

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DA SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO NATURAL E
RESISTÊNCIA ESTRUTURAL DE ELEMENTOS DE AÇO**

GABRIELA ALVES MOREIRA KLITZKE

ORIENTADOR: LUCIANO MENDES BEZERRA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

BRASÍLIA/DF: MAIO - 2021

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO DA SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO NATURAL E
RESISTÊNCIA ESTRUTURAL DE ELEMENTOS DE AÇO**

GABRIELA ALVES MOREIRA KLITZKE

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

**Prof. Luciano Mendes Bezerra, PhD (UnB)
(Orientador)**

**Prof. William Taylor Matias Silva, Dr. Ing.(UnB)
(Examinador interno)**

**Eng. Brenda Vieira Costa Fontes, M.Sc
(Examinadora externa)**

BRASÍLIA/DF, 25 DE MAIO DE 2021.

FICHA CATALOGRÁFICA

KLITZKE, GABRIELA ALVES MOREIRA

Estudo da Simulação de Incêndio Natural e Resistência Estrutural de Elementos de Aço. [Distrito Federal]2021.

xv, 98p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2021).

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|---------------|---------------------------|
| 1. Incêndio | 2. Estrutura de aço |
| 3. Simulação | 4. Fire Dynamic Simulator |
| I. ENC/FT/UnB | II. Título (Bacharel) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

KLITZKE, G.A.M. (2021). Estudo da Simulação de Incêndio Natural e Resistência Estrutural de Elementos de Aço. Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF, 98p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Gabriela Alves Moreira Klitzke

TÍTULO: Estudo da Simulação de Incêndio Natural e Resistência Estrutural de Elementos de Aço.

GRAU/ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2021.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora.

Gabriela Alves Moreira Klitzke
Rua Modesto de Melo, Número 852, Centro.
CEP: 73801-530– Formosa/GO – Brasil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e meu irmão pelo apoio, por acreditarem e confiarem em mim e no meu esforço. Pelos momentos de distração que passamos juntos. Sem vocês eu não seria nada.

À família Carvalhede de Oliveira, que esteve comigo durante grande parte dessa jornada, me apoiou e se tornou uma segunda família para mim. Obrigada por tudo!

Ao Luiz Felipe, por estar comigo desde o começo, por me incentivar durante todo o curso e me fazer acreditar em mim mesma. Saiba que essa conquista também é sua. Te amo!

Ao professor orientador Luciano Mendes Bezerra, por me incentivar, confiar em mim e trabalhar junto comigo durante esse final do curso de engenharia civil.

Aos amigos e Mosquerdos, Ana Flávia, Bruno, Carine, Carol, Duda, Gabriela, Laura, Mariana, Neto, Ricardo, Teury e Vinícius, pelo companheirismo e amizade durante todos esses anos. Ter vocês como amigos, me fez crescer, e parte do que sou hoje eu devo a vocês.

Aos amigos do Engenheiros, Alemão, Bixão, Caio, Catharina, Daruick, Erick, Flávia, Goiano, Marcelo, Marianna, Léo, Luiz, Lud, Vala, Vilela, Tito, Thales e Xandão, esse curso não seria o mesmo sem vocês. Obrigada por cada momento que passamos juntos durante esses anos.

A mim, por me dedicar e por me esforçar para chegar até aqui. Por ter feito o melhor que eu podia fazer durante esses 5 anos do curso de Engenharia Civil, em especial durante esse período tão complicado devido à pandemia do Covid-19.

RESUMO

ESTUDO DA SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO NATURAL E RESISTÊNCIA DA ESTRUTURA DE AÇO

Com o aumento do uso de materiais combustíveis, as edificações estão ficando cada vez mais susceptíveis ao fogo. Além disso, os experimentos realizados na área de incêndio são difíceis de executar, perigosos e demoram no tempo, além de serem caros, o que dificulta a realização de pesquisas nessa área. Como alternativa para os experimentos em escala real tem-se as simulações numérico computacionais de incêndio. Atualmente, essas simulações são mais focadas em estudar as formas de proteção ativa do edifício. Por isso, esse trabalho busca utilizar as simulações de incêndio para estudar uma forma de proteção passiva contra o efeito do incêndio na resistência das estruturas. Mais precisamente, os objetivos deste trabalho envolvem o estudo da simulação de incêndio com base em dados experimentais, e a análise de elementos estruturais de aço submetidos à esse incêndio. Para isso, o estudo será dividido em duas partes. Primeiro será realizada a simulação do incêndio utilizando os softwares FDS (Fire Dynamic Simulator) e Pyrosim, e a comparação das temperaturas obtidas entre a simulação e os dados experimentais. Depois, o incêndio simulado será usado para estudar as resistências de cálculo em elementos estruturais.

Palavras-chaves: Incêndio, Estruturas de aço, Simulação, Fire Dynamic Simulator.

ABSTRACT

STUDY OF STUDY OF NATURAL FIRE SIMULATION AND STEEL FRAME STRUCTURES RESISTANCE

Over the years, buildings are getting more susceptible to fire, with the increased use of more combustible materials. Experiments involving fire are too hard to execute, dangerous, take a long time and are expensive, making it difficult to do such research. As an alternative, fire simulations can be done. Nowadays, these simulations are focused on studying active ways of protecting a building. This project will focus on a passive protection of the building, which is done by studying the building resistance under fire. The goals are to study the simulation of a compartmented fire based on experimental data, and the analysis of a steel structural elements under that compartmented fire. For this, this study will be divided in two parts. First, the fire simulation will be done using FDS (Fire Dynamic Simulator) and Pyrosim, and the temperatures obtained with the simulation and from the experimental data will be compared. Then the same simulated fire will be used to do a structural analysis of a steel structural elements.

Keywords: Fire, Steel structures, Thermal analysis, Simulation, Pyrosim, Fire Dynamics Simulator.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1.	Considerações gerais.....	1
1.2.	Motivação	2
1.3.	Diretrizes da pesquisa	4
1.3.1.	Definição do problema	4
1.3.2.	Hipóteses e limitações do problema	4
1.3.3.	Objetivos.....	4
1.4.	Estrutura do Trabalho	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3	ANÁLISE TERMOCINÉTICA	9
3.1.	Incêndio	9
3.1.1.	Tipos de incêndios	10
3.2.	Estudo Experimental.....	17
3.3.	Aspectos Computacionais.....	21
3.3.1.	Métodos de simulação	21
3.3.2.	Ferramentas de simulação	22
3.4.	Modelo da simulação de um incêndio real	26
3.4.1.	Modelo final	27
3.4.2.	Testes	34
3.5.	Análise dos resultados numéricos e experimentais.....	40
4	ANÁLISE ESTRUTURAL.....	44
4.1.	Fundamentos teóricos	44
4.1.1.	Temperatura do aço	44
4.1.2.	Propriedades do aço.....	50
4.1.3.	Dimensionamento dos perfis de aço em situação de incêndio	53
4.2.	Temperaturas na Estrutura	58
4.3.	Modelo Estrutural	62
4.3.1.	Determinação dos parâmetros do aço sob incêndio.....	63
4.3.2.	Verificação das vigas segundo NBR 14323:2013	63
4.3.3.	Verificação das colunas segundo NBR14323:2013	68

5	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
	APÊNDICE A – ROTEIRO DE UTILIZAÇÃO DO FDS E PYROSIM	75
A.1	Configurações iniciais.....	75
A.2	Definição da malha	75
A.3	Propriedades dos Materiais	76
A.4	Modelagem do ambiente.....	77
A.5	Dispositivos de medição	78
A.6	Resultados	78
	APÊNDICE B – ENTRADA DE DADOS DA SIMULAÇÃO REALIZADA NO PYROSIM	81
B.1	Parâmetros iniciais	81
B.2	Domínio computacional e malha	83
B.3	Propriedade dos materiais	84
B.4	Dispositivos de medição	88
B.5	Resultados.....	89
B.6	Arquivo FDS.....	89
	APÊNDICE C – PRÉ-DIMENSIONAMENTO DA VIGA UTILIZADA NA ANÁLISE ESTRUTURAL	94
C.1	Pré-dimensionamento das Vigas.....	95
C.2	Pré-dimensionamento dos Pilares	97
C.3	Determinação da carga de projeto para situação de incêndio	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Valores das cargas de incêndio específicas	11
Tabela 3.2 - Dimensões da malha.....	28
Tabela 3.3 - Propriedade dos materiais	28
Tabela 3.4 - Parâmetros das condições ambientais	38
Tabela 4.1 - Fator de massividade para elementos estruturais sem proteção térmica.	46
Tabela 4.2 - Fatores de redução do aço	51
Tabela 4.3 - Propriedades geométricas do perfil W 250x32,7	62
Tabela 4.4 - Propriedades geométricas do perfil I 203x 27,3.....	63
Tabela 4.5 - Temperatura máxima do aço para cada elemento estrutural	63
Tabela 4.6 - Fatores de redução para cada elemento estrutural.....	63
Tabela 4.7 - Equações dos índices de esbeltez	65
Tabela 4.8 - Parâmetros do cálculo de $M_{fi,Rd}$ no FLT.....	67
Tabela C.1 - Propriedades geométricas do perfil I 203 x 27,3	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Arquibancada do circo após o incêndio.....	2
Figura 1.2 - Incêndio no edifício Joelma.....	3
Figura 3.1 - Curva temperatura-tempo de um incêndio real.....	9
Figura 3.2 - Curva temperatura tempo do incêndio padrão.....	13
Figura 3.3 - Curva temperatura tempo do incêndio natural.....	14
Figura 3.4 - Curva temperatura tempo em incêndio natural, com variação da carga de incêndio	16
Figura 3.5 - Curva temperatura tempo em incêndio natural, com variação do grau de ventilação.....	16
Figura 3.6 - Modelo do experimento.....	17
Figura 3.7 - Montagem real do experimento.....	18
Figura 3.8 - Temperaturas no termopar T21 segundo Hejtmánek.....	19
Figura 3.9 - Temperaturas no termopar T03 segundo Hejtmánek.....	19
Figura 3.10 – Gráficos de temperatura obtidos pelo <i>GethData Gaph Digitizer</i>	20
Figura 3.11 – Curva média das temperaturas no termopar T21.....	21
Figura 3.12 - Arquivo de texto do FDS.....	23
Figura 3.13 - Simulação no FDS.....	24
Figura 3.14 - Resultados da simulação representados no SMV.....	25
Figura 3.15 - Modelagem da simulação no Pyrosim.....	26
Figura 3.16 – Parâmetros da reação.....	27
Figura 3.17 - Parâmetros do "queimador".....	29
Figura 3.18 - Modelo do pallet.....	30
Figura 3.19 - Distribuição dos pallets - Caso 1.....	30
Figura 3.20 - Distribuição dos pallets - Caso 2.....	31
Figura 3.21 - Modelo do container.....	32
Figura 3.22 - Modelo do terraço no PyroSim.....	32
Figura 3.23 - Modelo do terraço no FDS.....	33
Figura 3.24 - Localização dos termopares.....	34
Figura 3.25 - Localização do plano de temperatura.....	34
Figura 3.26 - Parâmetros da ignição através do bloco de madeira.....	35
Figura 3.27 - Modelo do teste de ignição.....	36
Figura 3.28 - TLC para as duas formas de ignição.....	36
Figura 3.29 - Temperatura para as duas formas de ignição.....	37
Figura 3.30 – Modelo do teste de condições ambientais.....	38
Figura 3.31 – TLC para o teste de condições ambientais.....	39
Figura 3.32 – Temperatura para o teste de condições ambientais.....	39
Figura 3.33 – Temperatura no termopar T21 durante as simulações.....	40
Figura 3.34 - Comparação da curva média com a simulação.....	42
Figura 3.35 - Comparação das curvas simuladas, curva média e curva padrão.....	43
Figura 4.1 - Temperatura do aço no incêndio padrão.....	47

Figura 4.2 - Influência do fator de massividade na temperatura do aço para incêndio natural.	47
Figura 4.3 - Influência do fator de massividade na temperatura do aço para incêndio natural	48
Figura 4.4 - Influência do fator de massividade na temperatura do aço para incêndio natural	48
Figura 4.5 - Influência do fator de massividade na temperatura do aço para incêndio natural	49
Figura 4.6- Influência do fator de massividade na temperatura do aço para incêndio natural	49
Figura 4.7 - Influência do fator de massividade na temperatura do aço para incêndio natural	50
Figura 4.8 - Variação do calor específico do aço com a temperatura	52
Figura 4.9 - Variação da condutividade térmica do aço com a temperatura	53
Figura 4.10 - Localização da estrutura no container	58
Figura 4.11 - Temperatura dos gases na Viga 1 e no Pilar 1 medida na simulação	59
Figura 4.12 - Curvas médias experimental e aproximada	60
Figura 4.13 - Temperatura do aço nas Vigas	61
Figura 4.14 - Temperatura do aço nos Pilares	61
Figura 4.15 - Perfil dos elementos da estrutura: (a) perfil da viga e (b) perfil da coluna	62
Figura A.1 - Malha feita no Pyrosim	76
Figura A.2 - Geometria do ambiente feita no Pyrosim	78
Figura A.3 - Temperatura no plano X=2.0 em t = 352 segundos	79
Figura A.4 - Fluxo de calor no ambiente em t= 475 segundos	79
Figura A.5 - Gráfico da temperatura com o tempo no termopar (THCP)	80
Figura C.1 - Localização da estrutura no container (1)	94
Figura C.2 - Localização da estrutura no container (2)	95

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Base

Letras romanas maiúsculas

- A - área da seção transversal
- A_f - área do piso do compartimento
- A_g - área bruta da seção transversal
- A_i - área da abertura i
- A_t - área total, incluindo vedação e aberturas
- A_v - área total das aberturas para o ambiente externo
- C_b - fator de modificação para diagrama de momento fletor não uniforme
- E - módulo de elasticidade de todos os aços
- E_θ - módulo de elasticidade dos aços laminados em temperaturas elevadas
- $E_{o,\theta}$ - módulo de elasticidade dos aços trefilados em temperaturas elevadas
- F - fator de massividade
- H_i - potencial calorífico específico de cada componente i do material combustível
- M_{cr} - momento fletor de flambagem elástica à temperatura ambiente
- M_i - massa de cada componente i do material combustível
- $M_{fi,Rd}$ - momento fletor resistente de cálculo em situação de incêndio
- M_{pl} - momento de plastificação plástica da seção transversal
- M_r - momento fletor no início do escoamento da seção transversal à temperatura ambiente
- $N_{fi,Rd}$ - força normal resistente de cálculo de uma barra axialmente tracionada ou comprimida em situação de incêndio
- O - grau de ventilação
- Q_{fi} - coeficiente de redução que leva em consideração a flambagem local em situação de incêndio
- $R_{fi,d}$ - esforço resistente de cálculo em situação de incêndio
- $S_{fi,d}$ - esforço solicitante de cálculo em situação de incêndio
- $V_{fi,Rd}$ - força cortante resistente de cálculo em situação de incêndio

V_{pl} - força cortante de plastificação da alma por cisalhamento à temperatura ambiente

Letras romanas minúsculas

c_a - calor específico do aço

c_v - calor específico do material de vedação

f_y - resistência ao escoamento dos aços laminados à temperatura ambiente

f_{y0} - resistência ao escoamento dos aços trefilados à temperatura ambiente

$f_{y,\theta}$ - resistência ao escoamento dos aços laminados em temperaturas elevadas

$f_{y0,\theta}$ - resistência ao escoamento dos aços trefilados em temperaturas elevadas

h_i - altura da abertura i

$k_{E,\theta}$ - fator de redução do módulo de elasticidade de aços laminados em temperaturas elevadas relativo ao valor à temperatura ambiente

$k_{E0,\theta}$ - fator de redução do módulo de elasticidade de aços trefilados em temperaturas elevadas relativo ao valor à temperatura ambiente

$k_{y,\theta}$ - fator de redução da resistência ao escoamento de aços laminados em temperatura elevada relativo ao valor à temperatura ambiente

$k_{y0,\theta}$ - fator de redução da resistência ao escoamento de aços trefilados em temperatura elevada relativo ao valor à temperatura ambiente

q_{fi} - carga de incêndio específica

t - tempo

u - perímetro exposto ao incêndio

Letras gregas maiúsculas

Δ - aumento, variação

Σ - somatório

Letras gregas minúsculas

α - coeficiente de calor por convecção

χ_{fi} - fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio

ϵ_{res} - emissividade resultante

φ - valor do fluxo de calor por unidade de área

- φ_c - componente do fluxo de calor devido à convecção
- φ_r - componente do fluxo de calor devido à radiação
- λ - parâmetro de esbeltez
- λ_a - condutividade térmica do aço
- λ_o - índice de esbeltez reduzido para barras submetidas à compressão à temperatura ambiente
- $\lambda_{o,\theta}$ - índice de esbeltez reduzido para barras submetidas à compressão em situação de incêndio
- λ_p - parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação
- λ_r - parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento
- λ_v - condutividade térmica do material de vedação
- κ_1 - fator de correção para a temperatura não uniforme na seção transversal
- κ_2 - fator de correção para a temperatura não uniforme ao longo da barra
- ρ_a - massa específica do aço
- ρ_v - massa específica do material de vedação
- θ_a - temperatura no aço
- $\theta_{a,t}$ - temperatura no aço no tempo
- θ_g - temperatura dos gases no tempo
- θ_0 - temperatura do ambiente

Símbolo subscrito

Letras romanas maiúsculas

- Rd - resistente de cálculo

Letras romanas minúsculas

- a - aço
- c - convecção
- d - de cálculo
- fi - em situação de incêndio
- pl - plastificação

- r - início do escoamento, radiação
- t - tempo
- v - material de vedação

LISTA DE ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSYS	Analysis System (software)
CFD	Computer Fluid Dynamics
CO	Monóxido de Carbono
EUROCODE	European Committee of Standardization
FDS	Fire Dynamics Simulator
FLA	Flambagem local da alma
FLM	Flambagem local da mesa
FLT	Flambagem lateral com flexo-torção
FVM	Finite Volume Method
NBR	Norma Brasileira
SMV	Smokeview
LES	Large Eddy Simulation
MEF	Método dos Elementos Finitos
NIST	National Institute of Standards and Engineering
CSi	Computer & Structures, Inc.
SAP	Structural Analysis Software
TLC	Taxa de liberação de Calor
TRRF	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

1 INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais

O fogo é uma das principais descobertas feitas na história. Desde então, ele tem sido utilizado de diversas formas, que facilitam a vida do homem, por exemplo: para manter-se aquecido, como forma de iluminação, para cozinhar alimentos, na produção de commodities, e outros. Quando o fogo sai do controle do homem ele passa a ser chamado de incêndio. E traz riscos à vida humana, ao meio ambiente e ao patrimônio.

Ao longo dos anos, as edificações foram ficando mais susceptíveis ao fogo, com o aumento do uso de materiais mais combustíveis. Com isso, a possibilidade de incêndio aumentou. E, nos anos 70, houve algumas tragédias no Brasil, como os incêndios nos edifícios Andraus (1972) e Joelma (1974), que mostram a importância do combate ao incêndio.

Um sistema de combate ao incêndio envolve a proteção ativa, com o uso de chuveiros automáticos, detecção de calor ou fumaça, brigada contra incêndio etc.; e a proteção passiva, que abrange a resistência ao fogo das estruturas, saídas de emergência e compartimentação do ambiente (VARGAS, 2005). O estudo do comportamento do incêndio e da estrutura faz parte da proteção passiva. Geralmente, os estudos sobre incêndio são feitos considerando elementos isolados da estrutura, que é o caso deste trabalho. Em que, será analisada uma estrutura de aço submetida a um incêndio que será caracterizado através da simulação de um exemplo real.

As simulações computacionais de incêndio nos ajudam a entender como ocorre a propagação do fogo e como as estruturas reagem ao aumento de temperatura, além de fornecer dados como o perfil de temperatura do ambiente e da estrutura. Além disso, essas simulações são utilizadas para estudar incêndios que já foram objeto de análises experimentais. Assim, os dados experimentais são usados nas simulações e servem para calibração do sistema, para que outras simulações possam ser feitas sem a necessidade dos dados experimentais.

O Pyrosim é um dos principais softwares de simulação computacional de incêndio. Ele é uma interface gráfica do Fire Dynamic Simulator (FDS), que permite a modelagem do ambiente, inserir parâmetros de como ocorre a combustão dos materiais, inserir também dispositivos de medição de temperatura etc. O Pyrosim cria as linhas de código demandadas pelo FDS, e este faz o processamento. E, através do Smokeview, é possível analisar os resultados da simulação ao longo do tempo.

Assim, este trabalho visa, primeiramente, fazer a simulação de um incêndio a partir dos dados experimentais de um incêndio real utilizando os softwares PyroSim, FDS e Smokeview. E, posteriormente, analisar elementos de aço submetidos a esse incêndio.

Devo ainda salientar as dificuldades encontradas durante a pandemia da Covid-19, que dificultou parte da execução deste trabalho. Impedindo o uso de computadores mais potentes para a realização das simulações de incêndio.

1.2. Motivação

Já ocorreram no Brasil vários acidentes relacionados a estruturas acometidas por incêndios. Alguns exemplos são:

- Gran Circo (1961): O incêndio do Gran Circo aconteceu no dia 17 de dezembro de 1961, em Niterói. Ele foi o maior incêndio em número de mortes do Brasil, com 503 vítimas. O espetáculo acontecia com um público aproximado de 3 mil pessoas quando parte da lona em chamas caiu sobre a plateia. O toldo era feito de nylon e possuía uma camada impermeabilizante de parafina, que contribuiu para a propagação do incêndio. O seu início foi criminoso, e o culpado foi julgado e condenado. A Figura 1.1 mostra como ficaram as arquibancadas do circo após o incêndio.



Figura 1.1- Arquibancada do circo após o incêndio

(Fonte: LINCOLINS, 2019.)

- Edifício Joelma (1974): Antes da tragédia acontecida na Boate Kiss, o incêndio do edifício Joelma era o segundo maior em quantidade de mortes no Brasil. O incêndio aconteceu no dia 1º de fevereiro de 1974, na cidade de São Paulo e deixou 187 mortos e 300 feridos. Teve início pelo curto-circuito em um ar-condicionado no 12º andar. E o fogo se alastrou por 14 dos 25 andares do prédio, como pode ser visto na Figura 1.2.



Figura 1.2 - Incêndio no edifício Joelma

(Fonte: PREVIDELLI, 2020.)

- Boate Kiss (2013): Na madrugada de 27 de janeiro de 2013, ocorre em Santa Maria a pior tragédia, relacionada a incêndios, acontecida no Rio Grande do Sul. O incêndio começou quando um integrante da banda que tocava na boate acendeu um sinalizador que provocou a queima da espuma de revestimento do teto da boate. A tragédia causou 242 mortes e mais de 600 feridos. Após a tragédia, houve uma grande pressão pública sob o governo do estado, e dessa forma, foi aprovada a Lei Complementar nº 14.376 de dezembro de 2013, chamada de Lei Kiss, que diz respeito à segurança contra incêndio.
- Museu Nacional do Rio de Janeiro (2018): Foi o mais recente incêndio em prédios de grande porte acontecido e noticiado no Brasil. Aconteceu no dia 2 de setembro de 2018, e o incêndio começou no ar-condicionado do auditório. Logo o fogo se espalhou e foi consumindo parte do acervo histórico do museu. Nesse caso não houve vítimas, mas a perda patrimonial foi inestimável.

Esses acontecimentos geraram grande comoção nacional, e demonstram a importância de se estudar o comportamento do incêndio e das estruturas diante do aumento de temperatura.

Ultimamente os edifícios vêm se tornando cada vez mais inflamáveis, com maior uso de materiais como plásticos e MDF, que possuem uma maior capacidade combustível em relação a outros materiais. O aumento do consumo desses materiais aumenta ainda mais o risco de incêndio em edifícios residenciais e comerciais.

Em face disso, percebe-se que ainda são poucos os estudos desenvolvidos sobre essa situação. Apesar de estarem sendo desenvolvidos estudos na área de proteção ativa contra incêndios, os estudos que envolvem o fenômeno do incêndio em estruturas prediais são muito importantes para garantir uma maior segurança à vida, e ao patrimônio, além de um melhor

entendimento desse fenômeno e da resistência estrutural para a edificação sob situação de incêndio.

Dessa forma, tem-se como motivação para este trabalho contribuir para o estudo do incêndio em edifícios e com isso para a segurança à vida humana. Para evitar que mais tragédias como as citadas aconteçam.

Uma segunda motivação para este trabalho será o uso do *software* de simulação dinâmica do fogo (*FDS*). Esse *software* é uma ferramenta que vem sendo muito utilizada internacionalmente, e vem sendo utilizada em pesquisas no Brasil. Em Brasília, especialmente na Universidade de Brasília, será utilizado de forma pioneira em uma pesquisa. E espera-se poder incentivar seu uso na universidade, para o estudo mais aprofundado do tema.

1.3. Diretrizes da pesquisa

A seguir são apresentadas as diretrizes para o desenvolvimento deste trabalho, que envolvem a definição do problema, as hipóteses e delimitações da pesquisa e os objetivos gerais e específicos.

1.3.1. Definição do problema

O presente trabalho visa verificar um estudo experimental de incêndio através de simulações numérico computacionais e mostrar simulações para analisar elementos de uma estruturas de aço.

1.3.2. Hipóteses e limitações do problema

Para resolver o primeiro problema proposto será feita a simulação de um incêndio com base em um experimento em escala real feito em (Hejtmánek, 2013). A simulação será feita com o *software Pyrosim* e os dados experimentais servirão de base para o modelo da simulação. Após a análise dos resultados da simulação, as temperaturas do incêndio simulado serão utilizadas para fazer a análise estrutural de alguns elementos de aço.

A simulação e a análise de elementos estruturais serão feitas seguindo as seguintes limitações:

- Foi considerado um incêndio com carga de incêndio e grau de ventilação conhecidas;
- A carga de incêndio foi considerada em função do peso de pallets de madeira;
- O container e a estrutura são metálicos e não possuem proteção térmica;
- A estrutura é composta por duas vigas e quatro pilares.

1.3.3. Objetivos

Dessa forma, os objetivos principais do trabalho são estudar a simulação de um incêndio a partir dos dados experimentais de um incêndio real e analisar elementos de aço submetidos a esse incêndio.

E os objetivos específicos são:

- Comparar os resultados obtidos com o incêndio experimental e com a simulação numérico computacional;
- Calcular as resistências dos elementos estruturais em utilizando-se a norma NBR 14323:2013;

1.4. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está separado em cinco capítulos. O primeiro introduz o leitor ao tema e inclui também a motivação, os objetivos do trabalho e sua estruturação.

No capítulo 2 tem-se a revisão bibliográfica, que contém a base de estudos utilizada pela autora para o desenvolvimento desta pesquisa. Possui um breve resumo dos livros, teses, artigos e normas lidas, e uma análise deles, que cita quais foram os resultados obtidos e como cada trabalho estudado contribuiu e se diferencia da proposta deste trabalho.

O estudo desenvolvido neste trabalho foi dividido em duas partes, apresentadas nos capítulos 3 e 4 respectivamente. No capítulo 3 será feita a análise termo cinética do problema proposto. Assim, primeiro serão estudados os fundamentos teóricos do incêndio, depois será apresentado o estudo experimental no qual a simulação de incêndio se baseará. Finalmente, será desenvolvida a simulação do incêndio e a análise dos resultados através da comparação dos incêndios teórico, experimental e simulado.

No capítulo seguinte, será feita a análise estrutural do problema. Novamente, será feito, primeiramente, um estudo teórico do assunto. E posteriormente, o estudo de uma estrutura metálica submetida ao incêndio desenvolvido anteriormente. E, por fim, a análise dos resultados.

No último capítulo, serão apresentadas as conclusões feitas a partir das análises anteriores e respondendo ao problema proposto no capítulo inicial.

Por fim, tem-se, no Apêndice A a apresentação de um roteiro de utilização do FDS e *Pyrosim*. No Apêndice B foram colocadas imagens dos parâmetros de entrada da simulação no *Pyrosim*. E, no Apêndice C foi detalhado o pré-dimensionamento da estrutura utilizada no capítulo 4.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente trabalho irá se basear nas principais normas referentes a incêndio em estruturas de aço, a NBR 14432 (2001) Exigências de resistências ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento e a NBR14323 (2013) Dimensionamento de estruturas de aço e estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio - Procedimento.

A NBR 14432 estabelece os critérios a serem seguidos para se assegurar a resistência de edifícios e elementos estruturais contra a ação térmica. Ela especifica as cargas de incêndio definidas para cada tipo de ocupação de um edifício. E define os tempos requeridos de resistência ao fogo (TRRF) para vários tipos de edificação utilizando a curva de incêndio padrão. E a NBR 14323:2013 aborda os critérios de dimensionamento de estruturas em situação de incêndio. Fazendo considerações também sobre: como calcular a ação térmica através da combinação excepcional de cargas, as propriedades mecânicas e térmicas do aço com o aumento de temperatura e formas de calcular a temperatura no aço em estruturas com ou sem proteção térmica.

Entretanto, podem ser encontradas na literatura formas diferentes de se calcular os esforços resistentes em uma estrutura submetida a elevadas temperaturas. A NBR14323 indica uma metodologia simplificada baseada na premissa de que há a distribuição uniforme de temperatura na seção transversal do elemento. Em Nunes (2005) e Campêlo (2008) são descritas formas alternativas de cálculo do momento crítico e da carga crítica, respectivamente, em elementos estruturais em situação de incêndio.

Nunes (2005), em sua tese, descreve dois métodos diferentes da norma para o cálculo do momento crítico, um utilizando equilíbrio de forças e o outro por conservação de energia. Ele, então, confronta os resultados obtidos com os resultados obtidos pela formulação da norma. Chegando à conclusão de que a norma trabalha com uma formulação conservadora, pois, para todos os perfis analisados o momento crítico calculado pela norma está abaixo do momento crítico calculado de forma analítica. Campêlo (2008) segue uma linha de raciocínio parecida com a de Nunes (2005) para obter uma nova formulação para o cálculo da carga crítica. Ela também utiliza o método da energia e obtém resultados semelhantes.

Neste trabalho, a resistência da estrutura em situação de incêndio será analisada utilizando as formulações da norma. O que o diferencia dos demais é a utilização dos softwares FDS e *PyroSim* para a simulação de um incêndio baseado em um experimento real. A utilização de incêndios reais como base para simulações computacionais também foi utilizada por Sá (2018) e por Weinschenk, Overholt, Madrzykowski (2014).

Em seu trabalho Sá (2018) utiliza os softwares FDS e Ozone para simular e analisar dois exemplos. A autora utilizou dois casos em que foi feito um estudo experimental e com base nisso as simulações foram feitas. O primeiro estudo de caso envolvia um container com uma carga de incêndio representada por pilhas de madeira. E o segundo exemplo estudou a propagação de incêndio em um quarto de uma residência típica de Recife. Em seu trabalho ela também disponibilizou os arquivos de texto do FDS de ambas as simulações realizadas. O que foi interessante, pois possibilita a simulação dos mesmos exemplos utilizando também o

PyroSim, e o arquivo ajuda a tirar quaisquer dúvidas que possam surgir sobre a montagem do problema.

No trabalho de Weinschenk, Overholt, Madrzykowski (2014), porém, o estudo foi feito com base em um incêndio residencial e não com base em um experimento. O estudo foi realizado para analisar a propagação do incêndio na residência em questão e para estudar as condições nas quais os bombeiros presentes foram expostos. Então, a partir da descrição dos acontecimentos e de dados geométricos e dos materiais da residência, foi desenvolvido um modelo de simulação no FDS.

O FDS juntamente com o *Smokeview* e o *Pyrosim* serão utilizados para a simulação de incêndio no presente trabalho, e serão definidos na seção 3.3 (Aspectos computacionais). Como será utilizado um software de simulação de incêndio que não é conhecido na universidade, foram estudados outros trabalhos que fizeram simulações com ele. Alguns exemplos são os trabalhos de: Glasa et al. (2013), Simion et al. (2018), Brunetto (2015) e da Luz (2017). Todos esses trabalhos utilizaram o FDS como forma de analisar o comportamento do incêndio em diferentes tipos de edificação

Glasa et al. (2013) fizeram o estudo do incêndio em uma sala de cinema. O foco do incêndio foi colocado na parte superior esquerda da sala, e a simulação foi feita para os três primeiros minutos no incêndio. Os dados obtidos em apenas 22 segundos de simulação indicam uma acumulação de fumaça na parte esquerda e inferior da sala. E uma das conclusões dos autores é a de que o teto curvo da sala de cinema aumenta o perigo para os espectadores.

Simion et al. (2018) fizeram o estudo da propagação do fogo em uma fachada de um edifício, a simulação foi feita com base em um experimento em escala real realizado anteriormente e os resultados obtidos pela simulação indicam a validação do estudo, apesar de uma diferença de mais de 15% os resultados do experimento e da simulação. E os autores apontam as dificuldades de se simular essa situação como causa para essa diferença.

Brunetto (2015) faz a simulação do fogo no prédio da escola de engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). E seu objetivo é o de estudar diferentes situações de incêndio variando o local do incêndio dentro da edificação. Foram realizadas quatro simulações, sendo que, em três delas o foco inicial do incêndio é a biblioteca do prédio. Os resultados obtidos demonstram que a fumaça do incêndio se propaga rapidamente pelo vão da escada. O que dificultaria a evacuação do prédio e aumentaria o risco à vida humana.

Por fim, da Luz (2017) estuda como os fatores de carga de incêndio, ventilação e distribuição de carga afetam um incêndio em um depósito. Para isso ela realizou 12 simulações diferentes, e os resultados obtidos foram os mesmos citados em outras literaturas, para carga de incêndio e grau de ventilação. E que também serão abordados neste trabalho. Para a distribuição da carga de incêndio no ambiente, não houve nenhuma diferença grande de temperatura que indicasse alguma relação entre as duas distribuições utilizadas.

Pode-se perceber que todas as simulações realizadas pelos autores citados não visavam à análise da estrutura do edifício, e foram utilizadas apenas para o estudo do ambiente em situação de incêndio. Dessa forma, o presente trabalho se destaca por utilizar a simulação de incêndio,

não somente para a análise do ambiente, mas também para a análise mecânica da estrutura sob essa situação. Não foram encontradas bibliografias que fizessem a mesma análise que este e com o mesmo software de simulação.

3 ANÁLISE TERMOCINÉTICA

Na primeira parte desse trabalho será tratada a análise termocinética do problema proposto. Essa análise será tratada como sendo o estudo comparativo entre o incêndio experimental e o simulado. Dessa forma, esse capítulo será dividido em quatro partes, a primeira irá estudar o fenômeno do incêndio, seus tipos e como calcular a temperatura dos gases para cada caso. A segunda será o estudo do trabalho experimental feito por Hejtmánek (2013). Depois, serão discutidos os aspectos computacionais do trabalho, apresentando primeiro os softwares utilizados, e depois o modelo de simulação utilizado. Por fim, tem-se a análise dos resultados obtidos através da simulação, por meio da comparação dos gráficos de temperatura dos gases obtidos pelo estudo do incêndio e pelos dados experimentais.

3.1. Incêndio

O incêndio começa a partir de uma reação química de combustão. Essa reação acontece quando um material combustível (material oxidável) reage com um material comburente (oxigênio) e libera energia na forma de calor. Ocorre também o fenômeno da reação em cadeia, que permite que o processo de combustão continue acontecendo.

O calor proveniente da reação de combustão se propaga pelo ambiente e aquece os elementos estruturais. Por isso, é importante começar a análise do incêndio estudando sua curva de temperatura versus tempo, apresentada na Figura 3.1.

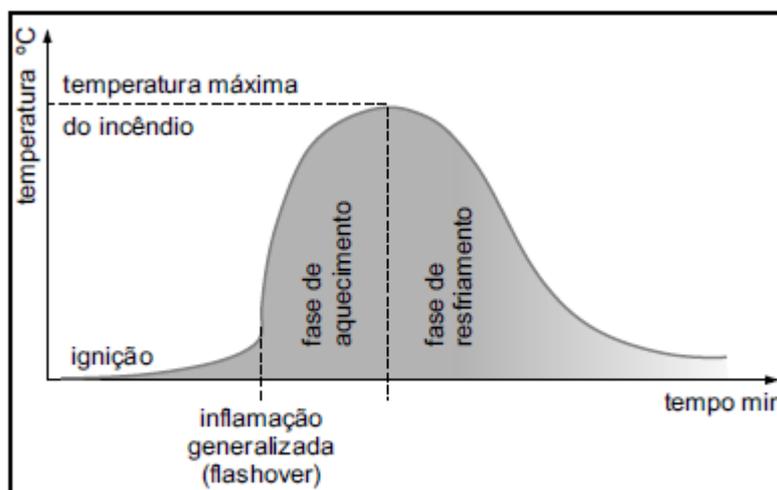


Figura 3.1 - Curva temperatura-tempo de um incêndio real

Fonte: (VARGAS, 2005)

Utilizando essa curva é possível calcular a ação térmica e o efeito que a temperatura causa na rigidez e na capacidade resistente do elemento estrutural.

Como evidenciado na Figura 3.1, a curva temperatura-tempo pode ser dividida em três partes que representam as fases de um incêndio.

A parte inicial do gráfico indica a fase de ignição, em que as temperaturas ainda são baixas, e o incêndio pode ser controlado caso as medidas de proteção forem tomadas. Sendo assim, o risco à vida humana também é baixo.

Após essa fase inicial, o incêndio começa a se desenvolver e entra na fase de aquecimento. O momento do “flashover”, ou inflamação generalizada, indica o início dessa fase. As temperaturas começam a aumentar rapidamente e os materiais combustíveis do ambiente atingem o ponto de ignição por meio da irradiação do calor, liberado pela reação de combustão. A partir do ponto de “flashover” o incêndio é considerado desenvolvido e não pode mais ser revertido.

A última fase do incêndio, fase de resfriamento, é marcada pela diminuição da temperatura à medida que o material combustível vai sendo consumido.

3.1.1. Tipos de incêndios

A norma NBR 14432:2001 especifica dois tipos de incêndio que podem ser utilizados para a determinação da temperatura dos gases em um incêndio, o incêndio-padrão e o incêndio natural.

A temperatura de um incêndio é o determinante da sua severidade. E existem alguns fatores que a influenciam, são eles:

- Geometria do edifício, que é influenciado pelo grau de compartimentação e a quantidade de andares do edifício;
- Propriedades térmicas dos materiais de vedação do ambiente;
- Carga de incêndio;
- Grau de ventilação.

A carga de incêndio, segundo a NBR 14432:2001, é a “soma das energias caloríficas que poderiam ser liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis em um espaço, inclusive os revestimentos das paredes divisórias, pisos e tetos”. De acordo com Silva (1997), a carga de incêndio também depende da atividade desenvolvida no edifício, pois isso definirá o tipo e quantidade de material combustível. A Tabela 3.1, abaixo, apresenta alguns valores de carga de incêndio específica (carga de incêndio dividida pela área do piso considerado), de acordo com a Norma citada.

