



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JENNIFER ROSY AVELINO WAVRIK

**AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS DE INCÊNDIO PARA UM EDIFÍCIO GARAGEM EM
ESTRUTURA DE AÇO UTILIZANDO FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS)**

Recife
2025

JENNIFER ROSY AVELINO WAVRIK

**AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS DE INCÊNDIO PARA UM EDIFÍCIO GARAGEM EM
ESTRUTURA DE AÇO UTILIZANDO FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira

Recife
2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Wavrik, Jennifer Rosy Avelino.

Avaliação de cenários de incêndio para um edifício garagem em estrutura de aço utilizando fire dynamics simulator (fds) / Jennifer Rosy Avelino Wavrik. - Recife, 2025.

97 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

Orientação: Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira.

Inclui referências e apêndices.

1. Segurança contra incêndios; 2. Estruturas de aço; 3. Fire Dynamics Simulator (FDS). I. Oliveira, Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

JENNIFER ROSY AVELINO WAVRIK

**AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS DE INCÊNDIO PARA UM EDIFÍCIO GARAGEM EM
ESTRUTURA DE AÇO UTILIZANDO FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Estruturas.

Aprovada em 21/02/2025

Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira – UFPE

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof. Dr. Jordlly Reydson de Barros Silva (examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof.^a Dr.^a Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte (examinadora externa)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Dr. Cristiano Corrêa (examinador externo)
Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder forças, sabedoria e determinação ao longo deste trabalho.

Ao Professor Dr. Tiago Ancelmo, pela orientação dedicada e pelo incentivo constante, que foram essenciais para a condução deste estudo.

À Professora Dra. Dayse Duarte, pelas oportunidades concedidas na área de Engenharia de Incêndio.

À banca examinadora pela leitura atenta e pelas valiosas considerações sobre meu trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE (PPGEC/UFPE), aos professores e à secretaria.

Ao meu amado noivo, Jammesson Cabral de Albuquerque, cuja presença foi essencial para esta conquista. Seu amor, apoio incondicional e palavras de incentivo me fortaleceram nos momentos desafiadores desta jornada.

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais, José Felipe André Gomes Wavrik e Rosineide Avelino de Andrade Wavrik.

Às amigas MSc. Roberta Tabackzenski e MSc. Kézia Brasilino.

Aos amigos e colegas do PPGEC/UFPE, em especial à Luccas André, Fernanda Lays, Ítalo Matias, Matheus Hella, Gabriel Simões e Ariane da Silva.

A bolsa de mestrado do apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Por fim, agradeço a todos os amigos e familiares que, de forma direta ou indireta, participaram dessa caminhada, oferecendo apoio, incentivo e inspiração para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

Incêndios em edifícios-garagem de aço abertos lateralmente representam um desafio significativo para a segurança contra incêndios (SCI), devido à presença de combustíveis e ao risco de propagação rápida das chamas. A curva de incêndio padrão ISO 834, amplamente utilizada em dimensionamentos, ignora variáveis críticas como ventilação, geometria do ambiente, tipo de combustível e quantidade de veículos envolvidos, o que pode levar ao superdimensionamento da proteção passiva das estruturas de aço. O presente estudo tem como objetivo realizar uma análise térmica e mecânica, com o intuito de comparar as temperaturas dos gases obtidas por meio de simulações computacionais Fire Dynamics Simulator (FDS) e do método simplificado da NBR 14323 (ABNT, 2013) com as previsões da curva ISO 834, além de analisar parâmetros como concentrações de gases (O_2 , CO, CO_2) e espessura da camada de fumaça. Para isto, foram simulados três cenários de incêndio, variando o número de veículos em chamas (1 a 5), em um edifício-garagem aberto lateralmente. Utilizou-se o FDS para modelar a dinâmica do fogo e extrair dados de temperatura dos gases, concentrações gasosas e espessura de fumaça. A verificação da estabilidade estrutural dos pilares foi realizada conforme o método simplificado da NBR 14323, comparando a quantificação térmica e mecânica dos cenários de incêndio e da ISO 834. As temperaturas dos gases e do aço foram consistentemente inferiores às previstas pela curva ISO 834, mesmo no cenário crítico avaliado indicando estabilidade estrutural sem necessidade de proteção passiva excessiva neste caso. As concentrações de oxigênio (O_2) apresentaram redução de até 12% nas regiões próximas ao fogo. O dióxido de carbono (CO_2) elevou-se significativamente, enquanto o monóxido de carbono (CO) não atingiu níveis críticos. A espessura da camada de fumaça foi elevada em cenários severos, evidenciando que a ventilação natural é insuficiente para garantir segurança em edifícios-garagens abertos lateralmente. Os resultados demonstram que a adoção combinada de simulações FDS e do método simplificado da NBR 14323 permite um dimensionamento mais realista e seguro para estruturas de aço em garagens abertas, evitando o superdimensionamento da proteção passiva associada à ISO 834.

Palavras-chaves: Segurança contra incêndios; Estruturas de aço; Fire Dynamics Simulator (FDS).

ABSTRACT

Fires in side-open steel car park buildings present a significant fire safety challenge due to the presence of combustibles and the risk of rapidly spreading flames. The standard ISO 834 fire curve, which is widely used in design, ignores critical variables such as ventilation, room geometry, type of fuel and number of vehicles involved. This can lead to the passive protection of steel structures being oversized. The objective of this study is to conduct a thermal and mechanical analysis to compare the gas temperatures obtained using the Fire Dynamics Simulator (FDS) computer simulations and the simplified method of NBR 14323 (ABNT, 2013) with the predictions of the ISO 834 curve. The analysis will also examine parameters such as gas concentrations (O_2 , CO, CO_2) and the thickness of the smoke layer. To this end, three fire scenarios were simulated, varying the number of vehicles on fire (1 to 5), in a building with a garage open on the side. The FDS were used to model fire dynamics and extract data on gas temperature, gas concentrations and smoke thickness. The structural stability of the columns was checked according to the simplified method of NBR 14323, comparing the thermal and mechanical quantification of the fire scenarios and ISO 834. The gas and steel temperatures were consistently lower than those predicted by the ISO 834 curve, even in the critical scenario evaluated, indicating structural stability without the need for excessive passive protection in this case. Oxygen concentrations (O_2) showed a reduction of up to 12% in the regions close to the fire, while carbon dioxide (CO_2) rose significantly, and carbon monoxide (CO) did not reach critical levels. The thickness of the smoke layer was high in severe scenarios, showing that natural ventilation is insufficient to guarantee safety in buildings with open garages on the side. The results show that the combined use of FDS simulations and the simplified NBR 14323 method allows for a more realistic and safer design for steel structures in open garages, avoiding the over-dimensioning of passive protection associated with ISO 834.

Keywords: Fire safety; Steel structures; Fire Dynamics Simulator (FDS).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modos de propagação de calor para veículos adjacentes _____	21
Figura 2 – Incêndio no Shopping Center Douglas Village, Irlanda (2019) _____	22
Figura 3 – Incêndio no Aeroporto de Luton – Reino Unido (2023) _____	22
Figura 4 - Distribuição Anual de Publicações sobre o Tema (1967-2024) _____	23
Figura 5 – Testes realizados por Butcher <i>et al.</i> (1967): (a) layout do cenário de incêndio, (b) visualização do experimento _____	24
Figura 6 – Edifício garagem do experimento de Gewain <i>et al.</i> (1973). _____	25
Figura 7 – Configuração experimental de Bennetts <i>et al.</i> (1986): (a) elementos do experimento, (b) e (c) corte do layout _____	26
Figura 8 – Configuração experimental de Joyeux <i>et al.</i> (2002) (a) corte do edifício garagem analisado, (b) cenários de incêndios analisados _____	27
Figura 9 – Configuração experimental de Kitano <i>et al.</i> (2000) (a) experimento do edifício garagem, (b) cenário de incêndio e tempo de propagação, (c) temperaturas obtidas nas colunas e vigas, (d) Resposta estrutural por Hirashima <i>et al.</i> (2003). _____	29
Figura 10 – Experimento do Edifício garagem de aço do ensaio de Zhao e Kruppa (2004) (a) geometria, (b) cenário de incêndio do 1º ensaio, (c) temperaturas obtidas do 1º ensaio, (d) 2º ensaio com carro em chamas, (e) propagação para terceiro veículo do ensaio 2, (f) cenário 3 com proteção contra vento (g) propagação para o segundo carro com 56 minutos _____	31
Figura 11 – Modelagem de Cook e Pessiki (2008): (a) tempo de propagação para carro adjacente, (b) cenários simulados, (c) modelagem do veículo, (d) simulação _____	32
Figura 12 – Modelagem numérica para análise de vigas com e sem obstáculos de Wong (2014) _____	34
Figura 13 – Modelagem de espaçamento para análise da propagação de incêndio entre veículos de Márton <i>et al.</i> (2015) _____	35
Figura 14 – Temperatura dos gases por Tondini <i>et al.</i> (2016): (a) veículo em chamas sem vigas e com vigas, (b) temperatura dos gases dos veículos em chamas sem as vigas e com as vigas _____	36
Figura 15 – Modelagem no FDS para quantificação térmica de vigas de Mattheus (2017) _	36
Figura 16 – Ensaio numérico para análise de uma viga de Upmeyer <i>et al.</i> (2019) _____	37
Figura 17 – Ensaio numérico ao redor de uma viga e um pilar de Yan <i>et al.</i> (2022) _____	38
Figura 18 – Modelagem de análise de vigas de De Silva <i>et al.</i> (2023) _____	39
Figura 19 – Modelagem no FDS do estudo de caso _____	44
Figura 20 – Domínio computacional do modelo _____	45
Figura 21 – Cenários de propagação de incêndio em estacionamentos simulados _____	45
Figura 22 – Cenários de propagação de incêndio em estacionamentos simulados _____	46
Figura 23 – Curva com a taxa de liberação de calor da queima de 1 à 5 veículos _____	47
Figura 24 – Modelagem dos veículos em estudo _____	48

Figura 25 – Desenvolvimento do fogo durante uma liberação de calor	50
Figura 26 – Comparação dos históricos de HRR do experimento de Joyeux <i>et al.</i> (2002) e das simulações	51
Figura 27 – Geometria do pavimento	53
Figura 28 – Dispositivos de medição	55
Figura 29 – Localização dos termopares de temperatura dos gases	55
Figura 30 – Altura dos sensores para medição da espessura da camada de fumaça	57
Figura 31 – Evolução da Taxa de Liberação de Calor (HRR) em Diferentes Cenários de Incêndio Veicular	59
Figura 32 – Temperatura dos gases nos cenários analisados	60
Figura 33 – Evolução das temperaturas dos gases registradas através de dois planos de medição (Y e Z) e visualizado no SMV do CEN 01.	61
Figura 34 – Variação da temperatura ao longo do tempo no eixo X em diferentes distâncias do veículo em chamas no CEN 01.	61
Figura 35 – Variação da temperatura ao longo do tempo no eixo Y em diferentes distâncias do veículo em chamas no CEN 01.	62
Figura 36 – Evolução das temperaturas dos gases registradas através de dois planos de medição (Y e Z) e visualizado no SMV do CEN 02	63
Figura 37 – Variação da temperatura ao longo do tempo no eixo X em diferentes distâncias do foco do fogo no CEN 02.	63
Figura 38 – Variação da temperatura ao longo do tempo no eixo Y em diferentes distâncias do foco do fogo no CEN 02.	64
Figura 39 – Evolução das temperaturas dos gases registradas através de dois planos de medição (Y e Z) e visualizado no SMV do CEN 03	65
Figura 40 – Variação da temperatura ao longo do tempo no eixo X em diferentes distâncias do veículo em chamas no CEN 03.	65
Figura 41 – Variação da temperatura ao longo do tempo no eixo Y em diferentes distâncias do veículo em chamas no CEN 03.	66
Figura 42 – Concentração de oxigênio (O ₂) no edifício garagem no FDS no CEN 01	67
Figura 43 – Concentração de oxigênio (O ₂) no edifício garagem no FDS no CEN 02	68
Figura 44 – Concentração de oxigênio (O ₂) no edifício garagem no FDS no CEN 03	69
Figura 45 – Concentração monóxido de carbono (CO) no edifício garagem no FDS no CEN 03	70
Figura 46 – Concentração dióxido de carbono (CO ₂) no edifício garagem no FDS no CEN 01	71
Figura 47 – Concentração dióxido de carbono (CO ₂) no edifício garagem no FDS no CEN 02	71
Figura 48 – Concentração dióxido de carbono (CO ₂) no edifício garagem no FDS no CEN 03	72

Figura 49 – Espessura da camada de fumaça (2,70 m) no edifício garagem no FDS no CEN 01	73
Figura 50 – Espessura da camada de fumaça (2,00 m) no edifício garagem no FDS no CEN 01	73
Figura 51 – Espessura da camada de fumaça (0,90 m) no edifício garagem no FDS no CEN 01	74
Figura 52 – Evolução da espessura da camada de fumaça registrada através de dois planos de medição (Y e Z) e visualizado no SMV CEN 01.	74
Figura 53 – Espessura da camada de fumaça (2,70 m) no edifício garagem no FDS no CEN 02	75
Figura 54 – Espessura da camada de fumaça (2,00 m) no edifício garagem no FDS no CEN 02	76
Figura 55 – Espessura da camada de fumaça (0,90 m) no edifício garagem no FDS no CEN 02	76
Figura 56 – Evolução da espessura da camada de fumaça registrada através de dois planos de medição (Y e Z) e visualizado no SMV CEN 02	77
Figura 57 – Espessura da camada de fumaça (2,70 m) no edifício garagem no FDS no CEN 03	78
Figura 58 – Espessura da camada de fumaça (2,00 m) no edifício garagem no FDS no CEN 03	79
Figura 59 – Espessura da camada de fumaça (0,90m) no edifício garagem no FDS no CEN 03	79
Figura 60 – Evolução da espessura da camada de fumaça registrada através de dois planos de medição (Y e Z) e visualizado no SMV CEN 03.	80
Figura 61 – Pilares analisados para resistência mecânica para todos os cenários de incêndio.	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Incêndios em edifícios garagens com perdas _____	21
Quadro 2 – Resumo das temperaturas obtidas nos ensaios experimentais em escala real ____	40
Quadro 3 – Resumo das curvas de taxa de liberação de calor de cada veículo e tempo de propagação para o veículo adjacente _____	41
Quadro 4 – Taxa de liberação de calor inseridas no FDS _____	47
Quadro 5 – Resolução de malha _____	49
Quadro 6 – Cálculo de Malha _____	49
Quadro 7 – Relação entre tamanho de malha, número de células, HRR simulado, desvio percentual e tempo computacional _____	51
Quadro 8 - Propriedades térmicas dos materiais empregados no modelo computacional ____	52
Quadro 9 – Termopares nos eixos X e Y _____	56
Quadro 10 – Termopares nos centros de gravidade de cada veículo _____	56
Quadro 11 – Propriedades geométrica dos pilares (perfil I) _____	83
Quadro 12 – Temperatura máxima nos gases _____	84
Quadro 13 – Temperatura no perfil de aço dos pilares _____	85
Quadro 14 – Parâmetros de Redução no cenário ISO 834 _____	85
Quadro 15 – Esforços Solicitantes e Capacidade Resistente dos Pilares em Situação de Incêndio _____	85
Quadro 16 – Verificação de Falha dos Pilares em Situação de Incêndio _____	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BRE	British Research Establishment
CaPaFi	<i>Car Park Fire</i>
CFD	<i>Computer Fluid Dynamic</i>
CTICM	<i>Communities and Local Government, United Kingdom</i>
ECCS	<i>European Convention for Constructional Steelwork</i>
EN	<i>European Committee for Standardisation</i>
FDS	<i>Fire Dynamic Simulator</i>
h	horas
HRR	<i>Heat Release Rate (kW)</i>
HRRPUA	<i>Heat release rate per unit area (kW/m²)</i>
IDHL	Immediately Dangerous to Life or Health
INERIS	<i>National Competence Centre for Industrial Safety and Environmental Protection, France</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IT	Instrução Técnica
min	Minutos (min)
NBR	Norma Brasileira
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i>
NIOSH	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
ppm	Partes por milhão
s	Segundos (s)
SMV	<i>Smokview</i>
t	Tempo (minutos ou segundos)
fy	Tensão de escoamento
Ksh	Efeito do Sombreamento
u/Ag	Fator de Massividade
λ_{alma}	Esbeltez relativa da alma
λ_{mesa}	Esbeltez relativa da mesa
E	Módulo de Elasticidade
u	Perímetro (m)
d	Altura total do perfil
b _f	Largura da mesa
t _w	Espessura da mesa
t _f	Espessura da alma
I	Momento de inércia
N _{fi,Rd}	Esforços resistentes
N _{fi,Sd}	Esforços solicitantes

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Gregas

θ	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
ε	Emissividade
ρ	Densidade (kg/m^3)
ρ_{∞}	<i>Densidade do ar</i> (kg/m^3)
θ_g	Temperatura dos gases ($^{\circ}\text{C}$)
c_p	Calor específico ($\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$)
σ	Constante de Stephan Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$)
α_c	Coeficiente de convecção ($25 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$)
ε_{res}	Emissividade resultante aço-fogo
ρ_a	Densidade do aço ($7850 \text{ kg}/\text{m}^3$)
c_a	Calor específico do aço ($600 \text{ J}/\text{Kg}^{\circ}\text{C}$)
f_y	Tensão de escoamento do aço (Mpa ou kN/m^2)
θ_a	Temperatura do aço ($^{\circ}\text{C}$)
θ'_a	Temperatura nova do aço ($^{\circ}\text{C}$)
θ_{gases}	Temperatura dos gases ($^{\circ}\text{C}$)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1.	Contextualização e Justificativa	16
1.2.	Objetivos	18
1.2.1.	<i>Objetivos gerais</i>	18
1.2.2.	<i>Objetivos específicos</i>	18
1.3.	Estrutura do trabalho	19
2.	ESTADO DA ARTE	20
2.1.	Butcher <i>et al.</i> (1967)	23
2.2.	Gewain <i>et al.</i> (1973)	24
2.3.	Bennetts <i>et al.</i> (1986)	25
2.4.	Joyeux <i>et al.</i> (1997; 2002)	27
2.5.	Kitano <i>et al.</i> (2000) e Hirashima (2003)	28
2.6.	Zhao e Kruppa (2004)	29
2.7.	Cook e Pessiki (2008)	32
2.8.	Wong (2014)	33
2.9.	Márton <i>et al.</i> (2015)	34
2.10.	Tondini <i>et al.</i> (2016)	35
2.11.	Mattheus (2017)	36
2.12.	Upmeyer <i>et al.</i> (2019)	37
2.13.	Yan <i>et al.</i> (2022)	37
2.14.	De Silva <i>et al.</i> (2023)	38
2.15.	Observações sobre o capítulo	39
3.	MODELO FDS	43
3.1.	Estudo de Caso	43
3.2.	Domínio computacional	44
3.3.	Cenários de incêndio	45
3.4.	Carga de incêndio	46
3.5.	Combustível	47
3.6.	Veículo	48
3.7.	Configuração de malha	48
3.7.1.	<i>Teste de convergência</i>	48
3.7.2.	<i>Análise de sensibilidade</i>	50
3.8.	Propriedades térmicas e de combustão dos materiais	52
3.9.	Geometria	53

3.10.	Parâmetros iniciais	53
3.10.1.	<i>Classificação do edifício</i>	53
3.10.2.	<i>Condições ambientais</i>	54
3.11.	Parâmetros de saída	54
3.12.	Resultados do modelo FDS	57
3.12.1.	<i>Tempo de processamento</i>	57
3.12.4.	<i>Concentração dos gases</i>	66
3.12.4.1.	<i>Oxigênio (O₂)</i>	66
3.12.4.2.	<i>Monóxido de carbono (CO)</i>	69
3.12.4.3.	<i>Dióxido de carbono (CO₂)</i>	70
3.12.4.4.	<i>Espessura da camada de fumaça</i>	72
4.	IMPACTO NA ESTRUTURA	81
4.1.	<i>Método de verificação</i>	81
4.2.1.	<i>Detalhes da estrutura</i>	83
4.2.2.	<i>Resultados térmicos e mecânicos da estrutura</i>	84
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
5.1.	Conclusões	87
5.2.	Limitações do Estudo	87
5.3.	Trabalhos Futuros	87
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE A – ANÁLISE COMPARATIVA DAS TEMPERATURAS DOS GASES EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA NOS CENÁRIOS SIMULADOS	93
	APÊNDICE B – ANÁLISE MECÂNICA	96

1. INTRODUÇÃO

1.1.Contextualização e Justificativa

O crescimento populacional no Brasil, que passou de 190,7 milhões para 212,6 milhões de habitantes entre 2000 e 2024 (IBGE, 2000, 2024), ampliou a demanda por infraestrutura urbana, especialmente em relação à mobilidade e estacionamentos. Esse incremento demográfico, somado à expansão da frota veicular — hoje com 61 milhões de automóveis, ou um veículo para cada 4,4 habitantes (IBGE, 2024a) — é concentrado em estados populosos como São Paulo (21,6% da população), Minas Gerais (10,0%), Rio de Janeiro (8,1%) e Bahia (7,0%), onde a densidade demográfica é crítica, sendo necessária a implantação de soluções verticalizadas para a otimização de áreas restritas. Edifícios garagens verticalizados emergem como alternativas indispensáveis, pois acomodam os veículos e atendem à demanda crescente em regiões metropolitanas saturadas, como ocorre nos estados mais populosos.

Contudo, a verticalização amplia os desafios de segurança contra incêndios (SCI). A concentração e a proximidade lateral entre veículos, intensifica os riscos de propagação rápida do fogo, principalmente devido à alta presença de combustíveis nos veículos.

Os incêndios em veículos tornaram-se um problema crítico no Brasil, com registros anuais informados pelos dados estatísticos dos Corpos de Bombeiros Militares Estaduais (CBM-SP, 2025; CBM-RJ, 2025; CBM-MG, 2025; CBM-BA, 2025; CBM-CE, 2025; CBM-PE, 2025; CBM-PR, 2025). Entre 2019 e 2024, São Paulo liderou com média de 4.727 ocorrências/ano, seguido pelo Rio de Janeiro (3.226), Minas Gerais (2.024) e Bahia (834). Estados como Ceará (396), Pernambuco (585) e Paraná (360) também apresentaram números relevantes. É importante salientar, contudo, que esses dados representam apenas uma parcela do total de incêndios veiculares, uma vez que parte das ocorrências não recebe atendimento dos serviços públicos de combate a incêndio, resultando em subnotificações.

Os edifícios garagens constituídos de aço têm ganhado crescente utilização, em virtude de sua leveza e rapidez na construção, podendo ser classificados em diversos tipos: verticalizada, elevadores, abertas lateralmente, fechadas lateralmente, abertas a céu aberto e subterrâneas. Para o dimensionamento das estruturas de aço em situação de incêndio, normativas como a EN 1993-1-2 (EN, 2005), ASTM E 119 (ASTM, 2022) e NBR 14323 (ABNT, 2013) adotam métodos simplificados que se fundamentam na aplicação da curva de incêndio padrão ISO 834 (ISO, 1999), a qual descreve a variação da temperatura dos gases em função do tempo.

Entretanto, essa curva foi desenvolvida para simular incêndios em compartimentos fechados com materiais celulósicos, desconsiderando variáveis que influenciam a dinâmica do fogo em edifícios garagens abertas lateralmente. Entre as variáveis, destacam-se ventilação natural, a compartimentação, a distribuição dos materiais combustíveis, o espaçamento entre veículos e nas vias de circulação, a geometria do ambiente e o pé direito (KRUPPA, 2000; ZHAO e FRAUD, 2004; MÜLLER, 2020; SOMMAVILLA e TODINI, 2020; YAN, 2022; DA SILVA, 2023; HAREMZA, 2013; INERIS, 2001). Consequentemente, a aplicação isolada da ISO 834 (ISO, 1999) pode resultar em superdimensionamento da proteção contra incêndio em elementos de aço em cenários específicos. De acordo com o mapeamento de cenários de incêndio em edifícios-garagens europeus, o *European Convention for Constructional Steelwork* (ECCS, 1993) identificou que os casos mais frequentes envolvem um a três veículos em chamas, e não a totalidade do espaço, como pressupõe a curva padrão ISO 834.

Isso ocorre porque, conforme destacado pelo INERIS (2001, 2022), em estacionamentos, nem todos os veículos são afetados simultaneamente pelo incêndio, o que coloca em dúvida a adequação da curva ISO 834 (ISO, 1999) nesses contextos. Dessa forma, a aplicação indiscriminada dessa curva não apenas superestima a intensidade térmica em focos localizados, como também ignora a influência de variáveis críticas, como ventilação, geometria do ambiente e tempo de propagação do fogo.

Portanto, é imperativo incorporar modelagens realistas, que utilizam ferramentas como a dinâmica de fluidos computacional (*computational fluid dynamics* – CFD), para reproduzir cenários de incêndio condizentes com as condições reais. Essa abordagem vem sendo adotada desde a década de 1960 em países como Estados Unidos, Inglaterra, Nova Zelândia, Austrália, Singapura, Alemanha, Escócia, Itália e França, que integram simulações avançadas em projetos de engenharia. Tal metodologia otimiza segurança e economia ao refletir a complexidade termodinâmica dos cenários reais.

Entretanto, no Brasil, a prática normativa ainda é fortemente dependente do uso de curvas de incêndio, dificultando a adoção de metodologias que incorporem a dinâmica do fogo. Entre os desafios estão a ausência de regulamentações específicas, a carência de profissionais capacitados e a limitação tecnológica para implementação dessas técnicas avançadas.

Por fim, o crescente interesse pelo tema ressalta a urgência de adotar abordagens mais realistas para análise de comportamento estrutural de incêndios em edifícios garagem abertos lateralmente, visando economia e segurança. Embora a literatura demonstre avanços acadêmicos e técnicos, é essencial que esses conhecimentos sejam traduzidos em práticas

normativas e diretrizes mais precisas, a fim de garantir maior segurança estrutural e eficiência no combate a incêndios veiculares em edifícios garagens de aço abertos lateralmente.

1.2.Objetivos

1.2.1. Objetivos gerais

Fornecer diretrizes para a quantificação térmica em edifícios garagem metálicos abertos lateralmente, utilizando o software Fire Dynamics Simulator (FDS) e análise mecânica com o método simplificado da NBR 14323 (ABNT, 2013) para o projeto estrutural em situação de incêndio.

1.2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo visam, entre outros:

- Levantamento de estudos de casos sobre o comportamento estrutural em situação de incêndio em edifícios garagens de aço abertos lateralmente
- Buscar orientação sobre a modelagem de incêndios em edifício garagem de aço aberto lateralmente no software Fire Dynamics Simulator (FDS)
- Propor um parâmetro inicial para quantificação térmica do edifício garagem de aço aberto lateralmente no software Fire Dynamics Simulator (FDS)
- Verificar a resistência mecânica de pilares em situação de incêndio, nas estruturas do edifício garagem em estudo pelo método simplificado da NBR 14323 (ABNT, 2013)

1.3.Estrutura do trabalho

Esta dissertação é composta de 5 capítulos, cujos conteúdos são:

O Capítulo 1 apresenta uma introdução ao problema e a necessidade de viabilizar o projeto em situação de incêndio por desempenho. Além disso, os objetivos e uma visão geral desta pesquisa.

O Capítulo 2 fornece o estado da arte sobre o comportamento de estruturas de aço em edifícios garagens submetidas ao fogo e uma visão geral dos estudos publicados e resultados referentes a cada estudo.

O Capítulo 3 detalha a modelagem numérica para o estudo de caso de um pavimento de um edifício garagem aberto lateralmente desenvolvido no software Fire Dynamics Simulator (FDS) para quantificação térmica dos gases, a concentração dos gases e a espessura da camada de fumaça em três cenários de incêndio, bem como, seus resultados.

O Capítulo 4 apresenta uma aplicação para análise da resistência mecânica de pilares de aço em situação de incêndio pelo método simplificado, provenientes da quantificação térmica dos três cenários de incêndio elaborados no software FDS e comparando com o cenário de incêndio proveniente da curva de incêndio padrão ISO 834 (ISO, 1999).

O Capítulo 5 sintetiza as principais conclusões do estudo e delinea sugestões para futuras investigações, contribuindo para o avanço do conhecimento na área.

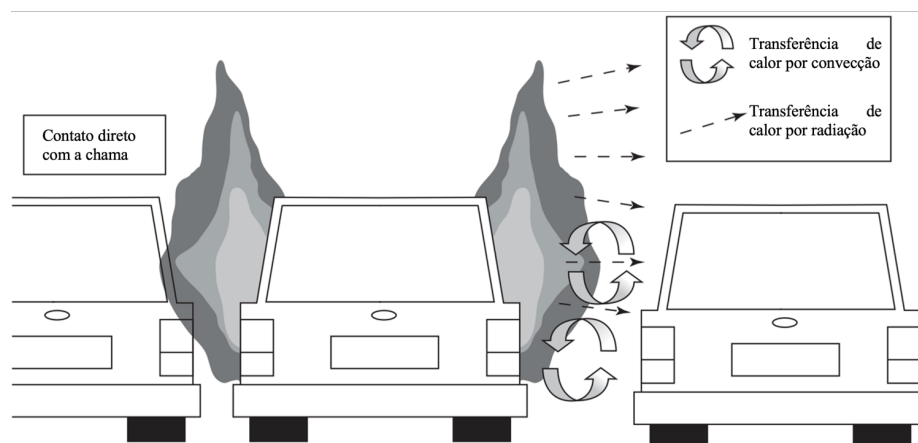
2. ESTADO DA ARTE

Incêndios em veículos caracterizam-se por sua complexidade e periculosidade, decorrentes da combinação de diversos elementos combustíveis. Inicialmente, destaca-se a presença de líquidos inflamáveis, como gasolina e diesel, armazenados nos tanques, além dos fluidos presentes nos motores (óleos lubrificantes, graxas etc.). Ademais, os materiais plásticos empregados em componentes internos e externos dos automóveis, bem como carpetes, assentos e encostos – os quais constituem uma carga de incêndio significativa, classificada como Classe A – aumentam consideravelmente o potencial de combustão. Outros elementos, como as chapas metálicas que compõem a estrutura dos veículos, contribuem para a propagação térmica tanto por condução quanto por irradiação, reforçando a termicidade geral dos automóveis, inclusive em componentes estruturais classificados, por exemplo, como Classe D (metais, motores, marchas).

A dinâmica dos incêndios veiculares envolve três mecanismos primordiais de transferência de calor: a radiação térmica, que diz respeito à energia emitida pela chama capaz de atingir veículos adjacentes e iniciar a combustão em superfícies inflamáveis; a convecção, responsável pelo transporte do calor por meio do movimento dos gases quentes; e a condução térmica, que ocorre pelo contato direto com as chamas (NOORDIJK, 2005). Esses processos interagem e potencializam a propagação do fogo, sobretudo em ambientes onde os veículos estão dispostos próximos uns dos outros.

