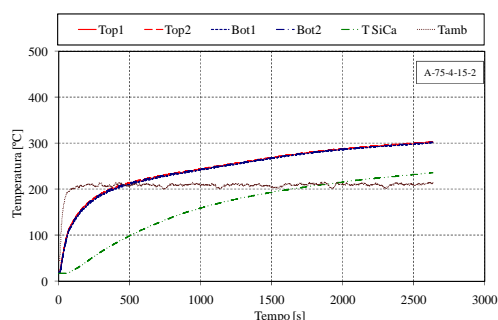


Figura II-16 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A754152.

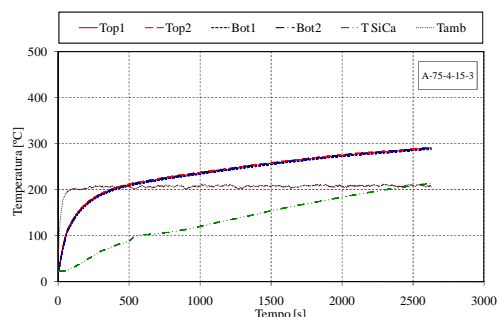


Figura II-17 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A754153.

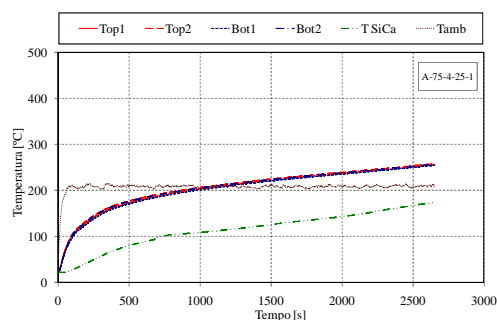


Figura II-18 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A754251.

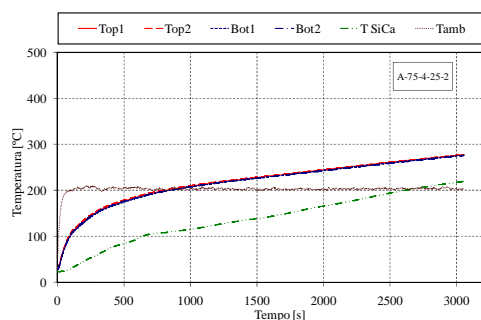


Figura II-19 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A754252.

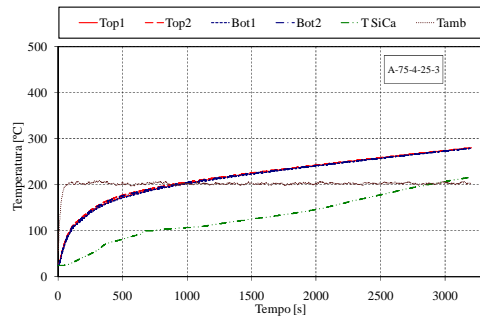


Figura II-20 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A754253.

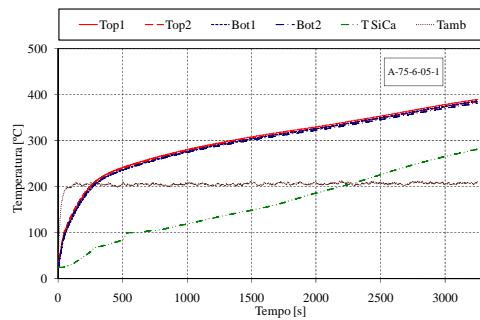


Figura II-21 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A756051.

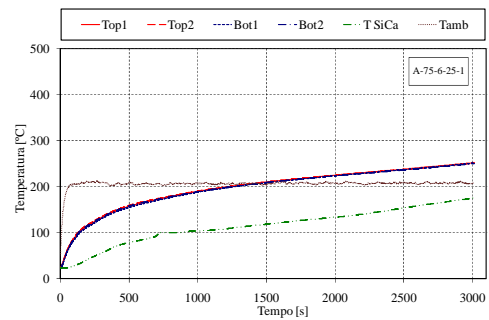


Figura II-22 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio A756251.

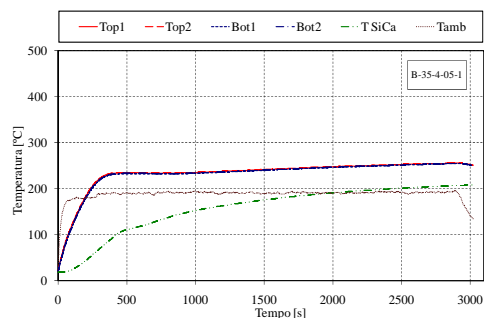


Figura II-23 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B354051.

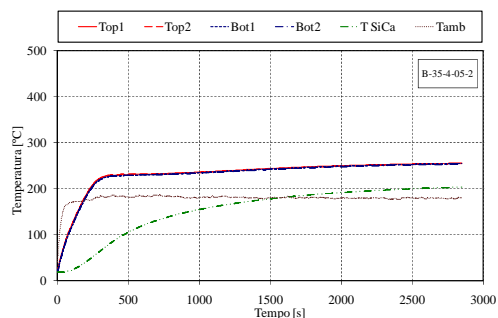


Figura II-24 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B354052.

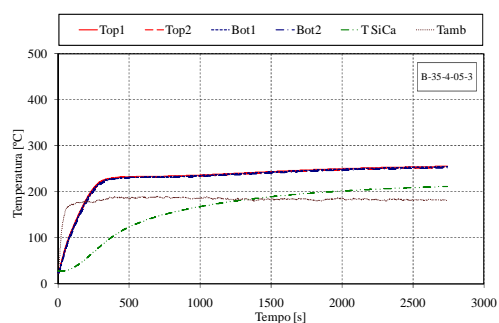


Figura II-25 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B354053.

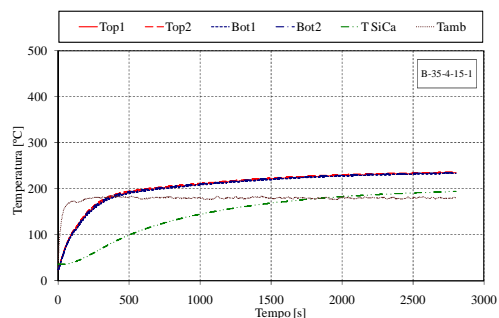


Figura II-26 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B354151.

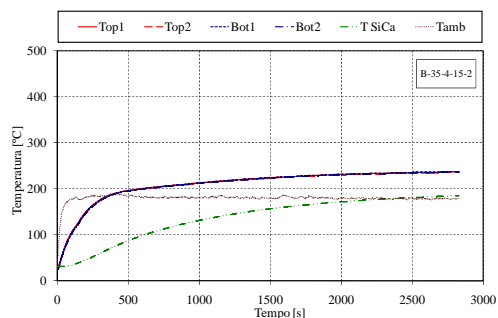


Figura II-27 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B354152.

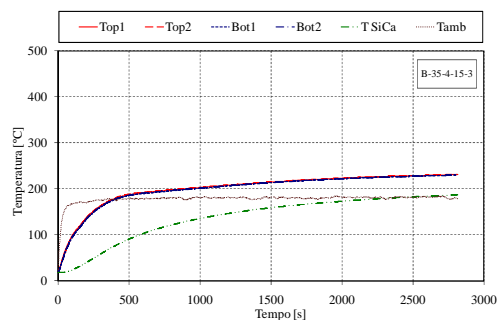


Figura II-28 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B354153.

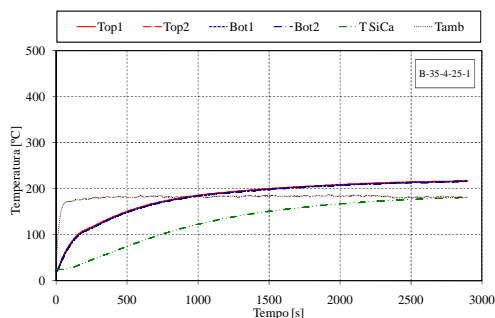


Figura II-29 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B354251.

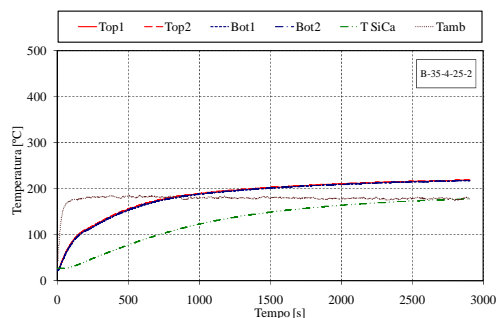


Figura II-30 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B354252.

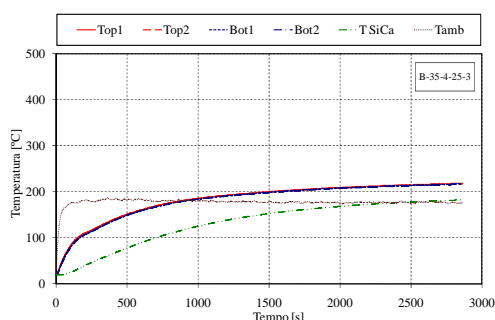


Figura II-31 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B354253.

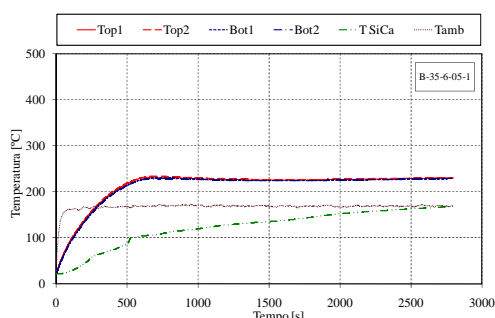


Figura II-32 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B356051.

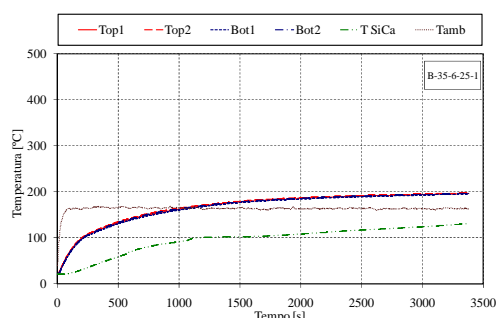


Figura II-33 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B356251.

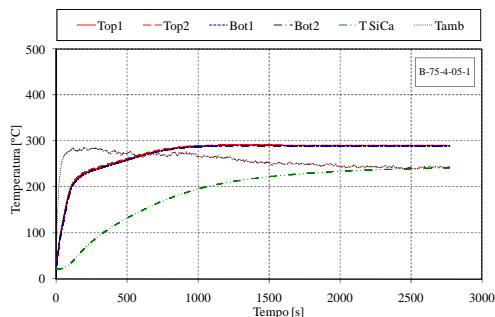


Figura II-34 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B754051.

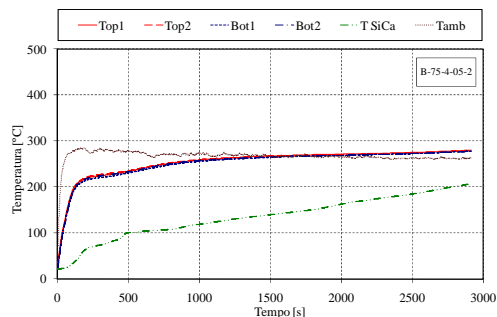


Figura II-35 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B754052.

