



**FCTUC** DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

# **“Computational Fluid Dynamics” – Comparação entre um incêndio generalizado e um “Travelling Fire”**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil  
na Especialidade de Mecânica Estrutural

Autor

**Diana Isabel Tomás Dias**

Orientador

**Maria Constança Simões Rigueiro**

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

**Coimbra, Julho, 2016**

## AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta dissertação não teria sido possível sem o auxílio, o apoio e a disponibilidade da Professora Constança Rigueiro e da Professora Aldina Santiago, que fizeram todos os esforços (e mais alguns!) para a concretização deste projeto.

Ao Professor Hélder Craveiro um muito obrigada pela disponibilidade e prontidão, pelos conhecimentos transmitidos e por toda a paciência demonstrada.

Em Coimbra aprendi o sentido da vida, a crescer como pessoa e como profissional. Desta cidade levo tradições, conhecimento, vivências, muitas noites árduas de trabalho e tantas outras de diversão. Agradeço fundamentalmente àqueles que estiveram comigo desde o início deste percurso académico - À Ema, Tita, Miguel, Adriana e Jorge.

À Carolina e à Joana um muito obrigada por tudo, companheiras de noites intermináveis, de diversão e trabalho, principalmente trabalho!!! Como vocês me disseram uma vez: daqui a uns anos vamo-nos rir disto! Chegou a altura, de rir, viver, sonhar e principalmente acreditar, porque isto tem que valer a pena! Aos meus colegas de Perfil, companheiros de luta, obrigada por tudo, principalmente por chegarmos ao fim, sem perdermos a sanidade mental (estivemos perto!), um especial agradecimento à Ana Teresa, à Gabriela, ao Rodrigo, ao Daniel, à Carla, a todos cujo nome não figura neste texto.

Às minhas amigas Psicólogas, agradeço os conselhos, as histórias, as aventuras. Obrigada Catarina, Lília e Rita! À Inês, minha melhor amiga, companheira de 5 anos de casa, obrigada por tudo, pela importância que tem.

À minha Malta agradeço por estes anos todos me mandarem mensagens mesmo sabendo que eu não iria comparecer porque tinha que estudar, trabalhar... Obrigada por acreditarem, ou fingirem que acreditavam mas a verdade era essa. O tempo passa mas as amizades verdadeiras ficam!

Não podia acabar estes agradecimentos sem agradecer àqueles que me permitiram que chegasse até aqui, me transmitiram os valores que tenho e prezo bastante, os que me deram a oportunidade de chegar onde cheguei. Este dia só é possível graças a vocês: Mãe, Pai e Filipe.

Chegou o dia. Chegou a Hora!

## RESUMO

Atualmente no dimensionamento estrutural em situação de incêndio não existem normas que descrevam de forma precisa o incêndio real, dado que as existentes têm diversas limitações no que concerne às áreas, aberturas e forma como a queima ocorre nos compartimentos, assumindo que esta é uniforme ao longo de todo o compartimento, no entanto é do conhecimento geral que tal não ocorre.

O desenvolvimento da arquitetura, com conseqüente aumento das áreas dos edifícios, das aberturas e de outras características geométricas, incita à necessidade de estudar incêndios em que se considera a sua evolução ao longo do espaço e do tempo, os designados – *Travelling Fires*.

A presente dissertação incide desta forma em dois casos de estudo: o primeiro para um incêndio generalizado, onde ocorre a sua queima uniforme em todo o compartimento, efetuando uma comparação com a curva paramétrica do Anexo A do Eurocódigo 1 – Parte 2 e o segundo para um *travelling fire* efetuando a sua comparação com o incêndio generalizado.

Para proceder à modelação do compartimento utilizam-se modelos CFD que permitem obter informações relativamente ao calor transferido e ao comportamento das estruturas em situação de incêndio. A ferramenta de cálculo estrutural de segurança contra incêndios usada foi o *software Pyrosim*, que tendo por base o FDS (*Fire Dynamics Simulator*), um programa de simulação numérica, permite uma interface gráfica ao utilizador.

Desta forma foi possível concluir que a consideração da forma como o incêndio se desenvolve ao longo do compartimento é de extrema importância para o dimensionamento estrutural em situação de incêndio e que é imperativo considerar a existência de incêndios que viajam ao longo do compartimento, promovendo o seu desenvolvimento e conseqüente aplicação nos documentos normativos.

Palavras – chave: incêndio generalizado, *travelling fire*, curva paramétrica, CFD, FDS, *Pyrosim*.

## **ABSTRACT**

Currently there are no design standards that can accurately depict the impact of fire dynamics on the structure. The existing ones have several limitations in regards to the consideration of areas, openings and how the burning process evolves in closed areas; thus creating an analytical disparity between the simplified conceptualization of fire dynamics and their real behaviour on the structure.

Developments in architecture have led to an increase in the areas, openings and geometrical characteristics of the buildings over time. Consequently, this premise has introduced the need to change the paradigm of fire analysis so as to introduce the evolution of the fire over space and time as variable, which has been overlooked, by using the concept of Travelling Fires.

Therefore, this dissertation focuses on two case studies: the first case study is centred on a widespread fire, considering a uniform burning across a closed area, making a comparison with the parametric curve of Annex A of Eurocode 1 – Part 2; the second case study tackles a travelling fire compared with a widespread fire.

In order to reproduce the closed area, CFD models were used to obtain information about the transferred heat and the structure’s behaviour during a fire. Additionally, Pyrosim was used as an analytical tool to approach the element of fire safety in structural design and to provide a graphical interface for the user. This tool is based on the FDS (Fire Dynamics Simulator), which uses numerical simulation.

This thesis has reached the conclusion that the consideration of the fire dynamics on closed areas is extremely important in terms of assuring the reliability of the structural design during a fire situation. Furthermore, it is imperative to consider the impact of fire traveling along closed areas, hence an update to the current standards is highly recommended in order to effectively control and minimize risks associated with this phenomenon.

Key words: widespread fire, traveling fire, parametric curve, CFD, FDS, Pyrosim.

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Incêndio Real .....	1
1.2	Curvas/ modelos de simulação de incêndio .....	2
1.3	Enquadramento do Trabalho e Objetivo .....	4
1.4	Organização e conteúdos da dissertação .....	5
2	MODELAÇÃO DE INCÊNDIOS EM COMPARTIMENTOS .....	6
2.1	Curvas Nominais .....	6
2.1.1	Curva de incêndio padrão .....	6
2.1.2	Curva de incêndio de hidrocarbonetos .....	7
2.1.3	Curva de incêndio para elementos exteriores .....	8
2.2	Curva de incêndio paramétrica .....	8
2.2.1	Fase de Aquecimento .....	11
2.2.2	Fase de Arrefecimento .....	13
2.3	<i>Travelling Fire</i> .....	14
2.3.1	Introdução .....	14
2.3.2	Estudo de queima não uniforme .....	14
2.3.3	<i>Travelling Fires</i> Horizontais .....	17
2.3.4	<i>Travelling Fires</i> Verticais .....	20
2.3.5	Aplicação dos <i>Travelling Fires</i> .....	21
2.4	Simulação Numérica .....	22
2.4.1	<i>Computational Fluid Dynamics</i> .....	22
2.4.2	<i>Software FDS</i> .....	25
3	CASO DE ESTUDO .....	27
3.1	Definição do caso de estudo .....	27
3.1.1	Geometria .....	27
3.1.2	Propriedades do material .....	28
3.2	Avaliação Regulamentar Incêndio Generalizado .....	28
4	MODELAÇÃO NUMÉRICA .....	31
4.1	Introdução .....	31
4.2	Modelo Numérico .....	31
4.2.1	Características do material da envolvente .....	31
4.2.2	Características do combustível .....	32
4.2.3	Discretização da malha numérica .....	32
4.2.4	Condições de contorno externas .....	34

---

4.2.5 Modelo Generalizado .....	35
4.2.6 Características específicas da modelação do <i>Travelling Fire</i> .....	37
5 RESULTADOS .....	44
5.1 Incêndio Generalizado .....	44
5.1.1 Refinamento da malha.....	44
5.1.2 Termopares.....	45
5.1.3 Movimentação de Gases.....	46
5.2 <i>Travelling Fire</i> .....	51
5.2.1 Refinamento da malha.....	51
5.2.2 Termopares.....	51
5.2.3 Movimentação de Gases.....	57
5.2.4 Comparação dos resultados obtidos no <i>Travelling Fire</i> e no Incêndio Generalizado	
63	
6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	65
6.1 Conclusões.....	65
6.2 Desenvolvimentos futuros .....	66
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	67

## SIMBOLOGIA

### Letras minúsculas latinas

$b$  – absortividade térmica da superfície envolvente total ( $b = \sqrt{\rho c \lambda}$ );

$c$  – calor específico;

$h_{eq}$  – média pesada das alturas verticais em todas as paredes em  $m^2$ ;

$h_i$  – altura da abertura  $i$ ;

$q_{f,d}$  – valor de cálculo da densidade de carga de incêndio por unidade de área do pavimento;

$q_{t,d}$  – valor de cálculo da densidade de carga de incêndio por unidade de área da envolvente;

$t_{lim}$  – instante de tempo em que ocorre a temperatura máxima dos gases no caso de incêndio controlado por combustível;

$t_{max}$  – instante de tempo em que ocorre a temperatura máxima dos gases.

### Letras maiúsculas latinas

$A$  – área do compartimento de incêndio;

$A_f$  – área do pavimento do compartimento de incêndio;

$A_t$  – área total da superfície envolvente (paredes, teto e pavimento, incluindo aberturas);

$A_v$  – área total das aberturas verticais em todas as paredes;

$O$  – fator de abertura do compartimento de incêndio;

$O_{lim}$  – fator de abertura reduzido em caso de incêndio controlado por combustível.

### **Letras minúsculas gregas**

$\lambda$  – condutibilidade térmica;

$\rho$  – massa volúmica.

### **Letras maiúsculas gregas**

$\Gamma$  – fator de conversão do tempo, função do fator de abertura  $O$  e da absorvidade térmica  $b$ ;

$\Gamma_{lim}$  – fator de conversão do tempo, função do fator de abertura  $O_{lim}$  e da absorvidade térmica  $b$ ;

$\theta$  – temperatura [ $^{\circ}$  C] =  $T[\text{K}] - 273$ ;

$\theta_{max}$  – temperatura máxima [ $^{\circ}$ C].

### **ABREVIATURAS**

CFD – Computational Fluid Dynamics;

FDS – Fire Dynamics Simulator;

LES – Large Eddy Simulation;

DNS – Direct Numerical Simulation.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Incêndio Real

A ocorrência de um incêndio necessita de três fatores a atuar simultaneamente: uma fonte de calor, o combustível e o comburente (oxigénio). A combustão, isto é, o início do fogo dá-se quando a mistura de combustível/ oxigénio está suficientemente quente.

Na Figura 1.1 representa-se a curva de incêndio natural, na qual são descritas quatro fases sucessivas (Vila Real, 2003):

Fase de ignição ou fase inicial (a) – ocorre no início da inflamação, as temperaturas permanecem baixas, não tendo influência no comportamento estrutural dos edifícios. Esta fase apesar de não ser incluída nas curvas temperatura – tempo regulamentares é uma fase crítica no que concerne à salvaguarda de vidas, dado que se produzem os gases mais tóxicos;

Fase de propagação (b) – designado por *flashover*, no qual o fogo se espalha por radiação ou contacto direto, ocorrendo a inflamação súbita de gases num determinado instante. As temperaturas situam-se entre os 450°C e os 600°C. A partir desse instante as temperaturas sobem rapidamente;

Fase de desenvolvimento pleno (c) – ocorre a queima do material combustível, mantendo-se as temperaturas praticamente constantes;

Fase de extinção ou fase de arrefecimento (d) – dá-se a diminuição progressiva das temperaturas, quer seja por falta de combustível ou oxigénio ou pela intervenção de terceiros, existindo um pequeno atraso no início do arrefecimento devido à inércia térmica, que promove um aumento de temperatura durante alguns minutos.

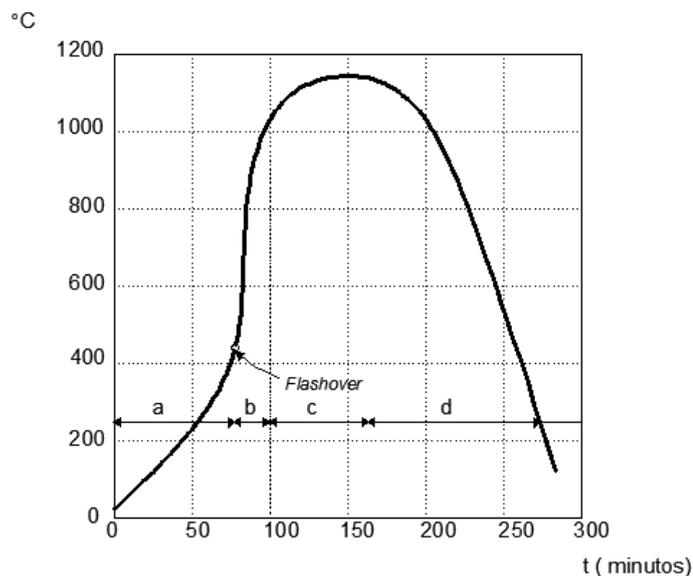


Figura 1.1 – Curva de incêndio real (Adaptado de Real, 2003)

Como o oxigênio existe em abundância na fase inicial e na fase de propagação, estas fases dependem essencialmente da carga de incêndio. Durante a fase de desenvolvimento o oxigênio disponível tem uma influência considerável, pelo que podem ocorrer dois tipos de situações:

- Incêndio controlado pela carga de incêndio – existe oxigênio suficiente e a taxa de combustão depende apenas das características e da quantidade de material combustível;
- Incêndio controlado por ventilação – as aberturas de ventilação do compartimento de incêndio são demasiado pequenas em comparação com as dimensões do compartimento, o que leva a que a taxa de combustão seja condicionada pela quantidade de oxigênio disponível.

## 1.2 Curvas/ modelos de simulação de incêndio

Para proceder à simulação de incêndios recorre-se a modelos de verificação de segurança, que podem ser simplificados, sem no entanto deixarem de representar de forma oportuna a influência dos vários fatores que condicionam o comportamento das estruturas. Estes fatores podem ser de diversos tipos: condições de ventilação, geometria, carga de incêndio, materiais que compartimentam o espaço, entre outros. Os regulamentos existentes apresentam várias formas distintas de modelar a temperatura dos gases nos compartimentos sujeitos a incêndios, sendo que tal pode ser consultado na norma EN 1991-1-2 (CEN, 2010).

Esta norma recorre a curvas de variação temporal da temperatura nos elementos, podendo estas ser de dois tipos: curvas de incêndio nominais (curva de incêndio padrão, curva de incêndio para elementos exteriores ou a curva de incêndio em hidrocarbonetos) ou curvas paramétricas.

As curvas nominais ou convencionais, designadas por *standard*, correspondem a simplificações de incêndio que facilitam a classificação e/ou verificação da resistência ao fogo. Estas curvas apenas dependem do fator tempo, pelo que não representam de forma muito aproximada o comportamento real de um incêndio, apenas servem como base para estudos.

Por sua vez, as curvas paramétricas, além de terem em consideração o fator tempo têm em conta determinados parâmetros físicos, pelo que reproduzem de uma forma mais fiel o comportamento do incêndio real.

Na atualidade, para simular o incêndio real utilizam-se modelos avançados de cálculo, denominados modelos CFD (*Computational Fluid Dynamics*), designados também por modelos de campo, dado serem uma das ferramentas mais sofisticadas disponíveis para os engenheiros de segurança aos incêndios. Estes modelos baseiam-se em leis fundamentais da física, ao invés de terem uma correlação empírica, pelo que exigem um conhecimento especializado por parte do utilizador. Por esta razão, os modelos CFD oferecem ao utilizador uma abordagem mais versátil no que diz respeito à resolução de problemas de dinâmica de incêndio. A modelação CFD é utilizada em quase todas as disciplinas da ciência e da engenharia, que consideram os problemas que envolvem fluxo de fluidos. As áreas onde o CFD é comumente aplicado incluem: indústria aeroespacial, indústria automóvel, indústria marítima, engenharia de processos químicos, ciências médicas, sistemas HVAC (*Heating Ventilation Air Conditioning*), dimensionamento ambiental, dimensionamento estrutural a incêndios, entre outros.

Neste trabalho recorre-se a modelos CFD para modelar um compartimento simples relativamente a fenómenos de natureza térmica, nomeadamente as temperaturas atingidas no compartimento ao longo da sua altura e do seu comprimento e a velocidade das chamas quanto à sua propagação, que serão alvo de explicação mais aprofundada.

### 1.3 Enquadramento do Trabalho e Objetivo

A problemática dos incêndios é um tema bastante corrente nos dias atuais, sendo que as suas consequências podem ser desastrosas. A maior parte das mortes em incêndios deve-se primeiramente aos efeitos tóxicos de fumaça, antes de qualquer colapso estrutural. Contudo, o fogo tem um efeito sobre o colapso estrutural que limita a estabilidade estrutural, colocando em risco a evacuação e o acesso seguro.

Atualmente os projetos arquitetónicos devido à sua geometria e dimensão apresentam um desafio para os engenheiros estruturais relativamente à segurança contra incêndios. O comportamento dos edifícios, bem como a compreensão dos mecanismos fundamentais dos mesmos, são fatores determinantes a ter em consideração aquando do dimensionamento. O dimensionamento destes é efetuado segundo os documentos normativos vigentes – os Eurocódigos, que apresentam bastantes limitações, dado assumirem um incêndio generalizado ao longo de todo o compartimento, o que para pequenas áreas pode ser adequado, mas para compartimentos grandes, de planos abertos, oferece bastantes limitações. O facto de assumir uma queima constante em todo o compartimento leva a pressupostos que não estão adequados ao comportamento que o incêndio real apresenta, devido à sua heterogeneidade não estar representada.

O dimensionamento estrutural é um fator de suma importância a ter em atenção, dado o seu potencial catastrófico, desta maneira quanto mais realista for o cenário potencial de incêndio mais otimizada a estrutura será.

Com esta dissertação pretende-se, desta maneira efetuar a comparação entre um incêndio generalizado, cuja queima é uniforme em todo o compartimento e um *travelling fire* que assume uma heterogeneidade ao longo do mesmo. As principais diferenças entre assumir um método ao invés do outro também serão estudadas, elaborando uma reflexão crítica sobre os dados obtidos através das simulações numéricas e o impacto que a sua escolha tem no dimensionamento estrutural.

## 1.4 Organização e conteúdos da dissertação

O presente documento está dividido em cinco capítulos sendo estes discretizados em seções e subseções, cujo conteúdo se encontra descrito resumidamente nos seguintes parágrafos:

No **Capítulo 1 – Introdução** é efetuada uma pequena contextualização da temática abordada na dissertação bem como uma breve descrição relativa ao incêndio real e aos diversos tipos de curvas existentes, especificando a abordagem utilizada para a resolução da problemática em estudo referenciando os modelos CFD. O âmbito e o objetivo da elaboração da presente dissertação encontram-se também explicitados.

No **Capítulo 2 – Modelação de incêndio em Compartimentos** é feito um enquadramento geral à temática da dissertação de forma a introduzir alguns conceitos teóricos necessários para a compreensão do trabalho desenvolvido nos capítulos que se seguem. Assim sendo, apresentam-se as curvas nominais e as curvas paramétricas, sendo que para estas últimas se apresenta a sua formulação de uma forma mais extensiva. Posteriormente faz-se referência aos desenvolvimentos históricos mais relevantes do início e desenvolvimento dos *travelling fires*, bem como dos modelos CFD.

No **Capítulo 3 – Caso de Estudo** é calculada a curva paramétrica do Anexo A do Eurocódigo 1- parte 2, que serve de calibração no caso do incêndio generalizado.

No **Capítulo 4 – Modelação Numérica** são apresentados dois casos de estudo: um incêndio generalizado e um *travelling fire*, sendo descritas de forma pormenorizada as várias etapas da modelação numérica.

No **Capítulo 5 – Resultados** são apresentados os resultados numéricos obtidos, bem como a respetiva crítica, comparando no caso do incêndio generalizado com os resultados obtidos através do Anexo A da parte 1-2 do Eurocódigo 1; no caso do *travelling fire* é realizada a comparação com o caso do incêndio generalizado.

No **Capítulo 6 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros** apresentam-se as considerações finais onde são sintetizadas as conclusões do trabalho desenvolvido, bem como propostas de temas a desenvolver futuramente.

## 2 MODELAÇÃO DE INCÊNDIOS EM COMPARTIMENTOS

### 2.1 Curvas Nominais

#### 2.1.1 Curva de incêndio padrão

A curva de incêndio padrão é caracterizada pelo aumento contínuo da temperatura ao longo do tempo numa velocidade pré-estabelecida, como se expressa na Equação (2.1) e está de acordo com a norma ISO 834 (1999). O valor de resistência determinado por meio desta curva não indica o tempo real que a estrutura resiste ao incêndio, trata-se apenas de um patamar de comparação para verificar a severidade do fogo que essa estrutura suporta (Kaefer e Silva, 2003). Os fogos *standard* têm um crescimento lento, o que nem sempre ocorre na realidade.

Na Figura 2.1 apresenta-se a curva de incêndio padrão ISO, que se caracteriza por possuir um ramo com desenvolvimento crescente, admitindo desta forma que a temperatura dos gases cresce ao longo do tempo.

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2.1)$$

Em que:

$\theta_g$  – temperatura dos gases no compartimento de incêndio (° C);

$t$  – tempo (min).

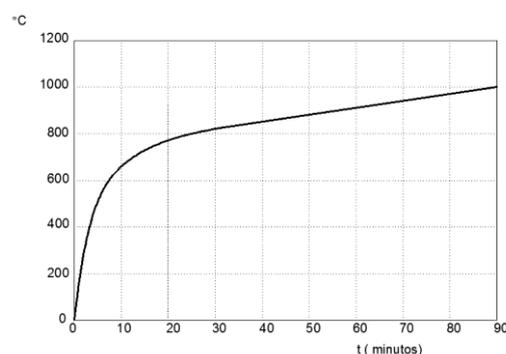


Figura 2.1 – Curva de incêndio padrão ISO (Vila Real, 2003)

A sua aplicação é sobretudo teórica, dado que para fogos reais não descreve corretamente o seu funcionamento. A temperatura da chama é considerada uniforme em toda a sua extensão e não há diferenciação de áreas no compartimento inteiro. Além disso, tem diversas condicionantes tais como, a temperatura nunca descer devido à decadência do fogo, não tem em consideração a fase de ignição, não depende da carga do fogo e nem das condições de ventilação, o que em fogos reais são aspetos essenciais a ter em consideração aquando do seu estudo. A curva de incêndio padrão tem a vantagem de unificar os ensaios em fornalha (Vila Real, 2003), permitindo deste modo comparar resultados obtidos em diferentes laboratórios utilizando-se em incêndios à base de materiais celulósicos.

