



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Ana Clara Teixeira Serva

PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIOS DE  
COMPARTIMENTO  
AÇÃO EM UM PILAR EXTERNO

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural, orientada pela Professora Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago e pelo Professor Doutor Hélder David da Silva Craveiro e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Outubro de 2020

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
Departamento de Engenharia Civil

Ana Clara Teixeira Serva

# PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIOS DE COMPARTIMENTO: AÇÃO EM UM PILAR EXTERNO

## FIRE SPREAD OF ENCLOSURE FIRES: STRUCTURAL FORCE ON AN EXTERNAL COLUMN

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural,  
orientada pela Professora Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago e pelo Professor Doutor Hélder David da Silva Craveiro.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC  
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Outubro de 2020

1 2  9 0

UNIVERSIDADE D  
COIMBRA



## AGRADECIMENTO

À Deus, fonte de amor e de força, que nunca me abandonou, mesmo nos momentos de pouca fé, e que sempre me cercou de bons corações.

Aos meus pais, Ana Paula e Luiz Cláudio, por sempre terem dado o melhor deles, por nunca me deixarem faltar amor, por me ensinarem os valores da vida, por me incentivarem a ser a minha melhor versão e por sempre me deixarem com a certeza de que eu não estava sozinha, não importasse a distância. Nunca expressarei o suficiente a minha gratidão.

À toda a minha família, que sempre me apoiou e me abraçou apertado em cada chegada e partida. Estar junto sempre foi o motivo de voltar. Em especial, aos meus irmãos, Maurício e Ana Luíza, por todo cuidado, proteção, amizade, companheirismo e amor que sempre tiveram comigo. “Vocês dividiram comigo as suas histórias e me ajudaram a construir a minha”.

Ao corpo docente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, principalmente àqueles que me marcaram e tanto me ensinaram: Ana Bastos, Alberto Martins, Anísio Andrade, Costa Neves, Helena Gervásio, João Negrão, Paulo Coelho, Paulo Mendes, Paulo Pinto, Paulo Providência, Miguel Ferreira e Sandra Jordão. Mais que professores, foram mestres, inspirações e algumas vezes amigos. Em especial ao professor Jorge Almeida e Souza e ao meu tutor Rui Simões, por todo o esforço em nos fazer sentir, eu e meus colegas brasileiros, bem vindos, acolhidos e amparados.

Aos meus orientadores, Aldina Santiago e Hélder Craveiro, por toda orientação e ajuda, por terem sido norte, luz e calma nessa caminhada final. Também à professora Sandra Monteiro, que não dimensiona o quanto foi um apoio importante nessa etapa tão desafiadora.

Por fim e com muito amor, às amigas que esta aventura chamada Portugal me trouxe. José Heitor, João Mois, Júlia Vieira, Carolina Carmine, Cecília Chagas, Eryk Fernandes, Daniela Cacioli, Jéssica Neves, Tiago Frizzera e muitos outros. Sem vocês, a caminhada teria sido bem mais difícil, talvez impossível em alguns momentos. Fomos base, força, abraço, carinho, casa. Fomos família. O meu muito obrigada.

## RESUMO

A engenharia de segurança contra incêndio é uma subespecialidade da Engenharia Civil que pode ter um grande impacto na concepção, no dimensionamento, na estética, na funcionalidade e no custo de um edifício. Este ramo da engenharia é importante uma vez que altas temperaturas num elemento estrutural geram dilatação térmica que podem originar esforços internos e afetam as propriedades mecânicas dos materiais, reduzindo a capacidade de resistência do elemento.

Dentre as medidas a considerar para uma segurança apropriada, encontra-se a proteção passiva, associada à estrutura e à capacidade em desempenhar suas funções mesmo em caso de acidente, tratada pelo Eurocódigo 1 – Parte 1-2. Este regulamento visa assegurar uma adequada capacidade resistente e limitação da propagação do fogo e possibilita análises do incêndio através de métodos prescritivos ou com base no desempenho da estrutura. Em síntese, os métodos prescritivos são mais simples e se caracterizam por relações matemáticas que traduzem a evolução da temperatura em função do tempo, reproduzindo diferentes cenários que podem ocorrer dentro de um compartimento. Já a análise com base no desempenho assume uma metodologia mais avançada, que permite uma concepção mais otimizada, desde que garantindo ser igualmente eficaz no cumprimento das condições de segurança. Nesse último, pode recorrer à utilização de ferramentas avançadas de *Computational Fluid Dynamics* (CFD), área de conhecimento que trata o comportamento dos gases através de métodos computacionais.

O presente trabalho tem como objetivo comparar as duas metodologias citadas, analisando a ação térmica num elemento estrutural exterior quando ocorre um incêndio dentro de um compartimento. O caso de estudo será num compartimento de escritório com aberturas e as consequências em colunas exteriores. Avalia-se, assim, a influência das aberturas, a forma como a chama se projeta para o exterior e a ação térmica nesses elementos estruturais junto com seus possíveis danos. Para tal comparação, recorreu-se ao Anexo B do Eurocódigo 1 – Parte 1-2 e às modelações computacionais CFD através do *software Pyrosim*.

**Palavras-chave:** Incêndio de Compartimento, CFD, FDS, Ação do Fogo, Pilar Externo.

## ABSTRACT

Fire safety engineering is a segment of Civil Engineering, which may have a significant impact on the building design and costs. The importance of this field lies in the effect that high temperatures have on structural elements. The thermal expansion produced can cause internal forces since different materials have different thermal expansion coefficients. Besides, high temperatures can also affect the mechanical properties of materials, reducing strength.

Eurocode 1 – Part 1.2, whose aim is to ensure adequate strength and to limit the fire spread, allows its analysis through prescriptive methods or based on the performance of the structure. Concisely, prescriptive methods are simpler and can be characterized by mathematical relations that describe the evolution of the temperature as a function of time, reproducing different scenarios that may occur inside a compartment. On the other hand, performance-based analysis assumes a more advanced methodology, which allows a more optimized design, since it is equally effective in requiring the safety conditions. In this one, is used the advanced tool of Computational Fluid Dynamic (CFD), an area of knowledge that treats the behavior of gases through computational methods.

This research aims at comparing the two methodologies, by analyzing the thermal action on an external structural element when a fire occurs inside a compartment with openings. The study will be focused on an office compartment with windows and the consequences will be analyzed in an external column. Thus, there was evaluated the effect of the opening, the way the flame projects itself out of the opening, the temperature reached in the column and the damaged occurred. For such comparison, Eurocode 1 – Part 1-2 – Appendix B and computational models CFD using Pyrosim software were used.

**Key words:** Enclosure Fire, CFD, FDS, Fire Action, External Column.

---

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Descrição do Tema .....	1
1.2. Objetivo do Trabalho .....	4
1.3. Organização do Documento.....	5
<b>2. ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>6</b>
2.1. Estudos Prévios.....	6
<b>3. MODELAÇÃO NORMATIVA.....</b>	<b>17</b>
3.1. Enquadramento .....	17
3.2. Anexo B do EN 1991-1-2 .....	19
3.2.1. Modelo 1 – com abertura oposta: “condições de tiragem forçada” .....	21
3.2.2. Modelo 2 – sem abertura oposta: “sem condições de tiragem forçada” .....	23
<b>4. MODELAÇÃO NUMÉRICA.....</b>	<b>26</b>
<b>5. CASO DE ESTUDO .....</b>	<b>29</b>
5.1. Caracterização, Definição Arquitetônica e Material do Compartimento do Edifício....	29
5.2. Materiais Considerados na Modelação do Edifício .....	30
5.3. Definição do Incêndio.....	31
5.4. Descrição do Modelo Numérico .....	36
5.4.1. Malha .....	36
5.4.2. Dispositivos de Medição e <i>Outputs</i> .....	37
<b>6. RESULTADOS E COMPARAÇÕES.....</b>	<b>39</b>
6.1. Resultados Normativos .....	39
6.1.1. Modelo 1 – com abertura oposta: “condições de tiragem forçada” .....	41
6.1.2. Modelo 2 – sem abertura oposta: “sem condições de tiragem forçada” .....	42
6.2. Resultados Numéricos .....	43
6.2.1. Modelo 1 – com abertura oposta: “condições de tiragem forçada” .....	44
6.2.2. Modelo 2 – sem abertura oposta: “sem condições de tiragem forçada” .....	54
6.3. Comparações.....	56

---

<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>63</b>



## SIMBOLOGIA

### Maiúsculas latinas

$A_{burner}$	Área da fonte de calor
$A_f$	Área em planta do compartimento
$A_t$	Área total da superfície envolvente
$A_v$	Área total das aberturas verticais do compartimento
$A_{v_n}$	Área das aberturas na parede em questão (n).
$C_p$	Calor específico do ar seco à temperatura ambiente
$D$	Diâmetro da base do combustível
$HRR$	Taxa de libertação de calor
$HRR_f$	Taxa máxima de libertação de calor por unidade de área
$HRR_t$	Taxa total de libertação de calor
$HRRPUA$	Taxa de libertação de calor por unidade de área
$L_f$	Comprimento da chama segundo o eixo
$L_H$	Projeção horizontal da chama
$L_L$	Altura da chama
$L_x$	Distância axial entre abertural e ponto do eixo
$O$	Fator de abertura do compartimento
$Q$	Taxa de libertação de calor
$\dot{Q}$	Taxa de fluxo de calor convectivo na abertura
$Q^*$	Taxa adimensional de libertação de calor
$Q_c$	Taxa de libertação de calor
$Q_{ex}$	Taxa de libertação de calor devido à combustão do excesso de combustível
$Q_{fuel}$	Transferência de calor para os combustíveis
$Q_R$	Perda de calor radiativo pela abertura
$Q_s$	Fluxo de calor cedido por convecção através da abertura

---

$Q_w$	Transferência de calor para as paredes limites
$T_0$	Temperatura inicial
$T_{\infty}$	Temperatura ambiente
$T_a$	Temperatura ambiente
$T_f$	Temperatura do compartimento de incêndio
$T_w$	Temperatura da chama na abertura
$T_z$	Temperatura da chama segundo o eixo
$U$	Velocidade do vento externo
$W_1$	Largura da parede com abertura principal
$W_2$	Largura da parede perpendicular à parede com a abertura principal
$W_a$	Projeção horizontal do piso superior
$Z$	Altura vertical alcançada pela chama

### Minúsculas latinas

$c_p$	Calor específico a pressão constante
$g$	Aceleração da gravidade
$h_{eq}$	Altura equivalente das aberturas
$\tilde{l}_1$	Escala de comprimento relacionada a área efetiva de vazão do incêndio
$m_0$	Taxa de entrada de ar
$q_{f,d}$	Densidade de carga de incêndio (valor de cálculo)
$r_0$	Raio de um círculo de área igual à metade da área da abertura (parâmetro de Yokoi)
$t$	Tempo
$t_{\alpha}$	Tempo necessário para taxa de libertação de calor de 1MW
$w$	Velocidade do vento
$w_1$	Largura das aberturas na parede principal
$w_2$	Largura das aberturas na parede perpendicular à parede principal
$w_3$	Largura das aberturas na parede oposta à parede principal
$w_f$	Largura da chama amplificada
$w_t$	Largura da chama na abertura
$z/r_0$	Distância vertical normalizada

---

**Maiúsculas gregas**

$\Delta T_z$	Varição da temperatura na altura $z$
$\theta$	Temperatura adimensional
$\Omega$	

**Minúsculas gregas**

$\rho_\infty$	Densidade ambiente
$\rho_\alpha$	Densidade ambiente
$\rho_g$	Massa volúmica do gás interior
$\rho_z$	Densidade local dos gases quentes
$\tau_F$	Duração do incêndio em combustão livre
$\phi$	Diâmetro

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Descrição do Tema

Incêndios em construções marcaram a humanidade ao longo de toda a sua história. Recentemente, em 2016, o edifício *Grenfell Tower*, em Londres, foi um exemplo desse tipo de incidente (Moore, 2018), onde um prédio de 24 andares ardeu quase que por inteiro em menos de 4 horas, causando um total de 72 vítimas fatais (Figura 1.1). O incêndio teve como fonte de origem um acidente com um eletrodoméstico dentro de um dos apartamentos, que levou ao incêndio do compartimento. De seguida, o incêndio propagou-se pelo exterior do edifício através da fachada de forma rápida e danosa, deixando a construção inutilizável (Figura 1.2).

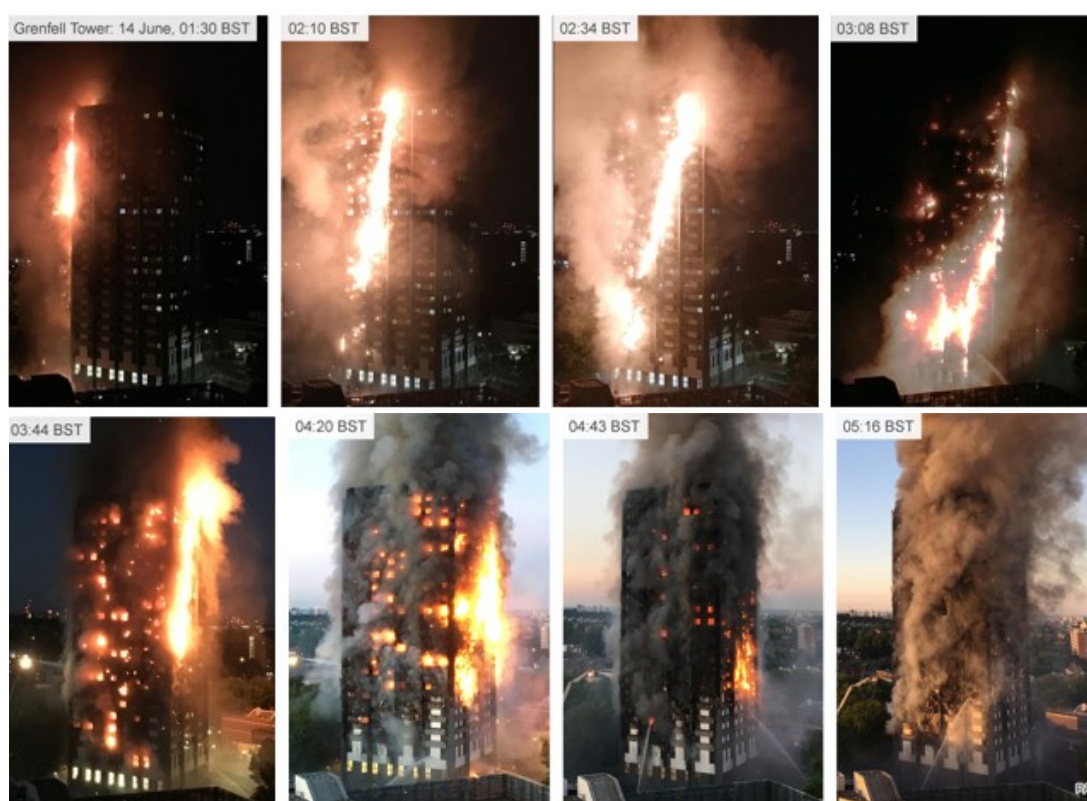


Figura 1.1 – Registros cronológicos do incêndio de Grenfell Tower em Londres (Moore, 2018).



Figura 1.2 – Situação das fachadas do Grenfell Tower após total controle do incêndio (Moore, 2018).

O incêndio de compartimento muitas vezes está associado a um posterior incêndio de fachada, uma vez que o aumento de temperatura e pressão dentro do compartimento fazem com que os vidros das janelas falhem, permitindo, assim, que as chamas sejam ejetadas através das aberturas. Em seguida, os elementos estruturais ou não estruturais podem ser atingidos pelo fogo, comprometendo as suas funcionalidades ou mesmo a sua ignição, se forem elementos inflamáveis, como é o caso de muitos materiais de revestimento das fachadas. Além disso, os gases quentes não queimados dentro do compartimento saem pelas aberturas e podem sofrer combustão com o ar fresco externo, aumentando o volume das chamas. Toda essa situação favorece o alcance de outros compartimentos e andares por parte das chamas, podendo também atingir construções adjacentes e, conseqüentemente, conduzindo a cenários catastróficos.

À medida que as chamas vão se alastrando, maiores as chances de danos humanos e estruturais, podendo comprometer a capacidade resistente do edifício. Daí a importância da consideração da ação incêndio durante o projeto estrutural, considerada como ação acidental pelo regulamento europeu, o Eurocódigo 1 – Parte 1-2 (EN 1991-1-2) EN(CEN, 2002). Caso ocorra um incêndio, é importante que o edifício seja capaz de resistir. Para isso, a estrutura do edifício, uma vez que hiperestática, deve garantir uma suficiente absorção dos esforços internos, gerados pela diferença dos coeficientes de dilatação térmica dos materiais restringidos, e também ser capaz de permitir uma correta redistribuição dos esforços. Dessa forma, o colapso de um dos elementos estruturais presentes ou a redução das suas capacidades resistentes (devido as propriedades mecânicas dos materiais que são afetadas pelas altas temperaturas), não comprometem todo o edifício, permitindo o resgate das vidas e, mais tarde, a reabilitação do edifício.

A engenharia de segurança contra incêndio é uma subespecialidade da Engenharia Civil que pode ter um grande impacto na concepção, no dimensionamento, na estética, na funcionalidade e no custo do edifício (Karlsson e Quintiere, 1999). Dentre as medidas a considerar para uma segurança apropriada, encontram-se duas vertentes: a proteção ativa e a proteção passiva. Na primeira, englobam-se os meios a implementar no edifício para minimizar os riscos e permitir um combate ao incêndio (como extintores, sensores, portas corta-fogo, entre outros), enquanto a segunda está associada à estrutura e à capacidade em desempenhar suas funções mesmo em caso de acidente como anteriormente citado, sendo, então, essa proteção passiva a vertente tratada pelo Eurocódigo 1 – Parte 1-2.

Este regulamento tem como objetivo assegurar a limitação da propagação do fogo e uma adequada capacidade resistente da estrutura, possibilitando que a análise dos incêndios seja feita através de métodos prescritivos ou com base no desempenho da estrutura. Os métodos prescritivos são metodologias simplificadas, caracterizados por curvas nominais que traduzem a temperatura em função do tempo, onde se assume que, de forma geral, todos os possíveis cenários de incêndio a ocorrer dentro de um compartimento podem ser assim reproduzidos. À medida que se avança para metodologias mais rigorosas, nomeadamente a análise com base no desempenho, adota-se os princípios físico-químicos associados ao processo de combustão do incêndio, o que permite um dimensionamento utilizando uma curva de incêndio com base nas condições reais no compartimento em questão e não numa mera relação matemática. Essa evolução permite uma concepção mais otimizada da estrutura e do sistema de proteção contra incêndio necessário, desde que se assegure ser igualmente eficaz na condição de segurança contra o fogo.

Para essa análise mais rigorosa, recorre-se a utilização de ferramentas avançadas de *Computational Fluid Dynamics* (CFD), área de conhecimento que trata o comportamento dos gases através de métodos computacionais. Inseridos nesses conceitos, encontram-se *softwares* capazes de simular os cenários de incêndio, como por exemplo, o *Fire Dynamics Simulator* (FDS). Neste programa, é possível controlar as admissíveis situações de fogo através da quantidade de combustível disponível no compartimento ou pela quantidade de oxigênio disponível para a reação térmica. Por meio desses recursos, é possível uma análise detalhada da fase de incêndio e da fase de extinção, prevendo questões importantes na Engenharia de Segurança Contra Incêndio.

Dentro do atual estudo, intenciona-se a análise de um elemento estrutural vertical no exterior do edifício (tal como exemplificado na Figura 1.3) à luz do Anexo B do Eurocódigo 1 – Parte 1-2. Este pilar estará sujeito a chamas provenientes do incêndio dum compartimento do edifício. Os resultados regulamentares serão comparados com os obtidos numericamente. Para

isso, recorreu-se a um caso de estudo baseado num edifício real de betão armado, com amplos vãos, fachadas em vidro, pilares externos e utilização tipo escritório.



Figura 1.3 – Exemplos de edifícios com pilares externos. À direita, Palácio Gustavo Capanema (CAU/BR, 2018), na cidade do Rio de Janeiro e, à esquerda, edifício da Receita Federal do Brasil, na cidade de Belo Horizonte (Couri, 2015).

## 1.2. Objetivo do Trabalho

O presente trabalho tem como objetivo comparar as duas abordagens citadas, métodos prescritivos e métodos com base no desempenho da estrutura, analisando a ação térmica num elemento estrutural exterior quando ocorre um incêndio dentro de um compartimento que apresente aberturas. Pretende-se estudar um compartimento de escritório com aberturas, variando alguns parâmetros, e as consequências no elemento estrutural coluna, presente fora da envolvente do edifício.

Prevê-se avaliar, assim, os seguintes tópicos:

- A influência das aberturas, como fonte de oxigénio e como possibilidade de escape e propagação do fogo;
- A forma como a chama se projeta para fora das aberturas e se desenvolve no exterior do edifício;
- A temperatura alcançada nessa coluna e em que grau essa ocorrência prejudica o seu desempenho estrutural.

Para tal comparação, será utilizado o Anexo B do Eurocódigo 1 – Parte 1-2 e modelações computacionais CFD através do *software Pyro*.

### 1.3. Organização do Documento

A presente dissertação de mestrado é constituída por 8 capítulos e 1 anexo, apresentando aqui uma breve descrição dos conteúdos dos mesmos:

- Capítulo 1: introdução do trabalho realizado, enquadrando o tema e indicando os objetivos e a organização;
- Capítulo 2: apresentação do estado da arte em relação a incêndios de compartimento, resultante da pesquisa e revisão bibliográfica realizadas para a presente dissertação, abordando estudos analíticos e numéricos;
- Capítulo 3: apresentação da abordagem normativa para análise de incêndios de compartimento e suas ações na estrutura e descrição do Anexo B do Eurocódigo 1 – Parte 1-2, referente às chamas ejetadas por aberturas;
- Capítulo 4: apresentação da abordagem numérica para análise de incêndios de compartimento, explicando a ferramenta de análise avançada CFD e os seus conceitos base;
- Capítulo 5: descrição dos casos de estudos considerados no estudo, nomeadamente os modelos numéricos desenvolvidos para simulação do comportamento das chamas;
- Capítulo 6: exposição dos resultados obtidos através de ambas metodologias, análise normativa e análise com base no desempenho, e comparação destes;
- Capítulo 7: apresentação das principais conclusões a que se chegou após a realização do estudo;
- Referências Bibliográficas: citação dos estudos e documentos consultados para condução do trabalho;
- Anexo A: exposição do código desenvolvido para o caso de estudo em linguagem de programação (apenas modelo 1), permitindo o acesso à modelagem completa para futuros interessados.



## 2. ESTADO DA ARTE

Durante o desenvolvimento de um incêndio de compartimento, geralmente na sua fase mais vigorosa, o aumento da temperatura e pressão dentro do espaço levam à quebra dos vidros das janelas das fachadas, permitindo a troca de fluxos com o meio externo através das aberturas. Esse fluxo alimenta o incêndio de compartimento com oxigênio, permite que chamas sejam ejetadas para o exterior e também permite que gases quentes ainda não queimados escapem, formando ainda mais chamas ao entrar em contato com o oxigênio externo. Todo esse cenário pode apresentar uma séria ameaça à segurança contra o incêndio, podendo levar a ignição de combustíveis armazenados em compartimentos vizinhos, pisos superiores e até construções adjacentes, além de serem um risco à estabilidade da própria estrutura e às vidas humanas (Ren et al, 2018 e Himoto et al, 2009).

Os estudos prévios aqui considerados e de seguida citados relacionam o incêndio de compartimento e o incêndio de fachada. Tal fato é importante para o desenvolvimento do presente documento, pois nesses estudos há uma análise do perfil vertical da temperatura das chamas ao longo das fachadas e à medida que se afastam dessas, que, apesar de não ser o objeto principal de estudo, levam a obtenção das temperaturas a que um elemento estrutural no exterior do edifício estaria exposto, como aqui desejado.

### 2.1. Estudos Prévios

**Yokoi** (1960a) foi um dos pioneiros na investigação das chamas provenientes de incêndios de compartimento e da correspondente variação de temperatura à medida que a chama se afasta da abertura (Figura 2.1). Realizando ensaios de pequena escala e analisando diferentes tamanhos de abertura, assumiu que o plano neutro da chama acontecia a meia altura da janela, postulando que a fonte de calor correspondia a um retângulo horizontal equivalente à metade superior da abertura em questão. Assim, propôs um dos seus principais parâmetros, um comprimento representativo da saída dos gases quentes equivalente ao raio de um círculo de área igual à metade da área da abertura,  $r_0$ .