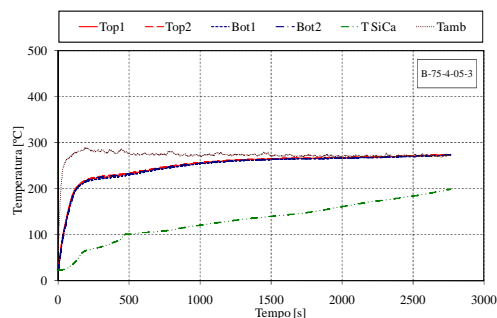


Figura II-36 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B754053.

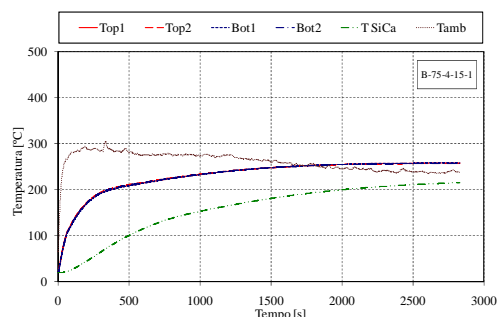


Figura II-37 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B754151.

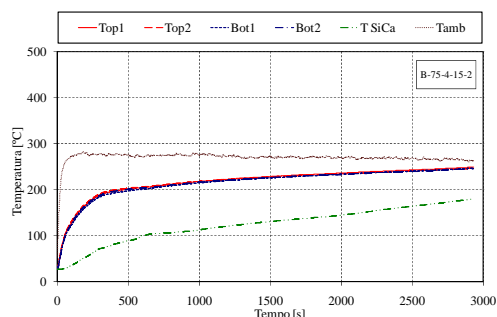


Figura II-38 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B75152.

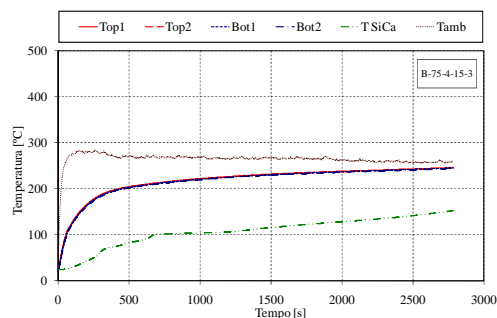


Figura II-39 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B754153.

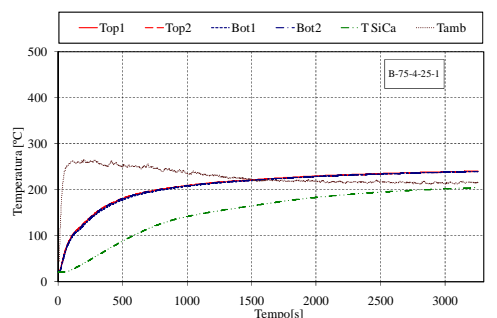


Figura II-40 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B754251.

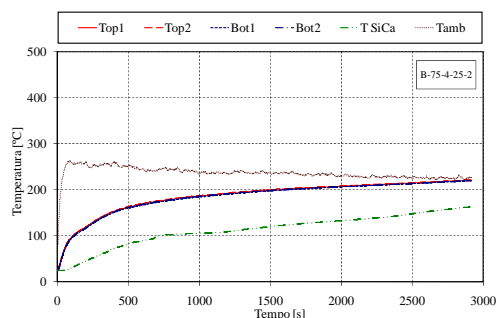


Figura II-41 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B754252.

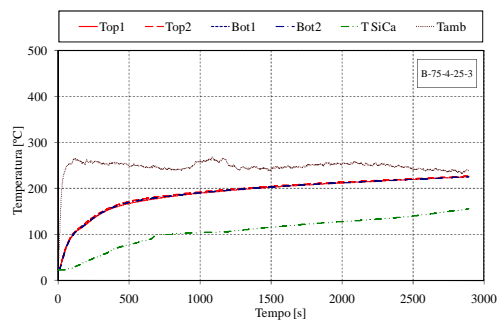


Figura II-42 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B754253.

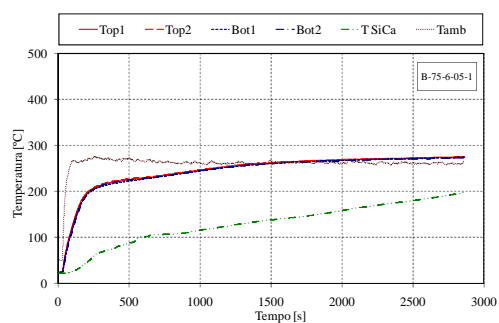


Figura II-43 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B756051.

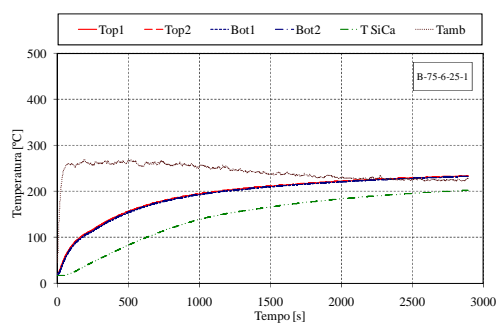


Figura II-44 Valor de temperatura no aço, nas placas de Silicato de cálcio e no ambiente, no ensaio B756251.

III.ANEXO

Gráficos de evolução do processo de intumescência

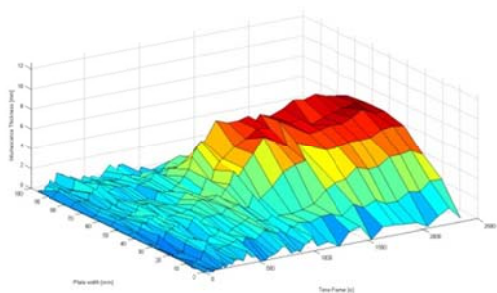


Figura III-1 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354051.

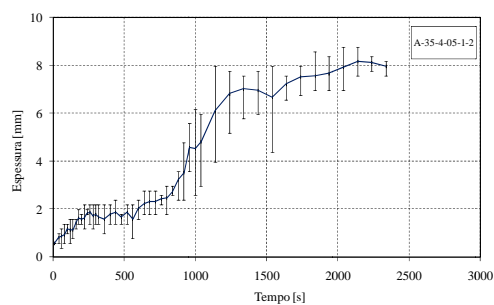


Figura III-2 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio A354051.

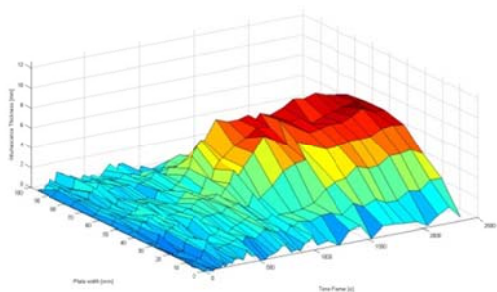


Figura III-3 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354051-2.

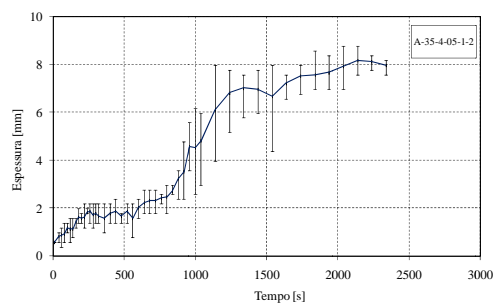


Figura III-4 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais, ao longo do ensaio A354051-2.

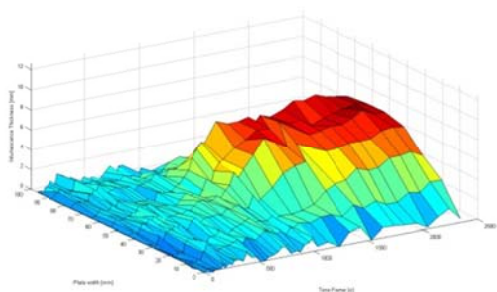


Figura III-5 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354051-3.

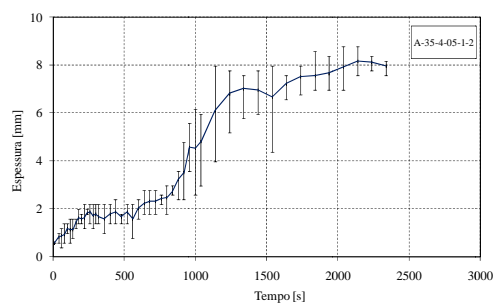


Figura III-6 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A354051-3.

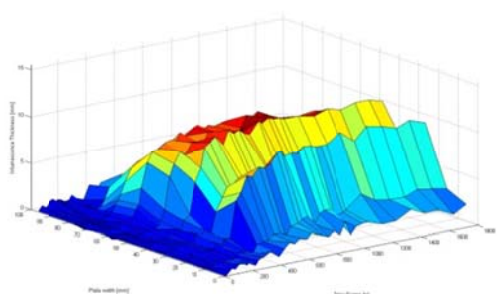


Figura III-7 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354052.

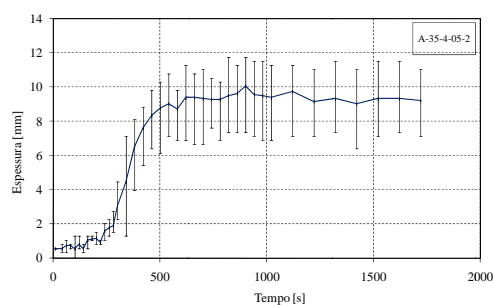


Figura III-8 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A354052.

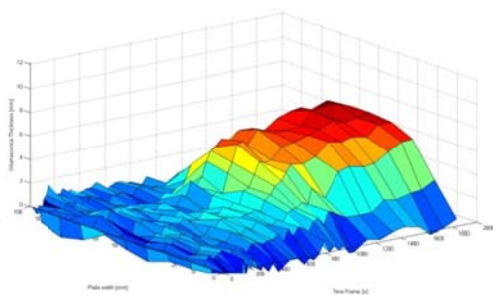


Figura III-9 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354052-2.

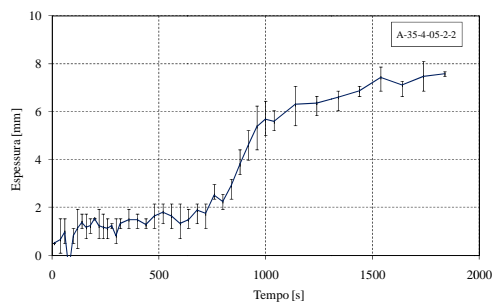


Figura III-10 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A354052-2.

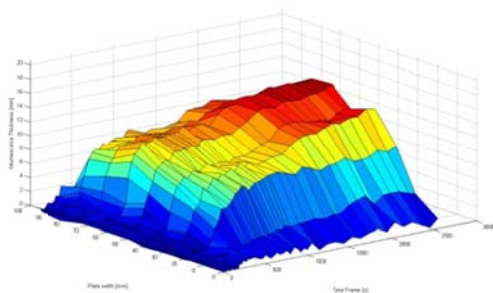


Figura III-11 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354052-3.

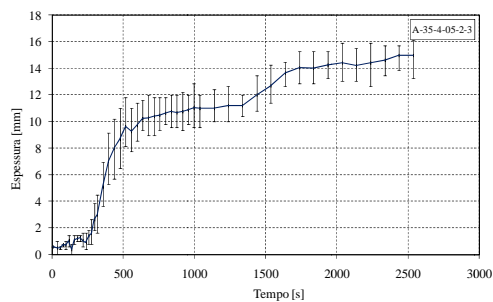


Figura III-12 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A354052-3.

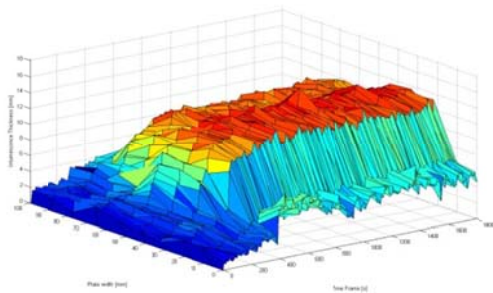


Figura III-13 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354053.

