



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

Modelação numérica e experimental de incêndios de compartimento sujeitos a incêndios naturais

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

Autor

Rúben José Policarpo Sobreiro

Orientador

Professor Doutor João Paulo Correia Rodrigues

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, Março, 2013

AGRADECIMENTOS

A toda a minha família e em particular aos meus pais e avós, aos primeiros pelo esforço pessoal que fizeram e fazem a fim de me proporcionar um ambiente adequado ao meu desenvolvimento como pessoa e como estudante, aos meus avós, por todo o amor e sábios ensinamentos que sempre transmitiram ao longo da vida, é também vosso este trabalho.

Ao Professor Doutor João Paulo Correia Rodrigues, a minha gratidão pela compreensão, orientação e tempo disponibilizado à realização desta dissertação.

À minha irmã Mafalda e à minha sobrinha Matilde por todo o apoio, carinho e amor prestados ao longo da minha vida.

Aos meus irmãos Tiago, João, David e Celso pelo apoio, companheirismo e amizade prestados ao longo da minha vida.

Um especial agradecimento á minha colega, amiga e namorada, pelo companheirismo e dedicação em todos os momentos da minha vida.

A todos os meus amigos pela amizade, camaradagem, incentivo e ajuda que recebi ao longo destes anos.

RESUMO

Os métodos de cálculo de desenvolvimento de incêndio são muitos e diversos, tendo um grau de rigor e erro que varia de caso para caso. As diferenças dos valores fornecidos pelos diversos métodos nunca foi aferida numa comparação alargada dos mesmos. Assim o presente trabalho tem como principal objetivo a caracterização da influência do modelo de cálculo no desenvolvimento de incêndio em compartimentos, na análise térmica das soluções construtivas do compartimento. Esta caracterização é efetuada através da utilização dos modelos simplificados do Eurocódigo 1 parte 1.2, modelos de zona dos programas Ozone V2.2.2 e CFAST V6.2.1 e, modelos de campo do programa FDS V5.3.1, utilizando o Pyrosim V5.3.1 como pré- processador do FDS V5.3.1.

As temperaturas foram também registadas em ensaios experimentais de incêndio de compartimento, onde serão simuladas as condições de um escritório. Nestes ensaios será usada uma carga de incêndio do tipo celulósica, utilizando madeira. Os modelos simplificados de cálculo do Eurocódigo 1, parte 2, que foram utilizados, são o método das curvas de incêndio paramétricas e dos incêndios localizados.

A análise térmica das soluções construtivas é realizada pelo programa de elementos finitos Abaqus V6.12.1. As temperaturas registadas pelos diferentes processos serão depois usadas na análise térmica da solução construtiva e verificada a sua influência.

Uma modelação detalhada do incêndio só pode ser alcançado através de um programa computacional de dinâmica de fluidos e através de modelos de elementos finitos, no dimensionamento de elementos estruturais em situação de incêndio, a integração de ambos os modelos representa o objetivo do presente trabalho.

Palavras-chave: Incêndio, compartimento, natural, modelação, numérica e experimental.

ABSTRACT

The calculation methods of fire spread are many and diverse, with a degrees of accuracy and error that varies from case to case. The differences of the values supplied by various methods has never been assessed in comparison enlarged thereof. Thus, the present work has as main objective to characterize the influence of the calculation model in the development of fire compartments in thermal analysis of constructive solutions compartment. This characterization is accomplished through the use of simplified models of Eurocode 1 Part 1.2, models of area programs and CFAST Ozone v2.2.2 V6.2.1 and models of field program FDS v5.3.1, using the pre Pyrosim V5.3.1 como - FDS v5.3.1 processor.

The temperatures were also recorded in the experimental room, where the fire will be simulated conditions of an office. In these assays will use one kind of fire load cellulosic using wood. The simplified models for calculating in the Eurocode 1, part 2, which were used, are the method of parametric curves of fire and fires located.

The Thermal analysis of constructive solutions is performed by the finite element program Abaqus V6.12.1. The temperatures recorded by different processes are then used in thermal analysis of the constructive solution and verified its influence.

A detailed modeling of the fire can only be achieved through a program of computational fluid dynamics and through finite element models, in the design of structural elements under fire conditions, the integration of both models is the goal of this work.

Keywords: Fire, compartment, natural, modeling, numerical and experimental.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento do tema	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Metodologia	3
1.4. Estrutura da tese	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Generalidades do incêndio natural	5
2.2. Curvas de incêndio nominais	7
2.2.1. Curvas de incêndio padrão	7
2.2.2. Curvas de incêndio de hidrocarbonetos	8
2.2.3. Curvas de incêndio de elementos exteriores	8
2.3. Modelos de incêndio simplificados	9
2.3.1. Curvas de incêndio paramétricas	9
2.3.2. Incêndios localizados	12
2.4. Modelos de incêndio avançados	14
2.4.1. Modelos de zona	14
2.4.2. Modelos de campo	17
3. MODELAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM INCÊNDIO DE COMPARTIMENTO..	20
3.1. Geometria do Compartimento	21
3.2. Carga de incêndio	22
3.3. Materiais do Ensaio	23
3.4. Instrumentação do ensaio	26
3.5. Resultados experimentais de compartimentação	28
3.5.1. Curvas de incêndio do ensaio 1	28
3.5.2. Curvas de incêndio do ensaio 2	32

4. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE UM INCÊNDIO DE COMPARTIMENTO	36
4.1. Modelo de Zonas- Ozone	37
4.1.1. Âmbito de Aplicação	37
4.1.2. Dados de entrada	38
4.2. Modelo de Zonas- CFAST	40
4.2.1. Âmbito de Aplicação	40
4.2.2. Dados de entrada	41
4.3. Modelos de CFD – FDS/Smokeview/Pyrosim	44
4.3.1. Âmbito de Aplicação	45
4.3.2. Dados de entrada	45
4.4. Resultados numéricos de um incêndio de compartimento.....	50
4.4.1. Modelos térmicos de fogo simplificados.....	50
4.4.2. Modelos térmicos de fogo avançados.....	52
5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	60
5.1. Conclusões	60
5.2. Desenvolvimentos futuros	61
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	62
7. ANEXOS	66
7.1. Anexo A- CFAST	66
7.2. Anexo B.1- FDS/SmokeView/Pyrosim – Slice X=1,72 m.....	67
7.3. Anexo B.2- FDS/SmokeView/Pyrosim – Slice Y=1,56 m.....	68
7.4. Anexo C-Abaqus.....	69
7.5. Anexo D-Fotografias da modelação experimental de compartimentação	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1 – Métodos de cálculo alternativos.

Capítulo 2

Figura 2.1 - Fases de um incêndio natural comparado ao incêndio-padrão(ISO 834, 1994)..

Figura 2.2 – Curvas de incêndio nominais.

Figura 2.3 - Curvas parametrizadas de acordo com o Eurocódigo 1, parte 2 para diversos fatores de ventilação e, com uma carga de incêndio de 200 MJ/m² (Kaefer & Silva, 2003).

Figura 2.4 - Esquema de incêndio localizado e descrição do incêndio Hasemi e Heskestad, respetivamente (NP EN 1991-1-2, 2010).

Figura 2.5-Vista esquemática de um modelo de duas e uma zona respetivamente(Cadorin et al, 2001).

Capítulo 3

Figura 3.1 – Compartimento da modelação experimental de incêndio.

Figura 3.2 – Geometria da cobertura e do pavimento do compartimento interior e exterior.

Figura 3.3 – Geometria das paredes 2 e 4 do compartimento interior e exterior.

Figura 3.4 – Geometria da parede 1 do compartimento interior e exterior.

Figura 3.5 – Geometria da parede 3 do compartimento interior e exterior.

Figura 3.6 - Disposição carga incêndio.

Figura 3.7 – Solução construtiva adotada para o ensaio da Parede 1 e 3 respetivamente.

Figura 3.8 – Solução construtiva adotada para o ensaio da Parede 2 e 4 respetivamente.

Figura 3.9 – Soluções construtivas adotadas para o pavimento e para o teto, respetivamente.

Figura 3.10 – Solução construtiva 1 adotadas para o ensaio do teto.

Figura 3.10 – Solução construtiva 2 adotadas para o ensaio do teto.

Figura 3.12 – Distribuição dos termopares na parede 1

Figura 3.13 – Distribuição dos termopares na parede 3

Figura 3.14 – Distribuição dos termopares na parede 2.

Figura 3.15 – Distribuição dos termopares na parede 4.

Figura 3.16 – Distribuição dos termopares das verticais 1 e 2.

Figura 3.17 – Distribuição dos termopares no teto.

Figura 3.18 – Temperaturas máximas da modelação experimental da parede 1, no ensaio 1.

Figura 3.19 – Temperaturas máximas da modelação experimental da parede 3, no ensaio 1.

Figura 3.20 – Temperaturas máximas da modelação experimental da parede 2, no ensaio 1.

Figura 3.21 – Temperaturas máximas da modelação experimental da parede 4, no ensaio 1.

Figura 3.22 – Temperaturas máximas da modelação experimental nas verticais, no ensaio 1.

Figura 3.23 – Temperaturas máximas da modelação experimental no teto, no ensaio 1.

Figura 3.24 – Temperaturas máximas da modelação experimental da parede 1, no ensaio 2.

Figura 3.25 – Temperaturas máximas da modelação experimental da parede 3, no ensaio 2.

Figura 3.26 – Temperaturas máximas da modelação experimental da parede 2, no ensaio 2

Figura 3.27 – Temperaturas máximas da modelação experimental da parede 4, no ensaio 2

Figura 3.28 – Temperaturas máximas da modelação experimental nas verticais, no ensaio 2.

Figura 3.29 – Temperaturas máximas da modelação experimental no teto, no ensaio 2.

Capítulo 4

Figura 4.1 – Compartimento da modelação numérica de incêndio.

Figura 4.2 – Interface gráfica inicial, do programa Ozone V2.2.2.

Figura 4.3 – Interface do compartimento, no programa Ozone V2.2.2.

Figura 4.4 – Interface gráfica do menu do fogo, no modelo em estudo, do programa Ozone V2.2.2.

Figura 4.5 - Interface gráfica do menu das propriedades da envolvente, no modelo em estudo, do programa Ozone V2.2.

Figura 4.6 – Interface gráfica dos parâmetros do modelo em estudo, no programa Ozone V2.2.2.

Figura 4.7 – Interface gráfica da estratégia do modelo em estudo, no programa Ozone V2.2.2.

Figura 4.8 – Interface gráfica inicial do ambiente da simulação, no programa CFAST V6.2.1

Figura 4.9 – Interface gráfica da geometria do compartimento, no programa CFAST V6.2.1.

Figura 4.10 – Interface gráfica das aberturas do compartimento, no programa CFAST V6.2.1.

Figura 4.11 – Interface gráfica do modelo de combustão do incêndio utilizado no programa CFAST V6.2.1.

Figura 4.12 Interface gráfica da taxa de libertação de calor pré-defenida, no programa CFAST V6.2.1.

Figura 4.13 – Interface gráfica inicial, do modelo em estudo, no Pyrosim V5.5.3.

Figura 4.14 – Interface gráfica do menu de criação da malha, do modelo em estudo, no Pyrosim V5.5.3.

Figura 4.15 – Interface gráfica do modelo em estudo, no Pyrosim V5.5.3.

Figura 4.16 – Interface gráfica da malha do modelo em estudo, no Pyrosim V5.5.3.

Figura 4.17 – Interface gráfica do menu das propriedades térmicas dos materiais, do modelo em estudo, no programa Pyrosim 5.3.1.

Figura 4.18 – Interface gráfica do menu do comportamento de pirólise dos materiais, do modelo em estudo, no programa Pyrosim 5.3.1

Figura 4.19 – Interface gráfica do menu de criação das superfícies, do modelo em estudo, no Pyrosim 5.3.1, com os respetivos valores utilizados.

Figura 4.20 – Interface gráfica do menu das características dos dispositivos (termopares e medidores de fluxo de calor) utilizados, no modelo em estudo, no programa Pyrosim 5.3.1.

Figura 4.21 – Interface gráfica dos menus de definição dos parâmetros da simulação utilizados no modelo em estudo, no programa Pyrosim 5.3.1.

Figura 4.22 – Interface gráfica das condições fronteira do compartimento aos 18,5 minutos.

Figura 4.23 – Temperaturas máximas da modelação numérica da parede 1, no FDS.

Figura 4.24 – Temperaturas máximas da modelação numérica da parede 3, no FDS.

Figura 4.25 – Temperaturas máximas da modelação numérica da parede 2, no FDS.

Figura 4.26 – Temperaturas máximas da modelação numérica da parede 4, no FDS.

Figura 4.27 – Temperaturas máximas da modelação numérica no teto, no FDS.

Figura 4.28 – Temperaturas máximas da modelação numérica nas verticais, no FDS.

Anexo A

Figura A.1 – *Output* gráfico das temperaturas no CFAST V6.2.1, aos 300s.

Figura A.2 – *Output* gráfico das temperaturas no CFAST V6.2.1, aos 600s.

Figura A.3 – *Output* gráfico das temperaturas no CFAST V6.2.1, aos 900s.

Figura A.4 – *Output* gráfico das temperaturas no CFAST V6.2.1, aos 2000s.

Figura A.5 – *Output* gráfico das temperaturas no CFAST V6.2.1, aos 2300s.

Figura A.6 – *Output* gráfico das temperaturas no CFAST V6.2.1, aos 2600s.

Anexo B

Figura B.1 – *Output* gráfico do *Slice* X=1,72m aos 150s.

Figura B.2 – *Output* gráfico do *Slice* X=1,72m aos 300s.

Figura B.3 – *Output* gráfico do *Slice* X=1,72m aos 450s.

Figura B.4 – *Output* gráfico do *Slice* X=1,72m aos 600s.

Figura B.5 – *Output* gráfico do *Slice* X=1,72m aos 900s.

Figura B.6 – *Output* gráfico do *Slice* X=1,72m aos 1050s.

Figura B.7 – *Output* gráfico do *Slice* X=1,72m aos 1200s.

Figura B.8 – *Output* gráfico do *Slice* X=1,72m aos 1450s.

Figura B.9 – *Output* gráfico do *Slice* X=3,03m aos 150s.

Figura B.10 – *Output* gráfico do *Slice* X=3,03m aos 300s.

Figura B.11 – *Output* gráfico do *Slice* X=3,03m aos 450s.

Figura B.12 – *Output* gráfico do *Slice* X=3,03m aos 600s.

Figura B.13 – *Output* gráfico do *Slice X=3,03m* aos 900s.

Figura B.14 – *Output* gráfico do *Slice X=3,03m* aos 1050s.

Figura B.15 – *Output* gráfico do *Slice X=3,03m* aos 1200s.

Figura B.16 – *Output* gráfico do *Slice X=3,03m* aos 1450s.

Anexo C

Figura C.1 – *Output* gráfico das temperaturas máximas, na solução construtiva do ensaio 1.

Figura C.2 – *Output* gráfico das temperaturas máximas, na solução construtiva do ensaio 2.

Anexo D

Figura D.1 – Fotografia 1 da modelação experimental de compartimentação.

Figura D.2 – Fotografia 2 da modelação experimental de compartimentação.

Figura D.3 – Fotografia 3 da modelação experimental de compartimentação.

Figura D.4 – Fotografia 1 da modelação experimental de compartimentação.

Figura D.5 – Fotografia 1 da modelação experimental de compartimentação.

Figura D.6 – Fotografia 1 da modelação experimental de compartimentação.

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Capítulo 3

Gráfico 3.1 - Evolução das temperaturas da modelação experimental no compartimento, do ensaio 1.

Gráfico 3.2 - Evolução das temperaturas da modelação experimental na parede 1, do ensaio 1.

Gráfico 3.3 - Evolução das temperaturas da modelação experimental na parede 3, do ensaio 1.

Gráfico 3.4 - Evolução das temperaturas da modelação experimental na parede 2, do ensaio 1.

Gráfico 3.5 - Evolução das temperaturas da modelação experimental na parede 4, do ensaio 1.

Gráfico 3.6 - Evolução das temperaturas da modelação experimental nas verticais, do ensaio 1.

Gráfico 3.7 - Evolução das temperaturas da modelação experimental no teto, do ensaio 1.

Gráfico 3.8 - Evolução das temperaturas da modelação experimental no compartimento, do ensaio 2.

Gráfico 3.9 - Evolução das temperaturas da modelação experimental no compartimento, do ensaio 2/ensaio 1.

Gráfico 3.10 - Evolução das temperaturas experimental na parede 1, do ensaio 2.

Gráfico 3.11 - Evolução das temperaturas experimental na parede 3, do ensaio 2.

Gráfico 3.12 - Evolução das temperaturas experimental na parede 2, do ensaio 2.

Gráfico 3.13 - Evolução das temperaturas da modelação experimental na parede 4, do ensaio 2.

Gráfico 3.14 - Evolução das temperaturas da modelação experimental, nas verticais, do ensaio 2.

Gráfico 3.15 - Evolução das temperaturas da modelação experimental no teto, do ensaio 2.

Capítulo 4

Gráfico 4.1 - Taxa de libertação do modelo de incêndio localizado.

Gráfico 4.2 - *Output* do Modelo de incêndio localizado.

Gráfico 4.3 - Evolução das temperaturas das curvas de incêndio paramétrica em relação ao ensaio 1.

Gráfico 4.4 - Evolução das temperaturas das curvas de incêndio paramétrica em relação ao ensaio 2.

Gráfico 4.5 - Evolução das temperaturas do modelo de uma zona do programa OZone V2.2/Ensaio 1.

Gráfico 4.6 - Evolução das temperaturas do modelo de duas zonas do programa OZone V2.2/Ensaio 1.

Gráfico 4.7- Evolução das temperaturas do modelo de duas zonas do programa OZone V2.2/Ensaio 2.

Gráfico 4.8- Evolução das temperaturas do modelo de duas zonas do programa OZone V2.2/Ensaio 2.

Gráfico 4.9 - Evolução das temperaturas do modelo de duas zonas do programa CFast V6.2/Ensaio 1.

Gráfico 4.10 - Evolução das temperaturas do modelo de duas zonas do programa CFast V6.2.1/Ensaio 2.

Gráfico 4.11 - Evolução das temperaturas da modelação numérica do compartimento, no FDS.

Gráfico 4.12 - Evolução das temperaturas da modelação experimental na parede 1, no FDS.

Gráfico 4.13 - Evolução das temperaturas da modelação experimental na parede 3, no FDS.

Gráfico 4.14 - Evolução das temperaturas da modelação experimental na parede 2, no FDS.

Gráfico 4.15 - Evolução das temperaturas da modelação experimental na parede 4, no FDS.

Gráfico 4.16 - Evolução das temperaturas da modelação experimental no teto, no FDS.

Gráfico 4.17 - Evolução das temperaturas da modelação experimental nas verticais, no FDS.

Gráfico 4.18 – Evolução das temperaturas médias, na solução construtiva do ensaio 1

Gráfico 4.19 – Evolução das temperaturas médias, na solução construtiva do ensaio 2

SIMBOLOGIA

A – Área do compartimento de incêndio.

A_f – Área do pavimento do compartimento de incêndio.

A_{fi} – Área do incêndio.

A_h – Área das aberturas horizontais no teto do compartimento.

$A_{h,v}$ – Área total das aberturas na superfície envolvente.

A_j – Área da superfície envolvente j , não incluindo as aberturas

A_t – Área total da superfície envolvente.

A_v – Área total das aberturas verticais em todas as paredes.

E_g – Energia interna do gás.

H – Distância entre a origem do incêndio e o tet

H_u – Poder calorífico efetivo, incluindo o teor de água.

L_f – Comprimento da chama segundo o eixo.

L_h – Comprimento horizontal da chama.

$M_{k,i}$ – Quantidade de material combustível i .

O – Fator de abertura do compartimento de incêndio ($O = A_v \text{ heq} / A_t$).

O_{lim} – Fator de abertura reduzido no caso de incêndio controlado por combustível.

Q – Taxa de libertação de calor do incêndio.

$Q_{fi,k}$ – Valor característico da carga de incêndio.

$Q_{fi,k,i}$ – Valor característico da carga de incêndio do material i .

Q_D – Taxa de libertação de calor relacionado com o diâmetro D do incêndio localizado.

Q_H – Taxa de libertação de calor relacionado com a altura H do compartimento.

Q_{max} – Taxa máxima de libertação de calor.

Q_{in} – Taxa de libertação de calor que entra pelas aberturas por meio do fluxo de gás.

Q_{out} – Taxa de libertação de calor perdido pelas aberturas por meio do fluxo de gás.

Q_{rad} – Taxa de libertação de calor perdido por radiação pelas aberturas.

Q_{wall} – Taxa de libertação de calor perdido por radiação e por convecção para as superfícies do compartimento.

RHR_f – Taxa máxima de libertação de calor por metro quadrado.

T – Temperatura [K].

T_{amb} – Temperatura ambiente [K].

T_0 – Temperatura inicial (= 293 [K]).

T_f – Temperatura do compartimento de incêndio [K].

T_g – Temperatura do gás [K].

b – Absortividade térmica da superfície envolvente total ($b = (\rho c \lambda)$).

-
- b_i – Absortividade térmica da camada i de uma superfície envolvente.
 b_j – Absortividade térmica de uma superfície envolvente j .
 c – Calor específico.
 heq – Média ponderada dos valores da altura das aberturas em todas as paredes.
 h_i – Altura da abertura i .
 \dot{h} – Fluxo de calor por unidade de área.
 \dot{h}_{net} – Fluxo de calor efetivo por unidade de área.
 \dot{h}_{tot} – Fluxo de calor total por unidade de área.
 m – Massa.
 \dot{m}_{min} – Taxa de entrada de massa de gás através das aberturas.
 \dot{m}_{out} – Taxa de saída de massa de gás através das aberturas.
 q_f – Carga de incêndio por unidade de área do pavimento.
 $q_{f,d}$ – Valor de cálculo da densidade de carga de incêndio por unidade de área do pavimento.
 $q_{f,k}$ – Valor característico da densidade de carga de incêndio por unidade de área do pavimento.
 q_t – Carga de incêndio por unidade de área da envolvente.
 $q_{t,d}$ – Valor de cálculo da densidade de carga de incêndio por unidade de área da envolvente.
 $q_{t,k}$ – Valor característico da densidade de carga de incêndio por unidade de área da envolvente.
 s_i – Espessura da camada i .
 s_{lim} – Espessura limite.
 t – Tempo.
 t_{lim} – Instante de tempo em que ocorre a temperatura máxima dos gases no caso de incêndio controlado.
 t_{max} – Instante de tempo em que ocorre a temperatura máxima dos gases
 z – Altura.
 z_0 – Origem virtual da altura z .
 z' – Posição vertical da fonte de calor virtual.
 Φ – Fator de vista.
 Γ – Fator de conversão do tempo, função do fator de abertura O e da absortividade térmica b .
 Γ_{lim} – Fator de conversão do tempo, função do fator de abertura O_{lim} e da absortividade térmica b .
 Θ – Temperatura.
 $\Theta_{cr,d}$ – Valor de cálculo da temperatura crítica dos materiais.
 Θ_d – Valor de cálculo da temperatura dos materiais.
 Θ_g – Temperatura dos gases no compartimento de incêndio, ou na proximidade do elemento.
 Θ_m – Temperatura da superfície do elemento.
 Θ_{max} – Temperatura máxima.
 Θ_r – Temperatura de radiação efectiva do ambiente de incêndio.
 λ – Condutibilidade térmica.
-

ρ – Massa volúmica.

ρ_g – Massa volúmica do gás interior.

σ – Constante de Stephan Boltzmann.

ABREVIATURAS

CDF - *Computational Fluid Dynamics*

FDS - *Fire Dynamics Simulator*

ODE - Ordinary differential equation

LES- *Large Eddy Simulation*

DNS- *Direct Numerical Simulation*

NIST - *National Institute of Standards and Technology*

FEA - *Finite Element Analysis*

RTE - *Radiate Transport Equation*

AFFM – *Active fire fighting Measures*

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do tema

Ao longo dos anos têm havido um interesse considerável dos efeitos do fogo em elementos estruturais, incitando a necessidade de uma boa compreensão do comportamento térmico em elementos estruturais, em situação de incêndio. Uma análise detalhada do incêndio em compartimentos é realizada nesta dissertação, revelando numerosas lacunas de conhecimento e incertezas dentro das metodologias da análise térmica que são geralmente usadas por engenheiros e, que são destinadas na realização de projetos de construção.

A temperaturas elevadas, a resistência e rigidez dos elementos estruturais diminui, e a capacidade de suporte de uma força, do respetivo elemento estrutural durante um incêndio é afetada diretamente, provocando uma redistribuição dos esforços, a partir do elemento estrutural em causa, para outros membros estruturais, que pode levar a um colapso precoce de um elemento estrutural ou, de toda a estrutura. Este documento apresenta vários métodos para prever o efeito de aquecimento e arrefecimento num elemento estrutural, em cenário de incêndio real. Através de ensaios experimentais e de modelações numéricas e, mais recentemente com o aparecimento de normas por todo o mundo, recorrendo a métodos simplificados criados de forma a agilizar todo o processo. De entre essas normas há que destacar os Eurocódigos, adotados no presente documento.

A análise térmica é efetuada por modelos de cálculo simplificados, modelos de cálculo avançados e, através de ensaios experimentais. Os modelos simplificados são baseados em formulações indicadas pelo Eurocódigo 1, parte 2, o modelo simplificado pode garantir a segurança estrutural, mas não garante a economia do projeto de dimensionamento, uma vez que nestes modelos a temperatura é considerada constante em toda a área do elemento estrutural. Nestes métodos, partindo da curva temperatura - tempo dos gases quentes resultantes do incêndio, é possível determinar-se a temperatura no elemento estrutural, com base nas expressões de transferência de calor. Em relação aos métodos numéricos, estes implicam programas de computador, em que o rigor dos resultados do respetivo programa depende da calibração dos dados de entrada efetuados.

Este estudo expõe modelos numéricos e experimentais utilizados para investigar o comportamento de uma coluna de aço em situação de incêndio. A utilização de modelos numéricos e experimentais permite uma validação do output da modelação numérica através dos dados da modelação experimental.

Na análise do procedimento de cálculo, no desenvolvimento do incêndio em compartimentos, de maneira a realizar uma análise térmica, no respetivo elemento estrutural utilizam-se duas abordagens diferentes, uma abordagem prescritiva e uma abordagem baseada no desempenho. A abordagem prescritiva é baseada nas curvas de incêndio nominais. A abordagem baseada no desempenho, refere-se a ações térmicas baseadas em parâmetros físicos, em que são abordados métodos de cálculo de modelos térmicos simplificados e avançados. As duas abordagens utilizadas, vão ter uma aplicação direta na análise do comportamento térmico, dos elementos estruturais em situação de incêndio.

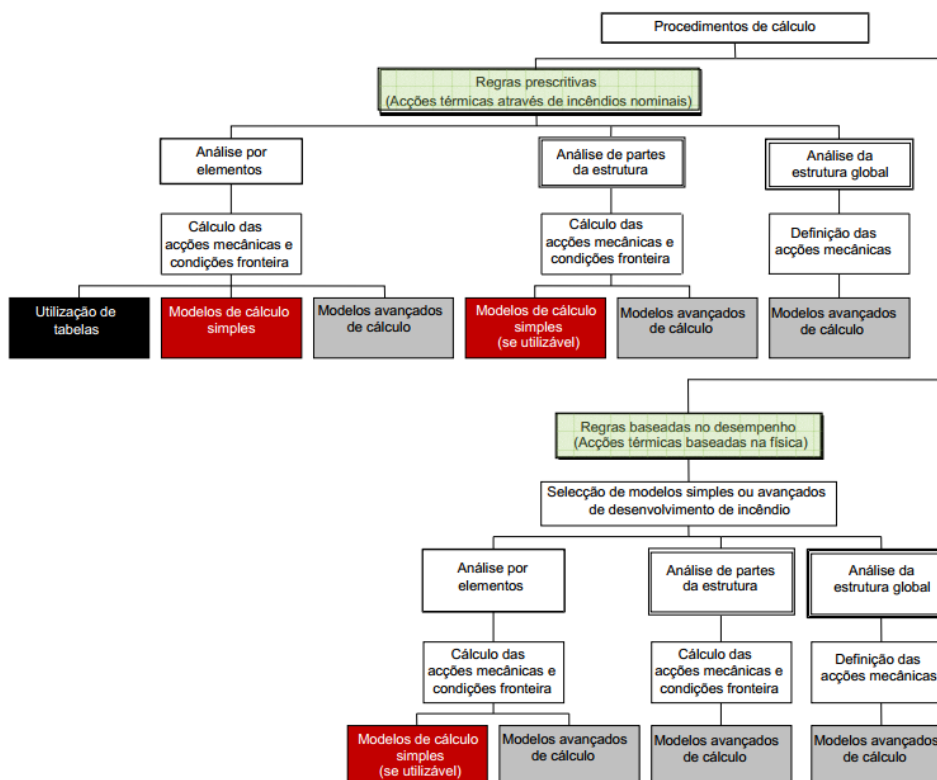


Figura 1.1 – Métodos de cálculo alternativos.

A análise dos respetivos métodos é essencial para se saber quais os mais eficazes em situação de projeto de modo a minimizar custos e viabilizar obras, além de oferecer igual aceitação da comunidade científica, inclusive com aprovação dos órgãos competentes.

1.2. Objetivos

O principal objetivo da dissertação é que esta funcione como uma ferramenta para os estudantes de engenharia e para engenheiros, que pretendam estudar a influência do modelo de cálculo de desenvolvimento de incêndio em compartimentos, na resistência ao fogo de soluções construtivas e, que desejam efetuar uma correta calibração dos respetivos modelos de cálculo. Um dos pontos principais deste documento é apresentar e avaliar ferramentas para a avaliação do desempenho térmico de elementos estruturais em situação de incêndio. As ferramentas utilizadas na avaliação, são modelos de cálculo simplificados e avançados e, modelações experimentais. Esta tese descreve como obter o modelo numérico, verificar a sua correta utilização, criar dados de entrada de forma adequada, e analisar o output da simulação, de modo, a se poder efetuar uma comparação do output dos resultados numéricos, com o output dos resultados experimentais.

Uma modelação detalhada do incêndio só pode ser alcançado através de um programa computacional de dinâmica de fluidos e através de modelos de elementos finitos, no dimensionamento de elementos estruturais em situação de incêndio. A integração de ambos modelos implica uma adequada compreensão das condições fronteira. Este trabalho irá analisar a condição de limite entre o meio gasoso gerado pelo fogo e o meio sólido, representada pelos elementos estruturais do compartimento.

1.3. Metodologia

Inicialmente realizou-se uma pesquisa bibliográfica intensiva e detalhada com o objetivo de recolher informação acerca das curvas nominais, das curvas de incêndio paramétricas e do incêndio localizado, de modo, a realizar análises térmicas, através de métodos simplificados, dos respetivos Eurocódigos. Em relação aos métodos avançados recolheu-se informação dos modelos de zona, modelos de campo e dos modelos de elementos finitos Para uma melhor compreensão, foi incluindo os algoritmos usados e as suposições feitas pelos respetivos métodos.

Numa segunda etapa é apresentado o ensaio experimental realizado, de modo a se conhecer as características do compartimento, do incêndio e é exposto os resultados experimentais.

A terceira etapa consiste na discretização dos modelos cálculos avançados (CFAST V6.2.1, OZone V2.2.2, Pyrosim V2012.1 como pré-Processador do FDS V5.5.3 e, do Abaqus V6.10) e, da respetiva calibração realizada de modo a se obter a evolução da temperatura dos gases em função do tempo, que será utilizada no dimensionamento dos elementos estruturais

Na quarta e última etapa procedeu-se ao tratamento e análise dos resultados obtidos no estudo, comparando os resultados obtidos pela modelação numérica, com a modelação experimental.

1.4. Estrutura da tese

A tese de mestrado é composta por sete capítulos, que são baseados na respetiva modelação experimental e numérica, de seguida há uma pequena descrição do conteúdo de cada capítulo.

No primeiro capítulo apresenta-se o tema da dissertação através de uma introdução, enquadramento do tema, objetivos do estudo, metodologia e estrutura da dissertação.

No segundo capítulo expõe-se o estado da arte, fazendo referência aos diferentes modelos térmicos simplificados e avançados existentes, de maneira a elucidar o modo de funcionamento dos respetivos modelos.

No terceiro capítulo apresenta-se o ensaio de incêndio de escala real, realizado com o objetivo de produzir dados da evolução da temperatura no compartimento obtidos pelos termopares. Este capítulo permite conhecer a geometria do compartimento, a carga de incêndio, os materiais do ensaio e, a instrumentação do ensaio no compartimento. É ainda apresentado, no respetivo capítulo, os resultados experimentais, onde é possível analisar a evolução das curvas de incêndio nas paredes, no teto e no interior do compartimento

No quarto capítulo é apresentado uma descrição de cada um dos programas que, permitem realizar modelações numéricas avançadas, uma vez que a modelação numérica de elementos estruturais em situação de incêndio é efetuada através do auxílio de programas de dimensionamento em situação de incêndio que permitem uma análise do comportamento ao fogo dos respetivos elementos estruturais e das temperaturas dos gases a que os elementos estão sujeitos em situação de incêndio. É indicado o âmbito de aplicação e os dados de entrada dos programas CFAST V6.2.1, OZone V2.2.2, Pyrosim V5.3.1 como pré-Processador do FDS V5.5.1 e, Abaqus V6.10.1. É ainda apresentado, no respetivo capítulo, os resultados numéricos da respetiva modelação numérica,

No quinto capítulo apresentam-se as principais conclusões e trabalhos futuros, após a realização da modelação experimental e numérica. Em que é mencionado possíveis desenvolvimentos de investigação futuros de forma a melhorar os conhecimentos na área dos modelos térmicos.

No sexto capítulo é apresentado as referências bibliográficas utilizadas para a realização do presente documento.

No último capítulo é apresentado os anexos, que complementam a informação apresentada nos capítulos anteriores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo expõe-se o estado da arte, fazendo uma discretização dos diferentes modelos térmicos simplificados e avançados existentes, de maneira a elucidar o modo de funcionamento dos respetivos modelos. Na revisão bibliográfica da presente tese é realizado uma caracterização das curvas de incêndio nominais, das curvas de incêndio paramétricas, dos incêndios localizados, dos modelos de zona e dos modelos de campo.