### 2.1.2 Curva de incêndio de hidrocarbonetos

Nos casos em que o material combustível armazenado no compartimento provoca um incêndio de maior intensidade que o incêndio padrão, devido à presença de hidrocarbonetos, a curva descrita será uma curva de hidrocarbonetos, designada por curva “H”, como se visualiza na Figura 2.2. Como exemplo nas estruturas *offshore*, os gases existentes são maioritariamente deste tipo, isto é, têm características especiais de aumento de temperatura. Os incêndios são bastante severos e podem ser descritos pela Equação (2.2) que se segue:

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (2.2)$$

Em que:

$\theta_g$  – temperatura dos gases no compartimento de incêndio (°C);

$t$  – tempo (min).

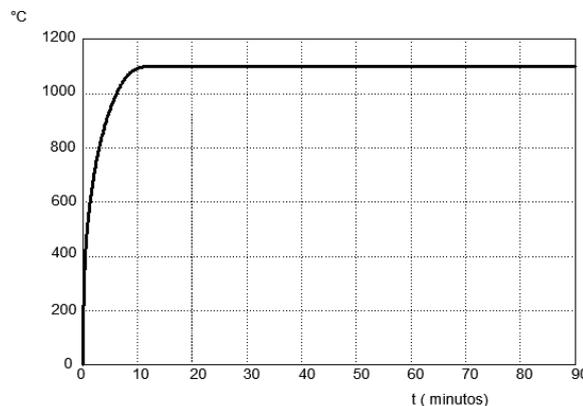


Figura 2.2 – Curva de Incêndio hidrocarbonetos (Vila Real, 2003)

### 2.1.3 Curva de incêndio para elementos exteriores

A curva de incêndio, descrita pela Equação (2.3), para elementos exteriores é aplicada em situações em que parte da estrutura resistente se encontra no exterior. A vantagem consiste na colocação da estrutura resistente fora do contacto direto com o incêndio. Esta curva é menos severa que a curva padrão ISO 834 (1999) e que a curva de hidrocarbonetos, e é descrita na Equação (2.3):

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad (2.3)$$

Em que:

$\theta_g$  – temperatura dos gases no compartimento de incêndio (°C);

$t$  – tempo (min).

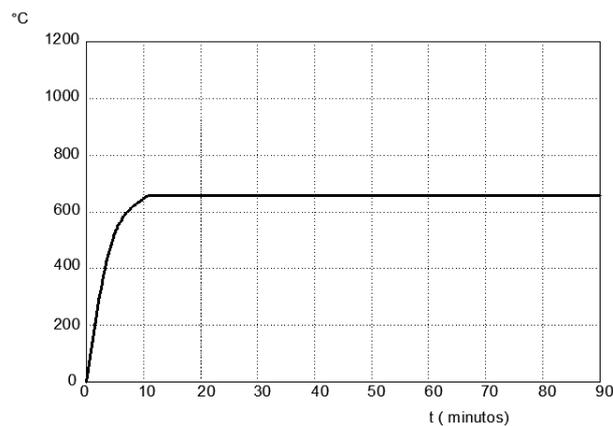


Figura 2.3 – Curva de Incêndio elementos exteriores (Vila Real, 2003)

### 2.2 Curva de incêndio paramétrica

As curvas de incêndio paramétricas têm uma forma mais precisa de determinação da temperatura dos gases, utilizando assim um modelo de incêndio natural compartimentado, onde há a parametrização de fatores que influenciam o aumento da temperatura dos gases. O Anexo A da parte 1-2 do Eurocódigo 1 (CEN, 2010) define curvas paramétricas para a evolução da temperatura em função do tempo, que ao contrário das curvas nominais dependem de vários parâmetros físicos, tais como: a densidade de carga de incêndio, as condições de ventilação, a inércia térmica das paredes, os materiais constituintes do compartimento, entre outros.

Contudo, têm diversas limitações, dado que apenas são válidas para compartimentos de incêndio com o máximo de 500 m<sup>2</sup> de área em planta, sem aberturas no teto e uma altura máxima de 4 m, admitindo-se que a carga de incêndio do compartimento é completamente consumida. (CEN, 2010).

Para a definição da curva paramétrica é fundamental ter em consideração que esta não possui apenas uma fase de aquecimento após o *flashover* mas também uma fase de arrefecimento que descreve o declínio do incêndio, aproximando a curva de um incêndio real de forma mais pormenorizada. Os fatores que influenciam a equação da curva paramétrica devem ser considerados à normal temperatura ambiente – 20°C. A Figura 2.4 permite observar uma curva paramétrica, cuja curva se aproxima da curva de incêndio real.

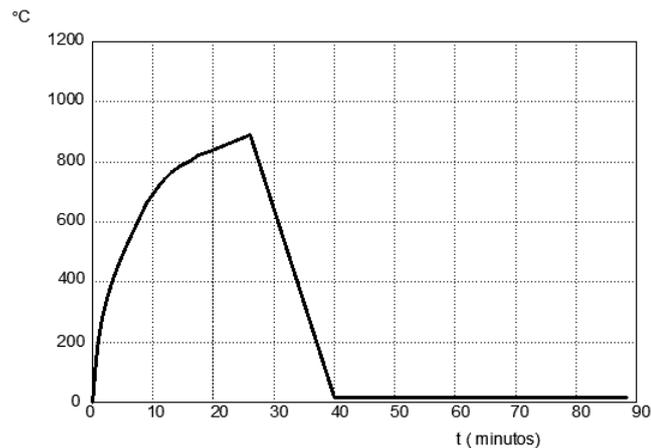


Figura 2.4 – Curva de Incêndio Paramétrica (Adaptado Real, 2003)

A variação das aberturas é um fator bastante importante para o desenvolvimento do incêndio, uma vez que o aumento das aberturas (O) vai propiciar um incêndio cada vez mais severo, com temperaturas mais elevadas e com menor duração conforme se pode visualizar na Figura 2.5.

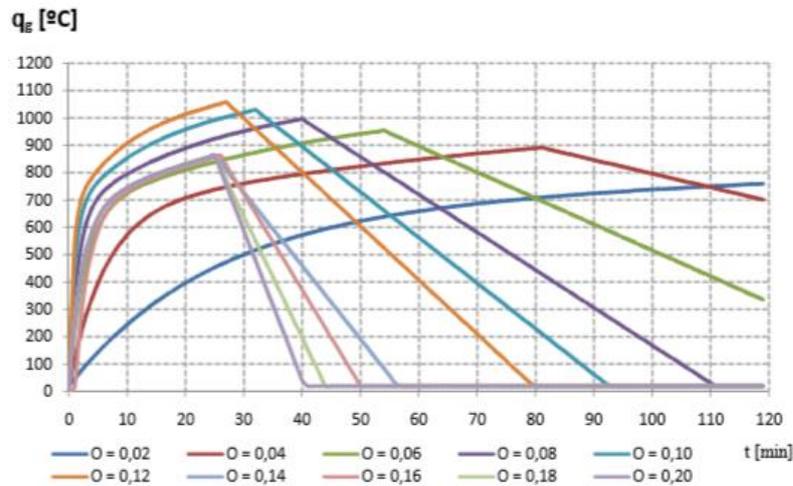


Figura 2.5 – Evolução de temperatura – tempo, variando o fator de abertura (Inácio, 2011)

A variação da densidade de carga térmica ( $q_{f,d}$ ) também é um fator que influencia o comportamento do incêndio. No estudo fixou-se um valor do fator de abertura, que faz com que o incêndio seja limitado pela ventilação. A partir desta consideração o aumento progressivo da carga propicia um incêndio cada vez mais severo, de forma a atingir temperaturas mais elevadas e com duração maior, conforme se pode visualizar na Figura 2.6.

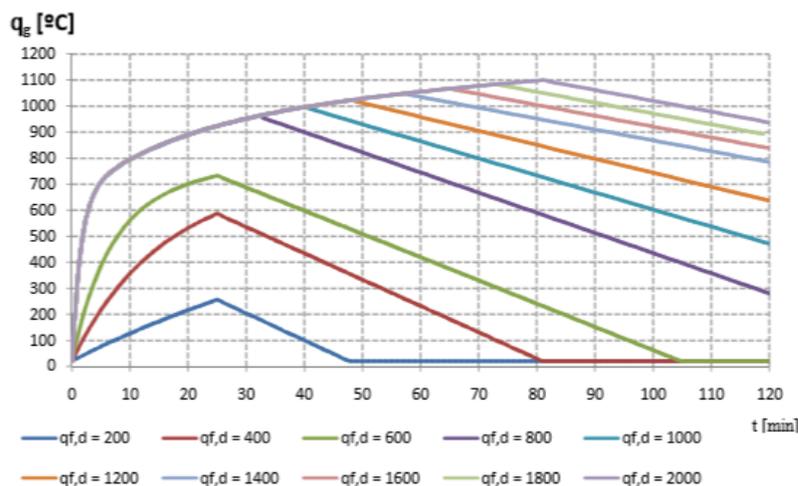


Figura 2.6 – Evolução da temperatura – tempo, variando a densidade de carga de incêndio (Inácio, 2011)

Para definir uma curva paramétrica como a representada na Figura 2.4, recorre-se a equações que permitem descrever a sua fase crescente e decrescente.

A fase crescente e portanto de aumento de temperatura (aquecimento) é descrita pelas Equações (2.4), (2.5), (2.6), (2.7), (2.8), (2.9), (2.10), (2.11) e (2.12) a fase decrescente, por conseguinte de decréscimo de temperatura (arrefecimento) é descrita pelas Equações (2.13), (2.14) e (2.15).

### 2.2.1 Fase de Aquecimento

$$\theta_g = 20 + 1325 \cdot (1 - 0,324 \cdot e^{-0,2 \cdot t^*} - 0,204 \cdot e^{-1,7 \cdot t^*} - 0,472 \cdot e^{-19 \cdot t^*}) \quad (2.4)$$

Em que:

$\theta_g$  – temperatura dos gases no compartimento [°C];

$t^*$  – tempo fictício em horas.

$$t^* = t \cdot \Gamma \quad (2.5)$$

Em que:

$t$  – tempo em horas;

$\Gamma$  – coeficiente de expansão.

$$\Gamma = \left[ \frac{O}{\frac{0,04}{b}} \right]^2 \quad (2.6)$$

Em que:

$O$  – fator de aberturas, em  $m^{1/2}$ ;

$b$  – absorvidade térmica da superfície envolvente total.

$$O = \frac{A_v \cdot \sqrt{h_{eq}}}{A_t} \quad (2.7)$$

Em que:

$$0,02 \leq O \leq 0,2$$

$A_v$  – área total das aberturas verticais em todas as paredes;

$h_{eq}$  – média pesada das alturas verticais em todas as paredes em  $m^2$ ;

$A_t$  – área total da superfície envolvente (paredes, teto e pavimento incluindo aberturas) em  $m^2$ ;

O cálculo do fator  $b$  é dado por:

$$b = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda} \quad (2.8)$$

Em que:

$$100 \leq b \leq 2200$$

$\rho$  – massa volúmica;

$c$  – calor específico;

$\lambda$  – condutibilidade térmica.

Para uma superfície envolvente com diferentes camadas de material,  $b = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda}$  deverá ser obtido da seguinte forma:

Se  $b_1 < b_2$ ,  $b_1 = b$ ;

Se  $b_1 > b_2$  calcula-se uma espessura limite  $S_{lim}$  para o material exposto, de acordo com:

$$S_{lim} = \sqrt{\frac{3600 t_{max} \lambda_1}{c_1 \rho_1}} \quad (2.9)$$

Se  $S_1 > S_{lim}$  então  $b = b_1$ ;

Se  $S_1 < S_{lim}$  então  $b = \frac{S_1}{S_{lim}} b_1 + \left(1 - \frac{S_1}{S_{lim}}\right) b_2$ .

Em que:

$S_i$  – espessura da camada  $i$ ;

$$b_i = \sqrt{\rho_i c_i \lambda_i} ;$$

$\rho_i$  – massa volúmica da camada  $i$ ;

$c_i$  – calor específico da camada  $i$ ;

$\lambda_i$  – condutibilidade térmica da camada  $i$ .

A temperatura máxima da curva paramétrica é dada quando:  $t^* = t^*_{max}$

$$t^*_{max} = t_{max} \cdot \Gamma \quad (2.10)$$

Em que:

$t^*_{max}$  – tempo fictício máximo;

$t_{max}$  – instante de tempo em que ocorre a temperatura máxima dos gases.

$$t_{max} = \max \left\{ 0,2 \times 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{O}; t_{lim} \right\} \quad (2.11)$$

Em que:

$t_{lim}$  – tempo limite de aquecimento;

$q_{t,d}$  – valor de cálculo da densidade de carga de incêndio por unidade de área da envolvente.

$$q_{t,d} = \frac{q_{f,d} \times A_f}{A_t}, \quad 50 \leq q_{t,d} \leq 1000 \quad (2.12)$$

Em que:

$q_{f,d}$  – valor de cálculo da densidade de carga de incêndio por unidade de área do pavimento;

$A_f$  – área do pavimento do compartimento de incêndio.

Neste trabalho pretende-se que o incêndio seja controlado por ventilação, assim sendo o  $t_{lim}$ , resulta da equação  $0,2 \times 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{O}$ .

### 2.2.2 Fase de Arrefecimento

Atingido o pico máximo de temperatura, inicia-se a fase de arrefecimento, cujas curvas temperatura – tempo são descritas pelas seguintes equações:

$$\theta_g = \theta_{max} - 625 \cdot (t^* - t^*_{max} \cdot x), \text{ se } t^*_{max} \leq 0,5 \quad (2.13)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 \cdot (3 - t^*_{max} \cdot x) \cdot (t^* - t^*_{max} \cdot x), \text{ se } 0,5 < t^*_{max} < 0,5 \quad (2.14)$$

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 \cdot (t^* - t^*_{max} \cdot x), \text{ se } t^*_{max} \geq 2 \quad (2.15)$$

Em que:

$\theta_{max}$  – temperatura máxima [°C];

$$t^*_{max} = \left(0,2 \times 10^{-3} \cdot \frac{q_{t,d}}{0}\right) \cdot \Gamma.$$

Sendo o incêndio controlado por ventilação, vem que:

$$x = 1, \text{ dado que } t_{max} > t_{lim}.$$

A duração total de um incêndio pode ser obtida pelo somatório dos períodos de aquecimento e arrefecimento, e é descrita pela Equação (2.16):

$$t_{total} = t_{max} + t_{arref} \quad (2.16)$$

Em que:

$t_{total}$  – duração total do incêndio, em horas.

## 2.3 Travelling Fire

### 2.3.1 Introdução

O conceito de *travelling fire* surgiu da necessidade de qualificar o fogo que raramente é uniforme no seu percurso e que não ocorre isoladamente num local. A sua queima processa-se à medida que se acende o combustível, movimentando-se desta forma ao longo do compartimento em questão. Os métodos atuais de dimensionamento não têm em consideração este tipo de fogo, pelo que o pressuposto deste conceito revoluciona os conhecimentos base relativos à engenharia estrutural contra incêndio. A dinâmica dos *travelling fires* precisa por conseguinte abranger uma maior compreensão no que respeita ao desempenho estrutural dos edifícios expostos a incêndios reais, de forma a permitir uma maior otimização e inovação, diminuindo os impactos no que concerne a danos causados. O principal desafio consiste no desenvolvimento de ferramentas para a incorporação de *travelling fires* no dimensionamento, dado que a regulamentação não prevê este tipo de incêndio e a principal problemática é desta forma a falta de dados de teste em grande escala.

### 2.3.2 Estudo de queima não uniforme

Steckler *et al.* (1982) conduziram uma série de estudos de validação de modelos de incêndio bem ventilados, cuja monitorização da distribuição vertical das temperaturas foi efetuada em duas localizações, na abertura e num canto do compartimento.

Contudo esta baixa resolução espacial não fornecia a percepção necessária para o grau de homogeneidade da temperatura, deixando os pressupostos que se pretendiam comprovar incontestados.

Os primeiros testes experimentais de queima não uniforme foram realizados por Kirby *et al.* (1994) e por Thomas e Bennets (1999) e em ambos se concluiu que os elementos estruturais mais próximos da saída (ventilação) estavam expostos a condições mais severas do que os elementos dentro de um compartimento.

Para proceder à validação dos modelos, de forma a comprovar a alta heterogeneidade que os edifícios sofrem era necessária uma alta resolução espacial, pelo que dois testes foram conduzidos com este propósito, sendo eles o teste de Cardington (1999) e o teste de Dalmarnock (2006). Os fogos reais tinham dispersão da temperatura mais parecidos aos testes de Dalmarnock (2006), devido à alta instrumentação deste teste. De notar que os dois testes foram realizados em compartimentos consistentes com a hipótese de temperatura homogénea, sendo que outros compartimentos com geometrias mais complexas tinham dispersões maiores.

Para combater as limitações dos métodos tradicionais diversas técnicas foram desenvolvidas, desta forma, salientam-se dois métodos pioneiros utilizados: o *Large Firecell Method* (LFM) e o *Travelling Fire Methodology* (TFM).

O primeiro método foi desenvolvido por Clifton (1996), que foi o primeiro a reportar o uso dos *travelling fires*, numa publicação intitulada – “*Fire Models for Large Firecells*” através do programa HERA na Nova Zelândia, sendo que foram propostas alterações em Fevereiro de 2000 e atualizações a documentos em Setembro de 2008. Este relatório referia que o *Large Firecell Method* (LFM) dava uma aproximação de modelos específicos de fogo que relacionavam o desenvolvimento da temperatura – tempo para os *travelling fires* através de “células de fogo”, admitindo que um compartimento de fogo era essencial num edifício. Clifton (1996), aplicou dois diferentes modelos de fogo para criar a curva temperatura-tempo e criou uma série de regras de aplicação desta ao dimensionamento dos compartimentos de fogo. Nomeadamente a área de dimensionamento, descrita na Figura 2.7 poderia ser designada consoante o momento, nas seguintes condições: fogo, pré-aquecimento, fumo, queimado.

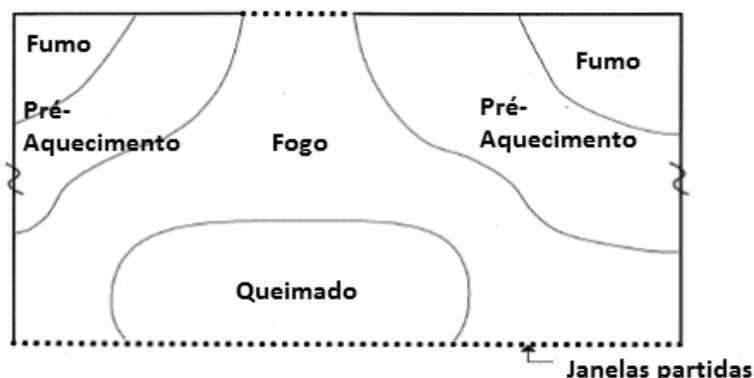


Figura 2.7 – Representação do fogo no LFM

Na primeira versão dos LFM, Clifton (1996), designou que o tamanho de cada área de dimensionamento deveria ser baseado na densidade de carga do combustível existente.

Este modelo necessitava de diversos pressupostos e devido à falta de informação nessa área Clifton (1996), assumiu que os LFM deveriam funcionar como uma ferramenta de pesquisa e utilizados apenas para verificar elementos singulares no dimensionamento. O seu comportamento apesar de se assemelhar ao real não podia ser diretamente comparado com resultados experimentais. Para proceder à análise de testes conduzidos em Cardington, Moss e Clifton (2002) utilizaram este método, que combinado com análises estruturais detalhadas apresentava resultados que aparentavam ser realistas, mas que não podiam ser diretamente comparados com os experimentais.

O segundo método foi desenvolvido na Universidade de Edinburgh, por Stern – Gottfried e Rein (2012). Estes autores referiram que o TFM calculava o fogo induzido, sendo compatível com a análise estrutural subsequente e tinha em consideração a relevância do fogo dinâmico para o edifício específico a estudar. Desta forma foi selecionado um modelo que providenciava uma evolução espacial e temporal da temperatura. O TFM calculava o fogo térmico induzido assumindo que existia uma carga de combustível através do caminho percorrido pelo fogo e que este queimava a uma emissão de calor constante por unidade de área do edifício. Este podia ser dividido em duas regiões: fogo próximo e fogo distante.

O fogo próximo, exemplificado na Figura 2.8, caracteriza-se como sendo a região que queima e onde os elementos estruturais são expostos diretamente às chamas e experienciam o calor mais intenso.

O fogo distante, exemplificado também na Figura 2.8a, é a região mais remota das chamas onde os elementos estruturais são expostos a fortes combustões de gases, no entanto experienciam calor menos intenso que o das chamas. A Figura 2.8b permite visualizar a forma como a temperatura se desenvolve ao longo do tempo, podendo deduzir as várias fases do fogo.

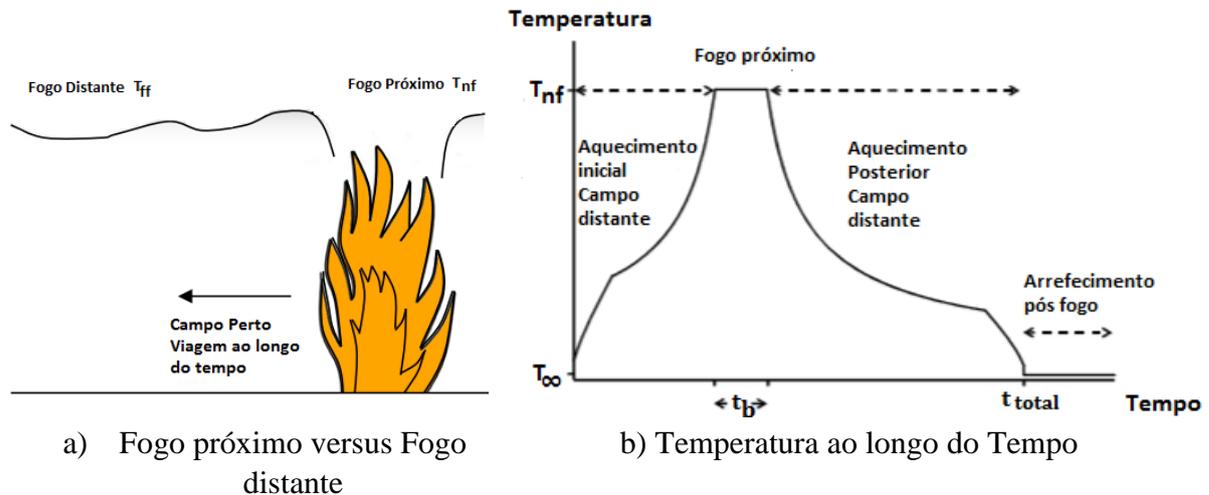


Figura 2.8 – Metodologia do *Travelling Fire* (adaptado Stern – Gottfried *et al.*, 2012 a)

### 2.3.3 *Travelling Fires Horizontais*

A primeira análise detalhada do comportamento estrutural dos *travelling fires* foi conduzida por Bailey *et al.* (1996), para estruturas de aço, tendo considerado vital o impacto estrutural de um incêndio mais realista do que o considerado pelos métodos convencionais. Desta forma, através do uso do modelo de elementos finitos, de pesquisa anterior que envolvia fogos uniformes, estudou-se a propagação do incêndio, com um foco maior sobre a fase fria do fogo na estrutura, o que permitiu considerar que o incêndio se movia progressivamente a partir de um ponto de ignição para as áreas adjacentes do edifício.