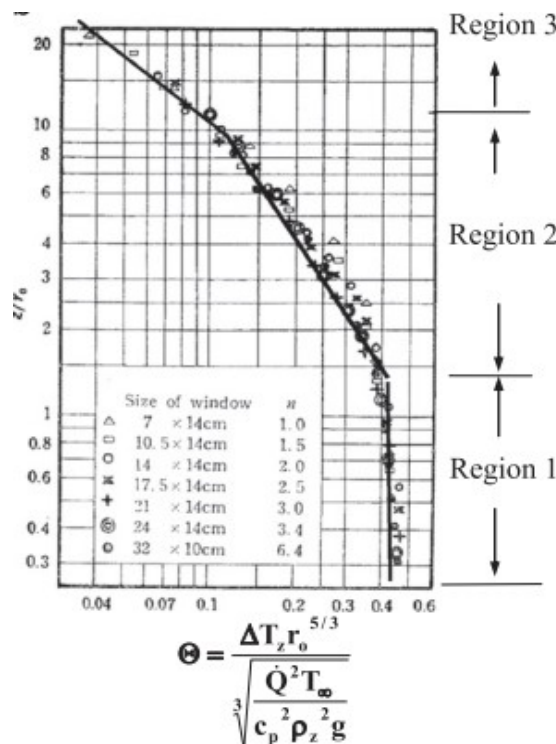


Figura 2.2 – Distribuição da temperatura adimensional em função da distância normalizada, incluindo a sobreposição de curvas representativas das três regiões propostas por Yokoi (1960b).

Mais recentemente, **Lee et al.** (2012) revisaram as correlações de Yokoi e suas aplicabilidades, concluindo que seria necessário duas novas escalas de comprimento para descrever corretamente a física do incêndio. A primeira nova escala de comprimento está relacionada a vazão térmica na abertura e a segunda representa o comprimento necessário para que a pluma passe de horizontal para vertical devido a sua flutuabilidade. Justificaram a necessidade destas duas variáveis defendendo que apenas o comprimento da abertura não seria suficiente para a correta representação do comportamento da chama. Dessa forma, na relação adimensional para a temperatura  $\theta$  proposta por Yokoi, a variável  $r_0/z$  foi substituída por  $\bar{L}_1$ , comprimento relacionado a área efetiva de vazão do incêndio. Além disso, Lee et al. também propuseram, através de suas análises e experimentos, que a densidade da pluma local  $\rho_z$  deveria ser substituída pela densidade ambiente  $\rho_\infty$ , a fim de caracterizar a física de arrastamento da pluma de modo mais realista. Os resultados obtidos através de ambas as relações adimensionais para a temperatura  $\theta$ , mostraram que os valores foram mais concisos com a nova relação proposta quando comparados aos obtidos com a relação de Yokoi (Figura 2.3).

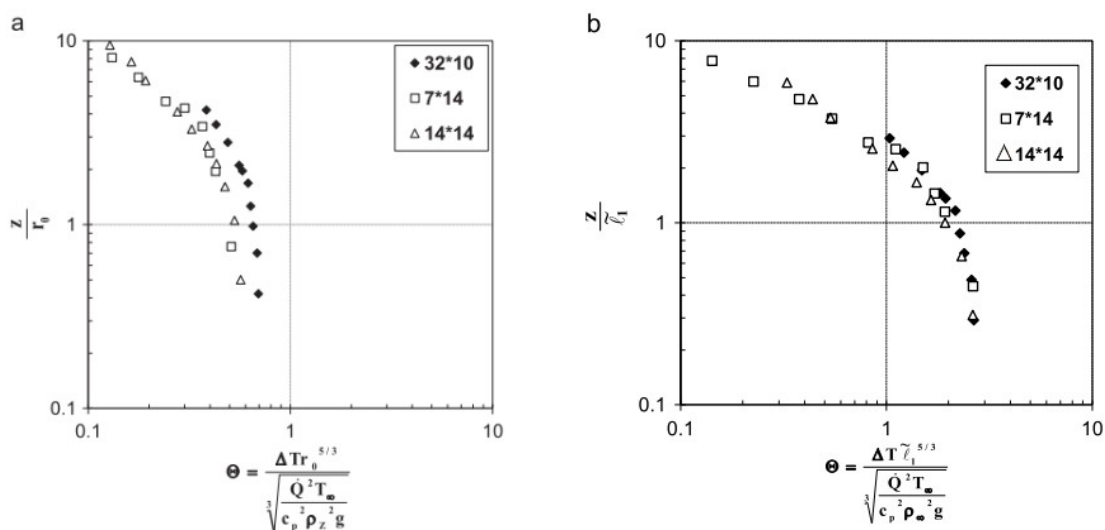


Figura 2.3 – Resultados da temperatura adimensional  $\theta$  para diferentes dimensões de abertura vertical para a relação de Yokoi (a) e para a nova relação proposta (b) (Lee et al, 2012).

Ohmiya et al. (1998) estudaram a taxa de combustão nas condições de um incêndio de compartimento. Com base nos resultados, desenvolveram relações entre o fator de ventilação, o tipo de combustível, a área de superfície do combustível, o calor cedido por convecção através da abertura  $Q_s$  e a taxa de liberação de calor devido à combustão do excesso de combustível  $Q_{ex}$  (Figura 2.4).

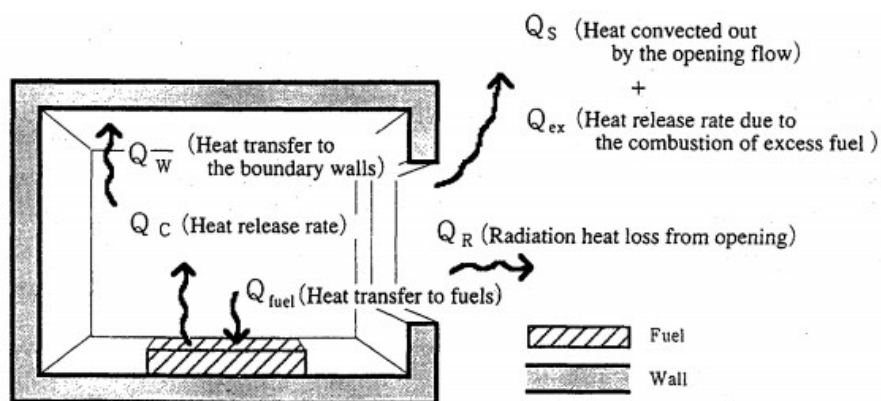


Figura 2.4 – Esquematização base para o modelo desenvolvido (Ohmiya et al, 1998).

A partir dos resultados, percebeu-se que, à medida que o fator de ventilação aumenta, o valor do calor cedido por convecção  $Q_s$  também aumenta, independentemente do tipo de combustível. Em relação a área de superfície do combustível, verificaram que, para fatores de ventilação baixos, não há interferência nos valores  $Q_s$ , os quais se mantêm praticamente os

mesmos, enquanto que à medida que o fator de ventilação aumenta, o valor de  $Q_s$  passa a depender da área. Já para a taxa de liberação de calor devido à combustão do excesso de combustível  $Q_{ex}$ , percebeu-se que, também independentemente do tipo de combustível, o calor aumenta à medida que o fator de ventilação aumenta e, após atingir um pico, começa a diminuir. Este pico depende de vários fatores, entre eles a área de superfície do combustível: à medida que esta área aumenta, o valor do pico de  $Q_{ex}$  também aumenta. De seguida, à medida que continua havendo um aumento do fator de ventilação, o valor de  $Q_{ex}$  anula-se, uma vez que o excesso de combustível passa a não ser mais gerado, devido a completa combustão dos gases dentro do próprio compartimento.

Em comparação com os resultados Yokoi observou-se que, para certos valores do fator de ventilação, o valor de  $Q_{ex}$  chegava a ser aproximadamente o dobro do valor de  $Q_s$ . Como Yokoi trabalhou no comportamento das chamas externas, baseando-se apenas no calor cedido por convecção através da abertura  $Q_s$ , percebe-se a importância de uma reconsideração da influência do excesso de combustível nas chamas externas, que são responsáveis pela taxa  $Q_{ex}$ .

**Himoto et al.** (2009) apontaram que, apesar dos estudos sobre o desenvolvimento de incêndios dentro de compartimentos já realizados (que permitiam compreender suas características físicas), ainda era insuficiente o conhecimento do desenvolvimento da chama através das aberturas na presença do vento externo a partir do momento em que os vidros das janelas cediam. Como é do conhecimento geral, a ventilação de um edifício é fortemente influenciada pelo vento externo e, conseqüentemente, o comportamento da chama de um possível incêndio também o é. Nos ensaios realizados previamente, a não consideração do efeito do vento fazia com que o incêndio fosse governado apenas pelas características dos combustíveis ou do compartimento de incêndio (normalmente apresentava uma configuração de apenas uma única abertura vertical numa das paredes).

De forma a simular diferentes condições de incêndio sob o efeito do vento externo, Himoto et al. realizaram ensaios de escala reduzida, subjeitaram um compartimento a um ventilador mecânico que introduzia ar fresco forçado, em regime de ventilação direta (que passa através do compartimento) e com diferentes taxas de entrada (Figura 2.5). Assim, foi possível uma análise da projeção da chama através da abertura considerando também o efeito do vento externo. Foi analisado o desenvolvimento de uma distribuição bidimensional da temperatura dessa chama de forma qualitativa (Figura 2.6) e percebeu-se a trajetória da chama e a evolução da temperatura para diferentes taxas de entrada de ar e dimensões da abertura.



**Huang et al. (2009)** também estudaram a influência de condições de ventilação externas no desenvolvimento do incêndio em compartimentos. Realizaram ensaios detalhados à escala reduzida, submetidos a uma ventilação direta, com o auxílio de um túnel de ar e variando a velocidade do vento (0.0, 1.5 e 3.0 m/s) e a posição da fonte de fogo (canto a favor do vento, centro do compartimento e canto contra o vento). Através das medições das temperaturas do ar, da chama e da superfície vertical e do registro das taxas de perda de massa do combustível e do fluxo de calor na abertura, concluíram que o vento externo apresenta dois efeitos opostos. Por um lado, esse promove a combustão do material dentro do compartimento, elevando a temperatura e, por outro lado, sopra e dilui os gases combustíveis do compartimento, diminuindo a temperatura e acelerando a extinção do incêndio. Ou seja, o vento externo provoca o aumento da temperatura, mas também reduz o tempo de incêndio (Figura 2.7).

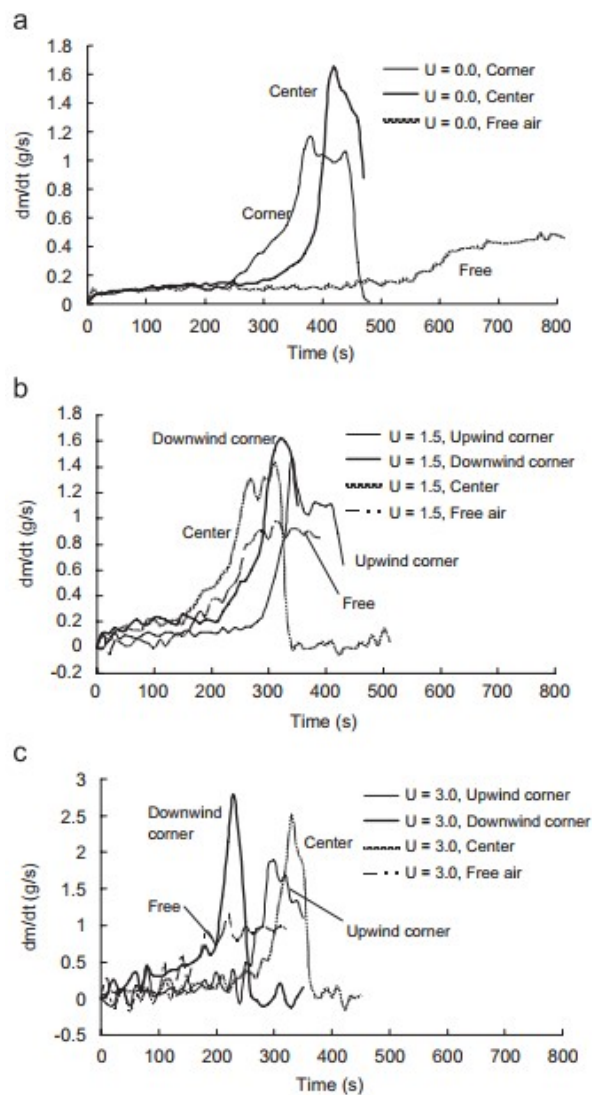


Figura 2.7 – Taxa de perda de massa do combustível para diferentes condições de vento externo ( $U$ ).  
 (a)  $U = 0.0$  m/s, (b)  $U = 1.5$  m/s e (c)  $U = 3.0$  m/s (Huang et al, 2009).

Os autores também demonstraram, na secção horizontal do modelo adotado, o padrão de fluxo do ar que é assumido dentro do compartimento quando submetido a uma corrente principal através do espaço (Figura 2.8). Nota-se que, quando considerado a presença do vento externo, podem se formar vórtices nos cantos, favorecendo a inclinação da chama em direção ao vento. Observaram também que essa inclinação da chama também aumenta à medida que se aumenta a velocidade do vento, devido a formação de vórtices maiores (Figura 2.9).

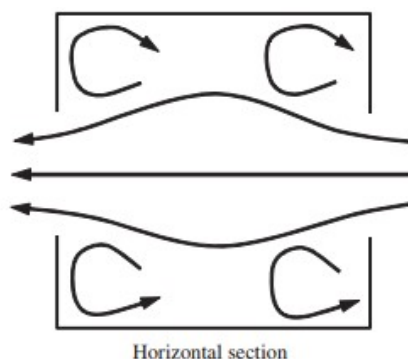


Figura 2.8 – Representação do fluxo de ar no modelo (Huang et al, 2009).

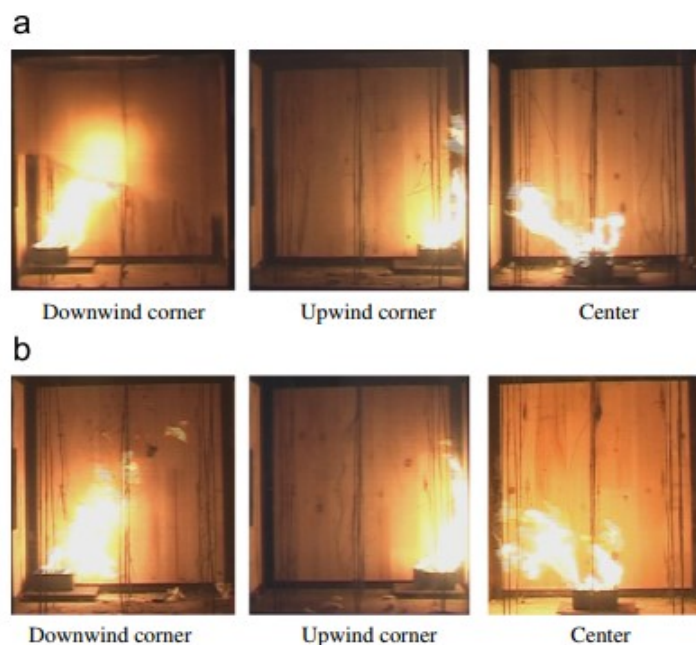


Figura 2.9 – Inclinação da chamas em diferentes posições dentro do compartimento, submetidas a diferentes velocidades do vento externo. (“Downwind corner”: canto contra o vento; “Upwind corner”: canto a favor do vento; “Center”: centro do compartimento). (a)  $U = 1.5$  m/s e (b) 3.0 m/s. (Huang et al, 2009).



Recentemente, **Ren et al.** (2018) analisaram a temperatura adimensional das chamas provenientes de um incêndio de fachada incluindo o efeito do vento externo frontal, ou seja, o vento que incide na direção normal à fachada (Figura 2.10). Para isso, num ensaio de escala reduzida, mediram a temperatura da chama ao longo da parede externa da fachada para traçar o perfil vertical do desenvolvimento da temperatura e correlacionaram com diferentes taxas de liberação de calor, geometria da abertura e velocidade do vento.

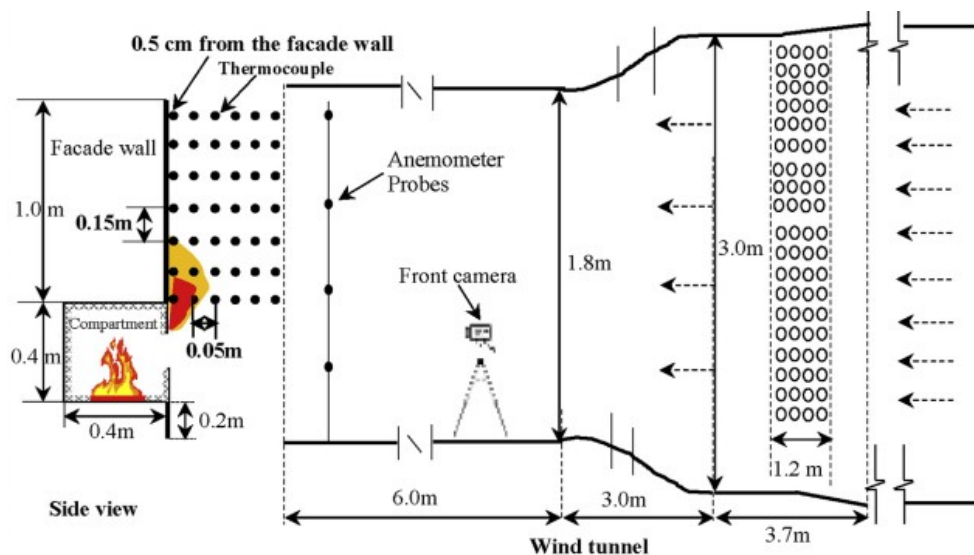


Figura 2.10 – Esquemática do experimento para simular o efeito do vento externo frontal, incidindo na direção normal à fachada (Ren et al, 2018).

A partir dos resultados, observaram que para todas as condições experimentais, isto é, variando os três parâmetros anteriormente citados, a temperatura diminuiu a longo da altura da fachada, o que foi justificado devido ao fluxo turbulento causado no encontro entre a pluma quente e o ar frio, que leva à entrada de ar fresco no interior da pluma, resfriando-a. Também foi observado que, para a mesma altura de fachada, a temperatura registrada diminuiu quando a velocidade do vento aumenta, pois a turbulência causada pelo encontro de fluxos é maior, conduzindo a uma redução da temperatura relativa.

Assim, Ren et al. concluíram que o vento externo normal à fachada afeta fortemente o perfil vertical da temperatura, apresentando diferenças consideráveis quando comparado com o perfil obtido sem a presença do vento. Também reforçaram a ideia das investigações de McCaffrey (1979) de que o perfil de temperatura na pluma pode ser dividido em três regiões, que relacionam o valor da temperatura com a altura em escalas diferentes para cada uma, sendo elas: região de chama contínua ( $\Delta T \sim Z^0$ ), região de chama intermitente ( $\Delta T \sim Z^{-1}$ ) e região da pluma flutuante ( $\Delta T \sim Z^{-5/3}$ ). Por fim, propuseram um novo modelo global para descrever o perfil vertical das chamas que considerasse os efeitos do vento externo frontal.

**Pelo** (2015) analisou a crescente utilização de fachadas em vidro nas construções atuais e a falta de informação para cumprir certos requisitos de desempenho da estrutura definidos nos códigos de construção (Suécia, Hong Kong e Nova Zelândia). Realizou estudos numéricos num modelo que reproduzia um edifício de características reais, utilizou o programa FDS para avaliar o desenvolvimento dum incêndio num dos compartimentos o software Abaqus para o comportamento estrutural das fachadas. Os estudos paramétricos focaram-se no tipo de fachada (com vidro simples ou duplo), na fonte de incêndio (baseada na taxa de libertação de calor ou na densidade de carga) e na presença ou não de fixadores dos painéis de vidro, geralmente constituídos por materiais metálicos.

Este estudo mostrou as muitas incertezas existentes na utilização do vidro em fachadas no que diz respeito a uma análise através dos códigos de construção, principalmente quando são considerados vidros duplos com caixa-de-ar, mostrando a necessidade de uma revisão desses mesmos códigos. No que se refere à temperatura, concluiu-se que o dimensionamento da fachada deve ter em consideração que durante um incêndio, podem ocorrer temperaturas entre 800 a 950 °C. Já sobre a fonte de incêndio, percebeu-se o impacto significativo que essa escolha tem sobre as temperaturas resultantes, ressaltando que uma abordagem com a densidade de carga ao invés da taxa de libertação de calor é muito mais susceptível a erro, pois a sua localização dentro do compartimento deve ser mais cuidadosamente considerada, a fim de garantir que a ignição do combustível aconteça como pretendido e que a propagação do fogo ocorra de forma adequada. Além disso, no uso da fonte de calor baseada na taxa de libertação de calor, percebeu-se que é importante a colocação dessa fonte próxima a fachada, principalmente em compartimentos de grandes dimensões. No que se refere aos fixadores, identificou-se que os maiores níveis de tensões ocorrem nas zonas de contato dos materiais, sendo, assim, considerados como pontos fracos para a segurança contra incêndios. Por fim, verificou-se ainda, que o vidro quebra para temperaturas de, aproximadamente, 290 °C, valor atingido em menos de 10 minutos para uma fonte de calor com taxa de libertação de 5MW.

**Shakerchi** (2017) investigou se os incêndios controlados por ventilação, podem ser previstos recorrendo a simulações em CFD. Esse tipo de incêndio ocorre quando não há, dentro do compartimento, oxigênio suficiente para ocorrer toda a reação química, o que acontece quando a entrada de ar para o compartimento não é suficiente e que leva ao aparecimento de gases não queimados como produto da reação. A consequência dessa concentração limitada de oxigênio é a ocorrência da chama externa.

O estudo passou por três etapas: i) simulação de modelos com resultados experimentais já validados na literatura, ii) análise dos regulamentos holandeses de construção e iii) investigação da influência de alguns parâmetros de construção e/ou incêndio no

comportamento da chama externa (Figura 2.11). Na primeira etapa, obteve-se variações de 10 a 15% nos resultados numéricos quando comparados com os experimentais; considerou-se a precisão dos resultados da simulação como validada. No segundo momento, pontuou-se que os regulamentos holandeses recorrem a um método de cálculo simples para a determinação dos riscos de propagação do incêndio para outros andares ou edifícios. Sendo esse método baseado em aproximações da realidade, com simplificações na geometria, na localização do incêndio, nas propriedades do combustível e do próprio desenvolvimento do incêndio; a obtenção dos resultados também será simplificada, mostrando um risco superestimado, ou seja, menos preciso, para a propagação do incêndio. Já na última etapa, simularam-se modelos com quatro variações paramétricas (uma abertura semelhante a uma janela, uma abertura estreita, uma construção adiabática e uma taxa de libertação de calor elevada). A partir dessa investigação, concluiu-se que todos esses parâmetros têm influência na chama exterior, aumentando-a, sendo o primeiro (a abertura similar a uma janela) o que teve um maior impacto; um aumento de aproximadamente 41% na altura da chama quando comparado com o modelo de referência (modelo validado).

Por fim, ressaltou-se que, embora a utilização de CFD para a engenharia contra incêndio necessite de um grande tempo computacional, ainda assim é economicamente mais viável que a realização de modelos experimentais, especialmente para um estudo com variantes. Por isso, associado ao avanço computacional e às pesquisas nesta área da engenharia, as simulações em CFD são cada vez mais uma ferramenta valiosa para melhoria na proteção contra incêndio, com o objetivo de reduzir e/ou prevenir vítimas de incêndio em construções, principalmente em incêndios em compartimentos, situações em que muitas das vezes os utilizadores do edifício não apercebem da ignição do incêndio. Um maior conhecimento sobre o desenvolvimento das chamas no exterior do edifício conduz a uma maior prevenção da propagação do incêndio a outros andares e/ou construções.

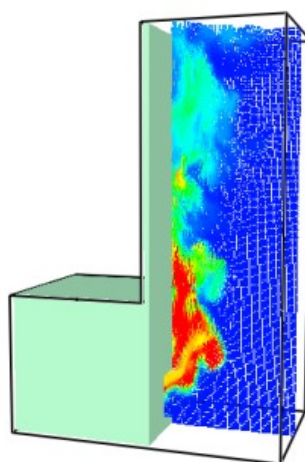


Figura 2.11 – Exemplo de modelação da investigação realizada (Shakerchi, 2017).