2.1. Generalidades do incêndio natural

Para que haja incêndio é necessária a existência simultânea de 3 fatores essenciais: uma fonte de calor, um combustível e o comburente, normalmente o oxigénio. O início do incêndio dá-se quando o combustível esta suficientemente quente para entrar em combustão com o oxigénio.(Costa & Silva, 2003)

No modelo de incêndio natural pode-se observar quatro fases: fase de ignição, fase de propagação, fase de desenvolvimento pleno e a fase de extinção ou de arrefecimento.

Na fase de ignição as temperaturas permanecem baixas, não tendo nenhuma influência no comportamento estrutural dos edifícios. A partir do momento em que é atingido um nível suficiente de radiação, os materiais combustíveis entram em ignição envolvendo todo o compartimento abrangendo a zona mais crítica do incêndio.

A fase de propagação é a fase a partir da qual o fogo se alastra por radiação ou convecção, provocando um aumento gradual da temperatura do ambiente e, inicia-se a formação de uma coluna de gás aquecido, a pluma, sobre o combustível que queima. Os gases aquecidos começam a elevar-se e, a propagar para os lados. Quando os gases atingem o teto do compartimento, ocorre um deslocamento, até ser alcançado as paredes do compartimento, a partir desse instante a concentração do gás começa a crescer, provocando o preenchendo do ambiente, de cima para baixo Nesta fase de crescimento, o oxigênio contido no ar está relativamente normalizado e o fogo produz vapor de água, dióxido de carbono, monóxido de carbono e outros gases. Em que maior parte do calor é consumido pelo próprio aquecimento dos combustíveis presentes e, nesta fase, a temperatura do ambiente está pouco acima do normal. No entanto, o calor é gerado e evolui com o aumento do fogo e a fase de crescimento matem-se, enquanto houver combustível suficiente e oxigênio disponível (Marcos, 2005) .

O *flashover* representa a passagem da fase de propagação para a fase de desenvolvimento, na evolução do crescimento do incêndio. Durante esta fase, o ar, que contém oxigénio, é arrastado para dentro do ambiente pelo efeito da convecção, uma vez que o ar quente sobe e sai do ambiente. Este facto força a entrada de ar fresco pelas aberturas nos pontos mais baixos. Os gases aquecidos espalham-se pelo ambiente e, de cima para baixo, forçam o ar frio a permanecer junto á zona mais baixa e, eventualmente, causam a ignição dos combustíveis nos níveis mais altos do ambiente. Na fase de desenvolvimento pleno ocorre a combustão do material combustível, em que ocorre pouca variação do comportamento do de incêndio. Durante este período de tempo, os combustíveis, que ardem no ambiente libertam a máxima quantidade de calor possível, sendo o calor irradiado pelos materiais combustíveis presentes, os quais produzem grandes volumes de gases e fumo. Este calor provoca uma diminuição dos combustíveis, expondo os seus componentes mais básicos, desta maneira, é libertado os vapores dos combustíveis. O calor libertado e os gases da combustão se são produzidos, dependem do número e do tamanho das aberturas da ventilação do ambiente em situação de incêndio (Vidal, 2006).

No final do incêndio ocorre a fase de extinção em que há uma diminuição progressiva das temperaturas e, da taxa de libertação de calor, quer seja por falta de combustível ou de oxigénio, as brasas geradas pela combustão levam a uma diminuição da temperatura gradual (Vidal, 2006).

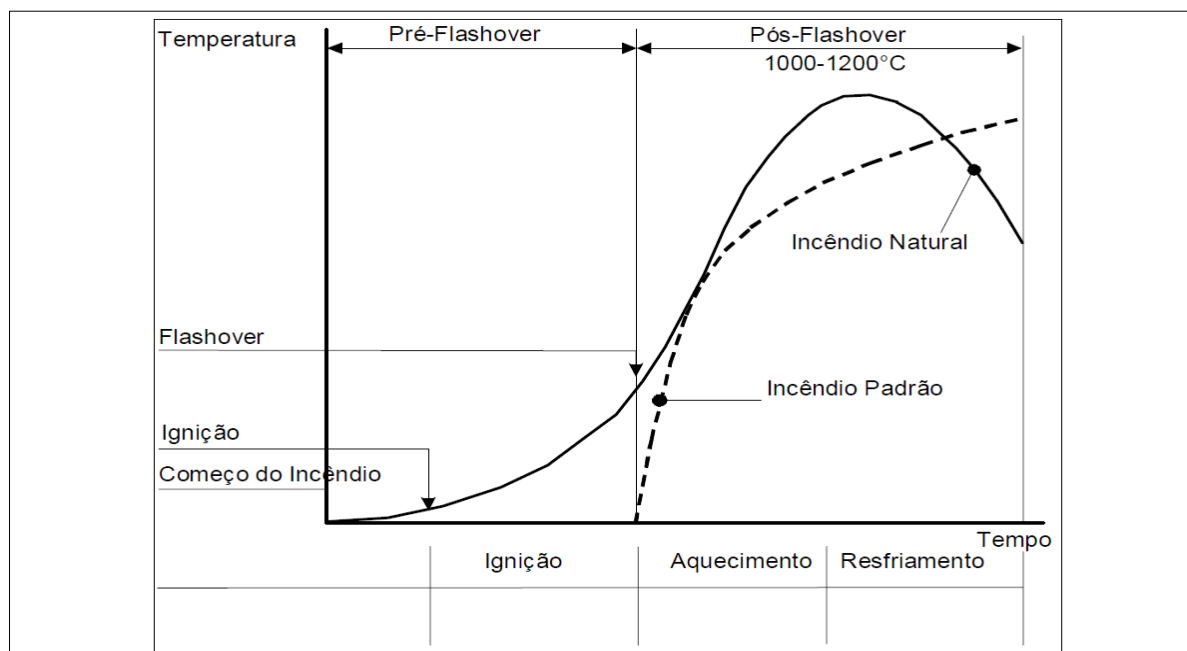


Figura 2.1 - Fases de um incêndio natural comparado ao incêndio-padrão (ISO 834, 1994).

2.2. Curvas de incêndio nominais

As curvas de incêndio nominais são curvas convencionais que são definidas por uma fórmula simples e, que não dependem da dimensão ou tipo de edifícios. As curvas de incêndio nominais são modelos de incêndio concebidos para análises experimentais, que se baseiam na hipótese de a temperatura dos gases quentes no compartimento em chamas obedecer às curvas nominais (Costa & Silva, 2003). As curvas de incêndio nominais têm simplesmente um ramo ascendente como se pode verificar pela figura 2.2, com o aumento da temperatura em relação ao tempo, independente da Ação da carga de incêndio e do grau de ventilação do compartimento e das propriedades térmicas dos materiais da compartimentação. Logo, as curvas-padrão não patenteiam uma situação real de incêndio, uma vez que as características do cenário do incêndio podem variar de um compartimento para o outro, apesar disso, elas são usadas para facilitar os ensaios em série de elementos construtivos para avaliar a sua resistência a fogo (Costa, 2002; Costa & Silva, 2003; Silva, 2004).

As limitações das curvas de incêndios nominais devem-se ao facto de não permitir a previsão do desempenho de elementos construtivos em incêndios reais, longe do controle laboratorial das condições de ensaio, as curvas de incêndio nominais admitem uma análise comparativa de resistência ao fogo entre elementos semelhantes, servindo como indicadores qualitativos da resistência em função do grau de aquecimento (Costa & Silva, 2006).

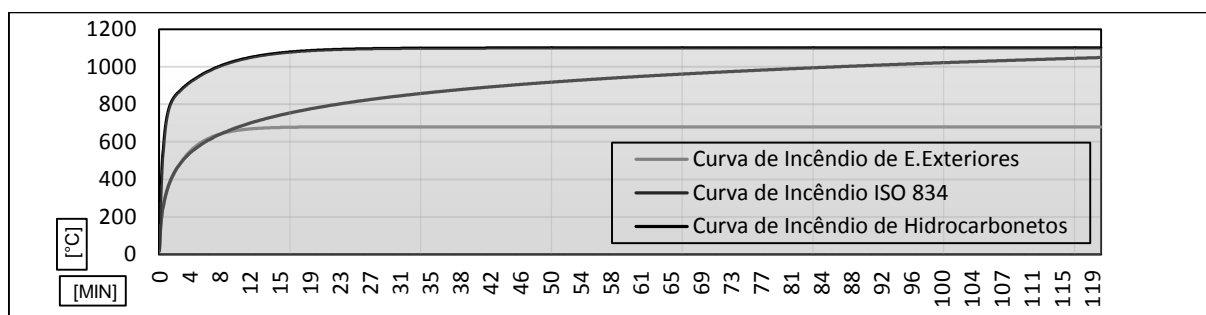


Figura 2.2 – Curvas de incêndio nominais (1991-1-2, 2010).

2.2.1. Curvas de incêndio padrão

De acordo com LWF (2000) em 1961, a *Organisation for International Standards* prepararam um conjunto de especificações para ensaios de resistência ao fogo, que deram origem ao texto ISO R834, foi primeira versão da norma ISO 834, que propunha uma curva temperatura-tempo, resultante de uma uniformização entre as curvas americana ASTM E119 (1918) e britânica BS 476 (1932). Em 1975, a *International Organization for Standardization* publicou a norma ISO 834 “*Fire-Resistance Tests – Elements of Building Construction*”, obtendo a equação. [2.2.1] para estimar a temperatura em função do tempo do incêndio padrão (Costa & Silva, 2006)

A equação [2.1] é utilizada em ensaios de laboratório bem como em projetos analíticos e ou numéricos em que os elementos de um compartimento estejam submetidos as seguintes condições térmicas. As hipóteses e condições do cenário de incêndio (fator de ventilação, $v = 0,04 \text{ m}^{1/2}$, fator térmico de compartimentação, $b = 1160 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2} \cdot ^\circ\text{C})$) da curva ISO 834 são similares àquelas que deram origem ao ramo ascendente da curva, recomendada pela norma sueca de 1967, SBN/1967 (Silva, 1997).

A curva de incêndio padrão, ISO 834 (1991-1-2, 2010) é obtida pela seguinte expressão:

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

2.2.2. Curvas de incêndio de hidrocarbonetos

As curvas de incêndios de materiais hidrocarbonetos são empregadas no projeto de túneis e ambientes industriais, onde a carga de incêndio é composta por hidrocarbonetos. A partir de 1970, as indústrias petroquímicas começaram a investigar as condições nas quais os incêndios por materiais inflamáveis eram produzidos (Ward et al, 1996). Era comum notar o colapso de elementos estruturais de aço quando submetidos a incêndios devido à combustão de derivados de petróleo (Milke et al, 2002). Na década de 80, as curvas temperatura-tempo de hidrocarbonetos conhecidas eram a curva UL 1709 e a curva Mobil ou curva NPD (*Norwegian Petroleum Directorate*), sendo esta última, adotada na maioria das vezes, na Europa. Havendo uma procura por uma uniformização dos procedimentos de ensaios; para diferenciar a curva NPD da curva-padrão para materiais celulósicos, aquela foi designada por “H”, para incêndio de hidrocarbonetos (Ward et al, 1996).

A curva de incêndio de hidrocarbonetos (1991-1-2, 2010) é obtida pela expressão:

$$\Theta_g = 1080 (1 - 0,325 e^{-0,167t} - 0,675 e^{-2,5t}) + 20 [^\circ\text{C}] \quad [2.2]$$

2.2.3. Curvas de incêndio de elementos exteriores

As hipóteses consideradas no cenário de incêndio para o uso da curva de incêndio externo do Eurocódigo 1, parte 2 (1991-1-2, 2010) são: a carga de incêndio do compartimento é constituída de materiais celulósicos e a temperatura da atmosfera exterior, onde a estrutura está localizada, é inferior àquela dentro do compartimento. A curva de incêndio externo é, portanto, apropriada para o projeto de elementos de fachada de edifícios usuais; devido às aberturas do compartimento, as chamas podem propagar-se para elementos exteriores.

A curva de incêndio para elementos exteriores é fornecida pela seguinte expressão:

$$\Theta_g = 660 (1 - 0,687 e^{-0,32t} - 0,313 e^{-3,8t}) + 20 [^\circ\text{C}] \quad [2.3]$$

2.3. Modelos de incêndio simplificados

Os modelos de incêndio simplificados utilizados no presente documento foram os modelos das curvas de incêndio paramétrico e os modelos de incêndios localizados, de acordo com o Eurocódigo 1, parte 2 (NP EN, 1991-1-2, 2010). Estes modelos baseiam-se em parâmetros físicos específicos e têm um campo de aplicação limitado em que no caso de incêndios em compartimentos é assumida uma distribuição de temperatura uniforme.

2.3.1. Curvas de incêndio paramétricas

As primeiras análises sobre a evolução das temperaturas em função do tempo, de um incêndio natural compartimentado foram realizados em 1958, pelos investigadores *Kunio Kawagoe* e *K. Odeen*, em trabalhos independentes entre si. Nesses respetivos trabalhos é considerado o equilíbrio térmico entre o calor gerado durante a combustão e o calor dissipado pelas aberturas e, que é absorvido pela envolvente do compartimento em chama. Esse equilíbrio é importante, uma vez que representa a quantidade de gases voláteis que são libertados para a atmosfera, e que depois são queimados como combustível pelo fogo. A taxa de combustão só pode ser quantificada até um determinado limite, depende apenas da ventilação, enquanto a radiação contribui significativamente para o aumento da taxa de combustão do combustível, já que a temperatura eleva-se á quarta potência (Kaefer e Silva, 2003).

O modelo proposto por *Kunio Kawagoe* foi refinado pela norma sueca SBN 1967 (*Swedish Building Regulations*), sendo a primeira norma internacional a permitir o uso de incêndio natural no cálculo da resistência ao fogo de estruturas metálicas. Essa norma apresentava curvas da evolução da temperatura em função do tempo à curva padrão, porém com a inclusão do parâmetro grau de ventilação (Silva, 1999).

A partir de 1975 a norma sueca passa a incluir as curvas obtidas por *Pettersson* e *Thelandersson*. As curvas de evolução de temperatura em função do tempo, que simulam os incêndios naturais compartimentados, que foram determinadas pelos suecos *Pettersson* e *Thelandersson*. Baseadas na equação fundamental do equilíbrio térmico e na expressão desenvolvida por *Kawagoe*. *Pettersson* e *Thelandersson* desenvolveram uma série de curvas para diferentes valores de ventilação e de carga combustível, compatíveis com resultados experimentais (Parkinson, 2001).

Essas curvas foram esboçadas, para diversos valores dos parâmetros de ventilação e carga combustível foram tomadas como base para a norma sueca. Essas mesmas curvas formaram os pilares das normas internacionais principalmente do Eurocódigo 1 (Kaefer e Silva, 2003).

De acordo com o anexo A do Eurocódigo 1, parte 2 (1991-1-2, 2010), as curvas de incêndio seguintes são válidas para compartimentos de incêndio com o máximo de 500 m² de área em

planta, sem aberturas no teto e uma altura máxima de 4 m. Admite-se que a carga de incêndio do compartimento é completamente consumida. O fator de abertura têm de estar compreendido entre 0,02 e 0,20 e o parâmetro b está limitado entre 1.000 e 2.200 J/m²s^{1/2}K. Para o cálculo do fator b , por simplificação, a massa volúmica ρ , o calor específico c e, a condutibilidade térmica λ , da envolvente poderão ser considerados à temperatura ambiente.

O parâmetro fator de abertura fornecido pela equação [2.4.1.1] é obtido pela integração da equação de Bernoulli para diferenças de pressão entre o interior e o exterior do compartimento, variando linearmente em função da posição vertical da abertura.

O fator de abertura contabiliza as aberturas verticais das paredes do compartimento e, quanto maior for o valor do fator de abertura, maior será a ventilação do respetivo compartimento.

$$O = A_v \cdot (h_{eq})^{1/2} / A_t \text{ [m}^{1/2}\text{]} \quad [2.4]$$

O parâmetro b é baseado na teoria da penetração do calor por condução num meio semi-infinito, logo para paredes que apresentem camadas divididas por uma camada de ar, o presente método não é válido, uma vez que, o calor na camada de ar seria transportado por radiação e não por condução.

Para uma superfície envolvente constituída por diferentes camadas de material (b_1 é a camada mais interior da parede e b_2 a camada mais exterior da parede do compartimento), o b deverá ser obtido da seguinte forma: $b = (\rho c \lambda)$.

Para $b_1 < b_2$, $b = b_1$, se $b_1 > b_2$, é calculada uma espessura limite S_{lim} para o material exposto, de acordo com a seguinte expressão:

$$s_{lim} = (3600 \cdot t_{max} \cdot \lambda_1 / (c_1 \cdot \rho))^{1/2} \quad [2.5]$$

Se $s_1 > S_{lim}$, então $b = b_1$, para um $s_1 < S_{lim}$, o parâmetro b é calculado pela seguinte equação:

$$b = (s_1 / S_{lim}) \cdot b_1 + (1 - s_1 / S_{lim}) \cdot b_2 \quad [2.6]$$

Para diferentes fatores b nas paredes, no teto e no pavimento, $b = (\rho c \lambda)$ deverá ser calculado através da seguinte equação:

$$b = (\sum(b_j A_j)) / (A_t - A_v) \quad [2.7]$$

A temperatura máxima, Θ_{\max} na fase de aquecimento ocorre para $t^* = t^*_{\max}$ e, é obtida por:

$$t^*_{\max} = t_{\max} \cdot \Gamma \text{ [h]}, \text{ com } t_{\max} = \max [(0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / O) ; t_{\lim}] \text{ [h]} \quad [2.8]$$

Em que o $q_{t,d}$ representa o valor de cálculo da densidade de carga de incêndio referida à área A_t da superfície envolvente total em que $q_{t,d} = q_{f,d} \cdot A_f / A_t$ [MJ/m²]. Deverão observar-se os seguintes limites: $50 \leq q_{t,d} \leq 1000$ [MJ/m²]; $q_{f,d}$ - valor de cálculo da densidade de carga de incêndio referida à área de superfície do pavimento, A_f [MJ/m²].

Quando $t_{\max} = t_{\lim}$, a temperatura máxima Θ_{\max} na fase de aquecimento é expresso por:

$$t^* = t \cdot \Gamma_{\lim} \text{ [h]}, \text{ com } \Gamma_{\lim} = [O_{\lim} / b]^2 / (0,04/1160)^2 \quad [2.9]$$

O factor de abertura reduzido no caso de incêndio controlado por combustível é obtido por:

$$O_{\lim} = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / t_{\lim} \quad [2.10]$$

Se ($O > 0,04$ e $q_{t,d} < 75$ e $b < 1160$), Γ_{\lim} em tem que ser multiplicado por k e, é obtido por:

$$k = 1 + ((O - 0,04)/(0,04)) \cdot ((q_{t,d} - 75)/75) \cdot ((1160 - b)/1160) \quad [2.11]$$

No caso de uma taxa de crescimento de incêndio lenta, $t_{\lim} = 25$ min; no caso de uma taxa de crescimento de incêndio média, $t_{\lim} = 20$ min e, no caso de uma taxa de crescimento de incêndio rápida, $t_{\lim} = 15$ min.

As curvas de incêndio na fase de aquecimento são obtidas por:

$$\Theta_g = 20 + 1325 (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad [2.12]$$

As curvas de incêndio na fase de arrefecimento são obtidas por:

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 625 (t^* - t^*_{\max} \cdot x) \text{ para } t^*_{\max} \leq 0,5 \quad [2.13]$$

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 250 (3 - t^*_{\max}) (t^* - t^*_{\max} \cdot x) \text{ para } 0,5 < t^*_{\max} < 2 \quad [2.14]$$

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 250 (t^* - t^*_{\max} \cdot x) \text{ para } t^*_{\max} \geq 2 \quad [2.16]$$

Em que o parâmetro x depende do t_{\max} e do t_{\lim} , de acordo com a seguinte expressão:

$$x = 1,0 \text{ se } t_{\max} > t_{\lim}, \text{ ou } x = t_{\lim} \cdot \Gamma / t^*_{\max} \text{ se } t_{\max} = t_{\lim} \quad [2.17]$$

2.3.2. Incêndios localizados

A Ação térmica de um incêndio localizado foi avaliada utilizando as expressões indicadas no Anexo C do Eurocódigo 1 parte 2 (1991-1-2, 2010). É necessário distinguir entre o caso em que a chama não atinge o teto (método Heskestad) e o caso em que o atinge o teto (método de Hasemi).

Em relação á Ação térmica de um incêndio localizado pode ser calculada usando o método de Heskestad. Sendo necessário ter em consideração a altura relativa da chama em relação ao teto. Em que o comprimento das chamas L_f , de um incêndio localizado de acordo com a figura 1.2 é obtido pela expressão:

$$L_f = -1,02 D + 0,0148 Q^{2/5} \text{ [m]} \quad [2.18]$$

Quando a chama não atinge o teto de um compartimento, $L_f < H$ ou, no caso de um incêndio ao ar livre, a temperatura $\Theta(z)$ na pluma ao longo do eixo vertical de simetria da chama é obtida por:

$$\Theta(z) = 20 + 0,25 Q_c^{2/3} (z-z_0)^{5/3} \leq 900 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad [2.19]$$

Em que a origem virtual z_0 do eixo é obtida pela seguinte expressão:

$$z_0 = -1,02 D + 0,00524 Q^{2/5} \text{ [m]} \quad [2.20]$$

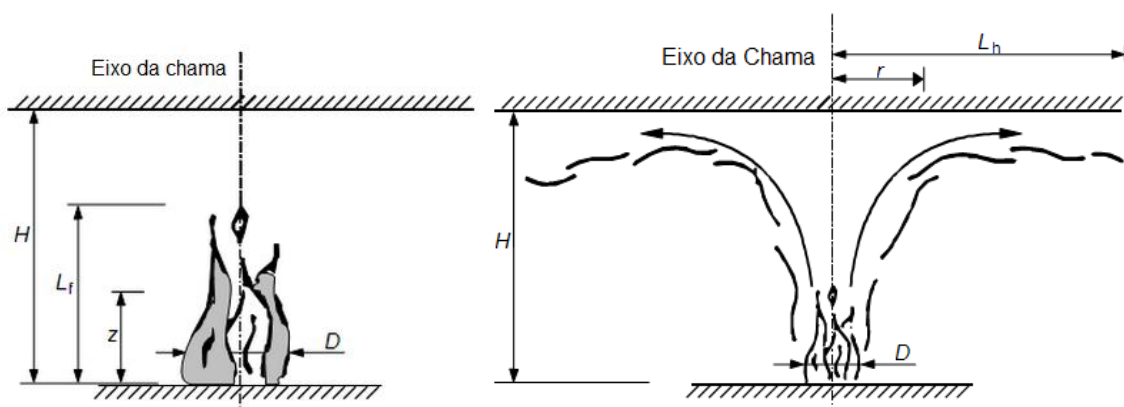


Figura 2.4 - Esquema de incêndio localizado e descrição do incêndio Hasemi e Heskestad, respetivamente (1991-1-2, 2010).

Quando a chama atinge o teto, $L_f \geq H$, utiliza-se método de Hasemi, que é uma forma simples de avaliar o efeito localizado em elementos horizontais localizados sobre o incêndio.

O fluxo de calor \dot{h} [W/m²] recebido por unidade de área da superfície exposta ao fogo ao nível do teto é obtido pelo seguinte algoritmo:

$$\dot{h} = 100\,000 \text{ [W/m}^2\text{]}, \text{ se } y \leq 0,30 \quad [2.21]$$

$$\dot{h} = 136\,300 - 121\,000 \text{ [W/m}^2\text{]}, \text{ se } 0,30 < y < 1,0 \quad [2.22]$$

$$\dot{h} = 15\,000 y^{-3,7} \text{ [W/m}^2\text{]}, \text{ se } y \geq 1,0 \quad [2.23]$$

O respetivo parâmetro y , do fluxo de calor h [W/m²] é obtido pela seguinte expressão:

$$y = (r + H + Z') / (L_h + H + Z') \text{ [m]} \quad [2.24]$$

O comprimento horizontal da chama, L_h [m], da Figura C.2, é obtido pela seguinte fórmula:

$$L_h = (2,9 H (Q_H^*)^{0,33}) - H \text{ [m]} \quad [2.25]$$

A taxa de libertação de calor, Q_H^* , relacionada com altura H do compartimento é obtida por:

$$Q_H^* = Q / (1,11 \cdot 10^6 \cdot H^{2,5}) \text{ [-]} \quad [2.26]$$

A posição vertical da fonte de calor virtual, z' [m], é obtido pela seguinte formulação:

$$z' = 2,4D (Q_D^{*2/5} - Q_D^{*2/3}) \text{ [m]}, \text{ para } Q_D^* < 1,0 \quad [2.27]$$

$$z' = 2,4D (1,0 - Q_D^{*2/5}) \text{ [m]}, \text{ para } Q_D^* \geq 1,0 \quad [2.28]$$

A taxa de libertação de calor, Q_D^* , relacionada com o diâmetro D do incêndio é expresso por:

$$Q_D^* = Q / (1,11 \cdot 10^6 \cdot D^{2,5}) \text{ [-]} \quad [2.29]$$

O fluxo de calor efetivo, h_{net} recebido pela unidade de área da superfície exposta ao fogo ao nível do teto é obtido por:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h} - \alpha_c \cdot (\Theta_m - 20) - \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\Theta_m + 273)^4 - (293)^4] \text{ [W/m}^2\text{]} \quad [2.30]$$

Quando ocorrem vários incêndios localizados separados, utilizar-se a expressão [2] para obter diferentes fluxos de calor h_1, h_2, h_3, \dots , recebidos pela unidade de área da superfície exposta ao fogo ao nível do teto. O fluxo de calor total poderá ser considerado como:

$$\dot{h}_{tot} = \dot{h}_1 + \dot{h}_2 + \dot{h}_3 \dots \leq 100\,000 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad [2.31]$$

2.4. Modelos de incêndio avançados

Os *software* mais comuns para dimensionamento em situação de incêndio descrevem a forma como se propaga o calor e os fumos num compartimento. Estes software são referidos como modelos de zona e modelos de campo.

2.4.1. Modelos de zona

Os modelos de zona são ferramentas numéricas usadas na avaliação do desenvolvimento da temperatura dos gases no interior de um compartimento em situação de incêndio. A partir de um número limitado de hipóteses, os modelos de zona permitem obter uma boa avaliação da situação de incêndio desde que o campo de aplicação seja o correto. Apesar de os modelos de zona serem os modelos numéricos de incêndio menos sofisticados, eles têm um campo de aplicação específico e, portanto, são ferramentas fundamentais no dimensionamento ao fogo.

As conjecturas principais dos modelos de zona devem-se ao facto de os compartimentos de incêndio serem divididos em zonas e, que a distribuição de temperatura ao longo do tempo ser uniforme. Nos modelos de uma zona a temperatura é considerada uniforme dentro de todo o compartimento, no caso de incêndios plenamente desenvolvidos. Em relação aos modelos de duas zonas estes são válidos em caso de incêndios localizados, em que existe uma zona mais quente que está próxima do limite superior e, uma zona mais fria, mais próxima do limite inferior

Quando se utiliza o algoritmo dos modelos de zona, têm de se considerar algumas hipóteses: O fumo fica separado em duas camadas diferentes, como se verifica numa situação de incêndio real; Considera-se que cada camada é uniforme, uma vez que as diferenças da respetiva camada são desprezáveis quando comparadas com as diferenças que existem entre as duas camadas; A pluma de incêndio projeta partículas de fumo e calor para a zona superior e, uma vez que, o volume da pluma é considerado desprezável comparado com as dimensões da zona superior e inferior, o volume da pluma acaba por ser ignorado; O mobiliário do compartimento é ignorado; o calor é perdido na envolvente do compartimento e não no mobiliário (Morente et al,2008)..

De acordo com Cadorin et al, (2001) a formulação fundamental dos modelos numéricos de duas zonas baseia-se em 11 variáveis físicas. Essas variáveis estão ligadas por sete restrições e quatro equações diferenciais que descrevem a massa e os balanços de energia das respetivas zonas. O tempo de integração destas equações diferenciais permite calcular a evolução das variáveis que descrevem o gás em cada zona. A equação de equilíbrio de massa expressa exprime o fato de que, em qualquer momento, a variação da massa do gás de uma zona é igual à massa dos gases de combustão criada pelo fogo, mais a massa que entra no compartimento através das aberturas, menos a massa que vai para fora do compartimento através das aberturas. A equação de equilíbrio energético exprime o fato de que, ao longo do tempo, haver um equilíbrio entre a

energia que é produzida no compartimento pela combustão e, a energia que é consumida pelo aquecimento dos gases no compartimento, com a perda de massa de ar quente através das aberturas (incluindo um negativo contabilidade termo para a energia do ar de entrada), com a perda da radiação através das aberturas e, finalmente, através do aquecimento das divisórias (Cadorin et al, 2001).

As onze variáveis que são consideradas para descrever o gás no compartimento são: o balanço da massa do gás, m_U e m_L ; a camada superior e inferior, T_U e T_L ; as temperaturas do gás, V_U e V_L ; os volumes; U_E e E_L ; as energias internas; r_U e r_L ; as densidades do gás, da parte superior (U) e da parte inferior (L); a pressão absoluta no compartimento considerado como um todo, p .

A sete restrições que são consideradas no modelo numérico de duas zonas são:

$$\rho_i = m_i/V_i; E_i = c_v(T).m_i.T_i; p = \rho_i.R.T_i; V = V_U + V_L; i = U, L.$$

As equações de balanço de massa são fornecidas pelas equações [2.1] e [2.2]. As respetivas equações indicam que a variação da massa gasosa, em cada zona é feita através da troca de massa de uma zona com o fogo, com a outra zona do compartimento, e com o ambiente exterior através da ventilação

$$\dot{m}_U = \dot{m}_{UVout} + \dot{m}_{UHVin} + \dot{m}_{UHVout} + \dot{m}_{UFVin} + \dot{m}_{UFVout} + \dot{m}_e + \dot{m}_f \quad [2.1]$$

$$\dot{m}_L = \dot{m}_{LWin} + \dot{m}_{LUVin} + \dot{m}_{LUVout} + \dot{m}_{LHVin} + \dot{m}_{LHVout} + \dot{m}_{LUVint} + \dot{m}_{LUVout} + \dot{m}_e \quad [2.2]$$

As equações de balanço de energia são apresentadas nas equações [2.3] e [2.4], indicando que a variação da energia em cada zona é feita das trocas de energia de uma zona com o fogo, com a segunda zona do compartimento, com as divisórias e com as aberturas.

$$\dot{q}_U = \dot{q}_{Urad} + \dot{q}_{Uwall} + \dot{q}_{Uwout} + \dot{q}_{UHVin} + \dot{q}_{UHVout} + \dot{q}_{UFVin} + \dot{q}_{UFVout} + c_p.(T_L). \dot{m}_{ent}. T_L + 0,7.RHR \quad [2.3]$$

$$\dot{q}_L = \dot{q}_{Lrad} + \dot{q}_{Lwall} + \dot{q}_{LUVin} + \dot{q}_{LUVout} + \dot{q}_{LHVin} + \dot{q}_{LHVout} + \dot{q}_{LUVin} + \dot{q}_{LUVout} - \dot{q}_{ent} \quad [2.4]$$

As quatro variáveis de base são utilizadas para descrever o sistema. A partir do momento que a temperatura das zonas, T_U e T_L , a altitude de separação de zonas, Z_S e a diferença de pressão a partir do momento inicial, D_p são escolhidos, as equações [2.1] a [2.4] pode ser transformado em um sistema de equações diferenciais ordinárias (EDO) formado pelas equações [2.5] a [2.8].

$$\Delta p = [(\gamma-1).\dot{q}]/V \quad [2.5]$$

$$\dot{T}_u = [1/(c_p.(T_u).\rho_u.V_u)].(\dot{q}_u - c_p.(T_u). m_u. T_u + V_u . \Delta p) \quad [2.6]$$

$$\dot{T}_L = [1/(c_p.(T_L).\rho_u.V_L)].(\dot{q}_L - c_p.(T_L). m_u. T_L + V_L . \Delta p) \quad [2.7]$$

$$Z_s = [1/(\gamma \cdot (T_L) \cdot PA_f)] \cdot [(\gamma \cdot T_L - 1) \cdot \dot{q} - V_L \cdot \Delta p] \quad [2.8]$$

No caso de um modelo de uma zona, o número de variáveis necessárias para descrever o gás no compartimento como um todo são seis: a massa do gás, m_g ; a temperatura do gás, T_g ; o volume do compartimento, V ; a energia interna, E_g ; a pressão no compartimento, p ; a densidade do gás, r_g .

As quatro restrições que são consideradas no modelo numérico de uma zona são:

$$\rho_g = m_g/V; E_g = c_v(T_g) \cdot m_g \cdot T_g; p = \rho_g \cdot R \cdot T_g; V = V_U + V_L; i = U, L.$$

O balanço de massa é obtido pela equação [2.9], enquanto o equilíbrio de energia é fornecido pela equação [2.10]. Estes balanços de massa ou de energia correspondem a uma diminuição de massa ou energia no compartimento, que são negativos.

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{in} + \dot{m}_{out} + \dot{m}_f \quad [2.9]$$

$$\dot{q}_U = \dot{q}_{rad} + \dot{q}_{wall} + c_p \cdot (T_g) \cdot \dot{m}_{out} \cdot T_g + c_p \cdot (T_{out}) \cdot \dot{m}_{in} \cdot T_{out} + RHR \quad [2.10]$$

As quatro variáveis de base que são escolhidas de modo a descrever o sistema são: as zonas de temperatura, T e, a diferença de pressão a partir do momento inicial, Δp . Para que as equações [2.9] e [2.10] possam ser transformadas em um sistema de equações diferenciais ordinárias formadas pelas equações [2.11] e [2.12] (Cadorin et al, 2001).

$$\Delta p = [(\gamma - 1) \cdot \dot{q}] / V \quad [2.11]$$

$$\dot{T}_g = [1/(c_p \cdot (T_g) \cdot \rho_g \cdot V_g)] \cdot (\dot{q} - c_p \cdot (T_g) \cdot m_g \cdot T_g + V \cdot \Delta p) \quad [2.12]$$

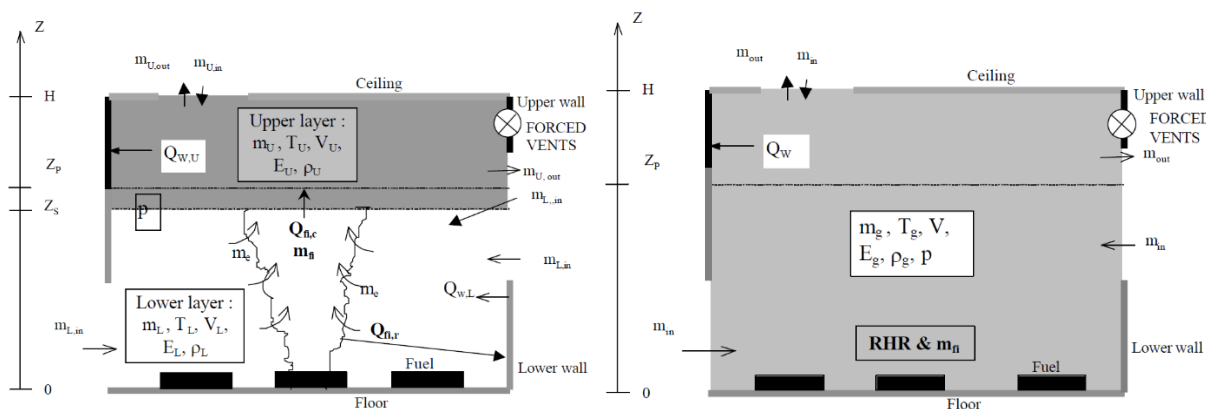


Figura 2.5-Vista esquemática de um modelo de duas e uma zona respetivamente (Cadorin et al, 2001).