Rein *et al.* (2007) usaram modelos CFD para estudar fogos uniformes e *travelling fires* num edifício de vários andares. Stern – Gottfried *et al.* (2009) simplificaram e refinaram o método para um piso utilizando um jato de correlação (*ceiling jet correlation*) para gerar um campo de temperaturas distantes.

Jonsdottir *et al.* (2010) aplicaram este método para um edifício de betão para *travelling fires* incluindo um estudo detalhado sobre o mesmo. Stern – Gottfried e Rein (2011) desenvolveram esta metodologia estendendo a examinação da estrutura de betão através de transferência de calor e identificando os parâmetros críticos para aplicação do método ao dimensionamento.

Para além destes dois métodos apresentados, outros investigadores, tais como: Shestopal *et al.* (2010) e Sandström *et al.* (2011) aplicaram ideias semelhantes para relatar o uso dos *travelling fires*.

Shestopal *et al.* (2010) efetuaram a revisão de dois casos de estudo em que os *travelling fires* foram implantados através de modelos CFD. Os autores determinaram que o pior cenário resultava de uma propagação de incêndio, que era utilizada para justificar os níveis de resistência do incêndio requeridos nominalmente pelos códigos de construção.

Ellobody e Bailey (2011) conduziram um estudo sobre o impacto dos *travelling fires* horizontais num piso de betão pós-tensionado, em que concluíram que a consideração de cenários de aquecimento/arrefecimento entre zonas resultava em padrões de deformações cíclicos em algumas zonas. Este estudo permitiu também inferir que um atraso de tempo na consideração da curva temperatura – tempo teria um impacto sobre a resposta estrutural e que o pior caso poderia resultar a partir de um aquecimento uniforme ou através de um *travelling fire*, pelo que os autores recomendam a utilização de diferentes dimensões de *travelling fires* para assegurar o caso mais desfavorável.

Num trabalho de investigação Law e Gillie (engenheiros estruturais) em colaboração com Stern – Gottfried e Rein (engenheiros de incêndios) aplicaram o TFM a uma estrutura de betão, cujo objetivo da modelação estrutural foi estudar a temperatura, a tensão elástica, a tensão de cedência e as deformações. Estes autores concluíram através de um estudo de sensibilidade, que variações na definição do fogo próximo/distante no caminho que o fogo percorre tinha pouco impacto nos resultados (Law *et al.*, 2011).

Sandström *et al.* (2011) desenvolveram uma ferramenta de pré-processamento para aplicar os *travelling fires* como *input* num modelo CFD. O dimensionamento foi efetuado usando diferentes taxas de libertação de calor por unidade de área para definir os diversos cenários de fogo e foi utilizada uma temperatura média. No estudo não se clarificou como os *travelling fires* eram aplicados e não existiram descrições da natureza, velocidade ou características de queima dos incêndios.

Law *et al.* (2011) utilizaram os *travelling fires* para uma análise estrutural, sendo que utilizaram a correlação de Alpert (1972). Esta correlação permite descrever o fogo próximo ( $r/H \leq 0.18$ ) e o fogo distante ( $r/H > 0.18$ ) para estudar a temperatura em função da distância ao incêndio. No caso de estudo de Law *et al.* (2011) apenas se utilizou a temperatura distante, apresentando-se a correlação na Equação (2.17).

$$T_{max} - T_{\infty} = \frac{5,38 (\dot{Q}/r)^{2/3}}{H} \quad (2.17)$$

Em que:

$T_{max}$  – máxima temperatura de teto (K);

$T_{\infty}$  – temperatura ambiente (K);

$\dot{Q}$  – taxa de libertação de calor total (kW);

R – distância do centro do incêndio (m);

H – altura (m).

Este estudo permitiu aferir que especificar um campo de temperatura distante para um fogo linear progredindo em passos discretizados seria suficiente para capturar a variedade de respostas estruturais dado que na altura os resultados não necessitavam de ter um nível de precisão elevado.

Stern – Gottfried (2011) estudou o impacto de um *travelling fire* num edifício de betão, dimensionado de acordo com os Eurocódigos. Para definir o campo de temperaturas distantes vários métodos foram utilizados, entre eles: o campo distante individual (*single far field*), dois campos distantes (*two far fields*), o perfil de temperaturas repentinas de Alpert (*Alpert’s temperature profile - sudden*) e o perfil de temperaturas graduais de Alpert (*Alpert’s temperature profile - gradual*), pelo que se concluiu que as variações obtidas para cada eram negligenciáveis, o que permitiu definir o calor transferido de uma forma mais simplificada, aspeto importante na consideração do dimensionamento. Este estudo proporcionou comprovar que a forma e o caminho que o fogo percorre tinha pouca influência na resposta da estrutura, bem como que o assumir um campo de temperatura distante seria válido.

Na República Checa, testes de fogo foram efetuados num edifício (Horová *et al.*, 2013). O objetivo foi simular o compartimento de fogo sob condições de temperatura para clarificar o potencial impacto da temperatura heterogénea no compartimento estrutural, sendo posteriormente utilizadas medições para validação numérica.

Este estudo permitiu inferir que o incremento da temperatura verificado no final do compartimento se devia à quantidade de oxigénio presente nessa área e que se observavam padrões cíclicos de aquecimento/ arrefecimento que causavam mudanças físicas na deformação dos membros constituintes das estruturas.

Baseado na metodologia proposta por Stern – Gottfried, um cenário de criação de incêndios para grandes compartimentos foi proposto por Hopkin em 2013. Este método de dimensionamento considera o potencial das variações espaciais da propagação de um fogo desde um lado do compartimento até ao oposto. A proposta desenvolve-se tendo em consideração as limitações relativas à ventilação e considera explicitamente o impacto das variações de ocupação (escritório, armazenamento, entre outros) neste caso a carga de incêndio.

Uma suposição comum no dimensionamento estrutural é a que os *travelling fires* horizontais oferecem uma representação mais realista da propagação do incêndio através do compartimento. (Roben *et al.*, 2010).

#### **2.3.4 Travelling Fires Verticais**

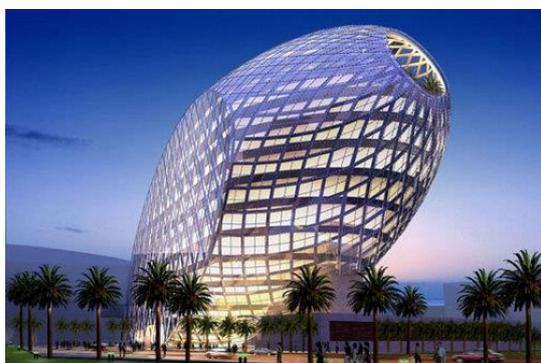
Os grandes incêndios tendem a envolver diversos pisos, pelo que surgiu a necessidade de estudar o comportamento dos *travelling fires* verticais. Assim, a curva de temperatura-tempo dos *travelling fires* horizontais foi aplicada também aos *travelling fires* verticais, considerando no entanto um pequeno atraso entre pisos, de forma a estudar a vertente vertical do fogo. (Roben *et al.*, 2010).

Os resultados examinados em termos de deslocamentos horizontais das colunas (pilares) e as forças axiais totais mostraram que os fogos verticais com um atraso induziam uma resposta estrutural de uniformidade no aquecimento. A principal diferença obtida foi a de um padrão cíclico induzido nas colunas, para os *travelling fires*. O padrão de deformação cíclica tinha um grande impacto na estrutura, como tal, devia ser considerado no dimensionamento. Os compartimentos limitavam a velocidade dos gases quentes, que pré-aqueciam os pisos superiores relativamente ao fogo envolvente fazendo com que surgissem deformações nos materiais. A curva térmica utilizada foi uma curva exponencial dada por Flint em 2005, que assume uma fase fria linear.

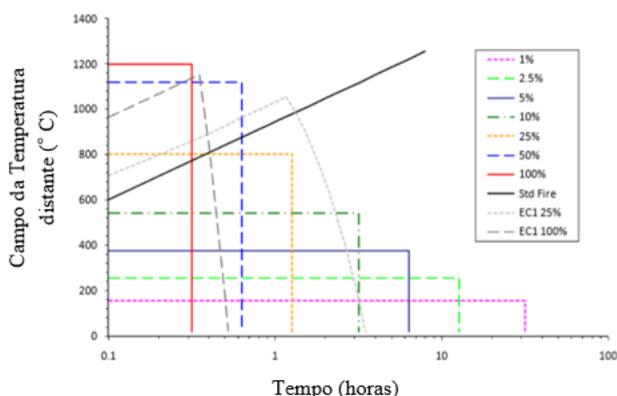
Ao contrário dos fogos horizontais, não existem abordagens que explorem a dinâmica envolvida dos *travelling fires* verticais, apesar dos numerosos incidentes que ocorrem neste tipo de fogos, o que dificulta a sua aplicação na análise estrutural. (Stern – Gottfried e Rein, 2011).

### 2.3.5 Aplicação dos *Travelling Fires*

A primeira aplicação dos *travelling fires* foi efetuada em dois edifícios reais. Stern – Gottfried *et al.* (2009) aplicaram o TFM ao projeto de construção no Mumbai, durante a sua fase de dimensionamento, tendo sido estudado o 9º andar. A primeira versão dos TFM foi aplicada para gerar a curva temperatura – tempo utilizando uma temperatura média. Esta curva foi comparada com o fogo *standard* e com dois casos paramétricos do Eurocódigo, como se pode visualizar na Figura 2.9b.



a) Mumbai C70



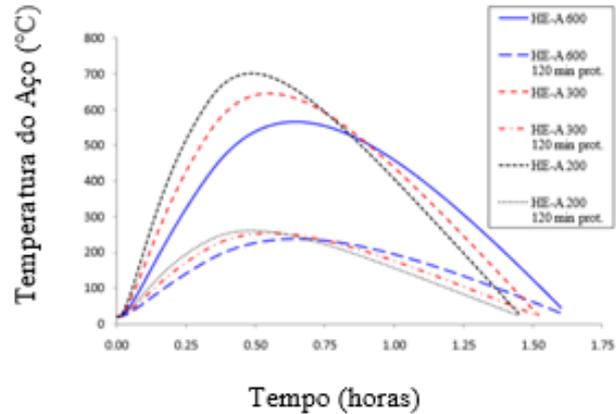
b) Curva temperatura- tempo utilizando uma temperatura média (comparação de métodos)

Figura 2.9 – Primeiras aplicações dos Travelling Fires (Stern – Gottfried *et al.*, 2012b)

Jonsdottir *et al.* (2010) calculou as temperaturas de aço resultantes obtidas pelo TFM no Fórum Informático da Universidade de Edimburgo, como se pode observar na Figura 2.10a, sendo que este edifício foi selecionado devido às suas características arquitetónicas únicas, isto é, um edifício de 7 andares com um átrio de vidro central e uma área de  $1700 m^2$ . O caso em estudo examinou o aquecimento estrutural de três diferentes vigas de aço baseado na curva temperatura – tempo dos fogos gerados pelos TFM, como demonstrado na Figura 2.10b.



a) Fórum Informático da Universidade de Edimburgo



b) Curva temperatura – tempo, aquecimento estrutural de vigas de aço

Figura 2.10 – Primeira aplicação *Travelling Fire* – Edinburgo (Stern – Gottfried *et al.*, 2012)

## 2.4 Simulação Numérica

### 2.4.1 *Computational Fluid Dynamics*

A ciência ao longo dos tempos sempre reuniu inúmeros esforços para tentar compreender o comportamento dos fluidos. No entanto, apenas no século XVIII existiu um progresso significativo relativamente à descrição matemática do movimento dos fluidos, devido ao trabalho efetuado por Bernoulli, Euler, Reynolds, Poisson e Lagrange. As equações de Euler descrevem a conservação do momento de um fluido viscoso e a conservação da massa (Smardz, 2006).

No século XIX, Claude Louis Marie Henry Navier e George Gabriel Stokes introduziram o conceito de transporte viscoso nas equações de Euler. Para resolver estas equações era necessário resolver as equações da quantidade de movimento, (2.18) da conservação da massa, (2.19) e da energia (2.20), que servem de base à dinâmica de fluidos computacional.

$$\frac{\delta(\rho u_i)}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x_j}(\rho u_j) = -\frac{\delta p}{\delta x_i} + \frac{\delta \tau_{ij}}{\delta x_j} - \frac{2}{3} \frac{\delta(\rho k)}{\delta x_i} + S_i \quad (2.18)$$

Em que:

$\tau_{ij}$  – tensor das tensões;

$k$  – energia cinética de turbulência;

$\rho$  – massa volúmica do fluido;

$S_i$  – fonte da quantidade de movimento devido às diferenças de temperatura no fluido.

$$\frac{\delta p}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (2.19)$$

$$\frac{\delta p h}{\delta t} - \frac{\delta p}{\delta t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{V} h) = \vec{\nabla}(\lambda \vec{\nabla} T) + S_E \quad (2.20)$$

Estas equações de fluxo de fluido são adequadas para fluidos direcionados e de baixa velocidade, pelo que permitem avaliar a distribuição da temperatura ao longo do tempo no compartimento inteiro.

Este conceito relativo às equações de Euler foi sendo desenvolvido ao longo do tempo, sendo que no início do século XX, as teorias de camadas limites e de turbulência em escoamento de fluidos tiveram um grande desenvolvimento imenso, contribuindo para modernizar os modelos CFD (Smardz, 2006).

As equações de *Navier-Stokes* eram de difícil resolução, pelo que diversas tentativas foram efetuadas para as resolver até ao início do século XX, no entanto não foram resolvidas até às décadas de 60 e 70, quando surgiram os primeiros computadores, que poderiam solucionar as equações para problemas de fluxos reais. Embora na teoria seja possível resolver as equações de forma analítica, na prática é difícil encontrar soluções analíticas para estas equações para a maioria dos problemas. Desta forma, efetuam-se aproximações das equações, recorrendo a diversos métodos, entre eles o dos elementos finitos, de volume finito e das diferenças finitas.

Os modelos CFD caracterizam-se por ser uma disciplina que se preocupa em resolver as equações de *Navier-Stokes* de forma numérica. As primeiras tentativas de aplicar esta modelação CFD relativamente à segurança contra incêndio foram realizadas no início da década de 1980.

O desenvolvimento destes modelos CFD para várias aplicações ao fogo começou no *National Bureau of Standards*, atualmente conhecido como *National Institute of Standards and Technology* (NIST), nos EUA, em 1998. A consolidação destes modelos levou ao aparecimento do FDS (*Fire Dynamics Simulator*) (McGrattan, 2016).

O trabalho realizado em 1988 por BRE (*Building Research Establishment*), na estação de metro *King’s Cross*, apresentada na Figura 2.11a e na Figura 2.11b, em Londres foi um dos primeiros exemplos de aplicação com sucesso.



a) Destroços na estação King’s Cross      b) King’s Cross após o incêndio

Figura 2.11 – Estação King’s Cross após o incêndio de 1987 (Daily Mail@, 2012)

Atualmente existem diversos estudos de modelação ao fogo, sendo que a maioria compara modelos CFD sofisticados com métodos analíticos ou dados experimentais. Os modelos CFD utilizados na engenharia de segurança aos incêndios podem ser divididos em dois tipos:

Códigos para propósitos gerais:

- CFX
- Fluent
- Phoenix

Códigos desenvolvidos para aplicações de engenharia de incêndio:

- FDS (LES / DNS)
- Jasmine (RANS)
- KOBRA -3D
- Smartfire (RANS)
- Sofie (RANS)

O primeiro tipo de código é mais versátil, dado que oferece mais variedade de submodelos para tratar a turbulência (RANS, LES, DNS), a combustão, a radiação térmica, entre outros. No entanto, para escrever sub-rotinas relacionadas com problemas específicos não é tão indicado como o segundo grupo, que oferece uma abordagem ideal para os problemas relacionados com aplicações de fogo (Smardz, 2006).

#### **2.4.2 Software FDS**

O FDS é um programa de simulação numérica que foi desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST). Na última década o FDS começou a ser mais utilizado devido a melhores condições computacionais e também à geometria dos edifícios modernos ser mais complexa. Para validar o *software* de cálculo inúmeros dados experimentais foram utilizados, cujo dados podem ser encontrados no guia de validação do FDS.

A simulação de escoamentos turbulentos é resolvida numericamente pelas equações de *Navier-Stokes*, apresentadas na seção anterior sendo que é demasiado morosa e implica e amplas escalas de comprimento.

O FDS pode permite efetuar dois tipos de simulação: a *Large-Eddy Simulation* (LES) ou a *Direct Numerical Simulation* (DNS). Os modelos FDS permitem compreender o fenómeno do fogo de uma forma pormenorizada, nomeadamente no que concerne ao transporte de calor e fumo resultante dos fogos, o que não ocorre em qualquer outro método analítico.

O modelo matemático LES, inicialmente proposto em 1963 por Joseph Smagorinsky, pretendia simular correntes de ar atmosférico. Este modelo assume que a combustão é controlada por uma mistura de gases compostos pela atmosfera envolvente e é utilizado em fluidos com escoamento lento, sendo que em termos de resolução da malha é menos exigente do que o DNS, dado que filtra informações de pequena escala a partir da solução numérica (Zhiyin, 2014).

A simulação numérica direta (DNS) é uma simulação em dinâmica de fluidos computacionais no qual as equações de *Navier-Stokes* são resolvidas numericamente sem qualquer modelo de turbulência.

Este modelo é utilizado em fluidos com escoamento rápido, e apresenta um tempo computacional bastante superior à simulação LES, dadas as informações de pequena escala serem incorporadas na análise (Orszag, 1970).

O FDS é um programa bastante valorizado pelos engenheiros de segurança ao incêndio dado que permite obter informação sobre: a migração do fumo, a concentração de produtos de combustão tóxicos e a visibilidade. Estes parâmetros são de extrema importância na conceção de rotas de fuga.

A robustez e precisão do FDS requer um processador *multi-core* que satisfaça a quantidade de RAM e um disco rígido grande que armazene suficiente quantidade de informação, nomeadamente os ficheiros *output*.

Na versão FDS (6.1.0), a interface Open MPI é ativada por defeito, o que permite que os computadores explorem múltiplos *cores*, o que não ocorre em versões anteriores. O domínio computacional ao ser dividido em múltiplas malhas permite usar o MPI (*Message – Passing Interface*) o que possibilita que um FDS *job* possa correr em múltiplos computadores (McGrattan, 2016).

Atualmente, um CPU rápido e uma RAM em quantidade necessária são características bastantes importantes quando se tem em consideração este tipo de programas. A velocidade do CPU delimita o tempo necessário para executar a análise, sendo que a quantidade de RAM fixa o número de células que podem ser realizadas na memória virtual. Além disso, os resultados FDS são muito dependentes da resolução da malha selecionada, dado que a definição da malha é um fator determinante para a qualidade dos resultados obtidos. As capacidades do FDS continuam a ser melhoradas de forma a tornar o *software* mais preciso.

O programa FDS simula a sua análise a partir de uma linha de comandos, que não tem interface gráfica, assim os parâmetros introduzidos são lidos através de um ficheiro de texto. Contudo existem programas que têm interfaces gráficas, que auxiliam o utilizador a visualizar os parâmetros que pretendem simular, como por exemplo o *Pyrosim*, o *ASPIRE Smoke Detection Simulation* (Xtralis), o *BlenderFDS* (Emanuele Gissi), o *CYPE- Building Services* (CYPE) ou o *Project Scorch* (Autodesk), como referido em Mielcarek (2016).

## 3 CASO DE ESTUDO

### 3.1 Definição do caso de estudo

#### 3.1.1 Geometria

O presente caso de estudo pretende, através das dimensões máximas admitidas no Anexo A do Eurocódigo 1 – Parte 2 para as curvas paramétricas, simular o desenvolvimento de um incêndio num compartimento de grandes dimensões, como por exemplo numa sala de um escritório *open-space*, definida por paredes de betão e pavimento revestido em madeira, dado que a madeira é dos elementos que se incendeia em primeiro lugar. Desta forma, admitindo um máximo de 500 m<sup>2</sup> de área em planta, sem aberturas no teto, as características do compartimento, podem ser visualizadas na Figura 3.1, sendo as dimensões dadas por:

- 25 m de comprimento, 20 m de largura e 4 m de altura;
- 4 aberturas, localizadas em cada uma das faces das paredes, cuja área de cada uma é dada por: 2,5 m × 3 m.

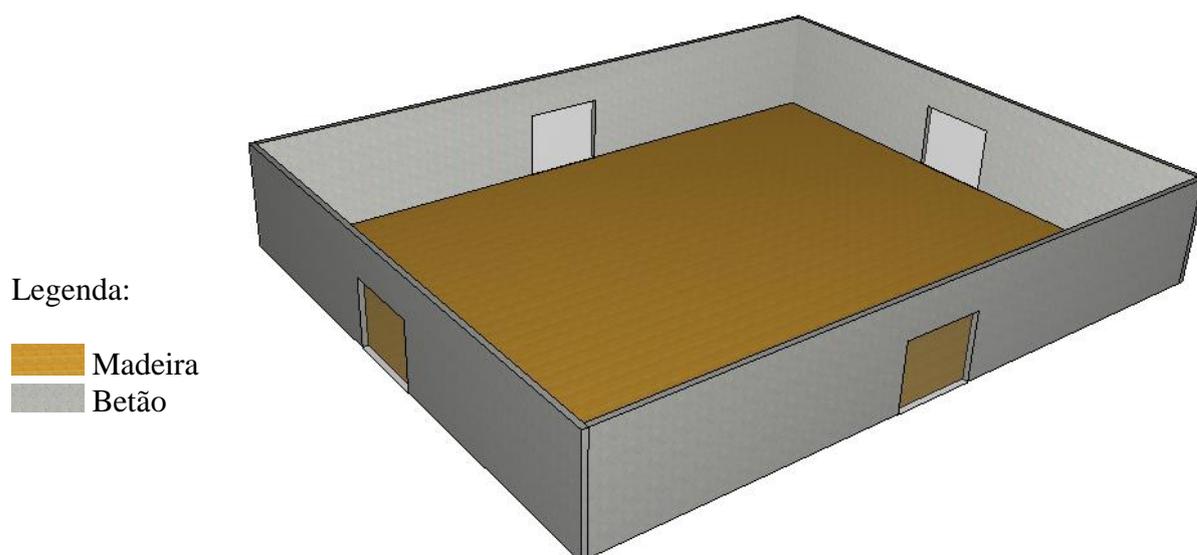


Figura 3.1 – Geometria do Compartimento

### 3.1.2 Propriedades do material

No Quadro 3.1 apresentam-se os materiais utilizados na envolvente no edifício e as suas propriedades inerentes.

