



**Universidade de Aveiro** Departamento de Engenharia Civil  
2011

**André da  
Silva Reis**

**Determinação de cenários de incêndio  
em edifícios**





Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil  
2011

**André da  
Silva Reis**

## **Determinação de cenários de incêndio em edifícios**

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



Dedico este trabalho à minha família.



**o júri**  
presidente

Prof. Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes  
professora auxiliar da Universidade de Aveiro

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

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

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





## **agradecimentos**

O desenvolvimento desta dissertação não seria possível sem a excelente orientação do Professor Nuno Lopes, sempre disponível com uma palavra de incentivo e otimismo. Pela disponibilidade total para responder às minhas incontáveis questões com respostas claras e precisas, estou-lhe muito grato por todo o conhecimento transmitido e por todas as experiências partilhadas no último ano.

Ao meu co-orientador Professor Paulo Vila Real, sempre direto e frontal, pelos conselhos, pelo incentivo e pelas valiosas sugestões e ajudas fornecidas durante a preparação desta dissertação.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro na pessoa do Professor Paulo Cachim, presidente do departamento, pelas facilidades proporcionadas durante a preparação deste trabalho.

A todos os meus amigos pelas horas de descontração, amizade, apoio e camaradagem ao longo desta fase da minha vida, em particular a Ângela Bernardo, Fábio Pires, Hugo Domingues, Luís Carneiro, Marco Nascimento, Nelson Teixeira e Pedro Roque.

Aos colegas da Universidade de Aveiro pelo companheirismo e apoio essenciais à concretização desta dissertação.

Aos meus pais, Aires Reis e Rosa Reis, por todo o esforço e pela forma como me educaram e acompanharam ao longo de toda a minha vida.

A toda a minha família sempre disponível com apoio e motivação.

Muito obrigado



**palavras-chave**

Cenários de incêndio, curvas nominais, modelos simplificados, modelos avançados de incêndio

**resumo**

A presente tese foca-se no estudo da evolução das temperaturas em compartimentos sujeitos a incêndios, apresentando uma análise dos diferentes métodos existentes para o cálculo das respectivas temperaturas e o campo de aplicação dos mesmos.

No âmbito dos métodos analíticos de análise de temperaturas, apresentam-se as curvas nominais, os incêndios localizados, curvas paramétricas e os fogos móveis. Para os métodos avançados, abordam-se os modelos de zona e os modelos de campo.

Ao longo deste trabalho foram realizadas análises comparativas dos diferentes modelos de fogo natural, aplicando três programas representativos. Para a obtenção das curvas de incêndio através dos métodos analíticos utilizou-se o programa Elefir-EN, o programa OZone foi usado para a análise das temperaturas com base num modelo de duas zonas e para as análises baseadas num modelo de campo recorreu-se ao programa FDS.

Nas análises efetuadas, procurou-se estudar a influência das características do compartimento e comparar os resultados dos diferentes modelos.



**keywords**

Fire scenarios, nominal curves, simplified models, fire advanced models

**abstract**

The main focus of this thesis is to study the temperatures evolution in fire compartments and to make an analysis of the existing different methods for the temperatures calculation and their field of application.

In the scope of the analytical methods for the temperatures calculation, the nominal curves, the localized fires, the parametric curves and the travelling fires are presented. For the advanced models, the zone models and the field models are applied.

Throughout this work, comparative analyses of the different models for natural fires were performed applying three representatives. To determine the parametric curves, the program Elefir-EN was used, for the zone models fire temperature curves it was applied the program OZone and the program FDS was used to obtain the fire curves using field models.

In the performed analyses, it was studied the influence of compartment characteristics and compared the results of the different methods.



---

## Índice

<b>Índice de figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de tabelas</b>	<b>xxiii</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>xxv</b>
<b>Capítulo 1 Introdução</b>	<b>2</b>
1.1 Considerações Gerais	2
1.2 O fenómeno do fogo	3
1.2.1 Fases de incêndio	4
1.2.2 Propagação do incêndio	5
1.2.3 Intervenção e extinção do incêndio	6
1.3 Enquadramento da legislação nacional e europeia	7
1.4 Evolução temporal da análise das temperaturas em compartimentos de incêndio	8
1.5 Objetivos	13
1.6 Estrutura da Dissertação	13
<b>Capítulo 2 Curvas de incêndio nominais</b>	<b>16</b>
2.1 Introdução	16
2.2 Curva de incêndio padrão ISO 834	16
2.3 Curva de incêndio ASTM E119	17
2.4 Curva de incêndio de hidrocarbonetos	18
2.5 Curva de incêndio para elementos exteriores	18
2.6 Curva de incêndio para materiais reativos ao fogo	18

2.7	Comparação das diferentes curvas nominais	19
<b>Capítulo 3 Modelos de incêndio natural</b>		<b>22</b>
3.1	Introdução	22
3.2	Dados necessários para a utilização dos modelos de incêndio natural	23
3.2.1	Densidade de carga de incêndio	23
3.2.2	Características das aberturas	29
3.2.3	Taxa de libertação de calor (RHR)	32
3.3	Modelos de incêndio simplificados	37
3.3.1	Curvas de incêndio paramétricas adotadas no Anexo A do EC1	37
3.3.2	Curvas de incêndio paramétricas adotadas no Anexo Nacional Alemão do EC1	41
3.3.3	Curvas BFD	45
3.3.3.1	Determinar a temperatura máxima $T_m$	46
3.3.3.2	Determinar o instante de tempo, $t_m$ , a que temperatura máxima ocorre	49
3.3.3.3	Determinar o fator de forma da curva $s_c$	50
3.3.3.4	Efeito dos diversos parâmetros utilizados nas curvas BFD	51
3.3.3.5	Substituição das curvas nominais por curvas BFD	52
3.3.4	Incêndios localizados	55
3.3.4.1	Modelo de Heskestad	55
3.3.4.2	Modelo de Hasemi	57
3.3.5	Fogos móveis ( <i>travelling fires</i> )	59
3.4	Modelos de incêndio avançados	68
3.4.1	Modelos de zona	68
3.4.1.1	Modelos de uma zona	69
3.4.1.2	Modelos de duas zonas	69
3.4.2	Modelos de campo (CFD)	71
<b>Capítulo 4 Análises comparativas da evolução da temperatura num compartimento de incêndio aplicando as diferentes metodologias</b>		<b>74</b>
4.1	Influência da área e do fator de abertura	74



---

4.1.1	Considerações gerais	74
4.1.2	Discussão de resultados	75
4.2	Influência da quebra do vidro das aberturas	79
4.2.1	Considerações gerais	79
4.2.2	Discussão de resultados	80
4.3	Curvas paramétricas do anexo Nacional Alemão do EC1	85
4.3.1	Considerações gerais	85
4.3.2	Exemplo 1	85
4.3.3	Exemplo 2	88
4.3.5	Discussão de resultados	91
4.4	Influência da geometria das aberturas	93
4.4.1	Considerações gerais	93
4.4.2	Discussão de resultados	99
4.5	Simulação de um compartimento de incêndio com diferentes fontes de calor	100
4.5.1	Considerações gerais	101
4.5.2	Discussão de resultados	102
4.5.3	Comparação com os modelos tradicionais	104
<b>Capítulo 5</b>	<b>Considerações finais e desenvolvimentos futuros</b>	<b>108</b>
5.1	Considerações finais	108
5.2	Desenvolvimentos futuros	109
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>112</b>
	<b>Anexos</b>	<b>124</b>



**Índice de figuras**

Figura 1.1 – Gráfico típico das fases que constituem um incêndio natural (BSC, 2011)	3
Figura 1.2 – Triângulo do Fogo (Junior, 2011)	4
Figura 1.3 – Transferência de calor por condução (Junior, 2011)	5
Figura 1.4 - Transferência de calor por convecção (Junior, 2011)	6
Figura 1.5 - Transferência de calor por radiação (Junior, 2011)	6
Figura 1.6 – Ilustração do conceito da caracterização da severidade de incêndios pelas áreas abaixo das curvas temperatura-tempo (Lie and ASCE, 1992). De acordo com este conceito, os incêndios descritos pelas curvas A e B têm igual severidade.	9
Figura 2.1 – Curvas de incêndio nominais	19
Figura 3.1 – Planta do compartimento utilizado no estudo da evolução das temperaturas no compartimento de incêndio para diferentes densidades de carga de incêndio	28
Figura 3.2 – Influência das medidas de proteção ativa na evolução da temperatura no compartimento de incêndio, com base nas curvas paramétricas adotadas no EC1 (CEN, 2010a)	29
Figura 3.3 – Influência das medidas de proteção ativa na evolução da temperatura no compartimento de incêndio, com base num modelo de duas zonas	29
Figura 3.4 – Aberturas verticais no compartimento de incêndio	30
Figura 3.5 – Taxa de libertação de calor (RHR) em função do tempo	33
Figura 3.6 – Gráfico típico da taxa de libertação de calor em função do tempo em caso de densidades de carga de incêndio muito pequenas (espaços públicos, por exemplo)	35
Figura 3.7 – Compartimento-tipo utilizado no estudo da evolução da taxa de libertação de calor para diferentes tipos de ocupação, de acordo com a parte 1-2 do EC1 (CEN, 2010a)	36

Figura 3.8 - Evolução da taxa de libertação de calor em função do tempo nos tipos de ocupação em que o incêndio é controlado pela densidade de carga de incêndio	36
Figura 3.9 - Evolução da taxa de libertação de calor em função do tempo nos tipos de ocupação em que o incêndio é controlado pela ventilação	36
Figura 3.10 – Exemplo de curvas paramétricas	41
Figura 3.11 – Representação esquemática da curva de incêndio paramétrica adotada no Anexo Nacional Alemão do EC1 (DIN, 2010)	42
Figura 3.12 – Curvas de temperatura em função do inverso do fator de abertura para compartimentos não isolados para determinar o parâmetro $T_m$ (Barnett, 2002)	47
Figura 3.13 – Curva de temperatura em função do inverso do fator de abertura obtida a partir da equação 3.68 para $\psi_{25}$	47
Figura 3.14 – Curvas de temperatura em função do inverso do fator de abertura obtidas a partir da equação 3.68 para $\psi_{25}$ , $\psi_{35}$ , $\psi_{50}$ e $\psi_{100}$	48
Figura 3.15 – Comparação entre a Figura 3.12 e a Figura 3.14	48
Figura 3.16 – Coeficiente de pirólise (Novozhilov et al.)	50
Figura 3.17 – Curvas BFD usando diferentes valores do parâmetro $T_m$ na equação 3.67	51
Figura 3.18 – Curvas BFD usando diferentes valores do parâmetro $t_m$ na equação 3.67	51
Figura 3.19 – Curvas BFD usando diferentes valores do parâmetro $s_c$ na equação 3.67	52
Figura 3.20 – Comparação entre a curva BFD e a curva de incêndio padrão ISO 834	53
Figura 3.21 – Comparação entre a curva BFD e a curva de incêndio ASTM E119	53
Figura 3.22 – Comparação entre a curva BFD e a curva de incêndio de hidrocarbonetos	54
Figura 3.23 – Comparação entre a curva BFD e a curva de incêndio para elementos exteriores	54

---

Figura 3.24 – Comparação entre curvas BFD e curvas de incêndio nominais de hidrocarbonetos e para elementos exteriores (Barnett, 2007)	54
Figura 3.25 – Esquema do modelo de incêndio localizado de Heskestad (Vila Real and Franssen, 2011)	56
Figura 3.26 – Exemplo de uma curva de incêndio obtida pelo modelo de Heskestad	56
Figura 3.27 – Esquema do modelo de incêndio localizado de Hasemi (Vila Real and Franssen, 2011)	57
Figura 3.28 – Exemplo de uma curva de incêndio obtida pelo modelo de Hasemi	59
Figura 3.29 – Ilustração da zona próxima das chamas ( <i>near field</i> ) e da zona distante das chamas ( <i>far field</i> ) de um fogo móvel (Stern-Gottfried, 2011)	60
Figura 3.30 – Exemplo de fogo móvel no edifício da TU Delft (Stern-Gottfried et al., 2009)	61
Figura 3.31 - Duração das diferentes fases de um fogo móvel num ponto do compartimento de incêndio (Law et al., 2011)	65
Figura 3.32 – Progressão do fogo móvel ao longo do pavimento: (a) para uma área de 2,5% do pavimento e (b) para uma área de 25% do pavimento (Stern-Gottfried, 2011)	65
Figura 3.33 – Medição das distâncias desde o centro do fogo até à zona próxima e distante das chamas para dois fogos com tamanhos diferentes: (a) pequeno e (b) grande (Stern-Gottfried, 2011)	66
Figura 3.34 – Gráfico da temperatura na zona distante das chamas em função do tempo, para diversas áreas de pavimento a arder (Stern-Gottfried, 2011)	67
Figura 3.35 – Compartimento num modelo de duas zonas (Mowrer, 2002)	70
Figura 3.36 – Compartimento num modelo de duas zonas (Vassart et al., 2007)	70
Figura 3.37 – Compartimento num modelo de duas zonas multi-compartimentos (Vassart et al., 2007)	71

Figura 3.38 – Gráfico da temperatura em função do tempo considerando um compartimento de duas zonas obtido pelo programa OZone (Vila Real and Lopes, 2010)	71
Figura 3.39 – Exemplo da variação da temperatura ao longo do tempo usando o programa FDS (Duthinh et al., 2008)	72
Figura 4.1 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para diferentes áreas de um compartimento com fator de abertura de $0.10 \text{ m}^{0.5}$ usando um modelo de duas zonas no programa OZone	76
Figura 4.2 – Curvas paramétricas que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para diferentes áreas de um compartimento com fator de abertura de $0.10 \text{ m}^{0.5}$ obtidas usando o programa Elefir-EN	76
Figura 4.3 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para diferentes fatores de abertura de um compartimento com área igual a $50 \text{ m}^2$ usando um modelo de duas zonas no programa OZone	77
Figura 4.4 – Curvas paramétricas que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para diferentes fatores de abertura de um compartimento com área igual a $50 \text{ m}^2$ obtidas usando o programa Elefir-EN	77
Figura 4.5 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura igual a $0.06 \text{ m}^{0.5}$ e área igual a $100 \text{ m}^2$	78
Figura 4.6 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura igual a $0.10 \text{ m}^{0.5}$ e área igual a $100 \text{ m}^2$	78
Figura 4.7 – Definição da variação gradual e linear da quebra do vidro das aberturas, parâmetros usados no programa OZone	79
Figura 4.8 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de $100 \text{ m}^2$ e fator de abertura de $0.10 \text{ m}^{0.5}$	80
Figura 4.9 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de $500 \text{ m}^2$ e fator de abertura de $0.02 \text{ m}^{0.5}$	81

---

Figura 4.10 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 100 m <sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06 m <sup>0.5</sup>	82
Figura 4.11 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra gradual do vidro das aberturas para um compartimento com fator de abertura de 0.10 m <sup>0.5</sup>	82
Figura 4.12 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra linear do vidro das aberturas para um compartimento com área igual a 50 m <sup>2</sup>	83
Figura 4.13 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de 0.10 m <sup>0.5</sup> e área igual a 50 m <sup>2</sup>	84
Figura 4.14 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de 0.10 m <sup>0.5</sup> e área igual a 200 m <sup>2</sup>	84
Figura 4.15 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de 0.10 m <sup>0.5</sup> e área igual a 200 m <sup>2</sup>	85
Figura 4.16 – Comparação entre as curvas paramétricas adotadas nos Anexos Alemão e Nacional do EC1 para o exemplo 1 do caso de estudo C	88
Figura 4.17 – Comparação entre as curvas paramétricas adotadas nos Anexos Alemão e Nacional do EC1 para o exemplo 2 do caso de estudo C	91
Figura 4.18 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 200 m <sup>2</sup> e fator de abertura de 0.10 m <sup>0.5</sup>	92
Figura 4.19 – Compartimento considerado no caso 1	94
Figura 4.20 – Compartimento considerado no caso 2	94
Figura 4.21 – Compartimento considerado no caso 3	95
Figura 4.22 – Taxa de libertação de calor obtida no programa FDS	96
Figura 4.23 – Temperaturas no compartimento de incêndio para o instante de tempo t=0 s	97

Figura 4.24 – Temperaturas no compartimento de incêndio para o instante de tempo $t=720$ s	98
Figura 4.25 – Temperaturas no compartimento de incêndio para o instante de tempo $t=1440$ s	98
Figura 4.26 – Temperaturas no compartimento de incêndio para o instante de tempo $t=2160$ s	98
Figura 4.27 – Temperaturas no compartimento de incêndio para o instante de tempo $t=2880$ s	99
Figura 4.28 – Temperaturas no compartimento de incêndio para o instante de tempo $t=3600$ s	99
Figura 4.29 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de $50 \text{ m}^2$ e fator de abertura de $0.06 \text{ m}^{0.5}$ , obtida usando o programa FDS	100
Figura 4.30 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de $50 \text{ m}^2$ e fator de abertura de $0.06 \text{ m}^{0.5}$ , obtida usando o programa OZone	100
Figura 4.31 – Compartimento em estudo	101
Figura 4.32 – Curvas HRRPUA inseridas no FDS	102
Figura 4.33 – RHR obtida no programa FDS	103
Figura 4.34 – Evolução da temperatura no interior do compartimento de incêndio, obtidas a partir do programa FDS	103
Figura 4.35 – Evolução da temperatura no compartimento de incêndio para os diversos métodos de análise de temperaturas em compartimentos de incêndio em estudo	104
Figura 4.36 – Evolução da temperatura no compartimento de incêndio obtida pelo programa FDS para duas malhas de cálculo diferentes	105



## Índice de tabelas

Tabela 1.1 – Modelos de análise da temperatura de um compartimento em situação de incêndio	11
Tabela 2.1 – Temperatura dos gases dentro do compartimento de incêndio	17
Tabela 3.1 - Valores característicos da densidade de carga de incêndio $q_{f,k}$ [MJ/m <sup>2</sup> ] por unidade de área do pavimento de acordo com tipo de ocupação (ajustados com a distribuição de Gumbel) segundo o EC1 (CEN, 2010a)	24
Tabela 3.2 - Valores característicos da densidade de carga de incêndio $q_{f,k}$ [MJ/m <sup>2</sup> ] por unidade de área do pavimento de acordo com tipo de ocupação segundo o projeto europeu EUR 18868 EN	24
Tabela 3.3 – Fator $\delta q_1$ (CEN, 2010a)	25
Tabela 3.4 – Fator $\delta q_2$ (CEN, 2010a)	25
Tabela 3.5 – Fatores $\delta n$ (CEN, 2010a)	26
Tabela 3.6 – Influência das medidas ativas de segurança contra incêndio no valor de cálculo da densidade de carga de incêndio	28
Tabela 3.7 – Taxa de crescimento de incêndio e $RHR_f$ [kW/m <sup>2</sup> ] para diferentes tipos de ocupação (CEN, 2010a)	33
Tabela 3.8 – Tempo necessário para atingir uma taxa de libertação de calor de 1 MW	49
Tabela 3.9 – Dados utilizados na construção das curvas BFD	52
Tabela 4.1 – Geometria dos vários compartimentos em estudo	75
Tabela 4.2 – Variação da percentagem de abertura crítica com a área do compartimento	83
Tabela 4.3 – Dados do exemplo 1	85
Tabela 4.4 – Dados do exemplo 2	88
Tabela 4.5 – Geometria dos vários compartimentos em estudo	91

Tabela 4.6 – Geometria dos três compartimentos em estudo	93
Tabela 4.7 – Exemplo de valores de $q_{f,d}$ e HRRPUA (Heinisuo et al., 2010)	95
Tabela 4.8 – Tempos que determinam a duração das várias fases da taxa de libertação de calor	96
Tabela 4.9 – Propriedades dos materiais que se encontram no interior do compartimento (Heinisuo et al., 2010)	101

## Nomenclatura

Não foram colocados todos os símbolos, pois alguns destes encontram-se descritos no decorrer desta dissertação.

### Letras maiúsculas do alfabeto latino

$A$	área	$[m^2]$
$A_f$	área de superfície do pavimento	$[m^2]$
$A_{fi}$	área máxima que o incêndio pode atingir	$[m^2]$
$A_m/V$	fator de massividade	$[m^{-1}]$
$A_t$	área total da superfície envolvente (incluindo paredes, pavimento, teto e aberturas)	$[m^2]$ .
$A_v$	área total das aberturas verticais	$[m^2]$
$A_{vi}$	área da abertura $i$	$[m^2]$
$A(t)$	área de incêndio ao longo do tempo	$[m^2]$
$D$	diâmetro do incêndio	$[m]$
$H$	altura do compartimento	$[m]$
$H'$	distância entre a origem do incêndio e o teto	$[m]$
$H_u$	poder calorífico efetivo	$[MJ/kg]$
$L_f$	dimensão máxima da chama	$[m]$
$O$	fator de abertura	$[m^{1/2}]$
$Q$	taxa de libertação de calor do incêndio	$[W]$
$Q(t)$	taxa de libertação de calor em função do tempo	$[W]$
$RHR_f$	taxa de libertação de calor por unidade de área	$[W/m^2]$
$T$	temperatura	$[^\circ C]$
$T_a$	temperatura ambiente	$[^\circ C]$
$T_m$	temperatura máxima	$[^\circ C]$

### Letras minúsculas do alfabeto latino

$b$	coeficiente que representa as propriedades térmicas da envolvente	$[J/(m^2s^{1/2}K)]$
$c$	calor específico	$[J/kgK]$
$c_a$	calor específico do aço	$[J/kgK]$
$k_p$	coeficiente de pirólise	$[kg/s\ m^{2,5}]$
$h$	altura	$[m]$
$\dot{h}$	fluxo de calor	$[W/m^2]$
$h_{eq}$	média pesada da altura das aberturas verticais	$[m]$
$h_i$	altura da abertura $i$	$[m]$
$\dot{h}_{net}$	fluxo de calor efetivo	$[W/m^2]$
$k_{sh}$	fator de correção para o efeito de sombra	$[-]$
$m$	fator de combustão	$[-]$
$q_{f,d}$	valor de cálculo da densidade de carga de incêndio por unidade de área	$[MJ/m^2]$
$q_{f,k}$	valor característico da densidade de carga de incêndio por unidade de área em função do tipo de ocupação	$[MJ/m^2]$
$s_c$	fator de forma da curva BFD	$[-]$
$t$	tempo	$[h, \text{min ou s}]$
$t_m$	instante de tempo a que ocorre a temperatura máxima	$[h, \text{min ou s}]$
$t_\alpha$	tempo necessário para atingir uma taxa de libertação de calor de 1 MW	$[s]$

**Letras maiúsculas do alfabeto grego**

$\Delta t$	intervalo de tempo	[s]
$\Delta\theta_g$	acrécimo de temperatura	[°C]
$\Phi$	fator de vista	[–]

**Letras minúsculas do alfabeto grego**

$\alpha_c$	coeficiente de convecção	[W/m <sup>2</sup> K]
$\delta_{q1}$	fator parcial que tem em conta o risco de ativação do incêndio em função da dimensão do compartimento	[–]
$\delta_{q2}$	fator parcial que tem em conta o risco de ativação do incêndio em função do tipo de ocupação	[–]
$\delta_n$	fator parcial que tem em conta as diferentes medidas ativas de segurança contra incêndio	[–]
$\varepsilon_m$	emissividade do aço, geralmente igual a 0,7	[–]
$\varepsilon_f$	emissividade do fogo, geralmente igual a 1,0	[–]
$\eta$	inverso do fator de abertura	[m <sup>-0.5</sup> ]
$\theta_a$	temperatura ambiente	[°C]
$\theta_g$	temperatura	[°C]
$\theta_m$	temperatura na superfície do elemento de aço	[°C]
$\lambda$	condutibilidade térmica	[W/mK];
$\rho$	massa volúmica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_a$	massa volúmica do aço igual a 7850	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	constante de Stephan Boltzmann $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ].
$\psi$	densidade de massa de carga de incêndio	[kg/m <sup>2</sup> ]

## **Abreviaturas**

BFD	Barnett Fire Design
CEN	Comissão Europeia de Normalização
CFD	Computational Fluid Dynamics
EC	Eurocódigo
ECSC	European Coal and Steel Community
FDS	Fire Dynamics Simulator
MAI	Ministério da Administração Interna
NFSC	Natural Fire Safety Concept
NIST	National Institute of Standards and Technology
RHR	Taxa de libertação de calor
SCIE	Segurança contra incêndio em edifícios
SFPE	Society of Fire Protection Engineers

---

# *Capítulo 1*

## *Introdução*

## Capítulo 1 Introdução

### 1.1 Considerações Gerais

Os incêndios são um flagelo permanente de qualquer agregado urbano, podendo existir em todos os tipos de construção. Em cada ano, 10 a 20 pessoas por cada milhão perdem a vida devido a esta ação. Para as nações desenvolvidas, o custo total do fogo, incluindo perdas e proteções, é sensivelmente 1% do produto interno bruto (PIB) por ano (Cox, 1999). Reduzir os acidentes pessoais e as perdas é uma preocupação constante dos especialistas em segurança e proteção de edifícios contra incêndios e deve ser o objetivo principal da legislação existente nesta área.

Na década de 1960, vários incêndios dramáticos, como o incêndio no supermercado *Innovation* em Bruxelas que provocou mais de três centenas de mortos e o incêndio na discoteca *Le cinq Sept* em São-Laurent-du-Pont (França), conduziram ao aparecimento de vários novos regulamentos em vários países europeus (Vassart et al., 2007). Portugal, felizmente, tem sido poupado a grandes catástrofes, mas o grande incêndio de Lisboa (Chiado – Agosto de 1988) fez soar o alarme e alertou toda a comunidade para a importância da proteção dos edifícios contra incêndios. Seguindo o que já havia sido feito em alguns países europeus, criou-se regulamentação portuguesa sobre esta matéria.

Nessa regulamentação, para avaliação da segurança de uma estrutura exposta ao fogo estão previstas duas abordagens, uma abordagem prescritiva baseada nas curvas de incêndio nominais e uma análise baseada no desempenho.

Nos últimos anos, o conhecimento e a compreensão sobre o modo como as estruturas respondem a elevadas temperaturas tem-se desenvolvido rapidamente. Hoje em dia, é possível incluir uma grande variedade de fenómenos nos modelos estruturais e prever com boa precisão a resposta da estrutura quando está sujeita a um aumento substancial da temperatura devido a incêndio (Bailey et al., 1995; Franssen et al., 1995; Gillie et al., 2002). Assim, o engenheiro tem a liberdade de dimensionar estruturas para resistir a elevadas temperaturas de forma inovadora e eficiente.

Para melhor previsão do comportamento ao fogo dos edifícios existem regulamentos que abrangem diversas áreas, incluindo:

- Meios de fuga;



- Propagação do fogo, incluindo “resistência ao fogo” e “reação ao fogo”;
- A resistência ao fogo da estrutura em termos de escalões de resistência, por exemplo: R30, 60, 90, 120, 180 ou 240;
- Os sistemas de ventilação: evacuação de fumos e calor;
- Medidas ativas de segurança contra incêndio como extintores de mão, alarmes detetores de calor, alarmes detetores de fumo, sprinklers, sistemas de extinção de pó químico, sistemas de gases e de vapor de água, etc.;
- Acessos para as equipas de bombeiros.

A proteção contra incêndio é uma matéria um pouco mais complexa do que possa parecer. De imediato imagina-se que ela é constituída pelos equipamentos de combate a incêndio que se encontram nas edificações. Contudo, esta é apenas uma parte de um sistema composto por elementos de proteção passiva e elementos de proteção ativa.

Esta dissertação focar-se-á na previsão das evoluções das temperaturas em compartimentos sujeitos a incêndios e visa contribuir para uma melhor compreensão da evolução das temperaturas em compartimentos de incêndio. Assim, será feito um estudo sobre a modelação da ação do fogo em edifícios, analisando-se diversos casos de estudo. Este estudo será baseado em diferentes análises que serão executadas recorrendo a software específico, comparando-se posteriormente os resultados obtidos.

## 1.2 O fenómeno do fogo

Neste ponto será feita uma breve apresentação do incêndio (ver Figura 1.1) tendo em conta o seu conceito, como se inicia, as diferentes fases que o definem, a forma como se propaga e os meios de intervenção e extinção do mesmo.

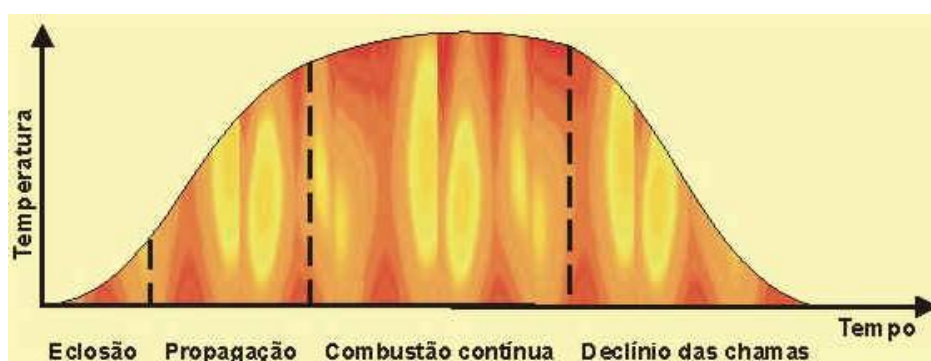


Figura 1.1 – Gráfico típico das fases que constituem um incêndio natural (BSC, 2011)

### **1.2.1 Fases de incêndio**

Considera-se que um incêndio é uma ocorrência de fogo não controlado. Em termos simples, os incêndios não se iniciam sem combustível, fonte de ignição (calor) e presença de oxigênio. Estes três fatores constituem o que na gíria se esquetiza como sendo o triângulo do fogo (ver Figura 1.2).



**Figura 1.2 – Triângulo do Fogo (Junior, 2011)**

Eliminar todas as fontes de ignição e combustível de um edifício não é exequível, mas limitar a sua existência e reduzir a sua interação por criteriosa colocação, é desejável e deverá constituir preocupação permanente quer do projetista, quer do ocupante (Pereira, 1993).

Para que a combustão se mantenha tem que existir alimentação contínua de oxigênio e combustível. Garantidas estas condições, o incêndio, que começa normalmente por um pequeno foco, desenvolver-se-á por fases, de acordo com a evolução da combustão e das temperaturas geradas.

A fase inicial, que pode ser de alguns minutos a várias horas, caracteriza-se pelo sucessivo aumento da temperatura com produção de fumo e gases. É neste estado que se deve processar a normal evacuação dos ocupantes do edifício.

Com a produção continuada de gases e chamas e com o conseqüente aquecimento dos materiais circundantes e acumulação de gases junto ao teto, a temperatura no compartimento elevar-se-á até que, subitamente, o incêndio passa de um foco localizado para um fenômeno generalizado a todo o compartimento.

A partir deste ponto, conhecido como flashover, a temperatura subirá drasticamente, atingindo-se a fase do desenvolvimento pleno. Após consumir todo o combustível ou

por intervenção direta dos bombeiros, as temperaturas baixam até à extinção do incêndio.

### 1.2.2 Propagação do incêndio

É no pós-flashover que pode ocorrer a propagação do incêndio para fora dos limites do compartimento onde este se iniciou. Este facto torna-se crítico se o incêndio se propagar em direção ao caminho de evacuação ou a outro edifício (Pereira, 1993).

A ocorrência de propagação depende das características de resistência ao fogo da envolvente e da severidade do incêndio que, por sua vez, depende da carga térmica total, das condições de ventilação, da existência de extinção automática ou da atempada intervenção dos bombeiros.

A propagação pode ocorrer de 3 formas: condução, convecção e radiação.

Condução é a transferência de calor através do mesmo material. A energia transfere-se da zona mais quente para a zona mais fria, à medida que a energia cinética das partículas que constituem a matéria se propaga ao longo do corpo, como se pode ver na Figura 1.3.

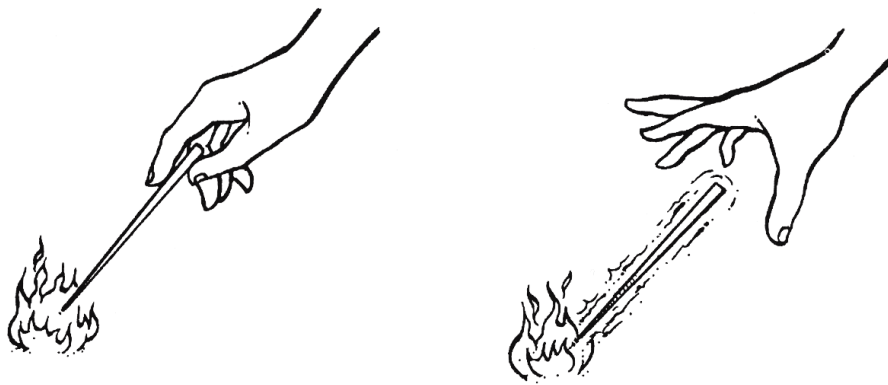


Figura 1.3 – Transferência de calor por condução (Junior, 2011)

Convecção é a transmissão de calor através de uma massa de ar aquecida, que se desloca do local em chamas, levando para outros locais quantidade de calor suficiente para que os materiais combustíveis aí existentes atinjam o seu ponto de combustão, originando outro foco de incêndio (ver Figura 1.4).

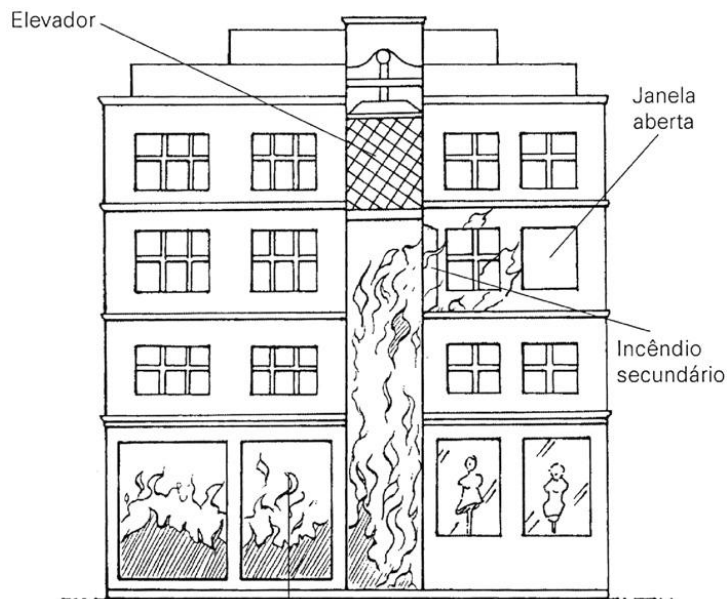


Figura 1.4 - Transferência de calor por convecção (Junior, 2011)

Transmissão de calor por radiação consiste na transferência de energia calorífica por intermédio de ondas eletromagnéticas, sem necessitar de qualquer meio material para se propagar. A Figura 1.5 ilustra um exemplo de transferência de calor por radiação.

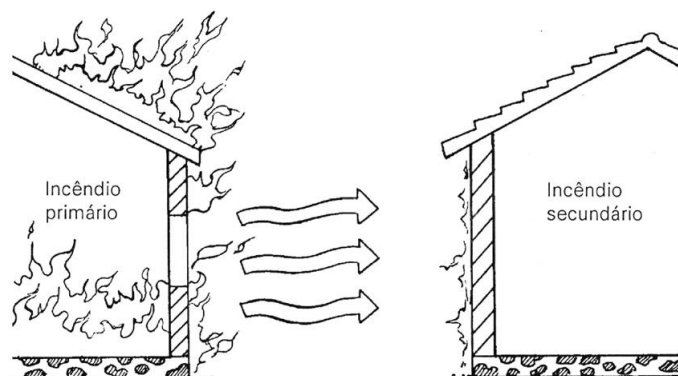


Figura 1.5 - Transferência de calor por radiação (Junior, 2011)

### 1.2.3 Intervenção e extinção do incêndio

Os minutos iniciais após ignição são críticos. O ataque do incêndio nesta fase é crucial para o seu não desenvolvimento (Pereira, 1993).

Não sendo possível evitar toda e qualquer ignição, torna-se necessário garantir o seu ataque ainda na fase de ignição. Para tal contribuem os meios de deteção e extinção automática, a atempada ação de um ocupante com meios de primeira intervenção e, por vezes, com meios de ataque improvisados, e o rápido alerta dos bombeiros.

A intervenção dos bombeiros e o combate ao incêndio até à sua extinção é também garantido pela existência e criteriosa colocação de bocas de incêndio interiores e exteriores e, sobretudo, pela disponibilidade de água suficiente para o serviço de incêndios.

### **1.3 Enquadramento da legislação nacional e europeia**

Em Portugal encontra-se em vigor o Novo Regime Jurídico de Segurança contra Incêndios em Edifícios (MAI, 2008a) e o Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndios em Edifícios (MAI, 2008b).

No que diz respeito à regulamentação contra incêndio, a tendência atual é a de abandonar o incêndio padrão e promover uma avaliação do desempenho dos elementos estruturais baseada em cenários de incêndios reais (Vila Real, 2010). De acordo com o artigo 15º do Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (MAI, 2008b) as abordagens baseadas no desempenho passam a ser possíveis, ao contrário do que acontecia antes da publicação da atual regulamentação. Estabelece-se que os elementos estruturais dos edifícios devem possuir uma resistência ao fogo que garanta as suas funções de suporte de cargas durante todas as fases de combate ao incêndio, incluindo o rescaldo (abordagem baseada no desempenho), ou, em alternativa, devem possuir resistência ao fogo padrão mínima (abordagem prescritiva).

Também o artigo 14º (perigosidade atípica) do Regime Jurídico de Segurança contra Incêndios em Edifícios (MAI, 2008a) veio possibilitar a utilização das abordagens baseadas no desempenho – *“Quando comprovadamente, as disposições do regulamento técnico sejam desadequadas face às grandes dimensões em altimetria e planimetria ou às suas características de funcionamento e exploração, os edifícios ou as suas frações são classificados de perigosidade atípica, e ficam sujeitos a soluções de SCIE”* - ou seja, desde que fundamente devidamente a sua opção, o engenheiro pode procurar a solução que melhor satisfaça a relação custo/benefício, sem comprometer a segurança do edifício em situação de incêndio.

A nível europeu existem os Eurocódigos Estruturais, que quando traduzidos passam a regulamentos nacionais. Todos eles, com exceção do Eurocódigo 7 (projeto geotécnico) e do Eurocódigo 8 (projeto de estruturas para resistência aos sismos) possuem uma parte, a parte 1-2, dedicada exclusivamente à verificação da resistência ao fogo. As

ações devidas ao fogo estão definidas na parte 1-2 do Eurocódigo 1, sendo que as restantes partes 1-2 dos outros Eurocódigos contêm as regras de dimensionamento e verificação da segurança em situação de incêndio, conforme o material que constitui a estrutura: Eurocódigo 2 (betão), Eurocódigo 3 (aço), Eurocódigo 4 (estruturas mistas aço-betão), Eurocódigo 5 (madeira), Eurocódigo 6 (alvenaria) e Eurocódigo 9 (alumínio).

O Anexo A do Eurocódigo 1 Parte 1-2 (CEN, 2010a) convencionou que:

- Para o cálculo das condições de aquecimento, a escolha do modelo avançado de incêndio a adotar (modelo de uma zona, modelo de duas zonas ou modelo de dinâmica de fluidos - CFD) é deixada ao critério do projetista em função da importância do projeto e dos objetivos pretendidos;
- O valor de cálculo da densidade de carga de incêndio pode eventualmente ser modificado para ter em conta as medidas ativas de combate a incêndio, desde que as opções sejam convenientemente fundamentadas pelo projetista, com base em análises de risco (estudos semi-probabilísticos de risco de colapso da estrutura), associadas a práticas já experimentadas;
- A utilização de modelos de cálculo avançados é permitida, desde que devidamente validados e justificados, nomeadamente no que se refere aos parâmetros adotados, ao método de cálculo utilizado e a eventuais comparações com outros modelos.

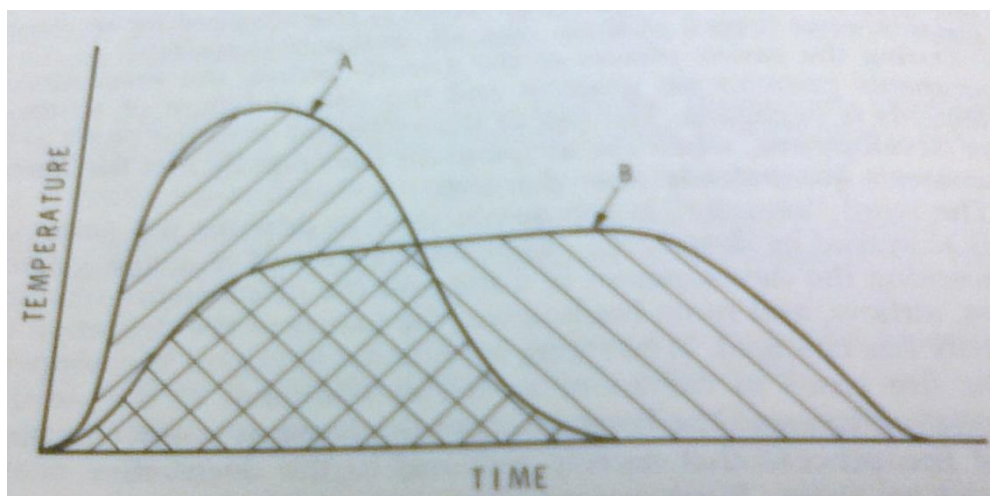
#### **1.4 Evolução temporal da análise das temperaturas em compartimentos de incêndio**

A evolução da análise da temperatura no compartimento de incêndio tem sido objeto de vários estudos ao longo do último século (Cadorin, 2003).

A curva temperatura-tempo padrão, que é usada como base no sistema de classificação ao fogo da maioria dos códigos de construção e padrões em todo o mundo, foi publicada inicialmente em 1917 (Babrauskas and Williamson, 1978a).

Em 1928, Ingberg realizou uma série de testes, comparando as áreas sob curvas de incêndio reais à área sob a curva padrão, apontando a influência da densidade de carga de incêndio na severidade do incêndio (Gewain et al., 2003). Este conceito, ilustrado na

Figura 1.6, sugere que dois incêndios em que as áreas abaixo das curvas temperatura-tempo sejam iguais podem ser considerados de severidade semelhante (Buchanan, 2001).



**Figura 1.6 – Ilustração do conceito da caracterização da severidade de incêndios pelas áreas abaixo das curvas temperatura-tempo (Lie and ASCE, 1992). De acordo com este conceito, os incêndios descritos pelas curvas A e B têm igual severidade.**

Nos anos cinquenta, Kawagoe e os seus colegas foram os primeiros a propor um método capaz de estimar o resultado de um cenário de incêndio. Kawagoe descobriu que a taxa de massa perdida e a taxa de libertação de calor pelo fogo era proporcional ao fator de ventilação do compartimento, sendo definido pelo produto da área da abertura com a raiz quadrada da sua altura, dando origem à correlação de Kawagoe (Kawagoe, 2004). Kawagoe e Sekine expressaram as curvas da temperatura em função do tempo, integrando o balanço de energia do compartimento de incêndio com o tempo. Este método é limitado a casos de incêndio com ventilação controlada com taxa de libertação de calor constante (Kawagoe and Sekine, 1963,1967,1964).

Na Suécia, Magnusson e Thelandersson (1970), estenderam o método de Kawagoe para um processo de fogo completo, utilizando a taxa de libertação de calor do incêndio dependente do tempo, limitada a um valor máximo obtido pela correlação de Kawagoe. Este método é descrito extensivamente em Pettersson et al. (1976). Estes autores forneceram uma série de curvas temperatura-tempo para várias cargas de incêndio, condições de ventilação e propriedades térmicas da envolvente do compartimento.

Os últimos dois grupos de investigadores lançaram as bases para os modelos mais avançados utilizados hoje em dia. Nos modelos acima referidos assume-se que ocorreu

flashover pelo que a temperatura é uniforme dentro de todo o compartimento, ou seja, estuda-se o desenvolvimento do incêndio considerando apenas uma zona.

Devido à necessidade de proceder a um cálculo bastante longo e a muitas suposições para aplicar o método de Kawagoe, Lie propôs uma expressão paramétrica baseada nas curvas temperatura-tempo de Kawagoe (Lie, 1974; Lie, 1995). Este método paramétrico é mais fácil de utilizar pois não é necessário recorrer a um processo iterativo, sendo espectável obter uma precisão equivalente nos resultados.

No início dos anos oitenta foi proposto um método para estimar a temperatura no compartimento de incêndio em situação pré-flashover (McCaffrey et al., 1981). Mais tarde foi proposto por Foote, Pagni e Alvares um método baseado no método referido anteriormente que passa a ter em conta o efeito da ventilação forçada no compartimento (Walton and Thomas, 1995).

No final dos anos noventa, uma pesquisa financiada pelo ECSC conduziu Franssen, no grupo de investigação NFSC, a propor diversas melhorias às curvas paramétricas inicialmente propostas no EC1 publicado em 1993 (Franssen, 2000; NFSC, 1999). Estas melhorias tiveram como objetivo passar a ter em conta múltiplas camadas em partições e alargar o método para a situação em que o fogo é controlado pelo combustível (ou pela carga de incêndio). Embora as melhorias nas partições sejam essencialmente teóricas, a melhoria sobre o regime de queima é fortemente empírica (Cadorin, 2003). Também Feasey e Buchanan propuseram alterações às curvas paramétricas adotadas na versão original do EC1 com o objetivo de melhorar a estimativa da temperatura no compartimento de incêndio em situação de pós-flashover (Feasey and Buchanan, 2002). Esta proposta baseou-se no dimensionamento ao fogo utilizando o programa COMPF2 (Babrauskas and Williamson, 1978b), após calibração do programa usando um grande número de ensaios ao fogo (Arnault et al., 1974,1973).

Na década de oitenta, Cooper desenvolveu um modelo matemático para estimar o tempo em que, em caso de incêndio, se pode efetuar a evacuação do edifício em segurança (Cooper, 1983,1982). Este modelo é baseado na observação de que na fase inicial do incêndio há acumulação de produtos de combustão na camada imediatamente abaixo do teto, com uma interface mais ou menos horizontal entre a camada referida anteriormente e uma camada inferior onde a temperatura dos gases permanece bastante mais baixa, levando a um fenómeno de duas zonas. Este estudo levou ao desenvolvimento de um



dos primeiros modelos de duas zonas, o modelo ASET (Cooper and Stroup, 1985), que foi posteriormente melhorado por Janssens e proposto como suporte didático para o seu livro *An Introduction to Mathematical Fire Modeling* (Janssens and Birk, 2000).

No início da última década, foram propostos dois outros métodos (Barnett, 2002; Ma and Mäkeläinen, 2000) para obter as curvas paramétricas, onde se destacam as curvas BFD. Estes métodos são essencialmente empíricos, cujo principal interesse é o facto da forma das curvas obtidas estar bastante perto da forma das curvas medidas durante ensaios ao fogo em grande escala.

Mais recentemente, em 2007, Jochen Zehfuss propôs um novo modelo de curvas paramétricas, as curvas iBMB (Zehfuss and Hosser, 2007), que estão diretamente relacionadas com o desenvolvimento da taxa de libertação de calor de um incêndio, sendo que mais tarde seriam adotadas no Anexo Nacional Alemão do Eurocódigo 1, Parte 1-2 (DIN, 2010).

Ao longo do tempo foram desenvolvidos vários modelos numéricos sobre a análise da temperatura no compartimento de incêndio. Em 1992, Friedman fez uma avaliação dos modelos conhecidos até então (Friedman, 1992) e, posteriormente, Olenick e Carpenter fizeram uma revisão dos modelos existentes (Olenick and Carpenter, 2003), mencionando três importantes modelos de uma zona modelados para a fase de incêndio pós-flashover: COMPF (Babrauskas and Williamson, 1978b), NAT (Curtat et al., 1992) e OZone (Cadorin and Franssen, 2003; Cadorin et al., 2000; Cadorin et al., 2003).

Na Tabela 1.1 encontram-se alguns dos modelos usados no último século para avaliar a evolução das temperaturas num compartimento em situação de incêndio, sendo que alguns deles têm vindo a ser melhorados. Uma listagem mais completa dos modelos existentes pode ser encontrada noutros estudos (CSE, 2008; Friedman, 1992; Olenick and Carpenter, 2003).

Posteriormente abordar-se-á com maior detalhe os modelos adotados na Parte 1-2 do Eurocódigo 1 (CEN, 2010a) e outros considerados relevantes.

**Tabela 1.1 – Modelos de análise da temperatura de um compartimento em situação de incêndio**

<b>Modelos analíticos (métodos simplificados)</b>	
<b>Pré-flashover</b>	McCaffrey, Quintiere and Harkleroad (McCaffrey et al., 1981)

	Foote, Pagni and Alvares (Walton and Thomas, 1995)		
	Incêndios localizados	Heskestad (Heskestad, 1983)	
		Hasemi (Hasemi and Tokunaga, 1984)	
	Fogos móveis (Law et al., 2011; Stern-Gottfried et al., 2009)		
<b>Pós-flashover</b>	Curvas de incêndio nominais	Curva de incêndio padrão ISO 834 (ISO, 1999)	
		Curva de incêndio ASTM E119 (ASTM, 2000)	
		Curva de incêndio de hidrocarbonetos (CEN, 2010a)	
		Curva de incêndio para elementos exteriores (CEN, 2010a)	
	Curvas paramétricas	Swedish fire curves (Pettersson et al., 1976)	
		EC1 (CEN, 2010a)	
		Babrauskas (Walton and Thomas, 1995)	
		Law (Walton and Thomas, 1995)	
		Lie (Lie, 1974, 1995)	
		Ma e Mäkeläinen (Ma and Mäkeläinen, 2000)	
		BFD Curves (Barnett, 2002)	
		iBMB Curves (DIN, 2010; Zehfuss and Hosser, 2007)	
	<b>Modelos numéricos (métodos avançados)</b>		
	<b>Modelos de Zona</b>	Modelos de uma zona	COMPF (Babrauskas and Williamson, 1978b)
NAT (Curtat et al., 1992)			
OZone (Cadorin et al, 2000, 2003a, 2003b).			
Modelos de duas zonas		ASET (Cooper and Stroup, 1985)	
		CCFM (Forney and Cooper, 1987)	
		CFAST (Jones et al., 2000)	
		OZone (Cadorin et al, 2000, 2003a, 2003b).	
<b>Modelos de campo (CFD)</b>		CFX (CFX-5, 2000)	
	SOFIE desenvolvido na Universidade de Cranfield (Rubini, 1997)		
	SMARTFire desenvolvido na Universidade de Greenwich (Ewer et al., 1999)		
	FDS (NIST, 2010)		

Existem alguns estudos comparativos dos diversos métodos, como por exemplo:

- O estudo realizado por Pope e Bailey onde se faz uma análise comparativa entre os modelos de campo (usando o programa FDS) e as curvas paramétricas (Pope and Bailey, 2006);
- A análise de um compartimento em situação de incêndio baseada nos modelos de campo usando o programa CFX (Hasib et al., 2007);
- Novozhilov enuncia algumas limitações dos modelos de zona e indica algumas vantagens da utilização dos CFD (Novozhilov, 2001)

Para além dos modelos de análise de temperatura no compartimento de incêndio acima referidos, existem outros para aplicação em estruturas sujeitas a incêndio. Um deles é a curva para materiais reativos ao fogo que será abordado com maior detalhe no capítulo 2 deste trabalho. No caso de túneis existem também curvas específicas para análise de temperaturas, sendo utilizadas normalmente curvas de hidrocarbonetos modificadas (Martins, 2010).

## **1.5 Objetivos**

Esta dissertação tem como principal objetivo contribuir para o aumento do conhecimento no estudo da evolução das temperaturas em compartimentos de edifícios sujeitos a incêndio.

Nesta dissertação pretende-se fazer uma revisão detalhada dos diferentes métodos de avaliação de temperaturas no compartimento de incêndio e o âmbito das suas aplicações. Com base nas diferentes metodologias existentes, serão analisados diversos casos de estudo representativos de situações reais e feitas análises comparativas dos diferentes métodos usando os modelos simplificados e avançados de incêndio, tomando em consideração os diferentes parâmetros que entram em conta na definição da evolução da temperatura no compartimento de incêndio.

Desta forma, pretende-se que este estudo tenha aplicação direta na melhor definição de cenários de incêndio em projetos de engenharia de segurança contra incêndios.

## **1.6 Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos.

No Capítulo 1 faz-se uma breve descrição introdutória do tema, apresenta-se o conceito de incêndio, um pequeno enquadramento da legislação nacional e europeia existente na área de segurança contra incêndios e a evolução temporal da análise das temperaturas no compartimento de incêndio. Para além do que foi referido anteriormente, são enunciados os objetivos e a estrutura deste trabalho.

No Capítulo 2 apresentam-se as diferentes curvas nominais de análise de temperaturas no compartimento de incêndio, assim como a curva nominal utilizada em ensaios laboratoriais de materiais reativos ao fogo. No final, faz-se uma breve ilustração comparativa entre as diferentes curvas abordadas ao longo do capítulo.

O Capítulo 3 é destinado aos modelos de incêndio natural. Inicialmente faz-se uma breve introdução dos mesmos, sendo posteriormente apresentados alguns desses modelos (modelos simplificados e avançados), bem como os parâmetros necessários para a sua utilização.

No Capítulo 4 fazem-se várias análises a alguns dos modelos referidos nos dois capítulos anteriores com recurso a software específico, comparando-se os resultados obtidos e retirando conclusões acerca dos mesmos.

Por fim, o Capítulo 5 é dedicado à apresentação das conclusões finais e são sugeridos alguns possíveis desenvolvimentos futuros.

---

## *Capítulo 2*

### *Curvas de incêndio nominais*

## Capítulo 2 Curvas de incêndio nominais

### 2.1 Introdução

Na abordagem prescritiva, mais simplista e convencional, a curva nominal mais utilizada como referência para a resistência ao fogo em todo mundo é a curva de incêndio padrão (ISO 834). Mas, de acordo com a Parte 1-2 do EC1 (CEN, 2010a), existem ainda mais duas curvas nominais, a curva de incêndio para elementos exteriores e a curva de incêndio de hidrocarbonetos. Com base em alguns estudos europeus realizados nos últimos anos (EC, 1999a,1999b; Vassart et al., 2007), percebe-se que, no caso de compartimentos de grandes dimensões, este tipo de abordagem é demasiado conservadora e pouco realista, sendo pouco viável economicamente.

As curvas de incêndio nominais são funções analíticas que nos dão a temperatura em função do tempo. O termo nominais deve-se ao facto deste tipo de curvas não representar um incêndio real. Neste capítulo iremos abordar as curvas nominais adotadas no EC1 (CEN, 2010a), a curva regulamentar americana ASTM E119 e a curva de incêndio para materiais reativos ao fogo. Porém, existem outras curvas nominais adotadas noutros países como, por exemplo, a curva britânica BS 476, a curva australiana AS 1530, a curva canadiana ULC S101 e a curva japonesa JIS A 1304. O trabalho de Costa e Silva mostra que estas não apresentam grandes diferenças para as curvas nominais ISO 834 e ASTM E119 apresentadas neste capítulo (Costa and Silva, 2006).

### 2.2 Curva de incêndio padrão ISO 834

A curva de incêndio padrão ISO 834 é a curva mais utilizada no passado e continua a ser utilizada atualmente, principalmente para classificar experimentalmente os elementos estruturais (Franssen and Vila Real, 2010). Esta curva é usada para representar um incêndio completamente desenvolvido num compartimento (ver Figura 2.1) e pode ser definida pela equação 2.1 (CEN, 2010a):

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8 t + 1) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.1)$$

em que:

$\theta_g$  – temperatura dos gases no compartimento de incêndio [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$t$  – tempo [min].

A curva de incêndio padrão ISO 834 tem algumas limitações:

- Tem que ser considerada em todo o compartimento, mesmo sendo um grande compartimento;
- Não considera a fase pré-flashover;
- Nunca decresce;
- Não depende da carga de incêndio e das condições de ventilação.

### 2.3 Curva de incêndio ASTM E119

A curva nominal ASTM E119 (ver Figura 2.1) é muito utilizada nos Estados Unidos da América. Inicialmente, esta curva foi apresentada de forma tabelada, como se poder ver na Tabela 2.1 (ASTM, 2000; Silva, 2001).

**Tabela 2.1 – Temperatura dos gases dentro do compartimento de incêndio**

Tempo (min)	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Temperatura (°C)
0	20	55	916
5	538	60	927
10	704	65	937
15	760	70	946
20	795	75	955
25	821	80	963
30	843	85	971
35	862	90	978
40	878	120	1010
45	892	240	1093
50	905	480	1260

Desenvolveram-se várias equações para descrever esta curva, sendo que a equação 2.2 é a que melhor representa os valores da Tabela 2.1 (Santos, 2009).

$$\theta_g = 20 + 750(1 - e^{-3,79553\sqrt{t}}) + 170,41\sqrt{t} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.2)$$

em que:

$\theta_g$  – temperatura dos gases no compartimento de incêndio [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$t$  – tempo [h].

## 2.4 Curva de incêndio de hidrocarbonetos

Ao contrário da curva de incêndio padrão, que aumenta progressivamente ao longo do tempo, a curva de incêndio de hidrocarbonetos (ver Figura 2.1) aumenta muito rapidamente, demorando aproximadamente meia hora até atingir 1100°C, permanecendo a temperatura constante a partir desse momento.

A curva de incêndio para elementos exteriores é definida por (CEN, 2010a):

$$\theta_g = 20 + 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.3)$$

em que:

$\theta_g$  – temperatura dos gases na proximidade do elemento [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$t$  – tempo [min].

## 2.5 Curva de incêndio para elementos exteriores

Esta curva de incêndio (ver Figura 2.1) é usada para elementos estruturais exteriores expostos ao fogo diretamente a partir do interior do compartimento através das aberturas nas fachadas do edifício (janelas, por exemplo). No caso de elementos estruturais em aço ou alumínio, o Eurocódigo 3 (CEN, 2010b) e o Eurocódigo 9 (CEN, 2000) apresentam nos seus anexos B um procedimento específico para a determinação da temperatura de elementos exteriores, não apresentando a curva de incêndio para elementos exteriores referida anteriormente.

A curva de incêndio para elementos exteriores é expressa pela seguinte equação (CEN, 2010a):

$$\theta_g = 20 + 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.4)$$

em que:

$\theta_g$  – temperatura dos gases na proximidade do elemento [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$t$  – tempo [min].

## 2.6 Curva de incêndio para materiais reativos ao fogo

Embora esta curva não seja utilizada para a análise de temperaturas em compartimentos de incêndio, decidiu-se inseri-la neste capítulo (ver Figura 2.1), pois é muito usada em



ensaios a elementos de aço pintados com tinta intumescente (medida de proteção passiva contra incêndio muito utilizada na construção metálica) e pode ser definida por (CEN, 2010c):

$$\begin{aligned} \theta_e &= 20 + 154 t^{0,25} && \text{para } 0 \leq t \leq 20 \\ \theta_e &= 20 + 345 \log_{10}[1 + 8 (t - 20)] && \text{para } t > 20 \end{aligned} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.5)$$

em que:

$\theta_e$  – temperatura do elemento de aço pintado com tinta intumescente [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$t$  – tempo [min].

## 2.7 Comparação das diferentes curvas nominais

A Figura 2.1 ilustra todas as curvas nominais usadas para análise das temperaturas de incêndio referidas anteriormente.

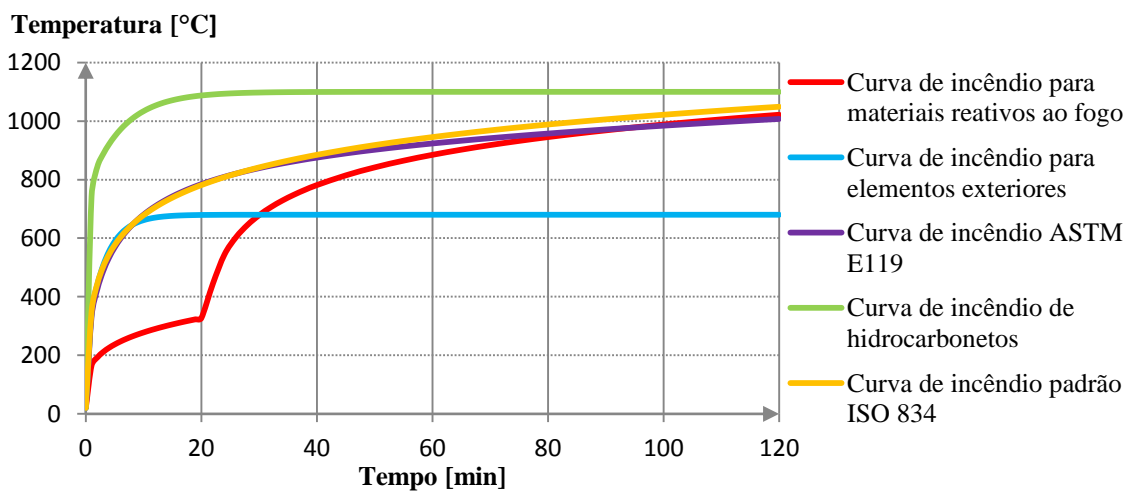


Figura 2.1 – Curvas de incêndio nominais



---

## *Capítulo 3*

### *Modelos de incêndio natural*

## **Capítulo 3 Modelos de incêndio natural**

### **3.1 Introdução**

A aprovação da utilização da análise baseada no desempenho, que se sustenta no desenvolvimento do incêndio natural, veio permitir aos projetistas de estruturas caracterizar os diversos cenários de incêndio de uma forma mais realista, encontrando soluções mais económicas sem comprometer a segurança da estrutura em situação de incêndio. De acordo com esta análise, existem métodos distintos para o cálculo das temperaturas no compartimento de incêndio (Vassart et al., 2007):

- Modelos de incêndio simplificados:
  - Curvas de incêndio paramétricas;
  - Incêndios localizados.
- Modelos de incêndio avançados:
  - Modelos de zona - estes modelos têm em consideração todos os parâmetros principais que influenciam o incêndio;
  - Modelos de campo baseados na mecânica de fluidos computacional (CFD) - muito complexos para usar como uma ferramenta de cálculo geral. Porém, os modelos de campo são as únicas ferramentas válidas para geometrias complexas.

Enquanto a abordagem prescritiva não precisa de dados específicos de cada análise, daí ser pouco realista, a análise baseada no incêndio natural necessita de alguns parâmetros físicos para caracterizar o incêndio:

- Taxa de libertação de calor (RHR);
- Área do incêndio;
- Propriedades da envolvente;
- Área das aberturas;
- Altura do compartimento;
- Geometria exata (apenas nos modelos de incêndio avançados).

Os modelos de incêndio natural são cada vez mais utilizados na análise da segurança ao fogo de edifícios em detrimento das curvas nominais pois são por definição,

aproximações da situação real. Neste capítulo, abordam-se com maior detalhe os modelos de incêndio simplificados adotados no EC1 (CEN, 2010a) e os parâmetros necessários para a sua aplicação. Para além disso, apresentam-se outro tipo de curvas paramétricas, os fogos móveis, os modelos de zona e faz-se uma breve referência aos modelos de incêndio avançados.

### **3.2 Dados necessários para a utilização dos modelos de incêndio natural**

No caso das curvas nominais, a temperatura é diretamente obtida por uma expressão matemática (temperatura em função do tempo), não sendo necessário introduzir qualquer tipo de dados. Quando utilizamos modelos de incêndio natural o processo torna-se mais complexo, havendo necessidade de introduzir alguma informação.

Dessa informação, uma parte está diretamente relacionada com a geometria do compartimento (tamanho do compartimento, dimensões das portas e janelas, características da envolvente, etc.). Este tipo de dados varia de projeto para projeto, sendo normalmente fornecidos pelo arquiteto ao projetista responsável pelo cálculo da estrutura. Porém, se um engenheiro especializado no estudo do comportamento de estruturas de edifícios ao fogo é apenas envolvido quando o projeto já está em desenvolvimento, torna-se mais complicado reunir toda esta informação.

A outra parte da informação necessária para uma análise baseada num modelo de incêndio natural está relacionada com a natureza do fogo, o seu desenvolvimento e a sua gravidade, sendo necessários parâmetros como a densidade de carga de incêndio e a taxa de libertação de calor, que podem ser obtidos no EC1 (CEN, 2010a).

#### **3.2.1 Densidade de carga de incêndio**

Existem dois métodos para calcular a densidade de carga de incêndio, um determinístico e um estatístico. O método determinístico consiste na soma de todas as cargas de incêndio existentes num edifício, sendo raramente utilizado. Geralmente são utilizados métodos estatísticos, cuja aproximação só é válida para tipos de edifícios onde podem ser esperadas quantidades semelhantes de carga de incêndio.

O Anexo E da Parte 1-2 do EC1 (CEN, 2010a) estabelece alguns valores característicos da densidade de carga de incêndio em função do tipo de ocupação do edifício (ver Tabela 3.1).

**Tabela 3.1 - Valores característicos da densidade de carga de incêndio  $q_{f,k}$  [MJ/m<sup>2</sup>] por unidade de área do pavimento de acordo com tipo de ocupação (ajustados com a distribuição de Gumbel) segundo o EC1 (CEN, 2010a)**

Ocupação	$q_{f,k}$
Habituação	948
Hospital (quarto)	280
Hotel (quarto)	377
Biblioteca	1824
Escritório	511
Sala de aulas de uma escola	347
Centro Comercial	730
Teatro (cinema)	365
Transportes (espaço público)	122

O projeto europeu EUR 18868 EN (EC, 1999b) propõe também alguns valores para outro tipo de ocupações (ver Tabela 3.2).

**Tabela 3.2 - Valores característicos da densidade de carga de incêndio  $q_{f,k}$  [MJ/m<sup>2</sup>] por unidade de área do pavimento de acordo com tipo de ocupação segundo o projeto europeu EUR 18868 EN**

Ocupação	$q_{f,k}$
Igreja	300
Sala de exposições	400
Receção de Hotel	200
Salão multi-usos	300
Galeria fotográfica	300
Restaurante	300
Salão de desporto	200
Supermercado	400

O valor de cálculo da densidade de carga de incêndio é dado, de acordo com o EC1, por (CEN, 2010a):

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \text{ [MJ/m}^2\text{]} \quad (3.1)$$

em que:

$q_{f,k}$  – valor característico da densidade de carga de incêndio por unidade de área em função do tipo de ocupação [MJ/m<sup>2</sup>];

$m$  – fator de combustão que para materiais celulósicos pode ser tomado igual a 0,8 ou, conservativamente, 1,0;

$\delta_{q1}$  – fator parcial que tem em conta o risco de ativação do incêndio em função da dimensão do compartimento (ver Tabela 3.3);

$\delta_{q2}$  – fator parcial que tem em conta o risco de ativação do incêndio em função do tipo de ocupação (ver Tabela 3.4);

$\delta_n$  – fator parcial que tem em conta as diferentes medidas ativas de segurança contra incêndio (ver Tabela 3.5).

**Tabela 3.3 – Fator  $\delta_{q1}$  (CEN, 2010a)**

Área em planta do compartimento, $A_f$ [m <sup>2</sup> ]	Perigo de ativação do incêndio, $\delta_{q1}$
0	1,00
25	1,10
250	1,50
2500	1,90
5000	2,00
10000	2,13

Para valores intermédios,  $\delta_{q1}$  deve ser determinado recorrendo a interpolação logarítmica (Franssen and Vila Real, 2010). A título de exemplo, para uma área  $A_f=1000$  m<sup>2</sup>:

$$\delta_{q1} = \frac{\log_{10} 1000 - \log_{10} 250}{\log_{10} 2500 - \log_{10} 250} \cdot (1,90 - 1,50) + 1,50 \approx 1,74$$

**Tabela 3.4 – Fator  $\delta_{q2}$  (CEN, 2010a)**

Exemplos de tipo de ocupação	Perigo de ativação do incêndio, $\delta_{q2}$
Galeria de arte, museu, piscina	0,78
Escritório, residência, hotel, indústria do papel	1,00
Fábrica de máquinas e motores	1,22
Laboratório químico, oficina de pintura	1,44

Fabrica de pirotecnia ou tintas	1,66
---------------------------------	------

Tabela 3.5 – Fatores  $\delta_n$  (CEN, 2010a)

Extinção automática de incêndio				Deteção automática de incêndio		Extinção manual de incêndio				
Sistema automático de extinção com água $\delta_{n1}$	Redes independentes de fornecimento de águas			Deteção e alarme automáticos de incêndio pelo calor $\delta_{n3}$	Transmissão automática de alarme aos bombeiros $\delta_{n5}$	Bombeiros no local $\delta_{n6}$	Bombeiros fora do local $\delta_{n7}$	Vias de acesso seguras $\delta_{n8}$	Dispositivos de combate a incêndios $\delta_{n9}$	Sistema de exaustão de fumos $\delta_{n10}$
	0	1	2							
0,61	1,0	0,87	0,7	0,87 ou 0,73	0,87	0,61 ou 0,78		0,9 ou 1,0 ou 1,5	1,0 ou 1,5	

O fator parcial  $\delta_n$  que tem em conta as diferentes medidas ativas de segurança contra incêndio é calculado através do produto de diferentes fatores  $\delta_{ni}$ , representando cada um deles o efeito de diferentes medidas (Franssen and Vila Real, 2010):

- $\delta_{n1}$  é igual a 0,61 se existir sistema automático de incêndio com água, caso contrário é igual a 1,00;
- $\delta_{n2}$  é igual a 1,00 se existir uma única rede de abastecimento de água do sistema de extinção, igual a 0,87 se existir uma rede independente de abastecimento adicional e igual a 0,70 se existirem duas redes independentes adicionais de abastecimento de água;
- $\delta_{n3}$  é igual a 0,87 se existir um sistema automático de deteção e alarme de incêndio pelo calor, caso contrário é igual a 1,00;
- $\delta_{n4}$  é igual a 0,73 se existir um sistema automático de deteção e alarme de incêndio pelo fumo, caso contrário é igual a 1,00. Se existirem sistemas automáticos de deteção e alarme de incêndio pelo fumo e pelo calor apenas  $\delta_{n4}=0,73$  é considerado,  $\delta_{n3}$  toma valor de 1,00;
- $\delta_{n5}$  é igual a 0,87 se existir transmissão automática de alarme aos bombeiros, caso contrário é igual a 1,00;
- $\delta_{n6}$  é igual a 0,61 se existir um corpo permanente de bombeiros no local, caso contrário é igual a 1,00. Neste caso  $\delta_{n7}$  é igual a 1,00;



- $\delta_{n7}$  é igual a 0,78 se existir uma corporação de bombeiros a poucos minutos de distância mas nenhuma brigada de bombeiros permanente no local;
- $\delta_{n8}$  é igual a 1,00 se existirem vias de acesso seguras, caso contrário é igual a 1,50. Se, para além de vias de acesso, as escadas estão pressurizadas em caso de alarme de incêndio, este fator toma valor de 0,90;
- $\delta_{n9}$  é igual a 1,00 se existirem os meios de primeira intervenção de combate a incêndios, caso contrário é igual a 1,50;
- $\delta_{n10}$  é igual a 1,00 se existir sistema de exaustão de fumos, caso contrário é igual a 1,50.