Adicionalmente, em pisos de garagem com tetos baixos, verifica-se a ocorrência de um feedback térmico intensificado, devido à maior concentração de energia irradiada, o que favorece a rápida disseminação das chamas. Assim, a proximidade entre os veículos, aliada à limitação do espaço vertical, eleva significativamente a taxa de propagação do incêndio, conforme ilustrado na Figura 1, que apresenta os modos de transferência térmica para veículos adjacentes.

Figura 1 – Modos de propagação de calor para veículos adjacentes



Fonte: Adaptado de Noordijk (2005).

Incêndios em edifícios garagem são eventos que, embora não sejam frequentes em comparação a outros tipos de edificações, possuem alto potencial de destruição devido às condições específicas desses ambientes. A concentração de veículos em espaços confinados ou parcialmente abertos, associada à presença de combustíveis inflamáveis como gasolina, diesel e materiais plásticos, favorece a rápida propagação das chamas e a geração de calor intenso.

O Quadro 1 evidencia os impactos dos incêndios na destruição de veículos, um fenômeno mais comum em outros países. A pesquisa não identificou incidentes desse tipo no Brasil.

Quadro 1 – Incêndios em edifícios garagens com perdas

Data	Carros queimados	Localização	Houve colapso estrutural?	Fonte
13/11/2002	101	Estacionamento em Amsterdã, Holanda	Não	Ayva (2020)
31/12/2017	1400	Incêndio no Kings Dock Car Park – Liverpool, Reino Unido	Não	BBC (2018)
01/09/2019	60	Shopping Center Douglas Village, Irlanda	Não	Roche, T. IRISHTIMES (2019)
07/01/2020	300	Aeroporto de Stavanger, Noruega	Não	Ayva (2020)
10/10/2023	1500	Aeroporto de Luton, Reino Unido	Colapso parcial	Pope, A. BBC (2023)
20/08/2023	100	Estacionamento Atsugi Japão	Não	Shimbun, K. KANALOCO.JP (2023)

Fonte: Autora (2025).

A Figura 2 ilustra o incêndio no Shopping Center Douglas Village, onde 60 veículos foram atingidos. Já a Figura 3 destaca o incêndio no Aeroporto de Luton, onde o colapso parcial da estrutura ocorreu devido à intensidade das chamas.

Figura 2 – Incêndio no Shopping Center Douglas Village, Irlanda (2019)



Fonte: Roche, T. IRISHTIMES (2019).

Figura 3 – Incêndio no Aeroporto de Luton – Reino Unido (2023)



Fonte: Pope, A. BBC (2023).

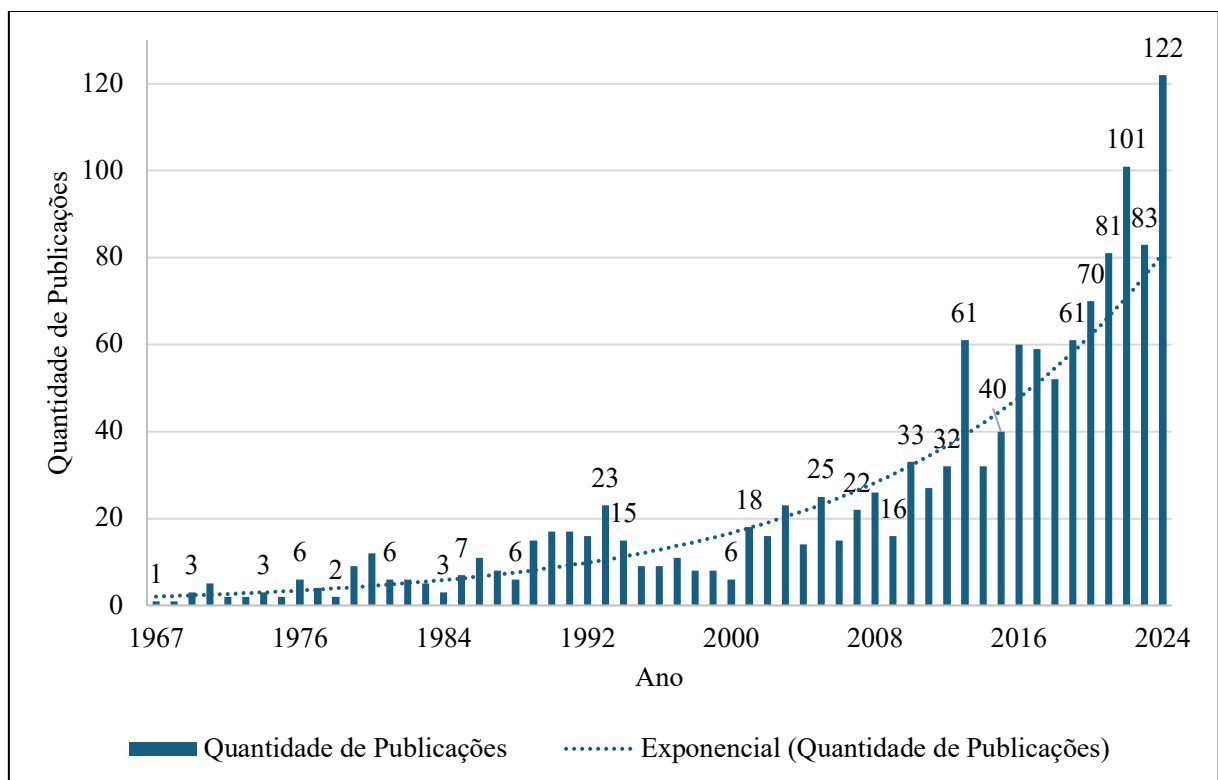
Uma revisão sistemática foi realizada nos 7 principais bancos de dados: Scopus, SciDirect, SpringerLINK, Web of Science, Periódicos CAPES, OIAster, Engineering Village. Foram filtrados em todas as bases de dados os termos: “*car park*” e “*steel*” e “*fire*”, retornando um total de 1.347 artigos científicos (dados recuperados em 1 de janeiro de 2025), com o objetivo de avaliar o comportamento térmico de um edifício garagem de aço aberto lateralmente

em situação de incêndio seja experimental ou com simulações numéricas no Fire Dynamics Simulator (FDS).

A Figura 4 apresenta a distribuição anual de publicações científicas entre 1967 e 2024, resultante de uma busca inicial que retornou 1.300 artigos. Após a triagem baseada na leitura dos títulos e resumos, 61 artigos foram selecionados para leitura completa, dos quais apenas 11 atenderam aos critérios de inclusão definidos para a revisão sistemática.

Os estudos finais foram organizados em ordem cronológica e detalhados a seguir, em conjunto com experimentos realizados por calorímetros.

Figura 4 - Distribuição Anual de Publicações sobre o Tema (1967-2024)



Fonte: Autora (2025).

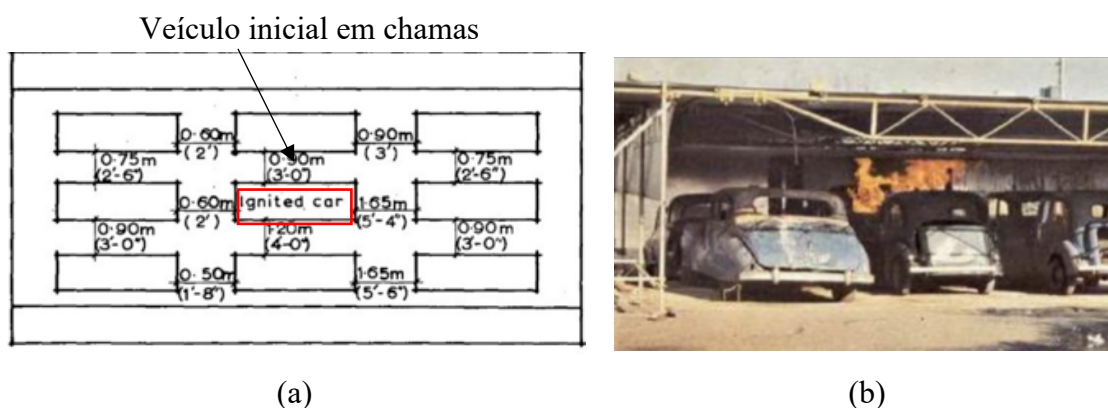
2.1. Butcher *et al.* (1967)

Os primeiros experimentos em escala real surgiram no início dos anos 1960, destacando o estudo pioneiro de Butcher *et al.* (1967) no Reino Unido. Nesse estudo, três testes foram realizados em uma estrutura de andaimes de aço (18,5 m x 9,15 m x 2,25 m) com nove carros dispostos em uma matriz 3x3, com espaçamentos de 0,60 m à esquerda e 1,65 m à direita do veículo central (Figura 5).

Os veículos, representativos da época, foram abastecidos com aproximadamente 19 L de gasolina e equipados com materiais combustíveis para simular bagagens pessoais. Durante os testes, o carro central foi incendiado e a propagação do fogo para os veículos adjacentes foi monitorada por termopares posicionados a 2,1 m de altura, revelando temperaturas máximas de 840 °C dos gases, 360 °C nas colunas de aço e 275 °C nas vigas. Esses dados permitiram a análise do tempo de propagação e a identificação de variações térmicas críticas em função do espaçamento entre os veículos.

Embora as elevadas temperaturas evidenciem o intenso desenvolvimento do incêndio, o estudo concluiu que o fogo de um único veículo não comprometeu a integridade estrutural do andaime de aço. Para a época, apesar das limitações, o estudo de Butcher *et al.* (1967) foi essencial para iniciar a avaliação das variáveis determinantes nos incêndios veiculares em estruturas de edifícios garagens de aço, tais como o tempo de propagação, as temperaturas máximas dos gases, das colunas e vigas, e o efeito do espaçamento entre os veículos.

Figura 5 – Testes realizados por Butcher *et al.* (1967): (a) layout do cenário de incêndio, (b) visualização do experimento



Fonte: Adaptado de Butcher *et al.* (1967).

2.2. Gewain *et al.* (1973)

Em 1973, Gewain *et al.* (1973) conduziram cinco testes em escala real em um estacionamento existente nos Estados Unidos, com dimensões aproximadas de 69 m x 55 m (Figura 6). O estudo utilizou estruturas de aço desprotegidas e concreto, dispostas com três automóveis americanos de última geração, alinhados lado a lado, com o veículo central posicionado diretamente sob uma viga de aço exposta e incendiado. Para simular as condições reais de um incêndio veicular, jornais amassados foram colocados nos carros e aproximadamente 38 L de combustível foram adicionados a cada tanque. Os veículos,

separados por 0,60 m, foram submetidos a um teste de 50 minutos, realizado em um ambiente com ventilação controlada e pé direito elevado, típicos de estacionamentos em andares altos.

As medições indicaram que o fogo não se propagou para os veículos adjacentes. Especificamente, a temperatura do ar atingiu um pico de 432 °C acima do para-brisa após 11 minutos, enquanto em outras áreas do pavimento os valores não ultrapassaram 204 °C, e a temperatura máxima registrada no aço foi de 226 °C.

Após o resfriamento, não foram observadas deformações residuais, como deflexões ou alongamentos, nos elementos estruturais. Portanto, pode-se concluir que a integridade estrutural das edificações garagem em aço permanece preservada após a exposição a incêndios veiculares.

Figura 6 – Edifício garagem do experimento de Gewain *et al.* (1973).



Fonte: Gewain *et al.* (1973).

2.3. Bennetts *et al.* (1986)

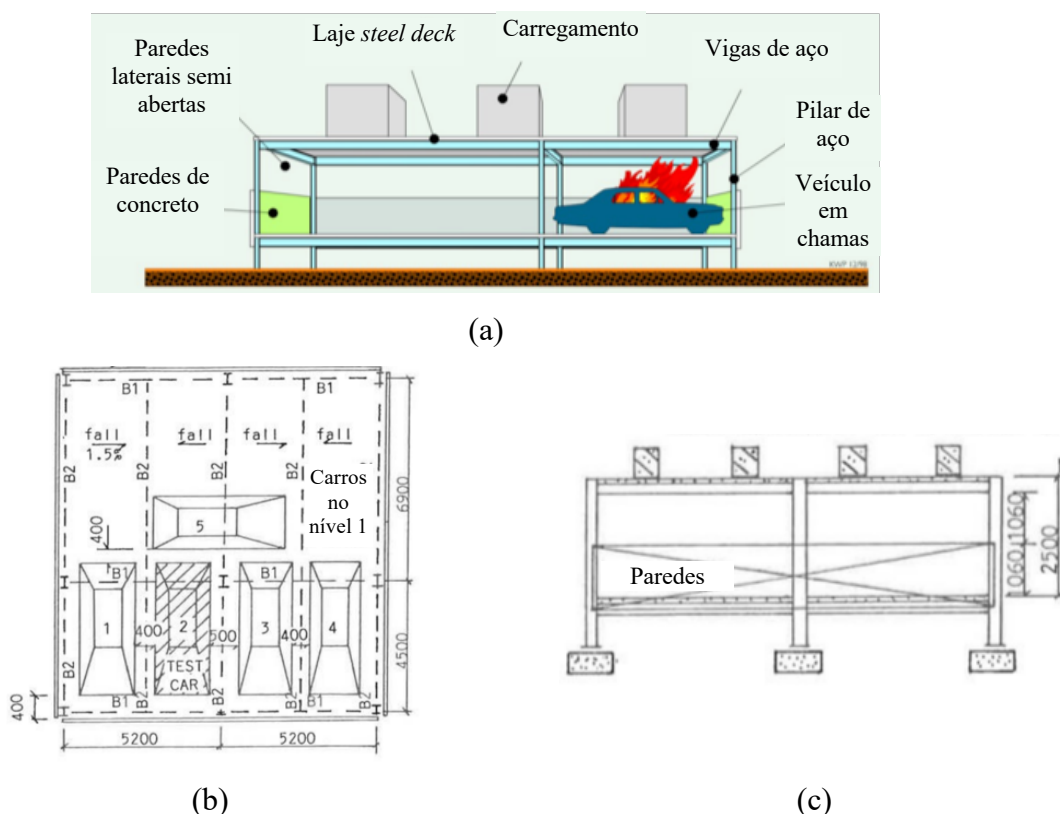
Em 1986, Bennetts *et al.* (1986), em parceria com a empresa australiana BHP, conduziram ensaios experimentais em um estacionamento de um andar com dimensões de 11,4 m × 10,4 m × 2,4 m, com o objetivo de avaliar a necessidade de proteção contra incêndio em estruturas de aço de garagens, seguindo exigências normativas da época que demandavam resistência ao fogo de 4 horas. Dois testes foram realizados: no primeiro, cinco veículos foram posicionados (quatro alinhados paralelamente e um perpendicular aos demais), com espaçamento de 0,40 m entre eles, conforme ilustrado na Figura 7.

O incêndio foi iniciado em um Ford Falcon XC Sedan, utilizando panos embebidos em gasolina colocados sob o banco dianteiro, com janelas parcialmente abertas para favorecer a

propagação. No primeiro teste, as chamas restringiram-se ao veículo inicial, queimando por 25 minutos antes de atingir o tubo de enchimento do tanque de gasolina, prolongando o fogo por mais 30 minutos. Foram no total 70 minutos de ensaio. As temperaturas máximas registradas foram 725 °C dos gases, 285 °C no flange inferior e 170 °C no flange superior do aço. Não houve propagação para os veículos adjacentes.

No segundo teste, o fogo propagou-se para o terceiro veículo, com temperaturas atingindo 550 °C no gás e 340 °C no flange inferior e 180 °C no flange superior do aço. Em ambos os casos, as colunas e vigas de aço mantiveram integridade estrutural, sem deflexões significativas (Figura 7). Com base nos resultados, Bennetts *et al.* (1986) demonstraram que estruturas de aço desprotegidas podem resistir a incêndios veiculares sem comprometer a segurança, o que levou à revisão do código de construção australiano, permitindo estacionamentos abertos com estruturas de aço sem proteção passiva.

Figura 7 – Configuração experimental de Bennetts *et al.* (1986): (a) elementos do experimento, (b) e (c) corte do layout



Fonte: Adaptado de Bennetts *et al.* (1986) por BHP.

2.4. Joyeux *et al.* (1997; 2002)

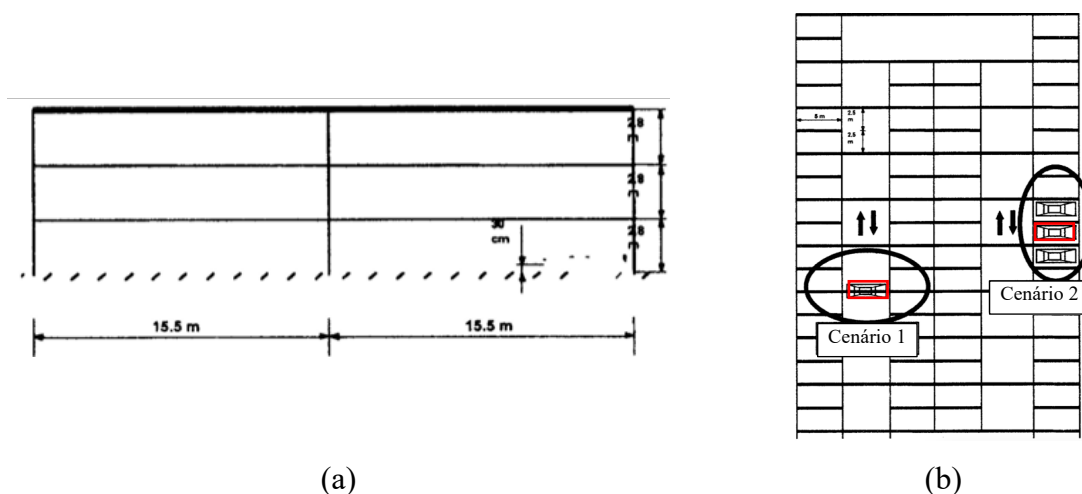
Em 1997 à 2002, Joyeux *et al.* (1997; 2002), no *Centre Technique Industriel de la Construction Métallique* (CTICM) da França, realizaram dois testes em escala real para avaliar o comportamento de estruturas de aço desprotegidas em estacionamentos abertos.

Os experimentos ocorreram em um estacionamento de dois andares, com dimensões de 32 m x 15 m x 3 m, composto por lajes de concreto e vãos longos de 16 m. Dois cenários foram testados: no primeiro, um carro foi incendiado abaixo de uma viga no meio do vão; no segundo, três carros foram incendiados em sequência, com intervalos de 12 minutos entre as ignições, de acordo com Figura 8.

Durante os testes, as temperaturas máximas chegaram a 700 °C nas vigas e 640 °C nas colunas, resultando em danos locais como deformações de vigas, flambagem lateral e instabilidades de flange. Também realizou a validação via modelos numéricos com os softwares Ozone e ANSYS (para análise mecânica) confirmando os resultados experimentais. Concluiu-se que, apesar dos danos locais, a proteção passiva contra incêndios não é necessária para garantir a estabilidade global de estruturas de aço em estacionamentos abertos.

Nos estudos do CTICM, realizados por Joyeux *et al.* (2002), observou-se que as temperaturas excedem os limiares de falha tipicamente estabelecidos para o aço (aproximadamente 500 °C para colunas e 620 °C para vigas de acordo com a Corus *et al.*, 2004), embora, conforme mencionado, não tenha ocorrido colapso estrutural.

Figura 8 – Configuração experimental de Joyeux *et al.* (2002) (a) corte do edifício garagem analisado, (b) cenários de incêndios analisados



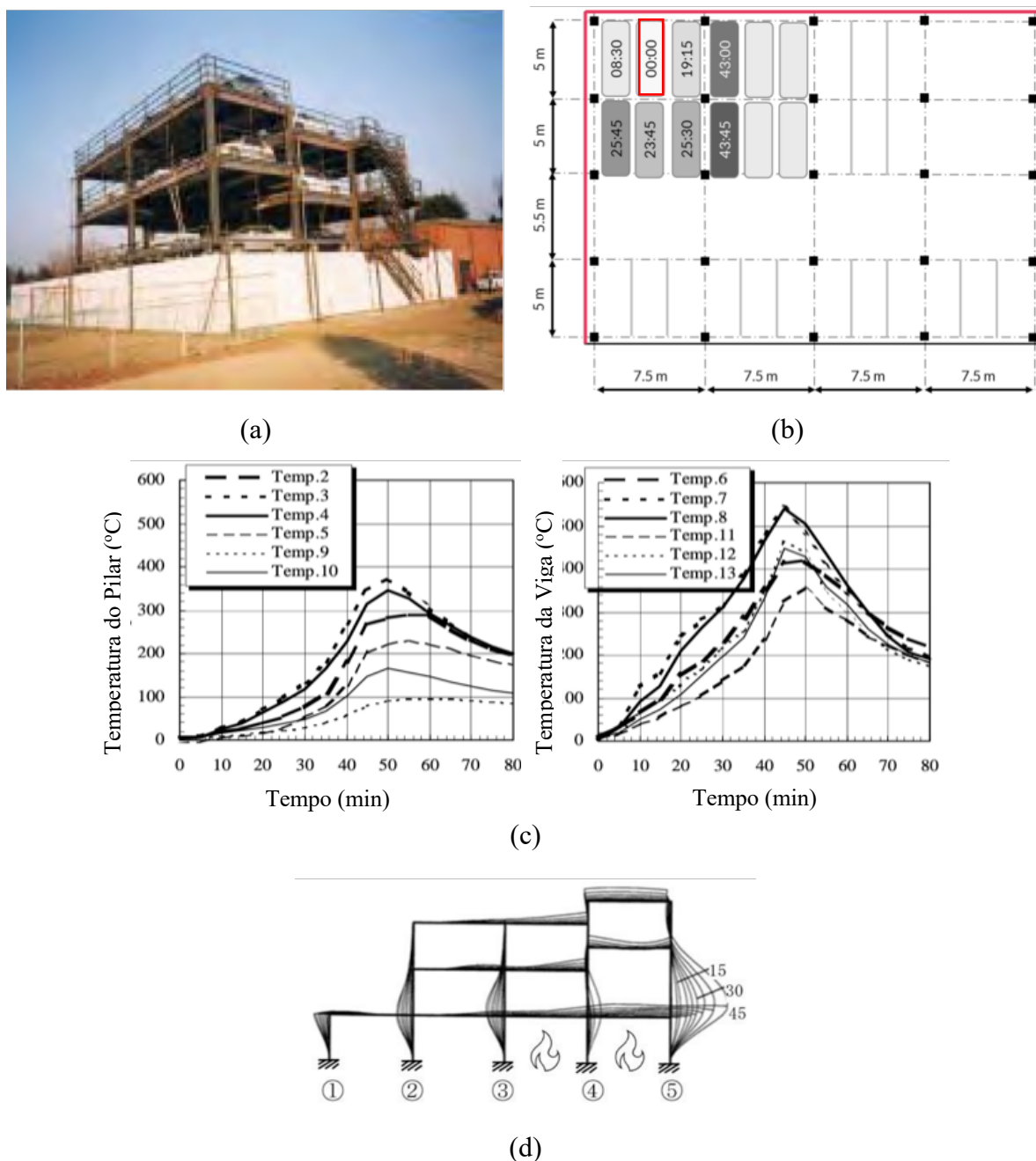
Fonte: Adaptado de Joyeux *et al.* (1997; 2002).

2.5.Kitano *et al.* (2000) e Hirashima (2003)

Em 2000, Kitano *et al.* (2000) realizaram um estudo experimental em larga escala para investigar incêndios em um estacionamento com estrutura metálica de quatro andares, medindo 20 m x 30 m x 2,9 m por pavimento. Os carros foram posicionados nos cantos de cada nível, e o objetivo principal do estudo foi analisar o comportamento dos incêndios veiculares, a propagação do fogo para veículos adjacentes e os efeitos térmicos do incêndio na estrutura do edifício. Durante o experimento, verificou-se que a propagação do fogo para o primeiro carro adjacente ocorreu após 8,5 minutos, enquanto a segunda e a terceira propagação ocorreram após 19 minutos e 23 minutos, respectivamente. A temperatura máxima registrada no aço foi de cerca de 600 °C na viga localizada diretamente acima dos veículos em chamas. Os flanges inferiores dessas vigas atingiram aproximadamente 550 °C, enquanto os flanges superiores permaneceram abaixo de 350 °C.

A resposta estrutural deste estudo foi publicada por Hisashima *et al.* (2003) que concluíram que estruturas de aço sem proteção contra incêndio permanecem estáveis em incêndios veiculares, desde que os membros sejam rigidamente conectados e projetados para resistir a cargas sísmicas. No entanto, os alongamentos térmicos induzidos pela exposição prolongada a altas temperaturas ocasionaram curvaturas residuais nas colunas externas. A estabilidade global da estrutura se mantém, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Configuração experimental de Kitano *et al.* (2000) (a) experimento do edifício garagem, (b) cenário de incêndio e tempo de propagação, (c) temperaturas obtidas nas colunas e vigas, (d) Resposta estrutural por Hirashima *et al.* (2003).



Fonte: Hirashima *et al.* (2003).

2.6. Zhao e Kruppa (2004)

Em 2004, Zhao e Kruppa (2004) do CTICM, realizaram uma série de ensaios de incêndio em um estacionamento aberto com estrutura de aço e laje composta de 12 cm de espessura, medindo 15 m x 32 m x 3 m. Os cenários incluíram três veículos posicionados em

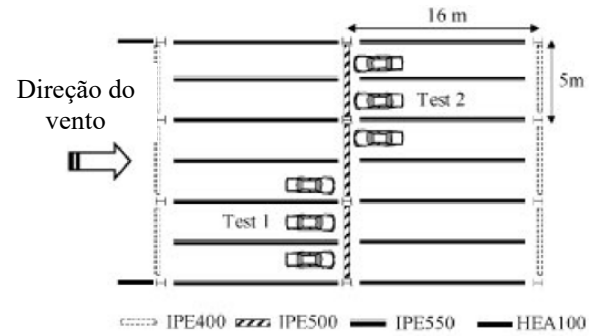
distâncias típicas de estacionamento, com condições de vento forte que variaram em direção e velocidade, influenciando a propagação do fogo segundo a Figura 10.

No primeiro ensaio, a propagação do fogo para o segundo veículo ocorreu após 16:30, e para o terceiro veículo, aos 48 minutos (31:30 após a primeira propagação). O teste teve duração total de 75 minutos, com temperaturas do gás próximas às vigas alcançando 600 °C, enquanto o aço atingiu 700 °C, resultando em deflexões verticais entre 6 e 15 cm nos pontos médios das vigas.

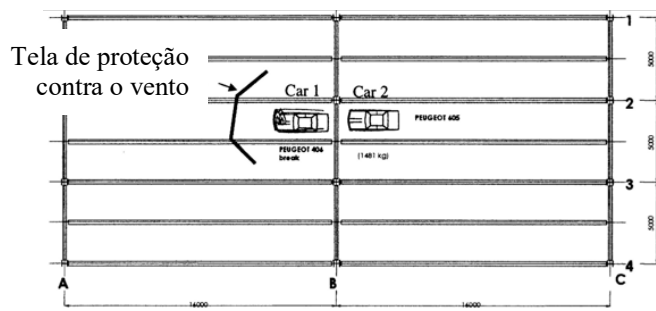
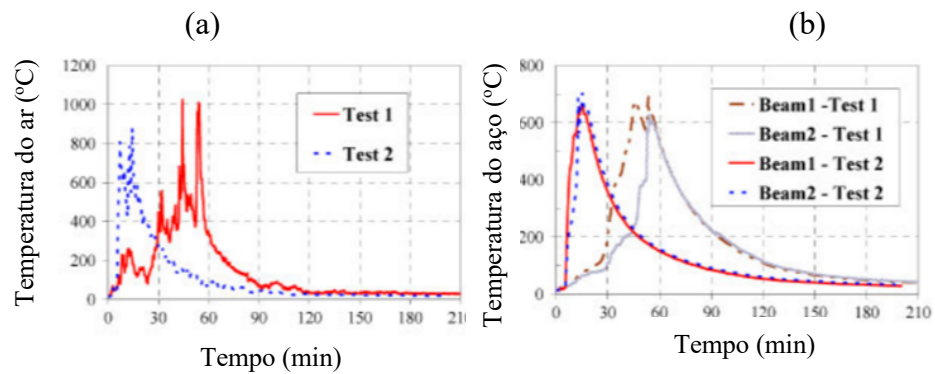
No segundo ensaio, a propagação para os veículos adjacentes ocorreu após apenas 5 minutos e 30 segundos para o segundo veículo e 17 minutos para o terceiro, devido aos fortes ventos no dia do experimento. O teste durou 50 minutos, registrando temperaturas de gás de 660 °C, enquanto as vigas e pilares atingiram temperaturas de 238 °C e 301 °C, respectivamente.

No terceiro ensaio, realizado com os veículos posicionados próximos às colunas, a propagação para o veículo adjacente ocorreu após 56 minutos. Análises numéricas complementares foram realizadas utilizando os softwares SISMEF e ANSYS (softwares para análise mecânica), considerando um tempo de propagação padrão de 12 minutos entre um veículo em chamas e o adjacente. Os modelos 3D confirmaram a precisão dos resultados experimentais, demonstrando a eficácia das vigas compostas de aço-concreto e das colunas de aço em resistir às condições de incêndio, sem a necessidade de proteção passiva adicional.