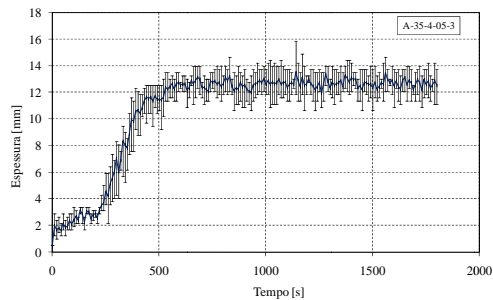


Figura III-14 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A354053.

Ensaio: A354053-2

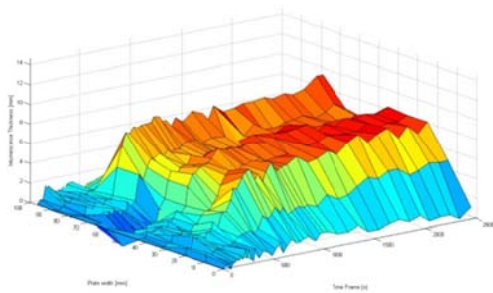


Figura III-15 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354053-2.

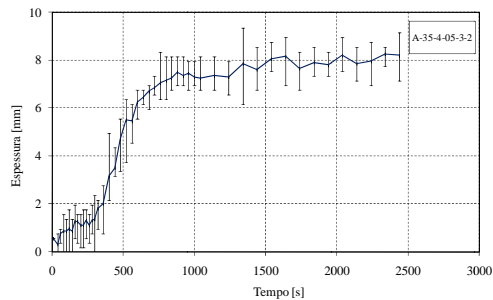


Figura III-16 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A354053-2.

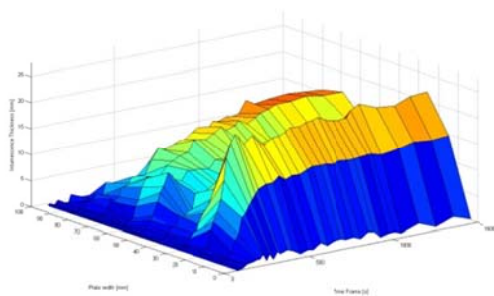


Figura III-17 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354151.

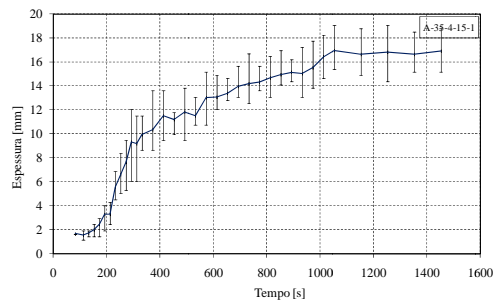


Figura III-18 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A354151.

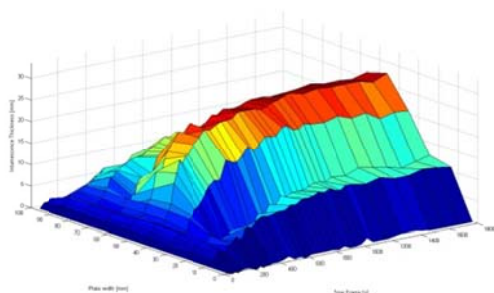


Figura III-19 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354152.

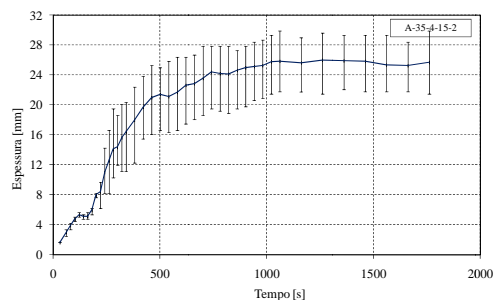


Figura III-20 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A354152.

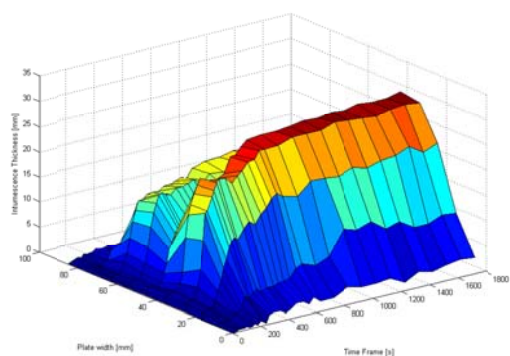


Figura III-21 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354153.

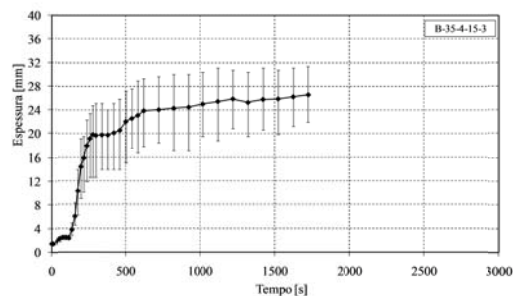


Figura III-22 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A354153.

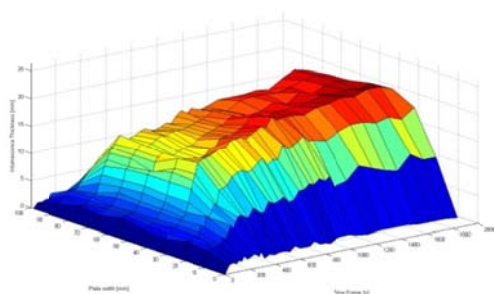


Figura III-23 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354251.

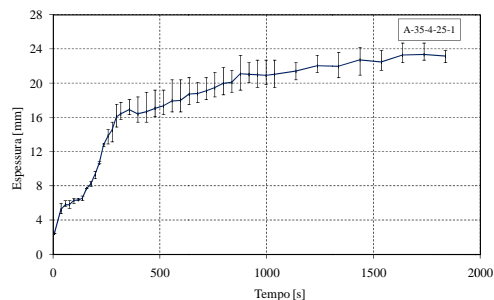


Figura III-24 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A354251.

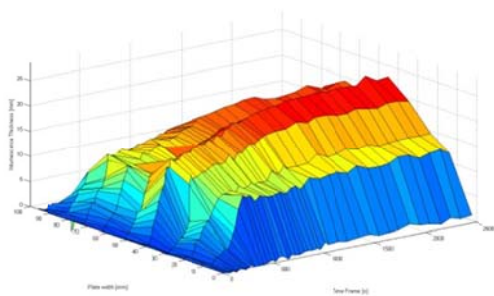


Figura III-25 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354251-2.

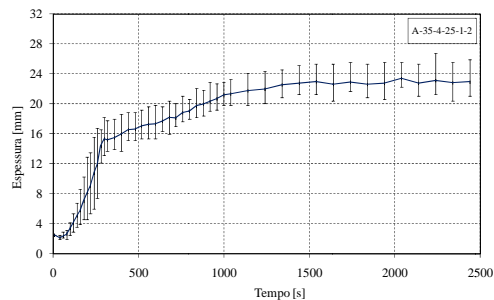


Figura III-26 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A354251-2.

Ensaio: A354252

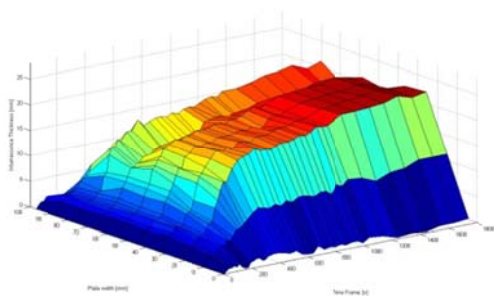


Figura III-27 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354252.

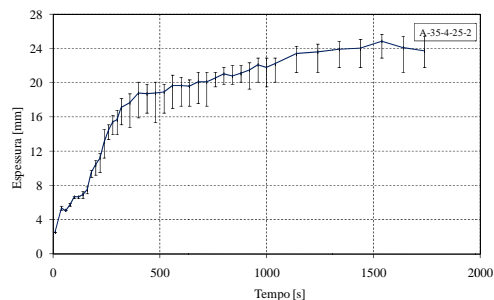


Figura III-28 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A354252.

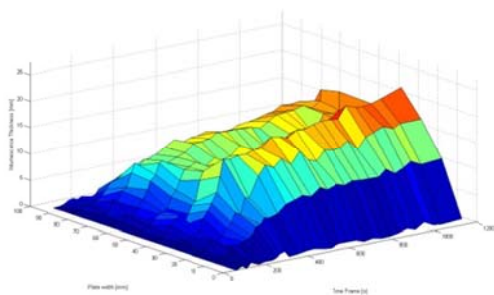


Figura III-29 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354253.

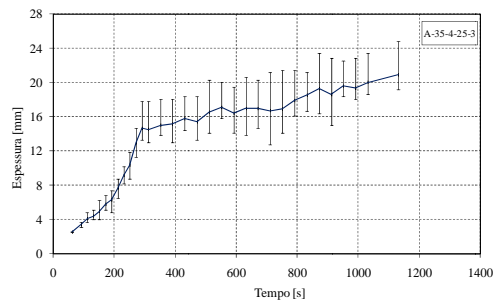


Figura III-30 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A354253.

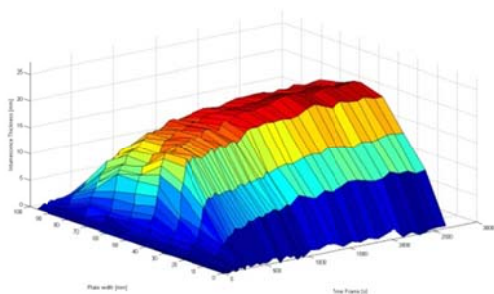


Figura III-31 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A354253-2.

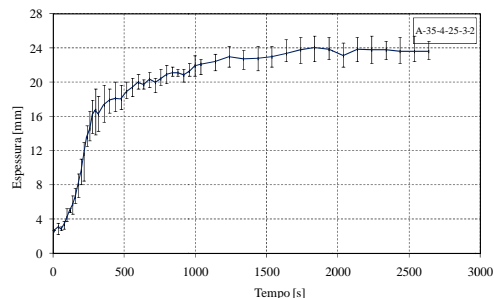


Figura III-32 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A354253-2.

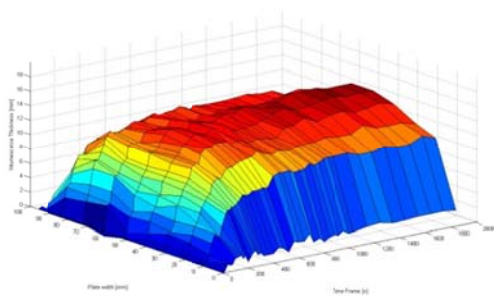


Figura III-33 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A754051.

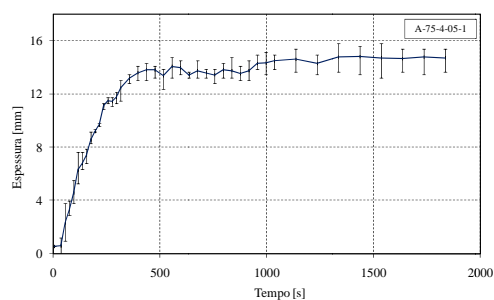


Figura III-34 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A754051.