## 3. MODELAÇÃO NORMATIVA

### 3.1. Enquadramento

No fim do século passado, a Comissão da Comunidade Europeia decidiu pela criação de um programa voltado para a área da construção, que forma a facilitar a comercialização de serviços e produtos entre os países, a harmonização técnica para o projeto de obras de construção, a supressão de lacunas da regulamentação existente, o favorecimento do desenvolvimento de ferramentas (tabelas, manuais, *softwares*), o aumento da competitividade do setor europeu de construção a nível internacional, entre outros (Pina, 2008). Com o auxílio de uma Comissão Diretiva compostas por representantes dos Estados-Membros, a intenção era de elaborarem um conjunto de regras que serviriam, num primeiro momento, como alternativa para as regras nacionais de cada país e, mais tarde, as substituiriam como Norma Europeia. Assim, na década de 90, o Comitê Europeu de Normalização (*Comité Européen de Normalisation* – CEN), produziu e publicou os chamados Eurocódigos Estruturais. Constituídos por 10 normas e subdivididos em diversas partes, apresentam regras de cálculo estrutural voltadas para o projeto corrente de estruturas e dos seus componentes (CEN, 2002).

O “Eurocódigo 1: Ações em estruturas”, foi a segunda norma publicada e a sua subdivisão “Parte 1-2” (EN 1991-1-2) é responsável pelas ações térmicas e mecânicas para o projeto estrutural de um edifício exposto ao fogo, ou seja, este contempla as medidas passivas de proteção contra incêndio, as quais se referem à concepção e à capacidade da estrutura em desempenhar suas funções mesmo em caso de acidente. A resistência ao fogo é definida pelo próprio documento como “capacidade de uma estrutura, de parte de uma estrutura ou de um elemento para desempenhar as funções pretendidas (função de suporte de carga e/ou função de compartimentação) para um nível de carga específico, quando sujeita a um incêndio específico e durante um período de tempo especificado” e é avaliada de acordo com os seguintes aspectos: a estabilidade ao fogo (evitar o colapso prematuro da estrutura), estanquidade (limitar a propagação do incêndio, incluindo chamas, gases quentes e calor) e isolamento térmico (limitar o aumento da temperatura na face não exposta através da condução).

Para analisar as ações térmicas e mecânicas para o projeto estrutural, o documento aborda os seguintes aspectos: as exigências de segurança e os métodos de cálculo. No que diz respeito

às exigências de segurança, o Eurocódigo estipula que “as construções devem ser concebidas e realizadas de modo que, no caso de se declarar um incêndio:

- A capacidade resistente das estruturas com função de suporte possa ser considerada durante um período de tempo determinado;
- A produção e a propagação do fogo e do fumo no interior da construção sejam limitadas;
- A propagação do fogo às construções vizinhas seja limitada;
- Os ocupantes possam abandonar o local ou ser socorridos por outros meios;
- A segurança das equipas de socorro seja tida em consideração”.

Já para os métodos de cálculo é identificado duas abordagens de cálculo: a prescritiva e a baseada no desempenho (Figura 3.1). A abordagem prescritiva é uma metodologia simplificada que recorre a incêndios nominais traduzidos por relações matemáticas da evolução da temperatura em função do tempo para obtenção das ações térmicas. Estas relações matemáticas reproduzem, de forma geral, diversos possíveis cenários de incêndio que podem ocorrer dentro de um compartimento. Já a abordagem baseada no desempenho recorre a engenharia de segurança contra incêndio e se fundamenta em parâmetros físico-químicos associados ao processo de combustão do incêndio para obtenção das ações térmicas.

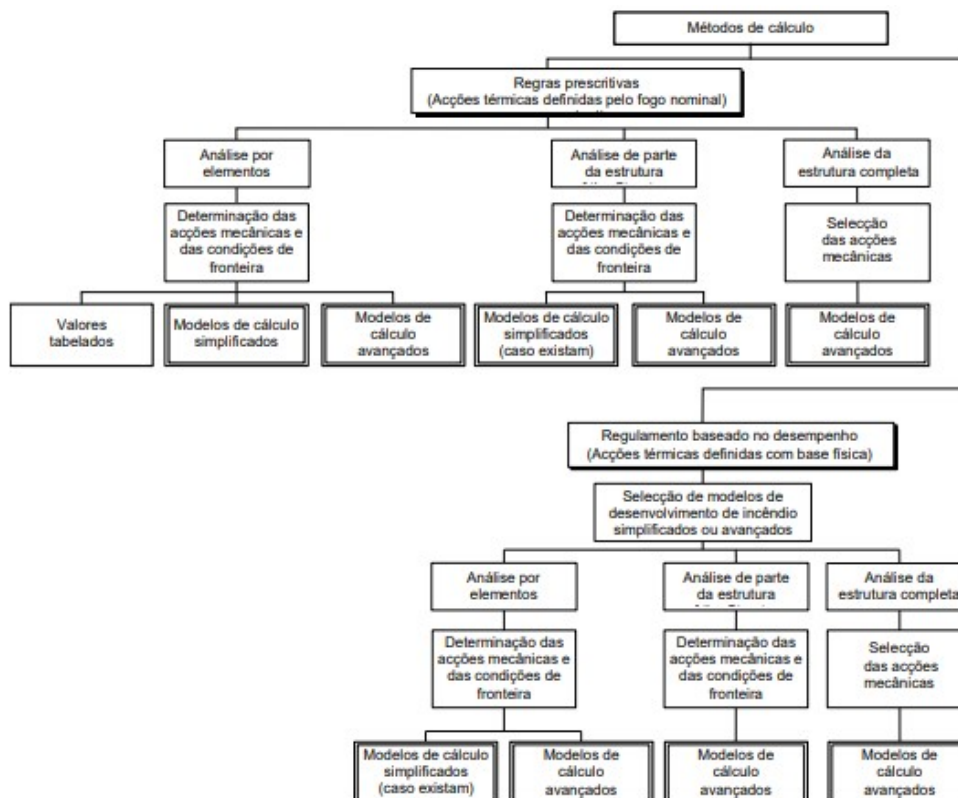


Figura 3.1 – Possíveis métodos de cálculo previstos pelo Eurocódigo 1 – Parte 1-2 (CEN, 2002).

O Eurocódigo 1 – Parte 1-2 também indica, no artigo 2, que para a análise estrutural da resistência ao fogo ser verificada deve-se proceder à seleção e determinação dos relevantes cenários de incêndio de cálculo, ao cálculo da evolução da temperatura no interior dos elementos estruturais e ao cálculo do comportamento mecânico da estrutura exposta ao fogo. Tal comportamento mecânico depende das ações térmicas e pode ser analisado para verificação da resistência ao fogo no domínio do tempo (tempo de cálculo da resistência maior que tempo requerido de resistência), da resistência (valor de cálculo da resistência de um elemento em situação de incêndio num determinado instante maior que valor de cálculo dos efeitos relevantes das ações em situação de incêndio num determinado instante) ou da temperatura (valor de cálculo da temperatura dos materiais menor que valor de cálculo da temperatura crítica dos mesmos).

Já no artigo 4, considerações são feitas em relação às ações mecânicas para a análise estrutural, pontuando que “as dilatações e deformações, impostas e restringidas, provocadas pelas variações de temperatura devidas à exposição ao fogo, originam efeitos de ações, por exemplo, forças e momentos, os quais devem ser considerados”, ponderando, por exemplo, a dilatação térmica restringida dos próprios elementos e a dilatação térmica diferencial no interior de elementos hiperestáticos. Além disso, ações adicionais induzidas pelo fogo também poderão ser necessárias dependendo das situações acidentais do projeto, como, por exemplo, o impacto do colapso de um elemento estrutural.

### **3.2. Anexo B do EN 1991-1-2**

No que diz respeito a incêndios de compartimento, o artigo 3.3.1.2 da EN 1991-1-2, determina que as temperaturas dos gases deverão ser baseadas em parâmetros físicos, considerando pelo menos a densidade de carga de incêndio e as condições de ventilação, e que, para os elementos exteriores, a exposição ao fogo deve ser considerada através das aberturas. No caso destes elementos exteriores, o Anexo B apresenta um método de cálculo das condições de aquecimento, considerando condições estacionárias para os diversos parâmetros e permitindo obter as temperaturas do compartimento e das chamas emergentes. Além disso, o efeito do vento também é analisado, pois se houver, no compartimento de incêndio, aberturas em lados opostos ou outra fonte de alimentação de ar, o cálculo deve ser realizado considerando “condições de tiragem forçada”. Caso contrário, recorre-se ao cenário “sem condições de tiragem forçada”. Assim, é possível obter dados como a taxa de libertação de calor, a temperatura do compartimento, as dimensões da chama ejetada, as temperaturas da chama na abertura e ao longo do seu eixo, entre outros.

Para ambos os cenários abordados na metodologia, as dimensões do compartimento não podem exceder um limite máximo de 70 m x 18 m x 5 m (comprimento x largura x altura) e a densidade de carga de incêndio ( $q_{f,d}$ ) não pode ser inferior ao limite mínimo de 200 MJ/m<sup>2</sup>. A primeira análise que se procede é a relação adimensional entre largura e profundidade do compartimento ( $D/W$ ), que assume a seguinte equação em casos de aberturas em mais de uma parede:

$$D/W = \frac{W_2 A_{V1}}{W_1 A_V} \quad (\text{Eq. 1})$$

em que  $W_1$  é a largura da parede 1 (que contém a maior área de aberturas), ou seja, a parede principal,  $W_2$  é a largura da parede perpendicular à parede 1,  $A_{V1}$  é a soma das áreas das aberturas da parede 1 e  $A_V$  é a área total das aberturas verticais do compartimento.

De seguida, a análise prossegue dependendo da situação correspondente ao modelo a ser estudado, se em “condições de tiragem forçada” ou se “sem condições de tiragem forçada”. Interessa referir que em ambos os casos, se houver uma obstrução horizontal sobre a abertura, seja uma projeção horizontal do piso superior, uma varanda ou uma pala, seu efeito deverá ser considerado na trajetória da chama (Figura 3.2 e 3.3).

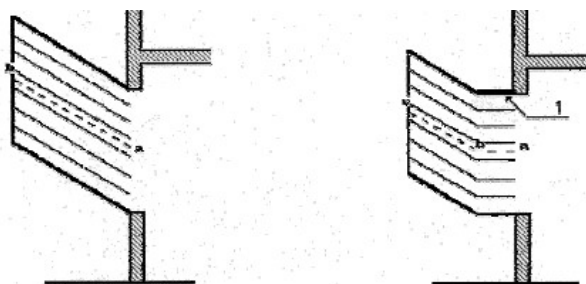


Figura 3.2 – Deflexão da chama devido à projeção horizontal do piso superior para a situação de “condições de tiragem forçada” (CEN, 2002).

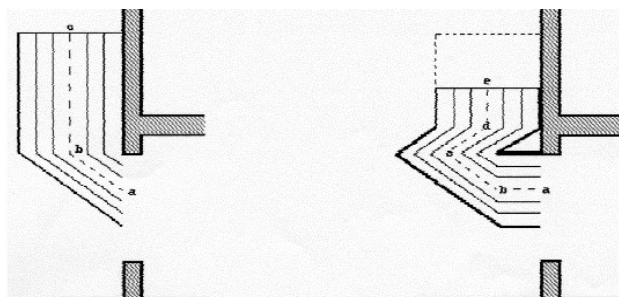


Figura 3.3 – Deflexão da chama devido à projeção horizontal do piso superior para a situação de “sem condições de tiragem forçada” (CEN, 2002).

### 3.2.1. Com abertura oposta: “condições de tiragem forçada”

As características do incêndio e da chama para a condição de tiragem forçada é descrita no artigo B.4.2 do Eurocódigo 1 – Parte 1-2 (Figura 3.4) de acordo com as seguintes equações:

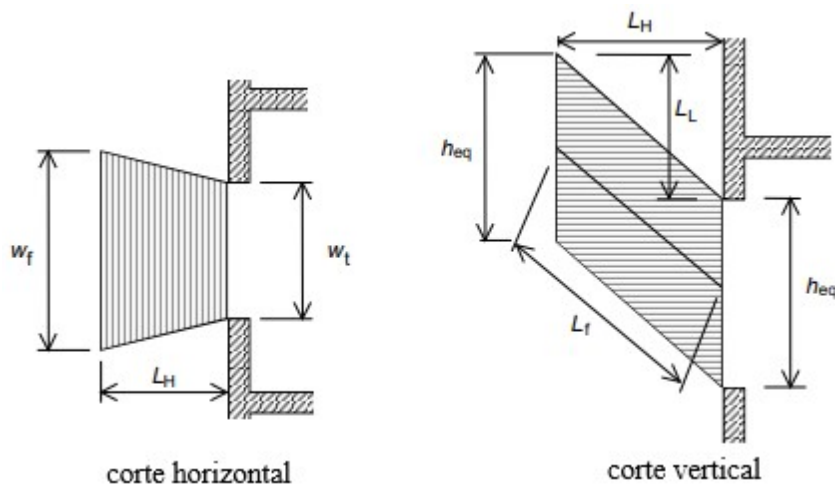


Figura 3.4 – Esquemática das dimensões da chama para a situação de “condições de tiragem forçada” (CEN, 2002).

- Taxa de libertação de calor ( $Q$ ):

$$Q = \frac{A_f \cdot q_{f,d}}{\tau_F} \quad [\text{MW}] \quad (\text{Eq. 2})$$

em que  $A_f$  é a área do pavimento,  $q_{f,d}$  é a densidade de carga [ $\text{MJ}/\text{m}^2$ ] e  $\tau_F$  é a duração do incêndio em combustão livre (indicada como 1200 s pela própria norma).

- Temperatura do compartimento de incêndio ( $T_f$ ):

$$T_f = 1200 (1 - e^{-0.00228 \Omega}) + T_0 \quad [\text{K}] \quad (\text{Eq. 3})$$

em que  $\Omega$  é um parâmetro obtido através da Equação 4, e  $T_0$  é a temperatura inicial do ambiente.

$$\Omega = (A_f \cdot q_{f,d}) / (A_V \cdot A_t)^{1/2} \quad [\text{MJ}/\text{m}^2] \quad (\text{Eq. 4})$$



em que  $A_V$  equivale a área total das aberturas verticais do compartimento e  $A_E$  equivale a área total da superfície envolvente.

- Altura da chama ( $L_L$ ):

$$L_L = \left( 1.366 \left( \frac{1}{u} \right)^{0.43} \frac{Q}{A_V^{1/2}} \right) - h_{eq} \quad [\text{m}] \quad (\text{Eq. 5})$$

em que  $u$  é a velocidade do vento (admitida pela própria norma como 6 m/s) e  $h_{eq}$  é a altura equivalente das aberturas, obtida através da média ponderada dos valores das alturas das aberturas.

- Projeção horizontal da chama ( $L_H$ ):

$$L_H = 0.605 \left( \frac{u^2}{h_{eq}} \right)^{0.22} \cdot (L_L + h_{eq}) + W_\alpha \quad [\text{m}] \quad (\text{Eq. 6})$$

aqui já afetado pela presença de uma obstrução horizontal sobre a abertura, previsto de acordo com B.4.2.(12).

- Largura da chama ( $w_f$ ) amplificada após ejetada pela abertura principal:

$$w_f = w_1 + 0.4L_H \quad [\text{m}] \quad (\text{Eq. 7})$$

em que  $w_1$  é a largura da abertura da parede 1 (parede principal).

- Comprimento da chama segundo o eixo ( $L_f$ ):

$$L_f = (L_L^2 + L_H^2)^{1/2} \quad [\text{m}] \quad (\text{Eq. 8})$$

- Temperatura da chama na abertura ( $T_w$ ):

$$T_w = 520 / (1 - 0.3325 L_f (A_V)^{1/2} / Q) + T_0 \quad [\text{K}] \quad (\text{Eq. 9})$$

garantindo  $L_f (A_V)^{1/2} / Q < 1$ .

- Temperatura da chama segundo o eixo ( $T_x$ ) variando em função da distância axial entre a abertura e o ponto onde o valor é desejado ( $L_x$ ):

$$T_x = \left( 1 - 0.3325 \frac{L_x (A_v)^{\frac{1}{2}}}{Q} \right) (T_w - T_0) + T_0 \quad [\text{K}] \quad (\text{Eq. 10})$$

### 3.2.2. Sem abertura oposta: “sem condições de tiragem forçada”

As características do incêndio e da chama para sem condição de tiragem forçada é descrita no artigo B.4.1 do Eurocódigo 1- Parte 1-2 (Figura 3.5) de acordo com as seguintes equações:

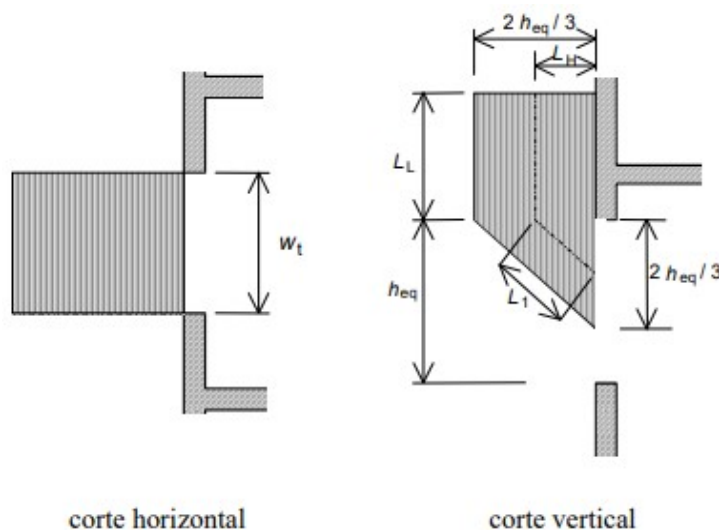


Figura 3.5 – Esquemática das dimensões da chama quando em situação de “sem condições de tiragem forçada” (CEN, 2002).

- Taxa de libertação de calor ( $Q$ ):

$$Q = \min \left( A_f \cdot q_{f,d} / \tau_F ; 3.15 (1 - e^{-0.036 / \theta}) A_v \left( \frac{A_f \cdot q_{f,d}}{\tau_F} \right)^{1/2} \right) \quad [\text{MW}] \quad (\text{Eq. 11})$$

em que  $A_f$  é a área do pavimento,  $q_{f,d}$  é a densidade de carga [ $\text{MJ}/\text{m}^2$ ],  $\tau_F$  é a duração do incêndio em combustão livre (admitida como 1200 s pela própria norma),  $\theta$  é o fator de

abertura do compartimento, obtido através da Equação 12, e  $A_V$  é a área total das aberturas verticais do compartimento.

$$O = A_V \cdot \sqrt{h_{eq}} / A_t \quad [1/m^2] \quad (\text{Eq. 12})$$

em que  $h_{eq}$  é a altura equivalente das aberturas e  $A_t$  é a área total da superfície envolvente.

- Temperatura do compartimento de incêndio ( $T_f$ ):

$$T_f = 6000 (1 - e^{-0.1/O}) O^{1/2} (1 - e^{-0.00286\Omega}) + T_0 \quad [\text{K}] \quad (\text{Eq. 13})$$

em que  $\Omega$  é um parâmetro (Eq. 4) e  $T_0$  é a temperatura inicial do ambiente.

- Altura da chama ( $L_L$ ):

$$L_L = \max \left( 0 ; h_{eq} \left( 2.37 \left( \frac{Q}{A_V \rho_g (h_{eq} \cdot g)^{1/2}} \right)^{2/3} - 1 \right) - W_\alpha (1 + \sqrt{2}) \right) \quad [\text{m}] \quad (\text{Eq. 14})$$

em que  $\rho_g$  é a massa volúmica do gás interior e  $g$  é a aceleração da gravidade (ambos admitidos pela própria norma como 0.45 kg/m<sup>3</sup> e 9.81 m/s<sup>2</sup> respectivamente), aqui já afetado pela presença de uma obstrução horizontal sobre a abertura, previsto de acordo com B.4.1.(13).

- Largura da chama ( $w_t$ ) na abertura principal:

$$w_t = w_1 \quad [\text{m}] \quad (\text{Eq. 15})$$

em que  $w_1$  é a largura da abertura da parede 1 (parede principal).

- Projeção horizontal da chama ( $L_H$ ), para a situação de presença de parede acima da abertura e de  $h_{eq} \leq 1.25w_t$ :

$$L_H = h_{eq}/3 + W_\alpha \quad [\text{m}] \quad (\text{Eq. 16})$$

aqui também já afetado pela presença da obstrução horizontal, previsto de acordo com B.4.1.(13).

- Comprimento da chama segundo o eixo ( $L_f$ ), também para a situação de parede acima da abertura e de  $h_{eq} \leq 1.25w_t$ ;

$$L_f = L_L + h_{eq}/2 \quad [\text{m}] \quad (\text{Eq. 17})$$

- Temperatura da chama na abertura ( $T_w$ ):

$$T_w = 520 / \left( 1 - 0.4725 (L_f w_t / Q) \right) + T_0 \quad [\text{K}] \quad (\text{Eq. 18})$$

garantindo  $L_f w_t / Q < 1$ .

- Temperatura da chama segundo o eixo ( $T_x$ ) variando em função da distância axial entre a abertura e o ponto onde o valor é desejado ( $L_x$ ):

$$T_x = (1 - 0.4725 (L_x w_t / Q)) (T_w - T_0) + T_0 \quad [\text{K}] \quad (\text{Eq. 19})$$

garantindo que  $L_x w_t / Q < 1$ .

## 4. MODELAÇÃO NUMÉRICA

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) consiste na metodologia que trata processos físicos e químicos que apresentem escoamento através de elementos finitos em meios computacionais, resolvendo numericamente as equações que governam a dinâmica dos fluidos e sendo uma abordagem mais avançada quando comparada com modelos simplificados ou de zonas típicas (Cox e Kumar, 2002). A importância da resolução numérica para a área de estudo se dá ao fato de não existir soluções analíticas de forma completa para as equações de Navier-Stokes, equações as quais regem a continuidade e conservação de energia, massa, velocidade e espécie (Shakerchi, 2017)

A modelação em CFD funciona a partir da subdivisão do domínio computacional tridimensional num elevado número de pequenos volumes, chamados de células. Dentro de cada uma dessas células, considera-se as variáveis do gás como uniformes no espaço, mas variando com o tempo, e resolve-se as equações de Navier-Stokes em cada uma de forma simultânea (Rein et al, 2004 e Rodriguez, 2019). Há diversas abordagens para resolução das equações, porém as mais comuns são:

- Solução Numérica Direta (*Direct Numerical Solution* – DNS), que consiste numa maneira direta de resolver numericamente as equações como o próprio nome indica, e que aborda o problema resolvendo todos os vórtices ou redemoinhos sem ser nada previsto, ou seja, as equações exatas de Navier-Stokes são solucionadas por completo e todos os detalhes do fluxo são fornecidos (Figura 4.1 e 4.2). Para obter essa alta precisão, é necessário uma elevada subdivisão da malha, o que acarreta num alto consumo de tempo e de recurso computacionais, inviabilizando a abordagem para aplicações práticas. Logo, o seu uso é mais voltado para estudos fundamentais de caráter acadêmico e/ou de investigação (Nicoud, 2007).
- Simulação das Grandes Escalas (*Large Eddy Simulation* – LES), que incide em um método de previsão de fluxo turbulento, em que as equações de Navier-Stokes são filtradas antes de serem solucionadas numericamente, assim, apenas os grandes vórtices são resolvidos e os pequenos, ou seja, aqueles menores que as células, são estimados (Figura 4.1 e 4.2). Dessa forma, o método é computacionalmente menos exigente do que o anterior e, apesar de o intervalo de tempo ser uma das suas condicionantes, uma vez que as previsões são dependentes do tempo já que o cálculo é

baseado no intervalo de tempo anterior, é a abordagem com maior potencial de uso numa escala prática e/ou industrial (Lönnermark e Björklund, 2008).

- Equações de Média de Reynolds (*Reynolds Averaged Navier-Stokes* – RANS), que tratam as equações de Navier-Stokes de forma estatística, transformando os valores instantâneos em um valor médio com flutuações (Figura 4.1 e 4.2). As escalas pequenas são desconsideradas, os vórtices são previstos e apenas o fluxo médio é resolvido, levando a uma menor demanda computacional, mas também a uma menor precisão da abordagem. Por não ser dependente do tempo, logo do que aconteceu no instante anterior, a metodologia é frequentemente utilizada para simulações de estado estacionário. Já para análise do comportamento do fogo de incêndios de compartimento, o método de previsão de fluxo turbulento não é favorável (Nicoud, 2007 e Shakerchi, 2017).