Segundo o Anexo Nacional da Parte 1-2 do EC1 (CEN, 2010a), em Portugal o valor de cálculo da densidade de carga de incêndio é dado por:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \text{ [MJ/m}^2\text{]} \quad (3.2)$$

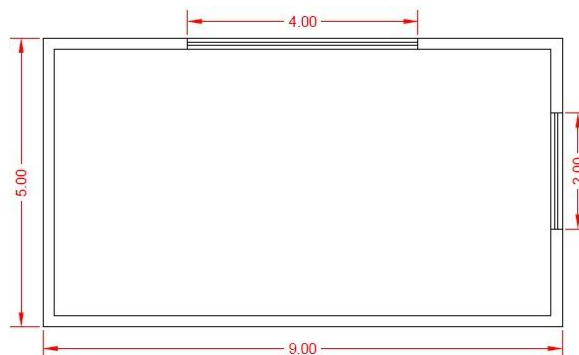
Ou seja, não se aplicam os fatores que têm em conta o perigo de ativação de incêndio ( $\delta_{q1}$  e  $\delta_{q2}$ ) e os fatores que têm em conta as medidas de proteção ativa ( $\delta_n$ ). Contudo, seguindo o texto do Anexo Nacional acima referido que nos diz que “*O valor de cálculo da densidade de carga de incêndio pode eventualmente ser modificado para ter em conta as medidas ativas de combate a incêndio, desde que as opções sejam convenientemente fundamentadas, com base em análises de risco (estudos probabilísticos ou semiprobabilísticos de risco de colapso da estrutura), associadas a práticas já experimentadas*” (CEN, 2010a), os projetistas acabam, na prática, por poder aplicar a expressão europeia.

A Tabela 3.6 mostra a influência das medidas ativas de segurança no valor de cálculo da densidade de carga de incêndio num escritório a que corresponde, segundo a Tabela 3.1, um valor característico de 511 MJ/m<sup>2</sup>. Pode verificar-se que a não consideração de qualquer medida de proteção ativa conduz a um valor de cálculo da densidade de carga de incêndio de 1656 MJ/m<sup>2</sup>, sendo possível reduzi-lo significativamente para 223 MJ/m<sup>2</sup> no caso de existirem bombeiros fora do local, vias de acesso seguras, deteção automática e alarme por fumo, meios de 1ª intervenção, sistema de extinção automática por água e transmissão automática do alarme para os bombeiros (Vila Real, 2010). Nesta tabela está também representado o valor de cálculo da densidade de carga de incêndio obtido por aplicação do Anexo Nacional da parte 1-2 do EC1 (CEN, 2010a).

**Tabela 3.6 – Influência das medidas ativas de segurança contra incêndio no valor de cálculo da densidade de carga de incêndio**

Sem proteção ativa					
Anexo Nacional da parte 1-2 do EC1 (CEN, 2010a)					
Sapadores Bombeiros					
Vias de acesso seguras					
Deteção automática e alarme por fumo					
Meios de 1ª intervenção					
Sistema de extinção automática por água					
Transmissão automática do alarme para os bombeiros					
$q_{f,d}$ (MJ/m <sup>2</sup> )	1656	409	861	419	223

Recorrendo aos programas de cálculo Elefir-EN e OZone, desenvolvidos nas Universidades de Aveiro (Vila Real and Franssen, 2011) e Liege (Cadorin et al, 2000, 2003a, 2003b), obtiveram-se as curvas que representam a variação da temperatura em função do tempo para as densidades de carga de incêndio acima definidas (ver Figura 3.2 e Figura 3.3), com base nas curvas paramétricas e nos modelos de zona. Considerou-se um escritório com 9 m de comprimento, 5 m de largura e 3 m de altura, ou seja, o pavimento tem 45 m<sup>2</sup> e a envolvente tem área igual a 174 m<sup>2</sup>. O fator de abertura usado foi 0,08 m<sup>0.5</sup>, resultante de duas janelas de dimensões 4x2 m e 2x1,4 m (ver Figura 3.1). As propriedades da envolvente são representadas pelo fator b igual a 692,82 J/m<sup>2</sup>s<sup>1/2</sup>K, obtido a partir dos seguintes valores:  $\rho = 1200$  [kg/m<sup>3</sup>],  $c = 800$  [J/kgK] e  $\lambda = 0,5$  [W/mK]. O fator de combustão foi tomado sempre igual a 0,8.



**Figura 3.1 – Planta do compartimento utilizado no estudo da evolução das temperaturas no compartimento de incêndio para diferentes densidades de carga de incêndio**

A Figura 3.2 põe em especial evidência que nem sempre o incêndio natural é menos severo que o incêndio padrão ISO 834. O mesmo não acontece na Figura 3.3, quando se analisa as temperaturas dentro do compartimento de incêndio com base num modelo de duas zonas.

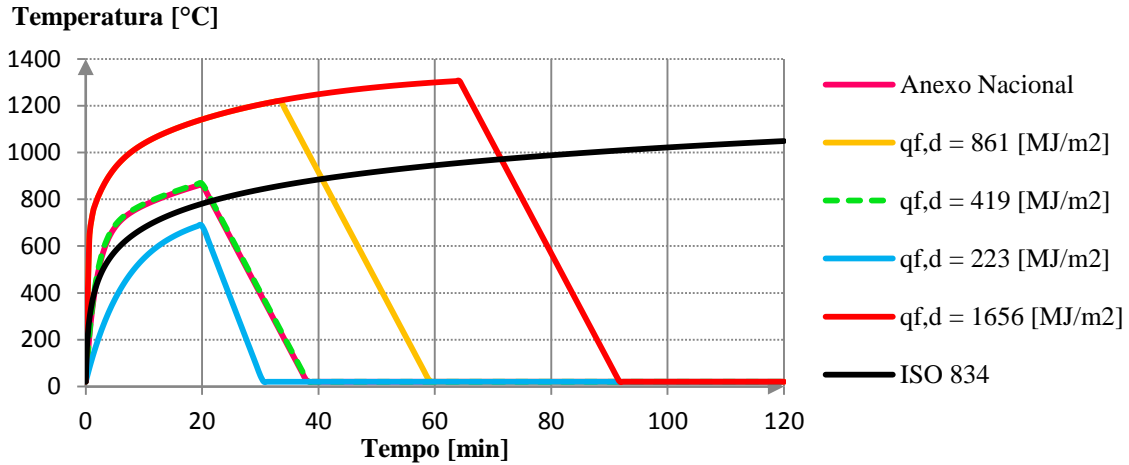


Figura 3.2 – Influência das medidas de proteção ativa na evolução da temperatura no compartimento de incêndio, com base nas curvas paramétricas adotadas no EC1 (CEN, 2010a)

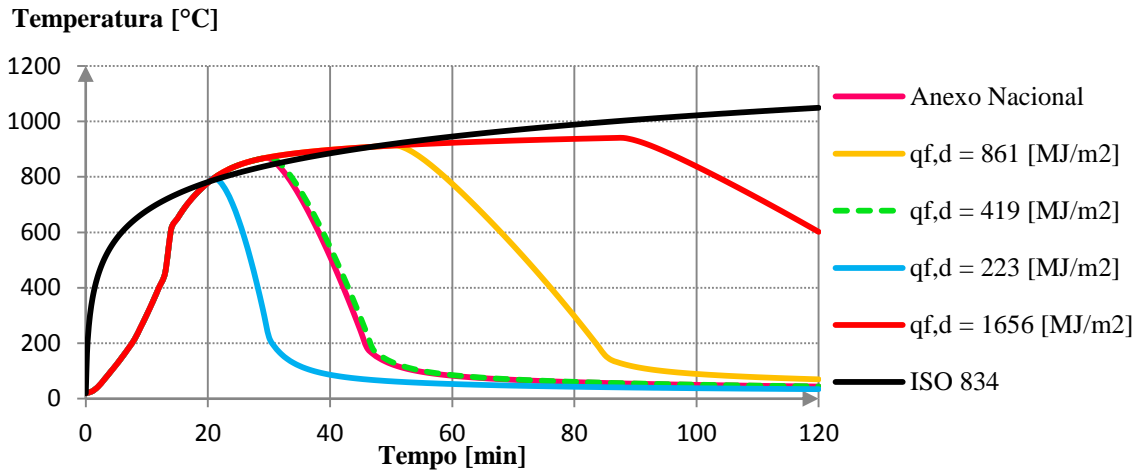


Figura 3.3 – Influência das medidas de proteção ativa na evolução da temperatura no compartimento de incêndio, com base num modelo de duas zonas

### 3.2.2 Características das aberturas

As aberturas num compartimento podem ser janelas, portas e aberturas horizontais. A severidade de um incêndio num compartimento depende da quantidade de aberturas no mesmo. Para uma única abertura vertical, o fator de abertura  $O$  usado em modelos simplificados é definido de acordo com a equação 3.3:

$$O = A\sqrt{h} \quad [m^{1/2}] \quad (3.3)$$

Quando for necessário considerar várias aberturas verticais, torna-se indispensável determinar a área total das aberturas verticais em todas as paredes ( $A_v$ ) e uma altura

equivalente ( $h_{eq}$ ) que é a média pesada da altura das aberturas verticais. Estas são determinadas através das equações 3.4 e 3.5 (Vila Real, 2003):

$$A_v = \sum A_{vi} \quad [\text{m}^2] \quad (3.4)$$

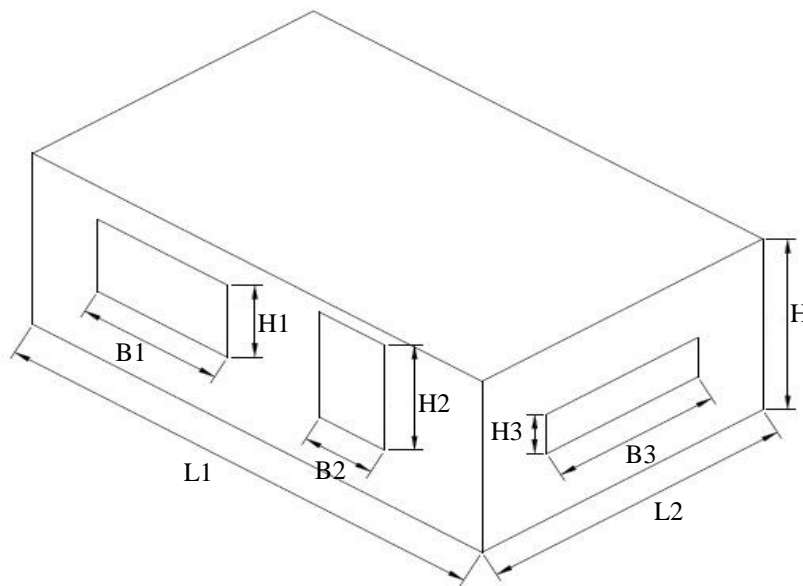
$$h_{eq} = \frac{\sum A_{vi} h_i}{\sum A_{vi}} \quad [\text{m}] \quad (3.5)$$

A Figura 3.4 representa um compartimento com várias aberturas verticais e serve para exemplificar o cálculo de algumas grandezas, tais como:

$$A_v = \sum A_{vi} = A_1 + A_2 + A_3 = B_1 H_1 + B_2 H_2 + B_3 H_3$$

$$h_{eq} = \frac{\sum A_{vi} h_i}{\sum A_{vi}} = \frac{A_1 H_1 + A_2 H_2 + A_3 H_3}{A_1 + A_2 + A_3} = \frac{B_1 H_1^2 + B_2 H_2^2 + B_3 H_3^2}{B_1 H_1 + B_2 H_2 + B_3 H_3}$$

$$A_t = 2 (L_1 L_2 + L_1 H + L_2 H)$$



**Figura 3.4 – Aberturas verticais no compartimento de incêndio**

Assim, o fator de abertura para paredes com várias aberturas verticais é dado pela equação 3.6:

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t \quad [\text{m}^{1/2}] \quad (3.6)$$

Note-se que a área das aberturas pode variar com o desenvolvimento do incêndio. A existência de vidro na envolvente pode ser considerada um exemplo desta variação. O

aumento de temperatura ou mesmo a ação humana (intervenção de bombeiros) leva à quebra deste material, provocando o aparecimento de novas aberturas.

Desta forma, a influência da quebra do vidro das aberturas na temperatura de um compartimento em situação de incêndio é grande, visto que a quebra do vidro pode aumentar a severidade de um incêndio, permitir a entrada de oxigênio que promove a ocorrência do flashover e até mesmo ditar se o incêndio é controlado pela ventilação ou pela carga de incêndio. Existem já alguns estudos sobre esta temática.

No estudo da quebra do vidro, há duas temperaturas fundamentais: a temperatura de início de fissuração/quebra e a temperatura de amolecimento do vidro em situação de incêndio, que provoca a queda total do material. Pode considerar-se que, no caso do vidro temperado, as temperaturas andam na ordem de 290°C para o início da fissuração e de 600°C para a queda total do vidro. Para o vidro comum, considera-se que a temperatura de início de fissuração ronda os 150°C e a temperatura de amolecimento anda à volta de 400°C (Henriques, 2010).

Este estudo baseia-se na utilização do programa OZone, onde se fez variar alternadamente e/ou cumulativamente três aspetos: área do compartimento de incêndio, densidade de carga de incêndio e percentagem de aberturas do compartimento. As principais conclusões foram:

- Quanto menor a área de incêndio, maior a temperatura no compartimento de incêndio nos instantes iniciais;
- Quanto maior a área de incêndio, maior o pico de temperatura no compartimento de incêndio e a duração do incêndio, logo maior a severidade do incêndio;
- Quando a temperatura no compartimento de incêndio é igual à temperatura de amolecimento do vidro, ocorre a queda do mesmo e há uma diminuição brusca da temperatura devido à criação de uma massa de ar com densidade mais baixa que, ao ascender, sai parcialmente pela zona superior da fachada anteriormente envidraçada, com a simultânea entrada de ar frio pela zona inferior;
- A temperatura no compartimento de incêndio aumenta com o aumento da percentagem de aberturas, até sensivelmente 15% da área do compartimento;
- Para percentagens de aberturas superiores a 15%, o estudo revela que a ventilação deixa de alimentar o incêndio, reduzindo a temperatura no compartimento de incêndio devido às perdas por convecção associadas à troca

da massa total dos gases. Ou seja, no caso de incêndios controlados pela carga de incêndio, só uma parte do ar que entra é utilizado na combustão, podendo ligar-se as perdas por convecção à troca da massa total dos gases, pois quando a quantidade de gases que passam pelas aberturas é superior à quantidade de ar que entra, a parte mais importante da energia produzida pelo incêndio é extraída do compartimento por transferência de massas (Cadorin, 2003);

- Para compartimentos de incêndio com grandes áreas, o aumento da percentagem de aberturas provoca apenas a redução da temperatura do compartimento.

### 3.2.3 Taxa de libertação de calor (RHR)

A taxa de libertação de calor é o parâmetro mais importante na caracterização de um incêndio. Esta representa a quantidade de energia libertada por segundo, ou seja, a velocidade à qual a carga de incêndio queimar. Na fase de crescimento define-se pela seguinte expressão (CEN, 2010a):

$$Q(t) = 10^6 \left( \frac{t}{t_\alpha} \right)^2 \text{ [W]} \quad (3.7)$$

em que:

$Q(t)$  – taxa de libertação de calor em função do tempo [W];

$t$  – tempo [s];

$t_\alpha$  – tempo necessário para atingir uma taxa de libertação de calor de 1 MW [s].

A taxa de libertação de calor por unidade de área  $RHR_f$  (*Rate of Heat Release*) e o parâmetro  $t_\alpha$  dependem dos diferentes tipos de ocupação, como se pode ver na Tabela 3.7. Note-se que para uma taxa de crescimento de incêndio ultra-rápida  $t_\alpha$  é igual a 75 segundos.

No caso do modelo de incêndio localizado, é importante saber a variação da área de incêndio ao longo do tempo para calcular a temperatura num instante  $t$  na fase de crescimento de  $RHR_f$ . Considerando  $A_{fi}$  a área máxima que o incêndio pode atingir [m<sup>2</sup>], esta variação é traduzida pela equação 3.8 (Franssen and Vila Real, 2010).

$$A(t) = \frac{Q(t)}{RHR_f} \leq A_{fi} \text{ [m}^2\text{]} \quad (3.8)$$

Assim, assumindo um incêndio circular, o diâmetro do incêndio é dado por:

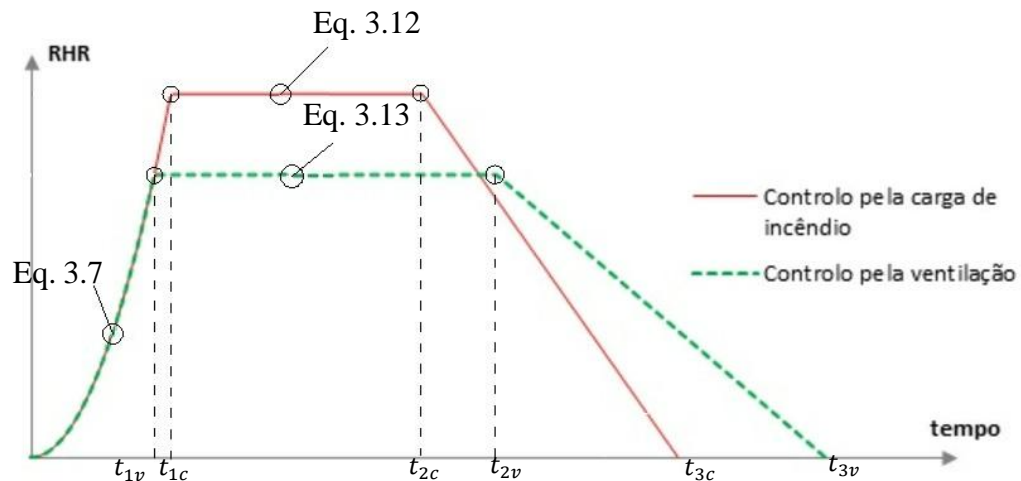
$$D(t) = \sqrt{\frac{4 A(t)}{\pi}} \leq D_{max} \quad [\text{m}] \quad (3.9)$$

em que  $D_{max}$  é o diâmetro máximo de incêndio.

**Tabela 3.7 – Taxa de crescimento de incêndio e  $RHR_f$  [kW/m<sup>2</sup>] para diferentes tipos de ocupação (CEN, 2010a)**

Ocupação	Taxa de crescimento de incêndio	$t_\alpha$	$RHR_f$ [kW/m <sup>2</sup> ]
Habitação	Média	300	250
Hospital (quarto)	Média	300	250
Hotel (quarto)	Média	300	250
Biblioteca	Rápida	150	500
Escritório	Média	300	250
Sala de aulas de uma escola	Média	300	250
Centro Comercial	Rápida	150	250
Teatro (cinema)	Rápida	150	500
Transportes (espaço público)	Lenta	600	250

A Figura 3.5 representa a variação da taxa de libertação de calor (RHR) em função do tempo para incêndios controlados pela carga de incêndio e para incêndios controlados pela ventilação.



**Figura 3.5 – Taxa de libertação de calor (RHR) em função do tempo**

A duração da fase de crescimento de um incêndio controlado pela carga de incêndio é dada pela equação 3.10. Para incêndios controlados pela ventilação, a duração da fase referida anteriormente é dada pela equação 3.11.

$$t_{1c} = \sqrt{\frac{RHR_f A_{fi}}{10^6}} t_\alpha \quad [s] \quad (3.10)$$

$$t_{1v} = (1,4 A_v \sqrt{h_{eq}})^{1/2} t_\alpha \quad [s] \quad (3.11)$$

Após a fase de crescimento, a curva de RHR segue uma reta horizontal com um valor máximo de RHR definido pela carga de incêndio ou pela ventilação. Caso exista oxigênio suficiente para que o incêndio consuma toda a carga de incêndio, diz-se que a RHR está limitada pela carga de incêndio disponível, ou seja, o incêndio é controlado pela carga de incêndio. Neste caso, a taxa de libertação de calor máxima é dada pela equação 3.12.

$$RHR_{max} = A_{fi} RHR_f \quad [W] \quad (3.12)$$

Por outro lado, se o fator de abertura  $O$  do compartimento for muito pequeno, não permitindo a entrada de ar suficiente para alimentar a combustão, o oxigênio disponível limita a RHR e diz-se que o incêndio é controlado pela ventilação. Neste caso, a taxa de libertação de calor máxima é dada pela seguinte expressão:

$$RHR_{max} = 0,1 m H_u A_v \sqrt{h_{eq}} = 1,4 A_v \sqrt{h_{eq}} \cdot 10^6 \quad [W] \quad (3.13)$$

em que:

$m$  – fator de combustão igual a 0,8 [–];

$H_u$  – poder calorífico da madeira igual a 17,5 [MJ/kg].

Em ambos os tipos de incêndio pode dar-se o flashover, sendo este fenômeno importante pois marca a transição de um incêndio localizado para um incêndio que se desenvolve em todo o compartimento.

Em vários documentos assume-se que a fase decrescente corresponde a uma diminuição linear da taxa de libertação de calor (BSI, 1996; CEN, 2010a; NKB, 1994). Com base em ensaios experimentais, estima-se que a diminuição linear da RHR começa quando estiver consumida 70% da carga de incêndio total, admitindo-se que a partir desse ponto a área de incêndio permanece constante.

Assim, o início ( $t_2$ ) e o fim ( $t_3$ ) da fase decrescente são definidos da seguinte forma:

- a) Para incêndios controlados pela carga de incêndio:



$$t_{2c} = \frac{\left(0,7 q_{f,d} \times 10^6 A_{fi} - 10^6 \frac{t_{1c}^3}{3 t_{\alpha}^2}\right)}{RHR_f A_{fi}} + t_{1c} \quad [\text{s}] \quad (3.14)$$

$$t_{3c} = \frac{(0,3 q_{f,d} \times 10^6 A_{fi})}{0,5 RHR_f A_{fi}} + t_{2c} \quad [\text{s}] \quad (3.15)$$

b) Para incêndios controlados pela ventilação:

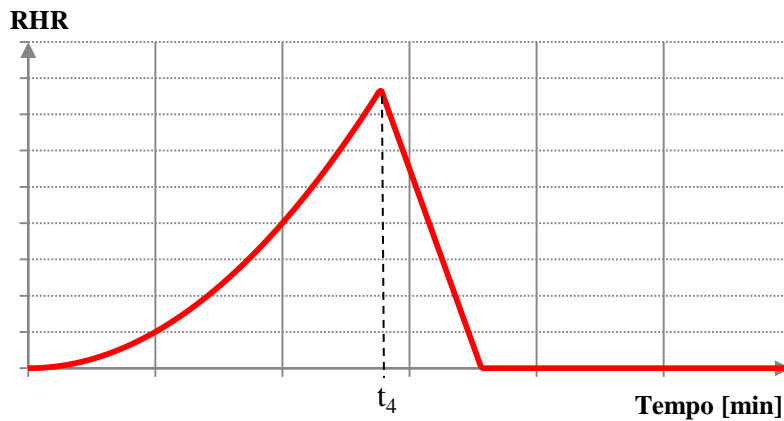
$$t_{2v} = \frac{\left(0,7 q_{f,d} \times 10^6 A_{fi} - 10^6 \frac{t_{1c}^3}{3 t_{\alpha}^2}\right)}{1,4 A_v \sqrt{h_{eq}} 10^6} + t_{1c} \quad [\text{s}] \quad (3.16)$$

$$t_{3v} = \frac{(0,3 q_{f,d} \times 10^6 A_{fi})}{0,7 A_v \sqrt{h_{eq}} 10^6} + t_{2c} \quad [\text{s}] \quad (3.17)$$

**Nota:**

No caso de compartimentos com densidade de carga de incêndio muito pequena pode acontecer que  $\int_0^t Q(t) dt > 0,7 q_{f,d} A_{fi}$ , sendo necessário calcular  $t_4$  (ver equação 3.18), ficando o gráfico da taxa de libertação de calor idêntico ao da Figura 3.6.

$$\int_0^{t_4} Q(t) dt = 0,7 q_{f,d} A_{fi} \Leftrightarrow t_4 = \sqrt[3]{\frac{0,7 q_{f,d} A_{fi}}{10^6}} 3 t_{\alpha}^2 \quad [\text{s}] \quad (3.18)$$



**Figura 3.6 – Gráfico típico da taxa de libertação de calor em função do tempo em caso de densidades de carga de incêndio muito pequenas (espaços públicos, por exemplo)**

Com base na parte 1-2 do EC1 (ver Tabela 3.1 e Tabela 3.7), obtiveram-se as curvas de evolução da taxa de libertação de calor para os diferentes tipos de ocupação. Para isso considerou-se que o incêndio deflagrava num compartimento como o representado na Figura 3.7, independentemente do tipo de ocupação.

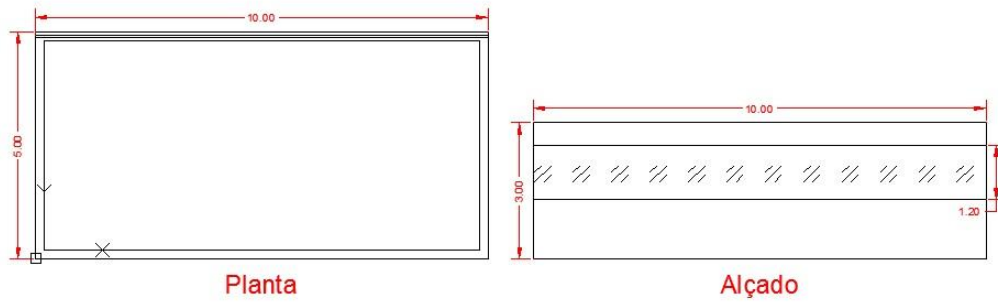


Figura 3.7 – Compartimento-tipo utilizado no estudo da evolução da taxa de libertação de calor para diferentes tipos de ocupação, de acordo com a parte 1-2 do EC1 (CEN, 2010a)

Assim, no presente caso de estudo, em todos os tipos de ocupação os incêndios são controlados pela densidade de carga de incêndio (ver Figura 3.8), com exceção da biblioteca e do teatro (cinema) que são controlados pela ventilação (ver Figura 3.9).

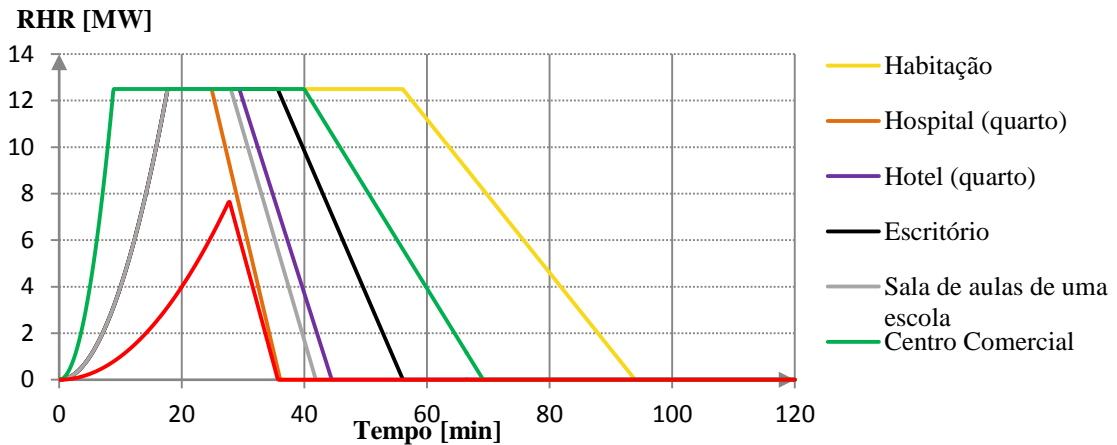


Figura 3.8 - Evolução da taxa de libertação de calor em função do tempo nos tipos de ocupação em que o incêndio é controlado pela densidade de carga de incêndio

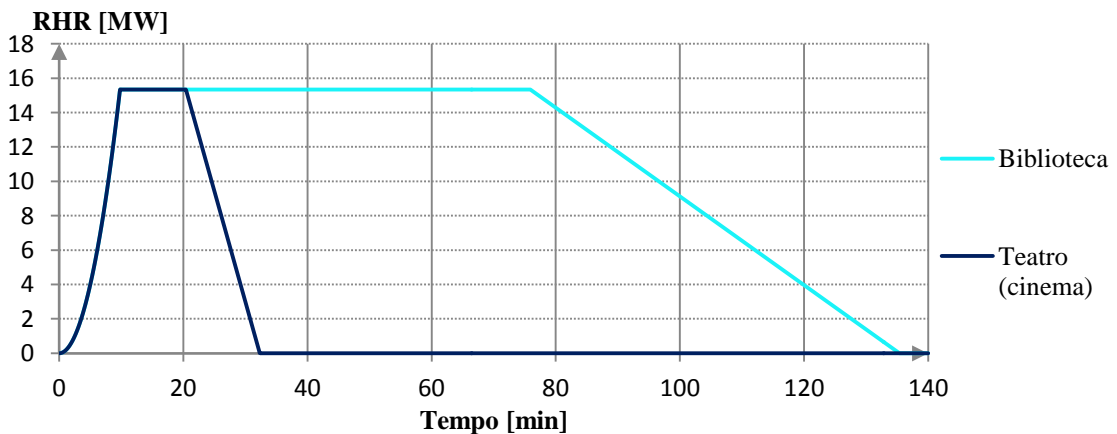


Figura 3.9 - Evolução da taxa de libertação de calor em função do tempo nos tipos de ocupação em que o incêndio é controlado pela ventilação

### 3.3 Modelos de incêndio simplificados

Neste subcapítulo abordar-se-á com maior detalhe os modelos de incêndio simplificados adotados no EC1 (CEN, 2010a), ou seja, as curvas de incêndio paramétricas e os incêndios localizados que se dividem em dois tipos consoante a chama toca, ou não, no teto. Para além disso, também serão analisadas as curvas BFD, as curvas iBMB (curvas paramétricas adotadas no Anexo Nacional Alemão do EC1) e os fogos móveis.

#### 3.3.1 Curvas de incêndio paramétricas adotadas no Anexo A do EC1

Estas curvas traduzem, de forma idêntica às curvas nominais, uma evolução da temperatura em função do tempo, considerando a temperatura uniforme em todo o compartimento. A diferença que se verifica das curvas paramétricas para as curvas nominais consiste no facto das primeiras dependerem de diversos fatores, dos quais se destacam a densidade de carga de incêndio, as condições de ventilação e as características térmicas da envolvente. A Parte 1-2 do EC1 (CEN, 2010a) propõe formulações para este tipo de curvas.

As curvas de incêndio paramétricas adotadas no EC1 têm algumas limitações:

- São válidas apenas para compartimentos com área em planta até 500 m<sup>2</sup>;
- A altura máxima do compartimento é de 4 m;
- O compartimento não pode ter aberturas horizontais;
- Admite que a carga de incêndio do compartimento é totalmente consumida;
- As propriedades térmicas da envolvente do compartimento devem situar-se entre 100 e 2200 [J/m<sup>2</sup>s<sup>1/2</sup>K];
- O fator de abertura do compartimento em análise deve estar compreendido entre 0,02 e 0,2 m<sup>0.5</sup>.

Um estudo recente a edifícios em Edimburgo, Reino Unido, sublinha as implicações destas limitações sobre a aplicabilidade deste tipo de modelo ao dimensionamento ao fogo de estruturas modernas. Para edifícios construídos a partir do início do século vinte, 66% do seu volume total está dentro das limitações. No entanto, num edifício moderno construído recentemente, que tem espaços abertos e fachadas em vidro, apenas 8% do seu volume total está dentro das limitações (Jonsdottir and Rein, 2009). Este estudo sugere que com a construção moderna, a produção de edifícios que têm

compartimentos aos quais as curvas paramétricas não devem ser aplicadas está a aumentar.

A curva de incêndio na fase de aquecimento é definida por (CEN, 2010a):

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0,324e^{-0,2t'} - 0,204e^{-1,7t'} - 0,472e^{-19t'}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.19)$$

em que:

$\theta_g$  – temperatura dos gases no compartimento de incêndio [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$$t' = t \cdot \Gamma \text{ [h]} \quad (3.20)$$

com:

$t$  – tempo [h]

$$\Gamma = \frac{[O/b]^2}{(0,04/1160)^2} \text{ [-]} \quad (3.21)$$

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} \text{ e } 100 \leq b \leq 2200 \text{ [J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K]} \quad (3.22)$$

$$O = A_v \sqrt{\bar{h}_{eq}} / A_t \text{ [m}^{1/2}\text{]} \text{ e } 0,02 \leq O \leq 0,20 \quad (3.23)$$

$\rho$  – massa volúmica da envolvente do compartimento [ $\text{kg/m}^3$ ];

$c$  – calor específico da envolvente do compartimento [ $\text{J/kgK}$ ];

$\lambda$  – condutibilidade térmica da envolvente do compartimento [ $\text{W/mK}$ ].

Para o cálculo do fator  $b$ , a massa volúmica  $\rho$ , o calor específico  $c$  e a condutibilidade térmica  $\lambda$  da envolvente poderão ser considerados à temperatura ambiente (CEN, 2010a).

**Nota:** No caso de paredes constituídas com camadas de diferentes materiais, o fator

$b = \sqrt{\rho c \lambda}$  deverá ser obtido com base no procedimento seguinte:

- Quando um material (2) é protegido por um material pesado (NFSC, 1999), tal que  $b_1 < b_2$ , o fator  $b$  do conjunto corresponde ao fator  $b$  do material 1:  
 $b = b_1$ ;
- Caso contrário, se  $b_1 > b_2$  calcula-se uma espessura limite para o material 1 igual a:

$$S_{1,lim} = \sqrt{\frac{3600t_{max}\lambda_1}{c_1\rho_1}} \text{ [m]} \quad (3.24)$$

em que:

$$t_{max} = \max[(0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}/O); t_{lim}] \text{ [h]} \quad (3.25)$$

com:

$$q_{t,d} = q_{f,d} \cdot A_f/A_t \text{ [MJ/m}^2\text{]} \quad (3.26)$$

– Se o incêndio é controlado pela carga de incêndio:

$$t_{lim} = \begin{cases} 0,417 & \text{para uma taxa de crescimento de incêndio lenta} \\ 0,333 & \text{para uma taxa de crescimento de incêndio média} \\ 0,250 & \text{para uma taxa de crescimento de incêndio rápida} \end{cases} \text{ [h]}$$

– Se o incêndio é controlado pela ventilação:

$$t_{lim} = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}/O \text{ [h]} \quad (3.27)$$

$\rho_1$  – massa volúmica do material 1 [kg/m<sup>3</sup>];

$c_1$  – calor específico do material 1 [J/kgK];

$\lambda_1$  – condutibilidade térmica do material 1 [W/mK].

Então o fator  $b$  é determinado por:

- Se  $s_1 > s_{1,lim}$ , então  $b = b_1$ ;
- Se  $s_1 < s_{1,lim}$ , então  $b = \frac{s_1}{s_{1,lim}} b_1 + \left(1 - \frac{s_1}{s_{1,lim}}\right) b_2$ .

Ao aplicar a equação 3.21, existem duas hipóteses distintas:

- Se  $0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}/O > t_{lim}$  o incêndio é controlado pela ventilação e as equações 3.19 a 3.21 e 3.23 e as equações 3.33 a 3.35 são aplicadas integralmente, sem qualquer modificação;
- Se  $0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}/O < t_{lim}$ , as equações 3.19 a 3.21 são aplicadas com um fator de abertura modificado,  $O_{lim}$ :

$$O_{lim} = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}/t_{lim} \quad (3.28)$$

As equações 3.20 e 3.21 vêm modificadas, sendo  $t'$  utilizado na equação 3.12 substituído por  $t'_{lim}$ :

$$t'_{lim} = t \cdot \Gamma_{lim} \text{ [h]} \quad (3.29)$$

$$\Gamma_{lim} = [O_{lim}/b]^2 / (0,04/1160)^2 \quad (3.30)$$

Por fim, para se ter em consideração a ventilação durante a fase de aquecimento, no caso de  $t_d = t_{lim}$ :

Se  $O > 0,04$ ,  $q_{t,d} < 75$  e  $b < 1160$ ,

$$\text{então } k = 1 + \left(\frac{O-0,04}{0,04}\right) \left(\frac{q_{t,d}-75}{75}\right) \left(\frac{1160-b}{1160}\right) \quad (3.31)$$

$$\text{e } \Gamma_{lim} = k \cdot [(O_{lim}/b)^2 / (0,04/1160)^2] \quad (3.32)$$

Na fase de arrefecimento, as curvas de temperatura são dadas por:

$$\theta_g = \theta_{max} - 625(t' - t'_{max} \cdot x) \text{ para } t'_d \leq 0,5 \quad (3.33)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(3 - t'_{max})(t' - t'_{max} \cdot x) \text{ para } 0,5 < t'_d < 2,0 \quad (3.34)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(t' - t'_{max} \cdot x) \text{ para } t'_d \geq 2,0 \quad (3.35)$$

com:

$\theta_{max}$  (temperatura máxima no final da fase de aquecimento) dada pela equação 3.19;

$t'$  dado pela equação 3.20;

$$t'_{max} = (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}/O) \cdot \Gamma \quad [\text{h}] \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} x &= 1 && \text{se } t_{max} > t_{lim} \\ x &= t_{lim} \cdot \Gamma/t'_{max} && \text{se } t_{max} = t_{lim} \end{aligned}$$

A Figura 3.10 tem como objetivo ilustrar o tipo de curvas paramétricas que se podem obter. Para isso utilizou-se o programa Elefir-EN (Vila Real and Franssen, 2011) considerando um compartimento quadrado com 100m<sup>2</sup> e 3m de altura (o que perfaz uma área total da superfície envolvente de  $A_t = 320\text{m}^2$ ), um valor de cálculo da densidade de carga de incêndio de  $q_{f,d} = 800 \text{ MJ/m}^2$ , um  $t_{lim}$  igual a 20 minutos (a que corresponde uma velocidade de propagação do incêndio média) e fez-se variar o fator de abertura  $O$  entre 0,02 m<sup>1/2</sup> e 0,20 m<sup>1/2</sup> (Vila Real, 2003).

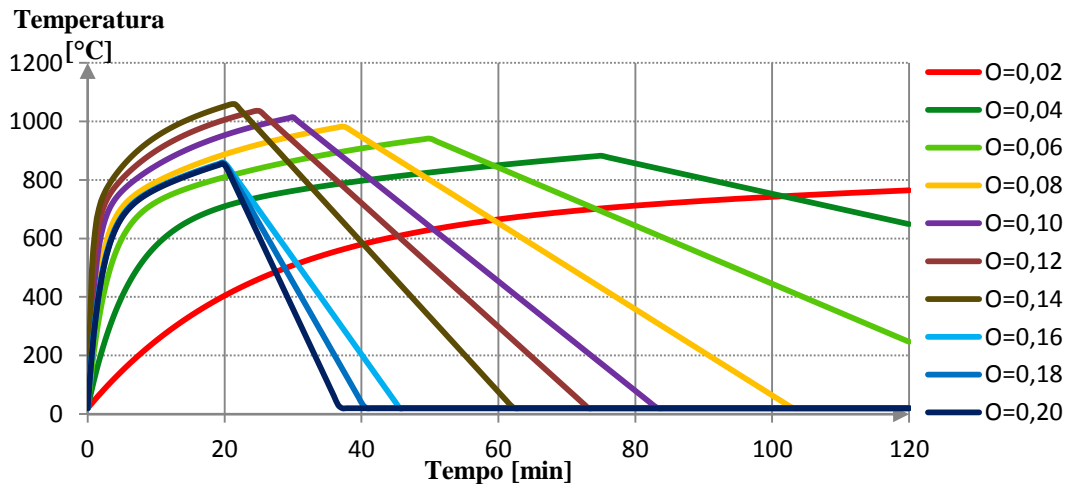


Figura 3.10 – Exemplo de curvas paramétricas

Como se viu anteriormente, um incêndio pode ser controlado pela densidade de carga de incêndio ou pela ventilação. A Figura 3.10 demonstra que, se um incêndio é controlado pela ventilação, quanto maior o fator de abertura mais curto e agressivo é o incêndio. Por outro lado, se um incêndio é controlado pela densidade de carga de incêndio, o fator de abertura influencia apenas a velocidade de arrefecimento do incêndio, sendo que este atinge o pico no instante correspondente a  $t_{lim}$ , neste caso igual a 20 minutos.

### 3.3.2 Curvas de incêndio paramétricas adotadas no Anexo Nacional Alemão do EC1

As curvas paramétricas adotadas no Anexo Nacional Alemão do EC1 (DIN, 2010), também conhecidas como curvas iBMB (Zehfuss and Hosser, 2007), dependem, tal como as curvas paramétricas adotadas no Anexo A do EC1 (CEN, 2010a), da densidade de carga de incêndio, das condições de ventilação, da geometria do compartimento e das propriedades térmicas da envolvente.

As curvas de incêndio paramétricas alemãs têm algumas limitações:

- São válidas apenas para compartimentos com área em planta até 400 m<sup>2</sup>;
- A altura máxima do compartimento é de 5 m;
- As aberturas e ventilação vertical devem estar compreendidas entre 12,5 e 50% da área em planta do compartimento;
- São válidas apenas para densidades de carga de incêndio entre 100 e 1300 MJ/m<sup>2</sup>.

Este modelo simplificado de análise de temperatura no compartimento de incêndio baseia-se na taxa de libertação de calor (ver pág.32), mas considera que, para utilizações tipo escritório, residenciais e semelhantes, os valores máximos de RHR podem ser simplificados. Assim, para incêndios controlados pela densidade de carga de incêndio, o valor máximo de RHR é definido pela equação 3.37, enquanto que para incêndios controlados pela ventilação esse valor pode ser obtido pela equação 3.38.

$$Q_{max,f} = 0,25 A_{fi} \text{ [MW]} \quad (3.37)$$

$$Q_{max,v} = 1,21 A_v \sqrt{h_{eq}} \text{ [MW]} \quad (3.38)$$

O valor máximo da taxa de libertação de calor é o menor dos dois valores anteriores, ou seja,  $Q_{max,f}$  para incêndios controlados pela densidade de carga de incêndio ou  $Q_{max,v}$  para incêndios controlados pela ventilação (ver equação 3.39)

$$Q_{max} = \text{MIN}(Q_{max,f} ; Q_{max,v}) \text{ [MW]} \quad (3.39)$$

Ao contrário das curvas paramétricas adotadas no Anexo A do EC1 (CEN, 2010a), estas curvas estão diretamente relacionadas com a taxa de libertação de calor, podendo ser definidas pela decomposição do incêndio em três fases, como se pode ver na Figura 3.11.

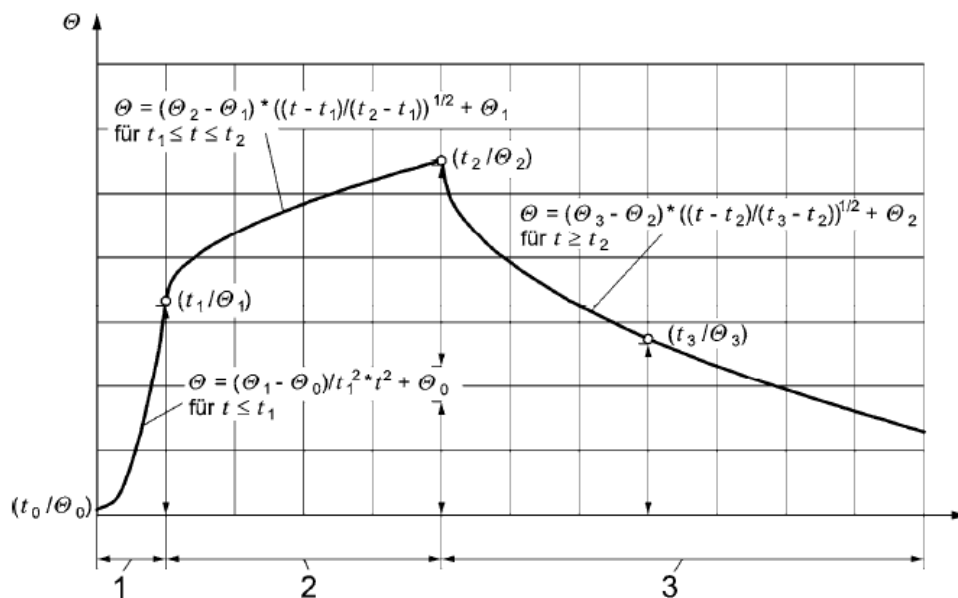


Figura 3.11 – Representação esquemática da curva de incêndio paramétrica adotada no Anexo Nacional Alemão do EC1 (DIN, 2010)



Existem quatro pontos de relevo ( $t_0, t_1, t_2$  e  $t_3$ ) que limitam a forma como esta curva se desenvolve ao longo do tempo, pontos esses que são obtidos a partir da taxa de libertação de calor, sendo  $t_0$  o instante inicial,  $t_1$  o fim da fase de crescimento do incêndio,  $t_2$  o início da fase de decrescimento do incêndio e  $t_3$  o fim dessa mesma fase. Na determinação desses parâmetros e dos valores de temperatura correspondentes deve ter-se em atenção se o incêndio é controlado pela densidade de carga de incêndio ou pela ventilação.

Desta forma, para incêndios controlados pela densidade de carga de incêndio e uma densidade de carga de incêndio de referência de 1300 MJ/m<sup>2</sup>, os valores referidos anteriormente podem ser obtidos da seguinte forma:

$$t_1 = t_\alpha \sqrt{Q_{max,f}} \quad [s] \quad (3.40)$$

$$\theta_1 = 24000 k + 20 \text{ para } k \leq 0,04 \text{ e } \theta_1 = 980 \text{ para } k > 0,04 \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.41)$$

$$t_2 = t_1 + \frac{Q_2}{Q_{max,f}} \quad [s] \quad \text{com } Q_2 = 0,7 Q_d - \frac{t_1^3}{3 t_\alpha^2} \quad [MJ] \quad (3.42)$$

$$\theta_2 = 33000 k + 20 \text{ para } k \leq 0,04 \text{ e } \theta_2 = 1340 \text{ para } k > 0,04 \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.43)$$

$$t_3 = t_2 + \frac{2 Q_3}{Q_{max,f}} \quad [s] \quad \text{com } Q_3 = 0,3 Q_d \quad [MJ] \quad (3.44)$$

$$\theta_3 = 16000 k + 20 \text{ para } k \leq 0,04 \text{ e } \theta_3 = 600 \text{ para } k > 0,04 \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.45)$$

em que:

$$k = \left( \frac{Q_{max,f}^2}{A_v \sqrt{h_{eq}} (A_t - A_v) b} \right)^{1/3} \quad [-] \quad (3.46)$$

$$Q_d = q_{f,d} A_f \quad [MJ] \quad \text{com } q_{f,d} = 1300 \text{ MJ/m}^2 \quad (3.47)$$

Para incêndios controlados pela ventilação e uma densidade de carga de incêndio de referência de 1300 MJ/m<sup>2</sup>, os instantes de tempo são obtidos de acordo com o procedimento anterior e os respetivos valores da temperatura dependem agora do fator de abertura do compartimento e das propriedades térmicas da envolvente, como se pode ver nas seguintes equações:

$$t_1 = t_\alpha \sqrt{Q_{max,v}} \quad [s] \quad (3.48)$$

$$\theta_1 = -8,75 \frac{1}{0} - 0,1 b + 1175 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.49)$$

$$t_2 = t_1 + \frac{Q_2}{Q_{max,v}} \text{ [s]} \quad \text{com } Q_2 = 0,7 Q_d - \frac{t_1^3}{3 t_\alpha^2} \text{ [MJ]} \quad (3.50)$$

$$\theta_2 = (0,004 b - 17) \frac{1}{0} - 0,4 b + 2175 \leq 1340 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.51)$$

$$t_3 = t_2 + \frac{2 Q_3}{Q_{max,v}} \text{ [s]} \quad \text{com } Q_3 = 0,3 Q_d \text{ [MJ]} \quad (3.52)$$

$$\theta_3 = -5,0 \frac{1}{0} - 0,16 b + 1060 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.53)$$

Com base na curva paramétrica para a densidade de carga de incêndio de referência  $q_{f,d} = 1300 \text{ MJ/m}^2$  pode-se determinar as curvas de temperatura-tempo para quaisquer densidades de carga de incêndio  $q_{x,d} \leq 1300 \text{ MJ/m}^2$ . O ramo ascendente da curva é independente da densidade de carga de incêndio (zonas 1 e 2). O tempo  $t_{2,x}$  em que a temperatura máxima  $\theta_{2,x}$  é atingida é dependente da densidade de carga de incêndio e pode ser determinado a partir da abordagem da taxa de libertação de calor.

- Para  $Q_1 < 0,7 Q_{x,d}$  vem:

$$t_{2,x} = t_1 + \frac{0,7 Q_{x,d} - Q_1}{Q_{max}} \text{ [s]} \quad (3.54)$$

$$t_{3,x} = t_{2,x} + \frac{0,6 Q_{x,d}}{Q_{max}} \text{ [s]} \quad (3.55)$$

em que:

$$Q_1 = \frac{t_1^3}{3 t_\alpha^2} \text{ [MJ]} \quad (3.56)$$

$$Q_{x,d} = q_{x,d} A_f \text{ [MJ]} \quad (3.57)$$

- Para  $Q_1 \geq 0,7 Q_{x,d}$  vem:

$$t_1 = t_{1,x} = t_{2,x} = \sqrt[3]{0,7 Q_{x,d} 3 t_\alpha^2} \text{ [s]} \quad (3.58)$$

$$t_{3,x} = t_{2,x} + \frac{0,6 Q_{x,d}}{Q_{max}} \text{ [s]} \quad (3.59)$$

Agora, com os tempos corrigidos, as temperaturas corrigem-se da seguinte forma:

$$\theta_{2,x} = \theta_1 + (\theta_2 - \theta_1) \sqrt{\frac{t_{2,x} - t_1}{t_2 - t_1}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.60)$$

$$\theta_{3,x} = \theta_3 \frac{\log_{10}\left(\frac{t_{3,x} + 1}{60} + 1\right)}{\log_{10}\left(\frac{t_3}{60} + 1\right)} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.61)$$

Assim, a construção da curva paramétrica é feita da seguinte forma:

$$\theta(t) = \theta_0 + \frac{(\theta_1 - \theta_0)}{t_1^2} t^2 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \text{para } 0 < t \leq t_1 \quad (3.62)$$

$$\theta(t) = \theta_1 + (\theta_{2,x} - \theta_1) \sqrt{\frac{t - t_1}{t_{2,x} - t_1}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \text{para } t_1 < t \leq t_2 \quad (3.63)$$

$$\theta(t) = \theta_{2,x} + (\theta_{3,x} - \theta_{2,x}) \sqrt{\frac{t - t_{2,x}}{t_{3,x} - t_{2,x}}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad \text{para } t > t_2 \quad (3.64)$$

O tempo em que possivelmente poderá ocorrer flashover,  $t_{1,fo}$ , em que a taxa de libertação de calor aumenta abruptamente para o máximo possível pode ser determinado por:

$$t_{1,fo} = \sqrt{t_{\alpha}^2 Q_{fo}} \quad [\text{s}] \quad (3.65)$$

em que:

$$Q_{fo} = 0,0078 A_t + 0,378 A_v \sqrt{h_{eq}} \quad [\text{MW}] \quad (3.66)$$

### 3.3.3 Curvas BFD

Em 2001, Barnett propôs um novo modelo empírico de análise de temperaturas no interior de um compartimento em situação de incêndio, as curvas BFD (Barnett, 2002).

As curvas BFD são curvas de incêndio natural que têm como principal característica o facto de se aproximarem mais dos resultados experimentais dos testes ao fogo do que outros métodos, como por exemplo as curvas paramétricas. Estas curvas foram ajustadas com base nos resultados dos ensaios de Cardington (Kirby et al., 1994; Lennon and Moore, 2003) e aplicadas aos testes realizados por Kawagoe, Odeen, entre outros, com resultados bastante satisfatórios (Magnusson and Helander, 1970).

A curva BFD tem uma forte relação com o fator de abertura do compartimento ( $O$ ) e apresenta a particularidade de usar apenas uma equação para representar a fase de crescimento e decrescimento do incêndio:

$$T = T_a + T_m e^{-\left(\frac{(\ln t - \ln t_m)^2}{s_c}\right)} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.67)$$

em que:

$T$  – temperatura dos gases no compartimento de incêndio [ $^\circ\text{C}$ ];

$T_a$  – temperatura ambiente [ $^\circ\text{C}$ ];

$T_m$  – temperatura máxima dos gases no compartimento de incêndio [ $^\circ\text{C}$ ];

$t$  – tempo [min];

$t_m$  – instante de tempo a que ocorre a temperatura máxima [min];

$s_c$  – fator de forma da curva [–].

### 3.3.3.1 Determinar a temperatura máxima $T_m$

O primeiro passo para utilizar as curvas BFD é determinar a temperatura máxima no compartimento de incêndio,  $T_m$ . No capítulo 2.2 do livro da SFPE constam cinco formas de o fazer, dois métodos pré-flashover e três métodos pós-flashover (SFPE, 2002). No âmbito da Engenharia Civil o que tem mais interesse são os métodos pós-flashover, sendo abordado neste trabalho o método mais simples, designado por método de Law.

Barnett no seu trabalho (Barnett, 2002) indica a equação 3.68 como meio para obter  $T_m$ , parâmetro que depende do inverso do fator de abertura ( $\eta$ ) e da densidade de massa de carga de incêndio ( $\psi$ ). Para além da equação, Barnett referencia um gráfico com várias curvas da temperatura máxima do compartimento de incêndio ( $T_m$ ) em função do inverso do fator de abertura ( $\eta$ ), sendo que a cada curva corresponde um valor da densidade de massa de carga de incêndio ( $\psi$ ) que varia entre 25 e 100 (ver Figura 3.12).

$$T_m = \frac{6000 (1 - e^{-0,1 \eta})}{\sqrt{\eta}} (1 - e^{0,5 \psi}) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.68)$$

em que:

$T_m$  – temperatura máxima dos gases no compartimento de incêndio [ $^\circ\text{C}$ ];

$\eta$  – inverso do fator de abertura =  $1/O$  [ $\text{m}^{-0.5}$ ];

$\psi$  – densidade de massa de carga de incêndio –  $\psi = \frac{q_{f,d}}{H_u}$  [kg/m<sup>2</sup>].

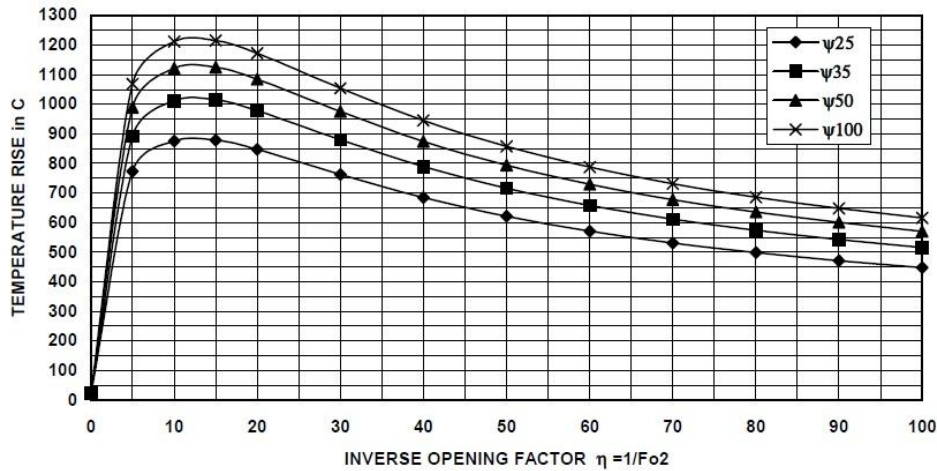


Figura 3.12 – Curvas de temperatura em função do inverso do fator de abertura para compartimentos não isolados para determinar o parâmetro  $T_m$  (Barnett, 2002)

Assim, com base na equação 3.68, tentou-se reproduzir as curvas representadas na Figura 3.12, obtendo-se resultados bastante diferentes do previsto, como se pode ver na Figura 3.13.

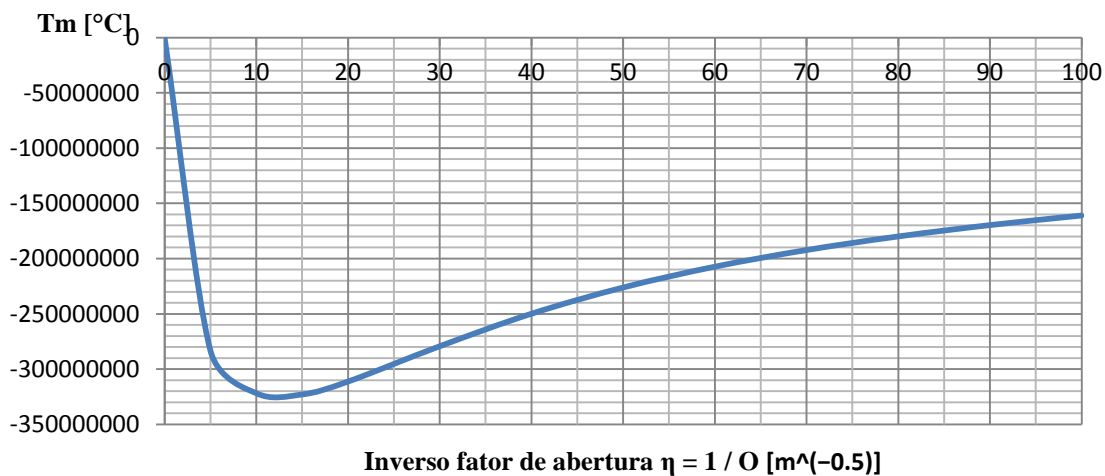


Figura 3.13 – Curva de temperatura em função do inverso do fator de abertura obtida a partir da equação 3.68 para  $\psi=25$

Como se pode ver na figura acima, os valores possíveis do parâmetro  $T_m$  para além de serem negativos são demasiado elevados, o que levou a concluir que a equação 3.68 poderia ter alguma gralha. Desta forma, procurou-se encontrar a equação que melhor representa as curvas da Figura 3.12, chegando-se à seguinte equação:

$$T_m = \frac{6000 (1 - e^{-0,1 \eta})}{\sqrt{\eta}} (1 - e^{-0,053 \psi}) \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.69)$$

Com base na equação 3.69, obtiveram-se as curvas representadas na Figura 3.14.

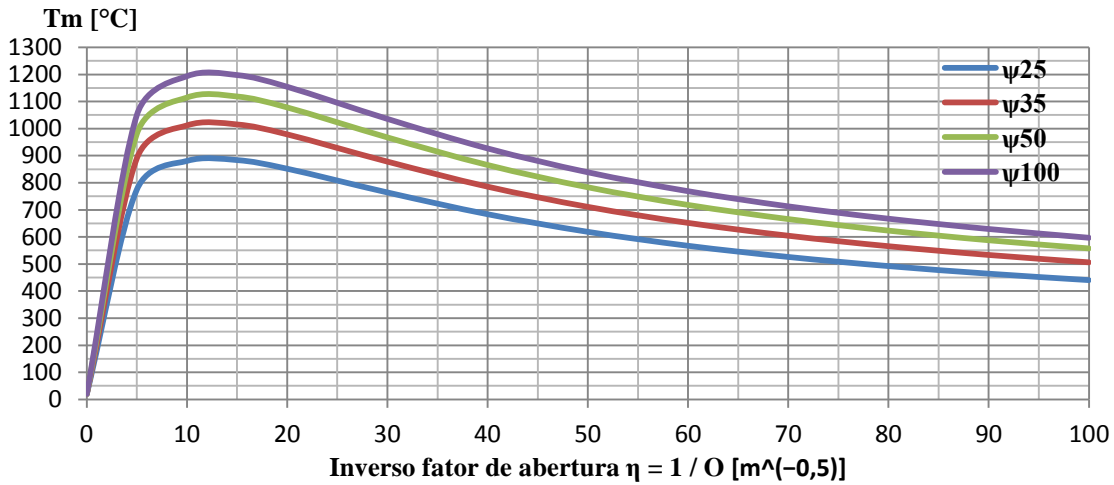


Figura 3.14 – Curvas de temperatura em função do inverso do fator de abertura obtidas a partir da equação 3.68 para  $\psi 25$ ,  $\psi 35$ ,  $\psi 50$  e  $\psi 100$

Na Figura 3.15 sobrepueram-se as curvas obtidas pela equação 3.69 ao gráfico da Figura 3.12 e obtiveram-se resultados muito idênticos para  $\psi 25$ ,  $\psi 35$  e  $\psi 50$ . Para  $\psi 100$  há uma diferença ligeira (aproximadamente 20°C) que não se crê ser significativa, sendo que para além disso  $\psi 100$  representa um compartimento com densidade de carga de incêndio muito elevada e pouco comum, típica de uma biblioteca, por exemplo.

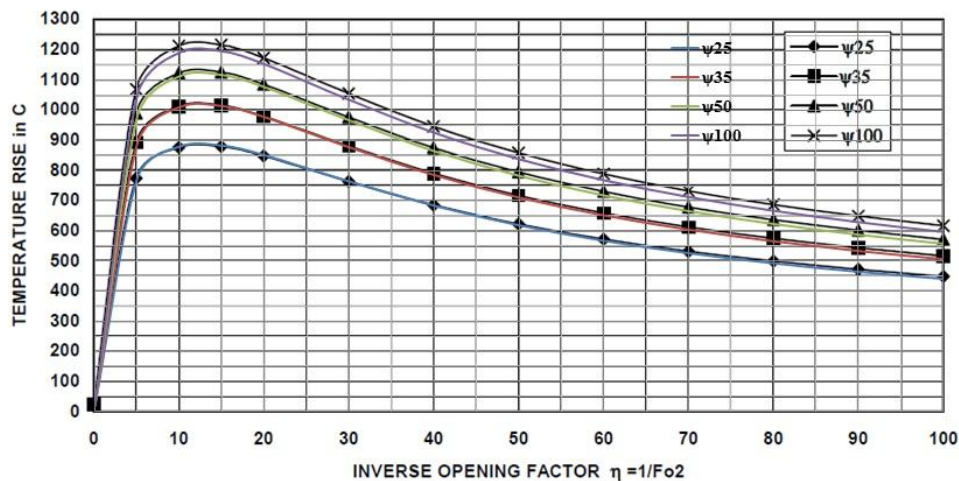


Figura 3.15 – Comparação entre a Figura 3.12 e a Figura 3.14

Até ao momento não há conhecimento de estudos onde se aplica-se as curvas BFD a compartimentos de incêndio com isolamento, sendo que o autor recomenda que para esses compartimentos se multiplique o parâmetro  $T_m$  por 1,10 até um máximo de 1250°C (Barnett, 2002).

**3.3.3.2 Determinar o instante de tempo,  $t_m$ , a que temperatura máxima ocorre**

O segundo passo para utilizar as curvas BFD é determinar o tempo a que a temperatura máxima no compartimento de incêndio ocorre,  $t_m$ . Para fogos controlados pela densidade de carga de incêndio, este parâmetro é determinado a partir da equação 3.70, enquanto que para incêndios controlados pela ventilação é obtido pela equação 3.71 (Barnett, 2002).

$$t_m = t_c^* \left( \frac{3E}{t_c^* + t_d^*} \right)^{0,333} \quad [s] \quad (3.70)$$

$$t_m = \frac{E}{Q_m} - \sqrt{Q_m} \left( \frac{1}{3} t_d^* - \frac{2}{3} t_c^* \right) \quad [s] \quad (3.71)$$

em que:

$t_m$  – instante de tempo a que ocorre a temperatura máxima [s];

$t_c^*$  – tempo necessário para atingir uma taxa de libertação de calor de 1 MW na fase de crescimento do incêndio [s];

$t_d^*$  – tempo necessário para atingir uma taxa de libertação de calor de 1 MW na fase de decrescimento do incêndio [s];

$E$  – carga de incêndio [MJ];

$Q_m$  – intensidade máxima de incêndio [MW].

Os parâmetros  $t_c^*$  e  $t_d^*$  podem ser obtidos a partir da Tabela 3.8. O parâmetro  $t_c^*$  também pode ser determinado a partir da Tabela 3.7, para os diferentes tipos de ocupação.

**Tabela 3.8 – Tempo necessário para atingir uma taxa de libertação de calor de 1 MW**

Taxa de crescimento e decrescimento do incêndio	Tempo $t^*$ para atingir 1 MW [s]
Ultra-rápida	75
Rápida	150
Média	300
Lenta	600
Muito lenta	1200

O valor da carga de incêndio obtém-se a partir da equação 3.72, enquanto que a equação 3.73 permite determinar a intensidade máxima de incêndio.

$$E = q_{f,d} A_f \quad [\text{MJ}] \quad (3.72)$$

$$Q_m = H_u R \quad [\text{MW}] \quad (3.73)$$

em que:

$H_u$  – poder calorífico efetivo (ver Quadro E.3 da Parte 1-2 do EC1) [MJ/kg];

$R = k_p A_v \sqrt{h_{eq}}$  – velocidade máxima de queima [kg/s].

O valor do coeficiente de pirólise ( $k_p$ ) depende do fator de abertura do compartimento e pode ser obtido a partir da Figura 3.16 ou através da seguinte equação:

$$k_p = 1/(148 O + 3,8) \quad [\text{kg/s m}^{2,5}] \quad (3.74)$$

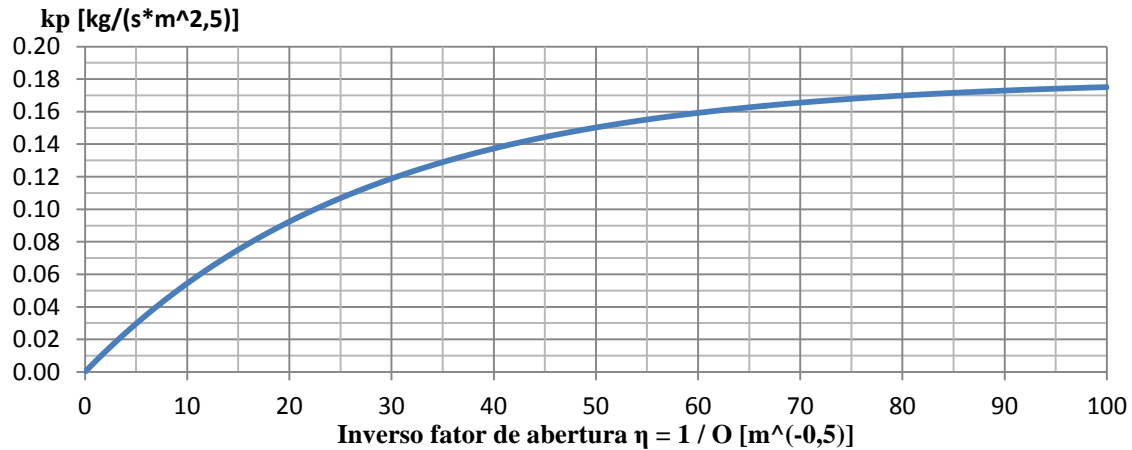


Figura 3.16 – Coeficiente de pirólise (Novozhilov et al.)

### 3.3.3.3 Determinar o fator de forma da curva $s_c$

Por fim, o último passo para ter todos os dados necessários para utilizar as curvas BFD consiste em determinar o fator de forma da curva,  $s_c$ . Este depende do coeficiente de pirólise ( $k_p$ ), que por sua vez depende do fator de abertura ( $O$ ), sendo portanto possível determinar o fator de forma da curva a partir do fator de abertura com base nas equações 3.75 e 3.76.