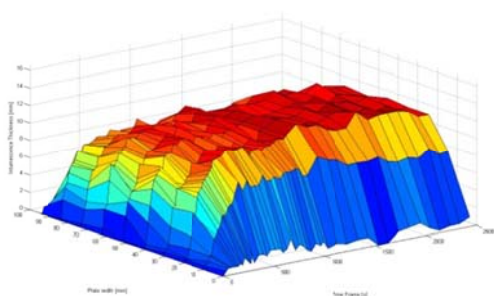


Figura III-35 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A754052.

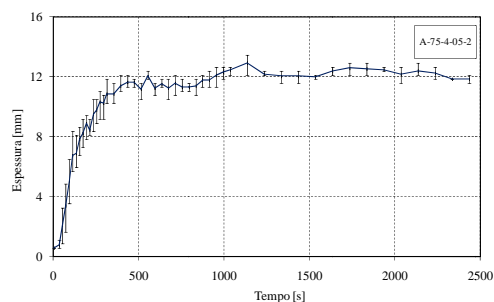


Figura III-36 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A754052.

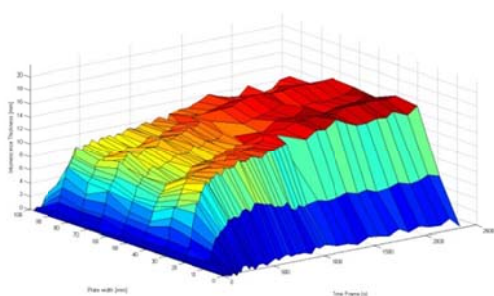


Figura III-37 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A754052-2.

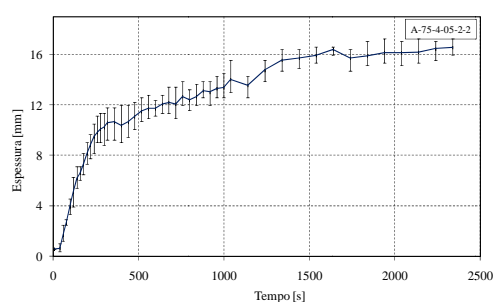


Figura III-38 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A754052-2.

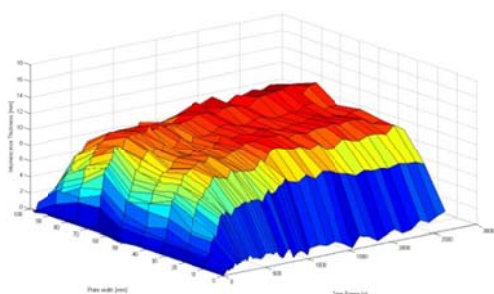


Figura III-39 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A754053.

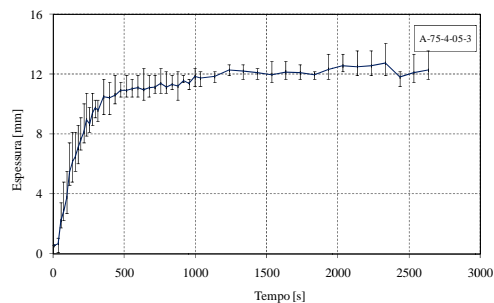


Figura III-40 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A754053.

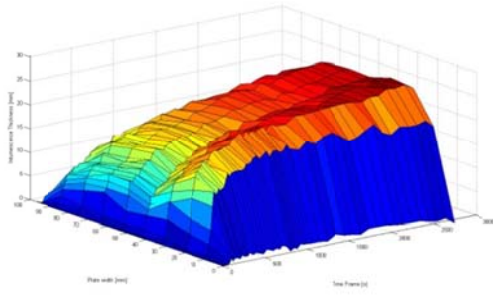


Figura III-41 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A754151.

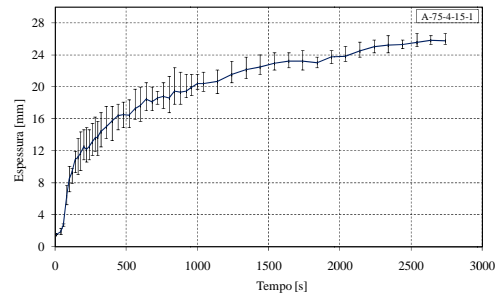


Figura III-42 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A754151.

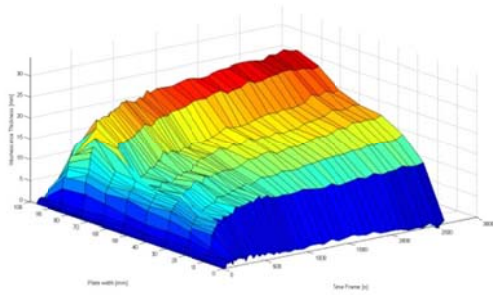


Figura III-43 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A754152.

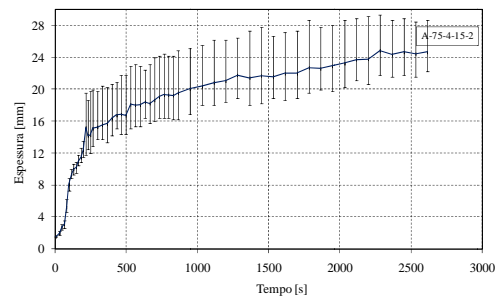


Figura III-44 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A754152.

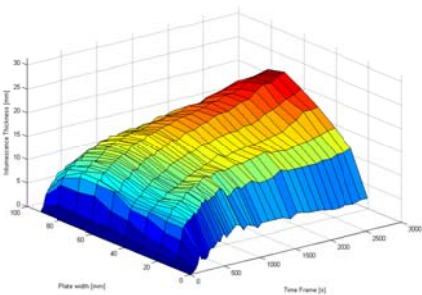


Figura III-45 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A754153.

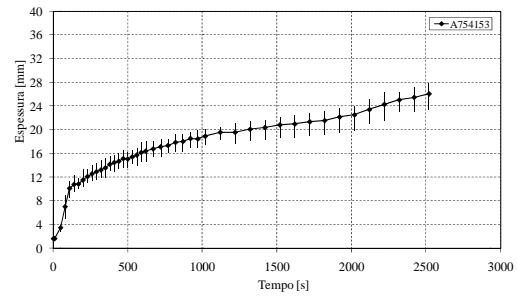


Figura III-46 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A754153.

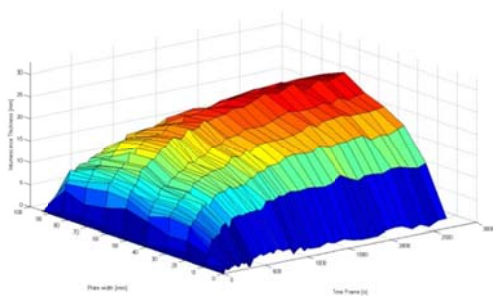


Figura III-47 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A754251.

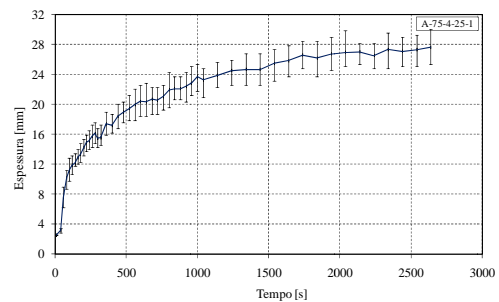


Figura III-48 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A754251.

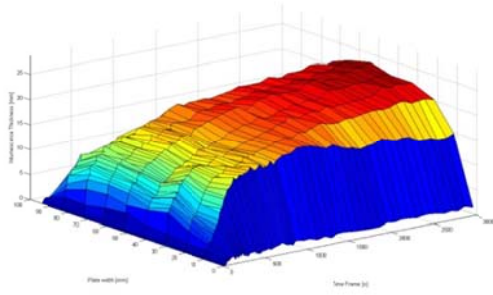


Figura III-49 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A754252.

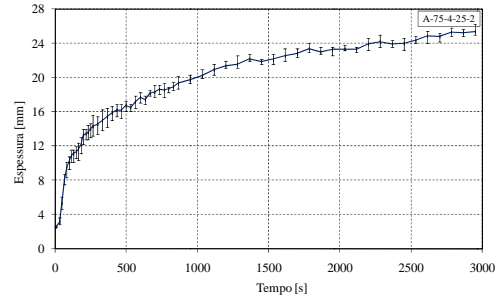


Figura III-50 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A754252.

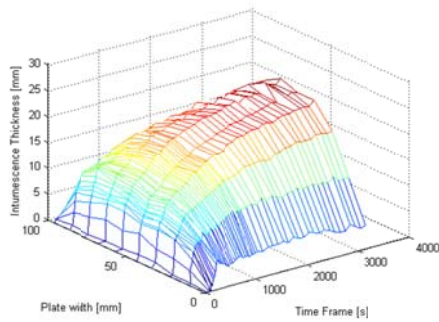


Figura III-51 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio A754253.

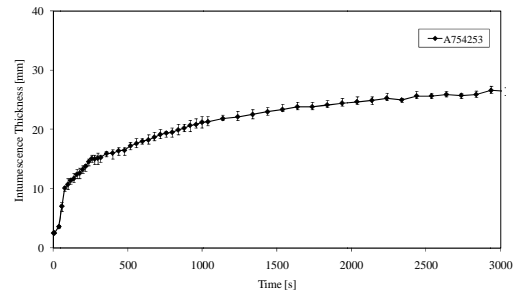


Figura III-52 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio A754253.

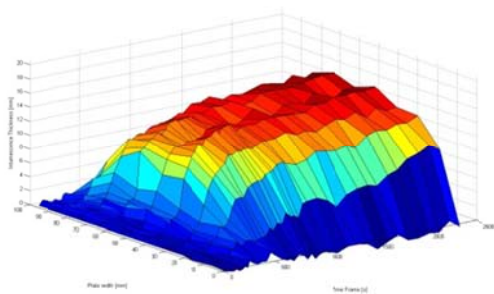


Figura III-53 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B354051.

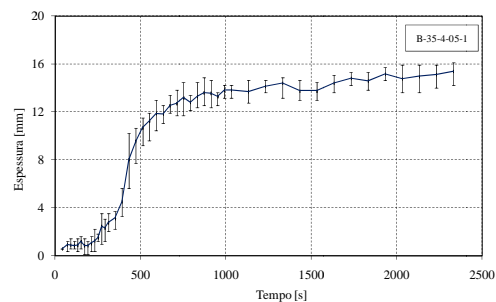


Figura III-54 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B354051.

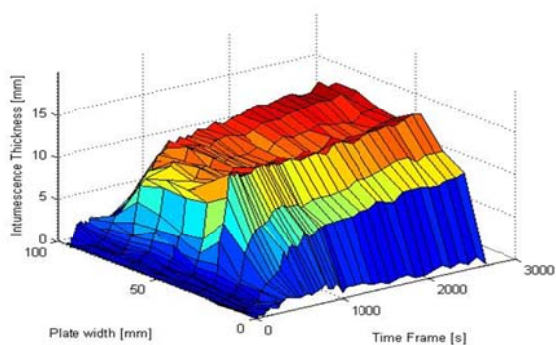


Figura III-55 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B354052.

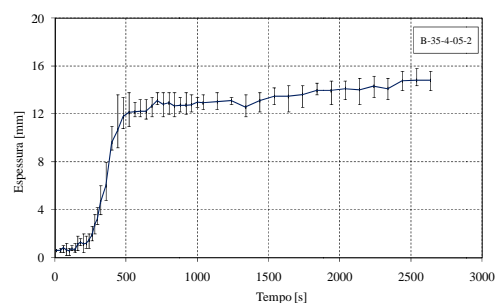


Figura III-56 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B354052.