Tabela 3.1 - Valores das cargas de incêndio específicas

Ocupação / Uso	Descrição	Carga de Incêndio (q _{fi}) MJ/m ²
Residencial	Alojamentos estudantis	300
	Apartamentos	300
	Casas térreas ou sobrados	300
Serviços de hospedagem	Hotéis	500
Comercial varejista	Livrarias	1000
	Papelarias	500
	Supermercados	300
Educacional e cultura física	Academias	300
	Escolas	300
Locais de reunião pública	Bibliotecas	2000
	Cinemas ou teatros	600
	Museus	300
Industrial	Janelas e portas de madeira	200
	Lâmpadas	40
	Móveis	1000
	Vidros ou espelhos	200

(Fonte: adaptado ABNT, 2001)

A Norma ainda indica que, para ocupações que não foram citadas em sua tabela, a carga de incêndio específica deve ser obtida por similaridade. E fornece uma fórmula para calcular a carga de incêndio (q_{fi}) em depósitos:

$$q_{fi} = \sum \frac{M_i H_i}{A_f} \quad (3.1)$$

Em que:

q_{fi} é o valor da carga de incêndio específica, em MJ/m²

M_i é a massa total de cada componente i do material combustível, em kg. Este valor não pode ser excedido durante a vida útil da edificação, exceto quando houver alteração de ocupação, ocasião em que M_i deve ser reavaliado.

H_i é o potencial calorífico específico de cada componente i do material combustível, em MJ/kg.

A_f é a área do piso do compartimento, m².

O grau de ventilação pode ser definido pela expressão do fator de abertura (O) abaixo, e representa a quantidade de oxigênio que pode estar contido no ambiente durante o incêndio.

$$O = \frac{A_v \sqrt{h}}{A_t} \quad (3.2)$$

Em que:

$$h = \frac{\sum h_i A_i}{A_v} \quad (3.3)$$

sendo:

A_v é a área total das aberturas para o ambiente externo ao edifício, m²;

A_t é a área total, incluindo vedação (paredes, piso e teto) e aberturas, m²;

h_i é a altura da abertura i , m;

A_i é a área da abertura i , m².

3.1.1.1. Incêndio-padrão

Devido aos fatores que influenciam a temperatura do incêndio pode-se afirmar que não existem incêndios iguais. Por isso, convencionou-se uma curva temperatura-tempo padrão, que modela o incêndio e serve de referência em análises estruturais e no estudo de materiais isolantes térmicos.

A curva do incêndio padrão não leva em consideração a carga de incêndio, o grau de ventilação e o material usado na vedação do compartimento. E ela não foi desenvolvida para se assemelhar a curva do incêndio natural, servindo apenas como uma referência.

As temperaturas dos gases são definidas pela seguinte equação, no estudo do modelo de incêndio padrão:

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log(8t + 1) \quad (3.4)$$

sendo:

θ_g é a temperatura dos gases no instante t , em °C;

θ_0 é a temperatura do ambiente antes do início do aquecimento, em °C, geralmente tomada igual a 20°C;

t é o tempo, em min.;

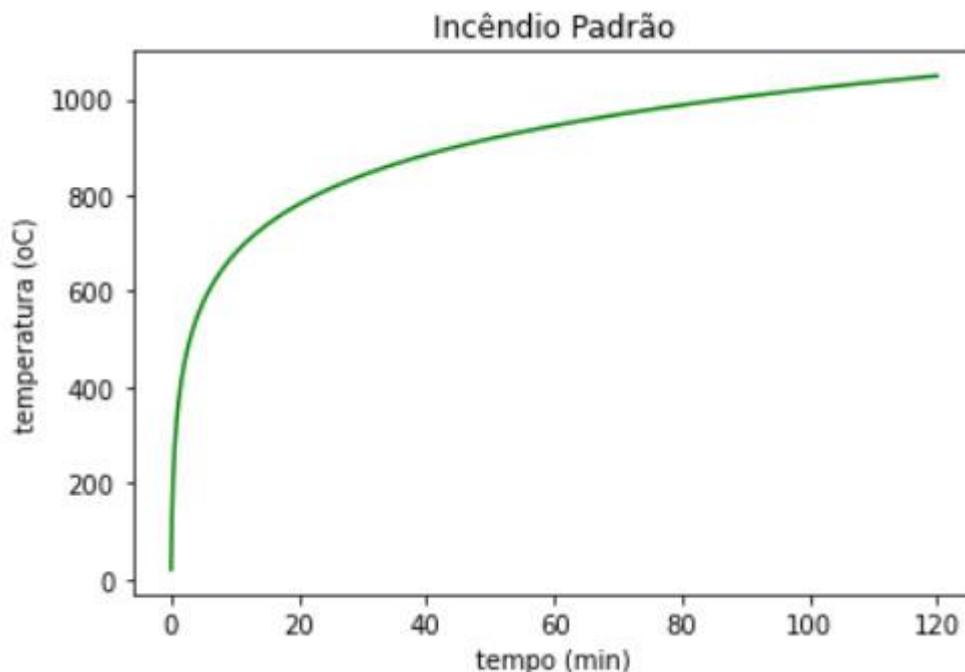


Figura 3.2 - Curva temperatura tempo do incêndio padrão

(Fonte: elaborado pela autora)

A Equação 3.4 é utilizada pela norma NBR 14432:2001. E tem como característica principal não possuir um ramo descendente, quando comparada às curvas de incêndio real (Figura 3.1) e natural (Figura 3.3).

3.1.1.2. *Incêndio natural*

Para caracterizar o fenômeno de incêndio, vários estudos e experimentos foram feitos com a finalidade de simular a situação real de um incêndio compartimentado e chegou-se a uma formulação mais real, que leva em consideração os fatores que influenciam a temperatura do incêndio. Logo, o modelo natural de incêndio pode ser visto na Figura 3.3. E, diferentemente do modelo padrão, possui um ramo ascendente e um descendente, que indicam a fase de aquecimento e resfriamento. A equação dessa curva não é definida pela norma brasileira, sendo necessário recorrer à norma europeia, Eurocode 1: Part 1-2 (2002), para isso. Dessa forma, tal norma define as seguintes curvas:

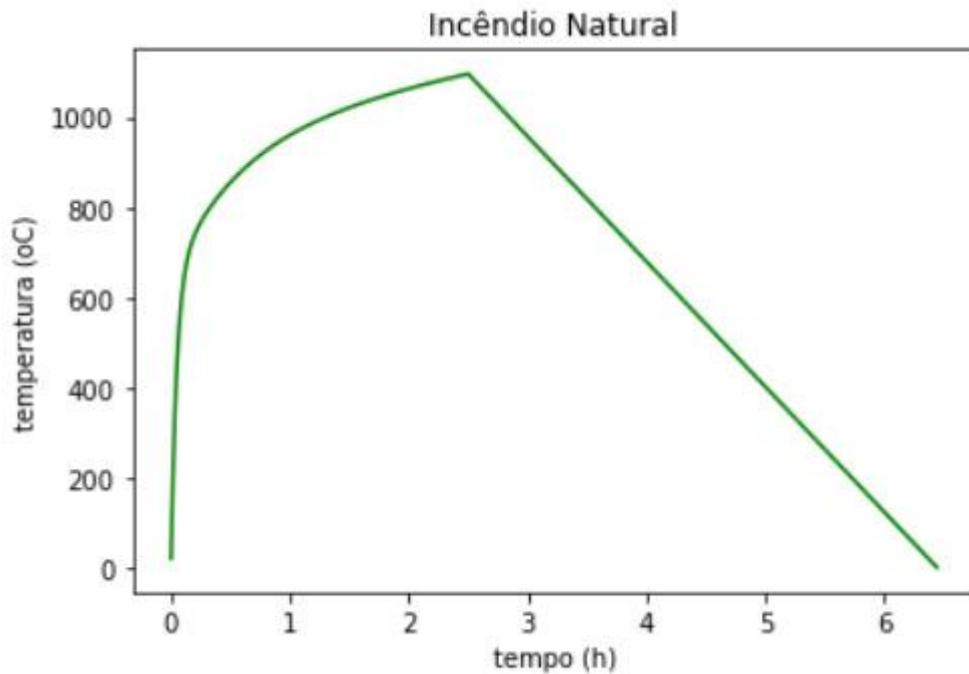


Figura 3.3 - Curva temperatura tempo do incêndio natural

(Fonte: elaborado pela autora)

- Fase de aquecimento:

$$\theta_g = 20 + 1325 (1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad (3.5)$$

- Fase de resfriamento:

- se $t^*_{max} \leq 0,5$:

$$\theta_g = \theta_{max} - 625 (t^* - t^*_{max}) \quad (3.6)$$

- se $0,5 < t^*_{max} < 2$:

$$\theta_g = \theta_{max} - 250(3 - t^*_{max}) (t^* - t^*_{max}) \quad (3.7)$$

- se $t^*_{max} \geq 2$:

$$\theta_g = \theta_{max} - 250 (t^* - t^*_{max}) \quad (3.8)$$

Em que:

θ_g é a temperatura dos gases no instante t, em °C;

$t^* = t \cdot \Gamma$, em horas; e com, (3.9)

t sendo o tempo em h; e

$$\Gamma = \frac{\left(\frac{O}{b}\right)^2}{\left(\frac{0,04}{1160}\right)^2} \quad (3.10)$$

$$b = \sqrt{\rho_v c_v \lambda_v}, \text{ com } b \text{ entre os seguintes limites: } 1000 \leq b \leq 2000 (\text{J/m}^2 \text{s}^{1/2} \text{°C}); \quad (3.11)$$

ρ_v é a massa específica do material de vedação do ambiente (kg/m^3);

c_v é o calor específico do material de vedação do ambiente ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$);

λ_v é a condutividade térmica do material de vedação do ambiente ($\text{W/m}^\circ\text{C}$);

O é o grau de ventilação ($\text{m}^{1/2}$), com O entre os limites: $0,02 \leq O \leq 0,20$.

O valor de t^*_{max} é dado por:

$$t^*_{max} = \frac{0,2 \cdot 10^{-3} q_{fi,d}}{O} \Gamma \quad (3.12)$$

Em que:

$q_{fi,d}$ é a carga de incêndio específica, respeitando os seguintes limites $50 \leq q_{t,d} \leq 1000$ (MJ/m^2);

É importante ressaltar que o método utilizado pelo Eurocode é válido somente para compartimentos com área máxima de 500m^2 , que não possuam aberturas no teto e com altura máxima de 4 metros.

No caso do incêndio natural, vários tipos de curva podem ser gerados dependendo do tipo do compartimento, pois o grau de ventilação, a carga de incêndio e as características térmicas dos elementos de vedação (ρ_v , c_v e λ_v) podem ser modificados.

A título de exemplo, foi feito um estudo das curvas de incêndio natural, apresentadas acima, utilizando três valores diferentes para a carga de incêndio e para o grau de ventilação. Os gráficos obtidos estão representados nas Figuras 3.4 e 3.5.

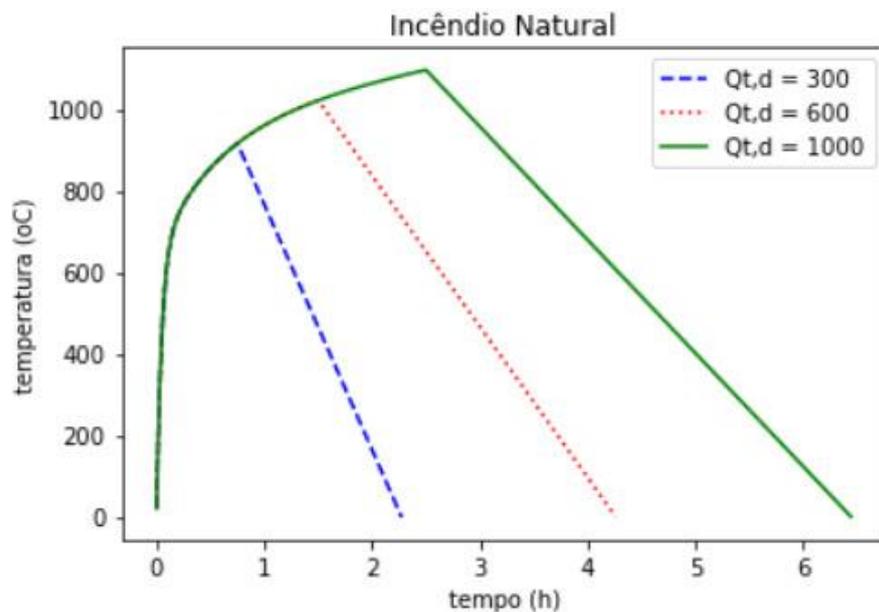


Figura 3.4 - Curva temperatura tempo em incêndio natural, com variação da carga de incêndio

(Fonte: elaborado pela autora)

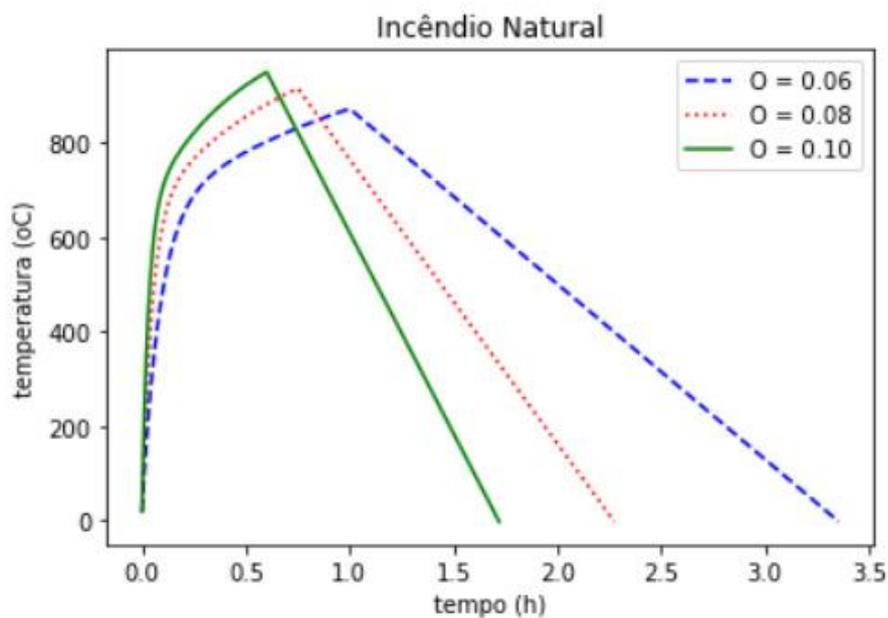


Figura 3.5 - Curva temperatura tempo em incêndio natural, com variação do grau de ventilação

(Fonte: elaborado pela autora)

Analisando as curvas apresentadas acima, observa-se que:

- Mantido o mesmo grau de ventilação, quanto maior for a carga de incêndio maior será a temperatura máxima e a duração do incêndio.
- Mantida a mesma carga de incêndio e variando o grau de ventilação, percebe-se que a temperatura máxima do incêndio aumenta com o aumento da ventilação. E quanto menor a ventilação mais longa será a duração do incêndio.

3.2. Estudo Experimental

Os experimentos estudados e reportados neste trabalho foram realizados por Hejtmánek (2013) em parceria com a Universidade de Brasília (UnB) por meio do programa de intercâmbio Erasmus e, também com a colaboração do Corpo de Bombeiros Militar do DF (CBM-DF).

Esses experimentos buscaram estudar o comportamento de um incêndio em terraços de madeira, que são típicos de residências da Europa e EUA. Para o experimento foi utilizado um container de aço, que simulou a cozinha de uma residência, com uma abertura de dimensões semelhantes às de uma porta. Fora do container foi posicionado o terraço de madeira. A Figura 3.6 abaixo mostra a montagem esperada do experimento e a Figura 3.7 mostra uma das montagens feitas para o experimento.

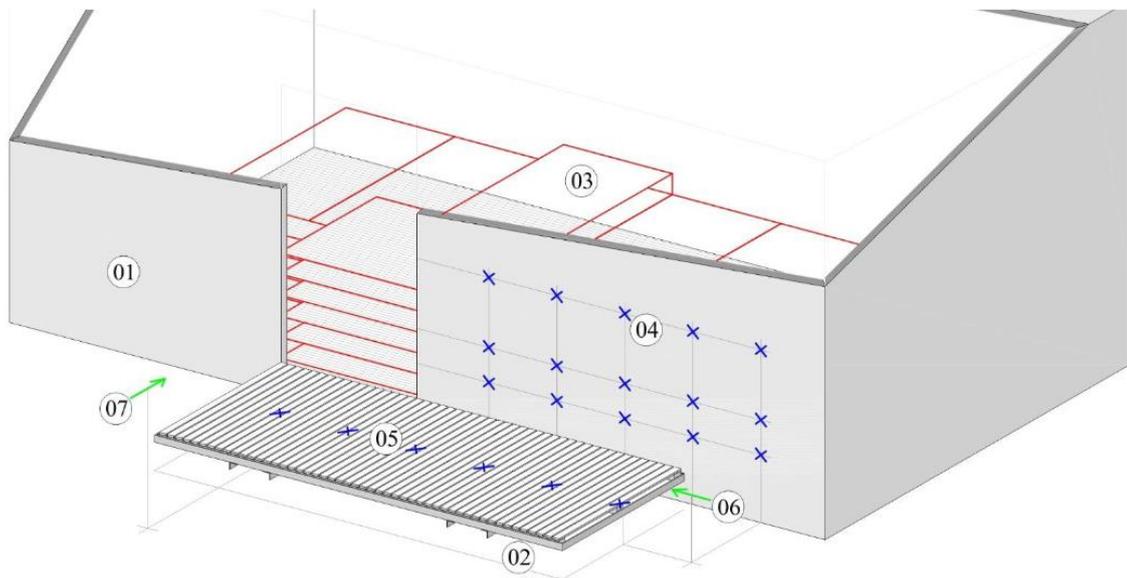


Figura 3.6 - Modelo do experimento

Fonte: (Hejtmánek, 2013)

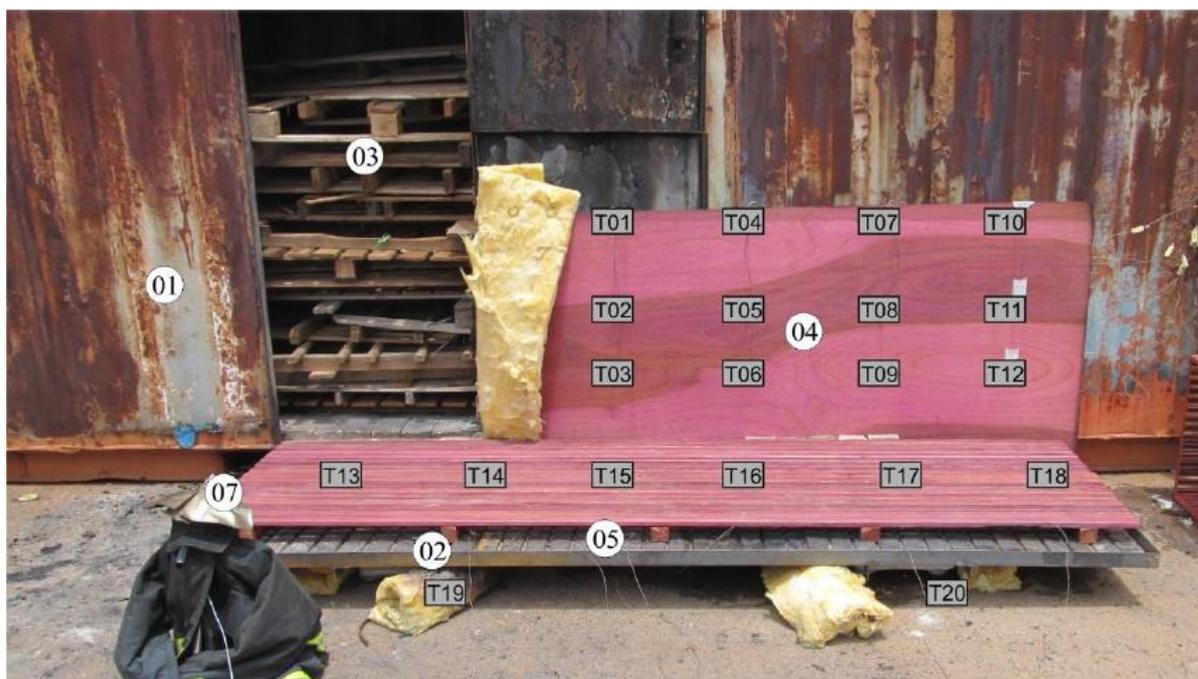


Figura 3.7 - Montagem real do experimento

Fonte: (Hejtmánek, 2013)

Para o estudo, foram utilizados diferentes tipos de terraços. Foram utilizados 4 tipos de madeiras, tipicamente brasileiras, para a construção dos terraços: Pinho, Cumaru, Roxinho e Maçaranduba. Além disso, a geometria do terraço variou de duas formas: com as tábuas paralelas ou perpendiculares à fachada do container. Dessa forma, foram feitos 8 experimentos no total, variando a madeira e a geometria do terraço.

Para simular a carga de incêndio, foram utilizados 300kg de pallets. E a temperatura foi medida através de termopares posicionados na fachada do container, no seu interior e embaixo do terraço. Além disso, também foi medido o fluxo de calor e a perda de massa do terraço. A duração dos experimentos variou de 35 a 50 minutos.

Os resultados obtidos por Hejtmánek (2013) e reportados para o termopar dentro do container (T21) e para um dos termopares da fachada (T03) estão apresentados abaixo, nas Figuras 3.8 e 3.9.

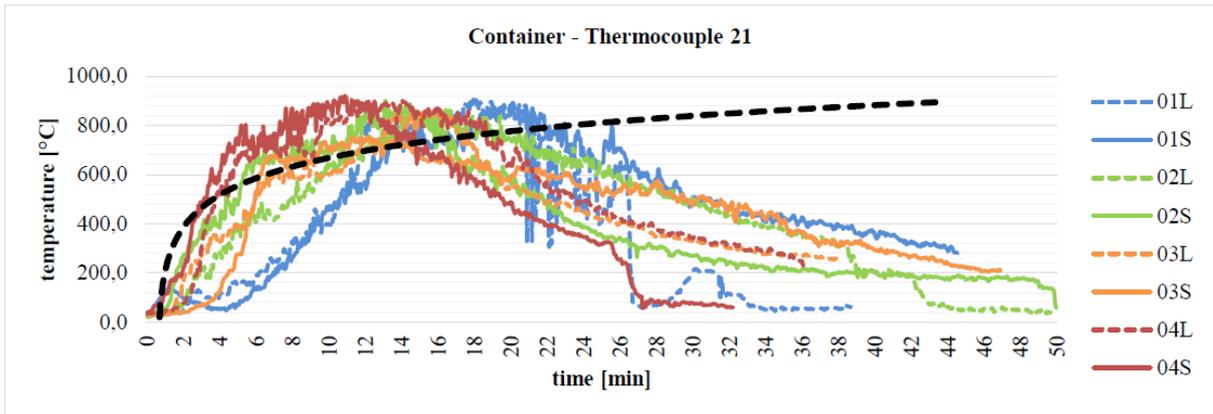


Figura 3.8 - Temperaturas no termopar T21 segundo Hejtmánek

(Fonte: Hejtmánek, 2013)

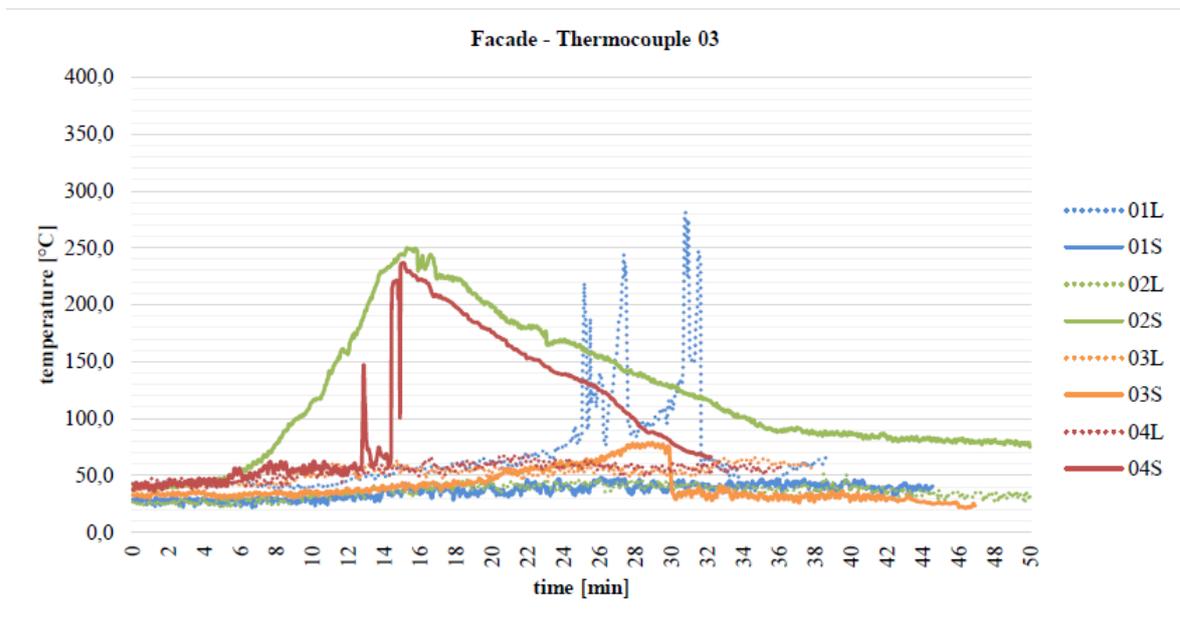


Figura 3.9 - Temperaturas no termopar T03 segundo Hejtmánek

(Fonte: Hejtmánek, 2013)

Através do gráfico da Figura 3.9, Hejtmánek chega à conclusão de que a temperatura na fachada no container aumenta por causa da propagação do incêndio no terraço, e que essa temperatura também é influenciada pela direção e velocidade do vento. Além disso, ele assume a temperatura de ignição da madeira entre 220 e 500°C, e por isso, o perigo do terraço sofrer ignição é baixo (HEJTMÁNEK, 2013).

Após as análises dos resultados, ficou concluído que estruturas de madeira do terraço não apresentam uma propagação do fogo alta, e a fachada do container também não se aquece muito (HEJTMÁNEK, 2013).

Como os dados numéricos para obtenção dos gráficos de Hejtmánek não foram disponibilizados, foi utilizado o programa *GethData Gaph Digitizer* para sua obtenção. Com esse *software*, a determinação da curva é feita a partir da imagem do gráfico e da marcação de pontos sobre a imagem. Então, foi determinado que seriam pegadas apenas metade das curvas

apresentadas na Figura 3.8 acima (aquelas com traçado contínuo, que foram obtidas com a disposição de tábuas do terraço perpendiculares à parede do container), além disso os pontos foram pegos a cada minuto da simulação. Dessa forma, foram obtidos os seguintes gráficos (Figura 3.10).

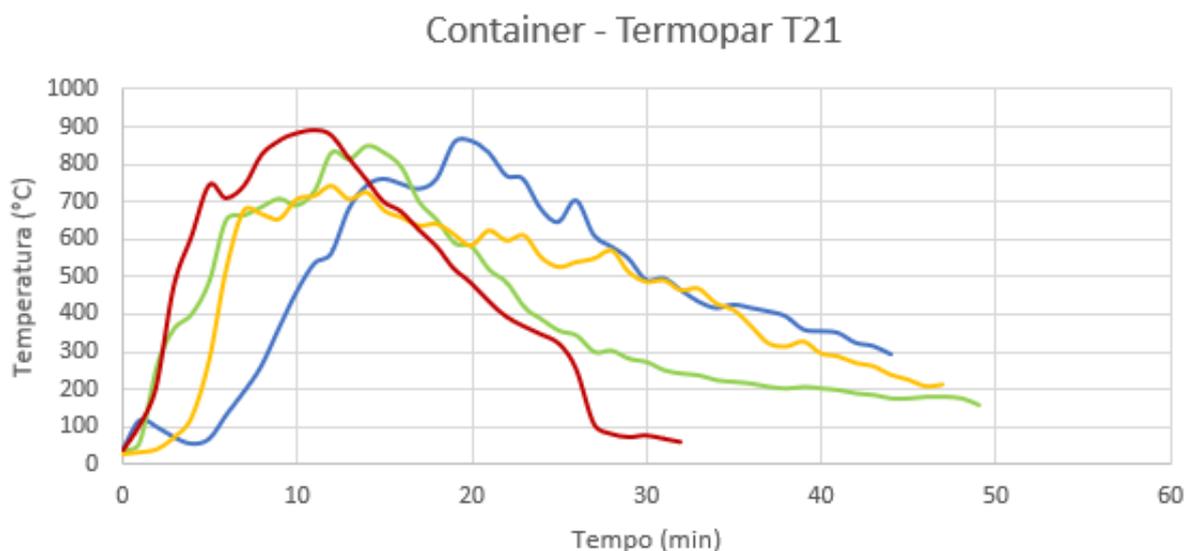


Figura 3.10 – Gráficos de temperatura obtidos pelo *GethData Gaph Digitizer*

(Fonte: elaborado pela autora)

No trabalho de Hejtmánek (2013) foram realizados oito experimentos diferentes, por isso foram obtidas 8 curvas diferentes para o termopar T21. Como esse termopar está localizado dentro do container, e em todos os experimentos foram queimados o mesmo tipo de combustível e na mesma quantidade, então as curvas obtidas com esse termopar tendem a ser bem parecidas, como pode ser observado na Figura 3.8. Sabendo disso, decidiu-se por fazer uma média das curvas, que será utilizada para a comparação com as curvas obtidas na simulação. Assim, a curva média obtida está mostrada abaixo (Figura 3.11).

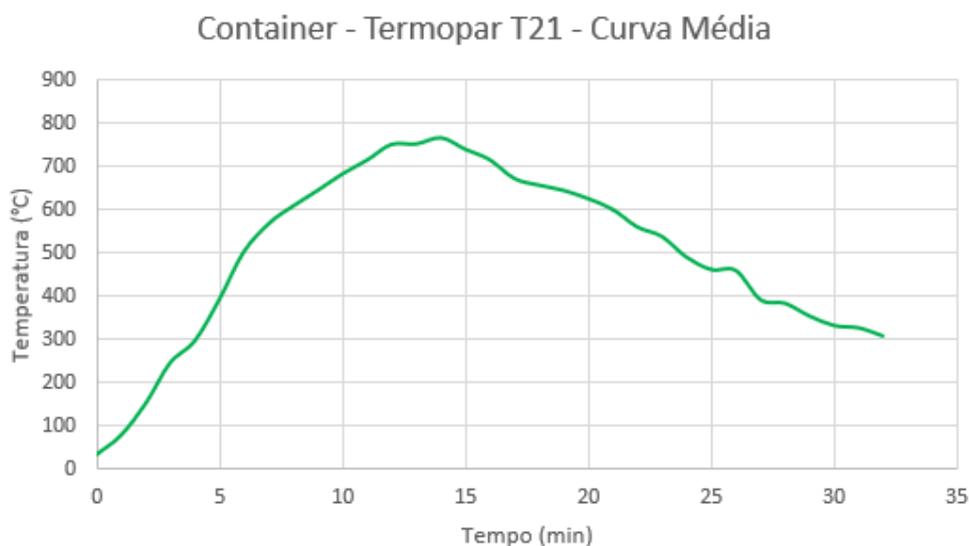


Figura 3.11 – Curva média das temperaturas no termopar T21

(Fonte: elaborado pela autora)

É importante ressaltar que a média das curvas foi feita até a duração de 32 minutos, que foi a duração da curva vermelha (apresentada na Figura 3.8). Pois, caso fosse feita a média para uma duração maior, os valores nulos dessa curva a partir dos 32 minutos iriam influenciar a curva média.

Ao se comparar a curva média com as curvas originais, percebe-se que a fase de aquecimento da curva média ocorre de forma mais suave em relação as curvas da Figura 3.10, além de possuir uma temperatura máxima menor que três das quatro curvas. Porém, ainda sim, a curva apresenta um comportamento adequado qualitativamente em relação a curva de incêndio natural.

3.3. Aspectos Computacionais

As simulações computacionais vêm sendo cada vez mais utilizadas para resolução de problemas físicos. No caso do incêndio, os experimentos em escala real são caros e difíceis de serem realizados, além de possuírem um risco associado a eles.

Os métodos computacionais utilizados em simulações geralmente se baseiam em um problema físico que deve ser solucionado. Desse problema, são feitas considerações de simplificação e são definidas condições de contorno para o problema. Com o modelo matemático definido pode-se recorrer aos softwares de simulação, que irão utilizar métodos matemáticos para resolver o modelo e retornar os resultados do problema.

3.3.1. Métodos de simulação

Dependendo do tipo de resultado que se deseja obter a partir da simulação, são utilizados diferentes tipos de modelos computacionais. Os primeiros modelos criados eram mais simples e faziam mais simplificações para obter os resultados. Mas, com o passar do tempo, com a

evolução dos computadores e da teoria por trás de cada método, os modelos de simulação foram se desenvolvendo e se refinando cada vez mais. Abaixo estão descritos dois dos principais métodos utilizados na simulação de incêndio.

3.3.1.1. Modelos de zonas múltiplas

Os modelos de zonas múltiplas começaram a ser implantados na década de 1970. Nesse modelo, o ambiente era dividido em duas partes relativamente homogêneas, em que uma era mais afetada pelo fogo que a outra. O modelo de zonas múltiplas é baseado em leis de conservação de energia e massa, suplementados por modelos de processamento físicos que descrevem o espalhamento da fumaça, o fluxo de gás pelas janelas, transferência de calor e pirólise dos sólidos. Por possuir certa simplicidade física e computacional, o modelo de zonas múltiplas foi muito utilizado, principalmente para análises de incêndio compartimentado. (GLASA et al., 2013, p.1, tradução nossa).

3.3.1.2. Computer Fluid Dynamics (CFD)

Os modelos de CFD foram estabelecidos no começo da década de 1990, quando soluções numéricas iterativas, para as equações fundamentais de conservação, foram descobertas. (RYDER et al., 2004, p.1, tradução nossa).

Esse modelo utiliza as equações de dinâmica dos fluidos para descrever a transferência de massa, momento e energia do fluxo de gás induzido pelo fogo durante o incêndio. A solução numérica dessas equações exige a divisão do espaço em uma malha tridimensional. (GLASA et al., 2013, p.1, tradução nossa).

3.3.2. Ferramentas de simulação

A seguir são apresentadas as funcionalidades e características dos softwares que serão utilizados nas simulações de incêndio deste trabalho.

3.3.2.1. Fire Dynamic Simulator (FDS)

O FDS é um software livre, que utiliza o CFD para fazer simulações de incêndio. Foi desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST) e sua primeira versão foi lançada em 2000. O FDS resolve numericamente a equação de Navier-Stokes para baixas velocidades, com fluxo termicamente orientado e dando ênfase ao transporte de calor e fumaça através do fogo. (MCGRATTAN, K et al., 2015, p.3, tradução nossa).

O programa não possui uma interface gráfica, portanto para fazer as simulações utiliza-se um arquivo de texto com os parâmetros que serão processados. Dessa forma, o FDS lê o arquivo de texto, processa os dados, resolve as equações governantes e retorna um arquivo de dados com os resultados.

O *Smokeview* (SMV) é outro software utilizado juntamente com o FDS para analisar os dados obtidos pela simulação. Ele permite a visualização do ambiente, dos materiais, do incêndio e gráficos dos resultados.

O FDS utiliza diferentes estratégias de modelagem dependendo do fenômeno abordado. O algoritmo principal é um esquema de predição correção explícito, com precisão de segunda

ordem no espaço e no tempo. A turbulência é modelada através do *Large Eddy Simulation* (LES). A combustão é modelada utilizando frações de massa. E utiliza *Finite Volumes Method* (FVM) para modelar a transferência de calor por radiação. (GLASA *et al.*, 2013, p.1, tradução nossa).

A seguir estão apresentados nas Figuras 3.12, 3.13 e 3.14 o arquivo de texto de dados de entrada com os parâmetros de entrada no FDS, o próprio FDS fazendo a simulação e os resultados obtidos no SMV, respectivamente.

```
&HEAD CHID='box_burn_away' /
&TIME T_END=30.0, WALL_INCREMENT=1/
&DUMP DT_RESTART=300.0, DT_SL3D=0.25/

&MESH ID='Mesh01', IJK=10,10,10, XB=0.0,1.0,0.0,1.0,0.0,1.0/

&REAC ID='METHANE',
      FYI='AFT NIST Multi-Floor FDS5 Validation',
      FUEL='METHANE',
      AUTO_IGNITION_TEMPERATURE=1.5E4/

&DEVC ID='HRR', QUANTITY='HRR', XB=0.0,1.0,0.0,1.0,0.0,1.0/

&MATL ID='FOAM',
      FYI='Caution: Reaction Rate Not Validated, remaining data from Jukka Hi
SPECIFIC_HEAT=1.0,
CONDUCTIVITY=0.2,
DENSITY=20.0,
HEAT_OF_COMBUSTION=0.0,
N_REACTIONS=1,
HEAT_OF_REACTION=800.0,
REFERENCE_TEMPERATURE=200.0/

&SURF ID='Foam',
      RGB=153,0,0,
      BURN_AWAY=.TRUE.,
      MATL_ID(1,1)='FOAM',
      MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
      THICKNESS(1)=0.1/
&SURF ID='Hot',
      COLOR='RED',
```

Figura 3.12 - Arquivo de texto do FDS.