Figura 10 – Experimento do Edifício garagem de aço do ensaio de Zhao e Kruppa (2004) (a) geometria, (b) cenário de incêndio do 1º ensaio, (c) temperaturas obtidas do 1º ensaio, (d) 2º ensaio com carro em chamas, (e) propagação para terceiro veículo do ensaio 2, (f) cenário 3 com proteção contra vento (g) propagação para o segundo carro com 56 minutos



Pilares das extremidades: HEA 180; Pilares centrais: HEB200

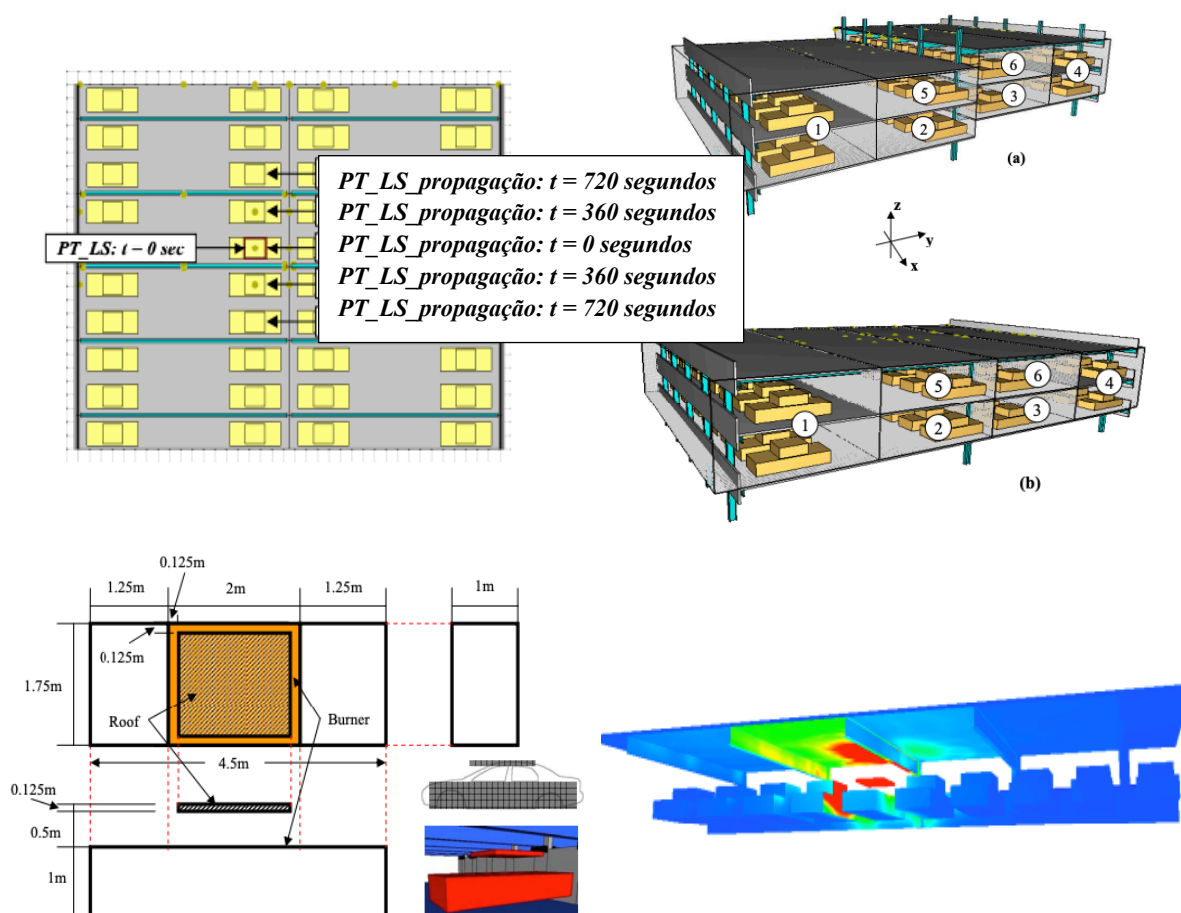


Fonte: Zhao e Kruppa (2004).

2.7. Cook e Pessiki (2008)

Cook e Pessiki (2008) analisaram as cargas de incêndio em estruturas de estacionamento de aberto com estrutura de aço, empregando o FDS e ABAQUS (software de elementos finitos para análise mecânica), para análise do comportamento estrutural sob condições de incêndio. O estudo de caso se concentra em um edifício de estacionamento de três andares com dimensões de 45m x 36m x 3,1m, analisando um cenário com 40 carros, conforme Figura 11. Os veículos foram modelados como blocos retangulares (4,5 m x 1,75 m x 1 m). A curva de HRR utilizada foi de HRR com piso de 7,3MW (Bayreuther, 2006). A propagação do fogo para os carros adjacentes aos 12 minutos. A malha utilizada no FDS foi de 0,125m x 0,125 m x 0,125 e o tipo do elemento no ABAQUS foi DC3D8. A propagação sequencial elevou as temperaturas nas vigas adjacentes a $\sim 870^{\circ}\text{C}$, reduzindo a capacidade de tração das seções metálicas em até 88%.

Figura 11 – Modelagem de Cook e Pessiki (2008): (a) tempo de propagação para carro adjacente, (b) cenários simulados, (c) modelagem do veículo, (d) simulação

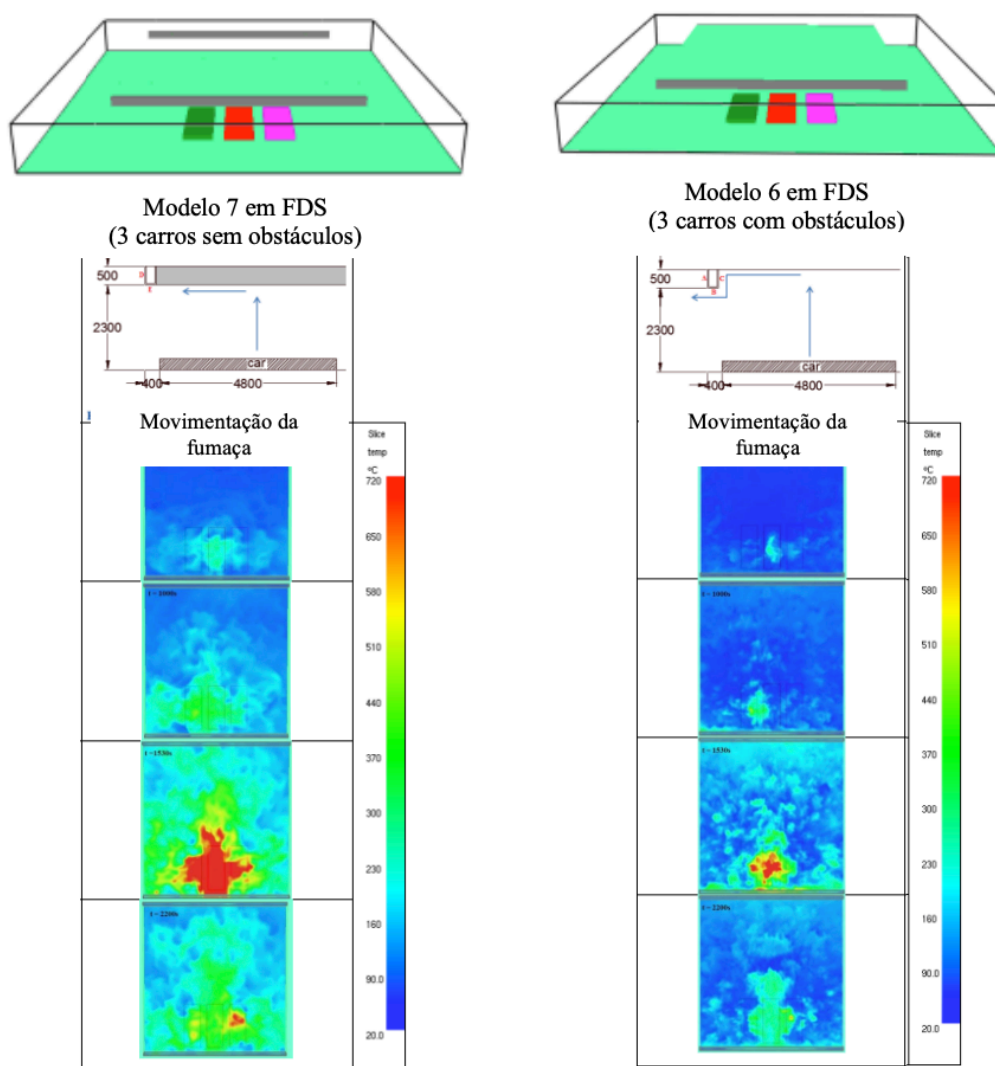


Fonte: Cook e Pessiki (2008).

2.8.Wong (2014)

Wong (2014) investigou a influência da fumaça retida entre as vigas de aço em estacionamentos abertos durante um incêndio de carro através da comparação entre o CaPaFi (software especializado na análise de incêndios em edifícios garagem, desenvolvido com base no Eurocódigo e em testes reais de incêndio de veículos) e o FDS. Foram criados dois cenários de incêndio: com um carro e três carros em chamas, com diferentes configurações de vigas (vigas salientes e vigas embutidas no teto). Utilizando a curva de Zhao e Kruppa (2004) do CTICM com pico de 8,3MW e 12 minutos como tempo para propagação dos veículos adjacentes com distância de aproximadamente 2,5m. Os veículos foram modelados como retângulos de 4,8m x 1,8m x 0,3m, espaçados a 2,5m. A malha utilizada foi de 0,10 m × 0,10 m × 0,10 m para simulações com um veículo e 0,20 m × 0,20 m × 0,20 m para o cenário com três veículos, detalhados na Figura 12. Os resultados indicam que, no caso de um único veículo em combustão, o CaPaFi previu uma temperatura de 435°C, enquanto o FDS estimou 396°C. Para o cenário com três veículos, os modelos com vigas salientes apresentaram temperaturas de 295°C (CaPaFi) em comparação a 194°C (FDS), enquanto os modelos com vigas embutidas resultaram em 295°C (CaPaFi) em comparação a 182°C (FDS).

Figura 12 – Modelagem numérica para análise de vigas com e sem obstáculos de Wong (2014)



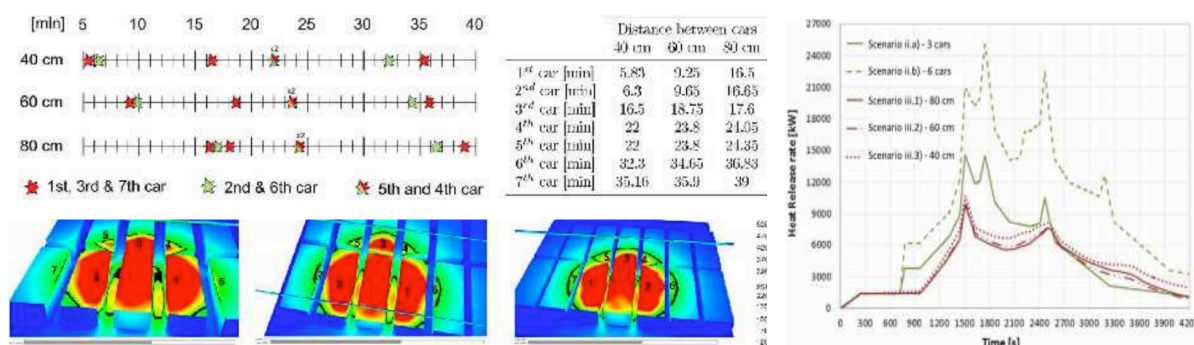
Fonte: Wong (2014).

2.9. Márton *et al.* (2015)

Márton *et al.* (2015) da Franca, investigaram a propagação de incêndios em estacionamentos abertos de estrutura metálica, utilizando o FDS, para analisar a influência do layout geométrico e da distância entre veículos. Foram simulados três cenários envolvendo até 7 veículos, considerando a curva de HRR do CTICM de Joyeux *et al.* (1997), com pico de 8,3 MW por veículo. No cenário 1, foi realizada a validação do modelo da curva de HRR adotada do CTICM utilizando um único veículo em combustão. Diferentes refinamentos de malha foram testados (20 cm, 15 cm e 10 cm) para avaliar a precisão dos resultados térmicos e de propagação. O cenário 2 seguiu as diretrizes francesas do INERIS (2001), estabelecendo um limite de 12 minutos para a propagação entre ignições, com testes em configurações de 3 e 7

veículos. Já o cenário 3 analisou a propagação livre do fogo, considerando a temperatura crítica de ignição da borracha natural ($\sim 300^{\circ}\text{C}$) e três distâncias entre veículos (40 cm, 60 cm e 80 cm), com ignição iniciando em um veículo central, detalhados na Figura 13. Os veículos foram modelados como blocos retangulares de $1,8\text{ m} \times 4,8\text{ m}$. Os resultados mostraram que distâncias $\leq 60\text{ cm}$ aceleram a propagação: com 40 cm, o veículo adjacente incendiou-se em 6 minutos; com 60 cm, em 9 minutos, ambos abaixo dos 12 minutos previstos. A 80 cm, a propagação ocorreu em 16 minutos, alinhando-se às normas. O incêndio consumiu 7 veículos em 35-40 minutos, com dois picos de HRR: o inicial (8,3 MW) e um segundo, de 16 MW a 40 cm, devido à ignição simultânea. A distância 40 cm foi a mais crítica, intensificando a radiação térmica e acelerando a propagação do fogo.

Figura 13 – Modelagem de espaçamento para análise da propagação de incêndio entre veículos de Márton *et al.* (2015)



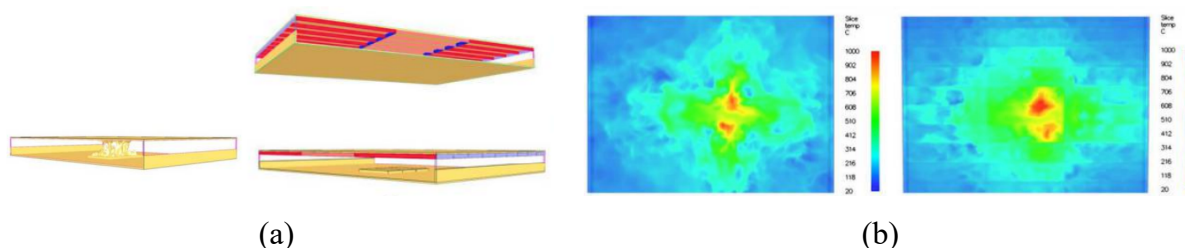
Fonte: Márton *et al.* (2015).

2.10. Tondini *et al.* (2016)

Tondini *et al.* (2016) compararam o método simplificado de Hasemi-SAFIR com uma estratégia integrada FDS-SAFIR para análise termomecânica de vigas em edifícios garagens de aço abertos sob incêndio veicular. No FDS, simularam dois cenários com três veículos: um incluindo vigas como obstáculos adiabáticos e outro sem. Utilizou-se a curva de taxa de liberação de calor (HRR) de carros Classe 3 (INERIS, 2001; Joyeux et al., 1997) com calor de combustão de $44,4\text{ MJ/kg}$ (gasolina), rendimento de fuligem de 0,22 e propagação entre veículos adjacentes após 12 minutos. A malha CFD foi de $0,15\text{ m} \times 0,15\text{ m} \times 0,15\text{ m}$ e os carros foram modelados como blocos a $0,30\text{ m}$ do piso, conforme detalhado na Figura 14. O modelo Hasemi, mais conservador, indicou colapso estrutural em 27 minutos, enquanto o acoplamento FDS-SAFIR resultou em temperaturas inferiores ($\sim 400^{\circ}\text{C}$ comparado a $\sim 600^{\circ}\text{C}$) e na manutenção da integridade estrutural.

A inclusão de vigas no FDS elevou as temperaturas dos gases, como esperado e não houve colapso global.

Figura 14 – Temperatura dos gases por Tondini *et al.* (2016): (a) veículo em chamas sem vigas e com vigas, (b) temperatura dos gases dos veículos em chamas sem as vigas e com as vigas

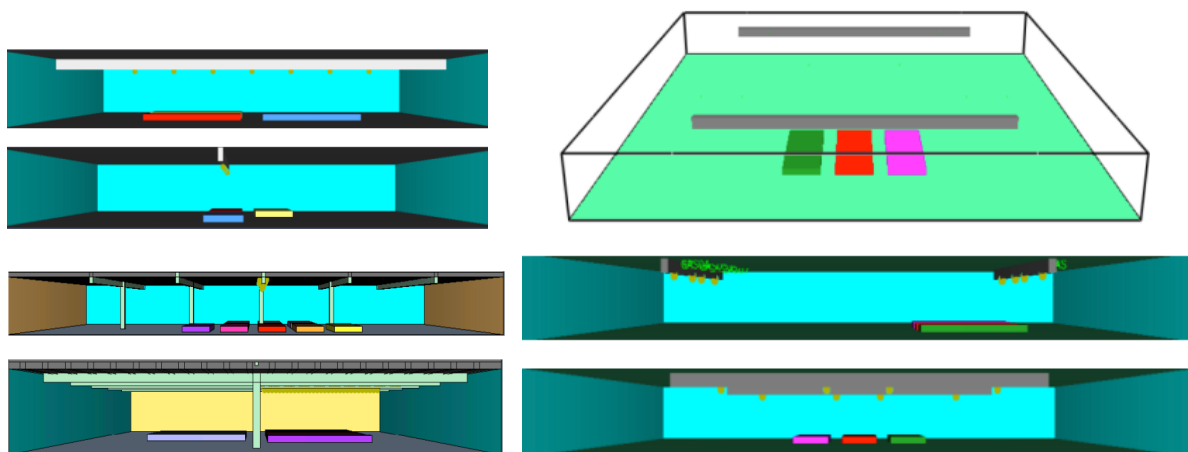


Fonte: Tondini *et al.* (2016).

2.11. Matheus (2017)

Matheus (2017) analisou a propagação do incêndio em um pavimento de $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 3\text{ m}$ de um estacionamento aberto, considerando três veículos sob duas vigas. Para isso, foram utilizados os softwares CaPaFi e FDS, com o FDS empregando malhas de 0,10 m, 0,25 m e 0,50 m para simulação, detalhados na Figura 15. Os veículos foram modelados como cubos de $4,8\text{ m} \times 1,8\text{ m} \times 0,3\text{ m}$, posicionados com um espaçamento de 0,70 m, e o tempo estimado para a propagação do fogo para o veículo adjacente foi de 12 minutos. Os resultados demonstraram que o FDS apresentou estimativas mais conservadoras das temperaturas em comparação com o CaPaFi, registrando 857°C contra 737°C na superfície da viga.

Figura 15 – Modelagem no FDS para quantificação térmica de vigas de Matheus (2017)

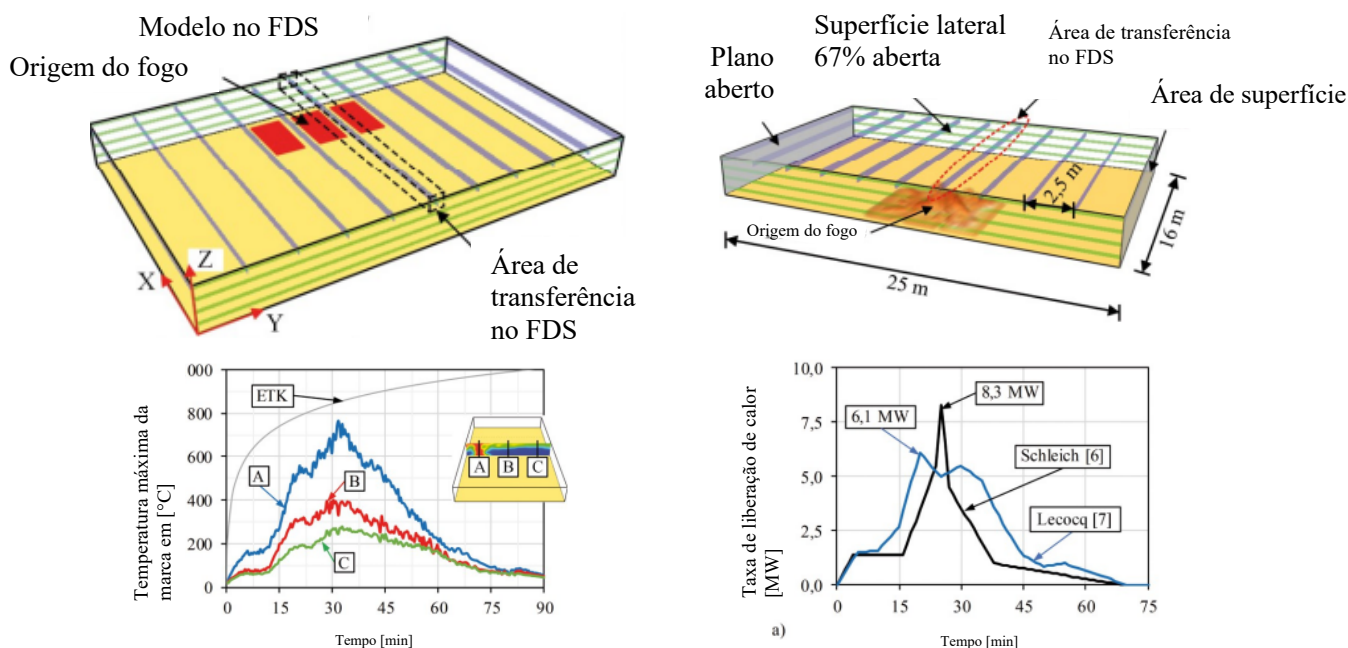


Fonte: Matheus (2017).

2.12. Upmeyer *et al.* (2019)

Upmeyer *et al.* (2019) investigaram o desempenho termomecânico de uma garagem aberta de aço, utilizando o acoplamento FDS-SAFIR para análise de viga em um edifício garagem de aço de 25m x 16m, foi analisado um cenário de incêndio com 3 veículos adotando a curva de taxa de liberação de calor (HRR) de Lecocq *et al.* (2014) para veículos á combustão, com pico de 6,1 MW e tempo de propagação entre veículos adjacentes de 12 minutos, detalhados na Figura 16. Comparou-se ainda os resultados com a curva padrão ISO 834 (ISO, 1999) para 30 minutos, que atingiu 800°C no flange da viga, enquanto o modelo FDS-SAFIR registrou 650°C na mesma região. A abordagem FDS-SAFIR reduziu as deformações máximas da viga em 35% comparado à ISO 834 (ISO, 1999), permitindo verificar a capacidade de carga sem proteção passiva.

Figura 16 – Ensaio numérico para análise de uma viga de Upmeyer *et al.* (2019)



Fonte: Adaptado de Upmeyer *et al.* (2019).

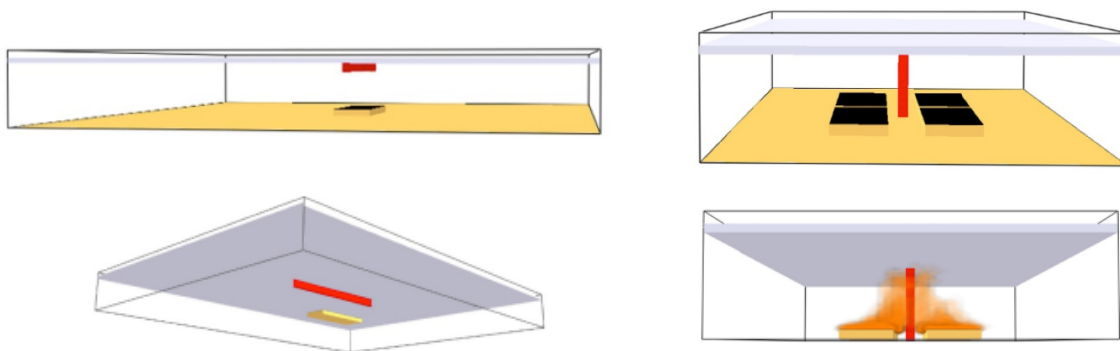
2.13. Yan *et al.* (2022)

Yan *et al.* (2022) investigaram a resposta térmica de vigas e colunas de aço não protegidas em estacionamentos abertos expostos a incêndios localizados de veículos, bem como a influência da galvanização dos perfis. O estudo combinou modelagem do FDS com o software SAFIR (FDS-FEM) em comparação com modelos analíticos do Eurocódigo (Hasemi, Heskestad e LOCAFI) para prever temperaturas em elementos estruturais. Foram realizados

dois cenários de incêndio: um carro alinhado sob a viga e quatro carros ao redor de uma coluna. A curva de taxa de liberação de calor (HRR) adotada foi a Classe 3 de Joyeux *et al.* (2002) do CTICM, com pico de 8,3 MW e propagação de 12 minutos para os veículos adjacentes e os veículos a frente 24 minutos. As simulações no FDS utilizaram malhas refinadas ($0,1\text{ m} \times 0,2\text{ m} \times 0,1\text{ m}$) em domínios de $30\text{ m} \times 22,5\text{ m} \times 3\text{ m}$, detalhados na Figura 17. Os autores observaram que vigas de aço não galvanizadas atingiram temperaturas entre 476°C (1 carro) e 855°C (3 carros), com perfis mais esbeltos (IPE450) registrando até 120°C a mais que vigas robustas. Colunas alcançaram 474°C com 4 carros. A galvanização reduziu os picos em $50\text{--}70^{\circ}\text{C}$ (vigas) e $40\text{--}50^{\circ}\text{C}$ (colunas). O modelo Hasemi superestimou temperaturas em até 260°C por assumir chama contínua no teto, enquanto FDS-FEM evidenciou variações mais compatíveis com os comportamentos termodinâmicos observados (200°C em colunas).

É importante ressaltar que mesmo as propriedades do piso não foram integradas ao modelo (o que pode influenciar nos resultados das simulações no FDS), Yan *et al.* (2022), afirma que as vigas em cenários leves podem dispensar proteção do aço, evitando o superdimensionamento.

Figura 17 – Ensaio numérico ao redor de uma viga e um pilar de Yan *et al.* (2022)



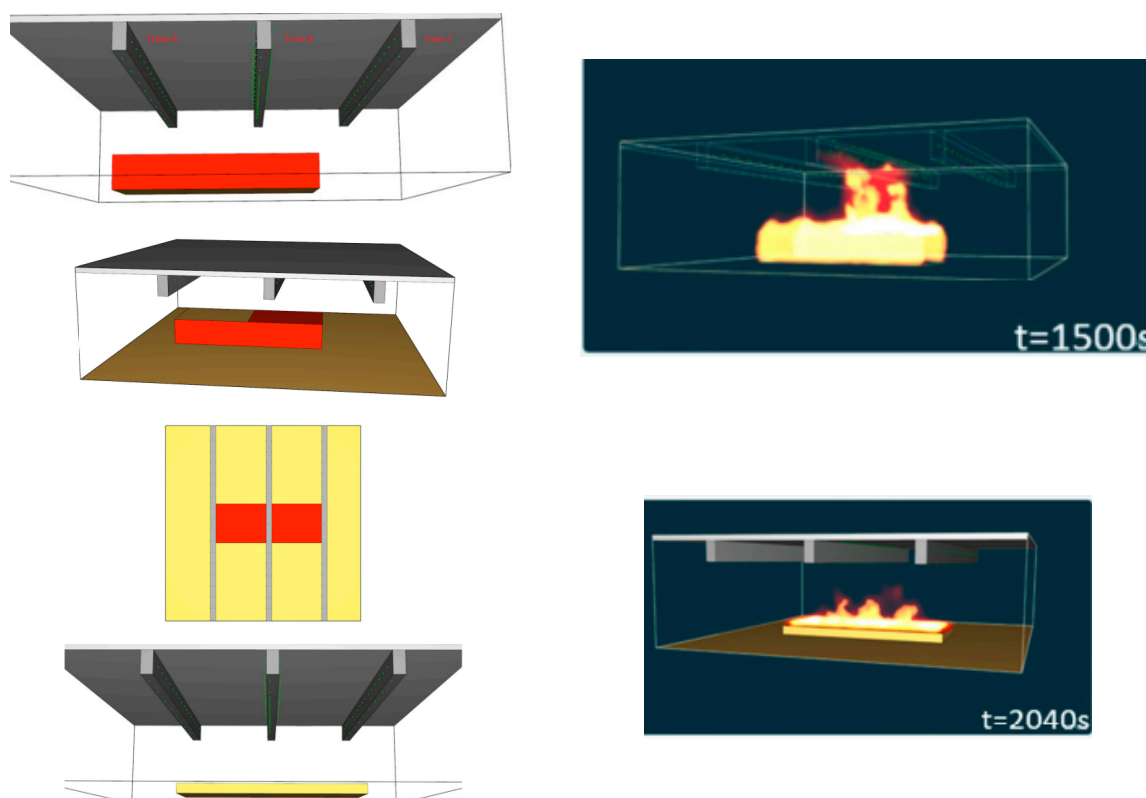
Fonte: Yan *et al.* (2022)

2.14. De Silva *et al.* (2023)

De Silva *et al.* (2023) analisaram o impacto dos diferentes modelos de incêndio localizado na evolução da chama, temperatura dos gases e temperatura do aço em um estacionamento, utilizando os métodos Hasemi-FDS e FDS-SAFIR (FDS-FEM). O edifício garagem de $16\text{ m} \times 50\text{ m} \times 2,70\text{ m}$ foi modelado com um cubo de $8,75\text{ m} \times 8,75\text{ m} \times 2,75\text{ m}$. A malha do FDS foi de $0,125\text{ m}$, e a curva de HRR seguiu Zhao (2014) do CTICM, com pico de 8,3 MW. Dois cenários foram analisados com um veículo em combustão, considerando modelagem 3D e Placa. No 3D, a área de queima foi de $2 \times 4,5 \times 0,75\text{ m}$, e a parte superior

modelada como $0,5 \text{ m} \times 4,5 \text{ m} \times 1,75 \text{ m}$, com $\text{HRRPUA} = 778 \text{ W/m}^2$. No modelo Placa, a área queimante foi $4,75 \times 1,75 \text{ m}$, com $\text{HRRPUA} = 1000 \text{ W/m}^2$, detalhados na Figura 18. Também foram comparados cenários com e sem sprinklers, sendo que o HRR foi reduzido em 50% com sprinklers. O modelo Hasemi superestimou temperaturas, com a alma da viga atingindo 800°C (Hasemi) versus 650°C (FDS) em 30 minutos. O modelo FDS 3D resultou em temperaturas ligeiramente superiores ($\sim 800^\circ\text{C}$) ao modelo FDS Placa ($\sim 750^\circ\text{C}$).

Figura 18 – Modelagem de análise de vigas de De Silva *et al.* (2023)



Fonte: De Silva *et al.* (2023)

2.15. Observações sobre o capítulo

O capítulo apresentado oferece uma visão abrangente sobre os estudos experimentais e numéricos realizados para a análise de incêndios em edifícios garagem de aço abertos lateralmente.

O foco principal está na compreensão do comportamento estrutural sob incêndio veicular, considerando variáveis-chave como a temperatura dos gases, a taxa de liberação de calor (*Heat release rate* - HRR), o espaçamento entre veículos e o tempo de propagação do incêndio.

Os estudos revisados demonstraram resultados significativos. O Quadro 2 evidencia que, mesmo com temperaturas elevadas nos gases e no aço estrutural, nenhuma das investigações experimentais registrou colapso global da estrutura.

Dentre os estudos revisados, apenas os trabalhos de Joyeux *et al.* (2002) e Zhao e Kruppa (2004) empregaram modelagens numéricas para a análise mecânica utilizando softwares como Abaqus e Ozone, sem realizar a quantificação térmica proveniente de outros softwares especializados, como o FDS.

Quadro 2 – Resumo das temperaturas obtidas nos ensaios experimentais em escala real

Autor (Ano)	Temperatur a máxima dos gases (°C)	Temperatur a máxima do aço (°C) na viga	Temperatura máxima do aço (°C) no pilar	Houve colapso estrutural?	Espaçament o (m)	Tempo de propagação para o veículo adjacente (min)
Butcher <i>et al.</i> (1967)	840	275	360	Não	0,60, 1,65	-
Nippon Steel (1970)	245	245	242	Não	-	-
Gewain (1973)	432	226	-	Não	0,60	-
Bennetts <i>et al.</i> (1986)	725	340	320	Não	0,40, 0,50	-
Kitano <i>et al.</i> (200)	-	550	350	Não	-	8.5, 19, 23
Joyeux <i>et al.</i> (2002).	-	700	640	Não	-	12
Zhao e Kruppa (2004)	1000	700	301	Não	-	5.5, 16.5, 56

Fonte: Autora (2025).