2.4.2. Modelos de campo

Os modelos de campo CFD representam a vanguarda no que diz respeito à modelação numérica em situação de incêndio. O modelo CFD é constituído por uma malha tridimensional de elementos de volume de controlo que representam o caso em estudo. Estes volumes de controlo são similares aos usados na modelação de zona, no entanto enquanto os modelos de zona podem ter duas ou três zonas, um modelo CFD pode ter centenas de milhares de volumes de controlo. Os modelos CFD resolvem as equações diferenciais dependentes do tempo (as equações fundamentais da mecânica dos fluídos de Navier-Stokes), para cada volume de controlo. Este processo rigoroso é muito complexo e demoroso, contudo as equações de Navier-Stokes estão apenas restringidas pelas condições fronteiras da superfície do problema. Isto permite considerar menos hipóteses e aplicar o modelo a geometrias de compartimentos mais complexas (Morente & Quintana, 2008).

Um dos principais objetivos da modelação do incêndio é de prever a propagação e a extinção das chamas. Além de se pretender a interação entre a fase gasosa e sólida em situação de incêndio, de modo que a que a velocidade de combustão seja a prevista e não a prescrita. Recentes estudos numéricos da pirólise em fase sólida têm sido usados nos modelos de campo, para a modelação da interação entre a fase gasosa e a fase sólida. Estes estudos mostraram que, em pequena escala, em que uma fonte externa de radiação está normalmente presente e, o efeito do *feedback* da chama não pode controlar ou manter a pirólise (McGrattan & Hostikka, 2002).

Com o surgimento de computadores poderosos e rápidos, novas possibilidades surgiram para substituir o demorado modelo numérico existente, de maneira que os modelos de campo têm surgido com maior ênfase. Tal facto envolve que a solução das equações diferenciais que descreve a dinâmica de fluidos, utiliza quer um volume finito, ou se necessário, mas, mais raramente, devido à maior quantidade de processamento necessário, um método de elementos finitos. Estes métodos aplicados para a solução das equações de dinâmica de fluidos são denominados modelos computacionais de dinâmica de fluidos ou simplesmente CFD. O CFD essencialmente usa as equações de dinâmica, de calor e de balanço de massa, juntamente com outros modelos que descrevem o desempenho do equipamento, e resolve-os de modo a fornecer os resultados pretendidos, tais como a temperatura, o fluxo de calor, entre muitos outros resultados. O princípio básico do método de modelagem CFD é que a região de escoamento da simulação está dividida em pequenas células, em que, dentro de cada um dos quais o fluxo é mantido sob condições constantes ou varia suavemente. As Equações diferenciais de dinâmica, de energia, e de equilíbrio de massa são discretizadas e representadas em termos de variáveis, no centro ou em qualquer posição predeterminada, no interior das células. Estas equações são resolvidas iterativamente até a solução atingir a precisão desejada (AET, 2009).

De acordo com McGrattan e Hostikka (2002), na modelação hidrodinâmica, o fluxo de fluido é modelado para resolver as equações de conservação de massa, mistura da fração, momento e energia em numeração *low mach*.

$$\partial\rho/\partial t + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad [2.13]$$

$$\partial(\rho Z)/\partial t + \nabla \cdot \rho Z \mathbf{u} = \nabla \cdot \rho D \nabla Z \quad [2.14]$$

$$\rho(\partial\rho/\partial t + 0,5 \cdot \nabla |\mathbf{u}|^2 - \mathbf{u} \cdot \nabla \rho) + \nabla \cdot \rho = (\rho - \rho_\infty) \cdot \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad [2.15]$$

$$\rho c_p \cdot (\partial T/\partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla T) = \dot{q}_c - \nabla \cdot \mathbf{q}_R + \nabla \cdot \mathbf{k} \nabla T \quad [2.16]$$

Onde ρ , \mathbf{u} , Z e T são a densidade, o vetor velocidade, a fração de mistura e a temperatura, respetivamente. D é a difusividade, ρ a pressão de perturbação, $\boldsymbol{\tau}$ o tensor do stresse da viscosidade e, \mathbf{k} a condutividade térmica. O \dot{q}_c e $\nabla \cdot \mathbf{q}_R$ são os termos da fonte, devido às reações químicas e, à radiação, respetivamente.

Essas equações são complementados pela seguinte equação de estado:

$$p_0 = \rho R T Y \cdot \sum_i (Y_i/M_i) \quad [2.17]$$

Em que a pressão é substituído por uma pressão média p_0 , de modo, a filtrar para fora as ondas acústicas. R é a constante ideal do gás e, Y_i e M_i são as frações em massa das espécies e da massa *mole*. O parâmetro p_0 é a constante do domínio, que é hermeticamente fechado e, que só depende do tempo.

A aproximação mais importante do modelo é que a equação de dinâmica pode ser simplificada substituindo:

$$\nabla H = \nabla(0,5 \cdot |\mathbf{u}|^2 + p/\rho) = 0,5 \cdot \nabla |\mathbf{u}|^2 + (1/\rho) \nabla p \quad [2.18]$$

Esta aproximação é equivalente a negligenciar o torque baroclínico como uma fonte de vorticidade. O valor de H é resolvido, tendo o desvio da equação de dinâmica, utilizando a equação de estado e a equação de Poisson, obtém-se como resultado, um método rápido e direto.

A respetiva equação de dinâmica devido à aproximação obtém a seguinte formulação:

$$\partial \mathbf{u} / \partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \nabla H = 1/\rho \cdot [(\rho - \rho_\infty) \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}] \quad [2.19]$$

O efeito do campo de fluxo de turbulência é modelada com LES, em que os vórtices de grande escala são computorizados diretamente e os processos dissipativos são modelados

O modelo de combustão da madeira é baseado na suposição de que a mistura de combustão é controlada. Isto implica que todas as espécies de interesse podem ser descritos em termos da fração de mistura de Z, uma variável escalar. O calor da reação de combustível e oxigénio é libertado ao longo de uma folha infinitamente fina, onde Z assume o seu valor estequiométrico, tal como determinado pela solução de a equação de transporte para Z. A taxa de libertação de calor por unidade de área de superfície de chama é:

$$\dot{q}_c = \Delta H_O \cdot dY_O/dZ |_{Z=Z_f} (\rho D) \nabla Z \cdot n \quad [2.20]$$

Em que, ΔH_O é a energia libertada por unidade de massa de oxigénio consumida e n é a unidade extrínseca normal. Em que dY_O/dZ e $\nabla Z \cdot n$ são negativos. ΔH_O corresponde à quantidade de oxigénio que não faz parte do combustível. As relações de estado são calculados para um reação estequiométrica de $C_{3.4}H_{6.2}O_{2.5}$, que foi usada para modelar a combustão e, o calor de combustão é assumido como sendo 17,5 MJ / kg, correspondendo a $\Delta H_O = 12,96$ MJ / kg (O₂), estes valores foram os utilizados na respetiva modelação numérica deste documento.

O Modelo de radiação térmica utiliza as equações RTE para um gás sem dispersão, através do respetivo algoritmo:

$$s \cdot \nabla I(x,s) = \kappa(x) [I_b(x) - I(x,s)] \quad [2.21]$$

Onde $I(x,s)$ é a intensidade da radiação, s é a unidade normal do vetor de direção e, o termo fonte deve-se à radiação de corpo negro, $I_b = \sigma \cdot T^4 / \pi$. Os limites da parede são assumidos como sendo difusos. O coeficiente de absorção $\kappa(x)$ é calculada usando o modelo de Radcal de banda estreita e foram tabulados como uma função da fração de mistura e da temperatura antes da simulação real. A equação de transporte radiativo é resolvida utilizando o método de volumes finitos, uma técnica semelhante ao de transporte convectivo do fluxo de fluido. A forma discretizada da RTE é obtida dividindo o ângulo sólido em um número finito de ângulos de controlo. A respetiva equação é, então, integrada ao longo do volume celular, V_{ijk} e, do ângulo de controlo, $\delta_{\Omega i}$. Os integrais de volume são transformados sob a forma de adições sobre as faces das células, assumindo-se que a intensidade de radiação é constante sobre os limites da célula, no interior do volume das células e sobre o ângulo $\delta_{\Omega i}$. Em um sistema de grelha cartesiana, o sistema resultante pode ser resolvido muito eficientemente usando uma sequência explícita. As intensidades relativas aos limites da célula são calculados usando um método de primeira ordem, e os integrais sobre os ângulos de controlo são calculados analiticamente. O solucionador de radiação é usado em cada etapa pelo solucionador de fluxo e, em cada etapa, apenas o ângulo em cada cinco é atualizado. Como resultado, são necessários 15 passos de tempo para atualizar todos os ângulos de controlo (McGrattan & Hostikka, 2002)

3. MODELAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM INCÊNDIO DE COMPARTIMENTO

O ensaio de incêndio de escala real foi realizado com o objetivo de produzir dados da evolução da temperatura dentro do compartimento e, validar os dados obtidos pelas modelações numéricas de zona e campo. A modelação experimental de escala real foi executada num contentor em aço no parque dos Voluntários de Ortigosa, Leiria.

Este contentor têm as dimensões externas de 6,1m de comprimento, por 2,5m de largura e, 2,6m de altura. O compartimento de ensaio possui as dimensões interiores de 5,30 metros de comprimento por 2,03 m de largura e, 2, 10 m de altura, com uma janela de dimensões de 1,23 m de largura por 0,92 m de altura e, uma porta com 1,74 m de altura por 0,73 m de largura. A estrutura do contentor é constituída por perfis de aço, forrado a chapa de aço de perfil trapezoidal, com 2 mm de espessura.



Figura 3.1 – Compartimento da modelação experimental de incêndio.

3.1. Geometria do Compartimento

A geometria do compartimento do ensaio experimental é apresentado nas seguintes figuras:

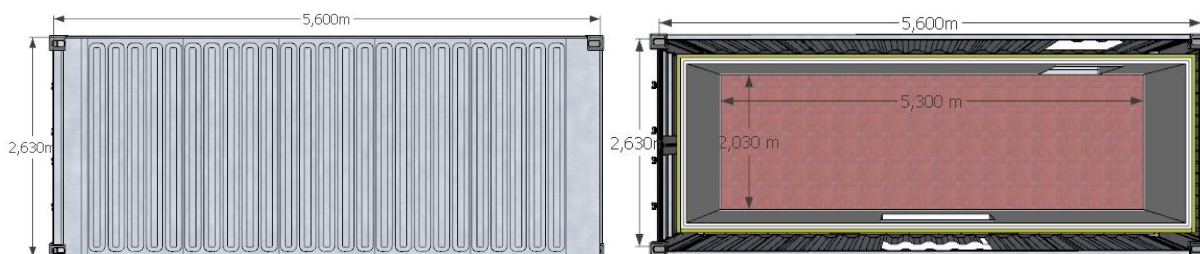


Figura 3.2 – Geometria da cobertura e do pavimento do compartimento interior e exterior.

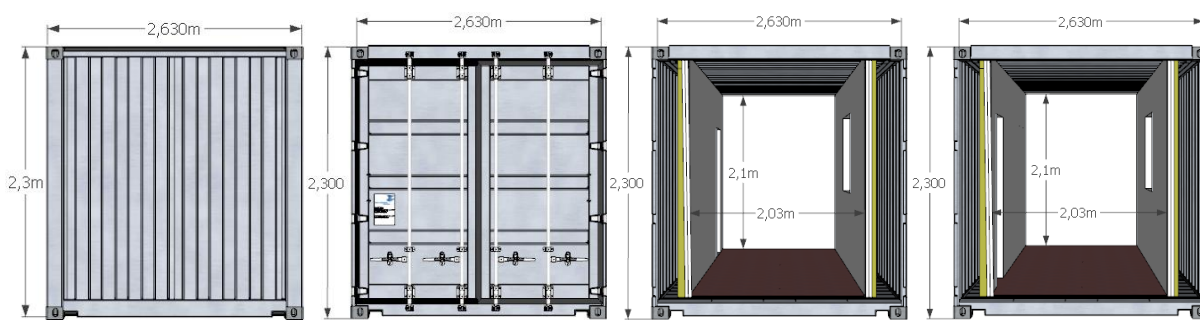


Figura 3.3 – Geometria das paredes 2 e 4 do compartimento interior e exterior.

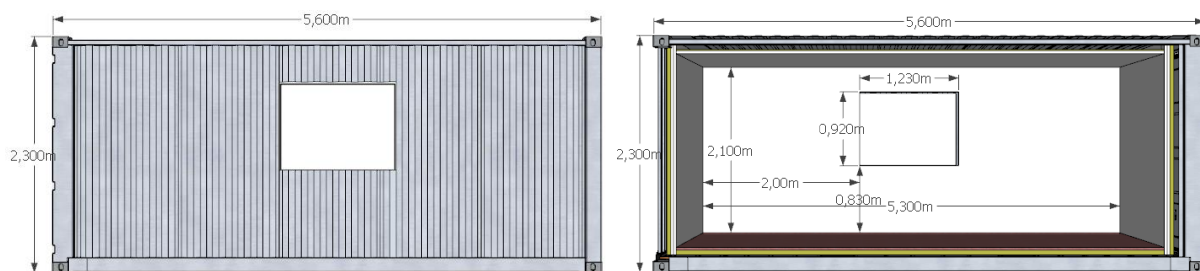


Figura 3.4 – Geometria da parede 1 do compartimento interior e exterior.

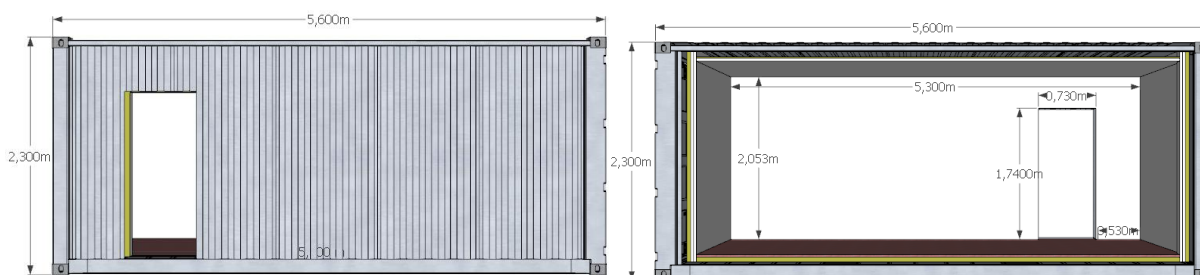


Figura 3.5 – Geometria da parede 3 do compartimento interior e exterior.

3.2. Carga de incêndio

Utilizou-se nos ensaios como carga de incêndio barrotes de madeira de pinho com dimensões de 1,00m x 0,050m x 0,055m. Cada barrote possui um volume de 2750 cm³ e uma densidade de 0,5 g/cm³ pesando 1,375 kg aproximadamente. O Eurocódigo 1 parte 1-2 (NP EN 1991-1-2 2010), define o poder calorífico da madeira em 17,5 MJ/kg.

No ensaio foram colocadas 3 pilhas de barrotes, com 69 barrotes, por cada pilha distribuídos por 9 filas, como se pode observar na figura, no respetivo ensaio queimou-se 207 barrotes.

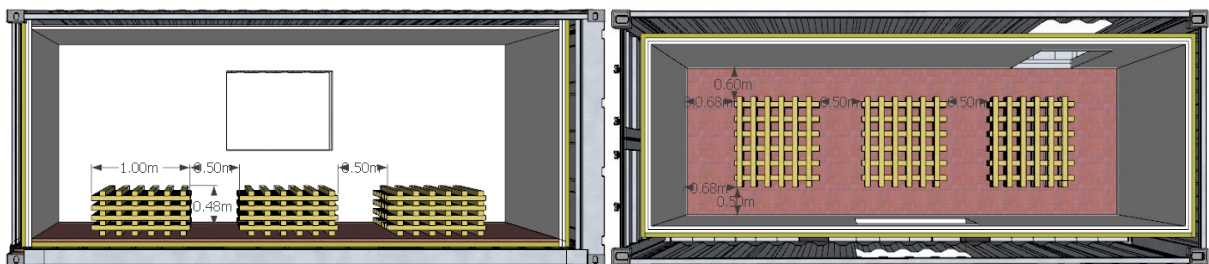


Figura 3.6 - Disposição carga incêndio.

O valor característico da carga de incêndio $Q_{fi,k}$, foi obtido pelo Eurocódigo 1, parte 2, resultado da quantidade de madeira de pinho (M_{ki}) de 284,63 kg queimado em cada ensaio pelo poder calorífico da madeira (H_u) igual a 17,5 MJ/kg.

$$Q_{fi,k} = \sum M_{k,i} \cdot H_u \text{ [MJ]} = 4980,94 \text{ MJ} \quad [3.1]$$

O valor característico da densidade de carga de incêndio por unidade de área de pavimento ($q_{f,k}$) foi calculado pela expressão seguinte relacionando o valor da carga de incêndio de 4980,94 MJ/m² dividido pela área (A) de pavimento com 10,76 m² obtendo-se como resultado 462,96 MJ/m².

$$q_{f,k} = Q_{fi,k}/A \text{ [MJ]} = 462,96 \text{ MJ} \quad [3.2]$$

Considerou-se 10680 segundos (s) de duração de incêndio, onde a taxa de libertação de calor (Q) do incêndio foi de 20,32 MW, com base na expressão seguinte.

$$Q = \frac{Q_{fi,k}}{s} \text{ [MW]} \quad [3.3]$$

A taxa de libertação de calor obtida de 20,32 MW, ou seja, 20320 KW libertados por ensaio e uma vez que, existiam 3 pilhas de madeira foi libertado por cada uma 6773 kW.

3.3. Materiais do Ensaio

As paredes do compartimento foram revestidas por painéis rígidos de lã de rocha vulcânica *Rocksol-E 2-525* com as seguintes dimensões: 40 mm de espessura; 1200 mm de comprimento; 600 mm de largura. A Lã de Rocha é feita de rocha, isto é, a matéria-prima básica é a rocha vulcânica diábase.

O processo de fabrico da lã de rocha consiste na produção de fibras que são compostas por aglutinante de resina. Durante o processo de produção as fibras são prensadas na densidade e espessuras pretendidas, obtendo-se placas rígidas ou semirrígidas. A Lã de Rocha é um excelente isolamento térmico e acústico para paredes e pavimentos, fazendo todo o sentido de ser aplicado neste ensaio, uma vez que na construção civil é bastante utilizado (LaRocha, 2012)

Os painéis rígidos de lã de rocha vulcânica, *Rocksol-E 2-525* patenteiam as seguintes características técnicas: Reacção ao fogo de euroclasse A1 (incombustível), segundo a norma UNE – EN 13.501.1:2002; Condutividade térmica de 0,041W/ (m.K), segundo a norma UNE – EN 12667; Resistência térmica de 0,95 W/m².K; Calor específico de 0,84 KJ/Kg.K a 20°C; Densidade nominal de 150 Kg/m³.

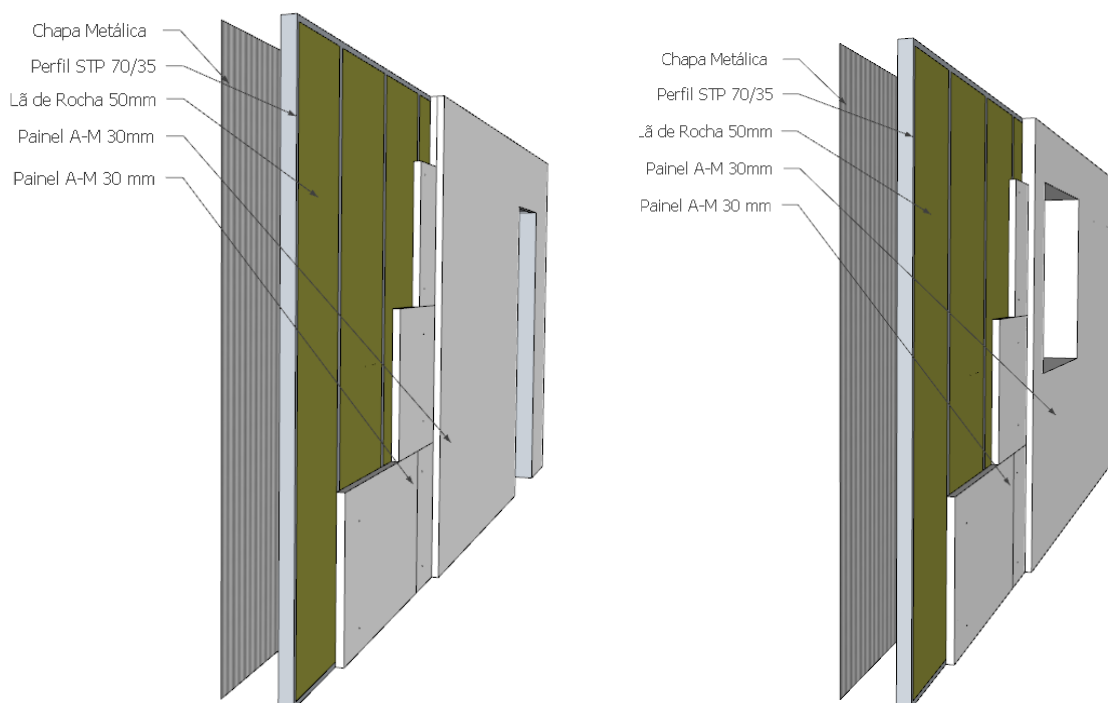


Figura 3.7 – Solução construtiva adotada para o ensaio da Parede 1 e 3 respetivamente.

As paredes do compartimento são ainda forradas por duas camadas de Painéis A-M pré fabricados, constituídos por compostos de gesso e reforçado com fibra de vidro, com encaixe macho-fêmea que apresentam as seguintes dimensões: 30 mm de espessura; 1200 mm de comprimento; 600 mm de largura. A finalidade do reforço do gesso é o de melhorar as propriedades mecânicas do dihidrato, que é um material suscetível de sofrer rutura sem, antes, sofrer deformações plásticas significativas. A ductilidade pós-fratura que as fibras conferem ao material é o fator que destaca o composto em relação ao material sem fibras (UFSC, 2012).

As placas de gesso foram aparafusadas aos montantes por parafusos TTPC 35 mm Perfisa S.A.. Nas paredes do compartimento colocou-se 2 painéis de gesso perfazendo uma espessura de 60 mm, para uma melhor proteção dos perfis de aço e da estrutura do contentor, diminuindo a perda de calor por condução para estrutura. Na colocação dos painéis de gesso utilizou-se argamassa Euro Stick-forte EuroTABI.

Em relação aos Painéis A-M estes apresentam as seguintes características técnicas: Resistência ao fogo de REI 120 e REI 180, segundo a norma UNE – EN 1364–1:2002; Condutividade térmica de 0,041W/ (m.K), segundo a norma UNE –EN 12667:2002; Resistência térmica de 0,89 W/m².K; Calor específico de 1 KJ/Kg.K a 20°; Densidade nominal de 900 Kg/m³.

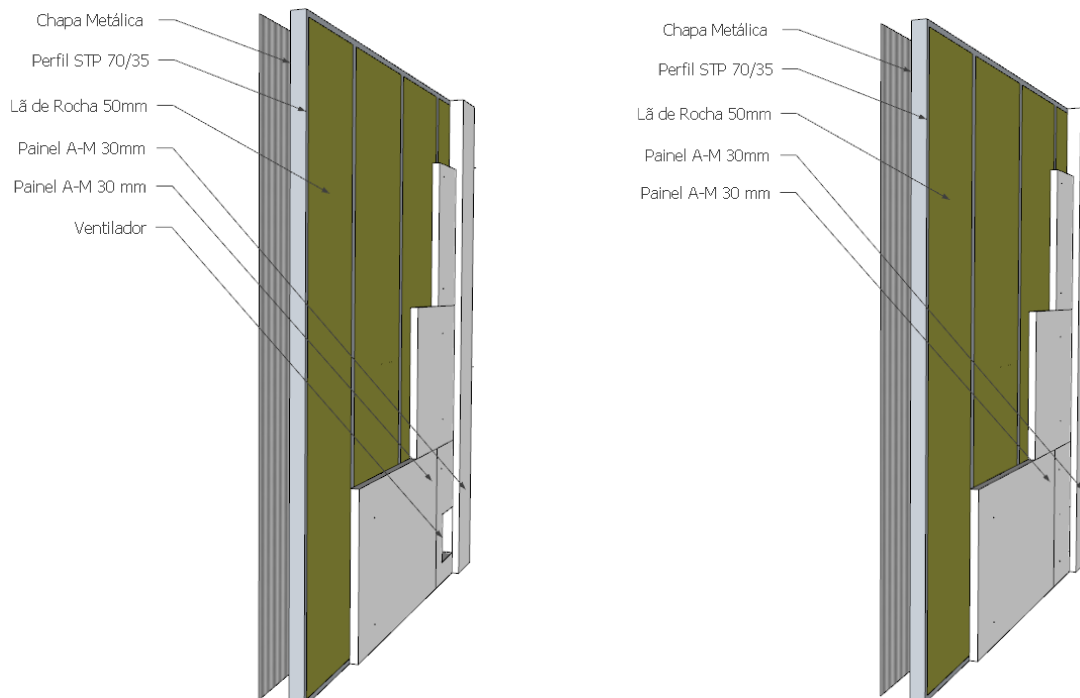


Figura 3.8 – Solução construtiva adotada para o ensaio da Parede 2 e 4 respetivamente.

O chão do compartimento de ensaio foi revestido com lã de rocha com 40 mm de espessura e 70 kg/m³ e com tijoleira refratária com 30 mm de espessura, para a colocação utilizou-se argamassa refratária LS-25 Cerâmica do Liz.

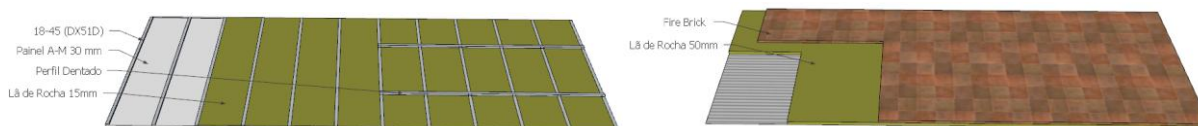


Figura 3.9 – Soluções construtivas adotadas para o pavimento e para o teto, respetivamente.

Como se observar na figura 3.9, o teto apresenta duas soluções construtivas. Na primeira solução adotada colocou-se painéis A-M 20 mm aplicados com parafusos TTPC 35 mm em perfil de teto 18-45 (DX51D) com um afastamento de 500 mm entre eles. Os perfis de teto assentaram nas paredes sem fixação e foram fixos ao teto por varão roscado aplicado com *attache OMEGA* (fotografia 3). Entre o perfil de teto 18-45 e o painel A-M colocou-se uma placa de lã de rocha com as dimensões 1200 mm de comprimento por 600 mm de largura e 15 mm de espessura.

Na segunda solução adotada colocou-se os painéis A-M 20 mm aplicados com parafusos TTPC 70 mm em perfil de teto 18-45 (DX51D) com um afastamento de 400 mm entre eles, que por sua vez são fixos em 3 perfis dentados, separados 500 mm entre eles. O perfil dentado é fixo ao teto por varão roscado e sistema *attache OMEGA*, como na solução 1. Entre o perfil de teto 18-45 e o painel A-M colocou-se uma placa de lã de rocha idêntica à solução 1. Nesta solução foi colocada lã de rocha com 50 mm de espessura com 40 kg/m³ entre os perfis dentados e o teto. Na figura 3.10 observa-se a lã de rocha acima dos perfis, o perfil dentado e a placa de lã de rocha entre o painel A-M e o perfil de teto.

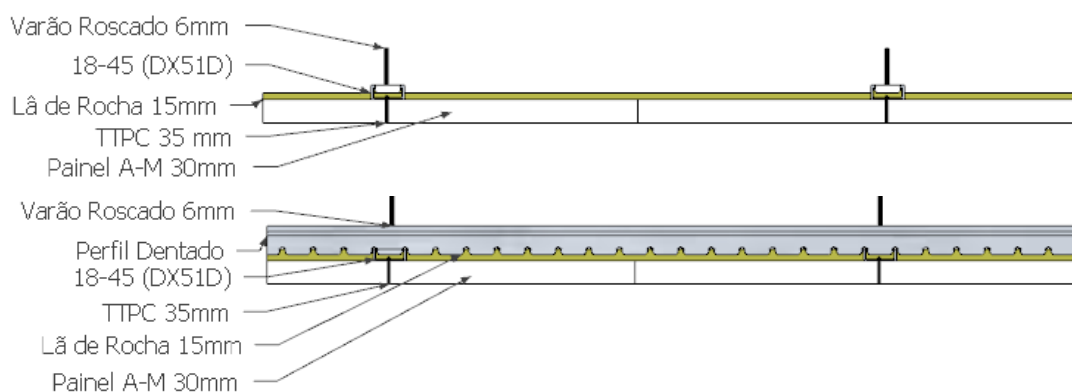


Figura 3.10 e 3.11 – Solução construtiva 1 e 2 adotadas para o ensaio do teto.

3.4. Instrumentação do ensaio

Nas paredes, na face exposta ao incêndio, foram colados termopares tipo k da marca OMEGA modelo SA1XL para medição das temperaturas. A sua distribuição seguiu a norma EN 1363 e encontram-se representadas nas respetivas figuras. Estes termopares foram colocados a partir de furos abertos nas placas de base gesso tipo A-M que permitiram a passagem dos respetivos cabos. Foi colocada uma massa de acabamento de forma a impedir a passagem de calor através dos furos.

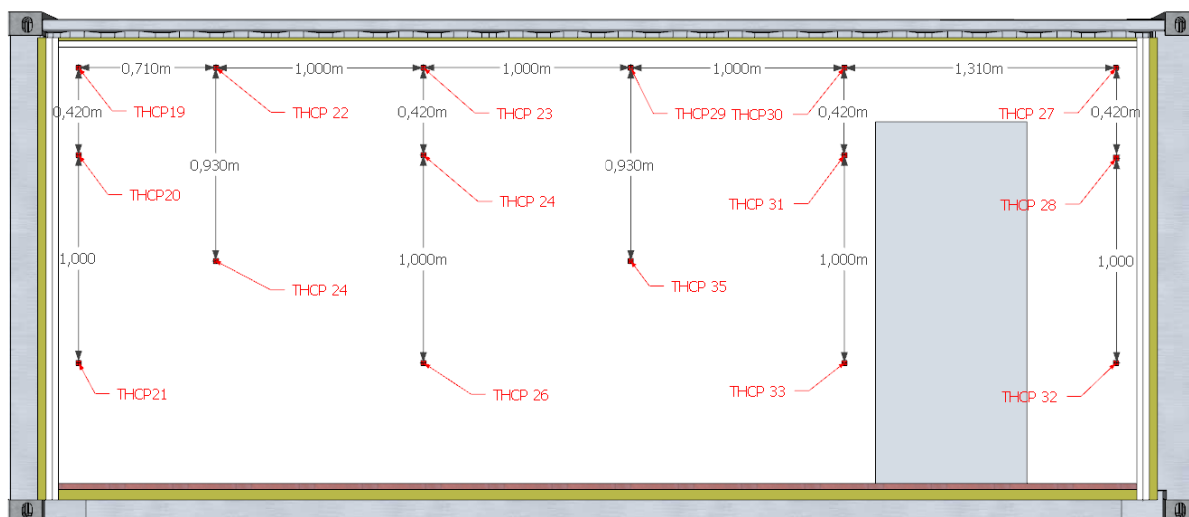


Figura 3.12 – Distribuição dos termopares na parede 1

Nas Figura 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 e 3.16 são representadas as distribuições dos termopares na face exposta das respetivas paredes, teto e verticais no meio do compartimento.

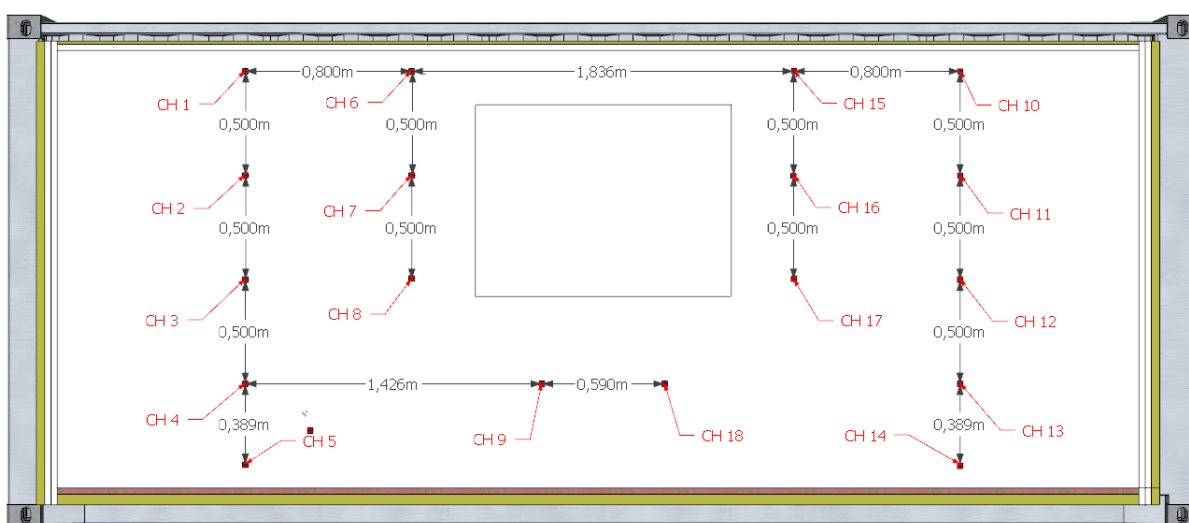


Figura 3.13 – Distribuição dos termopares na parede 3

A colocação dos termopares foi realizada através da abertura de um furo de 8mm de profundidade, que atravessa as duas placas de base gesso tipo A-M de modo a que a ponta do termopar se posicionasse no interior do compartimento junto à parede.