(Fonte: elaborado pela autora)

```
Selecionar FDS
C:\Users\Gabi\Desktop\box_burn_away1>fds box_burn_away1.fds

Starting FDS ...

MPI Process      0 started on DESKTOP-P70AFCL

Reading FDS input file ...

Fire Dynamics Simulator

Current Date      : November 29, 2020  14:08:09
Revision         : FDS6.7.5-0-g71f025606-release
Revision Date    : Thu Aug 20 16:19:01 2020 -0400
Compiler        : Intel ifort 19.1.1.216
Compilation Date : Fri 08/21/2020  04:51 PM

MPI Enabled;      Number of MPI Processes:      1
OpenMP Enabled;  Number of OpenMP Threads:      2

MPI version: 3.1
MPI library version: Intel(R) MPI Library 2019 Update 7 for Windows* OS

Job TITLE        : Test BURN_AWAY feature
Job ID string    : box_burn_away1

Time Step:       1, Simulation Time:           0.01 s
Time Step:       2, Simulation Time:           0.02 s
Time Step:       3, Simulation Time:           0.03 s
Time Step:       4, Simulation Time:           0.04 s
Time Step:       5, Simulation Time:           0.05 s
Time Step:       6, Simulation Time:           0.06 s
Time Step:       7, Simulation Time:           0.07 s
Time Step:       8, Simulation Time:           0.08 s
Time Step:       9, Simulation Time:           0.09 s
Time Step:      10, Simulation Time:           0.10 s
Time Step:      20, Simulation Time:           0.20 s
Time Step:      30, Simulation Time:           0.30 s
Time Step:      40, Simulation Time:           0.40 s
Time Step:      50, Simulation Time:           0.50 s
Time Step:      60, Simulation Time:           0.60 s
Time Step:      70, Simulation Time:           0.70 s
```

Figura 3.13 - Simulação no FDS

(Fonte: elaborado pela autora)

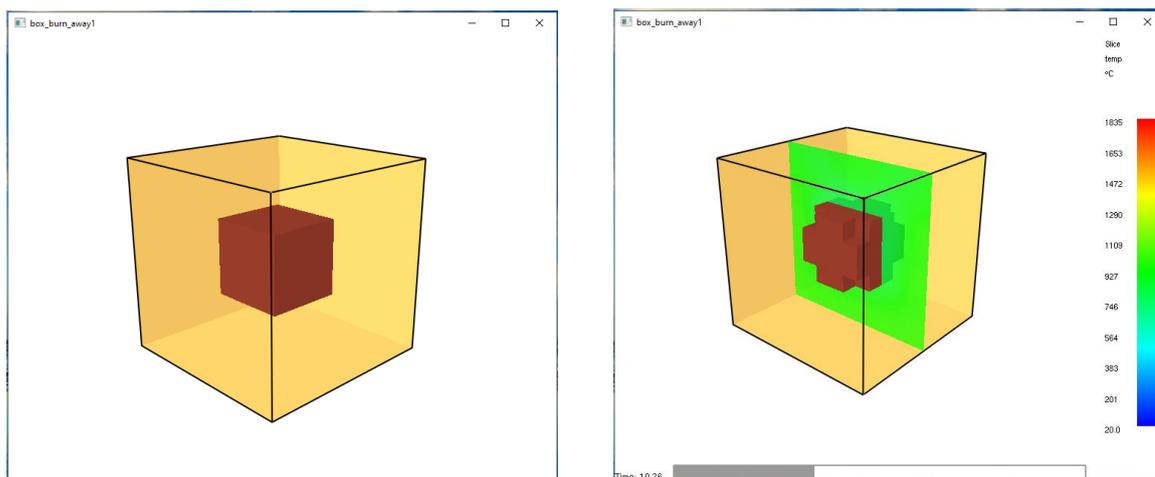


Figura 3.14 - Resultados da simulação representados no SMV

(Fonte: elaborado pela autora)

3.3.2.2. *Pyrosim*

O Pyrosim é uma interface gráfica para a utilização do FDS. Ele foi desenvolvido pela *Thunderhead Engineering* (Thunderhead Engineering, 2021b) e não é um software livre. Sendo possível fazer o download de um teste do software com licença de um mês e pode ser solicitada uma licença de estudante, com duração de seis meses.

Com o Pyrosim é possível criar estruturas um pouco mais complexas, como escadas e estruturas curvas, de forma interativa. Além disso, também é possível inserir os parâmetros de material, superfície, incêndio, e várias outras informações de forma compatível com o FDS. O FDS e o SMV já estão integrados ao Pyrosim, o que facilita a importação e exportação de arquivos entre os softwares. E ele também permite a importação de arquivos tipo DXF e a manipulação desses arquivos dentro do software.

A Figura 3.15 mostra a interface do Pyrosim para o exemplo da Figura 3.12. E como pode ser visto com a interface gráfica do Pyrosim, a modelagem fica mais interativa e fácil de ser feita.

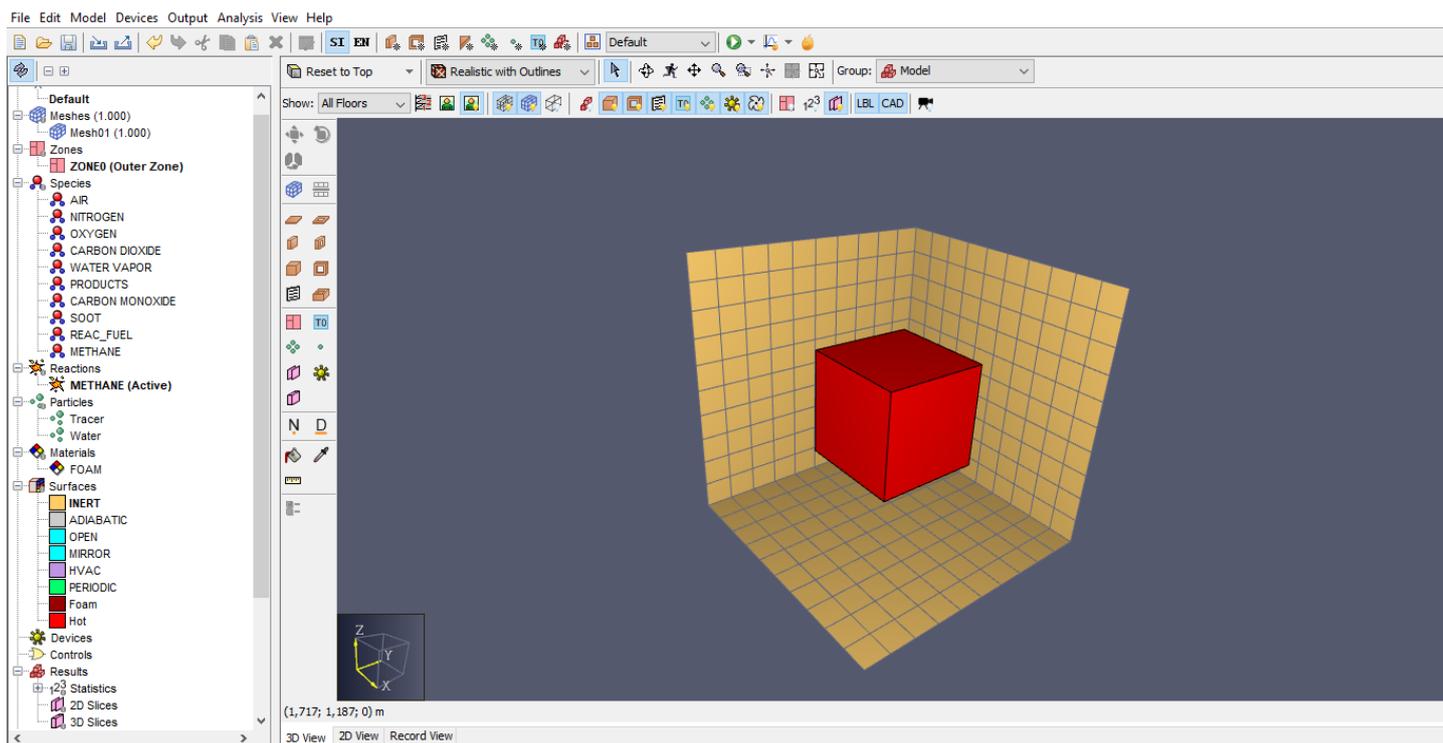


Figura 3.15 - Modelagem da simulação no Pyrosim

(Fonte: elaborado pela autora)

Usando o trabalho de Sales (2018) e os manuais do FDS e Pyrosim como referências, será apresentado, no Apêndice A, um breve roteiro de utilização do FDS. Em que será feita uma simulação de uma sala com dimensões 4m x 4m x 2,8m, e será colocado um bloco no centro da sala onde será iniciado o incêndio.

3.4. Modelo da simulação de um incêndio real

As simulações do incêndio estudado na seção 3.2 foram feitas utilizando o *software* Pyrosim versão 2021.1.0224 (THUNDERHEAD ENGINEERING, 2021) instalado em um *notebook* com processador AMD Ryzen 5 3500U 2.10GHz e 8GB de memória RAM.

A partir dos dados apresentados anteriormente sobre o estudo experimental desenvolvido por Hejtmánek (2013), sobre o software PyroSim e levando em consideração o roteiro apresentado no Apêndice A, serão apresentados a seguir os modelos de simulação feito neste trabalho, bem como os resultados de alguns testes feitos para se chegar ao modelo completo.

Será feito o estudo de duas simulações diferentes, para comparação de duas distribuições diferentes de carga de incêndio. Esse foi um dos parâmetros que não foi completamente definido por Hejtmánek (2013), e, como foram feitos oito experimentos no total, pode ser que essa disposição tenha variado de um experimento para outro.

Os parâmetros das simulações estão descritos a seguir, e abaixo seguem uma breve descrição de cada caso estudado.

- Caso 1: foi simulado o container juntamente com o terraço, e foi utilizada uma carga de incêndio igual a 12 pallets divididos em duas pilhas no centro do container.
- Caso 2: foi simulado apenas o container, com a mesma carga de incêndio anterior, porém com uma distribuição diferente (apresentada na Figura 3.20)

As diferenças entre os casos estão apresentadas de forma mais detalhada no item a seguir.

3.4.1. Modelo final

Tendo como modelo os experimentos feitos por Hejtmánek (2013), foi modelado um container de aço com uma abertura frontal, à frente da abertura, foi colocado o terraço e dentro do container foram colocados os pallets, que representam a carga de incêndio.

3.4.1.1. Configurações iniciais

As simulações realizadas foram feitas com duração de 2100 segundos (35 minutos), que foi a duração média dos experimentos feitos por Hejtmánek (2013).

Na reação de combustão, foi considerado que o único material a ser queimado é a madeira e a reação possui a seguinte formulação química $\text{CH}_{1,70}\text{O}_{0,74}\text{N}_{0,002}$ e com as seguintes taxas de liberação de fuligem e CO (monóxido de carbono) respectivamente, 0,015kg/kg e 0,004kg/kg. E, além disso, também foi adicionado um calor de combustão de 17500 kJ/kg a reação. Esses parâmetros estão apresentados na Figura 3.16 abaixo.

Figura 3.16 – Parâmetros da reação

(Fonte: elaborado pela autora)

As condições ambientais (temperatura, pressão atmosférica, umidade e vento) foram consideradas com os valores de default do PyroSim, e foi um dos parâmetros testados antes da determinação do modelo completo.

3.4.1.2. Domínio computacional e malha

Para considerar o fluxo de fumaça, foi determinado um domínio computacional maior que as obstruções analisadas. De forma geral, foi considerado um acréscimo de 1,0 m para cada lado da obstrução, exceto para na face frontal. Logo, as dimensões do domínio computacional foram apresentadas na Tabela 3.2, e teremos uma malha cúbica de 10cm.

Tabela 3.2 - Dimensões da malha

Dimensões (m)		
Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
8,0	4,1	6,0

(Fonte: elaborado pela autora)

Para indicar que existem aberturas para fora do domínio, foram colocadas superfícies abertas (OPEN VENTS) nos extremos do domínio computacional. Garantindo assim, uma comunicação entre o exterior e o interior da malha (TABACZENSKI).

3.4.1.3. Propriedades dos materiais

Para determinar os materiais a serem utilizados na simulação é necessário especificar suas propriedades e posteriormente criar superfícies correspondentes a cada material. Na Tabela 3.3 a seguir, estão apresentadas as propriedades dos materiais considerados nas simulações, são eles: o aço do container, a madeira dos pallets e a do terraço.

Em seu trabalho, Hejtmánek (2013) define algumas propriedades das madeiras utilizadas na confecção dos terraços, porém ele não apresenta as propriedades térmicas delas. Dessa forma, para a madeira do terraço foi considerada a densidade apresentada em Hejtmánek (2013), e os demais parâmetros foram considerados iguais ao da madeira “Yellow Pine” que são fornecidos pelo PyroSim.

Tabela 3.3 - Propriedade dos materiais

Material	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (kJ/(kg.K))	Condutividade (W/ (m.K))	Emissividade
Steel	7850	0,46	45,80	0,95
Yellow Pine	640	2,85	0,14	0,90
Pinus	388	2,85	0,14	0,90

(Fonte: elaborado pela autora)

O tipo da superfície desses materiais foi definido como ‘Layered’ e as especificações de cada superfície e as propriedades dos materiais estão apresentadas com mais detalhes no Apêndice B.

A ignição das pilhas de pallets não foi descrita no trabalho de Hejtmánek (2013), por isso ela foi outro parâmetro analisado através dos testes mencionados acima e apresentado na próxima seção. Após a realização e análise dos testes, a forma de ignição escolhida foi através de um “queimador”. Dessa forma a ignição é feita colocando uma superfície do tipo “Burner” em cima do pallet.

Esse tipo de superfície libera uma taxa de liberação calor (TLC) por metro quadrado, também é definida uma temperatura na qual a superfície se encontrará no início da simulação. Os parâmetros utilizados no “queimador” utilizado estão apresentados na Figura 3.17 abaixo.

Além disso, foi definido um controle para a superfície do “queimador”, nesse caso, o controle desativa a superfície no tempo escolhido. Assim, para a simulação final o “queimador” foi desativado após 240 segundos de simulação.

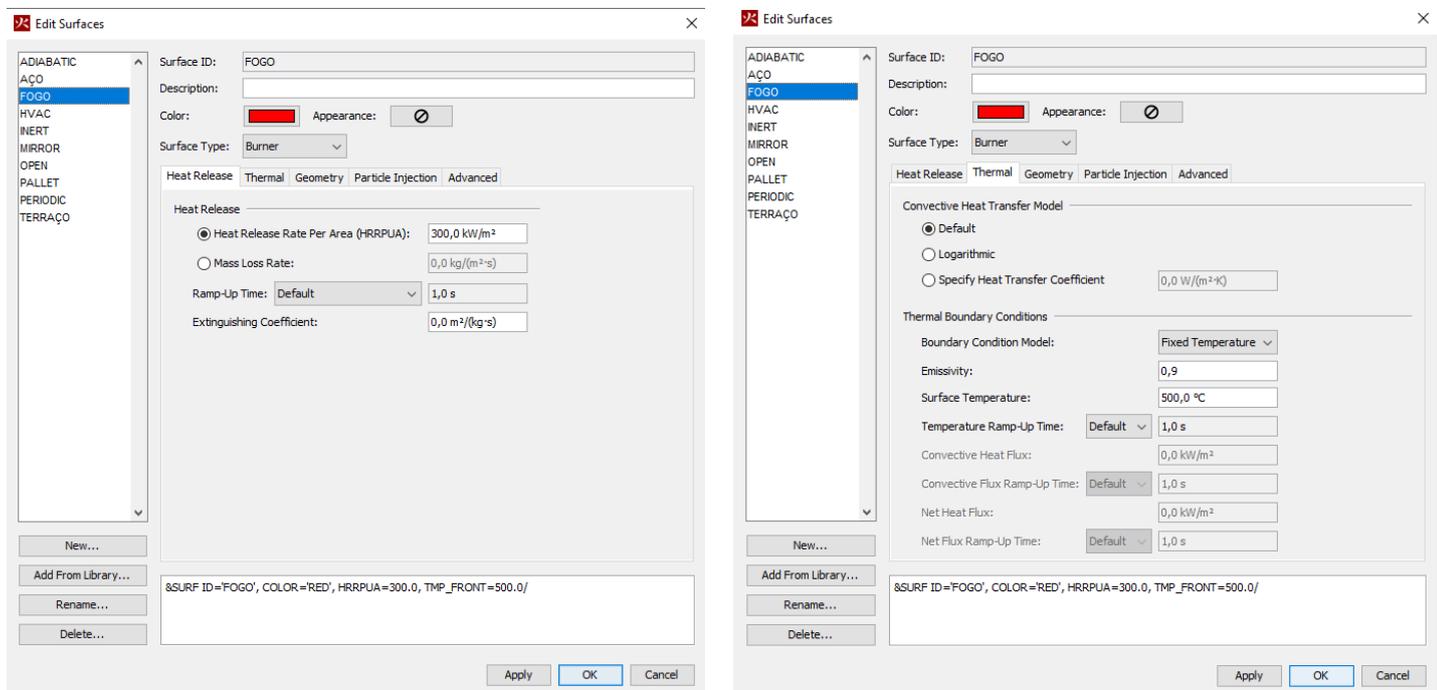


Figura 3.17 - Parâmetros do "queimador"

(Fonte: elaborado pela autora)

3.4.1.4. Modelagem do ambiente

A modelagem do ambiente foi dividida em 3 grupos: um para os pallets, outro para o container e o último para o terraço. Todos os objetos foram criados com a função obstrução citada no roteiro de utilização do Apêndice A.

o Pallets

Para a modelagem dos pallets foi criado um modelo mais simplificado do que um pallet comum, mas que ainda possui certo fator de abertura. Dessa forma, as dimensões utilizadas se assemelham às dimensões de um pallet padrão conforme PBR I – “Especificação do palete padrão para distribuição nacional – Comitê permanente de paletização”, com 1,2m de comprimento, 1,0m de largura e 0,20m de altura. A Figura 3.18 mostra como foi feita a

modelagem do pallet, embaixo foram colocados 3 blocos com 0,10 x 0,10m e na parte de cima um bloco sólido de 1,2x1,0mx0,10m.

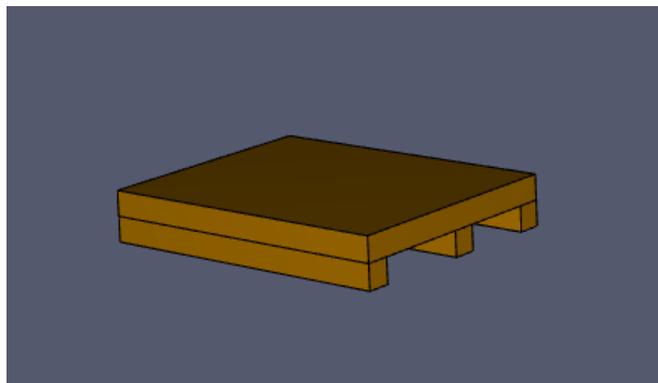


Figura 3.18 - Modelo do pallet

(Fonte: elaborado pela autora)

No total foram modelados 12 pallets. Segundo PBR I – “Especificação do palete padrão para distribuição nacional – Comitê permanente de paletização” o peso máximo de um pallet é de 42kg, e, além disso, o peso utilizado por Mata (2018) foi de 20kg. Sabendo disso, foi estimado um peso de 25kg para cada pallet, totalizando uma massa de madeira igual a 300kg (a mesma utilizada no experimento de Hejtmánek).

Para os dois casos apresentados serão utilizadas distribuições de pallets diferentes, logo as distribuições para cada caso estão apresentadas nas Figuras 3.19 e 3.20 abaixo.

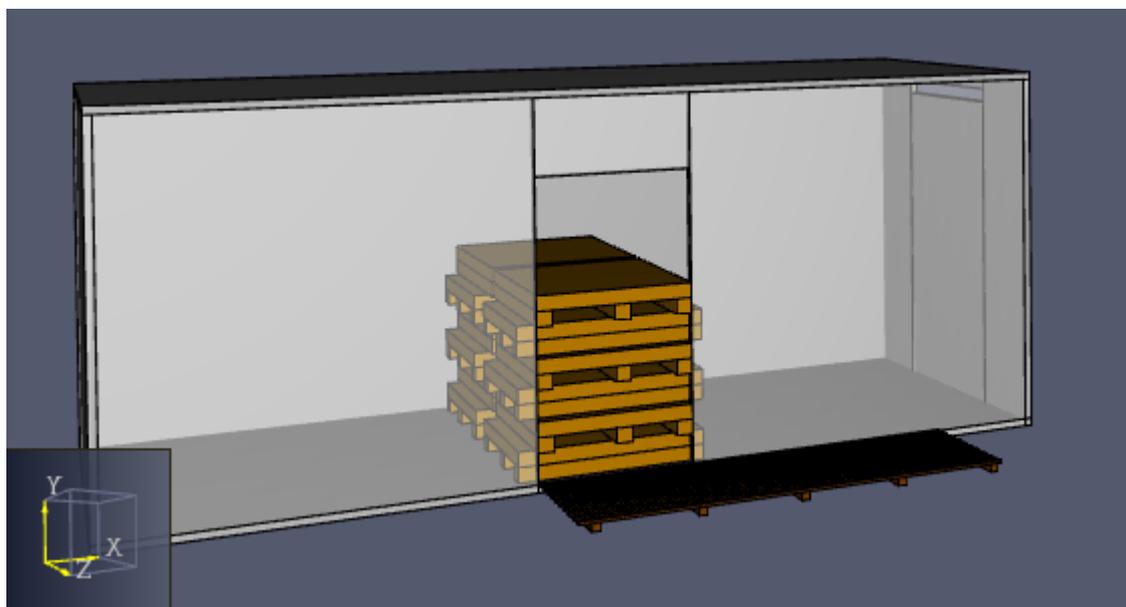


Figura 3.19 - Distribuição dos pallets - Caso 1

(Fonte: elaborado pela autora)



Figura 3.20 - Distribuição dos pallets - Caso 2

(Fonte: elaborado pela autora)

- Container

O container foi criado com as mesmas dimensões mencionada por Hejtmánek (2013), com 6,0x2,6x2,5m. E a espessura utilizada foi de 5 cm. Além disso, foi considerada a abertura de uma porta de 2,0x1,0m. Em seu trabalho Hejtmánek (2013) cita a presença de uma outra abertura no container, como uma janela. Porém seu tamanho e local não são especificados. Dessa forma, foi considerada uma pequena abertura de uma janela na face direita do container, com dimensões de 1,3 x 0,1 m. A Figura 3.21 abaixo mostra como ficou a modelagem do container.

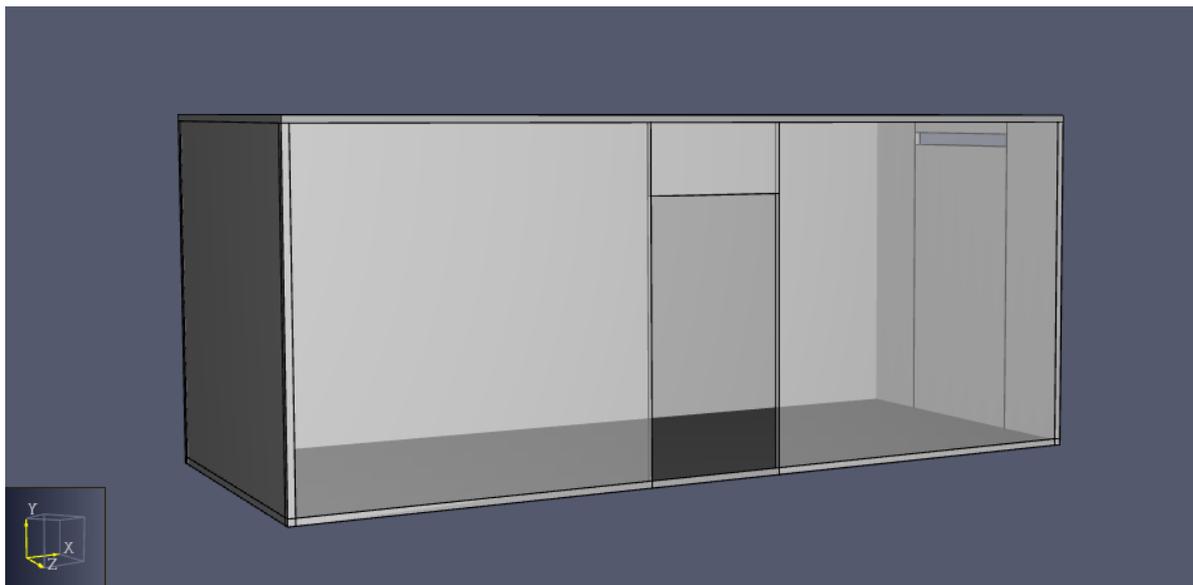


Figura 3.21 - Modelo do container

(Fonte: elaborado pela autora)

A parede frontal foi modelada com uma maior transparência para ser possível visualizar o incêndio e propagação de fumaça dentro do container.

- Terraço

O terraço tinha dimensões iguais a 2750 x 950 mm, composto por tábuas de seção transversal igual a 50 x 20 mm e com os cantos superiores chanfrados. O espaçamento entre as tábuas era igual a 5mm. O suporte do terraço foi feito com a madeira Massaranduba, com seção transversal de 50 x 50mm, e distância axial de 650mm. (HEJTMÁNEK, 2013, p.4, tradução nossa).

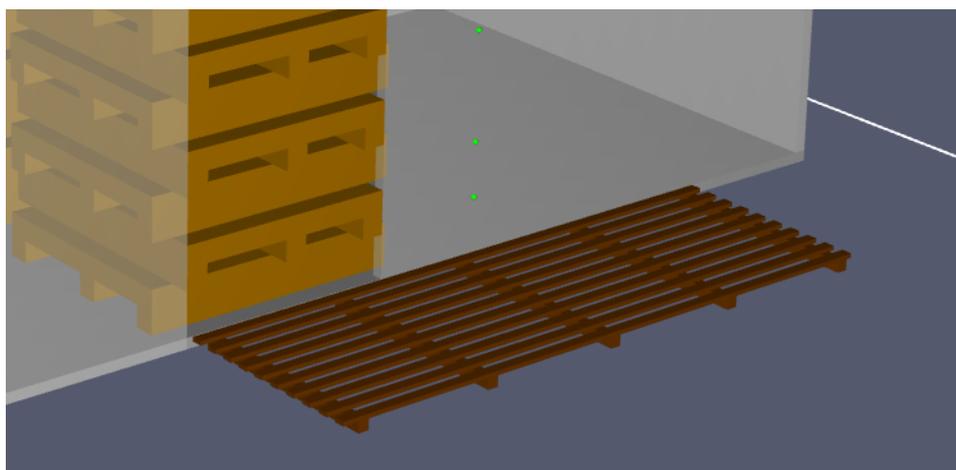


Figura 3.22 - Modelo do terraço no PyroSim

(Fonte: elaborado pela autora)

Apesar de o terraço ter sido modelado conforme as medidas do experimento, durante a simulação o FDS modifica todas as obstruções para que elas se moldem a malha escolhida. Como algumas dimensões do terraço são menores que as dimensões das células da malha

(definida acima) então o FDS adaptou a geometria do terraço. A Figura 3.23 abaixo mostra como ficou a modelagem do terraço no FDS após a simulação. Como pode ser visto, as tábuas foram tratadas como uma placa de pequena espessura, e alguns blocos de sustentação ficaram com dimensões maiores enquanto outros foram tratados apenas como uma “folha”.

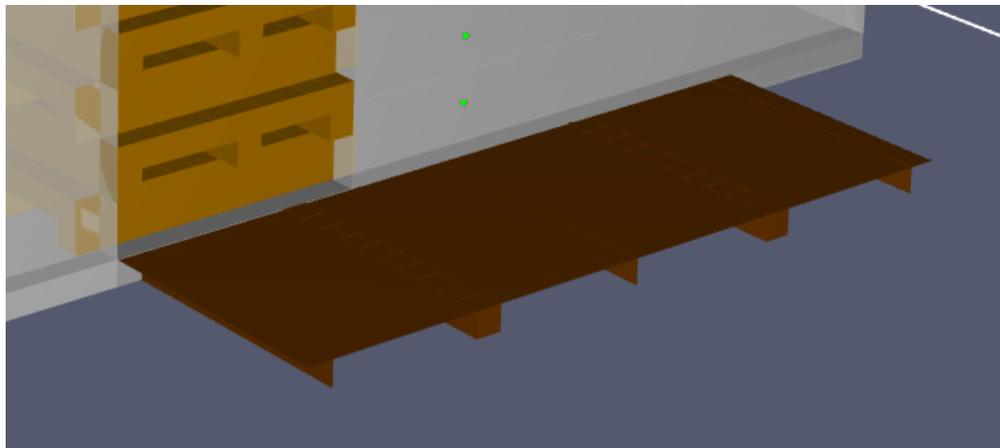


Figura 3.23 - Modelo do terraço no FDS

(Fonte: elaborado pela autora)

Conforme apresentado anteriormente, o Caso 2 não levou em consideração o terraço. Nesse caso, foi levantada a hipótese de que o terraço não influencia na temperatura medida dentro do container, e por isso, ele foi omitido da simulação.

3.4.1.5. Dispositivos de medição

Os dispositivos de saída utilizados no modelo do Caso 1 foram:

- um termopar (T21) no centro do container, a uma altura de 0,35m do piso;
- um plano de temperatura posicionado no meio do eixo z do container, conforme apresentado na Figura 3.18;
- 8 termopares (T22.1 a T 22.4 e T23.1 a T23.4) localizados nos cantos do container, a 0,5 metros do piso e do teto;
- Um termopar posicionado na parede do container, assim como feito no experimento (T03).
- Dois termopares (TV01 e TV02) localizados na linha central do container, um na parte frontal e outro na parte posterior. Esses termopares são aqueles que medirão a temperatura no centro da viga que será analisada no capítulo 4.

As Figuras 3.24 e 3.25 apresentam a localização dos outputs para o Caso 1, mencionados acima.

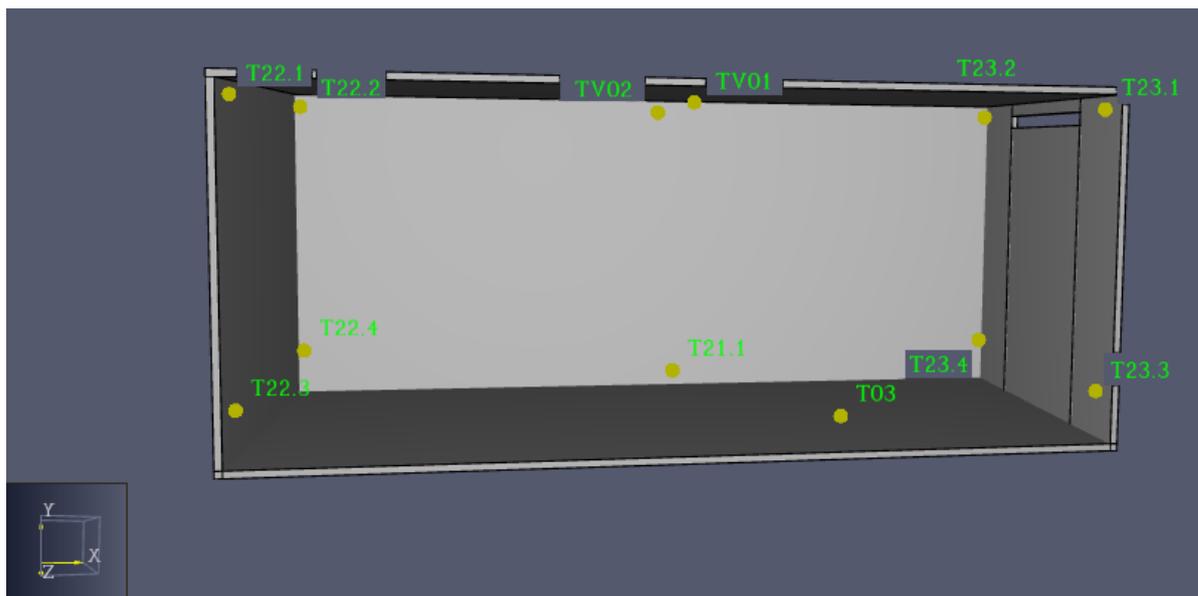


Figura 3.24 - Localização dos termopares

(Fonte: elaborado pela autora)

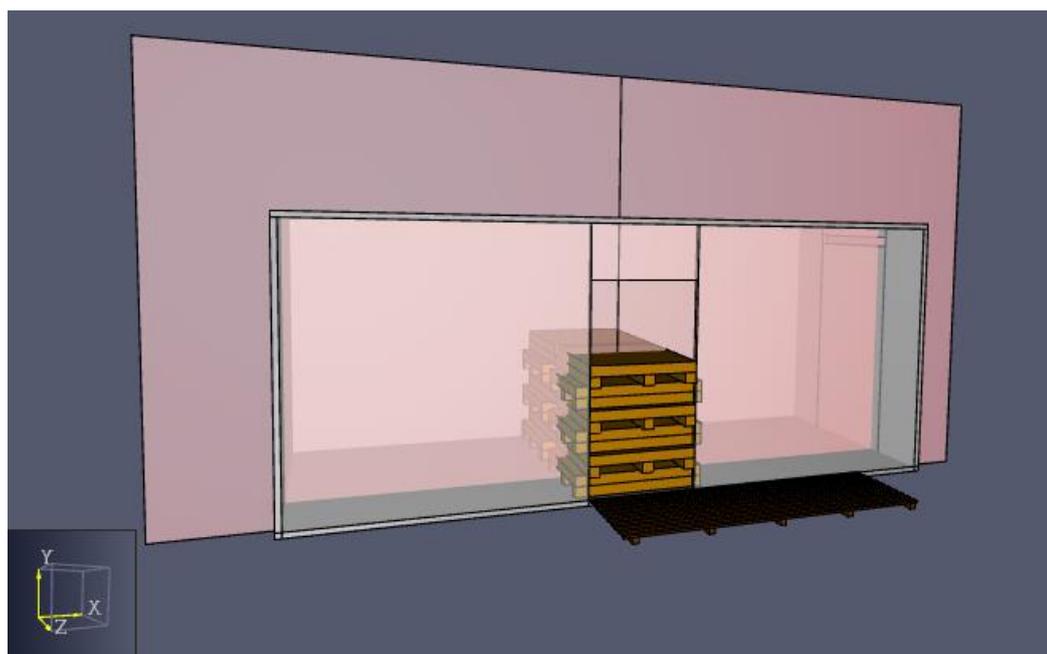


Figura 3.25 - Localização do plano de temperatura

(Fonte: elaborado pela autora)

Para o Caso 2, os dispositivos de saída considerados foram apenas o termopar T21.1, termopar T03 e o plano de temperatura todos na mesma posição indicada acima (para o Caso 1).

3.4.2. Testes

Como falado anteriormente, alguns testes foram realizados para determinar alguns parâmetros que não foram obtidos a partir do estudo experimental de Hejtmánek (2013). Os parâmetros não obtidos foram: forma de ignição e uso das condições ambientais.

3.4.2.1. Forma de ignição

As duas formas de ignição analisadas foram:

- “Queimador”: como definido anteriormente, essa forma de ignição considera uma superfície tipo “Burner” em cima do pallet. Nesse caso, esse “queimador” irá se manter na simulação com uma determinada temperatura e irá liberar calor a uma certa taxa.
- Bloco de madeira: essa forma de ignição foi feita usando a premissa de que um pequeno bloco de madeira pega fogo logo no início da simulação. Esse bloco de madeira foi colocado dentro de um dos pallets. Primeiro foi modelado um bloco de madeira que possui as mesmas propriedades dos pallets, e as propriedades de liberação de calor e temperatura de ignição foram modificadas de forma que o bloco pegasse fogo instantaneamente. O bloco de madeira utilizado para ignição tem as seguintes dimensões: 10 x 15 x 15 cm.

Abaixo estão apresentadas as propriedades modificadas da superfície do bloco de madeira que sofrerá a ignição.

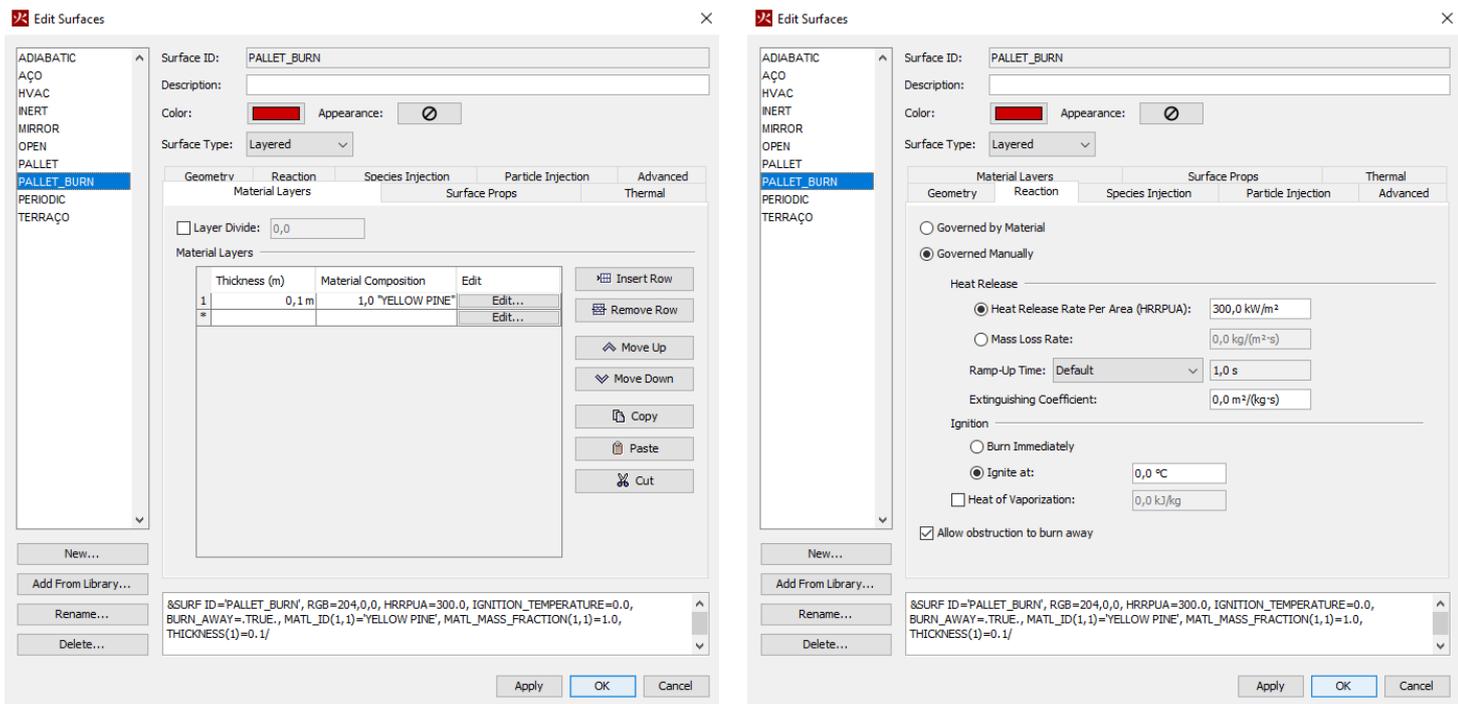


Figura 3.26 - Parâmetros da ignição através do bloco de madeira

(Fonte: elaborado pela autora)

Os testes realizados para determinação da forma de ignição foram feitos desconsiderando o container e o terraço, ou seja, a simulação ocorreu apenas com a pilha de pallets no modelo, como mostrado a seguir.