O Quadro 3 resume os estudos que utilizaram o Fire Dynamics Simulator (FDS), ressaltando geometrias veiculares, configurações de malha e curvas de HRR amplamente reconhecidas na literatura, como as de Joyeux *et al.* (1997; 2002) e Zhao e Kruppa (2004).

Contudo, nenhum dos estudos que empregaram o FDS realizou validações diretas com dados provenientes de incêndios experimentais em escala real, o que limita a confiabilidade dos resultados numéricos e ressalta a necessidade de investigações adicionais para correlacionar as simulações com evidências práticas.

Quadro 3 – Resumo das curvas de taxa de liberação de calor de cada veículo e tempo de propagação para o veículo adjacente

Autor (Ano)	Curva de HRR	Veículos envolvidos	Geometria Veículo (m)	Tamanho de Malha (m)	Tempo de propagação (min)	Espaçamento (m)	HRR (MW)
Cook <i>et al.</i> (2008)	Bayeuther <i>et al.</i> (2006)	40	4,5m x 1,75m x 1m	0,125	6	-	7,3
Wong (2014)	CTICM: Zhao e Kruppa (2004)	1 e 3	4,8m x 1,8m x 0,3m	0,10 e 0,20	12	2,5	8,3
Márton <i>et al.</i> (2015)	CTICM: Joyeux <i>et al.</i> (1997)	3	1,8 x 4,8	0,10, 0,15 e 0,20	6,3, 9,25, 16,5	0,40, 0,60, 0,80	8,3
Todini <i>et al.</i> (2016)	CTICM: INERIS (2001)	3	0,30	0,15	12	-	8,3
Mattheus (2017)	CaPaFi (EN 1991-1-2, 2010)	3	4,8 m × 1,8 m × 0,3 m	0,10, 0,25 e 0,50	12	0,70	8,3
Upmeyer <i>et al.</i> (2019)	Lecoq <i>et al.</i> (2014)	3	5 x 2	-	12	-	6,1
Yan <i>et al.</i> (2022)	CTICM: Joyeux (2002) ECCS	1 e 4	4,8 m × 1,8 m × 0,3 m	0,1 m × 0,2 m × 0,1 m	12	-	8,3
De Silva (2023)	CTICM: Zhao (2014)	1	4.5 × 1.75 × 0.75 e 4.75 × 1.75 × 0.25	0,125m	-	-	8,3

Fonte: Autora (2025).

Após a coleta dos dados, os seguintes direcionamentos foram estabelecidos para a modelagem de incêndios em edifícios garagem abertos lateralmente:

- Os cenários mais comuns apresentam um, dois ou três veículos em chamas, o que corrobora com o estudo estatístico realizado pelo ECCS em 1993.
- O tempo de propagação é o tempo médio entre a ignição e o tempo de propagação para o veículo adjacente, sendo amplamente utilizado 12 minutos, adotado a partir dos

experimentos de Joyeux (1997), inclusive, o relatório do INERIS (2001) para projetos baseados em desempenho em edifícios garagens estabelece este intervalo de propagação.

- As curvas de taxa de liberação de calor consolidadas pelo CTICM, para veículos de passeios classe 3, que representam 93% da frota de veículos em chamas segundo o ECCS (1993). Esses veículos de passeio apresentam uma HRR de pico de 8,3 MW pelos experimentos do CTICM pelos autores Joyeux *et al.* (1997;2002) e Zhao e Kruppa (2004).
- Nenhuma proteção passiva contra incêndio foi necessária para as estruturas de aço, mesmo em cenários com temperaturas máximas elevadas, como as registradas por Zhao e Kruppa (2004) (1.000 °C) e Butcher *et al.* (1967) (840°C).

Em busca de dados mais atualizados sobre o comportamento de veículos de passeio em chamas, analisou-se o estudo revisado pelo CTICM em 2023 por Thauvoye *et al.* (2023). Apesar das mudanças na composição dos veículos atuais – como o maior uso de materiais combustíveis representando um acréscimo médio de 200 kg na massa – o estudo demonstrou que não houve incremento na taxa de liberação de calor (HRR) em comparação com os experimentos realizados entre 1997 e 2002. Ao contrário, foi registrado um pico reduzido de 7 MW em relação aos valores anteriores.

3. MODELO FDS

Para determinar a carga térmica incidente na estrutura, realizou-se uma simulação de incêndio com o software Fire Dynamics Simulator (FDS). O FDS é um software CFD especializado na simulação de incêndios, dinâmica de chamas, combustão e dispersão de fumaça, desenvolvido e mantido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST). Seu núcleo matemático resolve numericamente as equações de Navier-Stokes compressíveis filtradas para escoamentos de baixo número de Mach onde as variações de pressão são desprezíveis em relação à pressão ambiente – uma aproximação válida para incêndios em edificações, onde velocidades do fluxo são tipicamente inferiores a 10 m/s (MCGRATTAN, 2024).

A formulação utiliza um sistema de coordenadas cartesianas com malha estruturada e uniforme, onde as variáveis primárias (pressão (p), velocidade $u=(u,v,w)$, temperatura (T), e frações mássicas de espécies químicas Y_i) são dispostas em um arranjo escalonado (*staggered grid*) (MCGRATTAN, 2024).

Nesse esquema, as componentes de velocidade são armazenadas nas faces das células, enquanto pressão, densidade (ρ), e variáveis escalares ocupam o centro da célula, mitigando oscilações espúrias e garantindo conservação local de massa e momentum.

A discretização temporal emprega um esquema explícito de diferenças finitas de segunda ordem (método de Adams-Bashforth), com passo de tempo limitado pelo critério de estabilidade de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL). Para o espaço, utiliza-se diferenças centradas de segunda ordem em coordenadas cartesianas, preservando energia cinética em escalas resolvidas – um aspecto crítico para simulações de turbulência, conforme discutido no capítulo *Turbulence Modeling*, que descreve a abordagem LES (*Large Eddy Simulation*) e modelos de submalha, como o Deardorff, para capturar efeitos de turbulência não resolvidos pela malha (MCGRATTAN, 2024).

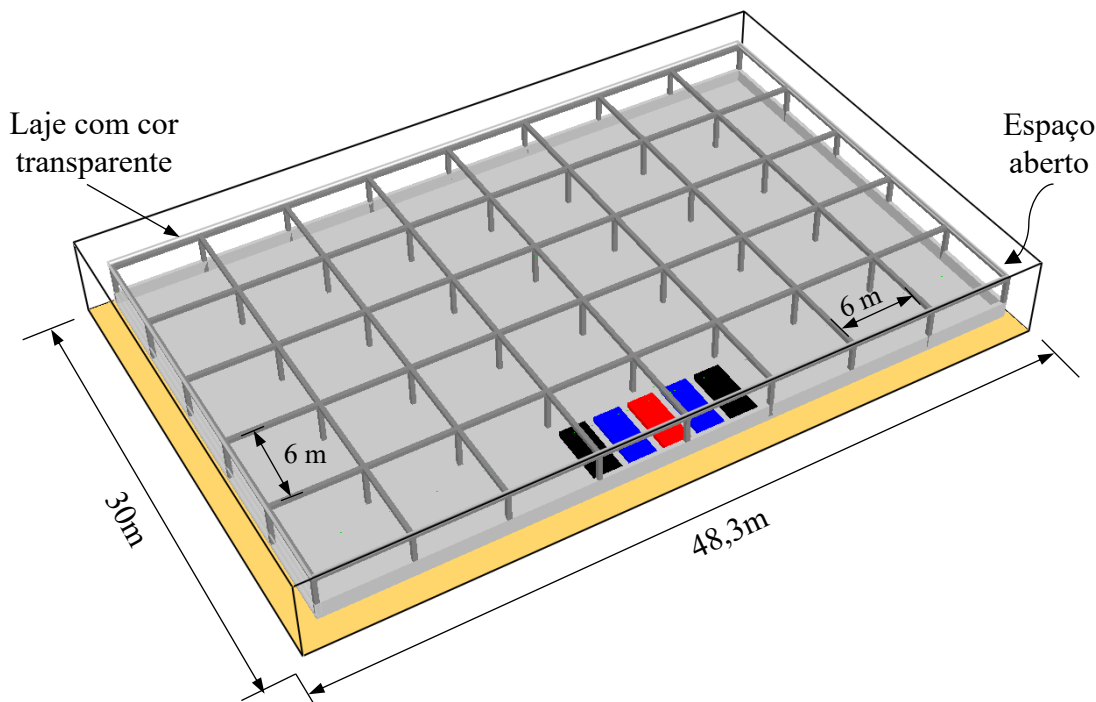
Para a modelagem, o software foi instalado em um desktop com processador Ryzen 7 5700X 3D 4.00GHz, 8 núcleos, 32.0 GB de memória RAM e Placa Gráfica AMD Radeon Rx 6750 XT.

3.1. Estudo de Caso

O estacionamento em estudo apresenta dimensões de 30 m de comprimento, 48,30 m de largura e 3,6 m de altura, geometria típica dos edifícios garagens do Brasil. Os pilares são

espaçados a cada 6 metros na transversal e longitudinal, com vigas, seguindo toda a área do estacionamento, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Modelagem no FDS do estudo de caso



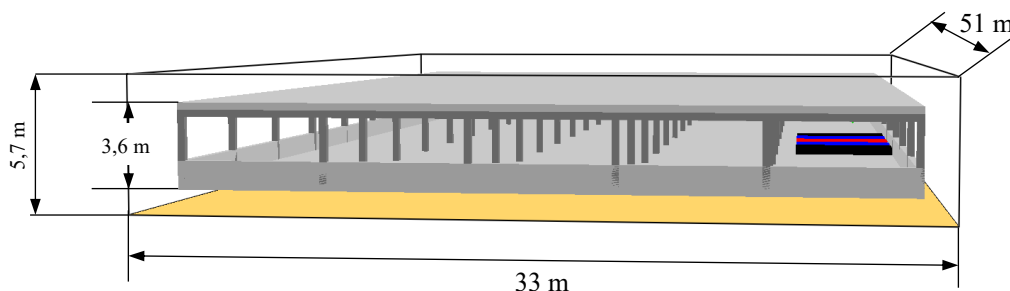
Fonte: Autora (2025)

3.2.Domínio computacional

A fim de minimizar os efeitos de contorno que ocorrem em simulações com o FDS, utiliza-se um domínio maior do que a área de interesse. Essa estratégia assegura que as condições impostas nas bordas não interfiram diretamente nos fenômenos físicos, evitando reflexões e distorções nos resultados (TABACZENSKI, 2019). Ao expandir o domínio, as ondas de calor, pressão e massa dispõem de espaço suficiente para se dissiparem naturalmente, permitindo uma modelagem que reflete adequadamente o comportamento do incêndio e a propagação da fumaça. O domínio foi estendido à frente, atrás e acima da abertura, abrangendo 33 m de largura (com 1,5 m adicionais em cada lado da abertura), 2,7 m de profundidade e 1,1 m de altura acima do teto. A Figura 20 apresenta a representação geométrica do modelo em estudo.

As fronteiras externas do domínio de ar (parte superior e quatro laterais) foram definidas como aberturas, caracterizando condições de fronteira abertas para o ambiente externo. Já o limite inferior do domínio foi estipulado como um piso fechado pelo *namelist & VENT*.

Figura 20 – Domínio computacional do modelo

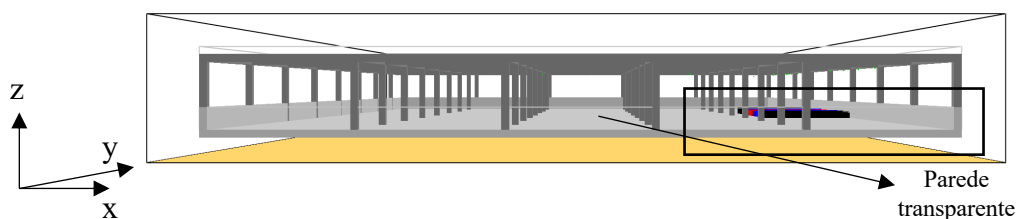


Fonte: Autora (2025)

3.3. Cenários de incêndio

Nesse esquema, os veículos são estacionados próximo a parede lateral direita (Figura 21), todos os carros alinhados, lado a lado, devido ao layout do edifício. Esses cenários podem ocorrer em qualquer posição na planta do edifício de acordo com recomendações práticas de projetos baseados em desempenho do ECCS (ECCS, 1993).

Figura 21 – Cenários de propagação de incêndio em estacionamentos simulados



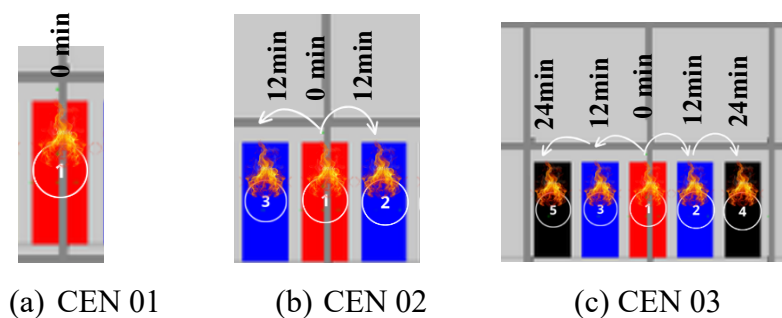
Fonte: Autora (2025)

Com base nos cenários mais investigados de incêndios na Europa pelo ECCS (ECCS, 1993), foram definidos três layouts para cenários de incêndio para a simulação, representando na Figura 22:

1. Cenário 1 (CEN01): Um único veículo em chamas, simulando um incêndio isolado.
2. Cenário 2 (CEN02): Três veículos em chamas, com o veículo central (1) iniciando o incêndio. Os veículos adjacentes (2 e 3) a 60cm de distância e entram em combustão 12 minutos após o início do fogo no veículo central.
3. Cenário 3 (CEN03): Cinco veículos em chamas, onde o veículo central (1) inicia a ignição, seguido pelos veículos adjacentes (2 e 3) a 60 cm de distância do carro central, que começam a queimar após 12 minutos. Os veículos externos (4 e 5) a 60cm de

distância, adjacentes aos veículos 2 e 3, iniciam a queima 24 minutos após o início do incêndio no veículo central

Figura 22 – Cenários de propagação de incêndio em estacionamentos simulados



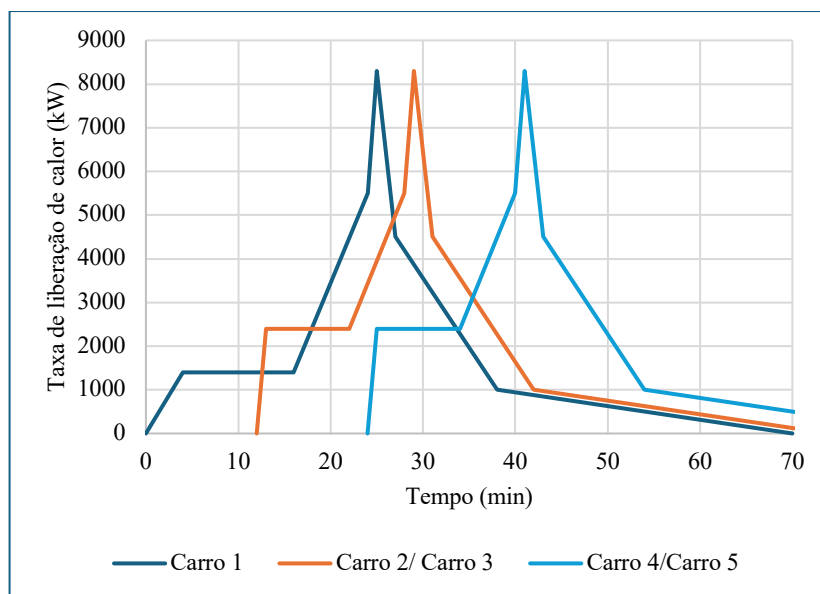
Fonte: Autora (2025)

3.4. Carga de incêndio

O INERIS (*Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques*) recomenda que sejam utilizados veículos de passeios (classe 3) para avaliar a estabilidade estrutural de estacionamentos sob condições de fogo e o tempo de 12 minutos para propagação para os veículos adjacentes, com a taxa de liberação de calor proveniente da queima de um veículo com pico de 8.300kW (INERIS, 2001; 2022). A carga de incêndio modelada foi definida pelas recomendações do INERIS, que se baseiam nos estudos experimentais do CTICM (Joyeux *et al.*, 1997; 2002, ZHAO E KRUPPA, 2004).

A Figura 23 mostra a simplificação da curva adotada e os dados do experimento do CTICM, inseridos na simulação no formato de &RAMP, pois, a taxa de liberação de calor varia de acordo com o tempo, como detalhado no Quadro 4.

Figura 23 – Curva com a taxa de liberação de calor da queima de 1 à 5 veículos



Fonte: Joyeux et al. (2002).

Quadro 4 – Taxa de liberação de calor inseridas no FDS

Tempo (s)	Tempo (min)	HRR (MW)	HRR (kW)
0	0	0	0,00
240	4	1,40	1400
960	16	1,40	1400
1440	24	5,50	5500
1500	25	8,30	8300
1620	27	4,50	4500
2280	38	1,00	1000
4200	70	0	0

Fonte: Joyeux et al. (2002).

3.5. Combustível

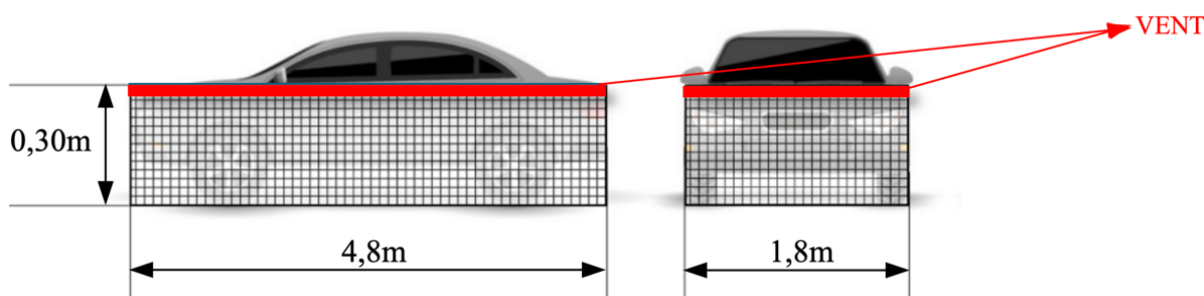
A modelagem adotada na simulação considerou a variabilidade inerente à composição química da gasolina e a ausência de consenso científico sobre metodologias padronizadas para a propagação de incêndios em veículos. Baseando-se nas características das queimas de combustíveis definidas por Babrauskas (2002) e na metodologia de Yan *et al.* (2022), o n-heptano (C_7H_{16}) foi inserido pelo *namelist &REAC* para representar a combustão de hidrocarbonetos devido ao seu calor de combustão de aproximadamente 44.400 kJ/kg ($HEAT_OF_COMBUSTION = 4.46E4$). Os parâmetros de rendimento associados incluem o monóxido de carbono ($CO_YIELD = 0.008$) e a fuligem ($SOOT_YIELD = 0.037$), consistentes

com o poder calorífico típico da gasolina, resultando em uma aproximação confiável do HRR característico do incêndio de Joyeux *et al.* (2002).

3.6. Veículo

Para analisar o comportamento térmico no espaço, os veículos foram modelados de forma simplificada como blocos retangulares. Cada carro foi representado como um bloco com uma área de fogo correspondente a um “incêndio de poça” (*pool fire*), inserido com *namelist &OBST* de 4,8 m de comprimento, 1,80 m de largura e 0,30 m de altura, com uma área de queima na parte superior do bloco (4,8 m x 1,8 m), partindo da premissas adotadas por Schleich *et al.* (1999) e BRE (2010), sendo considerado para fins de simulação como *namelist &VENT* e a taxa de liberação de calor por unidade de área (HRRPUA) é 658.73kW/m², sem alterar o tamanho da superfície de incêndio na parte superior dos blocos, conforme Figura 24.

Figura 24 – Modelagem dos veículos em estudo



Fonte: Adaptado de Freepik por Autora (2025).

3.7. Configuração de malha

3.7.1. Teste de convergência

Para garantir a precisão e a representatividade das simulações no FDS, foi realizado um estudo de convergência de malha antes da implementação dos cenários, com auxílio do *FDS mesh size calculator* (FDS Tutorial, 2024; McGrattan *et al.*, 2024), ferramenta originalmente desenvolvida por Kris Overholt (FDS Tutorial, 2024). Esse script sugere três configurações de malha (grosseira, média e fina) e gera as respectivas linhas de entrada para o arquivo de simulação. A resolução espacial é representada pelo comprimento característico de cada célula (δx), que, de acordo com McGrattan *et al.* (2024), deve situar-se na faixa de 1/10 a 1/20 em relação ao diâmetro característico (D)* de um incêndio em piscina.

O valor de diâmetro de fogo característico (D^*) é obtido pela Equação (1), recomendada no capítulo sobre resolução de malha (“*Mesh Resolution*”), em que Q é a taxa de liberação de calor do fogo (kW), ρ_∞ é densidade do ar (kg/m^3), c_p : calor específico do ar ($\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$), g : aceleração da gravidade (m/s^2) e T_∞ corresponde a temperatura ambiente (K). Os valores adotados estão no Quadro 5.

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad \text{Equação (1)}$$

Quadro 5 – Resolução de malha

	Valores adotados	Fonte
Q	8300 kW	Joyeux <i>et al.</i> (2002)
ρ_∞	1,204 kg/m^3	McGrattan <i>et al.</i> (2024)
c_p	1,005 $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$	McGrattan <i>et al.</i> (2024)
T_∞	302,65 K	McGrattan <i>et al.</i> (2024)
g	9,81 m/s^2	McGrattan <i>et al.</i> (2024)
D^*	2,236 m	Calculado

Fonte: Autora (2025).

No caso em estudo, o diâmetro de fogo característico D^* foi calculado em aproximadamente 2,236 m. O tamanho do elemento recomendado $D^*/4$ para a malha grossa (0,55 m para esse modelo), $D^*/10$ para a malha média (0,22 m) e $D^*/16$ para a malha fina (0,14 m). Assim, foram escolhidos três tamanhos de elementos 0,50m, 0,25m, 0,15 m.

Quadro 6 sintetiza os resultados, considerando um domínio de $35,5 \text{ m} \times 51,5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ($\text{XB}=-1.50,35,-1.5,50,-1,4$) correspondente ao edifício garagem analisado e adaptando o número de células em cada direção (IJK) para próximos.

Quadro 6 – Cálculo de Malha

	Tamanho de célula (δx) sugerido	Tamanho de célula (δx) adotado	Número de células (I; J; K):	Número total de células (I x J x K)
Grossa $D/\delta x = 4$	0,559 m	0,50 m	73;103;10	75.190
Média $D/\delta x = 10$	0,224 m	0,30 m	110;170;19	355.300
Fina $D/\delta x = 16$	0,140 m	0,15 m	220; 340; 38	2.842.400

Fonte: Autora (2025).

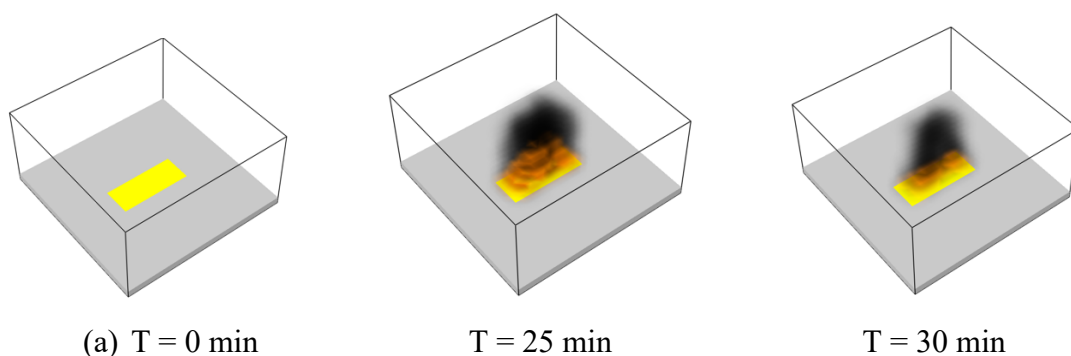
3.7.2. Análise de sensibilidade

Além do estudo de convergência de malha, foi realizada uma análise de sensibilidade em relação à taxa de liberação de calor (HRR) de referência, com o objetivo de verificar se a configuração numérica adotada reproduziria com precisão a dinâmica de queima de um veículo, conforme os dados experimentais de Joyeux *et al.* (2002).

Para isso, simulou-se uma placa plana de $4,8\text{ m} \times 1,8\text{ m}$ (sem espessura em formato de &VENT), representando a superfície queimante, em um domínio computacional de $12\text{ m} \times 12\text{ m} \times 6\text{ m}$, aberto em cinco faces, exceto pelo piso de laje steel deck (Figura 25). O perfil de HRR do experimento foi inserido via função RAMP, com HRRPUA de $960,65\text{ kW/m}^2$, utilizando n-heptano como combustível. Três resoluções de malha foram testadas: $0,15\text{ m}$, $0,30\text{ m}$ e $0,50\text{ m}$.

A validação do modelo baseou-se no histórico experimental de HRR reportado por Joyeux *et al.* (2002), cujo pico de 8.300 kW ocorre aos 25 minutos ($t=1500\text{ s}$). Não foi necessário utilizar o parâmetro *namelist &DEV* do FDS para monitorar a HRR ao longo de 70 minutos de simulação ($t=4200\text{ s}$).

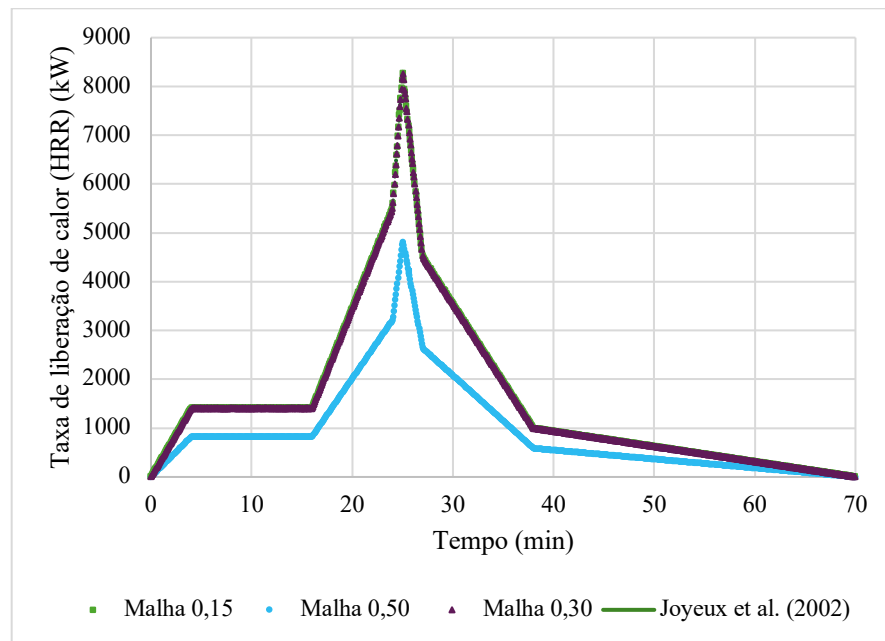
Figura 25 – Desenvolvimento do fogo durante uma liberação de calor



Fonte: Autora (2025).

Os resultados conforme Figura 26, demonstraram que as curvas de HRR simuladas foram praticamente idênticas às do experimento para todas as malhas, com diferenças nos picos inferiores a 1% (exceto para a malha de $0,50\text{ m}$, que apresentou desvio de 41,95%. O Quadro 7 detalha os valores de HRR obtidos, os desvios percentuais em relação à referência e o tempo computacional exigido por cada configuração.

Figura 26 – Comparação dos históricos de HRR do experimento de Joyeux *et al.* (2002) e das simulações



Fonte: Autora (2025).

Quadro 7 – Relação entre tamanho de malha, número de células, HRR simulado, desvio percentual e tempo computacional

Tamanho da malha (m)	Número de células	Taxa de liberação de calor total pelo FDS (kW)	Referência de cálculo (Joyeux <i>et al.</i> , 1997;2002) (kW)	Desvio percentual de cálculo (%)	Tempo computacional
0,15x0,15x0,15	256.000	8.268,93	8.300	0,38	17h21min
0,30x0,30x0,30	32.000	8.253,76	8.300	0,56	6h12min
0,50x0,50x0,50	6.912	4.818,09	8.300	41,95	39min

Fonte: Autora (2025).

Observa-se que a malha de 0,15 m³, com 256.000 células, apresenta o menor desvio percentual (0,38%) em relação à referência teórica de Joyeux *et al.* (1997; 2002), simulando uma taxa de liberação de calor (HRR) de 8.268,93 kW contra os 8.300 kW esperados. Essa alta precisão, contudo, demanda um tempo computacional elevado (17h21min), refletindo o trade-off intrínseco entre resolução espacial e eficiência numérica.

Por outro lado, ao ampliar a malha para 0,30 m³ (32.000 células), verifica-se uma redução exponencial no tempo de processamento para 6h12min, com desvio percentual ligeiramente superior (0,56%) e HRR calculado em 8.253,76 kW. Esse resultado indica que,

mesmo com uma redução de 87,5% no número de células, a precisão mantém-se dentro de parâmetros aceitáveis (inferior a 1%), sugerindo que malhas intermediárias podem otimizar recursos sem comprometer significativamente a confiabilidade do modelo.

Entretanto, ao adotar uma malha de 0,50 m³ (6.912 células), o desvio percentual atinge 41,95%, com HRR simulado de 4.818,09 kW, evidenciando uma subestimação crítica da potência térmica. Embora o tempo computacional seja drasticamente reduzido (39 minutos), a discrepância compromete a qualidade dos resultados, não representando adequadamente a taxa de liberação de calor, podendo haver um subdimensionamento em relação ao projeto.

Com base nesses achados, e considerando a relação entre convergência numérica e eficiência computacional, optou-se pela utilização da malha de 0,30 m em todas as direções do domínio de estudo, totalizando 355.300 células no domínio completo para o estudo de caso.

3.8. Propriedades térmicas e de combustão dos materiais

Como padrão do FDS, todas as obstruções inseridas no modelo são inertes com a temperatura fixada na temperatura ambiente inicial. Nesse sentido, é necessário fornecer os valores das propriedades térmicas de cada material para que este seja influenciado pelo incêndio. As propriedades térmicas do edifício garagem foram definidas a partir das normas NBR 15220-2 (ABNT, 2022) e para fins de simulação as propriedades de todos os materiais foram consideradas invariáveis. O Quadro 8 mostra as propriedades dos materiais empregados neste modelo.