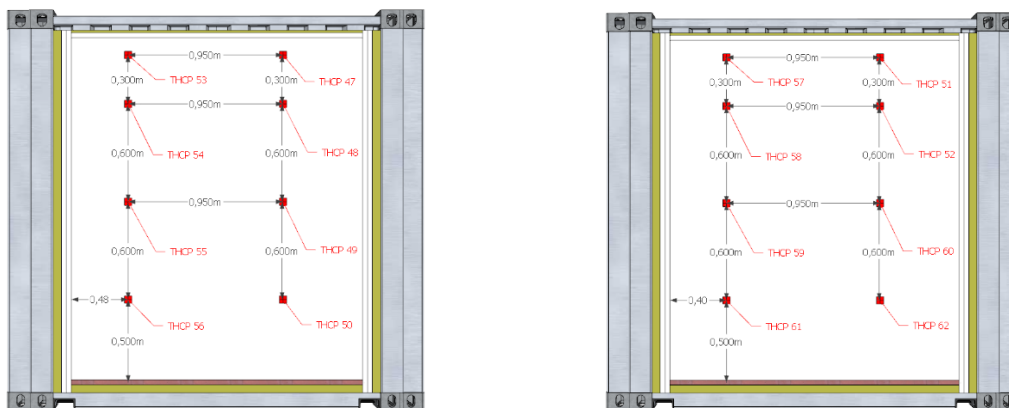


Figura 3.14 e 3.15 – Distribuição dos termopares na parede 2 e 4, respetivamente.

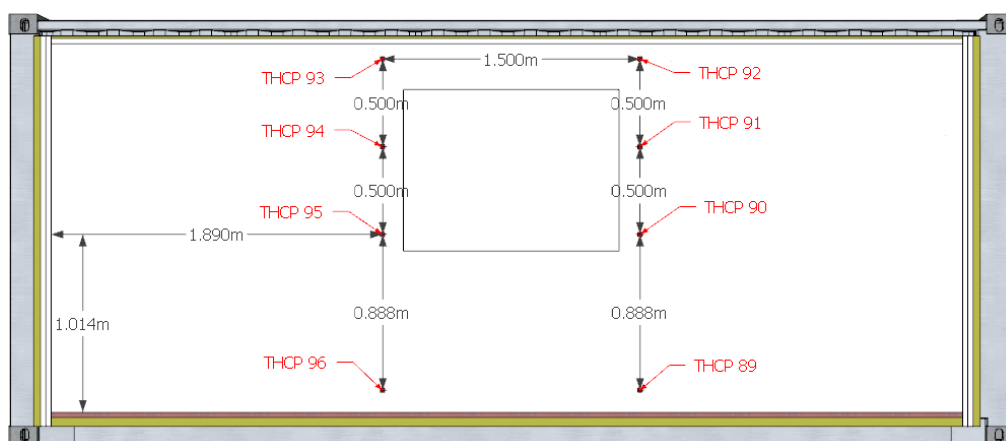


Figura 3.16 – Distribuição dos termopares das verticais 1 e 2.

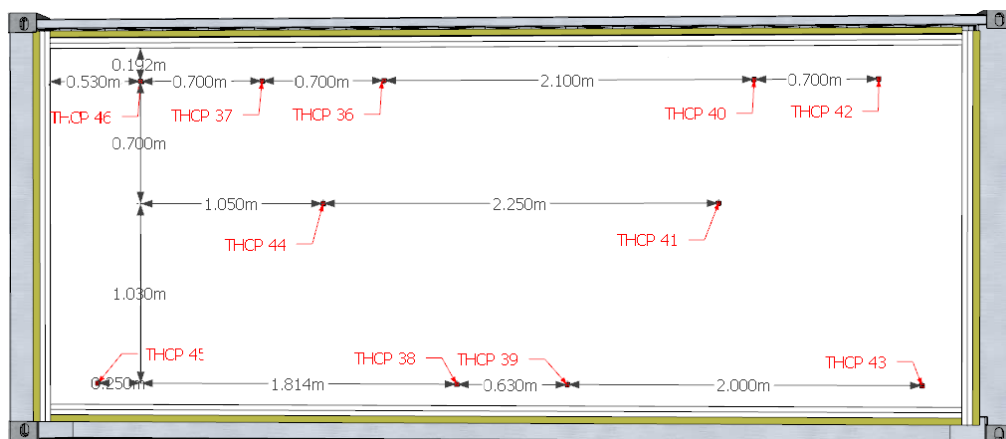


Figura 3.17 – Distribuição dos termopares no teto.

3.5. Resultados experimentais de compartimentação

Nos subcapítulos seguintes é apresentado a evolução das temperaturas de incêndio obtidas nos termopares localizados nas paredes do compartimento, no teto e, no interior do compartimento, de acordo com a distribuição dos termopares apresenta no capítulo anterior. A duração do incêndio foi de 178 minutos.

3.5.1. Curvas de incêndio do ensaio 1

As curvas de incêndio do ensaio 1 nas paredes, no teto e, no meio do compartimento são apresentadas pelos gráficos 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, e, 4.7 respetivamente. De referir que os termopares CH32, CH33, CH38, CH39, CH41, CH 43, CH60, CH61 e, CH62 utilizados na modelação experimental do ensaio 1 ficaram danificados durante o ensaio.

3.5.1.1. Curvas de incêndio no compartimento

Da observação do gráfico 4.1 verifica-se a existência de uma zona mais quente que está próxima do limite superior e, de uma zona mais fria, mais próxima do limite inferior. A temperatura máxima atingida no interior do compartimento foi de cerca de 1081 °C, aos 18,5 minutos, correspondendo ao termopar CH95, que se encontra na vertical 1.

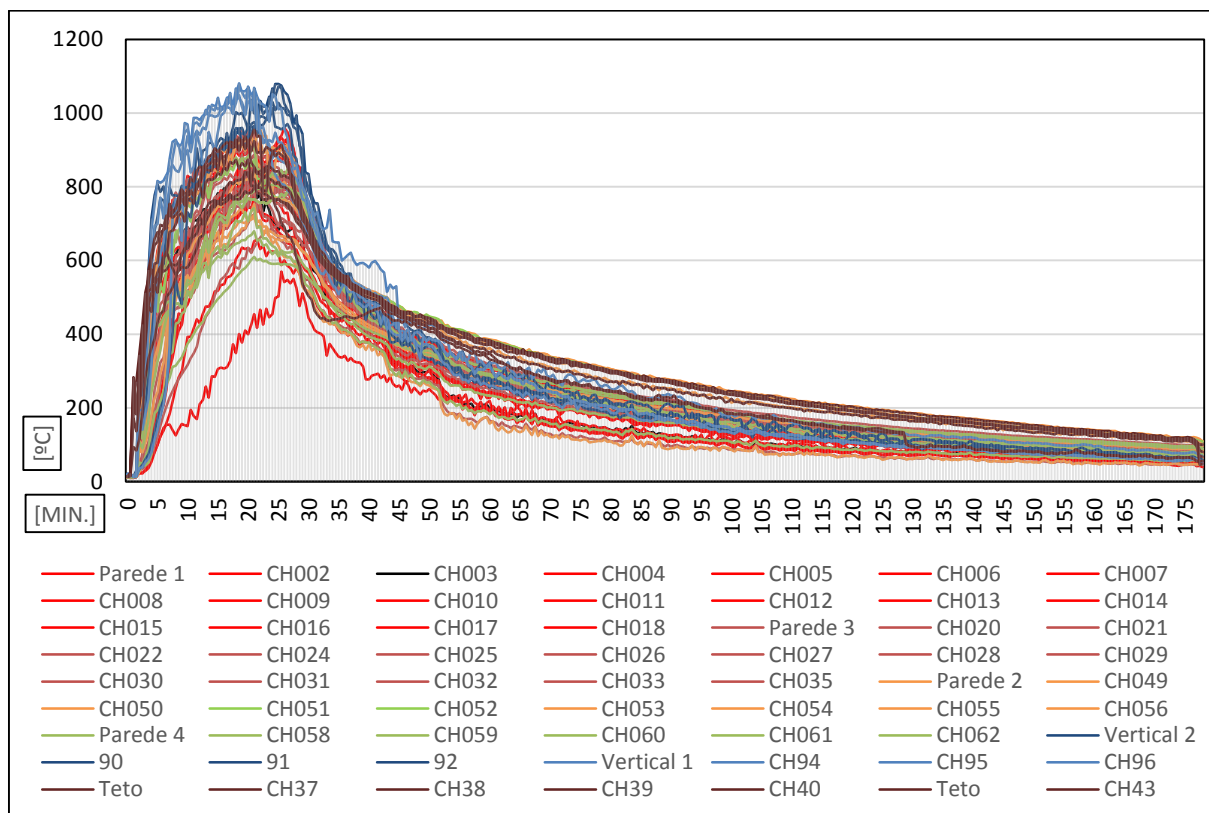


Gráfico 3.1 - Evolução das temperaturas no compartimento, do ensaio 1.

3.5.1.2. Curvas de incêndio na Parede 1 e 3

O gráfico 4.2 e 4.3 apresenta a evolução das temperaturas na parede 1 e 3, respetivamente. Na parede 1 a temperatura máxima foi de 960,3°C, aos 26 minutos, no termopar CH16. Na parede 3 a temperatura máxima foi de 961,5°C, aos 20 minutos, no termopar CH30.

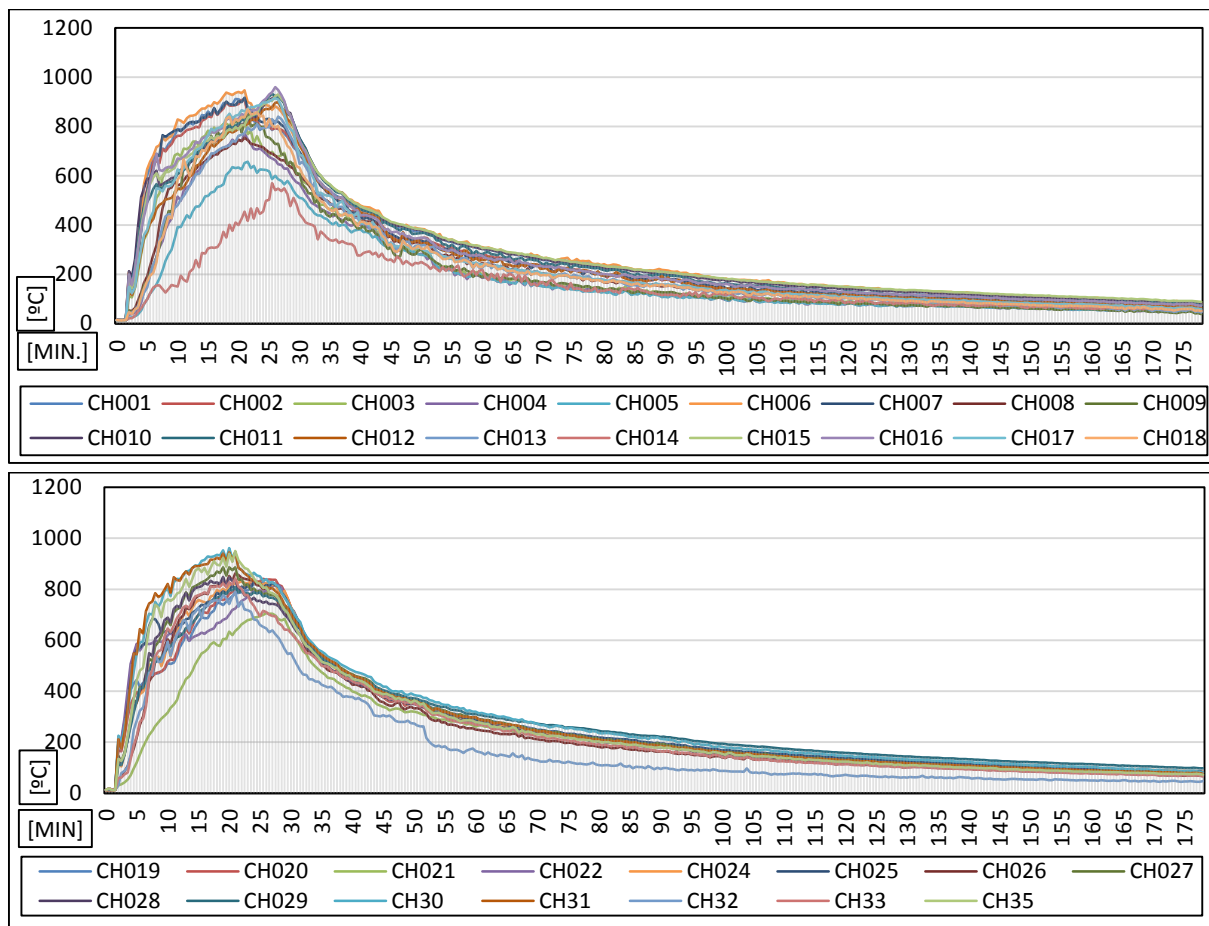


Gráfico 3.2 e 3.3 - Evolução das temperaturas da modelação experimental na parede 1 e 3, do ensaio 1, respetivamente.

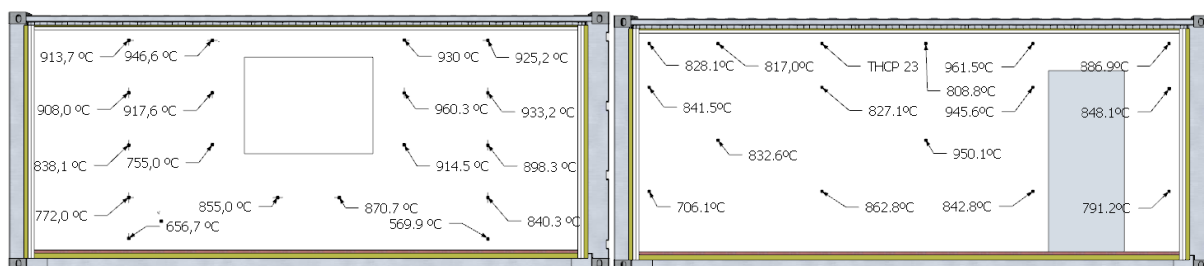


Figura 3.1 e 3.2 – Temperaturas máximas da modelação experimental da parede 1 e 3, no ensaio 1, respetivamente.

3.5.1.3. Curvas de incêndio na Parede 2 e 4

O gráfico 4.4 e 4.5 apresenta a evolução das temperaturas na parede 2 e 4, respetivamente. Na parede 2 a temperatura máxima foi de 954,5°C, aos 22 minutos, no termopar CH48. Na parede 4 a temperatura máxima foi de 915,2°C, aos 21 minutos, no termopar CH58.

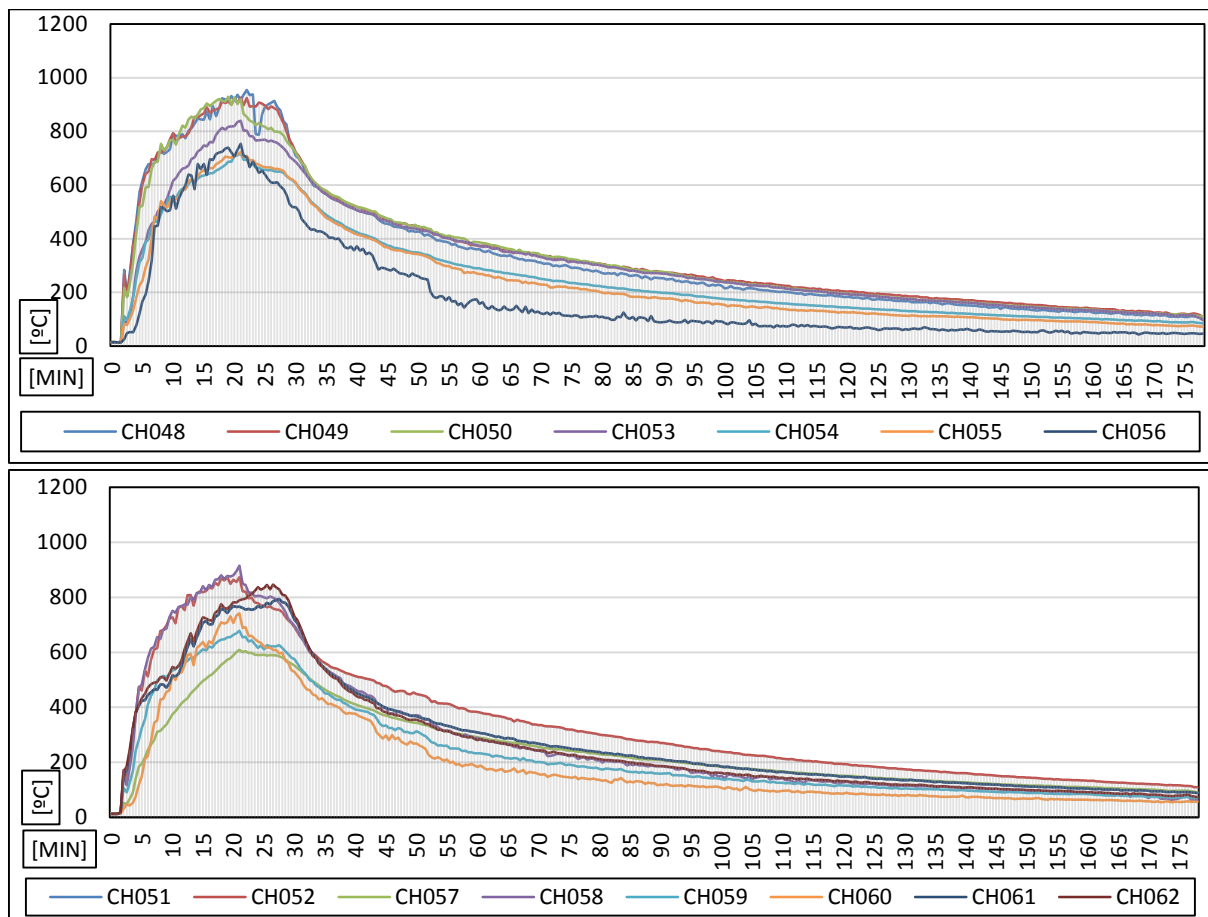


Gráfico 3.4 e 3.5 - Evolução das temperaturas da modelação experimental na parede 2 e 4, do ensaio 1, respetivamente.

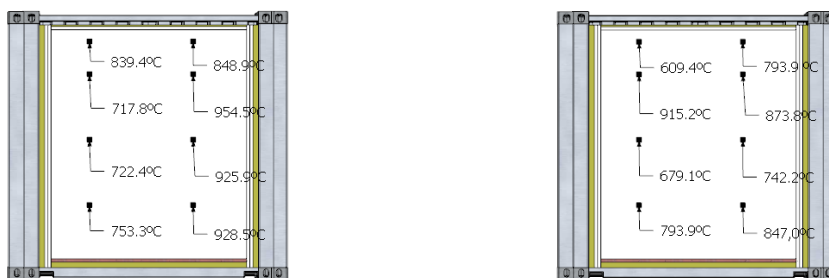


Figura 3.3 e 3.4 – Temperaturas máximas da modelação experimental da parede 2 e 4, no ensaio 1, respetivamente.

3.5.1.4. Curvas de incêndio no interior e no teto do compartimento

O gráfico 4.6 e 4.7 apresenta a evolução das temperaturas nas verticais 1 e 2 e, no teto, respetivamente. No teto a temperatura máxima foi de 954,5°C, aos 21 minutos, no termopar CH38. Nas verticais 1 e 2 a temperatura máxima foi de 1081 °C, aos 18,5 minutos, no termopar CH95 da vertical 1.

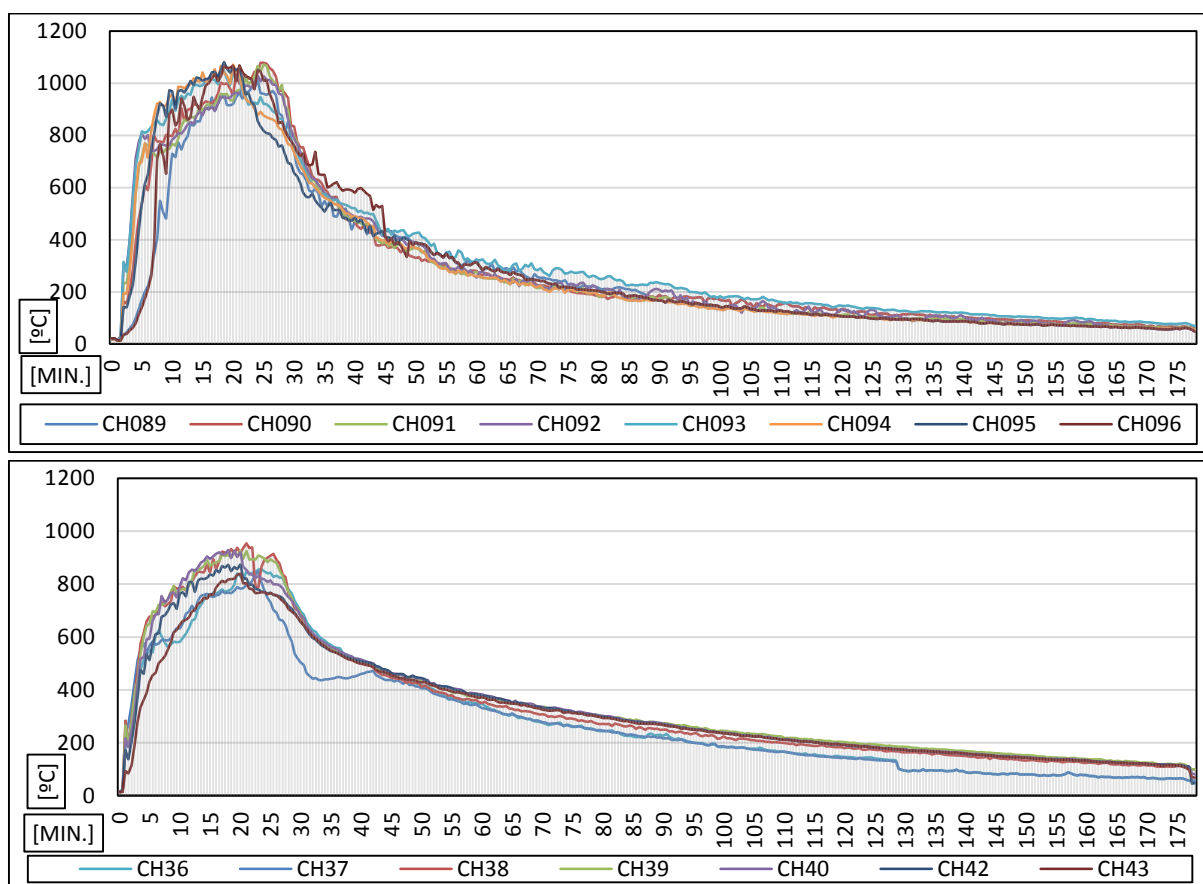


Gráfico 3.6 e 3.7 - Evolução das temperaturas da modelação experimental nas verticais e no teto, do ensaio 1, respetivamente.

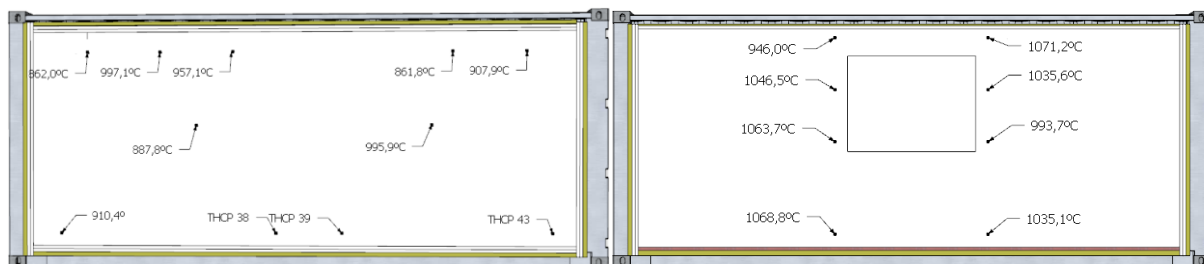


Figura 3.5 e 3.6 – Temperaturas máximas da modelação experimental no teto e nas verticais, no ensaio 1, respetivamente.

3.5.2. Curvas de incêndio do ensaio 2

As curvas de incêndio do ensaio 1 nas paredes, no teto e, no meio do compartimento são apresentadas pelos gráficos 1, 2, 3, 4, 5, 6, e, 7 respetivamente. De referir que os termopares CH23, CH47, CH41, CH44, CH45 e, CH46 utilizados na modelação experimental do ensaio 1 ficaram danificados durante o ensaio 2.

3.5.2.1. Curvas de incêndio no compartimento

A temperatura máxima atingida no interior do compartimento foi de 1071,2 °C, aos 23,5 minutos, no termopar CH92 da vertical 1.

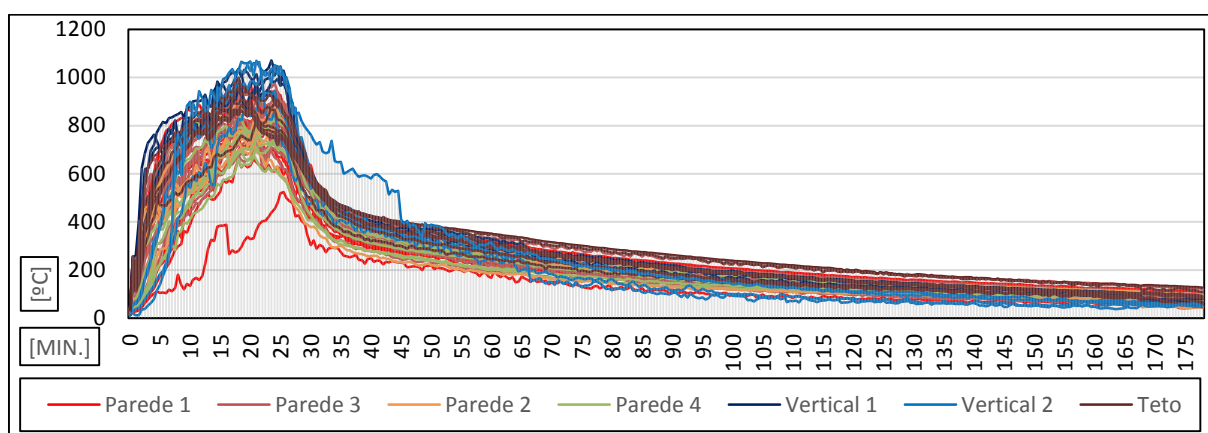


Gráfico 4.8 - Evolução das temperaturas no compartimento, do ensaio 2.

3.5.2.2. Curvas de incêndio na Parede 1 e 3

O gráfico 4.9 e 4.10 apresenta a evolução das temperaturas na parede 1 e 3, respetivamente. Na parede 1 a temperatura máxima foi de 980,1°C, aos 18,5 minutos, no termopar CH6. Na parede 3 a temperatura máxima foi de 947,1°C, aos 18,5 minutos, no termopar CH27.

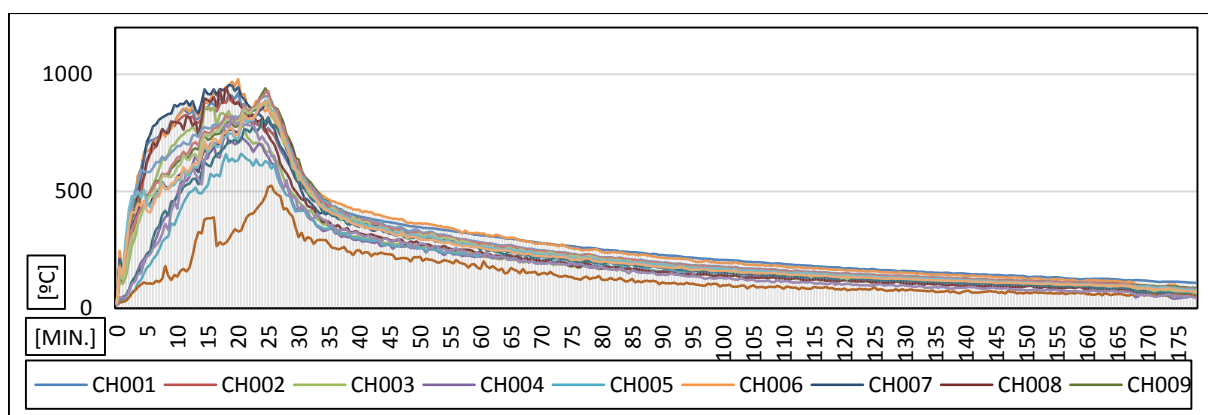


Gráfico 3.9 - Evolução das temperaturas da modelação experimental na parede 1, do ensaio 2.

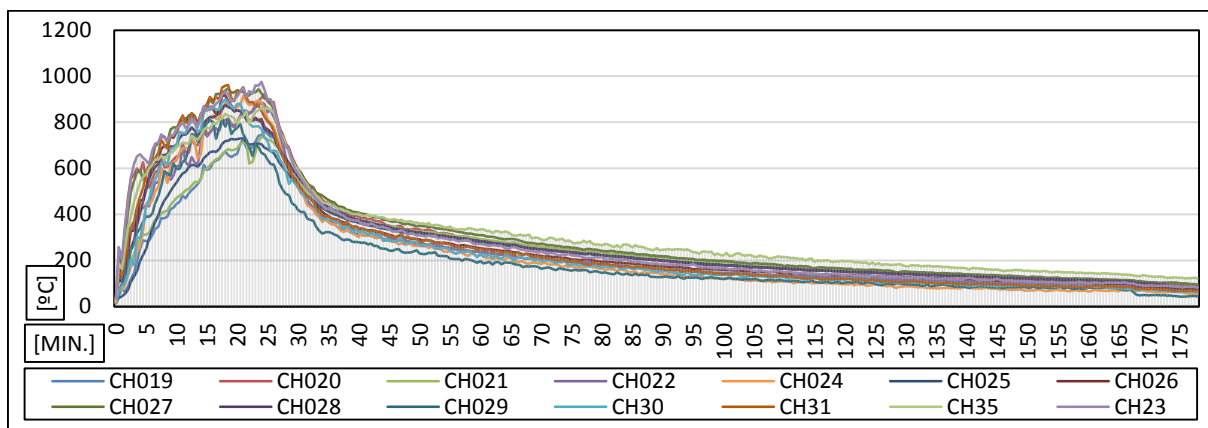


Gráfico 3.10-Evolução das temperaturas da modelação experimental na parede 3, do ensaio 2,

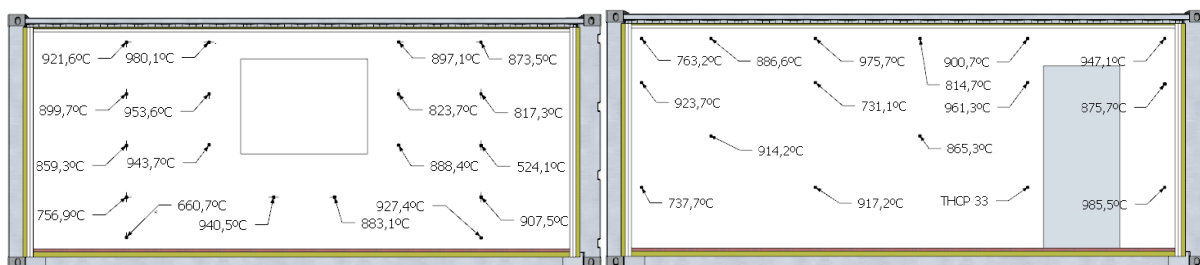


Figura 3.7 e 3.8 – Temperaturas máximas da modelação experimental da parede 1 e 3, no ensaio 2, respetivamente.

3.5.2.3. Curvas de incêndio na Parede 2 e 4

O gráfico 4.11 e 4.12 apresenta a evolução das temperaturas na parede 2 e 4, respetivamente. Na parede 2 a temperatura máxima foi de 902,9°C, aos 24,5 minutos, no termopar CH49. Na parede 4 a temperatura máxima foi de 839,3°C, aos 24,5 minutos, no termopar CH58.

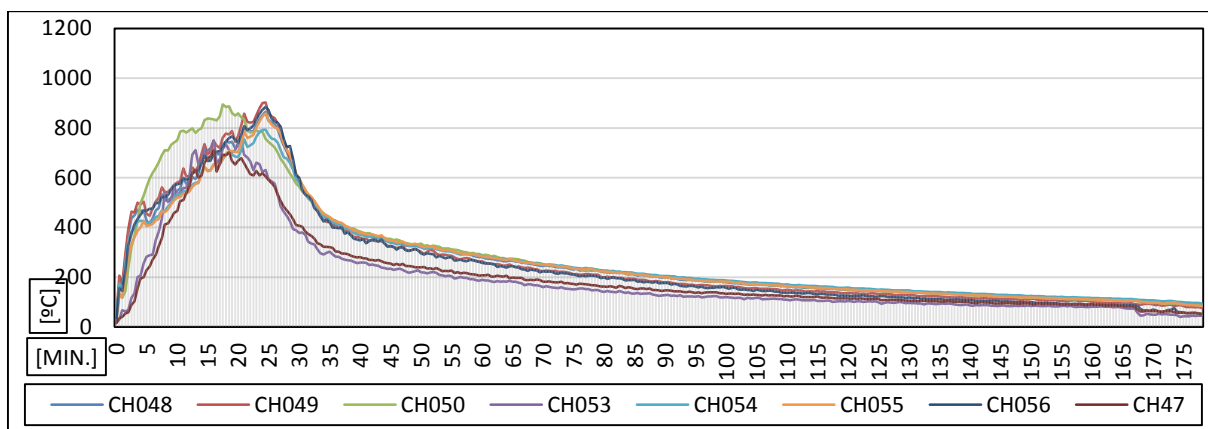


Gráfico 3.11-Evolução das temperaturas da modelação experimental na parede 2, do ensaio 2.