Para compartimentos de incêndio sem isolamento:

$$s_c = 1/(4,00 O + 0,10) \quad [-] \quad (3.75)$$

Para compartimentos de incêndio com isolamento:

$$s_c = 1/(9,25 O + 0,24) \quad [-] \quad (3.76)$$



### 3.3.3.4 Efeito dos diversos parâmetros utilizados nas curvas BFD

Neste ponto pretende-se dar uma ideia sobre a influência que cada um dos parâmetros tem na forma da curva BFD. Assim, na Figura 3.17 fez-se variar a temperatura máxima  $T_m$  de 200°C a 1200°C, mantendo-se constantes o valor da temperatura ambiente  $T_a$  igual a 20°C, o instante de tempo a que ocorre a temperatura máxima  $t_m$  igual a 60 min e o fator de forma da curva  $s_c$  igual a 1.

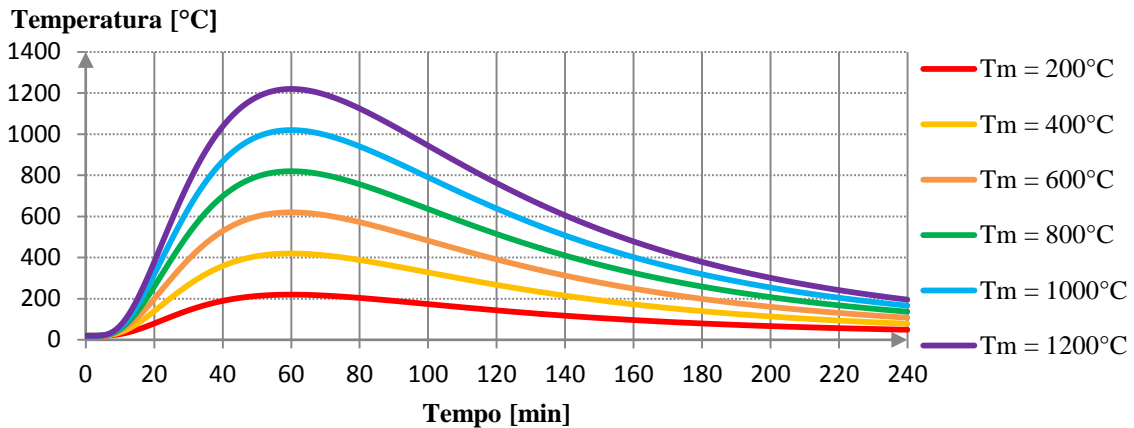


Figura 3.17 – Curvas BFD usando diferentes valores do parâmetro  $T_m$  na equação 3.67

O efeito que o instante de tempo a que ocorre a temperatura máxima  $t_m$  tem na curva BFD é ilustrado na Figura 3.18, onde este parâmetro toma os seguintes valores: 30, 60, 90, 120, 180 e 240 min. Todos os restantes parâmetros necessários à construção da curva BFD não sofrem qualquer variação, sendo o valor da temperatura máxima  $T_m$  igual a 1000°C, o valor da temperatura ambiente  $T_a$  igual a 20°C e o fator de forma da curva  $s_c$  igual a 1.

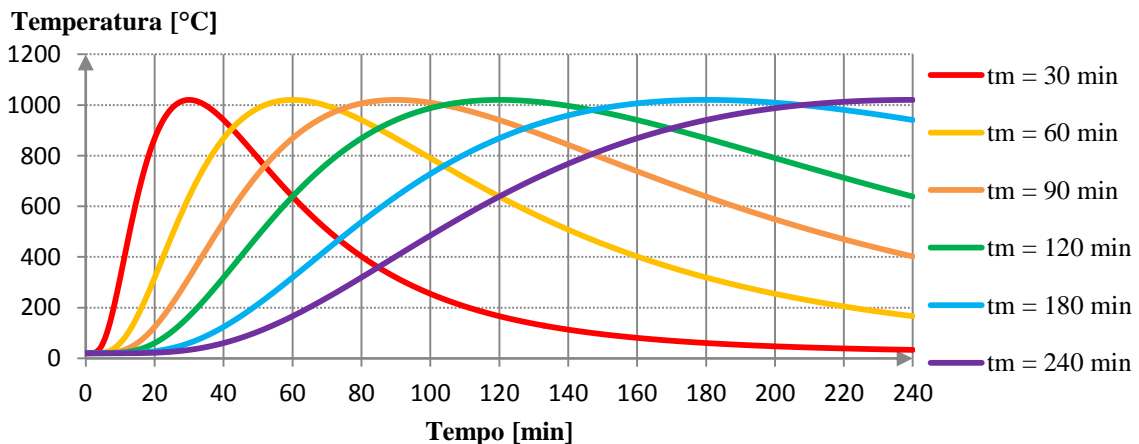


Figura 3.18 – Curvas BFD usando diferentes valores do parâmetro  $t_m$  na equação 3.67

Por fim, o efeito que o fator de forma tem na curva BFD é representado na Figura 3.19, onde este parâmetro toma os seguintes valores: 0.1, 0.4, 1, 3, 9 e 50. Todos os restantes parâmetros que intervêm na equação 3.67 são constantes, sendo o valor da temperatura máxima  $T_m$  igual a 1000°C, o valor da temperatura ambiente  $T_a$  igual a 20°C e o instante de tempo a que ocorre a temperatura máxima  $t_m$  igual a 60 min.

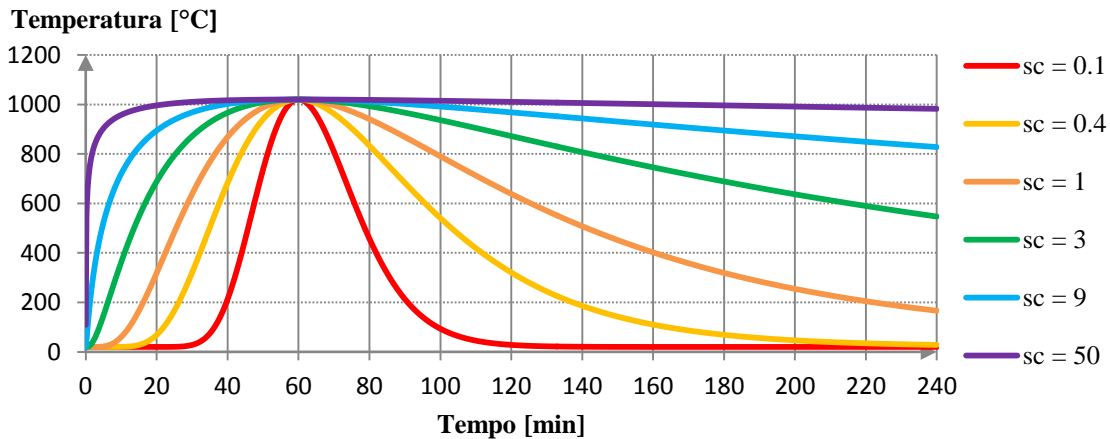


Figura 3.19 – Curvas BFD usando diferentes valores do parâmetro  $s_c$  na equação 3.67

### 3.3.3.5 Substituição das curvas nominais por curvas BFD

Em 2007, Barnett propôs a substituição de algumas curvas de incêndio nominais por curvas BFD, o que demonstra a flexibilidade deste tipo de curva que pode tomar diversas formas consoante os parâmetros que se usam para as definir. Essas curvas podem ser obtidas usando os valores da Tabela 3.9 (Barnett, 2007).

Tabela 3.9 – Dados utilizados na construção das curvas BFD

Curva nominal	Curva BFD			
	$T_a$ [°C]	$T_m$ [°C]	$t_m$ [min]	$s_c$ [-]
Curva de incêndio padrão ISO 834	20	1418	10000	62
Curva de incêndio ASTM E119		1211	3500	58
Curva de incêndio de hidrocarbonetos		1065	80	60
Curva de incêndio para elementos exteriores		660	50	150

Na Figura 3.20 pode ver-se que a curva BFD proposta por Barnett representa quase na perfeição a curva de incêndio padrão ISO 834, sendo a variação máxima de temperatura entre as curvas de 0,5% aos 60 minutos. No caso da curva americana ASTM E119, a curva BFD proposta é também muito semelhante à curva nominal, sendo a variação

máxima de temperatura entre as curvas de 20°C aos 240 minutos, ou seja, 1,8% (ver Figura 3.21).

Note-se que nos primeiros dez minutos as diferenças são maiores, visto que as curvas crescem muito rapidamente nos instantes iniciais, sendo por isso mais complicado ajustar a curva BFD à curva pretendida. Conseqüentemente, na descrição dos resultados obtidos feita anteriormente ignora-se as diferenças maiores nos minutos iniciais, pois não têm muita relevância na análise da temperatura em compartimentos em situação de incêndio.

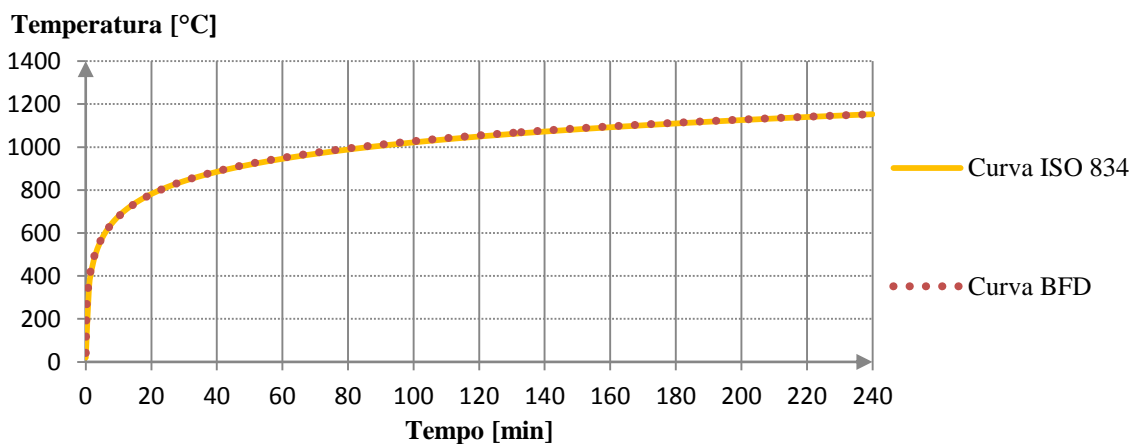


Figura 3.20 – Comparação entre a curva BFD e a curva de incêndio padrão ISO 834

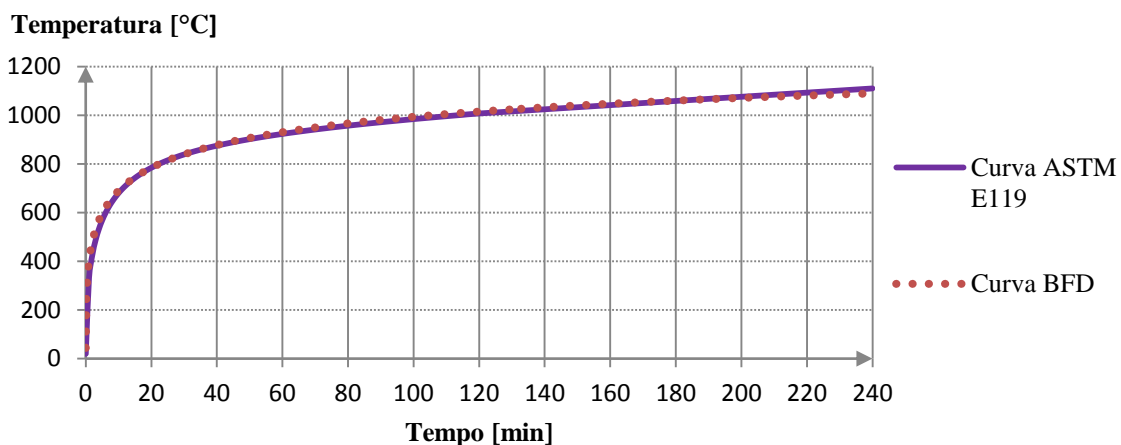


Figura 3.21 – Comparação entre a curva BFD e a curva de incêndio ASTM E119

Na curva de incêndio de hidrocarbonetos e na curva de incêndio para elementos exteriores, as curvas que se encontram no artigo de Barnett não resultam dos valores por ele propostos no seu artigo (Barnett, 2007). Assim, visto que os gráficos obtidos usando os valores da Tabela 3.9 (ver Figura 3.22 e Figura 3.23) são diferentes dos gráficos que

constam nesse mesmo artigo (ver Figura 3.24), admite-se que haverá algum lapso nos valores que Barnett propõe, visto que as curvas que apresenta no seu artigo não correspondem exatamente ao que seria de esperar com os valores que sugere para as construir.

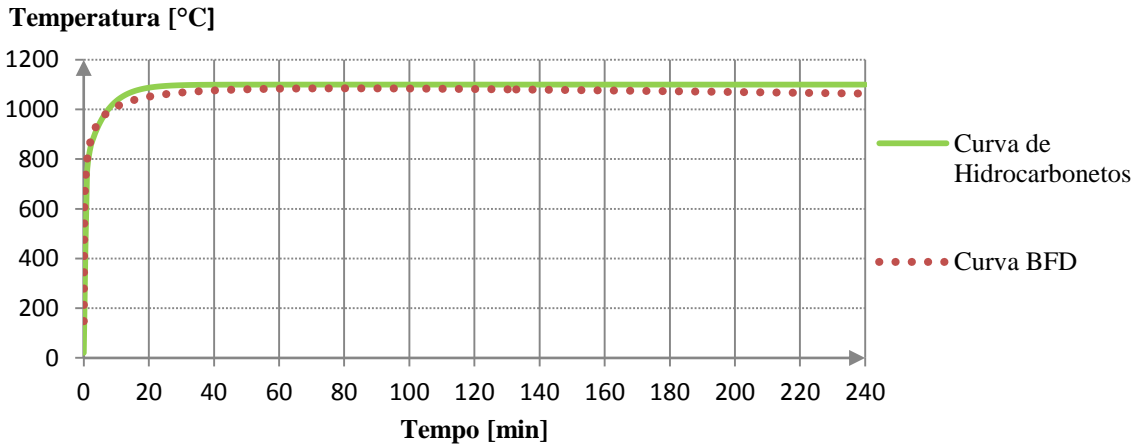


Figura 3.22 – Comparação entre a curva BFD e a curva de incêndio de hidrocarbonetos

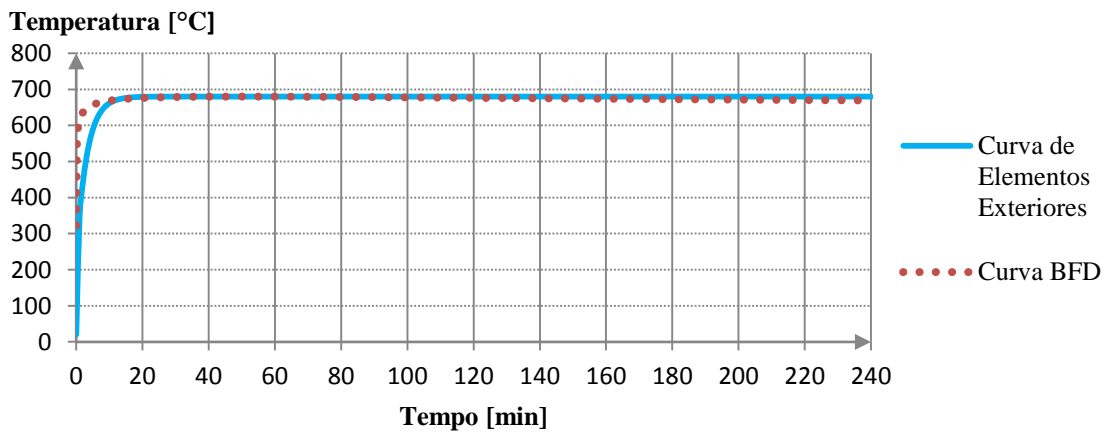


Figura 3.23 – Comparação entre a curva BFD e a curva de incêndio para elementos exteriores

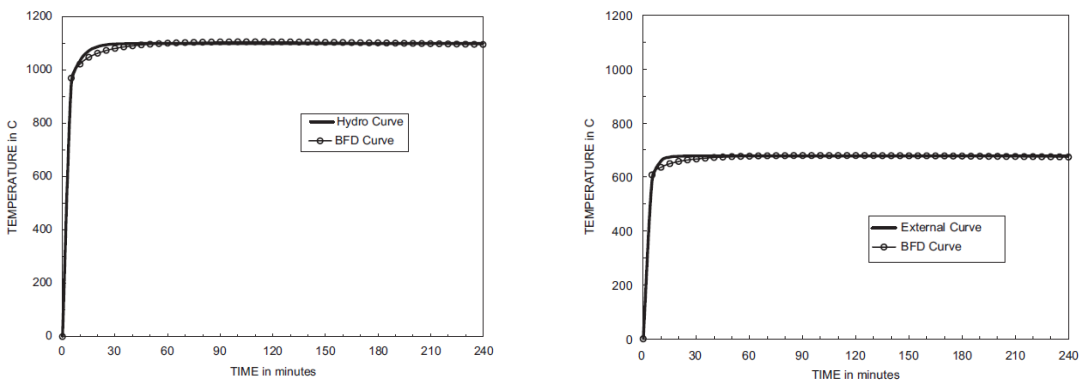


Figura 3.24 – Comparação entre curvas BFD e curvas de incêndio nominais de hidrocarbonetos e para elementos exteriores (Barnett, 2007)

### 3.3.4 Incêndios localizados

Exceto em circunstâncias muito especiais, todos os incêndios em edifícios começam com um pequeno incêndio localizado. Quando se dá o flashover, o incêndio deixa de ser localizado e passa a estar desenvolvido a todo o compartimento.

Segundo a Parte 1-2 do EC1 (CEN, 2010a), deve-se considerar as ações térmicas de um incêndio localizado nos casos em que é improvável a ocorrência de flashover. Porém, segundo Jean-Marc Franssen e Paulo Vila Real, o termo “improvável” é enganador e não pode ser transformado numa regra geral, pois se o modelo utilizado na análise da estrutura é um modelo pós-flashover, como por exemplo as curvas nominais e os modelos de uma zona, significa que nestes casos os fogos localizados não são considerados. Assim, a expressão mais correta seria “deve-se considerar as ações térmicas de um incêndio localizado nos casos em que o flashover ainda não ocorreu” (Franssen et al., 2007; Franssen and Vila Real, 2010).

O Anexo C do EC1 (CEN, 2010a) apresenta dois modelos para avaliar a ação térmica de um incêndio localizado, cuja utilização depende da dimensão máxima da chama ( $L_f$ ) e da altura do compartimento ( $H$ ). Assim, o comprimento das chamas é dado por:

$$L_f = 0,0148 Q^{0,4} - 1,02 D \quad [\text{m}] \quad (3.77)$$

Considera-se que as chamas têm dimensão máxima quando o diâmetro do incêndio é máximo, então:

$$L_{f,max} = 0,0148 Q^{0,4} - 1,02 D_{max} \quad [\text{m}] \quad (3.78)$$

Se a chama não atinge o teto do compartimento aplica-se o modelo de Heskestad (CEN, 2010a; Heskestad, 1983; SFPE, 2002). Caso contrário aplica-se o modelo de Hasemi (CEN, 2010a; Hasemi and Tokunaga, 1984; Ptchelintsev et al., 1995).

#### 3.3.4.1 Modelo de Heskestad

Quando a chama não atinge o teto de um compartimento ( $L_{f,max} < H$ ) ou no caso de um incêndio ao ar livre, a temperatura  $\theta_{(z)}$  na pluma ao longo do eixo vertical de simetria da chama é dada por:

$$\theta_{(z)} = 20 + 0,25 Q_c^{2/3} (z - z_0)^{-5/3} \leq 900 \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.79)$$

em que:

$Q_c$  – parte convectiva da taxa de libertação de calor do incêndio [W], com  $Q_c = 0,8 Q$  na ausência de mais informação;

$z$  – altura ao longo do eixo da chama (ver figura 4.5) [m];

$z_0$  – origem virtual da fonte de fogo, calculada a partir da equação 4.35 [m].

$$z_0 = 0,00524 Q^{0,4} - 1,02 D \quad (3.80)$$

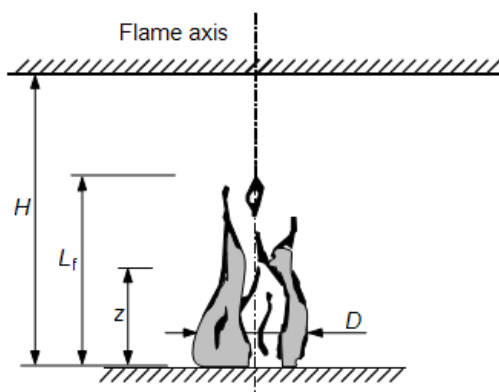


Figura 3.25 – Esquema do modelo de incêndio localizado de Heskestad (Vila Real and Franssen, 2011)

A Figura 3.26 ilustra um exemplo de uma curva de incêndio obtida a partir do programa Elefir-EN (Vila Real and Franssen, 2011) considerando um compartimento de um edifício de escritórios com área máxima de incêndio igual a 25m<sup>2</sup> e 3m de altura (chama não toca no teto).

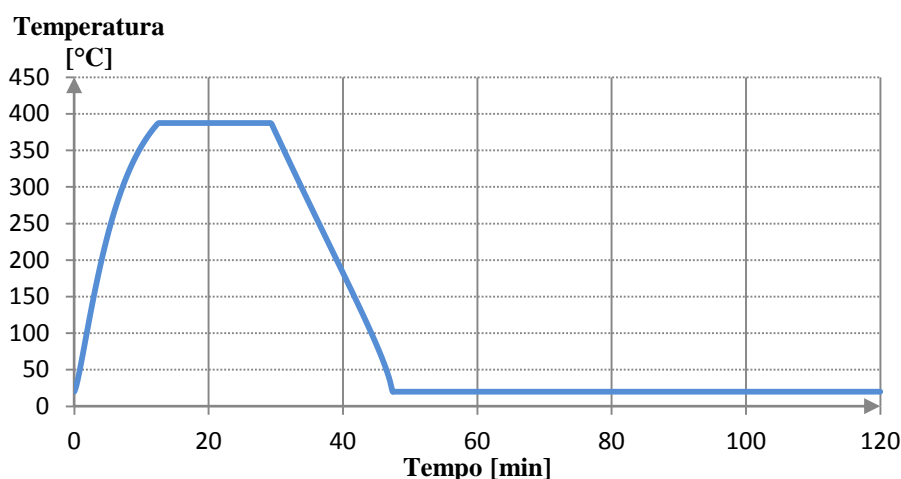


Figura 3.26 – Exemplo de uma curva de incêndio obtida pelo modelo de Heskestad

### 3.3.4.2 Modelo de Hasemi

O método de Hasemi baseia-se nos resultados dos testes efetuados pelo *Building Research Institute* em Tsukuba, no Japão. Este método aplica-se quando a chama atinge o teto de um compartimento ( $L_{f,max} \geq H$ ). A Figura 3.27 esquematiza o modelo de incêndio localizado de Hasemi. Este tipo de modelo aplica-se muito na análise da segurança em situação de incêndio de parques de estacionamento (Haremza et al., 2011; Vila Real et al., 2011).

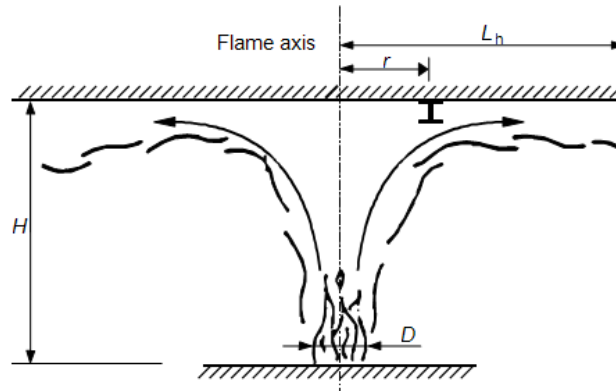


Figura 3.27 – Esquema do modelo de incêndio localizado de Hasemi (Vila Real and Franssen, 2011)

Neste modelo é necessário calcular duas taxas de libertação de calor adimensionais:

$$Q_H^* = Q / (1,11 \times 10^6 H'^{2,5}) \quad [-] \quad (3.81)$$

$$Q_D^* = Q / (1,11 \times 10^6 D^{2,5}) \quad [-] \quad (3.82)$$

O comprimento horizontal da chama no teto  $L_h$  é calculado a partir da equação 3.83.

$$L_h = (2,9 H' (Q_H^*)^{0,33}) - H' \quad [\text{m}] \quad (3.83)$$

A posição vertical da fonte de calor virtual é obtida por:

$$\begin{aligned} z' &= 2,4 D (Q_D^{*2/5} - Q_D^{*2/3}) \quad \text{para } Q_D^* < 1,0 \\ z' &= 2,4 D (1,0 - Q_D^{*2/5}) \quad \text{para } Q_D^* \geq 1,0 \end{aligned} \quad (3.84)$$

O fluxo de calor  $\dot{h}$  recebido pela unidade de área da superfície exposta ao fogo ao nível do teto é dado por:

$$\begin{aligned} \dot{h} &= 100\,000 && \text{quando } y \leq 0,3 \\ \dot{h} &= 136\,300 - 121\,000 y && \text{quando } 0,3 < y < 1,0 \\ \dot{h} &= 15\,000 y^{-3,7} && \text{quando } y \geq 1,0 \end{aligned} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.85)$$

em que:

$r$  – distância horizontal entre o eixo vertical do incêndio e o ponto no teto em que é calculado o fluxo térmico;

$y$  – parâmetro obtido por:  $y = \frac{r+H+z'}{L_h+H+z'} [-]$ .

O fluxo de calor efetivo  $\dot{h}_{net}$  pode ser obtido pela equação 3.86, considerando que o coeficiente de convecção toma um valor igual a 35.

$$\dot{h}_{net} = \dot{h} - \alpha_c (\theta_m - 20) - \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma [(\theta_m + 273)^4 - 293^4] \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.86)$$

O efeito de um incêndio em que a chama atinge o teto é dado através de um fluxo de calor (ver equação 3.85). Assim, nos casos em que há necessidade de conhecer a evolução da temperatura, é necessário transformar um fluxo de calor numa temperatura equivalente do compartimento. Portanto, considera-se que o acréscimo de temperatura dos gases no compartimento de incêndio ( $\Delta\theta_g$ ) é igual ao acréscimo de temperatura de um perfil metálico fictício não protegido com um fator de massividade elevado (podendo adotar-se  $A_m/V = 10000 \text{ m}^{-1}$ ), sendo calculado, para intervalos de tempo não superiores a 5s, a partir da seguinte expressão (Franssen and Vila Real, 2010; Vila Real et al., 2011):

$$\Delta\theta_g = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.87)$$

A temperatura no compartimento de incêndio é determinada recorrendo a um processo iterativo onde  $\Delta\theta_{g_i}$  é calculado pela equação 3.88 em que  $\dot{h}_{net_i}$  é obtido pela equação 3.89. A temperatura no compartimento é representada por  $\theta_{m_i} = \theta_{m_{(i-1)}} + \Delta\theta_{g_i}$  com  $\theta_{m_0} = 20^\circ\text{C}$  (temperatura ambiente).

$$\Delta\theta_{g_i} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net_i} \Delta t \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.88)$$

$$\dot{h}_{net_i} = \dot{h} - \alpha_c (\theta_{m_{(i-1)}} - 20) - \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma \left[ (\theta_{m_{(i-1)}} + 273)^4 - 293^4 \right] \quad (3.89)$$

Todo este cálculo torna-se bastante mais rápido com a utilização de software apropriado, como por exemplo o programa Elefir-EN (Vila Real and Franssen, 2011).



A Figura 3.28 ilustra um exemplo de uma curva de incêndio obtida pelo programa Elefir-EN (Vila Real and Franssen, 2011) considerando um compartimento de uma livraria com área máxima de incêndio igual a 25m<sup>2</sup> e 3m de altura (chama toca no teto).

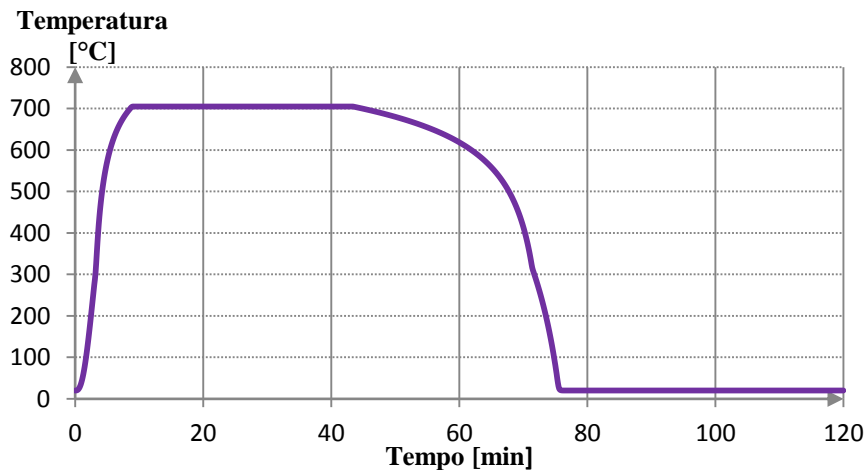


Figura 3.28 – Exemplo de uma curva de incêndio obtida pelo modelo de Hasemi

### 3.3.5 Fogos móveis (*travelling fires*)

Os métodos computacionais para determinar o comportamento estrutural dos edifícios amadureceram ao longo da última década e têm agora capacidade para analisar modelos estruturais mais complexos. Isto levou a perceber que muitos dos edifícios modernos não se comportam da forma que os simples modelos tradicionais de análise estrutural faziam crer. Contudo, os modelos tradicionais de análise de temperaturas em compartimentos em situação de incêndio continuam simplistas e não são representativos da evolução de incêndios em compartimentos de grandes dimensões. Já em 2003, em Cardington, Lennon e Moore chegaram à conclusão que os modelos adotados no EC1 (CEN, 2010a) deveriam ser alvos de melhorias (Lennon and Moore, 2003).

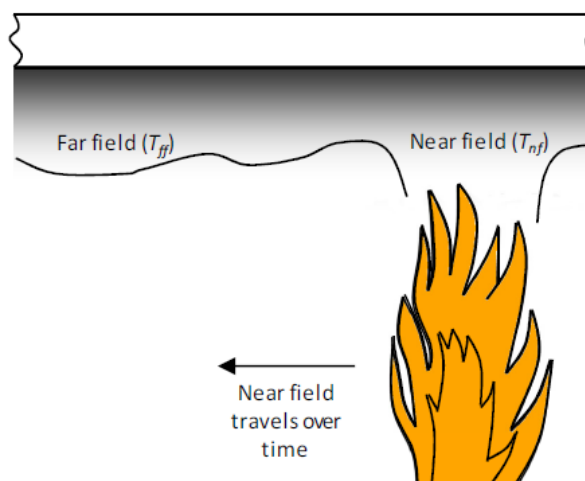
Assim, numa tentativa de retificar os diferentes níveis de sofisticação entre o dimensionamento ao fogo e a consequente análise estrutural, foi proposto um novo método na Universidade de Edinburgh para determinação das temperaturas em compartimentos de incêndio, onde é introduzido um novo conceito: *travelling fires*, designado neste trabalho por fogos móveis (Law et al., 2011; Stern-Gottfried, 2011; Stern-Gottfried et al., 2009).

Uma das principais conclusões obtidas a partir destes estudos refere que o impacto dos fogos móveis na estrutura de um edifício pode ser mais severo que os fogos obtidos

pelas curvas paramétricas adotadas no EC1 (CEN, 2010a), ou seja, os resultados dados pelas curvas tradicionalmente usadas para dimensionamento de estruturas ao fogo não podem ser considerados conservativos (Law et al., 2010).

Considera-se um fogo móvel quando um fogo começa a partir de uma zona do compartimento e depois alastra-se a outras zonas, sendo que entretanto extingue-se onde inicialmente deflagrava. Este tipo de fogos é típico de compartimentos de grandes dimensões.

Este conceito de fogos, ao considerar a temperatura não uniforme no compartimento de incêndio, entra em contraste direto com a base dos atuais métodos de análise de compartimentos em situação de incêndio. Um fogo que arde uniformemente dentro de um grande compartimento poderia gerar altas temperaturas, mas apenas por um período relativamente curto. No entanto, um fogo que se move vai criar temperaturas elevadas longe do fogo (*far field*) e próximo do fogo (*near field*). Assim, um incêndio móvel pode sujeitar a estrutura a altas temperaturas por períodos mais longos. A Figura 3.29 ilustra as duas zonas consideradas num fogo móvel.



**Figura 3.29 – Ilustração da zona próxima das chamas (*near field*) e da zona distante das chamas (*far field*) de um fogo móvel (Stern-Gottfried, 2011)**

Na Figura 3.30 pode ver-se um fogo móvel que inicialmente ardia na extremidade direita do edifício e de seguida foi-se alastrando e extinguindo da direita para a esquerda.



**Figura 3.30 – Exemplo de fogo móvel no edifício da TU Delft (Stern-Gottfried et al., 2009)**

Devido à discrepância entre o comportamento do fogo em incêndios reais e o comportamento do fogo assumido nos métodos de dimensionamento tradicionais, é possível que as práticas atuais para o projeto estrutural não considerem o cenário de incêndio potencialmente pior. A análise estrutural do edifício em situação de incêndio com base numa temperatura não uniforme no compartimento pode detetar falhas na estrutura que a mesma análise baseando-se numa temperatura uniforme no compartimento não detetaria.

Porém, na maioria dos casos os métodos de dimensionamento tradicionais podem ser excessivamente conservadores em comparação com um incêndio real. Portanto, é benéfica a existência de uma metodologia que incorpore a dinâmica real de um incêndio móvel para análise estrutural, permitindo a inovação do projeto estrutural e arquitetónico (Stern-Gottfried et al., 2009).

Em situação de incêndio, as temperaturas não são uniformes na maior parte dos compartimentos, como foi claramente demonstrado numa recente avaliação experimental considerando um cenário de incêndio de pós-flashover (Stern-Gottfried et al., 2010b). Para além disso, na última década ocorreram alguns incêndios, como por exemplo, os incêndios na Torre Windsor (Fletcher et al., 2007), no edifício World Trade Center (Gann, 2005; NIST, 2008) e na Faculdade de Arquitetura da Universidade

Técnica de Delft (Bouwkunde, 2008), que colocaram em evidência que os fogos, em grandes compartimentos, tendem a mover-se horizontalmente ao longo das placas de piso e verticalmente entre placas de pisos diferentes, em vez de queimarem uniformemente. Observações similares foram realizadas nos incêndios no Banco Interestadual de Los Angeles (Routley, 1988) e no One Meridian Plaza (Routley et al., 1991).

Os fogos móveis foram também observados experimentalmente em compartimentos com ventilação não uniforme (Kirby et al., 1994; Stern-Gottfried et al., 2010b; Thomas and Bennets, 1999). Alguns testes mostraram ainda que existe uma grande variação da temperatura mesmo em pequenos compartimentos (Abecassis-Empis et al., 2008; Stern-Gottfried et al., 2010a; Welch et al., 2007).

Com base no que foi referido anteriormente, foi proposto um novo método para estimar as temperaturas no compartimento de incêndio (Law et al., 2011,2010; Stern-Gottfried et al., 2010a). Esta metodologia inclui uma gama ampla de possíveis incêndios, desde fogos que ardem uniformemente até fogos móveis, baseando-se na dinâmica de fogo dentro do edifício.

Ao considerar uma série de incêndios, em vez de apenas um, e dividindo o efeito de um incêndio em duas zonas (a zona próxima das chamas e a zona distante das chamas) em vez de apenas uma zona uniforme, esta metodologia permite considerar um leque completo de possíveis incêndios, o que é importante porque na altura de projetar um edifício é impossível conhecer a natureza exata do incêndio que poderá deflagrar nesse mesmo edifício.

Este método utiliza duas temperaturas diferentes para representar a temperatura no compartimento: uma temperatura mais elevada na zona em chamas (zona próxima) e uma temperatura mais baixa no resto do compartimento (zona afastada).

Os valores máximos de temperatura em pequenos incêndios situam-se entre os 800 e os 1000°C (Audouin et al., 1995), mas em grandes compartimentos podem chegar a 1200°C (Drysdale, 1999). Assim, assumindo o caso mais gravoso, considera-se que a temperatura na zona próxima das chamas é de 1200°C.

O método dos fogos móveis assume que existe uma densidade de carga de incêndio uniforme ao longo do caminho que o fogo vai percorrer e que o fogo queima a uma taxa

de libertação de calor por unidade de área constante. Assim, a taxa de libertação total pode ser calculada por:

$$\dot{Q} = A_f \dot{Q}'' \quad [\text{kW}] \quad (3.90)$$

em que:

$\dot{Q}$  – taxa de libertação de calor [kW];

$A_{fi}$  – área máxima que o incêndio pode atingir [m<sup>2</sup>];

$\dot{Q}''$  – taxa de libertação de calor por unidade de área [kW/m<sup>2</sup>].

Além disso, o tempo de queima local sobre a área de incêndio pode ser calculado por:

$$t_b = \frac{q_{f,d}}{\dot{Q}''} \quad [\text{s}] \quad (3.91)$$

em que:

$t_b$  – tempo de queima [s];

$q_{f,d}$  – densidade de carga de incêndio [MJ/m<sup>2</sup>].

Note-se que o tempo de queima é independente da área de incêndio. Assim, uma área de incêndio de 100% e uma área de incêndio de 1% irão ambas consumir todo o combustível ao longo da área em questão no mesmo tempo,  $t_b$ . Contudo, os fogos móveis movem-se de uma área para outra, sendo por isso o tempo de queima total ao longo do pavimento aumentado. Isto traduz-se numa longa duração de combustão total para incêndios em pequenas áreas.

A temperatura na zona distante das chamas pode ser calculada manualmente ou computacionalmente, após programação. A temperatura máxima no compartimento de incêndio pode ser calculada recorrendo-se à correlação de Alpert (Alpert, 1972; Law et al., 2011):

$$T_{max} = \frac{5,38 (\dot{Q}/r)^{2/3}}{H} + T_{\infty} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.92)$$

em que:

$T_{\infty}$  – temperatura ambiente [°C];

$\dot{Q}$  – taxa de libertação de calor [kW];

$r$  – distância desde o centro do fogo [m];

$H$  – altura do compartimento [m].

Esta correlação foi desenvolvida para fogo estacionário mas é válida para fogos móveis, pois a taxa de propagação das chamas, aproximadamente 0,01 m/s (Alpert 1972), é muito menor do que a velocidade do fumo (aproximadamente 1 m/s). Deste modo, a temperatura da zona distante move-se com o fogo de forma praticamente constante.

Como o fogo vai viajando ao longo do tempo consumindo o combustível disponível no seu caminho, a temperatura do gás adjacente a qualquer elemento estrutural está constantemente a mudar. Assim, para passar esta informação para uma análise estrutural a correlação de Alpert reduz-se a um simples valor característico,  $T_{ff}$ :

$$T_{ff} = \frac{\left[ \int_{r_{nf}}^{r_{ff}} (T_{max})^4 dr \right]^{0,25}}{(r_{ff} - r_{nf})^{0,25}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.93)$$

em que:

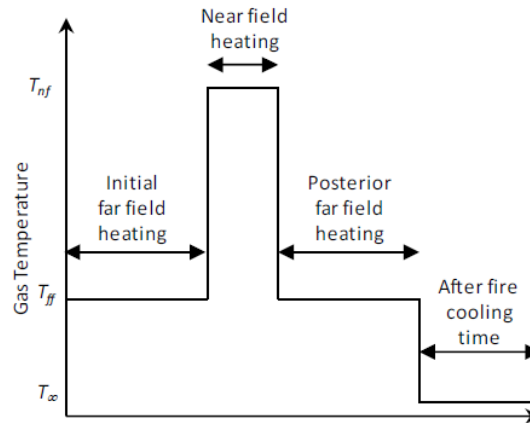
$T_{ff}$  – temperatura na zona distante das chamas [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$T_{max}$  – temperatura máxima no interior do compartimento [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$r_{ff}$  – distância deste o centro do fogo até ao fim da zona distante das chamas [m];

$r_{nf}$  – distância desde o centro do fogo até ao fim da zona próxima das chamas [m].

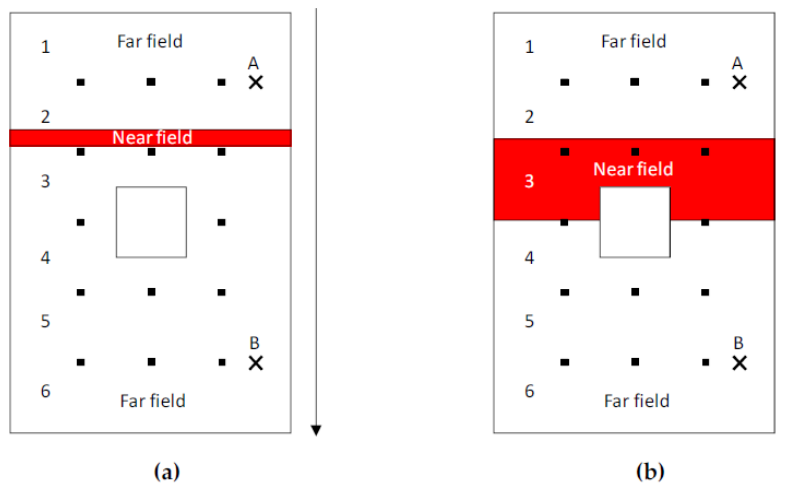
A Figura 3.31 representa a duração das diferentes fases de um fogo móvel num ponto do compartimento de incêndio. Um dado local está inicialmente exposto à temperatura da zona distante das chamas (*far field*), antes do aumento da temperatura com a chegada das chamas até si, ficando então sujeito à temperatura da zona próxima das chamas (*near field*). Depois de todo o combustível existente no local ter sido consumido, o local volta a estar sujeito à temperatura da zona distante das chamas (*far field*) até todo o combustível existente em todo o compartimento ser consumido. Por fim, segue-se a fase em que o compartimento volta à temperatura ambiente.



**Figura 3.31 - Duração das diferentes fases de um fogo móvel num ponto do compartimento de incêndio (Law et al., 2011)**

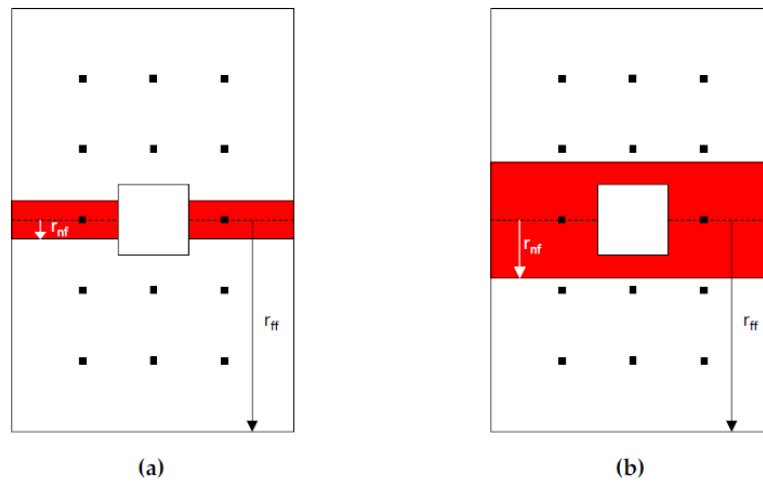
A flexibilidade do método deve-se aos seguintes parâmetros: área de fogo, forma do fogo e caminho seguido pelo fogo. Supõe-se que, após ter entrado em ignição, qualquer área do pavimento vai queimar uniformemente até todo o combustível ser consumido. O tempo que uma determinada área está a arder pode, portanto, ser simplesmente calculado a partir da densidade de carga e da taxa de libertação de calor.

De forma a poder comparar os fogos móveis com os métodos tradicionais, Stern-Gottfried realizou um estudo em que os fogos moviam-se linearmente de um lado de um pavimento para o outro (Stern-Gottfried, 2011). As dimensões do fogo consideradas foram 1%, 2,5%, 5%, 10%, 25%, 50% e 100% da área do pavimento, como se pode ver na Figura 3.32. Assumiu-se que a densidade de carga de incêndio era 570 MJ/m<sup>2</sup> e a taxa de libertação de calor por unidade de área era 500 kW/m<sup>2</sup>.



**Figura 3.32 – Progressão do fogo móvel ao longo do pavimento: (a) para uma área de 2,5% do pavimento e (b) para uma área de 25% do pavimento (Stern-Gottfried, 2011)**

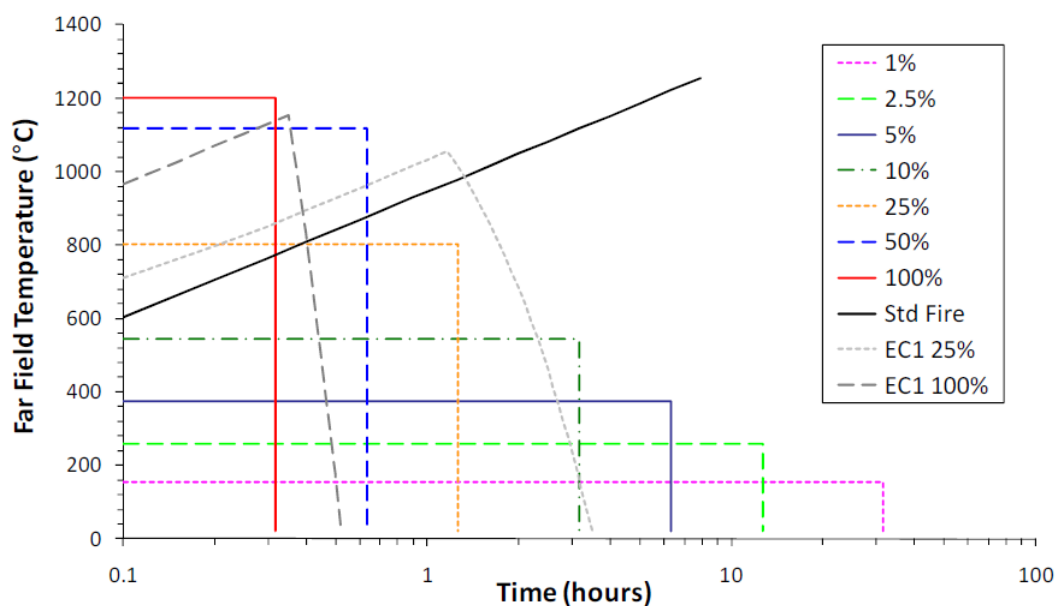
A Figura 3.33 ilustra a medição das distâncias desde o centro do fogo até à zona próxima e distante das chamas ( $r_{nf}$  e  $r_{ff}$ ).



**Figura 3.33 – Medição das distâncias desde o centro do fogo até à zona próxima e distante das chamas para dois fogos com tamanhos diferentes: (a) pequeno e (b) grande (Stern-Gottfried, 2011)**

As condições de combustão acima referidas resultaram num tempo de queima local de 19 min, ou seja, cada área individual demora 19 minutos a consumir toda a carga de incêndio. Assim, considerando que o fogo se move linearmente, o tempo total de queima de 50% da área do pavimento (duas fases de queima) é igual a  $19 \times (100/50) = 38$  min. Por exemplo, num incêndio com dimensão de 25% da área do pavimento existem quatro fases, durando no total 76 min, sendo a temperatura na zona distante das chamas igual a 805 °C. A temperatura na zona próxima das chamas é considerada igual à temperatura das chamas, ou seja, 1200°C. Por sua vez, o incêndio com dimensão de 2,5% da área do pavimento teve duração total de 760 min, apresentando uma temperatura na zona distante das chamas de 325°C. A Figura 3.34 mostra a duração e a temperatura na zona distante das chamas para cada uma das áreas de pavimento em estudo, salientando-se o facto de para uma área de 100% a temperatura na zona distante das chamas ser igual à temperatura na zona próxima das chamas.





**Figura 3.34 – Gráfico da temperatura na zona distante das chamas em função do tempo, para diversas áreas de pavimento a arder (Stern-Gottfried, 2011)**

As restantes três curvas temperatura-tempo presentes na Figura 3.34 correspondem à curva de incêndio padrão ISO 834 e às curvas paramétricas adotadas no Eurocódigo para 25% e 100% de quebra do vidro ao longo da fachada. A curva onde o vidro da fachada quebra na totalidade resulta de um incêndio onde são atingidas grandes temperaturas num curto espaço de tempo devido à existência de oxigénio em quantidades suficientes para sustentar o incêndio. Em contrapartida, num incêndio onde o vidro das fachadas não quebra na totalidade, a curva temperatura-tempo apresenta um pico de temperatura inferior e uma duração maior no tempo.

Os diferentes estudos realizados na Universidade de Edimburgo levaram a concluir que os pequenos incêndios tendem a mover-se ao longo de um pavimento por longos períodos de tempo com temperaturas na zona distante das chamas relativamente baixas, enquanto que fogos de maior dimensão apresentam temperaturas na zona distante das chamas mais elevadas e uma duração inferior (Stern-Gottfried, 2011). Esta nova metodologia foi aplicada a estruturas de aço e betão e verificou-se que os incêndios têm um impacto considerável sobre essas estruturas e que as abordagens de projeto convencionais não podem, como foi referido anteriormente, ser consideradas conservativas. Os resultados indicam que os incêndios médios, entre 10% e 25% da área do pavimento, são os mais gravosos para a estrutura de um edifício.

### **3.4 Modelos de incêndio avançados**

#### **3.4.1 Modelos de zona**

Os modelos de zona são modelos que podem ser usados para avaliar o desenvolvimento da temperatura num compartimento de incêndio e, em modelos de multi-compartimentos, pode-se avaliar também o desenvolvimento da temperatura nos compartimentos adjacentes. Consistem na aplicação de programas numéricos que, baseando-se na hipótese de que a temperatura é uniforme em cada zona do compartimento, calculam o desenvolvimento da temperatura dos gases em função do tempo, integrando as equações diferenciais que expressam a conservação de massa e a conservação de energia para cada zona do compartimento (Franssen and Vila Real, 2010; Vassart et al., 2007).

Para além da evolução da temperatura dos gases no compartimento, estes modelos também facultam informações adicionais como as temperaturas nas paredes ou a velocidade dos gases através das aberturas.

Os parâmetros necessários para aplicar um modelo de zona são:

- Informações geométricas, como as dimensões do compartimento, as aberturas e a disposição dos elementos de compartimentação;
- Propriedades dos materiais constituintes das paredes;
- Dados de incêndio, como as curvas RHR, a taxa de pirólise e o calor de combustão do combustível.

As aberturas têm um papel essencial pois permitem a entrada de ar que alimenta o incêndio. Mas, enquanto que nas curvas paramétricas todas as aberturas eram representadas pelo fator de abertura  $O$ , nos modelos de zona cada abertura individual tem de ser representada com as suas próprias dimensões e posição, sendo consideradas as aberturas tanto nas paredes como no teto. Pode-se considerar ainda que no início do incêndio algumas aberturas estavam fechadas mas, devido à intervenção do homem ou a partir de determinada temperatura, acabam por partir. Se necessário também poderá ser considerada a ventilação forçada.

Enquanto que nas curvas de incêndio paramétricas as paredes do compartimento eram representadas pelo parâmetro  $b$ , nos modelos de zona cada parede deve ser representada individualmente, assim como os diferentes materiais que as compõem.

Os modelos mais utilizados são os modelos de uma zona e os modelos de duas zonas. Um programa muito utilizado na análise da ação térmica baseado neste tipo de modelos é o programa OZone desenvolvido na Universidade de Liège, na Bélgica (Cadorin et al, 2000, 2003a, 2003b).

#### **3.4.1.1 Modelos de uma zona**

Nos modelos de uma zona admite-se que o incêndio está desenvolvido em todo o compartimento, ou seja, representa-se uma situação pós-flashover, onde se considera a temperatura uniforme em todo o compartimento. Alguns modelos podem começar num modelo de duas zonas e terminar num modelo de uma zona, representando a situação pré-flashover e pós-flashover.

#### **3.4.1.2 Modelos de duas zonas**

Quando o tamanho do fogo é pequeno comparado com as dimensões do compartimento onde este se desenvolve, a hipótese de temperatura uniforme no compartimento não é válida. Nestes casos, considera-se outra hipótese baseada na observação de que existe uma acumulação de produtos numa camada superior onde a temperatura é bastante elevada. Assim, os modelos de duas zonas consideram que o compartimento se encontra dividido em duas camadas, uma camada superior a temperatura elevada e uma camada inferior onde a temperatura permanece mais baixa, admitindo-se que a temperatura é uniforme em cada uma das zonas.

Numa análise baseada neste tipo de modelo, com ajuda de software específico, determina-se a temperatura do gás em cada uma das duas camadas consideradas, assim como as temperaturas das paredes e o fluxo através das aberturas. A evolução da espessura da camada ao longo do tempo é um resultado bastante importante, visto que a espessura da camada mais baixa, que permanece a baixa temperatura e não contém nenhum produto da combustão, é muito importante para avaliar o grau de segurança do compartimento para os ocupantes.

A Figura 3.35 esquematiza um compartimento modelado por um modelo de duas zonas.

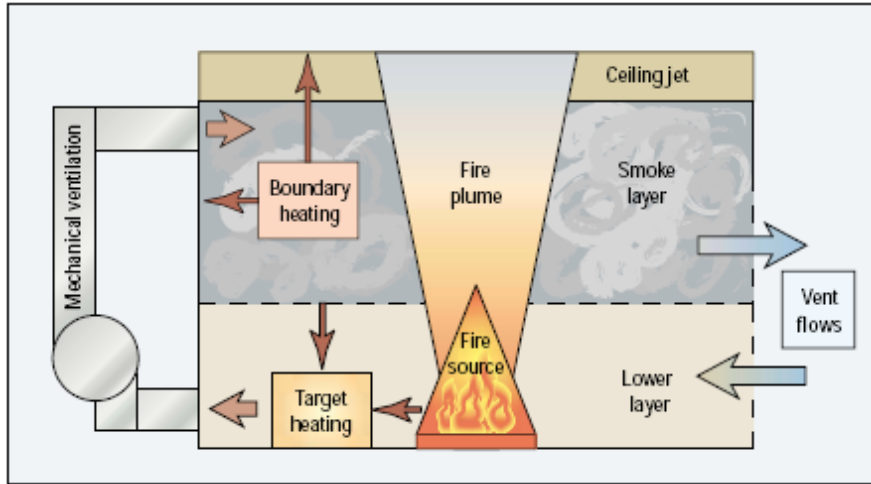


Figura 3.35 – Compartimento num modelo de duas zonas (Mowrer, 2002)

A Figura 3.36 é o exemplo de uma situação simples onde apenas ocorrem trocas de massa e energia do compartimento com o exterior. Mas este tipo de modelos é capaz de analisar edifícios mais complexos onde existem trocas com outros compartimentos do edifício e com o exterior. Isto é de interesse particular para analisar a propagação de fumo do compartimento de origem para outros compartimentos adjacentes. Tal situação, estudada a partir de modelos de duas zonas multi-compartimentos, é descrita na Figura 3.37.

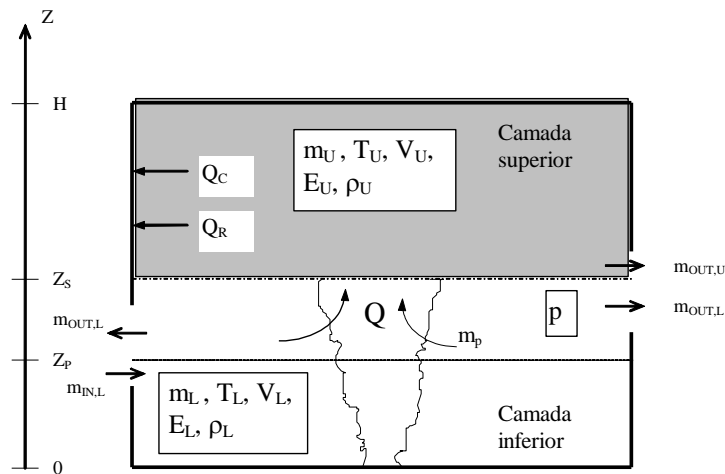


Figura 3.36 – Compartimento num modelo de duas zonas (Vassart et al., 2007)

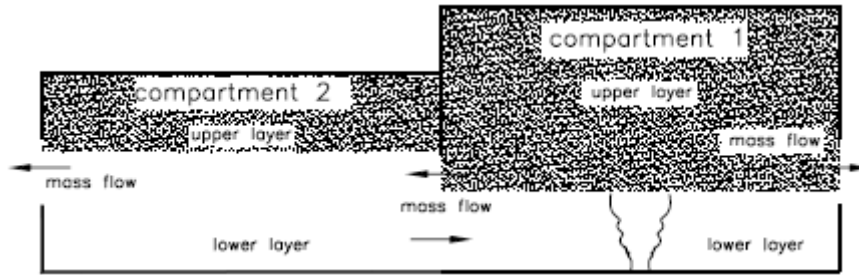


Figura 3.37 – Compartimento num modelo de duas zonas multi-compartimentos (Vassart et al., 2007)

O programa OZone permite obter as temperaturas no compartimento de incêndio, obtendo-se um gráfico da temperatura em função do tempo semelhante ao da Figura 3.38.

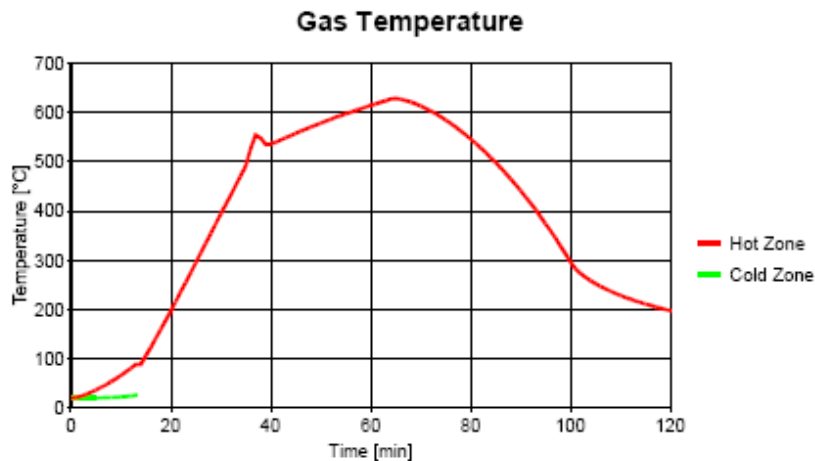


Figura 3.38 – Gráfico da temperatura em função do tempo considerando um compartimento de duas zonas obtido pelo programa OZone (Vila Real and Lopes, 2010)

### 3.4.2 Modelos de campo (CFD)

Os modelos de campo baseados na mecânica dos fluidos computacional (CFD) são muito complexos e morosos para serem regularmente utilizados como método de cálculo das temperaturas num compartimento em situação de incêndio. Contudo, na última década estes têm-se tornado cada vez mais populares. Baseiam-se na divisão do compartimento em várias células, para as quais as equações de Navier-Stokes são resolvidas, produzindo um variadíssimo leque de resultados a um nível bastante detalhado, como, por exemplo, temperatura, pressão, velocidade, componentes químicos e obstrução ótica em cada célula (Franssen and Vila Real, 2010; Hasib et al., 2007).

Estes modelos são mencionados no EC1 (CEN, 2010a) sem qualquer tipo de recomendação. A sua utilização exige utilizadores com grande experiência e computadores poderosos equipados com software específico, nomeadamente o programa FDS (ver Figura 3.39) desenvolvido no NIST (McGrattan and Forney, 2001).

Para a utilização dos resultados produzidos no FDS no dimensionamento estrutural de edifícios ou para comparação desses resultados com outros programas que se baseiam em métodos diferentes, utiliza-se o conceito da *Adiabatic Surface Temperature*. Um estudo recente demonstra claramente que o conceito da *Adiabatic Surface Temperature* é um parâmetro simples para descrever as complexas condições convectivas e radiativas a que a superfície de um elemento está exposta durante o fogo (Wickstrom et al., 2010). Assim, a *Adiabatic Surface Temperature* é uma forma eficaz de transferir os resultados térmicos de uma simulação ao fogo para uma análise térmica e estrutural (Duthinh et al., 2008).

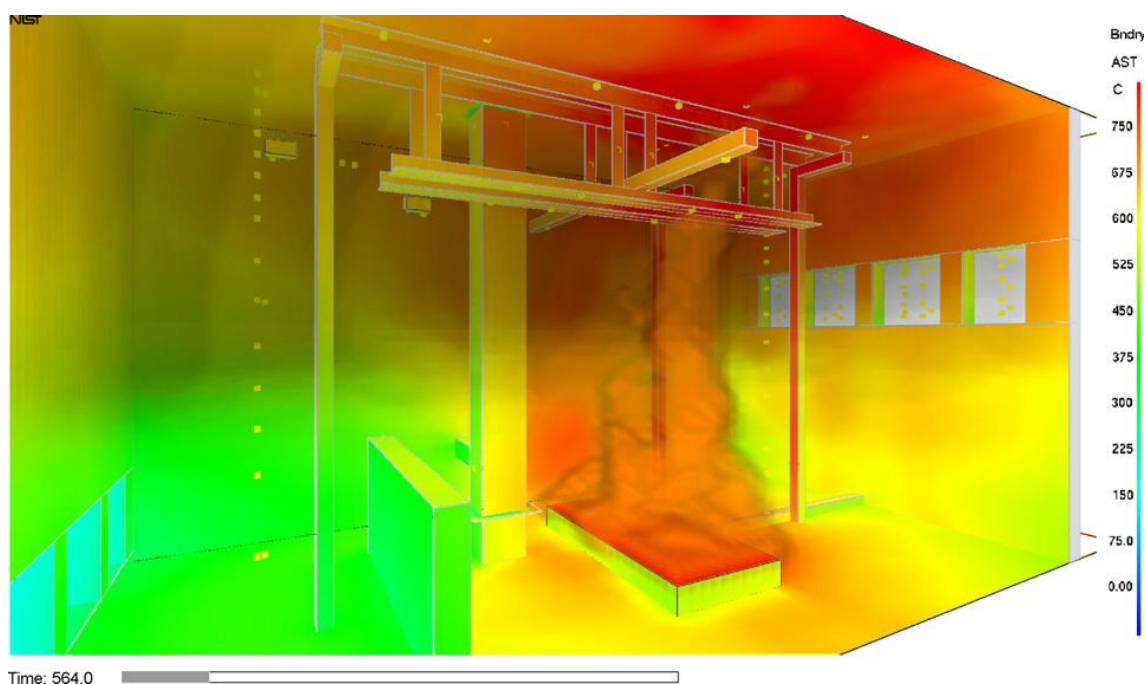


Figura 3.39 – Exemplo da variação da temperatura ao longo do tempo usando o programa FDS (Duthinh et al., 2008)

---

## *Capítulo 4*

*Análises comparativas da evolução da  
temperatura num compartimento de  
incêndio*

## **Capítulo 4    Análises comparativas da evolução da temperatura num compartimento de incêndio aplicando as diferentes metodologias**

Neste capítulo serão realizados diferentes estudos com vista a melhorar a compreensão dos principais parâmetros que influenciam a evolução da temperatura num compartimento em situação de incêndio. As diferentes análises efetuadas serão baseadas na curva de incêndio padrão e em alguns dos modelos de incêndio natural descritos ao longo do Capítulo 3 desta dissertação, dos quais se destacam as curvas paramétricas, os modelos de zona e os modelos de campo (CFD).

Nas diversas análises que serão efetuadas procurar-se-á estudar diversos parâmetros característicos do compartimento de incêndio, como por exemplo as aberturas e a área. A altura do compartimento é também um parâmetro a ter em conta, mas não será tida em consideração neste estudo, tomar-se-ão os valores mais habituais do pé-direito dos edifícios, 3 m.

### **4.1    Influência da área e do fator de abertura**

O propósito deste estudo passa pela avaliação da influência da área e do fator de abertura na temperatura de um compartimento em situação de incêndio, usando-se três abordagens diferentes: as curvas paramétricas adotadas no EC1 com recurso ao programa Elefir-EN, o modelo de duas zonas usando o programa OZone e as curvas BFD. As curvas paramétricas alemãs serão abordadas no ponto 4.3 deste capítulo.

#### **4.1.1    Considerações gerais**

Neste estudo considerou-se um compartimento tipo com 3 m de altura e área variável (ver Tabela 4.1), sendo a envolvente constituída por alvenaria de tijolo de 0.20 m de espessura com condutibilidade térmica de 0.7 W/mK. O fator de abertura fez-se variar para os seguintes valores: 0.02, 0.06, 0.10, 0.14 e 0.18 m<sup>0.5</sup>. Quanto ao tipo de ocupação, admitiu-se que o compartimento representava uma habitação com valor de cálculo da densidade de carga de incêndio igual a 758.4 MJ/m<sup>2</sup>.



Tabela 4.1 – Geometria dos vários compartimentos em estudo

Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)	Área de incêndio (m <sup>2</sup> )
5	5	3	25
10	5		50
10	10		100
20	10		200
25	20		500

Note-se que no programa OZone considerou-se que as aberturas estavam totalmente abertas e na construção das curvas BFD considerou-se o compartimento não isolado.

#### 4.1.2 Discussão de resultados

Neste caso de estudo foram produzidos diversos gráficos que se encontram no Anexo A deste documento, a partir dos quais se obteve as conclusões aqui apresentadas, sendo que neste ponto apenas serão colocados alguns dos gráficos exemplificativos das conclusões obtidas.

##### (i) Variação da área do compartimento de incêndio

Relativamente à variação da área do compartimento de incêndio, neste caso de estudo pode-se concluir que quanto maior a área de incêndio, maior a duração do incêndio, mais tarde é atingido o pico de temperatura no compartimento de incêndio e mais alto é esse pico, traduzindo-se num incêndio mais severo (ver Figura 4.1 e Figura 4.2). Porém, é importante salientar que quanto menor a área de incêndio, maiores são as temperaturas nos instantes iniciais, o que pode traduzir-se em menores resistências ao fogo (R30, R60, R90, etc.) dos elementos que possivelmente possam constituir a estrutura do edifício.

Estas conclusões foram obtidas a partir dos resultados dos programas Elefir-EN e OZone, visto que não é possível retirar conclusões gerais das curvas BFD pois os resultados não são homogêneos, variando de acordo com o fator de abertura do compartimento. Estes podem ser consultados com mais pormenor no Anexo A.

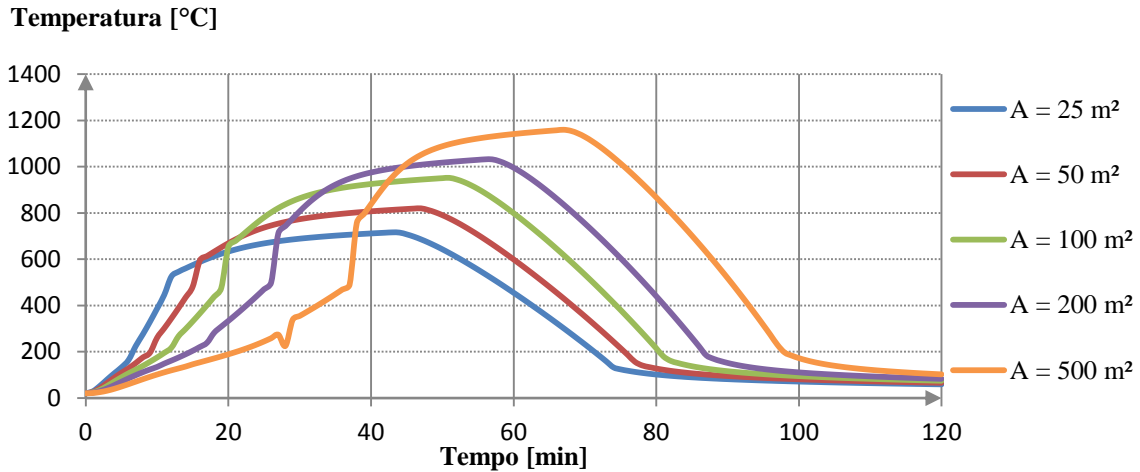


Figura 4.1 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para diferentes áreas de um compartimento com fator de abertura de  $0.10 \text{ m}^{0.5}$  usando um modelo de duas zonas no programa OZone

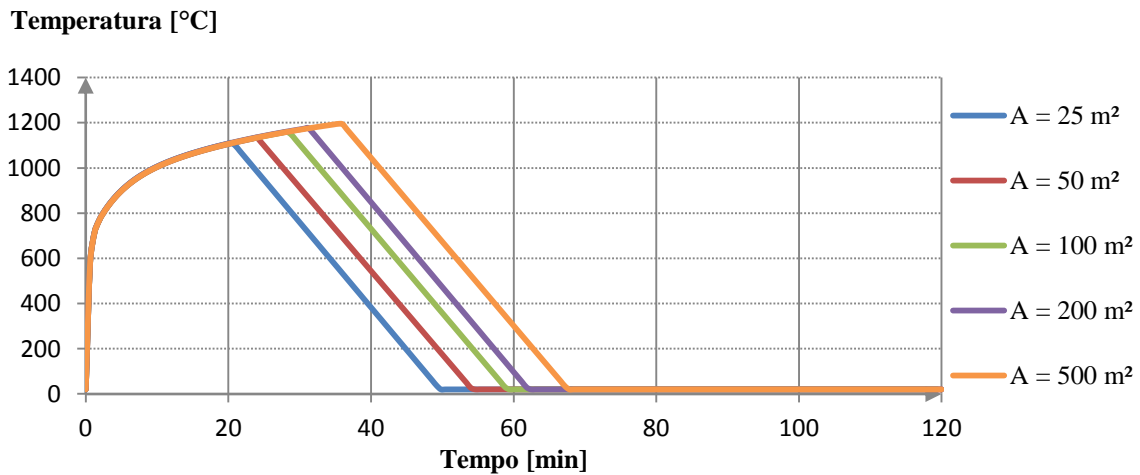


Figura 4.2 – Curvas paramétricas que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para diferentes áreas de um compartimento com fator de abertura de  $0.10 \text{ m}^{0.5}$  obtidas usando o programa Elefir-EN

### (ii) Variação do fator de abertura

Como já vimos anteriormente, fatores de abertura baixos levam a incêndios controlados pela ventilação, pois a entrada de oxigénio é insuficiente para sustentar o incêndio. Por outro lado, fatores de abertura elevados levam a incêndios controlados pela carga de incêndio, onde nem todo o oxigénio que entra no compartimento é usado na combustão.