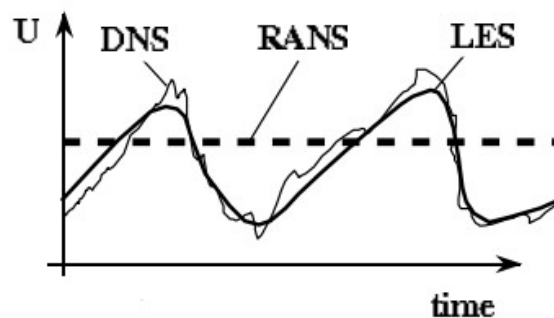


Figura 4.1 – Comparação das abordagens DNS, LES e RANS para uma evolução temporal típica de velocidade que esses três métodos forneceriam (Nicoud, 2007).

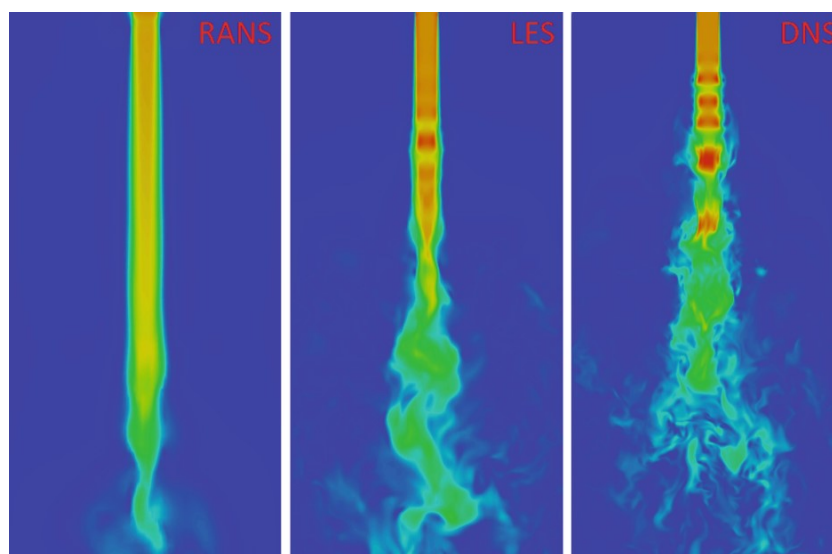


Figura 4.2 – Comparação das abordagens RANS, LES e DNS para uma análise do desenvolvimento de chama (Rodriguez, 2019).

---

Para a correta utilização de modelos CFD, é necessário uma descrição da geometria do compartimento e de suas aberturas, uma especificação dos materiais e suas superfícies e a determinação das condições de incêndio. O resultado gerado é de grande detalhamento no intervalo de tempo calculado e pode conter várias informações, como temperatura, velocidade, concentração dos constituintes, visibilidade e outros, além de permitir uma representação gráfica dos mesmos, permitindo a visualização dos acontecimentos do cenário de incêndio (Cox e Kumar, 2002).

Neste estudo, recorreu-se a modelação CFD através do *Fire Dynamics Simulator* (FDS), código computacional desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST) dos Estados Unidos, baseado na abordagem LES e com foco no transporte de calor e fumo provenientes de um incêndio (FDS-SMV, n.d.), junto com o *Pyrosim*, interface gráfica do utilizador desenvolvida pelo *Thunderhead Engineering Consultants*. No mercado estão ainda disponíveis outras opções para modelação CFD, como *Jasmine*, *Flow3D* e *Sofie*.

Para garantir um correto uso dos modelos de incêndio, é importante um processo de validação dos resultados, que pode incluir a comparação com literatura já validada, modelos anteriormente avaliados, previsões regulamentares, experiência em campo, ensaios à escala real, entre outros (ASTM, 2018). Neste trabalho, a calibração e a validação dos modelos desenvolvidos foram realizadas com base em suportes técnicos, literatura existente e estudos já validados. Desenvolveu-se ou correu-se diversos modelos já bem analisados na literatura, sendo eles exemplos e documentos do próprio suporte (*Pyrosim Fundamentals*, 2019; *Pyrosim User Manual*, 2019; e *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide*, 2006), análises e conteúdos académicos (Overholt, 2006 e Benkorichi, n.d.) e códigos obtidos de estudos prévios (Pelo, 2015; Shakerchi, 2017; e outros não publicados), para, por fim, desenvolver os modelos dos casos de estudo com propriedade e obter as análises desejadas (ver secção 6. Resultados e Comparações).

## 5. CASO DE ESTUDO

O presente capítulo tem como objetivo descrever o modelo computacional utilizado para realizar a análise CFD. O modelo desenvolvido foi baseado no projeto estrutural realizado na disciplina de *Projecto de Edifícios e Fundações* da área de mestrado *Mecânica Estrutural* do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. O projeto arquitetónico foi concedido pelo gabinete estrutural Adão da Fonseca, no Porto, e desenvolvido, por parte da aluna, no 1º semestre do ano letivo 2019/2020.

### 5.1. Caracterização, Definição Arquitetónica e Material do Compartimento de Incêndio

O projeto base consistia num edifício em betão armado composto por cinco andares, sendo um deles enterrado, vãos amplos e sem divisórias, duas fachadas em vidro opostas, sendo as do rés de chão de um dos lados de correr, funcionando como vias de passagem para a área externa. A utilização tipo deste edifício era escritórios. Porém, para a atual análise, simplificou-se o projeto e considerou-se apenas a parte relevante para o estudo da ação do fogo num pilar exterior devido a um incêndio de compartimento.

O modelo final utilizado consiste num edifício de dois pavimentos, sendo o rés de chão com uma área em planta de 186 m<sup>2</sup> (7.75 m x 24 m) e o primeiro andar com 216 m<sup>2</sup> (9 m x 24 m) (Figura 5.1 e 5.2). Essa diferença ocorre justamente pela presença dos pilares externos desejados no estudo, que sustentam a projeção horizontal que o piso superior possui num dos seus lados. Tais pilares estão afastados 1.0 m do limite do compartimento e possuem uma secção transversal de 0.25 x 0.75 m, sendo a maior dimensão paralela à fachada de vidro e a menor dimensão condicionada pela própria arquitetura. Nas outras fachadas em vidro, do próprio piso e do piso superior, que não possuem esses elementos estruturais externos, os pilares estão alinhados com as fachadas e com a mesma secção transversal citada. Além disso, a construção conta com um pé direito de 2.75 m, com paredes estruturais de 0.25 m de espessura nas outras duas fachadas, perpendiculares às de vidro, com vigas invertidas no alinhamento longitudinal dos pilares com secção transversal de 0.25 x 0.50 m e com lajes fungiformes de 0.25 m de espessura. Interessa referir que as dimensões desses elementos



estruturais, não foram exatamente as mesmas do projeto estrutural realizado inicialmente, de modo a simplificar as dimensões não relevantes e também de forma a compatibilizar as medidas possíveis a utilizar na dimensão da malha computacional do *software PyroSim*, condição importante para o bom resultado do programa, como explicado posteriormente.

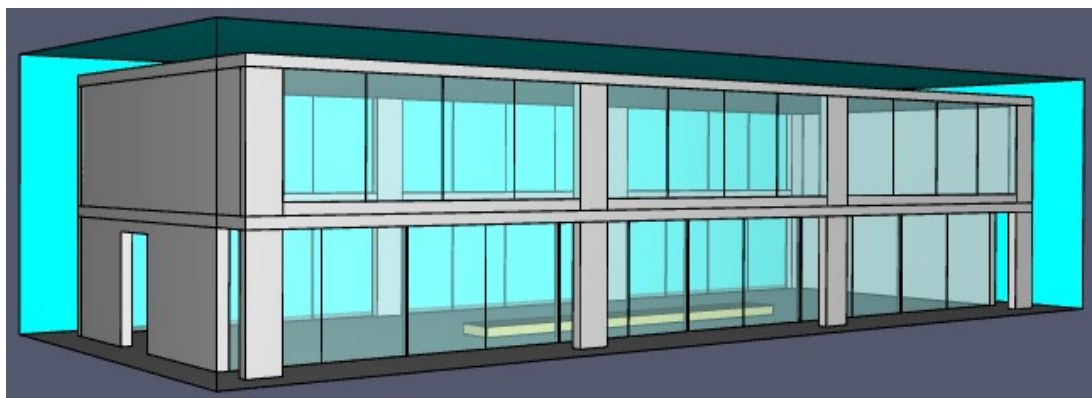


Figura 5.1 – Fachada principal da modelação, a qual possui os pilares externos no rés de chão.

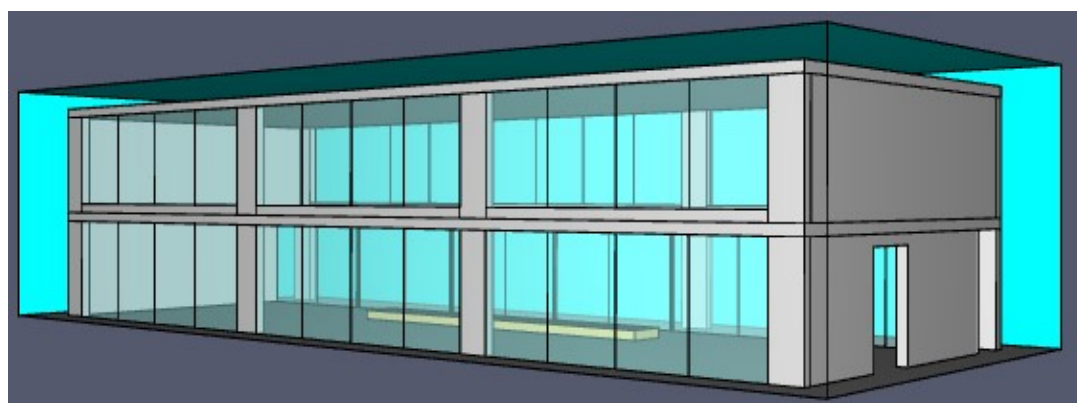


Figura 5.2 – Fachada oposta à principal.

## 5.2. Materiais Considerados na Modelação do Edifício

A modelação do edifício considerou três materiais construtivos: betão, aço e vidro (Quadro 5.1). O betão foi associado aos elementos estruturais: vigas, lajes e pilares, tal como já referido e suas propriedades foram obtidas da biblioteca disponibilizada pelo próprio programa. O aço foi utilizado apenas para representar a fixação dos vidros nas fachadas que funcionavam como portas para o exterior, a fim de aproximar da realidade, uma vez que o aço

apresenta uma alta condutividade térmica, o que afetará a variação de temperatura dos vidros adjacentes. Já o vidro, por não constar na biblioteca do programa, teve suas características determinadas com base em modelos e estudos já validados previamente (Pelo, 2015); a espessura escolhida foi de 10 mm. Interessa referir que esse último material pode variar bastante de acordo com o fabricante, mas no presente modelo a temperatura de rotura assumida foi de 290 °C, seguindo o estudo acima citado, o qual teve em consideração principalmente o choque térmico devido a variação da temperatura entre as faces do vidro e a introdução de tensões devido ao diferente coeficiente de dilatação entre o material em questão e os seus materiais de sustentação e/ou fixação.

Quadro 5.1 – Propriedades térmicas adotadas nos materiais utilizados no modelo.

Propriedades térmicas	Betão	Aço	Vidro
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	2280.0	7850.0	2500.0
Calor específico [kJ/(kg.K)]	1.04	0.46	0.72
Condutividade [W/(m.K)]	1.8	45.8	1.0
Emissividade [-]	0.9	0.95	0.9
Coefficiente de absorção [1/m]	50000.0	50000.0	20.0

### 5.3. Definição do Incêndio

Para a modelação do incêndio, foi necessário determinar a reação ativa, a taxa de libertação de calor e a curva de crescimento. Em relação a reação ativa, decidiu-se por uma reação do tipo Celulose (combustível  $C_4H_6O_3$ ), uma vez que os principais materiais combustíveis disponíveis em compartimentos de uso para escritório são materiais celulósicos, como papeis e mobiliário. Os parâmetros deste tipo de materiais foram definidos de acordo com estudos prévios (Shakerchi, 2017). Para os restantes dados, recorreu-se ao Anexo E do Eurocódigo 1 – Parte 2 (CEN, 2002). Através desta norma e atendendo ao tipo de ocupação como escritório, foi possível obter um valor de cálculo da densidade de carga de incêndio ( $q_{f,d}$ ) de 613.2 MJ/m<sup>2</sup>, considerando medidas normais de combate ao fogo, e uma taxa máxima de libertação de calor por unidade de área ( $HRR_f$ ) de 250 kW/m<sup>2</sup>. Multiplicando esse último valor por 216 m<sup>2</sup>, área do compartimento onde o incêndio tem sua origem ( $A_f$ ), obteve-se uma taxa de libertação de calor total da combustão ( $HRR_t$ ) de 46500 kW.

Interessa referir que a equipe responsável pelo desenvolvimento do programa, *Thunderhead Engineering* (Modeling Fire in Pyrosim, 2019), indica que a forma mais correta para simular um incêndio é especificando a sua taxa de libertação de calor no modelo de combustão. Já

para a curva de crescimento, o próprio Eurocódigo apresenta a seguinte equação para definir a fase de desenvolvimento, até se atingir a taxa de libertação total associada ao compartimento em estudo:

$$Q = 10^3 \left( \frac{t}{t_{\alpha}} \right) \quad [\text{kW}] \quad (\text{Eq. 20})$$

em que  $Q$  é a taxa de libertação de calor,  $t$  o tempo em segundos (e variável da função), e  $t_{\alpha}$  o tempo necessário para atingir uma taxa de libertação de calor de 1 MW, que no caso de escritórios assume o valor de 300 s (incêndio de crescimento médio).

Entretanto, para a correta introdução das características do incêndio no *software PyroSim*, é importante ressaltar três pontos:

- 1) A curva de incêndio determinada pela norma é uma equação *t-squared* e, apesar do programa ter essa opção ao definir as propriedades da libertação de calor da superfície que irá arder, optou-se por personalizar a curva, introduzindo os valores calculados à parte, a fim de ter um maior controle sobre a ferramenta. Dessa forma, introduziu-se as taxas de libertação de calor em função do tempo e de forma fracionada em relação ao valor total alcançado no incêndio em questão, que ocorrerá por volta dos 34 minutos de incêndio (Quadro 5.2).
- 2) A introdução da taxa de libertação total de calor ( $HRR_f$ ) no programa é feita tendo em consideração a área que irá servir como fonte de calor, ou seja, a área a arder ( $A_{burner}$ ). É assim possível definir-se um novo parâmetro: taxa de libertação de calor por unidade de área  $HRRPUA$ . Para determinação dessas áreas a arder, o *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (Cox e Kumar, 2002) fornece a seguinte equação:

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_{\alpha} \cdot c_p \cdot T_{\alpha} \cdot D^2 \cdot \sqrt{g \cdot D}} \quad (\text{Eq. 21})$$

em que  $Q^*$  é a taxa de libertação de calor adimensional,  $Q$  é a taxa total de libertação de calor do incêndio, aqui denominada por  $HRR_f$ ,  $\rho_{\alpha}$  é a densidade do ar à temperatura ambiente de 20 °C, considerada como 1.204 kg/m<sup>3</sup>,  $c_p$  é o calor específico do ar seco à temperatura ambiente, considerado como 1.005 kJ/(kg.K),  $T_{\alpha}$  é a temperatura ambiente em Kelvin, que assume um valor de 293 K (equivalente a

20°C),  $D$  é a dimensão característica do combustível, isto é, o diâmetro da base de combustível, valor que se deseja obter, e  $g$  é a aceleração da gravidade, adotada como 9.81 m/s<sup>2</sup>. Além disso, Cox e Kuman definiram que a taxa de libertação de calor adimensional deveria se encontrar dentro do intervalo de 0.3 a 2.5 para incêndios naturais dentro de edifícios. Assim, calcularam-se os valores possíveis para o diâmetro da base e suas respectivas áreas circulares, de modo a obter a percentagem da área total que esses valores representariam (Quadro 5.3).

Quadro 5.2 – Definição da curva de crescimento do incêndio seguindo a Equação 20.

Tempo (s)	HRR (kW)	Fração
0	0.0	0.000
100	111.1	0.002
200	444.4	0.010
300	1000.0	0.022
400	1777.8	0.038
500	2777.8	0.060
600	4000.0	0.086
700	5444.4	0.117
800	7111.1	0.153
900	9000.0	0.194
1000	11111.1	0.239
1100	13444.4	0.289
1200	16000.0	0.344
1300	18777.8	0.404
1400	21777.8	0.468
1500	25000.0	0.538
1600	28444.4	0.612
1700	32111.1	0.691
1800	36000.0	0.774
1900	40111.1	0.863
2000	44444.4	0.956
2010	44890.0	0.965
2020	45337.8	0.975
2030	45787.8	0.985
2040	46240.0	0.994
2045	46466.9	0.999
2045.75	46501.0	1.000

Quadro 5.3 – Cálculo da área a arder de acordo com a Equação 21.

Diâmetro (m)	Taxa de libertação de calor adimensional, $Q^*$	Área circular equivalente	Porcentagem da área total
3.000	2.69	7.07	3.80%
3.100	2.47	7.55	4.06%
3.500	1.83	9.62	5.17%
4.000	1.31	12.57	6.76%
4.500	0.97	15.90	8.55%
5.000	0.75	19.63	10.56%
5.500	0.59	23.76	12.77%
6.000	0.47	28.27	15.20%
6.500	0.39	33.18	17.84%
7.000	0.32	38.48	20.69%
7.500	0.27	44.18	23.75%

- 3) A área da fonte de calor ( $A_{burner}$ ), ou seja, a área a arder, como visto (Quadro 5.3), pode variar numa gama de 4 a 20% da área total do compartimento. O *British Standards Institution* (2003) ressalta que uma alta taxa de libertação de calor sobre uma pequena área de fonte (maior *HRRPUA*) fará com que o incêndio seja governado por impulsão ao invés de por flutuabilidade, resultando em uma chama mais estruturada, o que se pode chamar por jato de chama, situação mais comum em incêndios no interior de edifícios, já que são menos afetados pelo fluxo de ar ao redor. Caso contrário, numa situação de maior área da fonte de calor (menor *HRRPUA*), a tendência da chama será em se dividir em menores plumas, não representando bem o incêndio de compartimento.

Assim, para prosseguir as análises, dentre os possíveis valores obtidos, optou-se por uma fonte de menor área, a fim de obter uma maior taxa de libertação de calor por unidade de área (*HRRPUA*). Definiu-se a percentagem de 5% da área total a fim de obter um valor exato próximo do limite (Quadro 5.4 com outros valores para comparação). Como o programa não se relaciona bem com áreas circulares, tal área foi convertida em área retangular e optou-se por escolher as dimensões do retângulo de forma que a área a queimar tivesse um maior comprimento no sentido paralelo às fachadas (Figura 5.3). Por fim, para um maior entendimento do desenvolvimento do incêndio e comparação com a norma vigente, desenvolveu-se um outro modelo com as mesmas condições de incêndio, porém alterando a fachada oposta aos pilares externos, ao nível do rés de chão, para paredes de betão (Figura

5.4). Tal mudança foi realizada de modo a obter uma situação de incêndio de compartimento com a fachada oposta sem aberturas, ou seja, que não funcionará como uma fonte de ar para o incêndio, passando, assim, no âmbito das análises normativas, de “com condições de tiragem forçada” para “sem condições de tiragem forçada” (ver secção 3. Metodologia Normativa). Ambas as metodologias estão previstas no Anexo B do Eurocódigo 1 – Parte 1-2 (CEN, 2002), visando as futuras comparações entre os métodos de análise (normativo e numérico).

Quadro 5.4 – Possíveis áreas de incêndio para o atual estudo.

Percentagem da área total	Área equivalente (m <sup>2</sup> )	Taxa de libertação de calor adimensional, Q*	HRRPUA (kW/m <sup>2</sup> )
5.00%	9.30	1.91	5000
12.50%	23.25	0.61	2000
20.00%	37.20	0.34	1250

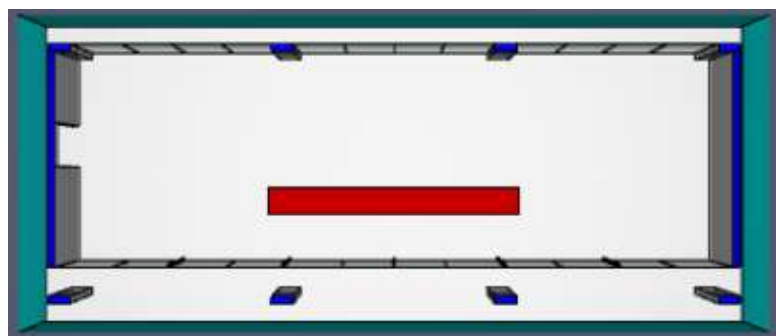


Figura 5.3 – Modelo de estudo 1, com área a arder de 9.30 m<sup>2</sup> (1 m x 9.30 m) e HRRPUA de 5.00 MW/m<sup>2</sup>.

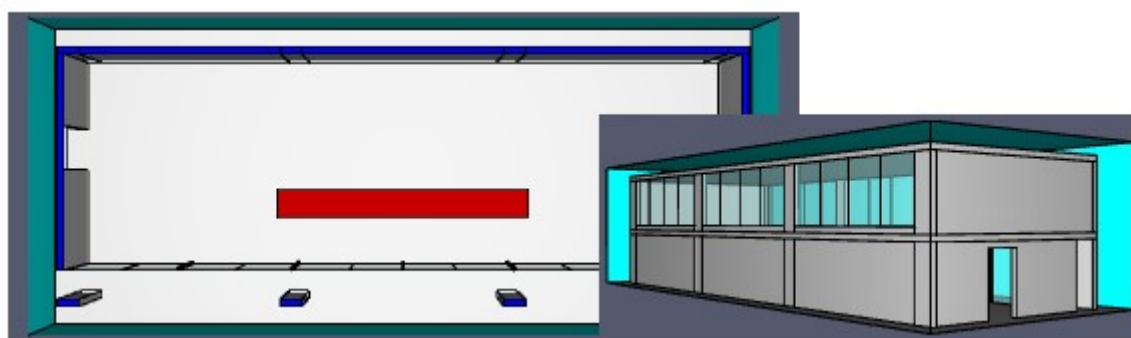


Figura 5.4 – Modelo de estudo 4, com área a arder de 9.30 m<sup>2</sup> (1 m x 9.30 m) e HRRPUA de 5.00 MW/m<sup>2</sup>, assim como o modelo 1, porém substituindo fachada oposta em vidro por paredes de betão.

## 5.4. Descrição do Modelo Numérico

### 5.4.1. Malha

A qualidade dos resultados de uma análise CFD está fortemente veiculada ao correto dimensionamento das células que constituem a malha. A cada vez que se reduz a dimensão das células por um fator de 2, o erro é diminuído por um fator de 4, entretanto o tempo de execução da simulação é aumentado por um fator de 16. Logo é importante ponderar bem a qualidade do resultado com a potência computacional disponível e afinar bem o modelo previamente, recorrendo a dimensões maiores para as células, até que esse esteja fiel ao cenário que se deseja obter e, aí sim, proceder a uma análise mais refinada para um resultado que represente bem a realidade.

A importância da dimensão das células ocorre, pois essas sofisticadas ferramentas computacionais lidam com complexas relações físicas e químicas, resolvendo as equações de conservação de Navier-Stokes, através da fragmentação do domínio computacional tridimensional em um grande número de pequenos volumes retangulares (Mawhinney e Back, 2002). Dentro de cada um desses pequenos espaços, apesar de haver variação dos dados em função do tempo, as variáveis do gás são uniformes, logo constantes dentro de toda a célula (Rein et al, 2004), por isso, quanto mais próximo do ideal infinitesimal, melhor a qualidade da interação entre fluidos e gases com as superfícies e, assim, da simulação.