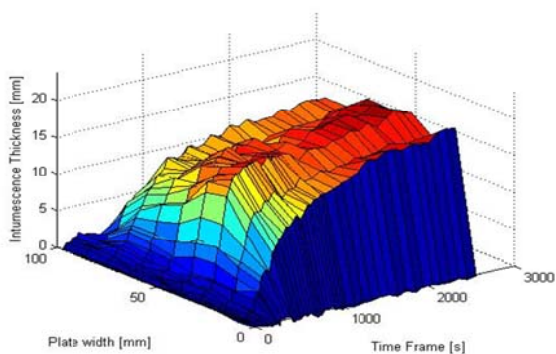


Figura III-57 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B354053.

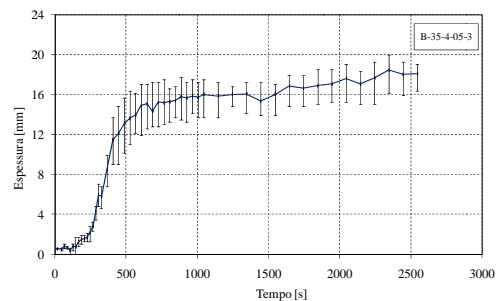


Figura III-58 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B354053.

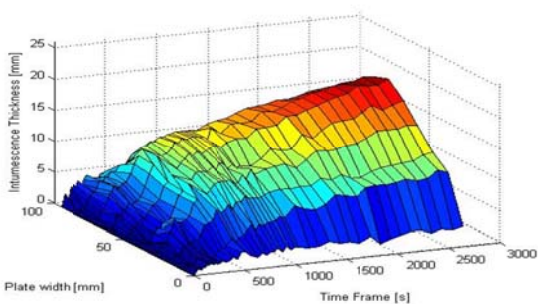


Figura III-59 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B354151.

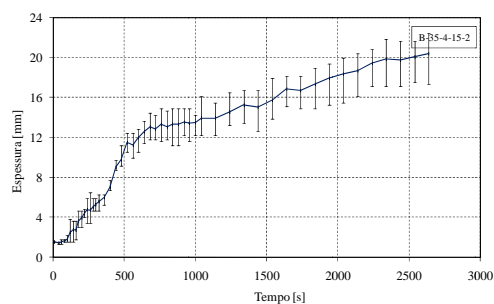


Figura III-60 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B354151.

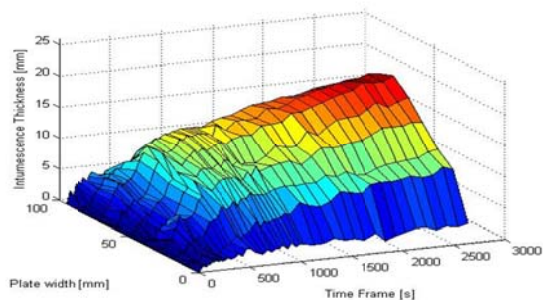


Figura III-61 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B354152.

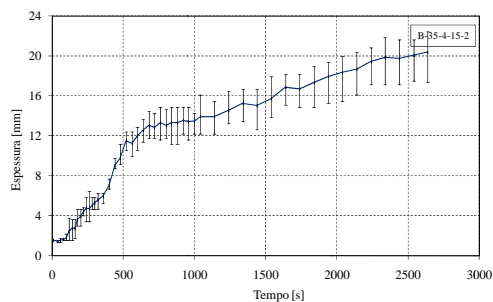


Figura III-62 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B354152.

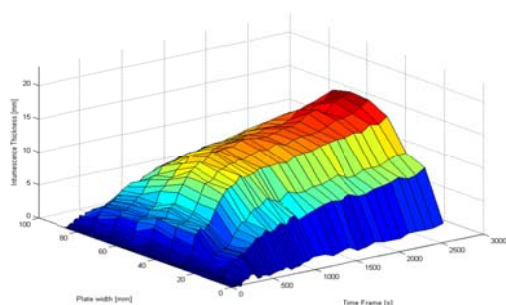


Figura III-63 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B354153.

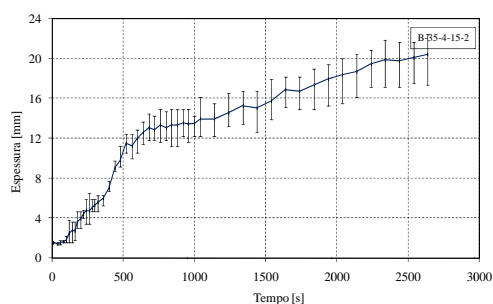


Figura III-64 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B354153.

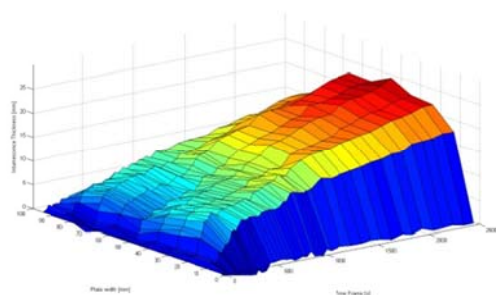


Figura III-65 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B354251.

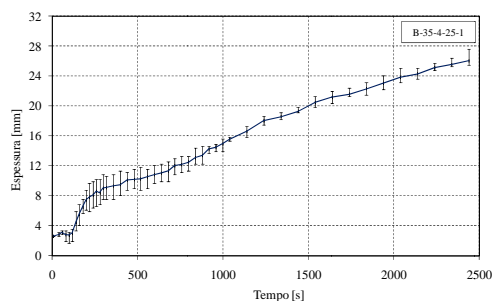


Figura III-66 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B354251.

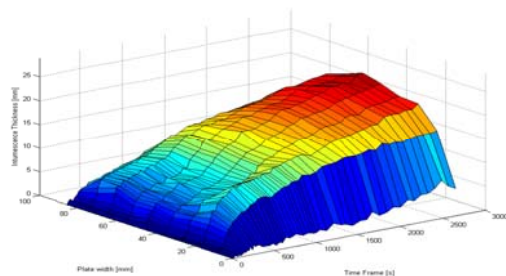


Figura III-67 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B354252.

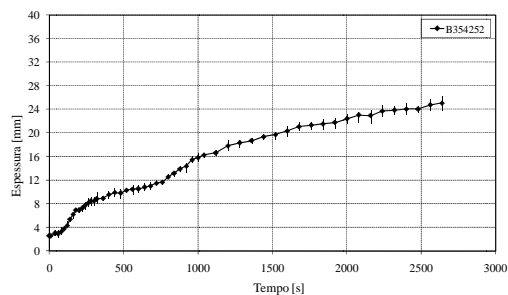


Figura III-68 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B354252.

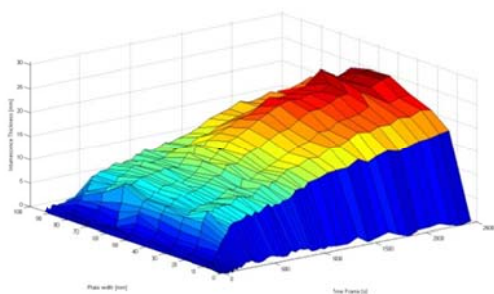


Figura III-69 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B354253.

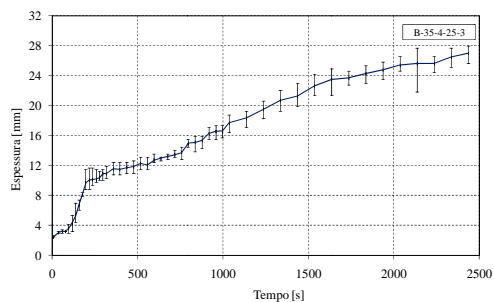


Figura III-70 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B354253.

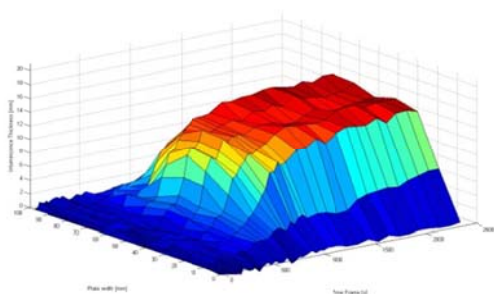


Figura III-71 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B356051.

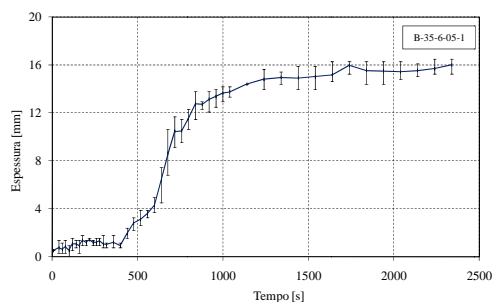


Figura III-72 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B356051.

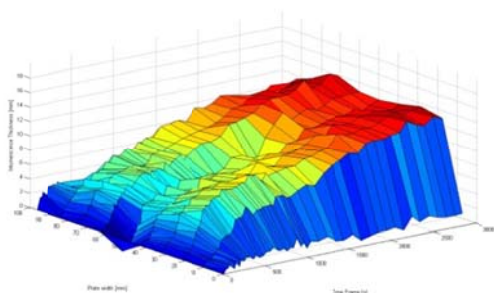


Figura III-73 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B356251.

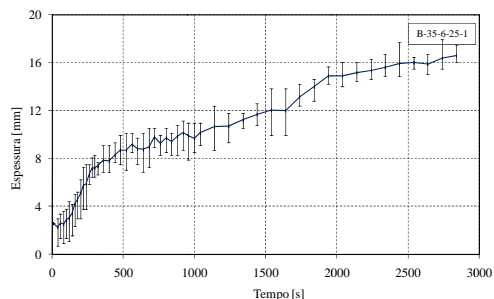


Figura III-74 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B356251.

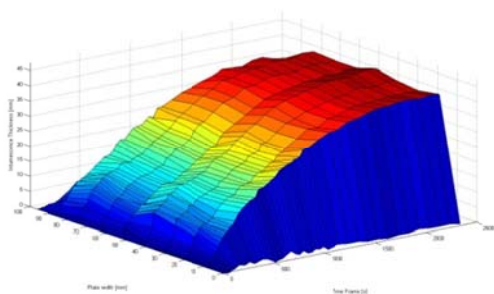


Figura III-75 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B754051.

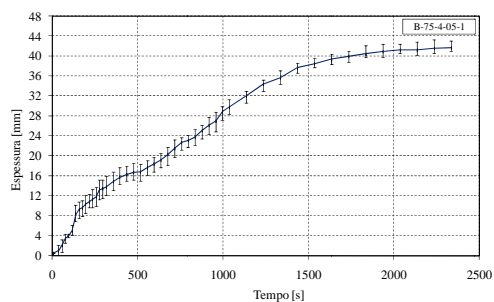


Figura III-76 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B754051.

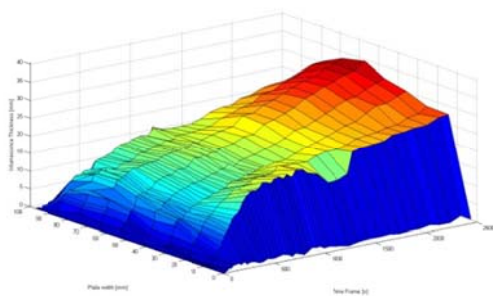


Figura III-77 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B754052.

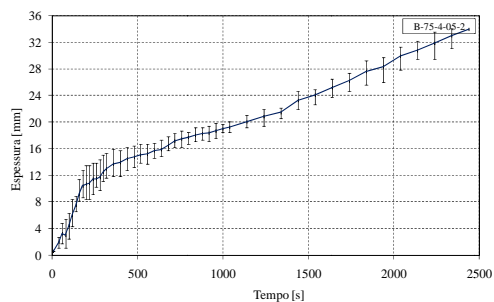


Figura III-78 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B754052.