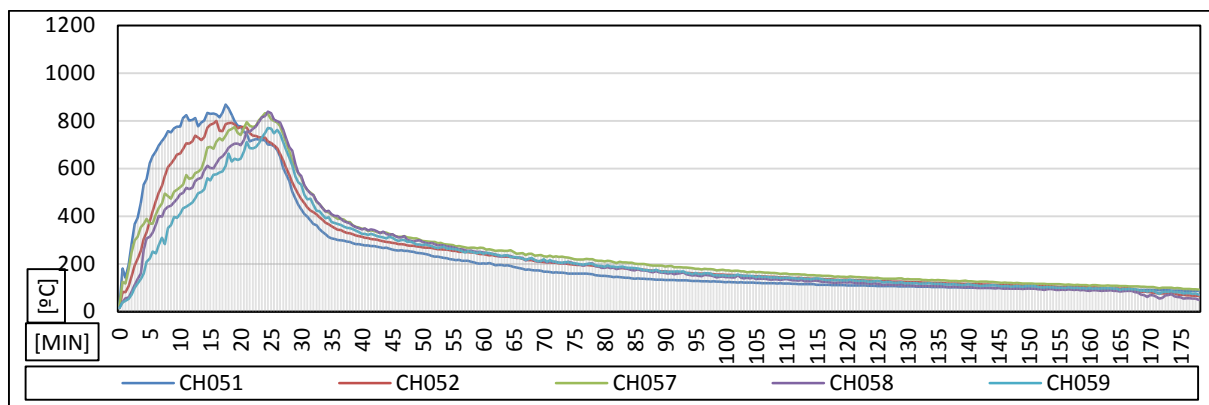


Gráfico 3.12-Evolução das temperaturas da modelação experimental na parede 4, do ensaio 2.



Figura 3.9 e 3.10 – Temperaturas máximas da modelação experimental da parede 2 e 4, no ensaio 2, respetivamente.

3.5.2.4. Curvas de incêndio no interior e no teto do compartimento

O gráfico 4.13 e 4.14 apresenta a evolução das temperaturas nas verticais 1 e 2 e, no teto, respetivamente. Nas verticais 1 e 2 a temperatura máxima foi de 1071,2 °C, aos 23,5 minutos, no termopar CH92 da vertical 1. No teto a temperatura máxima foi de 997,1,5°C, aos 18 minutos, no termopar CH37.

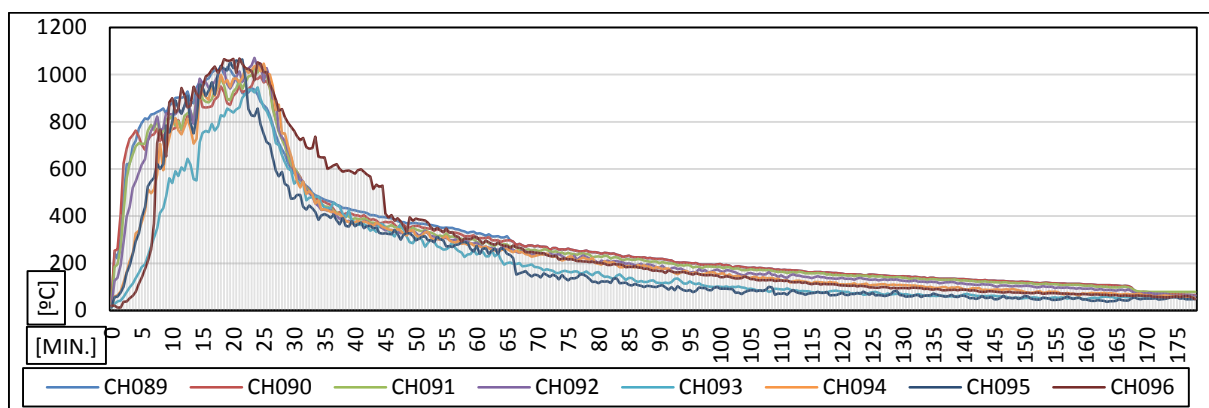


Gráfico 3.13-Evolução das temperaturas da modelação experimental nas verticais do ensaio 2.

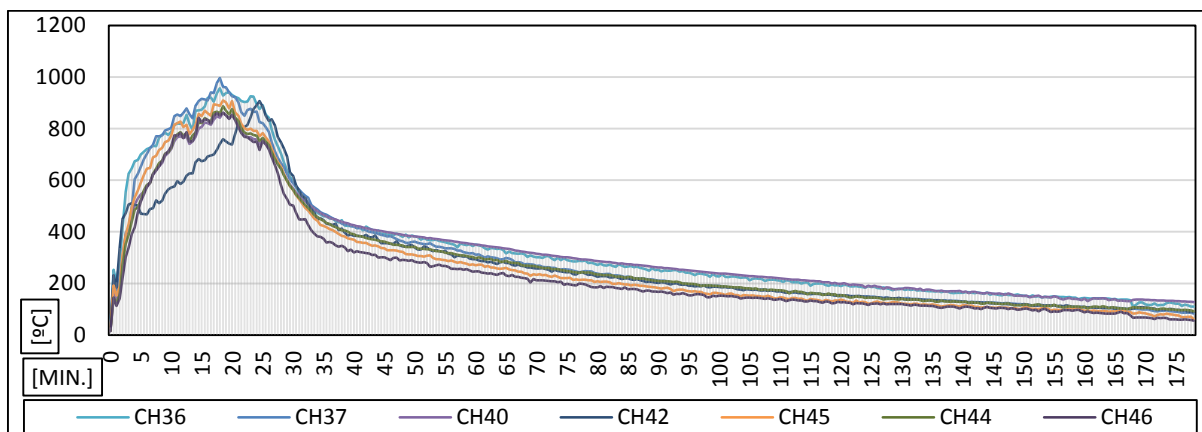


Gráfico 3.14 - Evolução das temperaturas da modelação experimental no teto, do ensaio 2.

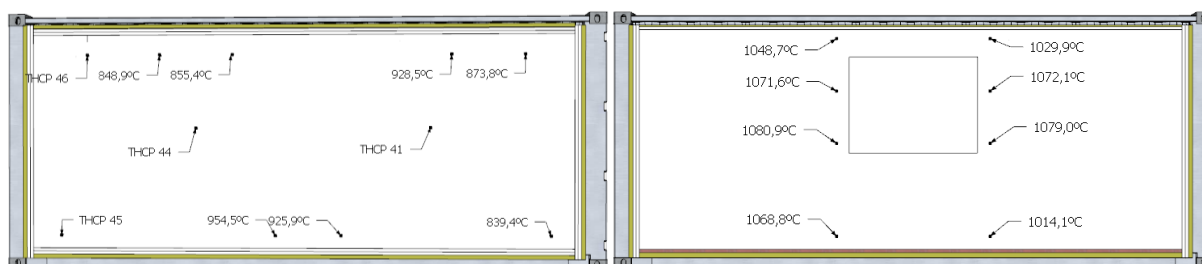


Figura 3.11 e 3.12 – Temperaturas máximas da modelação experimental no teto e nas verticais, no ensaio 2, respetivamente.

3.5.2.5. Evolução das temperaturas no compartimento, do ensaio 1 e 2

Da Figura 4.15 verifica-se que a evolução das temperaturas do ensaio 1 seguiu o mesmo padrão da evolução das temperaturas do ensaio 2.

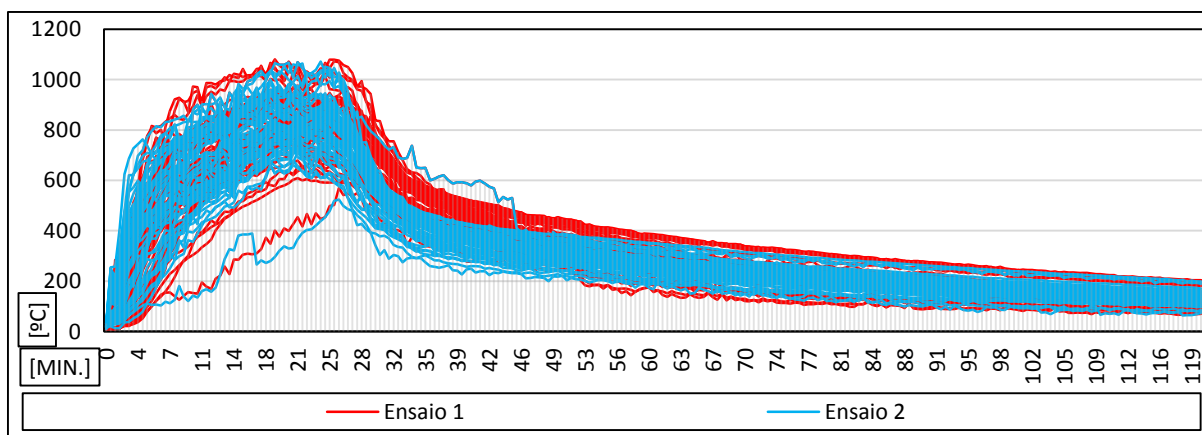


Figura 3.15 – Evolução das temperaturas no compartimento, do ensaio 1 e 2

4. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE UM INCÊNDIO DE COMPARTIMENTO

A modelação numérica de elementos estruturais em situação de incêndio é efetuada através do auxílio de programas de dimensionamento em situação de incêndio que permitem uma análise do comportamento ao fogo dos respetivos elementos estruturais e das temperaturas dos gases a que os elementos estão sujeitos em situação de incêndio. Estes modelos numéricos baseiam-se em algoritmos que procuram simular vários aspetos de um incêndio e, uma vez que estamos a falar de algoritmos que procuram simular a realidade, estes vão apresentar limitações, potencialidades, *input*, *output* e âmbitos de aplicação diferentes, de maneira que no presente capítulo pretende-se elucidar sobre quais os programas escolhidos e, de que modo a calibração da simulação do respetivo programa foi efetuada. Após pesquisa, recolha e avaliação intensiva de programas de dimensionamento ao fogo verificou-se a existência de um variado leque de *software*, que permite efetuar simulações a partir dos métodos simplificados do Eurocódigo, de modelos de zona e de modelos de campo. De forma que se optou pelo *Ozone* e pelo *CFAST* para os modelos de zona e, em relação aos modelos de campo utilizou-se o algoritmo do *FDS* com a interface do *Pyrosim* e do *Abaqus*.

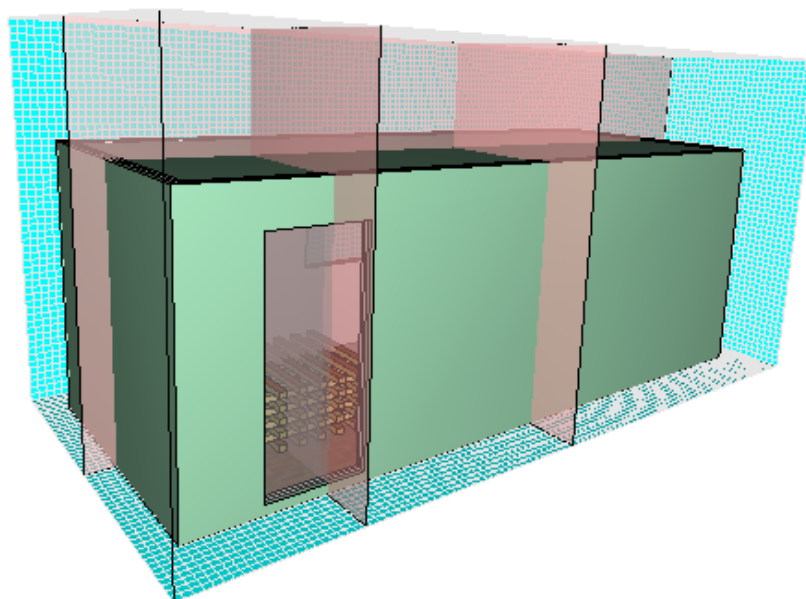


Figura 4.1- Compartimento da modelação numérica de incêndio.

4.1. Modelo de Zonas- Ozone

O programa Ozone V2.2.2 (2002) apresenta um interface em linha de código Visual Basic e, foi desenvolvido por J. F. Cadorin e J. M. Franssen da ULG e, L. G. Cajot; M. Haller e J. B. Schleich da Arcelor na Bélgica a partir de duas investigações europeias, de modo a se obter uma ferramenta com um interface acessível para o dimensionamento de elementos estruturais submetidos a fogos em compartimentos, em que, a linha de código do programa é disponibilizada gratuitamente. O algoritmo do programa é baseado em progressos recentes, na modelação de um incêndio em compartimento e no efeito de fogos localizados em estruturas. O programa considera que o compartimento está dividido em zonas, em que a distribuição da temperatura é uniforme a qualquer instante. Nos modelos de uma zona, a temperatura é considerada uniforme em todo o compartimento. Este tipo de modelo é assim válido em caso de incêndios inteiramente desenvolvidos, contrariamente aos modelos de duas zonas, que são válidos em caso de fogos localizados. Neste último modelo existe uma camada quente que se situa próxima ao teto e uma camada fria próxima do chão, isto é, um modelo pré e pós flashover. O programa OZone V2.2.2 calcula ainda o desenvolvimento da temperatura de uma secção em aço submetida a esse fogo no compartimento e, finalmente, e avalia a resistência ao fogo de elementos estruturais em aço, de acordo com o EC3 ENV 1993-1-2. Foram efetuadas diversas melhorias no Ozone: o modelo de parede é feito por elemento finito e dois modelos diferentes de combustão foram desenvolvidos para cobrir situações diferentes da utilização do programa (Morente et al,2008)..

4.1.1. Âmbito de Aplicação

A hipótese principal da aplicação do OZone V2.2.6 neste documento é verificar a calibração utilizada pelo modelo de combustão, e as estratégias utilizadas pelo respetivo programa na validação do seu output. O programa OZone V2.2.6 apresenta dois modelos de combustão, modelos externos e modelos prolongados da chama. Nos modelos de combustão externa, toda a carga de incêndio é transformado em gases no compartimento, mas apenas uma parte fornece energia no compartimento, em que, a taxa de calor libertado pelo fogo pode ser limitada pela quantidade de oxigénio disponível no compartimento, a taxa de pirólise é constante. Nos prolongados da chama pressupõe-se que a libertação da massa é limitada pela quantidade de oxigénio disponível no compartimento, de maneira que, a massa total de combustível é queimada no interior do compartimento, provocando um aumento da duração do incêndio. Estes modelos modificam a curva da HRR, que é definido pelo utilizador ou se mantém *default*, se o utilizador optar por usar as considerações do Eurocódigo 2, em função do balanço de massa de oxigénio, de maneira que, o modelo de combustão do OZone V2.2.6 foi analisado exaustivamente Este estudo descreve como se obteve o modelo numérico pretendido, verifica a sua correta utilização e, como se criou os dados de entrada de forma adequada, de modo a analisar-se o *output* correto obtido da simulação do programa OZone V2.2.6 .

4.1.2. Dados de entrada

O Ozone V2.2 apresenta a seguinte interface grafica, como podemos verificar pela figura 3.1, de onde podemos observar os atalhos para os parâmetros e para executar a análise respectiva de temperatura dos gases, a temperatura desenvolvida no aço e a respectiva resistência a uma determinada solicitação de força, as duas ultimas análises não foram utilizadas no trabalho uma vez que neste trabalho não se pretende saber se o elemento suporta determinada força, mas sim ate que limites de força é que o elemento suporta .

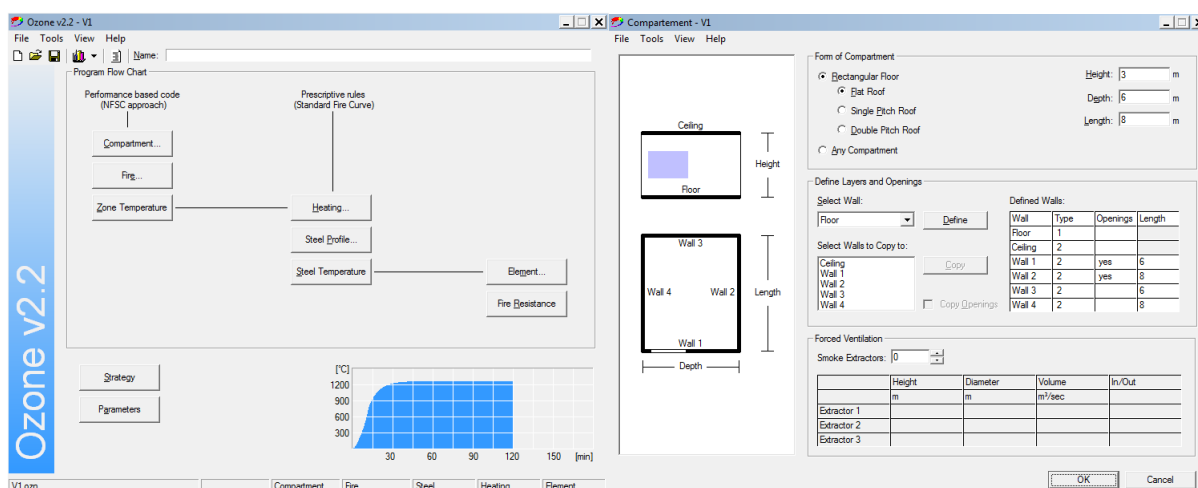


Figura 4.2 e 4.3 - Interface gráfica inicial e do compartimento no programa Ozone V2.2.2, respectivamente.

A partir da interface inicial do Ozone V2.2.2 selecciona-se o atalho do compartimento obtendo-se o menu representado na figuras 3.2, no respectivo menu define-se a geometria do compartimento e as camadas termicas da envolvente do compartimento atraves da interface representada na figura 3.3 que, utiliza para a forma do compartimento, *flat roof*, com a geometria e as propriedades termicas da envolvente do compartimento da modelação experimental.

Uma vez definidas as características do compartimento, acedemos ao menu principal e seleccionamos o menu de fogo da figura 3.4. Como podemos verificar a partir da figura 3.4, o Ozone V2.2.2 apresenta duas alternativas para definir o incêndio, a partir da curva de incêndio definida pelo EN 1991-1-2 ou, a partir da taxa de libertação de calor definida pelo utilizador. Em relação ao AFFM optou-se por manter todas as medidas de AFFM constantes e, iguais a um, de modo, a não afectar a carga de incêndio e respeitarmos o anexo nacional do EN 1991-1-2. O modelo de combustão manteve-se *default* (duração do fogo prolongada, factor de eficiência de combustão de 0,8, coeficiente Stoichiometrico de 1,27 e, com calor de combustão de 17,5 MJ/kg).

As características de incêndio definidas no Ozone V2.2.2 são: Area máxima de fogo de 10,76 m²; altura do fogo de 1m; altura do combustível de 0,5 m.

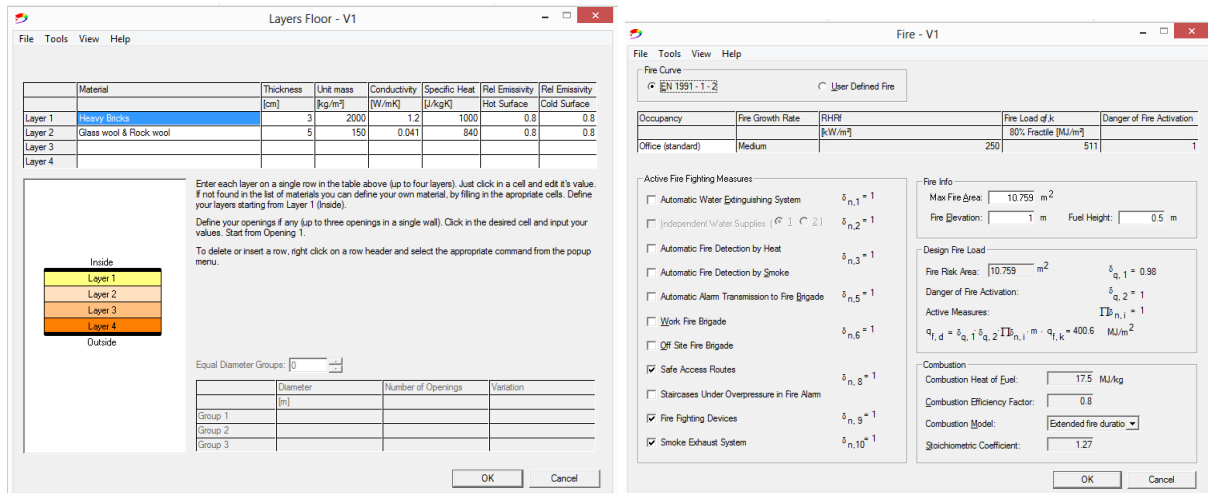


Figura 4.4 e 4.5 - Interface gráfica do menu do fogo e do menu das propriedades da envolvente do modelo em estudo no programa Ozone V2.2.2, respectivamente.

A figura 3.6 representa o menu da estratégia utilizada pelo Ozone V2.2.2, em que, se define a modelação de zona pretendida, isto é, modelo de uma zona, duas zonas ou, um modelo de combinação, que segue um critério de transição de uma zona para duas zonas ou, vice-versa, de acordo com a limitação dos parâmetros definidos na figura 3.6. Os parâmetros definidos na figura 3.5 foram considerados *default*.

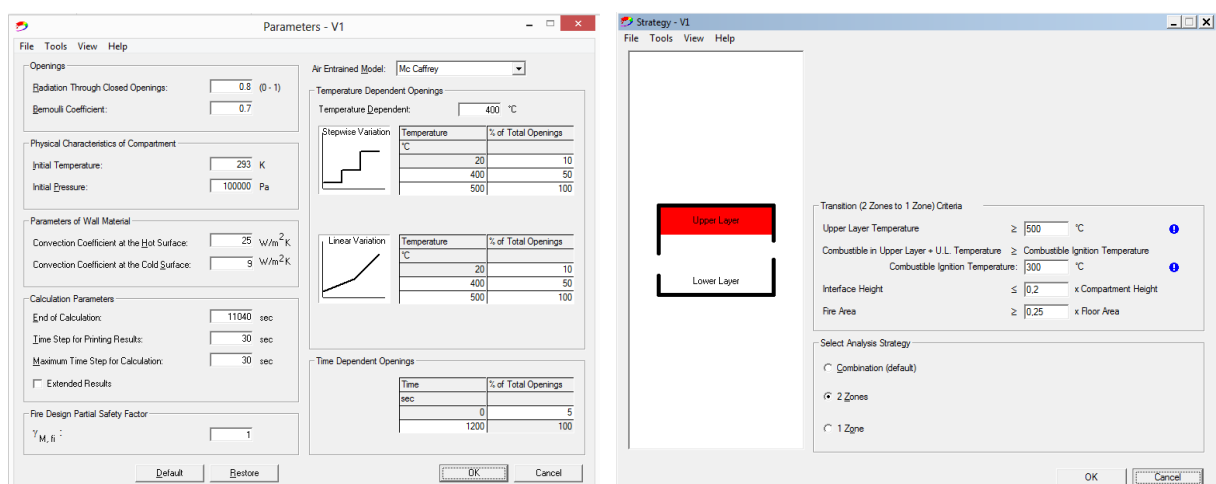


Figura 4.6 e 4.7 - Interface gráfica dos parâmetros e da estratégia do modelo em estudo no programa Ozone V2.2.2, respectivamente.

4.2. Modelo de Zonas- CFAST

O modelo de zona CFAST V6.2.1 foi desenvolvido por R. D. Peacock, W. W. Jones, P. A. Reneke e, G. P. Forney do NIST e, é o resultado da união do FAST com os CCFM.VENTS. O programa apresenta uma linha de programação baseada em FORTRAN/C e, tal como, o Pyrosim é um modelo de construção de modelos numéricos que, utiliza o FDS/Smokeview para gerar o respetivo *output* e permitir uma visualização do incêndio e da geometria do compartimento, a partir destes dois programas. A linha de código do CFAST é de distribuição gratuita e, baseia-se em modelação de elementos finitos, uma vez que cada compartimento é dividido em um pequeno número de volumes, cada um dos quais é uniforme em termos de temperatura e composição. Isto é, as concentrações de fumo, temperatura e gás no interior de cada camada são assumidos como sendo iguais em todos os pontos. No CFAST, cada compartimento é dividido em duas camadas, o compartimento do fogo tem zonas adicionais para a pluma do fogo e para as aberturas no teto, uma vez que as respetivas zonas do fogo são calculadas de maneira a considerar a massa e a transferência de calor entre as zonas do fogo e as superfícies do compartimento Uma vez que estas camadas representam uma camada superior e uma inferior da sala, as condições dentro de um quarto só podem variar de chão ao teto, e não horizontalmente. Esta suposição é baseada em observações experimentais que em um incêndio, condições da sala fazer estratificar-se em duas camadas distintas. Embora possamos medir as variações das condições dentro de uma camada, estas são geralmente comparado pequenas diferenças entre as camadas. (Peacock, Jones, Reneke, & Forney, 2009)

4.2.1. Âmbito de Aplicação

O programa CFAST V6.2.1 utiliza um modelo de duas zonas de fogo para calcular a distribuição da evolução de gases de fumo, fogo e temperatura ao longo do compartimento do compartimento durante o incêndio, apesar do programa apresentar a hipótese de se modelar um modelo de uma zona, o verdadeiro âmbito do CFAT V6.2.1 é a modelação de duas zonas. O âmbito de aplicação do CFAST V6.2.1 é o mesmo do programa OZone V2.2.2, utilizar as três modelações numéricas que o programa realiza, normal (modelo de duas zonas), *shaft* (modelo de uma zona) e, *corridor* (modelo de zonas com fluxo atrasado). Pretende-se ainda verificar o modelo de combustão do CFAST, que para modelar a evolução do incêndio, o programa utiliza um modelo especificado pelo utilizador, expresso em função de taxas de libertação de energia e de massa expresso pelos elementos constituintes do compartimento ao longo do tempo Este documento pretende ainda descrever a forma correta de como se obter o modelo numérico pretendido, verificar a sua correta utilização, criar os dados de entrada de forma adequada e, analisar o *output* obtido da simulação do programa CFAST V6.2.1, de modo, a validar os resultados experimentais da modelação experimental, tal como, os resultados das restantes modelações numéricas dos respetivos programas de zona e de campo, de maneira, a comparar as vantagens e as limitações do programa CFAST V6.2.1 em relação aos outros programas e, á respetiva modelação experimental.

4.2.2. Dados de entrada

O CFAST V6.2.1 apresenta a interface gráfica representada na figura 3.1, de onde podemos visualizar uma série de itens de menu para auxiliar a criação do modelo numérico. Os itens do menu incluem o atalho de criação do ficheiro de geometria, de simulação do modelo e de visualização do modelo através do Smokeview. O atalho *Geometry* permite criar um arquivo de geometria para visualização com o programa smokeview. O atalho *Run* permite correr o modelo numerico, de acordo com os dados de entrada especificados. O atalho *View* corre o programa com o smokeview, em que o arquivo de geometria esta previamente defenido. Isso permite que o usuário veja a geometria compartimento previamente ou, visualizar os resultados da simulação visualmente.

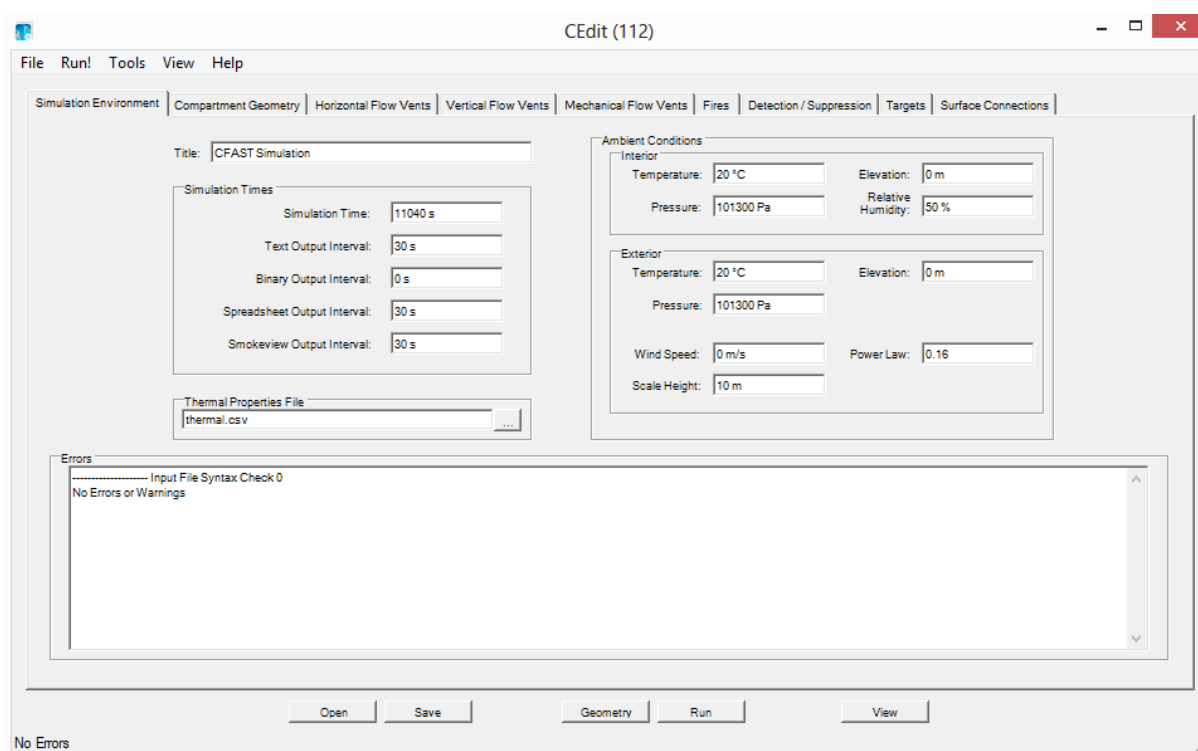


Figura 4.8 - Interface gráfica inicial do ambiente da simulação no programa CFAST V6.2.1.

Os parâmetros utilizados no tempo de simulação e nas condições exteriores e interiores do ambiente, no caso da modelação numerica em estudo, foram os que estão representados na figura 3.1. O menu de simulação de ambiente apresenta ainda uma interface para verificar e indicar se o ficheiro dos dados de entrada contém erros que impeça a modelação.

Em relação à geometria do compartimento e das propriedades termicas dos materiais da envolvente do compartimento, no programa CFAST V6.2.1, foram utilizados os dados de entrada representados na respectiva figura 3.2.

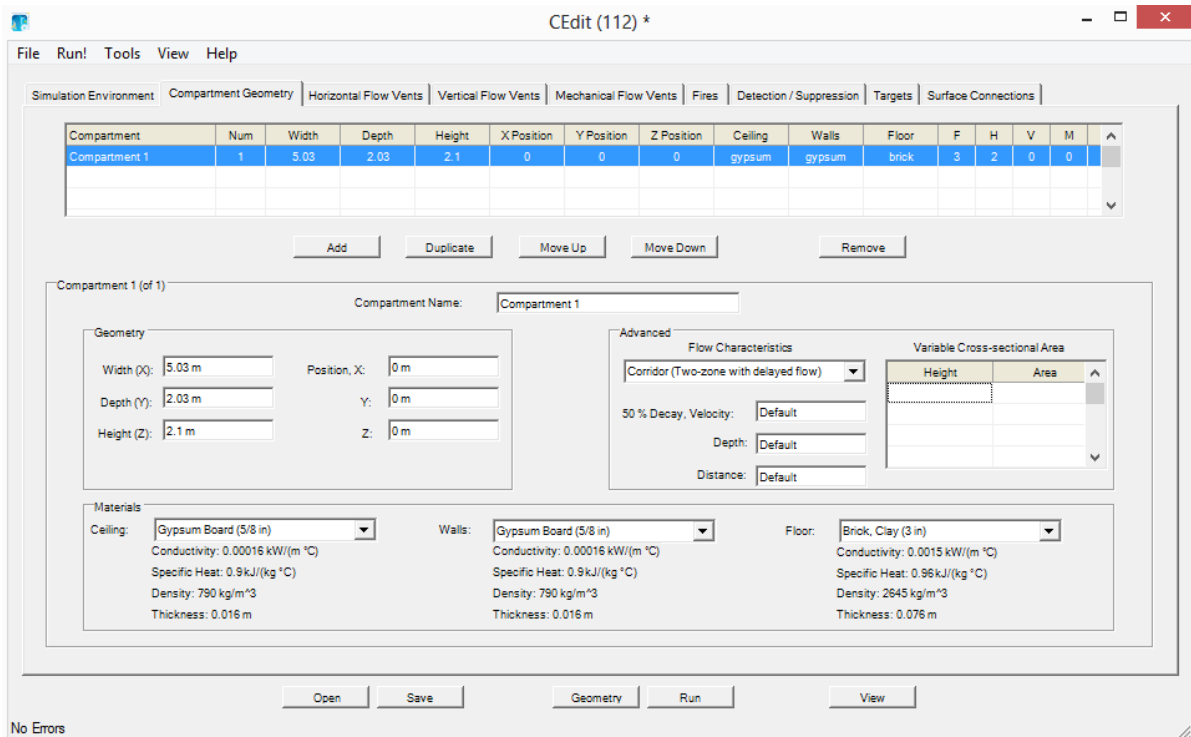


Figura 4.9 - Interface gráfica da geometria do compartimento no programa CFAST V6.2.1.