Quadro 8 - Propriedades térmicas dos materiais empregados no modelo computacional

Material	Densidade (kg/m ³)	Emissividade	Condutividade Térmica (W/m.K)	Calor específico (kJ/kg.K)
Concreto	2300	0,90	1,75	1
Aço	7850	0,70	45,0	0,70
Tijolo comum	1600	0,90	0,90	0,90
Argamassa de cimento	2000	0,90	1,15	0,90

Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2022).

A partir dos materiais empregados no Quadro 8, foram realizadas superfícies com *namelist* &SURF com a combinação desses materiais e suas espessuras reais. A parede de alvenaria foi modelada como uma composição de três camadas: uma camada externa de argamassa de cimento com espessura de 0,025 m, seguida por uma camada de tijolo com 0,10 m de espessura, e uma camada interna de argamassa de cimento com 0,025 m. A laje steel deck

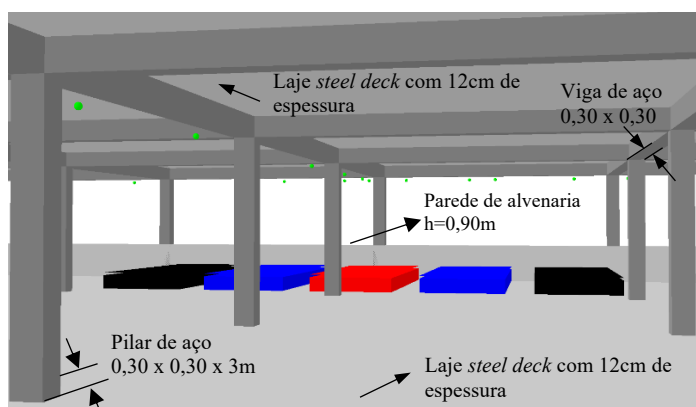
foi definida como uma superfície com espessura total de 0,12 m, constituída por 0,10 m de concreto, uma rede anti-fissuração de 0,002 m e uma malha de aço de 0,0095 m.

3.9. Geometria

A representação das paredes, laje, alvenaria se deu através da modelagem de obstruções (*namelist & OBST*) cuja geometria e distribuição no ambiente foram devidamente ajustadas com a malha adotada, porém suas espessuras reais foram detalhadas pelo *namelist & SURF*, conforme item anterior. Assim, todos os objetos sólidos presentes nesta simulação foram modelados com dimensões múltiplas de 30 cm.

As paredes são compostas de alvenaria com altura de 0,90 m e espessura de 0,30 m (múltiplos da malha), o piso e o teto são compostos de laje *steel deck* com espessura de 0,30m e os pilares têm pé direito de 3,30 m e as vigas foram consideradas perfis quadrados de aço com lados de 0,30 m. A geometria é exposta na Figura 27.

Figura 27 – Geometria do pavimento



Fonte: Autora (2025).

3.10. Parâmetros iniciais

3.10.1. Classificação do edifício

Para avaliar o impacto do fogo na estrutura durante um incêndio, a NBR 14432 (ABNT, 2001) estabelece o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), que é o período durante o qual a estrutura deve manter sua estabilidade, integridade e isolamento térmico.

No caso dos edifícios garagem, classificados como tipo G2, abertos lateralmente e enquadrados na classe P3, é exigido um TRRF de 30 minutos. Assim, durante esses 30 minutos, é imprescindível que a temperatura atingida pelos elementos estruturais não ultrapasse sua

temperatura crítica, garantindo que eles mantenham a resistência adequada em situação de incêndio.

3.10.2. Condições ambientais

Algumas condições ambientais foram consideradas atribuídos na *namelist &MISC*, tais como:

As condições ambientais iniciais consideradas foram:

- Temperatura ambiente de 29,5 °C;
- Pressão atmosférica ao nível do mar de 101.325,0 Pa;
- Tempo de simulação 30 minutos ($t=1800s$) para atender ao TRRF 30 min;
- Umidade relativa do ar de 80%;
- Domínio do edifício garagem de aço aberto para ventilação;

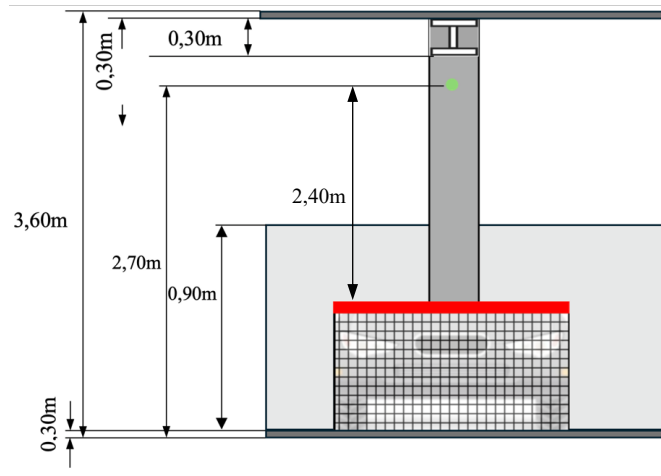
Não foram inseridos parâmetros de ventilação, pois como condição inicial para as simulações de CFD-FDS, supõe-se que o ar no estacionamento esteja parado. Os demais critérios foram mantidos de acordo com as configurações padrão do *software*.

3.11. Parâmetros de saída

Antes da execução da análise no FDS, os dados de saída foram configurados por meio de dispositivos de medição, como os termopares. Todos os parâmetros de saída foram coletados a cada 1 minuto (60s), utilizando o *namelist &DT_DEVC*.

Os termopares foram inseridos para registrar as temperaturas dos gases ao longo da estrutura durante a simulação. Os sensores foram posicionados a partir do centro de gravidade do veículo em chamas, a uma altura fixa de 2,70 metros, conforme Figura 28.

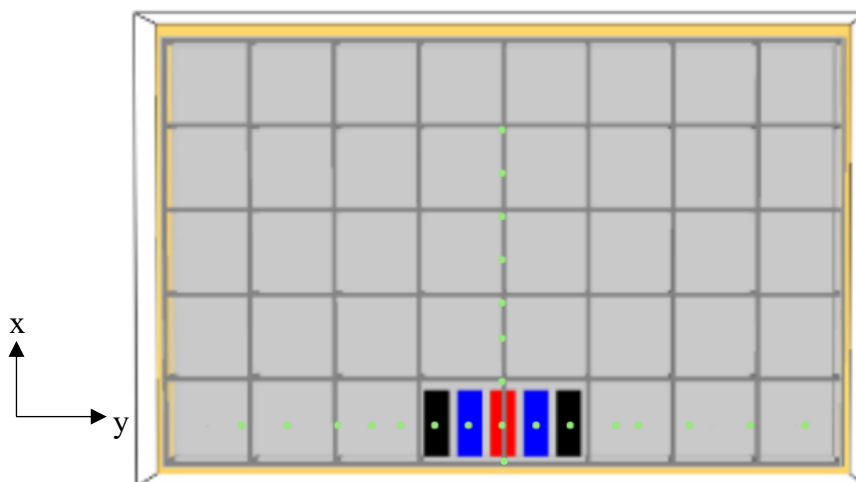
Figura 28 – Dispositivos de medição



Fonte: Autora (2025).

A distribuição dos outros termopares no modelo seguiu um critério baseado na distância em relação à fonte de calor, para capturar as variações térmicas tanto na direção longitudinal quanto na transversal do domínio. No eixo X, os termopares foram dispostos à frente do Carro 1, cobrindo distâncias de 0,9 m, 3 m, 6 m, 12 m, 15 m, 18 m e 21 m. No eixo Y, os sensores foram instalados em múltiplos de 0,9 metros, abrangendo pontos acima e abaixo do Carro 1, com as mesmas distâncias. Na figura 29 e Quadro 9, apresentam-se os termopares distribuídos nos eixos X, Y1 (sentido negativo do eixo Y) e Y2 (sentido positivo do eixo Y) e as distâncias em relação ao veículo 1, permitindo analisar a variação de temperatura em relação a distância.

Figura 29 – Localização dos termopares de temperatura dos gases



Fonte: Autora (2025).

Quadro 9 – Termopares nos eixos X e Y

Distância (m)	Termopar X (sentido negativo)	Termopar Y1 (sentido negativo)	Termopar Y2 (sentido positivo)
0	d = 0 m (X)	-	-
0,9	d = 0,90 m (X)	d = 0,90 m (Y1)	d = 0,90 m (Y2)
3	d = 3,00 m (X)	d = 3,00 m (Y1)	d = 3,00 m (Y2)
6	d = 6,00 m (X)	d = 6,00 m (Y1)	d = 6,00 m (Y2)
12	d = 12,00 m (X)	d = 12,00 m (Y1)	d = 12,00 m (Y2)
15	d = 15,00 m (X)	d = 15,00 m (Y1)	d = 15,00 m (Y2)
18	d = 18,00 m (X)	d = 18,00 m (Y1)	d = 18,00 m (Y2)
21	d = 21,00 m (X)	d = 21,00 m (Y1)	d = 21,00 m (Y2)

Fonte: Autora (2025).

No Quadro 10, são apresentados os termopares associados ao centro de gravidade em relação a cada veículo em chamas.

Quadro 10 – Termopares nos centros de gravidade de cada veículo

Veículo	Coordenadas (XYZ)
Carro 5	(27.6, 26.1, 2.70)
Carro 3	(27.6, 24.6, 2.70)
Carro 1	(27.6, 24.0, 2.70)
Carro 2	(27.6, 21.6, 2.70)
Carro 4	(27.6, 19.2, 2.70)

Fonte: Autora (2025).

Com o objetivo de complementar a análise térmica, foram inseridas seções de visualização, denominadas *slices*. No eixo X, foram aplicados cortes transversais ao longo dos veículos, enquanto no eixo Y foram realizados cortes horizontais no meio das obstruções (pilares e vigas).

No eixo Z, foi realizado um corte na altura dos termopares (2,70 metros), permitindo a correlação entre os dados quantitativos obtidos pelos termopares e a visualização qualitativa da distribuição térmica no ambiente.

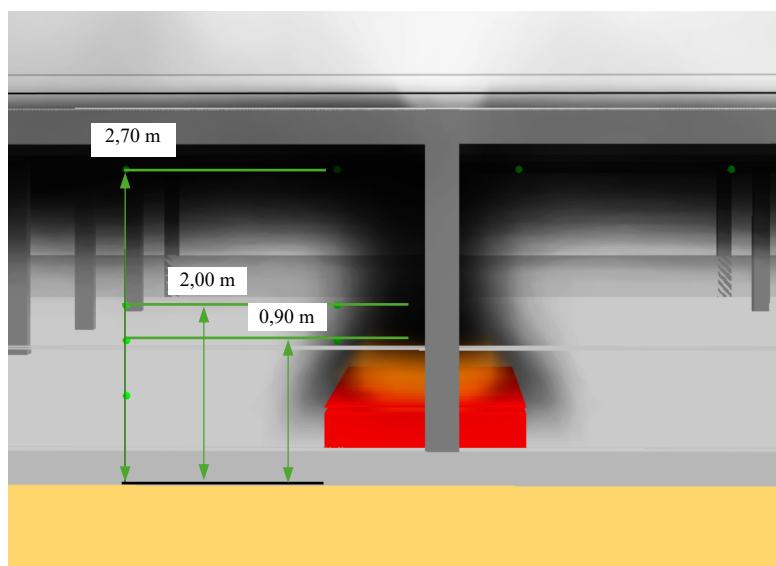
Para a análise da concentração dos gases resultantes da combustão no ambiente simulado, foram inseridos sensores de medição para quantificar as concentrações de oxigênio (O₂), dióxido de carbono (CO₂) e monóxido de carbono (CO) em termos de fração volumétrica.

Os sensores foram posicionados ao longo dos eixos X e Y em diferentes distâncias do veículo em chamas, com sensores localizados a 0.9 m, 3 m, 6 m, 12 m, 15 m, 18 m e 21 m na direção longitudinal e na direção transversal, garantindo uma cobertura completa da dispersão dos gases.

Para a análise da dispersão da fumaça ao longo do ambiente simulado, foram inseridos sensores para monitorar espessura longitudinal da camada de fumaça nas posições a partir do veículo em chamas, como nos itens anteriores, no eixo X, os sensores foram posicionados à frente do Carro 1 em chamas, registrando a altura da camada de fumaça em múltiplas posições: 0,90 m, 2,00 m e 2,70 m, conforme Figura 30.

A visualização dos *slices* resultados foi realizada utilizando o software *Smokeyview*, possibilitando uma interpretação detalhada dos padrões de fluxo e dispersão dos produtos da combustão.

Figura 30 – Altura dos sensores para medição da espessura da camada de fumaça



Fonte: Autora (2025).

3.12. Resultados do modelo FDS

3.12.1. Tempo de processamento

Um dos aspectos mais relevantes das simulações realizadas no Fire Dynamics Simulator (FDS) está relacionado ao tempo de processamento necessário para os diferentes cenários. No presente estudo, foi utilizado um domínio com 355.300 células, o que caracteriza uma malha de 0,30 m para as simulações propostas.

Os tempos de processamento variaram de acordo com a complexidade do cenário modelado. As simulações voltadas apenas para a medição da temperatura dos gases demandaram um período entre 30 e 40 horas. Em contrapartida, quando a análise incluiu a

concentração de gases (O_2 , CO , CO_2) e fumaça, os tempos de processamento foram reduzidos, situando-se entre 12 e 24 horas.

A abordagem adotada, que segmentou as simulações em análises isoladas de temperatura dos gases e de concentração de gases e fumaça, otimizou significativamente o tempo computacional utilizando uma malha média. Estudos indicam variações no tempo de processamento: Wong (2014) reportou de 30 a 40 horas, Martón (2015) de 12 a 24 horas, e Donatella *et al.* (2023) de 12 a 40 horas. Esses dados evidenciam que a segmentação das simulações permite reduzir os custos computacionais sem comprometer a precisão dos resultados.

3.12.2. Taxa de liberação de calor

A taxa de liberação de calor (HRR) é a quantidade de energia liberada por um combustível por unidade de tempo (EN 1991-1-2, 2010). Esta medida quantifica o tamanho do incêndio e é um dos poucos outputs que são gerados automaticamente pelo FDS.

No Cenário 1 (CEN 01), considerando um único veículo em chamas, o HRR máximo registrado foi de 7.925 kW. Esse valor se aproxima da referência de 8.300 kW, apresentando uma leve redução que pode ser explicada por fatores como ventilação diferenciada no ambiente aberto e a interação do incêndio com as obstruções do edifício garagem.

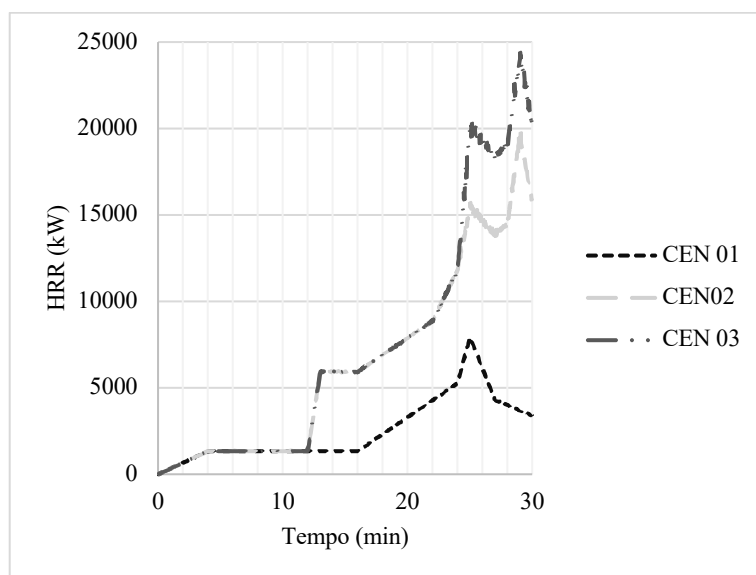
No Cenário 2 (CEN 02), foi modelada uma situação na qual três veículos entraram em combustão sucessivamente. Inicialmente, o veículo central foi incendiado, e, após 12 minutos, os veículos adjacentes também atingiram a ignição. O HRR máximo registrado para esse cenário foi de 19.773 kW.

No Cenário 3 (CEN 03), a propagação do fogo foi ainda mais intensa. Inicialmente, os veículos imediatamente adjacentes ao foco primário entraram em combustão após 12 minutos, enquanto os veículos subsequentes (adjacentes aos adjacentes) atingiram a ignição a partir de 24 minutos. O HRR máximo atingido nesse cenário foi de 24.427,34 kW. Embora se reconheça que a HRR para veículos que entram em ignição secundária possa divergir levemente daquela do carro inicial, tais diferenças são consideradas desprezíveis para automóveis com condições de combustão similares.

A evolução total de HRR resultou da soma dos históricos individuais de HRR, observado nos estudos de Tondini (2016) para modelagem da propagação do incêndio de um veículo a outro.

A Figura 31 apresenta a progressão do HRR ao longo do tempo para cada um dos três cenários analisados, destacando a influência do número de veículos envolvidos na intensificação da energia liberada pelo incêndio.

Figura 31 – Evolução da Taxa de Liberação de Calor (HRR) em Diferentes Cenários de Incêndio Veicular



Fonte: Autora (2025).

3.12.3. Temperatura dos gases

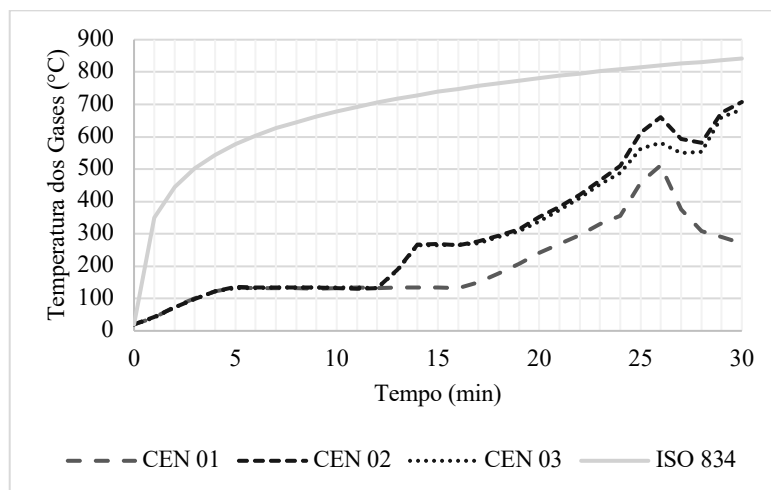
Os resultados das temperaturas dos gases obtidas através das simulações dos três cenários modelados (CEN 01, CEN 02 e CEN 03) no FDS foram organizados de forma que seja possível observar a comparação da relação entre os cenários e a curva de incêndio padrão ISO 834 (ISO, 1999), conforme Figura 32.

Como resultado da primeira análise, os termopares foram inseridos no centro de gravidade do veículo em chamas, de acordo a localização presente nos itens 3.11.1. Nos primeiros 12 minutos de simulação, as temperaturas nos três cenários são relativamente similares, com valores variando entre 41 °C e 135 °C, isso decorre porque a propagação dos veículos adjacentes só ocorre a partir dos 12 minutos. Comparando com a curva ISO 834 (ISO, 1999), observa-se que as temperaturas nos cenários simulados estão significativamente abaixo, já que a curva apresenta valores acima de 349 °C nesse intervalo.

Após 24 minutos, as diferenças entre os cenários tornam-se mais evidentes, visto que inicia o processo de propagação para os veículos adjacentes ao veículo em chamas principal para o CEN 02 e 03. No CEN 01, as temperaturas aumentam de forma mais lenta e moderada,

atingindo um pico de 511 °C aos 25 minutos. Em contraste, no CEN 02, as temperaturas aumentam de forma mais acentuada, com um pico de 707,28 °C também aos 30 minutos. Já no CEN 03, a evolução térmica é intermediária, atingindo um pico de 684,05 °C no mesmo intervalo de tempo. A curva ISO 834, por outro lado, apresenta uma evolução exponencial com um pico de 841,79 °C aos 30 minutos.

Figura 32 – Temperatura dos gases nos cenários analisados



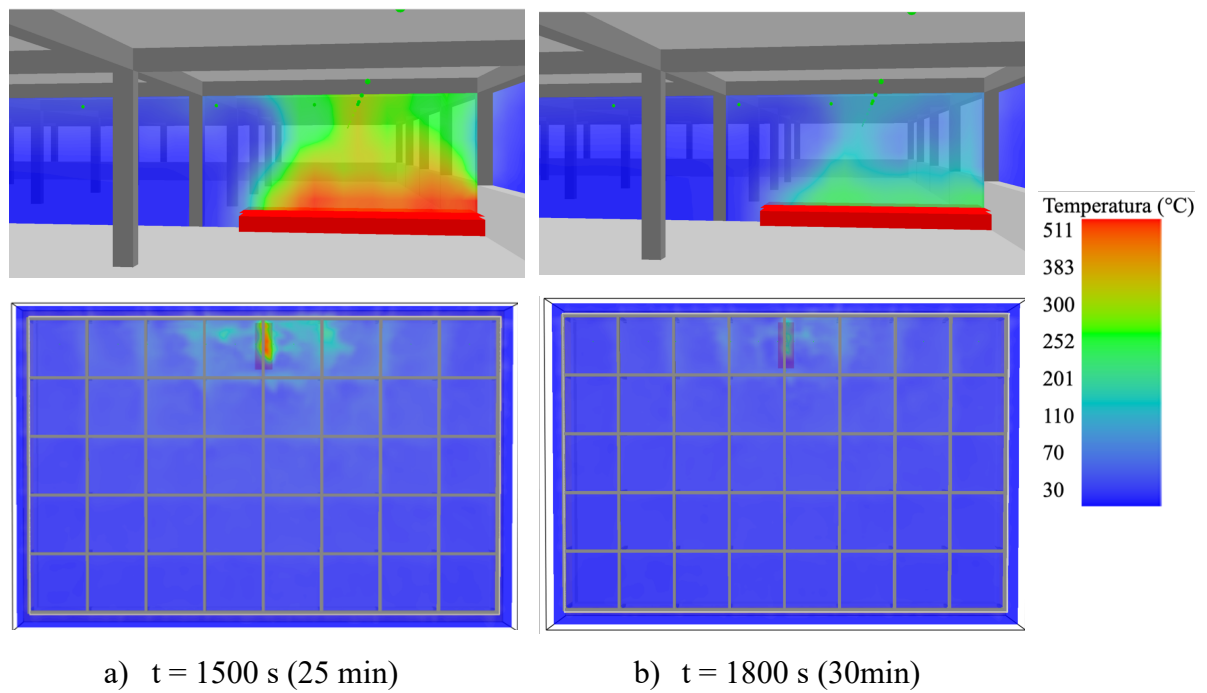
Fonte: Autora (2025).

No cenário 1, a temperatura dos gases nos pontos mais próximos ao veículo em chamas (0,90 m e 3,00 m), atingem picos superiores a 450 °C (0,90 m) e 400 °C (3,00 m) aos 25 minutos, período em que o incêndio atinge seu desenvolvimento máximo. Por outro lado, aos 12 metros, os picos térmicos não ultrapassam 127 °C, enquanto aos 15 metros esse valor cai para aproximadamente 70 °C, mesmo nos momentos de maior propagação térmica. A 18 metros e 21 metros, as temperaturas permanecem abaixo de 60 °C.

A Figura 33 mostra planos de temperaturas realizados no eixo Y e no eixo Z no pico do incêndio (25 minutos) e aos 30 minutos.

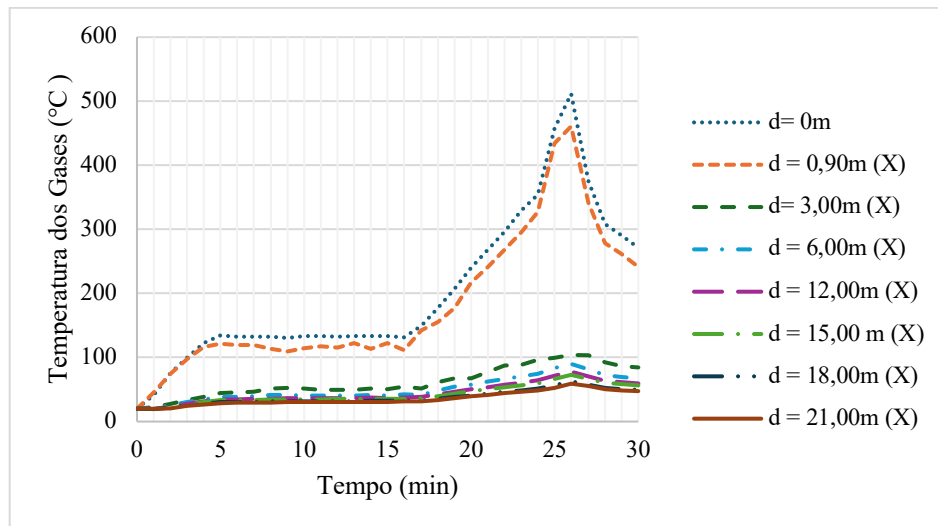
A Figura 34 e 35 ilustram os gráficos de como a temperatura dos gases atinge picos expressivos em distâncias próximas ao fogo e diminui gradativamente em menos de 3 metros.

Figura 33 – Evolução das temperaturas dos gases registradas através de dois planos de medição (Y e Z) e visualizado no SMV do CEN 01.



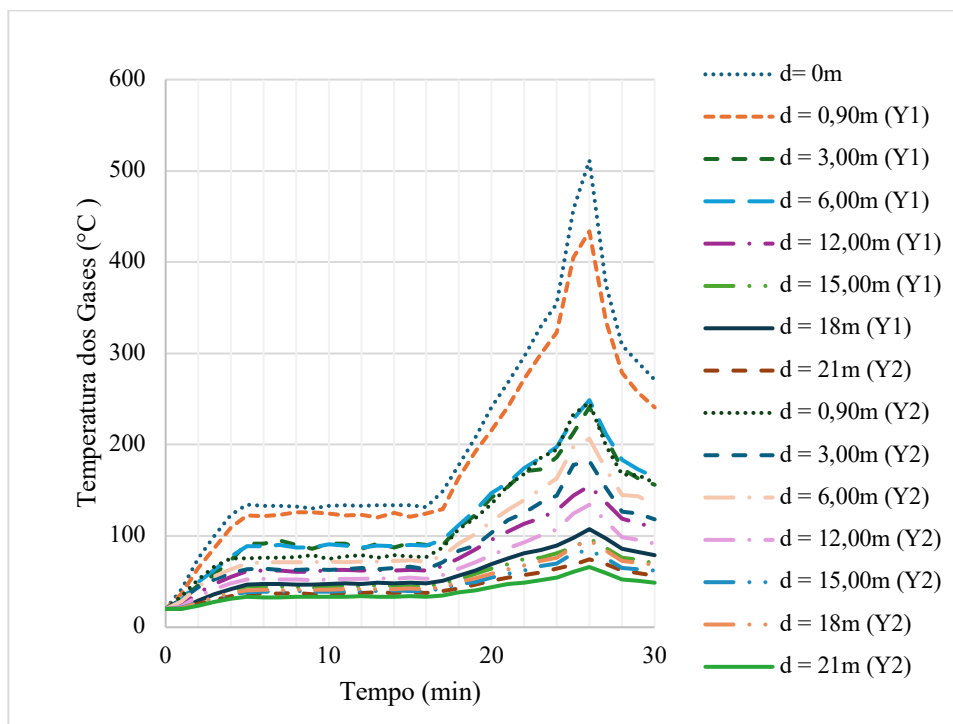
Fonte: Autora (2025).

Figura 34 – Variação da temperatura ao longo do tempo no eixo X em diferentes distâncias do veículo em chamas no CEN 01.



Fonte: Autora (2025).

Figura 35 – Variação da temperatura ao longo do tempo no eixo Y em diferentes distâncias do veículo em chamas no CEN 01.



Fonte: Autora (2025).

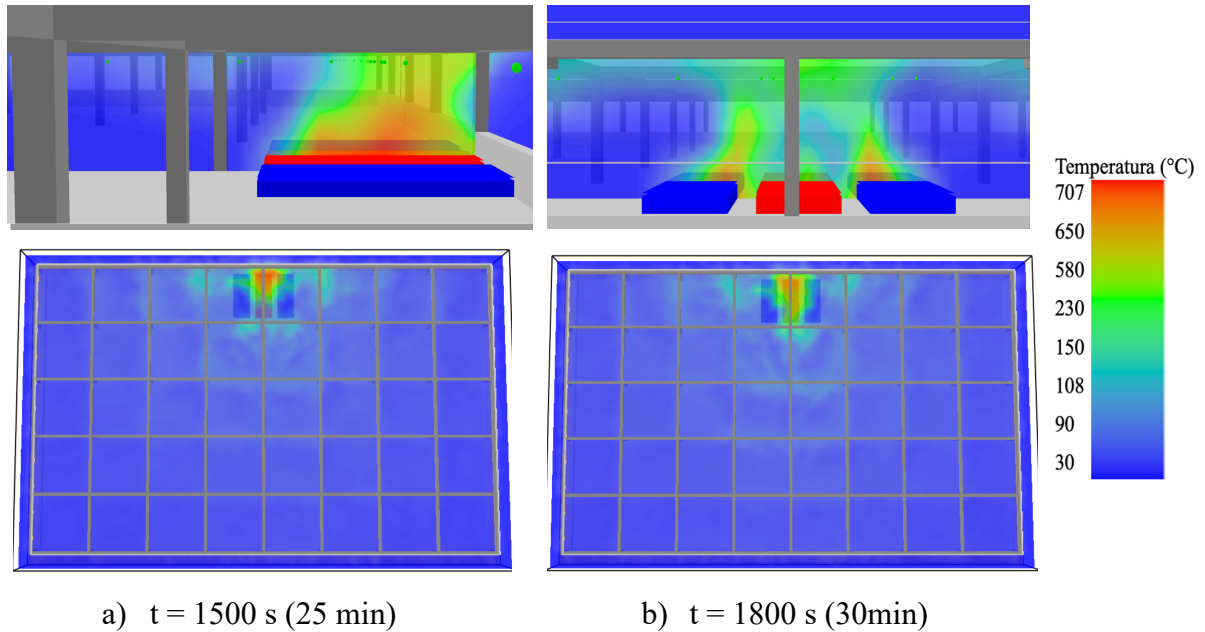
Além disso, nas distâncias superiores a 15 metros, as temperaturas não ultrapassam 80 °C, mesmo no pico da taxa de liberação de calor ($t = 25$ min). A partir desta distância, é observado valores insuficientes para causar danos significativos as estruturas (de acordo com CORUS *et al.*, 2004). Porém, temperatura suficiente para promover a ignição de outros objetos inflamáveis.

No cenário 2, os picos de temperatura nos pontos mais próximos ao veículo em chamas (0,90 m e 3,00 m) são ainda mais elevados, atingindo 674,22 °C a 0,90 m e 588,64 °C a 3,00 m aos 30 minutos, momento em que o incêndio atinge seu desenvolvimento máximo.