Assim, o oxigénio existente no compartimento pode alimentar o incêndio ou ter o papel inverso, ou seja, há uma gama de valores que o fator de abertura do compartimento pode assumir que conduzem a um incêndio mais severo. No estudo realizado, essa gama situa-se entre  $0.06$  e  $0.10 \text{ m}^{0.5}$ .

Logicamente que quanto mais baixo for o fator de abertura do compartimento mais longo será o incêndio, pois não existe oxigênio suficiente no compartimento para o sustentar, demorando mais tempo até que a carga de incêndio seja toda consumida. Neste tipo de incêndios em que o compartimento tem fator de abertura muito baixo, o pico de temperatura é atingido bastante mais tarde quando comparado com incêndios em compartimentos com fatores de abertura mais altos.

Por fim, pode-se concluir que compartimentos com fator de abertura alto levam a incêndios mais curtos e menos severos, como se pode ver na Figura 4.3 e na Figura 4.4.

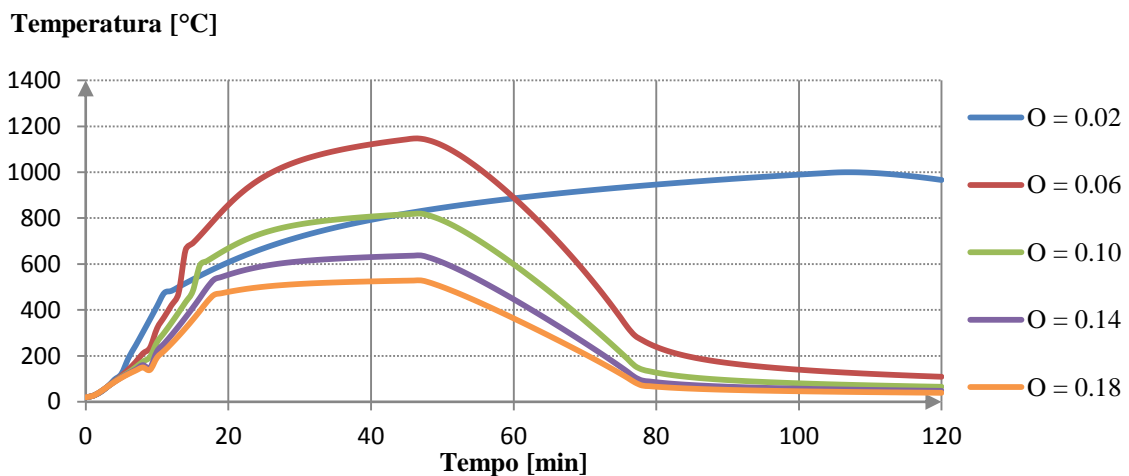


Figura 4.3 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para diferentes fatores de abertura de um compartimento com área igual a 50 m<sup>2</sup> usando um modelo de duas zonas no programa OZone

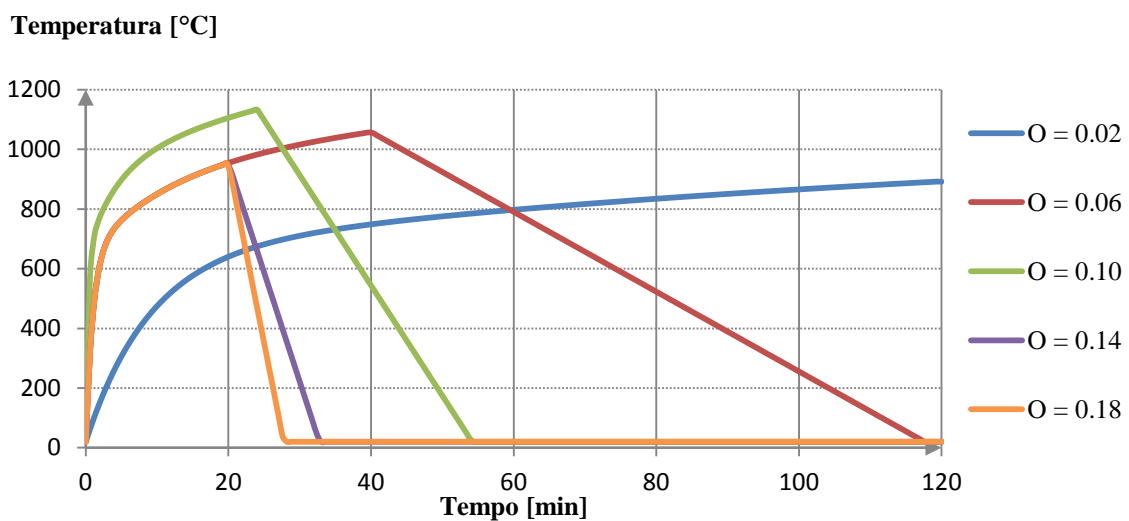


Figura 4.4 – Curvas paramétricas que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para diferentes fatores de abertura de um compartimento com área igual a 50 m<sup>2</sup> obtidas usando o programa Elefir-EN

**(iii) Comparação entre os diferentes métodos utilizados**

Neste estudo foram usadas três abordagens diferentes, dois tipos de curvas paramétricas (as curvas adotadas no EC1 e as curvas BFD) e um modelo de duas zonas. Comparando os resultados obtidos, conclui-se que para compartimentos com fator de abertura até  $0.06 \text{ m}^{0.5}$  a abordagem que se traduz num incêndio mais severo é o modelo de duas zonas (ver Figura 4.5). Para a restante gama de fatores de abertura, verifica-se que as curvas paramétricas adotadas no EC1 representam o cenário mais gravoso, como se pode ver na Figura 4.6.

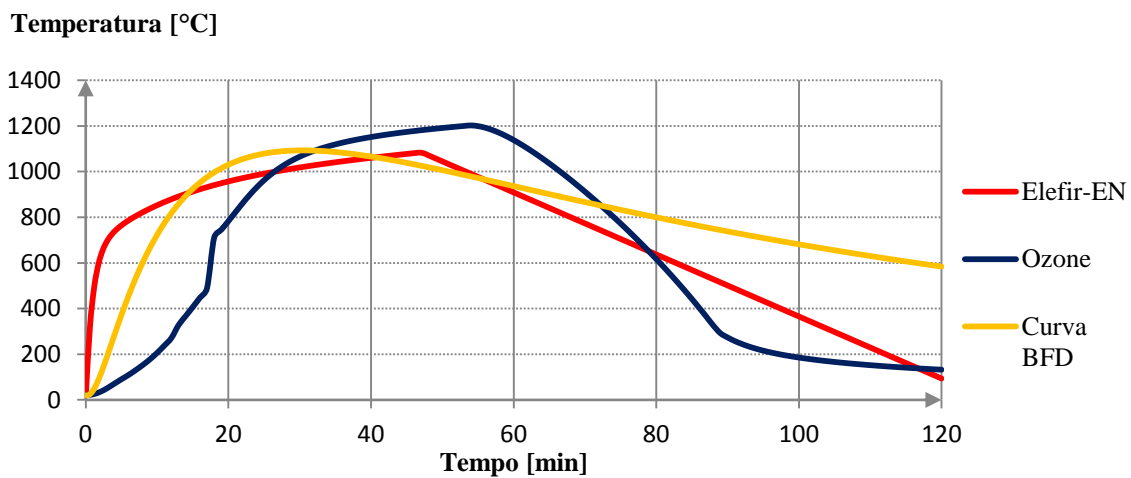


Figura 4.5 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura igual a  $0.06 \text{ m}^{0.5}$  e área igual a  $100 \text{ m}^2$

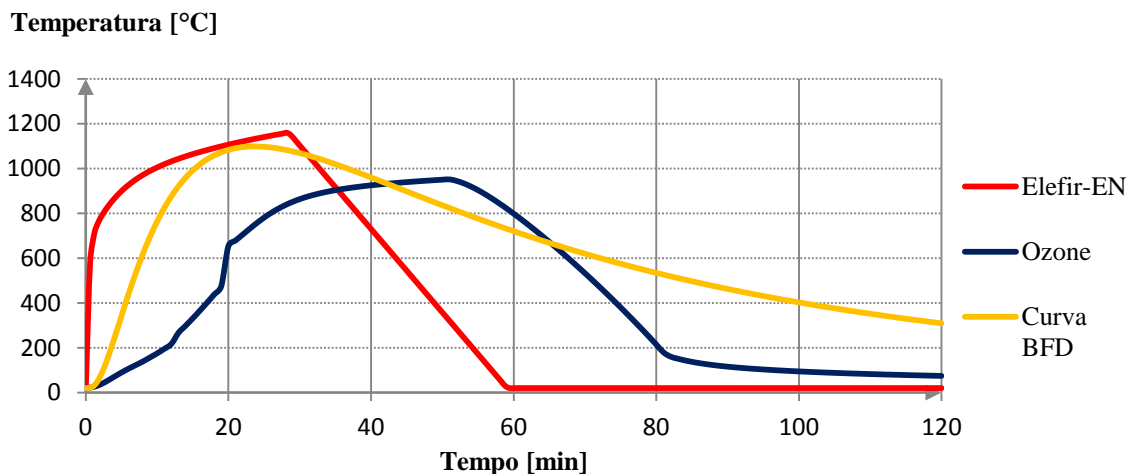


Figura 4.6 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura igual a  $0.10 \text{ m}^{0.5}$  e área igual a  $100 \text{ m}^2$

## 4.2 Influência da quebra do vidro das aberturas

Neste caso de estudo pretende-se avaliar a influência na evolução da temperatura do compartimento da forma como quebra o vidro das aberturas, usando-se um modelo de duas zonas no programa OZone para analisar a temperatura no interior do compartimento em situação de incêndio

### 4.2.1 Considerações gerais

Nesta análise, tal como no caso de estudo anterior, considerou-se um compartimento tipo com 3 m de altura e área variável (ver Tabela 4.1), sendo a envolvente constituída por alvenaria de tijolo de 0.20 m de espessura com condutibilidade térmica de 0.7 W/mK. Para o fator de abertura, admitiu-se a seguinte gama de valores: 0.02, 0.06, 0.10, 0.14 e 0.18 m<sup>0.5</sup>. Quanto ao tipo de ocupação, considerou-se que o compartimento representava uma habitação com densidade de carga de incêndio de cálculo de 758.4 MJ/m<sup>2</sup>. No que diz respeito à quebra do vidro das aberturas, admitiu-se uma quebra gradual (*stepwise variation*) e uma quebra linear (*linear variation*), como se pode ver na Figura 4.7.

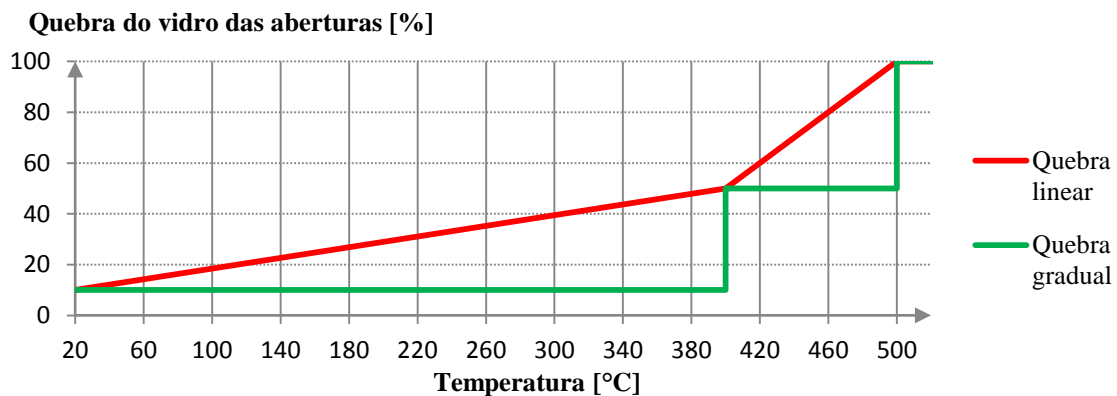


Figura 4.7 – Definição da variação gradual e linear da quebra do vidro das aberturas, parâmetros usados no programa OZone

Para além das duas abordagens referidas anteriormente, também foi analisada a temperatura no compartimento de incêndio considerando as aberturas abertas na sua totalidade, o que corresponde à opção *constant* na definição do tipo de abertura no programa OZone.

Num caso particular deste estudo, para todos os compartimentos referidos na Tabela 4.1 mas considerando sempre o fator de abertura igual a 0.10 m<sup>0.5</sup>, analisou-se a

temperatura no compartimento variando-se a percentagem de abertura das aberturas desde 10 a 100%.

#### 4.2.2 Discussão de resultados

Neste caso de estudo foram produzidos diversos gráficos que se encontram na totalidade no Anexo B deste documento, a partir dos quais se obteve as conclusões aqui apresentadas, sendo que apenas serão aqui colocados alguns dos gráficos exemplificativos dessas mesmas conclusões.

##### (i) Influência da abordagem utilizada

Como foi referido anteriormente, foram consideradas três possibilidades diferentes de quebra do vidro das aberturas:

- *Constant* – as aberturas estão totalmente abertas, ou seja, não existe vidro;
- *Stepwise* – variação gradual da quebra do vidro das aberturas, em que aos 400°C quebra 50% do vidro das aberturas, quebrando na totalidade para 500°C;
- *Linear* – variação linear da quebra do vidro das aberturas.

Com os resultados obtidos pode-se concluir que a abordagem *constant* e *linear* resultam em curvas temperatura-tempo, regra geral, muito semelhantes e que quanto menor o fator de abertura, menos idênticas se tornam as curvas temperatura-tempo obtidas pelas diferentes abordagens utilizadas, sendo que é para fatores de abertura na ordem de  $0.10\text{m}^{0.5}$  que estas são mais parecidas, como se pode ver na Figura 4.8.

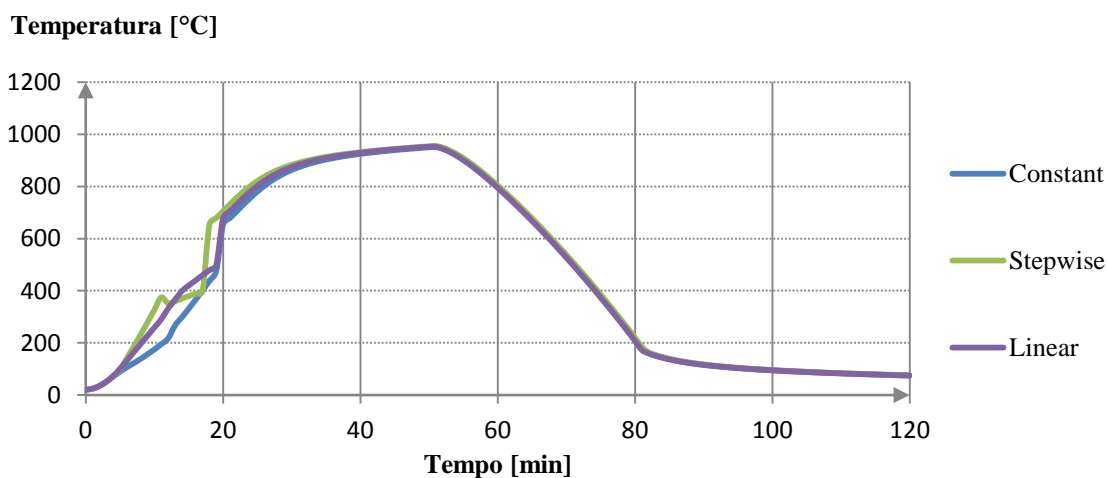
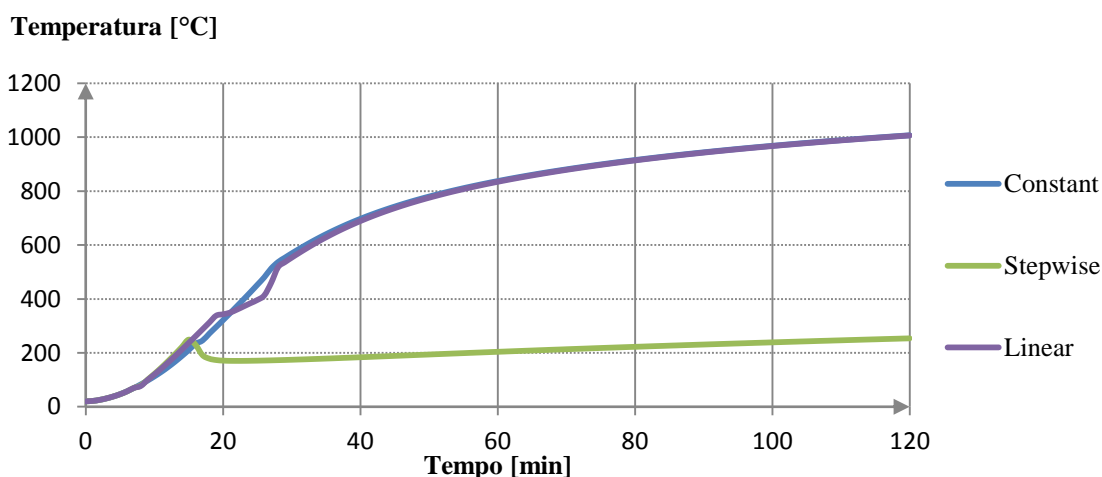


Figura 4.8 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de  $100\text{ m}^2$  e fator de abertura de  $0.10\text{ m}^{0.5}$

Quando se considera uma quebra gradual dos vidros das aberturas e um fator de abertura muito baixo ( $0.02 \text{ m}^{0.5}$ ) não é atingida a temperatura de  $400^\circ\text{C}$ , o que significa que toda a análise é feita considerando que apenas 10% do vidro das aberturas foi quebrado, traduzindo-se num incêndio controlado pela ventilação devido à escassa entrada de oxigénio. Neste caso, as temperaturas no compartimento de incêndio são relativamente baixas e o incêndio é extremamente longo, pois a carga de incêndio vai queimando muito lentamente. A Figura 4.9 representa esta situação.



**Figura 4.9 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de  $500 \text{ m}^2$  e fator de abertura de  $0.02 \text{ m}^{0.5}$**

Para compartimentos com fator de abertura na ordem de  $0.06 \text{ m}^{0.5}$  as curvas temperatura-tempo resultantes da consideração de uma variação gradual ou linear da quebra dos vidros das aberturas são bastante diferentes, pois como o fator de abertura é baixo, há pouca entrada de oxigénio quando a percentagem de vidro quebrado das aberturas é de 10%, o que faz com que demore mais tempo a atingir a temperatura de  $400^\circ\text{C}$ . Este facto traduz-se, quando se considera uma variação gradual da quebra do vidro das aberturas, em incêndios mais brandos nos instantes iniciais onde o pico de temperatura ocorre mais tarde, resultando daí um incêndio mais longo em comparação com outro em que a variação da quebra do vidro das aberturas era linear. A Figura 4.10 é um exemplo desta situação.

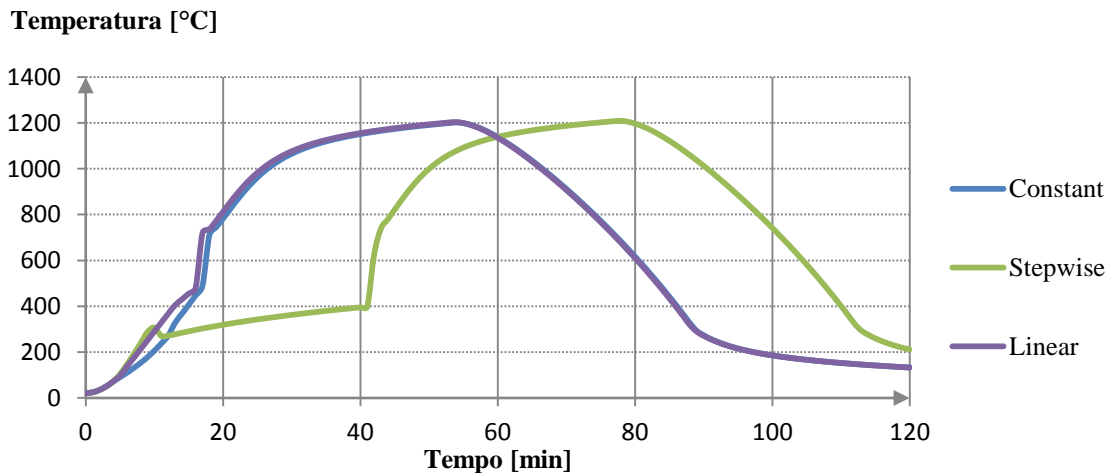


Figura 4.10 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 100 m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06 m<sup>0.5</sup>

(ii) **Influência da área do compartimento**

Neste ponto conclui-se que, qualquer que seja o tipo de quebra do vidro das aberturas considerado, quanto maior a área do compartimento, mais longo e severo é o incêndio que deflagra no interior desse mesmo compartimento, como se pode ver na Figura 4.11.

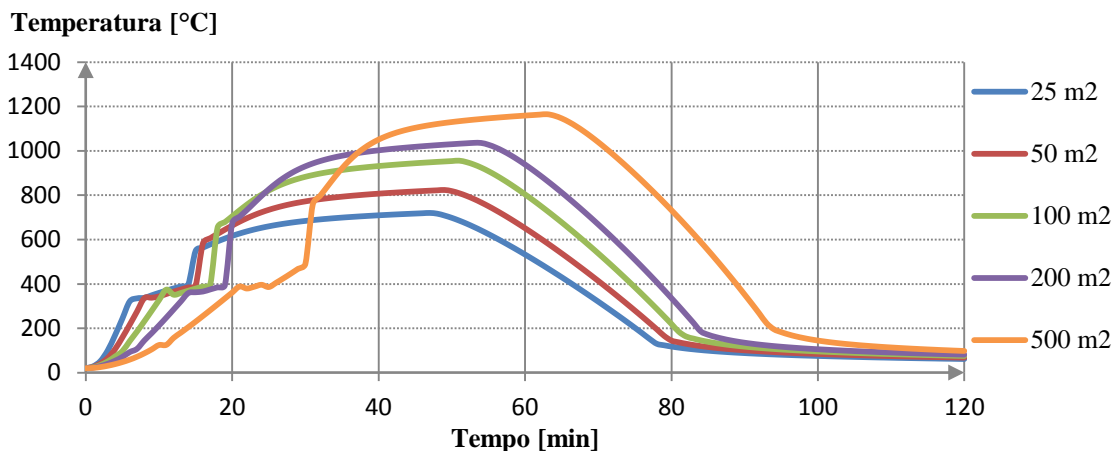


Figura 4.11 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra gradual do vidro das aberturas para um compartimento com fator de abertura de 0.10 m<sup>0.5</sup>

Também se conclui, como se pode ver na Figura 4.12, que o compartimento onde ocorre o incêndio em que a temperatura atinge valores mais elevados é, regra geral, aquele que tem fator de abertura na ordem dos 0.06 m<sup>0.5</sup>, para as três abordagens utilizadas referidas anteriormente. Contudo, é de salientar que os incêndios mais longos acontecem para compartimentos com fator de abertura inferior a 0.06 m<sup>0.5</sup>, devido à ausência de oxigênio suficiente para sustentar o incêndio.



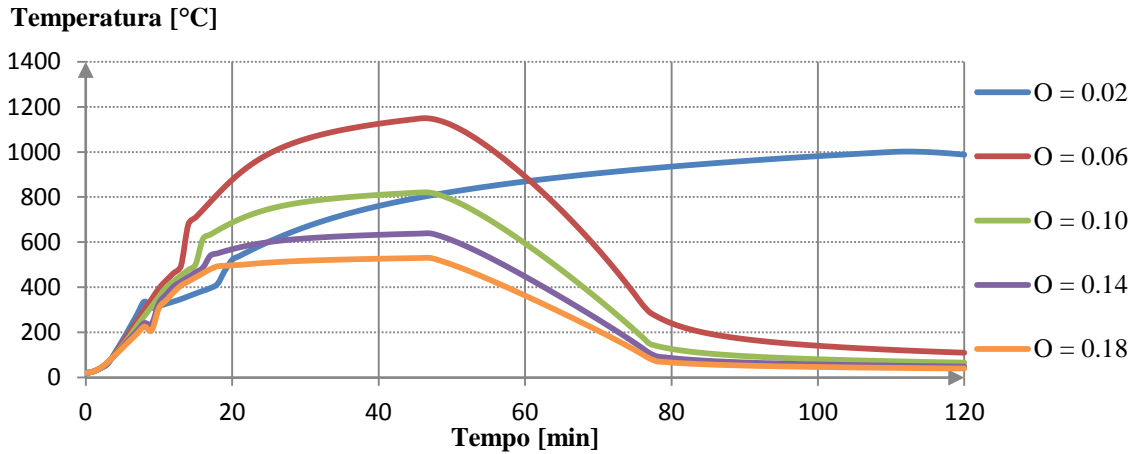


Figura 4.12 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra linear do vidro das aberturas para um compartimento com área igual a 50 m<sup>2</sup>

(iii) Caso particular

Num caso particular deste estudo, onde se analisou a temperatura no compartimento fazendo-se variar a percentagem de abertura das aberturas de 10 a 100%, pôde-se concluir que quanto maior a área do compartimento em análise, maior é a percentagem de abertura das aberturas necessária para atingir as temperaturas mais elevadas no compartimento, designada por percentagem de abertura condicionante, como se pode ver na Tabela 4.2, na Figura 4.13 e na Figura 4.14.

Tabela 4.2 – Variação da percentagem de abertura crítica com a área do compartimento

Área do compartimento (m <sup>2</sup> )	Percentagem de abertura condicionante (%)
25	50
50	60
100	70
200	70
500	80

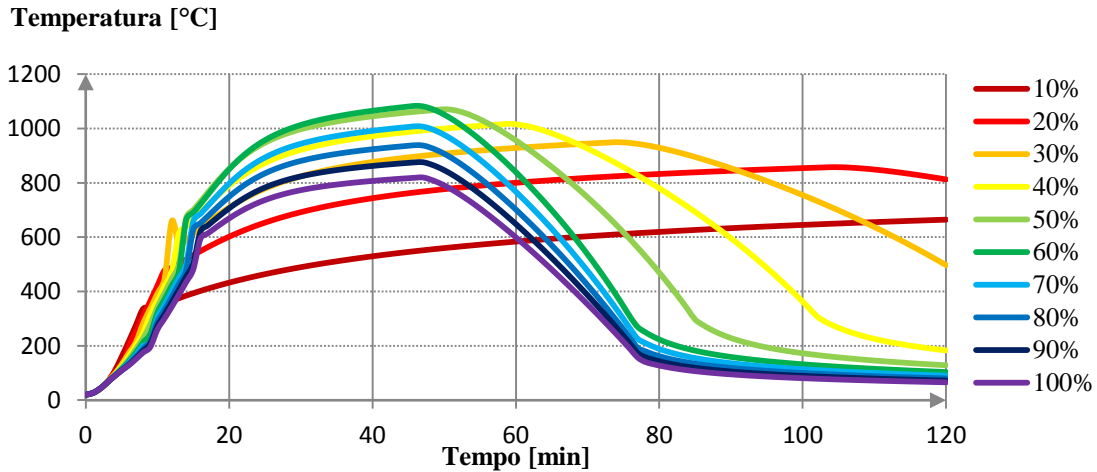


Figura 4.13 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.10 \text{ m}^{0.5}$  e área igual a  $50 \text{ m}^2$

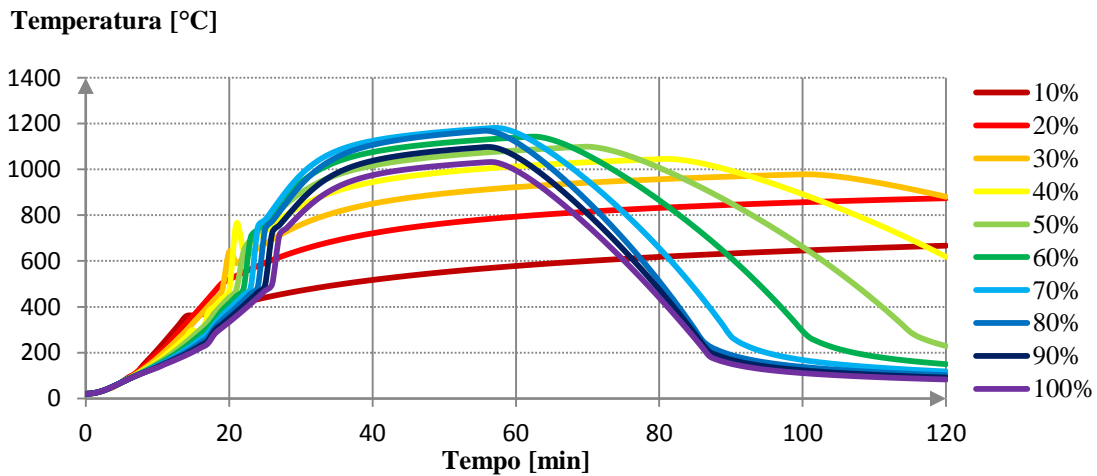


Figura 4.14 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.10 \text{ m}^{0.5}$  e área igual a  $200 \text{ m}^2$

Por fim, como se pode ver na Figura 4.15, é muito importante salientar que a curva temperatura-tempo obtida, considerando uma percentagem de abertura das aberturas igual à percentagem de abertura condicionante, traduz-se num incêndio mais severo do que qualquer uma das abordagens referidas anteriormente (*constant*, *stepwise* e *linear*), sendo que quanto maior a área do compartimento, mais suave será essa diferença.

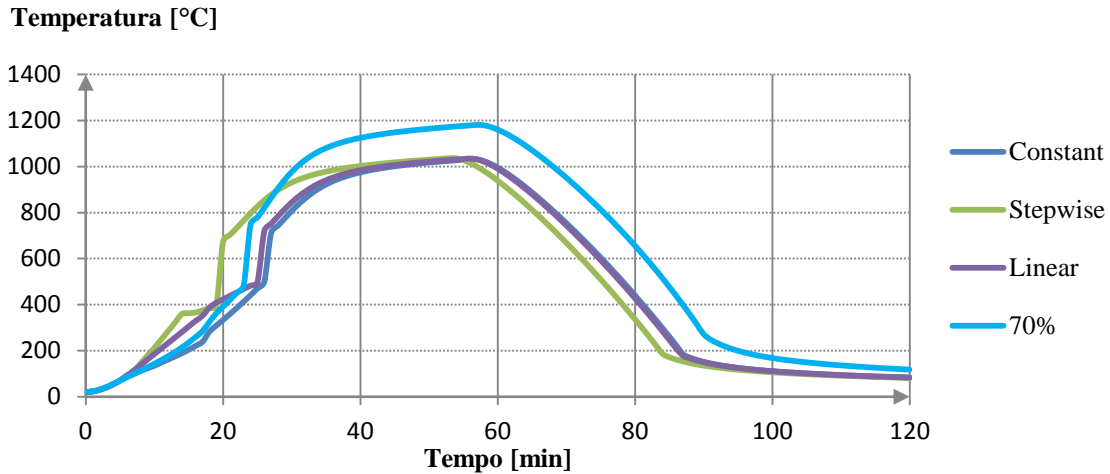


Figura 4.15 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.10 \text{ m}^{0.5}$  e área igual a  $200 \text{ m}^2$

### 4.3 Curvas paramétricas do anexo Nacional Alemão do EC1

Neste subcapítulo pretende-se exemplificar a aplicação das curvas iBMB (Zehfuss and Hosser, 2007), curvas paramétricas adotadas no Anexo A do EC1 Alemão (DIN, 2010), a um edifício de escritórios e compará-las com as curvas paramétricas adotadas no Anexo A do EC1 (CEN, 2010a), obtidas com a ajuda do programa Elefir-EN.

#### 4.3.1 Considerações gerais

Neste estudo admitiu-se um compartimento tipo de 3 m de altura e área igual a  $100 \text{ m}^2$ , com coeficiente  $b = 1500 \text{ J}/(\text{m}^2 \text{ s}^{1/2} \text{ K})$ , que representa as propriedades térmicas da envolvente. Como se pretende exemplificar duas situações diferentes, uma em que o incêndio é controlado pela ventilação e outra em que é controlado pela densidade de carga de incêndio, considerou-se que o compartimento teria fator de abertura igual a  $0.05$  e  $0.10 \text{ m}^{0.5}$ , respetivamente. Quanto ao tipo de ocupação, considerou-se que o compartimento representava um escritório com densidade de carga de incêndio de cálculo de  $511 \text{ MJ}/\text{m}^2$ .

#### 4.3.2 Exemplo 1

A Tabela 4.3 contém os dados necessários para a determinação das curvas paramétricas.

Tabela 4.3 – Dados do exemplo 1

$c$	10.00 m
$l$	10.00 m

<b><math>h</math></b>	3.00 m
<b><math>A_f</math></b>	100.00 m <sup>2</sup>
<b><math>A_t</math></b>	320.00 m <sup>2</sup>
<b><math>A_v</math></b>	16.00 m <sup>2</sup>
<b><math>h_{eq}</math></b>	1.00 m
<b><math>O</math></b>	0.05 m <sup>0.5</sup>
<b><math>q_{f,d}</math></b>	511.00 MJ/m <sup>2</sup>
<b><math>t_\alpha</math></b>	300.00 s
<b><math>b</math></b>	1500 J/(m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> K)

Antes de iniciar os cálculos para a construção da curva paramétrica, é necessário verificar se todas as limitações das curvas iBMB são cumpridas:

- $A_f = 100\text{m}^2 < 400\text{m}^2 \rightarrow \text{Ok};$
- $h = 3\text{m} < 5\text{m} \rightarrow \text{Ok};$
- $12,5\% < \frac{A_v}{A_f} \times 100 = 16,0\% < 50,0\% \rightarrow \text{Ok};$
- $100 \text{ MJ/m}^2 < q_{f,d} = 511 \text{ MJ/m}^2 < 1300 \text{ MJ/m}^2 \rightarrow \text{Ok}.$

De seguida, verifica-se se o incêndio é controlado pela densidade de carga de incêndio ou pela ventilação:

$$Q_{max,f} = 0,25 A_f = 25,0 \text{ MW}$$

$$Q_{max,v} = 1,21 A_v \sqrt{h_{eq}} = 19,36 \text{ MW}$$

$$Q_{max} = \text{MIN}(Q_{max,f} ; Q_{max,v}) = \text{MIN}(25,0 ; 19,36) = 19,36 \text{ MW}$$

Assim, pode-se concluir que o incêndio é controlado pela ventilação.

Para uma densidade de carga de incêndio de referência de 1300 MJ/m<sup>2</sup>:

$$Q_d = 1300 A_f = 130000 \text{ MJ}$$

$$t_1 = t_\alpha \sqrt{Q_{max,v}} = 1320 \text{ s} = 22 \text{ min}$$

$$Q_1 = \frac{t_1^3}{3 t_\alpha^2} = 8518,4 \text{ MJ}$$

$$Q_2 = 0,7 Q_d - \frac{t_1^3}{3 t_\alpha^2} = 82481,6 \text{ MJ}$$

$$t_2 = t_1 + \frac{Q_2}{Q_{max,v}} = 5580,41 \text{ s} \approx 93 \text{ min}$$

$$Q_3 = 0,3 Q_d = 39000 \text{ MJ}$$

$$t_3 = t_2 + \frac{2 Q_3}{Q_{max,v}} = 9609,34 \text{ s} \approx 160 \text{ min}$$

Os valores das ordenadas dos pontos acima calculados são determinados da seguinte forma:

$$\theta_1 = -8,75 \frac{1}{0} - 0,1 b + 1175 = 850^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = (0,004 b - 17) \frac{1}{0} - 0,4 b + 2175 = 1355 > 1340 \rightarrow \theta_2 = 1340^\circ\text{C}$$

$$\theta_3 = -5,0 \frac{1}{0} - 0,16 b + 1060 = 720^\circ\text{C}$$

Para uma densidade de carga de incêndio de cálculo de 511 MJ/m<sup>2</sup>:

$$Q_{x,d} = q_{f,d} A_f = 51100 \text{ MJ}$$

Como  $Q_1 = 8518,4 \text{ MJ} < 0,7 Q_{x,d} = 35770 \text{ MJ}$  vem:

$$t_{2,511} = t_1 + \frac{0,7 Q_{x,d} - Q_1}{Q_{max}} = 2727,62 \text{ s} \approx 45 \text{ min}$$

$$t_{3,511} = t_{2,511} + \frac{0,6 Q_{x,d}}{Q_{max}} = 4311,3 \text{ s} \approx 72 \text{ min}$$

$$\theta_{2,511} = \theta_1 + (\theta_2 - \theta_1) \sqrt{\frac{t_{2,x} - t_1}{t_2 - t_1}} \approx 1132^\circ\text{C}$$

$$\theta_{3,511} = \theta_3 \frac{\log_{10}\left(\frac{t_{3,x}}{60} + 1\right)}{\log_{10}\left(\frac{t_3}{60} + 1\right)} \approx 608^\circ\text{C}$$

O tempo em que possivelmente poderá ocorrer flashover,  $t_{1,fo}$ , em que a taxa de libertação de calor aumenta abruptamente para o máximo possível pode ser determinado por:

$$t_{1,fo} = \sqrt{t_\alpha^2 Q_{fo}} = 876,90 \text{ s} \approx 15 \text{ min}$$

$$Q_{fo} = 0,0078 A_t + 0,378 A_v \sqrt{h_{eq}} = 8,54 \text{ MW}$$

Então, como  $t_{1,fo} = 15 \text{ min} < 22 \text{ min}$ , temos que  $t_1$  passa a ser igual a 15 min.

A Figura 4.16 mostra a comparação entre as curvas paramétricas obtidas de acordo com os anexos Nacional e Alemão do EC1.

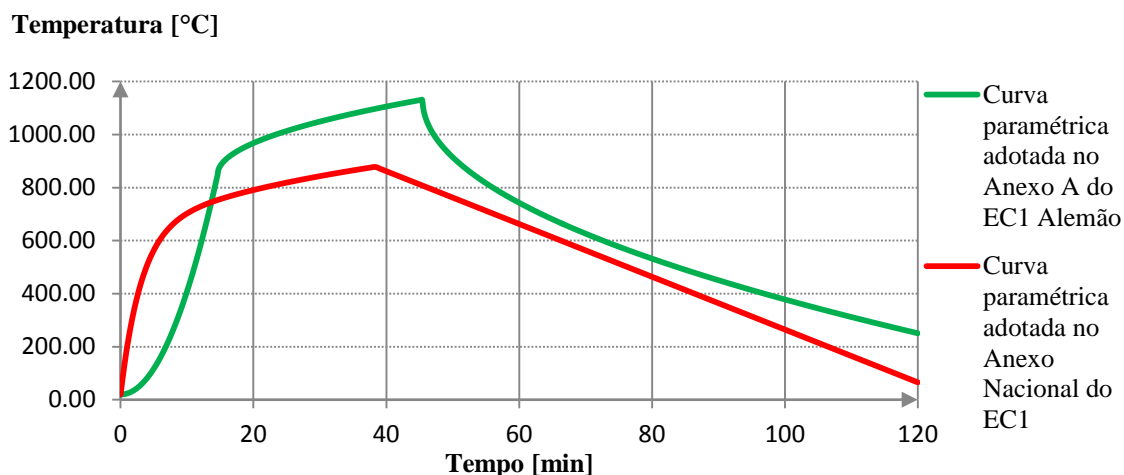


Figura 4.16 – Comparação entre as curvas paramétricas adotadas nos Anexos Alemão e Nacional do EC1 para o exemplo 1 do caso de estudo C

### 4.3.3 Exemplo 2

Com base nos dados da Tabela 4.4, pode-se fazer os cálculos necessários com vista à determinação das curvas paramétricas para o problema em estudo.

Tabela 4.4 – Dados do exemplo 2

$c$	10.00 m
$l$	10.00 m
$h$	3.00 m
$A_f$	100.00 m <sup>2</sup>
$A_t$	320.00 m <sup>2</sup>
$A_v$	32.00 m <sup>2</sup>
$h_{eq}$	1.00 m
$O$	0.10 m <sup>0.5</sup>
$q_{f,d}$	511.00 MJ/m <sup>2</sup>
$t_\alpha$	300.00 s
$b$	1500 J/(m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> K)

Tal como se fez no exemplo 1 deste caso de estudo, a primeira coisa a fazer com vista à construção da curva iBMB é verificar se todas as limitações impostas pelas curvas iBMB são cumpridas:

- $A_f = 100\text{m}^2 < 400\text{m}^2 \rightarrow \text{Ok};$
- $h = 3\text{m} < 5\text{m} \rightarrow \text{Ok};$
- $12,5\% < \frac{A_v}{A_f} \times 100 = 32,0\% < 50,0\% \rightarrow \text{Ok};$
- $100 \text{ MJ/m}^2 < q_{f,d} = 511 \text{ MJ/m}^2 < 1300 \text{ MJ/m}^2 \rightarrow \text{Ok}.$

O segundo passo consiste em verificar se o incêndio é controlado pela densidade de carga de incêndio ou pela ventilação:

$$Q_{max,f} = 0,25 A_f = 25,0 \text{ MW}$$

$$Q_{max,v} = 1,21 A_v \sqrt{h_{eq}} = 38,72 \text{ MW}$$

$$Q_{max} = \text{MIN}(Q_{max,f}; Q_{max,v}) = \text{MIN}(25,0; 38,72) = 25,0 \text{ MW}$$

Assim, como  $Q_{max,f} < Q_{max,v}$ , pode-se concluir que o incêndio é controlado pela densidade de carga de incêndio.

Para uma densidade de carga de incêndio de referência de  $1300 \text{ MJ/m}^2$ , as coordenadas dos pontos referência para a construção da curva iBMB são obtidas da seguinte forma:

$$Q_d = 1300 A_f = 130000 \text{ MJ}$$

$$t_1 = t_\alpha \sqrt{Q_{max,f}} = 1500 \text{ s} = 25 \text{ min}$$

$$Q_1 = \frac{t_1^3}{3 t_\alpha^2} = 12500 \text{ MJ}$$

$$Q_2 = 0,7 Q_d - \frac{t_1^3}{3 t_\alpha^2} = 78500 \text{ MJ}$$

$$t_2 = t_1 + \frac{Q_2}{Q_{max,f}} = 4640 \text{ s} \approx 77 \text{ min}$$

$$Q_3 = 0,3 Q_d = 39000 \text{ MJ}$$

$$t_3 = t_2 + \frac{2 Q_3}{Q_{max,f}} = 7760 \text{ s} \approx 129 \text{ min}$$

Os valores das ordenadas dos pontos acima calculados são determinados da seguinte forma:

$$k = \left( \frac{Q_{max,f}^2}{A_v \sqrt{h_{eq}} (A_t - A_v) b} \right)^{1/3} = 0,0356$$

$$\theta_1 = 24000 k + 20 \approx 875^\circ\text{C}$$

$$\theta_2 = 33000 k + 20 \approx 1196^\circ\text{C}$$

$$\theta_3 = 16000 k + 20 \approx 590^\circ\text{C}$$

Para uma densidade de carga de incêndio de cálculo de 511 MJ/m<sup>2</sup>:

$$Q_{x,d} = q_{f,d} A_f = 51100 \text{ MJ}$$

Como  $Q_1 = 12500 \text{ MJ} < 0,7 Q_{x,d} = 35770 \text{ MJ}$  vem:

$$t_{2,511} = t_1 + \frac{0,7 Q_{x,d} - Q_1}{Q_{max}} = 2430,8 \text{ s} \approx 41 \text{ min}$$

$$t_{3,511} = t_{2,511} + \frac{0,6 Q_{x,d}}{Q_{max}} = 3657,2 \text{ s} \approx 61 \text{ min}$$

$$\theta_{2,511} = \theta_1 + (\theta_2 - \theta_1) \sqrt{\frac{t_{2,x} - t_1}{t_2 - t_1}} \approx 1050^\circ\text{C}$$

$$\theta_{3,511} = \theta_3 \frac{\log_{10}\left(\frac{t_{3,x}}{60} + 1\right)}{\log_{10}\left(\frac{t_3}{60} + 1\right)} \approx 500^\circ\text{C}$$

O tempo em que possivelmente poderá ocorrer flashover,  $t_{1,fo}$ , em que a taxa de libertação de calor aumenta abruptamente para o máximo possível pode ser determinado por:

$$t_{1,fo} = \sqrt{t_\alpha^2 Q_{fo}} = 1145,91 \text{ s} \approx 19 \text{ min}$$

$$Q_{fo} = 0,0078 A_t + 0,378 A_v \sqrt{h_{eq}} = 14,59 \text{ MW}$$

Então, como  $t_{1,fo} = 19 \text{ min} < 25 \text{ min}$ , temos que  $t_1$  passa a ser igual a 19 min.

A Figura 4.17 mostra a comparação entre as curvas paramétricas obtidas de acordo com os anexos Nacional e Alemão do EC1.



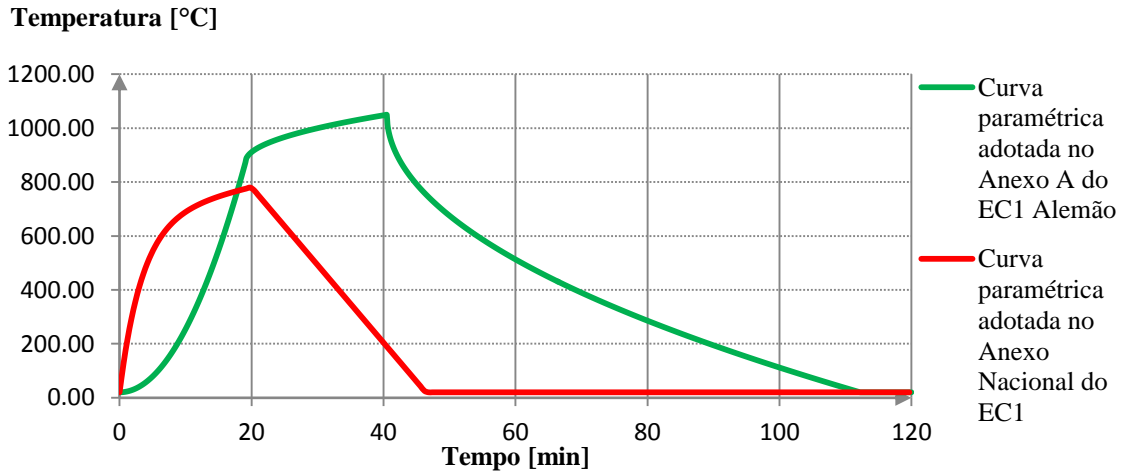


Figura 4.17 – Comparação entre as curvas paramétricas adotadas nos Anexos Alemão e Nacional do EC1 para o exemplo 2 do caso de estudo C

#### 4.3.5 Discussão de resultados

Com o objetivo de aumentar o número de resultados existentes para comparação das duas curvas paramétricas abordadas neste caso de estudo, considerou-se um compartimento tipo com 3m de altura e área variável (ver Tabela 4.5), fazendo-se variar o fator de abertura para os seguintes valores: 0.06, 0.10, 0.14 e 0.18  $m^{0.5}$ . Quanto ao tipo de ocupação, admitiu-se que o compartimento representava um edifício de escritórios com densidade de carga de incêndio de cálculo de 511 MJ/m<sup>2</sup>.

Em alguns casos não foi possível aplicar a curva iBMB devido ao facto das aberturas não estarem compreendidas entre 12,5 e 50% da área em planta do compartimento. Como se pode ver na Tabela 4.5, isto aconteceu para três dos dezasseis casos que se pretendia estudar.

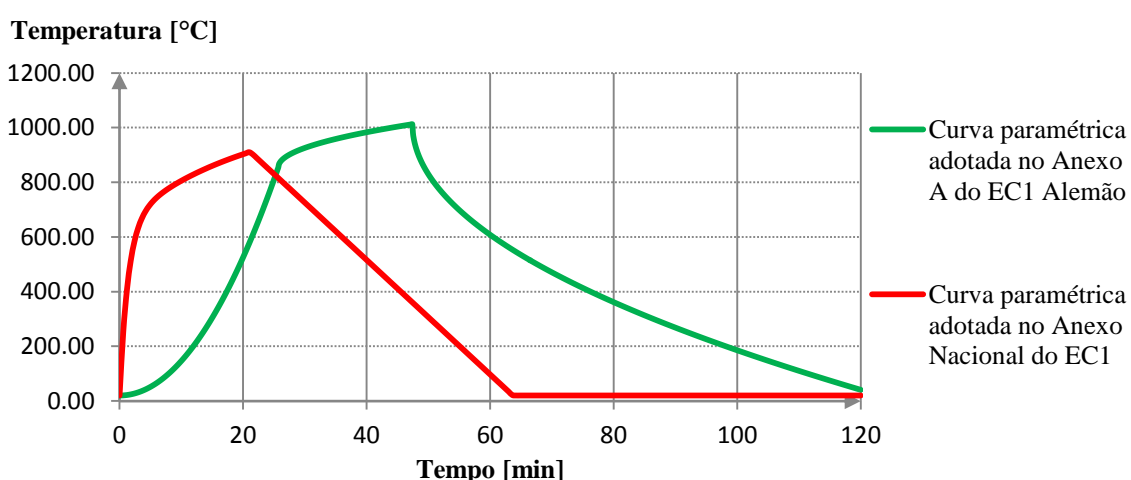
Tabela 4.5 – Geometria dos vários compartimentos em estudo

Comprimento (m)	Largura (m)	Altura (m)	Área de incêndio (m <sup>2</sup> )	Fatores de abertura estudados (m <sup>0.5</sup> )
5	5	3	25	0.06
				0.10
10	5		50	0.06
				0.10
				0.14

10	10		100	Todos
20	10		200	Todos

Todos os gráficos obtidos encontram-se no Anexo C desta dissertação. Alguns deles serão inseridos no ponto da discussão de resultados para ilustrar algumas das conclusões obtidas.

Assim, pode-se concluir que a curva paramétrica adotada no Anexo Nacional Alemão do EC1 traduz-se num incêndio mais severo do que a curva paramétrica adotada no Anexo A do EC1, como se pode ver na Figura 4.18.



**Figura 4.18 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 200 m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.10 m<sup>0.5</sup>**

Na curva iBMB, quanto menor o fator de abertura do compartimento de incêndio, maior a duração do incêndio e maior o pico de temperatura no interior do compartimento.

As curvas paramétricas estudadas neste ponto apresentam algumas diferenças, das quais se destacam:

- As curvas apresentam diferentes concavidades na fase de crescimento, o que se traduz na existência de um crescimento mais lento, nos minutos iniciais, na curva iBMB;
- A duração do incêndio é, regra geral, superior na curva iBMB, com exceção dos compartimentos com áreas e fatores de abertura pequenos;
- A curva paramétrica adotada no Anexo Nacional Alemão do EC1 representa a fase de decrescimento do incêndio com uma curva, enquanto que a curva

paramétrica adotada no Anexo A do mesmo documento representa essa mesma fase com uma reta;

- O pico de temperatura no compartimento de incêndio dado pela curva iBMB é significativamente superior ao dado pela curva paramétrica adotada no Anexo A do EC1.

#### 4.4 Influência da geometria das aberturas

O propósito deste estudo passa pela avaliação da influência da geometria das aberturas na temperatura de um compartimento em situação de incêndio. Esta análise sustenta-se num modelo de campo baseado na mecânica dos fluidos computacional (CFD), usando-se para isso o programa FDS desenvolvido no NIST (McGrattan and Forney, 2001). Pretende-se também comparar o modelo referido anteriormente com o modelo de zona, representado pelo programa OZone.

##### 4.4.1 Considerações gerais

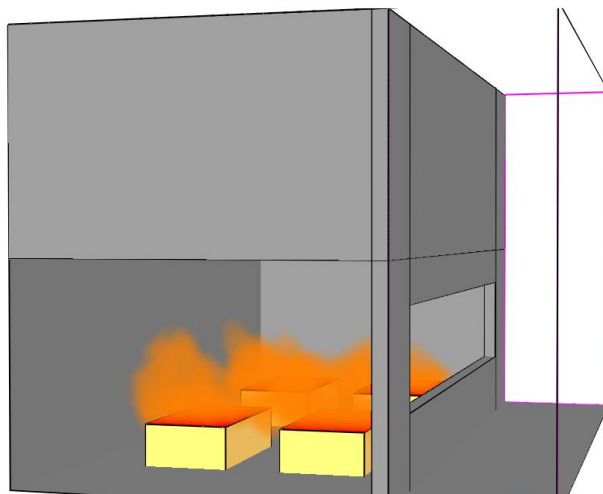
Neste estudo considerou-se um compartimento com 3m de altura e área igual a 50m<sup>2</sup>, com paredes de alvenaria de tijolo de 0.20m de espessura com condutibilidade térmica de 0.7 W/mK. Quanto ao tipo de ocupação, considerou-se que o compartimento representava uma habitação com densidade de carga de incêndio de cálculo de 758.4 MJ/m<sup>2</sup>.

Considerou-se que o compartimento tinha fator de abertura igual a 0.06m<sup>0.5</sup>, dividindo-se a análise em três casos distintos, como se pode ver na Tabela 4.6, com vista a concluir sobre a influência da geometria das aberturas no compartimento de incêndio.

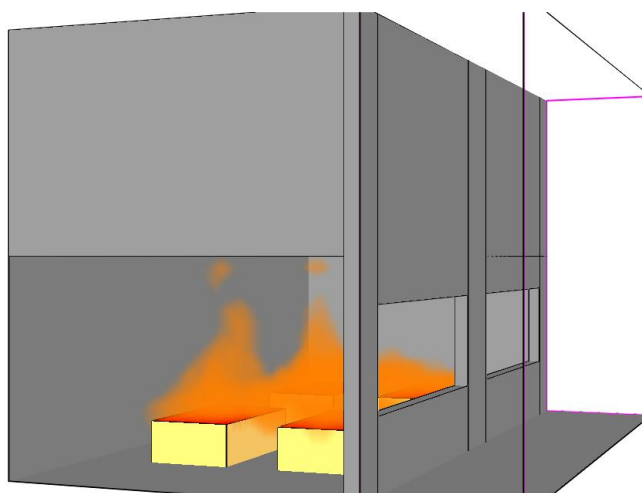
Tabela 4.6 – Geometria dos três compartimentos em estudo

Caso	Comp. (m)	Largura (m)	Altura (m)	Área de incêndio (m <sup>2</sup> )	Aberturas			
					Largura (m)	Altura (m)	A <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> )	h <sub>eq</sub> (m)
1	10	5	3	50	7.70	1.30	10.0	1.3
2	10	5	3	50	3.85	1.30	10.0	1.3
					3.85	1.30		
3	10	5	3	50	1.20	2.00	9.4	1.5
					5.40	1.30		

No caso 1 considerou-se apenas uma janela de grandes dimensões (ver Figura 4.19), no caso 2 admitiram-se duas janelas iguais de dimensão inferior (ver Figura 4.20) e no caso 3 as aberturas eram constituídas por uma porta e uma janela (ver Figura 4.21).



**Figura 4.19 – Compartimento considerado no caso 1**



**Figura 4.20 – Compartimento considerado no caso 2**

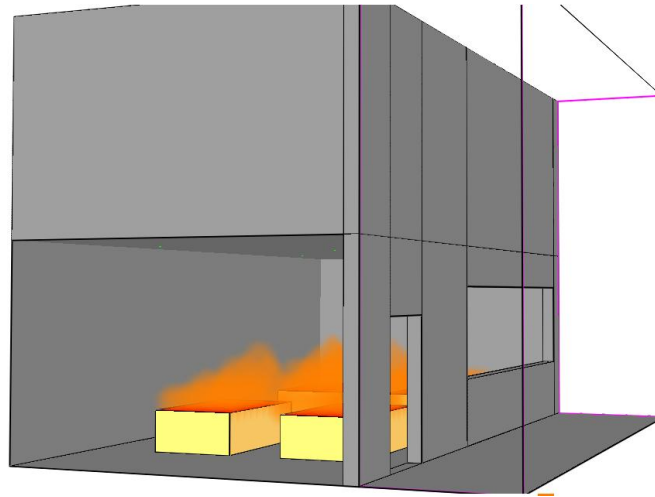


Figura 4.21 – Compartimento considerado no caso 3

O programa FDS funciona com base no bloco de notas, onde são inseridos todos os dados necessários para a análise, ou seja, os inputs ou dados de entrada, e fornece os resultados em ficheiros de Excel, ou seja, os outputs ou dados de saída.

Neste programa não é possível inserir a densidade de carga de incêndio. Assim, tornou-se necessário converter a densidade de carga de incêndio numa taxa de libertação de calor por unidade de área.

Na Tabela 4.7 podemos encontrar dados que relacionam a densidade de carga de incêndio, a taxa de libertação de calor por unidade de área e o tempo necessário para atingir uma taxa de libertação de calor de 1 MW ( $t_\alpha$ ), quando se considera que o material combustível está dividido em 4 pilhas de madeira (Heinisuo et al., 2010).

Tabela 4.7 – Exemplo de valores de  $q_{f,d}$  e HRRPUA (Heinisuo et al., 2010)

$q_{f,d}$ [MJ/m <sup>2</sup> ]	HRRPUA [kW/m <sup>2</sup> ]	$t_\alpha$ [s]
703 - 1561	469 - 2156	209 - 409

Então, para  $q_{f,d} = 758,4$  MJ/m<sup>2</sup> tem-se HRRPUA = 578 [kW/m<sup>2</sup>] e  $t_\alpha = 222$  [s].

A Figura 4.22 mostra a curva da taxa de libertação de calor retirada de um output do FDS, construída recorrendo a uma função RAMP\_Q que permite torná-la crescente e decrescente ao longo do tempo.

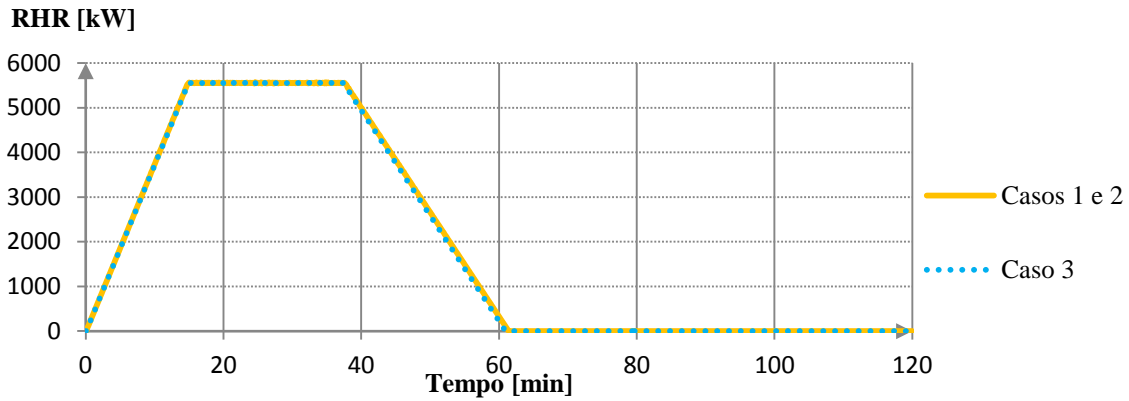


Figura 4.22 – Taxa de libertação de calor obtida no programa FDS

A função RAMP\_Q foi obtida a partir da construção da curva RHR com base no ponto 3.2.3 desta dissertação, obtendo-se os tempos que constam na Tabela 4.8. A curva RHR dos casos 1 e 2 é diferente da curva RHR do caso 3 pois, apesar dos compartimentos terem o mesmo fator de abertura em todos os casos, a área das aberturas ( $A_v$ ) e a altura equivalente ( $h_{eq}$ ) variam.

Tabela 4.8 – Tempos que determinam a duração das várias fases da taxa de libertação de calor

	$t_1$ [s]	$t_2$ [s]	$t_3$ [s]
<b>Casos 1 e 2</b>	887	2254	3680
<b>Caso 3</b>	891	2241	3653

Agora é necessário encontrar a área de cada pilha de madeira para que no FDS haja madeira equivalente à densidade de carga de incêndio de uma habitação.

$$q_{f,d} = 758,4 \text{ MJ/m}^2$$

$$A_f = 50 \text{ m}^2$$

$$Q = q_{f,d} A_f = 37920 \text{ MJ}$$

$$H_u = 17,5 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{Peso madeira} = \frac{Q}{H_u} = 2166,9 \text{ kg}$$

$$\text{Densidade madeira} = 450 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Volume madeira} = \frac{\text{Peso madeira}}{\text{Densidade madeira}} = 4,8 \text{ m}^3$$

$$\text{Altura da pilha de madeira} = 0,5 \text{ m}$$

$$\text{Área madeira} = 9,6 \text{ m}^2$$

$$\text{Área de uma pilha de madeira} = \frac{9,6}{4} = 2,4 \text{ m}^2$$

No FDS é necessário inserir a reação química que representa a combustão do material. Neste caso, inseriu-se a reação de pirólise da madeira  $C_{3,4}H_{6,2}O_{2,5}$  (Mell et al., 2007; Ritchie et al., 1997).

No que diz respeito a temperaturas no interior do compartimento de incêndio, utilizou-se o conceito da *Adiabatic Surface Temperature* e colocou-se 5 termopares no compartimento, sendo que nesta análise apenas se utilizou o termopar colocado no centro do compartimento, para que a análise não fosse influenciada pela maior ou menor proximidade da abertura ao termopar.

O FDS tem como interface gráfica o Smokeview que permite visualizar o desenvolvimento das temperaturas no compartimento de incêndio. As Figuras abaixo ilustram as temperaturas na superfície interior do compartimento e num plano a meio do compartimento, para diferentes instantes de tempo.

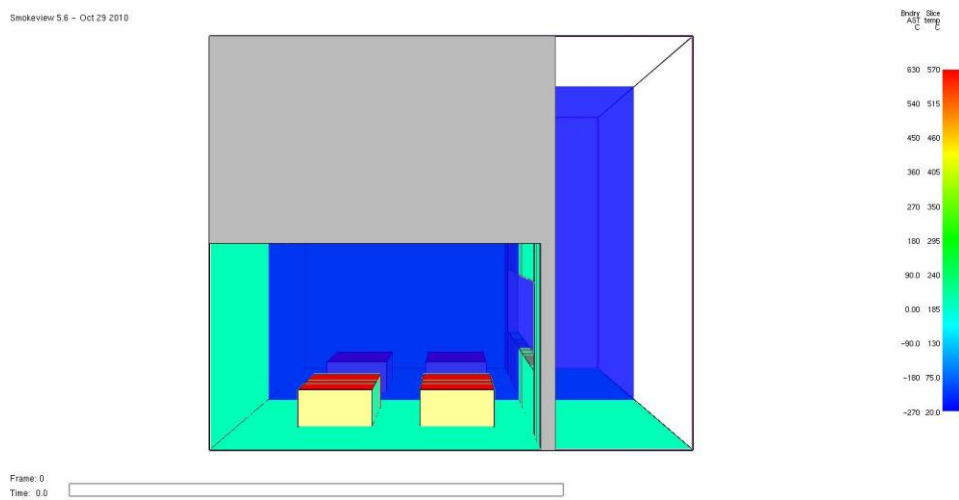


Figura 4.23 – Temperaturas no compartimento de incêndio para o instante de tempo  $t=0$  s

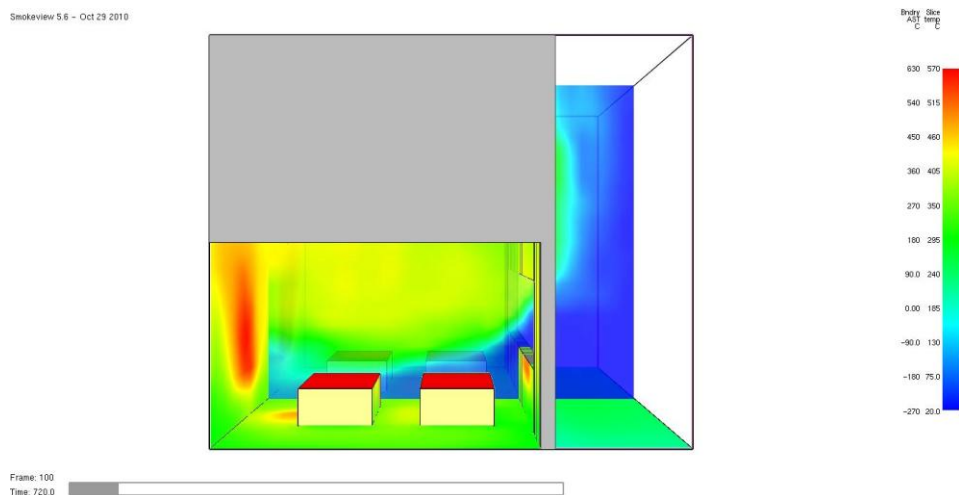


Figura 4.24 – Temperaturas no compartimento de incêndio para o instante de tempo  $t=720$  s

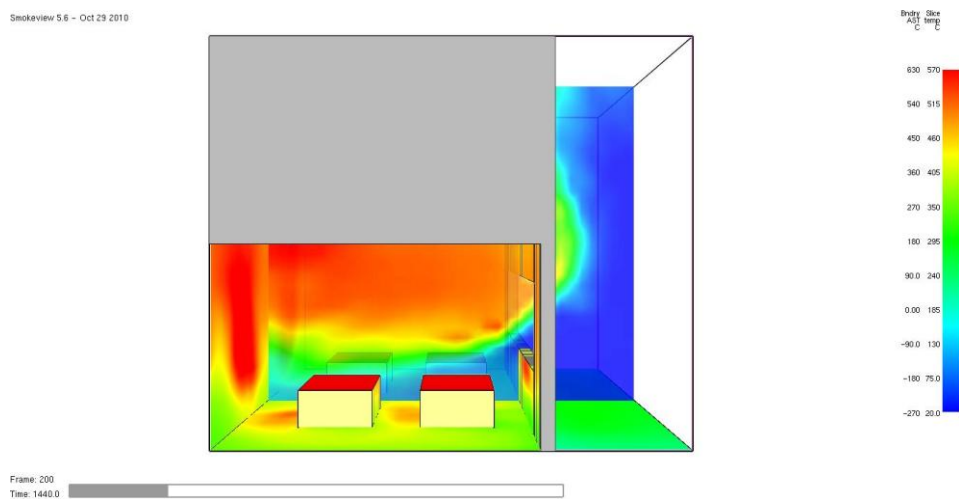


Figura 4.25 – Temperaturas no compartimento de incêndio para o instante de tempo  $t=1440$  s

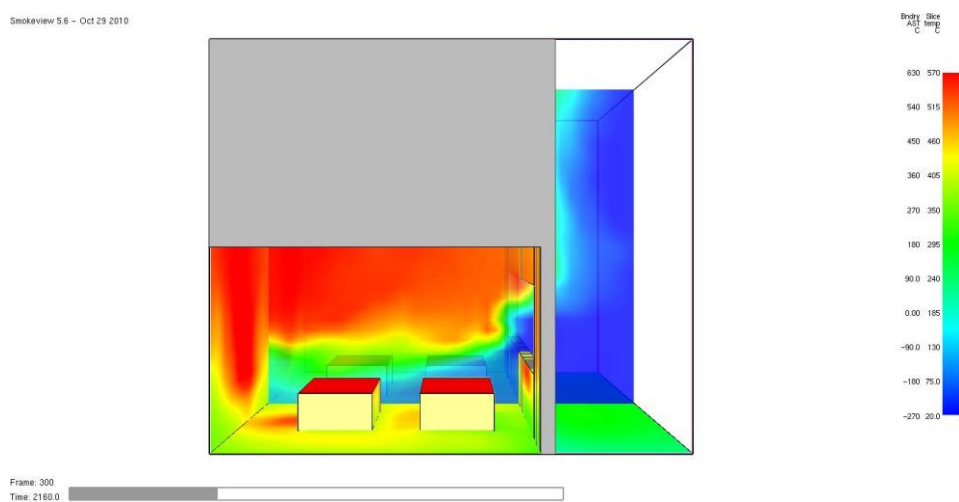


Figura 4.26 – Temperaturas no compartimento de incêndio para o instante de tempo  $t=2160$  s



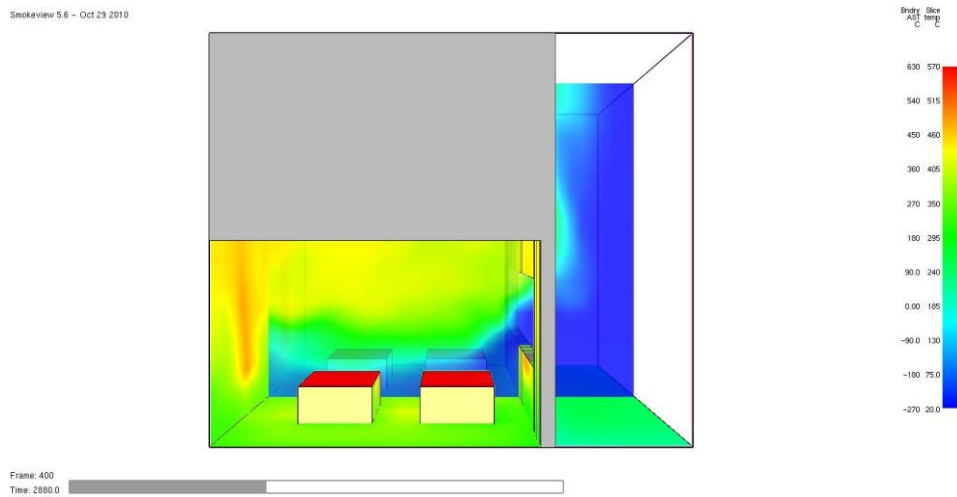


Figura 4.27 – Temperaturas no compartimento de incêndio para o instante de tempo  $t=2880$  s

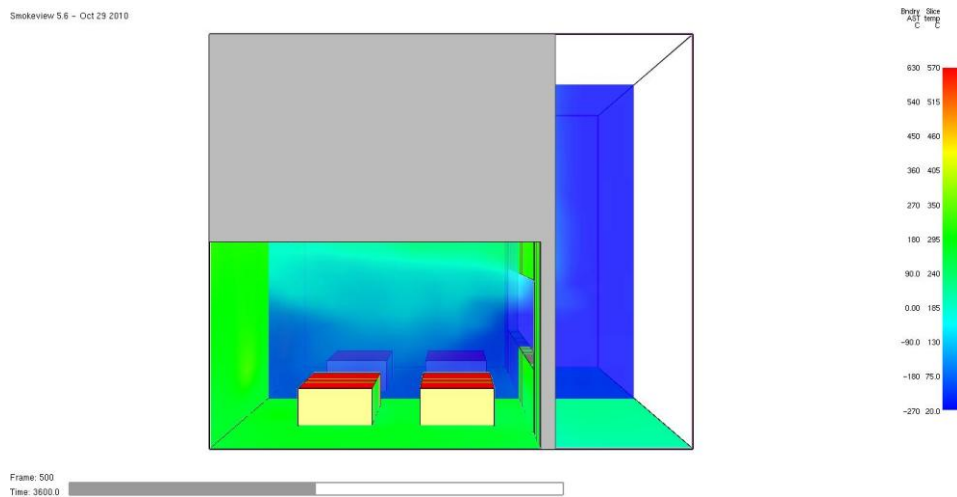


Figura 4.28 – Temperaturas no compartimento de incêndio para o instante de tempo  $t=3600$  s

#### 4.4.2 Discussão de resultados

A principal conclusão que se pode retirar deste caso de estudo é que, para o mesmo fator de abertura, a geometria e disposição das aberturas têm influência na temperatura no compartimento de incêndio. Este facto torna-se evidente na Figura 4.29, com a diferença de temperaturas a rondar os  $100^{\circ}\text{C}$  entre o caso 1 e o caso 3. Se a análise for feita recorrendo a um modelo de zona (ver Figura 4.30) a diferença de temperaturas não é tão grande. No fundo, isto torna claro uma das limitações de um programa como o programa OZone, que é a não utilização da geometria exata do compartimento na análise das temperaturas no interior do compartimento em situação de incêndio.