Quadro 3.1 – Propriedades dos materiais utilizados na envolvente do edifício

	Densidade ( $kg/m^3$ )	Calor Específico ( $kJ/KgK$ )	Condutibilidade Térmica ( $W/mK$ )	Emissividade (–)
<b>Madeira</b>	400	1,3	0,2	0,9
<b>Betão</b>	2280	1,4	1,8	0,9

### 3.2 Avaliação Regulamentar Incêndio Generalizado

No caso de estudo do incêndio generalizado a queima é uniforme em todo o compartimento, isto é, a queima é de 100%. Para simular a curva temperatura – tempo segundo o Anexo A do Eurocódigo 1 – parte 2 procede-se a diversos cálculos, que se exemplificam de seguida.

A Equação (2.4) permite obter a temperatura dos gases no compartimento. Para determinar o tempo fictício em horas,  $t^*$ , dado pela Equação (2.5) é essencial calcular o coeficiente de expansão, Equação (2.6).

Para o cálculo do fator  $b$  (Equação (2.8)) é necessário ter em consideração que existem diferentes camadas de material, por conseguinte procede-se ao cálculo do fator  $b$  para a madeira (Equação (3.1)) e para o betão (Equação (3.2)).

$$b_1 = \sqrt{400 \times 1300 \times 0,2} = 322,49 \quad (3.1)$$

$$b_2 = \sqrt{2280 \times 1400 \times 1,28} = 2021,33 \quad (3.2)$$

O fator  $b$  da madeira,  $b_1$ , é inferior ao do betão,  $b_2$ , pelo que se dispõe segundo o Eurocódigo que  $b_1 = b$ .

O fator de aberturas ( $O$ ) é dado pela Equação (2.7) e os seus parâmetros de cálculo encontram-se no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Características geométricas do compartimento

<b>Características Geométricas</b>	
$A_v(m^2)$	30
$h_{eq}(m)$	2,5
$A_t(m^2)$	1360

Os valores substituídos do Quadro 3.2 encontram-se na Equação (3.3).

$$O = \frac{30 \times \sqrt{2,5}}{1360} = 0,0349 \quad (3.3)$$

Após estes cálculos o coeficiente de expansão,  $\Gamma$ , pode ser determinado pela Equação (3.4).

$$\Gamma = \left[ \frac{0,0349}{\frac{0,04}{\frac{322,49}{1160}}} \right]^2 = 9,85 \quad (3.4)$$

O instante de tempo em que ocorre a temperatura máxima dos gases determina-se através da Equação (2.10). Para determinar o valor de cálculo da densidade de carga de incêndio por unidade de área envolvente, descrito pela Equação (2.12) substitui-se os seus parâmetros na Equação (3.5). O valor de cálculo da densidade de carga de incêndio é obtido com base no Anexo E do Eurocódigo 1 – parte 2, onde o quadro E.4 exemplifica as diferentes densidades de carga de incêndio  $q_{f,k}[MJ/m^2]$ , para os vários tipos de ocupação. No estudo efetuado foi considerado que o compartimento é do tipo escritório, sendo que  $q_{f,k} = 420 MJ/m^2$ . Admite-se que:  $q_{f,k} = q_{f,d}$ .

$$q_{t,d} = \frac{420 \times 500}{1360} = 154,41 MJ/m^2 \quad (3.5)$$

O compartimento é controlado por ventilação, desta forma o  $t_{max}$  dado pela Equação (2.11) é dado pela Equação (3.6)

$$t_{max} = 0,2 \times 10^{-3} \times \frac{154,41}{0,0349} = 0,8849 \quad (3.6)$$

O tempo fictício máximo,  $t^*_{\max}$ , é dado pela Equação (2.10), e o seu valor encontra-se na Equação (3.7).

$$t^*_{\max} = 0,8849 \times 9,85 = 8,81 \quad (3.7)$$

Na Equação (2.4) substituindo o valor de  $t^*_{\max}$  obtém-se uma temperatura máxima igual a 1250,7 °C. Após se atingir o pico máximo, a fase de arrefecimento inicia-se e as curvas que simulam o seu comportamento são descritas pelas Equações (2.13), (2.14) e (2.15) consoante o valor de  $t^*_{\max}$ . O valor de  $t^*_{\max}$ , dado pela Equação (3.7) permite concluir que se seleciona a Equação (2.15).

Na Figura 3.2, apresenta-se a curva temperatura – tempo obtida através do Eurocódigo 1- parte 2, onde se identificam as várias fases do incêndio.

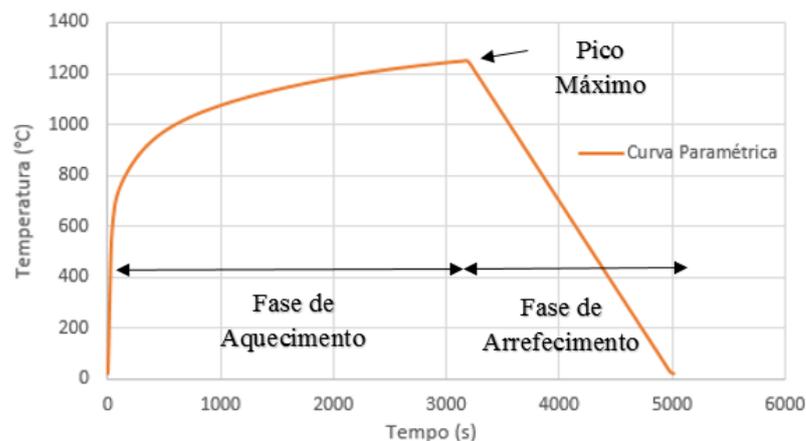


Figura 3.2 – Curva paramétrica segundo o EN1991-2- Anexo A

Pela Figura 3.2 observa-se que após 3 minutos a temperatura atinge cerca de 73% da temperatura máxima, sendo que a fase de crescimento do incêndio ocorre até aos 53,5 minutos, momento onde ocorre o pico máximo. Após o pico a curva apresenta um decréscimo linear até atingir a temperatura ambiente, após 30 minutos.

## 4 MODELAÇÃO NUMÉRICA

### 4.1 Introdução

Nos últimos anos, o desenvolvimento tecnológico e consequente aumento de capacidade dos sistemas informáticos levou à criação de ferramentas de análise poderosas, que permitem através de modelos avançados de fogo simular o calor e a massa transferida no compartimento em estudo, de forma a obter a temperatura de um modo mais preciso.

Para a realização desta dissertação recorreu-se ao programa *Pyrosim* (Thunderhead Engineering), que tendo por base um modelo computacional de dinâmica de fluidos, FDS (*Fire Dynamics Simulation*), oferece uma interface gráfica ao utilizador, o que permite uma melhor interação. No presente caso optou-se por um modelo relativamente simples, dado que quanto maior e mais complexa for a geometria do modelo adotado, maior tempo de cálculo o programa exigirá. Assim, apresenta-se o caso de um *open-space* com uma grande área e com 4 aberturas.

O programa FDS permite efetuar dois tipos de simulação, já descritos na seção 2.4.2 sendo que se optou por realizar uma simulação LES, dado o fluido em questão ser um fluido lento.

Na seção seguinte serão descritos os dois casos estudados e as condições que são válidas para ambos. O primeiro caso de estudo representa um incêndio generalizado, como tal ocupa 100% da área do pavimento e considera-se a sua queima uniforme, uma vez que se pretende comparar a curva paramétrica obtida pelo Anexo A do Eurocódigo 1 – parte 2 com a curva obtida através do modelo numérico. O segundo caso representa um *travelling fire*, que inicia a sua queima no lado Oeste do compartimento e viaja ao longo do mesmo. Posteriormente efetua-se a comparação dos resultados de ambos os modelos numéricos.

### 4.2 Modelo Numérico

#### 4.2.1 Características do material da envolvente

No capítulo anterior definiram-se as características dos materiais para a curva paramétrica utilizada; no entanto aquando da sua inserção no modelo numérico é necessário ter em consideração, no caso da madeira, a reação pirólise. Esta é uma reação química de decomposição ou análise na qual o calor do fogo decompõe uma substância, originando um ou mais produtos. Para tal é necessário determinar um valor de calor de combustão, que no caso da madeira é de  $1,7 \text{ E}^4 \text{ KJ/Kg}$ .

#### 4.2.2 Características do combustível

O combustível utilizado que provocará a reação com o material selecionado é “WOOD – OAK”, que faz parte da biblioteca do *software* utilizado, tendo as suas propriedades características descritas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Propriedades do combustível utilizado

Composição – “WOOD-OAK”	
<b>Carbono</b>	1
<b>Hidrogénio</b>	1.7
<b>Oxigénio</b>	0.72
<b>Nitrogénio</b>	0.001

A energia libertada por unidade de massa de oxigénio é de  $1,31 \text{ E}^5 \text{ KJ/Kg}$ , sendo os coeficientes desta energia, que figuram na biblioteca do *software*, descritos no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Propriedades da energia libertada

<b>Produção CO</b>	0.004
<b>Produção fuligem</b>	0.015
<b>Fração de Hidrogénio</b>	0.1

#### 4.2.3 Discretização da malha numérica

As dimensões utilizadas para o modelo foram superiores às do compartimento, dado que como as faces laterais do mesmo têm condições de fronteira abertas torna-se necessário criar uma envolvente, assim as dimensões admitidas foram:  $27 \text{ m} \times 22\text{m} \times 5\text{m}$ .

A malha de elementos finitos deve ser suficientemente refinada para que os resultados obtidos sejam precisos e fiáveis, mas ao mesmo tempo o número de elementos deverá permitir uma análise em tempo útil. Para conseguir uma precisão de simulação ótima deve ter-se em consideração que as dimensões das células da malha devem ser próximas nas três dimensões (x,y,z). O FDS utiliza um solucionador de *Poisson* baseado em *Fourier* (FTT), que induz a que as divisões da malha sigam a forma  $2^u, 3^v, 5^w$ , onde u, v e w são números inteiros. A utilização de um número primo pode causar resultados indesejáveis, nomeadamente instabilidades numéricas.

A definição da malha é um dos fatores que mais influencia os resultados numéricos. A dimensão da célula ( $d_x$ ) para uma dada simulação relaciona-se com o diâmetro característico do incêndio ( $D^*$ ), isto é, quanto menor o diâmetro do fogo, menor deverá ser a dimensão das células para resolver adequadamente a dinâmica de fluxos inerente. O diâmetro do fogo característico é dado pela Equação (4.1) que se apresenta na seção 6.3.3 do manual do *software* (McGrattan, 2015).

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (4.1)$$

Em que:

$\dot{Q}$  – taxa de libertação de calor (HRR) = 125 000 kW;

$\rho$  – densidade do ar = 1,2 kg/m<sup>3</sup>;

$c$  – calor específico = 1 kJ/kg-k;

$T$  – temperatura = 293 K;

$g$  – aceleração da gravidade – 9,8 m/s<sup>2</sup>

O diâmetro característico do incêndio é de 6,6 metros, pelo que a dimensão da malha terá que ser inferior a este valor. A relação  $D^*/dx$  deve situar-se no intervalo entre 4 e 16, de forma a resolver com precisão incêndios em diversos cenários. Este intervalo não indica que os valores têm de ser obrigatoriamente utilizados, apenas serve como orientação, dado que funcionaram bem para um conjunto de modelos testados. Para o caso de estudo a malha deveria situar-se entre 1,65 m e 0,41 m.

#### 4.2.4 Condições de contorno externas

As obstruções, no modelo designadas “OBSTRUCTIONS”, são uma barreira sólida retangular à passagem do fluido considerado, pelo que se considera as paredes, o piso térreo e o de cobertura. A cada obstrução é atribuída uma superfície.

As propriedades dos objetos sólidos e aberturas no modelo FDS são descritas através de uma superfície, designada por “SURFACE”. A “SURFACE” pode utilizar materiais definidos previamente ou camadas de materiais. O programa por defeito assume que os objetos sólidos são inertes e que a sua temperatura inicial é a temperatura ambiente. A “SURFACE” também permite a condução de calor em forma de sólido, o que permite definir um queimador, especificar a temperatura de ignição para um objeto, permite a um respiradouro aferir uma velocidade de alimentação, entre outros.

No presente caso, a superfície das paredes, do piso térreo e do piso da cobertura será designada por “LAYERED” dado as superfícies serem compostas por betão e madeira, materiais utilizados correntemente. Estas superfícies também podem ser utilizadas para injetar espécies adicionais (nitrogénio, oxigénio, dióxido de carbono, entre outros), para a simulação, no entanto esta vertente não foi explorada.

Para criar aberturas utiliza-se a ferramenta “VENT”, que descreve objetos planos em 2D. A abertura pode ser utilizada para modelar componentes do sistema de ventilação de um edifício, funcionando como um difusor ou um retorno, assumindo que o ar é empurrado para fora ou sugado no interior da parede. Para aplicar uma condição de contorno particular a uma superfície sólida, como por exemplo um incêndio, também se pode recorrer a esta ferramenta. No modelo utiliza-se a ferramenta “VENT” em duas situações: uma para definir a superfície de incêndio e outra para limitar a fronteira do modelo.

Para definir o incêndio utiliza-se um “BURNER”, que é um tipo de superfície que através da taxa de libertação de calor ou da taxa de perda de combustível permite a representação do incêndio.

Em todos os limites externos do domínio arbitrado, excetuando o piso térreo, a condição “OPEN” foi selecionada, desta forma a malha de regime de controlo está aberta interagindo com o exterior o que permite o fornecimento de oxigénio à simulação.

## 4.2.5 Modelo Generalizado

### 4.2.5.1 Geometria do modelo

No caso de estudo do modelo generalizado a queima é uniforme em todo o compartimento, isto é, a queima é de 100%. Para modelar esta superfície utiliza-se um “VENT” com as dimensões da área do compartimento, para simular a curva temperatura – tempo segundo o Anexo A do Eurocódigo 1 – Parte 2. Na Figura 4.1, apresenta-se o modelo numérico obtido através do programa do *Pyrosim*, cujas características acima mencionadas podem ser visualizadas:

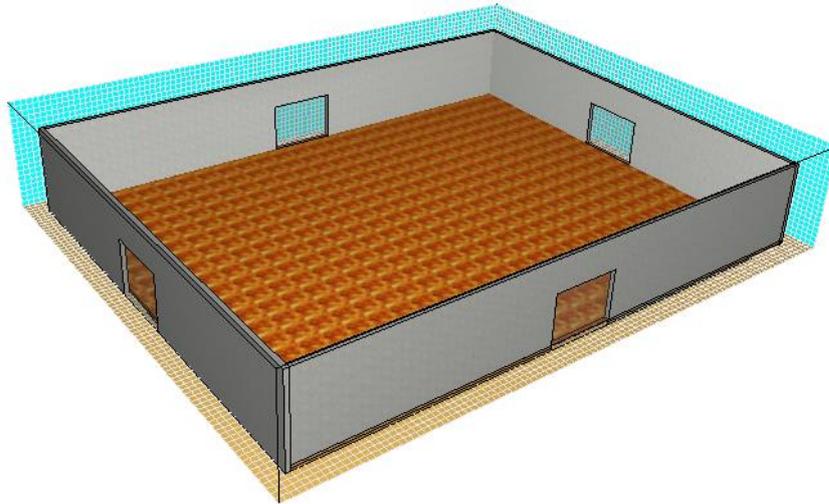


Figura 4.1 – Geometria do modelo numérico – incêndio generalizado (Caso 1)

### 4.2.5.2 Descrição do incêndio

A taxa de libertação de calor do fogo, não é a prevista pelo FDS, pelo que se pretendeu simular uma curva HRR (*Heat Release Rate*), de forma a modelar o comportamento do incêndio, em função da curva paramétrica

A taxa de libertação de calor não ocorre imediatamente, isto é, a sua libertação é gradual, pelo que se introduziu frações do seu valor total ao longo do tempo para simular a curva, tal é exemplificado na Figura 4.2. Este é um processo iterativo bastante moroso, dado que não existe nenhuma correlação direta entre a temperatura atingida no compartimento e a taxa de libertação de calor.

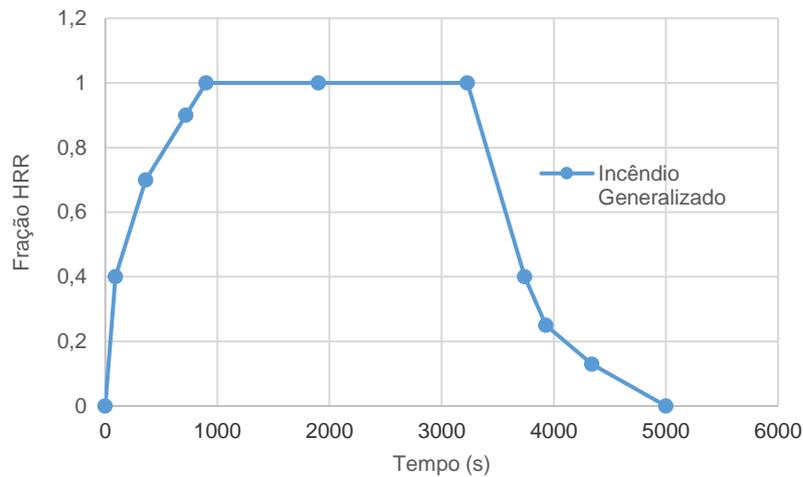


Figura 4.2 – Fração HRR- Tempo

Para definir o incêndio, o programa necessita estabelecer uma taxa de libertação de calor por unidade de área, que no presente caso será –  $HRR_{PUA} = 250 \text{ kN/m}^2$ , que é o valor que deve ser utilizado segundo o Anexo E do Eurocódigo 1 – Parte 2, para um compartimento do tipo escritório. Portanto a taxa de libertação de calor máxima (HRR) será cerca de 125 MW.

Para permitir obter os valores da temperatura, o programa faz uso de “DEVICES”, que são dispositivos que gravam entidades do modelo ou representam sensores mais complexos como detecção de fumo, termopares, entre outros. No modelo são colocados 8 termopares ao longo da altura do compartimento, a meio do mesmo, como se visualiza na Figura 4.3.

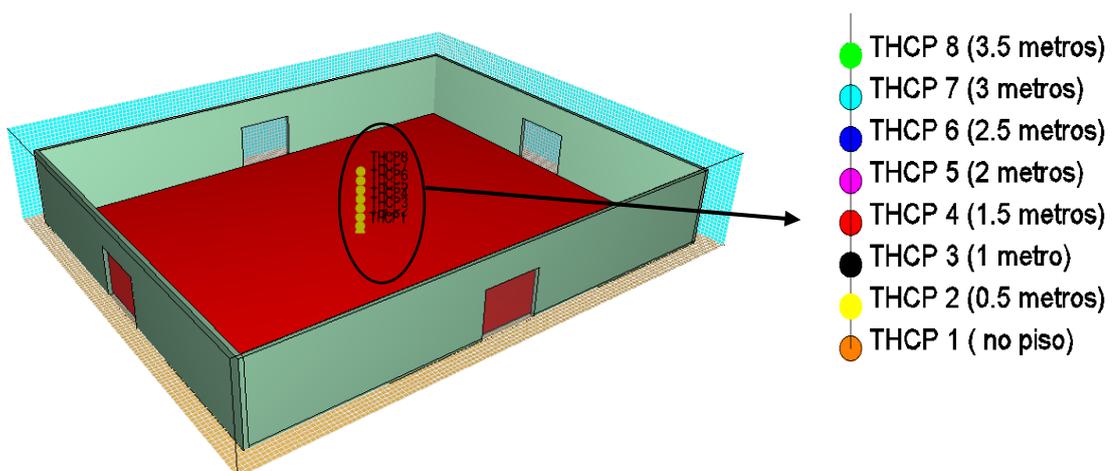


Figura 4.3 – Localização dos termopares no compartimento

## 4.2.6 Características específicas da modelação do *Travelling Fire*

### 4.2.6.1 Geometria do modelo

No caso de estudo 2 (*travelling fire*) pretende-se estudar um incêndio com uma área de queima de 20%, o que equivale a faixa com 20 metros de comprimento e 5 metros de largura, como se visualiza na Figura 4.4.

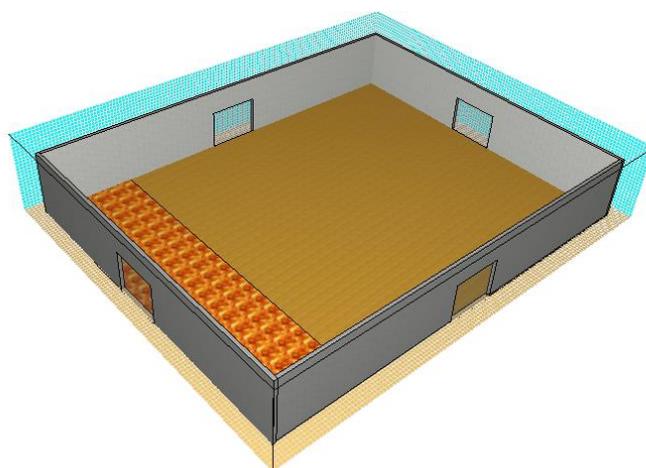


Figura 4.4 – Incêndio com área de queima de 20% – *travelling fire* (Caso 2)

O programa não permite que a superfície de incêndio apresentada na Figura 4.4 se desloque ao longo do compartimento, sendo que para tal se recorre a várias superfícies de incêndio, de forma a simular a continuidade do incêndio (Figura 4.5).

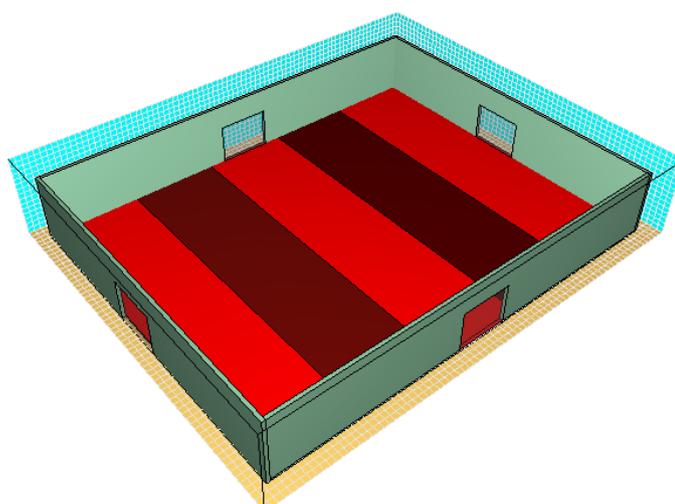


Figura 4.5 – Geometria do modelo numérico – *travelling fire* (Caso 2)

#### 4.2.6.2 Descrição do *Travelling Fire*

Um *travelling fire* caracteriza-se pelas suas áreas de superfície ou pela sua velocidade de propagação, uma vez que estas estão relacionados com a carga de incêndio e a velocidade de queima. Na metodologia do *travelling fire* assume-se que o combustível é uniformemente distribuído ao longo do compartimento com uma densidade de carga de combustível  $q_f$  ( $MJ/m^2$ ). O incêndio queima com uma área  $A_f$  ( $m$ ) e uma taxa de libertação de calor por unidade de área  $Q''$  ( $kW/m^2$ ), que corresponde a um poder  $\dot{Q}$  ( $kW$ ) para determinadas dimensões de incêndio.