As referências técnicas do próprio programa (*Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide*, 2006), relacionam a escolha da dimensão da malha com o diâmetro característico ( $D^*$ ) (Equação 22), recomendando que a dimensão apropriada para as células varie de 1/20 a 1/5 do parâmetro:

$$D^* = \left( \frac{Q}{\rho_a \cdot c_p \cdot T_a \cdot \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (\text{Eq. 22})$$

em que  $Q$  é a taxa total de libertação de calor do incêndio, aqui denominada por  $HRR_f$ ,  $\rho_a$  é a densidade do ar à temperatura ambiente de 20 °C, considerada como 1.204 kg/m<sup>3</sup>,  $c_p$  é o calor específico do ar seco à temperatura ambiente, considerado como 1.005 kJ/(kg.K),  $T_a$  é a temperatura ambiente em Kelvin, que assume um valor de 293 K para ser equivalente a 20 °C e  $g$  é a aceleração da gravidade, adotada como 9.81 m/s<sup>2</sup>.

Assim, num primeiro momento, os modelos foram desenvolvidos e afinados com células de maior dimensão ou simulados de forma expedita (determinados intervalos de tempo do incêndio, geralmente 10 a 150 s) com células de menor dimensão. Em seguida, quando

alcançado uma satisfatória modelação computacional, a dimensão final da célula foi definida em 0.25 m nas três direções ortogonais, levando a um considerável tempo de cálculo de aproximadamente 4 dias para cada modelo, mas permitindo um afiado resultado dos cenários de incêndio.

É importante também ressaltar que a malha teve suas fronteiras abertas, com exceção da que representa o solo da construção, a fim de providenciar uma condição de limite ambiente para a simulação. Essa ação é recomendada, pois, por padrão, o programa assume que os limites da malha são superfícies inertes, ou seja, funcionam como paredes sólidas com temperatura ambiente fixa. Ao serem alteradas para fronteiras abertas, o fluxo de gases e fluídos com o ambiente exterior à malha passa a ser permitido.

#### **5.4.2. Dispositivo de Medição e Outputs**

No presente estudo, dispositivos de medição foram utilizados com duas finalidades: como aparelhos de controle para gerar uma ação no próprio modelo e como medidores de parâmetros relevantes para o resultado. Na primeira situação, instalou-se detectores de calor em todos os painéis de vidro das fachadas do rés de chão com o comando de desativarem a sua respectiva obstrução quando a temperatura alcançada fosse de 290 °C. Dessa forma foi simulado a falha dos vidros para a entrada de ar acontecendo de forma gradativa, se aproximando do que ocorre na realidade. Na segunda situação, utilizou-se termopares centrados com a área de fonte do incêndio, para análise das chamas, e termopares junto com dispositivos de medição da temperatura de uma superfície adiabática (*Adiabatic Surface Temperature* – AST) nos pilares externos, na face voltada para o incêndio, sendo os termopares para medições no próprio gás e os dispositivos AST para medições na interface gás/sólido. Em ambos os casos da finalidade de medição, os aparelhos foram variados em altura com um distanciamento de 0.25 m e, no caso da análise do pilar, foi posicionado duas colunas de termopares de forma simétrica e uma coluna de medidores AST a meio (Figura 5.5 e 5.6).

Além dos dispositivos citados para obtenção de resultados, também utilizou-se outros recursos para validar o correto funcionamento do modelo. Posicionou-se painéis de medição 2D, a fim de obter os mais diversos parâmetros, como temperatura, velocidade, taxa de libertação de calor por unidade de área (HRRPUA) e frações volumétricas do ambiente (combustível, oxigênio e produtos da reação), sendo posicionados a cada 4 m no sentido longitudinal da construção, a meio dos pilares e da área a arder, também perpendiculares o eixo X, e na face interna dos pilares, já no sentido ortogonal aos anteriores (Figura 5.7). Por último, também se recorreu a um painel 3D para a temperatura, que traduz o parâmetro nas diversas superfícies da construção.



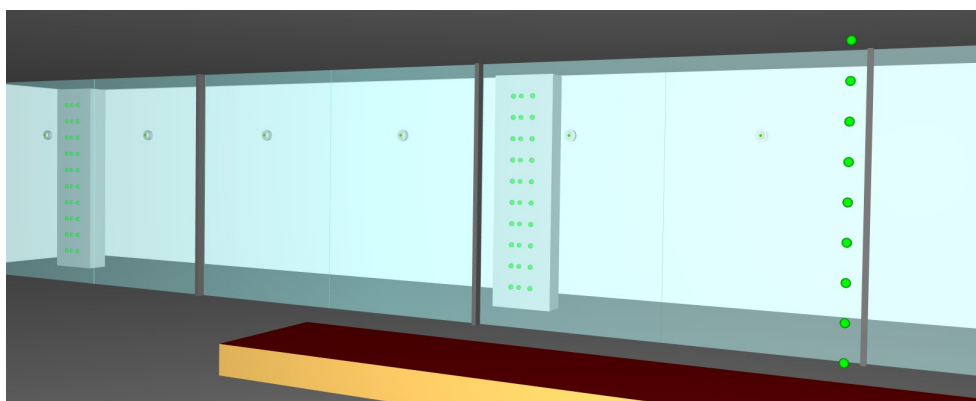


Figura 5.5 – Visão interna da construção, mostrando os termopares sobre a fonte de incêndio, os detectores de calor nos painéis de vidro e as colunas de dispositivos, termopares e AST, nos pilares.

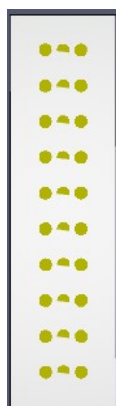


Figura 5.6 – Pormenorização da disposição dos aparelhos nos pilares externos, sendo a coluna central de AST e as colunas exteriores de termopares.

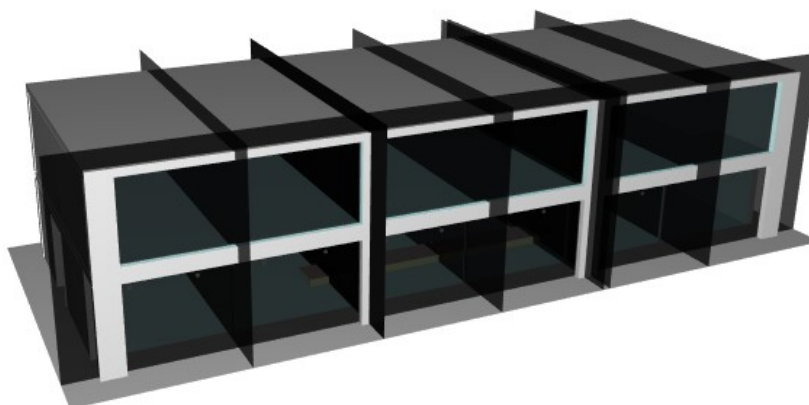


Figura 5.7 – posição dos Painéis 2D para diferentes medições.

## 6. RESULTADOS E COMPARAÇÕES

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os resultados dos dois casos de estudo desenvolvidos, primeiro através do Anexo B do Eurocódigo 1 – Parte 1-2 (EN 1991-1-2) e, em seguida, através da FDS. Como já anteriormente referido (ver secção 5. Casos de Estudo), os casos de estudos se diferem na presença de uma abertura oposta à abertura conjugada com os pilares exteriores, configurando assim, para a análise normativa, “condições de tiragem forçada” quando se faz presente (Modelo 1) e “sem condições de tiragem forçada” quando não (Modelo 2). O compartimento de incêndio apresenta dimensões de 7.75 m x 24 m em planta e pé direito de 2.75 m.

### 6.1. Resultados Normativos

Os valores regulamentares foram obtidos a partir do Anexo B do Eurocódigo 1 – Parte 1-2, denominado por “Acções térmicas para os elementos exteriores – Método de cálculo simplificado”, tal como apresentado na secção 3. Modelação Normativa. Para ambos os casos de estudo, Modelo 1 e Modelo 2, a densidade de carga de incêndio ( $q_{f,d}$ ) assume o valor de 613.2 MJ/m<sup>2</sup>, sendo superiores ao limite mínimo 200 MJ/m<sup>2</sup>, a temperatura inicial ( $T_0$ ) é considerada como 293 K (equivalente a 20 °C) e a projeção do piso superior ( $W_a$ ) de 1.25 m é considerada. Os dos parâmetros geométricos área em planta ( $A_f$ ) e área da superfície envolvente ( $A_e$ ) também são comuns aos modelos, assumindo os valores de 186.00 m<sup>2</sup> e 546.63 m<sup>2</sup>, respectivamente.

Já a relação adimensional entre largura da parede e profundidade do compartimento ( $D/W$ ) não assume o mesmo valor para ambos, uma vez que, apesar das dimensões da parede principal e sua abertura (fachada em vidro combinada com pilares exteriores) e da parede perpendicular e sua abertura (porta principal do edifício) se mantêm as mesmas, a área total das aberturas se modifica com a presença da fachada oposta em vidro. Logo, o parâmetro assume um valor de 0.165 para o Modelo 1 e 0.305 para o Modelo 2 (Equação 1 e Quadro 6.1 e 6.2).

Quadro 6.1 – Dimensões para relação D/W de acordo com a Equação 1 para o Modelo 1.

Modelo 1	
Largura parede com abertura, $W_1$	24.00m
Largura parede perpendicular, $W_2$	7.75m
Pé direito	2.75m
Abertura 1 (portas de vidro)	
Largura, $w_1$	23.25m
Altura	2.75m
Área da abertura 1, $A_{v1}$	63.94m <sup>2</sup>
Abertura 2 (parede perpendicular - porta de entrada)	
Largura, $w_2$	1.50m
Altura	2.50m
Área da abertura 2, $A_{v2}$	3.75m <sup>2</sup>
Abertura 3 (fachada oposta)	
Largura, $w_3$	21.00m
Altura	2.75m
Área da abertura 3, $A_{v3}$	57.75m <sup>2</sup>
Condições de utilização (artigo B.2)	
Área total das aberturas verticais, $A_v$	125.44 m <sup>2</sup>
<b>D/W</b> (para abertura em mais de uma parede)	0.165

Quadro 6.2 – Dimensões para relação D/W de acordo com a Equação 1 para o Modelo 2.

Modelo 2	
Largura parede com abertura, $W_1$	24.00 m
Largura parede perpendicular, $W_2$	7.75 m
Pé direito	2.75 m
Abertura 1 (portas de vidro)	
Largura, $w_1$	23.25 m
Altura	2.75 m
Área da abertura 1, $A_{v1}$	63.94 m <sup>2</sup>
Abertura 2 (parede perpendicular - porta de entrada)	
Largura, $w_2$	1.50 m
Altura	2.50 m
Área da abertura 2, $A_{v2}$	3.75 m <sup>2</sup>
Condições de utilização (artigo B.2)	
Área total das aberturas verticais, $A_v$	67.69 m <sup>2</sup>
<b>D/W</b> (para abertura em mais de uma parede)	0.305

### 6.1.1. Modelo 1 – Com abertura oposta: “condições de tiragem forçada”

As características geométricas específicas do Modelo 1 e os resultados dos parâmetros, seguindo as equações já descritas do artigo B.4.2, são as seguintes:

- Altura equivalente das aberturas:  $h_{eq} = 2.743$  m;
- Área total das aberturas:  $A_V = 125.44$  m<sup>2</sup>;
- Taxa de libertação de calor:  $Q = 95.1$  MW;
- Parâmetro:  $\Omega = 435.6$  MJ/m<sup>2</sup>;
- Temperatura do compartimento de incêndio:  $T_f = 1048$  K, equivalente a 775 °C;
- Altura da chama:  $L_L = 2.62$  m;
- Projeção horizontal da chama:  $L_H = 6.97$  m;
- Largura da chama:  $w_f = 26.04$  m;
- Comprimento da chama segundo o eixo:  $L_f = 7.45$  m;
- Temperatura da chama na abertura:  $T_w = 1027$  K, equivalente a 754 °C, sendo  $L_f(A_V)^{1/2} / Q = 0.88$ ;
- Temperatura da chama segundo o eixo:  $T_z$ , até o fim da projeção horizontal e face do pilar voltada para o incêndio se encontra a 1.00 m da abertura (Quadro 6.3).

Quadro 6.3 – Cálculo da temperatura da chama segundo o eixo de acordo com a Equação 10.

Temperatura da chama segundo o eixo, $T_z$		
$L_x$ (m)	$T_z$ (K)	$T_z$ (°C)
0.10	1024	751
0.20	1021	748
0.30	1019	746
0.40	1016	743
0.50	1013	740
0.60	1010	737
0.70	1007	734
0.80	1004	731
0.90	1001	728
1.00	998	725
1.10	996	723
1.20	993	720
1.25	991	718

### 6.1.2. Modelo 2: sem abertura oposta – “sem condições de tiragem forçada”

As características geométricas e os resultados dos parâmetros do Modelo 2, seguindo as equações já descritas do artigo B.4.1, são as seguintes:

- Altura equivalente das aberturas:  $h_{eq} = 2.736$  m;
- Área total das aberturas:  $A_V = 67.69$  m<sup>2</sup>;
- Taxa de libertação de calor:  $Q = 95.1$  MW (menor valor entre este e 102.9 MW);
- Parâmetro:  $\Omega = 592.9$  MJ/m<sup>2</sup>;
- Temperatura do compartimento de incêndio:  $T_f = 1150$  K, equivalente a 877 °C;
- Altura da chama:  $L_L = 0.00$  m (maior valor entre este e -1.13 m);
- Largura da chama:  $w_c = 23.25$  m;
- Projeção horizontal da chama:  $L_H = 2.16$  m;
- Comprimento da chama segundo o eixo:  $L_f = 1.37$  m;
- Temperatura da chama na abertura:  $T_w = 918$  K, equivalente a 645 °C, sendo  $L_f \cdot w_c / Q = 0.36$ ;
- Temperatura da chama segundo o eixo:  $T_z$ , até o fim da projeção horizontal e face do pilar voltada para o incêndio se encontra a 1.00 m da abertura (Quadro 6.4).

Quadro 6.4 – Cálculo da temperatura da chama segundo o eixo de acordo com a Equação 19.

Temperatura da chama segundo o eixo, $T_z$			
$L_x$	$L_x \cdot Wt/Q < 1$ :	$T_z$ (K)	$T_z$ (°C)
0.10m	0.03	911	638
0.20m	0.05	903	630
0.30m	0.08	895	622
0.40m	0.10	887	614
0.50m	0.13	880	607
0.60m	0.16	872	599
0.70m	0.18	864	591
0.80m	0.21	857	584
0.90m	0.23	849	576
1.00m	0.26	841	568
1.10m	0.29	834	561
1.20m	0.31	826	553
1.25m	0.33	822	549

## 6.2. Resultados Numericos

Para a análise através do modelo computacional, ou seja, análise com base no desempenho do próprio incêndio, antes de mais nada, é importante confirmar se a taxa de libertação de calor foi corretamente inserida, atingindo assim o seu máximo de 46.5 MW do presente estudo e respeitando a função *t-squared* (quadrática em t) aqui desejada (Gráfico 6.1 e ver secção 5. Caso de Estudo). Importa referir que a dispersão dos valores no gráfico ocorre, pois, apesar do combustível ser fornecido a uma taxa constante, a turbulência causa flutuações no fluxo de ar, de modo que a combustão e a mistura sofram leves variações ao longo do tempo.

Os resultados foram obtidos através dos dispositivos de medição inseridos, ambos variando em altura em todas as suas colocações, e médias aritméticas dos valores fornecidos por estes. Para obtenção das médias, prosseguiu-se de duas formas: i) considerando todos os dispositivos em altura de cada série (um dispositivo a cada 0.25 m) e ii) considerando apenas os três dispositivos superiores dos pilares (posições 2.00 m, 2.25 m e 2.50 m), região mais afetada pelas chamas devido à densidade mais baixa dos gases quentes. Assim, em cada coluna, na superfície voltada para as chamas provenientes do compartimento, foi inserido os dispositivos Temperatura da Superfície Adiabática (*Adiabatic Surface Temperature – AST*) e Termopares. Já no centro da fonte de incêndio, foi instalado apenas os Termopares.

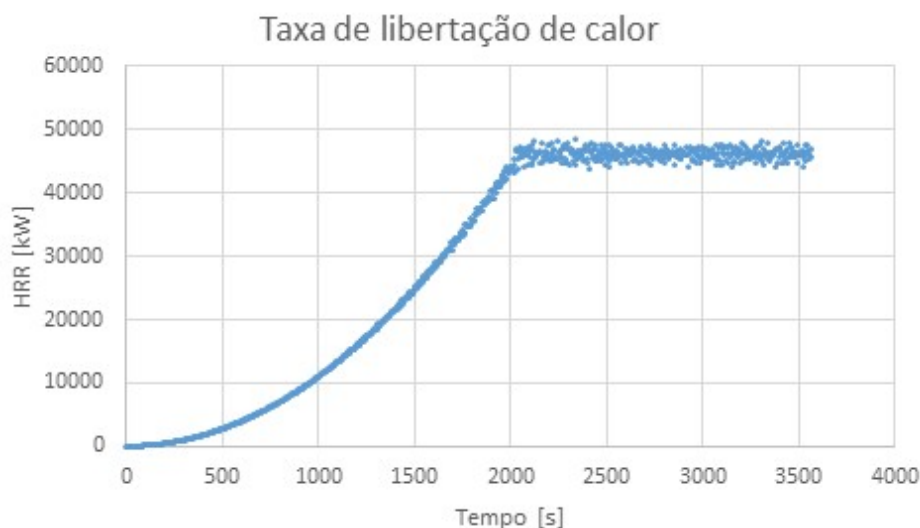


Gráfico 6.1 – Verificação da taxa de libertação de calor do incêndio, que se comportou como esperado para ambos os modelos.

### 6.2.1. Modelo 1 – Com abertura oposta: “condições de tiragem forçada”

Desenvolvendo, então, um incêndio de compartimento de *HRR* igual a 46.5 MW por 3600 s (60 minutos de incêndio) no Modelo 1 (Figura 6.1, 6.2 e 6.3), obteve-se os gráficos a seguir como resultado dos dispositivos:

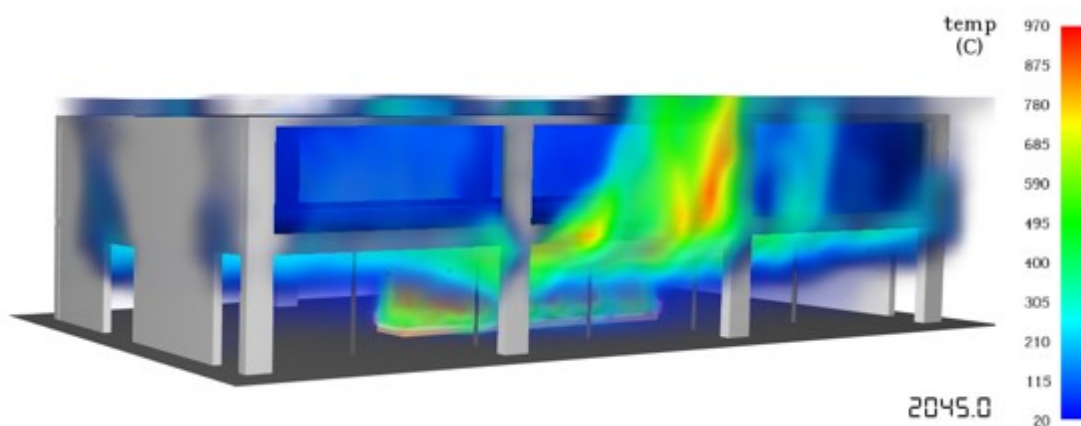


Figura 6.1 – situação do incêndio quando o *HRR* atinge o valor de 46.5 MW.

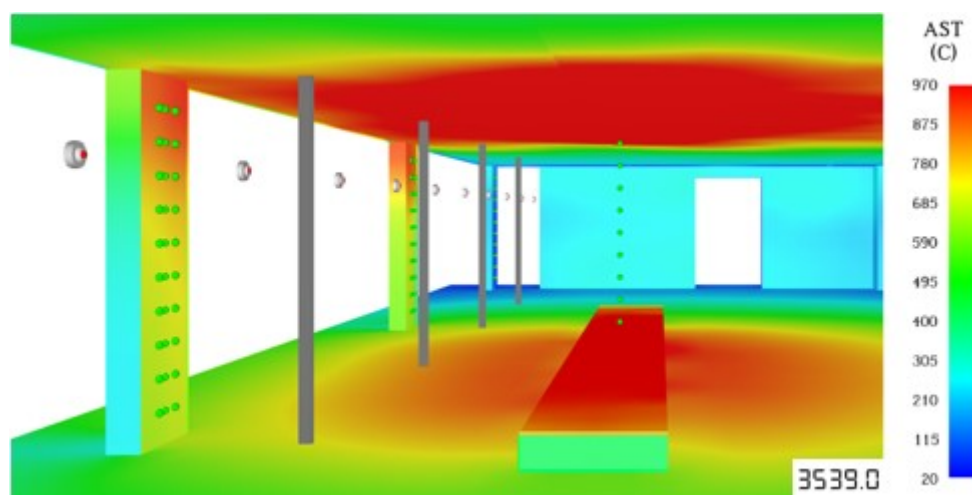


Figura 6.2 – Visão interna do edifício no instante de temperatura máxima registrada nos dispositivos das colunas (AST do pilar 3 na altura 2.25 m registrando 995 °C).

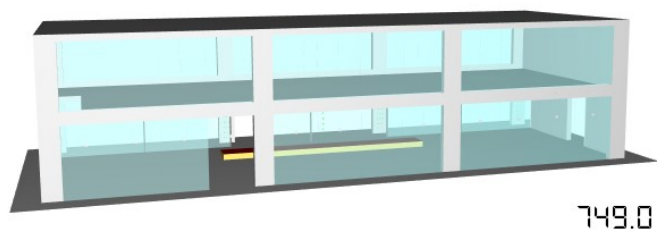


Figura 6.3 – Instante em que painéis da fachada oposta começam a quebrar, permitindo entrada de ar.

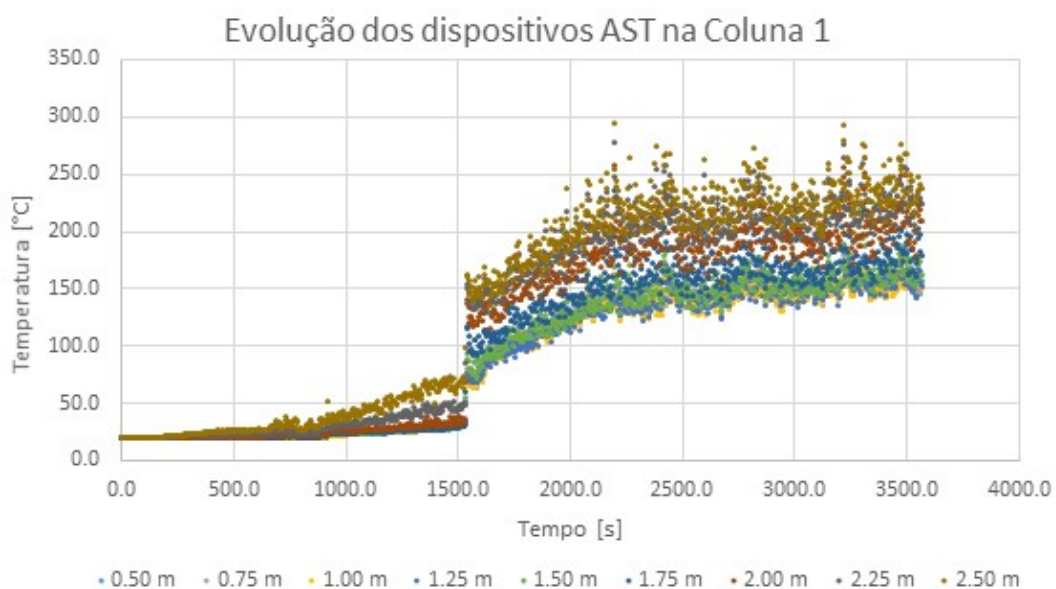


Gráfico 6.2 – Resultado dos dispositivos AST dispostos na coluna 1.