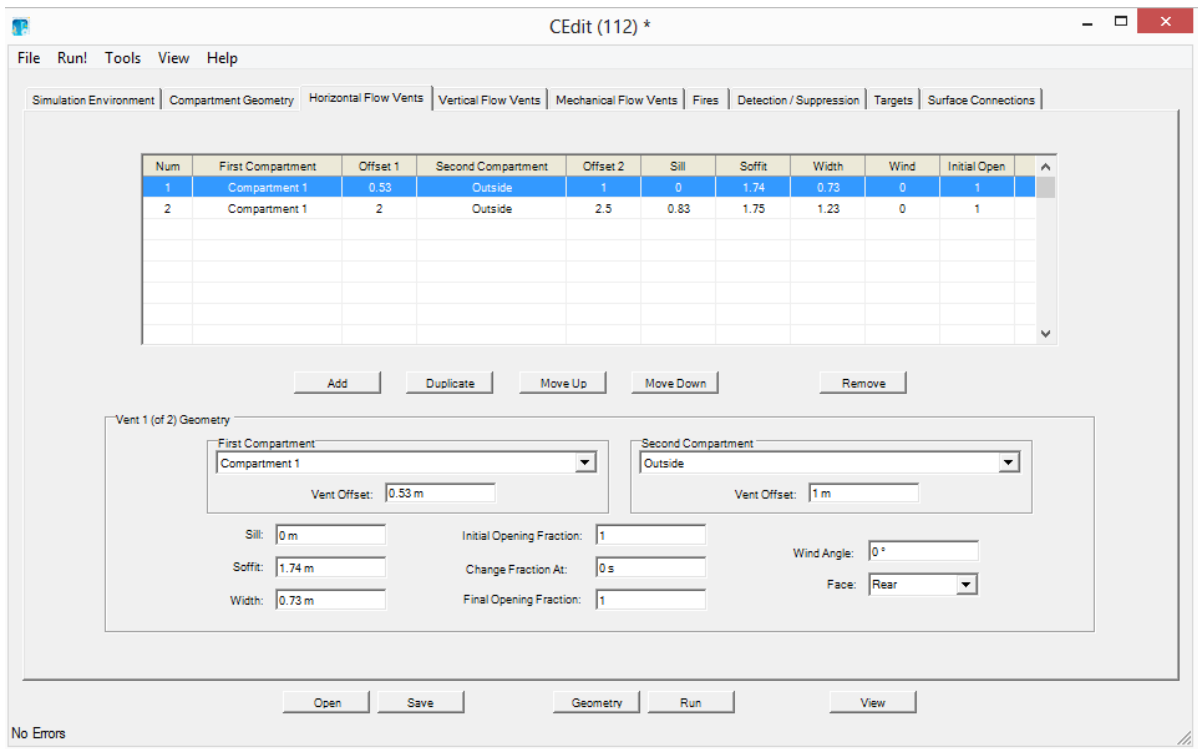


Figura 4.10 - Interface gráfica das aberturas do compartimento no programa CFAST V6.2.1.

A geometria das aberturas apresenta os parâmetros definidos na figura 3.3. O CFAST V6.2.1, permite através do atalho View, verificar se a geometria das aberturas foi bem definida.

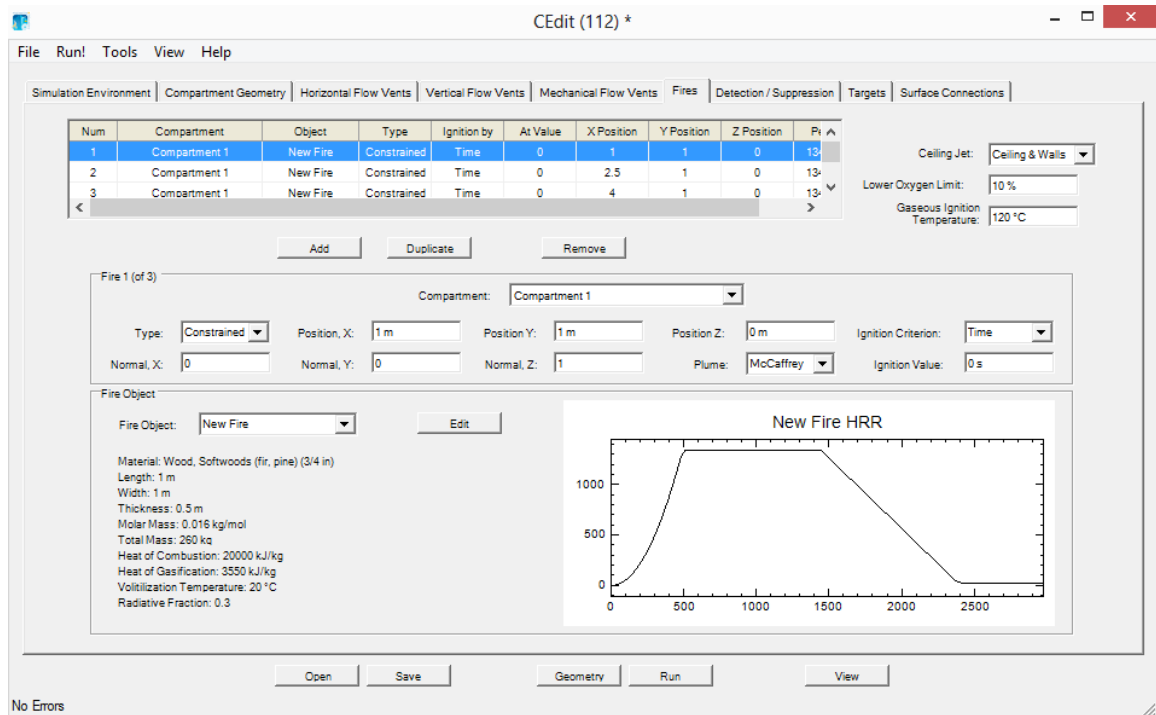


Figura 4.11 Interface gráfica do modelo de combustão do incêndio utilizado no programa CFAST V6.2.1.

Em relação ao incêndio foi utilizado 3 incêndios localizados, tal como aconteceu na modelação experimental, em que o modelo de combustão apresenta os parâmetros indicados na figura 3.3. O CFAST V6.2.1 permite utilizar uma taxa de libertação de calor pre-definida, de acordo com as figura 3.3 e 3.5 ou, de acordo com a taxa de libertação de calor pretendida pelo usuario.

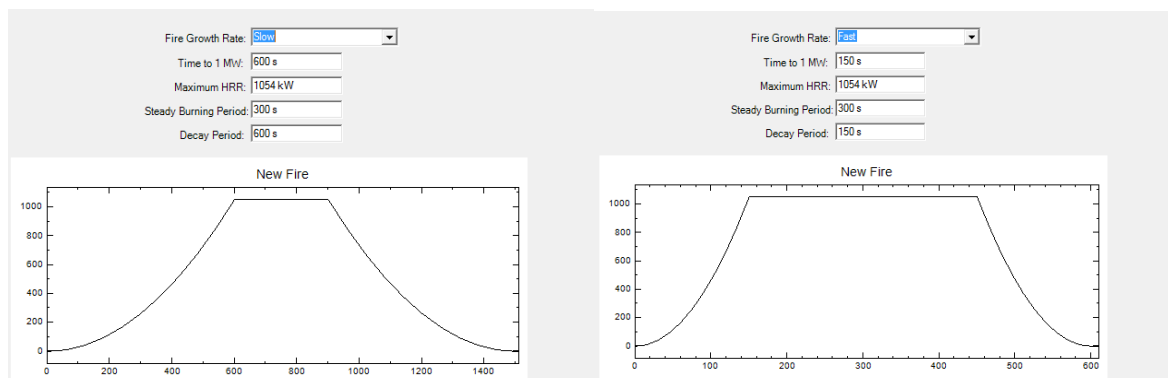


Figura 4.12 Interface gráfica da taxa de libertação de calor pre-definida.

4.3. Modelos de CFD – FDS/Smokeview/Pyrosim

O FDS é um simulador de fogo poderoso, que foi desenvolvido no *National Institute of Standards and Technology*. O FDS simula cenários de incêndio usando dinâmica de fluidos computacionais otimizados. Sendo desenvolvido com o intuito de resolver problemas práticos provocados por incêndios na engenharia de proteção contra incêndios e ao mesmo tempo fornecer uma ferramenta para o estudo da dinâmica e combustão de fogos. O FDS é um modelo computacional de dinâmica de fluidos de propagação de incêndio por meio de fluxo de fluidos. Esta abordagem é muito flexível e pode ser aplicado a incêndios que variam de um fogão para tanques de armazenamento de petróleo. Também pode modelar situações que não incluem um incêndio, tais como a ventilação dos edifícios. O programa resolve numericamente as equações de Navier-Stokes, equações apropriadas para condução de fluidos térmicos lentos, com ênfase no transporte de fumo e calor de incêndios. A aproximação envolve a filtração de ondas acústicas, de modo a permitir grandes variações na temperatura e na densidade. A análise pode ser tratada como DNS, em que os termos dissipativos são analisados diretamente, ou como uma grande simulação LES, em que os vórtices em grande escala são analisados diretamente e, são modelados os processos dissipativos das malhas com escala secundária. A escolha do DNS ou do LES depende do objetivo do cálculo e da definição da malha computacional. São usados no FDS dois modelos de combustão. Para uma análise DNS onde a difusão do combustível e do oxigénio pode ser modelada diretamente, a análise mais apropriada é uma etapa global com uma reação química de taxa finita. Numa análise LES onde a malha não seja refinada o suficiente para resolver a difusão do combustível e do oxigénio, é usado um modelo misto baseado na fração da combustão (McGrattan, et al., 2007).

O Smokeview é um programa de visualização dos resultados da simulação do FDS. O Smokeview visualiza os resultados dos modelos FDS apresentando o fluxo das partículas, as iso-curvas 2D ou 3D de dados de fluxo de gás, tais como vetores de temperatura e de fluxo mostrando a direção e o valor do fluxo. O Smokeview visualiza igualmente dados estáticos em instantes específicos que usam mais uma vez contornos 2D ou 3D (McGrattan, et al., 2007).

De acordo com o manual do PyroSim do utilizador, o Pyrosim é uma interface gráfica de modelos de construção para o FDS (pré-processador do FDS), uma vez que o FDS apresenta uma interface não amigável baseada em linhas de código. A interface PyroSim fornece *feedback* imediato dos dados de entrada e garante o formato correto para o arquivo dos dados de entrada do FDS. Além disso, o PyroSim permite utilizar características de geometria 2D e 3D de criação, como paredes diagonais, imagens de fundo, agrupamento de objetos, opções de visualização flexíveis, bem como a cópia e reprodução de obstruções. É possível importar arquivos DXF que incluem objetos 3D ou linhas 2D que pode ser para criar objetos 3D no PyroSim.

4.3.1. Âmbito de Aplicação

Este subcapítulo pretende descrever a metodologia correta de como se obter o modelo numérico pretendido, verificar a sua correta utilização, criar os dados de entrada de forma adequada e, como se obter os resultados pretendidos através da simulação do programa Pyrosim V5.5.3, de modo, a validar os resultados experimentais da modelação experimental, tal como, os resultados das restantes modelações numéricas dos respetivos programas de zona, de maneira, a comparar as vantagens e as limitações do programa Pyrosim V5.5.3 em relação aos outros programas e, á respetiva modelação numérica. Uma vez que uma modelação detalhada do incêndio só pode ser alcançada através de um programa de computacional de dinâmica de fluidos e através de modelos de elementos finitos, no dimensionamento de elementos estruturais em situação de incêndio. A integração de ambos modelos implica uma adequada compreensão das condições fronteira. Desta maneira a utilização do Pyrosim V5.5.3 neste trabalho irá permitir a análise da condição limite do meio gasoso gerado pelo fogo e, através dos resultados obtidos no Pyrosim V5.5.3 vais ser possível utilizar esses resultados como dados de entrada no programa Abaqus 6.12.1, de maneira, a realizar a análise da condição limite no meio sólido, representada nos elementos estruturais do compartimento.

4.3.2. Dados de entrada

Este topico fornece uma visão geral de como calibrar um modelo de campo utilizando a modelação do FDS, com a interface do PyroSim.

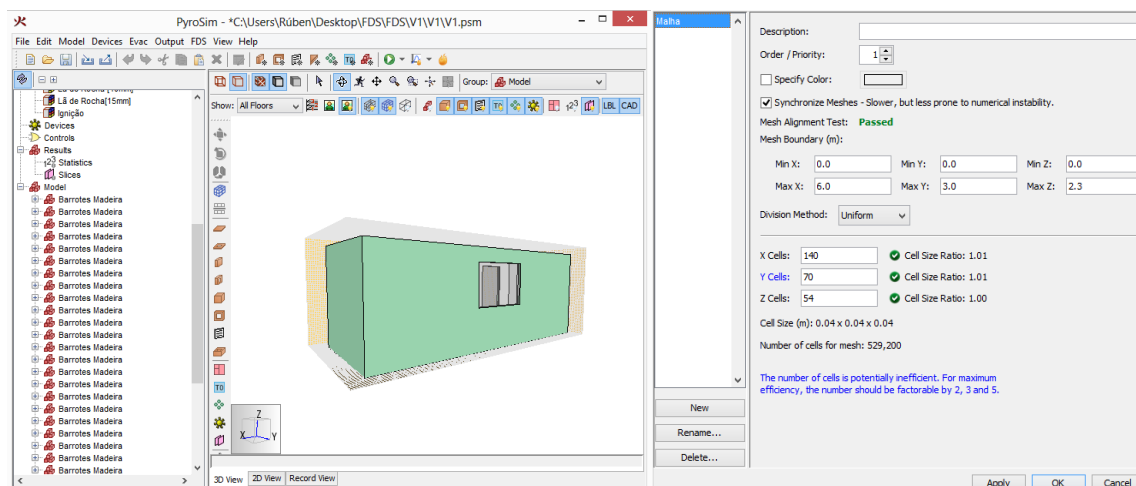


Figura 4.13 e 4.14 - Interface gráfica inicial e, do menu da criação da malha do modelo em estudo, no Pyrosim V5.5.3, respetivamente.

De acordo com o manual do PyroSim do utilizador, a Malha computacional do utilizada pelo Pyrosim V5.5.3 realiza os cálculos dentro de um domínio feito de volumes retilíneos chamados de malhas, em que cada malha é dividida em células cúbicas. Na escolha do tamanho da célula

deve ser considerado a resolução necessária para definir objetos no modelo e a resolução desejada para a solução da dinâmica do escoamento (incluindo efeitos de incêndio locais induzidas). Cada objeto na simulação (obstruções e aberturas) deve estar de acordo com a malha. Quando a localização de um objeto não está de acordo com a respetiva malha vai implicar que o objeto seja automaticamente reposicionado durante a simulação. Qualquer objeto que se prolonga para além do limite do domínio físico da malha é excluído da respetiva malha.

Os objetos geométricos (obstruções) numa análise do FDS V5.5.3 podem ser especificados utilizando dimensões diferentes das coordenadas da malha da célula, uma vez que, durante a simulação do FDS, todas as faces de uma obstrução são deslocadas para célula mais próxima, se assim acontecer. Se uma obstrução é muito fina, as duas faces pode ser aproximadas na mesma célula face. O Guia do Usuário do FDS recomenda que, para a funcionalidade ser completa, obstrução deve ser especificada como sendo de pelo menos uma célula de espessura. Como resultado, o tamanho da célula deve ser seleccionada suficientemente pequena para representar a geometria do problema. Além disso, as células devem ser o mais próximo possível de cubos. O tamanho da célula tem ser suficiente para resolver o fluxo da solução dinâmica e, tal facto só pode ser determinada através de estudo de sensibilidade do tamanho da célula. (McGrattan, Klein, Hostikka, e Floyd, 2009).

Na modelação numérica realizada no FDS V5.5.3, vamos utilizar células de malha com um tamanho de 0,050m, como se pode verificar pelas figuras seguintes. Esta dimensão é geometricamente conveniente e suficiente para se obter uma precisão numérica moderada.

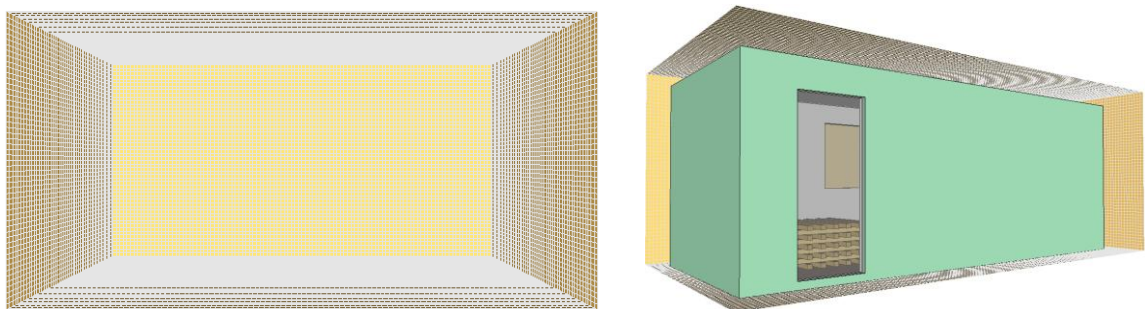


Figura 4.15 e 4.16 - Interface gráfica do modelo e da malha do modelo em estudo, no Pyrosim V5.5.3, respetivamente.

Conforme descrito no Guia do Usuário do FDS V5.5.3 (McGrattan, et al., 2005), uma fonte comum de confusão no FDS é a distinção entre a combustão em fase gasosa e a pirólise em fase sólida. A combustão em fase gasosa refere-se à reacção do vapor do combustível com o oxigénio. A pirólise em fase sólida refere-se a geração de vapor de combustível numa superfície

sólida ou líquida. Numa simulação fogo FDS, há apenas um combustível gasoso que actua como um substituto para todas as fontes de combustível potencial. A reação é definida utilizando a caixa de diálogo Editar Reações no PyroSim V5.5.3. De referir que o PyroSim V5.5.3 suporta apenas o modelo de mistura de fracção para explicar a evolução do gás combustível a partir da superfície de origem, por meio do processo de combustão. A alternativa fornecido pelo FDS V5.5.3 é a abordagem da taxa finita, em que todas as espécies de gases individuais envolvidas no processo de combustão são definidas e, controladas individualmente. A abordagem de taxa finita só é recomendada para Simulação Numérica Direta. O modelo de fração de mistura é a abordagem mais utilizada.

Para simular a transferencia de calor na superfície do material sólido é necessário especificar um material que descreve determinadas propriedades térmicas e de comportamento de pirólise. As propriedades térmicas e de comportamento de pirólise são defenidas atraves dos menus representados pelas seguintes figuras.

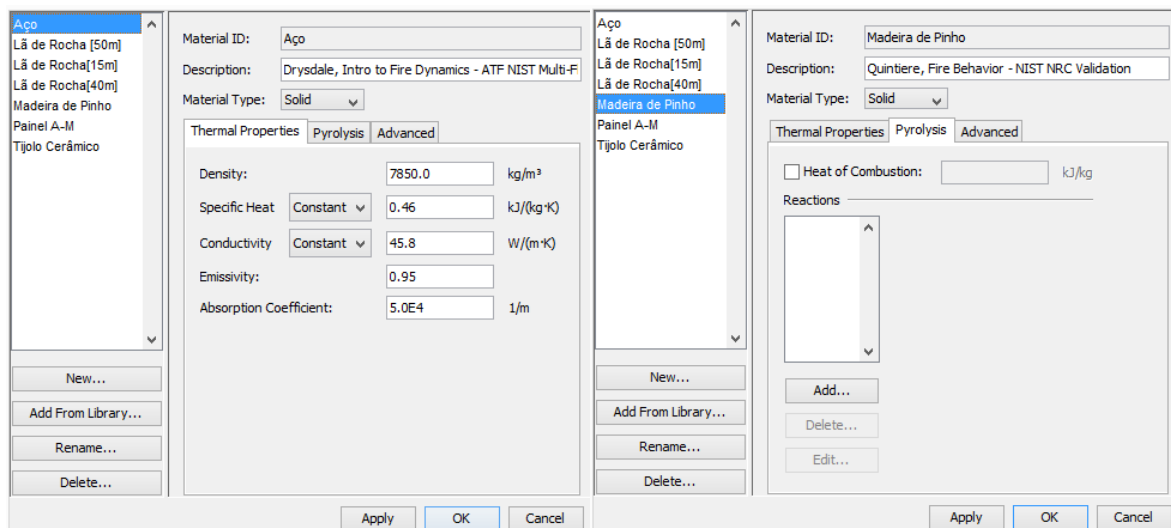


Figura 4.17 e 4.18 - Interface gráfica do menu das propriedades térmicas e de comportamento de pirólise dos materiais do modelo em estudo, respetivamente.

As superfícies são usadas para definir as propriedades dos objetos sólidos e aberturas no modelo FDS. A superfície pode usar materiais previamente definidos em misturas ou camadas. Por defeito, todos os objetos sólidos e aberturas são inertes, com uma temperatura que é fixa à temperatura ambiente (que pode ser redefinida no menu dos parâmetros da simulação).As superfícies além de definirem a condução de calor na forma de um sólido, podem ainda ser definidas como um queimador, em que, é especificada a temperatura de ignição do respetivo objeto e, definir as propriedades de muitas outros aspetos suportados pelo FDS (McGrattan, Klein, Hostikka, e Floyd, 2009).

De acordo com o manual do PyroSim do utilizador existem quatro tipos de superfície fundamentais no programa Pyrosim V5.3.1, *Inert*, *Adiabatic*, *Open e*, *Mirror*. No *inert*, esta superfície utiliza a temperatura ambiente de forma constante, em que, não há transferência de calor (por radiação ou por convecção) a partir do gás de um sólido adiabático. No *adiabatic*, esta superfície mantém-se constante à temperatura ambiente, em que a transferência de calor ocorre a partir de gases em superfícies inertes, em que, a superfície *adiabatic* é a superfície do padrão no programa PyroSim V5.5.3. No *mirror*, esta superfície é apenas usada para aberturas de ventilação no limite da malha exterior. O *mirror* é um contorno impermeável, sem escorregamento, que inverte o fluxo. Destina-se a ser aplicada a um limite da malha inteira, simetricamente o dobro do tamanho do domínio. No *open*, esta superfície é apenas usado para aberturas de ventilação no limite da malha exterior, em que, se denota uma abertura passiva para o exterior e é muitas vezes usado para modelar portas e janelas abertas.

Os tipos de superfície disponíveis no pyrosim são *adiabatic*, *Inert* e, *burner*. No *adiabatic*, este tipo de superfície é idêntico ao tipo de superfície embutida *adiabatic*. A superfície *adiabatic* permite personalizar a descrição, cor e textura da superfície *adiabatic*. *Inert*, este tipo de superfície é idêntico ao tipo de superfície embutida *inert*, ela permite personalizar a descrição, cor e textura da superfície inerte; No *Burner*, este tipo de superfície representa um fogo com uma taxa de liberação de calor conhecida ou massa de combustível a taxa de perda massa de combustível.

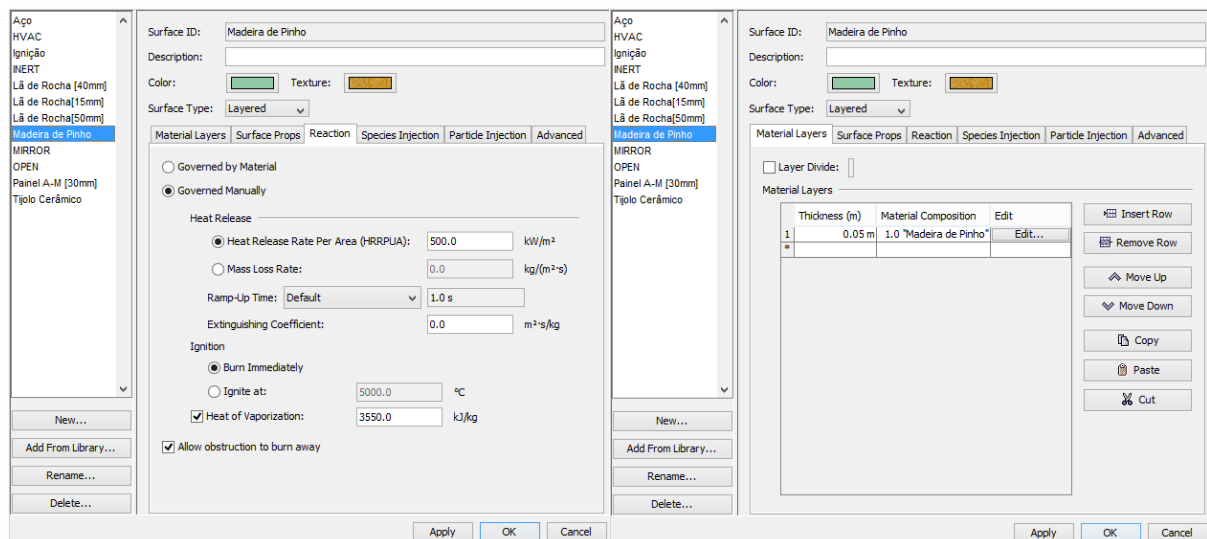


Figura 4.19 Interface gráfica do menu de criação das superfícies do modelo em estudo, no Pyrosim 5.3.1, com os respetivos valores utilizados.

As figuras seguintes representam a interface gráfica do menu das características dos dispositivos (termopares e medidores de fluxo de calor) utilizados no modelo em estudo, no programa Pyrosim 5.3.1, com os respetivos valores utilizados.

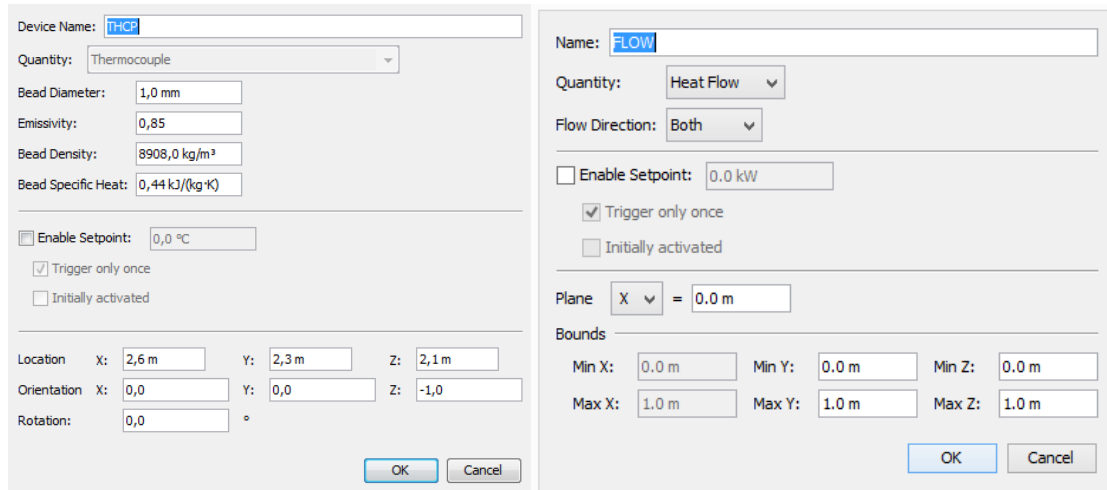


Figura 4.20 - Interface gráfica do menu das características dos dispositivos (termopares e medidores de fluxo de calor) utilizados no modelo em estudo, no programa Pyrosim 5.3.1.

As figuras seguintes representam a Interface gráfica dos menus de definição dos parâmetros da simulação utilizados no modelo em estudo, no programa Pyrosim 5.3.1., com os respetivos valores utilizados.

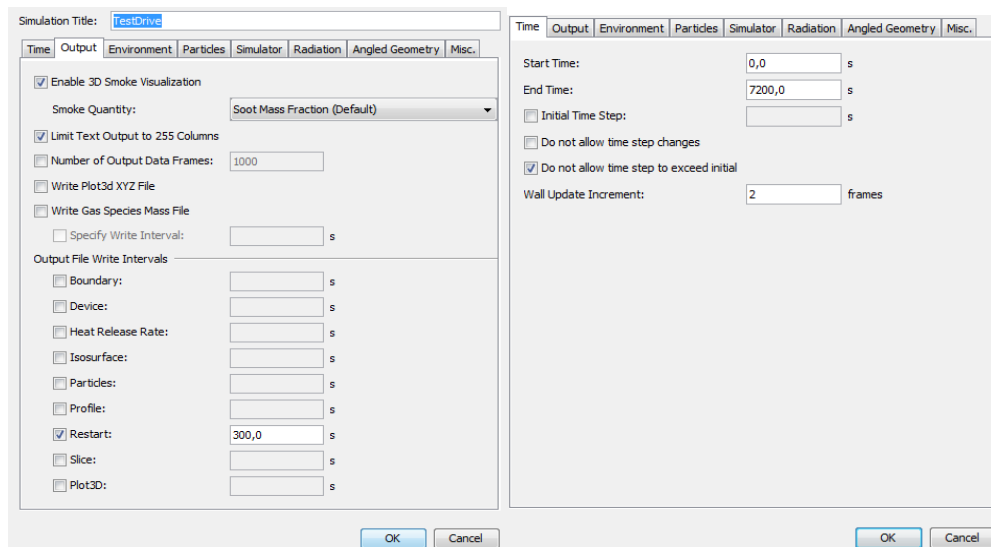


Figura 3.21 - Interface gráfica dos menus de definição dos parâmetros da simulação utilizados no modelo em estudo, no programa Pyrosim 5.3.1.

4.4. Resultados numéricos de um incêndio de compartimento

Neste capítulo é apresentado a evolução das temperaturas de incêndio obtidas pelas respetivas modelações numéricas, isto é, a evolução de temperaturas obtidas pelos modelos térmicos de fogo simplificados do respetivo Eurocódigo 1, parte 2 e pelos modelos térmicos de fogo avançados.

4.4.1. Modelos térmicos de fogo simplificados

O output dos modelos térmicos de fogo simplificados desenvolvidos na dissertação são obtidos pelos modelos de incêndio localizado e, pelos modelos das curvas de incêndio paramétrico do respetivo Eurocódigo 1, parte 2.

4.4.1.1. Incêndio Localizado

O gráfico 4.1 apresenta a taxa de libertação de calor obtido pelos modelos térmicos avançados (Modelos de zona). A partir da taxa de libertação de calor é obtido a altura da chama de acordo com o modelo de incêndio localizado, que esta representa na figura 6.2.

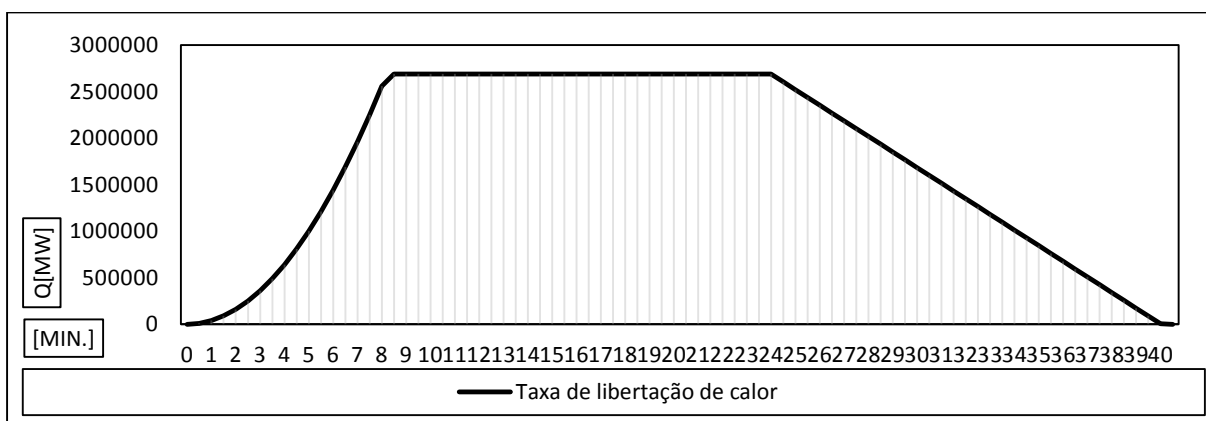


Gráfico 4.1 – Taxa de libertação de calor utilizada no modelo de incêndio localizado.

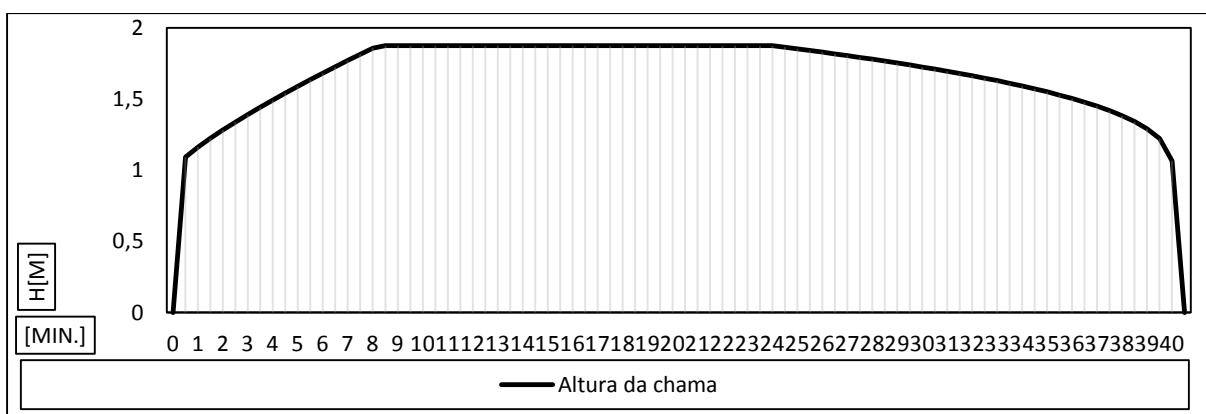


Gráfico 4.2 – Altura da chama obtida no modelo de incêndio localizado.

4.4.1.2. Curvas de Incêndio paramétricas

O gráfico 4.3 é apresentado a comparação entre os resultados do primeiro ensaio experimental e a curva de incêndio paramétrica da evolução de temperaturas no compartimento. A temperatura máxima registada na evolução da temperatura nas curvas de incêndio paramétricas foi cerca de 945,1°C e ocorreu aos 20 minutos. A partir do instante em que é atingido a temperatura máxima nas curvas paramétricas, a temperatura começa a decrescer, mas mais rapidamente do que nos modelos de zona e de campo e que respetiva modelação numérica.

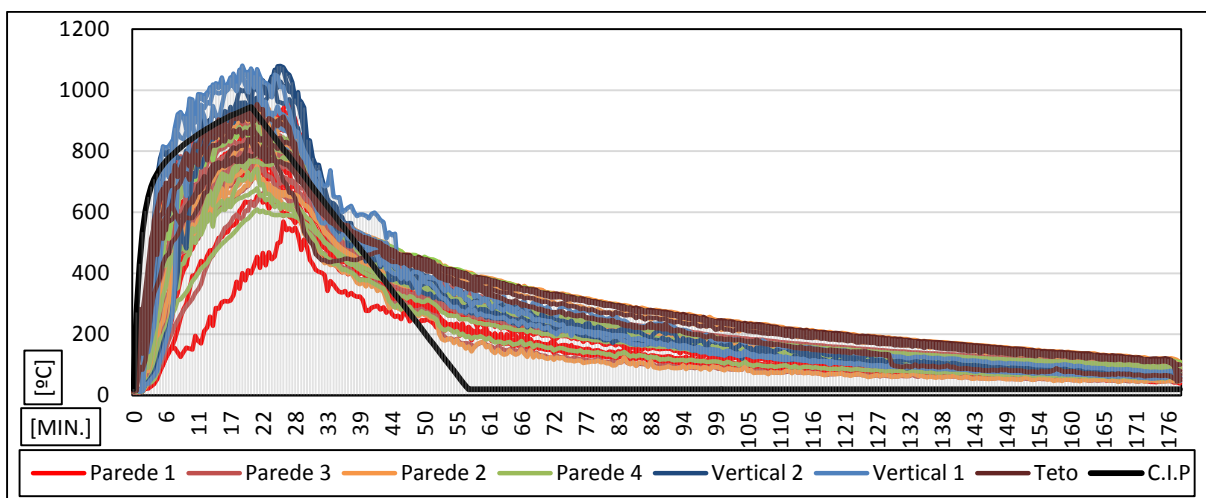


Gráfico 4.3 - Curvas de incêndio paramétrica em relação ao ensaio 1.