Cada área tem um tempo de queima,  $t_b$ , dado pelo quociente entre a densidade de carga do combustível  $q_f$  ( $MJ/m^2$ ) e a taxa de libertação de calor por unidade de área, HRRPUA ( $kW/m^2$ ), consoante se visualiza na Equação (4.2):

$$t_b = \frac{q_f}{Q''} \quad (4.2)$$

O tempo  $t_b$  é o tempo característico do fogo próximo e é determinado pela densidade de carga do combustível e pelas propriedades do material, sendo independente da dimensão dos fogos considerados. Assumindo que o incêndio tem um comprimento  $L_f$  ( $m$ ) ao longo da sua direção de propagação, a taxa de propagação –  $s$  ( $m/s$ ) é constante e descrita pela Equação (4.3):

$$s = \frac{L_f}{t_b} \quad (4.3)$$

O incêndio viaja através de um caminho linear movimentando-se de Oeste para Este do compartimento e tem um comprimento que ocupa toda a largura do compartimento ( $w$ ). O comprimento inicial do incêndio é  $L_0 = 0.1m$  e mantém um comprimento constante  $L_f$  quando o incêndio atinge as dimensões consideradas. Este comprimento  $L_f$  é dado pela Equação (4.4):

$$L_f = \frac{A_f}{W} \quad (4.4)$$

Para este *travelling fire* linear, o tempo total de queima é calculado através da Equação (4.5):

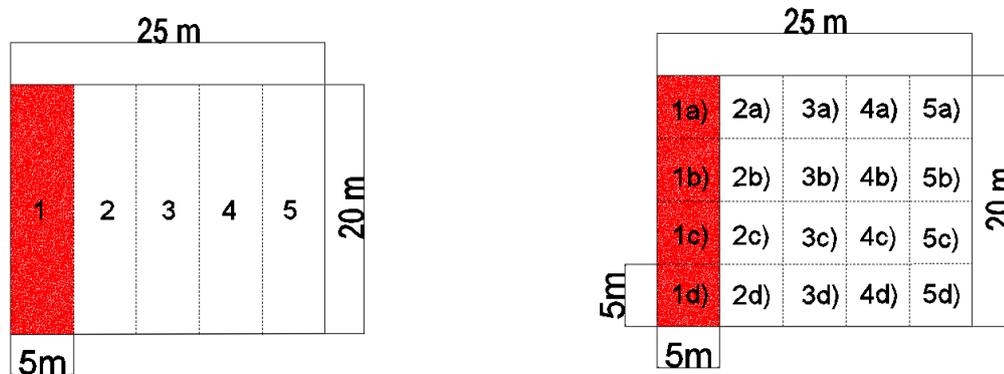
$$t_{total} = t_b \left( \frac{L - L_0}{L_f} + 1 \right) \quad (4.5)$$

No Quadro 4.3 apresentam-se os valores que permitem caracterizar o *travelling fire*:

Quadro 4.3 – Taxa de propagação do incêndio – parâmetros

$q_f$ (MJ/m <sup>2</sup> )	420
HRRPUA (kW/m <sup>2</sup> )	250
$t_b$ (s)	1680
$A_f$ (m <sup>2</sup> )	100
W (m)	20
L (m)	25
$L_f$ (m)	5
s (m/s)	0,00298
$t_{total}$ (s)	10046
$t_{total}$ (min)	167,44

A taxa de propagação (s) descrita no Quadro 4.3 corresponde a uma faixa de dimensões 5 m × 5 m. No modelo corresponde a um quarto da zona considerada, pelo que se apresenta na Figura 4.6 as considerações efetuadas. Cada zona considerada, engloba 4 faixas mais pequenas (de a) a d)).



a) Zona (1 a 5)

b) Respetivas Faixas

Figura 4.6 – Divisão do compartimento

No caso do incêndio generalizado recorreu-se a uma fração HRR – tempo para definir a curva paramétrica que se pretende calibrar, segundo o Eurocódigo 1- parte 2. No caso dos *travelling fires* não existem ainda estudos devidamente fundamentados que nos permitam obter com total rigor e clareza a fração introduzida. Desta forma, de modo a combater esta falta de informação opta-se por utilizar a mesma fração que no incêndio generalizado, devidamente adaptada aos tempos correspondentes para o caso em questão, conforme se pode visualizar na Figura 4.7.

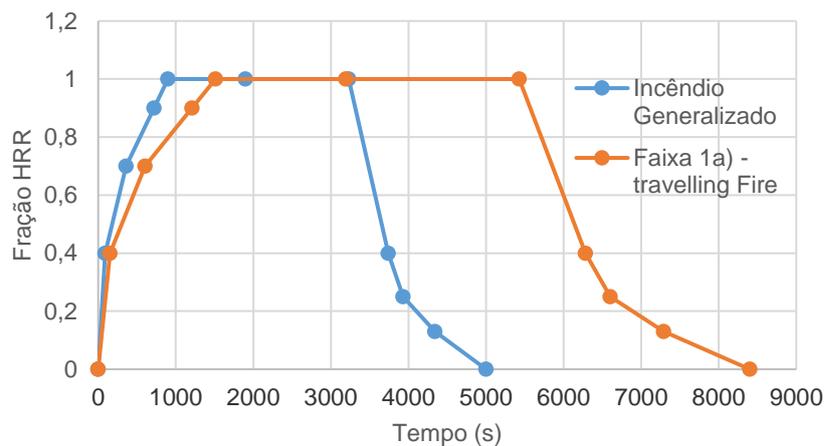


Figura 4.7 – Fração HRR–Tempo (adaptação da curva)

O compartimento é dividido em 5 zonas, cada uma com uma largura de 5 metros, o que nos permite aferir que as diversas curvas simuladas ao longo do compartimento são iguais, dado possuírem as mesmas características, apenas diferem no facto de terem uma translação horizontal no eixo das abcissas correspondente ao fator tempo, consoante de visualiza na Figura 4.8.

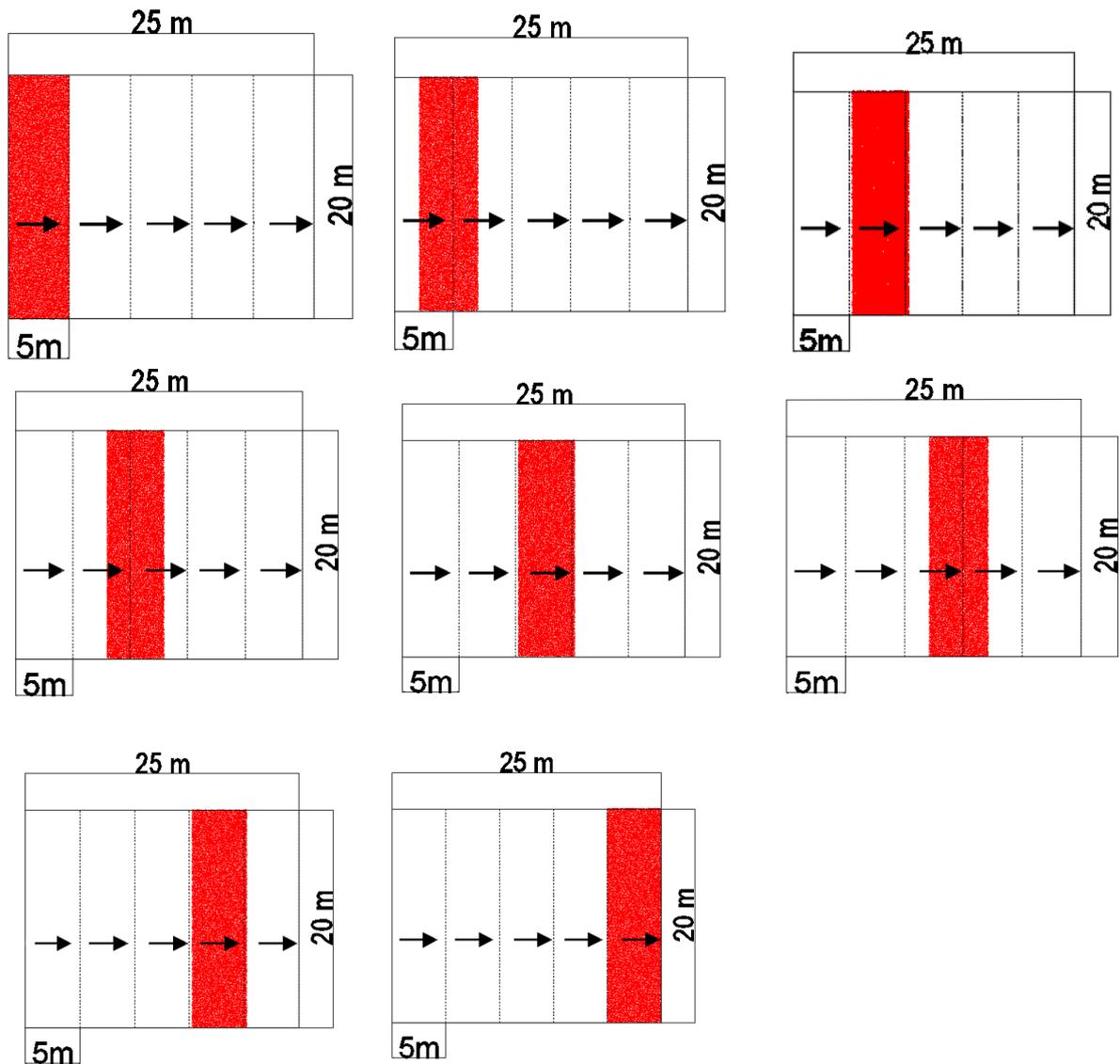
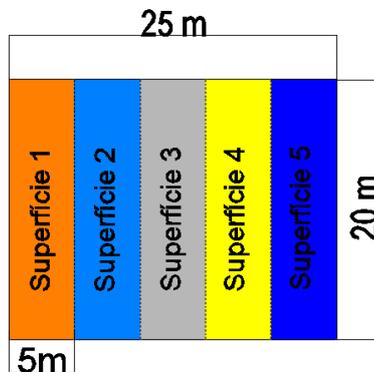


Figura 4.8 – Movimento do incêndio ao longo do compartimento

O incêndio no compartimento é simulado através de diversas superfícies de incêndio, apresentadas na Figura 4.8 a, que são sucessivamente ativadas e desativadas à medida que a queima ocorre. Para poder simular este comportamento são utilizados “CONTROLS”, que permitem articular os “VENTS” e ajustar os tempos (Figura 4.9 b).



Controladores	Ativar (s)	Desativar (s)
Superfície 1	0	8400
Superfície 2	1680	10080
Superfície 3	3360	11760
Superfície 4	5040	13400
Superfície 5	6720	15120

a) Superfícies de incêndio consideradas

b) Controladores – ativar/desativar superfícies

Figura 4.9 – Simulação do incêndio

O desfasamento relativamente ao tempo, descrito pelos controladores na Figura 4.9 b, no trabalho elaborado foi efetuado tendo por base o ponto de ignição de madeira que se inicia quando a temperatura atinge valores entre os 250°C e os 300°C. De forma a cumprir o tempo de queima de cada zona considerou-se a temperatura a rondar os 300° C. A Figura 4.10 explicita este comportamento através da fração HRR – Tempo.

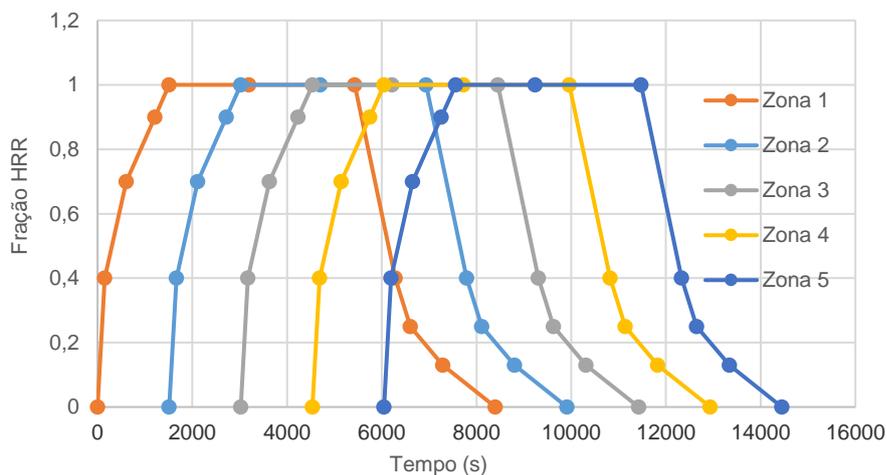


Figura 4.10 – Fração HRR – Tempo (nas diversas zonas que constituem o compartimento)

Neste caso também serão utilizados ”DEVICES” em diversos pontos do compartimento, ao longo da sua altura, de forma a obter os vários valores da temperatura que o compartimento atinge ao longo do seu comprimento. Consequentemente cada zona terá no centro da superfície de incêndio 8 termopares, consoante se pode visualizar no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Localização dos termopares no compartimento

Altura (m)	Superfície 1	Superfície 2	Superfície 3	Superfície 4	Superfície 5
3.5	● THCP 8	● THCP 16	● THCP 24	● THCP 32	● THCP 40
3	● THCP 7	● THCP 15	● THCP 23	● THCP 31	● THCP 39
2.5	● THCP 6	● THCP 14	● THCP 22	● THCP 30	● THCP 38
2	● THCP 5	● THCP 13	● THCP 21	● THCP 29	● THCP 37
1.5	● THCP 4	● THCP 12	● THCP 20	● THCP 28	● THCP 36
1	● THCP 3	● THCP 11	● THCP 19	● THCP 27	● THCP 35
0,5	● THCP 2	● THCP 10	● THCP 18	● THCP 26	● THCP 34
Piso (0.12)	● THCP 1	● THCP 9	● THCP 17	● THCP 25	● THCP 33

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Incêndio Generalizado

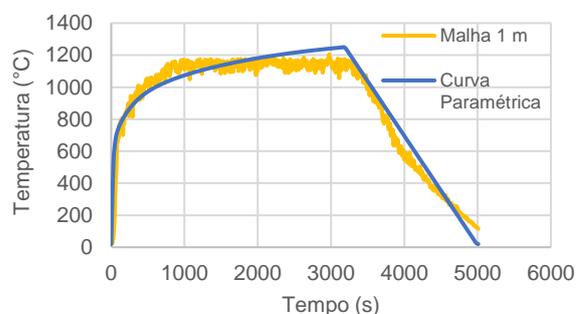
#### 5.1.1 Refinamento da malha

Um dos fatores que mais influencia os resultados obtidos é a escolha da malha, pelo que é necessário alguma sensibilidade para a sua escolha. No presente caso, para a aferição deste parâmetro, foram selecionados 4 tamanhos: 1 m, 0,5 m, 0,38 m e 0,33 m. No Quadro 5.1 apresentam-se as propriedades inerentes ao refinamento da malha, nomeadamente o número de células e o correspondente tempo de computação, para um computador com 24 GB de memória RAM.

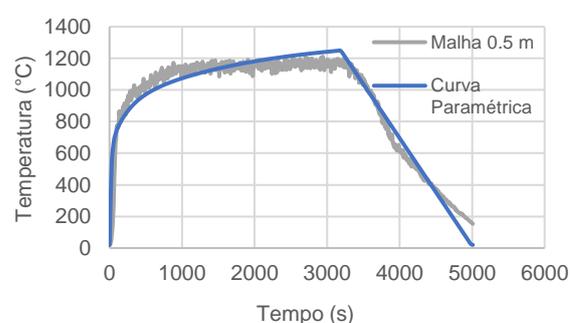
Quadro 5.1 – Propriedades inerentes ao refinamento da malha

Discretização (m)	Número de Células X	Número de Células Y	Número de Células Z	Número de células Total	Tempo de computação (horas)
1,0	22	27	5	2970	1
0,5	44	54	10	23 760	10
0,38	57	70	13	51 870	18
0,33	64	81	15	77 760	40

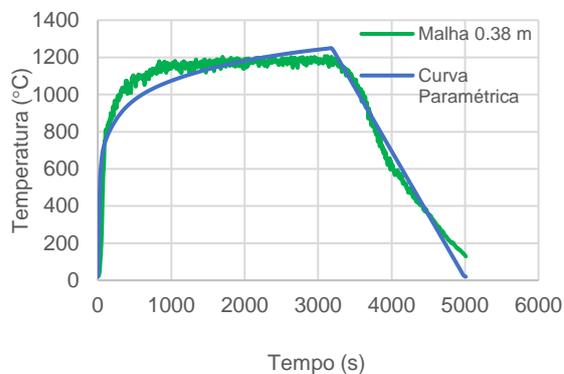
Como se pode inferir, através do Quadro 5.1 uma maior discretização da malha leva a tempos computacionais bastante superiores. Na Figura 5.1 apresentam-se os resultados obtidos para as discretizações efetuadas, a partir da média das curvas ao longo da altura do compartimento, comparando-as com a curva paramétrica calibrada através do Eurocódigo.



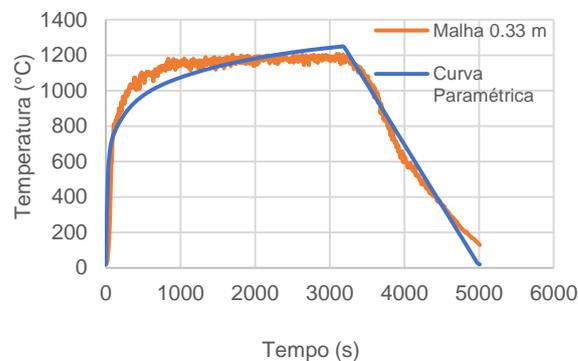
a) Discretização da malha: 1 m



b) Discretização da malha: 0.5 m



c) Discretização da malha: 0.38 m



d) Discretização da malha: 0.33 m

Figura 5.1 – Discretização da malha

No Capítulo 4, na subsecção 4.2.3 procedeu-se à discretização da malha, sendo 0.4 metros uma discretização com malha fina. No refinamento da malha procurou-se simular valores abaixo e acima deste valor conforme se apresenta na Figura 5.1a e Figura 5.1b é visível uma maior disparidade de resultados FDS relativamente à curva paramétrica e a discretização destes gráficos não corresponde a uma discretização com uma malha fina, conforme se pretende.

Na Figura 5.1c e Figura 5.1d é notória uma maior aproximação entre os resultados obtidos, pelo que qualquer uma destas curvas poderia ser utilizada para descrever os resultados. Através de uma análise custo-benefício, teve-se em consideração vários fatores, nomeadamente o tempo de simulação, os resultados obtidos e o tempo disponível para realizar o trabalho e o descrito no 4.2.3. Concluiu-se desta forma que a discretização de 0.33 m (Figura 5.1d) é aquela que conduz a resultados mais homogêneos pelo que se optou por utilizar esta discretização.

### 5.1.2 Termopares

No modelo numérico introduziram-se termopares no meio do compartimento nas coordenadas ( $x= 13,5$  m;  $y= 11$  m;  $z =$  variável), admitindo uma variação ao longo da altura, sendo que os valores obtidos em cada termopar encontram-se descritos na Figura 5.2 e no Quadro 5.2.

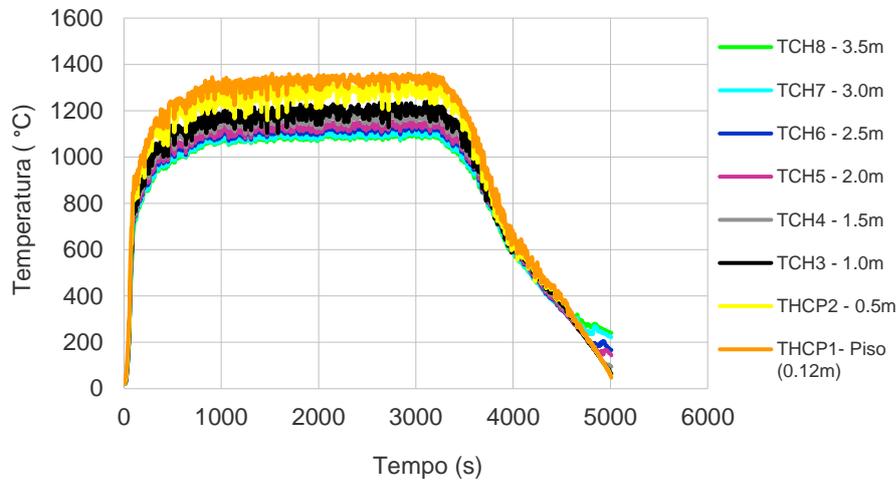


Figura 5.2 – Comparação da temperatura no compartimento ao longo da altura no centro do compartimento

Quadro 5.2 – Temperatura máxima obtida nos termopares

	● THCP 8	● THCP 7	● THCP 6	● THCP 5	● THCP 4	● THCP 3	● THCP 2	● THCP 1
<b>Temp °C (Máx)</b>	1109,12	1120,05	1147,14	1164,24	1210,46	1241,96	1325,20	1362,27

A Figura 5.2 permite concluir que a temperatura diminui ao longo da altura do compartimento, como é de esperar dado que os termopares junto ao piso térreo são mais afetados pela fonte de radiação. O fluxo de calor causa a mudança de temperatura num incêndio, o que é visível nos termopares que se encontram a uma altura mais elevada, que sofrem fenómenos de convecção. Do Quadro 5.2 pode-se visualizar que a temperatura máxima atingida é de 1362,27°C no termopar 1 e que a temperatura máxima atingida no termopar 8 é de 1109,12°C, o que perfaz uma diferença de 253,15°C.

Através da visualização da Figura 5.1d pode-se inferir que a calibração da curva paramétrica através da soma da média das curvas obtidas na Figura 5.2 está bastante aproximada, dado se tratar de um modelo numérico e o seu desenvolvimento demonstrar as várias fases do comportamento do incêndio: fase de aquecimento, pico e fase de arrefecimento.

### 5.1.3 Movimentação de Gases

Neste item são apresentados a evolução no tempo de alguns parâmetros, nomeadamente a taxa de libertação de calor por unidade de área, a temperatura e a velocidade de propagação do incêndio.

Para a representação da temperatura e da velocidade no compartimento são considerados diferentes planos YOZ em diferentes abcissas, que permitem ver a evolução destes parâmetros. No Quadro 5.3 apresenta-se então os parâmetros e os planos referidos.