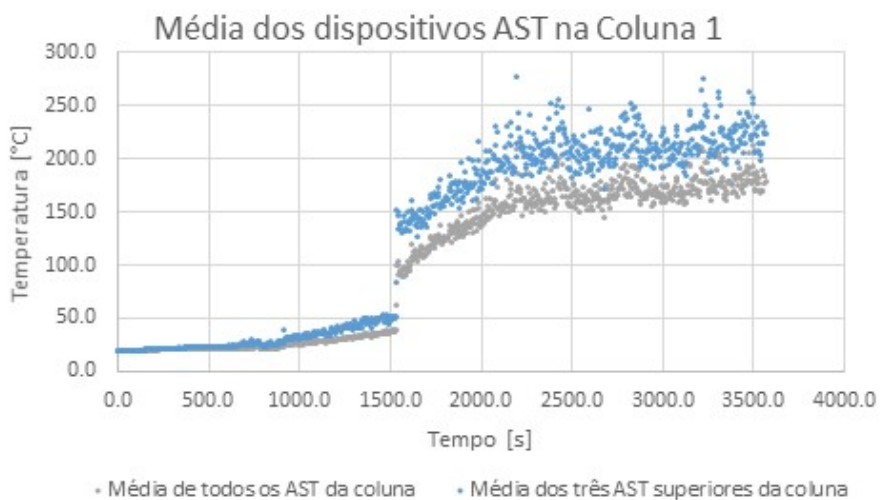


Gráfico 6.3 – Médias calculadas para os dispositivos AST da coluna 1.



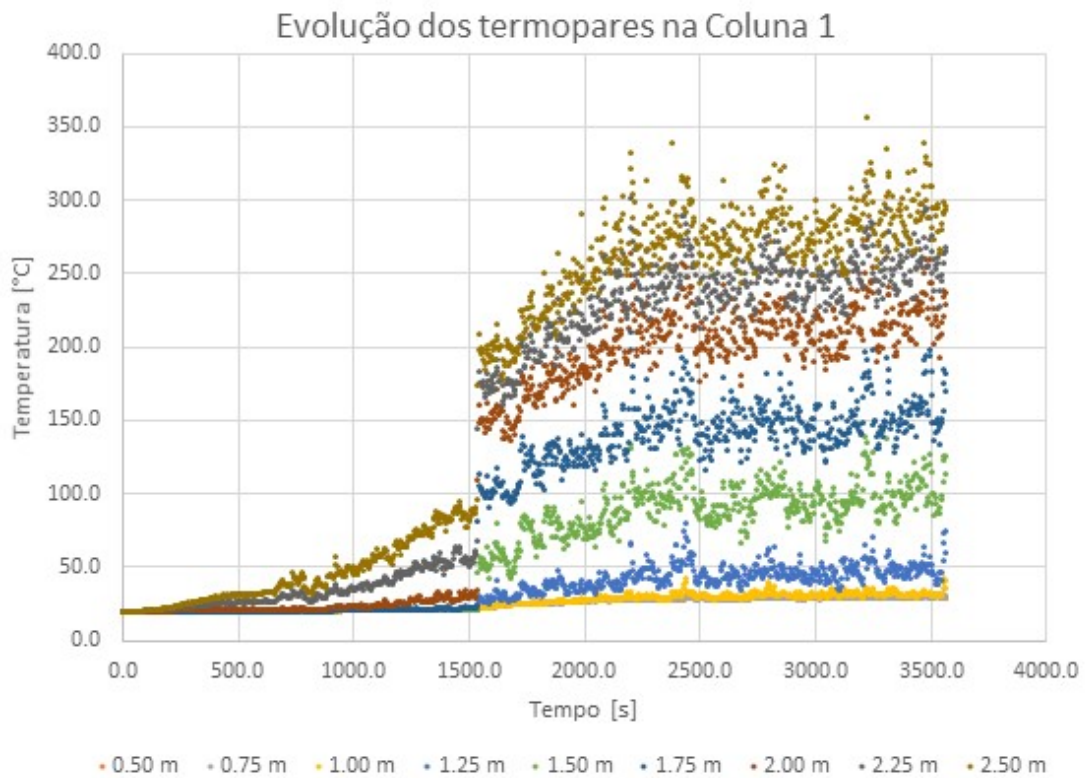


Gráfico 6.4 – Resultados dos termopares localizados no limite da coluna 1.

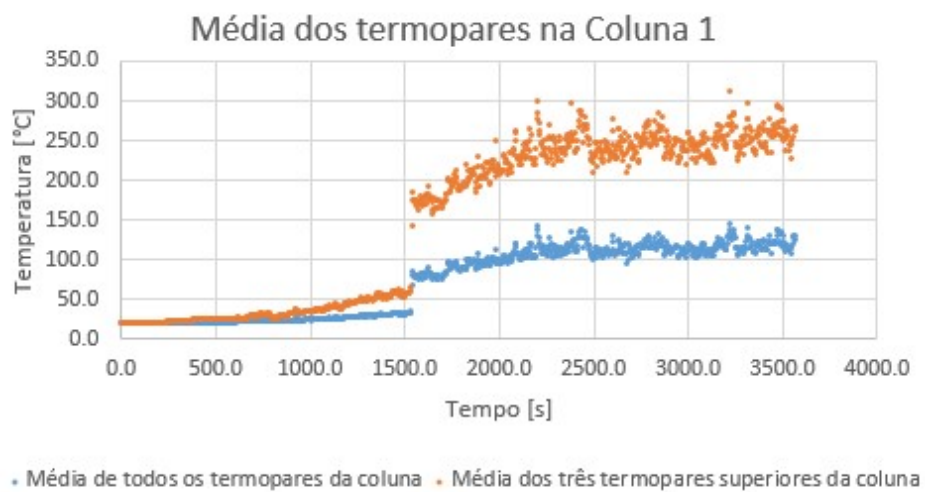


Gráfico 6.5 – Médias calculadas para os termopares da coluna 1.

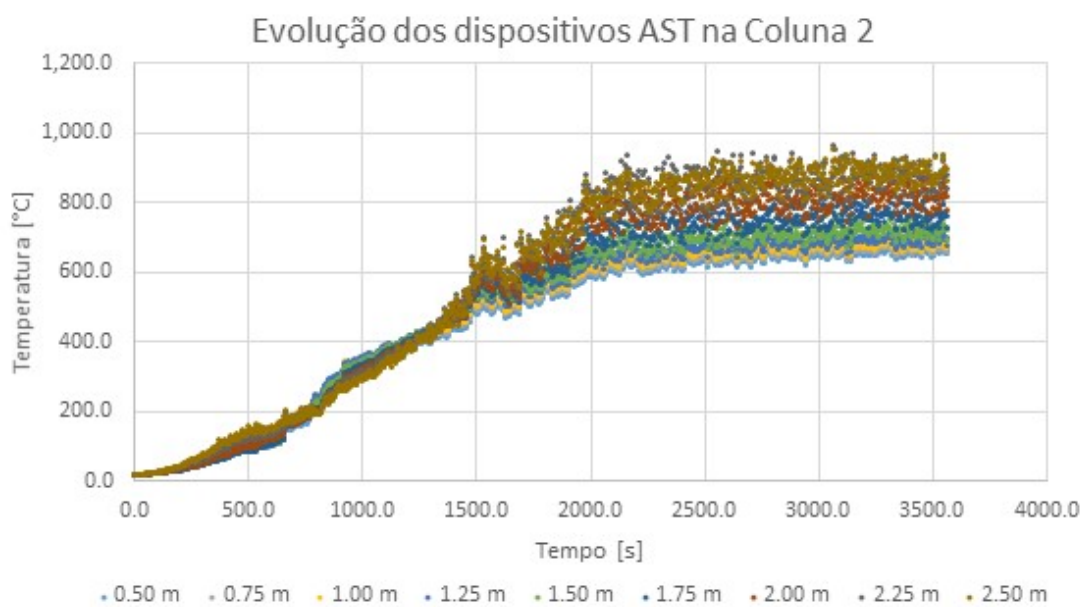


Gráfico 6.6 – Resultado dos dispositivos AST dispostos na coluna 2.



Gráfico 6.7 – Médias calculadas para os dispositivos AST da coluna 2.

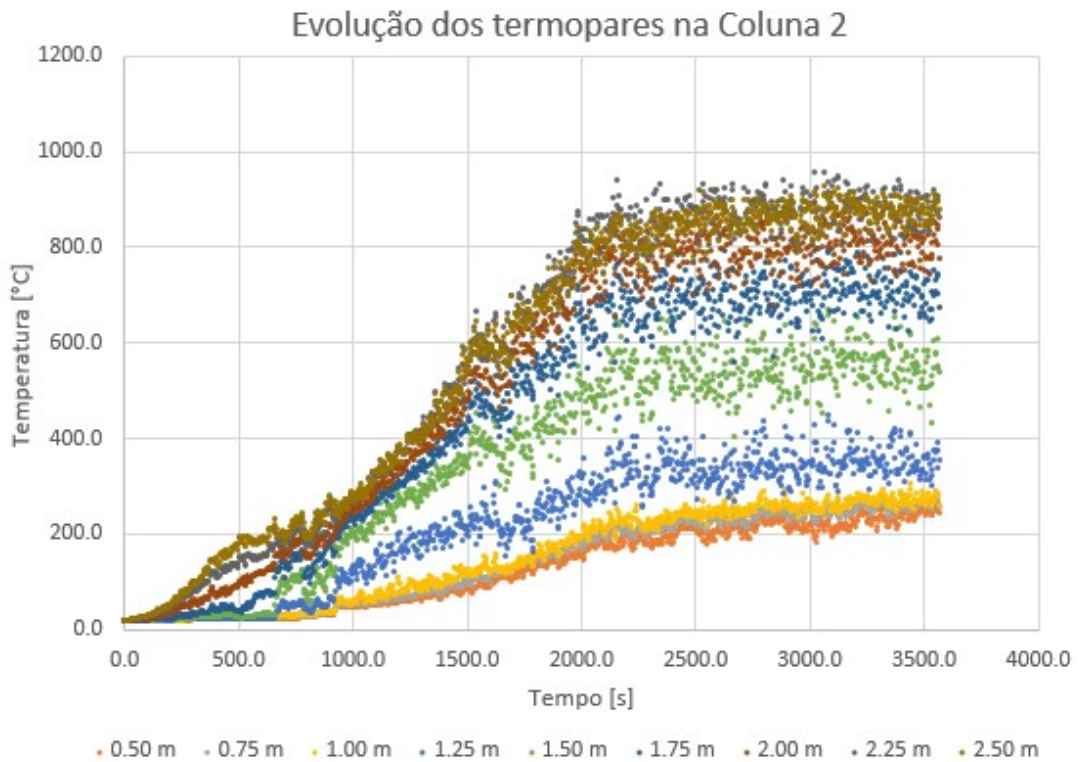


Gráfico 6.8 – Resultados dos termopares localizados no limite da coluna 2.

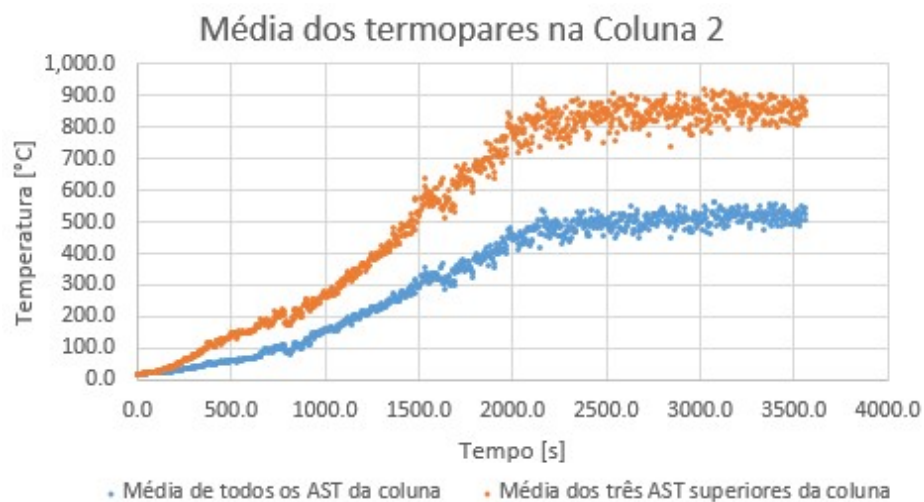


Gráfico 6.9 – Médias calculadas para os termopares da coluna 2.

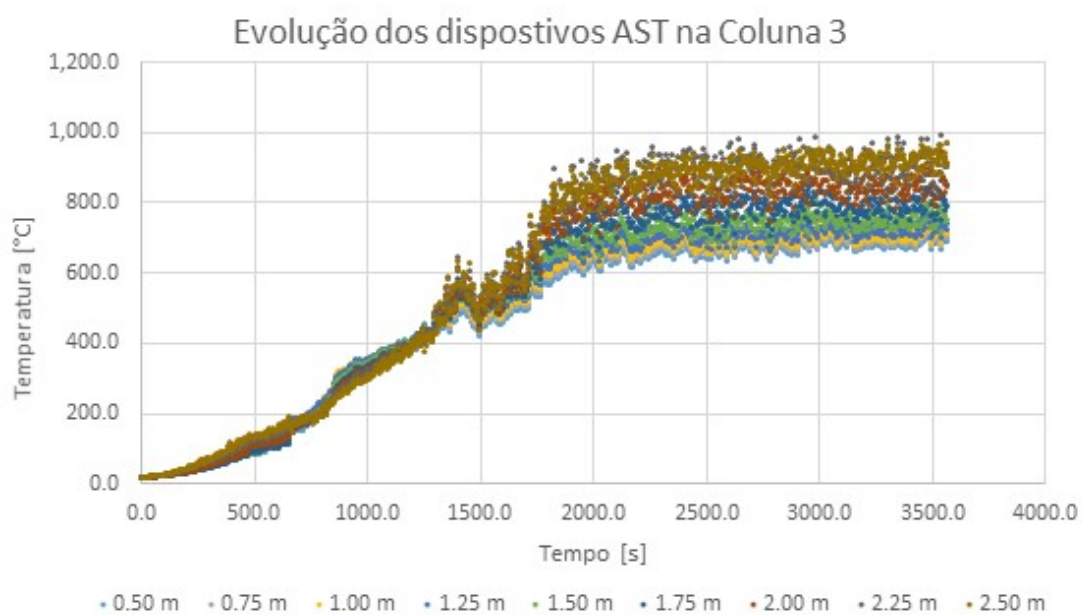


Gráfico 6.10 – Resultado dos dispositivos AST dispostos na coluna 3.

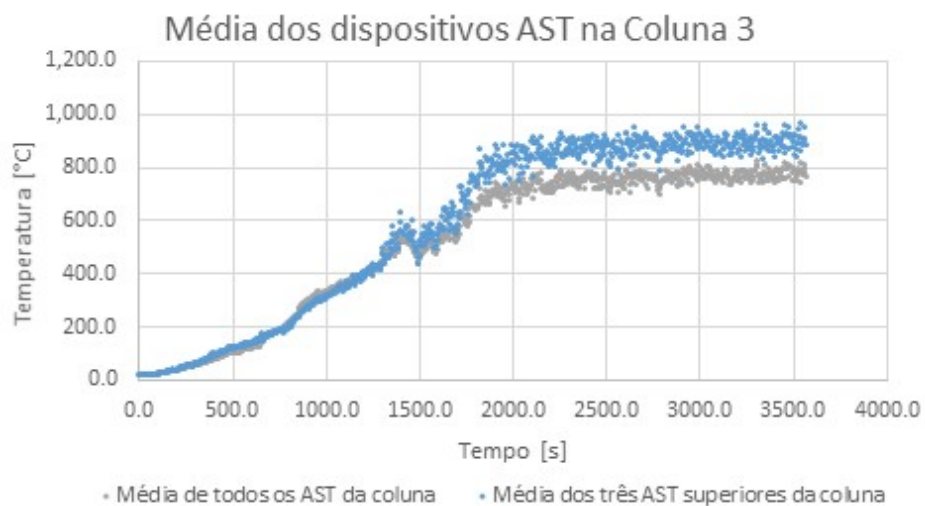


Gráfico 6.11 – Médias calculadas para os dispositivos AST da coluna 3.

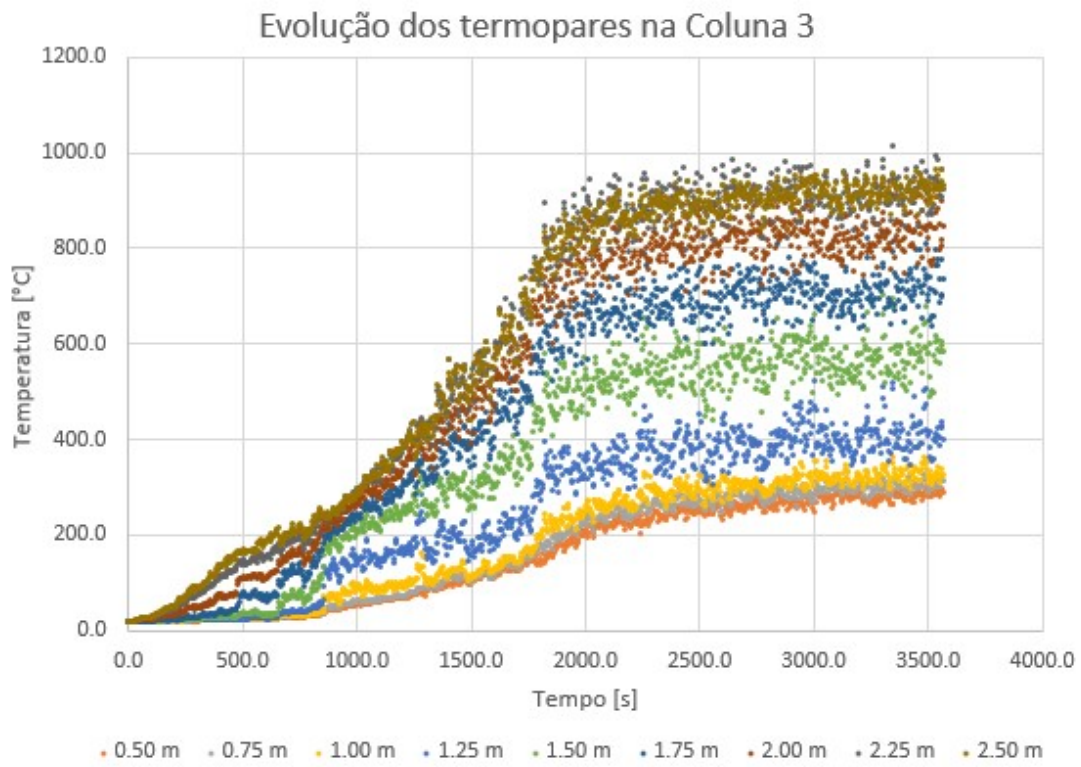


Gráfico 6.12 – Resultados dos termopares localizados no limite da coluna 3.

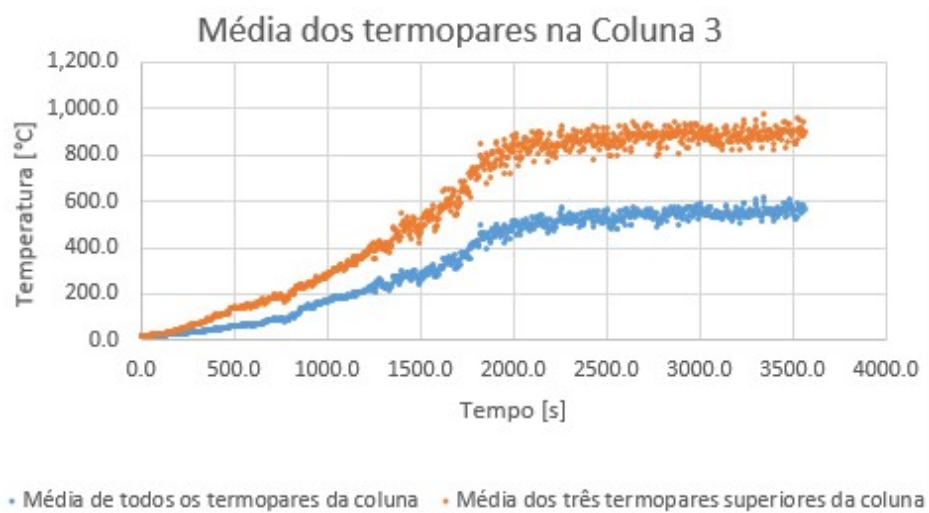


Gráfico 6.13 – Médias calculadas para os termopares da coluna 3.

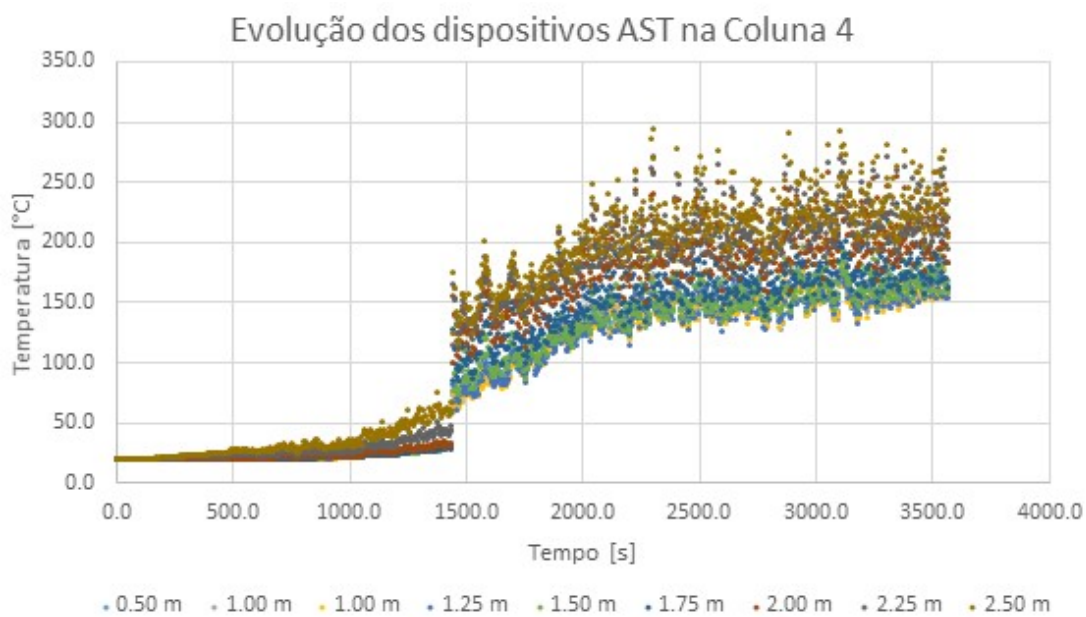


Gráfico 6.14 – Resultado dos dispositivos AST dispostos na coluna 4.



Gráfico 6.15 – Médias calculadas para os dispositivos AST da coluna 4.

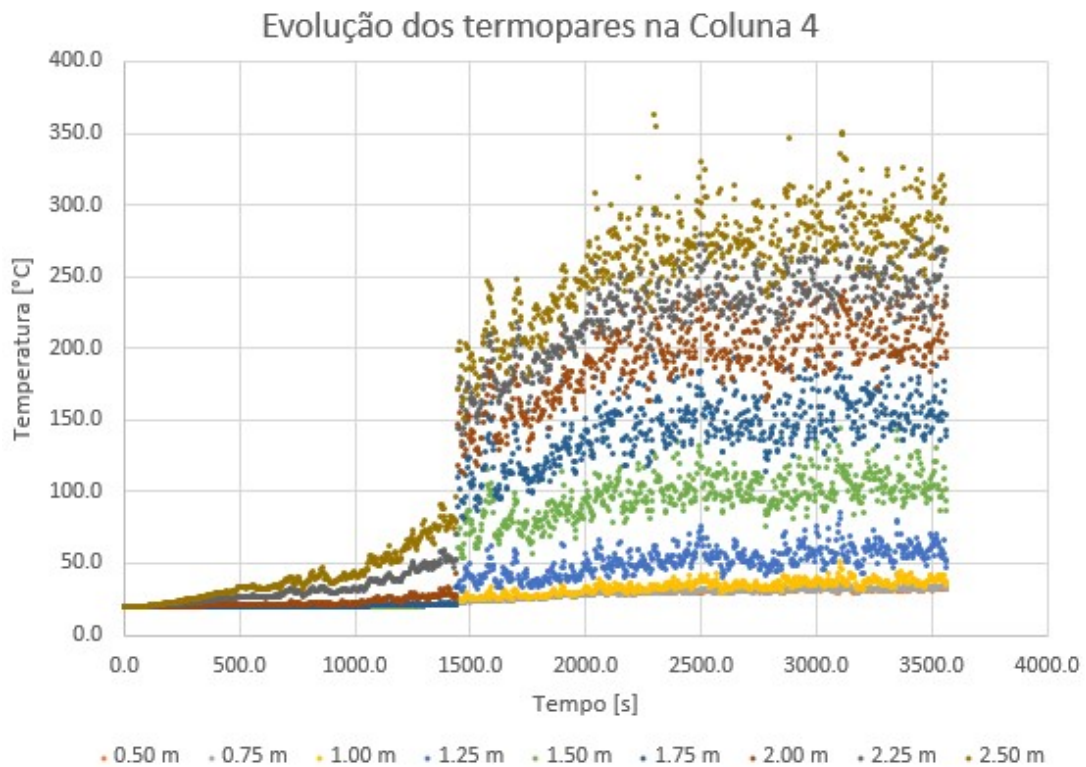


Gráfico 6.16 – Resultados dos termopares localizados no limite da coluna 4.