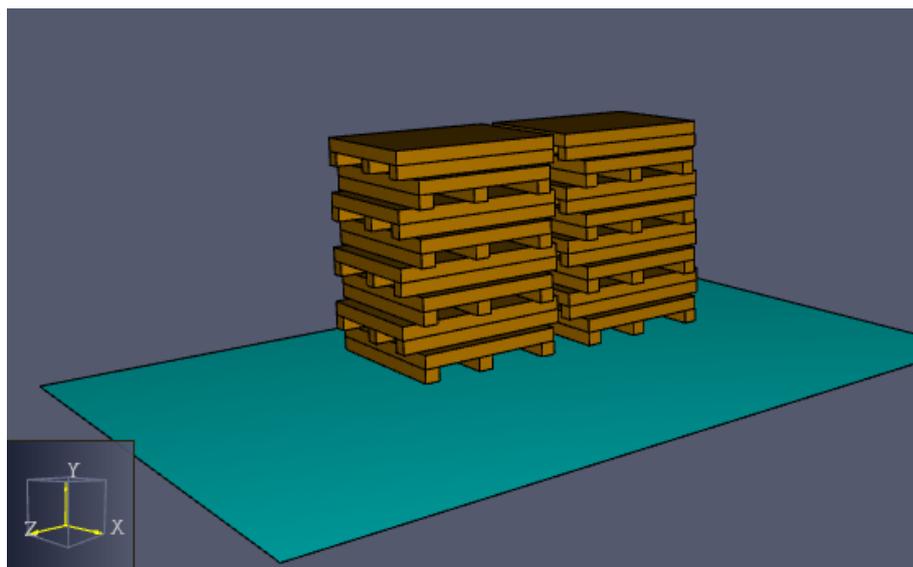


Figura 3.27 - Modelo do teste de ignição

(Fonte: elaborado pela autora)

De acordo com os resultados das simulações, a forma de ignição foi escolhida com base no desenvolvimento do incêndio, ou seja, a forma de ignição que possibilitou o desenvolvimento mais lento do incêndio foi a escolhida, por se aproximar mais da realidade do experimento.

Abaixo são apresentados os resultados dos testes com ignição através do “queimador” e do bloco de madeira. Notando que as curvas estão reportadas até um tempo de 900 segundos, pelo fato do tempo de processamento das simulações ser muito longo.

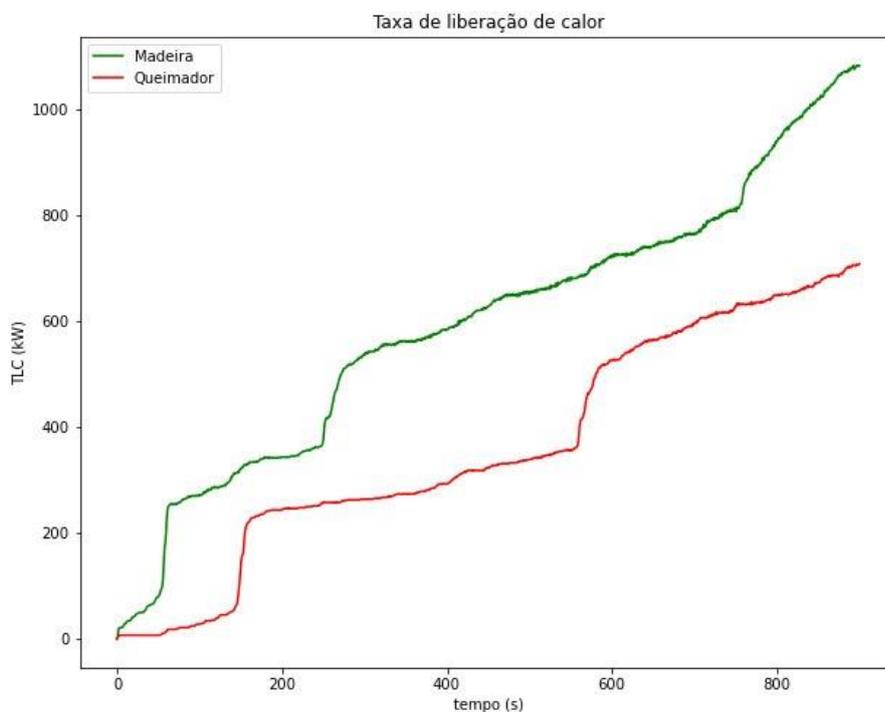


Figura 3.28 - TLC para as duas formas de ignição

(Fonte: elaborado pela autora)

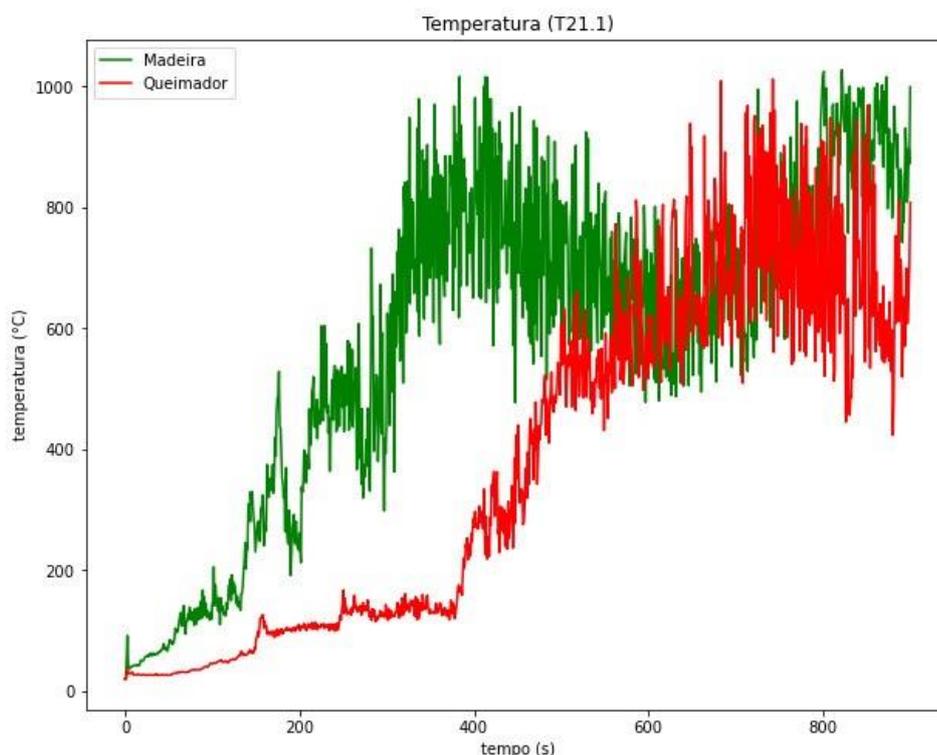


Figura 3.29 - Temperatura para as duas formas de ignição

(Fonte: elaborado pela autora)

O gráfico de taxa de liberação de calor (TLC) mostra um comportamento parecido em ambos os casos, porém os valores para ignição com o bloco de madeira superam os do queimador durante todo o teste, demonstrando que a queima nesse caso ocorre de forma mais lenta em relação àquele.

Para o gráfico de temperaturas, percebe-se um aumento de temperatura mais rápido com o uso do bloco de madeira, e um comportamento de certa forma oscilatório após atingir o pico. E com o uso do queimador, tem-se um aumento mais lento da temperatura.

3.4.2.2. Condições ambientais

Esse teste teve como objetivo determinar se as condições ambientais deveriam ou não serem utilizadas no modelo do PyroSim. Já que, evidentemente, elas estavam presentes durante os ensaios experimentais. Assim, o teste buscou comparar os resultados de uma simulação feita com os parâmetros ambientais dados pelo PyroSim com os parâmetros ambientais no dia da simulação. Esses parâmetros foram obtidos no site do INMET para o dia e horário aproximado de um dos experimentos (04/12/2013 às 9:00). Esses dados estão apresentados na Tabela 3.4 abaixo.

Tabela 3.4 - Parâmetros das condições ambientais

Condições Ambientais		
Temperatura		21,8 °C
Pressão atmosférica		88640 Pa
Umidade Relativa do Ar		81%
Vento	Velocidade	1,3 m/s
	Direção	29°

(Fonte: INMET)

As simulações realizadas para esse teste foram feitas considerando o container na simulação, porém ser considerar o terraço. Conforme apresentado na Figura 3.30 abaixo.

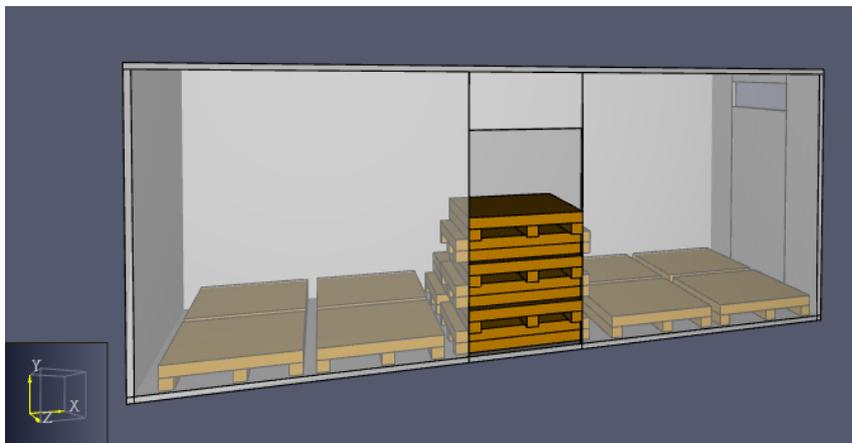


Figura 3.30 – Modelo do teste de condições ambientais

(Fonte: elaborado pela autora)

Após serem realizadas as simulações com e sem os parâmetros ambientais, percebeu-se que a diferença nos gráficos de temperatura e de taxa de liberação de calor não foi muito significativa. Dessa forma, escolheu-se fazer a simulação completa sem a ação do vento, já que o tempo de simulação nessa situação é mais reduzido.

Abaixo, tem-se a comparação dos gráficos de temperatura no termopar 21 (no centro do container) e de taxa de liberação de calor.

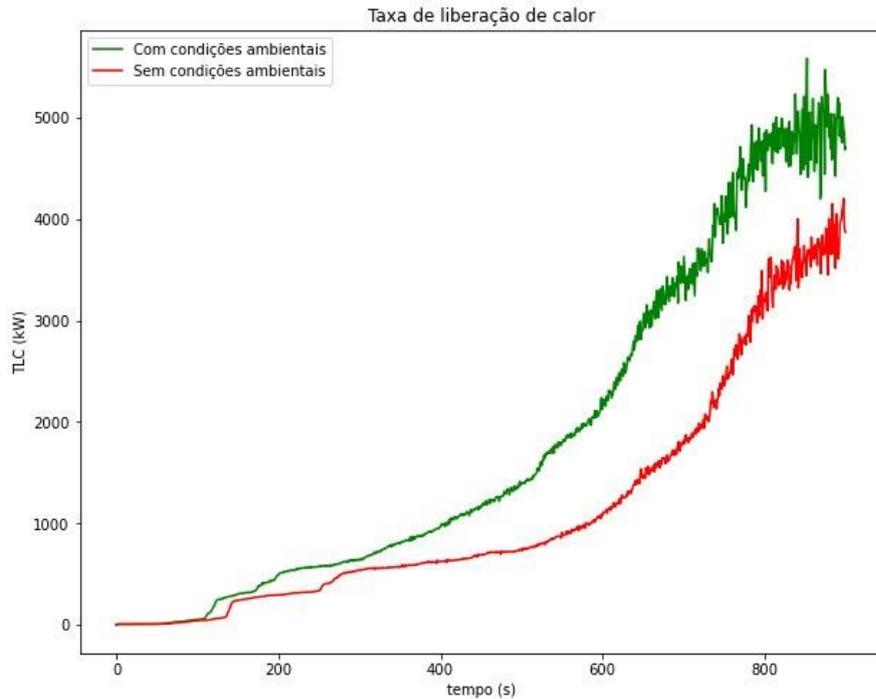


Figura 3.31 – TLC para o teste de condições ambientais

(Fonte: elaborado pela autora)

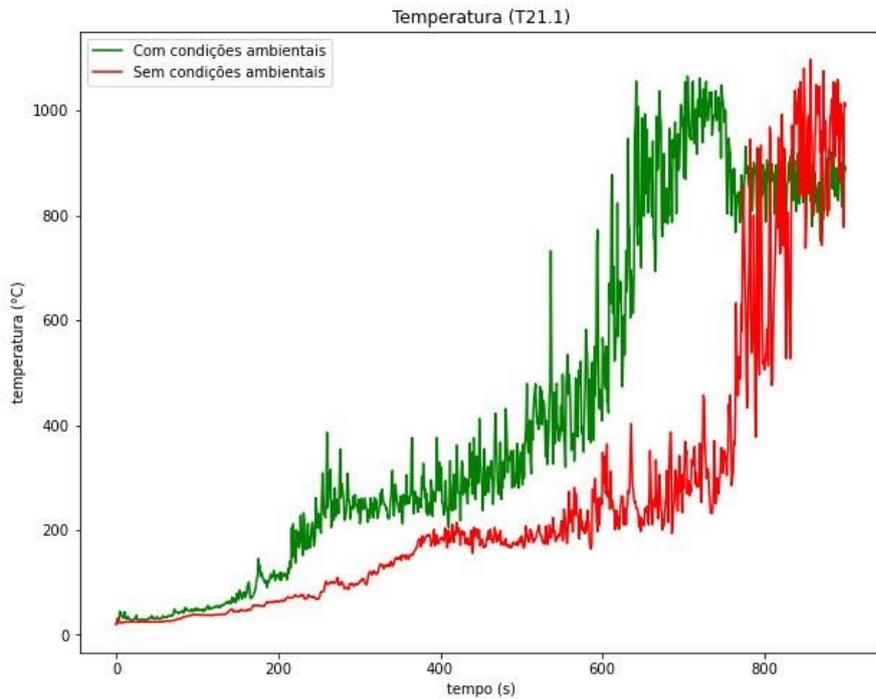


Figura 3.32 – Temperatura para o teste de condições ambientais

(Fonte: elaborado pela autora)

Em ambos os gráficos, o teste com condições ambientais apresentou valores maiores em relação ao teste sem as condições ambientais. Porém, como pode ser visto acima, o comportamento dos gráficos é bem semelhante e a diferença de valores não foi tão significativa. Por isso, foi escolhido trabalhar a simulação completa sem as condições ambientais.

3.5. Análise dos resultados numéricos e experimentais

Antes de serem feitas as análises dos resultados obtidos por meio das simulações, é importante salientar que as simulações foram divididas em rodadas de aproximadamente 900 segundos cada, totalizando, no final, 3 rodadas para cada caso estudado. Por causa das limitações computacionais do *notebook* utilizado nas simulações, o tempo de processamento de cada rodada durou entre 8 e 16 horas. Logo, o alto tempo de processamento das simulações afetou a quantidade de simulações realizadas no decorrer deste trabalho.

Após apresentação do modelo final das simulações e de como foram obtidos alguns parâmetros desse modelo, pode-se fazer a análise dos seus resultados e compará-los com aqueles obtidos por Hejtmánek (2013).

A partir do modelo descrito em 3.4.1 obtiveram-se os seguintes resultados (Figura 3.33) de temperatura das simulações do Caso 1 e do Caso 2 no termopar 21, localizado no centro do container.

Nesse momento, é importante se fazer duas observações. A primeira é que as curvas foram obtidas até os 35 minutos de incêndio simulado, isso aconteceu por causa das limitações computacionais no decorrer das simulações. A segunda observação diz respeito à posição do termopar T21. A sua localização não está bem especificada em Hejtmánek (2013), sabendo-se apenas sua posição aproximada.

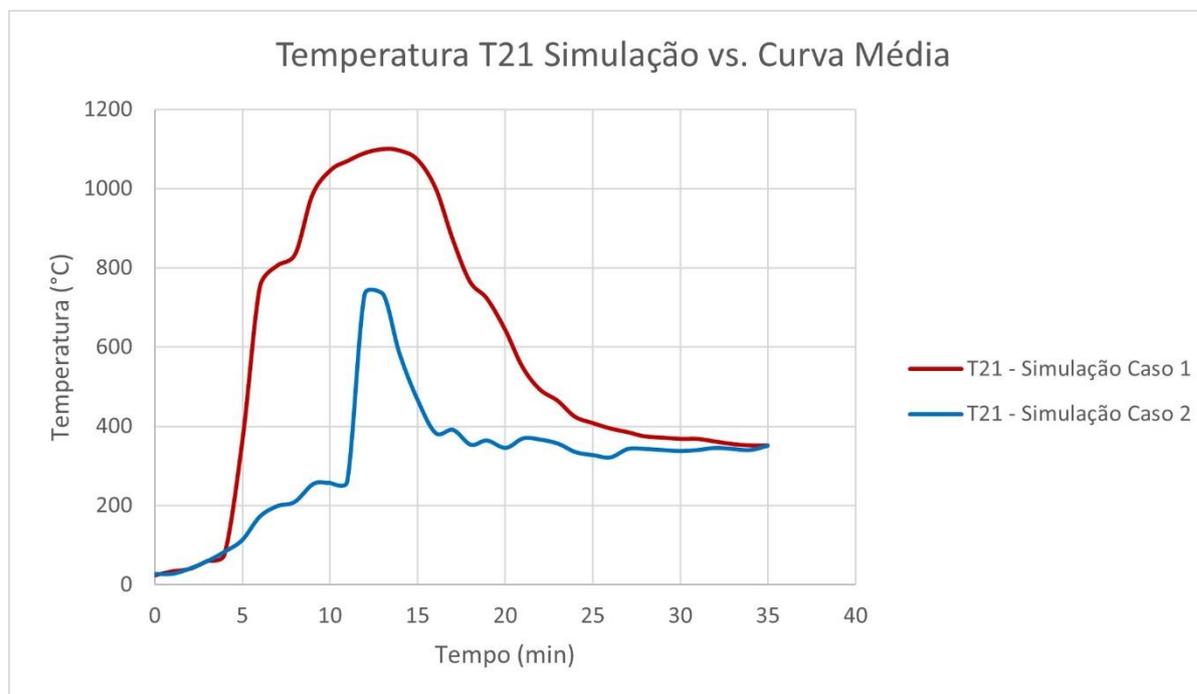


Figura 3.33 – Temperatura no termopar T21 durante as simulações

(Fonte: elaborado pela autora)

A curva de temperatura obtida pela simulação do Caso 1 apresenta um comportamento esperado para um incêndio natural, pois possui um ramo ascendente e outro descendente, assim

como as curvas de incêndio apresentadas anteriormente. A partir do gráfico sabe-se que a temperatura máxima ficou entre 1000 e 1200 °C e o pico ocorreu por volta dos 12 minutos. Além disso, é possível perceber que a fase de crescimento do incêndio ocorre de forma brusca por volta dos 5 minutos da simulação, e a fase de resfriamento acontece de forma mais gradual. Esse comportamento também aconteceu em 3 das quatro curvas apresentadas na Figura 3.10, e pode ter acontecido pelo fato de toda a carga de incêndio estar localizada no centro do container.

A curva da simulação do Caso 2 também apresenta características de uma curva de incêndio natural. Essa curva tem uma aparência mais estreita em relação a do Caso 1, pois o tempo entre o pico de aquecimento e resfriamento da curva é bem menor em relação a outra. A temperatura máxima do segundo caso estudado ficou entre 700°C e 800°C e seu pico ocorre quase no mesmo momento que o do primeiro caso.

A partir de uma análise física das simulações, percebe-se que o motivo da temperatura no Caso 1 subir por volta de 300°C a mais que a do Caso 2 é que o termopar na primeira situação fica envolto pela carga de incêndio. Assim, quando os pallets começam a entrar em ignição o termopar T21 fica abafado no centro do incêndio. Enquanto a segunda situação, o termopar tem espaço para “respirar” pois a pilha de pallets atrás dele é bem menor. Dessa forma, mesmo com a mesma carga de incêndio e mesmo grau de ventilação as duas situações apresenta valores máximos bem distintos.

Comparando os gráficos de temperatura média obtida dos experimentos com o gráfico obtido nas simulações tem-se os seguintes resultados.

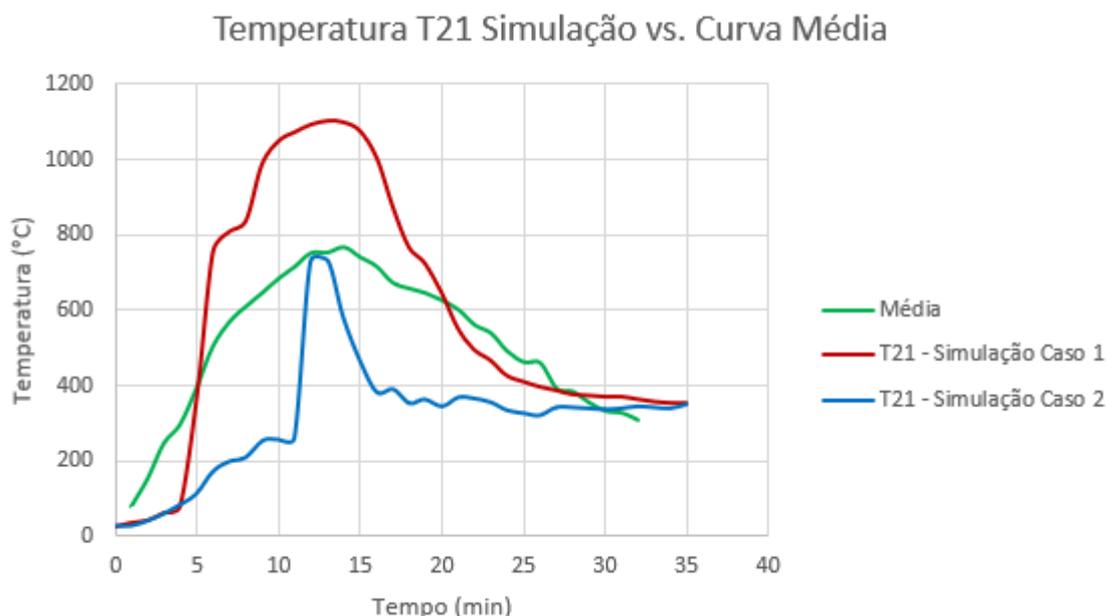


Figura 3.34 - Comparação da curva média com a simulação

(Fonte: elaborado pela autora)

Em comparação com a curva média obtida pelos dados experimentais, a curva do primeiro caso apresenta um crescimento mais brusco, e temperaturas mais altas. E a curva do segundo caso possui uma temperatura máxima bem próxima da temperatura máxima apresentada pela curva média. Porém seu pico ocorre de forma brusca e rápida, em relação as outras curvas. Também é possível observar que todas as curvas chegaram ao pico no mesmo momento.

Essas diferenças podem ocorrer pelo fato de ser uma curva média, e ela não apresentar o mesmo comportamento das curvas originais. E, também por erros no modelo, como a falta de conhecimento do local de ignição, das dimensões da janela lateral e da localização correta do termopar.

A seguir será feita a comparação das curvas simuladas, com a curva média e a curva do incêndio padrão. O incêndio padrão, foi definido no item 3.1.1.1 e conforme dito anteriormente, ele possui a característica de sua curva ser sempre crescente. Apesar disso, é possível ter uma noção do comportamento das curvas em relação a essa. Como visto na Figura 3.35 abaixo, a curva média e a curva do Caso 2 estão mais encaixadas na curva de incêndio padrão. Enquanto a curva do Caso 1 se distancia mais das demais.

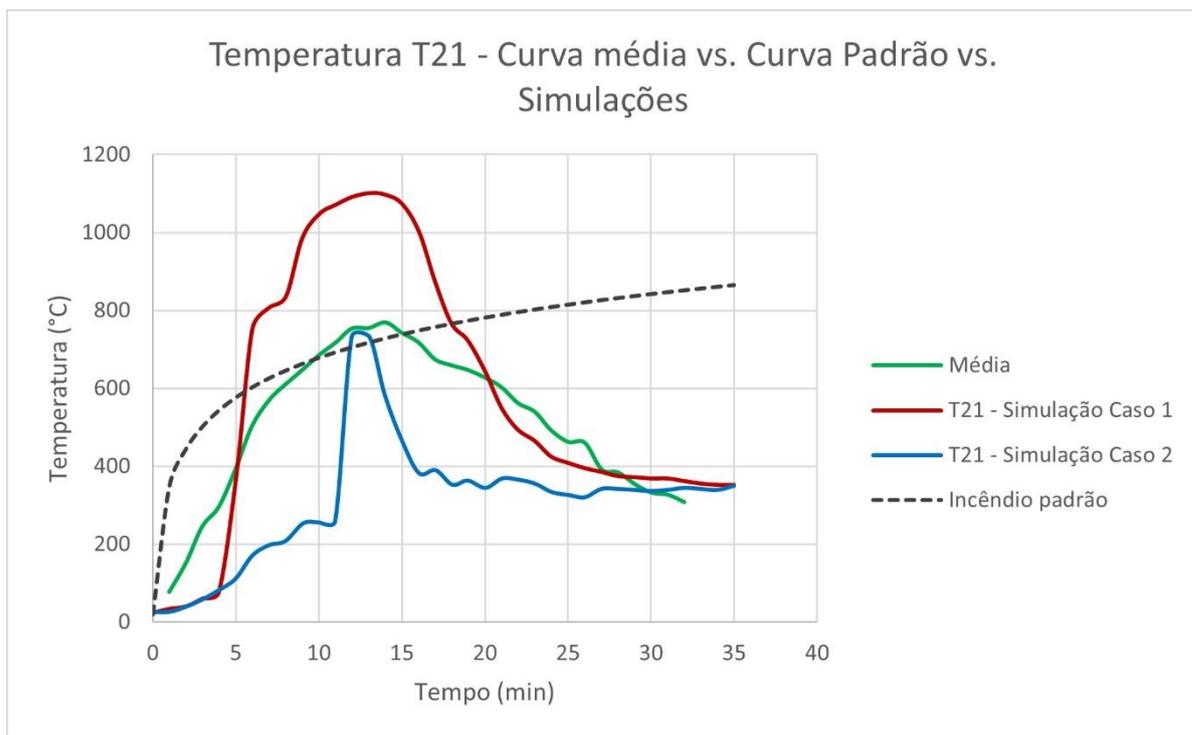


Figura 3.35 - Comparação das curvas simuladas, curva média e curva padrão

(Fonte: elaborado pela autora)

4 ANÁLISE ESTRUTURAL

Na segunda parte do trabalho, o incêndio simulado para o Caso 1 será utilizado para analisar cada elemento de uma estrutura em aço. Assim, este capítulo irá apresentar: os fundamentos teóricos da propagação de calor, que irá acontecer entre os gases e a estrutura metálica; o comportamento do aço em altas temperatura; e, finalmente, a verificação quanto a resistência de elementos estruturais de aço em situação de incêndio seguindo as recomendações da norma NBR 14323:2013. Depois dos fundamentos teóricos será apresentado o modelo estrutural a ser analisado, e, por último, serão feitas as análises dos resultados.

4.1. Fundamentos teóricos

4.1.1. Temperatura do aço

Utilizando os modelos de incêndio pode-se determinar a temperatura dos gases durante o incêndio. No entanto, faz-se necessária a determinação da temperatura no aço durante o incêndio. Para posterior estudo do seu comportamento e análise dos esforços no edifício em meio a essa situação.

Será feito o estudo da temperatura do aço considerando os modelos de incêndio apresentados, e as propriedades do aço em função da temperatura. E, para esse projeto, será estudada uma estrutura sem proteção térmica.

Nesse tipo de estrutura o calor do fogo se propagará de duas formas, através da radiação e da convecção. A convecção é o processo de transferência de calor que ocorre somente em fluidos e é definida como o movimento que o fluido tem devido à diferença de temperatura no ambiente. No caso do incêndio compartimentado, a massa de ar que está mais próxima ao fogo ficará com maior temperatura, e com isso, uma menor densidade. E então, de forma simplificada, irá se movimentar para a parte mais elevada do compartimento, enquanto outra massa de ar tomará seu lugar. Isso irá acontecer de forma cíclica enquanto ocorrer o incêndio. Para expressar esse fenômeno a NBR 14323:2013 utiliza a seguinte equação:

$$\varphi_c = \alpha_c(\theta_g - \theta_a) \quad (4.1)$$

Em que:

φ_c é a componente do fluxo de calor devido à convecção, em W/m^2 ;

α_c é o coeficiente de calor por convecção, que pode ser tomado por $25 W/m^2 \text{ } ^\circ C$;

θ_g é a temperatura dos gases, em $^\circ C$;

θ_a é a temperatura do aço, em $^\circ C$.

E a radiação é a forma de transferência de calor que não necessita de nenhum meio material para acontecer, ela ocorre através da propagação de ondas eletromagnéticas pelo

ambiente que podem ser refletidas ou absorvidas pelas superfícies. Todo corpo com temperatura maior que o zero absoluto emite radiação, mesmo que em baixas quantidades.

Em uma situação de incêndio, o ambiente emite radiação, que será absorvida pelos elementos estruturais. A expressão que descreve esse fenômeno é:

$$\varphi_r = 5,67 \times 10^{-8} \varepsilon_{res} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad (4.2)$$

Em que:

φ_r é a componente do fluxo de calor devido à radiação, em W/m²;

ε_{res} é a emissividade resultante, que pode ser tomada por 0,5, para efeitos práticos;

θ_g é a temperatura dos gases, em °C;

θ_a é a temperatura do aço, em °C.

Para determinar a temperatura no aço são necessários experimentos ou análise de modelos matemáticos que descrevam o fenômeno físico do incêndio compartimentado. Um modelo bastante utilizado é o da conservação de energia, que foi abordado por Silva (1997) em sua tese. Esse modelo considera que a energia emitida pelo fogo é equilibrada pela energia absorvida pelo elemento estrutural. Silva (1997) desenvolve as equações do fluxo de calor emitido e absorvido durante o incêndio e chega à seguinte expressão para o cálculo da elevação da temperatura no aço, considerando uma distribuição uniforme da temperatura na seção transversal:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{(u/A)}{c_a \rho_a} \varphi \Delta t \quad (4.3)$$

Sendo:

$\Delta\theta_{a,t}$ a elevação de temperatura no aço, em °C;

u/A o fator de massividade para elementos estruturais de aço sem proteção contra incêndio; em 1/m;

u é o perímetro exposto ao incêndio do elemento estrutural de aço, em m;

A é a área da seção transversal do elemento estrutural de aço, em m²;

ρ_a é a massa específica do aço, em kg/m³. Será adotado 7850 kg/m³, conforme 4.2.1;

c_a é o calor específico do aço, em J/kg°C. Conforme foi especificado em 4.2.2;

φ é o valor do fluxo de calor por unidade de área, em W/m². E é expresso por:

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r \quad (4.4)$$

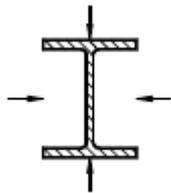
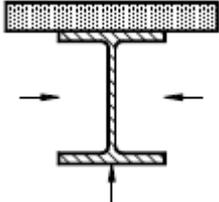
Δt é o intervalo de tempos, em segundos.

E a forma expandida da equação anterior é dada por:

$$\theta_a(t + \Delta t) - \theta_a(t) = \frac{(u/A)}{\rho_a c_a(\theta)} \left\{ \alpha_c (\theta_g(t) - \theta_a(t)) + \sigma \varepsilon [(\theta_g(t) + 273)^4 - (\theta_a(t) + 273)^4] \right\} \Delta t \quad (4.5)$$

A Tabela 4.1, retirada da NBR 14323:2013, indica o cálculo do fator de massividade de alguns elementos estruturais sem proteção térmica.

Tabela 4.1 - Fator de massividade para elementos estruturais sem proteção térmica.

<p>Seção aberta exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u_e}{A} = \frac{\textit{perímetro}}{\textit{área da seção transversal}}$ 	<p>Seção aberta exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u_e}{A} = \frac{\textit{perímetro exposto ao incêndio}}{\textit{área da seção transversal}}$ 
--	--

(Fonte: adaptado ABNT, 2013)

Para ilustrar os efeitos da variação do fator de massividade na temperatura do aço, foi feito, na Figura 4.1, um gráfico da temperatura no aço para perfis diferentes em comparação com a curva do incêndio padrão.

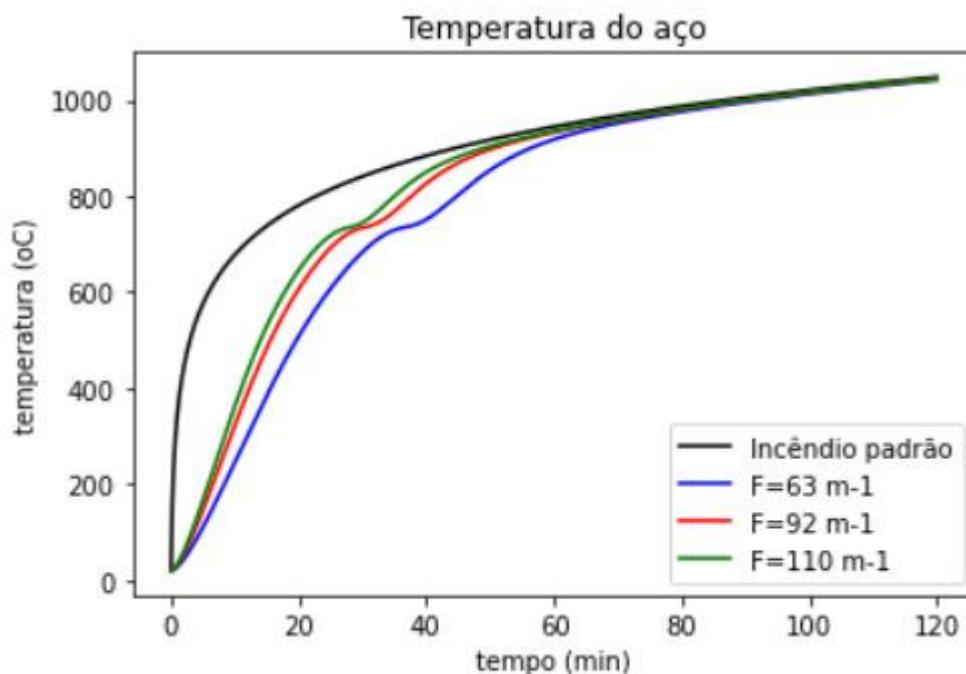


Figura 4.1 - Temperatura do aço no incêndio padrão

(Fonte: elaborado pela autora)

Como exemplo, também foram feitas curvas da temperatura do aço variando a carga de incêndio, grau de ventilação e fator de massividade e fazendo a comparação com a curva de incêndio natural.

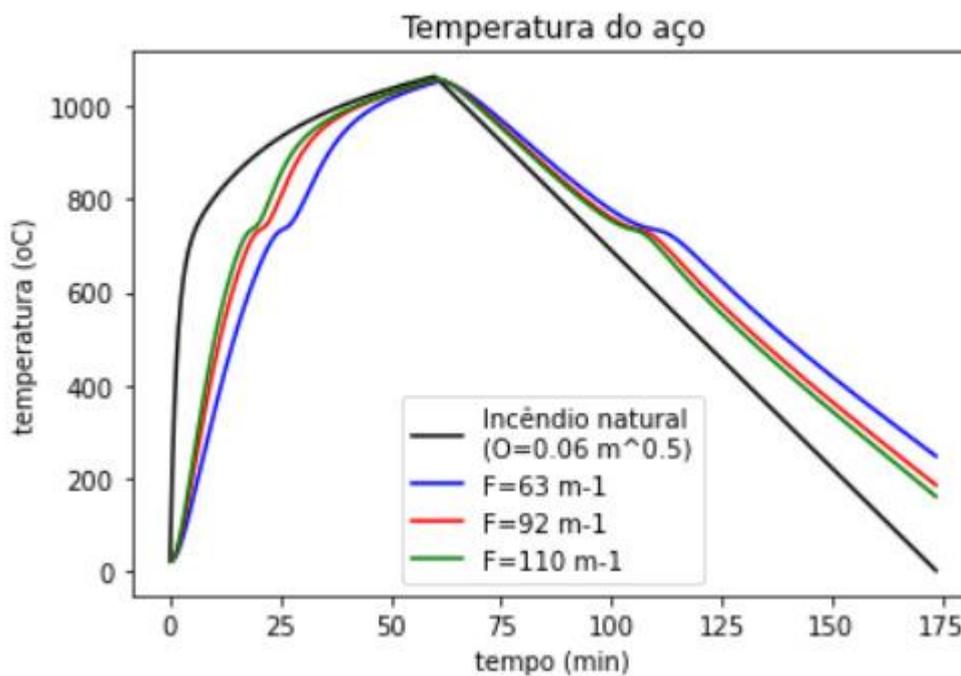


Figura 4.2 - Influência do fator de massividade na temperatura do aço para incêndio natural.