Nas medições realizadas a 6 metros, os picos de temperatura apresentam valores notavelmente inferiores, atingindo 227,89 °C, o que demonstra uma redução expressiva em comparação a pontos de maior proximidade. Com o distanciamento progressivo, registra-se uma redução gradativa nas temperaturas: aos 12 metros, os picos mantêm-se abaixo de 147,56 °C, e aos 15 metros, os valores estabilizam-se em 135,74 °C. A partir de 18 metros, os picos térmicos diminuem ainda mais, mantendo-se abaixo de 114,27 °C, e aos 21 metros, a temperatura atinge um máximo de 108,52 °C. A Figura 36 mostra alguns planos de temperaturas realizados no eixo Y e no eixo Z no pico do incêndio (25 minutos) e aos 30 minutos. Os gráficos

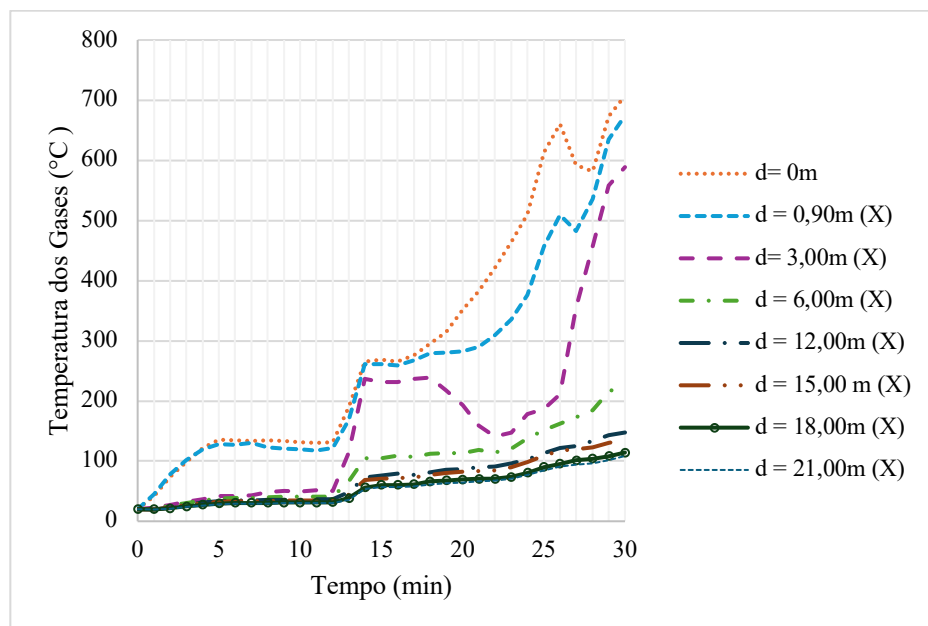
do CEN 02, presentes na Figura 37 e 38, que mostram a variação da temperatura dos gases ao longo do tempo nos eixos X e Y.

Figura 36 – Evolução das temperaturas dos gases registradas através de dois planos de medição (Y e Z) e visualizado no SMV do CEN 02



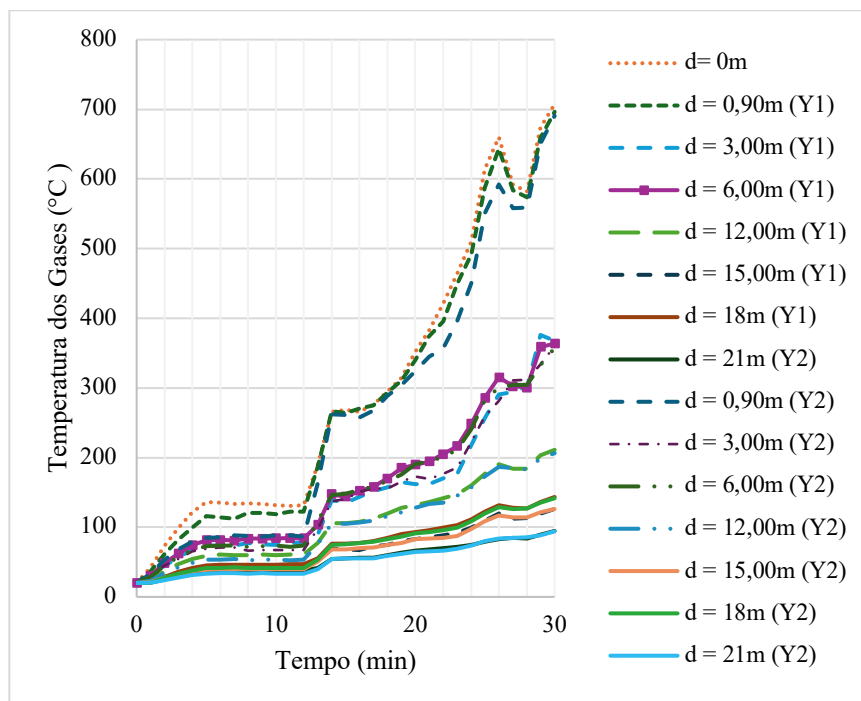
Fonte: Autora (2025).

Figura 37 – Variação da temperatura ao longo do tempo no eixo X em diferentes distâncias do foco do fogo no CEN 02.



Fonte: Autora (2025).

Figura 38 – Variação da temperatura ao longo do tempo no eixo Y em diferentes distâncias do foco do fogo no CEN 02.



Fonte: Autora (2025).

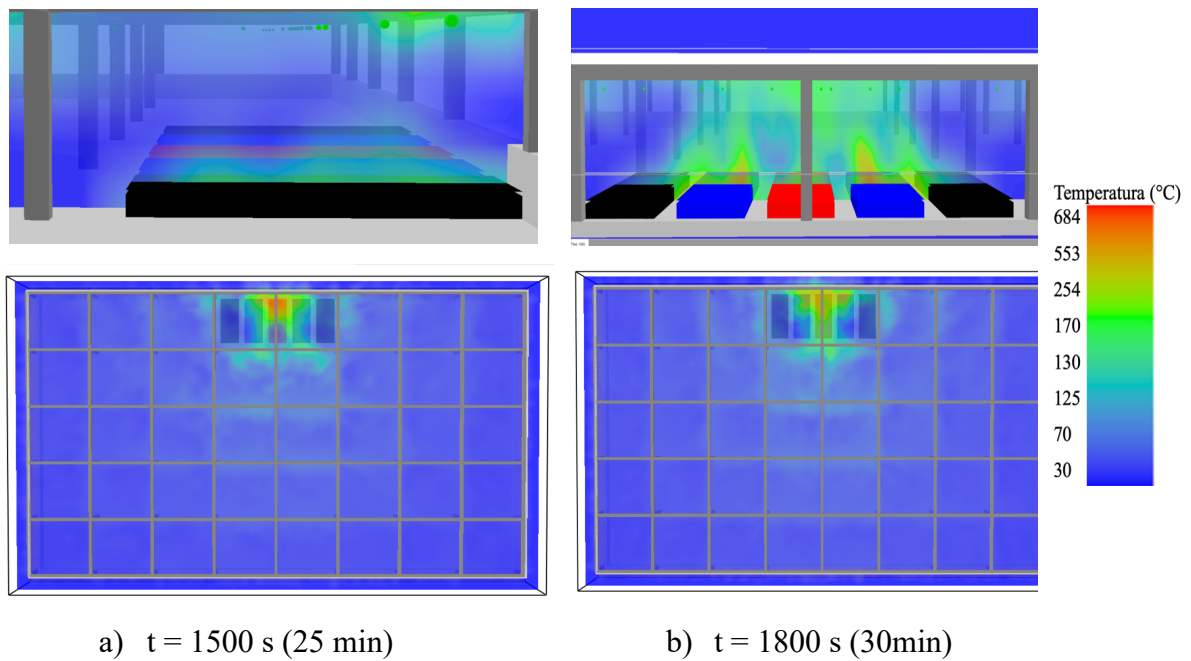
No Cenário 03, o impacto térmico é mais acentuado devido ao número de veículos envolvido em chamas. A Figura 39 mostra alguns planos de temperaturas realizados no eixo Y e no eixo Z no pico do incêndio (25 minutos) e aos 30 minutos.

Nas proximidades imediatas do foco do fogo, as temperaturas atingem os maiores valores. Aos 30 minutos, o ponto a 0,90 m registra um pico de 684,05 °C, enquanto a 3,00 m, o pico térmico chega a 553,93 °C. À medida que a distância aumenta, observa-se uma redução significativa das temperaturas. Aos 6 metros, as temperaturas máximas registradas aos 30 minutos atingem 254,84 °C, uma redução de 53% em relação aos valores a 3,00 m.

Nos pontos a 12 metros, a temperatura é de 170,35 °C e aos 15 metros, as temperaturas caem para 160,75 °C, isso é justificado pela dinâmica do fogo e a partir de 18 metros, as temperaturas são 132,02 °C, e aos 21 metros, a temperatura dos gases são de apenas 127,47 °C.

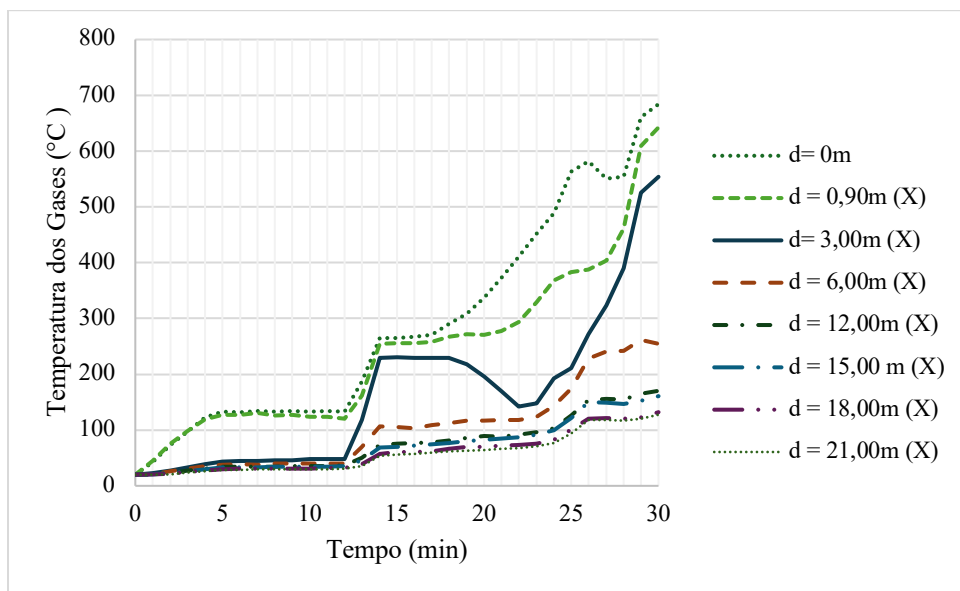
Os gráficos da evolução da temperatura dos gases do CEN 03 são representados nas Figuras 40 e 41, que ilustram a variação das temperaturas ao longo do tempo nos eixos X e Y.

Figura 39 – Evolução das temperaturas dos gases registradas através de dois planos de medição (Y e Z) e visualizado no SMV do CEN 03



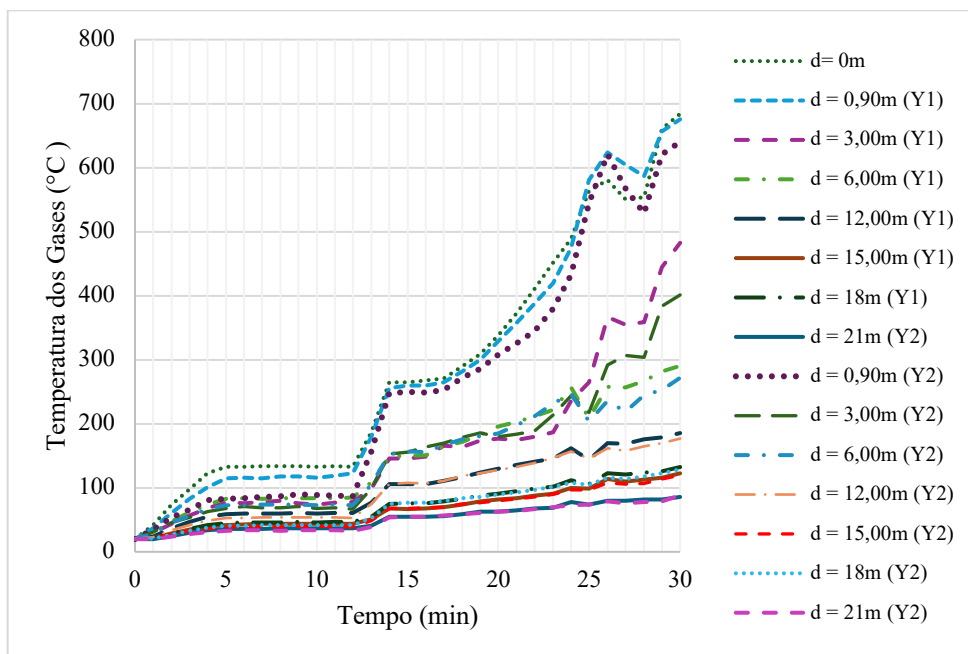
Fonte: Autora (2025).

Figura 40 – Variação da temperatura ao longo do tempo no eixo X em diferentes distâncias do veículo em chamas no CEN 03.



Fonte: Autora (2025).

Figura 41 – Variação da temperatura ao longo do tempo no eixo Y em diferentes distâncias do veículo em chamas no CEN 03.



Fonte: Autora (2025).

Portanto, a análise da temperatura dos gases nos três cenários, em função da distância, confirma que as medições se reduzem proporcionalmente à expansão do intervalo em relação ao foco do incêndio, corroborando a afirmação de Zanon et al. (2010) e INERIS (2001;2022).

Destaca-se ainda que a elevação no quantitativo de veículos em chamas amplia significativamente a área de influência térmica, quando comparada ao cenário com um único veículo. Essa expansão não apenas aumenta o raio de ação do calor radiante, mas também eleva a probabilidade de que regiões distantes do fogo principal atinjam patamares térmicos suficientes para ignição de componentes em veículos adjacentes.

No Apêndice “A” são apresentados os gráficos que ilustram a evolução das temperaturas dos gases em diferentes distâncias, comparadas com a curva de incêndio padrão ISO 834 (ISO, 1999).

3.12.4. Concentração dos gases

3.12.4.1. Oxigênio (O_2)

Nos cenários de incêndio avaliados, a partir da proximidade do foco do fogo ($d < 3 m$), ocorre uma depleção rápida do incêndio, com maior consumo de oxigênio, pois a ventilação

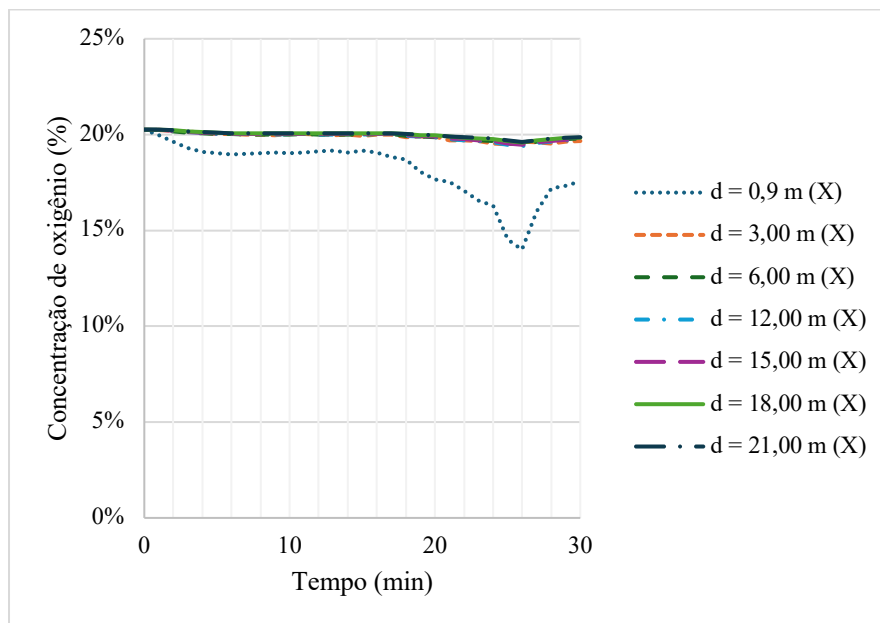
natural presente neste estudo, é insuficiente para repor o oxigênio consumido. Abaixo será detalhado como cada cenário.

O Cenário 1, a concentração de oxigênio iniciou-se em 0,20 mol/mol (20%), valor correspondente à composição normal do ar atmosférico seco, conforme Drysdale (2011). Esse valor foi mantido em todas as distâncias até os 25 minutos de simulação. No entanto, o pico máximo da taxa de liberação de calor do veículo ocorre neste tempo, havendo redução na concentração para 0,15 mol/mol (15%) em $d = 0,90$ m, ambos os eixos. Essa redução no consumo reflete o consumo de O_2 devido às reações de combustão próximas ao foco do incêndio.

Em contrapartida, em distâncias a partir de 0,90 m, a concentração de oxigênio permaneceu estável em torno de 0,20 mol/mol (20%) por toda simulação, evidenciando que o impacto da combustão é menos significativo em áreas afastadas, ilustrado na Figura 42.

Ao final da simulação, a concentração de oxigênio em $d = 0,90$ m, se estabilizou em 0,18 mol/mol (18%), indicando que o processo de combustão consumiu parte significativa do O_2 disponível.

Figura 42 – Concentração de oxigênio (O_2) no edifício garagem no FDS no CEN 01



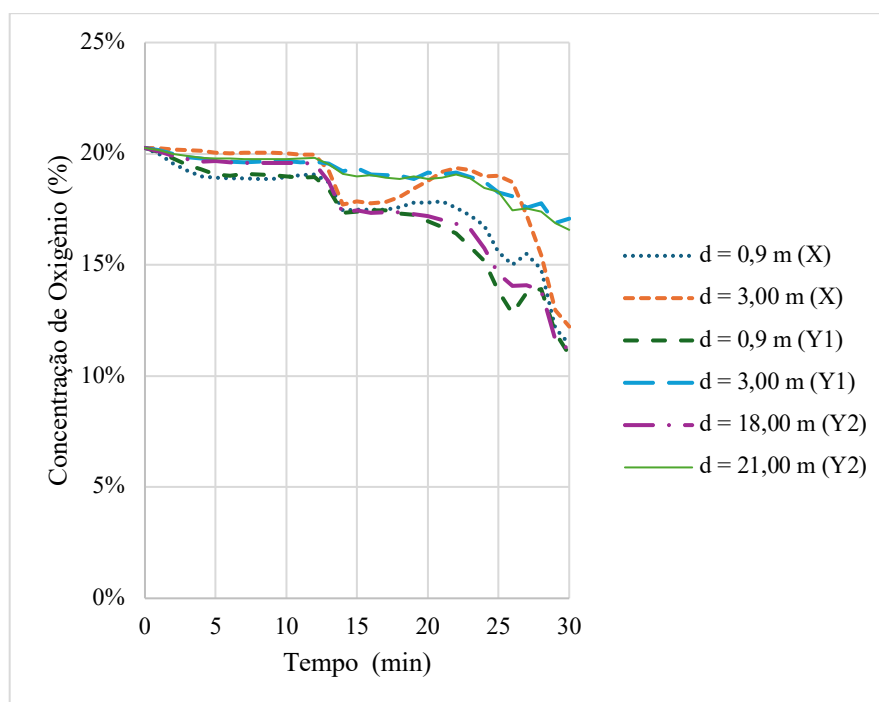
Fonte: Autora (2025).

No Cenário 2, mostram um comportamento significativamente diferente em relação ao consumo de oxigênio (O_2). Em distâncias próximas ao foco do incêndio ($d = 0,9$ m e $d = 3,0$ m) para X, e 0,90 m para Y, a concentração de oxigênio começou a diminuir rapidamente após os 12 minutos, alcançando valores de 17% (0,17 mol/mol), atua como ponto de bifurcação, sendo

o ponto para a transição para combustão deficiente, corroborada pela propagação para os veículos adjacentes. A partir dos 25 minutos, durante o pico da combustão do primeiro veículo, ocorre uma redução na concentração de oxigênio acentuada para $d = 18,00\text{m}$ no eixo Y, onde as concentrações de oxigênio (O_2) se estabilizaram em aproximadamente 11% (0,11 mol/mol), ilustrado na Figura 43.

Em regiões distantes ($d > 18,00\text{ m}$), o comportamento da concentração de O_2 é influenciado predominantemente por mecanismos de convecção, difusão turbulenta e estratificação térmica, em contraste com zonas próximas, onde predomina a consumo estequiométrico direto pelo processo de combustão (JUNIOR, 2018).

Figura 43 – Concentração de oxigênio (O_2) no edifício garagem no FDS no CEN 02



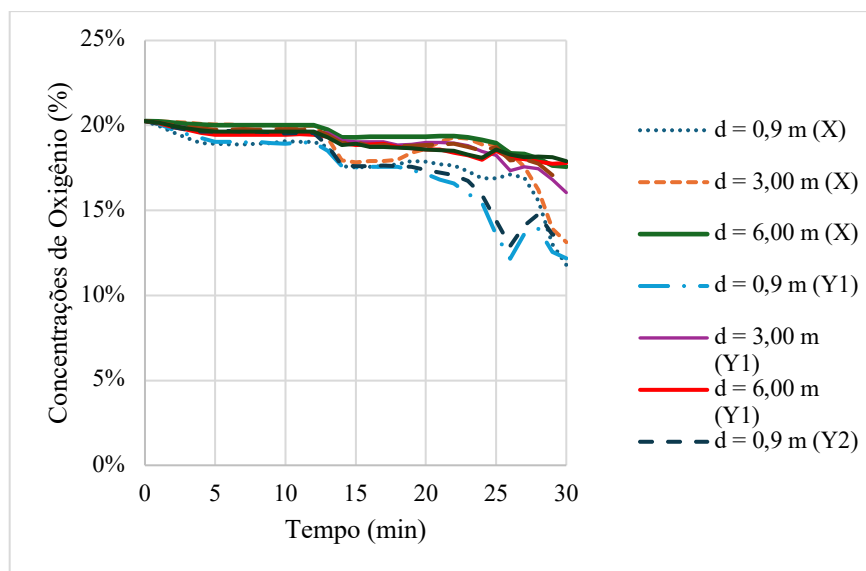
Fonte: Autora (2025).

No Cenário 3, nos primeiros 12 minutos, o fogo concentra-se nos veículos iniciais, consumindo O_2 de forma estequiométrica nas proximidades (0,90 m a 3,00 m), reduzindo sua concentração para 12–13% (0,12–0,13 mol/mol). Em distâncias horizontais intermediárias (6,00 m), a turbulência da pluma promove mistura parcial com o ar ambiente, elevando O_2 para 18% (0,18 mol/mol), enquanto além de 12,00 m, a ventilação natural restaura a concentração para 19–20% (próxima aos 0,20 mol/mol). Aos 25 minutos, com todos os veículos em chamas, o incêndio atinge seu pico térmico. Em regiões distantes ($>6,00\text{ m}$ em Y), a estabilização de O_2 em 19–20% reflete o equilíbrio entre *entrainment* (arraste de ar pela pluma) e dissipação natural

(QUINTIERE, 2016), enquanto a proximidade imediata ao fogo (0,90 m) permanece crítica, com O_2 a 12%.

Este cenário evidencia que a ventilação natural não foi capaz de restaurar níveis seguros de oxigênio, conforme ilustrado no gráfico da Figura 44.

Figura 44 – Concentração de oxigênio (O_2) no edifício garagem no FDS no CEN 03



Fonte: Autora (2025).

Reduções mais significativas de O_2 foram observadas em posições próximas ao veículo em chamas no cenário CEN 01 e CEN 02, destacando o impacto direto do consumo de oxigênio pela combustão ativa, como o esperado. No CEN 03, o consumo de O_2 em distâncias superiores a 18 m representa um fenômeno atípico, não diretamente vinculado à combustão local. Esse comportamento pode ser explicado pela dinâmica dos fluxos térmicos e pela estratificação de gases quentes, que alteram os padrões de ventilação (ANNEREL (2013)).

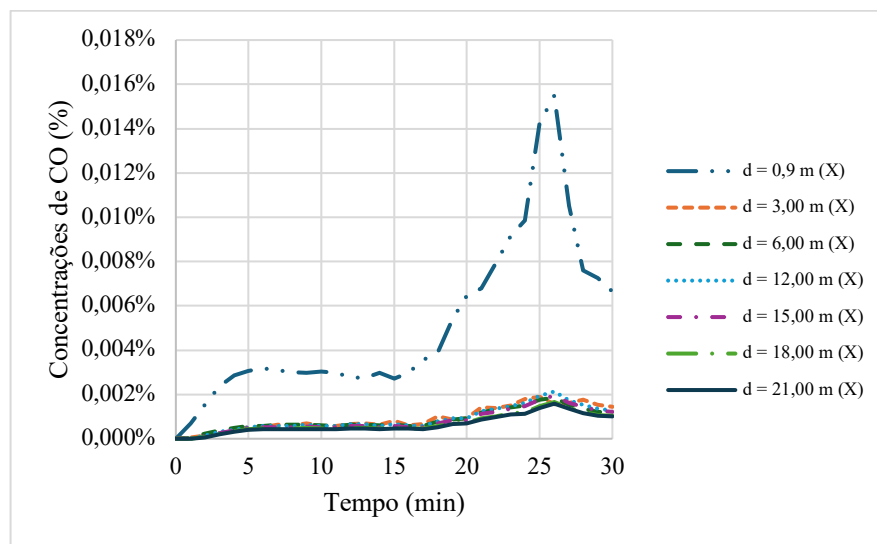
3.12.4.2. Monóxido de carbono (CO)

Nos três cenários simulados de incêndio em um edifício garagem aberto, as concentrações de monóxido de carbono (CO) variaram de 0,000% (0 ppm) até 0,015% (150 ppm) nas proximidades do fogo (Figura 45). Embora esses valores estejam abaixo do limite IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health) de 0,15% (1500 ppm) estabelecido pelo NIOSH (2004), é fundamental destacar que o CO permanece o principal agente tóxico em incêndios, responsável por mais de 80% das mortes relacionadas à inalação de fumaça (HURLEY, 2016). Sua toxicidade deriva da formação de carboxihemoglobina (COHb) no

sangue, que reduz a capacidade de transporte de oxigênio, causando hipóxia tecidual, perda de consciência e, em concentrações elevadas ($> 0,1\%$), morte em minutos (RAUB et al., 2000).

Figura 45 – Concentração monóxido de carbono (CO) no edifício garagem no FDS no CEN

03



Fonte: Autora (2025).

3.12.4.3. Dióxido de carbono (CO₂)

No Cenário 1, com apenas um veículo envolvido, a liberação de calor ocorre de forma mais gradual. O pico de liberação de calor do veículo em chamas ocorre aos 25 minutos, quando a energia térmica atinge seu máximo, e as medições a 0,9 m do fogo registram concentrações de CO₂ de cerca de 4% (40.000 ppm). Esse valor reflete a acumulação progressiva do gás, pois a única fonte de calor gera um fluxo convectivo moderado e a ventilação natural do ambiente, embora limitada, consegue retardar a propagação dos gases tóxicos.

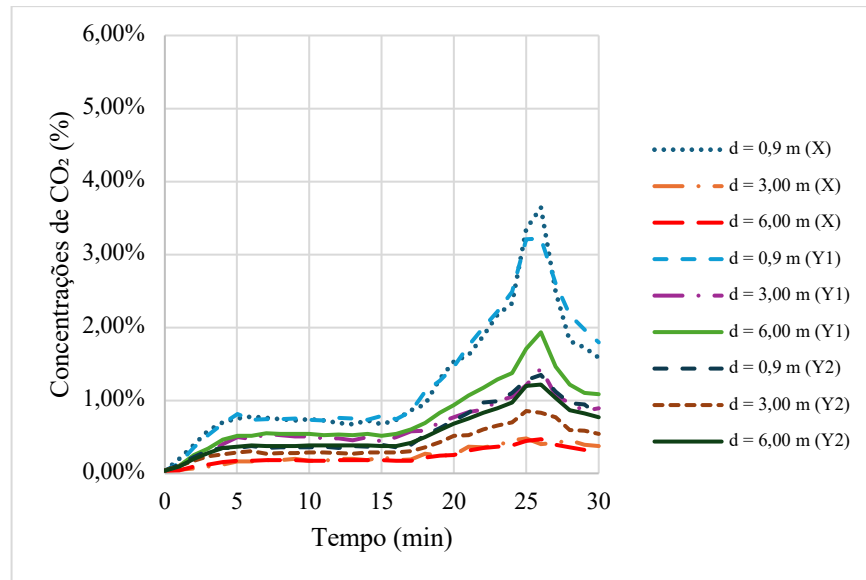
Por outro lado, nos Cenários 2 e 3, onde três e cinco veículos estão envolvidos, o comportamento térmico muda consideravelmente. A presença de múltiplas fontes de calor resulta em uma liberação combinada que acelera a propagação dos gases.

Esse pico precoce é seguido por um crescimento contínuo até os 25 minutos, quando as concentrações atingem 5% (50.000 ppm) em distâncias inferiores a 3,00 m. Esses resultados evidenciam que, em situações com múltiplos veículos, o aumento das concentrações de CO₂ é ainda mais preocupante, pois o ar ambiente normalmente contém apenas cerca de 0,03% de CO₂ (300 ppm) segundo Drysdale (2011).

Segundo Ling et al. (2024) e Blomqvist (2020), concentrações de 5% de CO₂, associadas à baixa disponibilidade de oxigênio, provocam hipercapnia, aumentando a taxa respiratória,

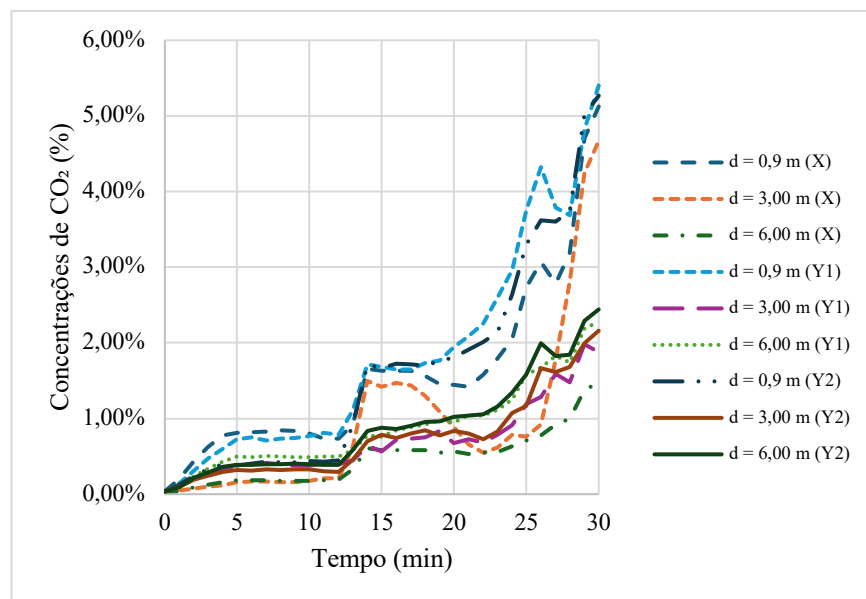
gerando dispneia intensa e sensação de sufocamento. Embora o limite imediatamente perigoso para a vida (IDLH) estabelecido pelo NIOSH seja de 5%, efeitos adversos já podem ocorrer em concentrações inferiores, evidenciando que a ventilação natural não é suficiente para a dispersão dos gases.