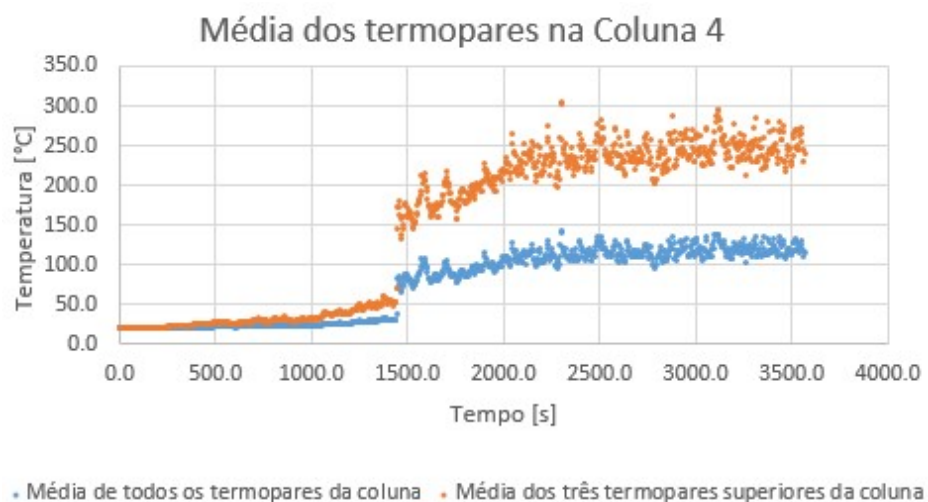


Gráfico 6.17 – Médias calculadas para os termopares da coluna 4.

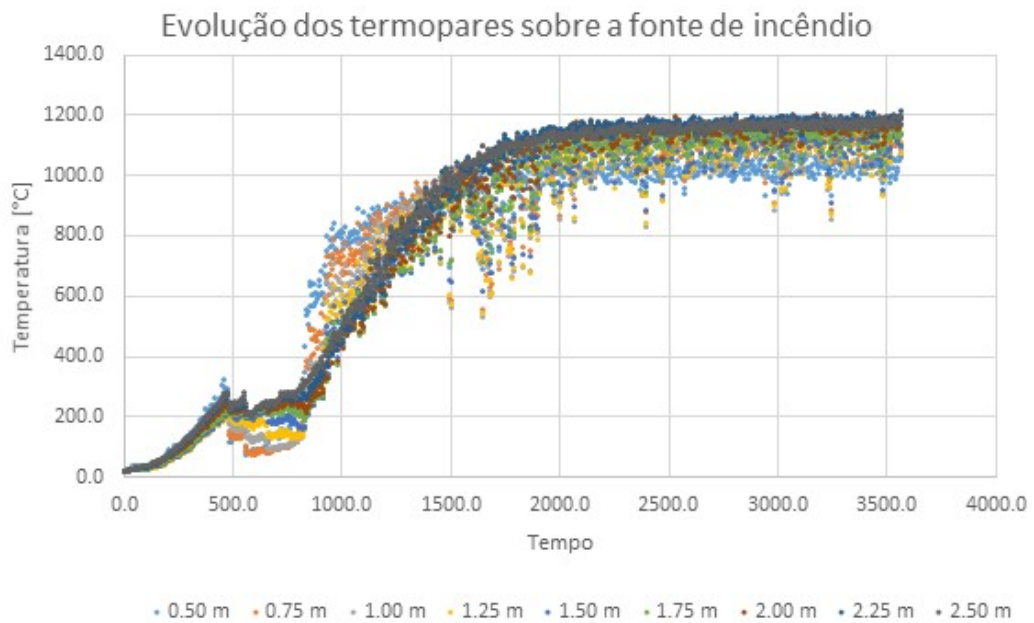


Gráfico 6.18 – Resultados dos termopares centrados com a fonte de incêndio.



Gráfico 6.19 – Média calculada para os termopares centrados com a fonte de incêndio.

A partir dos gráficos, faz-se as seguintes observações: i) os valores obtidos através dos dispositivos AST possuem uma menor variação quando comparados aos obtidos pelos termopares, que pode ser entendido devido ao fato de os AST mensurarem as condições dos materiais e não dos gases, logo o efeito da condução térmica é considerado, o que leva a uma temperatura mais uniforme no sólido. Além disso, os gases se deslocam no ambiente de acordo com suas densidades, onde o gás quente sobe por ser menos denso e o gás frio desce, o que explica uma temperatura mais baixa junto ao chão quando mensurado o gás e não o sólido com os termopares; ii) os pilares que alcançaram maiores temperaturas foram os centrais,



devido a posição também centralizada da fonte de incêndio; iii) um salto ocorre nos gráficos das colunas 1 e 4 por volta dos 1500 s, o que se deve à quebra dos vidros próximos a estes, permitindo que a chama, já projetada para o exterior, tenha a sua largura aumentada. Nas outras colunas, 2 e 3, este salto já não ocorre, pois as chamas, e logo as temperaturas também, evoluem de forma mais gradativa. Porém, nessas também se percebe uma ligeira redução dos valores por volta dos 1500 s, o que confirma que houve uma dispersão da chama nesta altura do incêndio e iv) uma diminuição acontece nos gráficos referentes a fonte de incêndio um pouco antes dos 500 s, exatamente quando ocorre a primeira quebra dos painéis da fachada principal de vidro (Figura 6.4).

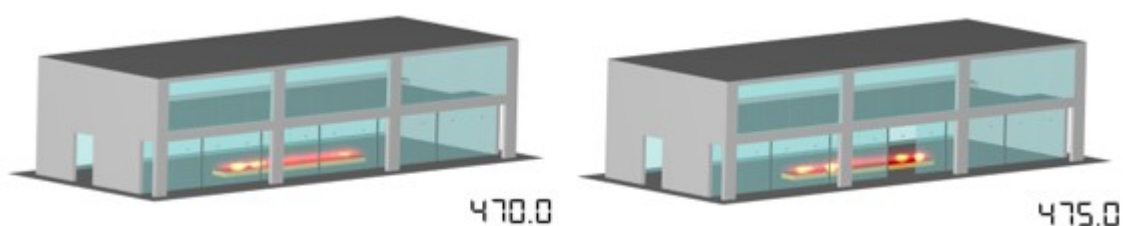


Figura 6.4 – Instante em que ocorre a quebra do primeiro painel da fachada de vidro principal.

### 6.2.2. Modelo 2 – Sem abertura oposta: “sem condições de tiragem forçada”

A partir do mesmo incêndio de compartimento do modelo anterior, porém alterando a fachada oposta à fachada principal para que não haja entrada de ar por esta fonte, desenvolveu-se o Modelo 2 (Figura 6.5) e obteve-se os gráficos a seguir (apresentação apenas da média dos dispositivos superiores):

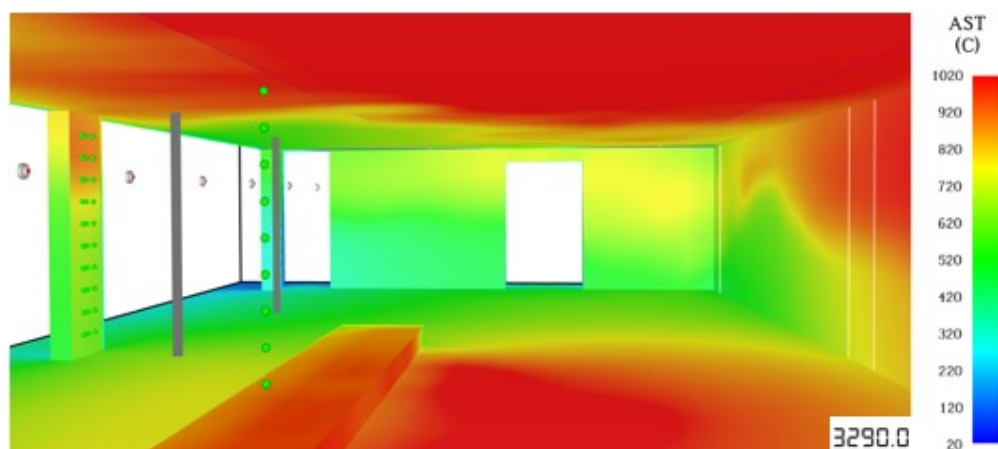


Figura 6.5 - Visão interna do edifício no instante de temperatura máxima registrada nos dispositivos das colunas (AST do pilar 2 na altura 2.25 m registrando 897 °C).

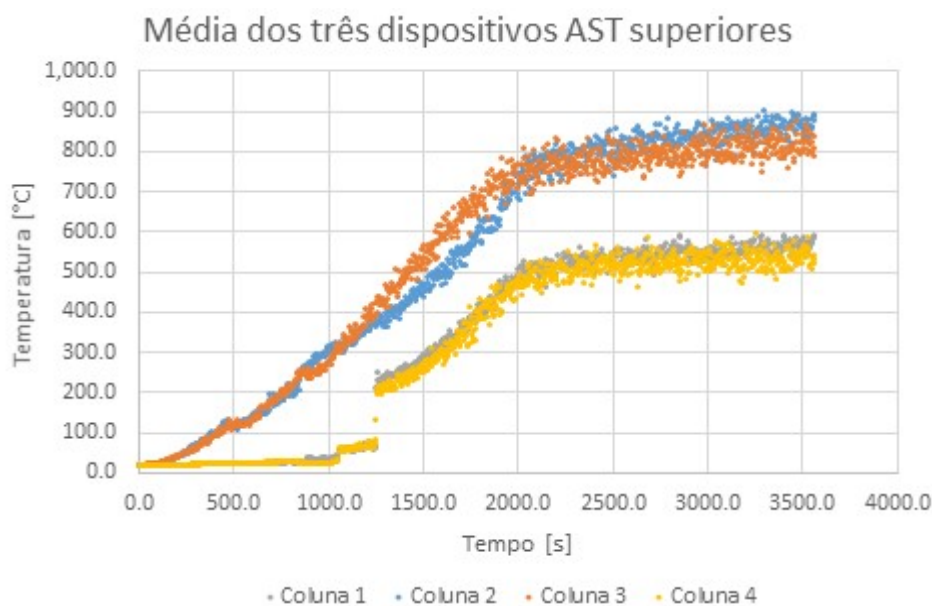


Gráfico 6.20 – Média dos três dispositivos AST superiores das colunas do Modelo 2.

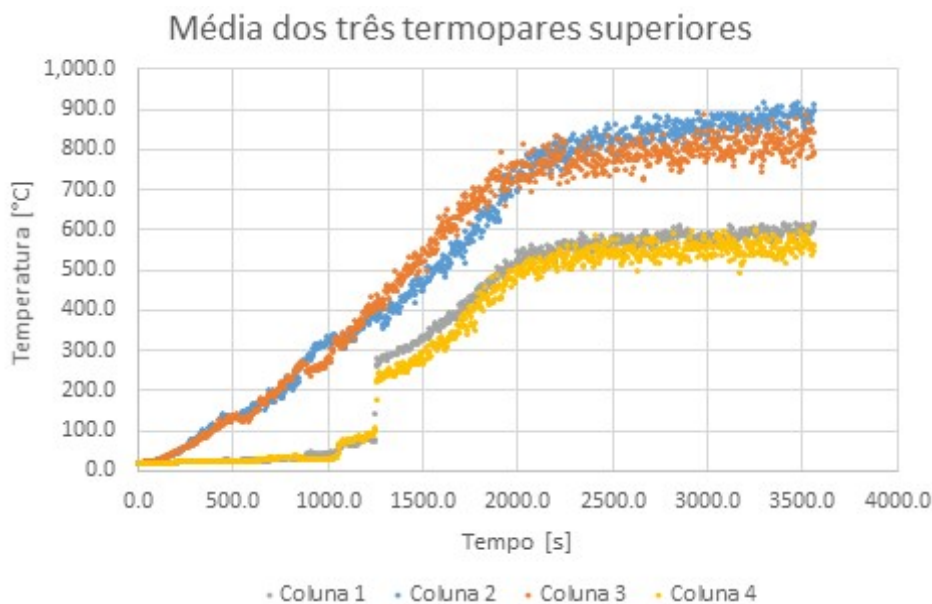


Gráfico 6.21 – Média dos três termopares superiores das colunas do Modelo 2.

A partir dos gráficos (Gráficos 6.20 e 6.21), observa-se que mais uma vez os pilares centrais, 2 e 3, foram os mais atingidos, justamente por estarem mais próximos a fonte do incêndio e que um salto nos pilares laterais, 1 e 4, por volta dos 1250 s, o que se deve à quebra dos painéis de vidro mais próximos a esses.

### 6.3. Comparações

Importa ressaltar que, uma vez que a temperatura da superfície adiabática se caracteriza pela temperatura de uma superfície que não pode ter fluxo de calor com o ambiente, ou seja, nem absorver e nem perder, funcionando como um isolador perfeito (Sandström et al, 2009 e Wickström, 2011), os valores de temperatura medidos pelos dispositivos AST parecem ser os ideais para a comparação com os obtidos de forma normativa. Isso se dá ao fato de que, na norma, a obtenção da temperatura da chama ao longo do seu eixo ( $T_z$ ), não leva em consideração a possível presença de outros materiais, logo, não contabiliza estas trocas de calor que ocorreriam num cenário real.

Comparando, assim, primeiro os modelos dentro do mesmo tipo de análise, normativa e numérica, respectivamente, observa-se que a situação “com condições de tiragem forçada” (Modelo 1), apresenta temperaturas máximas mais altas nos resultados para ambas as análises do que a situação “sem condições de tiragem forçada” (Modelo 2) (Quadro 6.5 e Gráfico 6.22). Porém nota-se também que, na análise numérica, os valores da temperatura nos pilares laterais (que não são os que atingem as temperaturas máximas observadas) são superiores para a situação “sem condições de tiragem forçada” (Modelo 2) quando comparado aos mesmos pilares do outro modelo. Esta situação ocorre, pois sem a presença da entrada de ar pela fachada oposta, as chamas do incêndio se dispersam para o ambiente com uma velocidade menor, alcançando, assim, de forma mais prejudicial, os pilares laterais, 1 e 4 (lembrando que, na análise normativa, não há distinção entre os pilares, pois esta só considera a distância do pilar até a fachada e não até a fonte de incêndio).

Quadro 6.5 – Comparação dos resultados para a análise normativa (Quadros 6.3 e 6.4). Importa ressaltar que a face interna dos pilares se encontram na posição 1.00 m da distância axial do eixo ( $L_x$ ).

Temperatura da chama segundo o eixo, $T_z$ (°C)		
$L_x$ (m)	Modelo 1	Modelo 2
0.10	751	638
0.20	748	630
0.30	746	622
0.40	743	614
0.50	740	607
0.60	737	599
0.70	734	591
0.80	731	584
0.90	728	576
1.00	725	568

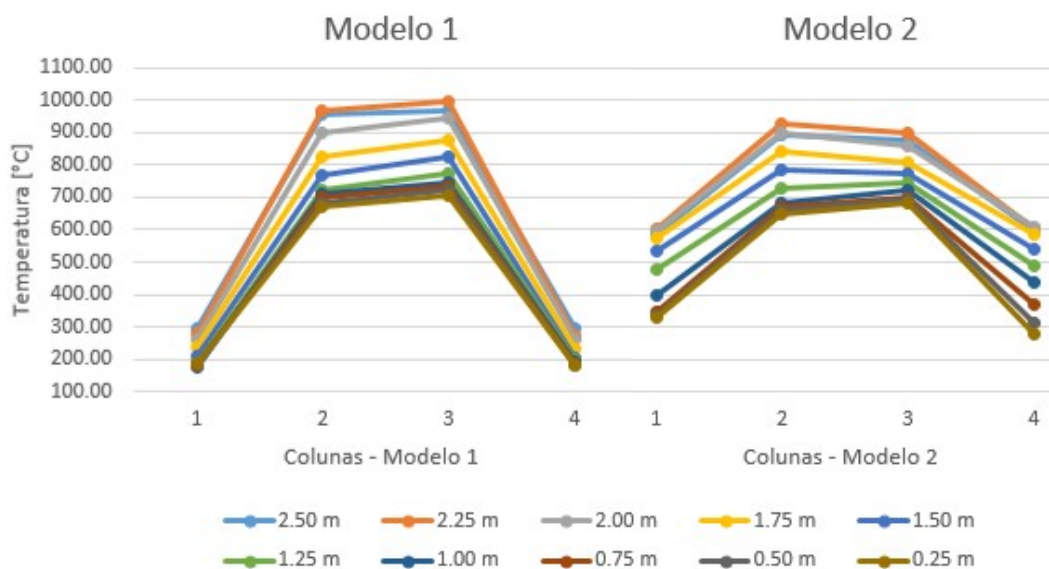


Gráfico 6.22 – Comparação dos resultados para a análise numérica nas diferentes colunas (valores máximos obtidos nos dispositivos AST), ressaltando que aqui a variação da localização da medição é em altura (posicionamento dos dispositivos utilizados).

De seguida, fazendo comparações entre as análises, nomeadamente comparando a temperatura obtida através do regulamento na posição de 1.00 m para a distância axial do eixo (Quadro 6.5) e as médias calculadas para os dispositivos AST na análise numérica (Quadro 6.6), percebe-se que os resultados obtidos através da análise com base no desempenho são consideravelmente mais gravosos do que os obtidos de forma normativa.

Quadro 6.6 – Médias dos dispositivos AST da análise numérica.

Colunas	Todos os dispositivos (°C)		Três dispositivos superiores (°C)	
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 1	Modelo 2
1	213	471	277	593
2	780	766	935	904
3	826	775	969	876
4	217	476	275	599

Considerando que os resultados advindos do regulamento não consideram uma zona específica do pilar e, logo, comparando então as temperaturas obtidas a 1.00 m da abertura com com a média obtida de todos os dispositivos AST dispostos verticalmente na análise numérica, obtem-se as temperaturas de 725 °C e 568 °C (Modelo 1 e Modelo 2, respectivamente, da análise normativa) contra 826 °C e 775 °C (Modelo 1 e Modelo 2, respectivamente, da análise numérica). Ou seja, percebe-se um aumento de 14% para a situação de “condições de tiragem forçada” e de 36% para a de “sem condições de tiragem forçada” em relação aos valores obtidos pelo regulamento.

## 7. CONCLUSÃO

O comportamento de uma estrutura de betão armado em situação de incêndio depende fortemente do comportamento dos pilares sob a ação do fogo, uma vez que eventuais situações de colapso de estruturas já foram verificadas que se devem à rotura dos pilares (Huang et al, 2006). Quando sujeitos a altas temperaturas, os materiais têm suas propriedades elásticas e de resistência alteradas, podendo comprometer, assim, o desempenho estrutural. O betão armado não é exceção. Aos 500 °C, o betão apresenta uma redução de 25 a 40% da sua resistência à compressão e, aos 600 °C, o aço das armaduras apresenta aproximadamente metade da resistência à tração, quando comparados aos valores à temperatura ambiente (Martins, 2008). Outro efeito que pode ocorrer com o betão armado comprometendo sua funcionalidade, é o *spalling*, que consiste no destacamento de pedaços do betão devido ao aumento da pressão de vapor na sua composição e que leva à perda de material e à exposição de camadas mais interiores, facilitando a transmissão de calor no interior do elemento e para as armaduras (Kodur et al, 2004). Além disso, devido aos diferentes coeficientes de dilatação térmica entre o betão e o aço, o aumento da temperatura também pode originar fissurações e redução na aderência entre o betão e as armaduras (Fletcher, 2007).

Percebendo, assim, a importância dos pilares nas estruturas e de suas corretas análises face às ações do fogo para o dimensionamento, pode-se concluir com o presente estudo que a diferença dos valores obtidos entre as análises, normativa e numérica, não apresentam um cenário favorável à Engenharia Contra Incêndio. Os resultados obtidos através da análise com base no desempenho foram consideravelmente mais gravosos, o que pode indicar limitações nos regulamentos e uma possível necessidade de revisão dos métodos dos mesmos. Percebe-se que o método para cálculo da temperatura das chamas ejetadas pelas aberturas de compartimentos no Anexo B do Eurocódigo 1 – Parte 1-2 (EN 1991-1-2) são muito simplistas, abrangendo uma vasta quantidade de cenários numa mesma marcha de cálculo. A consideração mais aprofundada de fatores como a geometria do edifício e das aberturas, além dos próprios parâmetros do incêndio, pode ser importante para um dimensionamento mais correto e otimizado das estruturas. Esta necessidade associada ao desenvolvimento computacional na engenharia visto nos últimos anos, leva a crer que abordagens com base no desempenho do incêndio devem ser cada vez mais consideradas, desde que com uma correta visão criteriosa e crítica por parte do utilizador.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM. (2018). "ASTM E1355-12 - Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models". ASTM International, West Conshohocken.

Benkorichi, S. Último acesso em: 22 de setembro de 2020. Salah Benkorichi Personal Blog: <https://www.sbenkorichi.com/>.

CEN. (2002). "Eurocódigo 1: Acções em Estruturas - Parte 1-2: Acções gerais - Acções em Estruturas Expostas ao Fogo". EN 1991-1-2. Comité Européen de Normalisation, CEN, Bruxelas.

Cox, G., Kumar, S. (2016). "Modeling Enclosure Fires Using CFD". SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3ª edição, Secção 3, pp. 194-218.

FDS-SMV. (n.d.). Último acesso em: 18 de outubro de 2020. NIST: <https://pages.nist.gov/fds-smv/>.

Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide. (2006). Último acesso em: 07 de outubro de 2020. NIST Special Publication: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication1018.pdf>.

Fletcher, I., Welch, S., Torero, J., Carvel, R., Usmani, A. (2007). "The Behaviour of Concrete Structures in Fire". Thermal Science, Vol. 11, pp. 37-52.

"Himoto, K., Tsuchihashi, T., Tanaka, Y., Tanaka, T. (2009). "Modeling Thermal Behaviors of Window Flame Ejected from a Fire Compartment". Fire Safety Journal, Vol. 44, pp. 230-240."

Huang, H., Ooka, R., Liu, N., Zhang, L., Deng, Z., Kato, S. (2009). "Experimental Study of Fire Growth in a Reduced-Scale Compartment Under Different Approaching External Wind Conditions". Fire Safety Journal, Vol. 44, pp. 311-321.

Huang, Z., Burgess, I., Plank, R. (2006). "Behaviour of Reinforced Concrete Structures in Fire". Proceedings of the 4th International Workshop "Structures Fire", Aveiro, pp. 561-572.

- Karlsson, B.; Quintiere, J. (1999). "Enclosure Fire Dynamics". CRC Press, Flórida.
- Kodur, V., Wang, T., Cheng, F. (2004). "Predicting the Fire Resistance Behaviour of High Strength Concrete Columns". *Cement & Concrete Composites*, vol. 26, pp. 141-153.
- Lee, Y., Delichatsios, M., Ohmiya, Y. (2012). "The Physics of the Outflow from the Opening of an Enclosure Fire and Re-examination of Yokoi's Correlation". *Fire Safety Journal*, Vol. 49, pp. 82-88.
- Lönnermark, A., Björklund, A. (2008). "Smoke Spread and Gas Temperatures During Fires in Retail Premises-Experiments and CFD Simulations". Technical Research Institute of Sweden.
- Martins, A. (2008). "Resistência ao Fogo de Pilares de Betão Armado com Dilatação Térmica Restringida". Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Mawhinney, J., Back, G. (2016). "Water Mist Fire Suppression Systems". *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3ª edição, Secção 4, pp. 311-337.
- McCaffrey B. (1979) "Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results". National Bureau of Standards: NBSIR 79-1910. Washington, DC.
- Modeling Fire in Pyrosim. (2019). Último acesso em: 21 de setembro de 2020. Thunderhead Engineering Consultants: <https://support.thunderheadeng.com/tutorials/pyrosim/modeling-fire/>.
- Moore, D. (2018). "Grenfell Tower and Steel Buildings in Fire". BCSA Regional Meetings, Londres.
- Nicoud, F. (2007). "Unsteady Flows Modeling and Computation". University Montpellier II, France.
- Ohmiya, Y., Tanaka, T., Wakamatsu, T. (1998). "A Room Fire Model for Predicting Fire Spread by External". *Fire Science & Technology*, Vol. 18, pp. 11-21.
- Overholt, K. (2006). Último acesso em: 31 de agosto de 2020. Kristopher Overholt - Fire Dynamics Simulator Tutotirals: <https://www.youtube.com/c/KristopherOverholt/featured>.
-

Pelo, C. (2015). "Double-Skin Glass Façades and Compliance with the Fire Safety Rules in Building Code 21 (BBR 21)". Master's Thesis of Science in Engineering Technology - Fire Engineering. Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering. Lulea University of Technology, Lulea.