O gráfico 4.4 apresenta a comparação entre os resultados do segundo ensaio experimental e a curva de incêndio paramétrica da evolução de temperaturas no compartimento.

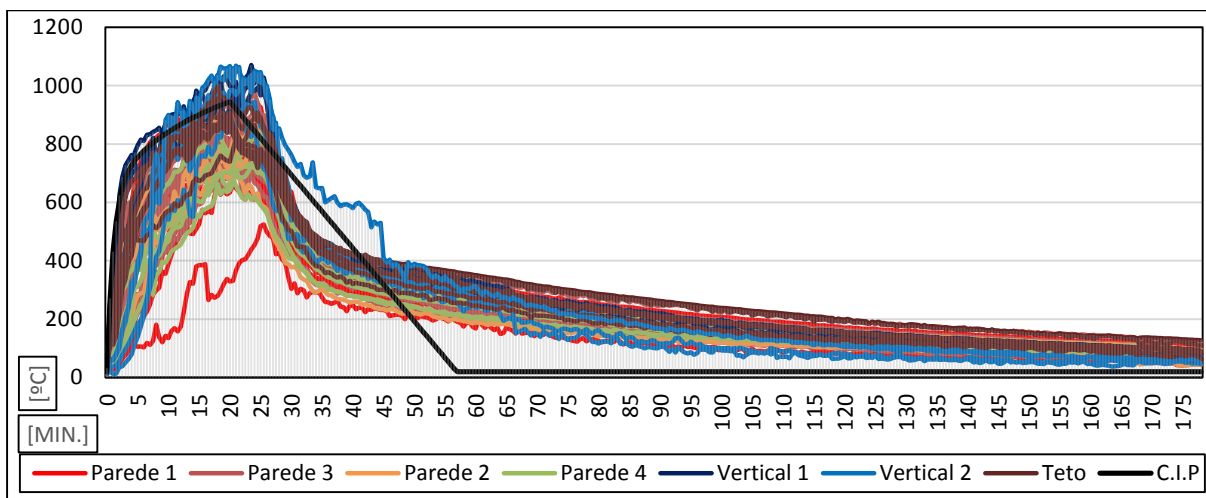


Gráfico 4.4 - Curvas de incêndio paramétrica em relação ao ensaio 2.

4.4.2. Modelos térmicos de fogo avançados

O Output dos modelos térmicos de fogo avançados, desenvolvidos na dissertação são obtidos pelos modelos de zona (programas Ozone V2.2.2 e CFast V6.2.1), modelos de campo (Programa FDS/SmokeView/Pyrosim V5.5.3) e por modelos de FEM (Abaqus V6.12).

4.4.2.1. OZone

As curvas de incêndio no compartimento do programa OZone V2.2.2, no modelo de uma e duas zonas, em relação ao ensaio 1 são representadas pelos gráficos 4.5 e 4.6, respetivamente.

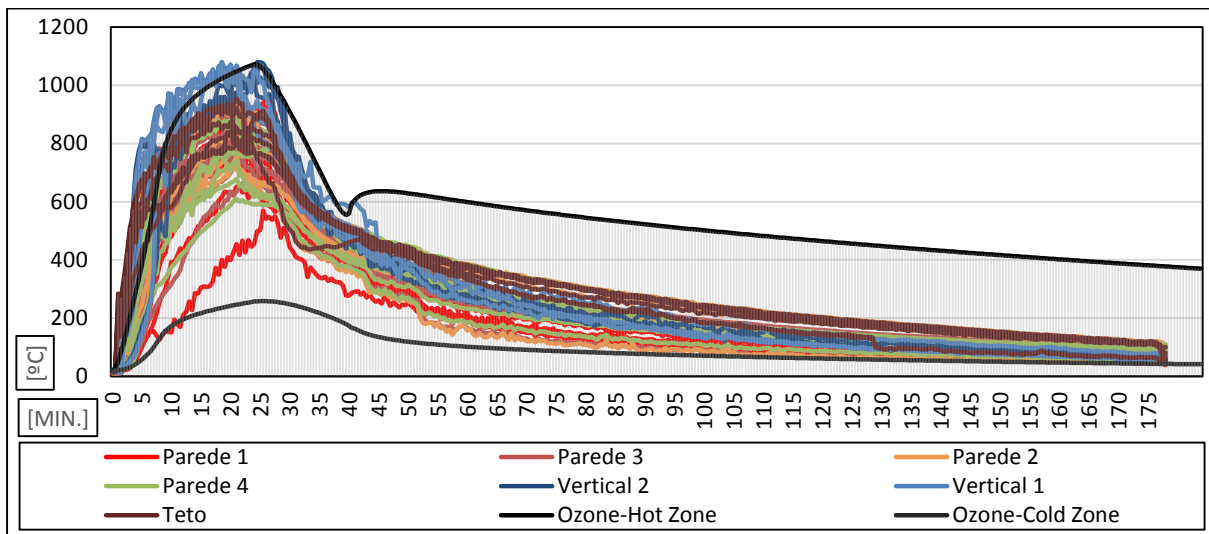


Gráfico 4.5 - Curvas de incêndio do modelo de uma zona do programa OZone V2.2/Ensaio 1.

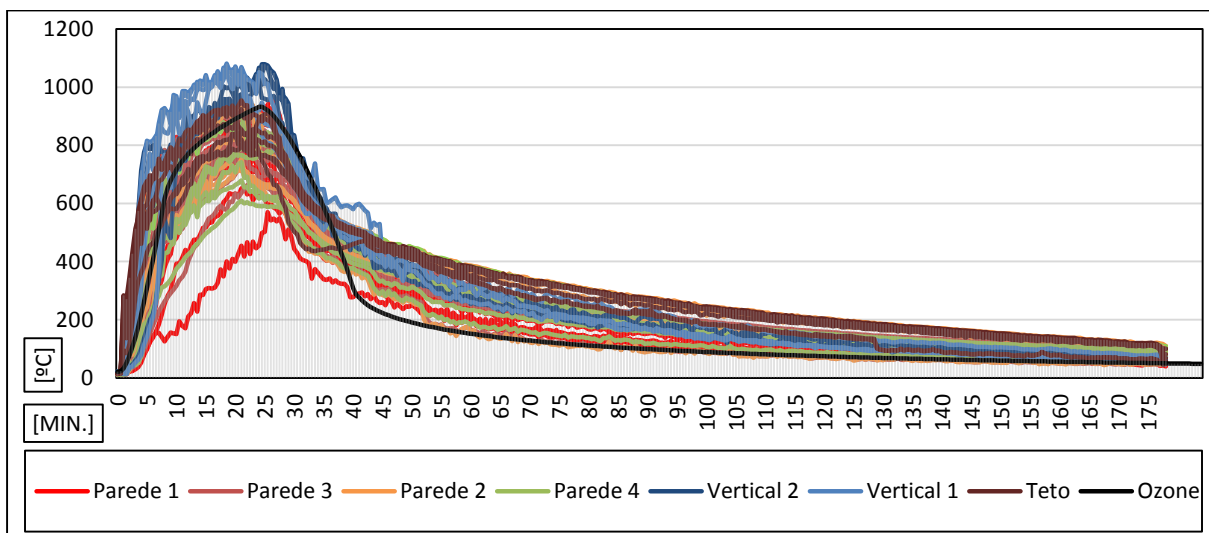


Gráfico 4.6- Curvas de incêndio do modelo de duas zonas do programa OZone V2.2/Ensaio 1.

As curvas de incêndio no compartimento do programa OZone V2.2.2, no modelo de uma e duas zonas, em relação ao ensaio 2 são representadas pelos gráficos 4.7 e 4.8, respetivamente.

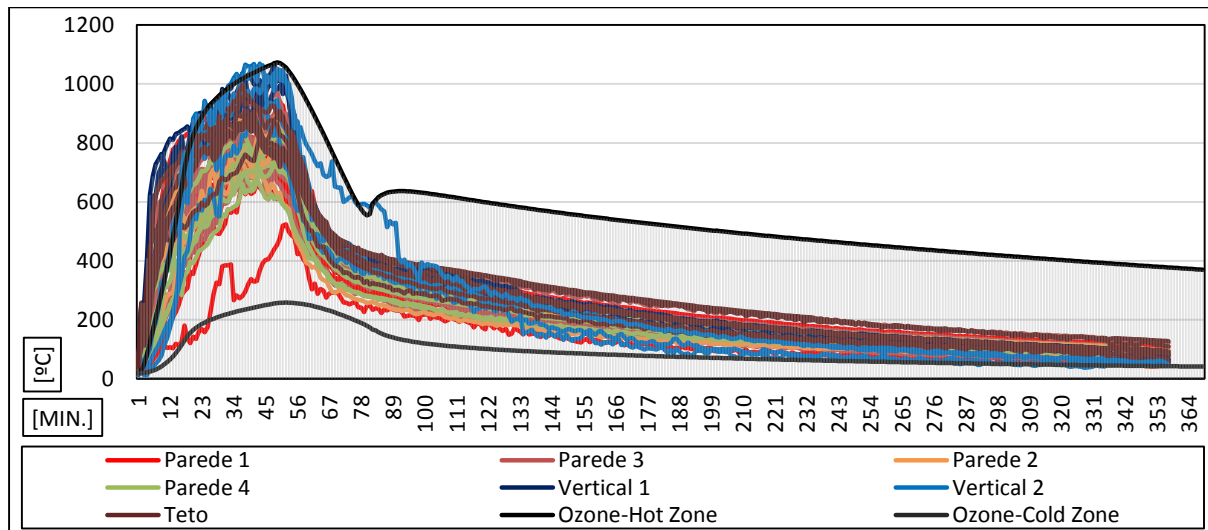


Gráfico 4.7- Curvas de incêndio do modelo de duas zonas do programa OZone V2.2/Ensaio 2.

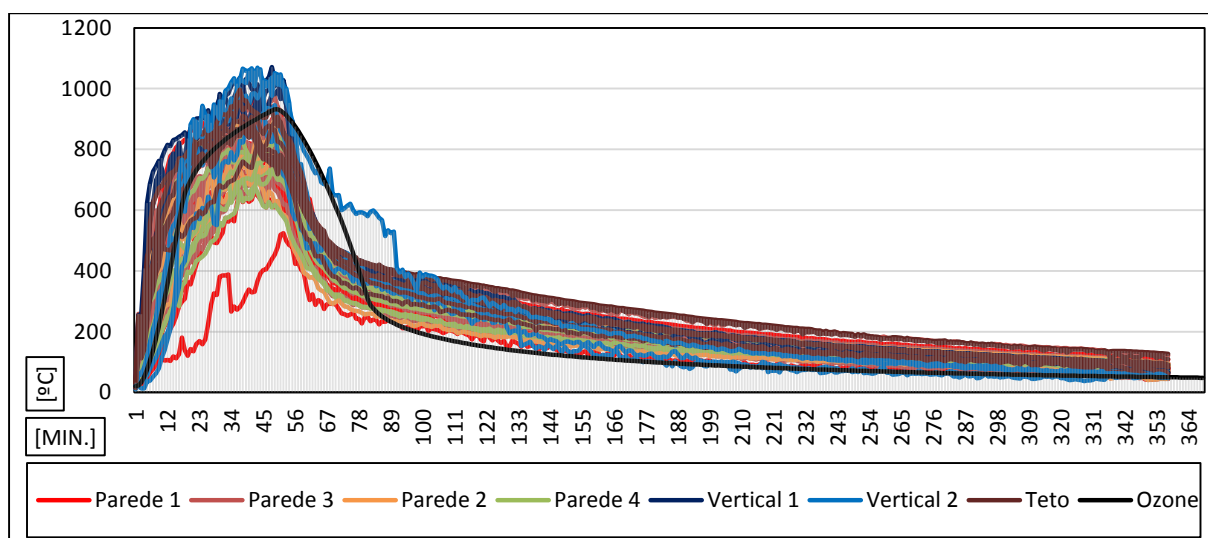


Gráfico 4.8- Curvas de incêndio do modelo de duas zonas do programa OZone V2.2/Ensaio 2.

A temperatura máxima que o modelo de uma zona no programa Ozone V2.2.2 registou na evolução da temperatura em situação de incêndio foi de 932,2°C e ocorreu aos 24 minutos. Em relação ao modelo de duas zonas, a temperatura máxima registada na evolução da temperatura da zona quente do modelo numérico do programa Ozone V2.2.2 foi de 1072,6°C e ocorreu aos 24 minutos. Para a zona fria a temperatura máxima foi de 258,4°C, aos 25,5 minutos.

4.4.2.2. CFAST

As curvas de incêndio no compartimento do programa CFast V6.2.1, no modelo duas zonas, em relação ao ensaio um e dois são representadas pelos gráficos 4.9 e 4.10, respetivamente.

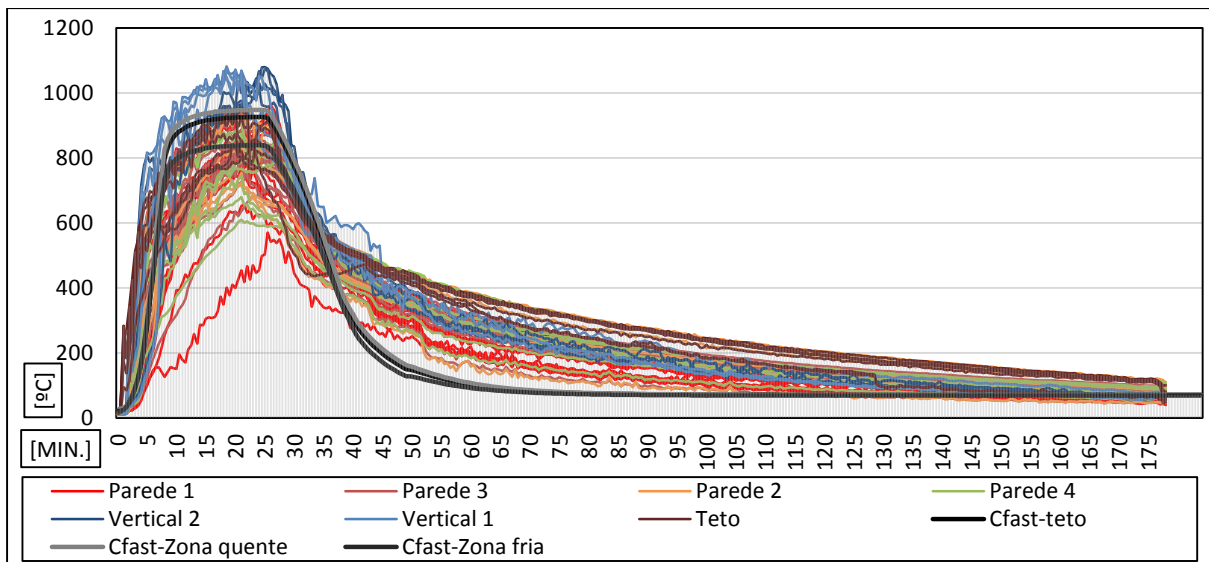


Gráfico 4.9 - Curvas de incêndio do modelo de duas zonas do programa CFast V6.2/Ensaio 1.

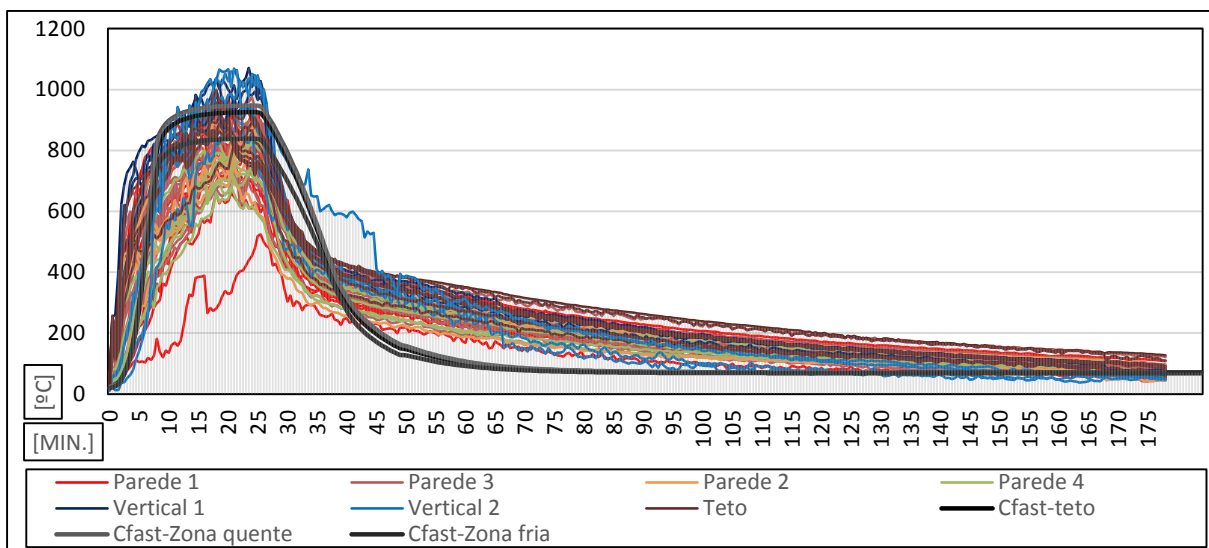


Gráfico 4.10 - Curvas de incêndio do modelo de duas zonas do programa CFast V6.2/Ensaio 2.

A temperatura máxima registada na evolução da temperatura da zona quente foi de 947,5°C e ocorreu aos 24 minutos. Para a zona fria a temperatura máxima foi de 838,8,4°C, aos 24 minutos. Para o teto a temperatura máxima foi de 925,8°C, aos 24 minutos.

4.4.2.3. FDS/SmokeView/Pyrosim

Da observação do gráfico 4.11 verifica-se a existência de uma zona mais quente que está próxima do limite superior e, de uma zona mais fria, mais próxima do limite inferior, tal como aconteceu na modelação experimental. A temperatura máxima atingida no interior do compartimento foi de cerca de 1081 °C, aos 18,5 minutos, correspondendo ao termopar CH95, que se encontra na vertical 1.

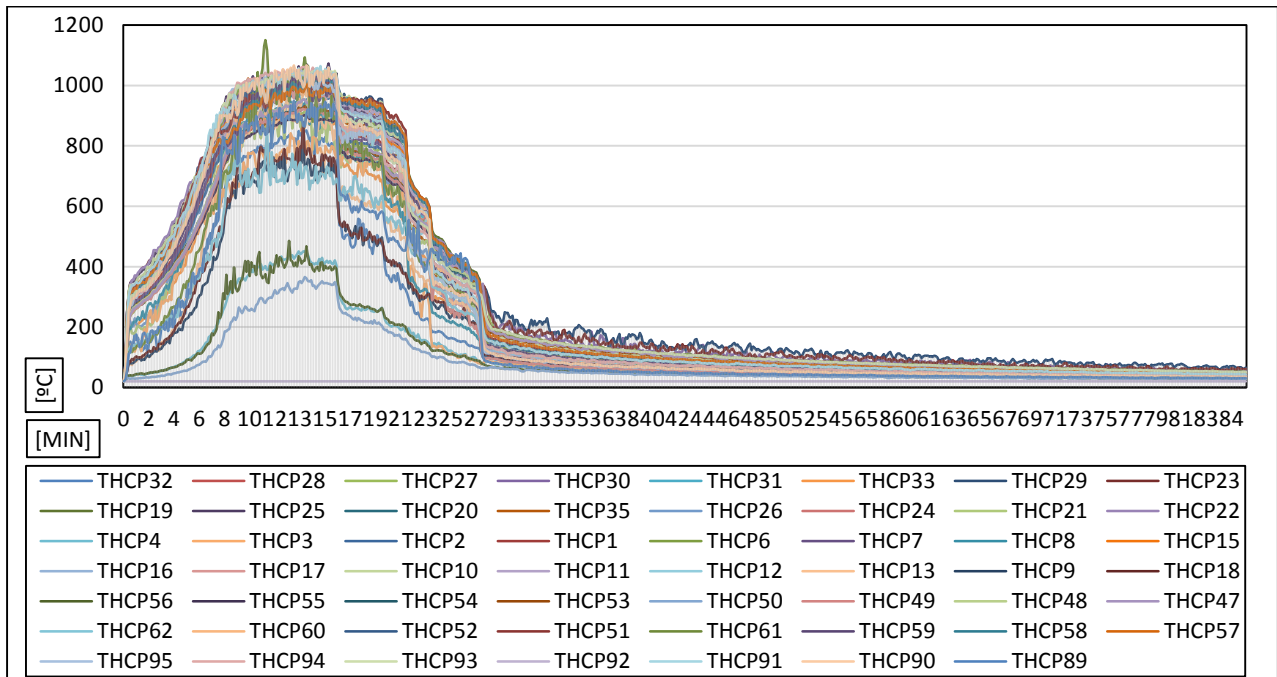


Gráfico 4.11 - Evolução das temperaturas da modelação numérica, no compartimento, no FDS V5.3.1.

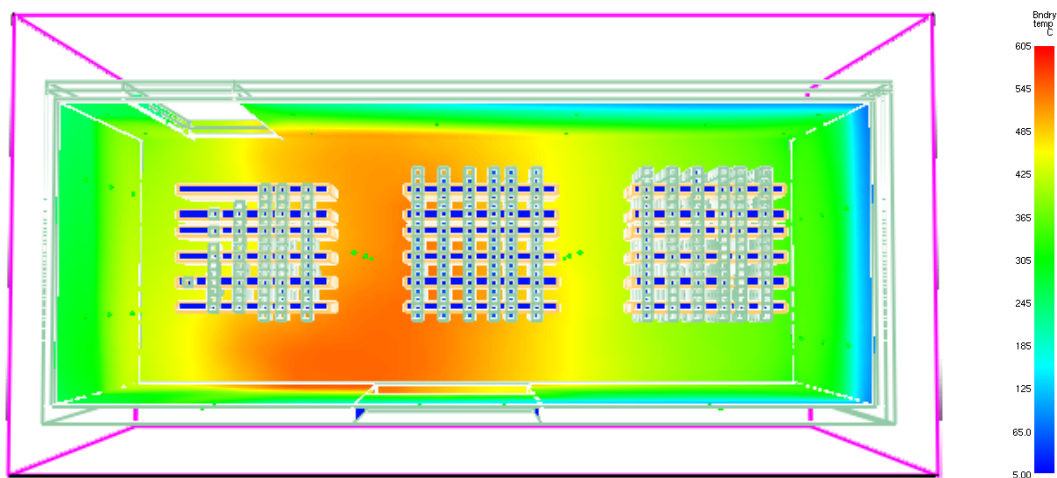


Figura 4.22 – Interface gráfica das condições fronteira do compartimento aos 18,5 minutos.

O gráfico 4.12 e 4.13 apresenta a evolução das temperaturas na parede 1 e 3, respetivamente. Na parede 1 a temperatura máxima foi de 1059,8°C, aos 14 minutos, no termopar CH12. Na parede 3 a temperatura máxima foi de 1072,6°C, aos 15,6 minutos, no termopar CH25.

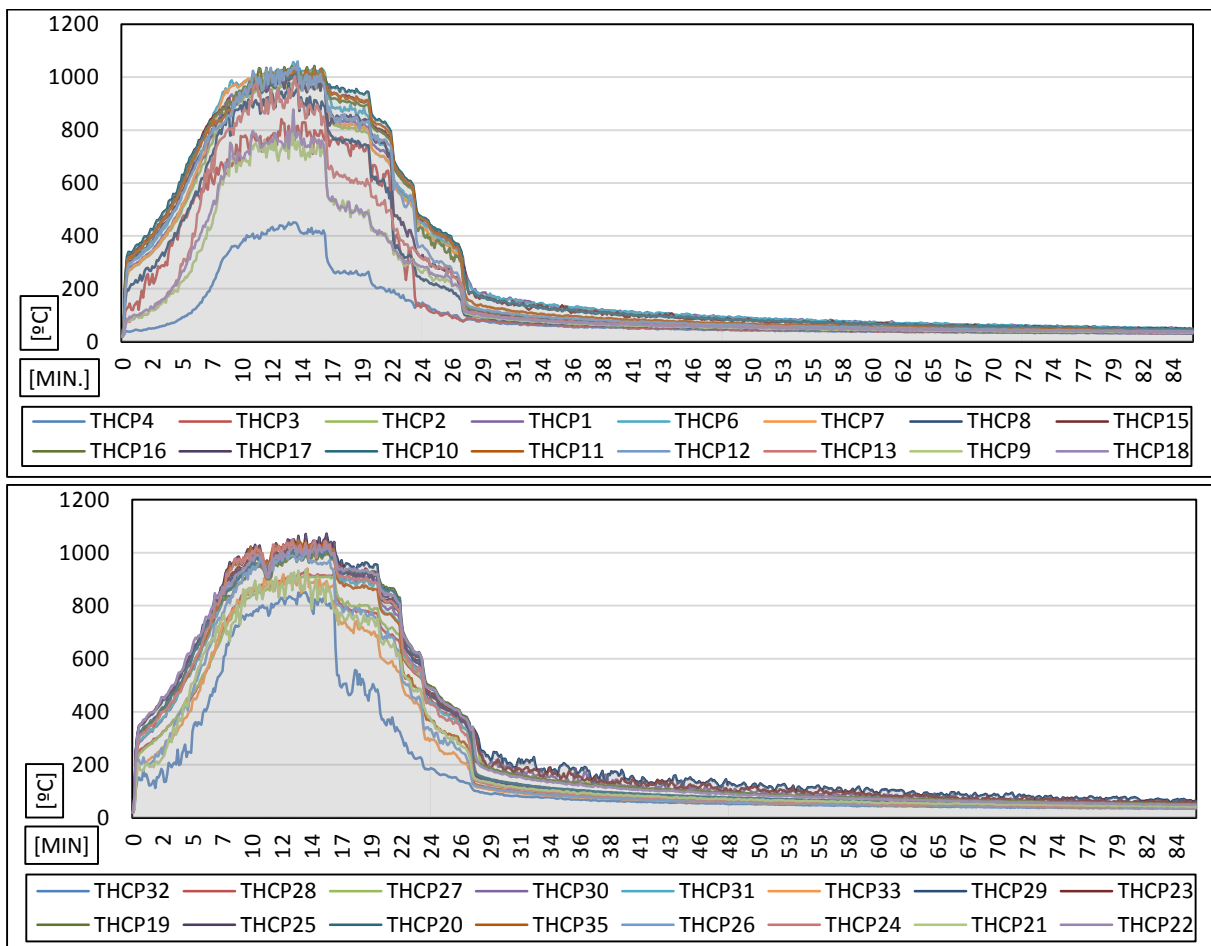


Gráfico 4.12 e 4.13 - Evolução das temperaturas da modelação numérica, na parede 1 e 3, no FDS, respetivamente.

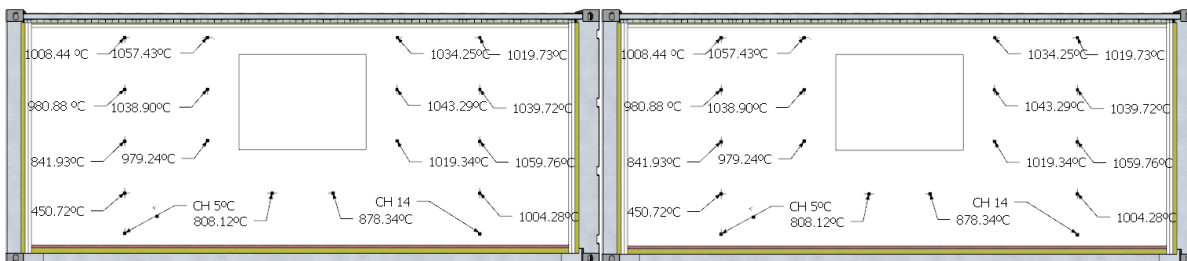


Figura 4.23 e 4.24 – Temperaturas máximas da modelação numérica, na parede 1 e 3, no FDS V5.3.1, respetivamente.

O gráfico 4.14 e 4.15 apresenta a evolução das temperaturas na parede 2 e 4, respetivamente. Na parede 2 a temperatura máxima foi de 955,3°C, aos 13,7 minutos, no termopar CH48. Na parede 4 a temperatura máxima foi de 1150°C, aos 10,8 minutos, no termopar CH61.

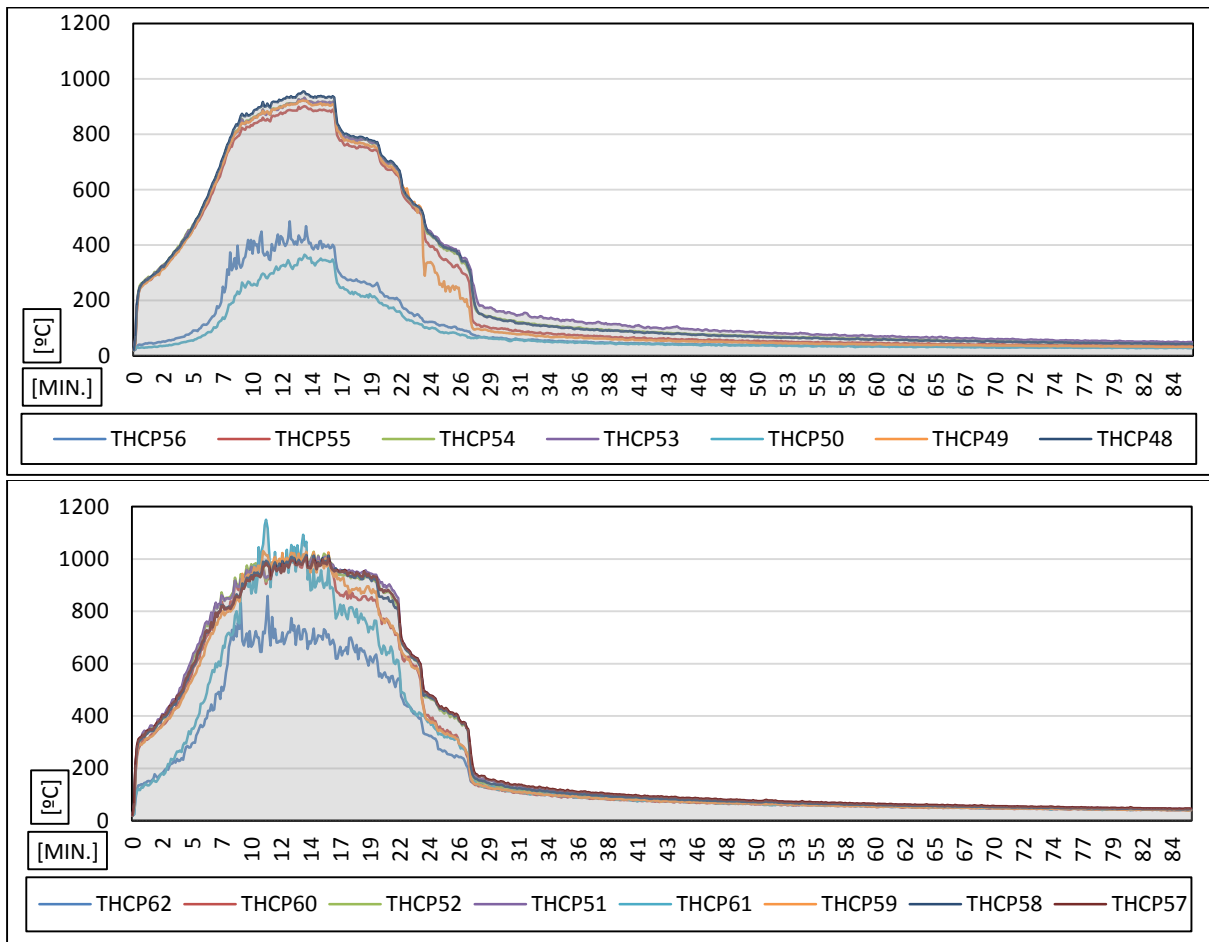


Gráfico 4.14 e 4.15 - Evolução das temperaturas da modelação numérica, na parede 2 e 4, no FDS V5.3.1, respetivamente.

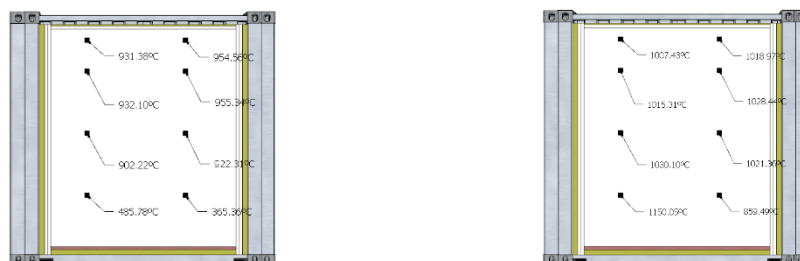


Figura 4.25 e 4.26 – Temperaturas máximas da modelação numérica, na parede 2 e 4, no FDS V5.3.1, respetivamente.

O gráfico 4.16 e 4.17 apresenta a evolução das temperaturas nas verticais 1 e 2 e, no teto, respetivamente. Nas verticais 1 e 2 a temperatura máxima foi de 1066,8°C, aos 13,9 minutos, no termopar CH90 da vertical 1.No teto a temperatura máxima foi de 1063,5°C, aos 14,6 minutos, no termopar CH61.