Quadro 5.3 – Definição das quantidades a medir

Plano XYZ	Plano – Cota (m)	Quantidade a medir	Vetor
X	5,5	Temperatura	Não
	11		
	16,5		
X	-	Velocidade	Sim
	11		
	-		

#### 5.1.3.1 Taxa de libertação de calor por unidade de área

Através do *Smokeview* é possível obter a movimentação de gases no compartimento, nomeadamente a taxa de libertação de calor por unidade de área, a temperatura e a velocidade. Na Figura 5.3 representa-se a taxa de libertação de calor por unidade de área (HRRPUA) ao longo do tempo, podendo visualizar a sua libertação gradual.

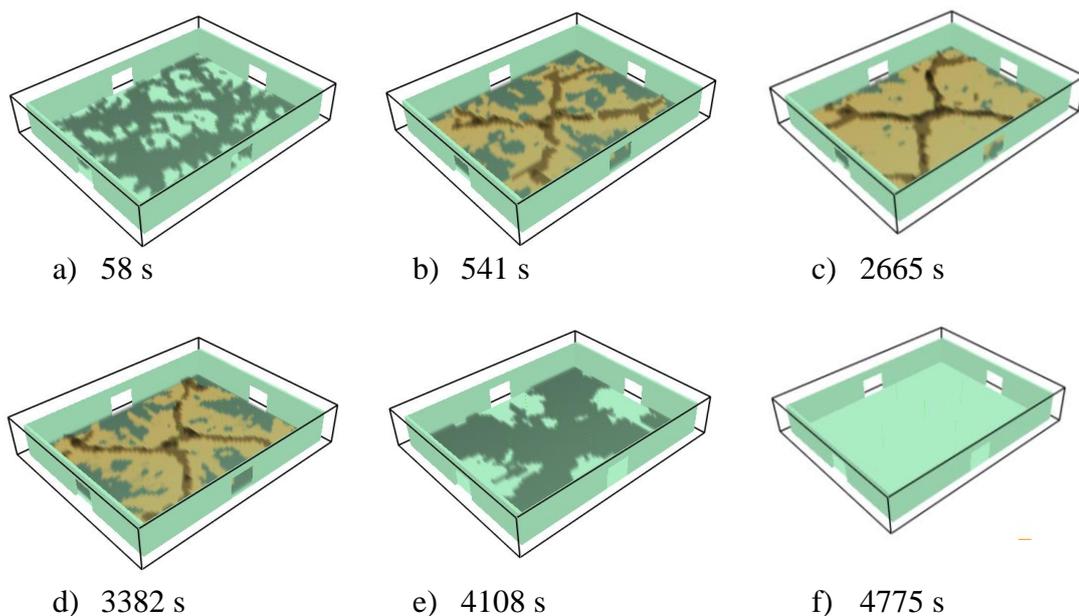


Figura 5.3 – Taxa de libertação de calor por unidade de área – incêndio generalizado

### 5.1.3.2 Temperatura

A Figura 5.4 representa a evolução no tempo da temperatura no compartimento em planos YOZ de abscissas 5.5, 11 e 16.5 m.

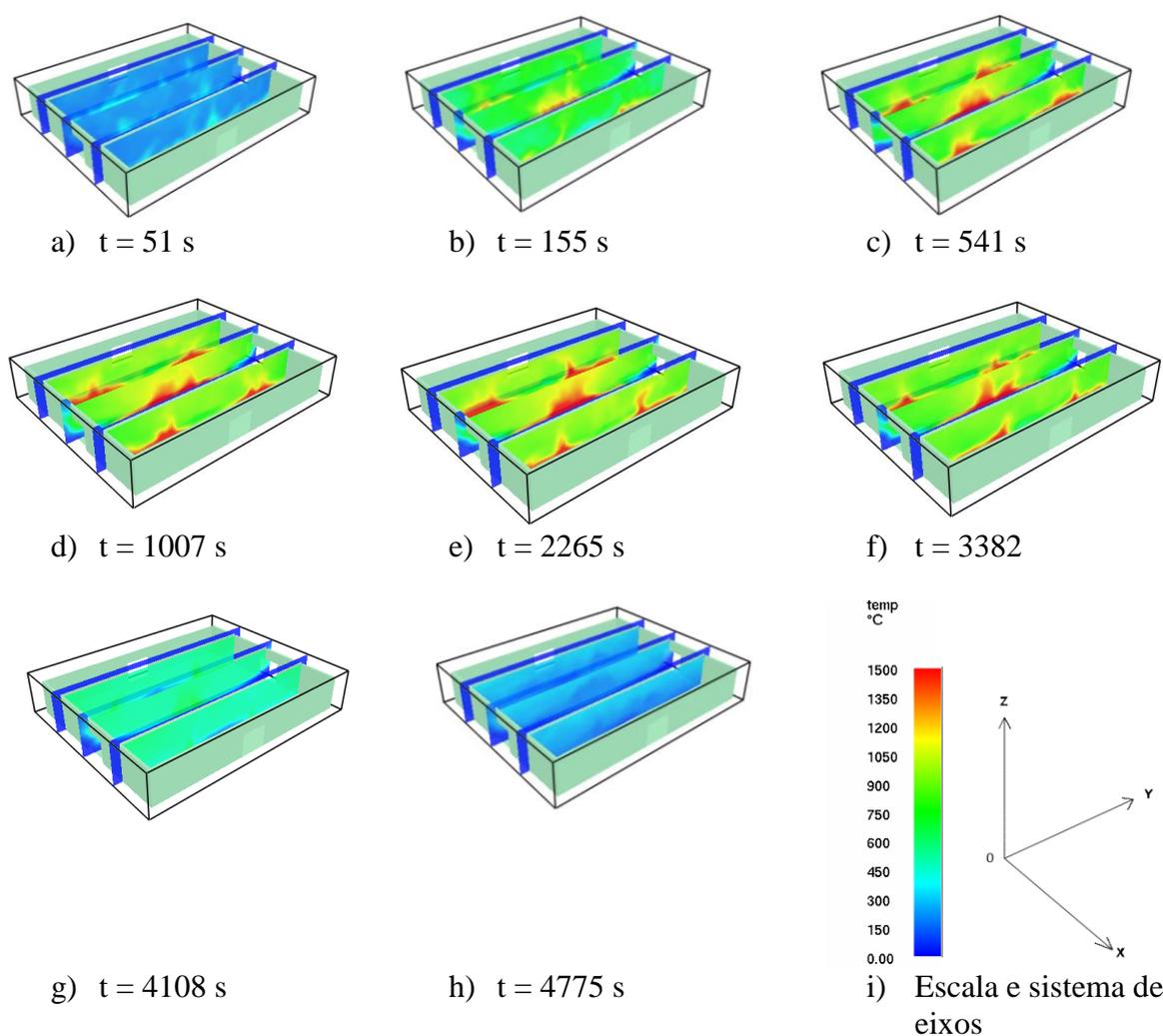


Figura 5.4 – Temperatura no Plano YOZ:  $x = 5,5$  m;  $x = 11$  m;  $x = 16,5$  m

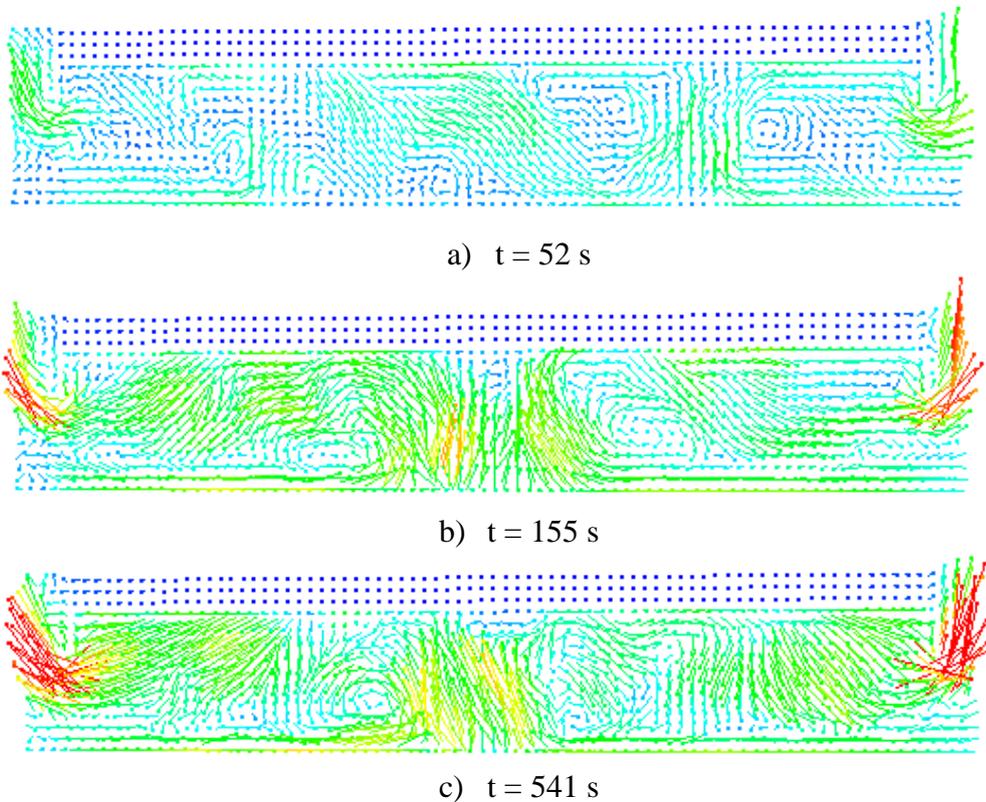
Através da Figura 5.4 observam-se as diferentes fases do incêndio: fase de crescimento e de arrefecimento. Inicialmente ( $t = 51$  s) as temperaturas rondam os  $200^{\circ}\text{C}$  (Figura 5.4a), sendo que o crescimento do incêndio é bastante rápido, dado que quando  $t = 155$  s as temperaturas do compartimento aumentam cerca de  $500^{\circ}\text{C}$  na sua generalidade (Figura 5.4b). Após 9 minutos do incêndio deflagrar as temperaturas atingem os  $1100^{\circ}\text{C}$  (Figura 5.4c).

O incêndio atinge uma fase em que a sua temperatura não tem grandes oscilações de valores, conforme é perceptível na Figura 5.4d e na Figura 5.4e. O tempo máximo ocorre quando  $t = 3126,25$  s, sendo que a Figura 5.4f representa o momento após este máximo, já apresentado no Quadro 5.2, pelo que é visível um decréscimo da temperatura no compartimento relativamente às figuras anteriores (Figura 5.4d e Figura 5.4e). Esta Figura 4.4 representa o início da fase de arrefecimento, que se prolonga (Figura 5.4g) até as temperaturas atingirem valores mais baixos (Figura 5.4h).

Na Figura 5.4 é visível o efeito da influência das aberturas na propagação do incêndio, pois verifica-se que o incêndio ocorre do centro do compartimento para os cantos e as temperaturas são mais elevadas ao nível do piso térreo.

### 5.1.3.3 Velocidade

A Figura 5.5 representa a velocidade de propagação do incêndio no tempo e no plano YOZ para  $x = 11$  m.



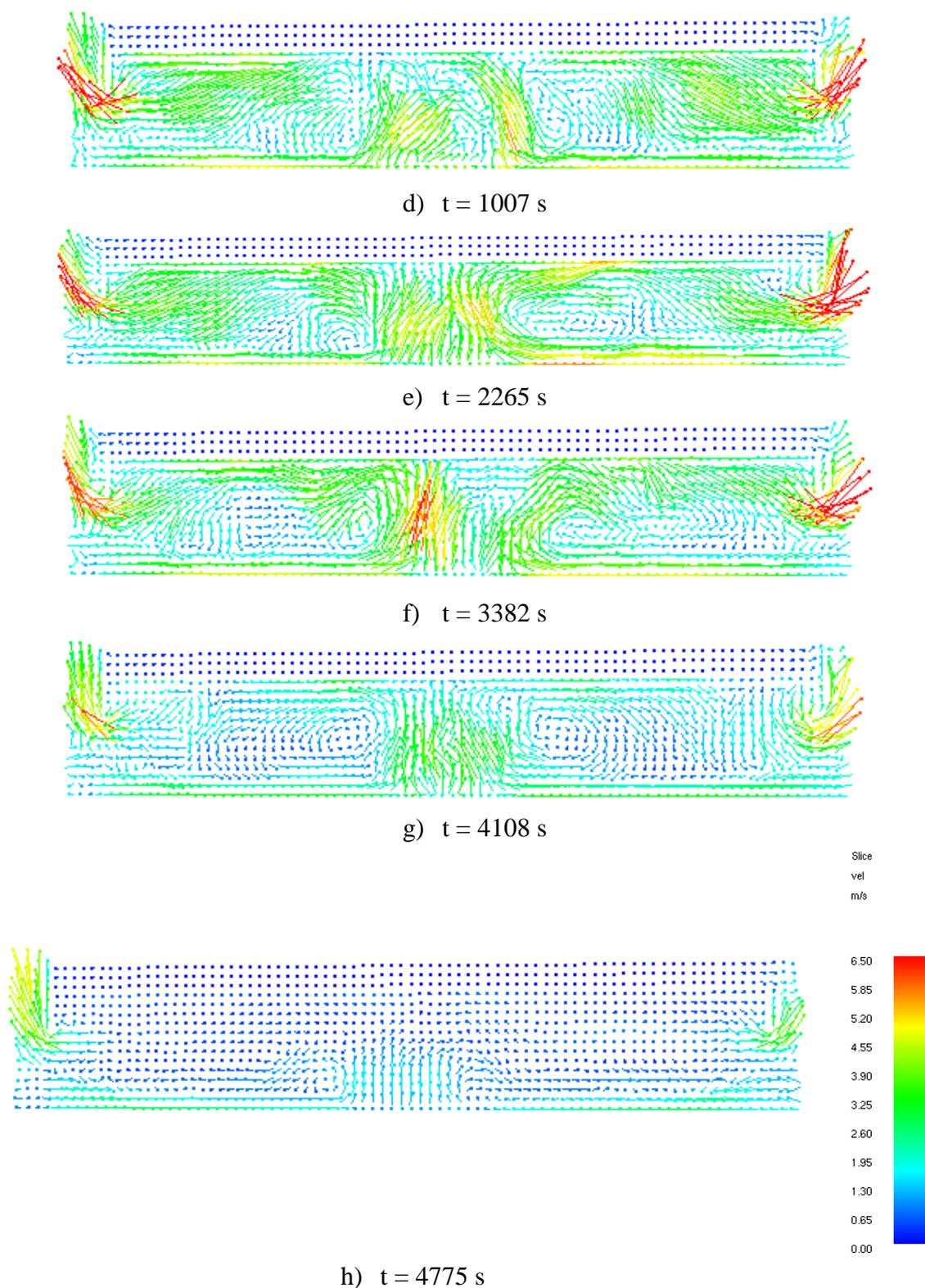


Figura 5.5 – Velocidade no Plano YOZ,  $x = 11$ m

A transferência de calor por convecção é influenciada pela temperatura do gás (Figura 5.4) e pela velocidade de propagação (Figura 5.5). A Figura 5.5 permite visualizar o movimento ascensional dos gases no compartimento ao longo da altura. No princípio da análise quando os gases quentes não estão em movimento e/ou o fluxo de gases através da superfície é lento, a energia é transferida a partir dos gases para a superfície, onde ocorre uma diminuição da temperatura dos gases, consequência do aumento da temperatura na superfície. Nos locais mais longe da superfície a transferência de calor por parte dos gases com temperaturas mais altas é reduzida. À medida que o tempo avança quando a velocidade aumenta, os gases mais frios (cuja transferência de energia para a superfície já tenha ocorrido) afastam-se e são substituídos por gases de temperatura mais elevada. Quando a velocidade aumenta suficientemente para provocar um fluxo turbulento, os gases quentes permanecem em contacto com a superfície sobre uma base relativamente constante, o que provoca o aumento do fluxo de calor por convecção. A sua velocidade ao longo do tempo aumenta até aos 3100 s (Figura 5.5a até Figura 5.5e), tendo um decréscimo a partir desse valor (Figura 5.5f até Figura 5.5h). Na Figura 5.5 também se pode aferir que a velocidade junto das aberturas é superior às velocidades dentro do compartimento, devido ao oxigénio disponível.

## 5.2 Travelling Fire

### 5.2.1 Refinamento da malha

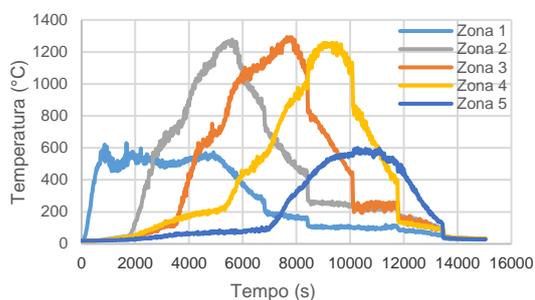
Para o caso de estudo do *travelling fire* será utilizada a mesma discretização do incêndio generalizado. As propriedades da malha obtida através da discretização efetuada são apresentadas no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Propriedades inerentes à discretização da malha

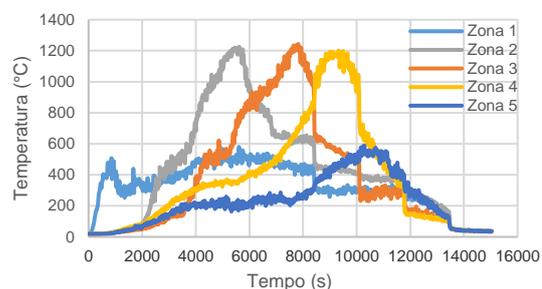
Discretização (m)	Número de Células X	Número de Células Y	Número de Células Z	Número de células Total	Tempo de computação (h)
0,33	64	81	15	77 760	100

### 5.2.2 Termopares

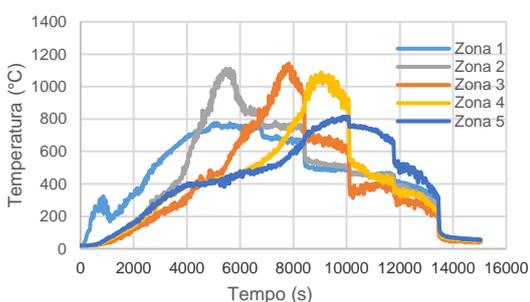
No modelo numérico introduziram-se termopares no centro das várias zonas do compartimento, ao longo da altura. Os valores obtidos em cada termopar encontram-se descritos na Figura 5.6.



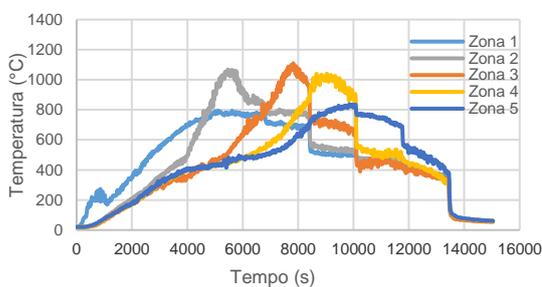
a) Termopares ao nível do Piso (0.12 metros)



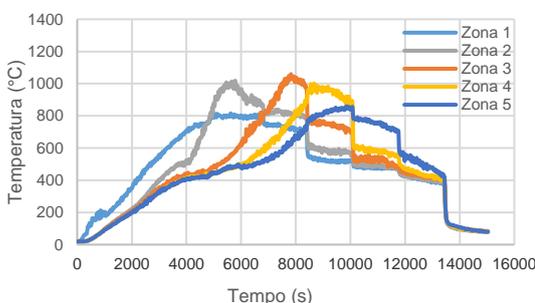
b) Termopares a 0.5 metros



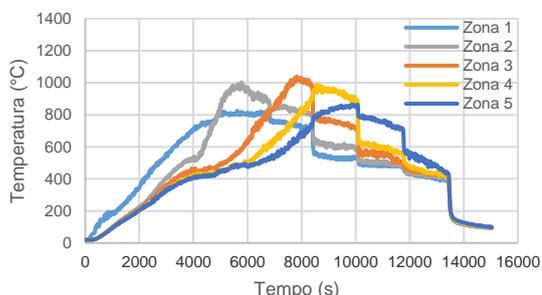
c) Termopares a 1.0 metro



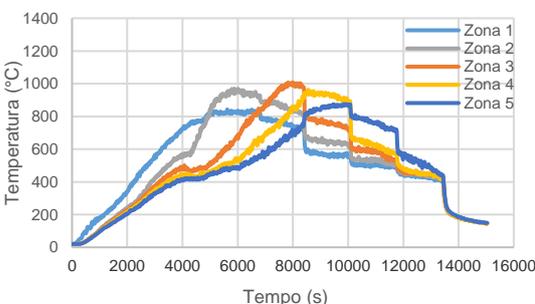
d) Termopares a 1.5 metros



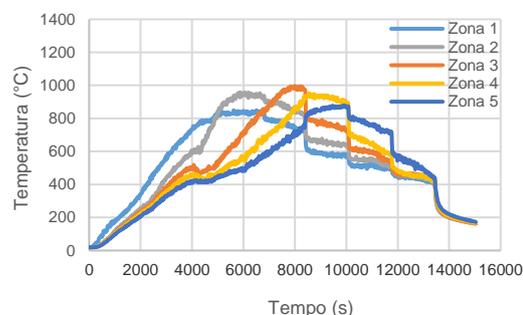
e) Termopares a 2.0 metros



f) Termopares a 2.5 metros



g) Termopares a 3.0 metros



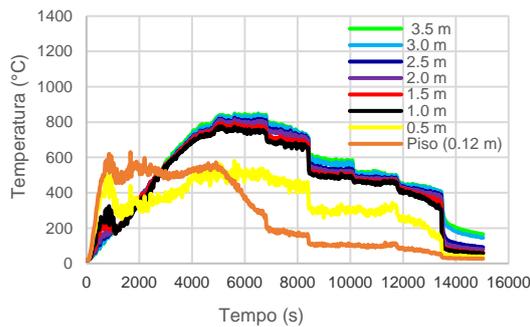
h) Termopares a 3.5 metros

Figura 5.6 – Temperatura nos termopares nas várias alturas

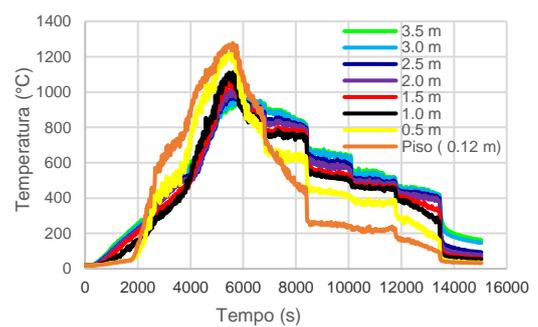
A Figura 5.6 fornece a variação da temperatura ao longo do tempo nas cotas consideradas ao longo da altura e nas 5 zonas. Nas curvas de temperatura registadas em cada termopar é possível observar a fase de aquecimento, pico e arrefecimento. Conforme a Figura 5.6 representa, a fase de aquecimento ocorre de uma forma mais rápida junto ao piso e na zona 1. O aquecimento da zona 5 é mais gradual no tempo e é superior nas cotas a 3,5 m e a 3,0 m.