(Fonte: elaborado pela autora)

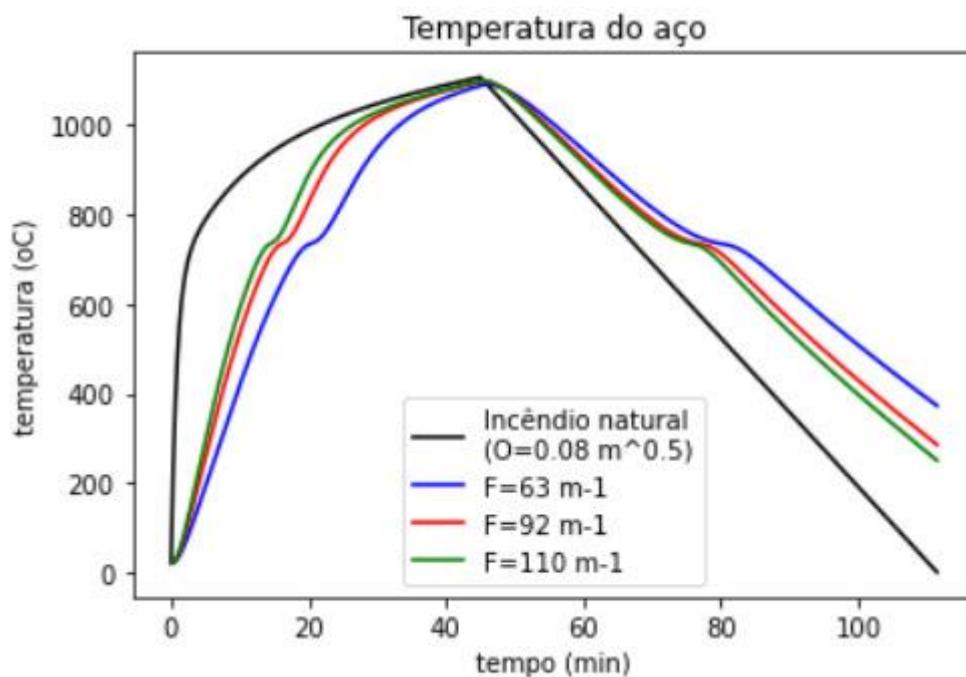


Figura 4.3 - Influência do fator de massividade na temperatura do aço para incêndio natural

($Q = 300\text{MJ/m}^2$) (2)

(Fonte: elaborado pela autora)

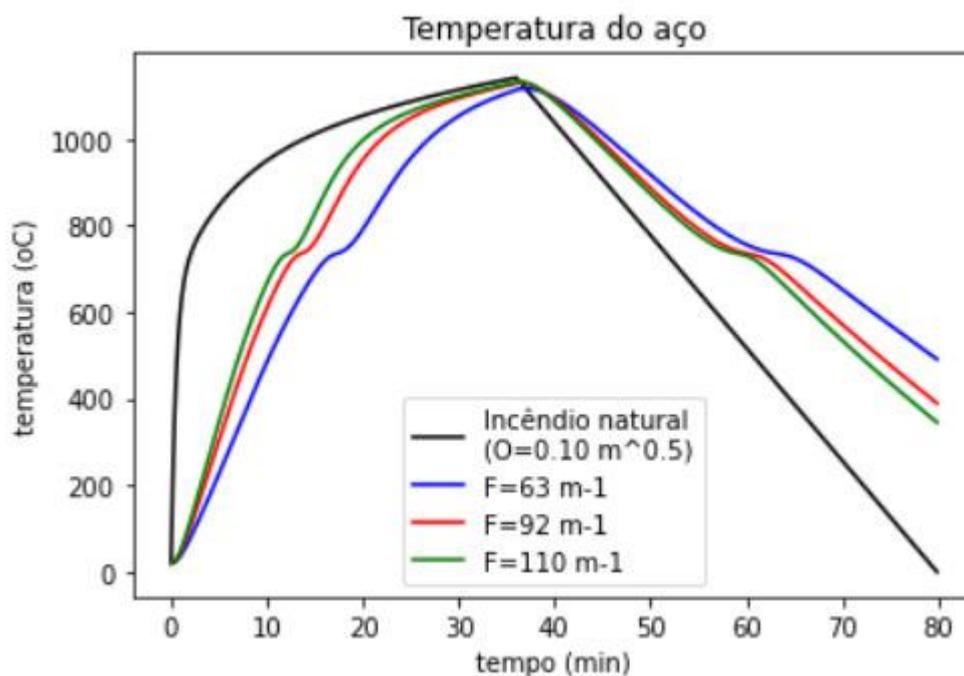


Figura 4.4 - Influência do fator de massividade na temperatura do aço para incêndio natural

($Q = 300\text{MJ/m}^2$) (3)

(Fonte: elaborado pela autora)

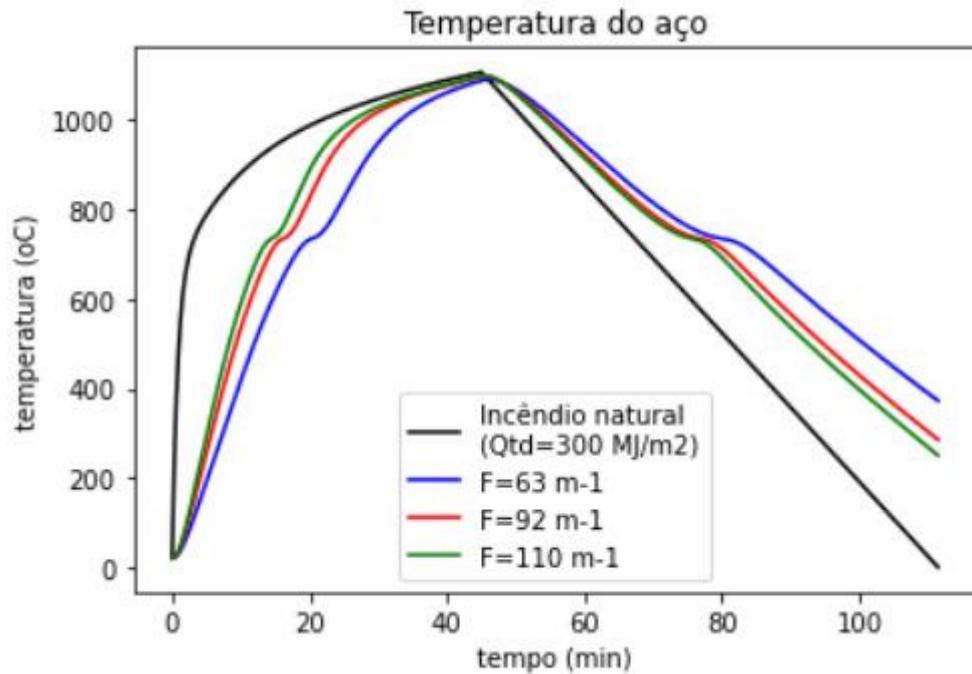


Figura 4.5 - Influência do fator de massividade na temperatura do aço para incêndio natural

$$(O = 0,08m^{1/2}) (1)$$

(Fonte: elaborado pela autora)

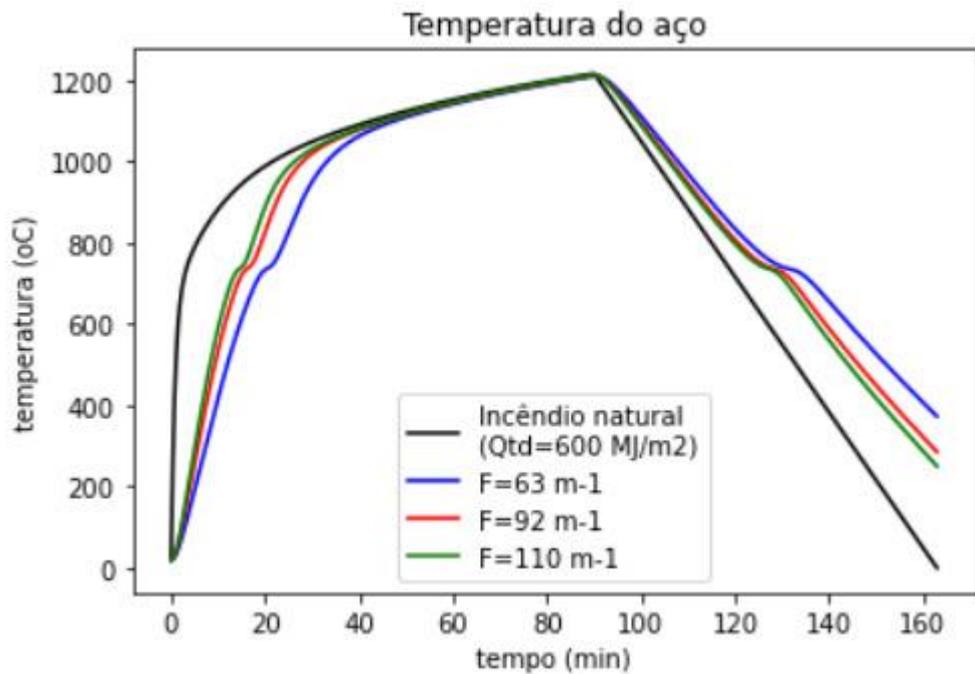


Figura 4.6- Influência do fator de massividade na temperatura do aço para incêndio natural

$$(O = 0,08 m^{1/2}) (2)$$

(Fonte: elaborado pela autora)

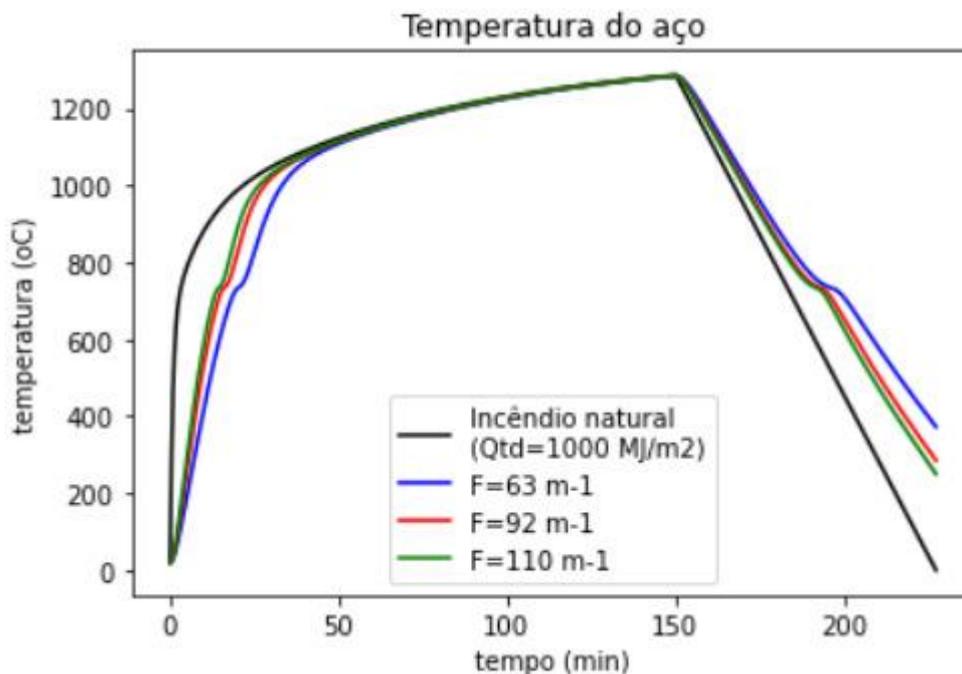


Figura 4.7 - Influência do fator de massividade na temperatura do aço para incêndio natural

$$(O = 0,08 \text{ m}^{1/2}) \text{ (3)}$$

(Fonte: elaborado pela autora)

Analisando as curvas apresentadas acima, chegam-se as seguintes conclusões:

- Quanto maior o fator de massividade maior será a temperatura máxima do incêndio. E a curva decai mais rapidamente no resfriamento;
- Mantendo o grau de ventilação constante, quanto maior for a carga de incêndio maior será a temperatura máxima do incêndio;
- Mantendo a carga de incêndio constante, quanto maior for o grau de ventilação menor será a duração do incêndio. E mais rápido se chega à temperatura máxima.

4.1.2. Propriedades do aço

O aço é um material muito utilizado na indústria da construção civil, e possui diversas vantagens em relação a outros materiais desse ramo. Apesar disso, ele ainda não é muito utilizado no Brasil, e uma das suas principais desvantagens é seu comportamento a altas temperaturas. Pois, quando submetido a elevadas temperaturas o aço sofre, principalmente, perda de resistência e de rigidez. Que são duas características importantes para seu dimensionamento e por isso devem ser monitoradas.

Dessa forma, de acordo com dados apresentados na norma NBR 14323:2013, tem-se as seguintes propriedades mecânicas e térmicas do aço quando submetido a elevadas temperaturas.

4.1.2.1. Propriedades mecânicas

Serão utilizados fatores de redução para a rigidez e resistência ao escoamento dos aços quando a taxa de aquecimento estiver entre 2°C/min e 50°C/min. Na Tabela 4.2 são apresentados os fatores de redução dessas duas propriedades para aços laminados e trefilados, de acordo com a NBR 14323:2013.

Tabela 4.2 - Fatores de redução do aço

Temperatura do aço θ_a (°C)	Fatores de redução do aço	
	Resistência ao escoamento dos aços laminados $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Módulo de elasticidade dos aços laminados $k_{E,\theta} = E_\theta / E$
20	1,000	1,0000
100	1,000	1,0000
200	1,000	0,9000
300	1,000	0,8000
400	1,000	0,7000
500	0,780	0,6000
600	0,470	0,3100
700	0,230	0,1300
800	0,110	0,0900
900	0,060	0,0675
1000	0,040	0,0450
1100	0,020	0,0225
1200	0,000	0,0000

(Fonte: ABNT, 2013)

Em que:

$k_{y,\theta}$ é fator de redução da resistência ao escoamento de aços laminados;

$k_{E,\theta}$ é o fator de redução do módulo de elasticidade de aços laminados;

$f_{y,\theta}$ é a resistência ao escoamento dos aços laminados a uma temperatura θ_a ;

f_y é a resistência ao escoamento do aço a 20°C;

E_θ é o módulo de elasticidade dos aços laminados a temperatura θ_a ;

E é o módulo de elasticidade de todos os aços a 20°C.

Ainda segundo a NBR 14323:2013 a massa específica do aço pode ser considerada inalterada com o aumento da temperatura, dessa forma, será utilizado o valor de $\rho_a = 7850 \text{ kg/m}^3$ para o valor da massa específica do aço.

4.1.2.2. Propriedades térmicas

As propriedades térmicas a serem analisada serão a condutividade térmica e o calor específico.

O calor específico é a propriedade térmica que define a variação de temperatura de um corpo em relação à quantidade de calor que ele recebe. Também pode ser definido como a relação entre capacidade térmica e a massa do corpo. Para o aço, o calor específico segue as seguintes equações em função da sua temperatura:

- Para $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 600^{\circ}\text{C}$:

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad (4.6)$$

- Para $600^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 735^{\circ}\text{C}$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad (4.7)$$

- Para $735^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 900^{\circ}\text{C}$

$$c_a = 545 + \frac{1780}{\theta_a - 731} \quad (4.8)$$

- Para $900^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}$

$$c_a = 650 \quad (4.9)$$

Sendo:

θ_a a temperatura do aço, em $^{\circ}\text{C}$;

c_a é o calor específico do aço, em $\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$.

E na Figura a seguir tem-se a representação da variação do calor específico do aço com a temperatura.

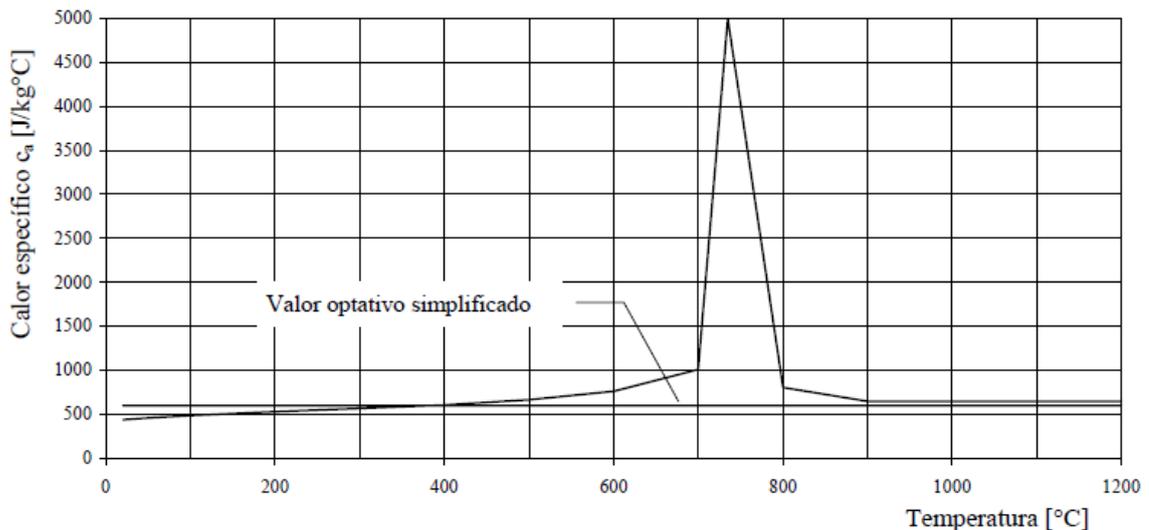


Figura 4.8 - Variação do calor específico do aço com a temperatura

(Fonte: ABNT, 2013)

A condutividade térmica é a propriedade relacionada à condução de energia térmica pelo material. Dessa forma, a variação da condutividade térmica do aço em função da temperatura pode ser descrita pelas expressões abaixo e está representada na Figura 9.

- Para $20^{\circ}\text{C} < \theta_a < 800^{\circ}\text{C}$

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \quad (4.10)$$

- Para $800^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}$

$$\lambda_a = 27,3 \quad (4.11)$$

Sendo:

θ_a a temperatura do aço, em $^{\circ}\text{C}$;

λ_a é a condutividade térmica do aço, em $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$.

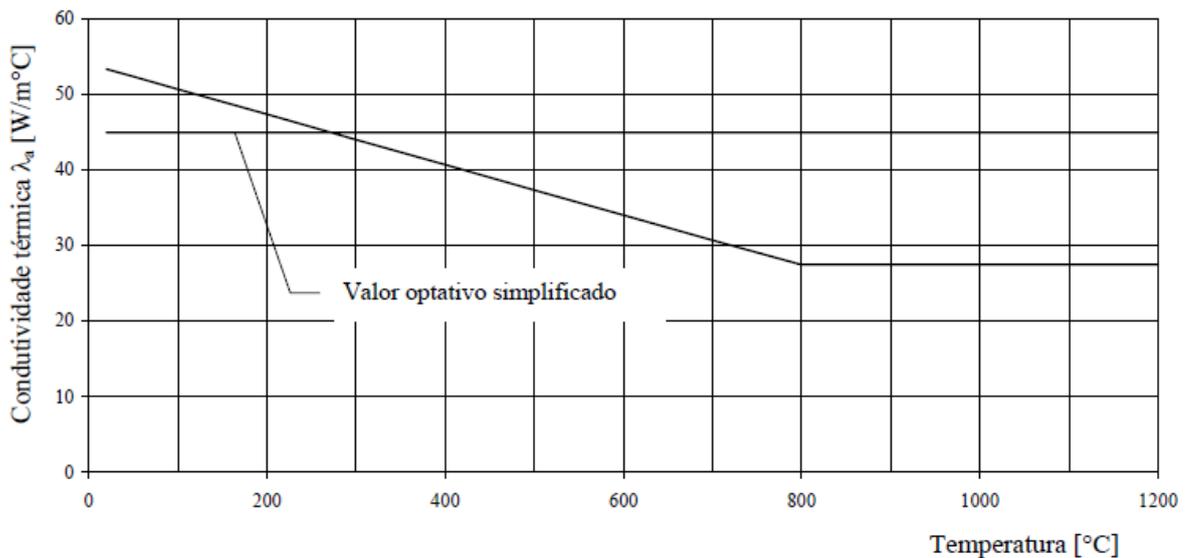


Figura 4.9 - Variação da condutividade térmica do aço com a temperatura

(Fonte: ABNT, 2013)

4.1.3. Dimensionamento dos perfis de aço em situação de incêndio

A norma NBR 14323:2013 aborda um método simplificado de dimensionamento de estruturas de aço submetidas a uma situação de incêndio. O método é chamado de simplificado por considerar distribuição uniforme de temperatura na seção transversal da peça. Esse procedimento será utilizado neste trabalho para servir como referência e base de comparação.

Além disso, a norma citada acima utiliza como referência a NBR8800: 2008, que trata do dimensionamento de estruturas de aço à temperatura ambiente.

A principal condição a ser satisfeita para o dimensionamento de estruturas de aço em situações de incêndio é:

$$S_{fi,d} \leq R_{fi,d} \quad (4.12)$$

Em que:

$S_{fi,d}$ é o esforço solicitante de cálculo em situação de incêndio;

$R_{fi,d}$ é o esforço resistente de cálculo em situação de incêndio, e considerando estado limite último.

Os esforços solicitantes de cálculo podem ser obtidos a partir de análise linear elástica da estrutura. E os resistentes de cálculo serão obtidos conforme as seções descritas abaixo, em que trataremos $R_{fi,d}$ como $M_{fi,Rd}$, $N_{fi,Rd}$ e $V_{fi,Rd}$ e considerando as mudanças nas propriedades mecânicas do aço conforme o item 4.1.2.1.

4.1.3.1. Força normal de tração

Para o estado limite de escoamento da seção bruta, o esforço resistente de cálculo de uma barra de aço tracionada axialmente e com distribuição uniforme de temperatura na seção transversal e ao longo do seu eixo será:

$$N_{fi,Rd} = k_{y,\theta} A_g f_y \quad (4.13)$$

Sendo:

$k_{y,\theta}$ o fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura θ_a , conforme Tabela 4.2;

A_g a área bruta da seção transversal da barra;

f_y a resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente.

4.1.3.2. Força normal de compressão

A verificação para força normal de compressão será feita para perfis sujeitos e não sujeitos à flambagem local em situação de incêndio. Os perfis não irão sofrer flambagem local quando:

$$\left(\frac{b}{t}\right) < \left(\frac{b}{t}\right)_{fi,lim} \quad (4.14)$$

Em que,

b/t é a relação entre largura e espessura, definida pela norma NBR8800:2008 no Anexo F;

$(b/t)_{fi,lim}$ é obtido multiplicando $(b/t)_{lim}$ por 0,85, e $(b/t)_{lim}$ é dado na Tabela F.1 do mesmo Anexo e mesma norma.

○ *Perfis não sujeitos a flambagem local em situação de incêndio*

Para o estado limite último de instabilidade geral da barra, o esforço normal resistente de cálculo é dado por:

$$N_{fi,Rd} = \chi_{fi} k_{y,\theta} A_g f_y \quad (4.15)$$

Sendo:

$k_{y,\theta}$ o fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura θ_a , conforme Tabela 4.2;

A_g a área bruta da seção transversal da barra;

f_y a resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente.

χ_{fi} o fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio, e calculado da seguinte forma:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{0,fi} + \sqrt{(\varphi_{0,fi}^2 - \lambda_{0,fi}^2)}} \quad (4.16)$$

com

$$\varphi_{0,fi} = 0,5(1 + \alpha \lambda_{0,fi} + \lambda_{0,fi}^2) \quad (4.17)$$

Sendo $\lambda_{0,\theta}$ o índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio, dado por:

$$\lambda_{0,fi} = \frac{\lambda_0}{0,85} \quad (4.18)$$

e

$$\alpha = 0,022 \sqrt{E/f_y} \quad (4.19)$$

Em que:

$\lambda_{0,fi}$ é o índice de esbeltez reduzido em situação de incêndio;

λ_0 é o índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas à temperatura ambiente, determinado conforme NBR 8800:2008;

$k_{E,\theta}$ é o fator de redução do módulo de elasticidade do aço à temperatura θ_a , conforme Tabela 4.2;

E é o módulo de elasticidade do aço à temperatura ambiente.

○ *Perfis sujeitos a flambagem local em situação de incêndio*

Para os estados limites últimos de instabilidade geral da barra e flambagem local, a força normal resistente de cálculo é dada por:

$$N_{fi,Rd} = \chi_{fi} k_{\sigma,\theta} A_{ef} f_y \quad (4.20)$$

Em que:

$k_{\sigma,\theta}$ é o fator de redução para a resistência ao escoamento do aço das seções sujeitas a flambagem local em situação de incêndio, dado na Tabela 2 da NBR14323:2013;

A_{ef} é a área efetiva da seção transversal, obtida multiplicando-se a área bruta da seção pelo fator de redução Q, dado pela NBR8800:2008;

f_y é a resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente.

χ_{fi} é o fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio, e calculado conforme item anterior;

4.1.3.3. *Flexão*

O momento resistente de cálculo para barras submetidas à flexão será calculado considerando os estados limites últimos de flambagem local (flambagem local da alma – FLA e flambagem local da mesa – FLM) e para o estado limite de flambagem lateral com torção (FLT). Para isso, serão utilizados os parâmetros de esbelteza na situação de incêndio $\lambda_{r,fi}$ e $\lambda_{p,fi}$, que serão calculados pela multiplicação dos parâmetros λ_r e λ_p (calculados através da NBR8800:2008) por 0,85.

○ para flambagem local

○ se $\lambda \leq \lambda_{p,fi}$

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{y,\theta} M_{pl} \quad (4.21)$$

○ se $\lambda_{p,fi} < \lambda \leq \lambda_{r,fi}$

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{y,\theta} M_y \quad (4.22)$$

○ se $\lambda > \lambda_{r,fi}$ (somente para FLM)

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{\sigma,\theta} M_y \quad (4.23)$$

○ para FLT

$$M_{fi,Rd} = \kappa \chi_{fi} k_{y,\theta} M_{pl} \quad (4.24)$$

Em que:

$k_{y,\theta}$ é o fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura θ_a , obtido na Tabela 4.2;

$k_{\sigma,\theta}$ é o fator de redução para a resistência ao escoamento do aço das seções sujeitas a flambagem local em situação de incêndio, dado na Tabela 2 da NBR14323:2013;

M_{pl} é o momento de plastificação plástica da seção transversal à temperatura ambiente;

κ é o fator de correção para temperatura não uniforme na seção transversal, obtido no item 8.4.3.2.4 da NBR 14323:2013;

M_y é o momento fletor correspondente ao início do escoamento à temperatura ambiente cujo valor é dado pelo produto $W \cdot f_y$. Sendo que W é o módulo resistente elástico mínimo da seção transversal em relação ao eixo de flexão;

χ_{fi} é o fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio, calculado segundo a equação 4.16, porém com $\lambda_{0,fi} = \sqrt{\frac{k_{y,\theta} M_{pl}}{k_{E,\theta} M_{cr}}}$. Sendo que M_{cr} é o momento fletor de flambagem elástica à temperatura ambiente, obtido pela norma NBR 8800:2008.

4.1.3.4. Força cortante

Segundo a NBR 14323:2013 o cálculo da força cortante resistente de cálculo em situação de incêndio será feito utilizando as equações da NBR8800:2008 e seguindo as seguintes observações:

- $\gamma_{a,1}$ será dado igual a 1,0;
- utilizar os parâmetros de esbeltez para a situação de incêndio ($\lambda_{p,fi}$ e $\lambda_{r,fi}$) no lugar dos parâmetros a temperatura ambiente (λ_p e λ_r). Sabendo que o parâmetro de esbeltez na situação de incêndio é igual aquele à temperatura ambiente multiplicado por 0,85;
- multiplicar a resistência ao escoamento f_y por $k_{y,\theta}$ quando $\lambda < \lambda_{r,fi}$ e por $k_{\sigma,\theta}$ quando $\lambda > \lambda_{r,fi}$.

Assim, as equações apresentadas abaixo são utilizadas para perfis do tipo I, H, U e caixão fletidos em relação ao eixo perpendicular à alma. E o esforço resistente da força cortante será calculado da seguinte forma:

- se $\lambda \leq \lambda_{p,fi}$

$$V_{fi,Rd} = V_{pl} \quad (4.25)$$

- se $\lambda_{p,fi} < \lambda \leq \lambda_{r,fi}$

$$V_{fi,Rd} = \frac{\lambda_{p,fi}}{\lambda} V_{pl} \quad (4.26)$$

- se $\lambda > \lambda_{r,fi}$

$$V_{fi,Rd} = 1,24 \left(\lambda_{p,fi} / \lambda \right)^2 V_{pl} \quad (4.27)$$

Sendo:

λ o parâmetro de esbeltez da alma, determinado pela NBR 8800:2008;

λ_p o parâmetro de esbeltez da alma correspondente à plastificação, cujo valor é dado na NBR8800;

λ_r o parâmetro de esbeltez da alma correspondente ao início do escoamento, também determinado pela NBR8800;

V_{pl} a força cortante de plastificação da alma por cisalhamento, determinada na seção 5.4.3 da NBR 8800;

4.2. Temperaturas na Estrutura

Essa seção irá tratar da análise das temperaturas nos elementos estruturais a partir do cálculo da temperatura no aço, conforme indicado no item 4.1.1.

A estrutura utilizada para a análise estrutural deste trabalho é composta por duas vigas e quatro pilares. As vigas estão localizadas acima das paredes frontal e posterior do container, como mostrado na Figura 4.10. E os pilares foram colocados nos quatro cantos do container, formando dois pórticos planos.

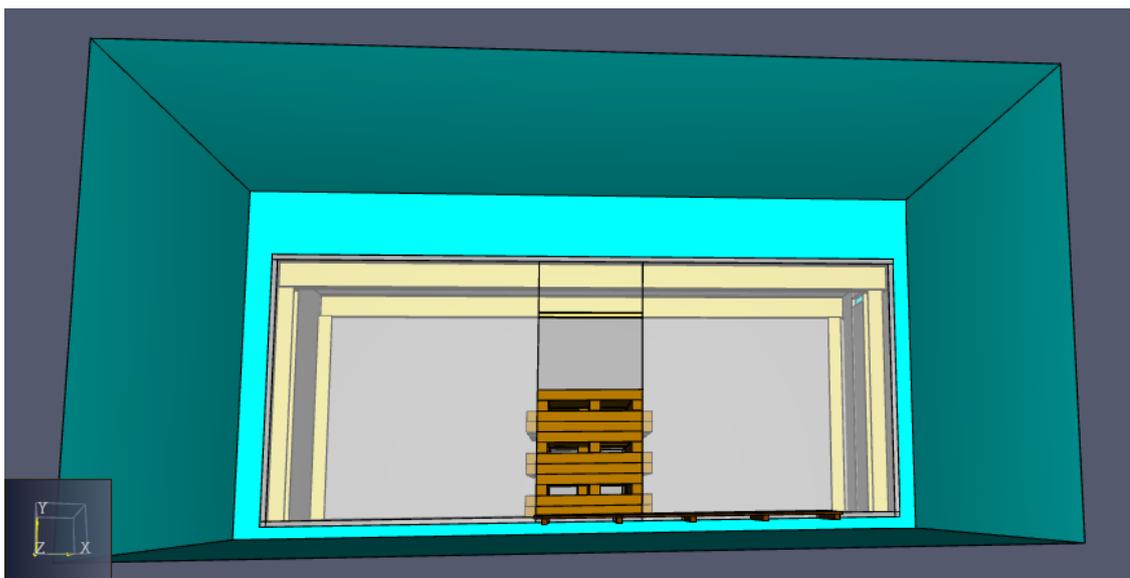


Figura 4.10 - Localização da estrutura no container

(Fonte: elaborado pela autora)

A princípio as temperaturas utilizadas para análise estrutural seriam aquelas retiradas da simulação, por meio dos termopares apresentados na Figura 3.18. Porém, como foi ressaltado anteriormente, por causa de limitações computacionais, as simulações foram feitas com um tempo mais reduzido. Por isso, não foi possível determinar o pico de temperatura dos elementos estruturais, como mostrado na Figura 4.11, onde estão apresentadas as temperaturas no centro da viga 1 (termopar TV01) e na parte superior do pilar 1 (termopar T22.1).

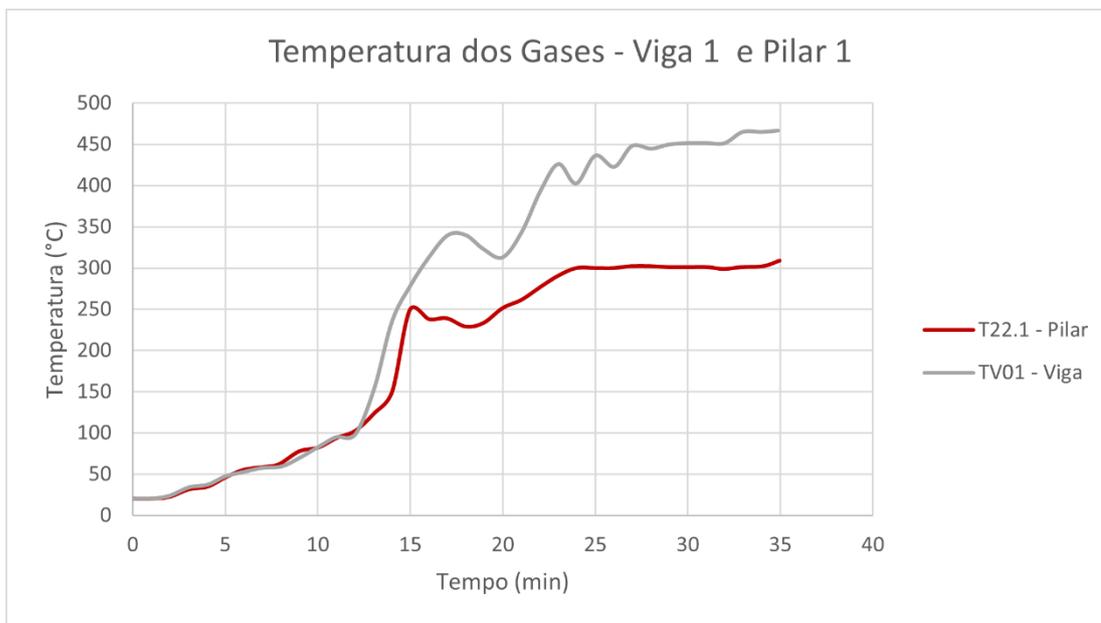


Figura 4.11 - Temperatura dos gases na Viga 1 e no Pilar 1 medida na simulação

(Fonte: elaborado pela autora)

Assim, para fins de simplificação, os dados de temperatura serão obtidos através da curva experimental média, apresentada na Figura 3.11. A partir da curva média dos experimentos de Hejtmánek (2013) será feita uma curva aproximada, que, por sua vez, será utilizada para o cálculo das temperaturas no aço. Abaixo (Figura 4.12) estão exibidas a curva experimental média e a curva aproximada.

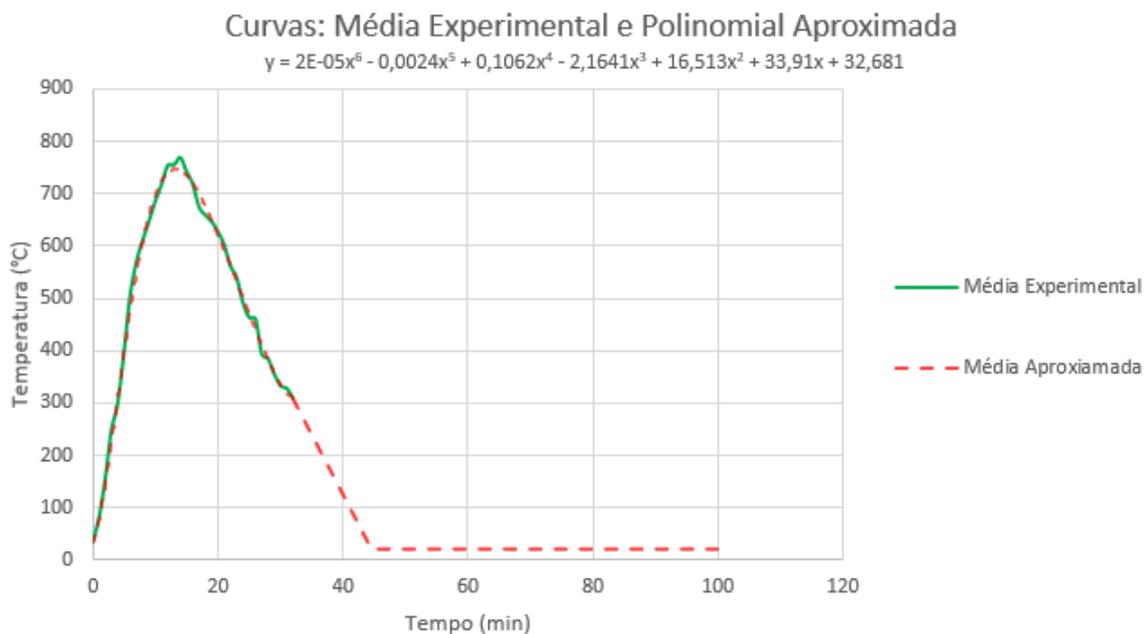


Figura 4.12 - Curvas médias experimental e aproximada

(Fonte: elaborado pela autora)

A curva aproximada foi dividida em duas partes, a primeira foi feita utilizando o recurso de linha de tendência do *software* Excel, assim a curva obtida foi um polinômio de grau seis cuja equação está apresentada no gráfico da Figura 4.12. Na segunda parte foi feita uma reta com inclinação igual à do ramo descendente da curva média, ela foi feita do fim da curva média experimental até o momento em que a temperatura atinge 20°C (temperatura assumida do ambiente) ficando constante a partir daí.

Sabendo as temperaturas dos gases pode-se determinar a temperatura no aço através da equação 4.5. Para isso, sabe-se que:

- Fator de massividade é igual a $223\ m^{-1}$ para o perfil da viga e $200\ m^{-1}$ para o perfil do pilar;
- O calor específico do aço será tomado como o fator simplificado da norma, $c_a = 600\ J/kg\ ^\circ C$;
- Da mesma forma para a condutividade térmica, $p_a = 7850\ kg/m^3$;

Então, a temperatura do aço para cada perfil está apresentada nas Figuras 4.13 e 4.14 abaixo.

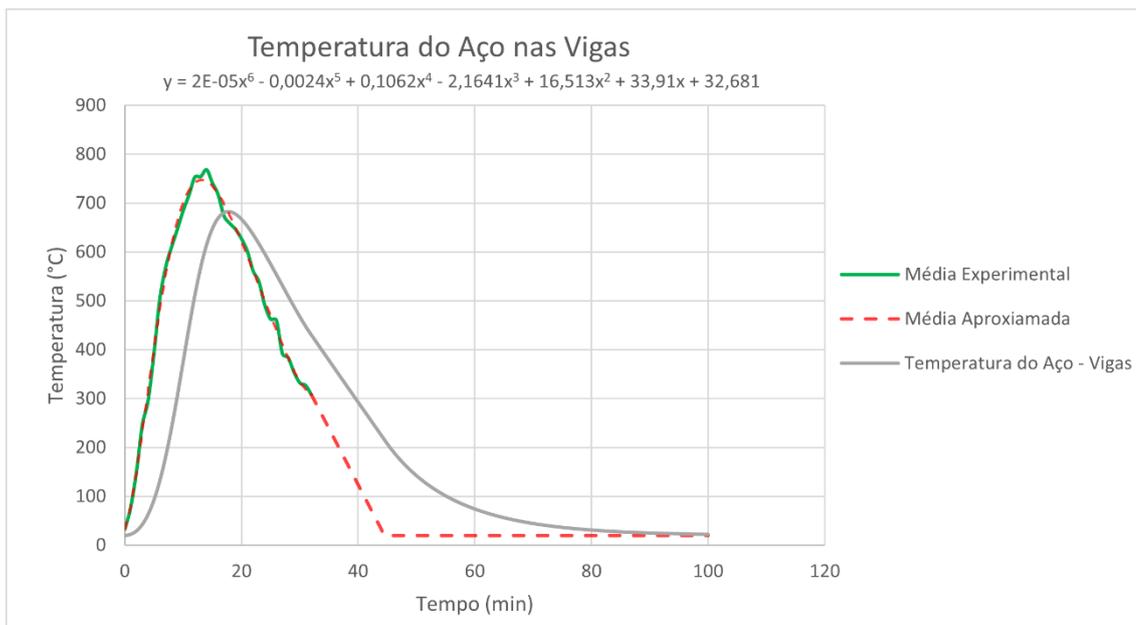


Figura 4.13 - Temperatura do aço nas Vigas

(Fonte: elaborado pela autora)

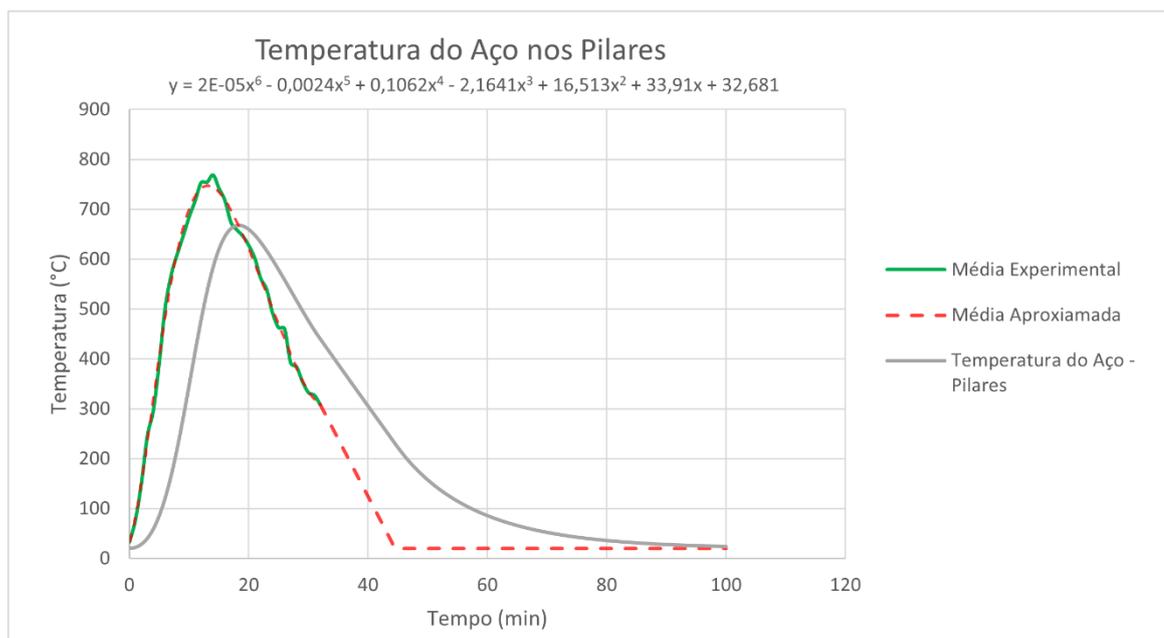


Figura 4.14 - Temperatura do aço nos Pilares

(Fonte: elaborado pela autora)

Em ambos os gráficos, percebe-se que a curva de temperatura do aço está um pouco deslocada no tempo em relação a temperatura dos gases. O que é o comportamento natural esperado, já que se leva um tempo para o aço ser aquecido após o aumento das temperaturas dos gases. Além disso, o pico de temperatura do aço é menor em relação à temperatura dos gases em quase 100°C. E a temperatura máxima das vigas é um pouco maior que a dos pilares. Isso se dá pela diferença entre os fatores de massividade dos elementos, dada pelo uso de perfis diferentes em cada tipo de elemento. A temperatura máxima das vigas é igual a 682,5°C e

ocorre com 17 minutos de incêndio, enquanto nos pilares a temperatura máxima acontece nos 18 minutos e é igual a 668°C.