Figura 46 – Concentração dióxido de carbono (CO_2) no edifício garagem no FDS no CEN 01



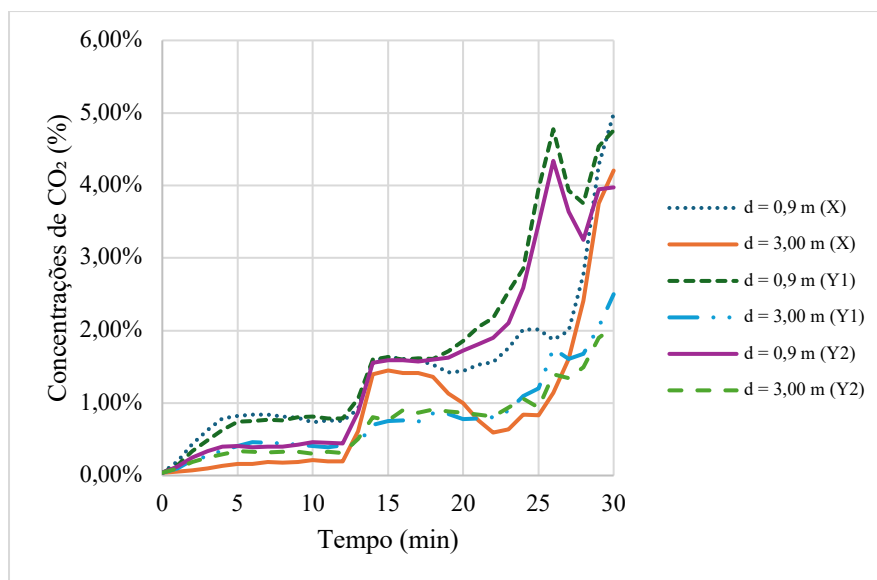
Fonte: Autora (2025).

Figura 47 – Concentração dióxido de carbono (CO_2) no edifício garagem no FDS no CEN 02



Fonte: Autora (2025).

Figura 48 – Concentração dióxido de carbono (CO₂) no edifício garagem no FDS no CEN 03



Fonte: Autora (2025).

A partir da análise pela modelagem numérica no FDS é possível verificar embora a ventilação natural contribua para a dispersão de produtos da combustão, ela não é suficiente para manter os níveis de CO₂ dentro de uma faixa segura, exigindo soluções complementares para mitigação dos riscos.

3.12.4.4. Espessura da camada de fumaça

No cenário 1, a espessura inicial da camada de fumaça de 2,70 m sofreu uma redução acentuada no primeiro minuto, especialmente nas proximidades do foco do incêndio, como nas distâncias de 0,9 m e 3,0 m em ambos os eixos.

Nessas regiões próximas ($d < 3,00\text{m}$), a espessura estabilizou-se abaixo de 1,0 m, indicando alta concentração de fumaça. Em distâncias maiores (15,0 m a 21,0 m), a camada estabilizou entre 1,5 m e 2,0 m, conforme ilustrado na Figura 49.

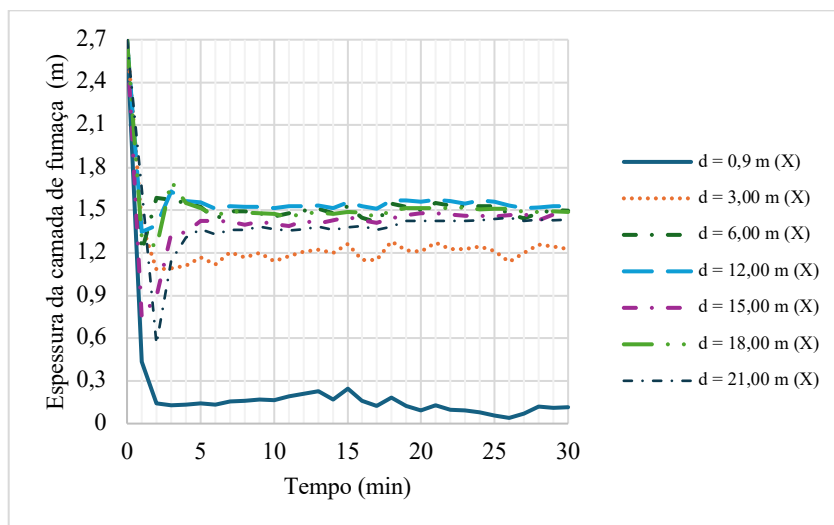
Na análise da espessura da camada inicial de 2,00 m, nas distâncias de 0,9 m e 3,0 m no eixo Y, e estabilizou-se abaixo de 0,50 m, destacando a concentração crítica de fumaça nessas áreas. Em distâncias maiores ($15,0\text{ m} > d < 21,0\text{ m}$), a camada estabilizou acima de 1,0 m, como mostrado na Figura 50.

Para a espessura da camada inicial de 0,90 m, as distâncias próximas ao foco do fogo apresentaram reduções significativas. Em 1 minuto, a espessura reduziu de 0,90 m para 0,18 m na distância próxima 0,90 m, enquanto na distância próxima $d = 3,00\text{ m}$ e $d = 6,00\text{ m}$, as alturas reduziram para 0,07 m e 0,11 m, respectivamente. Em $d = 18,00\text{ m}$ se estabilizam em 0,07 m,

reforçando a concentração progressivamente menor de fumaça com o distanciamento do foco do fogo, conforme Figura 51.

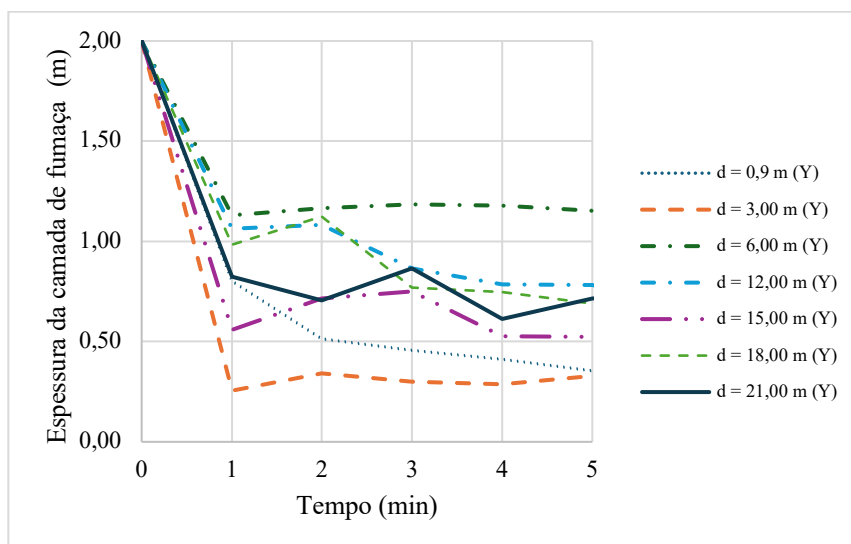
A Figura 52 ilustra a evolução da camada de fumaça nos eixos Y e Z, destacando sua intensificação no pico do incêndio (25 min) e sua estabilização aos 30 minutos. Observa-se a estratificação dos gases quentes junto ao teto, influenciada pela ventilação.

Figura 49 – Espessura da camada de fumaça (2,70 m) no edifício garagem no FDS no CEN 01



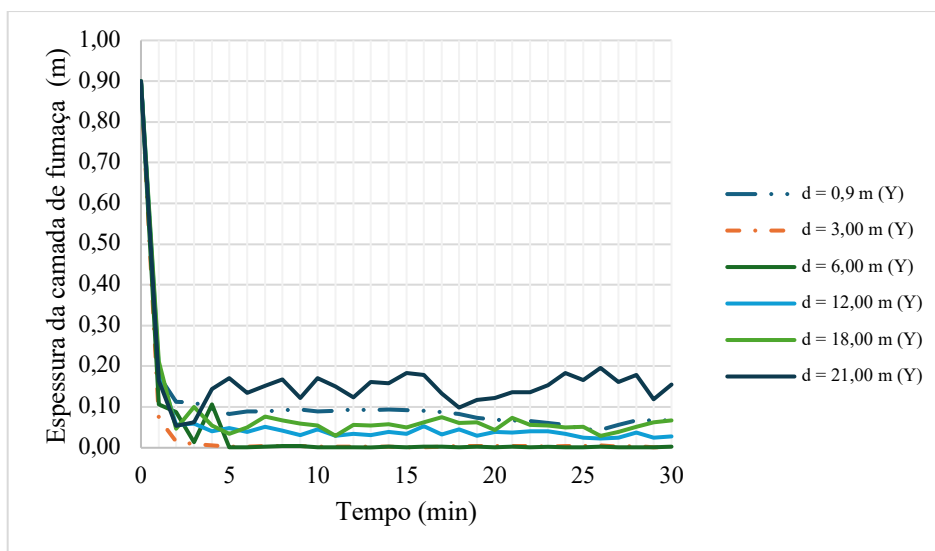
Fonte: Autora (2025).

Figura 50 – Espessura da camada de fumaça (2,00 m) no edifício garagem no FDS no CEN 01



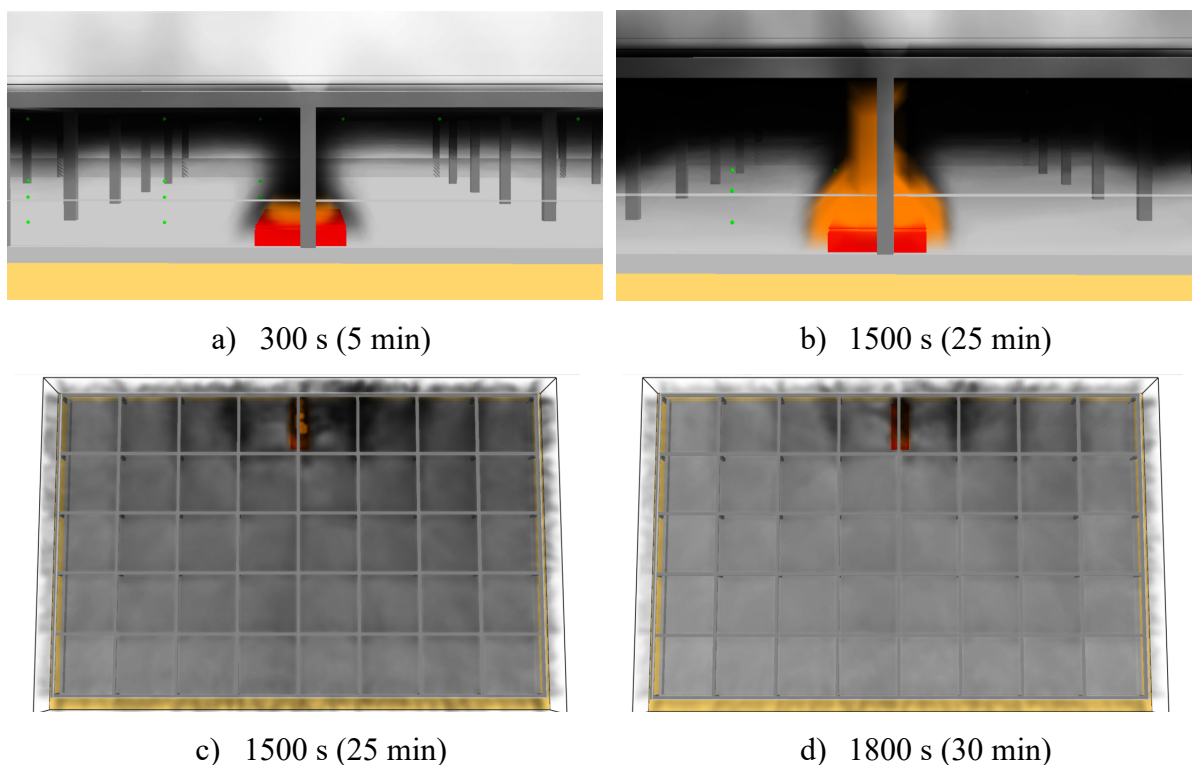
Fonte: Autora (2025).

Figura 51 – Espessura da camada de fumaça (0,90 m) no edifício garagem no FDS no CEN 01



Fonte: Autora (2025).

Figura 52 – Evolução da espessura da camada de fumaça registrada através de dois planos de medição (Y e Z) e visualizado no SMV CEN 01.



Fonte: Autora (2025).

No cenário 2, a espessura da camada de fumaça inicial foi registrada em 2,70 m no início para todas as distâncias. No primeiro minuto, as reduções mais acentuadas ocorreram próximas ao foco do incêndio, com a espessura reduzindo para 0,41 m em 0,9 m, 1,41 m em 3,00 m e 1,20

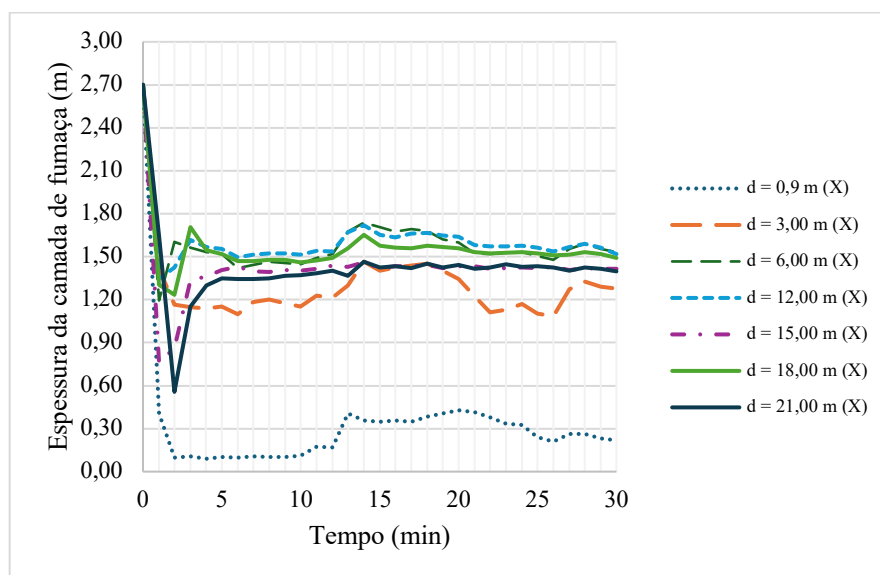
m em 6,00 m. A estabilização foi mais rápida alcançando 0,22 m ($d = 0,9$ m), 1,28 m ($d = 3,00$ m) e 1,53 m ($d = 6,00$ m) aos 30 minutos. Para distâncias $d = 18,00$ m e $d = 21,00$ m, os valores iniciais de 1,30 m e 1,64 m estabilizaram em 1,49 m e 1,40 m, respectivamente. O maior pico ocorreu aos 12 minutos, atingindo 1,67 m ($d = 6,00$ m), 1,67 m ($d = 12,00$ m) e 1,65 m ($d = 15,00$ m), refletindo a propagação do incêndio para veículos adjacentes (Figura 53).

Na espessura da camada inicial em 2,00 m, a camada de fumaça sofreu uma redução mais acentuada próximo ao foco do incêndio ($d = 0,9$ m), caindo para 0,15 m no primeiro minuto. Para $d = 3,00$ m e $d = 6,00$ m, os valores iniciais diminuíram para 0,33 m e 0,50 m, estabilizando posteriormente. Em $d = 18,00$ m, os valores se estabilizaram em 0,70 m, indicando que a ventilação ambiente não foi suficiente para garantir condições seguras próximas ao fogo, especialmente nas áreas mais próximas (Figura 54).

Em camadas de fumaça com a espessura inicial em 0,90 m, logo no início da simulação, a espessura apresentou reduções críticas em distâncias próximas ao foco do incêndio. Em $d = 0,9$ m e $d = 3,0$ m, as alturas caíram para 0,03 m e 0,47 m no primeiro minuto, estabilizando abaixo de 0,10 m após 10 minutos. Aos 12 minutos, durante a propagação do fogo para veículos adjacentes, foram registrados picos em distâncias maiores, como 0,30 m em $d = 18,0$ m e 0,37 m em $d = 21,0$ m, conforme Figura 55.

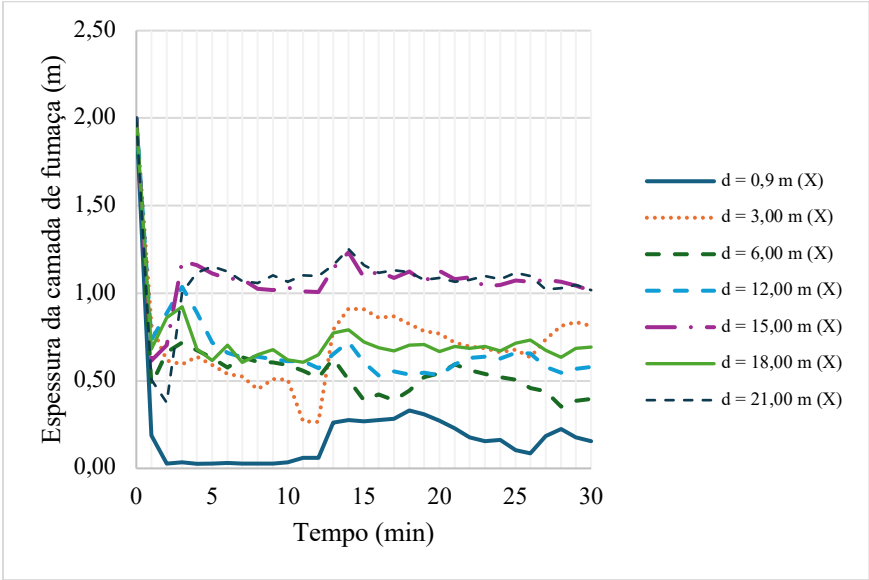
A Figura 56 apresenta a evolução da camada de fumaça no cenário CEN 02 aos 25 minutos, onde ocorre tanto a propagação para os veículos adjacentes (24 minutos), quando ocorre o pico da taxa de liberação de calor do veículo inicial.

Figura 53 – Espessura da camada de fumaça (2,70 m) no edifício garagem no FDS no CEN 02



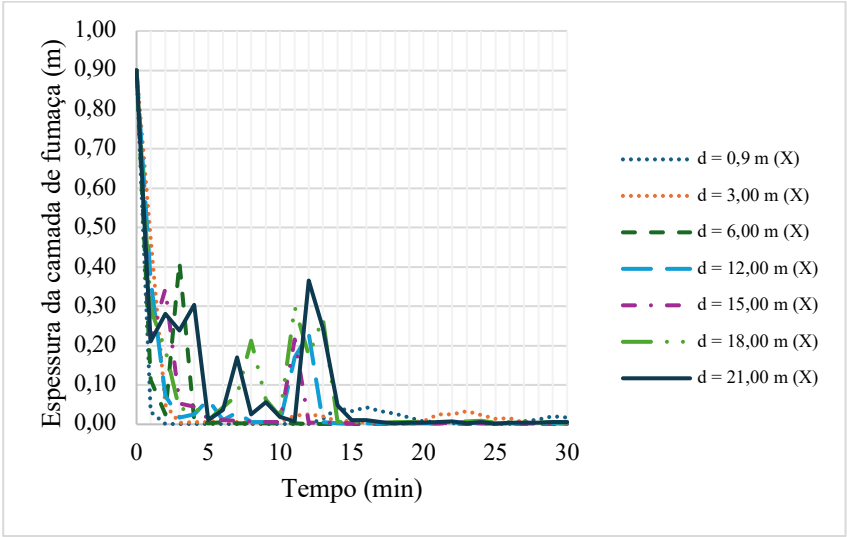
Fonte: Autora (2025).

Figura 54 – Espessura da camada de fumaça (2,00 m) no edifício garagem no FDS no CEN 02



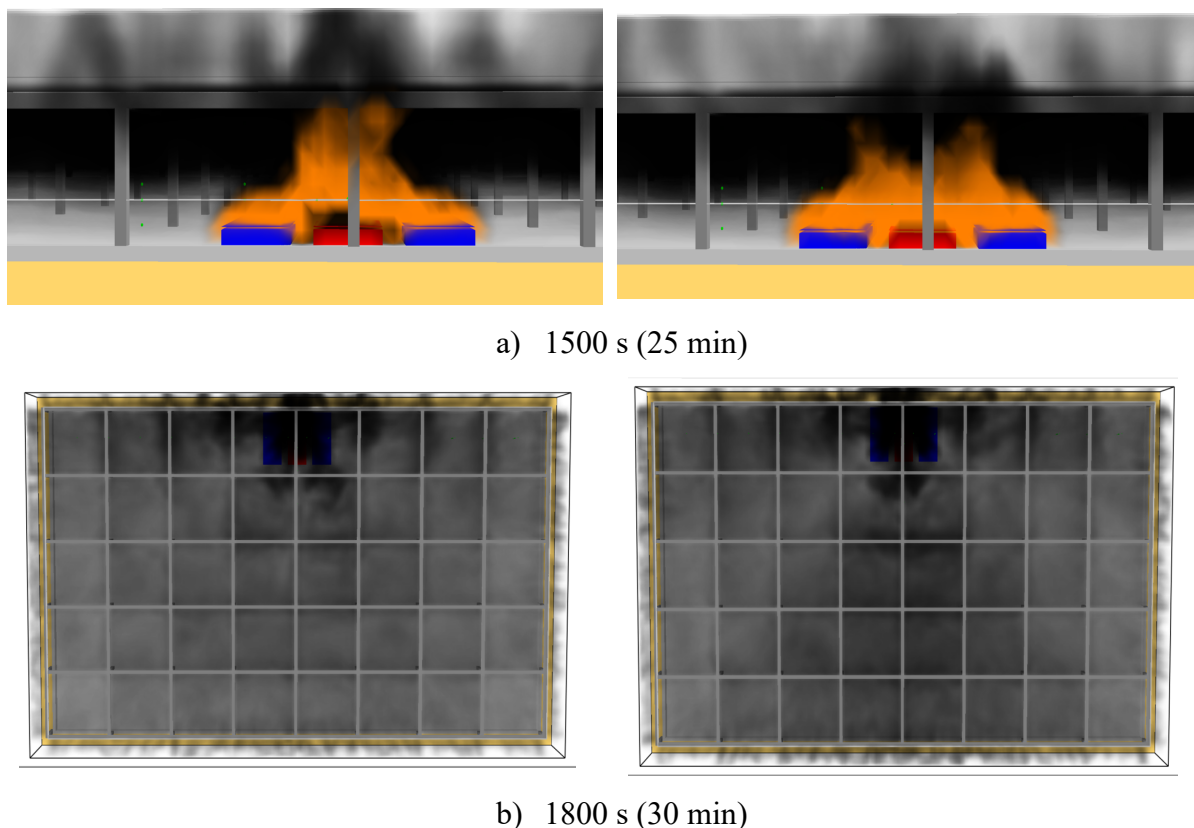
Fonte: Autora (2025).

Figura 55 – Espessura da camada de fumaça (0,90 m) no edifício garagem no FDS no CEN 02



Fonte: Autora (2025).

Figura 56 – Evolução da espessura da camada de fumaça registrada através de dois planos de medição (Y e Z) e visualizado no SMV CEN 02



No cenário 3, com cinco veículos em chamas, a espessura da camada de fumaça inicial foi de 2,70 m, no eixo Y apresentou reduções mais acentuada ocorreu aos 12 e 24 minutos, devido à propagação do fogo para os veículos adjacentes ao veículo principal. Nas distâncias próximas ao foco do incêndio ($d = 0,9$ m e $d = 3,0$ m), a altura despencou para valores críticos, enquanto em distâncias maiores ($d = 18,0$ m e $d = 21,0$ m), houve estabilização em torno de 1,49 m e 1,38 m, respectivamente, evidenciando a presença significativa de fumaça nessas áreas mais afastadas. (Figura 57)

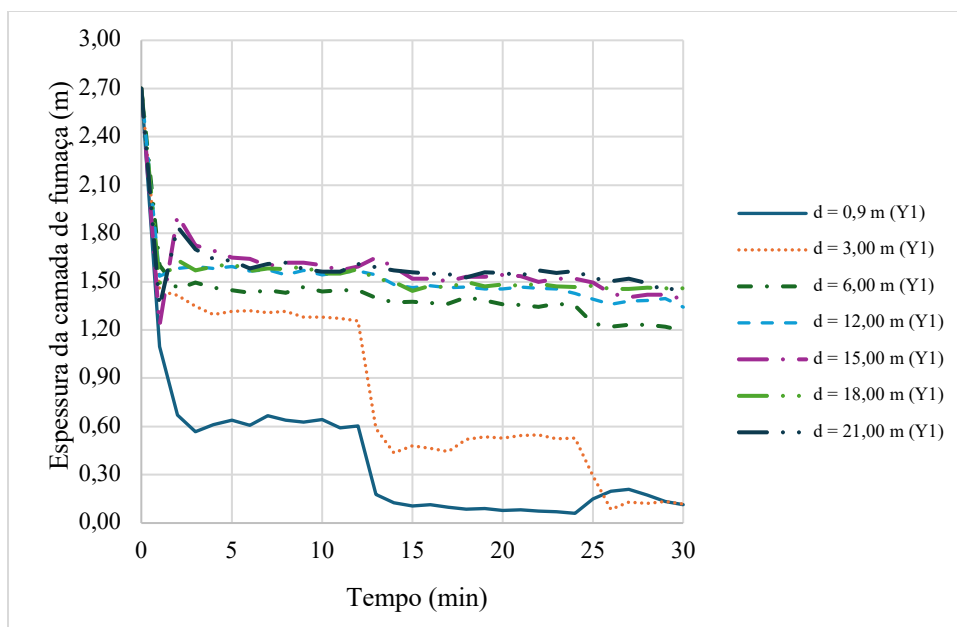
A análise revelou quedas acentuadas e contínuas em $d = 0,9$ m e $d = 3,0$ m, onde a espessura inicial de 2,00 m reduziu drasticamente para valores próximos de 0,08 m e 0,05 m ao final dos 30 minutos. Em distâncias maiores, como $d > 12,0$ m, a redução foi menos acentuada, mas a presença de fumaça persistiu. As espessuras da camada de fumaça estabilizaram abaixo de 0,61 m. (Figura 58)

Com uma camada de fumaça inicial de 0,90 m, observam-se quedas rápidas nas distâncias próximas ao foco do fogo ($d = 0,90$ e $d = 3,0$ m) e presença contínua de fumaça em distâncias maiores.

Para as distâncias próximas ao foco ($d = 0,9$ m e $d = 3,0$ m), a espessura reduziu rapidamente para 0,15 m e 0,09 m no primeiro minuto, estabilizando em valores próximos de 0,05 m ou praticamente zero ao final da análise. Em distâncias maiores ($d > 15,0$ m) embora a redução tenha sido mais lenta, a fumaça permaneceu presente, com espessuras variando entre 0,11 m e 0,22 m. (Figura 59).

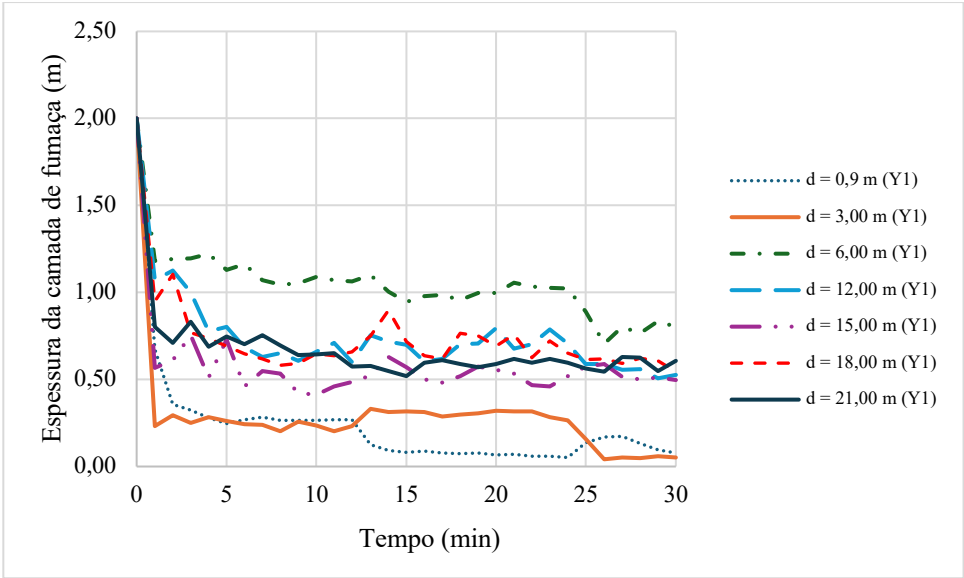
A Figura 60 apresenta a evolução da camada de fumaça no cenário CEN 03 aos 25 minutos, onde ocorre tanto a propagação para os veículos adjacentes (24 minutos), quando ocorre o pico da taxa de liberação de calor do veículo inicial.

Figura 57 – Espessura da camada de fumaça (2,70 m) no edifício garagem no FDS no CEN 03



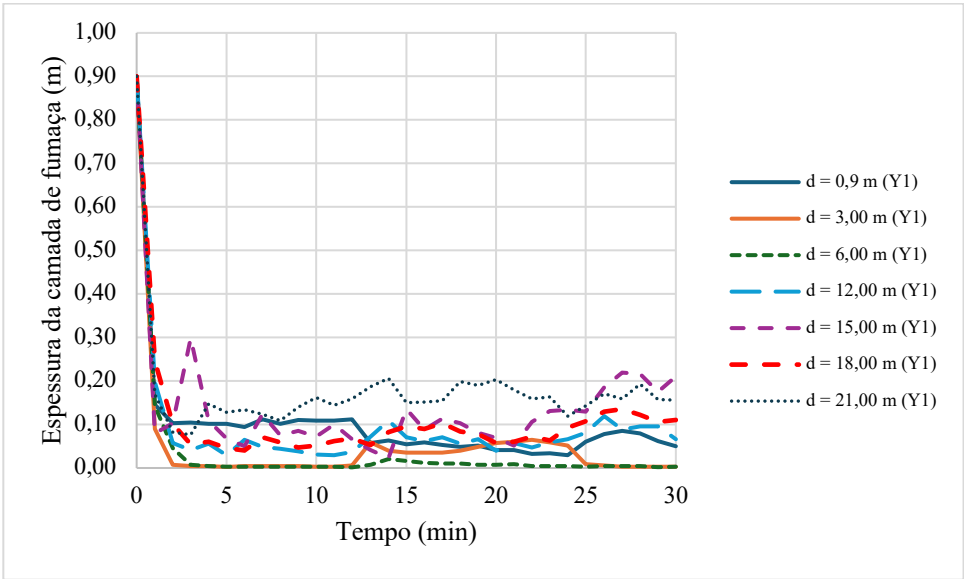
Fonte: Autora (2025).