No que diz respeito à altura, os termopares próximos do combustível (piso térreo do compartimento) apresentam valores superiores de temperatura aos que estão a uma cota mais elevada. A temperatura máxima atingida no compartimento foi de 1292,67 °C e ocorreu na zona 3, ao nível do piso. De realçar que é possível observar que a temperatura atinge os valores mais elevados, ao longo da altura do compartimento, para instantes de tempo muito idênticos.

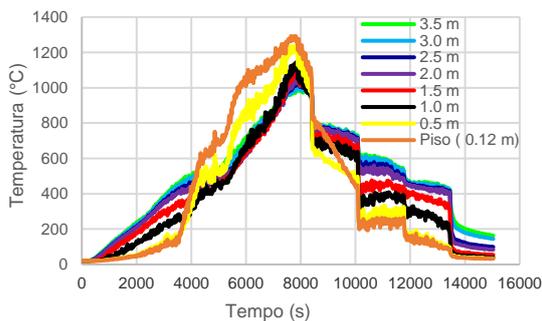
A análise no tempo por zona e ao longo da altura do compartimento também é aqui efetuada, como se apresenta na Figura 5.7.



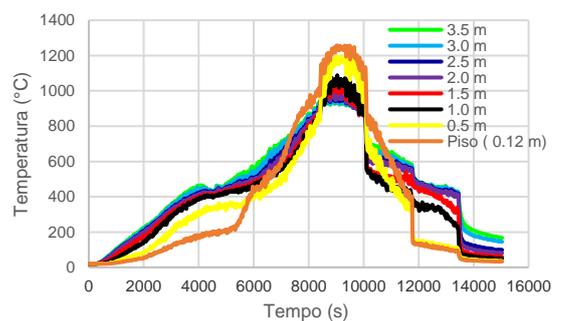
a) Termopares – Zona 1



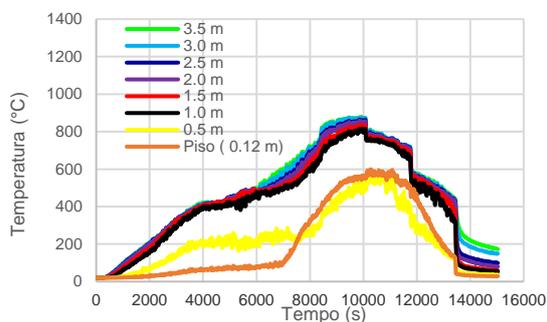
b) Termopares – Zona 2



c) Termopares – Zona 3



d) Termopares – Zona 4



e) Termopares – Zona 5

Figura 5.7 – Temperaturas nos termopares nas diversas zonas

Os termopares colocados nas cotas 0.12 m e 0.5 m determinam variações de temperatura muito semelhantes nas zonas 2, 3 e 4. A zona 1 define claramente a zona de deflagração do incêndio no compartimento; a zona 5 indica que a carga de incêndio está a finalizar. Portanto na Figura 5.7 é possível visualizar a variação da temperatura ao longo do tempo e ao longo do compartimento, confirmando a direção de propagação das chamas pré-definidas (da zona 1 para a zona 5).

Como o incêndio deflagra na zona 1, é nesta zona que o crescimento é mais rápido, retrata-se que é na fase inicial de crescimento do incêndio que se possui a maior quantidade de oxigénio disponível. (Figura 5.7a).

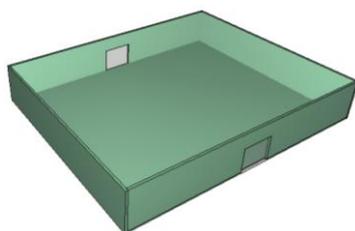
A propagação do incêndio nas diversas zonas ocorre com um crescimento menor (devido à diminuição de oxigénio que ocorre no compartimento), no entanto observa-se que as temperaturas atingidas são superiores, devido a fenómenos de radiação/convecção.

Nas zonas centrais (Figura 5.7 b a Figura 5.7d) os picos de temperatura são mais acentuados, enquanto que nas zonas laterais (Figura 5.7 a e Figura 5.7) são mais graduais.

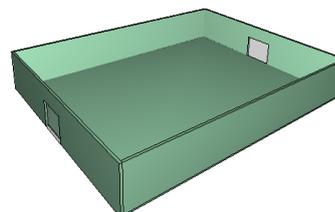
Este tipo de incêndios, os *travelling fires* causam fases quentes e fases frias, isto é, numa determinada zona o incêndio pode estar na fase de crescimento, mas na zona imediatamente anterior estar na fase de arrefecimento. A zona 3 atinge as temperaturas mais elevadas no compartimento, pois quando inicia a sua queima, a zona 2 apesar de já estar a arrefecer, tem uma contribuição maior de temperatura do que a zona 4. Esta variação de temperaturas no compartimento causa deformações nos materiais constituintes, no entanto tal consequência não é do âmbito desta dissertação.

As temperaturas na zona 2, 3 e 4 atingem praticamente o mesmo valor, pois os gases acumulam-se na zona superior do compartimento, o que permite inferir que estão na mesma camada de fumo, e que esta camada é espessa, dado que apenas os termopares mais junto ao chão não alcançam estes valores. O fumo gerado espalha-se através das aberturas.

De modo a clarificar a influência das aberturas definidas junto às zonas 1,3 e 5 (Figura 4.5), na evolução do incêndio no compartimento procedeu-se a duas análises extras em que se reduziu o número de aberturas consideradas. Numa primeira análise apenas se considerou a existência de aberturas na zona 3 e na segunda análise apenas aberturas junto às zonas 1 e 5 (Figura 5.8). De seguida apresentam-se os resultados de variação de temperaturas nas zonas onde foram retiradas as aberturas.



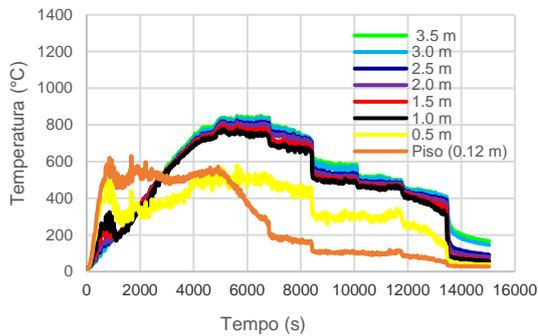
a) Aberturas na zona 3



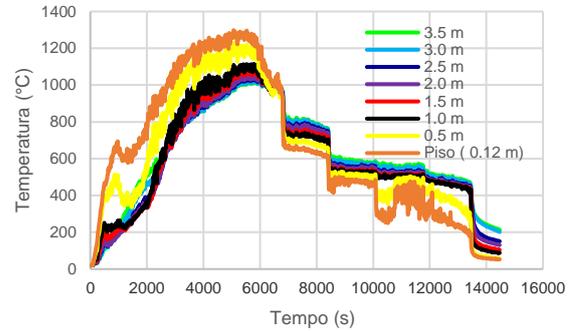
b) Aberturas na zona 1 e 5

Figura 5.8 – Aberturas consideradas no compartimento

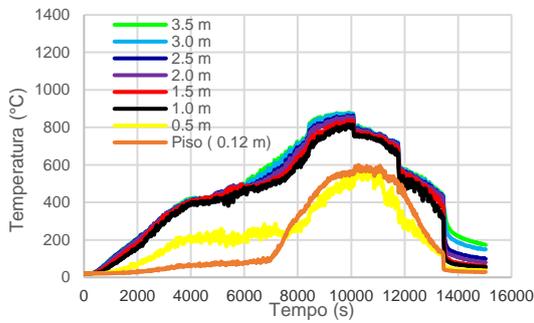
No que concerne à análise dos resultados obtidos considerando aberturas apenas na zona 3, Figura 5.8a, as temperaturas no compartimento, nas zonas 1 e 5 variam substancialmente relativamente à análise inicial, concluindo-se que a existência de aberturas é um fator determinante nas temperaturas máximas atingidas nestas zonas, bem como na evolução das temperaturas junto ao pavimento, conforme se demonstra através da Figura 5.9.



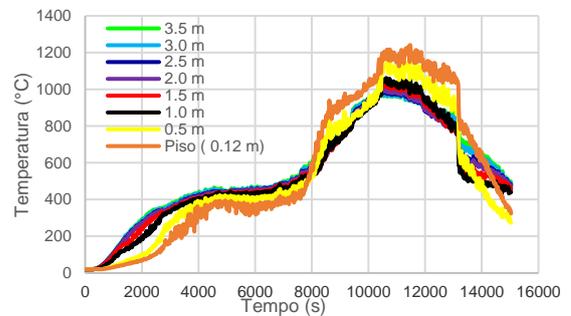
a) Zona 1 – Análise inicial – aberturas 1, 3 e 5



b) Zona 1 – análise – aberturas na zona 3



c) Zona 5 – Análise inicial – aberturas 1,3 e 5



d) Zona 5 – análise – aberturas na zona 3

Figura 5.9 – Efeito das aberturas – Zona 3

Através desta análise foi possível aferir que apesar do compartimento ter menos oxigénio e portanto o desenvolvimento do incêndio efetuar-se de uma forma mais lenta as temperaturas atingidas foram superiores às verificadas na análise inicial. Estes resultados são concordantes com a direção de propagação do incêndio.

Relativamente aos resultados obtidos considerando aberturas apenas na zona 1 e 5, Figura 5.8b observa-se que as temperaturas no compartimento nas zonas 3 e 4 não têm uma grande variação, pelo que o efeito das aberturas neste caso não é um fator determinante, consoante se demonstra na Figura 5.10.

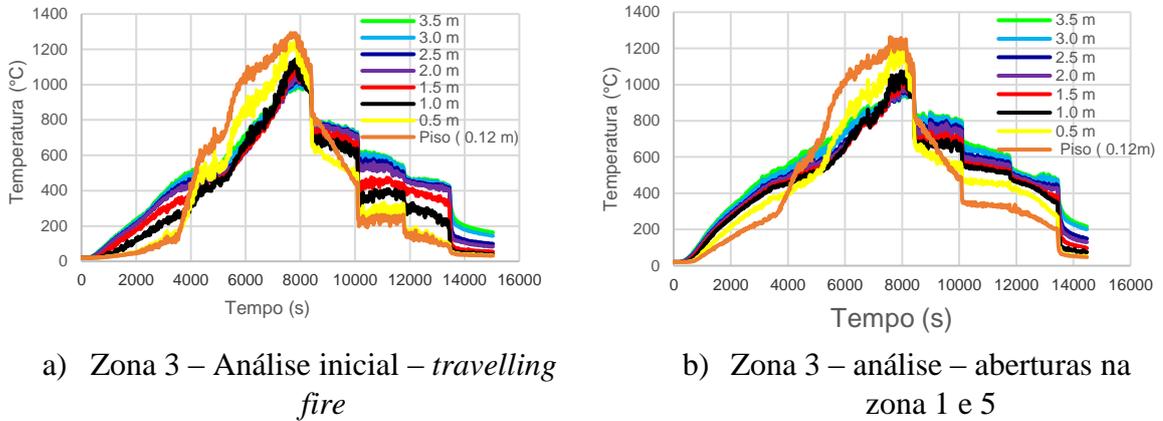


Figura 5.10 – Efeito das aberturas – zona 1 e 5

### 5.2.3 Movimentação de Gases

Conforme se efetivou anteriormente para a situação do incêndio generalizado, também para a consideração do *travelling fire* se utiliza o *smokeview* para analisar a movimentação dos gases no compartimento. Os valores da evolução da temperatura e da velocidade de propagação também foram apresentados.

Os planos considerados são os planos YOZ, os mesmos que no incêndio generalizado, de forma a poder proceder a comparações. No Quadro 5.5 apresenta-se então as quantidades e os planos referidos.

Quadro 5.5 – Definição das quantidades a medir

Plano XYZ	Plano – Cota (m)	Quantidade a medir	Vetor
X	5,5	Temperatura	Não
	11		
	16,5		
X	-	Velocidade	Sim
	11		
	-		

### 5.2.3.1 Taxa de libertação de calor por unidade de área

Na Figura 5.11 apresenta-se a taxa de libertação de calor por unidade de área (HRRPUA) ao longo do tempo, e contrariamente ao incêndio generalizado ocorre ao longo do compartimento variando nas zonas 1 a 5.

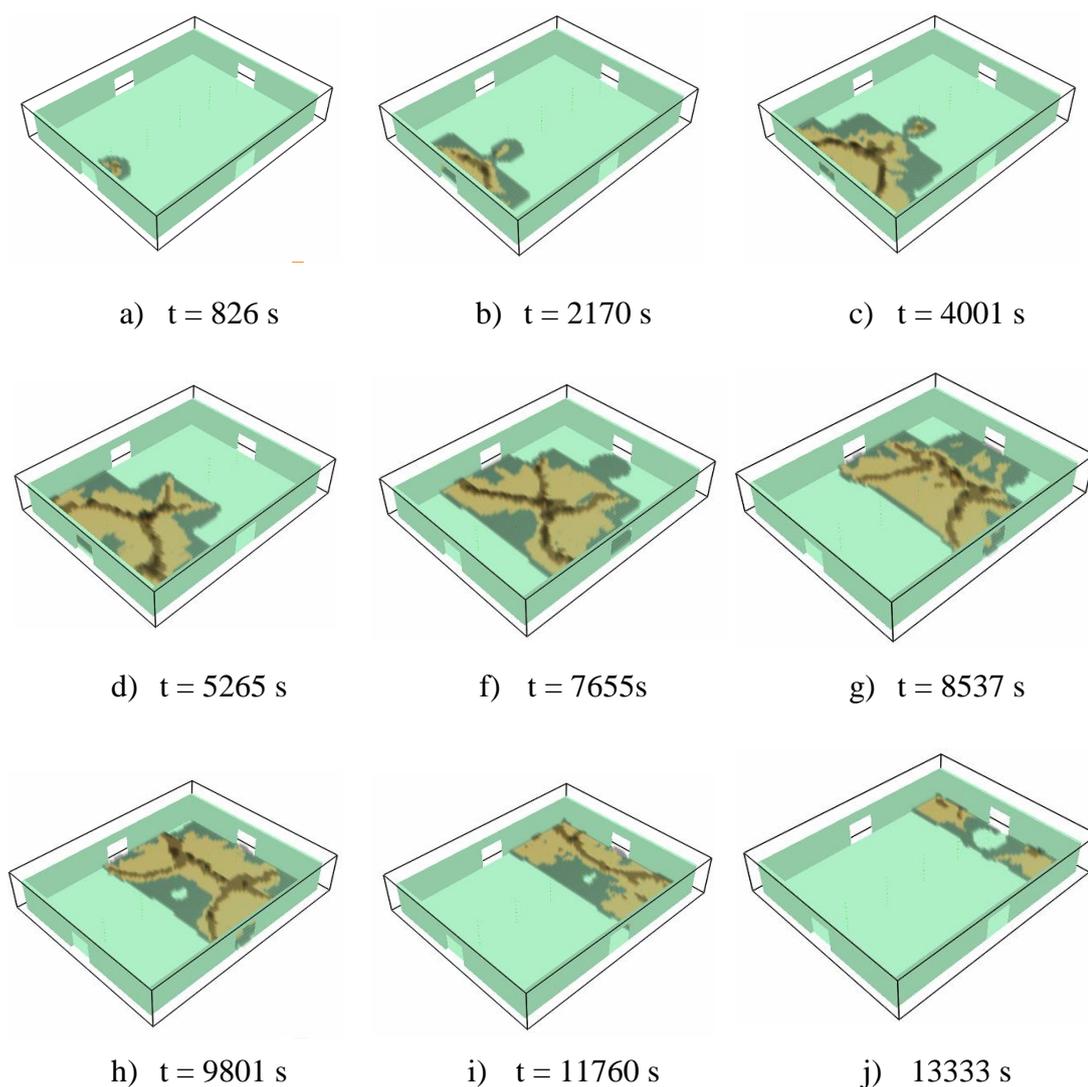


Figura 5.11 – Taxa de libertação de calor por unidade de área – *Travelling Fire*

### 5.2.3.2 Temperatura

De igual forma se apresenta a evolução da temperatura nos planos YOZ a diferentes abscissas.

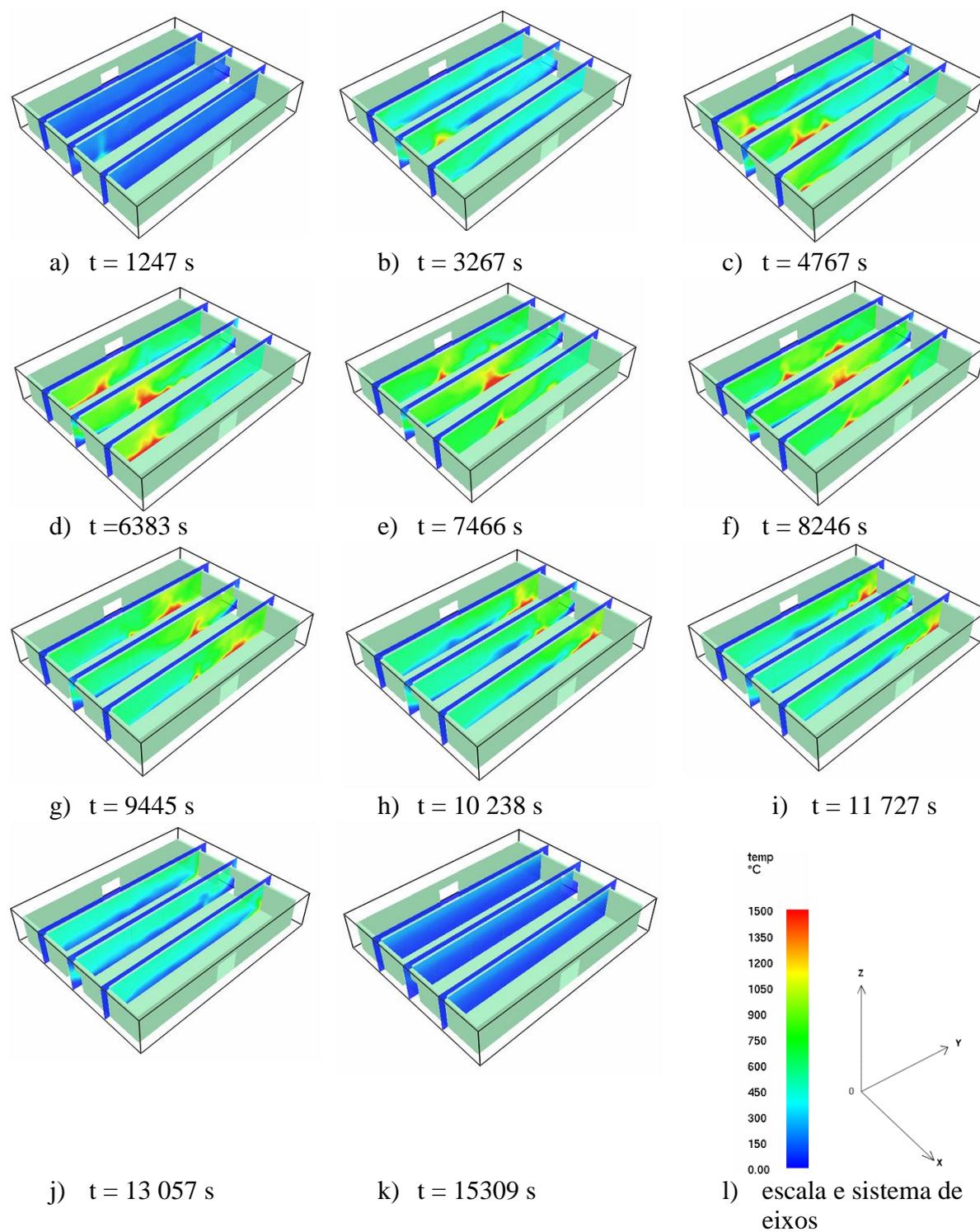


Figura 5.12 – Temperatura no Plano YOZ:  $x = 5,5\text{m}$ ;  $x = 11\text{m}$ ;  $x = 16,5\text{ m}$

Na Figura 5.12 representa-se a temperatura do *travelling fire* ao longo do tempo para as abcissas de 5.5, 11 e 16.5 m. Os planos considerados na análise são os mesmos do incêndio generalizado, para poder aferir as diferenças existentes. Estes planos são transversais às zonas consideradas pelo que permitem observar o desenvolvimento do incêndio ao longo do compartimento, no sentido inicialmente arbitrado e permitem concluir que a sua queima não ocorre de uma forma homogénea. Na seção 4.2.6.2 procedeu-se à descrição do *travelling fire* e para simular o seu comportamento utilizaram-se controladores.

O comportamento que ocorre na Figura 5.12 pode ser complementado com as temperaturas obtidas para cada zona, Figura 5.7. Assim de forma a simplificar esta análise determinou-se a média das temperaturas obtidas por zona e que se representa na Figura 5.13.