Outra das ideias que desde logo salta à vista é o facto de na análise feita a partir do programa FDS as temperaturas atingidas no compartimento são significativamente mais

baixas do que as temperaturas atingidas quando a análise é feita com o programa OZone. Esta diferença tão significativa pode dever-se ao grau de complexidade do programa FDS. De facto, a conversão da densidade de carga de incêndio, utilizada no programa Ozone, na taxa de libertação de calor por unidade de área com que trabalha o FDS, não é direta, podendo assim existir diferenças associadas aos dados introduzidos em cada um dos modelos.

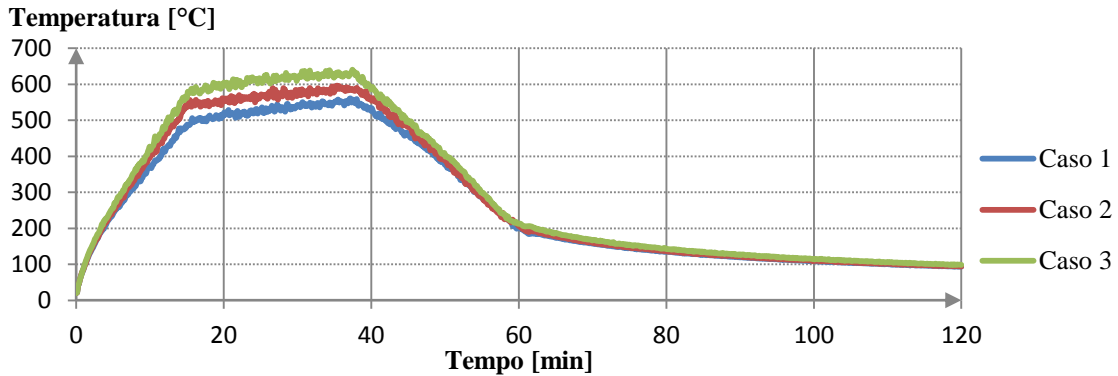


Figura 4.29 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 50 m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06 m<sup>0.5</sup>, obtida usando o programa FDS

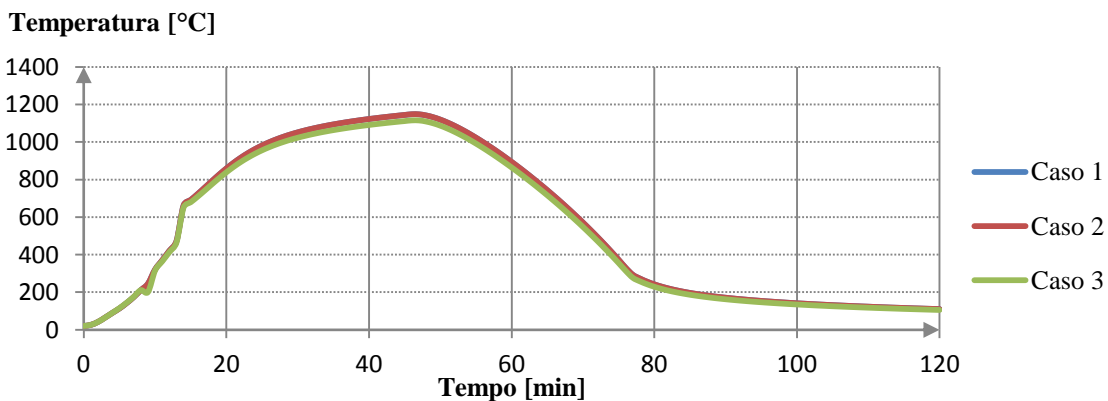


Figura 4.30 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 50 m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06 m<sup>0.5</sup>, obtida usando o programa OZone

#### 4.5 Simulação de um compartimento de incêndio com diferentes fontes de calor

Neste estudo pretende-se determinar as temperaturas em diferentes pontos num compartimento em situação de incêndio, tendo em conta que no interior do compartimento encontram-se diferentes materiais com diferentes RHR. Para isso, recorreu-se uma vez mais ao programa FDS.

#### 4.5.1 Considerações gerais

Neste estudo considerou-se um compartimento com 3 m de altura e área igual a 50 m<sup>2</sup>, com paredes de alvenaria de tijolo de 0.20 m de espessura com condutibilidade térmica de 0.7 W/mK. O compartimento possui uma única janela de 4 m de largura e 2 m de altura, que se encontra aberta durante toda a análise. No interior do compartimento existe um ponto de trabalho, um sofá e uma cadeira de plástico, com as propriedades apresentadas na Tabela 4.9. No programa FDS usaram-se 4 blocos de igual dimensão, dois representativos do ponto de trabalho, um do sofá e outro da cadeira de plástico. Na Figura 4.31 pode-se ver a planta do compartimento em estudo onde é visível a disposição dos blocos e dos termopares e uma imagem do compartimento a arder nos instantes iniciais no programa FDS. A chama do bloco representativo do sofá é substancialmente maior do que a chama dos outros blocos devido à elevada taxa de libertação de calor do sofá.



Figura 4.31 – Compartimento em estudo

Tabela 4.9 – Propriedades dos materiais que se encontram no interior do compartimento (Heinisuo et al., 2010)

	$t_{\alpha}$ [s]	HRRPUA[kW/m <sup>2</sup> ]	$q_{f,d}$ [MJ/m <sup>2</sup> ]
<b>Ponto de trabalho</b>	115	820	376
<b>Sofá</b>	110	3120	727
<b>Cadeira de plástico</b>	900	600	160

Assim, a partir dos valores da tabela acima, calcularam-se os tempos  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$  com base no ponto 3.2.3 do Capítulo 3 deste trabalho. Na Figura 4.32 apresentam-se as curvas HRRPUA inseridas no programa FDS.

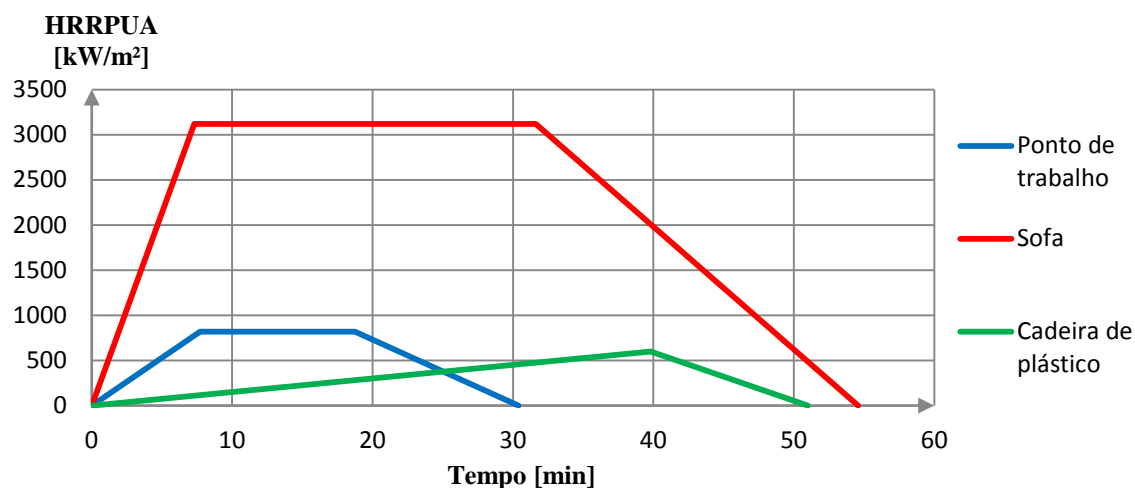


Figura 4.32 – Curvas HRRPUA inseridas no FDS

#### 4.5.2 Discussão de resultados

Na Figura 4.33 pode-se ver a taxa de libertação de calor obtida no FDS. Inicialmente a curva RHR cresce rapidamente, como seria de esperar, devido ao crescimento das três curvas HRRPUA, até que, aproximadamente aos 7 minutos, passa a ter um declive bastante mais baixo, começando a decrescer quando a curva HRRPUA do ponto de trabalho também começa a decrescer, aos 19 minutos sensivelmente. Aos 30 minutos tem um pequeno patamar horizontal resultante do início da fase de decrescimento da curva HRRPUA do sofá e da ainda fase de crescimento da curva HRRPUA da cadeira de plástico, coincidindo o fim desse patamar com o fim da fase decrescente da curva HRRPUA. A partir desse ponto a forma da curva RHR é claramente influenciada pela forma da curva HRRPUA do sofá.

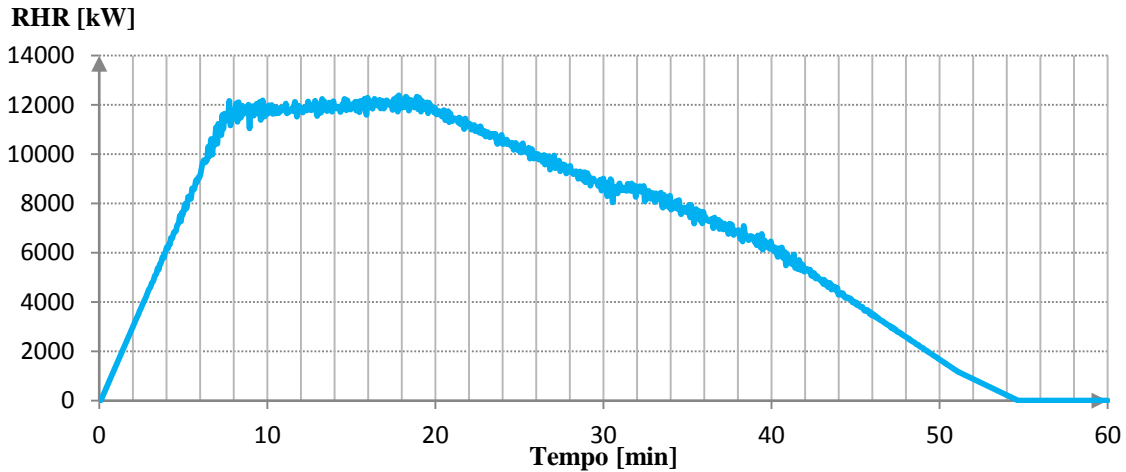


Figura 4.33 – RHR obtida no programa FDS

A Figura 4.34 mostra a evolução da temperatura no interior do compartimento em situação de incêndio. Dos cinco termopares existentes no interior do compartimento de incêndio, podemos verificar que existem diferenças significativas entre as temperaturas por eles medidas, atingindo um máximo de aproximadamente 300°C. As elevadas diferenças de temperatura registadas pelos termopares devem-se à localização dos mesmos, ou seja, como o termopar T1 se encontra bastante próximo do bloco representativo do sofá e este tem uma taxa de libertação de calor por unidade de área bastante elevada, apresenta temperaturas substancialmente superiores ao termopar T4, que é o termopar que se encontra mais afastado do bloco que representa o sofá.

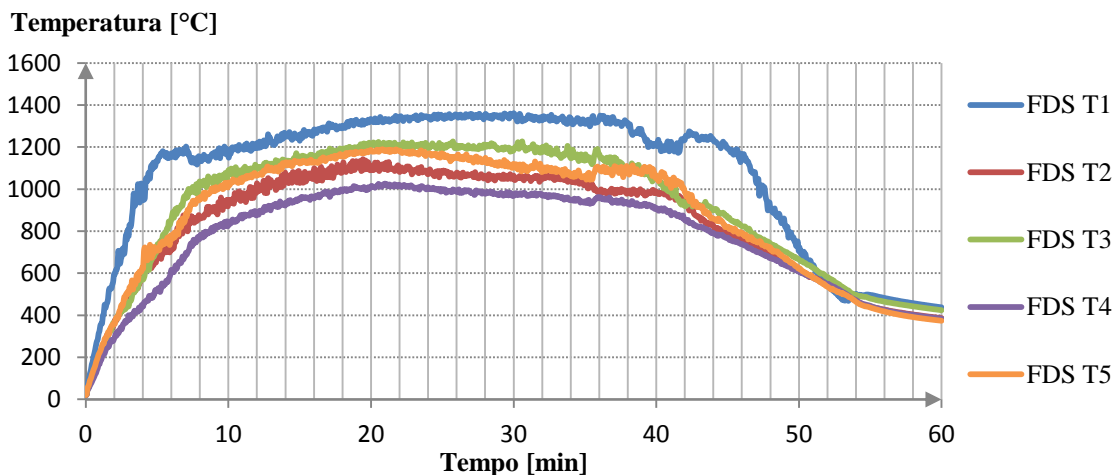


Figura 4.34 – Evolução da temperatura no interior do compartimento de incêndio, obtidas a partir do programa FDS

Tal como neste caso de estudo, na realidade os compartimentos não têm materiais com as mesmas características em todo o compartimento. Daqui pode-se concluir que num

compartimento em situação de incêndio a temperatura não é uniforme em todo o compartimento, variando bastante de acordo com a maior ou menor proximidade aos materiais em combustão e com as propriedades desses mesmos materiais, como por exemplo a taxa de libertação de calor. Este facto pode ter significativa importância na dimensionamento de estruturas de edifícios ao fogo, pondo em evidência a necessidade da consideração de cenários de incêndio onde existam fogos localizados.

#### 4.5.3 Comparação com os modelos tradicionais

É sempre complicado comparar os resultados de um modelo de campo bastante complexo, dependente de diversas variáveis e que não usa a densidade de carga de incêndio como parâmetro de entrada, com os modelos de incêndio natural tradicionais, que se baseiam essencialmente na densidade de carga de incêndio, sendo que os modelos de zona também entram em conta com a taxa de libertação de calor. Ainda assim, é apresentada na Figura 4.35 uma comparação deste modelo com as curvas paramétricas (usando o programa Elefir-EN), os modelos de zona (usando o programa OZone) e a curva de incêndio padrão ISO 824.

Considerou-se que a categoria tipo mais próxima em que o compartimento em estudo se enquadra é o edifício de escritórios. Assim, fez-se a análise considerando uma densidade de carga de incêndio de cálculo  $q_{f,d} = 506,9 \text{ MJ/m}^2$ . A taxa de libertação de calor por unidade de área para edifícios tipo escritório é de  $250 \text{ kW/m}^2$ . No FDS, para comparação com os métodos tradicionais considerou-se a curva temperatura-tempo do termopar T5 que é o termopar que se encontra no centro do compartimento.

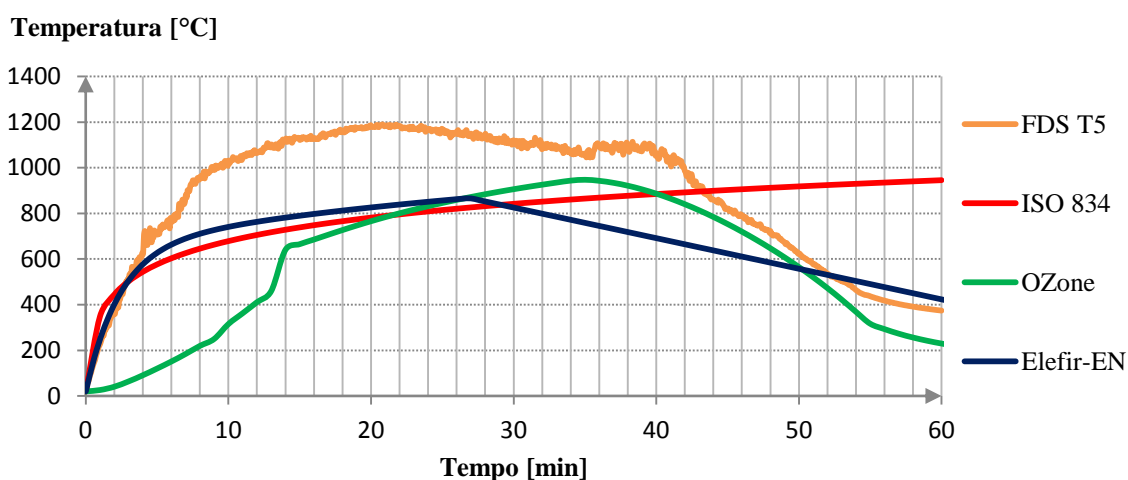


Figura 4.35 – Evolução da temperatura no compartimento de incêndio para os diversos métodos de análise de temperaturas em compartimentos de incêndio em estudo

Os métodos de análise tradicionais apresentam curvas com temperaturas bastante inferiores às temperaturas obtidas no programa FDS. Existe uma grande diferença inicial entre as curvas do OZone e do FDS, que se deve ao facto do modelo de zona ser um modelo que admite duas fases, o pré e o pós-flashover, considerando que este ocorre aos 500°C. Assim, a curva FDS na sua fase inicial aproxima-se bastante das curvas ISO 834 e paramétrica, admitindo-se então que, tal como estas, assenta num modelo pós-flashover.

Outra das grandes diferenças entre a curva FDS e as restantes curvas está no facto desta ser bastante sinuosa, apresenta bastantes altos e baixos, enquanto as outras são mais regulares. Nas várias corridas realizadas no FDS constatou-se que quanto mais apertada for a malha de cálculo utilizada, menos sinuosa se torna a curva. Para além disso, verificou-se que a mudança da malha de cálculo traduzia-se em diferenças de temperaturas, em alguns casos significativas. Na Figura 4.36 podemos ver as diferenças resultantes da variação da malha de cálculo no FDS, para o termopar T5 deste caso de estudo, em que se considerou as seguintes malhas de acordo com os eixos cartesianos (malha em X x malha em Y x malha em Z): 10x20x10 (cm) e 20x40x20 (cm).

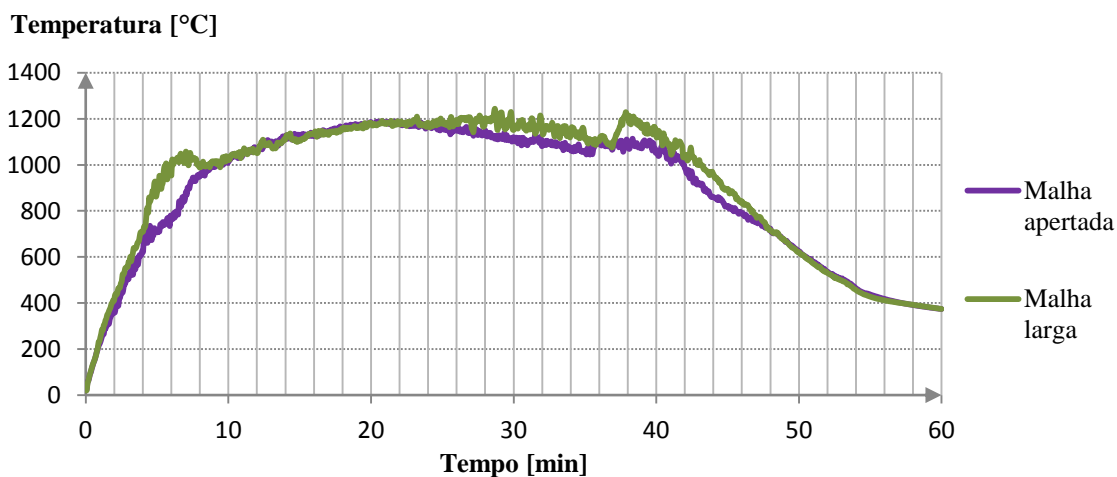


Figura 4.36 – Evolução da temperatura no compartimento de incêndio obtida pelo programa FDS para duas malhas de cálculo diferentes





---

## *Capítulo 5*

*Considerações finais e desenvolvimentos  
futuros*

## **Capítulo 5      Considerações finais e desenvolvimentos futuros**

### **5.1 Considerações finais**

Esta dissertação focou-se no estudo da evolução das temperaturas em compartimentos de edifícios sujeitos a incêndios. Começou-se por fazer uma revisão detalhada das diferentes metodologias usadas para a análise de temperaturas no compartimento de incêndio, apresentando-se uma evolução histórica nesse âmbito, e abordou-se com maior detalhe alguns métodos, desde os métodos tradicionalmente mais utilizados como por exemplo as curvas de incêndio nominal e as curvas paramétricas, até aos modelos mais avançados, como por exemplo os modelos de zona e os modelos de campo. Posteriormente, fizeram-se análises comparativas entre os diversos modelos, procurando estudar-se a influência de alguns parâmetros, como por exemplo as características do compartimento (área, geometria, etc.), na evolução das temperaturas em compartimentos de incêndio. Nessas análises usaram-se essencialmente três programas: Elefir-EN, OZone e FDS.

Os métodos tradicionais assumem incêndios uniformes e condições de temperatura homogéneas em todo o compartimento, qualquer que seja o seu tamanho. Na realidade, a observação dos incêndios acidentais em grandes compartimentos diz-nos que o fogo tende a mover-se através das placas de piso, ardendo numa área limitada de cada vez.

Assim, como os modelos tradicionais são aplicáveis apenas a pequenos compartimentos, torna-se necessário desenvolver novos modelos que se aproximem mais do que realmente acontece nos incêndios em grandes compartimentos.

Os modelos simplificados de análise de temperaturas em compartimentos em situação de incêndio, em particular as curvas paramétricas adotadas no EC1, apresentam algumas limitações. O facto de serem válidas apenas para compartimentos com área em planta até 500 m<sup>2</sup>, sem aberturas no teto, altura máxima de 4 m e propriedades térmicas da envolvente limitadas, levam a que muitos dos grandes edifícios com características típicas da construção moderna, como por exemplo tetos altos, grandes espaços abertos, vários andares ligados por vazios e fachadas de vidro, sejam excluídos da aplicabilidade deste tipo de modelos.

Neste trabalho foi possível apurar que uma das grandes limitações dos modelos simplificados de incêndio (programa Elefir-EN) e dos modelos de zona (programa OZone) resulta do facto de ambos não considerarem a geometria exata do compartimento onde deflagra o incêndio.

Nas várias corridas realizadas no programa FDS, a sua maioria de forma a compreender melhor o funcionamento do programa, permitiu concluir que estes modelos de campo ainda necessitarão de validações adicionais por parte da comunidade científica, que proporcionem uma utilização mais segura e fácil por parte de engenheiros que necessitem de aplicar estes modelos em projetos de engenharia de segurança contra incêndios. Verificou-se que podem ocorrer variações de temperatura significativas de acordo com a malha de cálculo considerada, podendo uma malha grosseira resultar em análises não conservativas. Uma corrida de um compartimento com área superior a 500 m<sup>2</sup> e uma malha de cálculo quadrada com células de 0,10 m pode demorar várias semanas, sendo esta uma das principais razões pela escassa utilização dos modelos de campo na engenharia de segurança contra incêndios. Para além disso, também o facto de ser um modelo ainda pouco consolidado leva a que seja preterido em função dos métodos tradicionais, mais simples e rápidos de utilizar, e dos modelos de zona.

Apesar das disciplinas sobre a ciência do fogo e da engenharia estrutural terem como base conhecimentos totalmente diferentes, estas têm uma forte sobreposição na sua aplicação à análise estrutural de um edifício em situação de incêndio, sendo necessário uma grande colaboração entre estas duas áreas.

## **5.2 Desenvolvimentos futuros**

Nesta dissertação apresentou-se uma revisão dos diferentes métodos de análise de temperaturas no compartimento de incêndio, podendo servir de base para futuras investigações nesta temática. Numa investigação futura, seria interessante a obtenção de temperaturas recorrendo aos diferentes modelos referidos ao longo deste trabalho e aplicá-los à estrutura de um edifício, fazendo uma análise comparativa dos resultados obtidos.

Os modelos de análise de temperaturas tradicionais apresentam várias limitações e não traduzem o que geralmente acontece na realidade. Acredita-se que os modelos avançados e os fogos móveis produzem cenários de incêndio mais realistas em grandes

compartimentos do que os modelos tradicionais que assumem incêndios uniformes e condições de temperatura homogêneas em todo o compartimento. Assim, sendo o conceito de fogo móvel relativamente recente, seria importante continuar a investigação neste âmbito, estudando com maior detalhe os mecanismos estruturais associados ao dimensionamento de edifícios utilizando este modelo em vez dos métodos convencionais. Segundo Stern-Gottfried (2011), o futuro passa por aperfeiçoá-lo para os incêndios que se movem horizontalmente e analisar os incêndios que se movem verticalmente, pois, ao contrário dos primeiros, não existe estrutura para explorar a dinâmica vertical deste tipo de fogos, o que atualmente está a dificultar a aplicação deste modelo na análise estrutural, apesar de já se ter verificado em diversos incêndios que os fogos viajam verticalmente pela estrutura de um edifício. Para além disso, seria importante a realização de estudos com vista a ultrapassar as diversas limitações que os modelos de análise tradicionais apresentam, dando especial ênfase às limitações geométricas do compartimento.

Os modelos de campo foram abordados de forma muito ligeira nesta dissertação, visto serem modelos de grande complexidade pouco usados como modelo de análise de temperatura no compartimento de incêndio devido ao facto da sua utilização depender bastante tempo e requerer hardware capaz. Neste sentido, sendo um modelo ainda pouco consolidado, seria interessante aprofundar o estudo realizado neste trabalho, pois estes modelos, se se mostrarem capazes de ultrapassar as limitações dos modelos usados nos dias de hoje, poderão ser o futuro da avaliação do desempenho de estruturas ao fogo.

---

*Referências bibliográficas*

## **Referências bibliográficas**

Abecassis-Empis, C., Reszka, P., Steinhaus, T., Cowlard, A., Biteau, H., Welch, S., Rein, G. and Torero, J. L., 2008 - Characterisation of Dalmarnock fire Test One. *Experimental Thermal and Fluid Science*. Vol. 32, n.º 7, p. 1334-1343.

Alpert, R., 1972 - Calculation of response time of ceiling-mounted fire detectors. *Fire Technology*. Vol. 8, n.º 3, p. 181-195.

Arnault, P., Ehm, H. and Kruppa, J., 1974 - Incendies naturels avec des meubles et du papier. Puteaux, France: Centre Technique Industriel de la Construction Métallique.

Arnault, P., Ehm, H. and Kruppa, J., 1973 - Rapport expérimental sur les essais avec des feux naturels exécutés dans la petite installation - Maizières-Les-Metz. Puteaux, France: Centre Technique Industriel de la Construction Métallique.

ASTM, 2000 - E119-200: standard methods for fire tests of building construction and materials. American Society for Testing and Materials.

Audouin, L., Kolb, G., Torero, J. L. and Most, J. M., 1995 - Average centreline temperatures of a buoyant pool fire obtained by image processing of video recordings. *Fire Safety Journal*. Vol. 24, n.º 2, p. 167-187.

Babrauskas, V. and Williamson, R. B., 1978a - The historical basis of fire resistance testing - Part II. *Fire Technology*. Vol. 14, p. 304-316.

Babrauskas, V. and Williamson, R. B., 1978b - Post-flashover compartment fires: Basis of a theoretical model. *Fire and Materials*. Vol. 2, n.º 2, p. 39-53.

Bailey, C. G., Burgess, I. W. and Plank, R. J., 1995 - Computer simulation of a full-scale structural fire test. *The Structural Engineer*. Vol. 74, p. 93-100.

Barnett, C. R., 2002 - BFD curve: a new empirical model for fire compartment temperatures. *Fire Safety Journal*. Vol. 37, n.º 5, p. 437-463.

Barnett, C. R., 2007 - Replacing international temperature-time curves with BFD curve. *Fire Safety Journal*. Vol. 42, n.º 4, p. 321-327.

Bouwkunde, Z. M. B. b., 2008 - COT Instituut voor Veilingheids - en Crisismanagement.

BSC, 2011 - Campanha de Bombeiros Sapadores de Coimbra. Disponível em <<http://sapadoresdecoimbra.no.sapo.pt/index1.html#Inicio%20do%20Index1>>.

BSI, 1996 - The use of Fire Safety Engineering in Buildings.

Buchanan, A. H., 2001 - Structural Design for Fire Safety. Wiley.

Cadorin, J. F., 2003 - Compartment Fire Models for Structural Engineering. Thèse de doctorat University of Liege, Belgium. 189 f.

Cadorin, J. F. and Franssen, J. M., 2003 - A tool to design steel elements submitted to compartment fires - OZone V2. Part 1: pre- and post-flashover compartment fire model. Fire Safety Journal. Vol. 38, n.º 5, p. 395-427.

Cadorin, J. F., Franssen, J. M. and Pintea, D., 2000 - The design Fire Tool OZone V2.0 - Theoretical Description and Validation Based On Experimental Fire Tests. University of Liege.

Cadorin, J. F., Pintea, D., Dotreppe, J. C. and Franssen, J. M., 2003 - A tool to design steel elements submitted to compartment fires - OZone V2. Part 2: Methodology and application. Fire Safety Journal. Vol. 38, n.º 5, p. 429-451.

CEN, 2000 - Eurocode 9 - Design of aluminium structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design: EN 1999-1-2.

CEN, 2010a - Eurocódigo 1 - Ações em Estruturas - Parte 1-2: Ações em Estruturas Expostas ao Fogo: NP EN 1991-1-2.

CEN, 2010b - Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço - Parte 1-2: Regras gerais - Verificação da resistência ao Fogo: NP EN 1993-1-2.

CEN, 2010c - Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part 8: Applied reactive protection to steel members: EN 13381-8. European Committee for Standardization.

CFX-5, 2000 - User Manual. Harwell, UK: AEA Technology.

Cooper, L. Y., 1983 - A Concept for Estimating Available Safe Egress Time in Fires. Fire Safety Journal. Vol. 5, n.º 2, p. 135-144.

Cooper, L. Y., 1982 - A Mathematical-Model for Estimating Available Safe Egress Time in Fires. *Fire and Materials*. Vol. 6, n.º 3-4, p. 135-144.

Cooper, L. Y. and Stroup, D. W., 1985 - Aset - a Computer-Program for Calculating Available Safe Egress Time. *Fire Safety Journal*. Vol. 9, p. 29-45.

Costa, C. N. and Silva, V. P., 2006 - Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio.

Cox, G., 1999 - Fire research in the 21st century. *Fire Safety Journal*. Vol. 32, n.º 3, p. 203-219.

CSE - International Survey of Computer Models for Fire and Smoke [em linha]. Combustion Science & Engineering, Inc. [Consult. Disponível em [www.firemodelsurvey.com](http://www.firemodelsurvey.com)].

Curtat, M., Fromy, P. and batiment, C. s. e. t. d., 1992 - Prevision par le calcul des sollicitations thermiques dans un local en feu: Le modele et le logiciel NAT. CSTB.

DIN, 2010 - German National Annex: Nationally determined parameters - Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2/NA: General actions - actions on structures exposed to fire: NA 005-52-22 AA N 252.

Drysdale, D., 1999 - An introduction to fire dynamics. Wiley.

Duthinh, D., McGrattan, K. and Khaskia, A., 2008 - Recent advances in fire-structure analysis. *Fire Safety Journal*. Vol. 43, n.º 2, p. 161-167.

EC, 1999a - Development of Design Rules for Steel Structures Subjected to Natural Fires in Closed Car Parks.

EC, 1999b - Development of Design Rules for Steel Structures Subjected to Natural Fires in Large Compartments.

Ewer, J., Galea, E. R., Patel, M. K., Taylor, S., Knight, B. and Petridis, M., 1999 - SMARTFire: An Intelligent CFD Based Fire Model. *Journal of Fire Protection Engineering*. Vol. 10(1), p. 13-27.

Feasey, R. and Buchanan, A., 2002 - Post-flashover fires for structural design. *Fire Safety Journal*. Vol. 37, n.º 1, p. 83-105.



Fletcher, I., Welch, S., Capote, J. A., Alvear, D. and Lazaro, M., 2007 - Model-Based Analysis of a Concrete Building Subjected to Fire Santander, Spain: Advanced Research Workshop on Fire Computer Modelling.

Forney, G. P. and Cooper, L. Y., 1987 - A Plan for the Development of the Generic Framework and Associated Computer Software for a Consolidated Compartment Fire Model Computer Code: NBSIR 86-3500. National Institute of Standards and Technology (formerly National Bureau of Standards).

Franssen, J. M., 2000 - Improvement of the Parametric Fire of Eurocode 1 based on Experimental Tests Results. Proceedings of the Sixth International Symposium on Fire Safety Science, Poitiers, France, p. 927-938.

Franssen, J. M., Cooke, G. M. E. and Latham, D. J., 1995 - Numerical simulation of a full scale fire test on a loaded steel framework. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 35, n.º 3, p. 377-408.

Franssen, J. M., Pintea, D. and Dotreppe, J. C., 2007 - Considering the effects of localised fires in the numerical analysis of a building structure. Fire Safety Journal. Vol. 42, n.º 6-7, p. 473-481.

Franssen, J. M. and Vila Real, P., 2010 - Fire Design of Steel Structures. ECCS Eurocode Design Manuals, Ernst & Sohn.

Friedman, R., 1992 - An International Survey of Computer Models for Fire and Smoke. Journal of Fire Protection Engineering. Vol. 4.

Gann, R. G., 2005 - Reconstruction of the Fires in the World Trade Center Towers. NIST NCSTAR 1-5.

Gewain, R. G., Iwankiw, N. R., Alfawakhiri, F. and Construction, A. I. o. S., 2003 - Facts for steel buildings: Fire. American Institute of Steel Construction.

Gillie, M., Usmani, A. S. and Rotter, J. M., 2002 - A structural analysis of the Cardington British Steel Corner Test. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 58, n.º 4, p. 427-442.

Haremza, C., Santiago, A. and da Silva, L. S., 2011 - Metodologia de Dimensionamento de Parques de Estacionamento Abertos Mistos Aço-Betão em Situação de Incêndio. VIII Congresso de Construção Metálica e Mista, Guimarães, p. 107-118.

Hasemi, Y. and Tokunaga, T., 1984 - Some Experimental Aspects of Turbulent Diffusion Flames and Buoyant Plumes from Fire Sources Against a Wall and in a Corner of Walls. *Combustion Science and Technology*. Vol. 40, n.º 1-4, p. 1-17.

Hasib, R., Kumar, R., Shashi and Kumar, S., 2007 - Simulation of an experimental compartment fire by CFD. *Building and Environment*. Vol. 42, n.º 9, p. 3149-3160.

Heinisuo, M., Laasonen, M. and Outinen, J., 2010 - Fire design in Europe. University of Naples, Italy: p. 375-402. COST Action C26 final report on Urban habitat constructions under catastrophic events.

Henriques, P. D. F., 2010 - Comportamento ao Fogo do Vidro Estrutural. Tese de Mestrado Aveiro.

Heskestad, G., 1983 - Virtual Origins of Fire Plumes. *Fire Safety Journal*. Vol. 5, n.º 2, p. 109-114.

ISO, 1999 - Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements: ISO 834-1.

Janssens, M. L. and Birk, D. M., 2000 - An introduction to mathematical fire modeling. Technomic Pub. Co.

Jones, W. W., Forney, G. P., Peacock, R. D. and Reneke, P. A., 2000 - A Technical Reference for CFAST: An Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport.

Jonsdottir, A. and Rein, G., 2009 - Out of Range. *Fire Risk Management*. p. 14-17.

Junior, A. B. C., 2011 - Manual de Prevenção e Combate a Incêndios. SENAC Sao Paulo.

Kawagoe, K., 2004 - Fire Behavior in Rooms. *Journal of Fire Protection Engineering*. Vol. 14, p. 5-8.

Kawagoe, K. and Sekine, T., 1963 - Estimation of temperature-time curves in rooms. Japanese Building Research Institute.

Kawagoe, K. and Sekine, T., 1967 - Estimation of temperature-time curves in rooms. Japanese Building Research Institute.

Kawagoe, K. and Sekine, T., 1964 - Estimation of temperature-time curves in rooms. Japanese Building Research Institute.

Kirby, B. R., Wainman, D. and Tomlinson, L., 1994 - Natural fires in large scale compartments. A British Steel Technical, Fire Research Station Collaborative Report. Swinden Laboratories. p. 89.

Law, A., Stern-Gottfried, J., Gillie, M. and Rein, G., 2011 - The influence of travelling fires on a concrete frame. *Engineering Structures*. Vol. 33, n.º 5, p. 1635-1642.

Law, A., Stern-Gottfried, J., Gillie, M. and Rein, G., 2010 - The Influence of Travelling Fires on the Response of a Concrete Frame. *Structures in Fire: Proceedings of the 6th International Conference*. p. 189-196.

Lennon, T. and Moore, D., 2003 - The natural fire safety concept - full-scale tests at Cardington. *Fire Safety Journal*. Vol. 38, n.º 7, p. 623-643.

Lie, T. T., 1974 - Characteristic Temperature Curves for Various Fire Severities. National Research Council of Canada: Fire Technology.

Lie, T. T., 1995 - Fire Temperature-Time Relations. In: *Engineers, S. o. F. P. - SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*.

Lie, T. T. and ASCE, 1992 - Structural Fire Protection. American Society of Civil Engineers. Committee on Fire Protection.

Ma, Z. and Mäkeläinen, P., 2000 - Parametric temperature-time curves of medium compartment fires for structural design. *Fire Safety Journal*. Vol. 34, n.º 4, p. 361-375.

Magnusson, S. E. and Helander, S., 1970 - Temperature-time curves of complete process of fire development - theoretical study of wood fuel fires in enclosed spaces. Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Lund Institute of Technology.

MAI, 2008a - Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndio em Edifícios.

MAI, 2008b - Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios.

Martins, S. P. A., 2010 - Avaliação da Resistência ao Fogo da Estrutura de Túneis. Tese de Mestrado Universidade de Aveiro.

McCaffrey, B., Quintiere, J. and Harkleroad, M., 1981 - Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations. *Fire Technology*. Vol. 17, n.º 2, p. 98-119.

McGrattan, K. B. and Forney, G. P., 2001 - FDS - Fire Dynamics Simulator. NIST - National Institute of Standards and Technology.

Mell, W., Jenkins, M. A., Gould, J. and Cheney, P., 2007 - A physics-based approach to modelling grassland fires. *International Journal of Wildland Fire*. Vol. 16, n.º 1, p. 1-22.

Mowrer, F. W., 2002 - The Right Tool for the Right Job. *Fire Protection Engineering Magazine*. n.º 13, p. 39-44.

NFSC, 1999 - Competitive Steel Buildings through Natural Fire Safety Concept. (to be published by the European Commission): Profil ARBED Research.

NIST, 2010 - Fire Dynamics Simulator - Technical Reference Guide. National Institute of Standards and Technology.

NIST, 2008 - Structural Fire Response and Probable Collapse Sequence of World Trade Center Building 7 Volume 1. National Institute of Standards and Technology.

NKB, 1994 - Performance and Requirements for Fire Safety and Technical Guide for Verification by Calculation. NKB Committee and Works: Nordic Committee on Building Regulations.

Novozhilov, V., 2001 - Computational fluid dynamics modeling of compartment fires. *Progress in Energy and Combustion Science*. Vol. 27, n.º 6, p. 611-666.

Novozhilov, V., Kirkpatrick, M., Kent, J. H., Sazonov, V., Zhang, L., Mann, A. and Dixon, T. F., 2001 - Computational fluid dynamics modelling of tube erosion rates in bagasse-fired boilers. *Journal of the Institute of Energy*. Vol. 74, n.º 499, p. 57-65.

Olenick, S. M. and Carpenter, D. J., 2003 - An Updated International Survey of Computer Models for Fire and Smoke. *Journal of Fire Protection Engineering*. Vol. 13, n.º 02, p. 87-110.

Pereira, P. J. R. M., 1993 - Incêndios em Edifícios na Cidade do Porto. Tese de Mestrado em Construção de Edifícios Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Pettersson, O., Magnusson, S. E. and Thor, J., 1976 - Fire Engineering Design of Steel Structures. Swedish Institute of Steel Construction.

Pope, N. D. and Bailey, C. G., 2006 - Quantitative comparison of FDS and parametric fire curves with post-flashover compartment fire test data. Fire Safety Journal. Vol. 41, n.º 2, p. 99-110.

Ptchelintsev, A., Hasemi, Y. and Nikolaenko, M., 1995 - Numerical analysis of structures exposed to localized fire: First International ASIAFLAM Conference at Kowloon. Hong Kong.

Ritchie, S. J., Steckler, K. D., Hamins, A., Cleary, T. G. and Kashiwagi, T., 1997 - The effect of sample size on the heat release rate of charring materials (ed Hasemi Y.). Fire Safety Science - Proceedings of the Fifth International Symposium, International Association for Fire Safety Science, p. 177-188.

Routley, J. G., 1988 - Interstate Bank Building Fire, Los Angeles, California. U.S. Fire Administration Technical Report 022.

Routley, J. G., Jennings, C. and Chubb, M., 1991 - Highrise Office Building Fire, One Meridian Plaza, Philadelphia, Pennsylvania. U.S. Fire Administration Technical Report 049.

Rubini, P. A., 1997 - SOFIE - Simulation of Fires in Enclosures: Proceedings of 5 International Symposium on Fire Safety Science. Melbourne, Australia: International Association for Fire Safety Science.

Santos, R. T., 2009 - Modelos Numéricos de Pilares Mistos Curtos de Seções Circulares de Aço Preenchidos com Concreto em Situação de Incêndio. USP - Universidade de São Paulo.

SFPE, 2002 - SFPE handbook of fire protection engineering. National Fire Protection Association, Society of Fire Protection Engineers.

Silva, V. P., 2001 - Estruturas de Aço em Situação de Incêndio. Zigurate.

Stern-Gottfried, J., 2011 - Travelling Fires for Structural Design. PhD Thesis University of Edinburgh. 158 f.

Stern-Gottfried, J., Law, A., Rein, G., Gillie, M. and Torero, J., 2010a - A Performance Based Methodology Using Travelling Fires for Structural Analysis: 8th International Conference on Performance Based Codes and Fire Safety Design Methods. Lund.

Stern-Gottfried, J., Rein, G., Bisby, L. A. and Torero, J. L., 2010b - Experimental review of the homogeneous temperature assumption in post-flashover compartment fires. *Fire Safety Journal*. Vol. 45, n.º 4, p. 249-261.

Stern-Gottfried, J., Rein, G. and Torero, J., 2009 - Travel Guide. *Fire Risk Management*. p. 12-15.

Thomas, I. R. and Bennets, I. D., 1999 - Fires in Enclosures with Single Ventilation Openings - Comparison of Long and Wide Enclosures: The 6th International Symposium on Fire Safety Science. Poitiers, France.

Vassart, O., Cajot, L. G. and Brasseur, M., 2007 - DIFISEK+ - Dissemination of Structural Fire Safety Engineering Knowledge throughout, Research Fund for Coal and Steel: WP1 - Thermal and mechanical actions.

Vila Real, P., 2003 - Incêndio em estruturas metálicas: cálculo estrutural. Orion.

Vila Real, P., 2010 - Risco de incêndios urbanos: aspectos gerais de verificação da resistência ao fogo das estruturas à luz da regulamentação vigente. *RPEE - Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*. Vol. II, n.º 8, p. 43-54. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Vila Real, P., Couto, C. and Lopes, N., 2011 - Utilização do software Elefir-EN na verificação da resistência ao fogo de parques de estacionamento sujeitos a incêndios localizados simultâneos. VIII Congresso de Construção Metálica e Mista, Guimarães, p. 159-169.

Vila Real, P. and Franssen, J. M., 2011 - Elefir-EN V1.4.5: Software for Fire Design of Steel Structural Members According the Eurocode 3. Disponível em <<http://elefiren.web.ua.pt/>>.

Vila Real, P. and Lopes, N., 2010 - Evaluation of the steel structure fire resistance of a shopping centre using structural fire engineering. Nápoles.

Walton, W. D. and Thomas, P. H., 1995 - Estimating Temperatures in Compartment Fires. In: *Engineers, S. o. F. P. - SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*.

Welch, S., Jowsey, A., Deeny, S., Morgan, R. and Torero, J. L., 2007 - BRE large compartment fire tests-Characterising post-flashover fires for model validation. *Fire Safety Journal*. Vol. 42, n.º 8, p. 548-567.

Wickstrom, U., Robbins, A. and Baker, G., 2010 - The Use of Adiabatic Surface Temperature to Design Structures for Fire. Structures in Fire: Proceedings of the 6th International Conference. p. 951-958.

Zehfuss, J. and Hosser, D., 2007 - A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings. Fire Safety Journal. Vol. 42, n.º 2, p. 115-126.





---

# *Anexos*

## *Anexo A*

## Anexos

### Curvas temperatura-tempo para área igual a 25m<sup>2</sup>

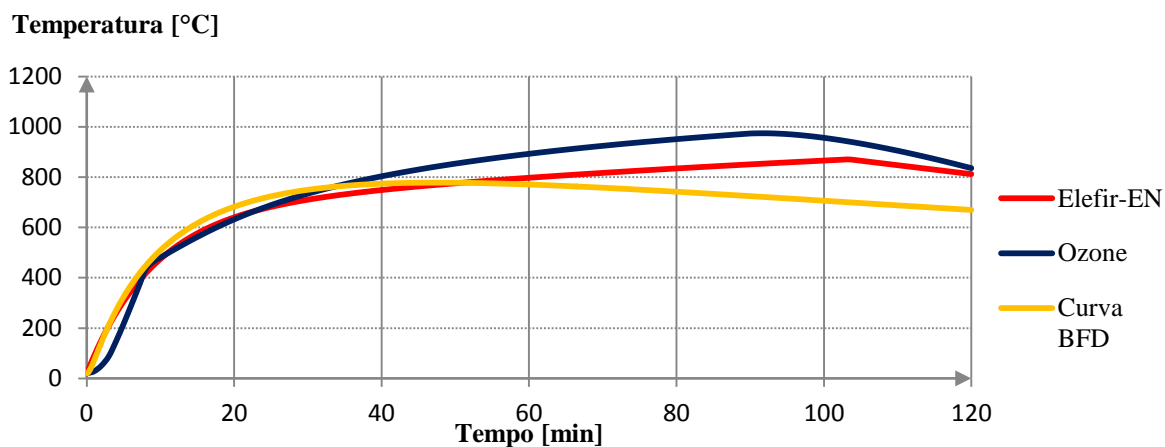


Figura A. 1 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 25m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.02m<sup>0.5</sup>

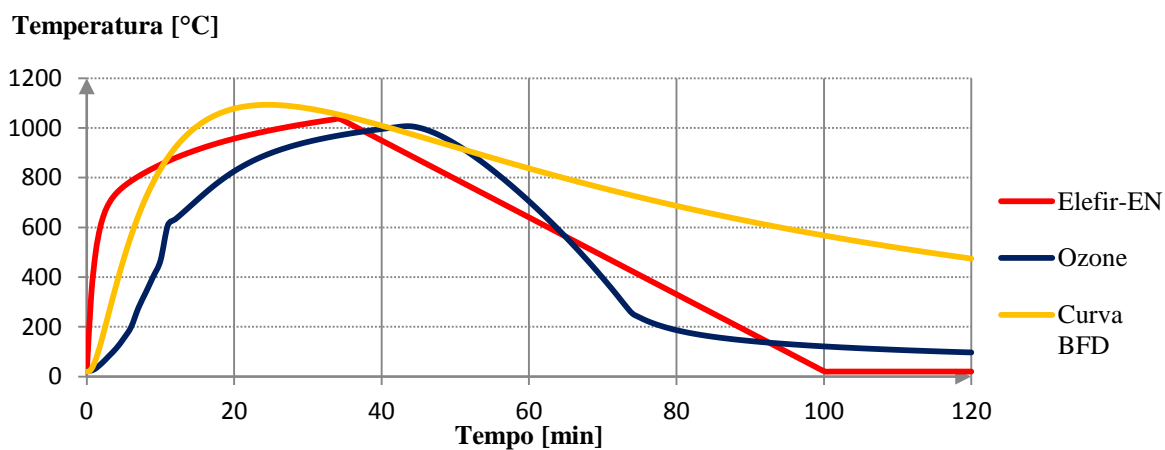


Figura A. 2 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 25m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06m<sup>0.5</sup>

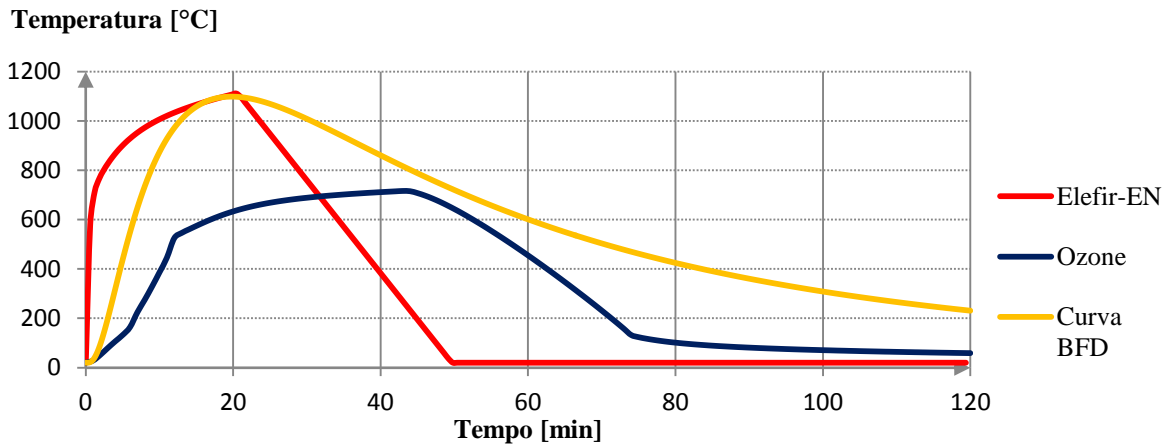


Figura A. 3 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 25m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.10m<sup>0.5</sup>

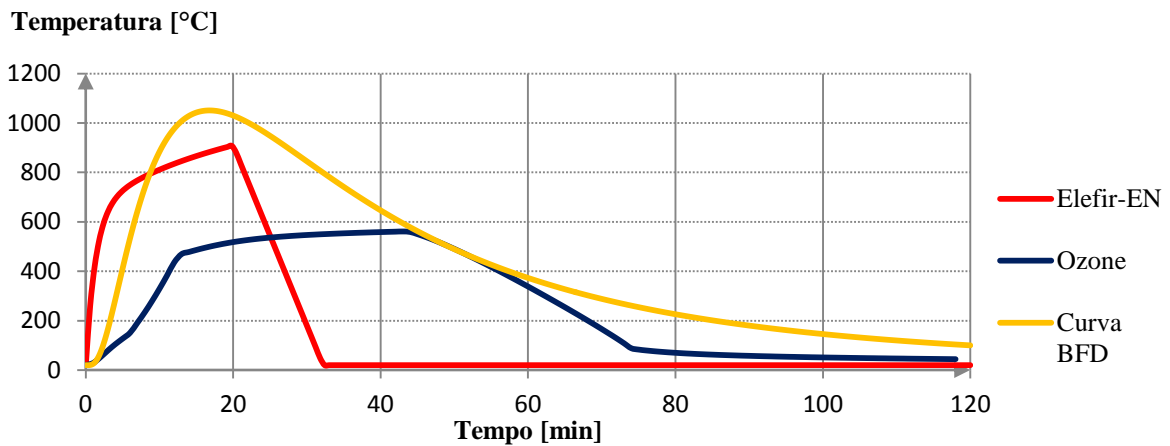


Figura A. 4 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 25m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.14m<sup>0.5</sup>

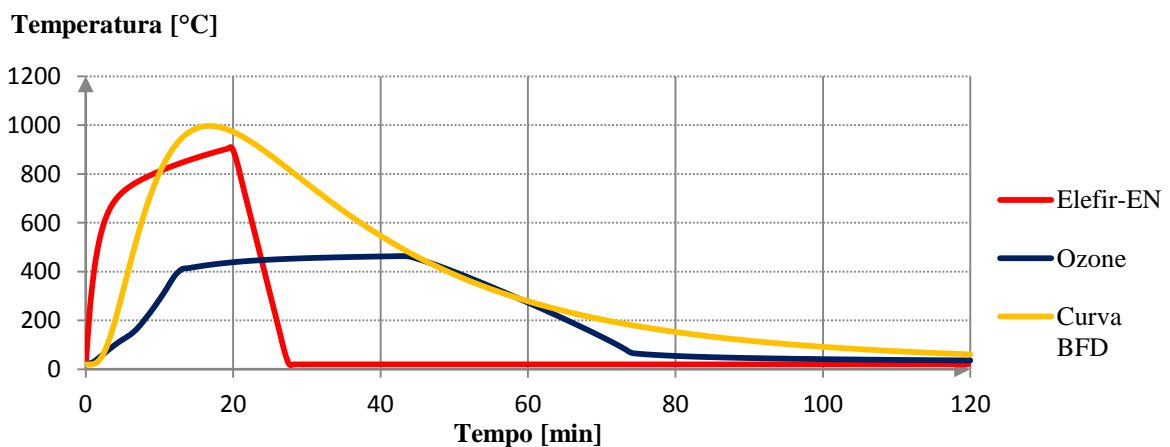


Figura A. 5 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 25m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.18m<sup>0.5</sup>

### Curvas temperatura-tempo para área igual a 50m<sup>2</sup>

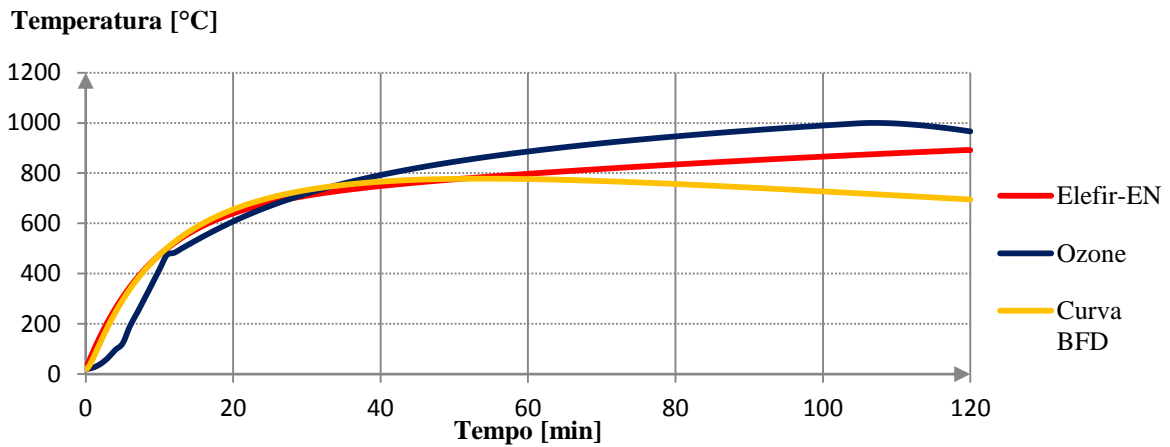


Figura A. 6 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 50m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.02m<sup>0.5</sup>

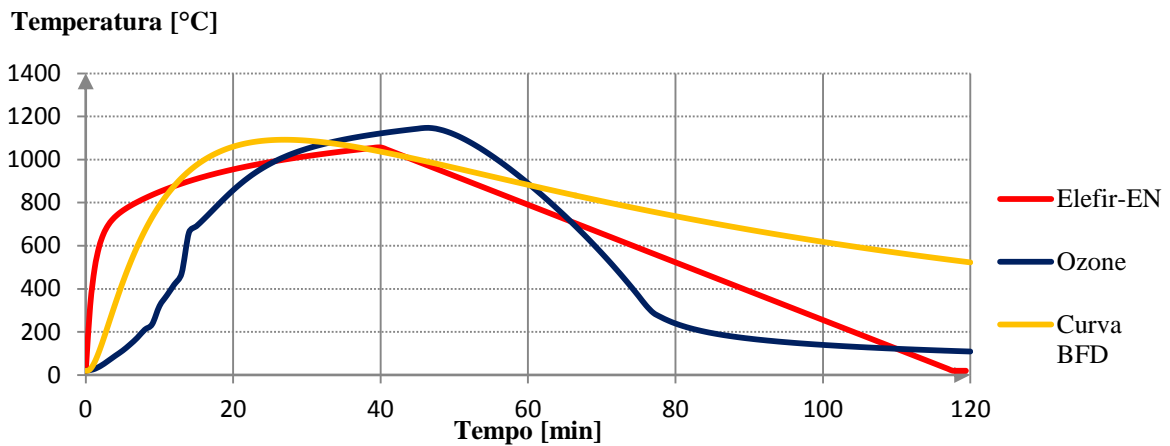


Figura A. 7 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 50m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06m<sup>0.5</sup>

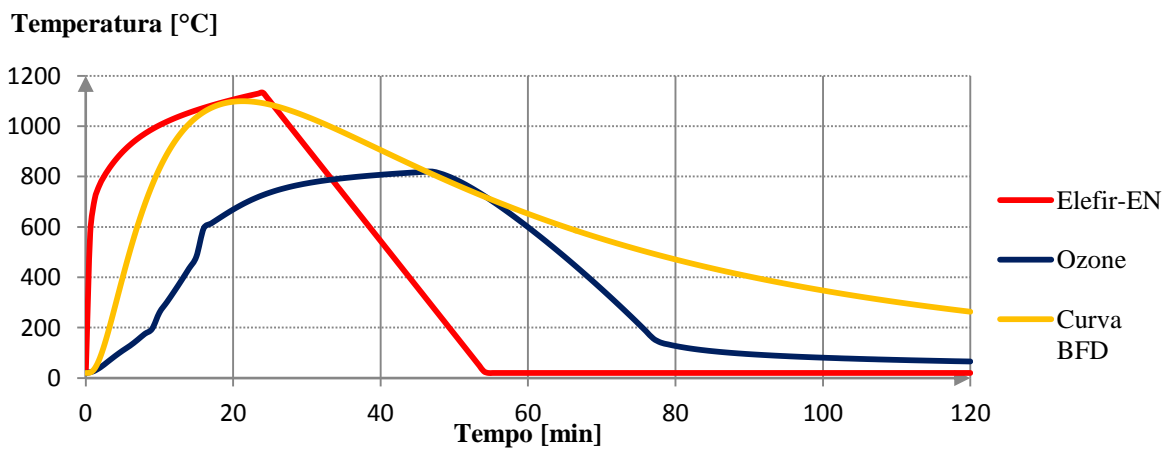


Figura A. 8 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 50m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.10m<sup>0.5</sup>

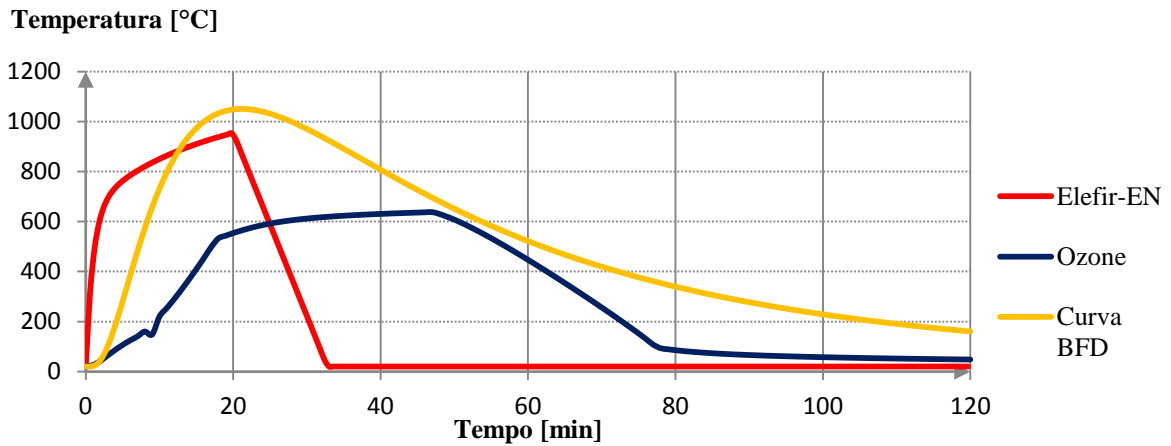


Figura A. 9 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 50m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.14m<sup>0.5</sup>

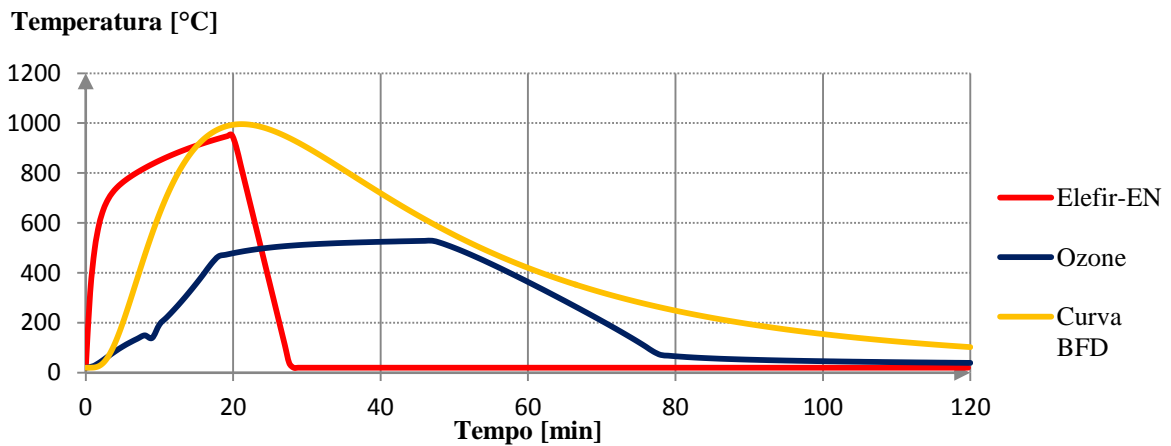


Figura A. 10 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 50m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.18m<sup>0.5</sup>

Curvas temperatura-tempo para área igual a 100m<sup>2</sup>

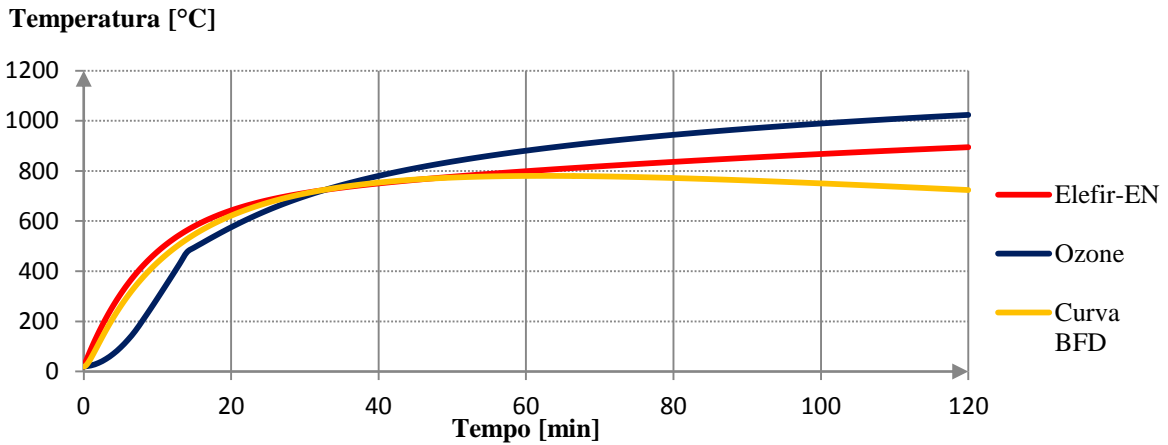


Figura A. 11 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 100m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.02m<sup>0.5</sup>

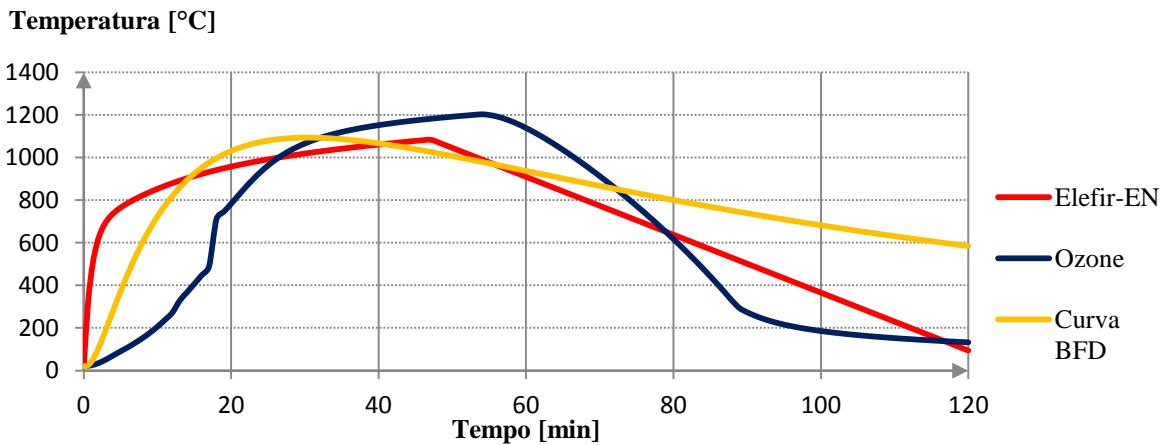


Figura A. 12 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 100m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06m<sup>0.5</sup>

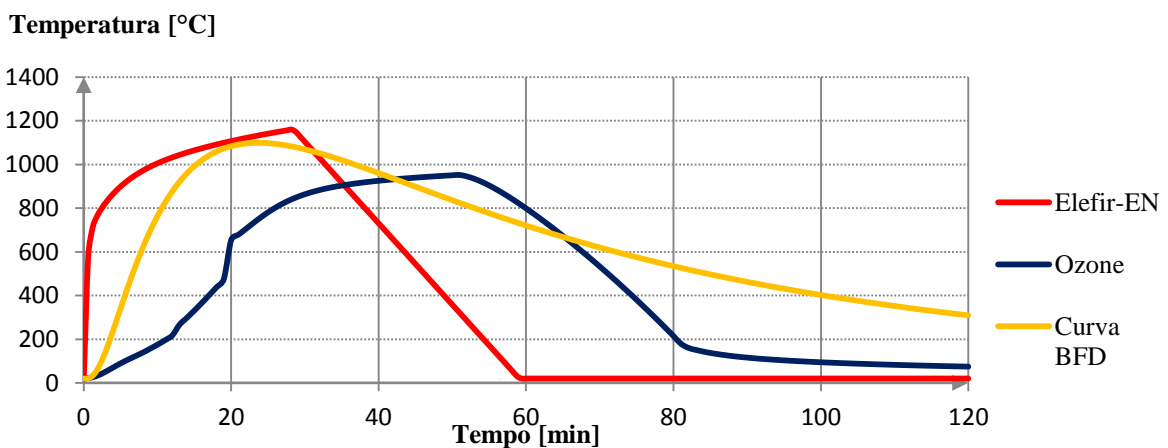


Figura A. 13 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 100m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.10m<sup>0.5</sup>