Pina, C., Pontífice, P. (2008). "Situação dos Eurocódigos Estruturais a Nível Nacional". Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC. Seminário Aplicação da Engenharia de Segurança Contra Incêndios no Projecto de Edifícios", DIFISEK.

Pyrosim Fundamentals. (2019). Acessado em 03 de outubro de 2020. Thunderhead Engineering Consultants: <https://support.thunderheadeng.com/tutorials/pyrosim/fundamentals/>.

Pyrosim User Manual. (2019). Acessado em 03 de outubro de 2020. Thunderhead Engineering Consultants: <https://support.thunderheadeng.com/docs/pyrosim/2020-4/user-manual/>.

Rein, G., Bar-Ilan, A., Fernandez-Pello, C., Alvares, N. (2004). "A Comparison of Three Fire Models in the Simulation of Accidental Fires". Department of Mechanical Engineering. University of California, Berkeley.

Ren, F., Hu, L., Sun, X., Hu, K. (2018). "An Experimental Study on Vertical Temperature Profile of Facade Fire Plume Ejected From Compartment with an Opening Subjected to External Wind Normal to Façade". International Journal of Thermal Sciences, Vol. 130, pp. 94-99.

Rodriguez, S. (2019). "Applied Computational Fluid Dynamics and Turbulence Modeling". Springer Nature Switzerland AG, Cham.

Sandström, J., Wickström, U., Veljkovic, M. (2009). "Adiabatic Surface Temperature: A Sufficient Input Data for a Thermal Model". Application of Structural Fire Engineering, Prague.

Shakerchi, R. (2017). "Numerical Simulation of External Flames in Ventilation-Controlled Fires". Master Thesis. Department of the Built Environment. Eindhoven University of Technology, Eindhoven.

Wickström, U. (2011). "The Adiabatic Surface Temperature and the Plate Thermometer". Fire Safety Science, Vol. 10, pp. 1001-1011.

---



Yokoi, S. (1960a). "Trajectory of Hot Gas Ejected from a Window of a Burning Concrete Building". Japanese Ministry of Construction, Building Research Institute Report, Vol. 34, pp. 78-89.

Yokoi, S. (1960b). "Temperature Distribution of Hot Gas Spurting out of Burning Concrete Building". Japanese Ministry of Construction, Building Research Institute Report, Vol. 34, pp. 89-103.

## **DEMAIS REFERÊNCIAS**

CAU/BR. (2018). Palácio Gustavo Capanema [Image]. Acessado em 26 de maio de 2020. <https://www.caubr.gov.br/palacio-gustavo-capanema-sera-um-dos-palcos-do-27o-congresso-mundial-de-arquitetos/>.

Couri, L. (2015). Receita Federal do Brasil - MG [Image]. Acessado em 26 de maio de 2020. <https://www.msn.com/pt-br/noticias/brasil/receita-bh/ar-BB19oxLU?li=BBwanrb#image=>.

## ANEXOS

### ANEXO A: CÓDIGOS FDS DOS CASOS DE ESTUDO (MODELO 1)

MF\_1 FINAL - Malha 0.25 - A, burner 5.00%.fds  
Generated by PyroSim - Version 2020.4.0902  
27/10/2020 12:22:43

```
&HEAD CHID='MF_1_FINAL_-_Malha_0_25_-_A,burner_5_00%', TITLE='MF_1/'  
&TIME T_END=3600.0/  
&DUMP DT_RESTART=300.0, DT_SL3D=0.25/
```

```
&MESH ID='Mesh 0.25m', IJK=104,44,26, XB=-1.0,25.0,-1.0,10.0,0.0,6.5/
```

```
&REAC ID='CELLULOSE',  
  FUEL='REAC_FUEL',  
  FORMULA='C4H6O3',  
  AUTO_IGNITION_TEMPERATURE=0.0,  
  SOOT_YIELD=0.01,  
  RADIATIVE_FRACTION=0.35/
```

```
&PROP ID='Default',  
  QUANTITY='LINK TEMPERATURE',  
  ACTIVATION_TEMPERATURE=290.0,  
  RTI=1.0/
```

```
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 1.4', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE.,  
INPUT_ID='latch/'  
&CTRL ID='latch', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 1.4/'  
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 1.3', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-  
2/'  
&CTRL ID='latch-2', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 1.3/'  
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 1.2', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-  
3/'  
&CTRL ID='latch-3', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 1.2/'  
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 1.1', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-  
4/'  
&CTRL ID='latch-4', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 1.1/'  
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 2.1', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-  
5/'  
&CTRL ID='latch-5', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 2.1/'  
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 2.2', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-  
6/'  
&CTRL ID='latch-6', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 2.2/'  
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 2.3', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-  
7/'  
&CTRL ID='latch-7', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 2.3/'  
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 2.4', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-  
8/'  
&CTRL ID='latch-8', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 2.4/'  
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 3.1', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-  
9/'
```

---

```
&CTRL ID='latch-9', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 3.1/'
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 3.2', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-10/'
&CTRL ID='latch-10', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 3.2/'
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 3.3', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-11/'
&CTRL ID='latch-11', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 3.3/'
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 3.4', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-12/'
&CTRL ID='latch-12', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 3.4/'
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 4', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-13/'
&CTRL ID='latch-13', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 4/'
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 5', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-14/'
&CTRL ID='latch-14', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 5/'
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 6', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-15/'
&CTRL ID='latch-15', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 6/'
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 7', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-16/'
&CTRL ID='latch-16', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 7/'
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 8', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-17/'
&CTRL ID='latch-17', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 8/'
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 9', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-18/'
&CTRL ID='latch-18', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 9/'
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 10', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-19/'
&CTRL ID='latch-19', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 10/'
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 11', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-20/'
&CTRL ID='latch-20', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 11/'
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 12', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-21/'
&CTRL ID='latch-21', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 12/'
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 13', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-22/'
&CTRL ID='latch-22', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 13/'
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 14', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-23/'
&CTRL ID='latch-23', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 14/'
&CTRL ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 15', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.FALSE., INITIAL_STATE=.TRUE., INPUT_ID='latch-24/'
&CTRL ID='latch-24', FUNCTION_TYPE='ALL', LATCH=.TRUE., INPUT_ID='Glass Temperature - Obstruction 15/'
&DEVC ID='Glass Temperature - Obstruction 1.1', PROP_ID='Default', XYZ=22.775,7.74,2.0, ORIENTATION=0.0,-1.0,0.0/
&DEVC ID='Glass Temperature - Obstruction 1.2', PROP_ID='Default', XYZ=20.825,7.74,2.0, ORIENTATION=0.0,-1.0,0.0/
&DEVC ID='Glass Temperature - Obstruction 1.3', PROP_ID='Default', XYZ=18.825,7.74,2.0, ORIENTATION=0.0,-1.0,0.0/
&DEVC ID='Glass Temperature - Obstruction 1.4', PROP_ID='Default', XYZ=16.875,7.74,2.0, ORIENTATION=0.0,-1.0,0.0/
&DEVC ID='Glass Temperature - Obstruction 2.1', PROP_ID='Default', XYZ=14.85,7.74,2.0, ORIENTATION=0.0,-1.0,0.0/
&DEVC ID='Glass Temperature - Obstruction 2.2', PROP_ID='Default', XYZ=12.9375,7.74,2.0, ORIENTATION=0.0,-1.0,0.0/
&DEVC ID='Glass Temperature - Obstruction 2.3', PROP_ID='Default', XYZ=11.0625,7.74,2.0, ORIENTATION=0.0,-1.0,0.0/
&DEVC ID='Glass Temperature - Obstruction 2.4', PROP_ID='Default', XYZ=9.15,7.74,2.0, ORIENTATION=0.0,-1.0,0.0/
&DEVC ID='Glass Temperature - Obstruction 3.1', PROP_ID='Default', XYZ=7.125,7.74,2.0, ORIENTATION=0.0,-1.0,0.0/
&DEVC ID='Glass Temperature - Obstruction 3.2', PROP_ID='Default', XYZ=5.175,7.74,2.0, ORIENTATION=0.0,-1.0,0.0/
&DEVC ID='Glass Temperature - Obstruction 3.3', PROP_ID='Default', XYZ=3.175,7.74,2.0, ORIENTATION=0.0,-1.0,0.0/
&DEVC ID='Glass Temperature - Obstruction 3.4', PROP_ID='Default', XYZ=1.225,7.74,2.0, ORIENTATION=0.0,-1.0,0.0/
&DEVC ID='Glass Temperature - Obstruction 4', PROP_ID='Default', XYZ=22.375,0.01,2.0, ORIENTATION=0.0,1.0,0.0/
&DEVC ID='Glass Temperature - Obstruction 5', PROP_ID='Default', XYZ=20.625,0.01,2.0, ORIENTATION=0.0,1.0,0.0/
&DEVC ID='Glass Temperature - Obstruction 6', PROP_ID='Default', XYZ=18.875,0.01,2.0, ORIENTATION=0.0,1.0,0.0/
&DEVC ID='Glass Temperature - Obstruction 7', PROP_ID='Default', XYZ=17.125,0.01,2.0, ORIENTATION=0.0,1.0,0.0/
&DEVC ID='Glass Temperature - Obstruction 8', PROP_ID='Default', XYZ=14.625,0.01,2.0, ORIENTATION=0.0,1.0,0.0/
```

---





```

&DEVC ID='Column 3 Adiabatic Temperature at 1.25m', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE', XYZ=8.1,8.75,1.25, IOR=-2/
&DEVC ID='Column 3 Adiabatic Temperature at 1.00m', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE', XYZ=8.1,8.75,1.0, IOR=-2/
&DEVC ID='Column 3 Adiabatic Temperature at 0.75m', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE', XYZ=8.1,8.75,0.75, IOR=-2/
&DEVC ID='Column 3 Adiabatic Temperature at 0.50m', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE', XYZ=8.1,8.75,0.5, IOR=-2/
&DEVC ID='Column 3 Adiabatic Temperature at 0.25m', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE', XYZ=8.1,8.75,0.25, IOR=-2/
&DEVC ID='Column 4 Adiabatic Temperature at 2.50m', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE', XYZ=0.35,8.75,2.5, IOR=-2/
&DEVC ID='Column 4 Adiabatic Temperature at 2.25m', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE', XYZ=0.35,8.75,2.25, IOR=-2/
&DEVC ID='Column 4 Adiabatic Temperature at 2.00m', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE', XYZ=0.35,8.75,2.0, IOR=-2/
&DEVC ID='Column 4 Adiabatic Temperature at 1.75m', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE', XYZ=0.35,8.75,1.75, IOR=-2/
&DEVC ID='Column 4 Adiabatic Temperature at 1.50m', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE', XYZ=0.35,8.75,1.5, IOR=-2/
&DEVC ID='Column 4 Adiabatic Temperature at 1.25m', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE', XYZ=0.35,8.75,1.25, IOR=-2/
&DEVC ID='Column 4 Adiabatic Temperature at 1.00m', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE', XYZ=0.35,8.75,1.0, IOR=-2/
&DEVC ID='Column 4 Adiabatic Temperature at 0.75m', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE', XYZ=0.35,8.75,0.75, IOR=-2/
&DEVC ID='Column 4 Adiabatic Temperature at 0.50m', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE', XYZ=0.35,8.75,0.5, IOR=-2/
&DEVC ID='Column 4 Adiabatic Temperature at 0.25m', QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE', XYZ=0.35,8.75,0.25, IOR=-2/

&MATL ID='CONCRETE',
  FYI='NBSIR 88-3752 - ATF NIST Multi-Floor Validation',
  SPECIFIC_HEAT=1.04,
  CONDUCTIVITY=1.8,
  DENSITY=2280.0/
&MATL ID='STEEL',
  FYI='Drysdales, Intro to Fire Dynamics - ATF NIST Multi-Floor Validation',
  SPECIFIC_HEAT=0.46,
  CONDUCTIVITY=45.8,
  DENSITY=7850.0,
  EMISSIVITY=0.95/

&SURF ID='CONCRETE',
  COLOR='GRAY 80',
  BACKING='VOID',
  MATL_ID(1,1)='CONCRETE',
  MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
  THICKNESS(1)=0.25/
&SURF ID='STEEL',
  COLOR='GRAY 40',
  BACKING='VOID',
  MATL_ID(1,1)='STEEL',
  MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
  THICKNESS(1)=0.1/
&SURF ID='BURNER - 5 MW/m²',
  FYI='5.00% da área total (186m²); Q* de 1.91 (Excel "Cálculos MODELO FINAL")',
  RGB=168,0,0,
  HRRPUA=5000.0,
  RAMP_Q='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q/'
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=100.0, F=2.389E-3/
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=200.0, F=9.558E-3/
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=300.0, F=0.021505/
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=400.0, F=0.038231/
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=500.0, F=0.059736/
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=600.0, F=0.08602/
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=700.0, F=0.117082/
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=800.0, F=0.152924/
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=900.0, F=0.193544/
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=1000.0, F=0.238943/
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=1100.0, F=0.289121/
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=1200.0, F=0.344078/
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=1300.0, F=0.403814/
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=1400.0, F=0.468329/
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=1500.0, F=0.537622/
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=1600.0, F=0.611695/
&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m²_RAMP_Q', T=1700.0, F=0.690546/

```

&RAMP ID='BURNER - 5 MW/m<sup>2</sup>\_RAMP\_Q', T=1800.0, F=0.774176/  
 &RAMP ID='BURNER - 5 MW/m<sup>2</sup>\_RAMP\_Q', T=1900.0, F=0.862585/  
 &RAMP ID='BURNER - 5 MW/m<sup>2</sup>\_RAMP\_Q', T=2000.0, F=0.955773/  
 &RAMP ID='BURNER - 5 MW/m<sup>2</sup>\_RAMP\_Q', T=2010.0, F=0.965355/  
 &RAMP ID='BURNER - 5 MW/m<sup>2</sup>\_RAMP\_Q', T=2020.0, F=0.974984/  
 &RAMP ID='BURNER - 5 MW/m<sup>2</sup>\_RAMP\_Q', T=2030.0, F=0.984661/  
 &RAMP ID='BURNER - 5 MW/m<sup>2</sup>\_RAMP\_Q', T=2040.0, F=0.994386/  
 &RAMP ID='BURNER - 5 MW/m<sup>2</sup>\_RAMP\_Q', T=2045.0, F=0.999267/  
 &RAMP ID='BURNER - 5 MW/m<sup>2</sup>\_RAMP\_Q', T=2045.75, F=1.0/

&OBST ID='Column 4', XB=0.0,0.75,8.75,9.0,0.0,2.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Column 1', XB=23.25,24.0,8.75,9.0,0.0,2.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Column 3', XB=7.75,8.5,8.75,9.0,0.0,2.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Column 2', XB=15.5,16.25,8.75,9.0,0.0,2.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Column 9', XB=23.25,24.0,8.75,9.0,3.0,5.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Column 10', XB=15.5,16.25,8.75,9.0,3.0,5.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Column 11', XB=7.75,8.5,8.75,9.0,3.0,5.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Column 12', XB=0.0,0.75,8.75,9.0,3.0,5.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Column 5', XB=23.25,24.0,0.0,0.25,0.0,2.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Column 6', XB=15.5,16.25,0.0,0.25,0.0,2.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Column 7', XB=7.75,8.5,0.0,0.25,0.0,2.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Column 8', XB=0.0,0.75,0.0,0.25,0.0,2.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Column 13', XB=23.25,24.0,0.0,0.25,3.0,5.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Column 14', XB=15.5,16.25,0.0,0.25,3.0,5.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Column 15', XB=7.75,8.5,0.0,0.25,3.0,5.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Column 16', XB=0.0,0.75,0.0,0.25,3.0,5.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Ceiling', XB=0.0,24.0,0.0,9.0,5.75,6.0, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Back Wall - Piso 0', XB=0.0,0.25,0.25,7.75,0.0,2.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Front Wall - Piso 1', XB=23.75,24.0,0.25,8.75,3.0,5.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Back Wall - Piso 1', XB=0.0,0.25,0.25,8.75,3.0,5.75, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Beam 4', XB=16.25,23.25,0.0,0.25,3.0,3.25, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Beam 5', XB=8.5,15.5,0.0,0.25,3.0,3.25, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Beam 6', XB=0.75,7.75,0.0,0.25,3.0,3.25, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Beam 1', XB=16.25,23.25,8.75,9.0,3.0,3.25, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Beam 2', XB=8.5,15.5,8.75,9.0,3.0,3.25, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Beam 3', XB=0.75,7.75,8.75,9.0,3.0,3.25, SURF\_ID='CONCRETE'/  
 &OBST ID='Obstruction 1.4', XB=15.9,17.85,7.74,7.75,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 1.4'/  
 &OBST ID='Obstruction 1.3', XB=17.85,19.8,7.74,7.75,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 1.3'/  
 &OBST ID='Obstruction 1.2', XB=19.85,21.8,7.74,7.75,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 1.2'/  
 &OBST ID='Obstruction 1.1', XB=21.8,23.75,7.74,7.75,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 1.1'/  
 &OBST ID='Obstruction 2.1', XB=13.85,15.85,7.74,7.75,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 2.1'/  
 &OBST ID='Obstruction 2.2', XB=12.025,13.85,7.74,7.75,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 2.2'/  
 &OBST ID='Obstruction 2.3', XB=10.15,11.975,7.74,7.75,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 2.3'/  
 &OBST ID='Obstruction 2.4', XB=8.15,10.15,7.74,7.75,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 2.4'/  
 &OBST ID='Obstruction 3.1', XB=6.15,8.1,7.74,7.75,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 3.1'/  
 &OBST ID='Obstruction 3.2', XB=4.2,6.15,7.74,7.75,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 3.2'/  
 &OBST ID='Obstruction 3.3', XB=2.2,4.15,7.74,7.75,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 3.3'/  
 &OBST ID='Obstruction 3.4', XB=0.25,2.2,7.74,7.75,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 3.4'/  
 &OBST ID='Obstruction 4', XB=21.5,23.25,-2.13371E-16,1.0E-2,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 4'/

&OBST ID='Obstruction 5', XB=19.75,21.5,-2.13371E-16,1.0E-2,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 5/'

&OBST ID='Obstruction 6', XB=18.0,19.75,-2.13371E-16,1.0E-2,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 6/'

&OBST ID='Obstruction 7', XB=16.25,18.0,-2.13371E-16,1.0E-2,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 7/'

&OBST ID='Obstruction 8', XB=13.75,15.5,-2.13371E-16,1.0E-2,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 8/'

&OBST ID='Obstruction 9', XB=12.0,13.75,-2.13371E-16,1.0E-2,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 9/'

&OBST ID='Obstruction 10', XB=10.25,12.0,-2.13371E-16,1.0E-2,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 10/'

&OBST ID='Obstruction 11', XB=8.5,10.25,-2.13371E-16,1.0E-2,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 11/'

&OBST ID='Obstruction 12', XB=6.0,7.75,-2.13371E-16,1.0E-2,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 12/'

&OBST ID='Obstruction 13', XB=4.25,6.0,-2.13371E-16,1.0E-2,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 13/'

&OBST ID='Obstruction 14', XB=2.5,4.25,-2.13371E-16,1.0E-2,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 14/'

&OBST ID='Obstruction 15', XB=0.75,2.5,-2.13371E-16,1.0E-2,0.0,2.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT', CTRL\_ID='Glass Failure at 290°C - Obstruction 15/'

&OBST ID='Obstruction', XB=21.5,23.25,-2.13371E-16,1.0E-2,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=19.75,21.5,-2.13371E-16,1.0E-2,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=18.0,19.75,-2.13371E-16,1.0E-2,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=16.25,18.0,-2.13371E-16,1.0E-2,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=13.75,15.5,-2.13371E-16,1.0E-2,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=12.0,13.75,-2.13371E-16,1.0E-2,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=10.25,12.0,-2.13371E-16,1.0E-2,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=8.5,10.25,-2.13371E-16,1.0E-2,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=6.0,7.75,-2.13371E-16,1.0E-2,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=4.25,6.0,-2.13371E-16,1.0E-2,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=2.5,4.25,-2.13371E-16,1.0E-2,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=0.75,2.5,-2.13371E-16,1.0E-2,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=21.5,23.25,8.99,9.0,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=19.75,21.5,8.99,9.0,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=18.0,19.75,8.99,9.0,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=16.25,18.0,8.99,9.0,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=13.75,15.5,8.99,9.0,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=12.0,13.75,8.99,9.0,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=10.25,12.0,8.99,9.0,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=8.5,10.25,8.99,9.0,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=6.0,7.75,8.99,9.0,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=4.25,6.0,8.99,9.0,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=2.5,4.25,8.99,9.0,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Obstruction', XB=0.75,2.5,8.99,9.0,3.25,5.75, RGB=166,255,255, TRANSPARENCY=0.294118, SURF\_ID='INERT/'

&OBST ID='Steel Column 3', XB=11.975,12.025,7.65,7.75,0.0,2.75, SURF\_ID='STEEL/'

&OBST ID='Steel Column 5', XB=4.15,4.2,7.65,7.75,0.0,2.75, SURF\_ID='STEEL/'

&OBST ID='Steel Column 1', XB=19.8,19.85,7.65,7.75,0.0,2.75, SURF\_ID='STEEL/'

&OBST ID='Steel Column 4', XB=8.1,8.15,7.65,7.75,0.0,2.75, SURF\_ID='STEEL/'

&OBST ID='Steel Column 2', XB=15.85,15.9,7.65,7.75,0.0,2.75, SURF\_ID='STEEL/'

&OBST ID='Fire 5% - 1m x 9.30m', XB=7.35,16.65,5.0,6.0,0.0,0.25, SURF\_IDS='BURNER - 5 MW/m²','INERT','INERT'/ 5% da área total (186m²)

&OBST ID='Floor 1', XB=0.0,0.25,1.25,5.75,2.75,3.0, SURF\_ID='CONCRETE/'

&OBST ID='Floor 1', XB=0.0,24.0,0.0,1.25,2.75,3.0, SURF\_ID='CONCRETE/'

&OBST ID='Floor 1', XB=0.0,24.0,5.75,9.0,2.75,3.0, SURF\_ID='CONCRETE/'

&OBST ID='Floor 1', XB=1.5,24.0,1.25,5.75,2.75,3.0, SURF\_ID='CONCRETE/'

&OBST ID='Front Wall - Piso 0', XB=23.75,24.0,0.25,2.75,0.0,2.75, SURF\_ID='CONCRETE/'

&OBST ID='Front Wall - Piso 0', XB=23.75,24.0,4.25,7.75,0.0,2.75, SURF\_ID='CONCRETE/'

&OBST ID='Front Wall - Piso 0', XB=23.75,24.0,2.75,4.25,2.5,2.75, SURF\_ID='CONCRETE/'

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [XMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=25.0,25.0,-1.0,10.0,0.0,6.5/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [XMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=-1.0,-1.0,-1.0,10.0,0.0,6.5/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [YMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=-1.0,25.0,10.0,10.0,0.0,6.5/



---

```
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=-1.0,25.0,-1.0,-1.0,0.0,6.5/  
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=-1.0,25.0,-1.0,10.0,6.5,6.5/  
&VENT ID='Floor 0', SURF_ID='CONCRETE', XB=-1.0,25.0,-1.0,10.0,0.0,0.0/  
  
&BNDF QUANTITY='ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE'/  
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/  
  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=8.75/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=4.0/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=8.0/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=12.0/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=16.0/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=20.0/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=8.15/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=15.9/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=15.9/  
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBX=15.9/  
&SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='AIR', PBX=15.9/  
&SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='PRODUCTS', PBX=15.9/  
&SLCF QUANTITY='VOLUME FRACTION', SPEC_ID='REAC_FUEL', PBX=15.9/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', XB=-1.0,25.0,-1.0,10.0,0.0,6.5, FYI='Temperature'/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., XB=-1.0,25.0,-1.0,10.0,0.0,6.5, FYI='Velocity'/  
  
&TAIL /
```