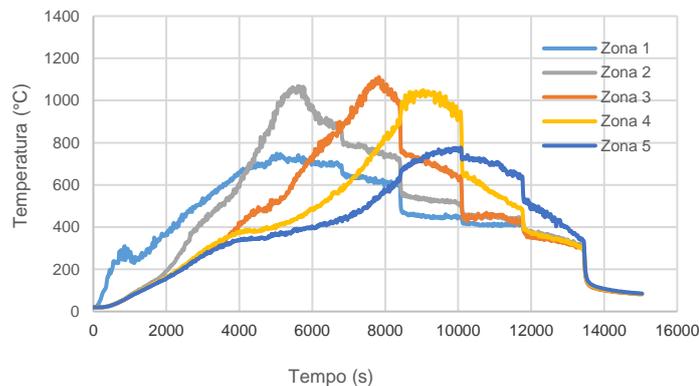
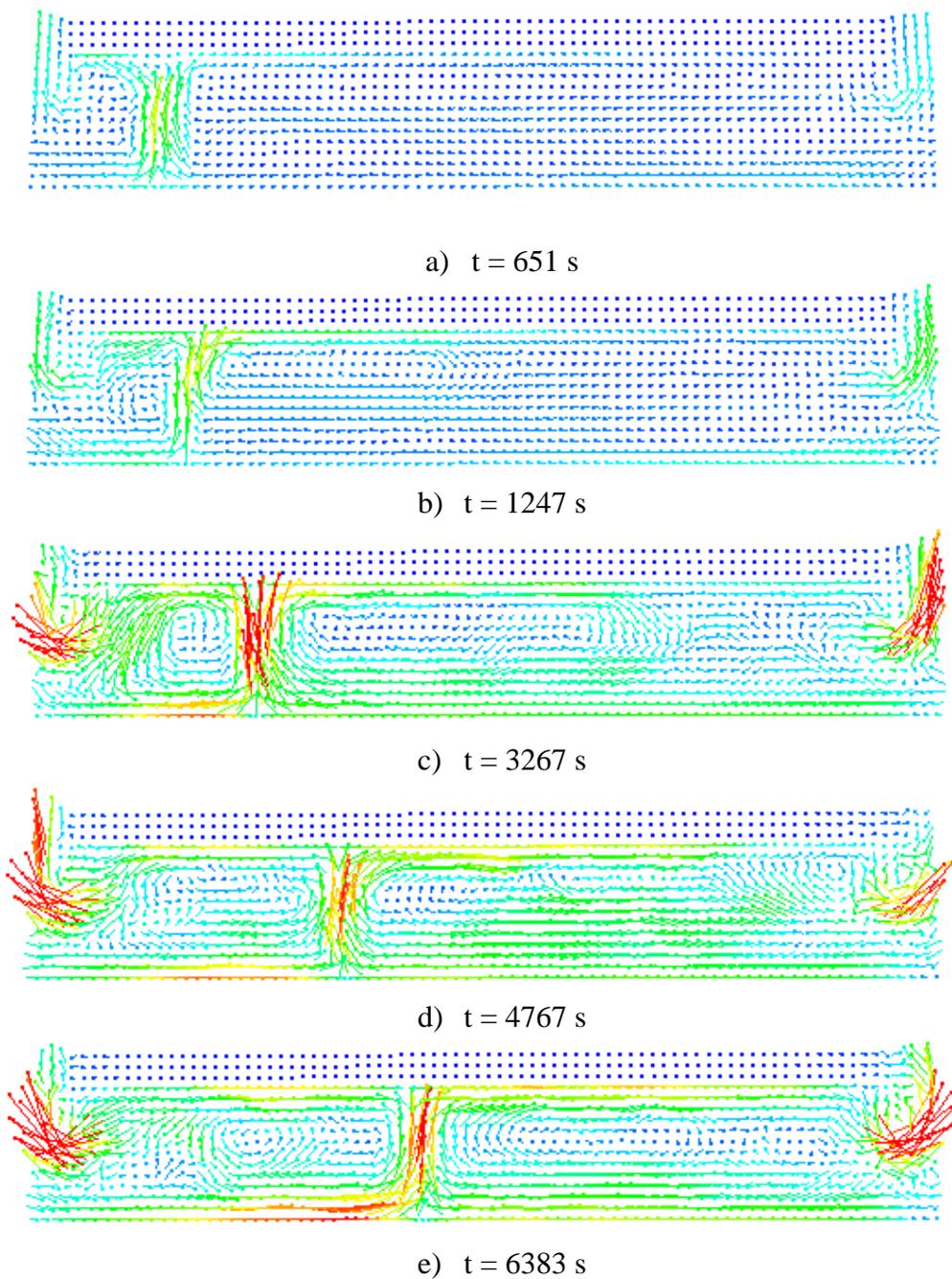


Figura 5.13 – Média das temperaturas nos termopares por zonas

Na Figura 5.12a e na Figura 5.12b a temperatura na zona 1 é superior à das restantes zonas dado que quando  $t = 1247$  s apenas a zona 1 está ativa. Quando  $t = 3267$  observa-se que a zona 2 já está ativa e o crescimento do incêndio efetua-se de uma forma mais gradual. Na Figura 5.12d ( $t = 6383$  s) a zona 4 está ativa, no entanto a zona 2 apesar de estar na sua fase de arrefecimento ainda tem um valor superior às zonas 3 e 4, que estão na sua fase de aquecimento. Na Figura 5.12e ( $t = 7466$  s) a zona 5 já está ativa e o compartimento atinge o seu máximo na zona 3 com o valor médio de  $1057,1^{\circ}\text{C}$ . Na Figura 5.12f ( $t = 8246$  s) a temperatura na zona 3 diminui, sendo que na zona 4 e na zona 5 são superiores ao instante medido anteriormente. Na Figura 5.12g ( $t = 9445$  s) a zona 4 atinge o seu máximo, já as zonas anteriores estão na sua fase de arrefecimento. Na Figura 5.12h, Figura 5.12i, Figura 5.12j e Figura 5.12k as temperaturas nas zonas do compartimento estão na fase de arrefecimento, tendo um valor superior a curva pertencente à zona 5.

### 5.2.3.3 Velocidade

Para representar a velocidade no Plano YOZ ( $x = 11\text{m}$ ), apresenta-se na Figura 5.14 ao longo do tempo:



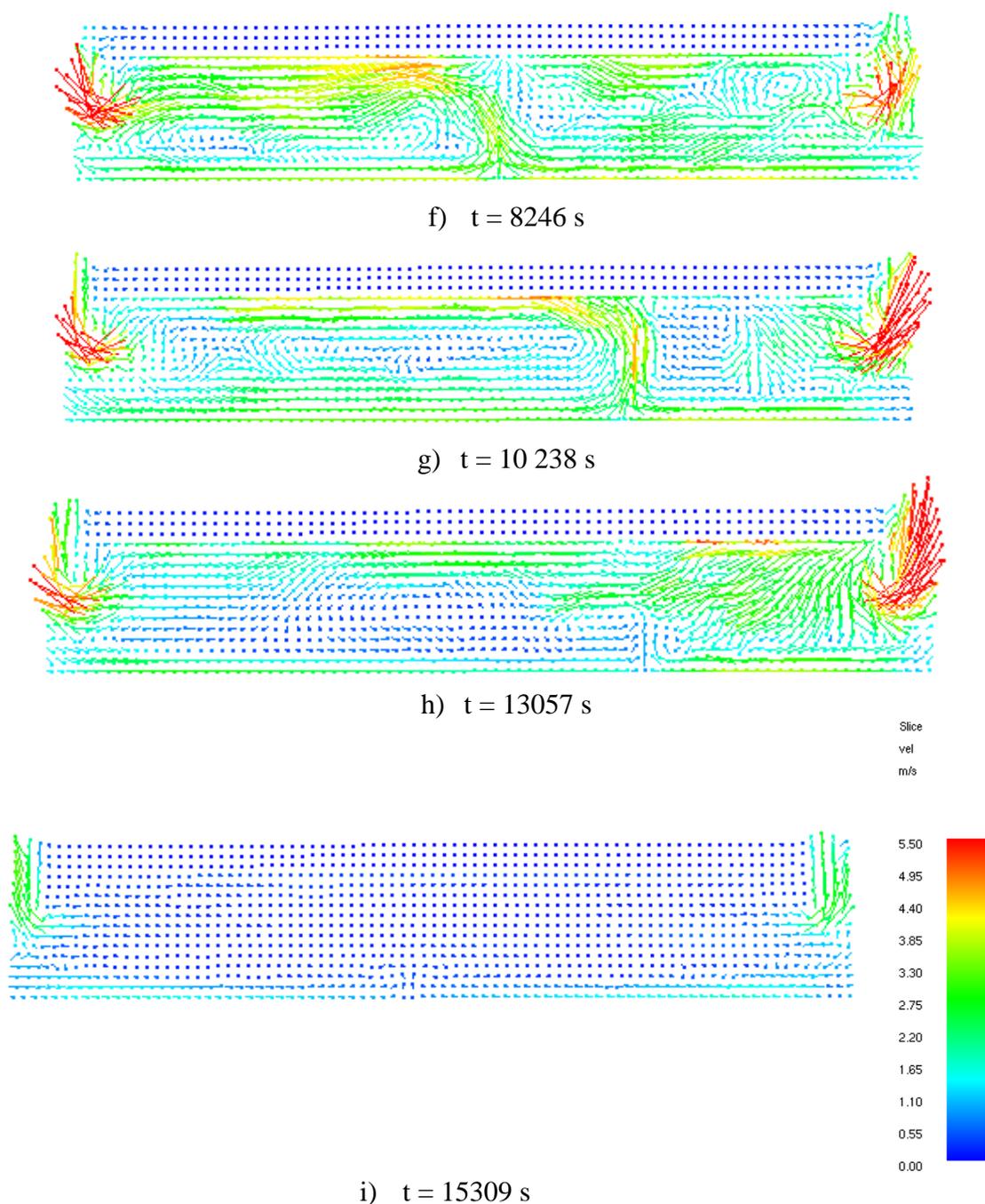


Figura 5.14 – Velocidade no Plano YOZ,  $x = 11$  m

A Figura 5.14 permite concluir que o incêndio está em regime turbulento dado que as partículas se misturam de forma não linear. As diferenças entre as fronteiras geram fluxos de convecção, que neste tipo de incêndios ocorre em maior quantidade devido ao tipo de incêndio estudado.

A Figura 5.14 permite visualizar o movimento ascensional dos gases no compartimento ao longo do seu comprimento, A evolução da velocidade no tempo permite confirmar a direção de propagação do incêndio e que a existência de aberturas no compartimento é determinante no incêndio.

O comportamento que aqui ocorre e a forma de propagação do incêndio são de uma complexidade tal que sai do âmbito deste trabalho pois implicaria uma caracterização mais detalhada de todos os materiais constituintes do compartimento, nomeadamente propriedades térmicas e caloríficas.

#### 5.2.4 Comparação dos resultados obtidos no *Travelling Fire* e no Incêndio Generalizado

De forma a poder comparar os resultados obtidos apresenta-se novamente as curvas já descritas de forma individual nas seções anteriores. Na Figura 5.15 apresentam-se as curvas obtidas através de um incêndio generalizado (queima uniforme) e de um incêndio que viaja ao longo do compartimento – *travelling fire* (queima não uniforme).

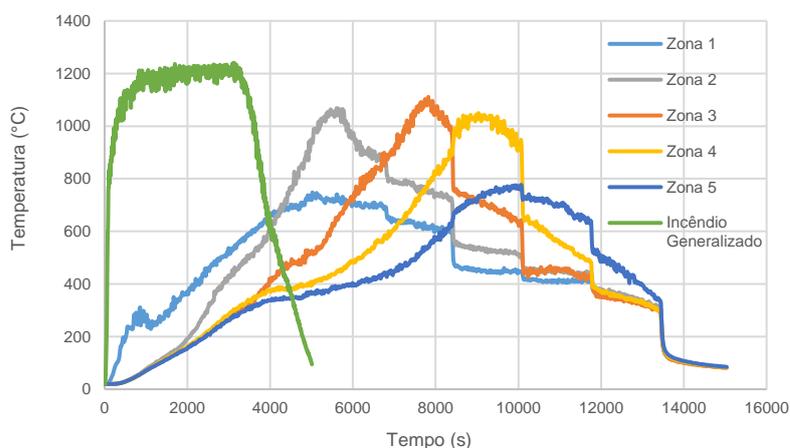


Figura 5.15 – Comparação entre o Incêndio Generalizado e o *Travelling Fire*

A Figura 5.15 permite concluir que existem diferenças entre assumir que um incêndio é generalizado ou que viaja ao longo do compartimento (*travelling fire*). Na presente dissertação estes dois tipos de incêndio estavam sujeitos às mesmas condições, isto é, o compartimento tinha as mesmas dimensões, aberturas e combustível, apenas variou a forma como o incêndio se desenvolveu.

No incêndio generalizado cuja queima é uniforme ao longo de todo o compartimento o tempo total de queima foi de 5010 s, isto é, aproximadamente 1 hora e 24 minutos.

No caso do *travelling fire*, o tempo total de queima foi de 15120 s, o que fez cerca de 4 horas e 20 minutos e verificou-se o desenvolvimento ao longo do compartimento.

Através da Figura 5.15 conclui-se que apesar de o *travelling fire* ter uma duração cerca de 3 vezes superior ao incêndio generalizado as temperaturas máximas do *travelling fire* não atingiram as máximas do incêndio generalizado.

## 6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 6.1 Conclusões

O trabalho desenvolvido no âmbito da presente dissertação permitiu concluir que para o dimensionamento estrutural face a incêndios a consideração da forma como o incêndio se desenvolve ao longo do compartimento é de extrema importância.

No caso de estudo do incêndio generalizado, as curvas paramétricas serviram como base para a sua calibração, dado que este tipo de curvas está descrito nos Eurocódigos. A forma como a modelação foi realizada influencia sobremaneira a qualidade dos resultados obtidos, nomeadamente a discretização da malha e taxa de libertação de calor da curva HRR. Os diversos termopares ao longo da altura do compartimento permitiram verificar que através de fenómenos de convecção os fluxos de calor causam mudança de temperatura, sendo que esta diminui ao longo da altura no compartimento. O efeito das aberturas no compartimento também contribui para a forma como o incêndio se desenvolve dado que se verifica que o incêndio ocorre do centro do compartimento para os cantos e as temperaturas são mais elevadas ao nível do piso térreo. A velocidade dos gases no compartimento varia, sendo que junto às aberturas é superior dado que o ar que entra é frio e o que sai é quente.

No caso de estudo do *travelling fire*, principalmente na modelação do incêndio, os parâmetros introduzidos tiveram uma grande influência nos resultados obtidos, nomeadamente a taxa de propagação, os tempos de queima arbitrados e a ativação dos controladores. Este tipo de incêndio, cuja queima não é uniforme e ocorre ao longo do compartimento, dividido por zonas, permite concluir que inicialmente o crescimento do incêndio é maior devido à quantidade de oxigénio disponível. Outra particularidade a considerar é que num incêndio que viaja ao longo de um compartimento as temperaturas entre cada faixa considerada aumentam ao longo do mesmo, podendo tal não ocorrer em todas as situações devido à existência de aberturas. A variação da temperatura em diversas localizações ao mesmo tempo confirma a propagação das chamas no sentido pretendido. Estes incêndios causam fases quentes e frias, ou seja, numa determinada zona o incêndio pode estar na fase de crescimento mas na zona imediatamente anterior estar na fase de arrefecimento, o que pode causar deformações.

O trabalho desenvolvido permitiu concluir que assumir que a temperatura é uniforme ao longo do compartimento não descreve a forma como os incêndios reais ocorrem, dado que as durações são muito superiores às propostas pela metodologia descrita no Eurocódigo, sendo que as temperaturas obtidas pela consideração de uma temperatura heterógena no compartimento são menores. Desta forma torna-se imperativo considerar a existência de incêndios que viajam ao longo do compartimento, promovendo o seu desenvolvimento e conseqüente aplicação. A interação entre engenheiros de segurança contra incêndios e engenheiros estruturais é de extrema importância para combater o fosso existente.

Desta forma, a previsão do crescimento do fogo e da sua propagação baseado nas propriedades físicas do caso em estudo, bem como dos combustíveis possibilita o dimensionamento mais económico dos modelos. Por conseqüente, a sua validação é de extrema importância para poder figurar nos documentos normativos que regulam a segurança contra incêndios.

## 6.2 Desenvolvimentos futuros

Este trabalho é considerado a etapa final de um estudo de comparação entre um incêndio generalizado e um *travelling fire*, no entanto é possível propor tópicos para desenvolvimentos futuros de forma a melhorar o conhecimento já existente sobre o assunto em estudo. Assim propõe-se:

- Variar as condições de ventilação do compartimento – geometria e localização das mesmas;
- Variar o tipo de combustível utilizado;
- Variar as densidades de cargas e conseqüentemente a tipologia do compartimento;
- Realizar ensaios experimentais, de forma a poder dar suporte aos resultados obtidos;
- Estudar outras dimensões de incêndio e aferir o seu impacto na estrutura;
- Estudar casos de compartimentos constituídos por outros materiais, nomeadamente os correntemente utilizados na construção civil.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alpert, R.L. (1972). “Calculation of Response Time of Ceiling-Mounted Fire Detectors”. *Fire Technology*, Vol. 8, Issue 3, pp. 181–195.

Baileys, C., Burgess, L., Plank, R. (1996) “Analyses of the effects of cooling and fire spread on steel-framed buildings”. *Fire Safety Journal*, Vol. 26, pp 273-293.

CEN (2010). “EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures, Part 1-2: General actions-Actions on structures exposed to fire”. European Committee for Standardization, Bruxelas, Bélgica. (Norma Portuguesa NP EN 1991-1-2).

Clifton, G. (1996). “Fire Models for Large Firecells”. *HERA*, Vol. 83, Issue 54, pp 4-83.

Coleman, G. e Sandberg, R. (2010). “A Primer on Direct Numerical Simulation of Turbulence – Methods, Procedures and Guidelines”. <[http://eprints.soton.ac.uk/66182/1/A\\_primer\\_on\\_DNS.pdf](http://eprints.soton.ac.uk/66182/1/A_primer_on_DNS.pdf)>. Acesso em 26 de Março de 2016.

Daily@. <<http://www.dailymail.co.uk/news/article-2235145/Kings-Cross-survivor-Kwasi-Afari-Minta-face-burned-blaze-killed-31-says-feels-lucky.html>>. Acesso em 26 de Março de 2016.

DeFriend, S., Dejmek, M., Porter, L., Deshotels, B. e Natvig, B. (2008). “A risk-based approach to flammable gas detector spacing”. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 159, pp 142-151.

Ellobody, E e Bailey, C. (2011) “Structural performance of a post-tensioned concrete floor during horizontally travelling fires”. *Engineering Structures*, Elsevier, 33, pp. 1908-1917.

Flint, G. (2005). “Fire Induced Collapse of Tall Buildings “. Tese de Doutorado, School of Engineering, The University of Edinburgh, Edinburgh.

Guedes Soares, C., Gordon, J. e Teixeira, A. (1998). “Elasto-plastic behaviour of plates subjected to heat loads”. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 45, Issue 2, pp. 179-198.

Guedes Soares, C. e Teixeira, A. (2000). “Strength of plates subjected to localised heat loads”. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 53, pp 335-358.

Guedes Soares, C. e Teixeira, A. (2000). “Strength of plates subjected to localised heat loads”. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.53, pp 335-358.

Horová, K., Jána, T. e Wald, F. (2013). “Temperature heterogeneity during travelling fire on experimental building”. *Advances in Engineering Software*, Vol. 62-63, pp 119-130.

Inácio, P. (2011).” Evolução da Temperatura Ambiente em Construções sujeitas ao fogo“. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

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

Jonsdottir, A., Stern – Gottfried, J. e Rein, G. (2010). “Comparison of resultant steel temperatures using travelling fires and traditional methods: case study for the informatics forum buildings”. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Interflam Conference*, Nottingham, UK.

Kaefer, E. e Silva, V. (2003) “Análise paramétrica de um incêndio conforme o novo Eurocode I”. <[http://www.lmc.ep.usp.br/grupos/gsi/wp-content/artigos1/incendio\\_CILAMCE.pdf](http://www.lmc.ep.usp.br/grupos/gsi/wp-content/artigos1/incendio_CILAMCE.pdf)>. Acesso em: 12 de Fevereiro de 2016.

Koverholt@. <<http://www.koverholt.com/fds-mesh-size-calc/>>. Acesso em: 25 de Março de 2016.

Law, A., Stern – Gottfried, J., Gillie, M., e Rein, G. (2011). “The influence of travelling fires on a concrete frame”, *Engineering Structures*, Vol. 33, pp. 1635-1642.

Lennon, T. e Moore, D. (2003) “The natural fire safety concept - full-scale tests at Cardington”. *Fire Safety Journal*, Vol. 38, pp. 623 – 643.

McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K. (2016). “Fire Dynamics Simulator User’s Guide”. NIST Special Publication 1019 Sixth Edition, Baltimore, Maryland, USA

Mespaque, W., Frainer, J. e Teixeira, P. (2012). “Analysis of hull-topside interaction by experimental approach on floating production unit P-53”. *Applied Oceanic research* 37, pp 133-144.

Mielcarek, A. (2016). “CFD Analysis of a Pool Fire in an Offshore Platform”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Moss, P.J. e Clifton, G.C. (2002) “Modelling of the Cardington LBTF Steel Frame Building Fire Tests”. 2nd International Workshop on Structures in Fire, Christchurch, New Zealand.

Orszag, S. (1970). “Analytical Theories of Turbulence”. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 41, pp.363–386.

Rein, G., Abecassis-Empis, C., e Carvel, R. (2007). “The Dalmarnock Fire Tests: Experiments and Modelling”. School of Engineering and Electronics, University of Edinburgh. Disponível em <https://www.era.lib.ed.ac.uk/bitstream/handle/1842/2415/DFT06%20Laboratory%20Experiments.pdf?sequence=1>

Rein, G., Zhang, X., Williams, P., Hume, B., Heise, A., Jowsey, A., Lane, B. e Torero, J. (2007). “Multi-story Fire Analysis for High- Rise Buildings”. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Interflam Conference*, London, UK.

Roben, C., Gillie, M. e Torero, J. (2010). “Structural behavior of during a vertically travelling fire”. *Fire Safety Journal*, Vol. 66, pp 191- 197.

Roberts, T., Buckland, I. Shirvill, L, Lowesmith, B., Salater, P. (2004).”Design and protection of pressure systems to withstand severe fires”. *Trans IchemE, Part B, Process Safety and Environmental Protection*, Vol.82, pp 89-96.

Sandström, J., Cheng, X., Veljkovic, M., Wickström, U. e Heistermann, T. (2011). “Travelling Fires for CFD”. *The 10th International Symposium on Fire Safety Science*, University of Maryland, USA.

Shestopal, V., Foley, M., Hewitt, J., Yii, E. e Bakker, F. (2010). “Spreading Fires in FDS5 Modelling (Case Studies)”. *Poster at The 12th International Interflam Conference*, Nottingham, UK.

Smardz, P. (2006). “Validation of Fire Dynamics Simulator (FDS) for forced and natural convection flows”. *Tese de Mestrado*, University of Ulster, Ulster.

Steckler, K.D., Quintiere, J.G., e Rinkinen, W.J. (1982) *Flow Induced by Fire in a Compartment*. NBSIR 82-2520.

Stern – Gottfried, J. (2011). “Travelling Fires for Structural Design“. *PhD. Thesis*, School of Engineering, The University of Edinburgh, Edinburgh.

Stern – Gottfried, J. e Rein, G. (2012a). “Travelling fires of structural design – Part II: Design methodology “. *Fire Safety Journal*, Vol. 54, pp 96-112.

Stern – Gottfried, J. e Rein, G. (2012b). “Travelling fires of structural design – Part I: Literature review “. Fire Safety Journal, Vol. 54, pp 74-85.

Stern – Gottfried, J., Rein, G., Lane, B. (2009). “An innovative approach to design fires for structural analyses of non-conventional buildings”. Application of Structural Fire Engineering.

Thomas, I.R. e 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.

Vila Real, P. (2003). “Incêndio em estruturas metálicas – Cálculo estrutural” (1ª edição, pp. 18-24). Amadora: Edições Orion, Novembro, ISBN: 972-8620-04-7.

Zhiyin, Y. (2014). ”Large-eddy simulation: Past, present and the future”. Chinese Journal of Aeronautics, Vol 28, Issue 1, pp 21-24.