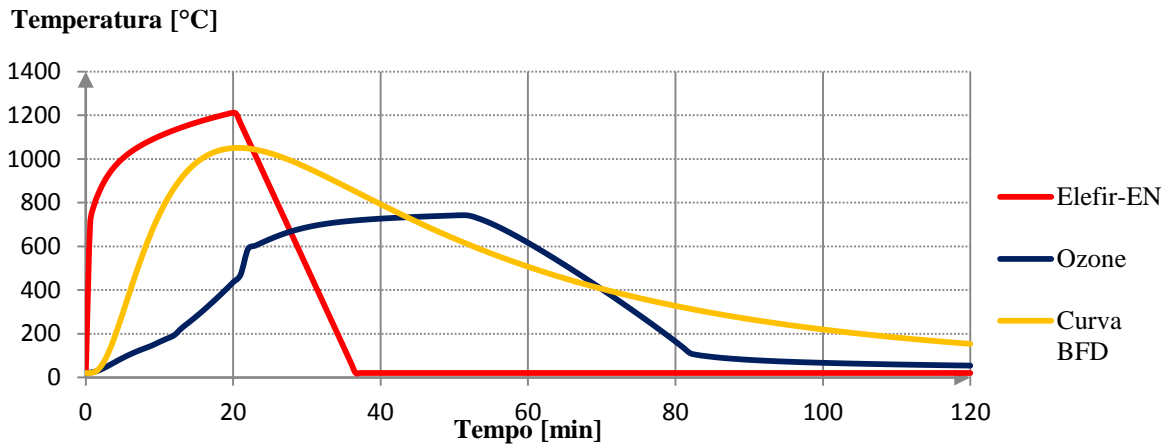


Figura A. 14 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de  $100\text{m}^2$  e fator de abertura de  $0.14\text{m}^{0.5}$

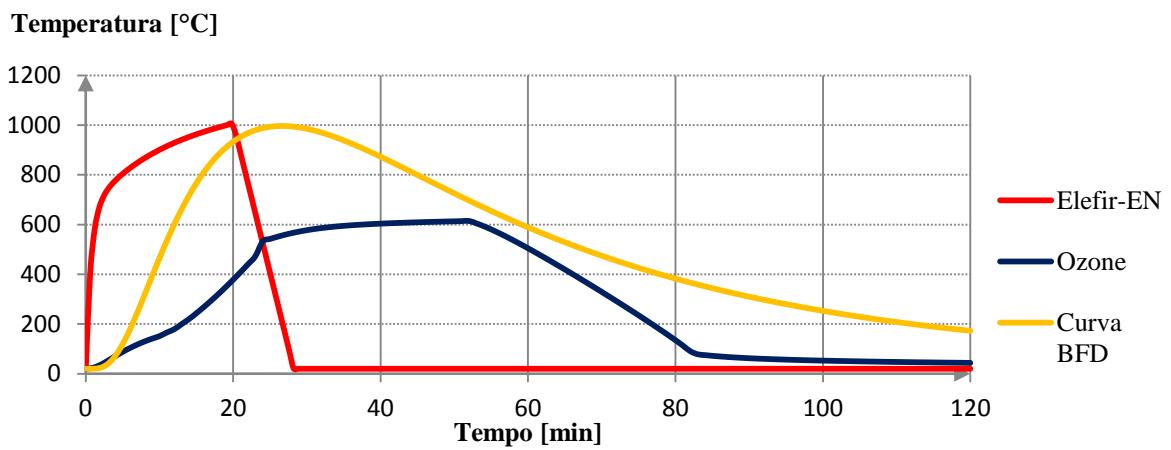


Figura A. 15 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de  $100\text{m}^2$  e fator de abertura de  $0.18\text{m}^{0.5}$

### Curvas temperatura-tempo para área igual a 200m<sup>2</sup>

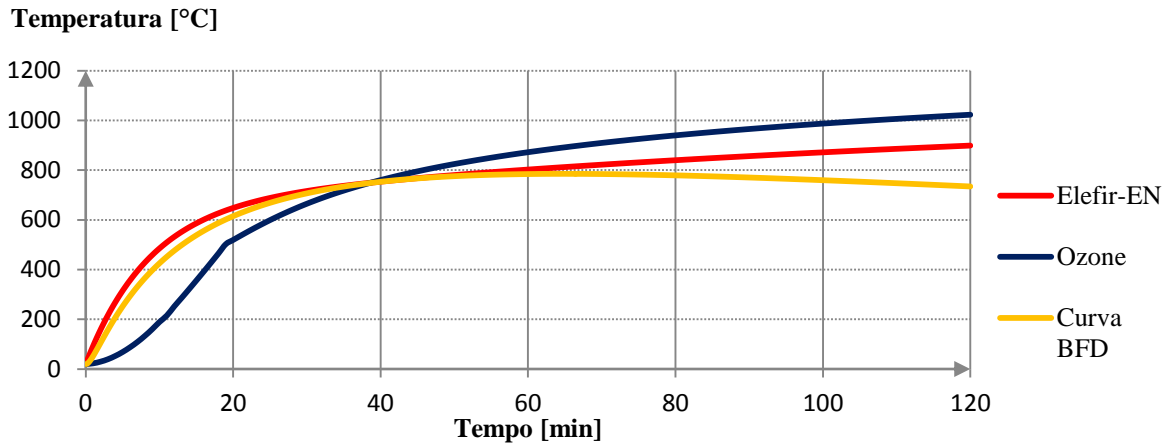


Figura A. 16 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 200m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.02m<sup>0.5</sup>

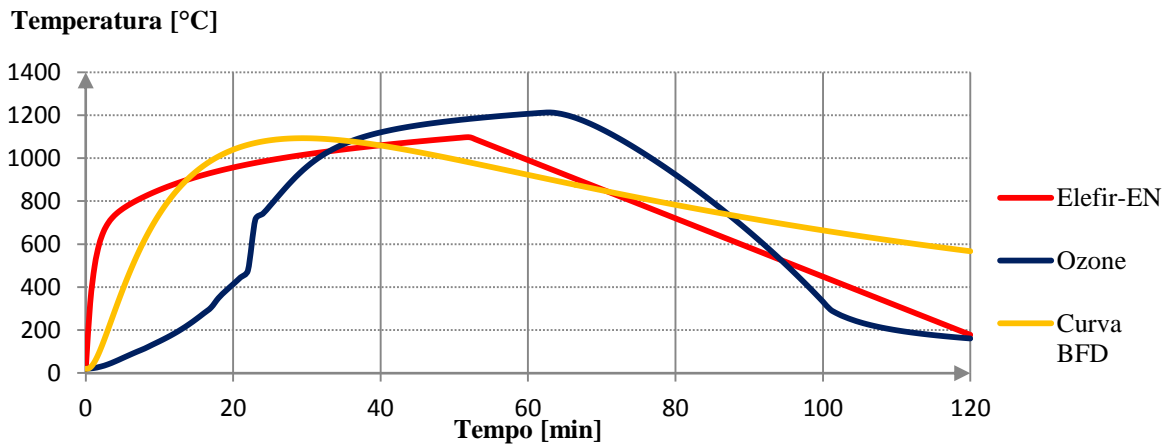


Figura A. 17 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 200m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06m<sup>0.5</sup>

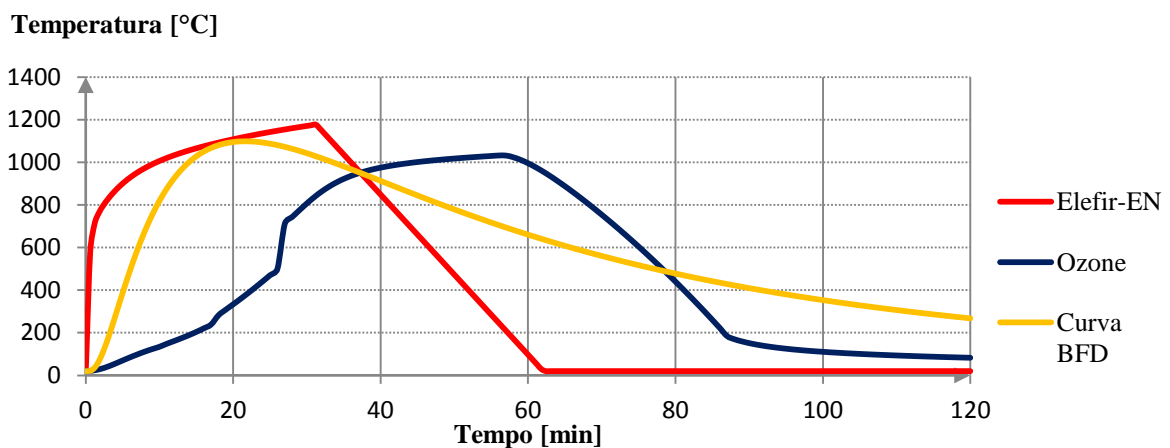


Figura A. 18 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 200m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.10m<sup>0.5</sup>



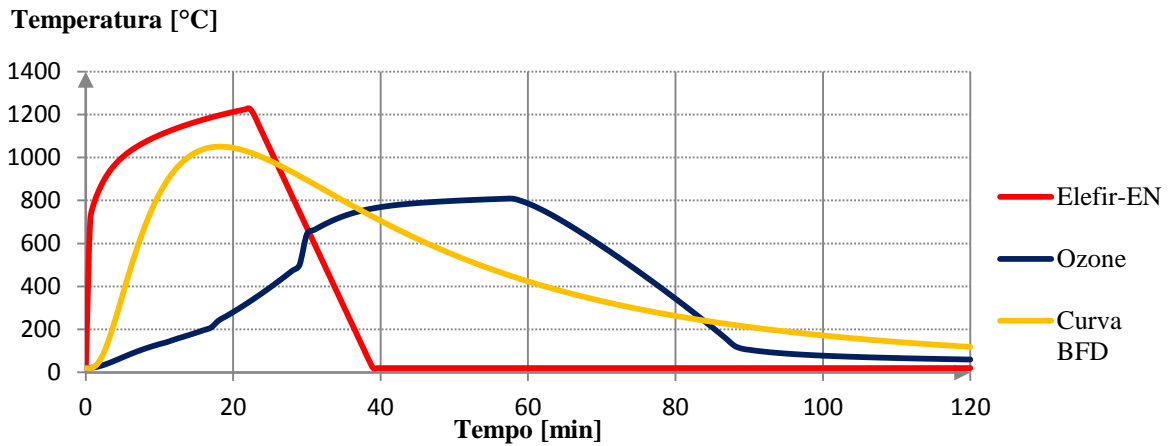


Figura A. 19 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 200m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.14m<sup>0.5</sup>

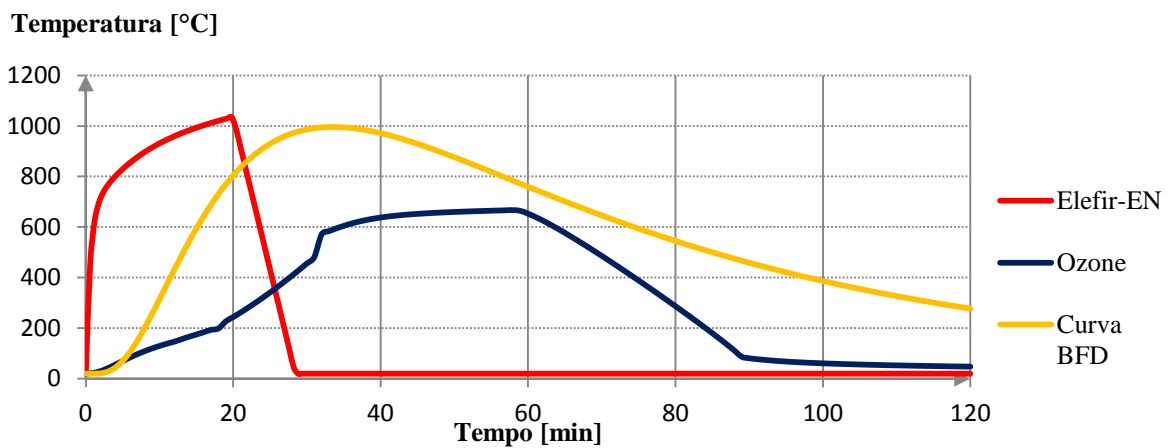


Figura A. 20 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 200m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.18m<sup>0.5</sup>

### Curvas temperatura-tempo para área igual a 500m<sup>2</sup>

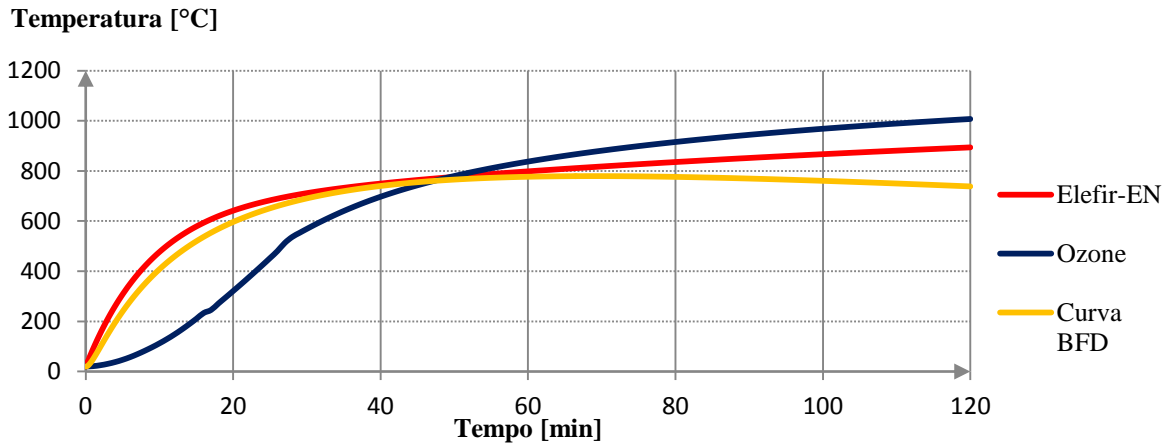


Figura A. 21 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 500m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.02m<sup>0.5</sup>

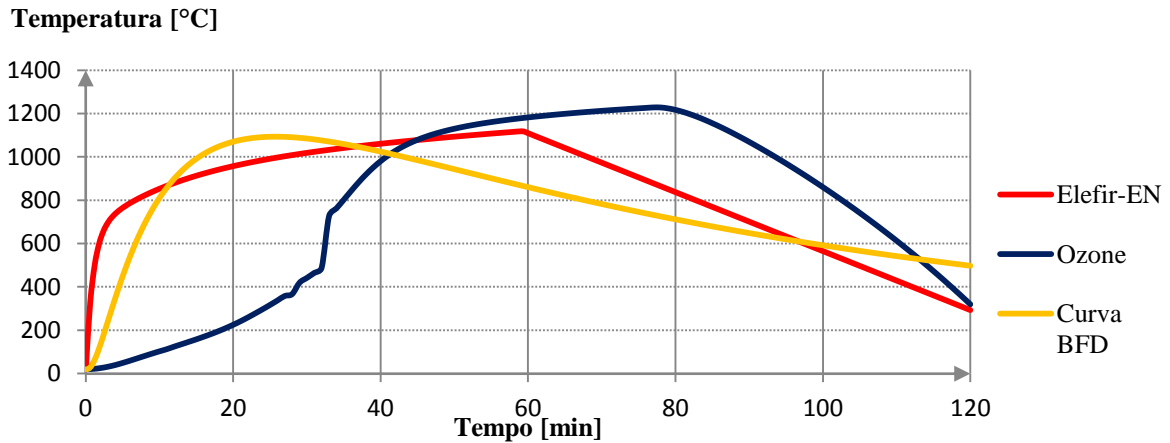


Figura A. 22 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 500m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06m<sup>0.5</sup>

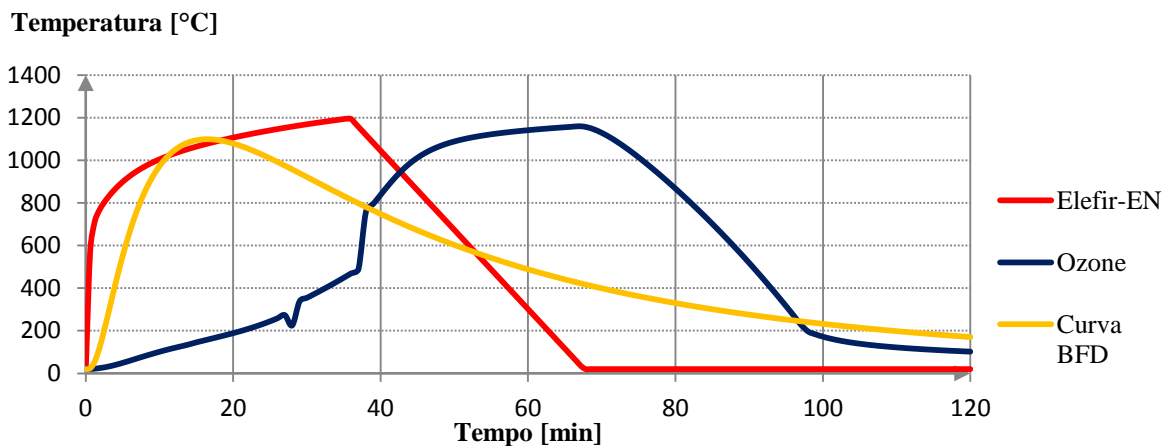


Figura A. 23 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 500m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.10m<sup>0.5</sup>

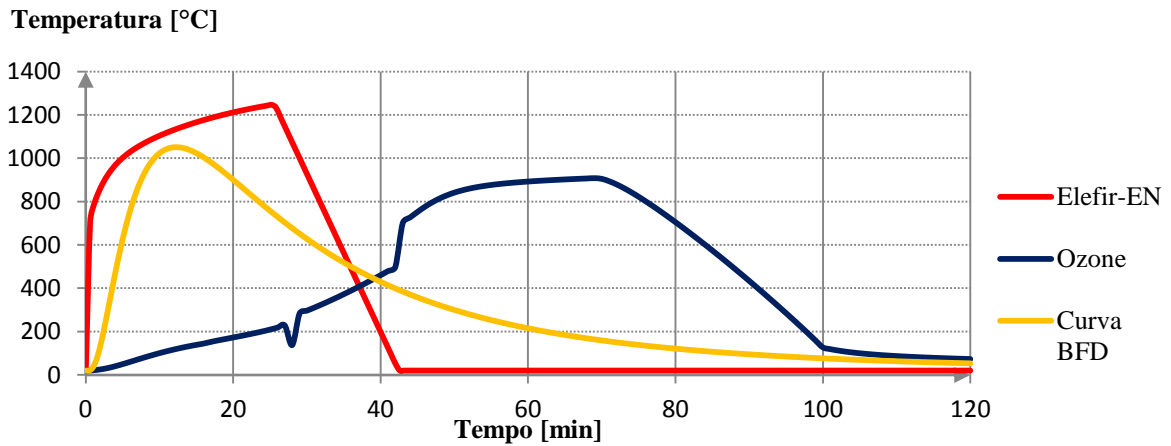


Figura A. 24 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 500m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.14m<sup>0.5</sup>

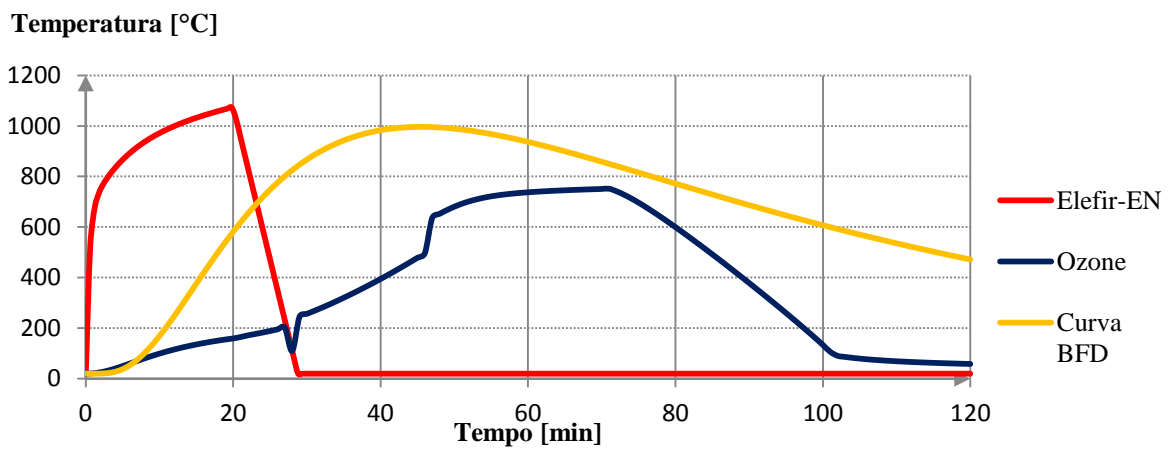


Figura A. 25 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 500m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.18m<sup>0.5</sup>

### Curvas paramétricas em função da área do compartimento

Temperatura [°C]

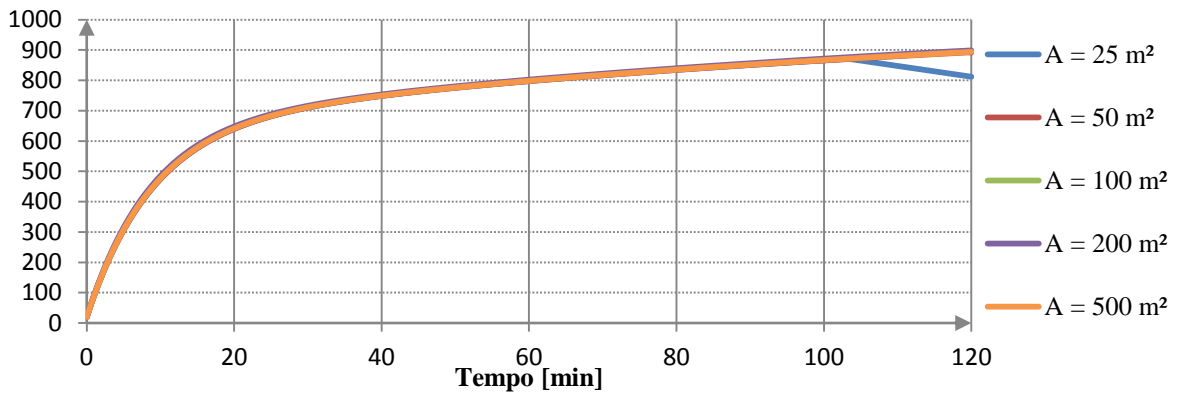


Figura A. 26 – Curvas paramétricas que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.02m^{0.5}$

Temperatura [°C]

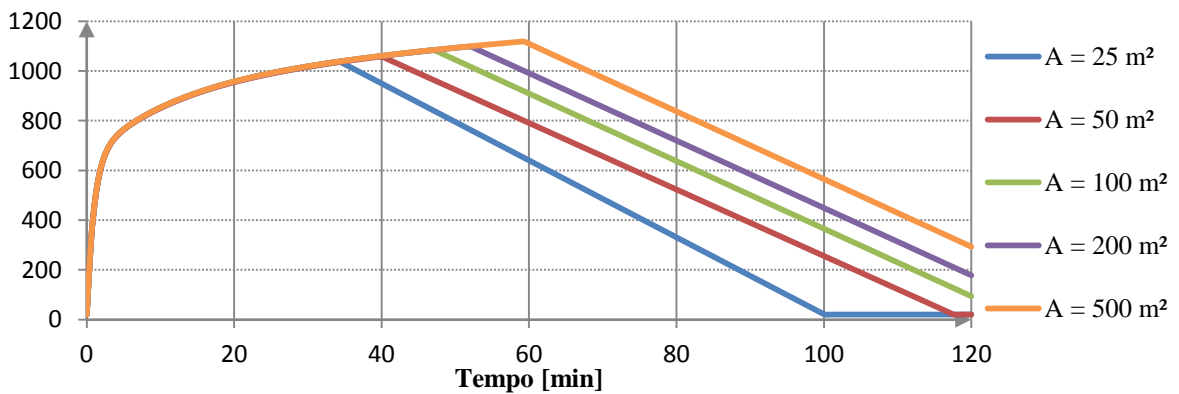


Figura A. 27 – Curvas paramétricas que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.06m^{0.5}$

Temperatura [°C]

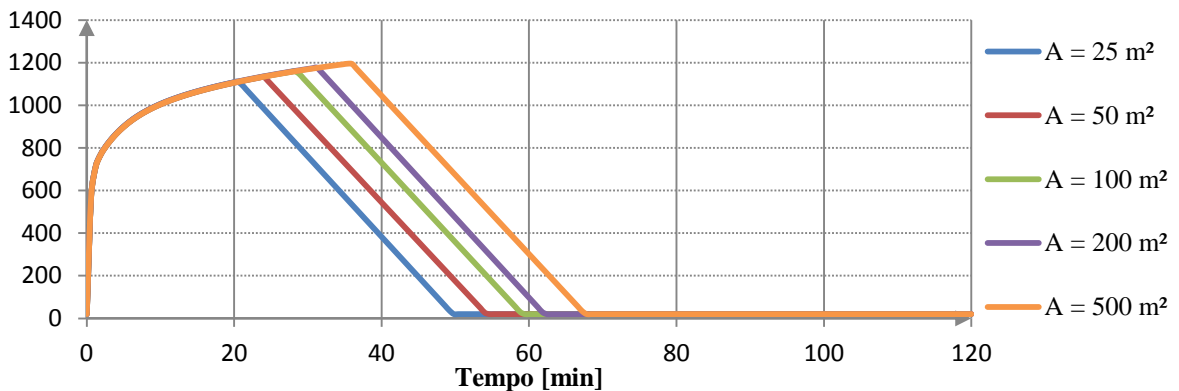


Figura A. 28 – Curvas paramétricas que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.10m^{0.5}$

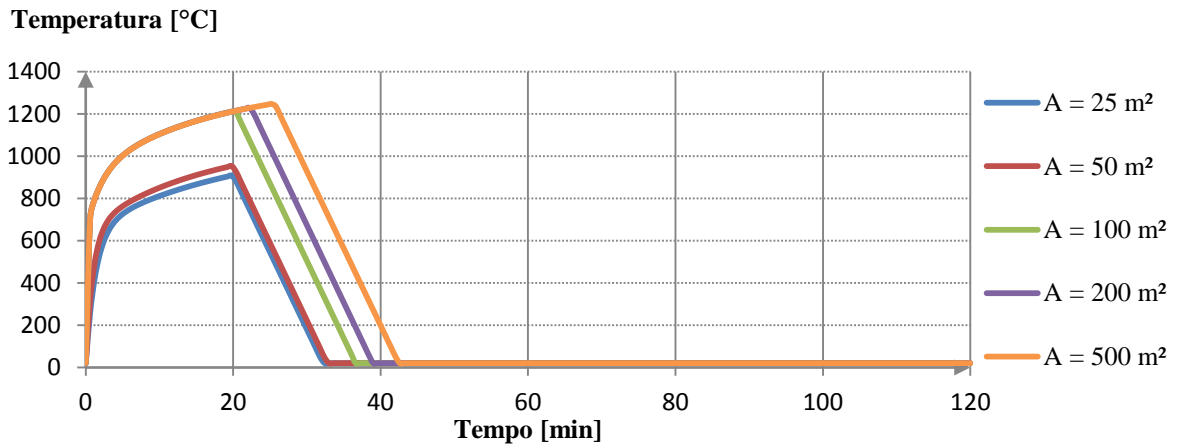


Figura A. 29 – Curvas paramétricas que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.14m^{0.5}$

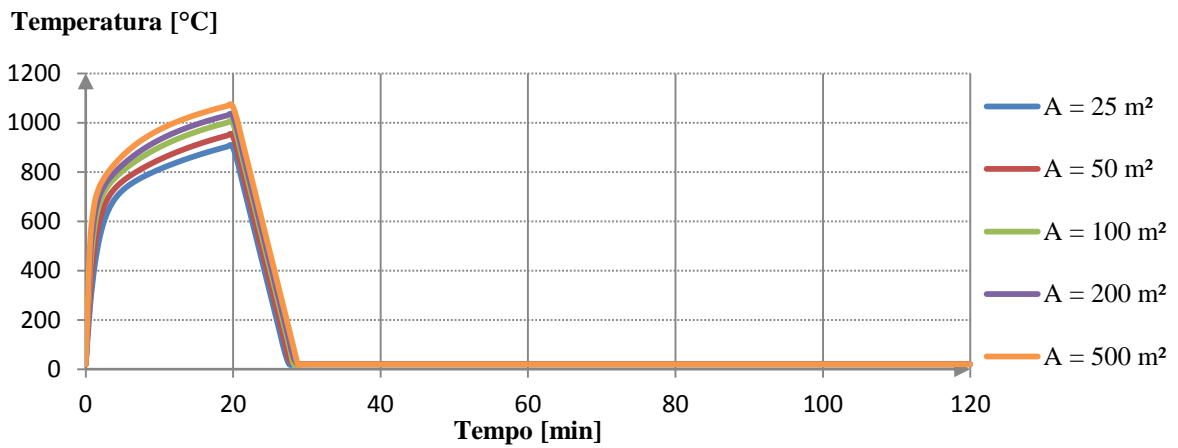


Figura A. 30 – Curvas paramétricas que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.18m^{0.5}$

### Curvas temperatura-tempo usando um modelo de duas zonas, em função da área do compartimento

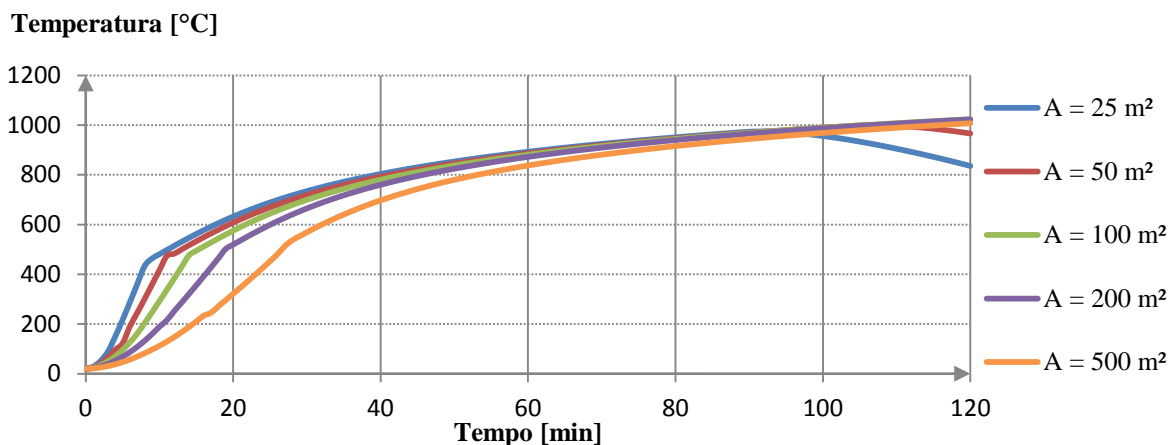


Figura A. 31 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.02m^{0.5}$  usando um modelo de duas zonas no programa OZone

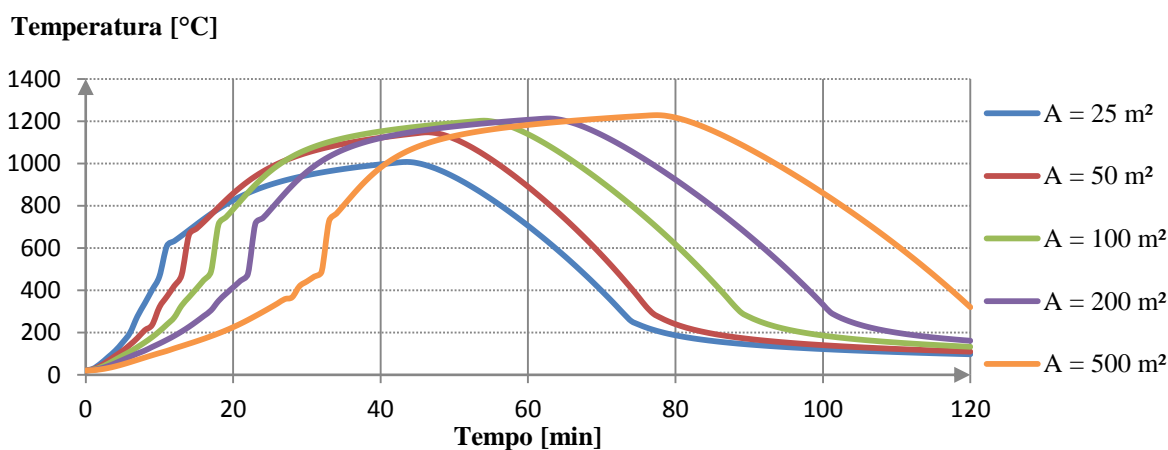


Figura A. 32 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.06m^{0.5}$  usando um modelo de duas zonas no programa OZone

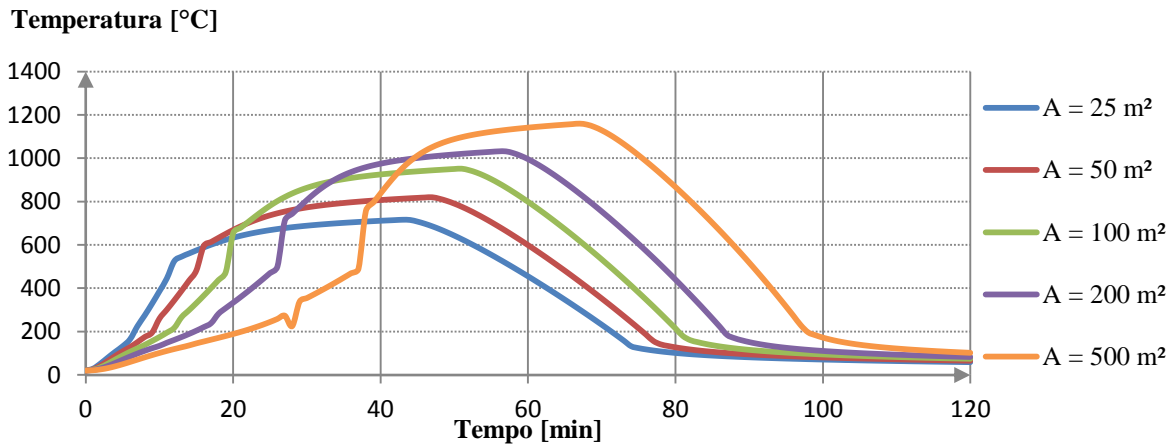


Figura A. 33 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.10m^{0.5}$  usando um modelo de duas zonas no programa OZone

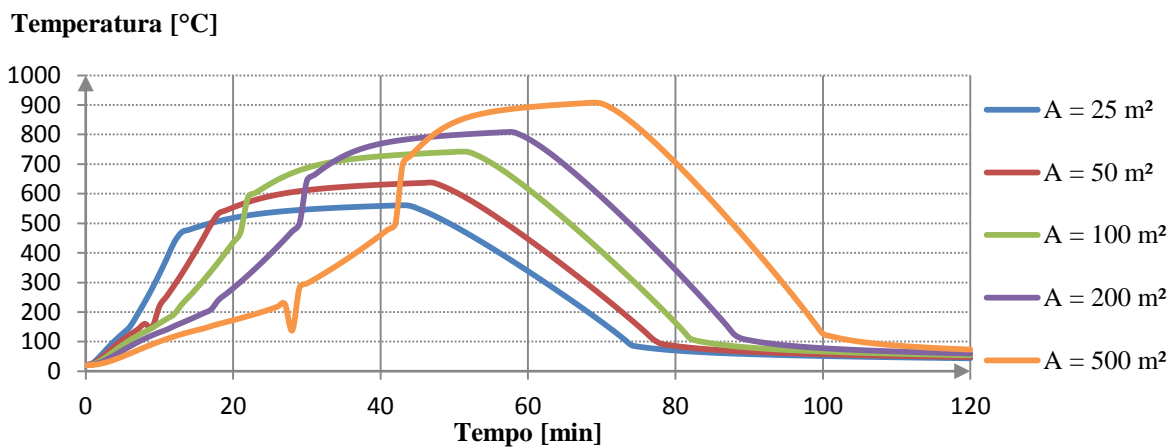


Figura A. 34 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.14m^{0.5}$  usando um modelo de duas zonas no programa OZone

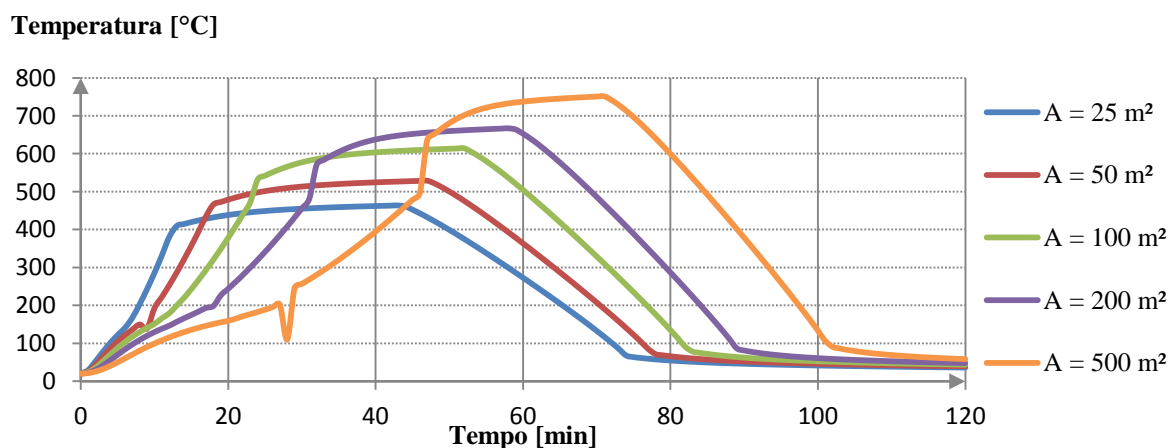


Figura A. 35 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.18m^{0.5}$  usando um modelo de duas zonas no programa OZone

### Curvas BFD em função da área do compartimento

Temperatura [°C]

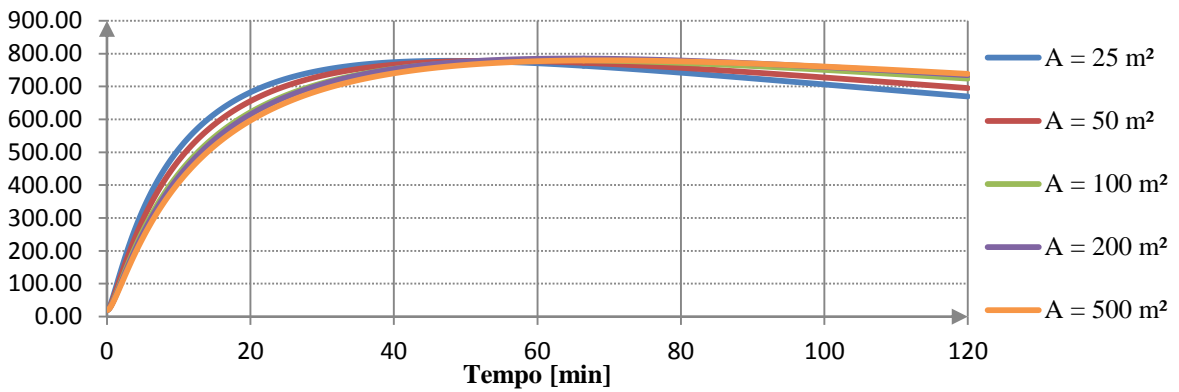


Figura A. 36 – Curvas BFD que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.02m^{0.5}$

Temperatura [°C]

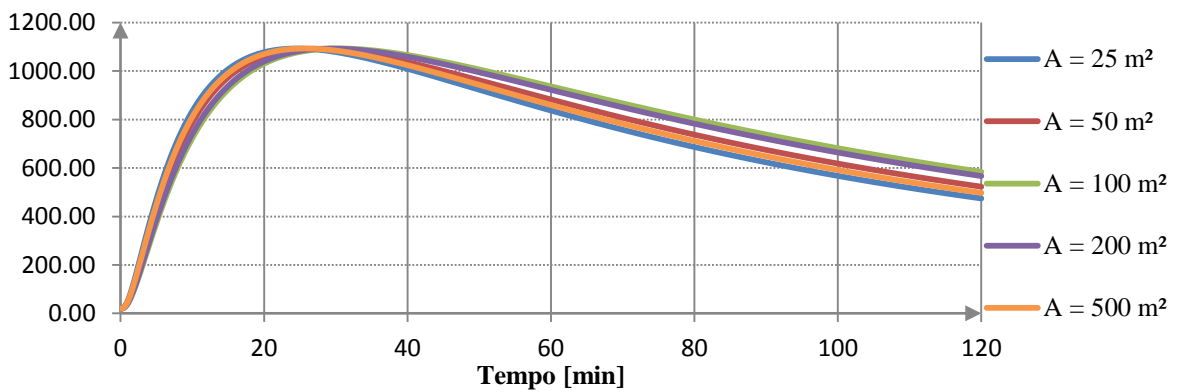


Figura A. 37 – Curvas BFD que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.06m^{0.5}$

Temperatura [°C]

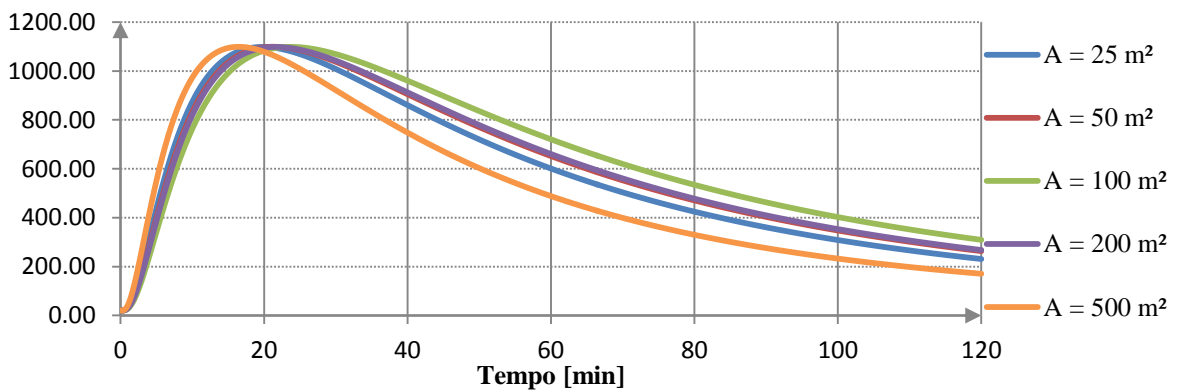


Figura A. 38 – Curvas BFD que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.10m^{0.5}$



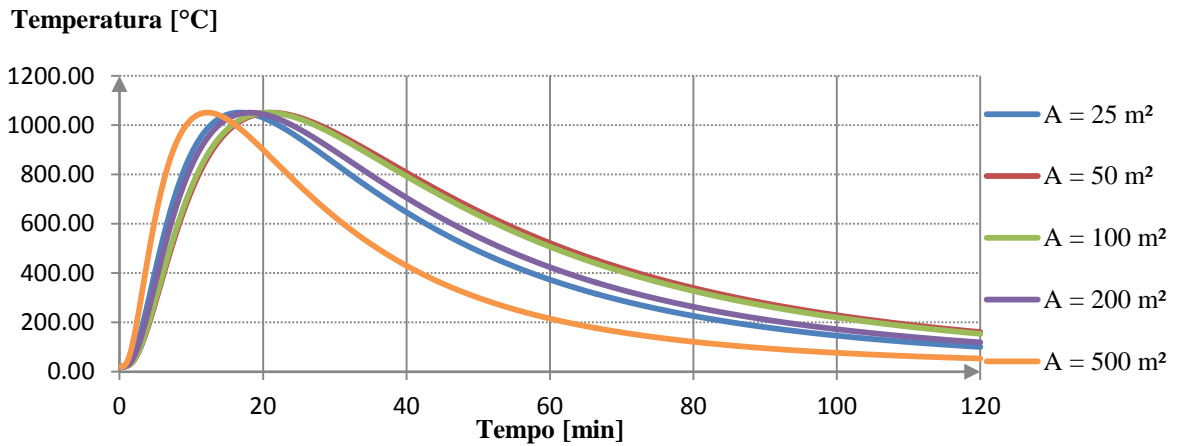


Figura A. 39 – Curvas BFD que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.14m^{0.5}$

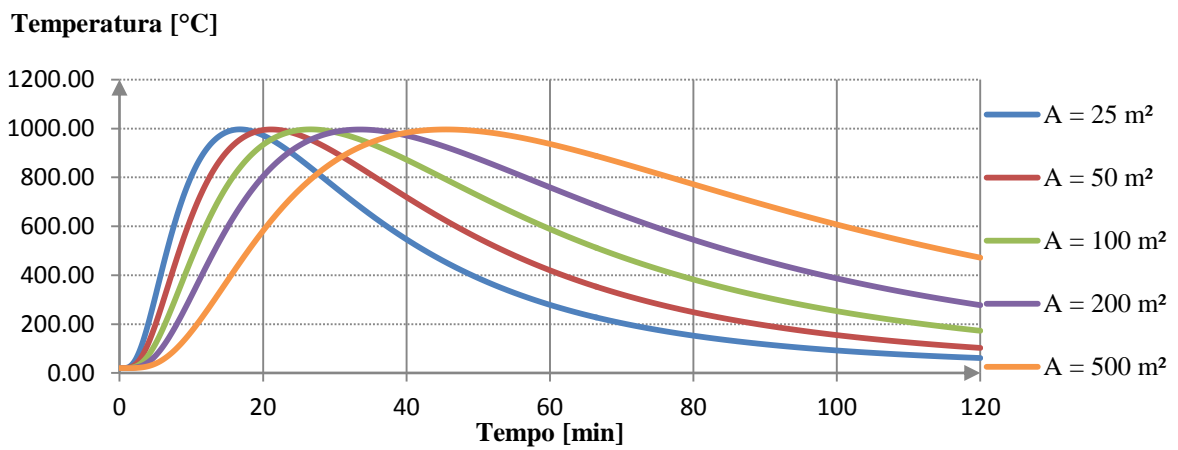


Figura A. 40 – Curvas BFD que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.18m^{0.5}$

### Curvas paramétricas em função do fator de abertura do compartimento

Temperatura [°C]

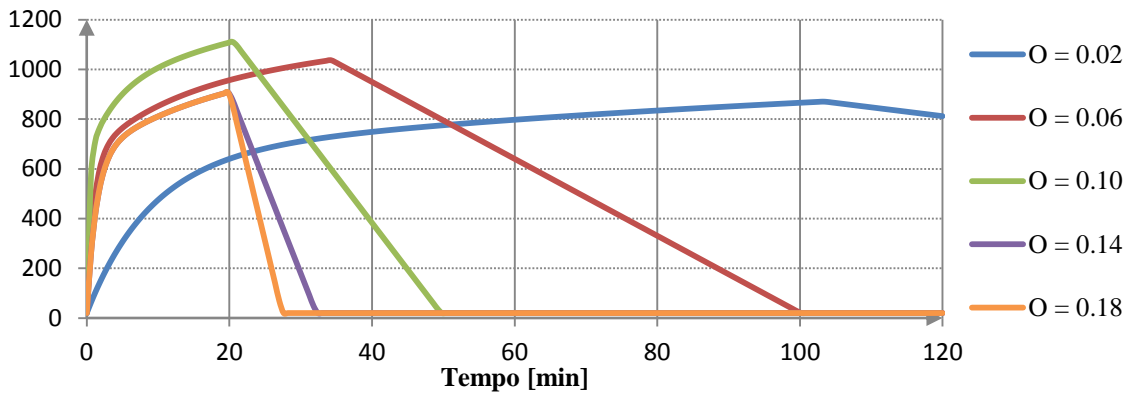


Figura A. 41 – Curvas paramétricas que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área igual a 25m<sup>2</sup>

Temperatura [°C]

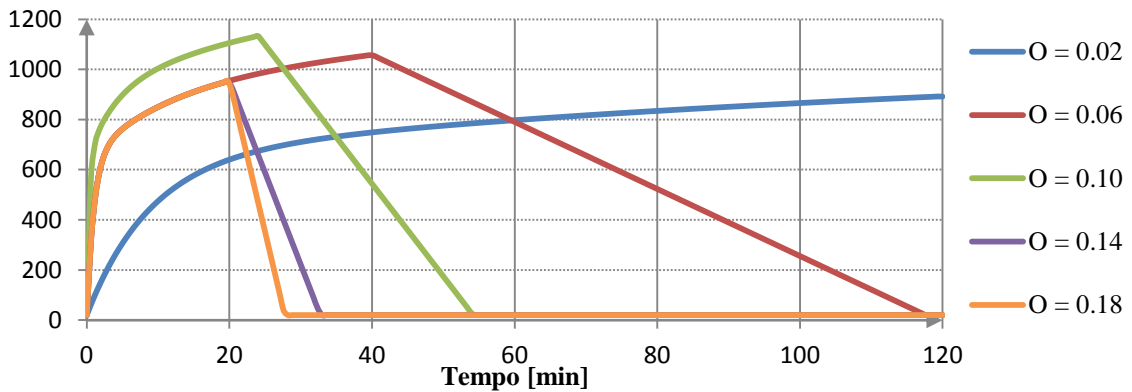


Figura A. 42 – Curvas paramétricas que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área igual a 50m<sup>2</sup>

Temperatura [°C]

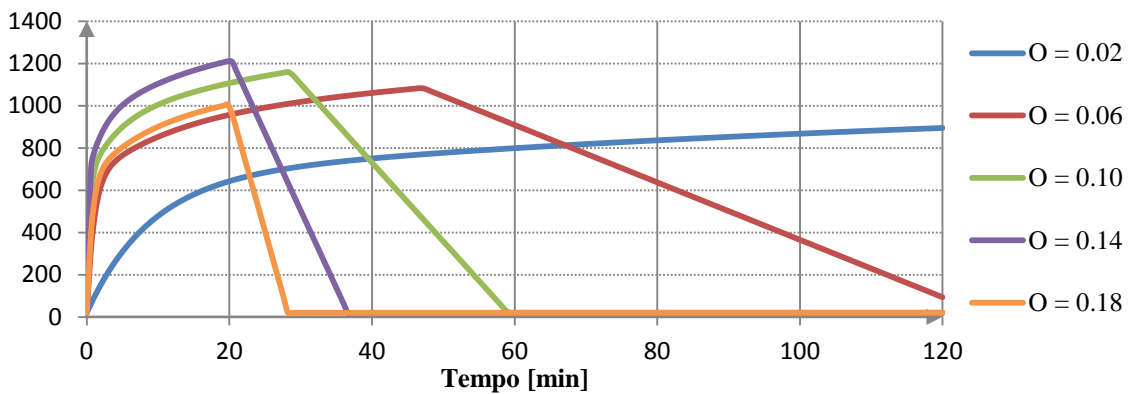


Figura A. 43 – Curvas paramétricas que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área igual a 100m<sup>2</sup>

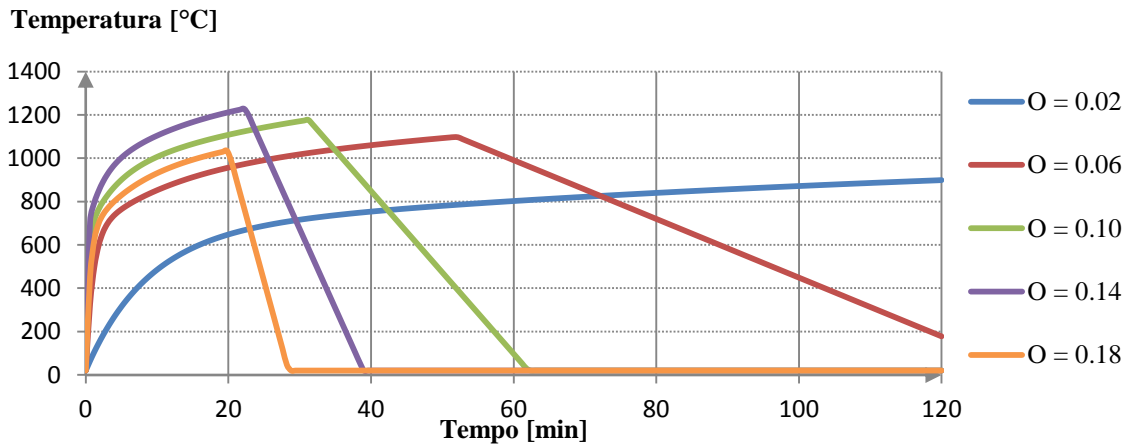


Figura A. 44 – Curvas paramétricas que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área igual a 200m<sup>2</sup>

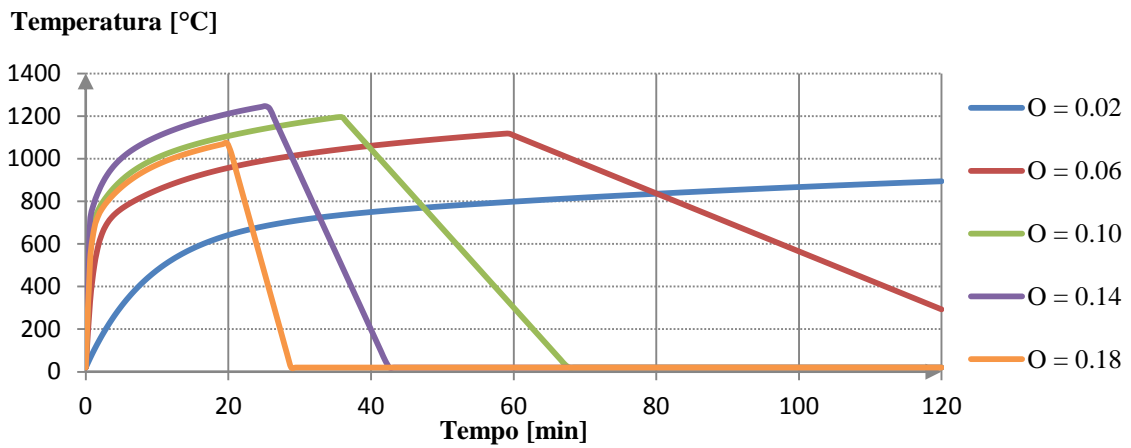


Figura A. 45 – Curvas paramétricas que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área igual a 500m<sup>2</sup>

### Curvas temperatura-tempo usando um modelo de duas zonas, em função do fator de abertura do compartimento

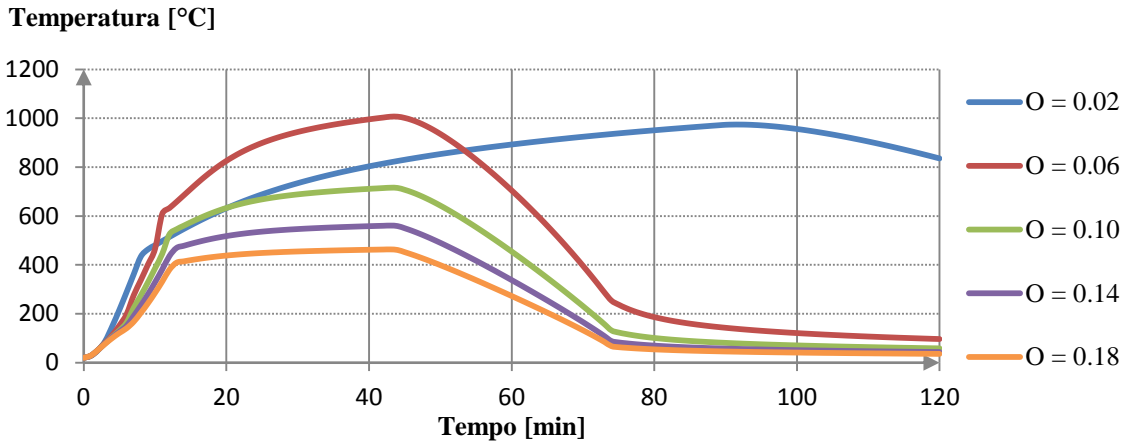


Figura A. 46 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área igual a 25m<sup>2</sup> usando um modelo de duas zonas no programa OZone

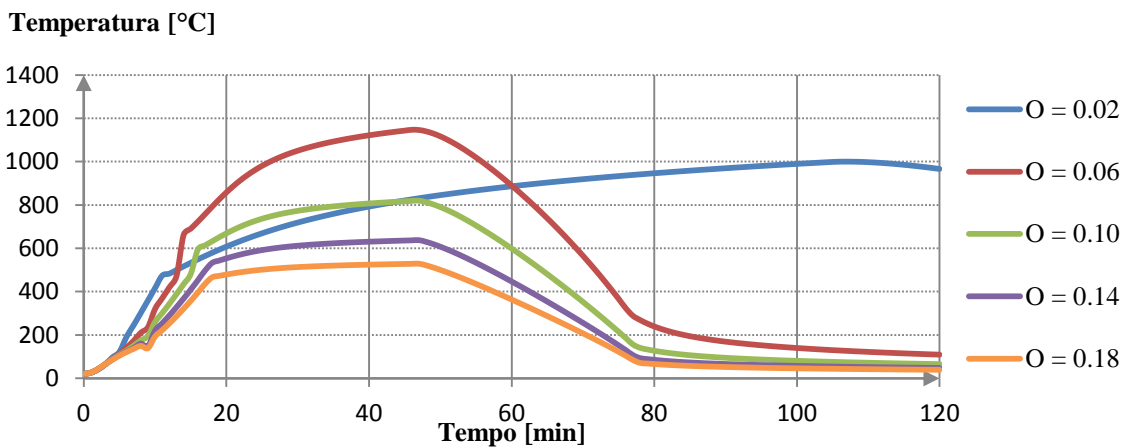


Figura A. 47 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área igual a 50m<sup>2</sup> usando um modelo de duas zonas no programa OZone

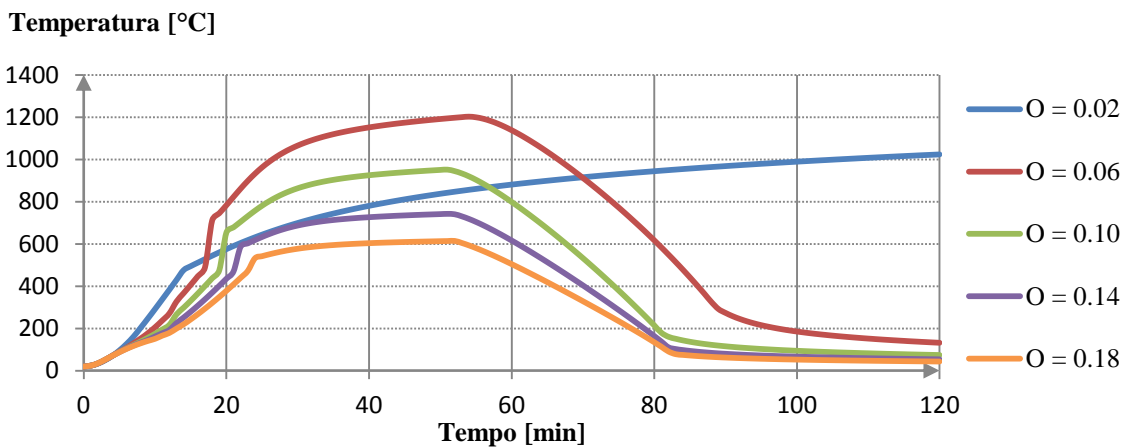


Figura A. 48 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área igual a 100m<sup>2</sup> usando um modelo de duas zonas no programa OZone

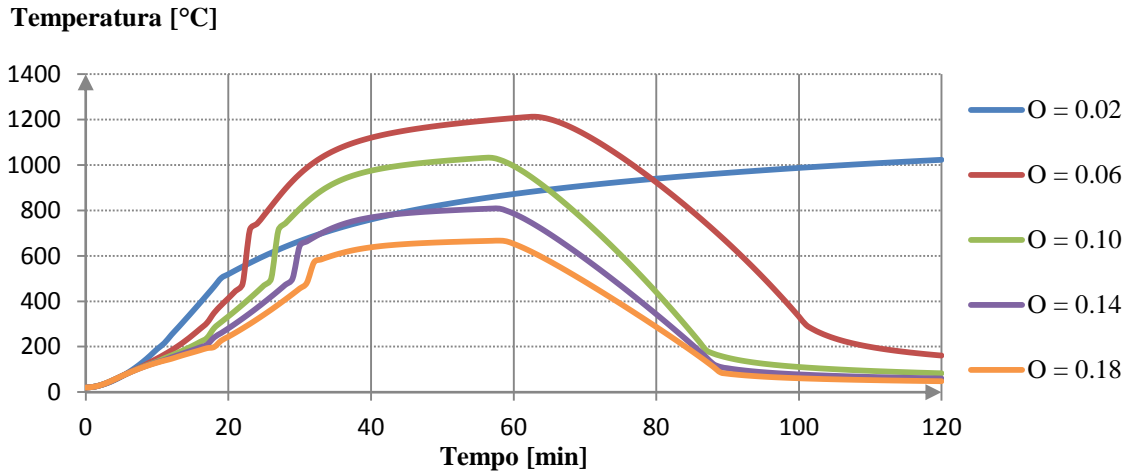


Figura A. 49 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área igual a 200m<sup>2</sup> usando um modelo de duas zonas no programa OZone

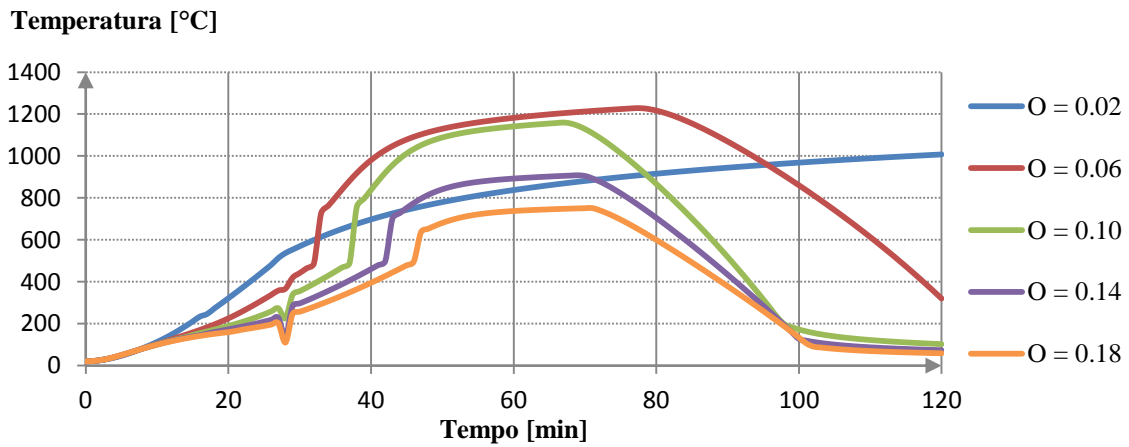


Figura A. 50 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área igual a 500m<sup>2</sup> usando um modelo de duas zonas no programa OZone

### Curvas BFD em função do fator de abertura do compartimento

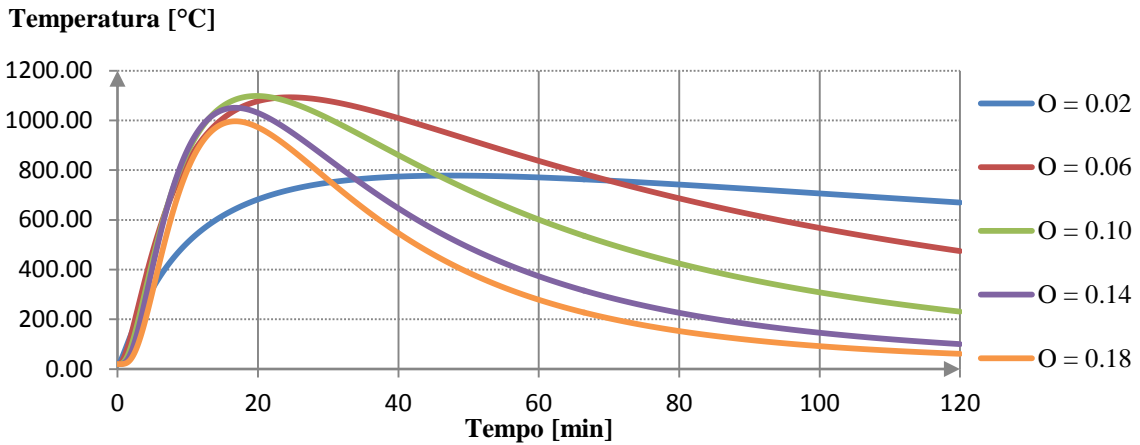


Figura A. 51 – Curvas BFD que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área igual a 25m<sup>2</sup>

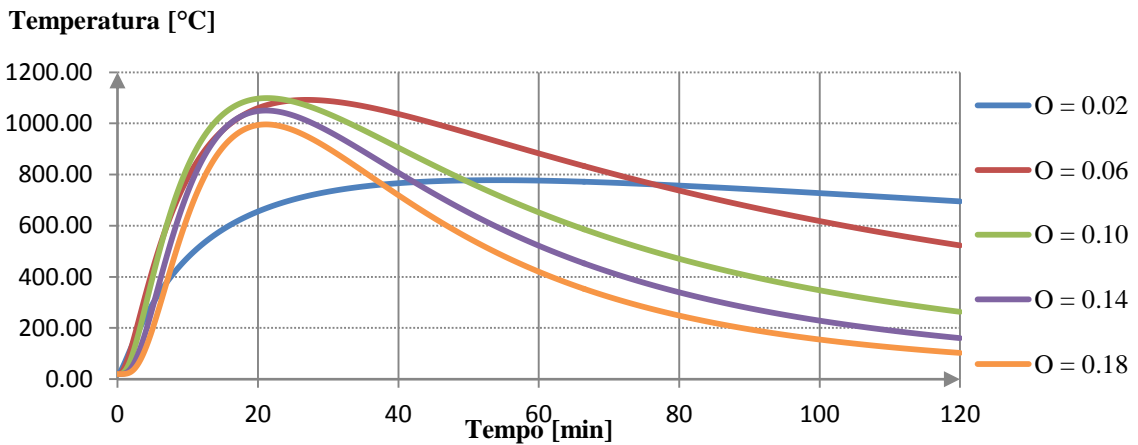


Figura A. 52 – Curvas BFD que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área igual a 50m<sup>2</sup>

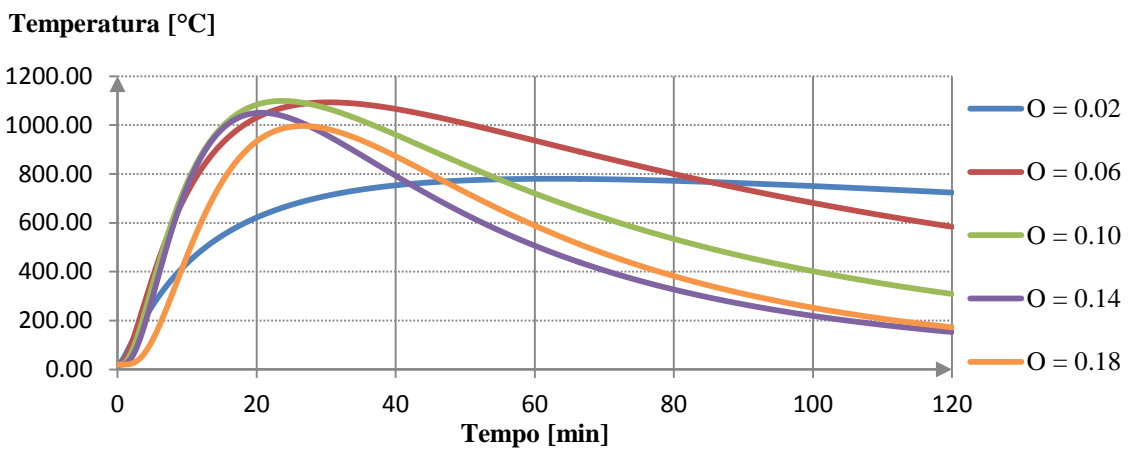


Figura A. 53 – Curvas BFD que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área igual a 100m<sup>2</sup>