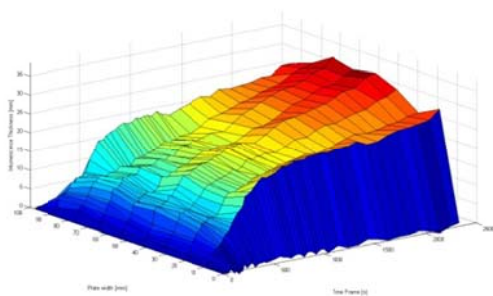


Figura III-79 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B754053.

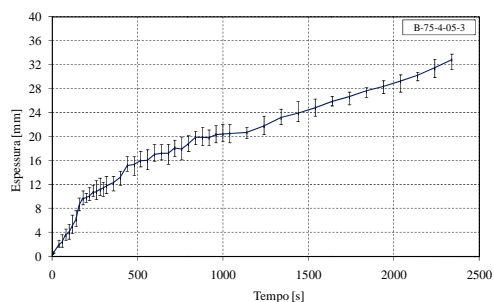


Figura III-80 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B754053.

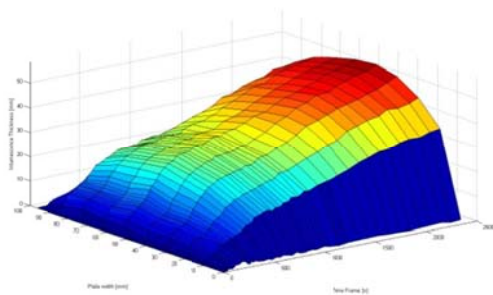


Figura III-81 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B754151.

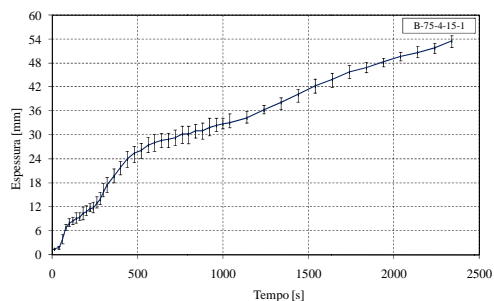


Figura III-82 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B754151.

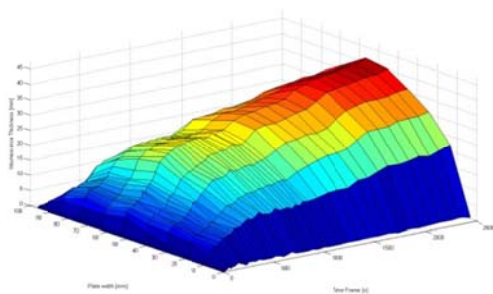


Figura III-83 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B754152.

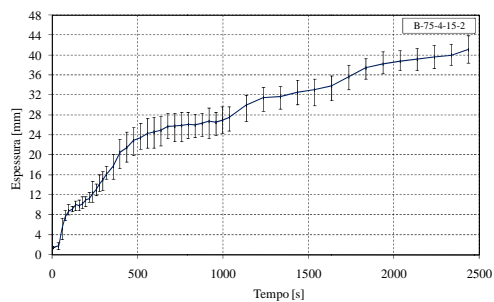


Figura III-84 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B754152.

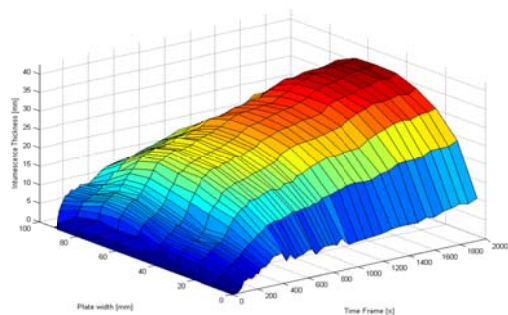


Figura III-85 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B754153.

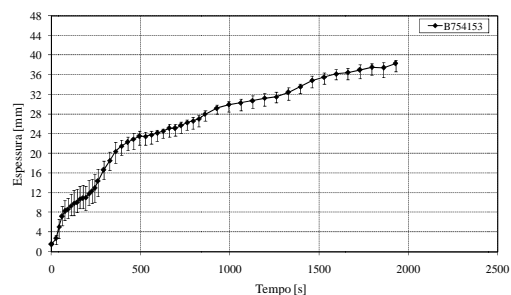


Figura III-86 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B754153.

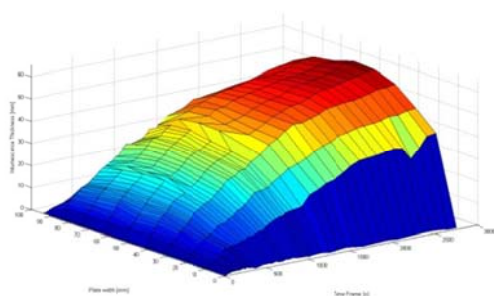


Figura III-87 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B754251.

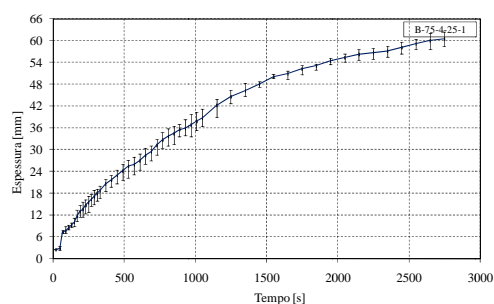


Figura III-88 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B754251.

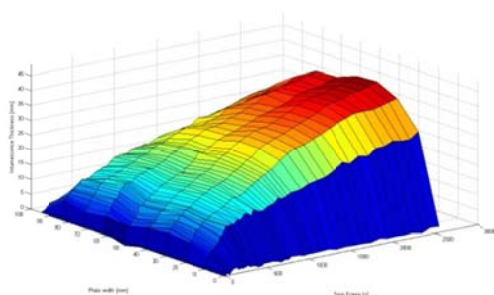


Figura III-89 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B754252.

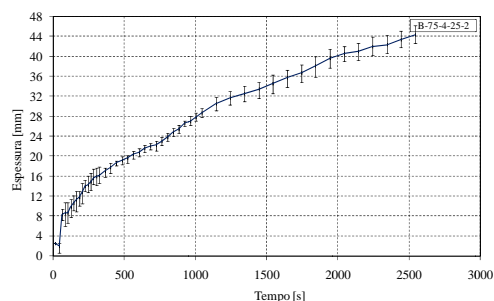


Figura III-90 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B754252.

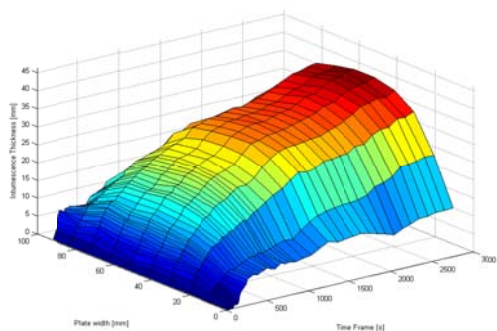


Figura III-91 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B754253.

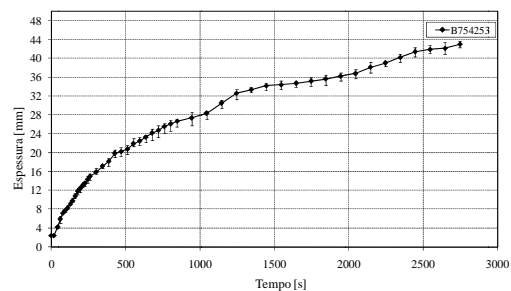


Figura III-92 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B754253.

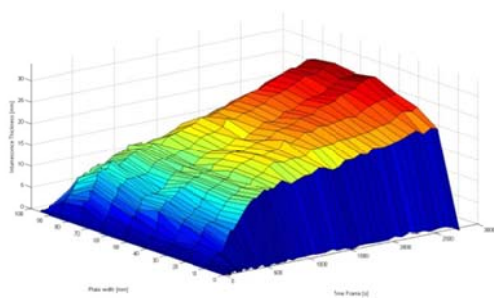


Figura III-93 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B756051.

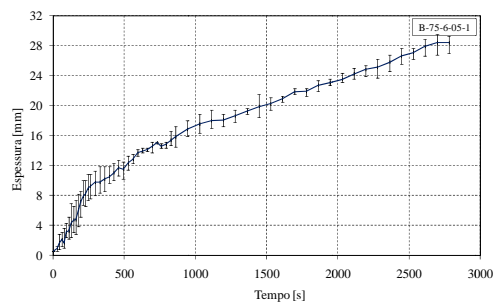


Figura III-94 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B756051.

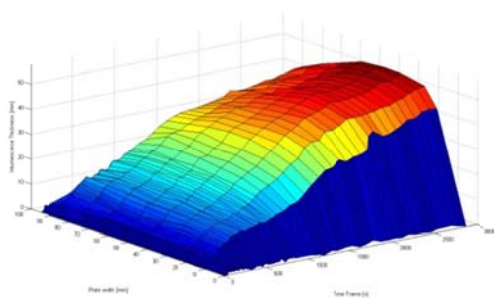


Figura III-95 Desenvolvimento da intumescência no perfil ao longo do ensaio B756251.

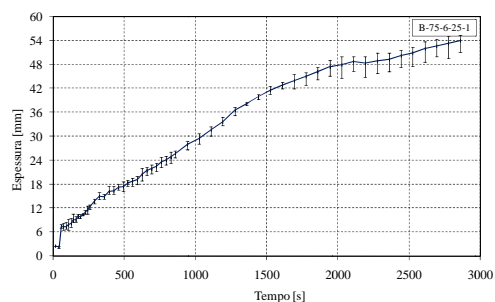


Figura III-96 Desenvolvimento da intumescência nos quatro pontos centrais ao longo do ensaio B756251.

IV. ANEXO

Rotinas em Matlab.

1- Criação dos fotogramas

```
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',frameIndexname,'.jpg');
image=(video.frames(1,ii).cdata);
imwrite(image,name);           %grava as frames pretendidas
end
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.

```

```

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;
for n=1:nfiles,

```

```

        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,zero,num2str(imnumr),formato);
        % si=strcat(s_raiz,zero,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
axes1 = axes('Parent',figure1,'YGrid','off',...
        'YDir','reverse',...
        'XGrid','off',...
        'TickDir','out',...
        'Layer','top',...
        'DataAspectRatio',[1 1 1]);
        xlim([0 720]);
        ylim([0 576]);
        %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
                                %%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([0 720]);
ylim([0 576]);
%box('on');
title(['Frame Name: ', si],'Pick N points in the intumescence
surface','To End click the Right mouse button');
hold('all');
%a=imread('frame0001.jpg');
% Create image
%imshow(A)
image(A,'Parent',axes1);

end %fim da analise da 1ª frame

%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;

%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],...
'XTickLabel',{GRIDX},...
'XTick',GRIDX,...
'XGrid','on',...