4.3. Modelo Estrutural

Nessa seção será feita a verificação dos elementos de aço de forma isolada de acordo com a norma NBR14323:2013, cujas fórmulas foram apresentadas na seção 4.1.3.

Para realizar as análises descritas acima deve-se primeiro dimensionar os elementos de aço que serão utilizados. Dessa forma, os cálculos utilizados para o dimensionamento da estrutura estão apresentados no Apêndice C, e os perfis da viga e do pilar utilizados nessa análise estrutural serão o W 250 x 32,7 e o I 203 x 27,3, cujos dados geométricos estão apresentados na Figura 4.26 e Tabela 4.3 e 4.4 abaixo.

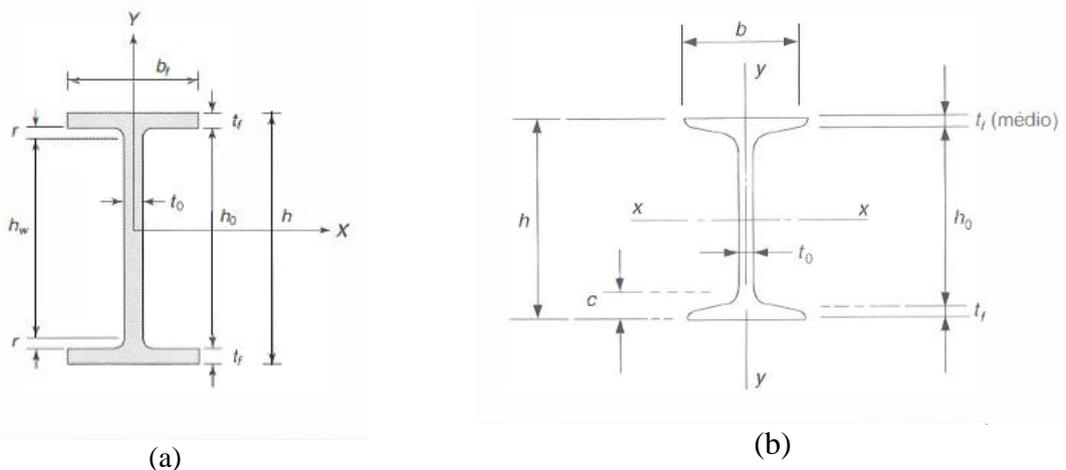


Figura 4.15 - Perfil dos elementos da estrutura: (a) perfil da viga e (b) perfil da coluna

(Fonte: Pfeil, 2009)

Tabela 4.3 - Propriedades geométricas do perfil W 250x32,7

Propriedades geométricas	
$t_0 = 6,1 \text{ mm}$	$I_x = 44937 \text{ cm}^4$
$h_0 = 240 \text{ mm}$	$I_y = 473 \text{ cm}^4$
$t_f = 9,1 \text{ mm}$	$r_y = 3,35 \text{ cm}$
$b_f = 146 \text{ mm}$	$J = 10,4 \text{ cm}^4$
$h = 258 \text{ mm}$	$Z_x = 428,5 \text{ cm}^3$
$A = 42,2 \text{ cm}^2$	$Z_y = 99,7 \text{ cm}^3$

(Fonte: Pfeil, 2009)

Tabela 4.4 - Propriedades geométricas do perfil I 203x 27,3

Propriedades geométricas	
$t_0 = 6,86 \text{ mm}$	$h = 203,2 \text{ mm}$
$h_0 = 181,6 \text{ mm}$	$A = 34,8 \text{ cm}^2$
$t_f = 10,8 \text{ mm}$	$i_x = 8,30 \text{ cm}$
$b = 101,6 \text{ mm}$	$i_y = 2,11 \text{ cm}$

(Fonte: Pfeil, 2009)

4.3.1. Determinação dos parâmetros do aço sob incêndio

Antes de realizar a verificação dos elementos de acordo com a norma, também deve-se determinar os fatores de redução ($k_{y,\theta}$ e $k_{E,\theta}$) utilizando a teoria descrita na seção 4.1.

Na seção anterior foram analisadas as temperaturas dos gases nos elementos estruturais a serem estudados, e foram calculadas as temperaturas no aço para esses elementos. Assim, as temperaturas máximas do aço para cada elemento estão apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Temperatura máxima do aço para cada elemento estrutural

Elemento Estrutural	Temperatura máxima (°C)
Vigas	682,50
Pilares	668,00

(Fonte: elaborado pela autora)

Observando a Tabela 4.5 dada acima, percebe-se que a temperatura nas duas vigas são iguais, assim como as temperaturas no aço são iguais em todos os pilares. Isso acontece por ter sido utilizada apenas uma curva de temperatura dos gases para a determinação da temperatura no aço. E as temperaturas nas vigas e nos pilares são diferentes, pois o perfil utilizado em cada caso foi diferente.

Utilizando essas temperaturas e a Tabela 4.2 é possível determinar os fatores de redução do módulo de elasticidade e da resistência do aço. Esses valores estão apresentados abaixo (Tabela 4.6) para cada tipo de elemento estrutural.

Tabela 4.6 - Fatores de redução para cada elemento estrutural

Elemento Estrutural	$k_{y,\theta}$	$k_{E,\theta}$
Vigas	0,272	0,1615
Pilares	0,307	0,1876

(Fonte: elaborado pela autora)

4.3.2. Verificação das vigas segundo NBR 14323:2013

Depois de determinada a temperatura do aço e os fatores de redução, pode-se partir para uma verificação hipotética de situação de cargas nas vigas em situação de incêndio. Para isso, faz-se necessário determinar os esforços solicitantes e resistentes de cálculo na situação de incêndio e compará-los conforme indicado pela desigualdade apresentada na equação 4.12.

Primeiramente, determina-se os esforços hipotéticos de cálculo, que solicitam a viga e são dados pelo momento fletor ($M_{fi,sd}$) e pela força cortante ($V_{fi,sd}$), para uma viga, aqui

considerada, bi apoiada. Esses esforços são determinados através das seguintes expressões e serão iguais para ambas as vigas.

$$M_{fi,sd} = \frac{q_{fi,d} \cdot l^2}{8} \quad (4.28)$$

$$V_{fi,sd} = \frac{q_{fi,d} \cdot l}{2} \quad (4.29)$$

Em que:

l é o comprimento da viga, em metros. Nesse caso, será igual ao comprimento do container, 6 metros; e

$q_{fi,d}$ é a carga de projeto igual a 15,63kN/m, que foi calculada utilizando uma combinação de cargas excepcional conforme Pfeil (2009), e cujo cálculo está apresentado no Apêndice C deste trabalho;

Então, tem-se $M_{fi,sd}$ igual a 7035,62kN.cm e $N_{fi,sd}$ igual a 46,89kN. Esses serão os valores utilizados para verificação da estrutura, sendo comparados aos esforços resistentes que serão determinados a seguir.

As vigas da estrutura analisada estão submetidas a flexão e força cortante, então pode-se utilizar as fórmulas dos itens 4.1.3.3 e 4.1.3.4 para determinar os esforços resistentes de cálculo em situação de incêndio.

4.3.2.1. Flexão

Para determinar os esforços resistentes na flexão é importante primeiro determinar os parâmetros de esbeltez, então utilizando a norma NBR 8800:2008, tem-se:

Tabela 4.7 - Equações dos índices de esbeltez

FLA	FLM	FLT
$\lambda = \frac{h_0}{t_0}$	$\lambda = \frac{b_f/2}{t_f}$	$\lambda = \frac{L}{r_y}$
$\lambda_p = 3,76 \sqrt{E/f_y}$	$\lambda_p = 0,38 \sqrt{E/f_y}$	$\lambda_p = 1,76 \sqrt{E/f_y}$
$\lambda_r = 5,7 \sqrt{E/f_y}$	$\lambda_r = 0,95 \sqrt{\frac{E}{(f_y - \sigma_r)/k_c}}$	$\lambda_r = \frac{1,38 \sqrt{I_y J}}{r_y J \beta_1} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{27 C_w \beta_1^2}{I_y}}}$
Em que:		
$k_c = 4 / \sqrt{h_0/t_0}$	$C_w = \frac{I_y (h - t_f)^2}{4}$	$\beta_1 = \frac{(f_y - \sigma_r) W_x}{EJ}$

(Fonte: ABNT 8800:2008)

Sabendo também que os parâmetros de esbeltez para a situação de incêndio segundo a NBR14323:2013, são calculados multiplicando os parâmetros λ_r e λ_p por 0,85.

o FLA

Utilizando os dados do perfil para calcular o índice de esbeltez da alma, tem-se que $\lambda = 39,34$. E, as fórmulas dadas na Tabela 4.7 sabe-se que $\lambda_{r,fi} = 137,04$ e $\lambda_{p,fi} = 90,40$. Dessa forma, como $\lambda < \lambda_{p,fi}$, então:

$$M_{fi,Rd} = \kappa k_{y,\theta} M_{pl} \quad (4.30)$$

Em que,

$k_{y,\theta}$ é o fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura θ_a , obtido na Tabela 4.6;

M_{pl} é o momento de plastificação plástica da seção transversal à temperatura ambiente, e é calculado como $M_{pl} = Z_x f_y$

κ é o fator de correção para temperatura não uniforme na seção transversal, obtido no item 8.4.3.2.4 da NBR 14323:2013 como sendo 1,40.

Fazendo o cálculo, o momento resistente será igual a

$$M_{fi,Rd} = \kappa \cdot k_{y,\theta} \cdot Z_x f_y \quad (4.31)$$

Usando os dados da Tabela 4.3 e da Tabela 4.6 e sabendo que f_y é igual a 25 kN/cm², o cálculo de $M_{fi,Rd}$ para as vigas é:

$$M_{fi,Rd} (Viga 1) = 4079,32kN.cm$$

Como o momento resistente é menor que o momento solicitante ($M_{fi,Sd} = 7035,62kN.cm$), então, nesse caso a viga não passa na verificação feita. E é indicado o uso de proteção térmica no perfil.

○ FLM

De forma semelhante será feito para o estado limite último de flambagem local da mesa. O índice de esbeltez será igual a 8,02, e pelos dados da Tabela 4.7 tem-se que $\lambda_{p,fi} = 9,14$. Novamente $\lambda < \lambda_{p,fi}$, e a fórmula utilizada para calcular o momento resistente será igual a utilizada para FLA. Então, tem-se os mesmos valores de $M_{fi,Rd}$, que implica que as vigas também não passam na verificação da FLM.

○ FLT

A equação para o cálculo do $M_{fi,Rd}$ está apresentada a seguir.

$$M_{fi,Rd} = \kappa \chi_{fi} k_{y,\theta} M_{pl} \quad (4.32)$$

Sendo,

$k_{y,\theta}$ o fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura θ_a , obtido na Tabela 4.2;

M_{pl} o momento de plastificação plástica da seção transversal à temperatura ambiente;

κ é o fator de correção para temperatura não uniforme na seção transversal, obtido no item 8.4.3.2.4 da NBR 14323:2013;

χ_{fi} é o fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio, calculado segundo a equação 4.16, porém com $\lambda_{0,fi} = \sqrt{\frac{k_{y,\theta} M_{pl}}{k_{E,\theta} M_{cr}}}$. Sendo que M_{cr} é o momento fletor de flambagem elástica à temperatura ambiente. Dado por:

$$M_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E I_y}{L^2} \sqrt{\frac{C_w}{I_y} \left(1 + \frac{0,039 J L^2}{C_w} \right)} \quad (4.33)$$

Em que, C_b foi calculado como 1,137 e sua fórmula pode ser obtida no item 5.4.2.3 da NBR 8800:2008;

Fazendo o cálculo, o momento crítico para a será dado por $M_{cr} = 6349,09 kN.cm$. Como o fator de redução da resistência ao escoamento do aço é igual a 0,2720 para as vigas, então o valor de $\lambda_{0,fi}$, $\phi_{0,fi}$ e χ_{fi} para as vigas, está apresentado na Tabela 4.8 abaixo:

Tabela 4.8 - Parâmetros do cálculo de $M_{fi,Rd}$ no FLT

$\lambda_{0,fi}$	1,69
$\varphi_{0,fi}$	2,45
χ_{fi}	0,24

Portanto, calculando os valores do momento resistente para esse caso, tem-se $M_{fi,Rd} = 979,04\text{kN.cm}$.

Como o momento resistente calculado é menor que o momento solicitante, isso implica que as vigas não passam na verificação de flambagem lateral com torção (FLT) e, deve-se utilizar um perfil diferente ou outro aço no dimensionamento delas.

4.3.2.2. Força Cortante

O procedimento realizado para força cortante se assemelha ao processo para flexão. Logo, devem ser calculados os índices de esbeltez do perfil, e posteriormente pode ser calculada a força cortante resistente.

Os índices de esbeltez são calculados como:

$$\lambda = h_0/t_o \quad (4.34)$$

$$\lambda_{p,fi} = 0,85 \cdot 1,10 \cdot \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (4.35)$$

$$\lambda_r = 0,85 \cdot 1,37 \cdot \sqrt{\frac{k_v E}{f_y}} \quad (4.36)$$

Como as vigas consideradas não possuem enrijecedores, então o parâmetro k_v será igual a 5, então $\lambda_{p,fi} = 59,13$ e $\lambda_r = 73,65$. Como $\lambda = 39,34 < \lambda_{p,fi}$, então pode-se calcular a força cortante resistente da seguinte forma:

$$V_{fi,Rd} = V_{pl} \quad (4.37)$$

Sendo que:

V_{pl} a força cortante de plastificação da alma por cisalhamento, que é igual a:

$$V_{pl} = 0,6 A_w f_y k_{y,\theta} , \text{ sendo que } A_w = h t_o$$

$k_{y,\theta}$ o fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura θ_a , conforme a Tabela 4.6.

Comparando o valor da força cortante resistente com a solicitante, tem-se que $V_{fi,Rd} = 64,21\text{kN}$. Como esse valor é superior ao valor da força cortante solicitante ($V_{fi,Sd} = 46,89\text{kN}$). Então, as vigas passam na verificação da força cortante.

4.3.3. Verificação das colunas segundo NBR14323:2013

Antes das verificações, faz-se necessário calcular o esforço de compressão solicitante ($N_{fi,Rd}$) para a situação de incêndio. Esse valor foi calculado no item anterior e é igual a 46,89kN. Assim, utilizando os fatores de redução dados na Tabela 4.6 é possível determinar os esforços resistentes de cálculo para as colunas.

Fazendo também a verificação a flambagem local para situação de incêndio, segundo a NBR 14323:2013 e utilizando os valores de b/t e $(b/t)_{lim}$ calculados no Apêndice C então:

- Flambagem local da mesa

Como b/t é igual a 4,70 e calculando $(b/t)_{lim}$ na situação de incêndio como:

$$\left(\frac{b}{t}\right)_{lim,fi} = 0,85 \left(\frac{b}{t}\right)_{lim} = 0,85 \cdot 15,80 = 13,43 \quad (4.38)$$

Então a mesa não sofrerá flambagem local já que b/t é menor que $(b/t)_{lim,fi}$.

- Flambagem local da alma

Fazendo da mesma forma para a alma, sabe-se que $b/t = 26,47$ e $\left(\frac{b}{t}\right)_{lim,fi} = 0,85 \cdot 42,10 = 35,80$. Novamente, não há o risco de flambagem local.

Dessa forma, utilizando a expressão para o cálculo do esforço resistente dada abaixo, tem-se:

$$N_{fi,Rd} = \chi_{fi} k_{y,\theta} A_g f_y \quad (4.39)$$

Sendo:

$k_{y,\theta}$ o fator de redução da resistência ao escoamento do aço à temperatura θ_a , conforme Tabela 4.6;

A_g a área bruta da seção transversal da barra;

f_y a resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente.

χ_{fi} o fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio, e calculado segundo a equação 4.16;

Para os pilares da estrutura, os parâmetros para o cálculo do χ_{fi} foram calculados como: $\lambda_{0,fi} = 3,13$, $\varphi_{0,fi} = 6,37$ e, também $\chi_{fi} = 0,084$. Como $k_{y,\theta}$ é igual para todos os pilares, então $N_{fi,Rd}$ também será.

Logo, a força de compressão resistente de cálculo para situação de incêndio $N_{fi,Rd}$ será igual a 22,44kN, que, por ser menor que a força solicitante de cálculo para a mesma situação implica que nenhuma das colunas passam na verificação de compressão. Nessa situação de

incêndio, para que a peça resista às solicitações de projeto, uma das opções seria fazer um melhor isolamento térmico dos pilares de aço.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho se propôs a estudar, de forma simplificada, o incêndio e suas consequências em elementos estruturais de aço. O estudo foi feito utilizando simulações através do *software Pyrosim* e dados experimentais.

Este trabalho, abordou simulações de incêndio feitas com base em análises de dados experimentais (Hejtmánek, 2013). Baseado nesses trabalhos, foram desenvolvidos casos de incêndio através do *software Pyrosim*. Com isso, pôde-se concluir que:

- O gráfico de temperatura dos gases obtido na simulação seguiu o esperado para um incêndio natural, com uma curva que apresenta um ramo ascendente e um descendente. Embora ainda existam diferenças como o alargamento ou estreitamento das curvas de incêndio em torno do pico de temperatura;
- Em comparação com a curva experimental, a curva do Caso 1 não apresentou valores tão próximos quanto esperado, pois a temperatura no pico excede a curva experimental em aproximadamente 400°C. E a curva do Caso 2 possui pico muito semelhante em valor de temperatura e tempo, porém ela é mais estreita que as demais curvas;
- No geral, as curvas de temperatura (simulada e experimental) tem um comportamento parecido, apesar das diferenças citadas acima. Mas, observa-se que as curvas crescem e decrescem de forma qualitativa com uma certa semelhança com os dados experimentais.
- O desconhecimento de alguns parâmetros do incêndio experimental (Hejtmánek, 2013) causou dificuldades na modelagem da simulação e afetaram os resultados das curvas obtidas pelo *software* de simulação de incêndio;

Devido a inconsistências e limitações computacionais nos dados obtidos pela simulação, os dados experimentais foram utilizados para a análise dos elementos estruturais de aço. A formulação proposta pela norma foi utilizada para a verificação de duas vigas e quatro pilares em aço. A título de exercício e a partir dessa análise foi concluído que as vigas analisadas não passariam nas verificações de flexão, então somente as verificações para a força cortante foram suficientes. Os pilares também não atendem às verificações feitas para a compressão, notando-se que os casos analisados são casos hipotéticos. Isso indica que esses elementos necessitariam de uma proteção térmica adequada para resistirem aos esforços solicitantes aplicados.

No geral, o trabalho evidenciou algumas vantagens do uso das simulações de incêndio. Em análise de estruturas em situação de incêndio, é recomendável utilizar dados de temperatura de vários pontos para determinação do perfil de distribuição das temperaturas mais detalhado na seção transversal e ao longo do comprimento do elemento estrutural analisado. Nesse caso, a simulação de incêndio possibilita uma facilidade maior na obtenção das temperaturas em relação aos experimentos, ou servem para a obtenção da distribuição mais precisa das temperaturas em elementos estruturais de uma forma geral.

Além disso, a simulação numérico computacional é também uma alternativa mais baratas e menos perigosas em relação aos experimentos em escala real. Com a calibração do modelo a partir de algumas curvas, os resultados numérico computacionais podem se aproximar bastante de valores mais reais. Este foi um trabalho introdutório e afetado pela pandemia da Covid-19, por isso, faz-se necessário mais estudos envolvendo simulações numéricas de incêndio com base em dados experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8800: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Projeto de Revisão da NBR 14323:2013 -Dimensionamento de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço-Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14432:2001. Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2001.

AELOUS CONSULTING BVBA. **Site da Aelous**. Pyrosim Example Guide 2012. Disponível em: <http://www.aeolus-consulting.be/downloads/pyrosimexamples.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2020.

BERG, G.V.D. **Multi-storey Steel Framed Buildings under Natural Fire Conditions**. In: **International Symposium on Fire Safety Research**, 2005, The Netherlands (Delft).

BRUNETTO, Leonardo de Oliveira. **Simulação Computacional de Incêndios: uma Aplicação no Prédio da Escola de Engenharia nova da UFRGS**. 2016. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

CAMPÊLO, Liris Silveira. **Estudo Numérico e Analítico para Determinação em Situação de Incêndio Natural da Carga Crítica de Vigas de Aço com Carga Concentrada**. 2008. 65 p. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.

CPP, Comitê Permanente de Paletização. **PBR I – Especificação do palete padrão para distribuição nacional**. ABRAS. 2000.

CSI PORTUGAL. **Site da CSi Portugal**. Informação geral. Disponível em: <https://www.csiportugal.com/software/2/sap2000#>. Acesso em: 21 nov. 2020.

DAINATEX ENGENHARIA E CONSULTORIA. **Site da Dainatex**. História do SAP2000. Disponível em: <https://www.dainatex.com.br/cursos/historia-do-sap-2000/>. Acesso em: 21 nov. 2020.

EUROCODE, European Committee for Standardization. **Eurocode 1: Actions on Structures - Part 1-2: General Actions - Actions on Structures Exposed to Fire**. Brussels, Belgium, 2002.

EUROCODE, European Committee for Standardization. **Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-2: General Rules - Structural fire design**. Brussels, Belgium, 2005.

GLASA, J. *et al.* Cinema Fire Modelling by FDS. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 410, p. 4, 2013.

HAMINS, A. *et al.* **Experiments and Modeling of Unprotected Structural Steel Elements Exposed to a Fire.** *In: International Association for Fire Safety Science*, n° 8, 2005. pp. 185-200.

HEJTMÁNEK, P. **Research of Fire Spread on Exterior Wooden Constructions.** Pesquisa (PhD) – Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

LINCOLINS, Thiago. Neste dia, em 1961, o pior incêndio do Brasil causava a morte de 503 pessoas. **Aventuras na história.** 17 dez. 2019. Disponível em: <https://aventurasnahistoria.uol.com.br/noticias/reportagem/historia-brasil-incendio-tragedia-gran-circo-vitimas.phtml>. Acesso em: 12 out. 2020.

LUZ, Vanessa Hernandez. **Simulação Computacional de um Incêndio em um Depósito: Análise das Principais Variáveis que Influenciam no Comportamento de um Incêndio.** 2017. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

MATA, Kamylla Lima. *et al.* **Estudo Teórico-Experimental do Comportamento de um Compartimento em Situação de Incêndio.** *In: XIII SIMMEC Simpósio de Mecânica Computacional*, n° 13, 2018, UFES, Campus Goiabeira (Vitória). Vitória, 2018.

MCGRATTAN, K. *et al.* **Fire Dynamics Simulator - FDS User's Guide.** NIST Special Publication 1019, 2015. Disponível em: <https://pages.nist.gov/fds-smv/manuals.html>. Acesso em: 30 nov. 2020.

MCGRATTAN, K. *et al.* **Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model.** NIST Special Publication 1018-1, 2013. Disponível em: <https://pages.nist.gov/fds-smv/manuals.html>. Acesso em: 30 nov. 2020.

NUNES, Jonathan Madeira de Barros. **Uma Abordagem Numérica e Analítica para Determinação da Temperatura e do Momento Fletor Crítico em Vigas De Aço em Situação de Incêndio.** 2005. 186p. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2005.

OLIVEIRA, Bianca Orsini. **Estudo Analítico e Experimental da Distribuição de Temperatura em Painéis em Situação de Incêndio.** 2014. 84p. Monografia de Projeto Final (Bacharel em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.

O QUE se sabe sobre o incêndio no Museu Nacional, no Rio. **G1.** 04 set. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2018/09/04/o-que-se-sabe-sobre-o-incendio-no-museu-nacional-no-rio.ghtml>. Acesso em: 12 out. 2020.

PFEIL, Walter.; PFEIL, Michèle. **Estruturas de aço: dimensionamento prático.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PREVIDELLI, Fabio. Há 46 anos, o edifício Joelma era alvo do maior incêndio acidental em um arranha-céu. **Aventuras na história.** 01 fev. 2020. Disponível em:

<https://aventurasnahistoria.uol.com.br/noticias/reportagem/historia-incendio-do-edificio-joelma.phtml>. Acesso em: 12 out. 2020.

RELEMBRE o incêndio na boate Kiss, em Santa Maria (RS). **UOL Notícias**. 25 jan. 2014. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/album/2014/01/25/incendio-na-boate-kiss-em-santa-maria-rs-completa-um-ano.htm?foto=15>. Acesso em: 12 out. 2020.

SÁ, Roberta Tabaczinski de. **Simulação Numérica de Incêndios em Edificações**. 2018. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

SALES, Vitor Haubert. **Elaboração de Roteiro para Utilização do Software FDS em Estudos de Segurança contra Incêndio em Edificações**. 2018. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2018.

SILVA, Valdir Pignatta. **Estruturas de Aço em Situação de Incêndio**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade da São Paulo, São Paulo, 1997.

SILVEIRA, Daniel. Incêndio que destruiu o Museu Nacional começou no ar-condicionado do auditório, diz laudo da PF. **G1 Rio**. 04 abr. 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2019/04/04/policia-federal-divulga-laudo-de-incendio-que-destruiu-o-museu-nacional-no-rio.ghtml>. Acesso em: 12 out. 2020.

SIMION, A. *et al.* Simulation of Propagation of Compartment Fire on Building Facades. **IOP Conferences Series: Materials Science and Engineering**, v. 374, p.7, 2018.

THUNDERHEAD ENGINEERING. **Pyrosim User Manual**. 2020. Disponível em: <https://support.thunderheadeng.com/docs/pyrosim/2020-5/>. Acesso em: 30 nov. 2020.

THUNDERHEAD ENGINEERING. **Pyrosim User Manual**. 2021(a). Disponível em: <https://support.thunderheadeng.com/docs/pyrosim/2021-2/user-manual/> . Acesso em: 28 maio 2021.

THUNDERHEAD ENGINEERING. **Thunderhead Engineering**, c2021(b). Página inicial. Disponível em: <https://www.thunderheadeng.com/>. Acesso em: 28 maio 2021.

VARGAS, Mauri Resende; SILVA, Valdir Pignatta. **Resistência ao Fogo das Estruturas de Aço**. 1. Ed. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2005.

WEINSCHENK, Craig G.; OVERHOLT, Kristopher J.; MADRZYKOWSKI, Daniel. **Simulation of an Attic Fire in a Wood Frame Residential Structure – Chicago, IL**. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.TN.1838>. Acesso em: 26 mar. 2021.

APÊNDICE A – ROTEIRO DE UTILIZAÇÃO DO FDS E PYROSIM

Esse roteiro foi baseado no trabalho de Sales (2018) e consistirá em uma breve explicação dos termos e da linha de comando referente ao termo explicado. Como o software que será utilizado neste trabalho é o Pyrosim, algumas funções dele estarão destacadas e a simulação do exemplo do roteiro será realizada no Pyrosim.

O roteiro será dividido em seis partes:

A.1 Configurações iniciais

As configurações iniciais envolvem a iniciação dos comandos e nomeação do arquivo, determinação dos parâmetros da simulação e determinação da reação.

Para iniciar o arquivo de texto, o comando utilizado será o HEAD, que também permite a determinação do título do arquivo (TITLE). A linha de comando inicial será:

```
&HEAD CHID = 'sala', TITLE = 'incêndio na sala'/'
```

Os comandos no FDS são iniciados pelo caractere "&" e finalizados com "/". É importante ressaltar que o arquivo de texto deve ser criado e salvo em uma pasta com o mesmo nome do arquivo. Ou seja, os nomes da pasta, do arquivo de texto e do parâmetro "CHID" devem ser iguais.

Os parâmetros da simulação envolvem principalmente definir o tempo da simulação. Que pode ser feito da seguinte forma:

```
&TIME T_END = 900./
```

Esse comando irá definir uma simulação com tempo total de 900 segundos. Por fim, para finalizar as configurações iniciais, deve-se definir uma reação. A reação específica como ocorrerá a combustão (a reação entre o combustível e o oxigênio) (THUNDERHEAD, 2020). É possível definir a composição do material combustível, a taxa de liberação de fuligem (SOOT_YIELD) e de monóxido de carbono (CO_YIELD). No Pyrosim, existem algumas reações já pré-definidas, que facilitam a determinação da reação e das suas especificações.

```
&REAC ID = 'METHANE', SOOT_YIELD = 0.0, CO_YIELD = 0.0/'
```

Nesse exemplo foi determinada uma reação cujo material combustível é o metano, a taxa de liberação de fuligem é igual nula e a de liberação de CO também.

A.2 Definição da malha

Nessa etapa será feita a definição da malha que será utilizada na simulação. Com o comando do FDS pode-se definir o tamanho das células (XB) e a quantidade de células (IJK) em cada direção. O tamanho e a quantidade de células irão determinar o grau de refinamento da simulação, e com isso também determinará o tempo dela. O manual do FDS aconselha que as células se aproximem de cubos, com tamanhos parecidos em cada direção. Além disso, ele também apresenta uma formulação para auxiliar na determinação do tamanho ideal das células.

```
&MESH IJK = 40, 40,28 XB = 0, 4, 0, 4, 0, 2.8/'
```

O tamanho das células é definido pela especificação XB, em que cada par de números indica uma posição no plano. Dessa forma, no exemplo, tem-se células com 0,4 m nas direções X e Y, e 0,28 m na direção Z.

X (0,4); Y (0,4) e Z (0,2.8)

A especificação IJK determina a quantidade de células em cada eixo. No total foram, 28 células no eixo Z e 40 nos eixos X e Y.

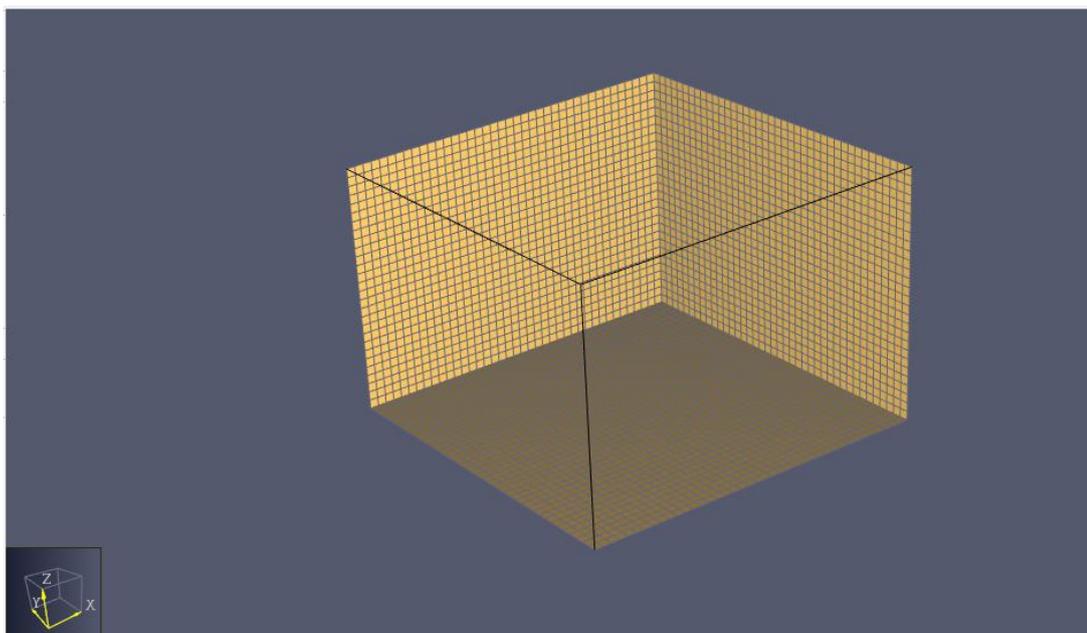


Figura A.1 - Malha feita no Pyrosim

(Fonte: elaborado pela autora)

A.3 Propriedades dos Materiais

No FDS, para determinar um objeto composto por determinado material deve-se definir primeiramente as propriedades do material, depois associar esse material a uma superfície e, por fim, aplicar a superfície ao objeto. Assim, nesse item, serão definidos os parâmetros do material e da superfície.

&MATL ID = 'gypsum', CONDUCTIVITY = 0.48, SPECIFIC_HEAT = 0.84, DENSITY = 1440. /

O comando acima determina a identidade do material (ID), que será constituído de gesso (“gypsum”), a condutividade do material (CONDUCTIVITY) que é igual a 0,48 W/m.K, o calor específico (SPECIFIC_HEAT) igual a 0,84 kJ/ (kg.K) e a densidade (DENSITY) igual a 1440 kg/m³.

No Pyrosim, existem seis superfícies fundamentais já definidas: Adiabatic, Inert, Mirror, Open, HVAC e Periodic. Além dessas, existem oito tipos de superfície que podem ser criadas. Cada uma possui características específicas e podem ser utilizadas com diferentes funções. Abaixo foi definida uma superfície utilizando o material definido acima.

&SURF ID = 'wall', COLOR = 'BRICK', MATL_ID = 'gypsum', THICKNESS = 0.03/

Assim, foi definida a superfície de uma parede (“wall”), que possui determinada cor (COLOR) e espessura (THICKNESS). E é constituída pelo material criado acima.

A superfície tipo “burner” é muito utilizada para especificar como ocorre a pirólise de um objeto. Dessa forma, é definida a taxa de liberação de calor (TLC) ou a perda de massa do objeto.

&SURF ID = 'fire', HRRPUA = 20.84/

O parâmetro HRRPUA define a taxa de liberação de calor por unidade de área, nesse caso, igual a 20,84 kW/m².

A.4 Modelagem do ambiente

Após os parâmetros dos materiais e do incêndio estarem definidos pode-se fazer a modelagem da geometria do ambiente. Para isso são definidas obstruções, aberturas e os “vents”.

As obstruções são barreiras sólidas para o fluxo. As aberturas são regiões negativas colocadas nas obstruções. E o “vent” é como se fosse um tipo de revestimento, que define uma sub-região da obstrução e pode ter características diferente do restante dela. Como ela não serve apenas como respiradouro, que seria sua tradução literal, decidiu-se manter o termo em inglês nesse roteiro.

A geometria tipo “vent” é muito utilizada para a definição do fogo, pois ela pode ser colocada sobre uma obstrução e ser associada a uma superfície tipo “burner”. Assim será definida a pirólise da obstrução criada. Abaixo são apresentados exemplos para cada tipo de geometria citada:

&OBST XB = 0, 4,0, 0.2, 0, 2.8, SURF_ID = 'wall'/

A obstrução acima irá definir uma parede de dimensões 4 m x 0,2 m x 2,8 m, que foi definida pelo parâmetro XB. E a ela foi associada a superfície “wall” criada anteriormente. Já a obstrução definida abaixo irá criar um bloco com dimensões 2 m x 2 m x 1 m no centro da sala. Esse será o bloco queimado durante a simulação

&OBST XB = 1, 3, 1, 3, 0, 1/

&HOLE XB = 1, 3, 0, 0.2, 1.2, 2.2 /

&VENT XB = 1, 3, 1, 3, 0, 1, SURF_ID = 'fire'.

Além disso, também foi colocada uma abertura de 2 m x 0,2 m x 1 m na parede, usando o comando “HOLE”. Por fim, foi definida uma “vent” que será colocada em cima do bloco e que foi associada à superfície “fire” criada.