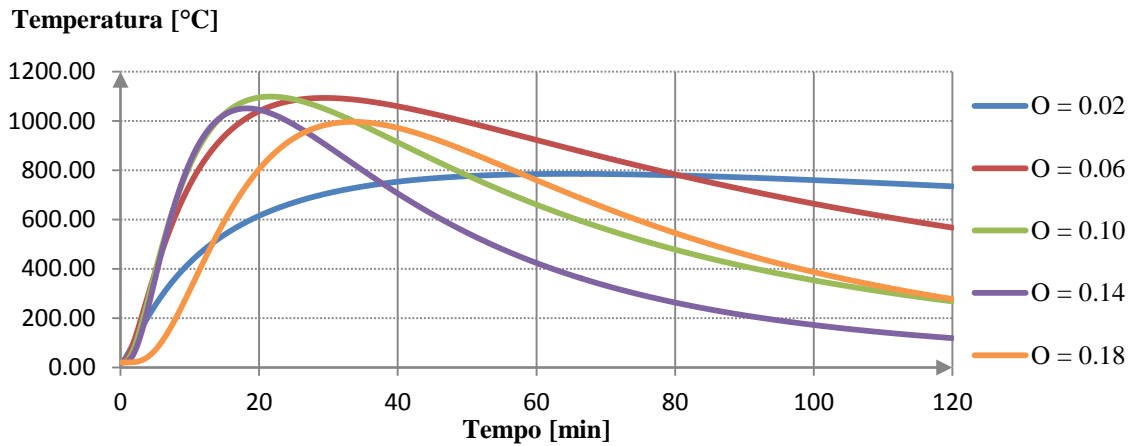


Figura A. 54 – Curvas BFD que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área igual a 200m<sup>2</sup>

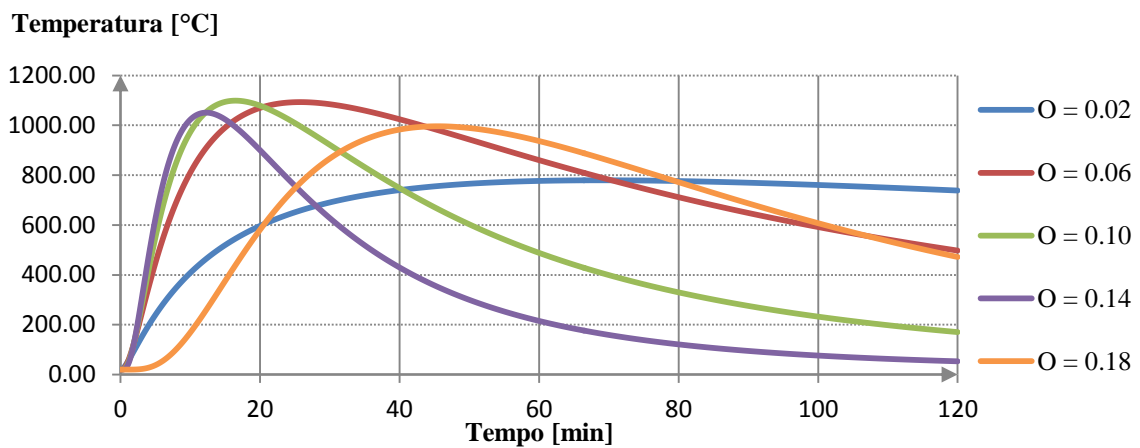


Figura A. 55 – Curvas BFD que representam a variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área igual a 500m<sup>2</sup>





---

*Anexos*

*Anexo B*

### Curvas temperatura-tempo para área igual a 25m<sup>2</sup>

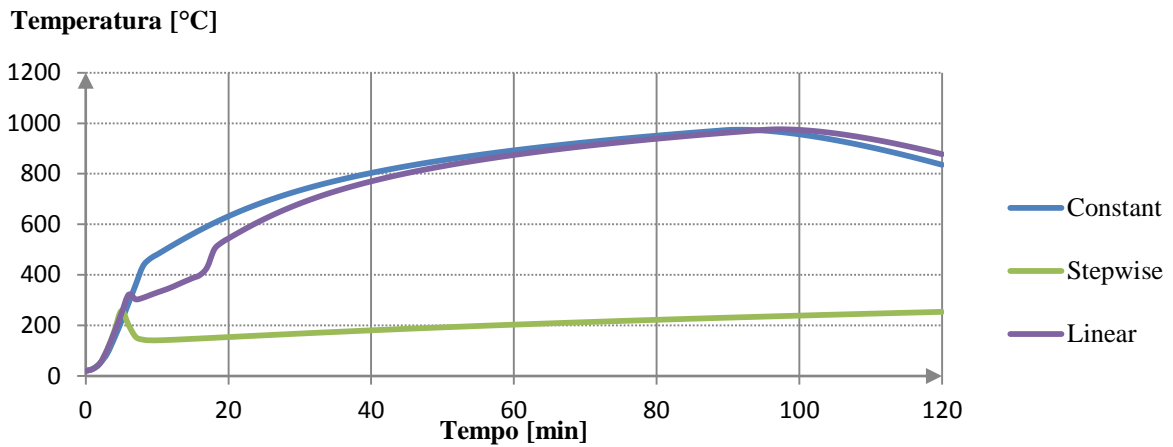


Figura B. 1 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 25m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.02m<sup>0.5</sup>

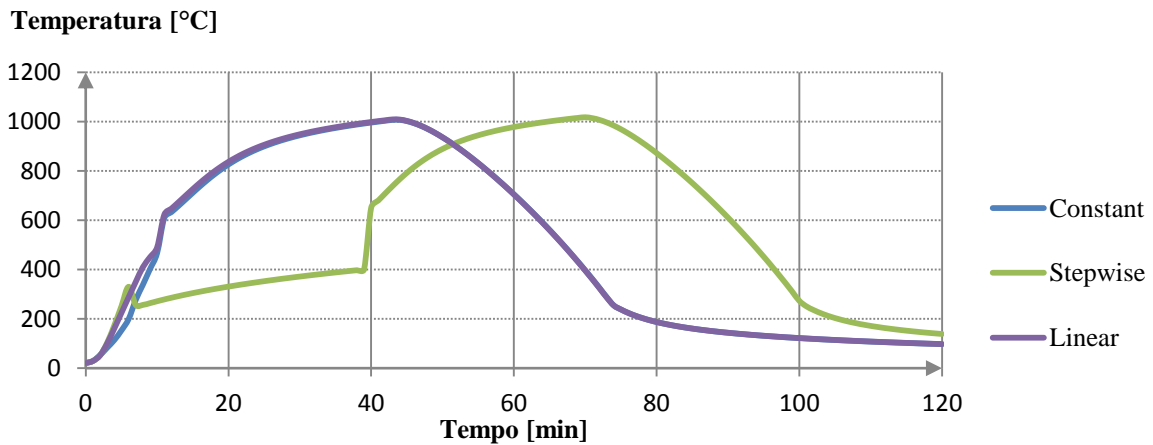


Figura B. 2 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 25m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06m<sup>0.5</sup>

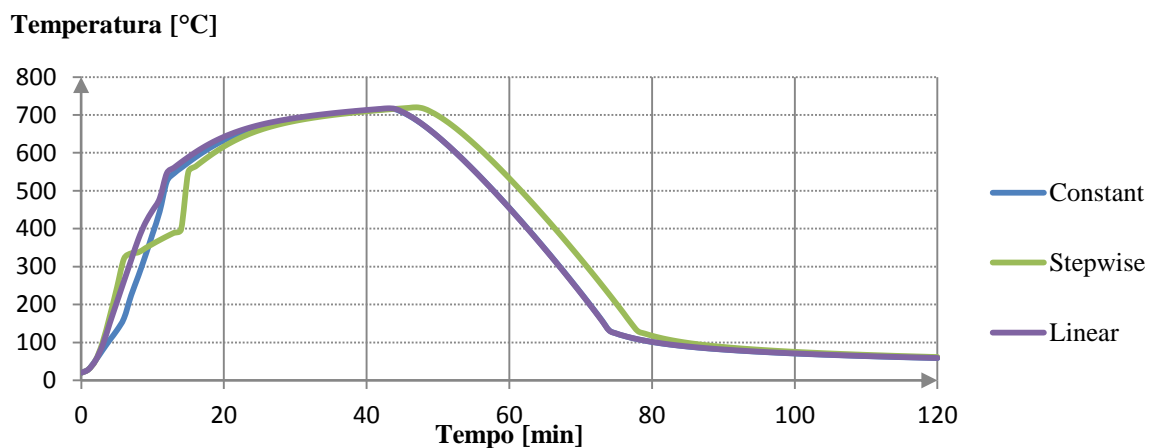


Figura B. 3 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 25m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.10m<sup>0.5</sup>

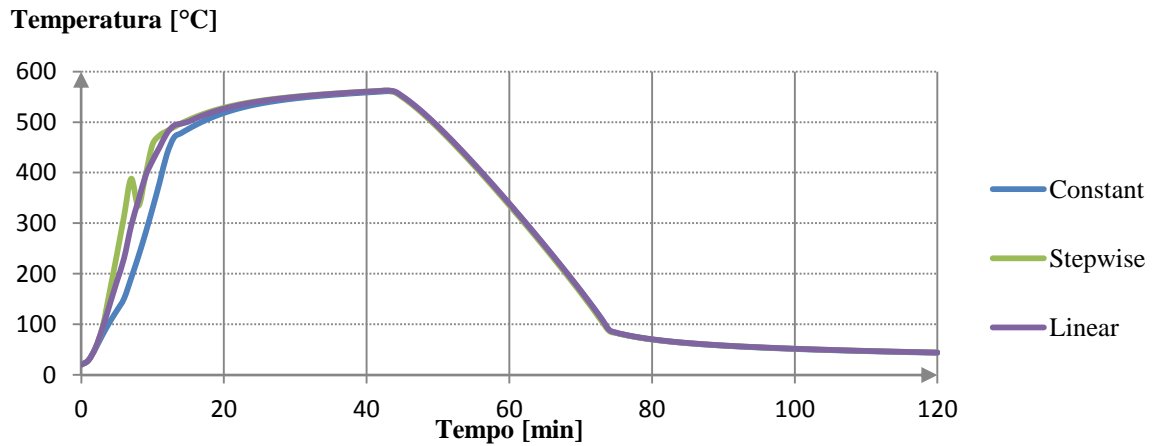


Figura B. 4 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de  $25\text{m}^2$  e fator de abertura de  $0.14\text{m}^{0.5}$

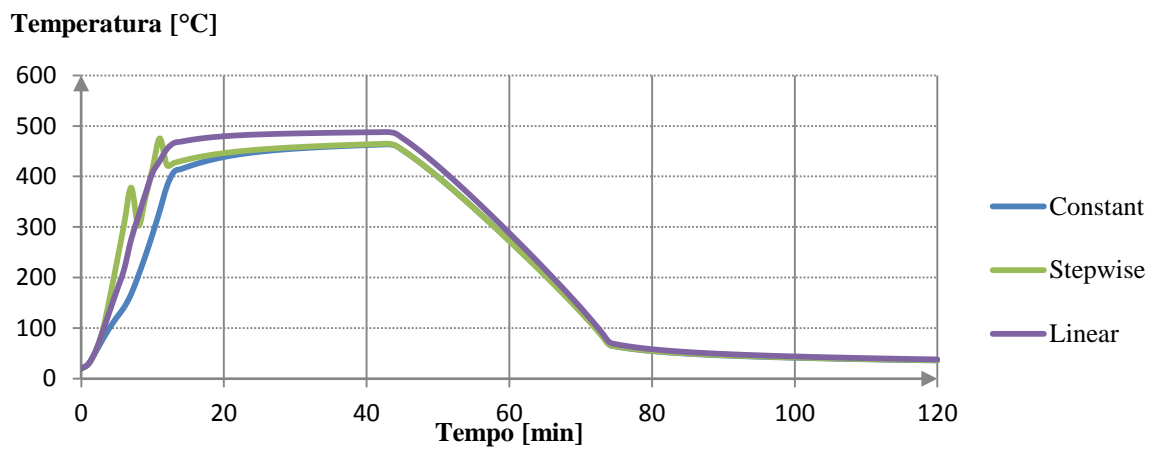


Figura B. 5 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de  $25\text{m}^2$  e fator de abertura de  $0.18\text{m}^{0.5}$

### Curvas temperatura-tempo para área igual a 50m<sup>2</sup>

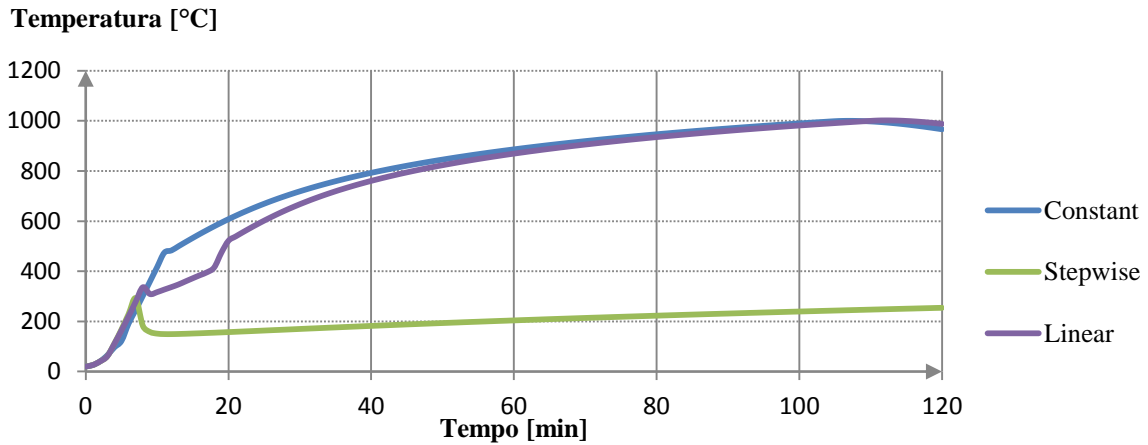


Figura B. 6 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 50m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.02m<sup>0.5</sup>

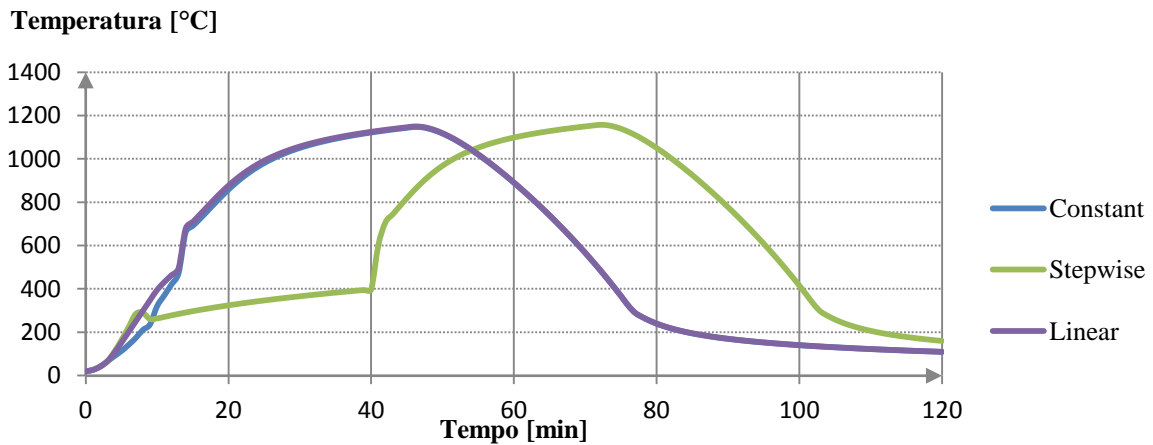


Figura B. 7 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 50m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06m<sup>0.5</sup>

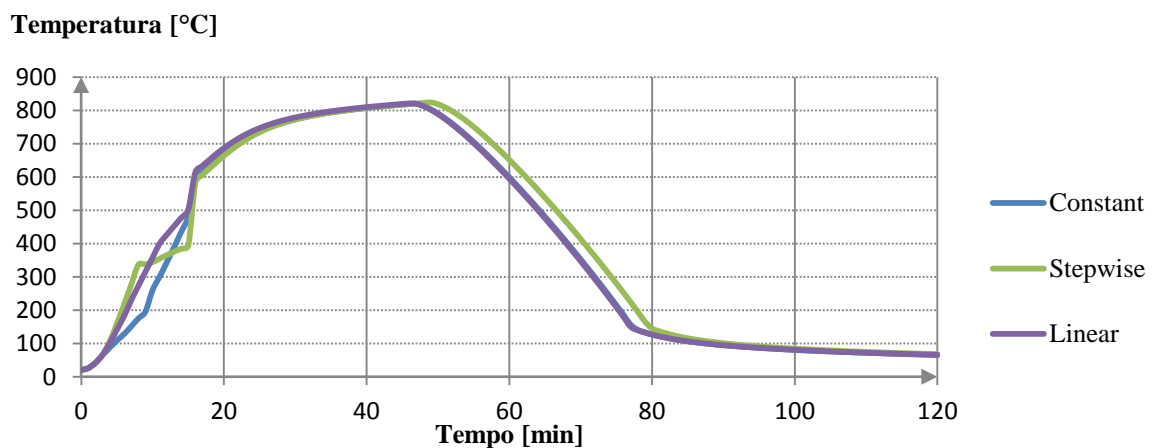


Figura B. 8 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 50m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.10m<sup>0.5</sup>

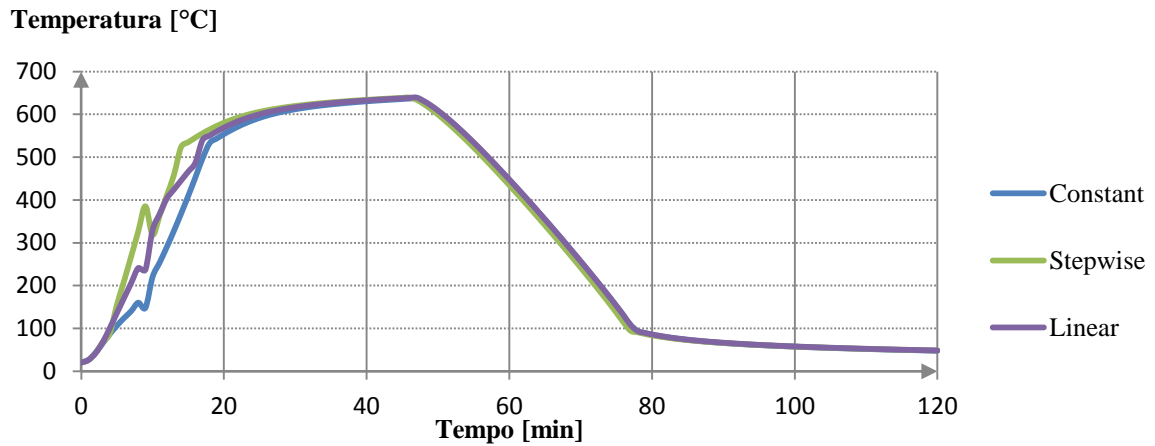


Figura B. 9 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 50m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.14m<sup>0.5</sup>

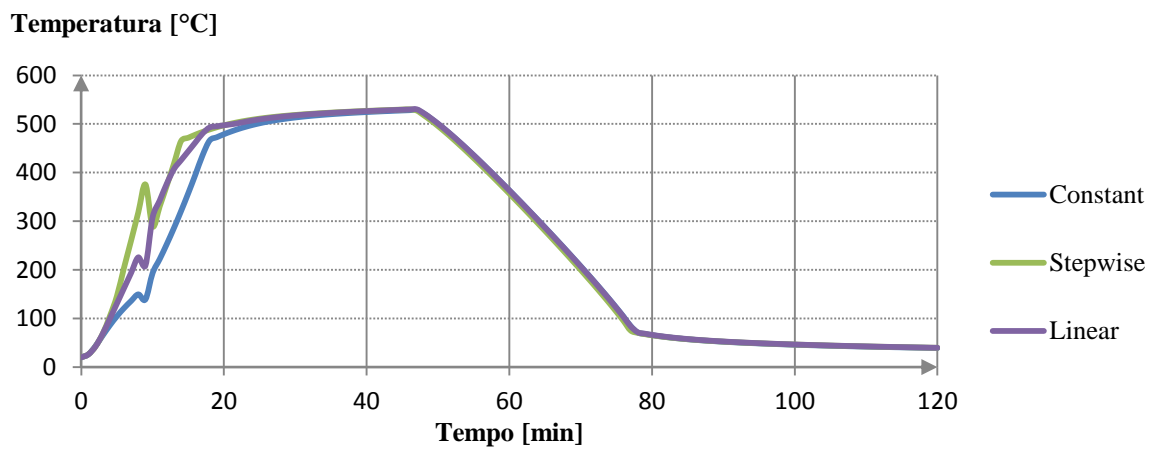


Figura B. 10 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 50m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.18m<sup>0.5</sup>

### Curvas temperatura-tempo para área igual a 100m<sup>2</sup>

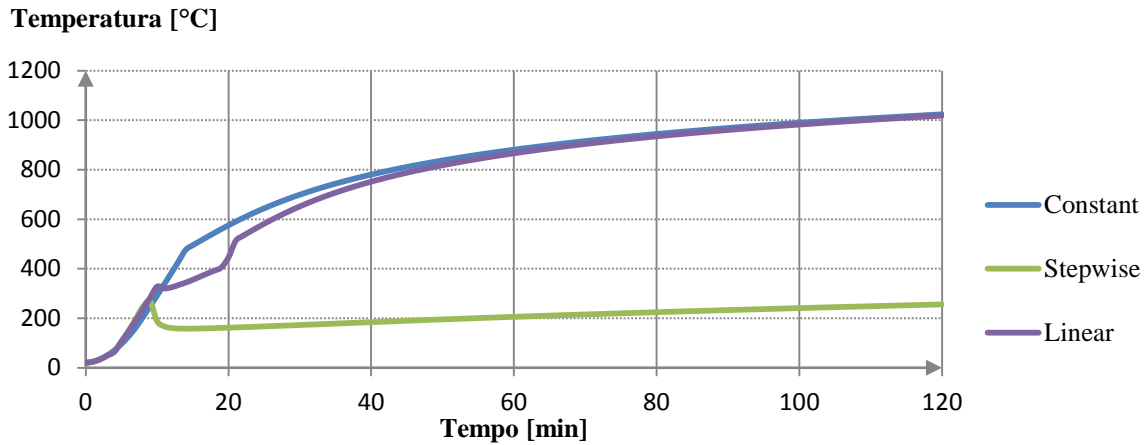


Figura B. 11 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 100m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.02m<sup>0.5</sup>

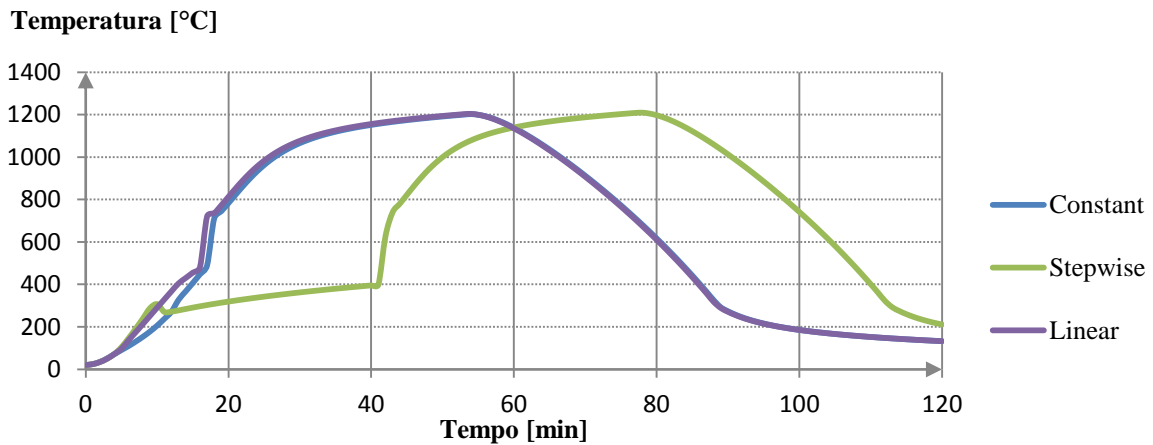


Figura B. 12 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 100m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06m<sup>0.5</sup>

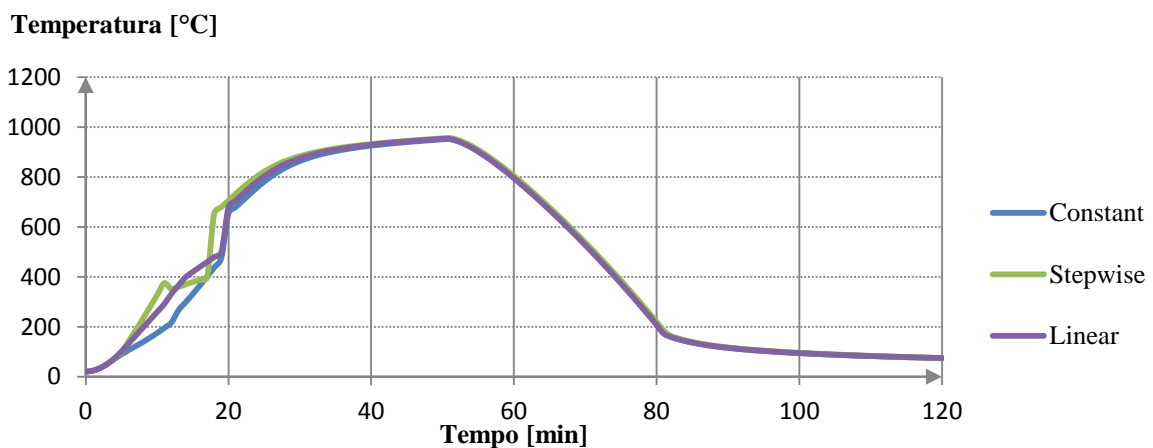


Figura B. 13 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 100m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.10m<sup>0.5</sup>

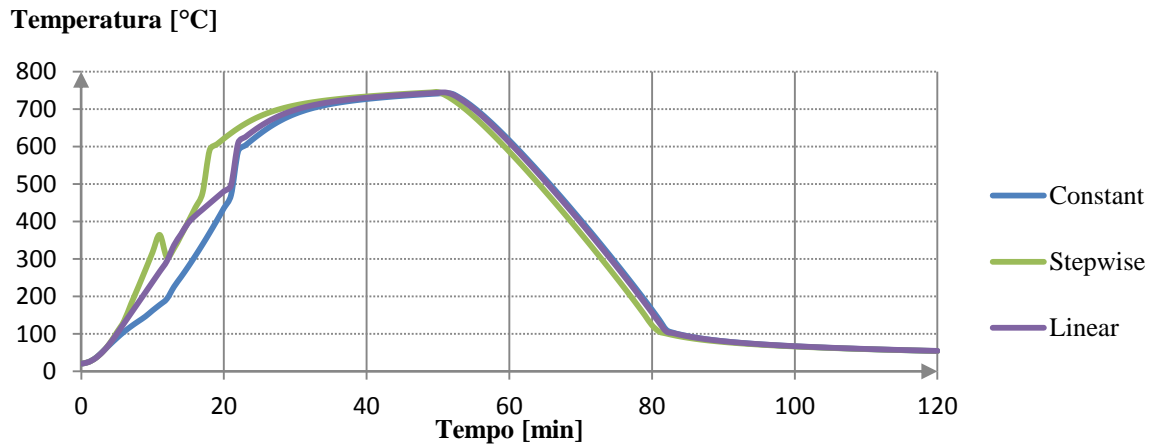


Figura B. 14 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de  $100\text{m}^2$  e fator de abertura de  $0.14\text{m}^{0.5}$

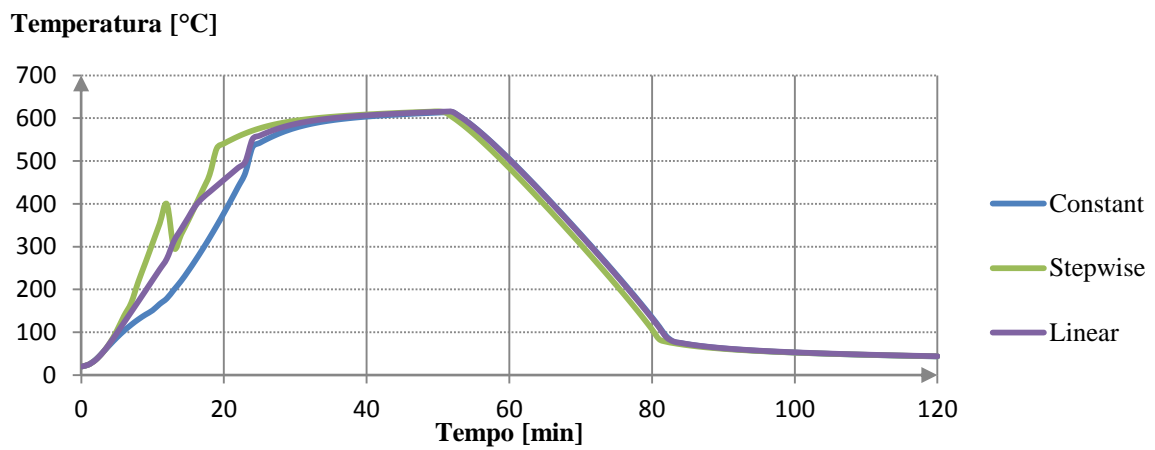
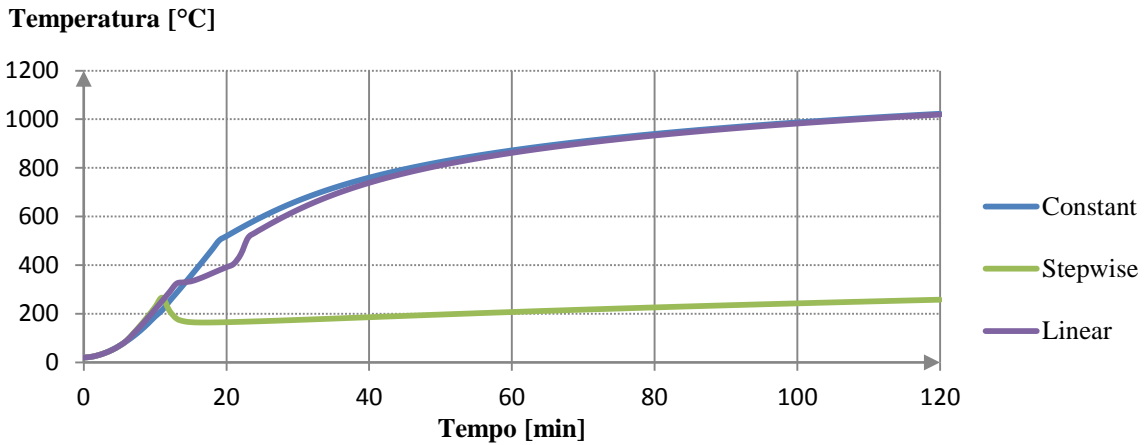
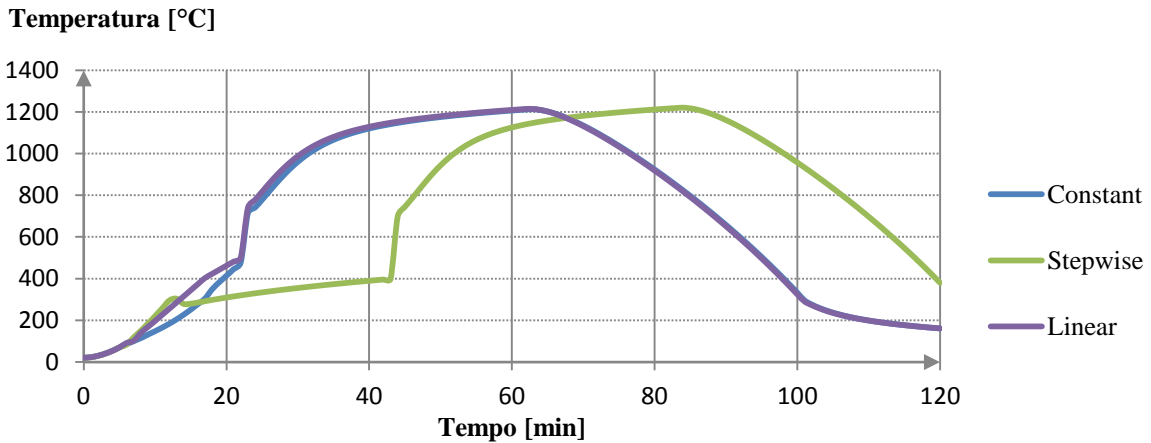


Figura B. 15 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de  $100\text{m}^2$  e fator de abertura de  $0.18\text{m}^{0.5}$

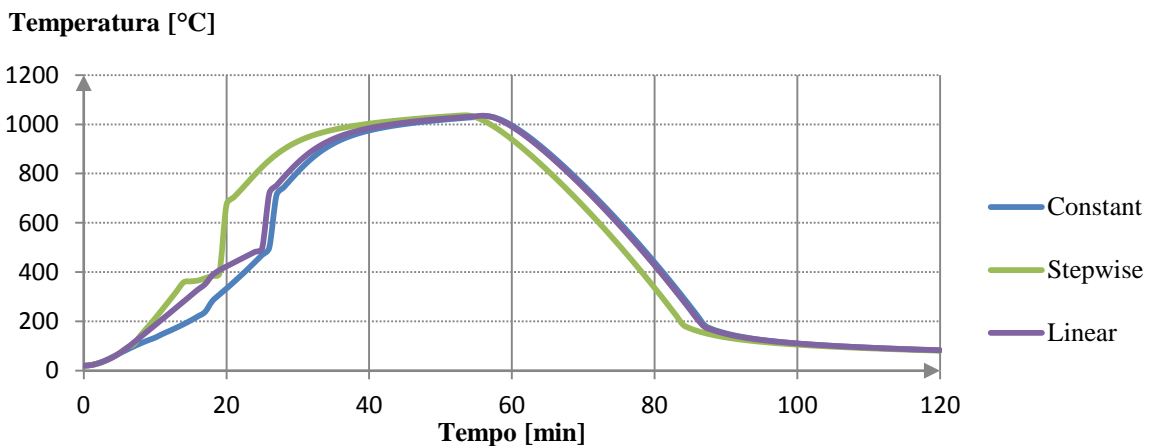
**Curvas temperatura-tempo para área igual a 200m<sup>2</sup>**



**Figura B. 16 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 200m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.02m<sup>0.5</sup>**



**Figura B. 17 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 200m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06m<sup>0.5</sup>**



**Figura B. 18 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 200m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.10m<sup>0.5</sup>**



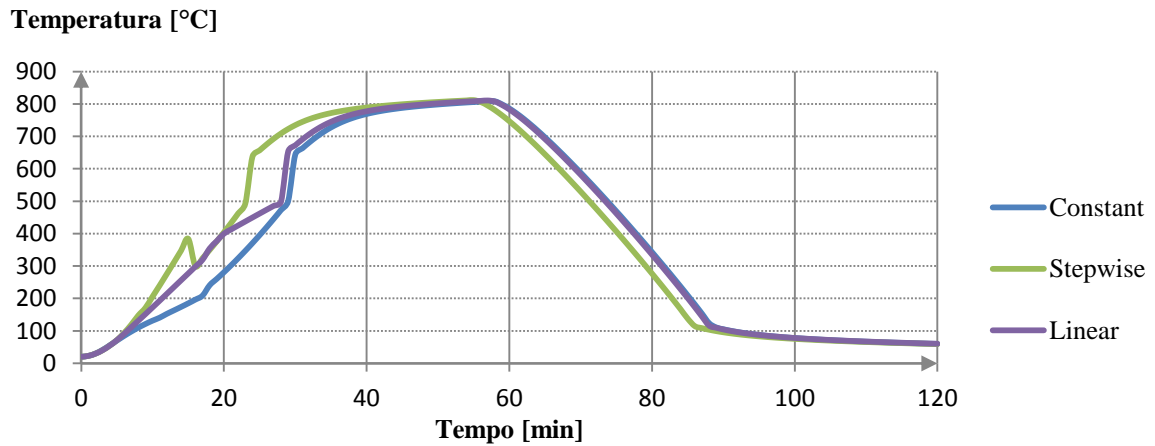


Figura B. 19 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 200m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.14m<sup>0.5</sup>

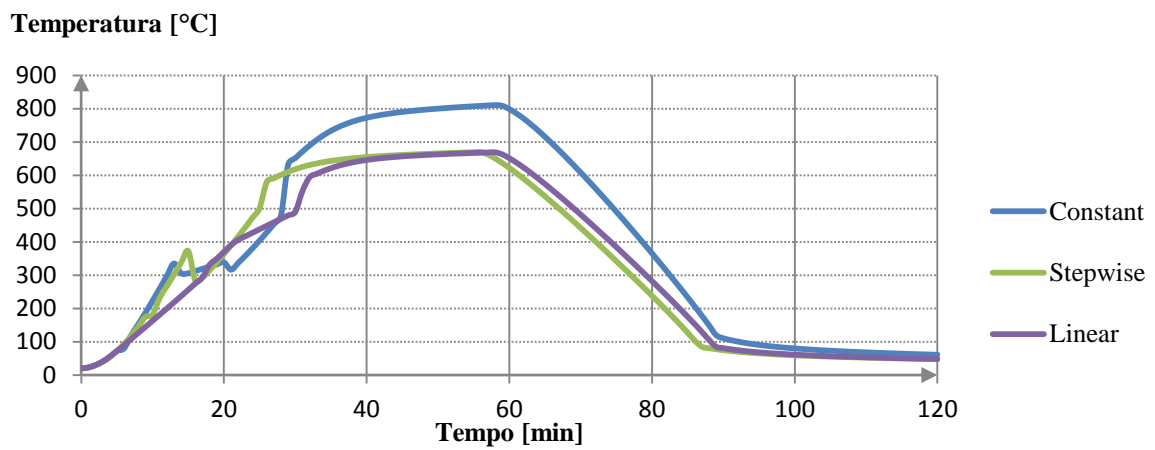


Figura B. 20 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 200m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.18m<sup>0.5</sup>

### Curvas temperatura-tempo para área igual a 500m<sup>2</sup>

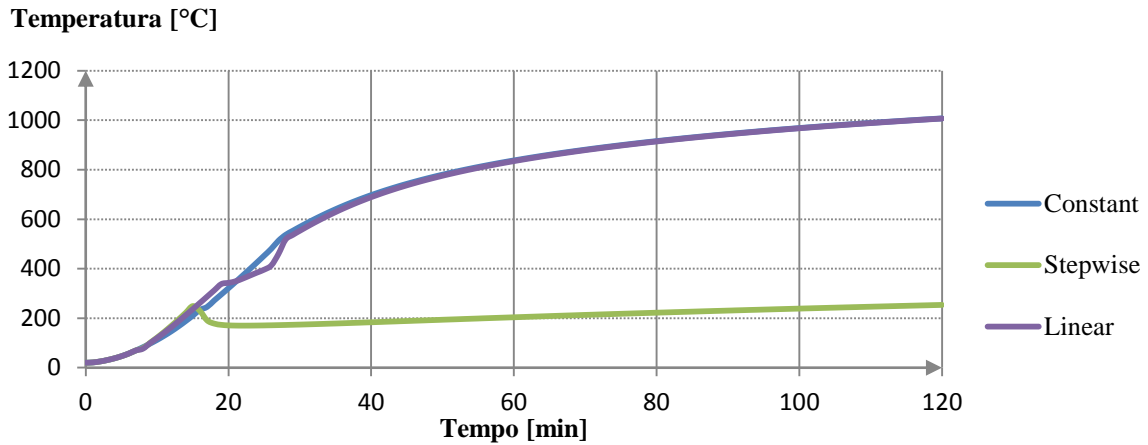


Figura B. 21 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 500m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.02m<sup>0.5</sup>

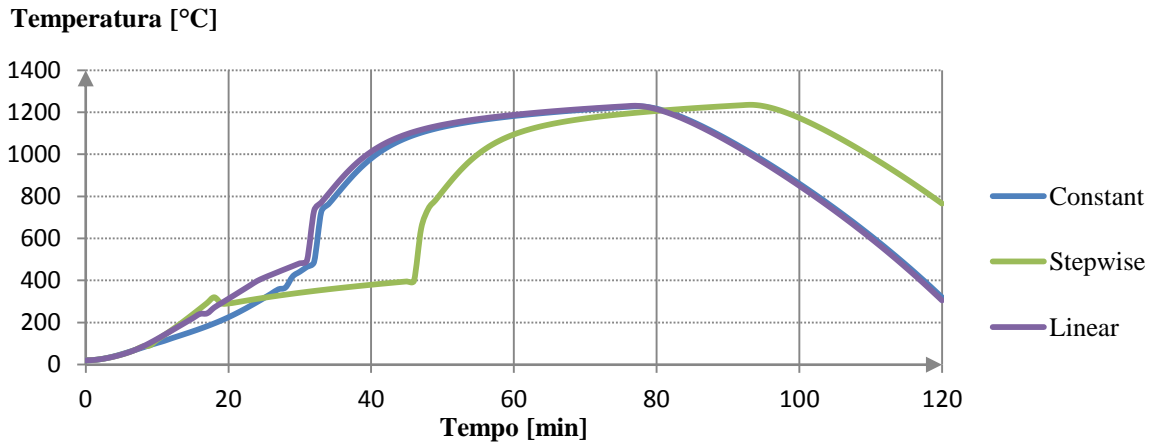


Figura B. 22 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 500m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06m<sup>0.5</sup>

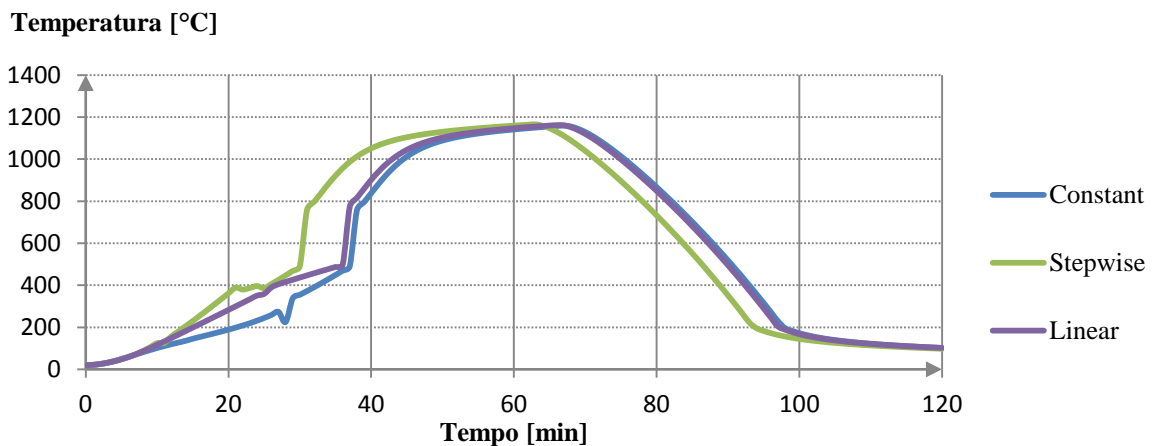


Figura B. 23 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 500m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.10m<sup>0.5</sup>

Temperatura [°C]

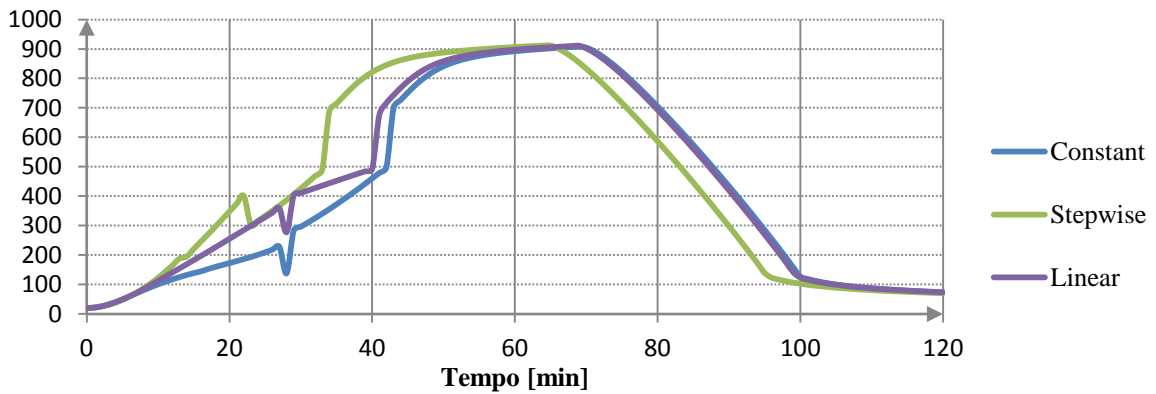


Figura B. 24 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 500m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.14m<sup>0.5</sup>

Temperatura [°C]

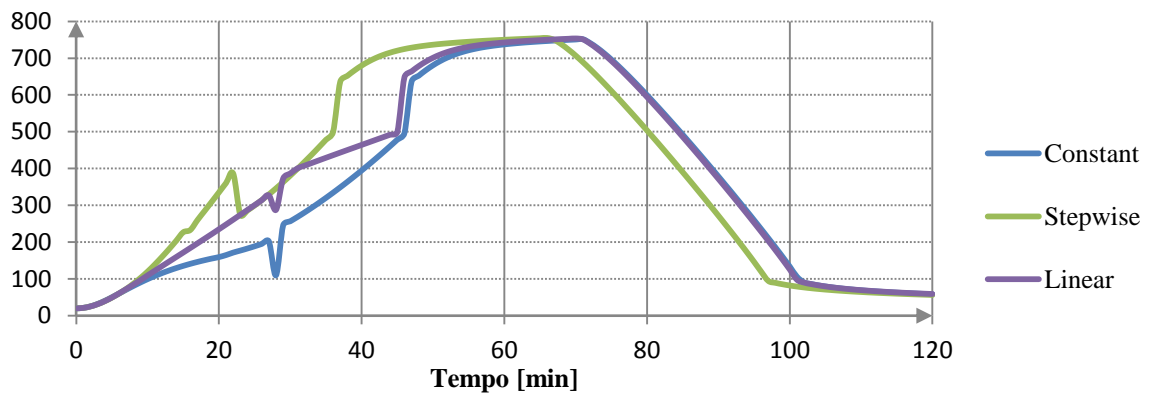


Figura B. 25 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 500m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.18m<sup>0.5</sup>

### Curvas temperatura-tempo considerando as aberturas abertas na totalidade, em função da área do compartimento

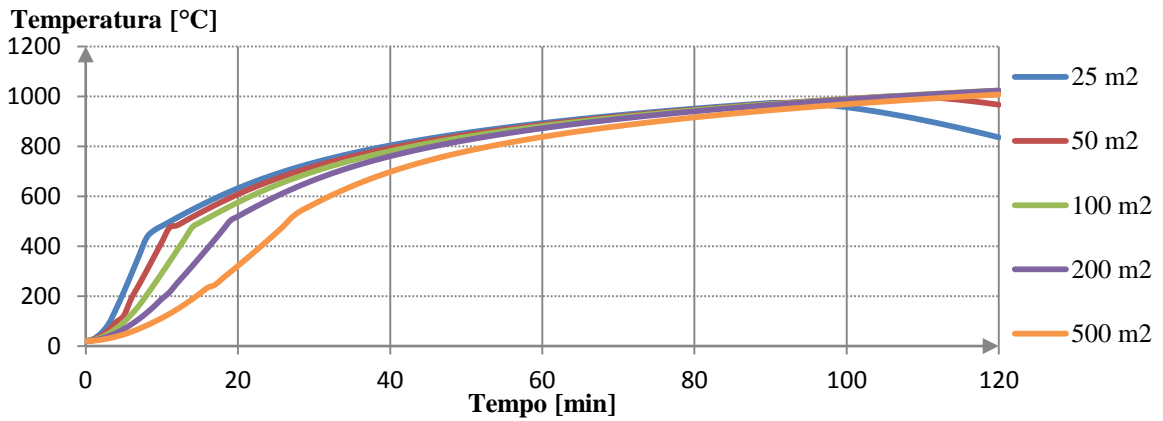


Figura B. 26 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com as aberturas abertas na sua totalidade e fator de abertura de  $0.02m^{0.5}$

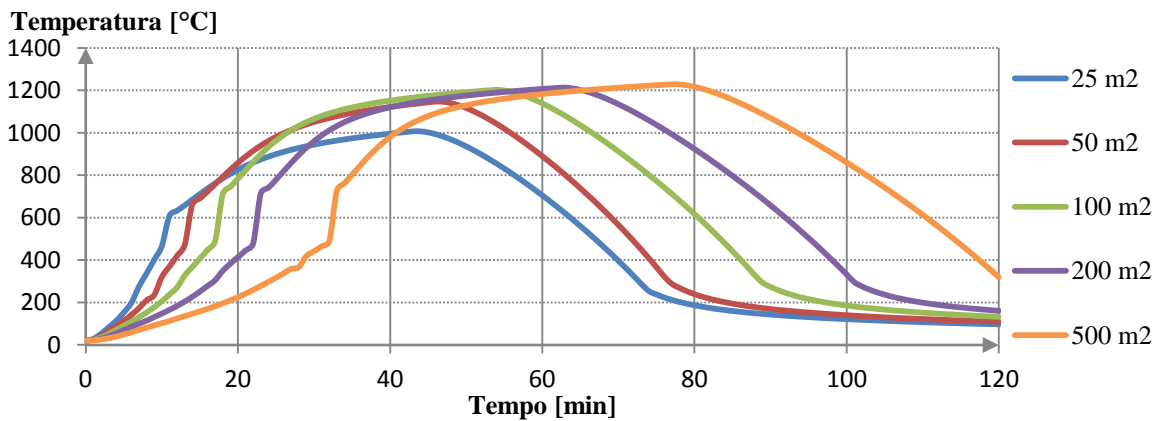


Figura B. 27 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com as aberturas abertas na sua totalidade e fator de abertura de  $0.06m^{0.5}$

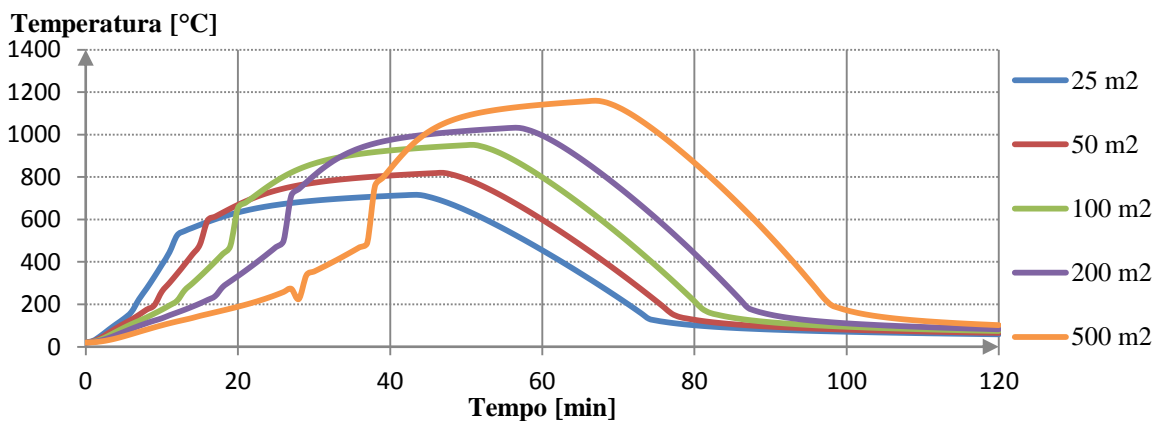


Figura B. 28 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com as aberturas abertas na sua totalidade e fator de abertura de  $0.10m^{0.5}$

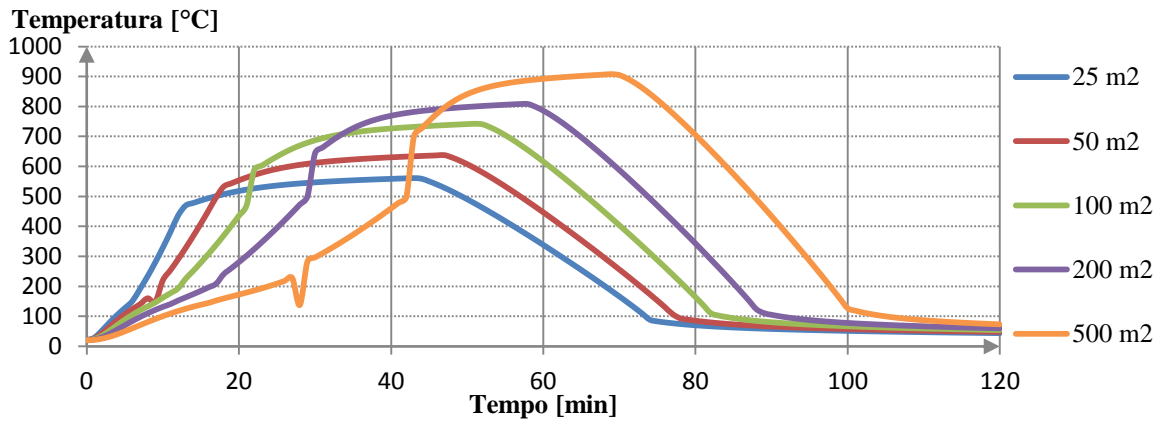


Figura B. 29 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com as aberturas abertas na sua totalidade e fator de abertura de  $0.14m^{0.5}$

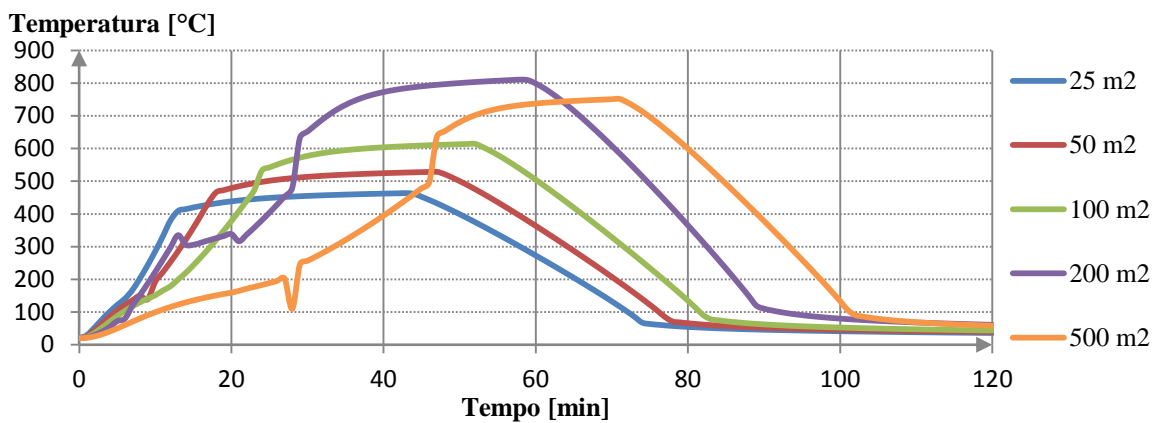


Figura B. 30 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com as aberturas abertas na sua totalidade e fator de abertura de  $0.18m^{0.5}$

### Curvas temperatura-tempo considerando uma quebra gradual do vidro das aberturas, em função da área do compartimento

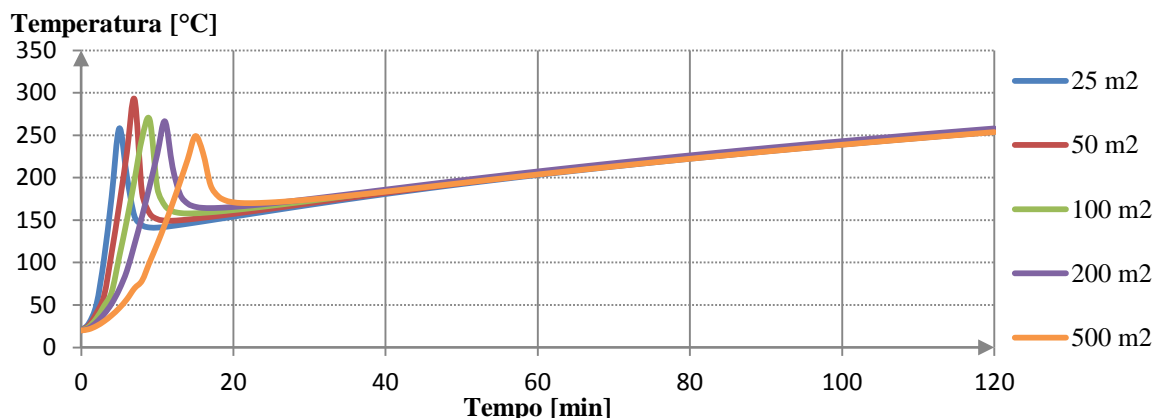


Figura B. 31 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra gradual do vidro das aberturas para um compartimento com fator de abertura de  $0.02\text{m}^{0.5}$

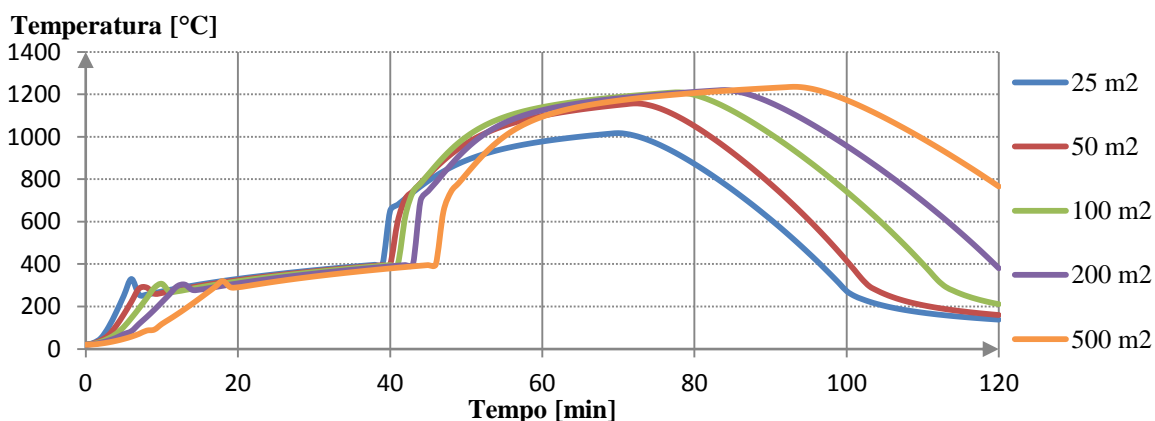


Figura B. 32 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra gradual do vidro das aberturas para um compartimento com fator de abertura de  $0.06\text{m}^{0.5}$

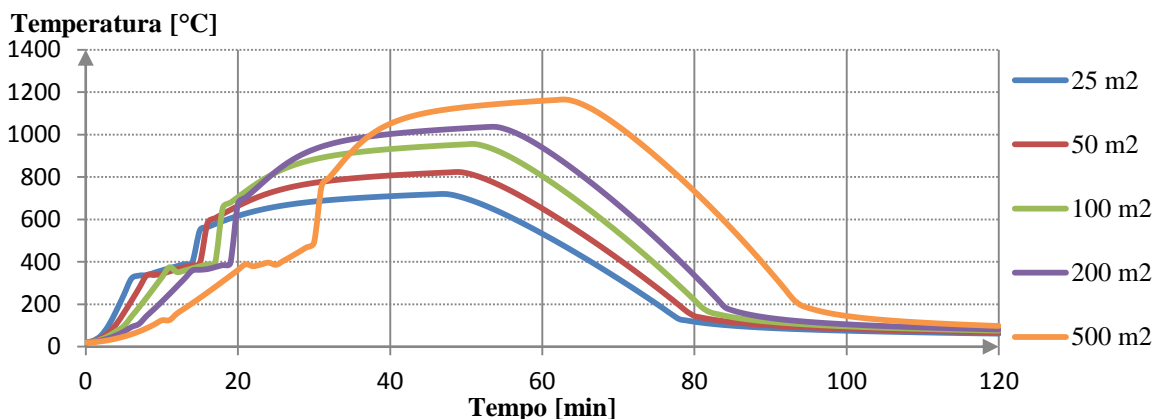


Figura B. 33 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra gradual do vidro das aberturas para um compartimento com fator de abertura de  $0.10\text{m}^{0.5}$

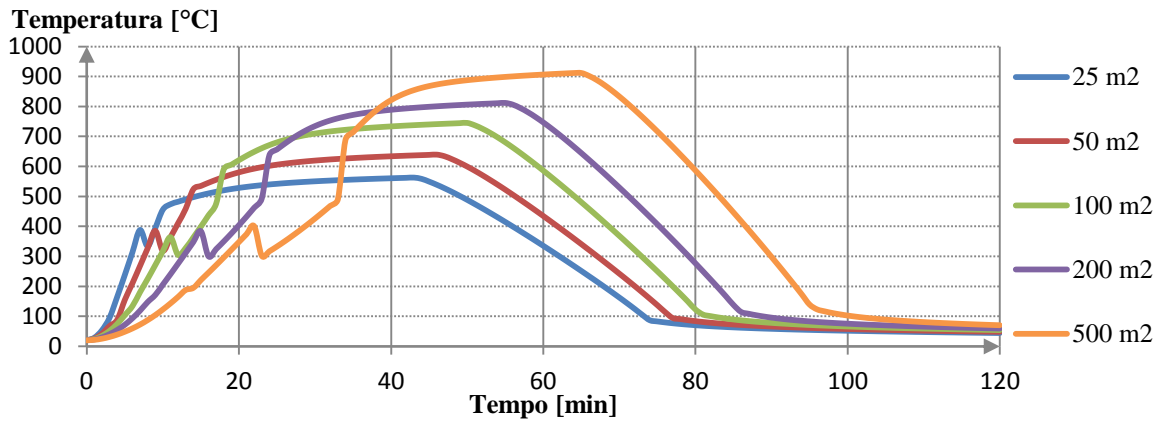


Figura B. 34 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra gradual do vidro das aberturas para um compartimento com fator de abertura de  $0.14m^{0.5}$

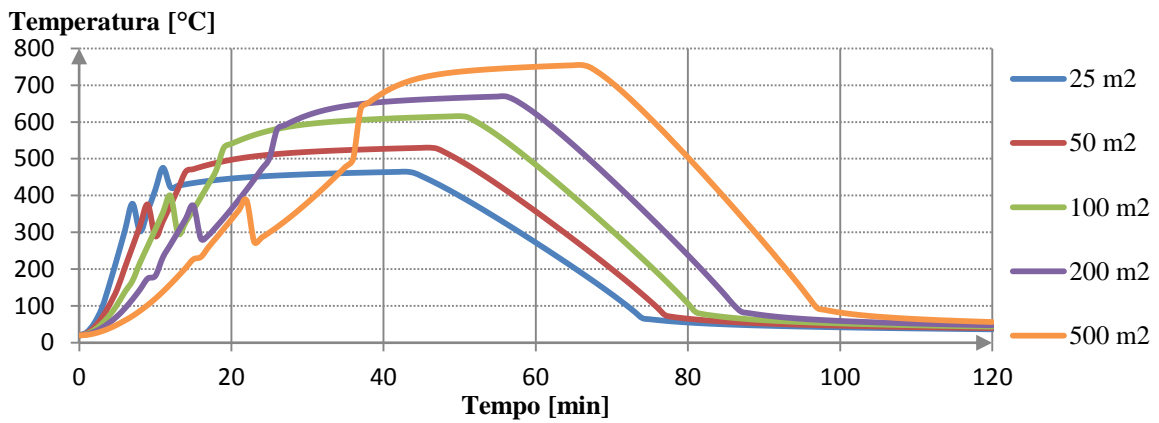


Figura B. 35 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra gradual do vidro das aberturas para um compartimento com fator de abertura de  $0.18m^{0.5}$

### Curvas temperatura-tempo considerando uma quebra linear do vidro das aberturas, em função da área do compartimento

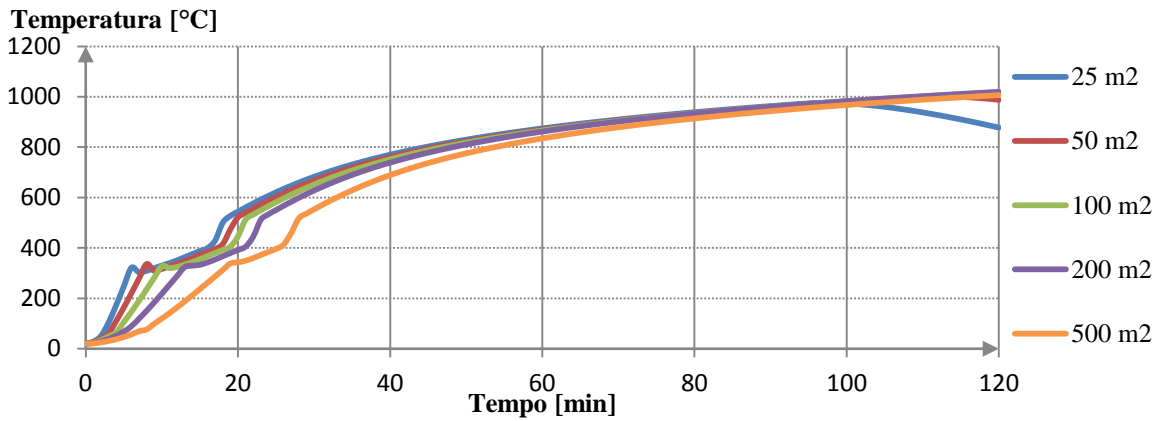


Figura B. 36 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra linear do vidro das aberturas para um compartimento com fator de abertura de  $0.02\text{m}^{0.5}$

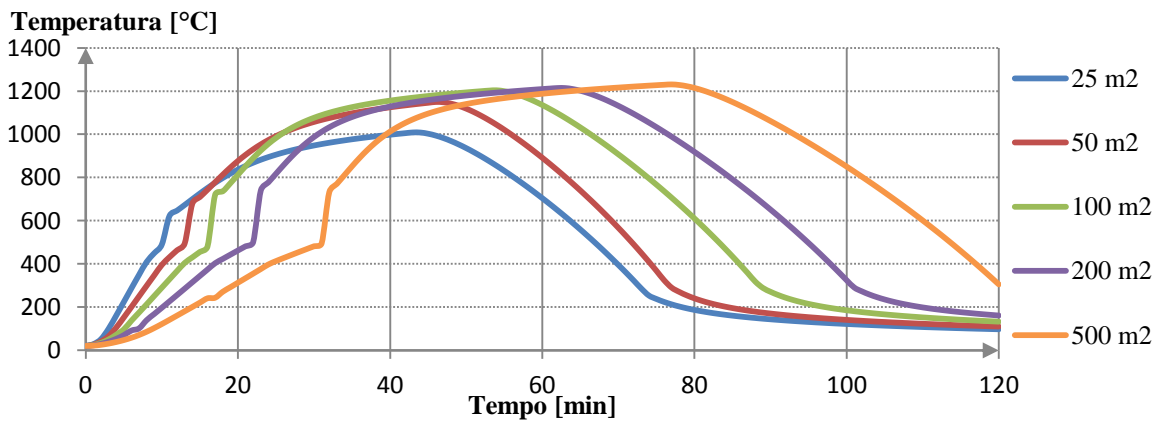


Figura B. 37 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra linear do vidro das aberturas para um compartimento com fator de abertura de  $0.06\text{m}^{0.5}$

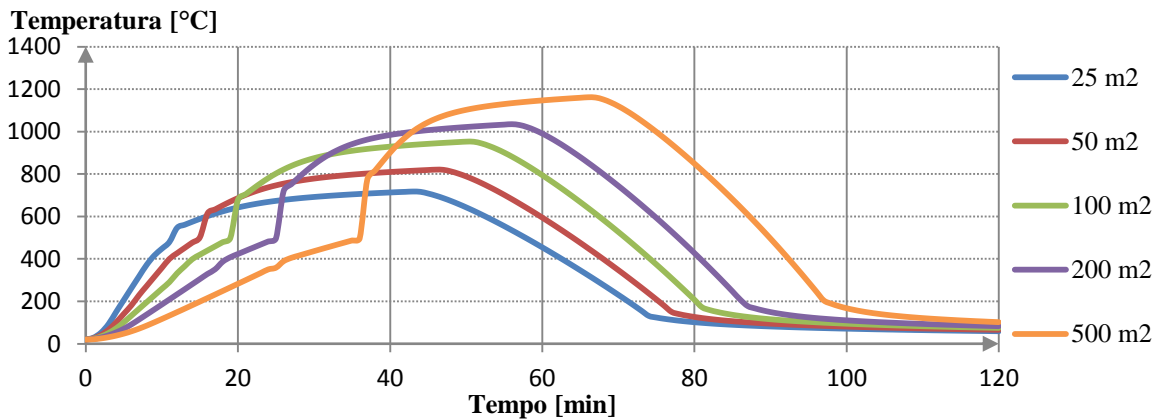


Figura B. 38 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra linear do vidro das aberturas para um compartimento com fator de abertura de  $0.10\text{m}^{0.5}$



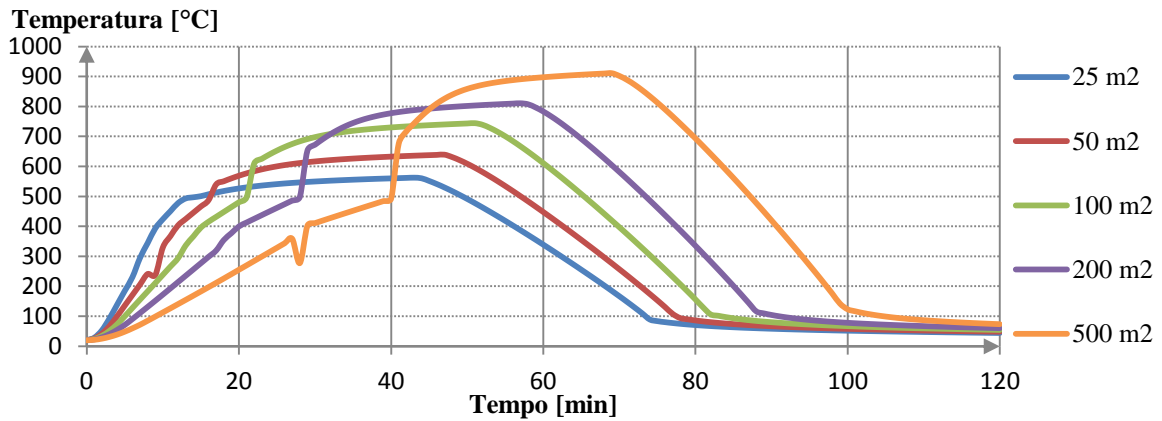


Figura B. 39 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra linear do vidro das aberturas para um compartimento com fator de abertura de  $0.14m^{0.5}$