```

```

        'XColor',[0.9725 0.9725 0.9725],...
        'TickDir','out',...
        'Layer','top',...
        'DataAspectRatio',[1 1 1]);
    xlim([0 720]);
    ylim([0 576]);
    %box('on');
    title(['Frame Name: ', si],'Pick N points in the intumescence
surface','To End click the Right mouse button');
    hold('all');
    %a=imread('frame0001.jpg');
    % Create image
    %imshow(A)
    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

% 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,n)=x;
    dp(j,2,n)=y;
    dp(j,3,n)=FramesData(n,3);

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

end

%
    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

```

```

close figure 1;
imnumr=dig+n;

dados(:,n*3-2)=tgraph(:,n);
dados(:,n*3-1)=Xgraph(:,n);
dados(:,n*3)=Zgraph(:,n);

%mean intumescence thickness values
dmean(n,1)=tgraph(1,n);
dmean(n,2)=mean(Zgraph(:,n));
%Write a Excel file with frame data
nl=n*3-1;
lline=strcat('A',num2str(nl));
lline2=strcat('A',num2str(n+1));
xlswrite(File, dados(:,[n*3-2:n*3]), 'dados', lline);
xlswrite(File, dmean(n,:), 'dmean',lline2);
end
save data.mat

%geração de uma figura com a evolução da espessura, em mm
figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68],'Color',[1 1 1]);
axes1 = axes('Parent',figure1);
surf(tgraph, Xgraph, Zgraph,'Parent',axes1);
nome=strcat('Intumescence surface','.tif');
zmax=max(Zgraph(:,n))+5;
ymax=max(Xgraph(:,n));
zlim([0 zmax]);
ylim([0 100]);
xlabel({'Time Frame [s]'});
ylabel('Plate width [mm]');
zlabel({'Intumescence Thickness [mm]'});
I = getframe(gcf);
imwrite(I.cdata, nome);
%[FileNameout,PathNameout]= uigetfile(FramesData.xls','Select the Excel
file to write');
%name of the file with the path

```

I. ANEXO

Modelo 1.1.

```
%% 1D heat equation with the Finite Difference Scheme Combined Method
% See Ozisik pag 490

%          d( k(T) dT/dx)dx = RhoCp(T) dT/dt

% The system is efficiently solved using the LU factorization
%theta=0 - explicit scheme  alfa*dt/dx^2 <= 1/2
%theta=1/2 - Crank-Nicolson
%theta=1 - Implicit scheme
% Input:
% nt = number of time steps.
% nx = number of mesh points in x direction.
% L = length of the domain.
% tmax = maximum time for the simulation.
%% Initialize parameters (time step, grid points, etc.).
%dt = input('Enter time step: ');
%N = input('Enter the number of grid points: ');
%L = input('Enter system length: ');
% x = location of finite difference nodes
% t = values of time at which solution is obtained (time nodes)
% T = matrix of temperature solution: T(:,j) is T(x) at t = t(j)
if nargin<1, dt = 3.75; end
if nargin<2, nx = 10; end
if nargin<3, L = 0.012; end
if nargin<4, tmax = 7200; end

% --- Compute mesh spacing and time step
dx = L/(nx-1)
% dt = tmax/(nt-1)
nt=1+tmax/dt
% --- Create arrays to save data and export
x = linspace(0,L,nx)
t = linspace(0,tmax,nt)

%%Material properties
% Insulation Properties
k=0.175; RCp=870*1200;
K = zeros(nx,nt);
RhoCp = zeros(nx,nt);
K(:,:)=k;
RhoCp(:,:)=RCp ;

% Steel properties
rho_cp_dsteel= 7850 * 600 * 0.007541 %equal to Qs

% Calcium Silicate properties
rho_cp_dsil=870 * 1200 * 0.012

hc=25;
epsilon=0.9;
Boltzman=5.6697e-8 ;% W/(m^2K^4)
```

```

Tamb=20%+273.15;
qL=epsilon*75000;

theta=0.5
% Explicit Method Estability parameter  $r \leq 1/2$ 
alfa=k/RCp
r=alfa*dt/dx^2

AA=zeros(nx,nx);BB=zeros(nx);
T = zeros(nx,nt);

% --- Set IC and BC
%T(:,1) = sin(pi*x/L) % Initial condition;
T(:,1) = 20;%+273.15; % Initial condition;

%% Loop over time steps
for j=1:nt-1
% Steel properties T(1,j) steel temperature at instante j
if T(1,j)>=20 && T(1,j)<600
    cp=425+7.75*10^-1*(T(1,j))-1.69*10^-3*(T(1,j))^2+2.22*10^-6*(T(1,j))^3
else
    if T(1,j)>=600 && T(1,j)<735
        cp=666+13002/(738-T(1,j));
    else
        if T(1,j)>=735 && T(1,j)<900
            cp=545+17820/(T(1,j)-731);
        else
            T(1,j)>=900 && T(1,j)<=1200
            cp=650;
        end
    end
end
5
cp
rho_cp_dsteel= 7850*cp*0.007541 %equal to Qs

time=j*dt
TL= 20 + 345*log10(8*time/60+1)%+ 273.15
q0 = 0;
% Equilibrium equations
i=1 ; % node 1 x=0
A(i)=K(i,j)*dt/(RhoCp(i,j)*dx^2); %  $K(i-1/2)=(K(i)+K(i-1))/2$ 
D(i)=(K(i,j)+K(i+1,j))/2*dt/(RhoCp(i,j)*dx^2); %
K(i+1/2)=(K(i)+K(i+1))/2
B(i)=0.5*(A(i)+D(i));

AA(1,1) = (1+2*theta*B(1)); %BC at x=0
AA(1,2) = -theta*(A(1)+D(1)); %BC at x=0
BB(1,j)=(1-2*(1-theta)*B(1))*T(1,j)+(1-theta)*(A(1)+D(1))*T(2,j)-2*dx*q0/K(i,j); %K(i-1/2)

%% %for a prescribed Heat flux at x=0  $kdT/dx=(Qs*dT/dt)_{steel}$ ,
%% considering that  $dT/dt=dT(x=0,t)/dt$ 

AA(1,1) = (1+2*theta*B(1))+theta*A(1)*2*dx*rho_cp_dsteel/(K(i,j)*dt);
%BC at x=0

```

```

AA(1,2) = -theta*(A(1)+D(1));    %BC at x=0
tt=1;
if j==1,tt=0;end %the stored heat at the first time incremente is null
BB(1,j)=(1-2*(1-theta)*B(1)-(1-
2*theta)*A(1)*2*dx*rho_cp_steel/(K(i,j)*dt))*T(1,j)+(1-
theta)*(A(1)+D(1))*T(2,j)+(1-
theta)*A(1)*2*dx*rho_cp_steel/(K(i,j)*dt)*T(i,j-1*tt); %K(i-1/2)

for i=2:nx-1 % Loop over the domain
A(i)=(K(i,j)+K(i-1,j))/2*dt/(RhoCp(i,j)*dx^2); % K(i-1/2)=(K(i)+K(i-
1))/2
D(i)=(K(i,j)+K(i+1,j))/2*dt/(RhoCp(i,j)*dx^2); %
K(i+1/2)=(K(i)+K(i+1))/2
B(i)=0.5*(A(i)+D(i));
%AA Matrix coefficients
AA(i,i-1)=-theta*A(i);
AA(i,i)=1+2*theta*B(i);
AA(i,i+1)=-theta*D(i);
%BB Matrix coefficients
BB(i,j)=(1-theta)*A(i)*T(i-1,j)+(1-2*(1-theta)*B(i))*T(i,j)+(1-
theta)*D(i)*T(i+1,j); % Equation RHS
end

i=nx; % node nx, x=L
A(i)=(K(i,j)+K(i-1,j))/2*dt/(RhoCp(i,j)*dx^2);
D(i)=K(i,j)*dt/(RhoCp(i,j)*dx^2);
B(i)=0.5*(A(i)+D(i));

AA(nx,nx-1) = -theta*(A(nx)+D(nx)); %BC at x=L
AA(nx,nx) = (1+2*theta*B(nx))+theta*D(nx)*2*dx*hc/K(nx,j); %K(i-1/2)
%BC at x=L
BB(nx,j)=(1-theta)*(A(nx)+D(nx))*T(nx-1,j) ...
+(1-2*(1-theta)*B(nx)-(1-theta)*D(nx)*2*dx*hc/K(nx,j))*T(nx,j) ...
+D(nx)*2*dx*(qL+hc*Tamb-epsilon*Boltzman*((T(nx,j))^4-
Tamb^4))/K(nx,j);

%% %for a prescribed surface temperature T(L,t)= TL = Tiso834
AA(nx,nx-1) =0;
AA(nx,nx) = 1;
BB(nx,j)=TL;

T(:,j+1)=linsolve(AA,BB(:,j)); %Solve the equation AA.X=BB using LU
factorization
end
figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1);
surf(t,x,T,'Parent',axes1); xlabel('Time [s]'); ylabel('x [m]');
zlabel('Temp [K]'); legend('Crank Nicolson FD Method');
colorbar('peer',axes1);

plot(t,T(1,:), 'k-o',t,T(nx,:), 'o-');
ylim([0 1200])
xlabel('Time [s]'); ylabel('Temp [°C]');
legend('T(x=0)', 'T(x=L)')
return

```

II. ANEXO

Modelo 1.2.

```
%% 1D heat equation with the Finite Difference Scheme Combined Method
% See Ozisik pag 490

%          d( k(T) dT/dx)dx = RhoCp(T) dT/dt

% The system is efficiently solved using the LU factorization
%theta=0 - explicit scheme  alfa*dt/dx^2 <= 1/2
%theta=1/2 - Crank-Nicolson
%theta=1 - Implicit scheme
% Input:
% nt = number of time steps.
% nx = number of mesh points in x direction.
% L = length of the domain.
% tmax = maximum time for the simulation.
%% Initialize parameters (time step, grid points, etc.).
%dt = input('Enter time step: ');
%N = input('Enter the number of grid points: ');
%L = input('Enter system length: ');
% x = location of finite difference nodes
% t = values of time at which solution is obtained (time nodes)
% T = matrix of temperature solution: T(:,j) is T(x) at t = t(j)
if nargin<1, dt = 3.75; end
if nargin<2, nx = 10; end
if nargin<3, L = 0.012; end
if nargin<4, tmax = 7200; end
% --- Compute mesh spacing and time step

dx = L/(nx-1)
% dt = tmax/(nt-1)
nt=1+tmax/dt
% --- Create arrays to save data and export
x = linspace(0,L,nx)'
t = linspace(0,tmax,nt)

%%Material properties
% Insulation Properties
k=0.175; RCp=923.637*1200;
K = zeros(nx,nt);
RhoCp = zeros(nx,nt);
K(:,:)=k;
RhoCp(:,:)=RCp ;

% Steel properties
rho_cp_dsteel= 7850 * 600 * 0.002584; %equal to Qs

% Calcium Silicate properties
rho_cp_dsil=923.637 * 1200 * 0.012
```

```

hc=25;
epsilon=0.8;
Boltzman=5.6697e-8 ;% W/(m^2K^4)
Tamb=20+273.15;
qL=epsilon*75000;
qL=0
theta=0.5
% Explicit Method stability parameter r<=1/2
alfa=k/RCp
r=alfa*dt/dx^2

AA=zeros(nx,nx);BB=zeros(nx);
T = zeros(nx,nt);

% --- Set IC and BC
%T(:,1) = sin(pi*x/L) % Initial condition;
T(:,1) = 20+273.15; % Initial condition;

%% Loop over time steps
for j=1:nt-1
% Steel properties T(1,j) steel temperature at instante j

Taco=T(1,j)-273.15% % Steel Temperature in °C
if Taco>=20 && Taco<600
    cp=425+7.75*10^-1*(Taco)-1.69*10^-3*(Taco)^2+2.22*10^-6*(Taco)^3
else
    if Taco>=600 && Taco<735
        cp=666+13002/(738-Taco);
    else
        if Taco>=735 && Taco<900
            cp=545+17820/(Taco-731);
        else
            Taco>=900 && Taco<=1200
            cp=650;
        end
    end
end

rho_cp_dsteel= 7850*cp*0.002584; %equal to Qs
%rho_cp_dsteel=0

time=j*dt
TISO= 20 + 345*log10(8*time/60+1)+ 273.15
Tamb=TISO

q0 = 0;
% Equilibrium equations
i=1 ; % node 1 x=0
A(i)=k*dt/(RCp*dx^2); % K(i-1/2)=(K(i)+K(i-1))/2
D(i)=A(i); % K(i+1/2)=(K(i)+K(i+1))/2
B(i)=0.5*(A(i)+D(i));

AA(1,1) =
(1+2*theta*B(1))+theta*A(1)*2*dx*rho_cp_dsteel/(K(i,j)*dt); %BC at x=0
AA(1,2) = -theta*(A(1)+D(1)); %BC at x=0
tt=1;
if j==1,tt=0;end %the stored heat at the first time incremente is null