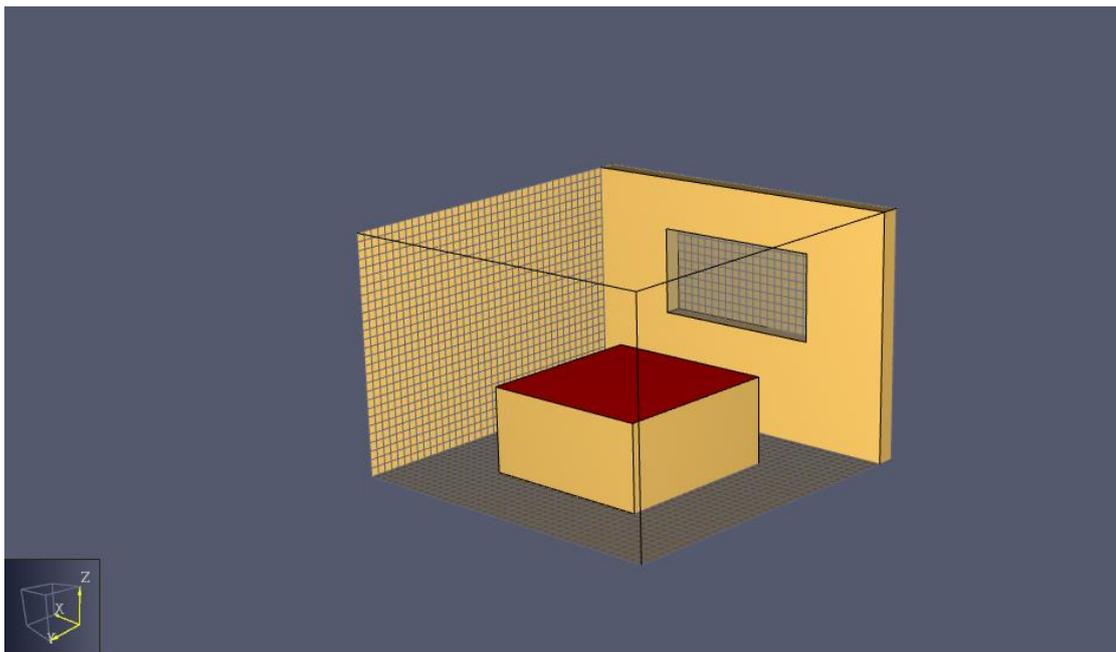


Figura A.2 - Geometria do ambiente feita no Pyrosim

(Fonte: elaborado pela autora)

A.5 Dispositivos de medição

Agora que a geometria do ambiente foi criada, podem ser adicionados dispositivos de medição a simulação. Esses dispositivos definirão quais os resultados que serão mostrados pelo Smokeview ao final da simulação. No exemplo que está sendo montado serão colocados dois planos no centro da simulação, um no eixo x e um no eixo y que irão medir a temperatura durante a simulação. Eles foram definidos pelo comando SLCF, em que PBX (ou PBY) define a posição do plano em relação ao eixo X (ou Y) e QUANTITY define qual será o parâmetro mostrado no plano.

Também serão definidos alguns dados do contorno (BNDF), esse tipo de dado permite a visualização de várias quantidades (ex. temperatura, fluxo de calor) no ambiente como um todo (dentro das dimensões da malha definida). E por último será colocado um termopar (THCP) no centro da sala.

```
&SLCF PBX = 2.0, QUANTITY = 'TEMPERATURE'/'
```

```
&SLCF PBY = 2.0, QUANTITY = 'TEMPERATURE'/'
```

```
&BNDF QUANTITY = 'WALL TEMPERATURE'
```

```
&BNDF QUANTITY = 'NET HEAT FLUX'/'
```

```
&BNDF QUANTITY = 'RADIATIVE HEAT FLUX'/'
```

```
&DEVC QUANTITY = 'TEMPERATURE', XYZ = 2.0, 2.0, 1.4/'
```

A.6 Resultados

Nessa última etapa os resultados da simulação podem ser visualizados com auxílio do Smokeview. Ele irá apresentar uma animação da simulação com o tempo e os dispositivos de

medição definidos podem ser acionados para visualização da variação das quantidades com o tempo.

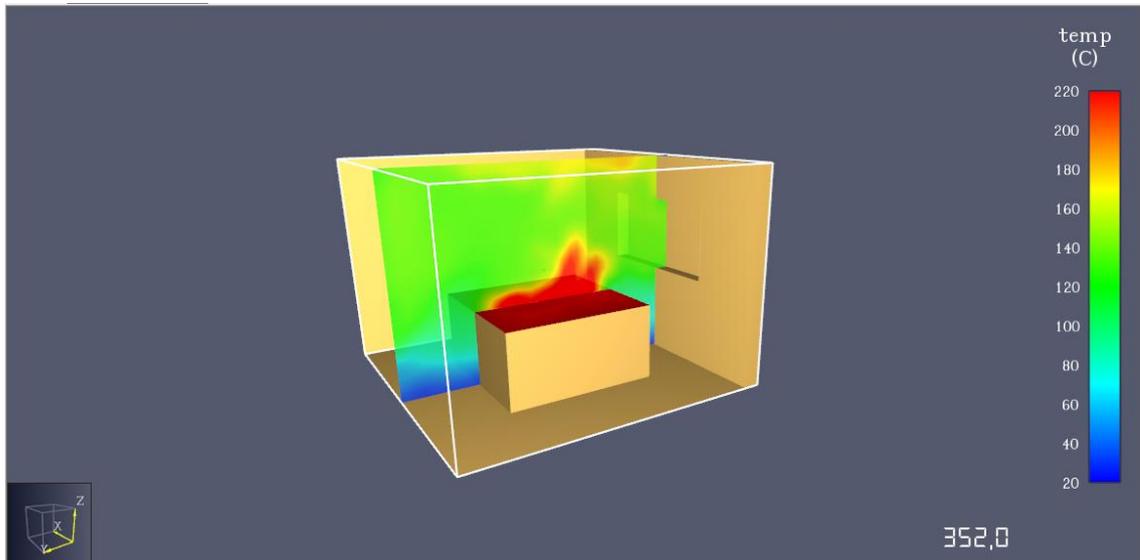


Figura A.3 - Temperatura no plano $X=2.0$ em $t = 352$ segundos

(Fonte: elaborado pela autora)

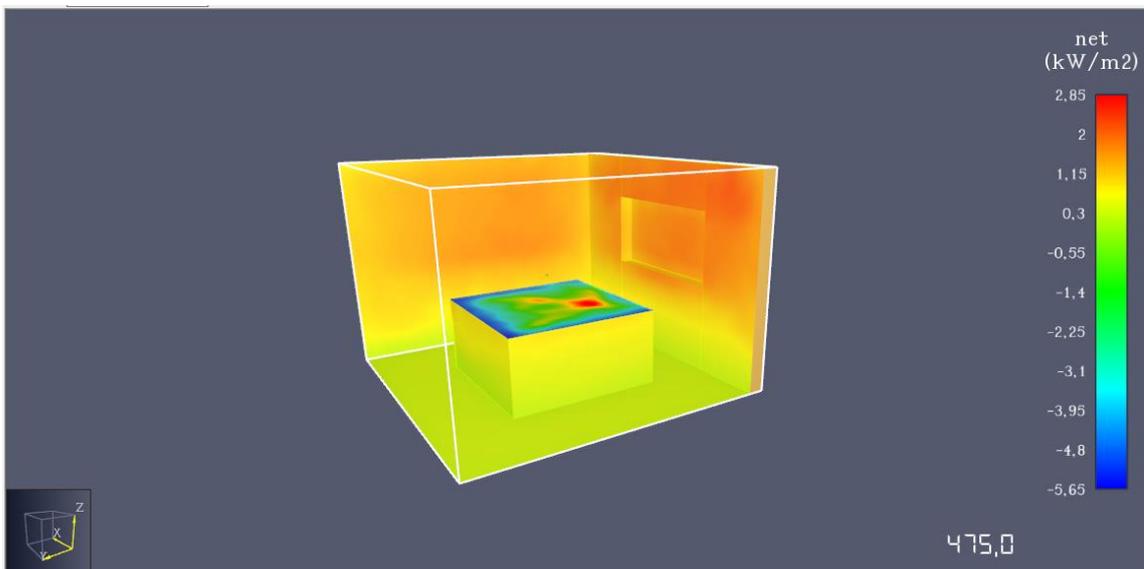


Figura A.4 - Fluxo de calor no ambiente em $t = 475$ segundos

(Fonte: elaborado pela autora)

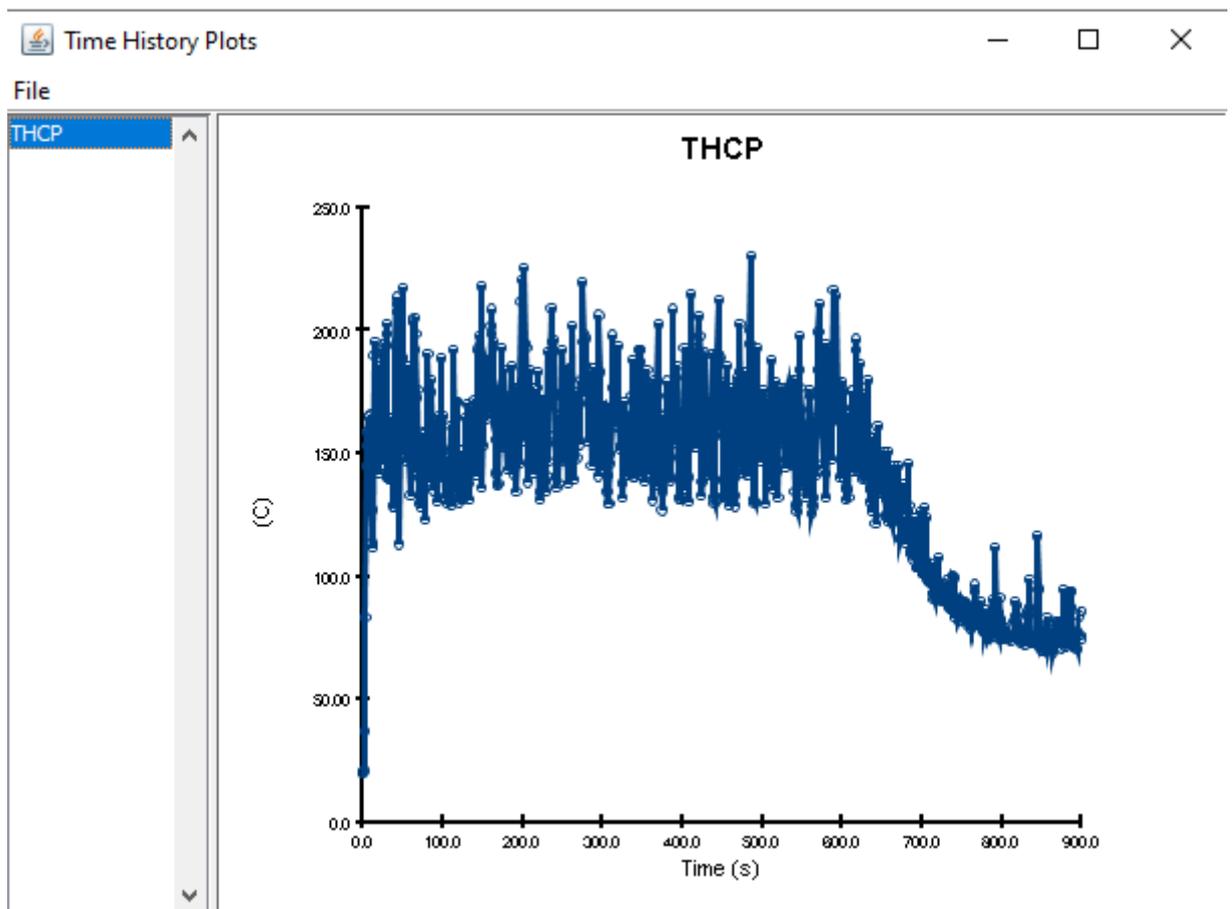
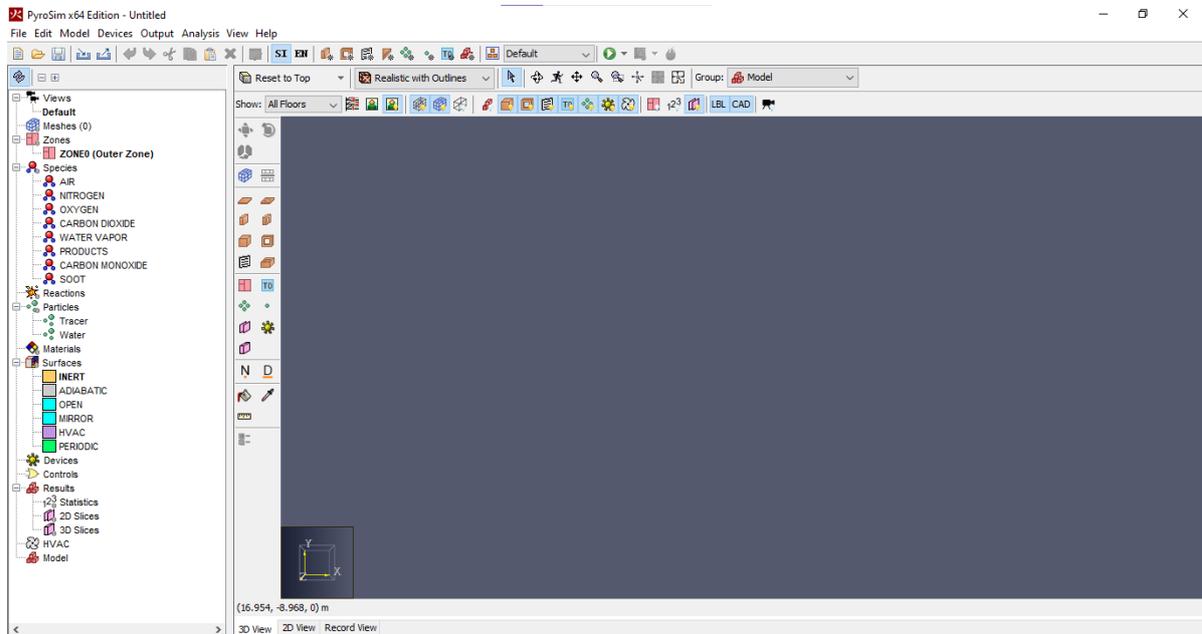


Figura A.5 - Gráfico da temperatura com o tempo no termopar (THCP)

(Fonte: elaborado pela autora)

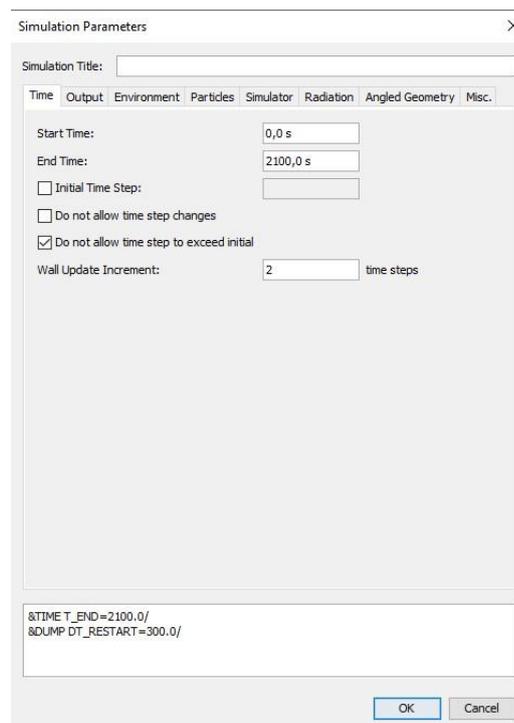
APÊNDICE B – ENTRADA DE DADOS DA SIMULAÇÃO REALIZADA NO PYROSIM

- Interface inicial do *software* PyroSim:



B.1 Parâmetros iniciais

- Definição do tempo de simulação:



- Definição da espécie utilizada na reação de combustão:

Species ID: MADEIRA

Description:

Initial Mass Fraction: 0,0

Primitive Vis/Dif Radiation Soot Liquid Gas Advanced

Molecular Weight: 29,0 g/mol

Chemical Formula: 1.700.74N0.002

Lumped Component Only: AUTO

&SPEC ID='MADEIRA', FORMULA='CH1.700.74N0.002/'

- Definição da reação de combustão:

Description:

Reaction Type: Simple Chemistry

Fuel Fire Suppression Byproducts Advanced

Fuel Type: User Defined

Fuel Species: MADEIRA Edit Species...

Composition

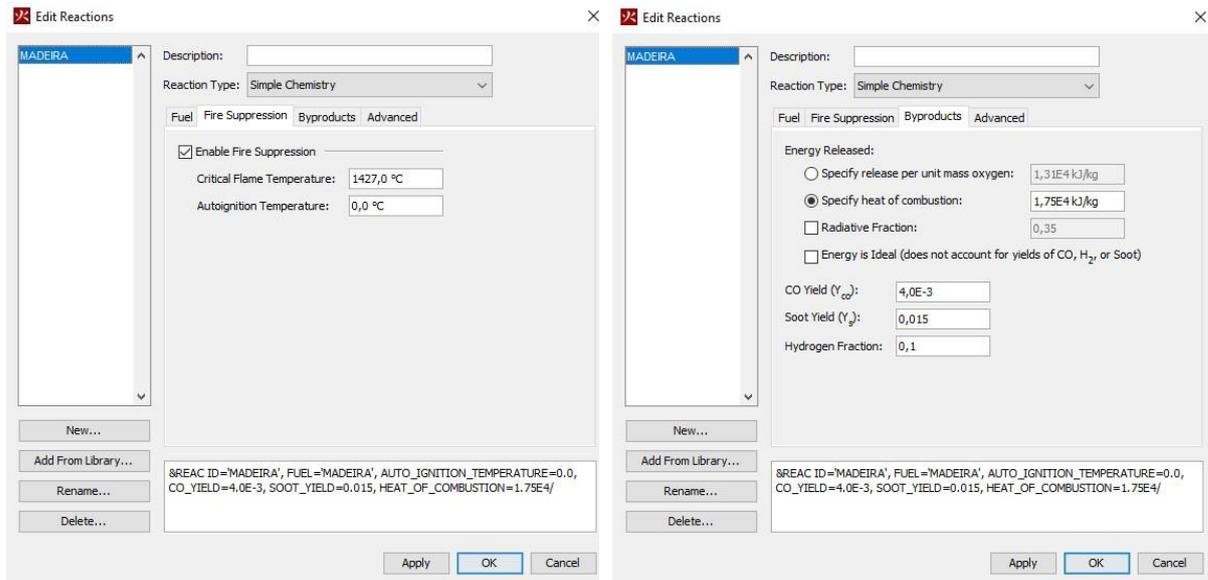
Carbon atoms: 0,0

Hydrogen atoms: 0,0

Oxygen atoms: 0,0

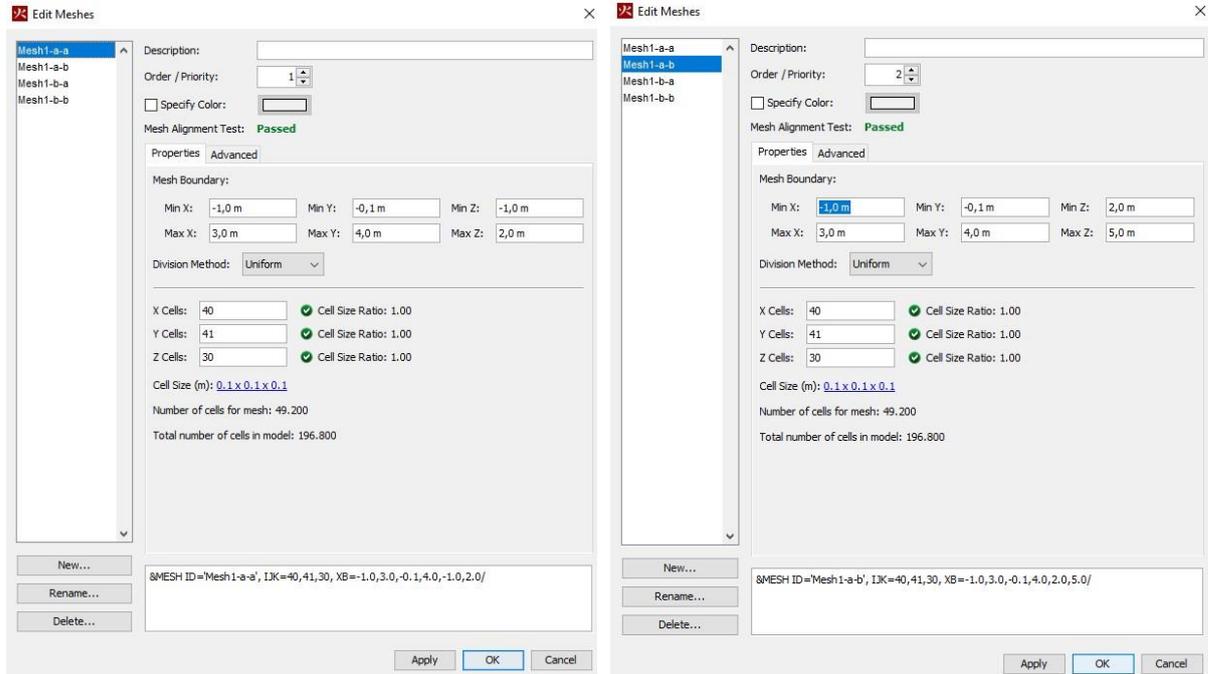
Nitrogen atoms: 0,0

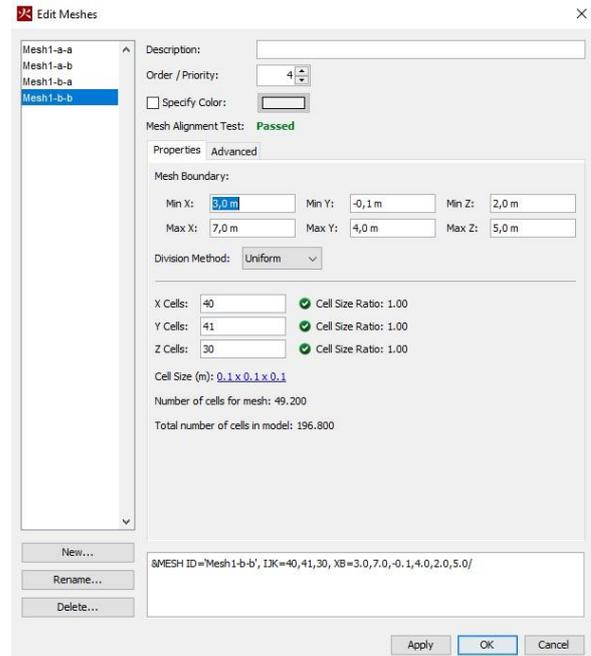
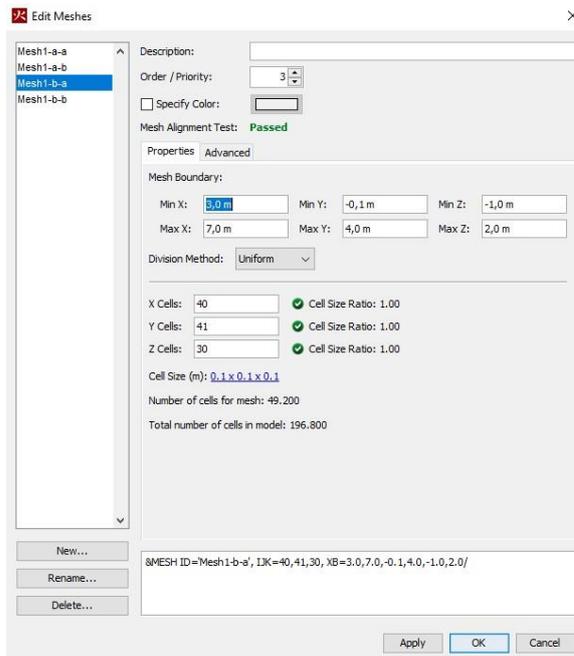
&REAC ID='MADEIRA', FUEL='MADEIRA', AUTO_IGNITION_TEMPERATURE=0.0, CO_YIELD=4.0E-3, SOOT_YIELD=0.015, HEAT_OF_COMBUSTION=1.75E4/'



B.2 Domínio computacional e malha

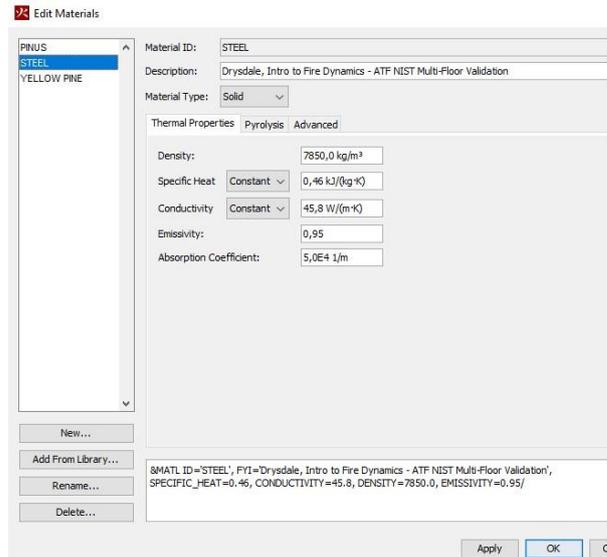
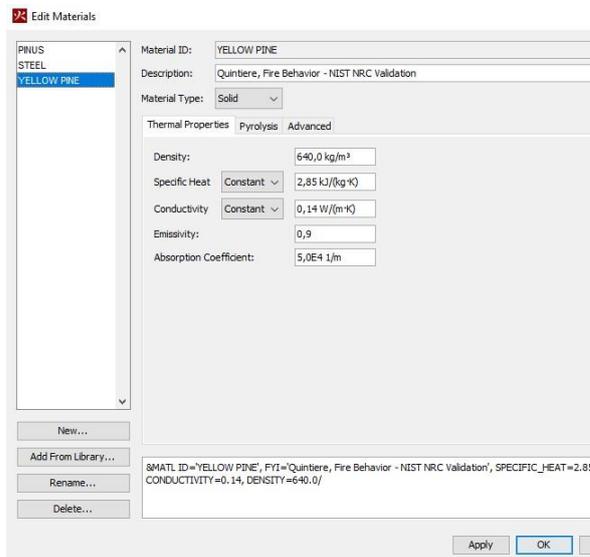
- Definição da malha, com dimensões indicadas na Tabela 3.2. A malha foi dividida em 4 partes para possibilitar o processamento paralelo da simulação.

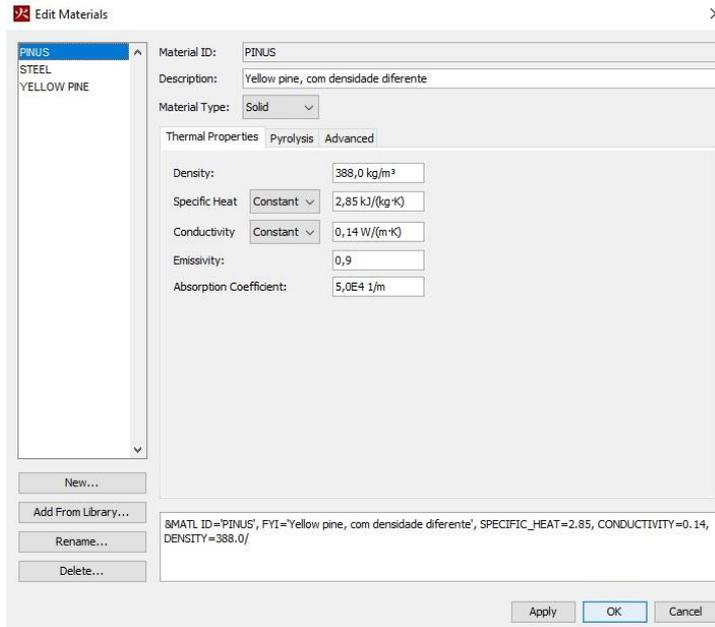




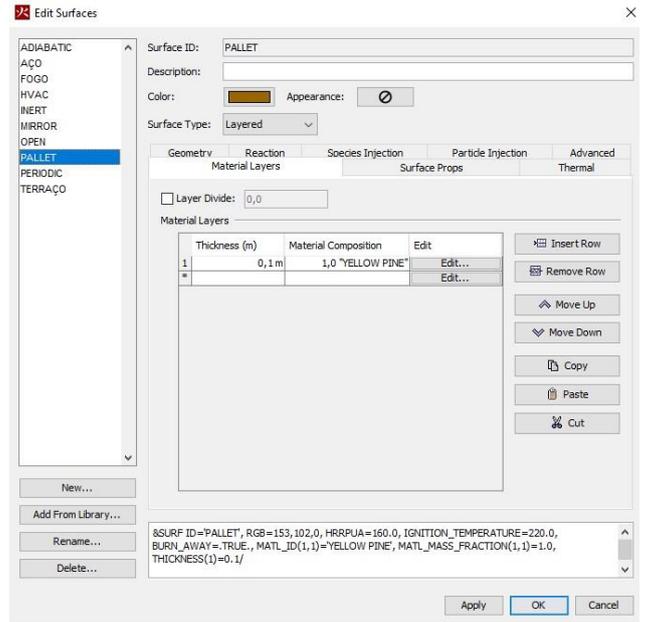
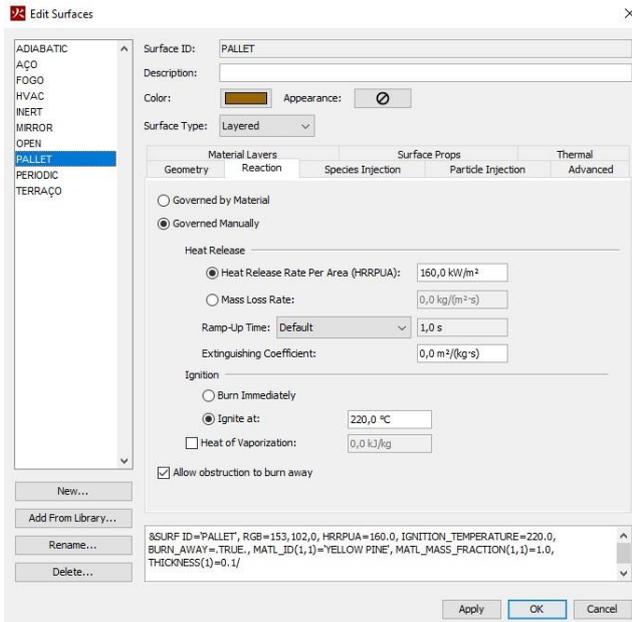
B.3 Propriedade dos materiais

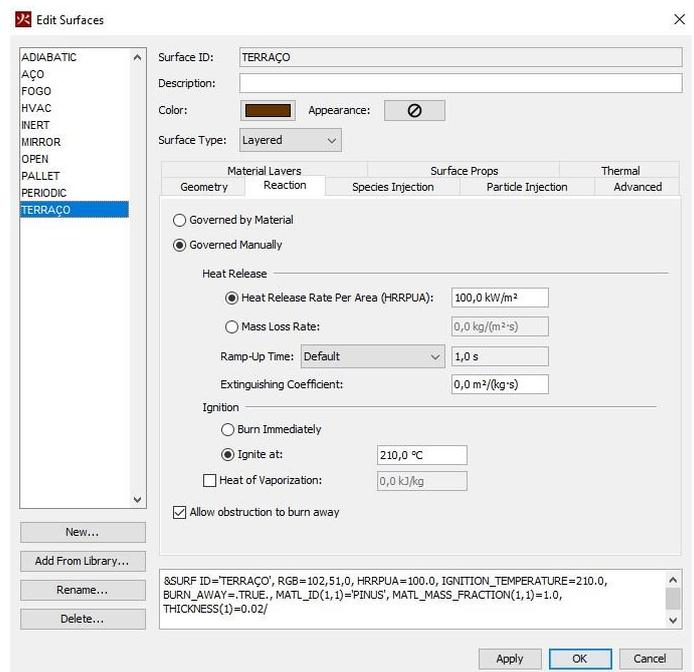
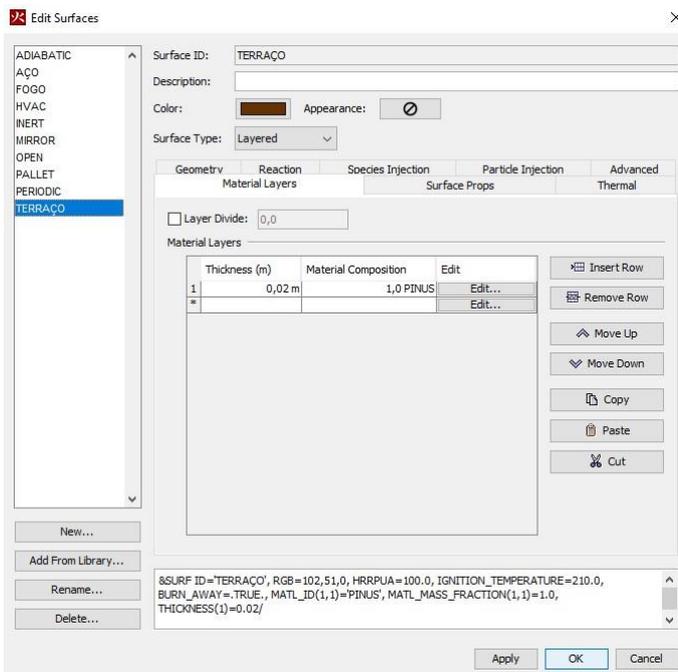
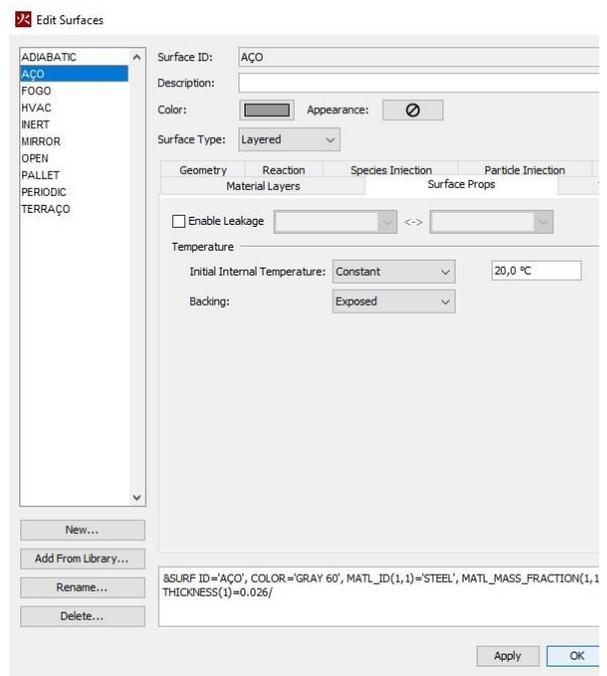
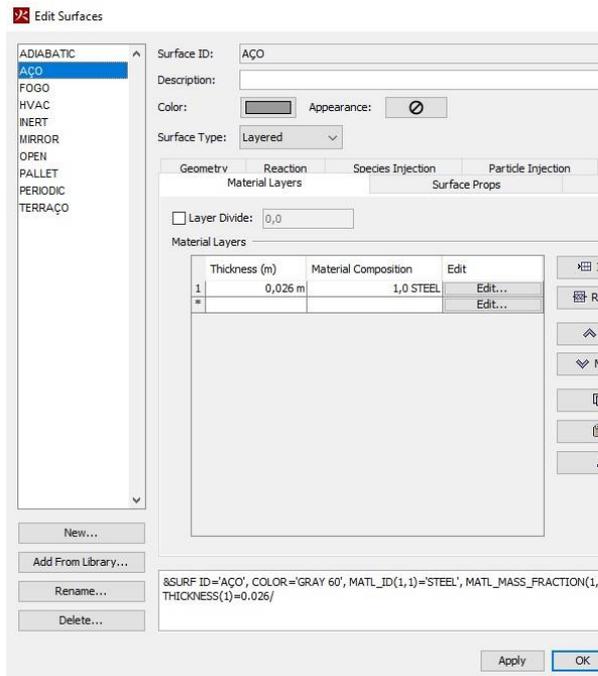
- Definição das propriedades dos materiais, como indicado na Tabela 3.3.