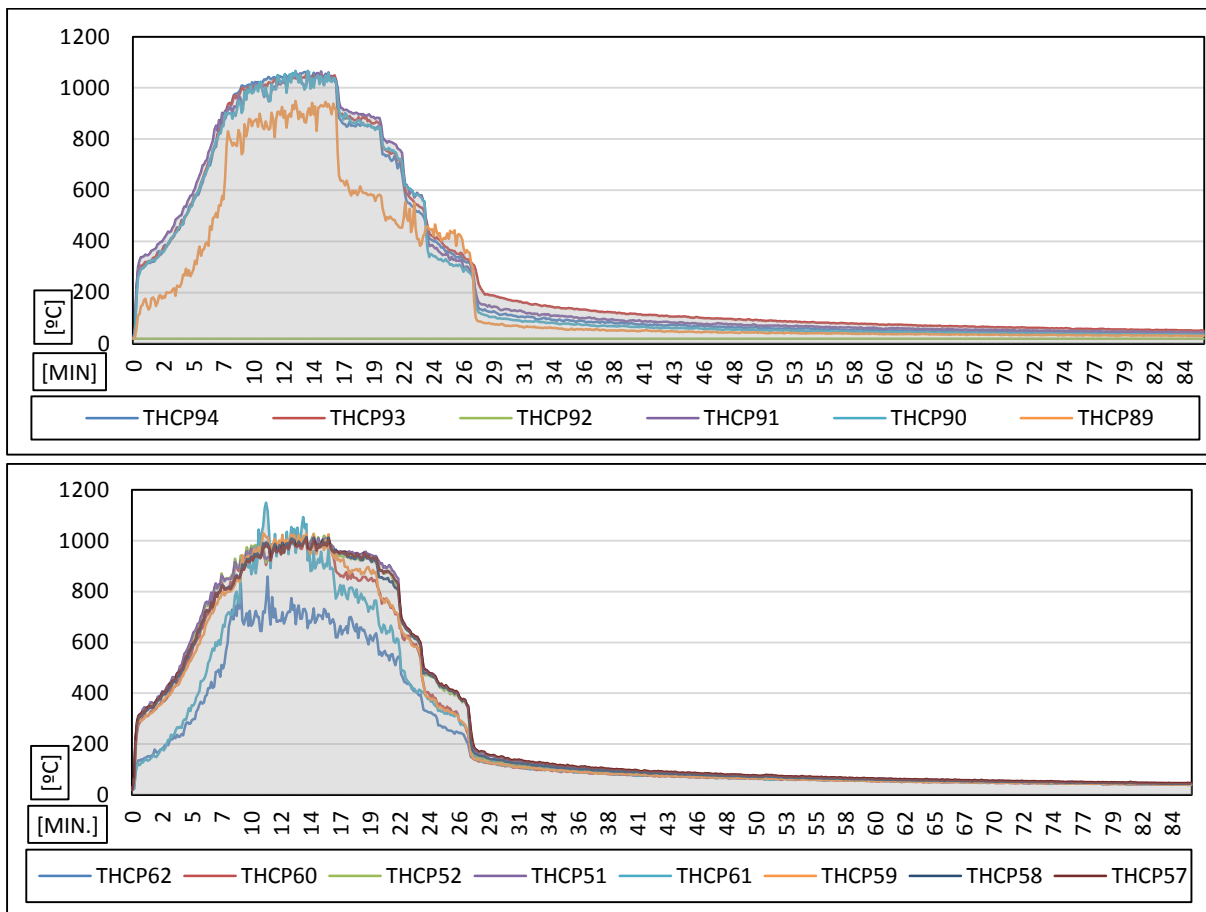


Gráfico 4.16 e 4.17 - Evolução das temperaturas da modelação numérica nas verticais e no teto, do ensaio 2, respetivamente.

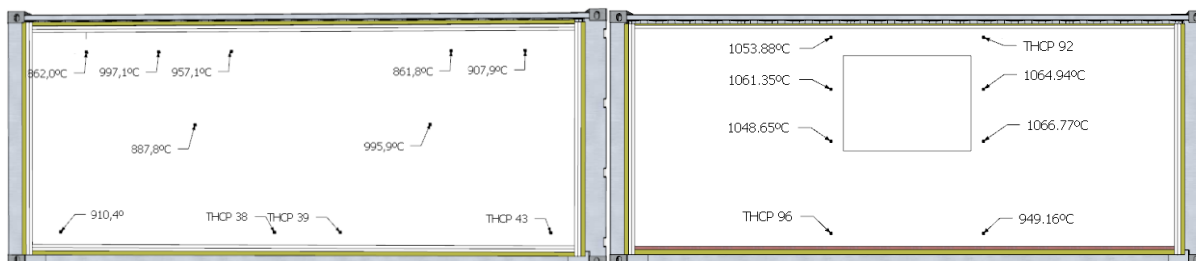


Figura 4.27 e 4.28 – Temperaturas máximas da modelação numérica no teto e nas verticais, no FDS, respetivamente.

4.4.2.4. Abaqus

A Figura 6.18 apresenta a evolução das temperaturas médias do ensaio 1, nas diferentes camadas da solução construtiva utilizadas no compartimento, em que foi utilizado as dimensões dos painéis A-M (600 mm por 1200 mm), para respetiva análise térmica. As temperaturas apresentadas são do lado interior (painel A-M 1) para o exterior do compartimento (lã de rocha exterior). A temperatura máxima atingida no painel A-M 1 foi de 636,0°C, aos 24,8 minutos. A temperatura máxima atingida no painel A-M 2 foi de 322,7°C, aos 50,3 minutos. A temperatura máxima atingida na Lã de rocha interior foi de 289,2°C, aos 75,8 minutos. A temperatura máxima atingida na lã de rocha exterior foi de 61,81°C aos 83,3 minutos.

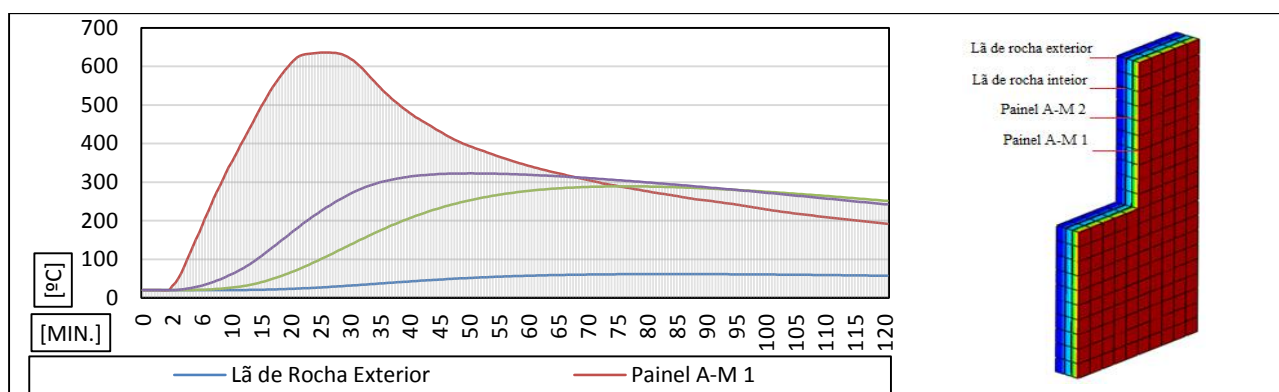


Gráfico 4.18 – Evolução das temperaturas médias, na solução construtiva do ensaio 2

A Figura 6.19 apresenta a evolução das temperaturas médias do ensaio 2, nas diferentes camadas da solução construtiva utilizadas no compartimento, para respetiva análise térmica. A temperatura máxima atingida no painel A-M 1 foi de 636,0°C, aos 23,8 minutos. A temperatura máxima atingida no painel A-M 2 foi de 308,9°C, aos 47,8 minutos. A temperatura máxima atingida na Lã de rocha interior foi de 279,1°C, aos 75,8 minutos. A temperatura máxima atingida na lã de rocha exterior foi de 60,3°C aos 83,3 minutos.

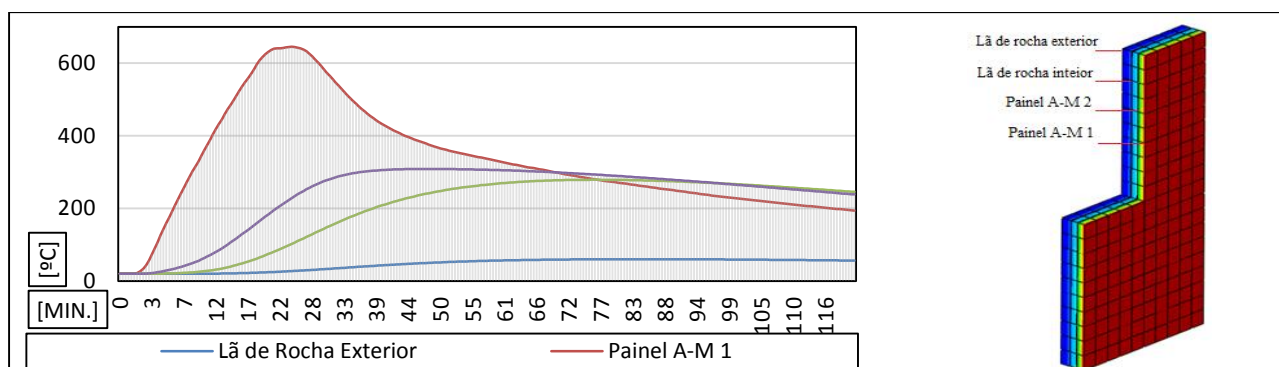


Gráfico 4.19 – Evolução das temperaturas médias, na solução construtiva do ensaio 2

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Este capítulo têm como objetivo avaliar as principais conclusões, em relação ao desempenho de um variado leque de modelos térmicos de fogo simplificados e avançados, de compartimentação, em relação à modelação experimental de compartimentação, que permitiu a validação dos respetivos modelos numéricos.

5.1. Conclusões

Em relação à modelação experimental de compartimentação em larga escala de fogo, realizada no presente documento obteve-se as seguintes conclusões. No desenvolvimento das temperaturas no compartimento de incêndio, a temperatura foi maior no centro do compartimento, isto é, nas verticais dos termopares, do que junto das paredes. Em termos de distribuição das temperaturas em altura estas foram maiores na zona superior do compartimento, verificando-se a existência de uma zona quente e de, uma zona fria no compartimento, implicando a existência do efeito de camada.

Nos modelos térmicos de fogo simplificados verificou-se que, em relação aos incêndios localizados, este modelo é bastante limitado, uma vez que apenas permite obter as dimensões das chamas e uma temperatura pontual (a temperatura máxima da chama). Em relação às curvas de incêndio paramétricas chegou-se a resultados bastantes razoáveis, a respetiva modelação apresentou um comportamento, em relação à evolução de temperaturas idêntico à evolução de temperaturas obtidas nos termopares da modelação experimental, em que a amplitude da evolução da temperatura das curvas paramétricas é semelhante à obtida nos termopares nas paredes, o que permite validação do modelo das curvas de incêndio paramétricas.

Na modelação de 2 Zonas vs. 1 Zona, do programa Ozone V2.2.2 e CFast V6.2.1, verifica-se que a evolução da temperatura dos gases, em termos de amplitude, em situação de incêndio para uma modelação de 2 zonas é superior à evolução da temperatura dos gases em situação de incêndio, para uma modelação de 1 zona. Embora a análise efetuada pelos programas de modelos de zona (CFast V6.2.1 e Ozone6.2.2) não ser muito detalhada, os modelos de zona demonstraram a capacidade de fazer previsões razoavelmente boas, desde que, a calibração do modelo seja efetuada corretamente. A respetiva modelação apresentou um comportamento e, uma amplitude, em relação à evolução de temperaturas idêntico à evolução de temperaturas obtidas nos termopares da modelação experimental de compartimentação.

A utilização de madeira como fonte de combustível (ou modelo de combustão) não é uma boa solução, uma vez que, ao fazer-se a validação do modelo numérico de fogo em estudo é necessário obter a taxa de libertação de calor e a taxa de produção de fuligem, da respetiva fonte de combustível. Ao utilizar-se madeira como fonte combustível não se sabe a taxa de libertação de calor real utilizada, no respetivo ensaio experimental, têm-se de utilizar taxas de libertação de calor tabeladas ou estimativas, que varia bastante dentro da mesma espécie e, de peça de madeira para peça de madeira, o que torna bastante difícil a calibração dos modelos de zona e campo, em relação às taxas de libertação de calor utilizadas nos algoritmos dos respetivos programas.

O modelo campo FDS V5.3.1 mostra um bom desempenho na previsão da magnitude da temperatura no interior do compartimento, apresentando um erro inferior a 10%, da fase ignição até ao pós-flashhover. Na fase resfriamento, as temperaturas descem mais rapidamente no que na modelação experimental, o que implica mais ajustes no modelo FDS V5.3.1, em relação ao modelo de combustão, de maneira a se obter melhores resultados na fase de resfriamento. Na fase sólida, a evolução de temperaturas obtidas pelo Abaqus V6.12.1 nas diferentes camadas, da solução construtiva apresentaram um comportamento próximo de um cenário real.

Podemos concluir que nenhuns dos modelos térmicos de fogo têm uma correlação de resultados de valores muito aproximada entre si, uma vez que os parâmetros e os algoritmos utilizados por cada um dos modelos térmicos, de fogo são bastante diferentes entre os respetivos modelos, dentro das mesmas cargas de incêndio. Mas por outro lado, pode-se concluir que todos os modelos térmicos de fogo têm resultados bastante próximos da modelação experimental de compartimentação, em que da ignição até ao *pós-flashhover*, os modelos térmicos apresentam um comportamento, em relação à evolução das temperaturas no compartimento bastante próximo da modelação experimental, expeto na fase resfriamento em que as temperaturas dos modelos térmicos descem mais rapidamente do que as temperaturas obtidas pelos respetivos termopares da modelação experimental. Tais factos permitem a validação dos resultados numéricos.

5.2. Desenvolvimentos futuros

Os trabalhos futuros a realizar dentro da área da modelação numérica e experimental de compartimentação são: A realização de mais ensaios em que é variado a carga, a disposição da carga, de incêndio; A realização de ensaios utilizando hidrocarbonetos e gás, como material combustível; A realização de ensaios, em que é variado as dimensões e a geometria do compartimento e, das aberturas e, a realização de modelações experimentais de compartimentação em que se varia as ventilações; Utilização de um maior leque de programas, tais como, o Cosmos do SolidWorks, o CDF do Abaqus e o CFX do Ansys.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AET. (2009). "Computacional fluid dynamics modeling". Allied Environmental Technologies,.

BSI. (1987). "Fire tests on building materials and structures - Part 20: Method for determination of the fire resistance of elements of construction (general principles).-BS 476- 20:1987". London: BSI, 1987.

BSI (1987). "Fire tests on building materials and structures — Part 21: Methods for determination of the fire resistance of loadbearing elements of construction. BS 476-21:1987". London: BSI, 1987.

BSI (1987). "Fire tests on building materials and structures — Part 22: Methods for determination of the fire resistance of non-loadbearing elements of construction BS 476-22:1987". London: BSI, 1987.

Buchanan, A. (2001). Structural Design for Fire. Canterbury.: Universidade de Canterbury.

Cadorin, J., Pintea, D., & Franssen, J. (2001). "The Design Fire Tool OZone V2.0 - Theoretical Description and Validation On Experimental Fire Tests". Belgica: Universidade de Liege.

Costa, C. N., & Silva, V. P. (2003). "Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio". São Paulo: EPUSP.

Costa, C. N., & Silva, V. P. (2006). "Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio". Nutau, 13.

Costa, C. N (2002). "Estruturas de concreto em situação de incêndio". São Paulo: PEF-EPUSP.

Costa, C. N. Silva, V. P (2003). "Dimensionamento de estruturas de concreto armado em situação de incêndio". São Paulo: EPUSP.

Costa, C. N; Silva, V. P (2005). "A importância da compartimentação e suas implicações no dimensionamento das estruturas de concreto para situação de incêndio". In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais. IBRACON, Olinda.

Costa, C. N; Silva, V. P (2006). "Recomendações para o dimensionamento de elementos de concreto à flexão simples em situação de incêndio. In: VI Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto". Anais. EPUSP, São Paulo.

Costa, N; Figueiredo O, A. D; Silva, V. P (2002). "O fenômeno do lascamento ("spalling") nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio - uma revisão crítica. In: 44º Congresso Brasileiro do Concreto". Anais. Belo Horizonte: IBRACON.

EN 1991-1-2 NP. (2010). "Eurocódigo 1: Acções em estruturas expostas ao fogo". Bruxelas: CEN.

ISO 834 (1994). "Fire resistance tests – Elements of building construction". Geneva.

Kaefer, E., & Silva, V. (2003). "Análise paramétrica de um incêndio conforme o novo Eurocódigo 1". São Paulo: Laboratório de Mecânica Computacional.

Kawagoe, K. (1967). "Estimation of Fire Temperature-Time Curve in Rooms, Third Report". Building Research Institute, Ministry of Construction, Japanese Government..

LaRocha. (2012). "Apresentação Lã de Rocha". Disponível em www.larocha.com

LWF (2000). "Fire resistance testing". LWF Bulletin ARC06. London: Lawrence Webster Forrest Ltd. Disponível em: <http://www.fireengineeringuk.co.uk/documents/Arc%206.pdf>

Marcos, O. (2005). "Estudo sobre incêndios de progresso rápido". Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.

McGrattan, K. B., & Hostikka, S. (2002). "Large eddy simulation of wood Combustion". Gaithersburg,: National Institute of Standards and Technology.

Milke, J.; Kodur, V.; Marion, C. (2002). "Overview of fire protection in buildings". New York: FEMA–G&O–ASCE.

Morente, F., & Quintana, J. (2008). "Software para Dimensionamento em Situação de Incêndio". Bilbão: DIFISEK+.

Peacock, R. D., Jones, W. W., Reneke, P. A., & Forney, G. P. (2008). "CFAST – Consolidated Model of Fire Growth (Version 6) User's Guide". National Institute of standards and Technology.

Peacock, R. D., Jones, W. W., Reneke, P. A., & Forney, G. P. (2009). "CFAST – Consolidated Model of Fire Growth (Version 6) Technical Reference Guide". National Institute of standards and Technology.

Pereira, A. A. (2009). "Estudo Experimental e Simulação numérica do Comportamento de Tintas Intumescentes na Protecção de Elementos Estruturais em Condições de Incêndio". Bragança: Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança.

Parkinson, D. (2001). "Performance based design of structural steel for fire conditions". Worcester Polytechnic Institute.

Pettersson, O., Magnussen, S., Thor, J. (1976). "Fire engineering design of steel structures, Swedish Institute of Steel Construction", Estocolmo.

Silva, V. P. (1999). "Ação térmica nas estruturas. O modelo do incêndio natural compartimentado, Boletim Técnico PEF 9911". Escola Politécnica, São Paulo, p. 01-20

Silva, V. P. (2004). "Estruturas de aço em situação de incêndio". Reimpressão. São Paulo: Zigurate.

Silva, V. P. (1997). "Estruturas de aço em situação de incêndio". Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Silva, V. P. (2000). "O efeito das deformações térmicas nas estruturas". Aveiro: Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional.

Valério, J. G. (2007). "Avaliação do Impacte das Pontes Térmicas no Desempenho Térmico e Energético de Edifícios Residenciais Correntes". Lisboa: IST.

Vassart, O., Cajot, L. G., & Brasseur, M. (2008). "PARTE 1: Acções Térmicas e Mecânicas". DIFISEK+.

Vidal, D. N. (2006). "Estudo sobre compartimentação horizontal e Vertical". Florianópolis: Centro de ensino bombeiro militar.

UFSC. (2012). "Plaster in Architecture". Disponível em:
http://www.arq.ufsc.br/arq5661/trabalhos_2005-1/gesso/architecture.html

Ward, T.; Greigger, P.; Matheson R.; Alveberg B. E. (1996). "Epoxy Intumescent Coatings Current Philosophy". Protective Coatings Europe – PCE Magazine. v.1, n° 12. Technology Publishing Co. Pittsburgh.

7. ANEXOS

7.1. Anexo A- CFAST

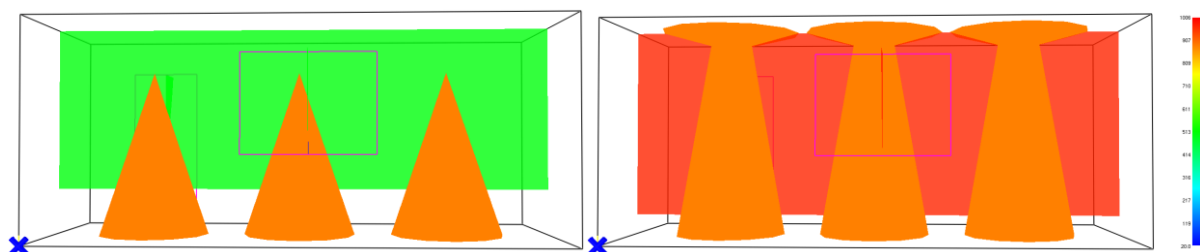


Figura A.1 e A.2 – *Output* gráfico das temperaturas no CFAST V6.2.1, aos 300s e aos 600s, respetivamente.

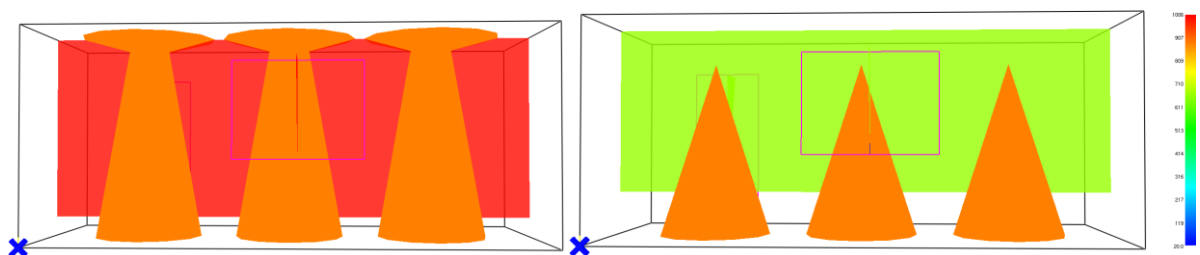


Figura A.3 e A.4 – *Output* gráfico das temperaturas no CFAST V6.2.1, aos 900s e aos 2000s, respetivamente.

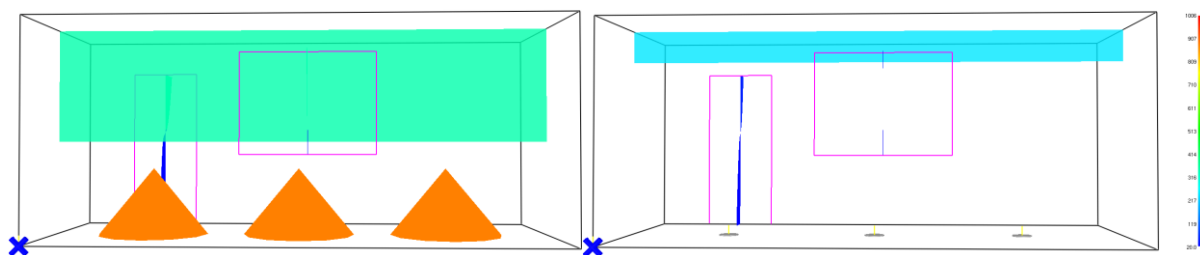


Figura A.5 e A.6 – *Output* gráfico das temperaturas no CFAST V6.2.1, aos 2300s e aos 2600s, respetivamente.

7.2. Anexo B.1- FDS/SmokeView/Pyrosim – Slice X=1,72 m

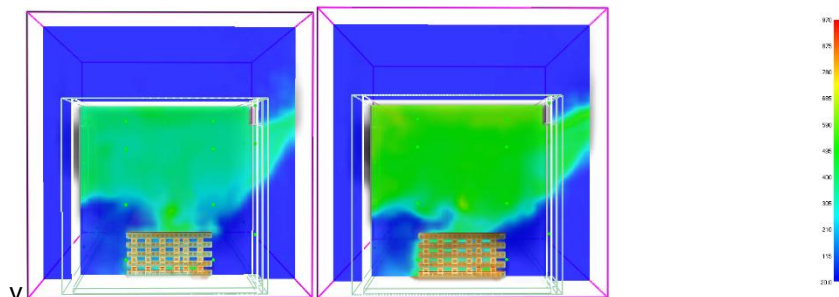


Figura B.1 e B.2 – *Output* gráfico do *Slice X=1,72m* aos 150s e aos 300s, respetivamente.

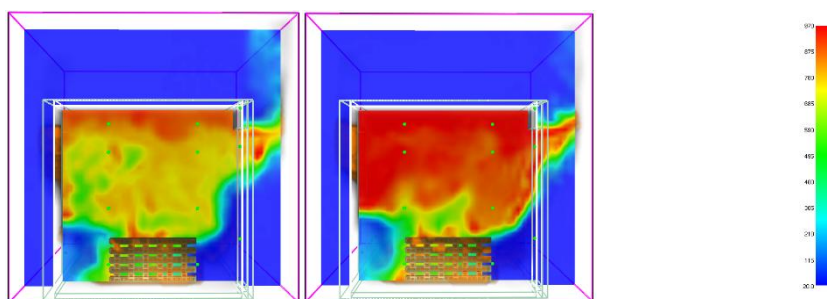


Figura B.3 e B.4 – *Output* gráfico do *Slice X=1,72m* aos 450s e aos 600s, respetivamente.

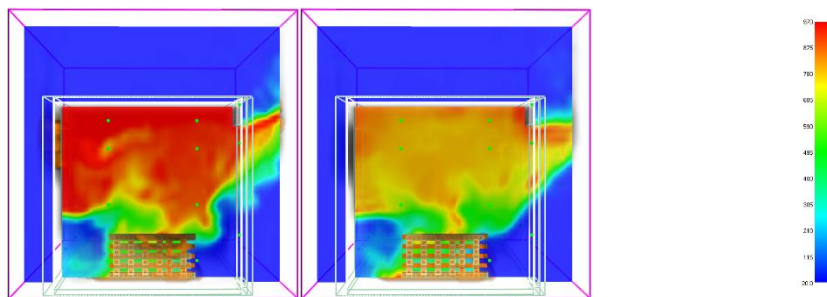


Figura B.5 e B.6 – *Output* gráfico do *Slice X=1,72m* aos 900s e aos 1050s, respetivamente.

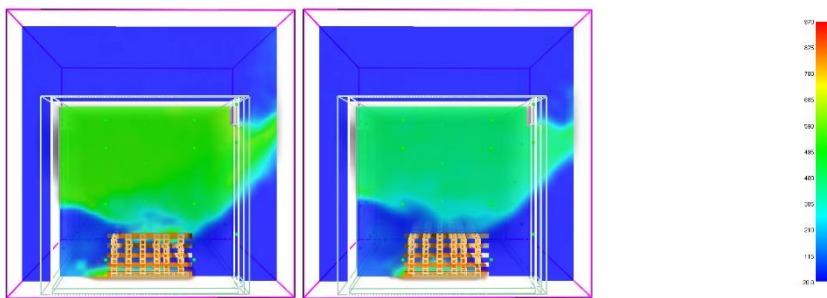


Figura B.7 e B.8- *Output* gráfico do *Slice X=1,72m* aos 1200s e aos 1450s, respetivamente.

7.3. Anexo B.2- FDS/SmokeView/Pyrosim – Slice Y=1,56 m

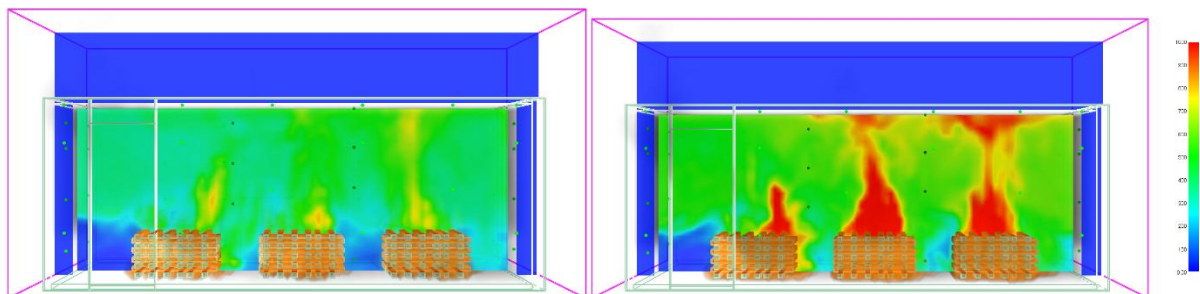


Figura B.9 e B.10 – *Output* gráfico do *Slice X=1,56m* aos 150s e aos 300s, respetivamente.

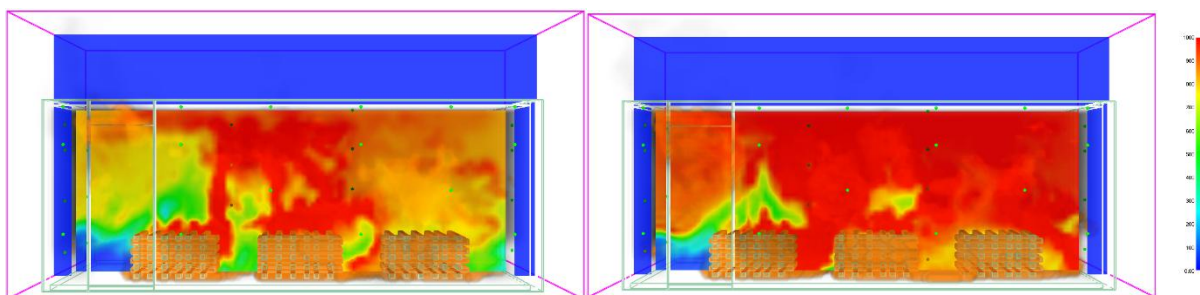


Figura B.11 e B.12 – *Output* gráfico do *Slice X=1,56m* aos 450s e aos 600s, respetivamente.

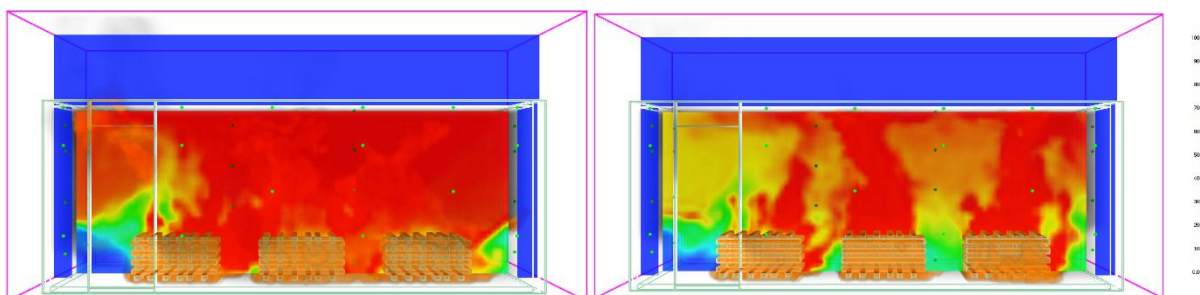


Figura B.13 e B.14 – *Output* gráfico do *Slice X=1,56m* aos 900s e aos 1050s, respetivamente.

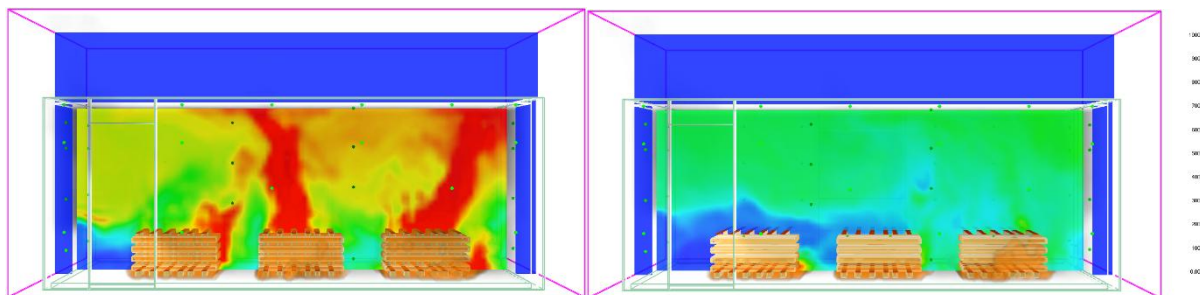


Figura B.15 e B.16 – *Output* gráfico do *Slice X=1,56m* aos 1200s e aos 1450s, respetivamente.

7.4. Anexo C-Abaqus

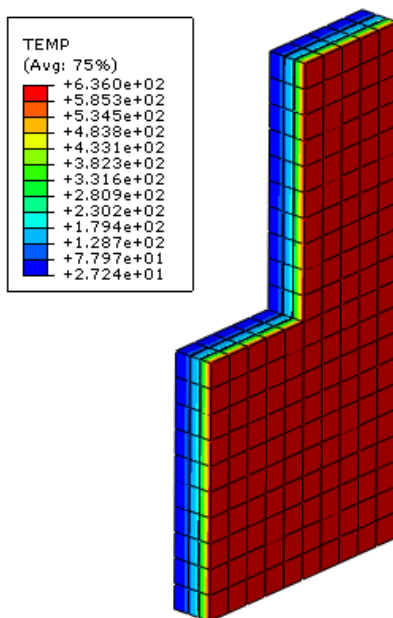


Figura C.1 – *Output* gráfico das temperaturas máximas, na solução construtiva do ensaio 1.

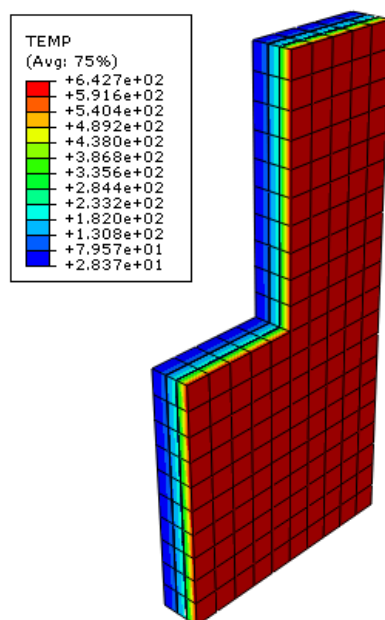


Figura C.2 – *Output* gráfico das temperaturas máximas, na solução construtiva do ensaio 2.

7.5. Anexo D-Fotografias da modelação experimental de compartimentação



Figura D.1 e D.2 – Fotografia 1 e 2 da modelação experimental de compartimentação.



Figura D.3 e D.4 – Fotografia 3 e 4 da modelação experimental de compartimentação.



Figura D.5 e D.6 – Fotografia 5 e 6 da modelação experimental de compartimentação.