```



```

    BB(1,j)=(1-2*(1-theta)*B(1)-(1-
2*theta)*A(1)*2*dx*rho_cp_dsteel/(K(i,j)*dt))*T(1,j)+(1-
theta)*(A(1)+D(1))*T(2,j)+(1-
theta)*A(1)*2*dx*rho_cp_dsteel/(K(i,j)*dt)*T(i,j-1*tt); %K(i-1/2)

    for i=2:nx-1 % Loop over the domain
        A(i)=(K(i,j)+K(i-1,j))/2*dt/(RhoCp(i,j)*dx^2); % K(i-1/2)=(K(i)+K(i-
1))/2
        D(i)=(K(i,j)+K(i+1,j))/2*dt/(RhoCp(i,j)*dx^2); %
K(i+1/2)=(K(i)+K(i+1))/2
        B(i)=0.5*(A(i)+D(i));
        %AA Matrix coefficients
        AA(i,i-1)=-theta*A(i);
        AA(i,i)=1+2*theta*B(i);
        AA(i,i+1)=-theta*D(i);
        %BB Matrix coefficients
        BB(i,j)=(1-theta)*A(i)*T(i-1,j)+(1-2*(1-theta)*B(i))*T(i,j)+(1-
theta)*D(i)*T(i+1,j); % Equation RHS
    end

    i=nx; % node nx, x=L
    A(i)=(K(i,j)+K(i-1,j))/2*dt/(RhoCp(i,j)*dx^2);
    D(i)=K(i,j)*dt/(RhoCp(i,j)*dx^2);
    B(i)=0.5*(A(i)+D(i));

    AA(nx,nx-1) = -theta*(A(nx)+D(nx)); %BC at x=L
    AA(nx,nx) = (1+2*theta*B(nx))+theta*D(nx)*2*dx*hc/K(nx,j); %K(i-1/2)
    %BC at x=L
    BB(nx,j)=(1-theta)*(A(nx)+D(nx))*T(nx-1,j) ...
        +(1-2*(1-theta)*B(nx)-(1-theta)*D(nx)*2*dx*hc/K(nx,j))*T(nx,j) ...
        +D(nx)*2*dx*(qL+hc*Tamb-epsilon*Boltzman*((T(nx,j))^4-
Tamb^4))/K(nx,j);

    T(:,j+1)=linsolve(AA,BB(:,j)); %Solve the equation AA.X=BB using LU
factorization
end

T_grau_c(:,:)=T(:,:)-273.15%

figure1 = figure('PaperSize',[20.98 29.68]);
axes1 = axes('Parent',figure1);
surf(t,x,T,'Parent',axes1); xlabel('Time [s]'); ylabel('x [m]');
zlabel('Temp [K]'); %legend('Crank Nicolson FD Method');
colorbar('peer',axes1);

plot(t,T_grau_c(1,:), 'k-o',t,T_grau_c(nx,:), 'o-');
ylim([0 1500])
xlabel('Time [s]'); ylabel('Temp [°C]');
Legend('T(x=0)', 'T(x=L)')
T_grau_c_transp=T_grau_c';
xlswrite('este', T_grau_c_transp, 'Tsteel', 'A2')
% Tc=T'
% xlswrite('Massividade_', Tc, 'Tsteel', 'A2')

return

```

III.ANEXO

Determinação da temperatura de elementos sujeitos a incêndio, segundo o EC3

```
%Program to solve the temperature increment of a fire protected steel beam
%accordingly to the EC3 part 1.2 formulae
%%
%insulation Properties

%% Experimental DATA
disp(['Reading the intumescent properties...'])
values=xlsread('simplif.xls'); % Reads the "experimental temperatures"
d(:,:)=values(:,[1:2]); %Time|dp|
%lambda(:,:)=values(:,[3:4]);%Insulation thermal conductivity

%di=input('enter the insulation thickness [m]');
%ci=input('enter the insulation specific heat [J/Kg K]');
%rhoi=input('enter the insulation specific mass [Kg/m^3]');
%lambdai=input('enter the insulation thermal conductivity [W/m°C]');
%%
%Steel Properties
%SF=input('enter the steel section factor [m^-1] ');
%ds=1/SF;
%cs=input('enter the steel specific heat [J/Kg K]');
%rhos=input('enter the steel specific mass [Kg/m^3]');
%%
%Other conditions
%Tamb=input('enter the Initial (Ambiente) Temperature [°C]');
%tfinal=input('enter the maximum time for analysis [s]');
%delta_t=input('enter the maximum time increment [s]');
%%
%di=0.001329;
SF=387;
Tamb=20; tfinal=1700;
delta_t=1;
ninc=tfinal/delta_t;
% ninct=tfinal/5.705;

%Variables
%ninc=240;
Tgas=size(ninc+1,2);
Tsteel=size(ninc+1,2);
% Tsteel=size(ninct+1,2);
delta_Tg=size(ninc+1,1);
delta_Ts=size(ninc+1,1);
Tm=size(ninc+1,2);
lambda=size(ninc+1,2);
%%
%Tg=Tamb+345*log10(8*t/60+1);
%%
%Steel temperature development
t=0
Ts=Tamb;
for i=1:ninc+1
    %Fire gas temperature increment
    t
    Tgas(i,1)=t;
```

```

    Tgas(i,2)=Tamb+345*log10(8*t/60+1);%Tfire(t,Tamb);
    if i>1,
        delta_Tg(i,1)=Tgas(i,2)-Tgas(i-1,2);
    else
        delta_Tg(i,1)=Tgas(i,2)-Tamb
    end
%Steel temperature increment
    Tsteel(i,1)=t;
    Tsteel(i,2)=Ts;
    Tm(i,1)=t;
    lambda(i,1)=t;
    %Tm(i,2)=Ts;
    [lambdas,rhos,cs] = steel_prop(Tsteel,i); %read the steel thermal
properties
    [rhoi,ci] = insul_prop(Tgas,Ts,i,t); %read the insulation thermal
properties

%    ki(i,1)=lambdai;
%    lambdai=interp1(lambda(:,1),lambda(:,2),t);
%    di=interp1(d(:,1),d(:,2),t);

%    lambdai=lambda(i,2);
%    di=d(i,2);

%    phi=(ci*rhoi*di)/(cs*rhos/SF);
%    delta_Ts(i,1)=(Tgas(i,2)-
Ts)*delta_t/((cs*rhos/SF)*(di/lambdai)*(1+phi/3))-(exp(phi/10)-
1)*delta_Tg(i,1);

% for j=1:ninct+1;

    Tm(i,2)=(Tgas(i,2)+Ts)/2;

    if Tm(i,2)>=20 && Tm(i,2)<140
        lambda(i,2)=-(0.08/140)*Tm(i,2)+0.15
    else
        if Tm(i,2)>=140 && Tm(i,2)<220
            lambda(i,2)=0.07+0.001*(Tm(i,2)-140)
        else
            if Tm(i,2)>=220 && Tm(i,2)<344
                lambda(i,2)=0.15
            else
                if Tm(i,2)>=344 && Tm(i,2)<462
                    lambda(i,2)=0.15+0.000847*(Tm(i,2)-344)
                else Tm(i,2)>=462 && Tm(i,2)<1000
                    lambda(i,2)=0.25
                end
            end
        end
    end

    end

    phi=(ci*rhoi*d(i,2))/(cs*rhos/SF);
    delta_Ts(i,1)=(Tgas(i,2)-
Ts)*delta_t/((cs*rhos/SF)*(d(i,2)/lambda(i,2))*(1+phi/3))-(exp(phi/10)-
1)*delta_Tg(i,1);

    if delta_Ts(i,1)<0

```

```

    delta_Ts(i,1)=0
end

    if Ts<=Tamb
        Ts=Tamb
    end
    Ts=Ts+delta_Ts(i,1);
    t=t+delta_t;
end;

%PLOT CURVES
plot (Tgas(:,1),Tgas(:,2), '-.r','LineWidth',2,'MarkerSize',2)%'-.rd'
hold on
plot (Tsteel(:,1),Tsteel(:,2), '--k','LineWidth',2,'MarkerSize',2)
hold off
legend('T fire','T steel')
axis([0 tfinal 0 1200])
xlabel('Time [sec]')
ylabel('Temperature [°C]')
title('Temperature Evolution')
%Write a Excel file with the temperatures
%xlswrite('Temp_data.xls',[Time Temperature], 'Temperatures', 'E1')
xlswrite('Temp_data.xls', Tsteel, 'Tsteel', 'A2')
xlswrite('Temp_data.xls', Tgas, 'Tgas', 'A2')
saveas(gcf,'Temperatures.jpg')

```

Sub-rotinas

A-

```

function [rhoi,ci] =insul_prop(Tgas,Ts,i,t);
%
T=(Tgas(i,2)+Ts)/2
% Insulation material Thermal Properties. T in °C and k in W/m/K.
%
%Intumescent coating
ci=1000;
rhoi=1360;

```

B-

```

function [lambdas,rhos,cs] = steel_prop(Tsteel,i)
%% Loop over time steps

% Thermal cond.temperature increment

Tsteel=Tsteel(i,2)%-273.15% % Steel Temperature in °C
if Tsteel>=20 && Tsteel<600
    cs=425+7.75*10^-1*(Tsteel)-1.69*10^-3*(Tsteel)^2+2.22*10^-6*(Tsteel)^3
else
    if Tsteel>=600 && Tsteel<735
        cs=666+13002/(738-Tsteel);
    else
        if Tsteel>=735 && Tsteel<900
            cs=545+17820/(Tsteel-731);
        else
            Tsteel>=900 && Tsteel<=1200
            cs=650;
        end
    end
end

```

```
end
end

% rho_cp_dsteel= 7850*cp*0.002584; %equal to Qs

%cs=600;
rhos=7850;
lambdas=45;
```

C-

```
function Tgas = Tfire(t,Tamb);
%
% ISO 834 Fire curve. t in seconds and T in °C.
%
Tgas=Tamb+345*log10(8*t/60+1); % ISO Fire curve
```

Errata

Na página 5.25 onde se lê “Nos gráficos de dispersão acima mencionados, verifica-se as diferenças entre as temperaturas determinadas no ensaio experimental e a previsão efectuada pelo método simplificado são inferiores a $\pm 10 \%$, convergindo para valores muito próximos na fase final”, deverá ser lido “Nos gráficos de dispersão acima mencionados, verifica-se as diferenças entre as temperaturas determinadas pelo método numérico e a previsão efectuada pelo método simplificado são inferiores a $\pm 10 \%$, convergindo para valores muito próximos na fase final”.

Na página 5.28 onde se lê “Nos gráficos de dispersão acima mencionados, as diferenças entre as temperaturas determinados no ensaio experimental e a previsão efectuada pelo método simplificado são inferiores a 20% , convergindo para valores muito próximos na fase final.”, deverá ser lido “Nos gráficos de dispersão acima mencionados, verifica-se as diferenças entre as temperaturas determinadas pelo método numérico e a previsão efectuada pelo método simplificado são inferiores a 20% , convergindo para valores muito próximos na fase final”.