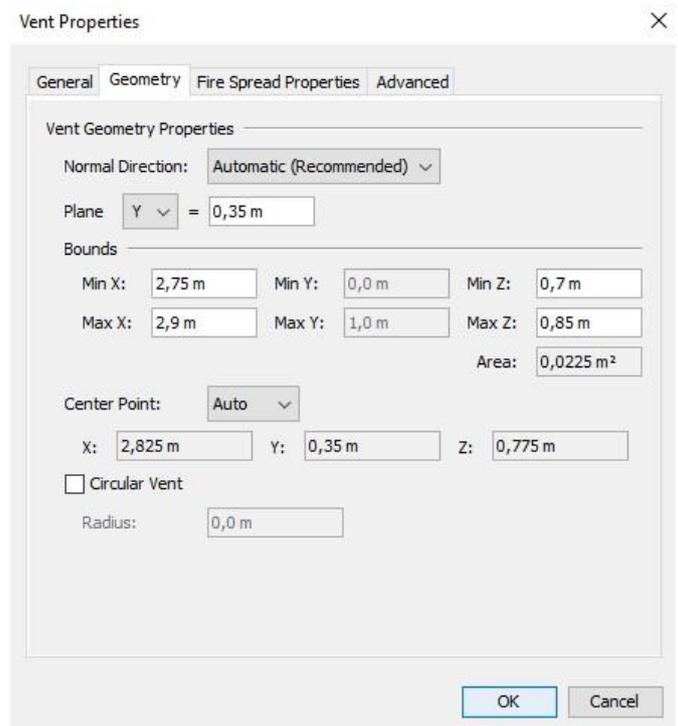
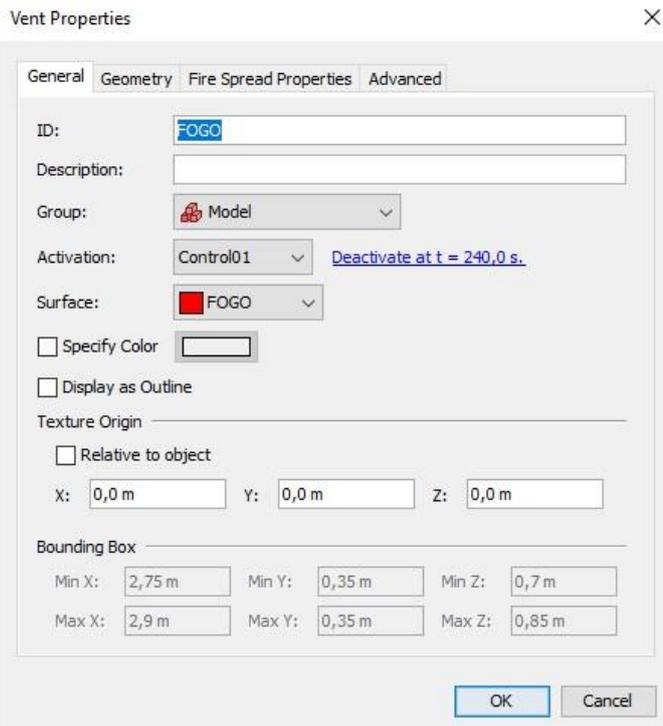
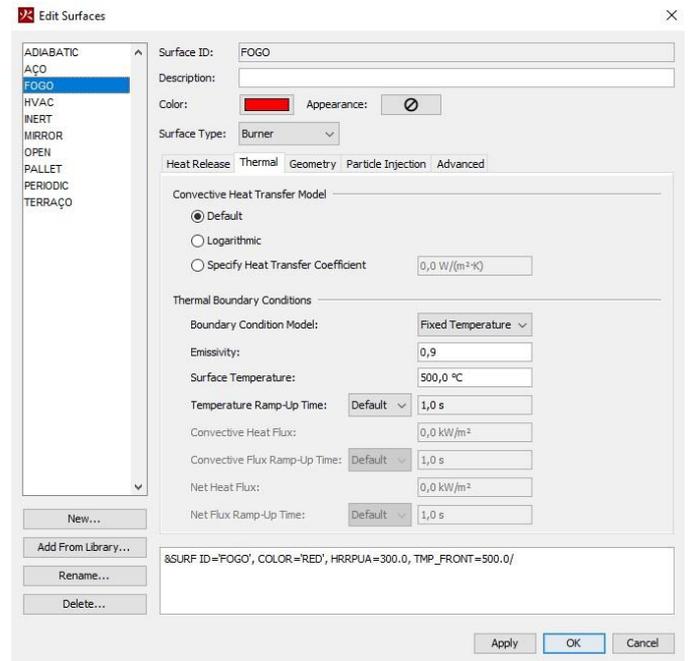
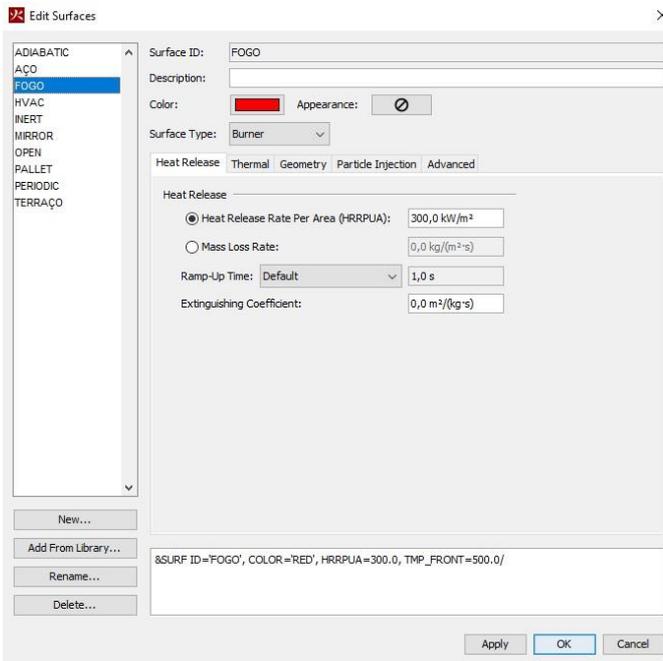


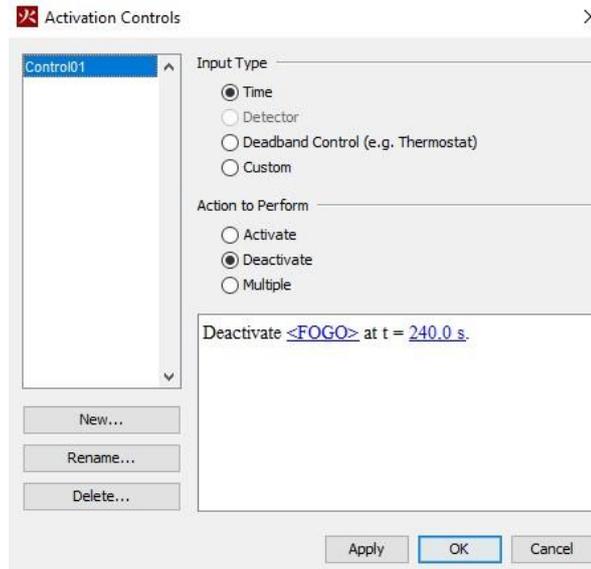
○ Definição das superfícies:





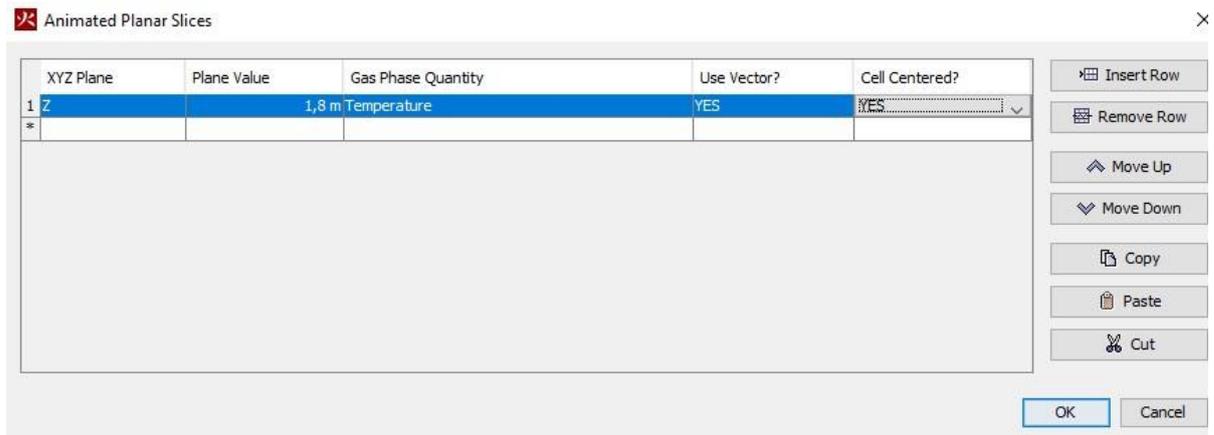
- Definição das propriedades da superfície do fogo, juntamente com seu posicionamento no modelo e os parâmetros do controle que o desativa após 4 minutos.



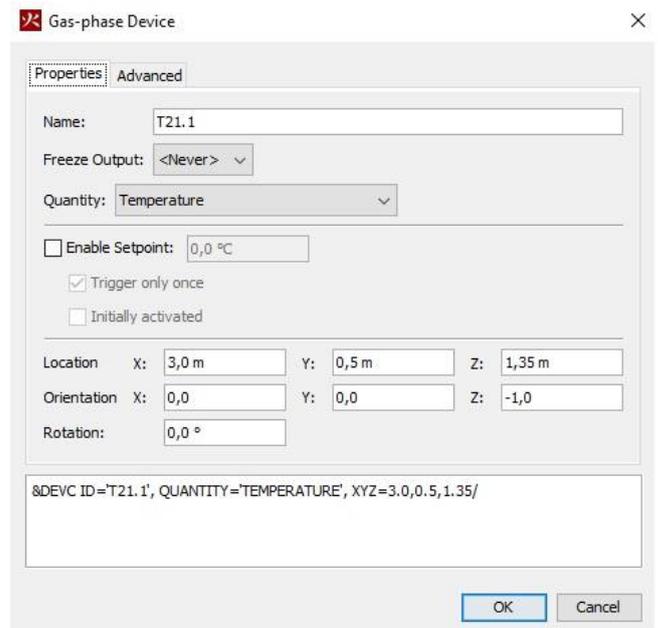
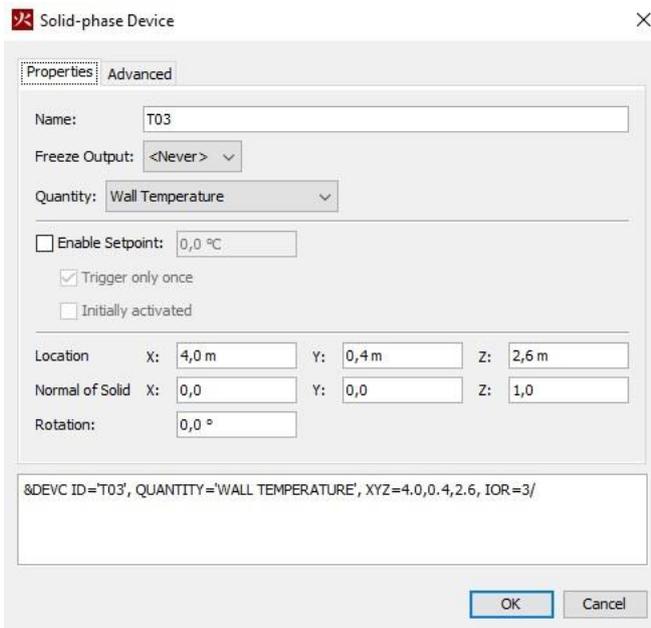


B.4 Dispositivos de medição

- Definição do plano de temperatura:

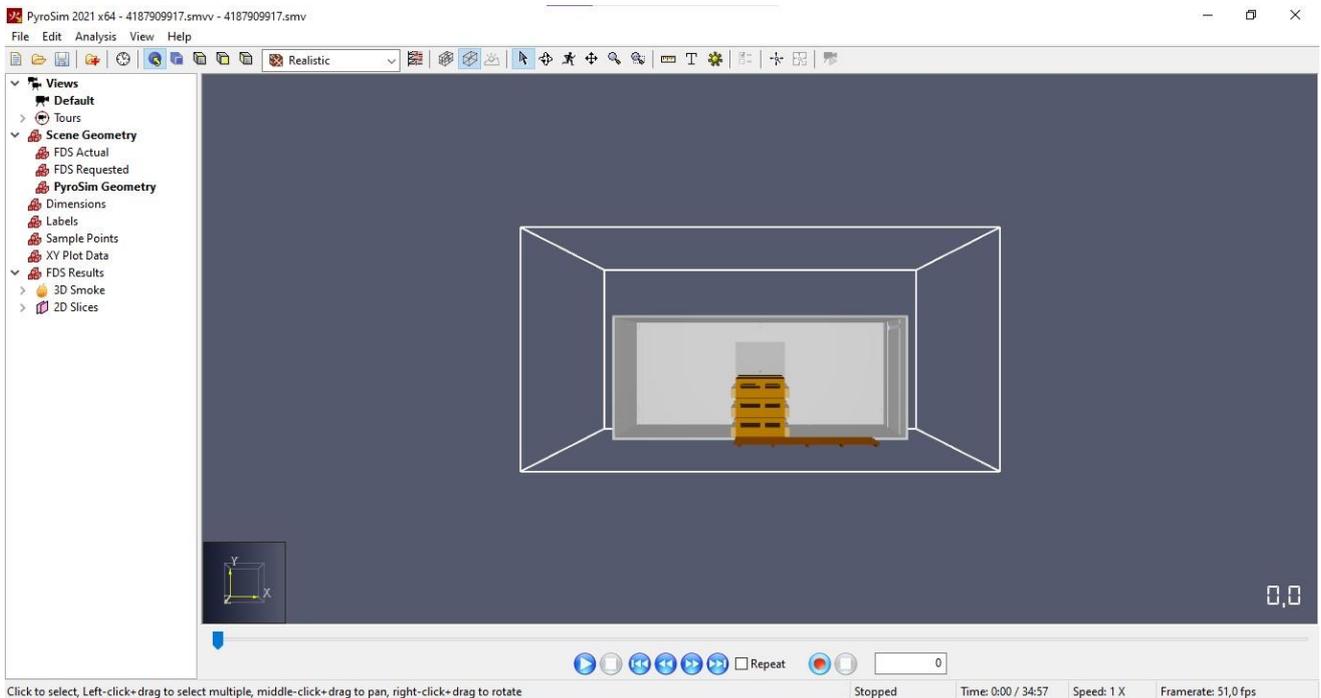


- Definição do termopar T21, os demais termopares têm parâmetros iguais com mudança apenas da sua posição. Com exceção do termopar T03, que também está definido abaixo, que foi colocado diretamente na parede do container, por isso faz a medida de uma fase sólida e não gasosa como os demais.



B.5 Resultados

- Interface do *Smokeview* com os resultados da simulação



B.6 Arquivo FDS

- Abaixo está apresentado o arquivo de texto do FDS gerado automaticamente pelo *software* PyroSim para a simulação do problema proposto neste trabalho;

Pré final.fds
Generated by PyroSim - Version 2021.1.0224
May 18, 2021 4:14:44 PM

&HEAD CHID='4187909917' /

DEFINIÇÃO DO TEMPO DE SIMULAÇÃO (EM SEGUNDOS):

&TIME T_END=2100.0/
&DUMP DT_RESTART=300.0/

DEFINIÇÃO DA MALHA:

&MESH ID='Mesh1-a-a', IJK=40,41,30, XB=-1.0,3.0,-0.1,4.0,-1.0,2.0/
&MESH ID='Mesh1-a-b', IJK=40,41,30, XB=-1.0,3.0,-0.1,4.0,2.0,5.0/
&MESH ID='Mesh1-b-a', IJK=40,41,30, XB=3.0,7.0,-0.1,4.0,-1.0,2.0/
&MESH ID='Mesh1-b-b', IJK=40,41,30, XB=3.0,7.0,-0.1,4.0,2.0,5.0/

DEFINIÇÃO DA REAÇÃO DE COMBUSTÃO:

&SPEC ID='MADEIRA', FORMULA='CH1.700.74N0.002' /

&REAC ID='MADEIRA',
FUEL='MADEIRA',
AUTO_IGNITION_TEMPERATURE=0.0,
CO_YIELD=4.0E-3,
SOOT_YIELD=0.015,
HEAT_OF_COMBUSTION=1.75E4/

DEFINIÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE SÁIDA:

TERMOPARES:

&DEVC ID='T03', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=4.0,0.4,2.6, IOR=3/
&DEVC ID='T21.1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.0,0.5,1.35/
&DEVC ID='T21.2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.0,1.0,1.35/
&DEVC ID='T22.1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.1,2.5,0.15/
&DEVC ID='T22.2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.1,0.5,0.15/
&DEVC ID='T23.1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=5.9,2.5,0.15/
&DEVC ID='T23.2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=5.9,0.5,0.15/
&DEVC ID='T22.1 Frente', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.1,2.5,2.45/
&DEVC ID='T22.2 Frente', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.1,0.5,2.45/
&DEVC ID='T23.1 Frente', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=5.9,2.5,2.45/
&DEVC ID='T23.2 Frente', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=5.9,0.5,2.45/
&DEVC ID='Tviga 1', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.0,2.5,2.5/
&DEVC ID='Tviga 01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.0,2.5,0.1/
&DEVC ID='T23.1 Frente01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=5.9,2.5,1.3/
&DEVC ID='T22.1 Frente01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.1,2.5,1.3/
&DEVC ID='T21 Porta', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.0,1.5,2.5/
&DEVC ID='T21 Porta01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=3.0,0.5,2.5/

CONTROLE DE TEMPO DO "QUEIMADOR"

&DEVC ID='TIMER->OUT', QUANTITY='TIME', XYZ=-1.0,-0.1,-1.0, SETPOINT=240.0, INITIAL_STATE=.TRUE./

PLANO DE TEMPERATURA:

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., CELL_CENTERED=.TRUE., PBZ=1.8/

PROPRIEDADE DOS MATERIAIS:

AÇO:

&MATL ID='STEEL',
FYI='Drysedale, Intro to Fire Dynamics - ATF NIST Multi-Floor Validation',
SPECIFIC_HEAT=0.46,
CONDUCTIVITY=45.8,
DENSITY=7850.0,
EMISSIVITY=0.95/

PINHO (USADO NOS PALLETS)

&MATL ID='YELLOW PINE',
FYI='Quintiere, Fire Behavior - NIST NRC Validation',
SPECIFIC_HEAT=2.85,
CONDUCTIVITY=0.14,
DENSITY=640.0/

PINUS (USADO NO TERRAÇO)

&MATL ID='PINUS',
FYI='Yellow pine, com densidade diferente',
SPECIFIC_HEAT=2.85,
CONDUCTIVITY=0.14,
DENSITY=388.0/

&SURF ID='AÇO',
COLOR='GRAY 60',
MATL_ID(1,1)='STEEL',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.026/

&SURF ID='PALLET',
RGB=153,102,0,
HRRPUA=160.0,
IGNITION_TEMPERATURE=220.0,
BURN_AWAY=.TRUE.,
MATL_ID(1,1)='YELLOW PINE',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.1/

&SURF ID='TERRAÇO',
RGB=102,51,0,
HRRPUA=100.0,
IGNITION_TEMPERATURE=210.0,
BURN_AWAY=.TRUE.,
MATL_ID(1,1)='PINUS',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.02/

&SURF ID='FOGO',
COLOR='RED',
HRRPUA=300.0,
TMP_FRONT=500.0/

GEOMETRIA DO COMPARTIMENTO:

CONTAINER:

&OBST ID='CONTAINER', XB=0.0,0.05,0.1,2.6,0.0,2.6, SURF_ID='AÇO' /
&OBST ID='CONTAINER', XB=5.95,6.0,0.1,2.6,0.0,0.65, SURF_ID='AÇO' /
&OBST ID='CONTAINER', XB=0.0,6.0,0.1,2.6,0.0,0.05, SURF_ID='AÇO' /
&OBST ID='CONTAINER', XB=0.0,2.5,0.1,2.6,2.55,2.6, RGB=192,192,192, TRANSPARENCY=0.498039, SURF_ID='AÇO' /
&OBST ID='CONTAINER', XB=3.5,6.0,0.1,2.6,2.55,2.6, RGB=192,192,192, TRANSPARENCY=0.498039, SURF_ID='AÇO' /
&OBST ID='CONTAINER', XB=0.0,6.0,2.6,2.65,0.0,2.6, SURF_ID='AÇO' /
&OBST ID='CONTAINER', XB=0.0,6.0,0.1,0.15,0.0,2.6, SURF_ID='AÇO' /
&OBST ID='CONTAINER', XB=2.5,3.5,2.1,2.6,2.55,2.6, RGB=192,192,192, TRANSPARENCY=0.498039, SURF_ID='AÇO' /
&OBST ID='CONTAINER', XB=5.95,6.0,0.1,2.6,1.95,2.6, SURF_ID='AÇO' /
&OBST ID='CONTAINER', XB=5.95,6.0,2.5,2.6,0.65,1.95, SURF_ID='AÇO' /
&OBST ID='CONTAINER', XB=5.95,6.0,0.1,2.4,0.65,1.95, SURF_ID='AÇO' /

PALLETS:

&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.15,0.25,2.4,2.5, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.25,0.35,1.5,2.5, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.15,0.25,1.5,1.6, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.15,0.25,2.0,2.1, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=3.4,3.5,0.35,0.45,1.4,2.6, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.5,3.5,0.45,0.55,1.4,2.6, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.5,2.6,0.35,0.45,1.4,2.6, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=3.0,3.1,0.35,0.45,1.4,2.6, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.55,0.65,2.4,2.5, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.65,0.75,1.5,2.5, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.55,0.65,1.5,1.6, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.55,0.65,2.0,2.1, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=3.4,3.5,0.75,0.85,1.4,2.6, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.5,3.5,0.85,0.95,1.4,2.6, SURF_ID='PALLET' /

&OBST ID='PALLET', XB=2.5,2.6,0.75,0.85,1.4,2.6, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=3.0,3.1,0.75,0.85,1.4,2.6, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.95,1.05,2.4,2.5, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,1.05,1.15,1.5,2.5, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.95,1.05,1.5,1.6, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.95,1.05,2.0,2.1, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=3.4,3.5,1.15,1.25,1.4,2.6, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.5,3.5,1.25,1.35,1.4,2.6, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.5,2.6,1.15,1.25,1.4,2.6, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=3.0,3.1,1.15,1.25,1.4,2.6, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.15,0.25,0.2,0.3, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.25,0.35,0.2,1.2, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.15,0.25,1.1,1.2, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.15,0.25,0.6,0.7, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.5,2.6,0.35,0.45,0.1,1.3, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.5,3.5,0.45,0.55,0.1,1.3, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=3.4,3.5,0.35,0.45,0.1,1.3, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.9,3.0,0.35,0.45,0.1,1.3, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.55,0.65,0.2,0.3, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.65,0.75,0.2,1.2, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.55,0.65,1.1,1.2, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.55,0.65,0.6,0.7, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.5,2.6,0.75,0.85,0.1,1.3, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.5,3.5,0.85,0.95,0.1,1.3, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=3.4,3.5,0.75,0.85,0.1,1.3, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.9,3.0,0.75,0.85,0.1,1.3, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.95,1.05,0.2,0.3, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,1.05,1.15,0.2,1.2, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.95,1.05,1.1,1.2, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.4,3.6,0.95,1.05,0.6,0.7, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.5,2.6,1.15,1.25,0.1,1.3, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.5,3.5,1.25,1.35,0.1,1.3, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=3.4,3.5,1.15,1.25,0.1,1.3, SURF_ID='PALLET' /
&OBST ID='PALLET', XB=2.9,3.0,1.15,1.25,0.1,1.3, SURF_ID='PALLET' /

TERRAÇO:

&OBST ID='TERRAÇO', XB=2.575,2.625,0.1,0.15,2.64,3.59, SURF_ID='TERRAÇO' /
&OBST ID='TERRAÇO', XB=3.225,3.275,0.1,0.15,2.64,3.59, SURF_ID='TERRAÇO' /
&OBST ID='TERRAÇO', XB=3.875,3.925,0.1,0.15,2.64,3.59, SURF_ID='TERRAÇO' /
&OBST ID='TERRAÇO', XB=4.525,4.575,0.1,0.15,2.64,3.59, SURF_ID='TERRAÇO' /
&OBST ID='TERRAÇO', XB=5.175,5.225,0.1,0.15,2.64,3.59, SURF_ID='TERRAÇO' /
&OBST ID='TERRAÇO', XB=2.5,5.25,0.15,0.17,2.64,2.69, SURF_ID='TERRAÇO' /
&OBST ID='TERRAÇO', XB=2.5,5.25,0.15,0.17,2.74,2.79, SURF_ID='TERRAÇO' /
&OBST ID='TERRAÇO', XB=2.5,5.25,0.15,0.17,2.84,2.89, SURF_ID='TERRAÇO' /
&OBST ID='TERRAÇO', XB=2.5,5.25,0.15,0.17,2.94,2.99, SURF_ID='TERRAÇO' /
&OBST ID='TERRAÇO', XB=2.5,5.25,0.15,0.17,3.04,3.09, SURF_ID='TERRAÇO' /
&OBST ID='TERRAÇO', XB=2.5,5.25,0.15,0.17,3.14,3.19, SURF_ID='TERRAÇO' /
&OBST ID='TERRAÇO', XB=2.5,5.25,0.15,0.17,3.24,3.29, SURF_ID='TERRAÇO' /
&OBST ID='TERRAÇO', XB=2.5,5.25,0.15,0.17,3.34,3.39, SURF_ID='TERRAÇO' /
&OBST ID='TERRAÇO', XB=2.5,5.25,0.15,0.17,3.44,3.49, SURF_ID='TERRAÇO' /
&OBST ID='TERRAÇO', XB=2.5,5.25,0.15,0.17,3.54,3.59, SURF_ID='TERRAÇO' /

SUPERFÍCIES DE ABERTURA DA MALHA PARA O EXTERIOR:

&VENT ID='Vent01', SURF_ID='OPEN', XB=-1.0,-1.0,-0.1,4.0,-1.0,5.0/
&VENT ID='Vent02', SURF_ID='OPEN', XB=7.0,7.0,-0.1,4.0,-1.0,5.0/
&VENT ID='Vent03', SURF_ID='OPEN', XB=-1.0,7.0,-0.1,4.0,-1.0,-1.0/
&VENT ID='Vent04', SURF_ID='OPEN', XB=-1.0,7.0,-0.1,4.0,5.0,5.0/
&VENT ID='Vent05', SURF_ID='OPEN', XB=-1.0,7.0,-0.1,-0.1,-1.0,5.0/
&VENT ID='Vent06', SURF_ID='OPEN', XB=-1.0,7.0,4.0,4.0,-1.0,5.0/

SUPERFÍCIE DO "QUEIMADOR":

&VENT ID='FOGO', SURF_ID='FOGO', XB=2.75,2.9,0.35,0.35,0.7,0.85, DEVC_ID='TIMER->OUT' /

&TAIL /

APÊNDICE C – PRÉ-DIMENSIONAMENTO DA VIGA UTILIZADA NA ANÁLISE ESTRUTURAL

Esse apêndice tratará da descrição do modelo estrutural utilizado na análise estrutural feita no capítulo 4 deste trabalho. Dessa forma, primeiramente, a estrutura utilizada para análise será apresentada. Depois será feito o dimensionamento da estrutura considerando condições ambientais. Para, por fim, ser feito o cálculo da carga de projeto na situação de incêndio.

A Figura C.1 abaixo apresenta a estrutura utilizada e sua localização no container da simulação feita no item anterior. É importante ressaltar que não foi feita uma simulação com a estrutura no modelo, e a Figura C.1 abaixo apenas demonstra sua localização no modelo.

Como pode ser visto, a estrutura é composta por: quatro pilares nos cantos do container; e duas vigas, a primeira passando em cima da porta e a outra paralela à primeira, localizada na parede posterior do container.

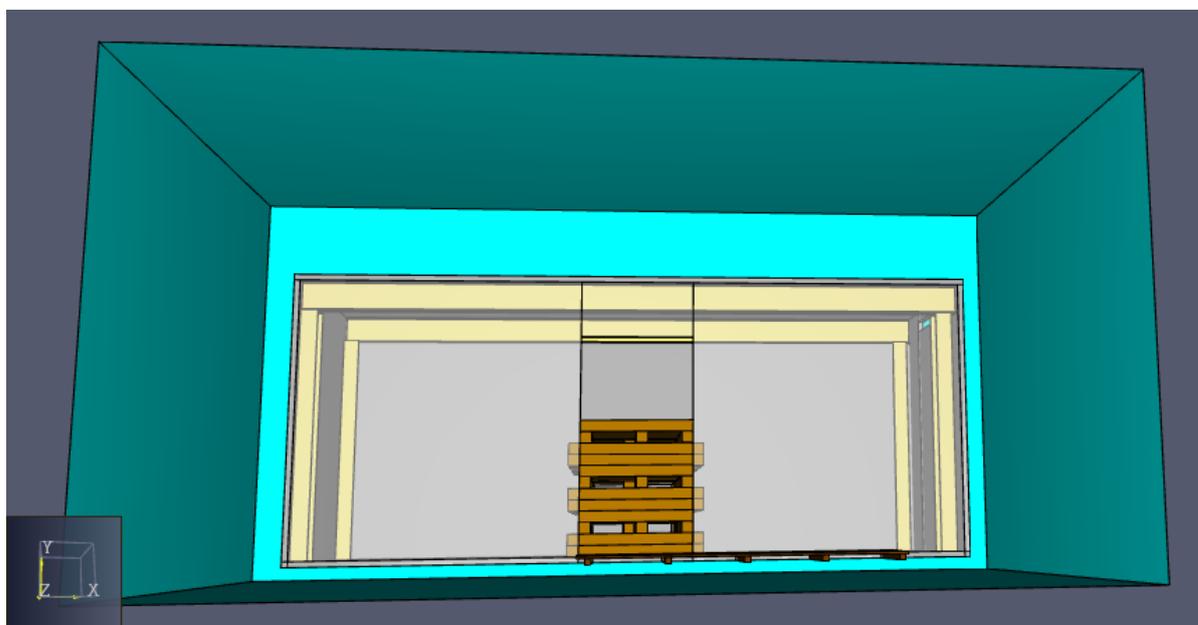


Figura C.1 - Localização da estrutura no container (1)

(Fonte: elaborado pela autora)

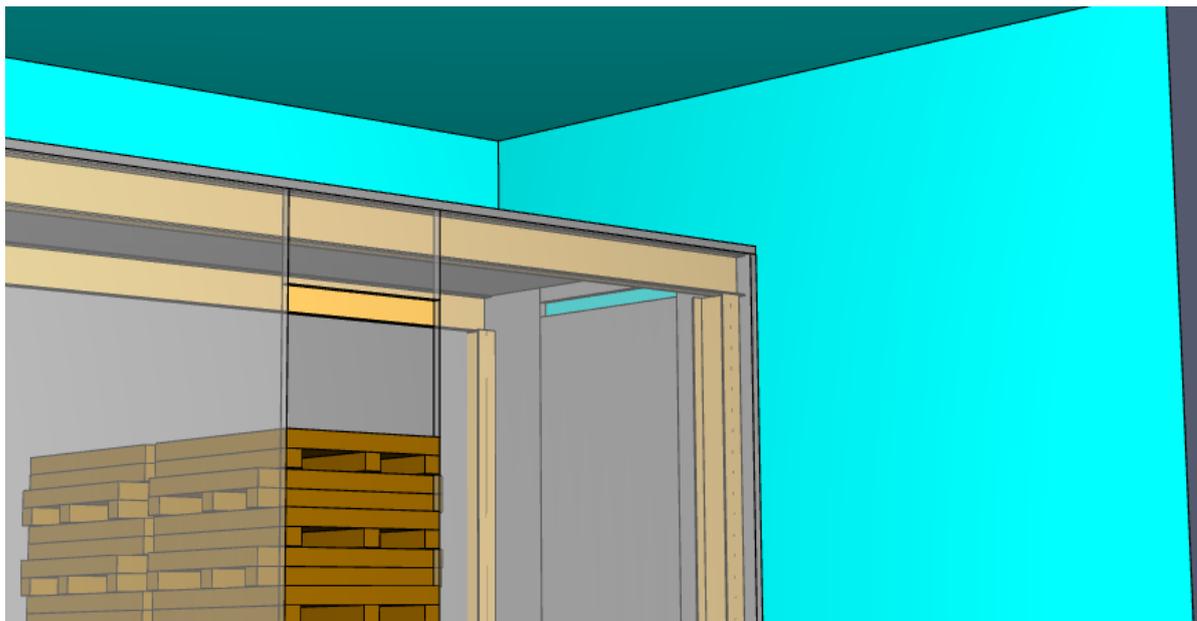


Figura C.2 - Localização da estrutura no container (2)

(Fonte: elaborado pela autora)

A partir do modelo apresentado para o pré-dimensionamento da estrutura, sabe-se que:

- O compartimento analisado será considerado como sendo uma cozinha não residencial. Que, de acordo com a norma NBR 6120:1980, possui uma carga mínima de utilização igual a 3kN/m^2 .
- Para a estrutura metálica será utilizado aço ASTM A36, cuja resistência ao escoamento (f_y) é igual a 250 MPa (Pfeil,2009).
- Acima da estrutura de aço tem-se uma laje de concreto armado (peso específico $\gamma = 25\text{kN/m}^3$) com espessura $e = 10\text{cm}$ e pré-moldada.

Sabendo disso, e considerando como referência as formulações e tabelas apresentadas em Pfeil (2009) primeiro será feito o pré-dimensionamento das vigas, para, posteriormente o perfil dos pilares serem determinados.

C.1 Pré-dimensionamento das Vigas

A carga permanente será composta apenas pelo peso próprio da laje da estrutura, que foi calculada da seguinte forma:

$$G_1 = \gamma \cdot e = 25 \cdot 0,1 = 2,5\text{kN/m}^2 \quad (\text{C.1})$$

Já a carga variável será igual a carga de utilização dada pela NBR 6120 (1980), que é dada por:

$$Q_1 = 3\text{kN/m}^2 \quad (\text{C.2})$$

As cargas dadas anteriormente estão distribuídas pela laje, para calcular a carga linear que atua nas vigas (V01 e V02) basta multiplicar os valores encontrados pela distância entre as vigas, que é igual à largura do container, 2,6 metros. Assim,

$$G_1 = 2,5 \cdot 2,6 = 6,5 \text{ kN/m} \quad (\text{C.3})$$

$$Q_1 = 3,0 \cdot 2,6 = 7,8 \text{ kN/m} \quad (\text{C.4})$$

A combinação de cargas para o cálculo da carga de projeto é dada por:

$$q_d = F_d = \sum \gamma_{gi} G_i + \gamma_{q1} Q_1 + \sum \gamma_{qj} \Psi_{oj} Q_j \quad (\text{C.5})$$

Nesse caso, o último termo da equação é nulo, pois só uma carga variável será utilizada. Os coeficientes γ_{gi} e γ_{q1} são iguais a 1,3 e 1,5 respectivamente. Então, a carga de projeto será igual a:

$$q_d = 1,3 \cdot 6,5 + 1,5 \cdot 7,8 = 20,15 \text{ kN/m} \quad (\text{C.6})$$

A partir da carga de projeto pode-se calcular o momento fletor de projeto máximo ($M_{dmáx}$) na viga, que acontecerá no meio do vão. Esse momento será utilizado para o pré-dimensionamento da viga. Então, calculando o momento M_d tem-se:

$$M_{dmáx} = \frac{q_d \cdot l^2}{8} \quad (\text{C.7})$$

Em que:

q_d é a carga de projeto, em kN/m;

l é o comprimento da viga, em metros.

Assim, o momento M_d é igual a 9067,5kNcm. E o perfil da viga que será utilizado será determinado utilizando a equação abaixo.

$$f_y = \frac{M_{dmáx}}{W_x} \quad (\text{C.8})$$

Em que:

f_y é a resistência ao escoamento do aço, que é igual a 250MPa para o aço utilizado;

W_x é o parâmetro geométrico da viga, em cm^3 ;

M_dmáx é o momento fletor de projeto máximo na viga, em kN.cm.

Usando a fórmula dada chega-se a um W_x igual a 362,7cm³. Dessa forma, para essa situação deve-se escolher um perfil metálico com W_x maior que o encontrado. Com o auxílio das tabelas apresentadas por Pfeil (2009), o perfil escolhido foi o W250 x 32,7.

Agora, tendo um perfil escolhido, deve-se levar em consideração o peso próprio do perfil na combinação de cargas feita anteriormente para fazer a verificação se o perfil ainda será adequado com a adição dessa carga. Assim, utilizando a equação C.5 dada acima, e sabendo que o peso do perfil é igual a 0,327kN/m e o coeficiente γ a ser usado na combinação de cargas é igual a 1,25. Tem-se a seguinte combinação de cargas:

$$q_d = 1,25 \cdot 0,327 + 1,3 \cdot 6,5 + 1,5 \cdot 7,8 = 20,56kN/m \quad (C.9)$$

Para uma carga de projeto igual a 20,56kN/m o novo momento fletor de projeto máximo é igual a 9252kNcm. O que implica em um perfil com W_x mínimo de 370,08 cm³. Como o perfil escolhido possui um W_x de 382,70 cm³ então, ainda podemos utilizá-lo.

C.2 Pré-dimensionamento dos Pilares

O pré-dimensionamento dos pilares será feito com base na carga de projeto (q_d) calculada para as vigas, igual a 20,56kN/m.

Dessa forma, a carga de projeto no pilar será dada por:

$$N_d = \frac{q_d l}{2} = \frac{20,56 \cdot 6}{2} = 61,68kN \quad (C.10)$$

O perfil das colunas será determinado através da seguinte expressão:

$$R_{dc} = \frac{A \cdot \chi \cdot f_y}{\gamma_{a1}} \quad (C.11)$$

Em que:

A_g a área bruta da seção transversal da barra;

f_y a resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente.

χ_{fi} o fator de redução associado à resistência à compressão em situação de incêndio, e calculado segundo a equação 4.13;

γ_{a1} é igual a 1,10 para combinações normais;

Nesse caso, a área A da seção transversal deve ser maior que 4,52 cm². Assim, escolhendo um perfil I laminado com o auxílio das tabelas apresentadas em Pfeil (2009) tem-se o perfil I 203x27,3 que possui uma área igual a 34,8 cm².

Agora, deve-se fazer a verificação do perfil. Calculando primeiramente o índice de esbeltez reduzido (λ_o):

$$\lambda_o = \frac{K \cdot l}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{f_y/E} \quad (C.12)$$

Sendo:

K o comprimento de flambagem, considerado igual a 2,0;

l o comprimento da coluna, em cm;

i o raio de giração da seção, igual a 2,11 para o perfil escolhido, segundo Pfeil (2009);

f_y a resistência ao escoamento do aço à temperatura ambiente;

E o módulo de elasticidade do aço a temperatura ambiente.

$$\lambda_o = \frac{2 \cdot 250}{2,11} \frac{1}{\pi} \sqrt{25/20000} = 2,66$$

Considerando o valor de λ_o , e utilizando a Tabela A2.1 de Pfeil (2009) o valor de χ será igual a 0,124.

Assim, utilizando a expressão de R_{dc} dada anteriormente, seu valor será igual a 98,07kN. Como esse valor é maior que a carga de projeto da coluna, então esse perfil pode ser utilizado.

Além dessa verificação, é importante também fazer as verificações de flambagem local do perfil. Então, sabendo a geometria do perfil (dada na Tabela C.1 abaixo) e utilizando a Tabela 5.2 de Pfeil (2009), então:

Tabela C.1 - Propriedades geométricas do perfil I 203 x 27,3

Propriedades geométricas	
$t_0 = 6,86 \text{ mm}$	$h = 203,2 \text{ mm}$
$h_0 = 181,6 \text{ mm}$	$A = 34,8 \text{ cm}^2$
$t_f = 10,8 \text{ mm}$	$i_x = 8,30 \text{ cm}$
$b = 101,6 \text{ mm}$	$i_y = 2,11 \text{ cm}$

(Fonte: Pfeil, 2009)

- o Flambagem local da mesa

O valor de b/t para a mesa do perfil é dado por:

$$b/t = \frac{b/2}{t_f} = \frac{101,6/2}{10,8} = 4,70 \quad (C.13)$$

Utilizando o Grupo 4 da tabela mencionada acima, o valor de b/t limite para o aço ASTM A-36 é igual a 15,8. Como $b/t < b/t$ lim então não há o risco de flambagem local da mesa.

- o Flambagem local da alma

Usando o mesmo raciocínio para a verificação da flambagem local da alma, tem-se:

$$b/t = \frac{h_0}{t_0} = \frac{181,6}{6,86} = 26,47 \quad (\text{C.14})$$

Utilizando o Grupo 2 da tabela referenciada, o valor de b/t limite será 42,1. Novamente, $b/t < b/t$ lim, logo também não há risco de flambagem local na alma.

C.3 Determinação da carga de projeto para situação de incêndio

Depois de determinar qual perfil será utilizado na estrutura pode-se partir para o cálculo da carga de projeto na situação de incêndio. Diferente da combinação de cargas utilizada acima, para essa situação deve ser utilizada a combinação excepcional, dada por:

$$q_d = F_d = \sum \gamma_{gi} G_i + E + \sum \gamma_q \Psi_2 Q_j \quad (\text{C.15})$$

Em que:

G_i é a ação permanente aplicada a combinação;

E é a ação excepcional para a situação considerada, nesse caso o incêndio;

Q_j é a ação variável que atua simultaneamente com a ação excepcional E ;

γ_{gi} e γ_q são coeficientes de segurança aplicados às cargas, obtidos na Tabela 1.5 de Pfeil (2009);

Ψ é o fator de combinação que reduz as ações variáveis;

Para a situação estudada a carga excepcional E será considerada nula, assim a carga de utilização será utilizada como carga variável principal, assim usando os coeficientes de segurança para a combinação excepcional, tem-se:

$$q_d = 1,10 \cdot 0,327 + 1,15 \cdot 6,5 + 1,0 \cdot 7,8 = 15,63 \text{ kN/m} \quad (\text{C.16})$$

Logo, a carga utilizada para o cálculo dos esforços solicitantes na situação de incêndio será igual a 15,63kN/m.