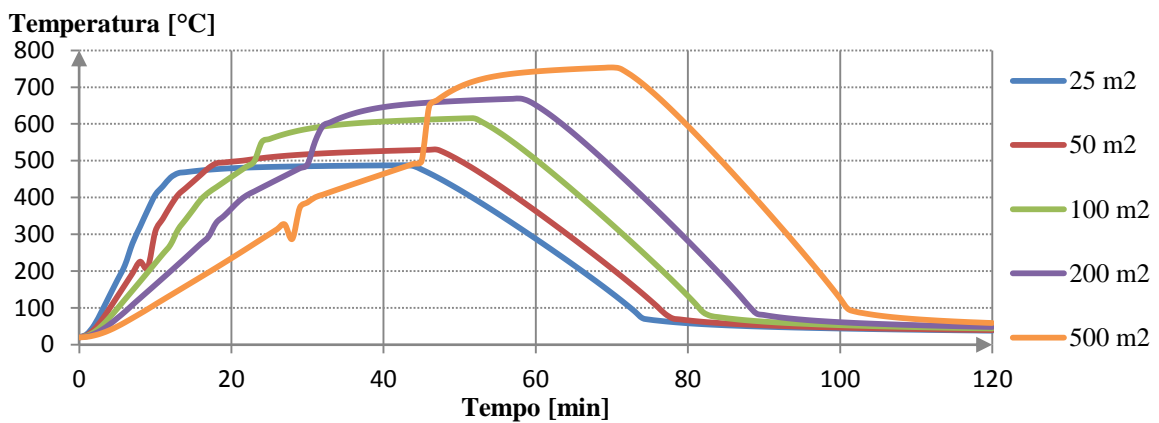


Figura B. 40 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra linear do vidro das aberturas para um compartimento com fator de abertura de  $0.18m^{0.5}$

### Curvas temperatura-tempo considerando as aberturas abertas na totalidade, em função do fator de abertura do compartimento

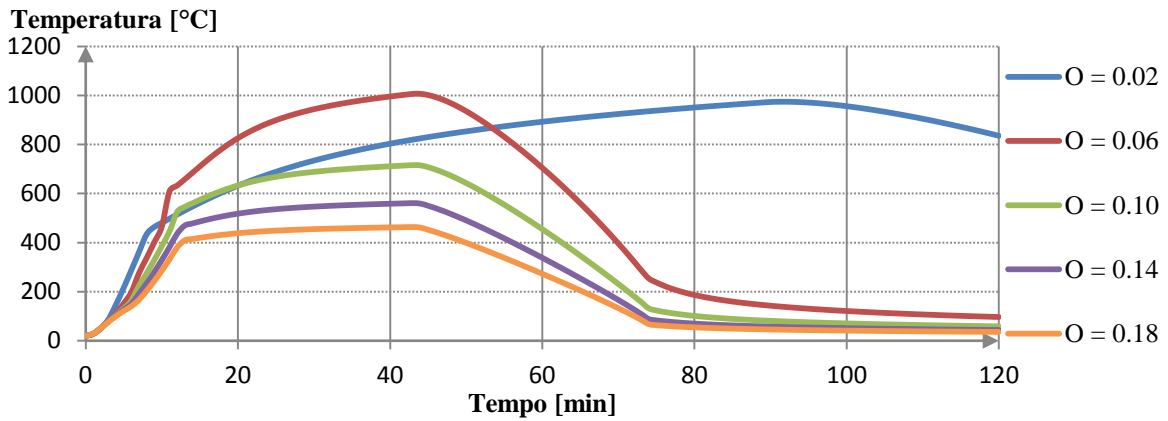


Figura B. 41 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com as aberturas abertas na sua totalidade e área igual a 25m<sup>2</sup>

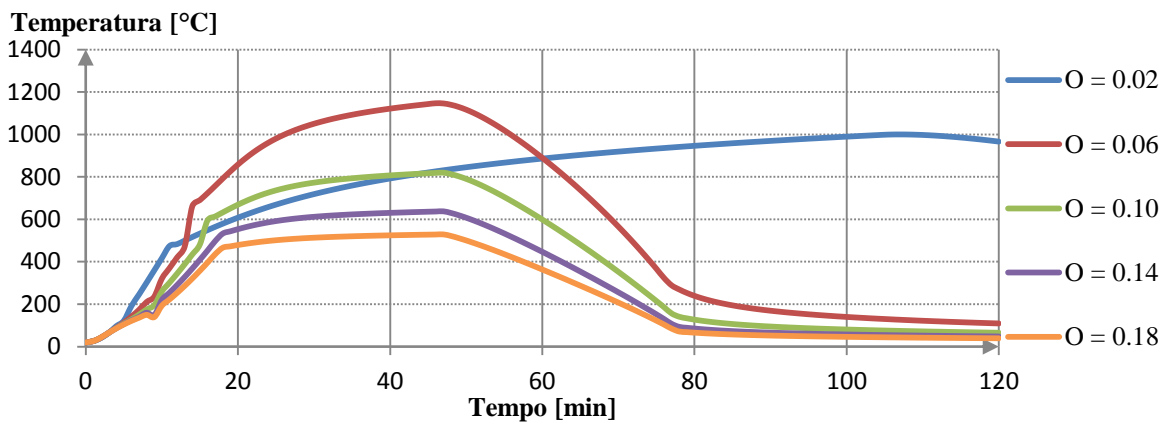


Figura B. 42 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com as aberturas abertas na sua totalidade e área igual a 50m<sup>2</sup>

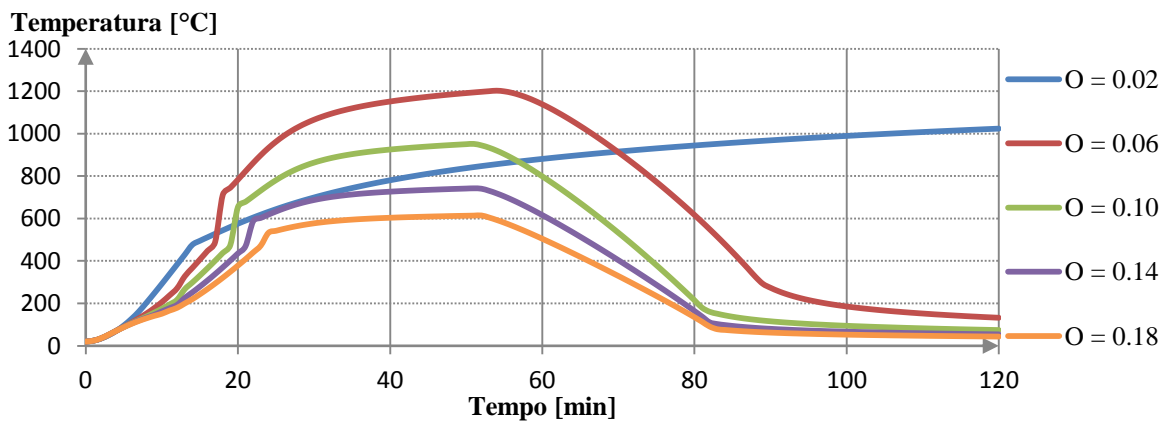


Figura B. 43 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com as aberturas abertas na sua totalidade e área igual a 100m<sup>2</sup>

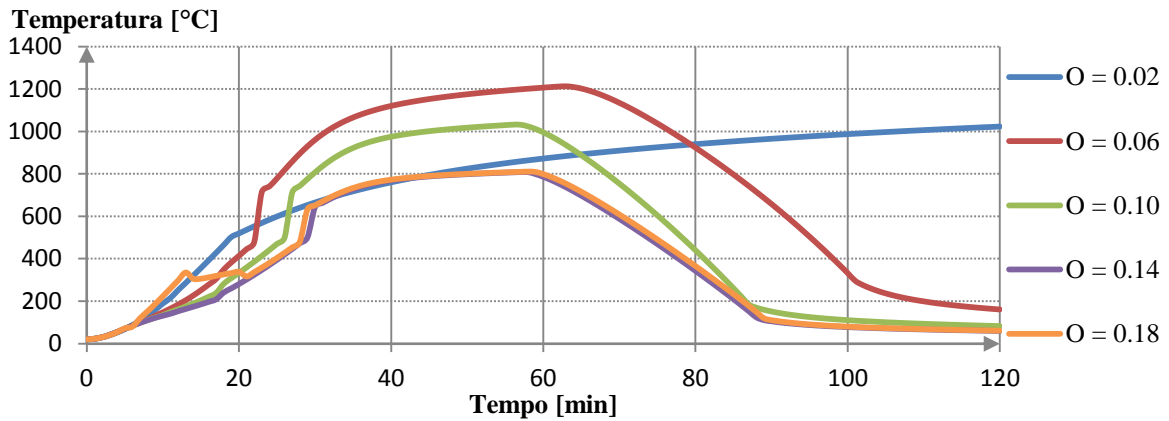


Figura B. 44 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com as aberturas abertas na sua totalidade e área igual a  $200\text{m}^2$

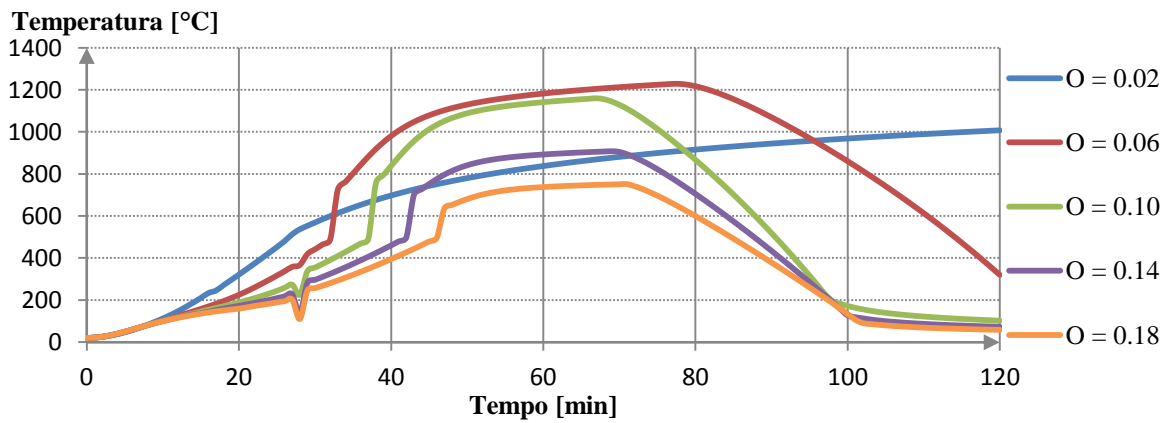
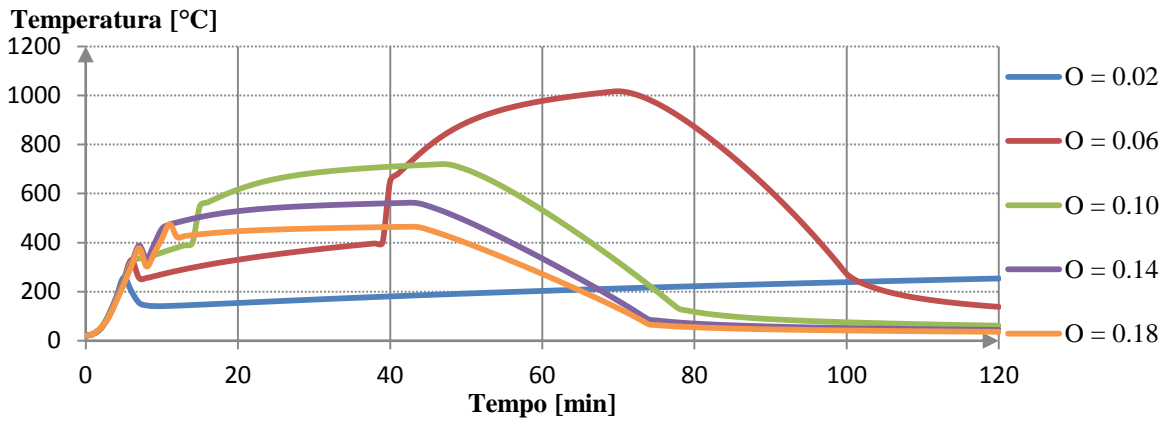
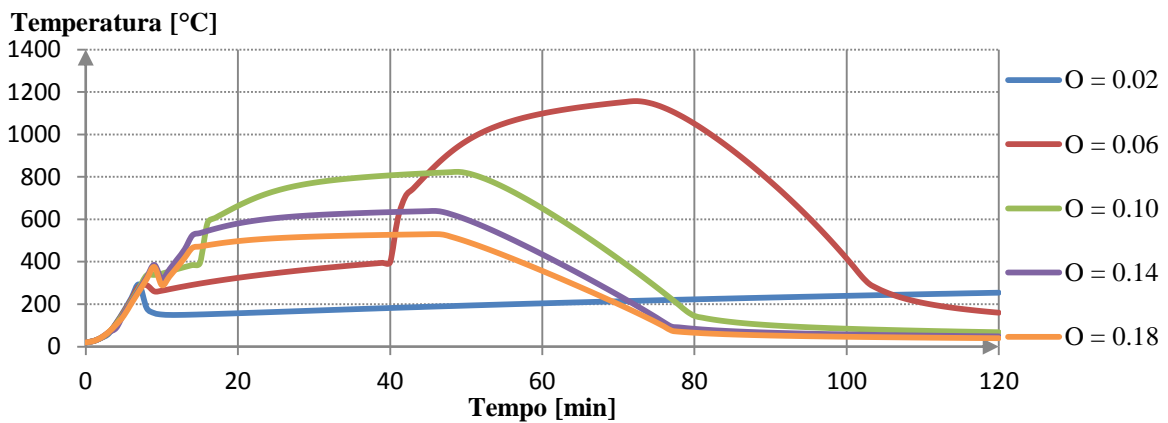


Figura B. 45 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com as aberturas abertas na sua totalidade e área igual a  $500\text{m}^2$

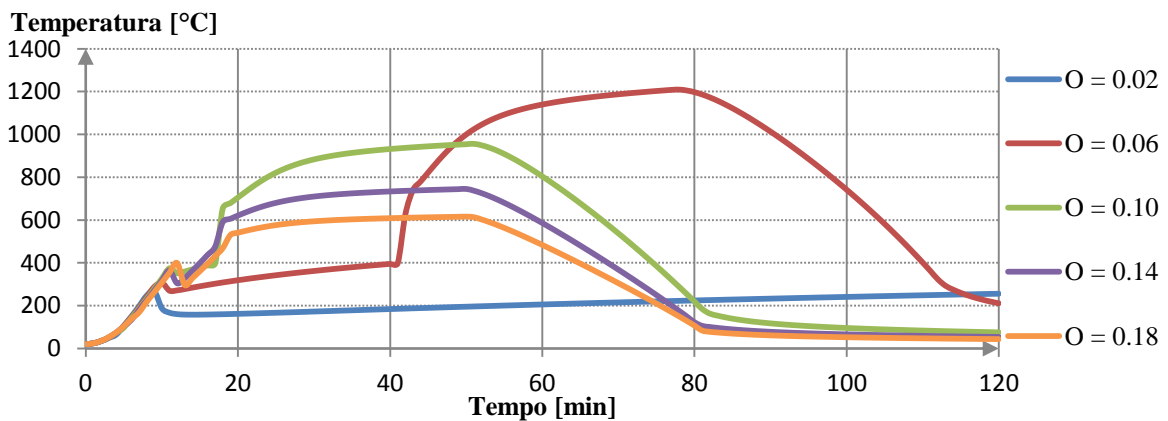
**Curvas temperatura-tempo considerando uma quebra gradual do vidro das aberturas, em função do fator de abertura do compartimento**



**Figura B. 46 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra gradual do vidro das aberturas para um compartimento com área igual a 25m<sup>2</sup>**



**Figura B. 47 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra gradual do vidro das aberturas para um compartimento com área igual a 50m<sup>2</sup>**



**Figura B. 48 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra gradual do vidro das aberturas para um compartimento com área igual a 100m<sup>2</sup>**

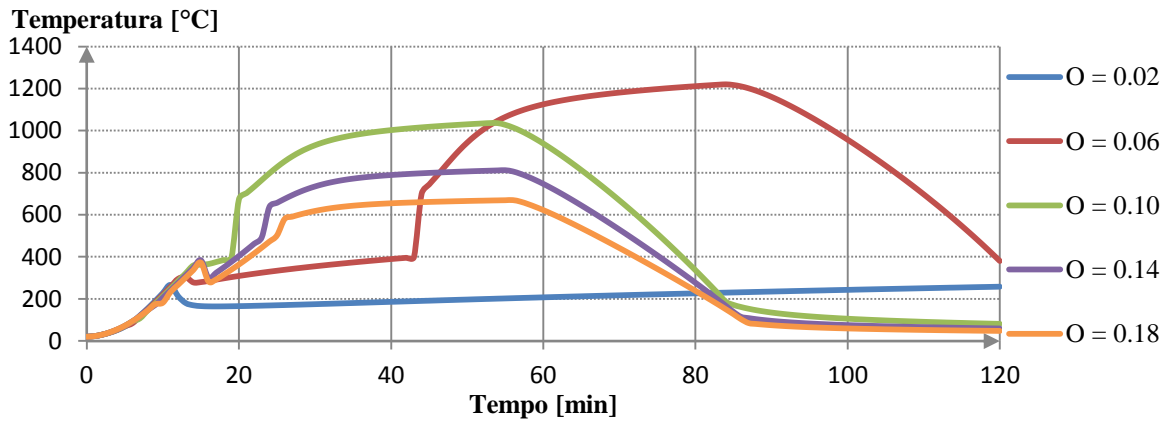


Figura B. 49 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra gradual do vidro das aberturas para um compartimento com área igual a 200m<sup>2</sup>

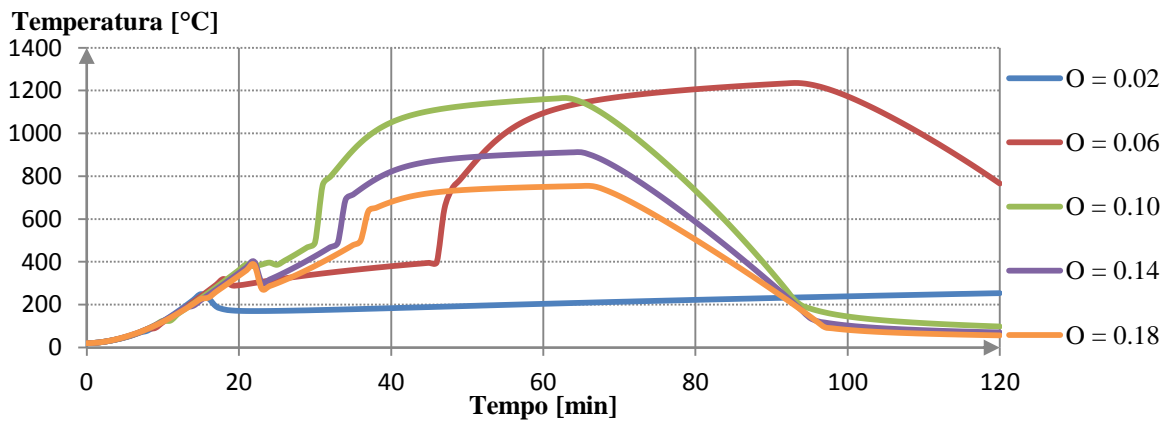


Figura B. 50 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra gradual do vidro das aberturas para um compartimento com área igual a 500m<sup>2</sup>

### Curvas temperatura-tempo considerando uma quebra linear do vidro das aberturas, em função do fator de abertura do compartimento

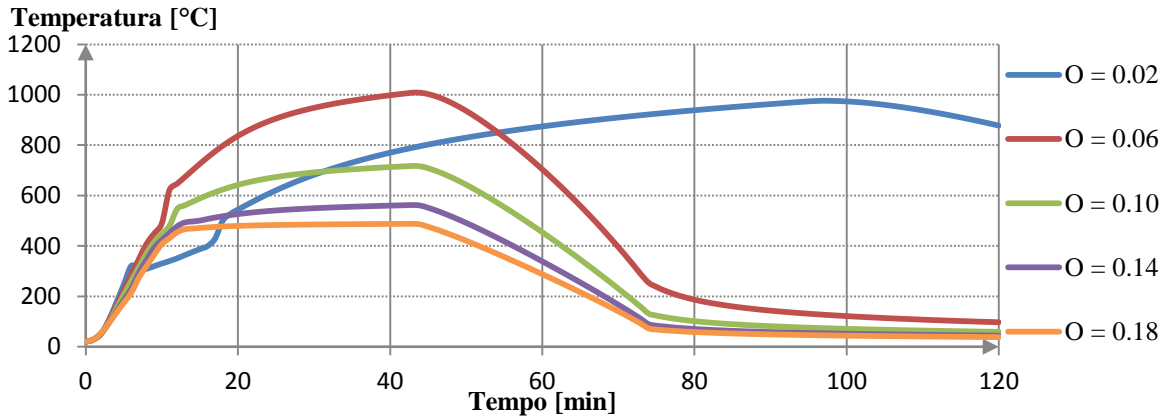


Figura B. 51 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra linear do vidro das aberturas para um compartimento com área igual a 25m<sup>2</sup>

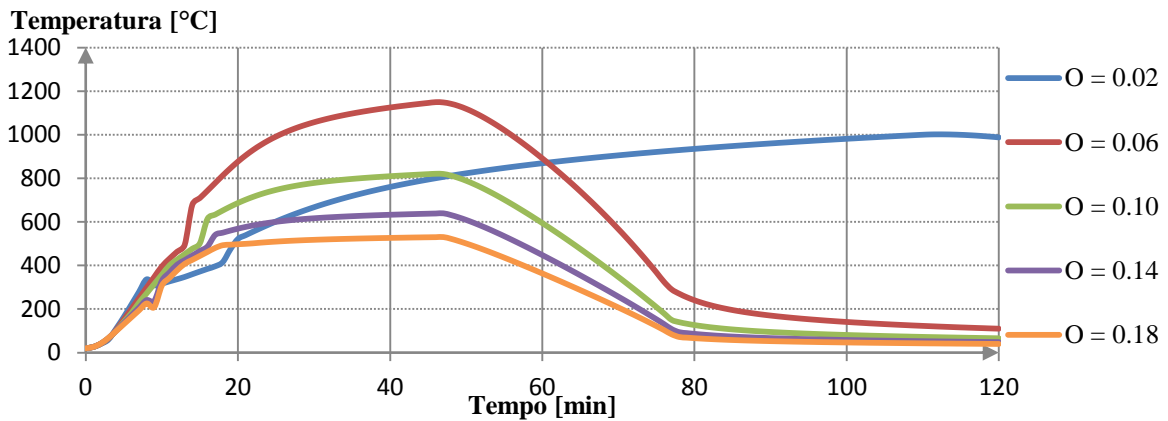


Figura B. 52 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra linear do vidro das aberturas para um compartimento com área igual a 50m<sup>2</sup>

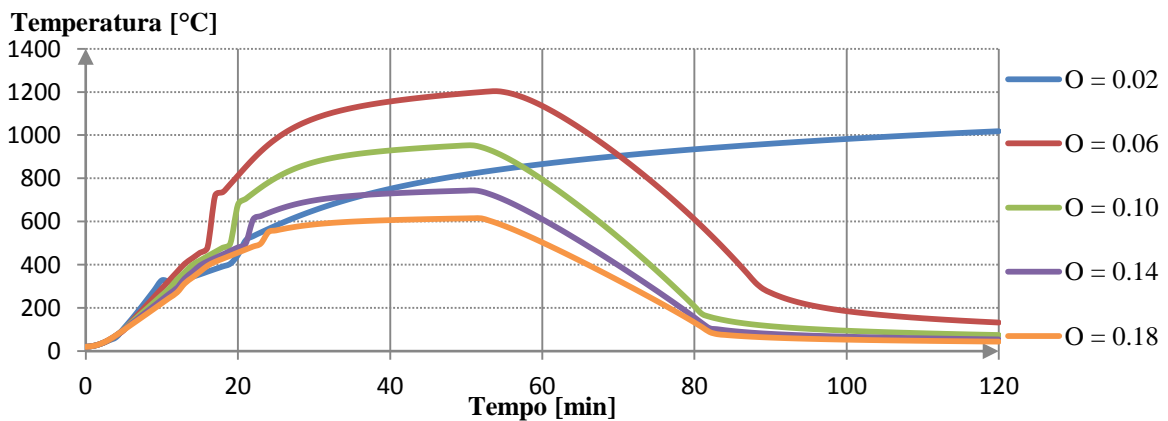


Figura B. 53 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra linear do vidro das aberturas para um compartimento com área igual a 100m<sup>2</sup>

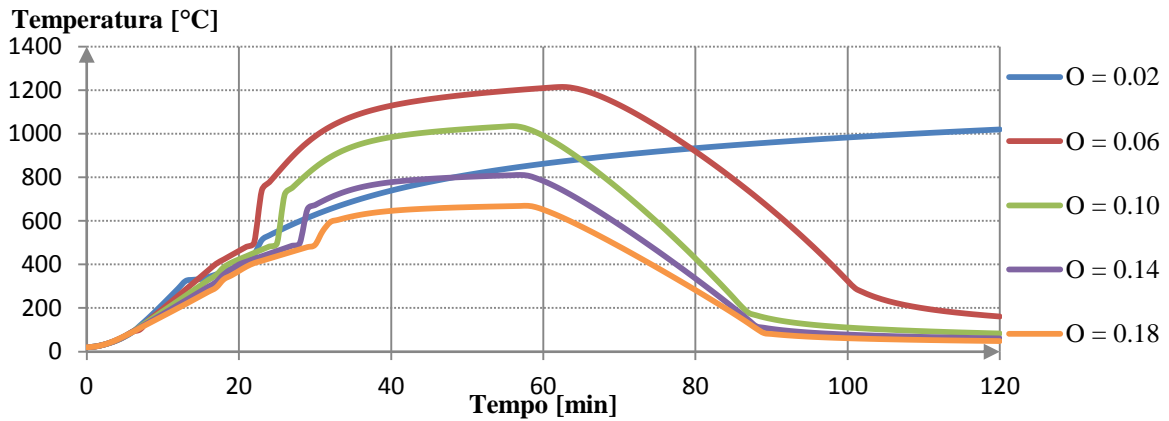


Figura B. 54 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra linear do vidro das aberturas para um compartimento com área igual a  $200\text{m}^2$

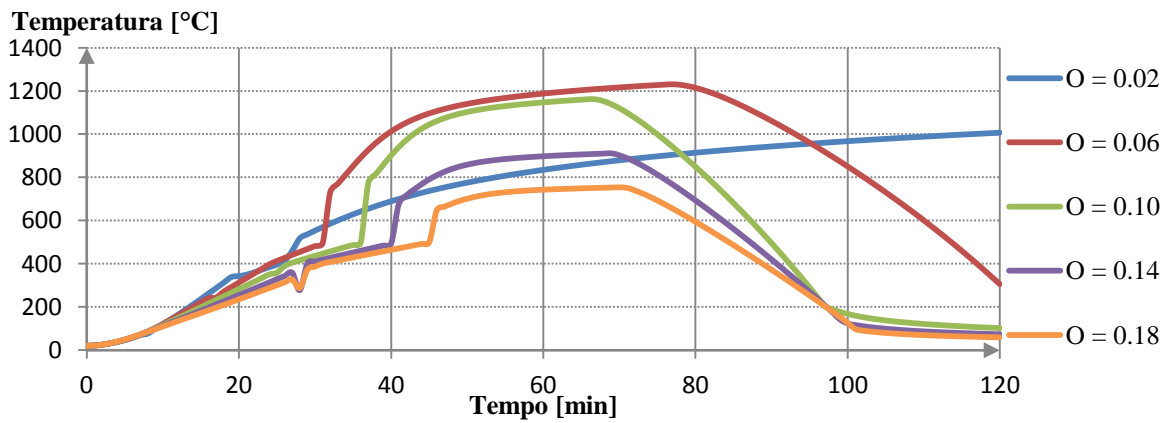


Figura B. 55 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio considerando uma quebra linear do vidro das aberturas para um compartimento com área igual a  $500\text{m}^2$

### Curvas temperatura-tempo para diferentes percentagens de abertura das aberturas, em função da área do compartimento

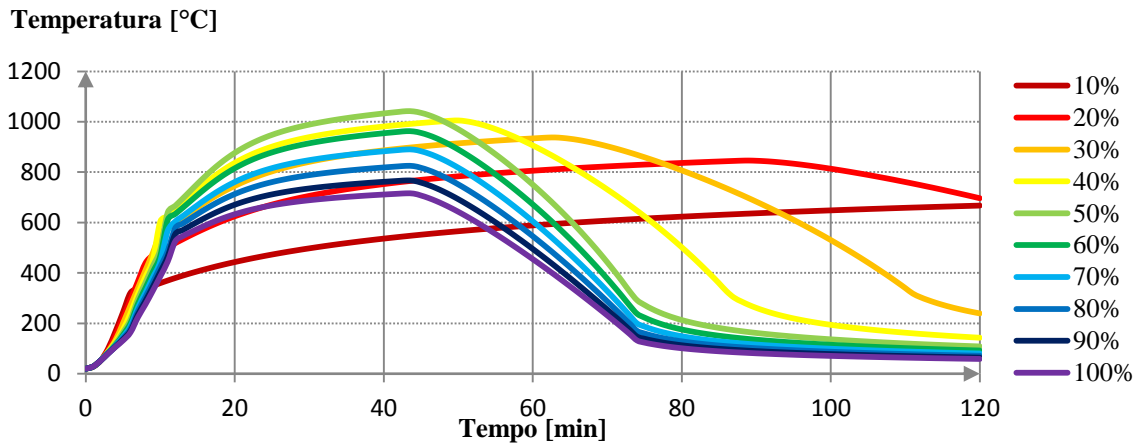


Figura B. 56 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.10m^{0.5}$  e área igual a  $25m^2$

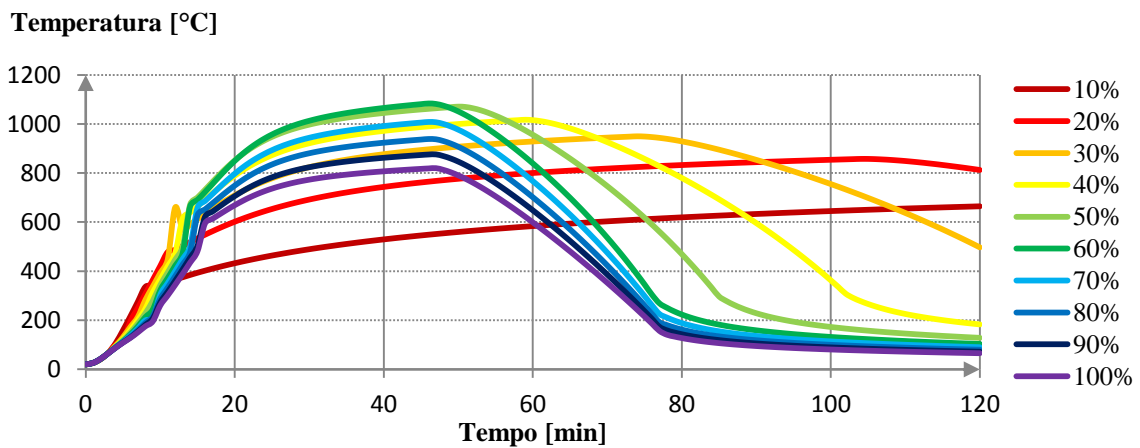


Figura B. 57 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.10m^{0.5}$  e área igual a  $50m^2$

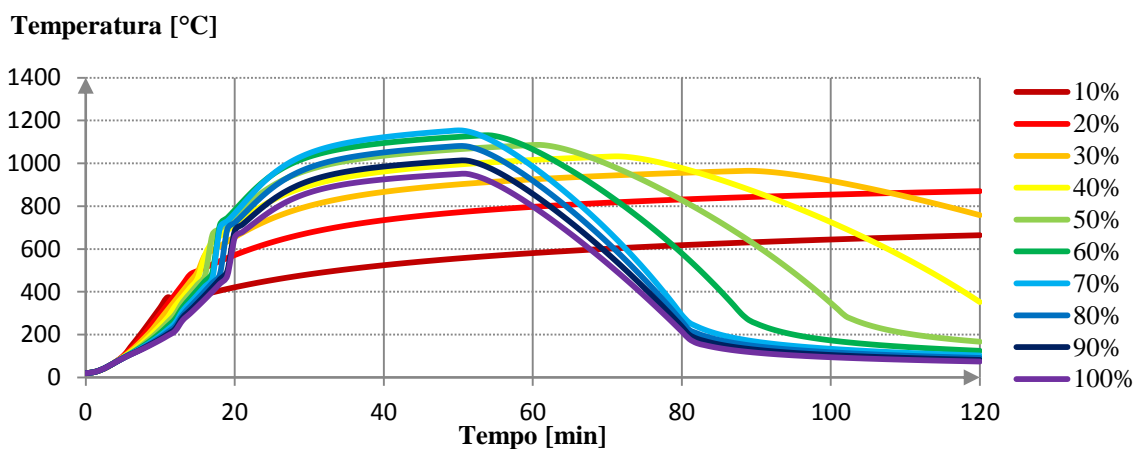


Figura B. 58 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.10m^{0.5}$  e área igual a  $100m^2$



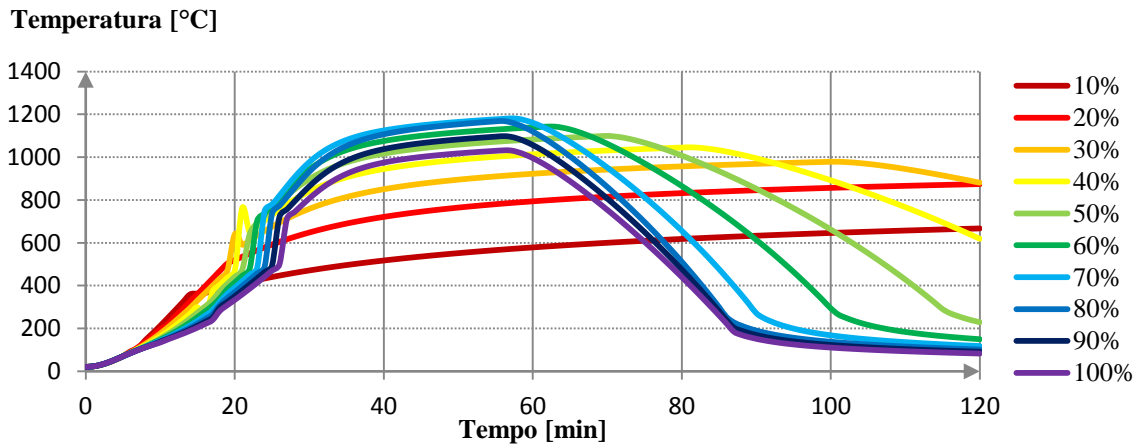


Figura B. 59 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.10m^{0.5}$  e área igual a  $200m^2$

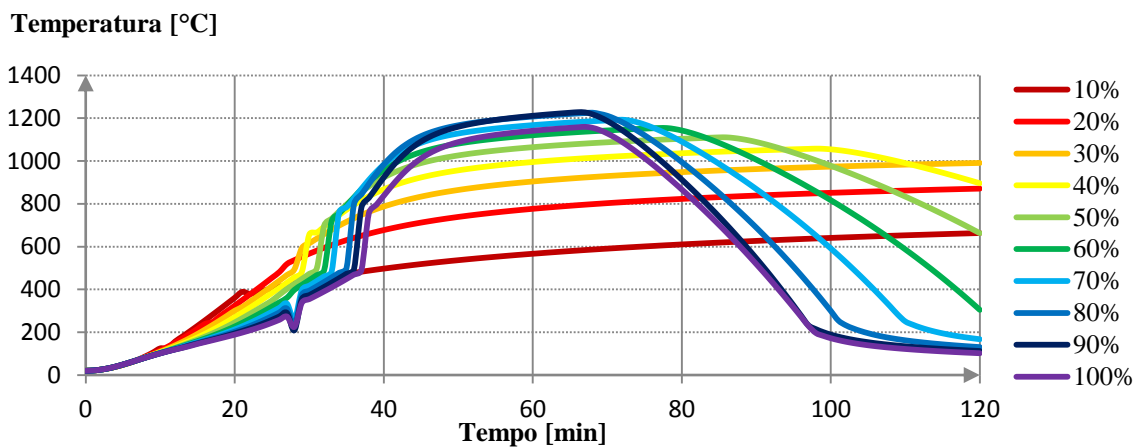
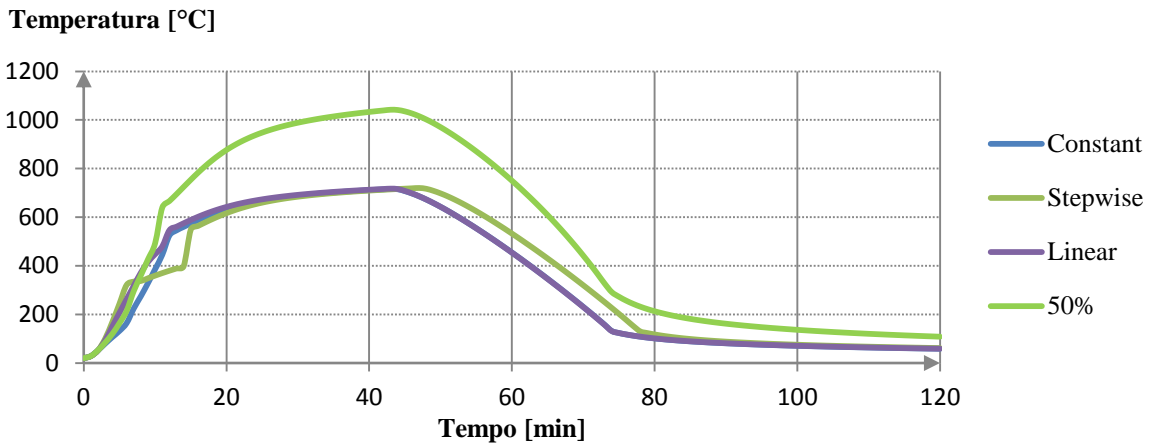
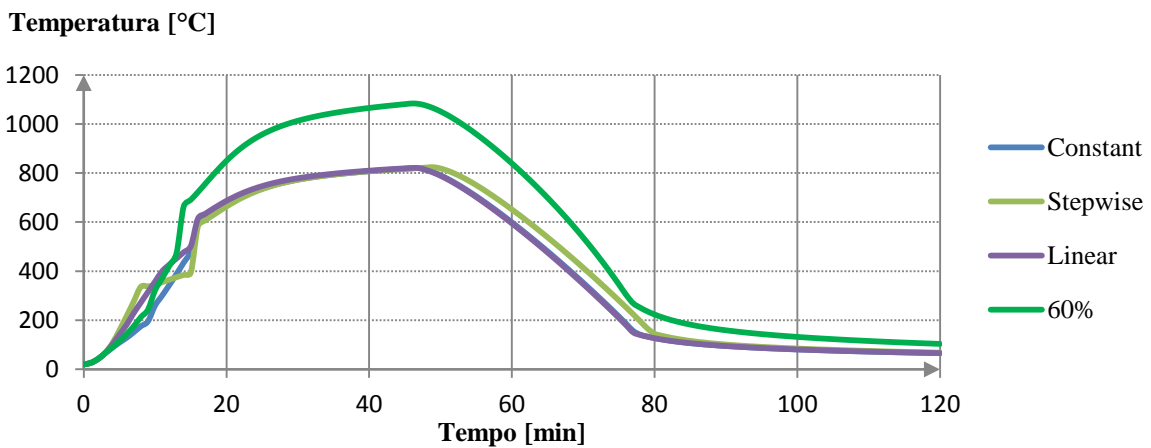


Figura B. 60 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.10m^{0.5}$  e área igual a  $500m^2$

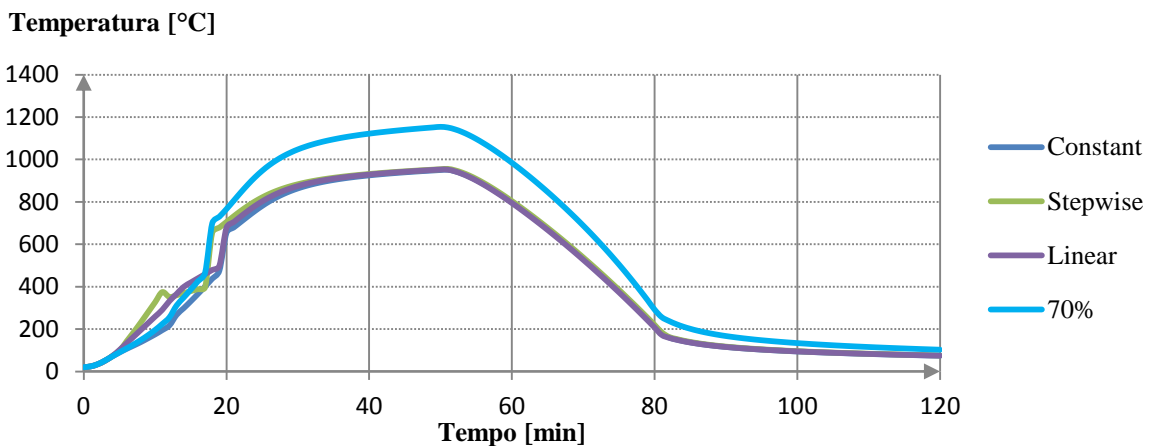
**Curvas temperatura-tempo para a percentagem de abertura crítica e as três abordagens analisadas anteriormente, em função da área do compartimento**



**Figura B. 61 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.10m^{0.5}$  e área igual a  $25m^2$**



**Figura B. 62 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.10m^{0.5}$  e área igual a  $50m^2$**



**Figura B. 63 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.10m^{0.5}$  e área igual a  $100m^2$**

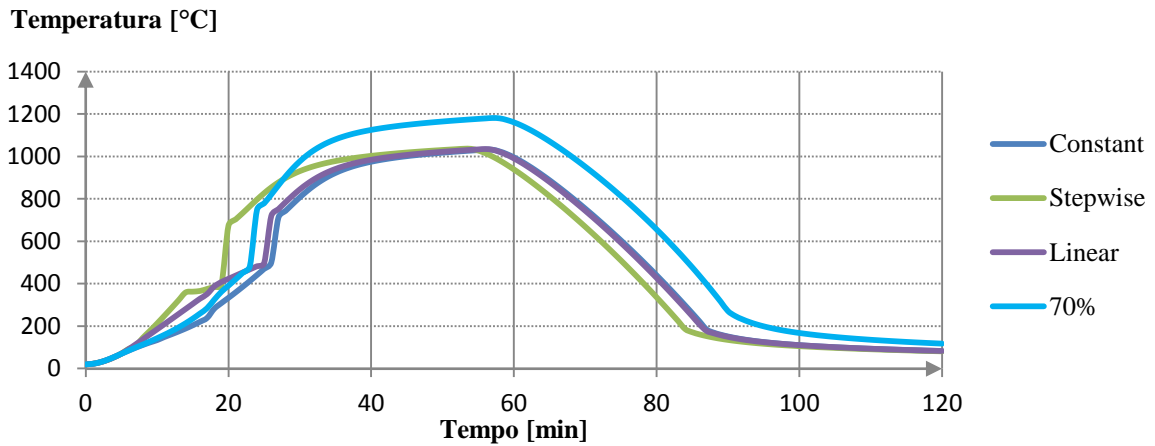


Figura B. 64 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.10m^{0.5}$  e área igual a  $200m^2$

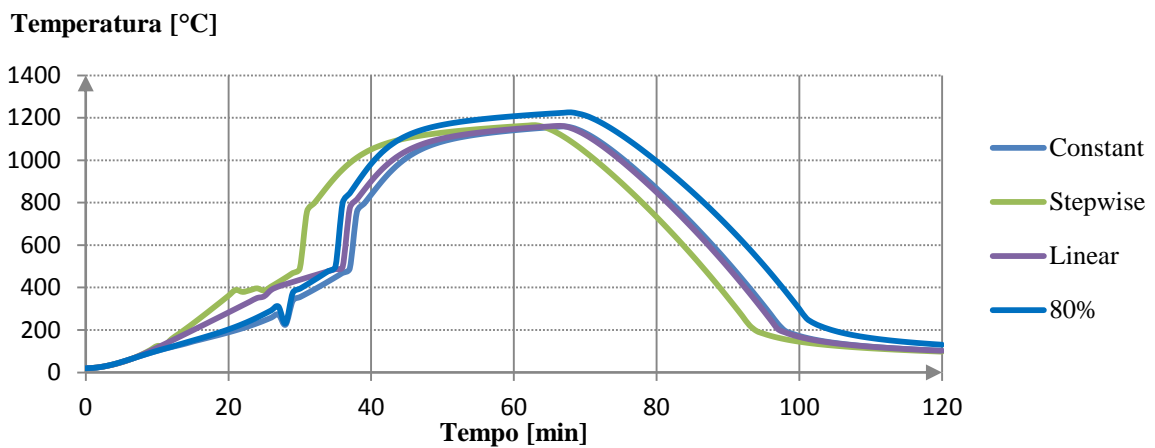


Figura B. 65 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com fator de abertura de  $0.10m^{0.5}$  e área igual a  $500m^2$



---

*Anexos*

*Anexo C*

### Curvas temperatura-tempo para área igual a 25m<sup>2</sup>

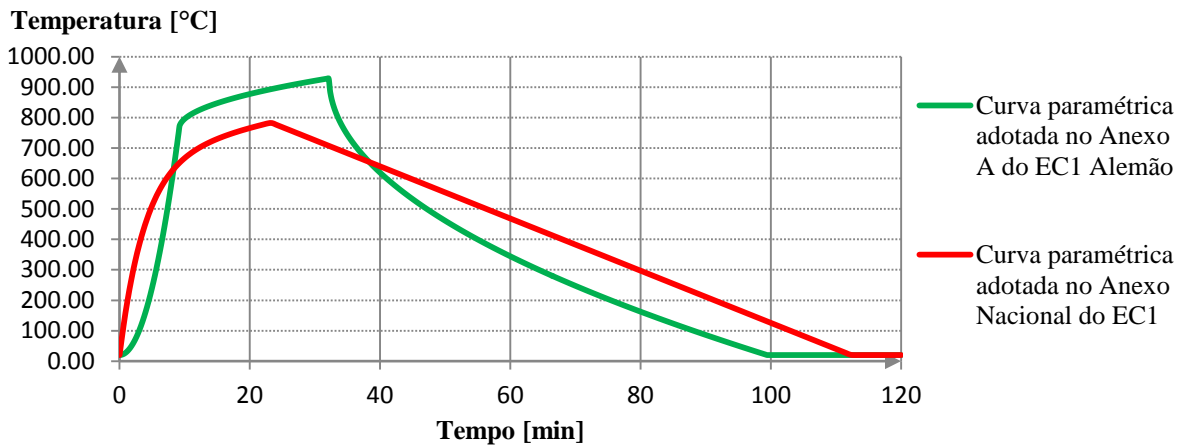


Figura C. 1 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 25m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06m<sup>0.5</sup>

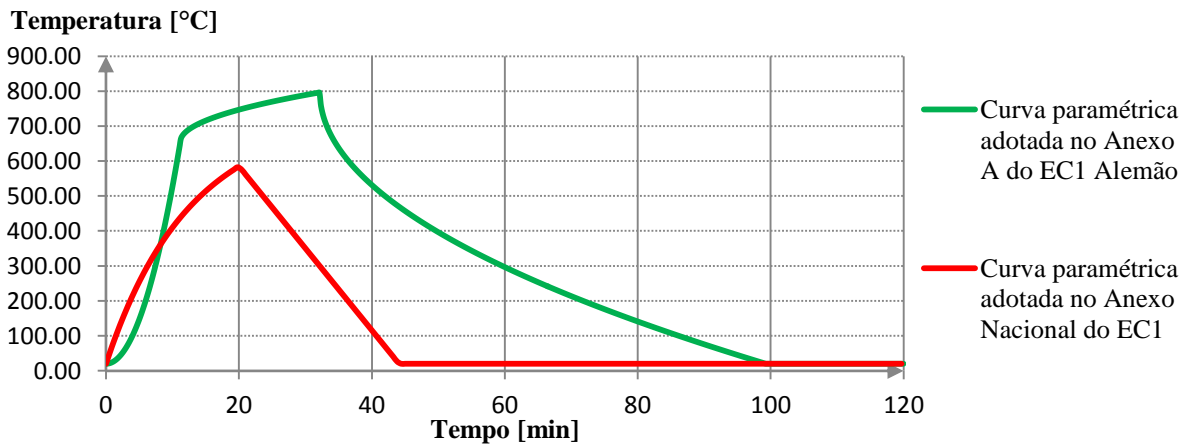
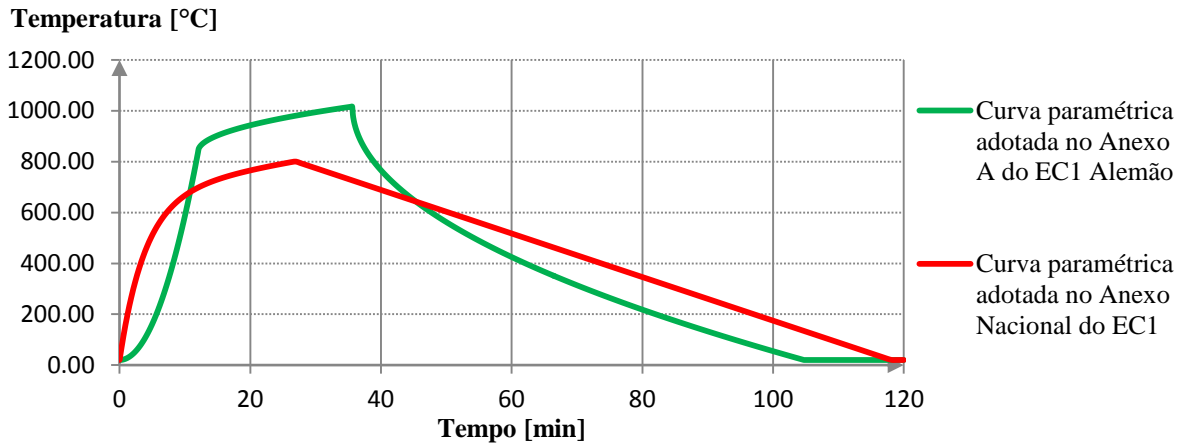
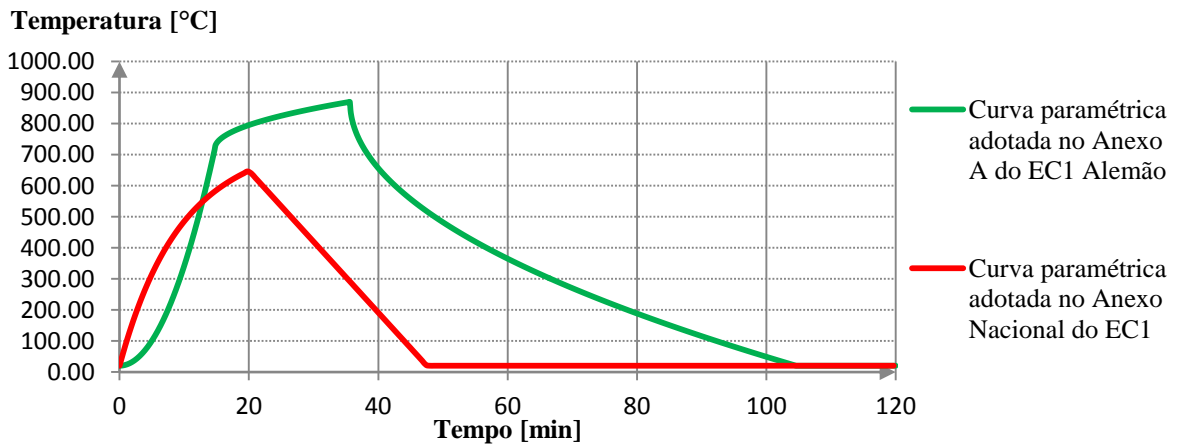


Figura C. 2– Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 25m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.10m<sup>0.5</sup>

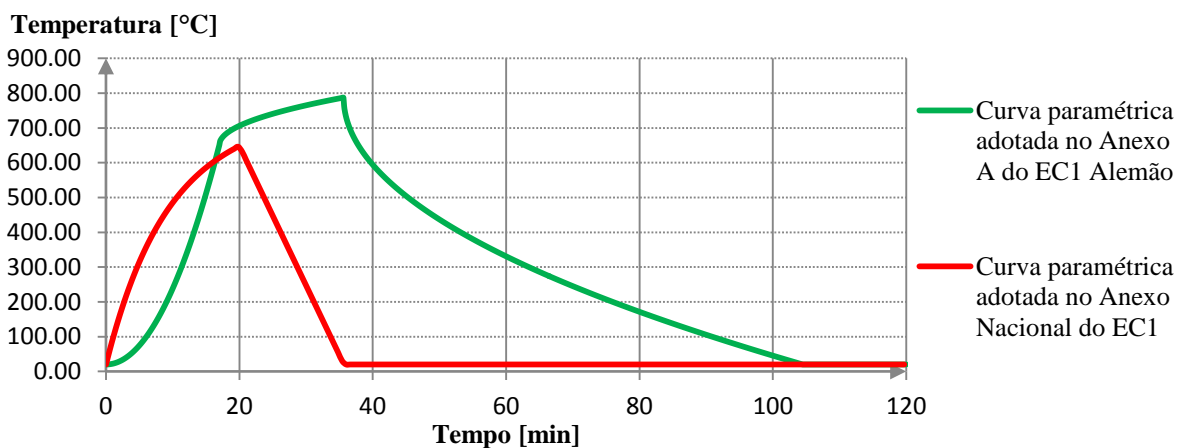
**Curvas temperatura-tempo para área igual a 50m<sup>2</sup>**



**Figura C. 3 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 50m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06m<sup>0.5</sup>**



**Figura C. 4 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 50m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.10m<sup>0.5</sup>**



**Figura C. 5 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 50m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.14m<sup>0.5</sup>**

### Curvas temperatura-tempo para área igual a 100m<sup>2</sup>

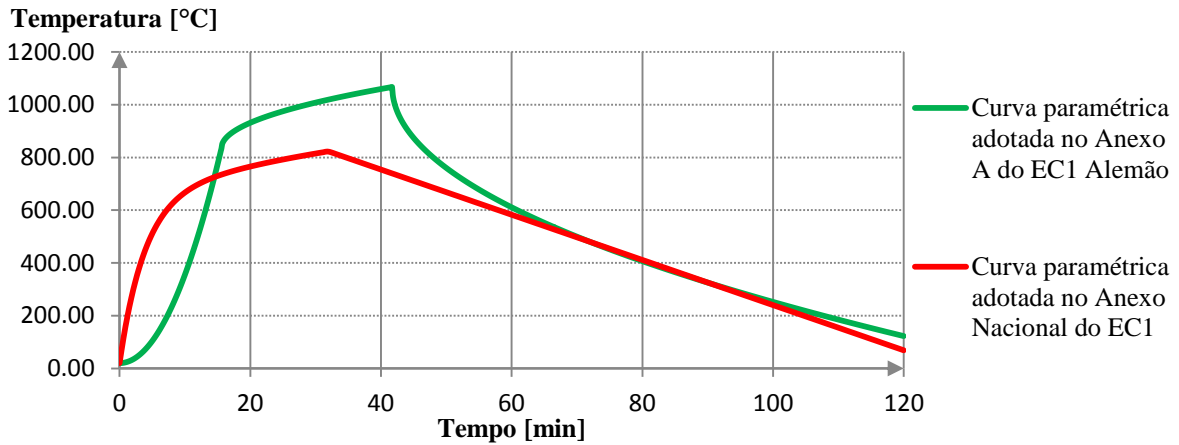


Figura C. 6 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 100m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06m<sup>0.5</sup>

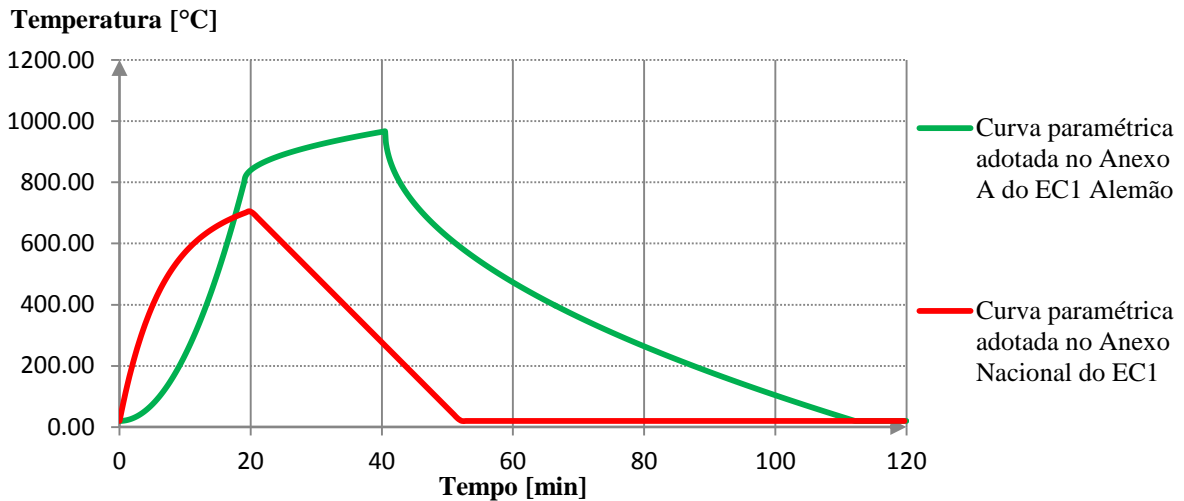


Figura C. 7 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 100m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.10m<sup>0.5</sup>

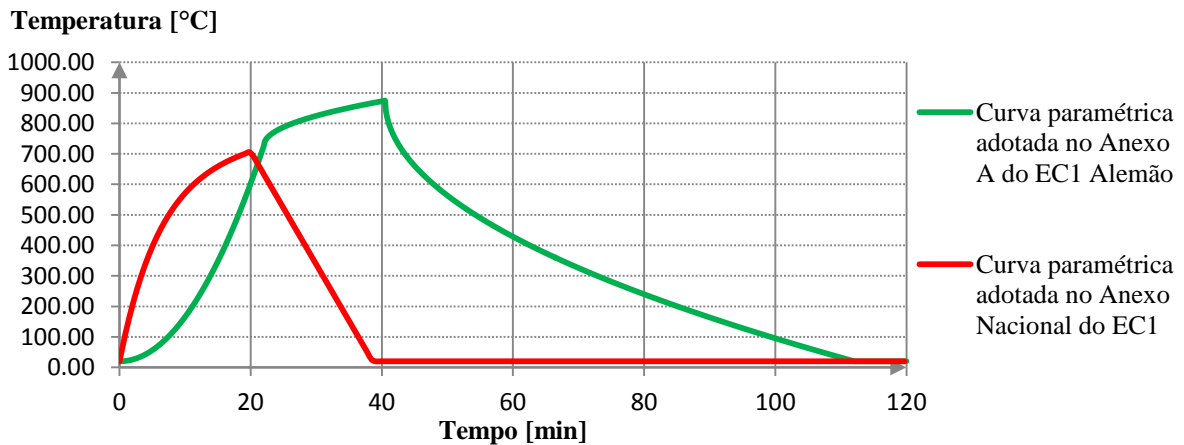


Figura C. 8 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 100m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.14m<sup>0.5</sup>



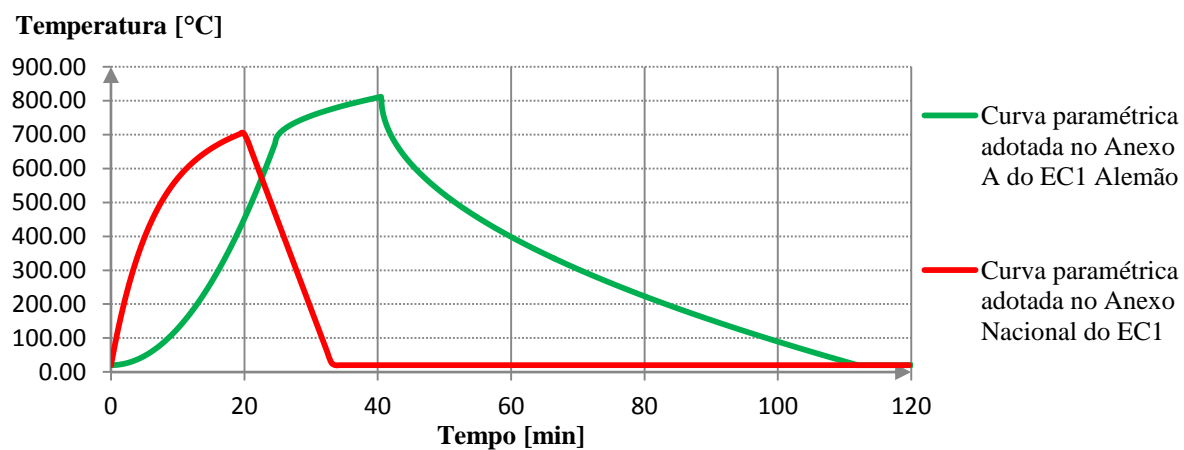


Figura C. 9 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 100m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.18m<sup>0.5</sup>

### Curvas temperatura-tempo para área igual a 200m<sup>2</sup>

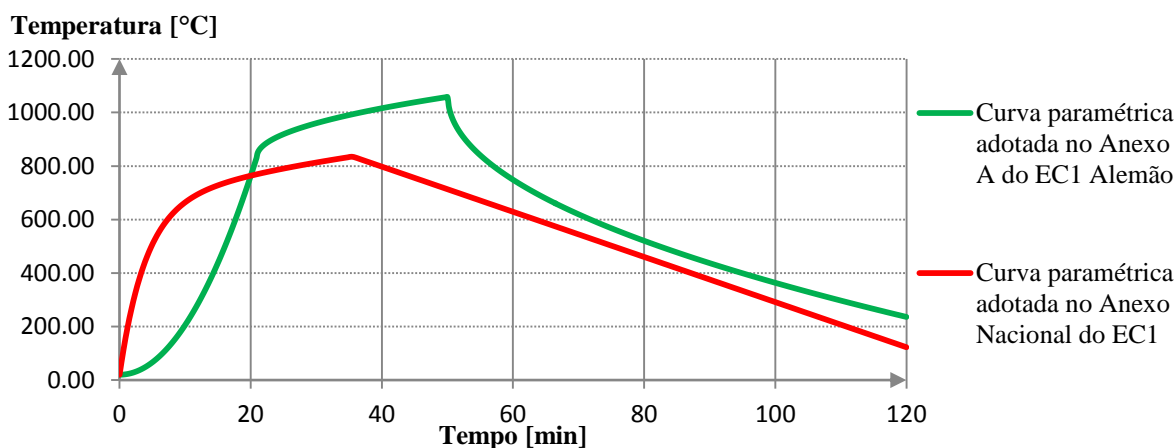


Figura C. 10 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 200m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.06m<sup>0.5</sup>

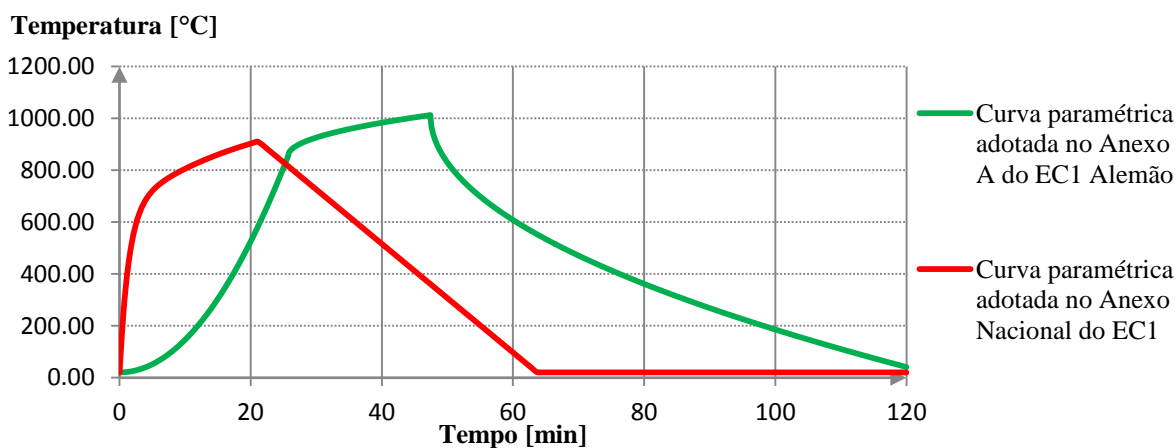


Figura C. 11 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 200m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.10m<sup>0.5</sup>

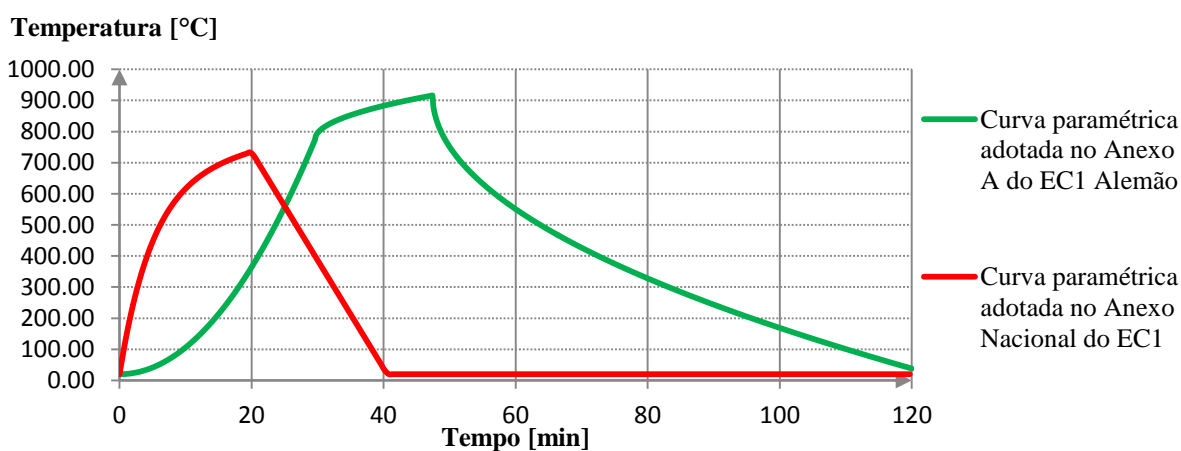


Figura C. 12 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 200m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.14m<sup>0.5</sup>

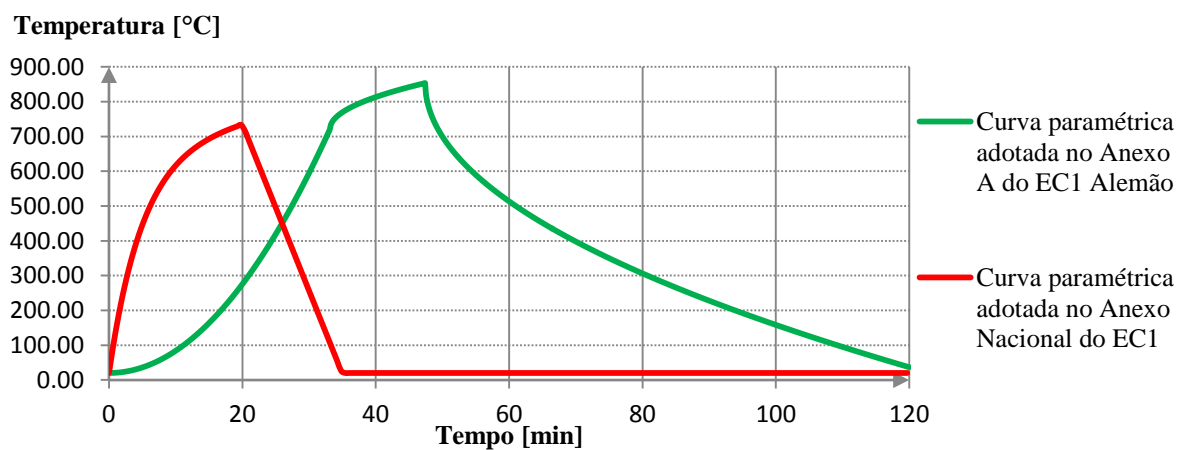


Figura C. 13 – Variação da temperatura no compartimento de incêndio para um compartimento com área de 200m<sup>2</sup> e fator de abertura de 0.18m<sup>0.5</sup>