Figura 58 – Espessura da camada de fumaça (2,00 m) no edifício garagem no FDS no CEN 03



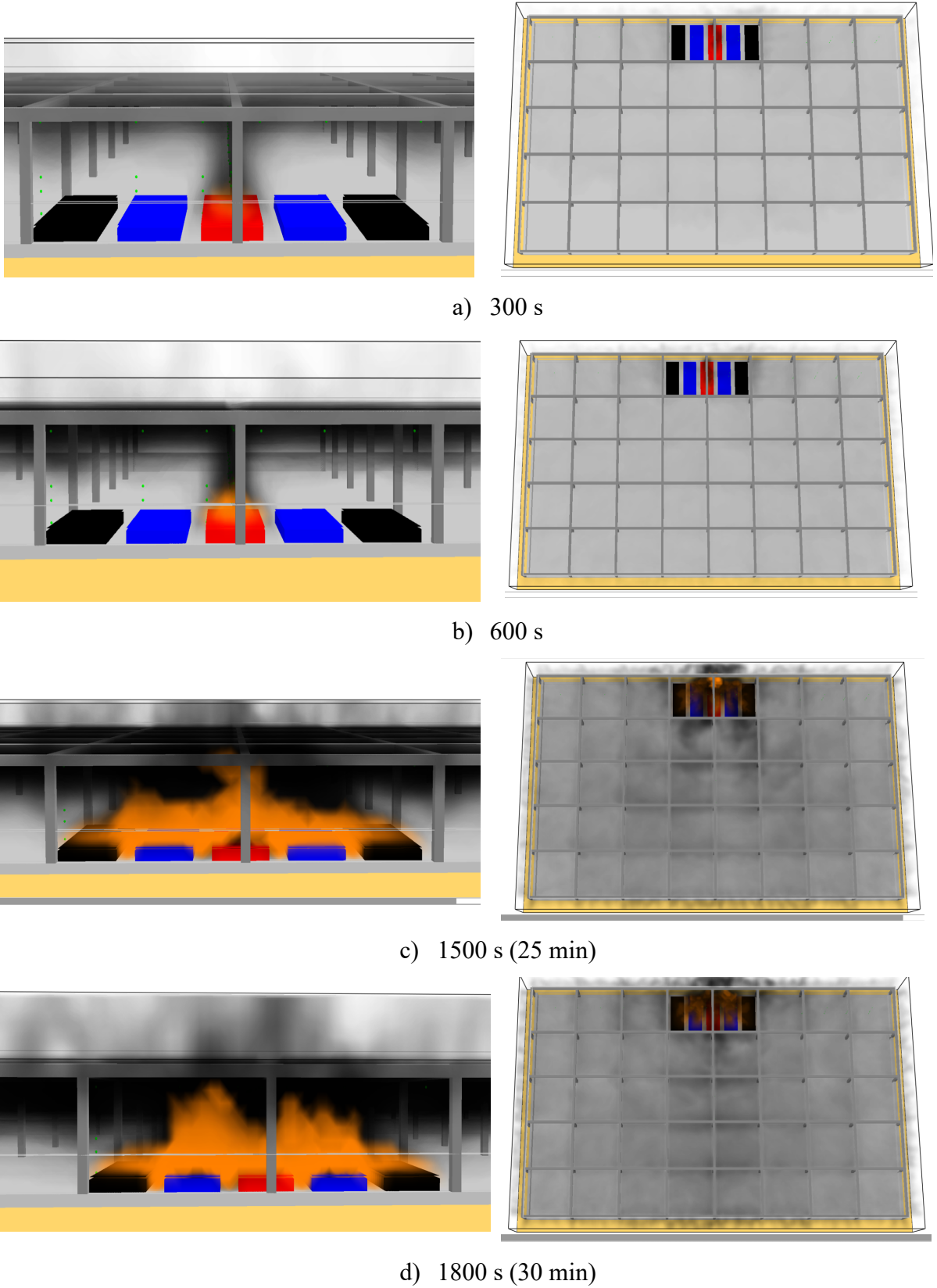
Fonte: Autora (2025).

Figura 59 – Espessura da camada de fumaça (0,90m) no edifício garagem no FDS no CEN 03



Fonte: Autora (2025).

Figura 60 – Evolução da espessura da camada de fumaça registrada através de dois planos de medição (Y e Z) e visualizado no SMV CEN 03.



4. IMPACTO NA ESTRUTURA

4.1. Método de verificação

Para o método simplificado, é realizado uma análise térmica e mecânica dos elementos estruturais em situação de incêndio, conforme as recomendações da ABNT NBR 14323 (ABNT, 2013). É determinada a temperatura dos elementos sem proteção para estimar a sua degradação e perda de capacidade.

A aplicação do método simplificado inicia-se análise térmica, com a determinação das constantes essenciais para o estabelecimento do balanço térmico do elemento estrutural. Inicialmente, define-se o fator de sombreamento (k_{sh}) e a razão entre o perímetro exposto ao fogo e a área da seção transversal (u/Ag), para os pilares I, a serem analisados, foram considerados três faces expostas, além de parâmetros intrínsecos ao aço, como o calor específico (c_a) e a densidade (ρ_a).

Com esses valores, procede-se à determinação da temperatura dos gases (θ_g), adotando-se um intervalo inicial de análise, tipicamente de 5 segundos, e fixando a temperatura inicial do aço (θ_a) em 20 °C. Em seguida, calcula-se o fluxo total de calor incidente sobre o elemento (φ), que é composto pela soma da contribuição convectiva (φ_c) e pela contribuição radiativa (φ_r). Obtidos a partir da Equação 2 e Equação 3.

$$\varphi_c = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_a) \quad \text{Equação (2)}$$

$$\varphi_r = 5,67 \times 10^{-8} \epsilon_{res} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad \text{Equação (3)}$$

Este fluxo é então utilizado para estimar o incremento de temperatura no elemento através da Equação 4, onde Δt representa o intervalo de tempo adotado para a análise.

$$\Delta\theta_a = k_{sh} \frac{(u/Ag)}{(c_a \cdot \rho_a)} \cdot \varphi \cdot \Delta t \quad \text{Equação (4)}$$

A nova temperatura do aço (θ'_a) é obtida somando-se o incremento $\Delta\theta_a$ à temperatura previamente considerada, e o procedimento é reiterado em incrementos sucessivos (a cada 5 segundos), permitindo a obtenção da evolução térmica da seção ao longo do tempo.

Com o perfil de temperaturas definido, é possível, ainda, proceder à análise mecânica, pois a elevação térmica acarreta a redução progressiva das propriedades mecânicas do aço, afetando diretamente sua capacidade de resistir aos esforços solicitantes durante o incêndio.

A partir da nova temperatura do aço (θ'), inicia-se a análise mecânica, verificando a capacidade residual dos pilares, aplicando os coeficientes de redução das propriedades mecânicas do aço conforme as prescrições da NBR 14323 (ABNT, 2013) e da NBR 8800 (ABNT, 2008), entre esses, destacam-se o fator de redução da resistência ao escoamento (k_y, θ), fator de redução do módulo de elasticidade (k_E, θ), fator de redução para flambagem local das bordas longitudinais vinculadas (FL-AA – Equação 5 e FL-AL – Equação 6) (k_σ, θ) e o fator de resistência à compressão em incêndio (χ_{fi} – Equação 7).

$$Q_a = \frac{\lambda_r}{\lambda_{alma}} \times \frac{f_y}{E} \times \lambda^2_{alma} \quad \text{Equação (5)}$$

$$Q_s = 1,415 - 0,65 \times \frac{\lambda_{mesa} f_y}{E K_c} \quad \text{Equação (6)}$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{0,fi} + \sqrt{\varphi_{0,fi}^2 - \lambda_{0,fi}^2}} \quad \text{Equação (7)}$$

Com esses coeficientes, foi realizada o cálculo para obter a força axial resistente de cálculo em situação de incêndio ($N_{fi,Rd}$ – Equação 8), levando em conta a redução da resistência mecânica do material, e, paralelamente, determina-se a capacidade nominal de resistência do pilar ($N_{fi,Sd}$), que é considerada como 70% da força axial de cálculo, proveniente do projeto em temperatura ambiente.

$$N_{fi,Rd} = \chi_{fi} \cdot k_{y,\theta} \cdot A_g \cdot f_y \quad \text{Equação (7)}$$

A verificação estrutural é efetuada comparando-se $N_{fi,Sd}$ com $N_{fi,Rd}$, adotando o critério de conformidade de que a relação $N_{fi,Sd}/N_{fi,Rd}$ seja menor ou igual a 1,0, garantindo assim a estabilidade estrutural (R30) sob as condições de incêndio, caso contrário, ocorrerá falha estrutural (FE), sendo necessário a proteção do aço.

4.2.1. Detalhes da estrutura

O Quadro 11 apresenta as propriedades geométricas e mecânicas de pilares com seção em I, dimensionados considerando sua proximidade com o centro de gravidade do veículo principal em chamas, sendo a distância do fogo, indicando o quão exposto o pilar estará à ação térmica. Nesse contexto, d representa a altura total da seção, bf é a largura das flanges, tf e tw são, respectivamente, as espessuras das flanges e da alma, e N_{fi}, S_d (kN) corresponde à capacidade nominal de resistência do pilar.

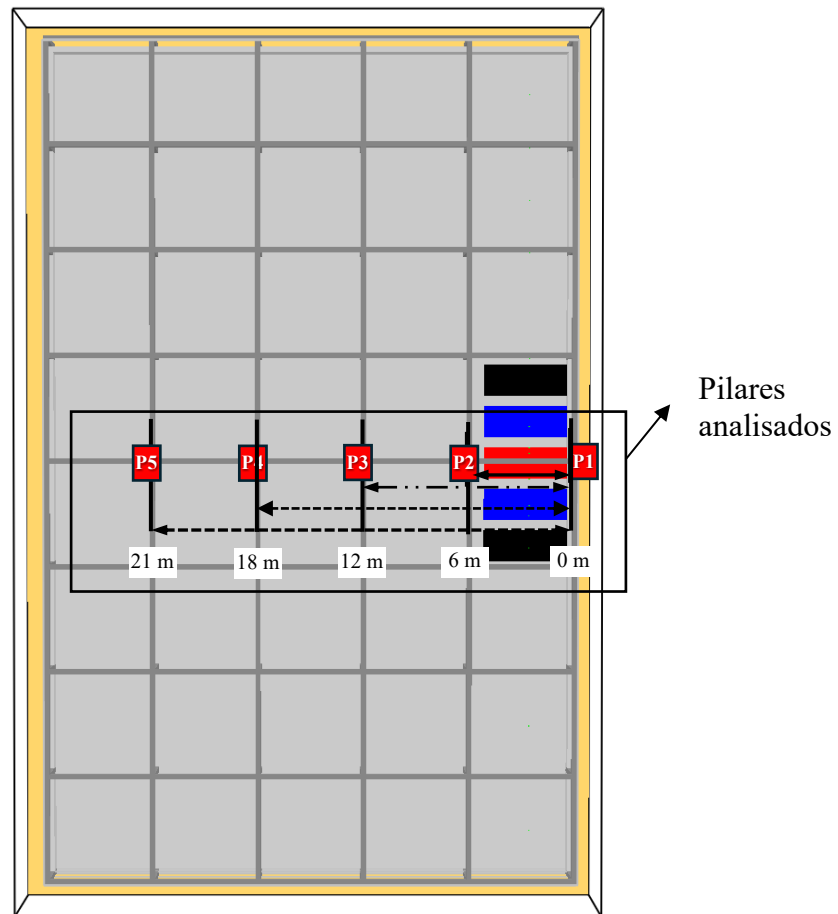
Quadro 11 – Propriedades geométrica dos pilares (perfil I)

Elementos: Pilares	Distância do veículo 1 em chamas	d (mm)	bf (mm)	tf (mm)	tw (mm)	N_{fi}, S_d (kN)
P1	0	300	300	16	8	2660
P2	6	250	250	12,5	6,35	1836
P3	12	250	250	8	6,35	1350
P4	18	250	250	9,5	6,35	1390
P5	21	300	300	9,5	8	868

Fonte: Autora (2025).

Mesmo com a possibilidade de isenção de TRRF para vigas e pilares que ocorre no anexo D da NBR 14432 (ABNT, 2001), será realizado a verificação de alguns pilares, visto a grande importância desses elementos na estrutura. Portanto, serão analisados os pilares a frente do veículo, conforme área situada na Figura 61.

Figura 61 – Pilares analisados para resistência mecânica para todos os cenários de incêndio.



Fonte: Autora (2025).

4.2.2. Resultados térmicos e mecânicos da estrutura

A determinação da temperatura atingida do pilar de aço foi realizada por meio da curva de incêndio padrão ISO 834 (ISO, 1999) e das três curvas derivadas dos cenários de incêndio por meio de simulações numéricas (CEN 01, CEN 02, CEN 03). Sendo determinado a temperatura do aço aos 30 minutos (θ_a), e a nova temperatura do aço (θ'_a).

O Quadro 12 e Quadro 13, apresentam a temperatura máxima dos gases e a temperatura máxima observadas do perfil de aço dos pilares para cada cenário avaliado.

Quadro 12 – Temperatura máxima nos gases

Pilares	ISO834	CEN01	CEN02	CEN03
P1	842	511	707	684
P2	842	460	674	642
P3	842	89	227	261
P4	842	77	147	170
P5	842	62	114	132

Fonte: Autora (2025).

Quadro 13 – Temperatura no perfil de aço dos pilares

Pilares	Ag (m ²)	u/Ag (m ⁻¹)	ISO834	CEN01	CEN02	CEN03
P1	0,0120	100,00	782	165	323	237
P2	0,0077	135,10	649	102	168	147
P3	0,0055	185,80	774	36	62	70
P4	0,0062	239,20	820	40	65	71
P5	0,0079	224,50	818	34	51	55

Fonte: Autora (2025).

Observa-se que o cenário da curva de incêndio padrão ISO 834, resultaram em temperaturas superiores ao limite crítico do aço, o que não ocorre em outros cenários modelados (CORUS *et al.*, 2004).

O Quadro 14 apresenta os parâmetros de redução das propriedades mecânicas do aço em situação de incêndio para estruturas sem revestimento contra o fogo.

Quadro 14 – Parâmetros de Redução no cenário ISO 834

Pilares	Fatores Redutores				FL-AA	FL-AL	FG
	ksh	ky	kE	kσ	Qa	Qs	χ _{fi}
P1	0,675	0,103	0,085	0,065	0,99	1	0,6088
P2	0,30	0,103	0,085	0,065	0,99	1	0,7649
P3	0,30	0,106	0,087	0,067	0,97	0,82	0,7881
P4	0,435	0,101	0,083	0,064	0,98	0,92	0,7768
P5	0,438	0,107	0,084	0,064	0,98	0,82	0,8271

Fonte: Autora (2025).

A Quadro 15 apresenta os esforços solicitantes e a capacidade resistente dos pilares de aço em situação de incêndio.

Quadro 15 – Esforços Solicitantes e Capacidade Resistente dos Pilares em Situação de Incêndio

Pilares	N _{fi,Sd} (kN)	N _{fi,Rd} (kN)			
		ISO834	CEN01	CEN02	CEN03
P1	2660	338	3075	3264	3133
P2	1836	272	2637	2464	2643
P3	1350	206	1945	1945	1945
P4	1390	219	2173	2173	2173
P5	868	316	2958	2958	2958

Fonte: Autora (2025).

A verificação estrutural foi realizada comparando N_{fi,sd} com N_{fi,Rd}, conforme apresentado na no Quadro 16. O critério de conformidade adotado é N_{fi,sd} ≤ N_{fi,Rd}, sendo considerado seguro essa relação é menor ou igual a 1,0 para que não haja a falha estrutural.

Quadro 16 – Verificação de Falha dos Pilares em Situação de Incêndio

Pilares	ISO834		CEN01		CEN02		CEN03	
P1	7,856	FE	0,865	R30	0,815	R30	0,849	R30
P2	6,744	FE	0,696	R30	0,745	R30	0,695	R30
P3	6,546	FE	0,694	R30	0,694	R30	0,694	R30
P4	6,333	FE	0,640	R30	0,640	R30	0,640	R30
P5	2,742	FE	0,293	R30	0,293	R30	0,293	R30

Legenda: F – Falha Estrutural. R30 – Integridade Estrutural.

Fonte: Autora (2025).

O cenário analisado (ISO 834), a razão entre os esforços foi 7,856, resultando em uma falha estrutural (FE), indicando que o pilar não atende aos requisitos de segurança para a condição de incêndio analisada.

Por outro lado, todos os pilares avaliados nos cenários CEN01, CEN 02, CEN 03 mantiveram sua capacidade resistente. Dessa forma, para os elementos estruturais enquadrados nesses três cenários no estudo de caso, não há necessidade de aplicação de proteção térmica adicional contra incêndio, visto que a integridade estrutural foi preservada.

No Apêndice “B” é apresentado o memorial de cálculo realizado para análise da resistência mecânica pelo método simplificado para os cenários de incêndio.

5. CONSIDERACOES FINAIS

5.1.Conclusões

- A separação dos parâmetros de saída reduziu o tempo computacional em comparação a solicitar todos os dados de uma vez.
- As concentrações de oxigênio (O_2) reduzem em 12% a distancias inferiores a 3 m, podendo comprometer a capacidade respiratória.
- Os níveis de dióxido de carbono (CO_2) atingem 5%, favorecendo a hipercapnia e sensação de sufocamento.
- Os níveis de monóxido de carbono (CO) embora abaixo dos limites, sua alta toxicidade é crítica.
- A ventilação natural não é suficiente para manter níveis seguros de CO e CO_2 nas áreas próximas ao foco do incêndio.
- Os cenários de incêndio desenvolvidos em edifícios de garagens laterais abertas são menos penalizantes do que os da curva de incêndio padrão ISO 834.
- O cenário de incêndio da ISO 834 ocorre falha estrutural neste caso analisado, sendo necessária a proteção passiva contra fogo da estrutura de aço.
- Nos demais cenários simulados, para um TRRF de 30 min, não observou a falha do elemento, não foi necessária a proteção passiva contra fogo da estrutura de aço.

5.2. Limitações do Estudo

- Veículos analisados movidos á combustão.
- Três cenários de incêndio com variação de um a cinco veículos em chamas.
- Tempo de propagação de 12 minutos.

5.3.Trabalhos Futuros

- Simulação de veículos elétricos e híbridos no FDS.
- Modelar um número maior cenários de incêndios.
- Modelar o comportamento da estrutura em elementos finitos através de softwares como ABAQUS, ANSYS para uma análise detalhada de seu desempenho ao fogo.
- Análise global da estrutura para verificar a necessidade de proteção passiva mesmo em cenários menos penalizadores.

- Adicionar ao modelo outras soluções revestimentos anti-fogo, barreiras térmicas, sistemas ativos de supressão (*sprinklers*).

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** ASTM E119-1: Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. West Conshohocken: ASTM, 2022.
- ANNEREL, E.; TAERWE, L.; MERCI, B.; JANSEN, D.; BAMONTE, P.; FELICETTI, R.** Thermo-mechanical analysis of an underground car park structure exposed to fire. *Fire Safety Journal*, v. 57, p. 96-106, 2013.
- ARCELOR MITTAL.** Parkings aériens métalliques largement ventilés. Les carnets de l'acier, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** ABNT. NBR 14323: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. ABNT. NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. ABNT. NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Componentes e elementos construtivos das edificações. Rio de Janeiro, 2022.
- _____. ABNT. NBR 8800: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Componentes e elementos construtivos das edificações. Rio de Janeiro, 2008.
- AYVA, B.** Fire Safety in Car Parks: A Study on Fire Spread and Structural Response. Dissertação (Mestrado) – Middle East Technical University, Ancara, 2020.
- BABRAUSKAS, V.** Chapter 3 - Heat release rate. In: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 3rd ed. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2002.
- BBC NEWS.** Liverpool Echo Arena car park fire destroys 1,400 vehicles. 2018. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/uk-england-manchester-42529615>. Acesso em: 3 jan. 2025.
- BENNETTS, I. D.; PROE, D.; LEWINS, R.; THOMAS, I. R.** Open-vehicle park fire analyses. In: *Pacific Structural Steel Conference*, 1986, Auckland, New Zealand. Proceedings [...]. Auckland: PSSC, 1986.
- BLOMQVIST, P.; ANDERSSON, P.; LÖNNERMARK, A.** Toxic Gases in Fires: A Review of the Current State of Knowledge. *Fire Technology*, v. 56, n. 3, p. 1023-1058, 2020.
- BOEHMER, H.; KLASSEN, M.; OLENICK, S.** *Modern Vehicle Hazards in Parking Structures and Vehicle Carriers*. Quincy: Fire Protection Research Foundation, NFPA, 2020.
- BRE BRITISH RESEARCH ESTABLISHMENT.** Fire spread in car parks. BRE Report, Department for Communities and Local Government, London, UK, 2010.
- BUTCHER, E. G.; LANGDON-THOMAS, G. J.; BEDFORD, G. K.** Fire and the motor car: results of tests on the propagation of fire in parked cars. *Fire Safety Science*, n. 678, p. 1-11, 1967.
- COOK, Daniel R.; PESSIKI, Stephen.** Analytical Investigation of Fire Loads for Steel-Framed, Open-Deck Parking Structures. ATLSS Reports, ATLSS report number 08-12, 2008.
- Corpo de Bombeiros Militar da Bahia. CBM-BA.** Disponível em: <http://www.cbm.ba.gov.br/>. Acesso em: 3 jan. 2025.
- _____. **de Minas Gerais. CBM-MG.** Disponível em: <https://www.bombeiros.mg.gov.br/>. Acesso em: 3 jan. 2025.
- _____. **de Pernambuco. CBM-PE.** Disponível em: <https://www.bombeiros.pe.gov.br/>. Acesso em: 3 jan. 2025.
- _____. **de São Paulo. CBM-SP.** Disponível em: <https://www.corpodebombeiros.sp.gov.br/>. Acesso em: 3 jan. 2025.
- _____. **do Ceará. CBM-CE.** Disponível em: <https://www.bombeiros.ce.gov.br/>. Acesso em: 3 jan. 2025.

_____. **do Paraná. CBM-PR.** Disponível em: <https://www.bombeiros.pr.gov.br/>. Acesso em: 3 jan. 2025.

_____. **do Rio de Janeiro. CBM-RJ.** Disponível em: <https://www.cbmerj.rj.gov.br/>. Acesso em: 3 jan. 2025.

CORUS. Steel-framed car parks. Corus Construction & Industrial, 2004.

CWIKLINSKI, C. *Parc de stationnement en superstructure largement ventilés – Avis d'experts sur les scénarios d'incendie.* Rapport final. INERIS, 2001.

DE SILVA, Donatella; THAUVOVE, C.; FRAUD, C.; TRAMONI, J.B.; SUZANNE, M. Effect of the Fire Modelling on the Structural Temperature Evolution Using Advanced Calculation Models. *Fire*, v. 6, n. 91, 2023. DOI: 10.3390/fire6030091.

DRYSDALE, Dougal. An Introduction to Fire Dynamics. 3^a ed. New York: Wiley, 2011.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION. EN 1993-1-2:2005: Eurocode 3 – Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. Bruxelas: European Committee for Standardisation, 2005.

EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK. ECCS. Fire safety in open car parks. Modern Fire Engineering, Technical Committee 3, European Convention for Constructional Steelwork, Brussels, Belgium, 1993.

GEWAIN, R. G. Fire Experience and Fire Tests in Automobile Parking Structures. *Fire Journal*, v. 4, n. 50-54, p. 67, 1973.

HAREMZA, C.; SANTIAGO, A.; SIMÕES DA SILVA, L. Design of steel and composite open car parks under fire. *Advanced Steel Construction*, v. 9, n. 4, p. 321-339, 2013.

HIRASHIMA, T.; WANG, Y.; UESUGI, H. Large Scale Fire Tests of a 4-Story Type Car Park – Part 2: Analysis of the Thermal Stresses and Deflections. *Fire Safety Science*, v. 7, p. 655-666, 2003. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.7-655.

HURLEY, Michael J. et al. (Ed.). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 5. ed. New York: Springer, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4939-2565-0>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Brasileiro de 2000. Rio de Janeiro: IBGE, 2000.

_____. Censo Brasileiro de 2000. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

_____. Frota de veículos de 2024. Rio de Janeiro: IBGE, 2024a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 834: Fire resistance tests: elements of building construction – Part 1.1: General requirements for fire resistance testing. Geneva: ISO, 1999.

JOYEUX, D. Natural Fires in Closed Car Parks – Car Fire Tests. INC-96/294d-DJ/NB. Paris: CTICM, 1997.

JOYEUX, D.; KRUPPA, J.; CAJOT, L. G.; SCHLEICH, J. B.; VAN DE LEUR, P.; TWILT, L. Demonstration of Real Fire Tests in Car Parks and High Buildings. CEC Agreement 7215 – PP/025. CTICM, France – Profil-Arbed Recherches, Luxembourg – TNO, The Netherlands, 2002.

JUNIOR, E. M. S. EFEITO DO FOGO LOCALIZADO EM UM ESTACIONAMENTO ABERTO. Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

KITANO, T.; SUGAWA, O.; MASUDA, H.; AVE, T.; UESUGI, H. Large Scale Fire Tests of 4-Story Type Car Park – Part 1: The Behavior of Structural Frame Exposed to the Fire at the Deepest Part of the First Floor. In: ASIA-OCEANIA SYMPOSIUM ON FIRE SCIENCE AND TECHNOLOGY, 4., 2000, Tokyo, Japan. Proceedings [...]. Tokyo, 2000. p. 527-538.

KRUPPA, J. Recent developments in fire design. *Progress in Structural Engineering and Materials*, v. 2, n. 1, p. 6-15, 2000.

- LING, G.; WANG, N.; YOU, F.** Numerical Simulation of Fire in Library Atrium Based on FDS. *Advances in Computer and Engineering Technology Research*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.61935/acetr.2.1.2024.P546>
- MÁRTON, T.; DEDERICH, A.; GIULIANI, L.** Modelling of fire in an open car park. *Applications of Structural Fire Engineering*, 2016. DOI: <https://doi.org/10.14311/asfe.2015.06>
- MATTHEUS, J.** Fire Propagation in an Open Car Park: A Case Study on the Car Park of the Designer Outlet. Dissertação (Mestrado) – Delft University of Technology, Delft, 2017.
- MCGRATTAN, K. et al.** *Fire Dynamics Simulator User's Guide: Sixth Edition*. NIST Special Publication 1019. Maryland: National Institute of Standards and Technology, 2024.
- NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. NFPA 88A:** Standard for Parking Structures. Quincy, MA: NFPA, 2023.
- NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH. NIOSH.** Disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/124389.html>. Acesso em: 30 jan. 2025.
- _____. **NFPA 13:** Standard for the Installation of Sprinkler Systems. Quincy, MA: NFPA, 2019.
- NOORDIJK, L. M.; LEMAIRE, T.** Modelling of fire spread in car parks. *Revista HERON*, v. 50, n. 4, 2005.
- POPE, A.** Luton Airport car park fire was 'accidental', says fire service. *BBC NEWS*, 2023. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/uk-england-beds-bucks-herts-68627759>. Acesso em: 3 jan. 2025.
- QUINTIERE, J. G.** Principles of Fire Behavior. 2ª ed. CRC Press, 2016.
- RAUB, J. A., MATHIEU-NOLF, M., HAMPSON, N. B., THOM, S. R.** Carbon monoxide poisoning--a public health perspective. *Toxicology*, 145(1), 1–14, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0300-483x\(99\)00217-6](https://doi.org/10.1016/s0300-483x(99)00217-6)
- ROCHE, T.** Up to 60 cars scorched in 'accidental' Cork car park blaze: millions of euro worth of damage caused by the fire at Douglas Village Shopping Centre. *IRISHTIMES*, 2019. Disponível em: <https://www.irishtimes.com/news/ireland/irish-news/up-to-60-cars-scorched-in-accidental-cork-car-park-blaze-1.4004015>. Acesso em: 3 jan. 2025.
- SCHLEICH, J.B., Cajot, L. Pierre, M. Brasseur, M., Franssen, J. Kruppa, J., Joyeux, D. Twilt, L., Oerle, J. V. Aurtenetxe, G.** Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in closed car parks. European Commission. CEC Agreement 7215 – PP/025. Luxembourg, 1999.
- SHIMBUN, K.** Incêndio no estacionamento de Atsugi: corpo de bombeiros da cidade divulga fotos dentro de vigas distorcidas pelo alto calor. *KANALOCO.JP*, 2023. Disponível em: <https://www.kanaloco.jp/news/social/article-1026150.html>. Acesso em: 3 jan. 2025.
- SOMMAVILLA, M.; TONDINI, N.** Fire performance of a steel open car park in the light of the recent development of the localised fire model “LOCAFI”. In: SiF 2020 – The 11th International Conference on Structures in Fire. DOI: <https://doi.org/10.14264/356eb1f>, 2020.
- TABACZENSKI, R., CORRÊA, C. ANCELMO PIRES, T, RÊGO SILVA, J. J.** Simulação numérica e experimento de incêndio em dormitório residencial, *Revista ALCONPAT*, 9(1), pp. 15-30, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.315>
- THAUVOVE, C.; FRAUD, C.; TRAMONI, J. B.; SUZANNE, M.** Étude expérimentale par calorimétrie de la combustion de véhicules de tourisme récentes. *Revue CM, CTICM, RCM_1_2023*, 37 p., 2023.
- TONDINI, N.; MORBIOLI, A.; VASSART, O.; LECHÊNE, S.; FRANSSEN, J. M.** An integrated modelling strategy between a CFD and an FE software: Methodology and application to compartment fires. *Journal of Structural Fire Engineering*, 2016.

UPMEYER, F.; LÖHR, A.; RIEDEL, A.; SCHEIBE, M. *Ingenieurmethoden im Parkhausbau*. Dissertação (Mestrado) – Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2019.

WONG, Y. C. *Car Park Fire Modelling Using Computational Tools: Development and Validation of CAPAFI Software with FDS*. Dissertação (Mestrado) – The University of Hong Kong, Hong Kong, 2014.

YAN, Xia; CHARLIER, Marion; GERNA, Thomas. Thermal Response of Steel Framing Members in Open Car Park Fires. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, v. 16, n. 9, p. 1071-1088, 2022. DOI: 10.1007/s11709-022-0879-0

ZANON, R. et al. Analysis of steel-framed open car parks under localized fire. *Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events (Proceedings)*. London: Taylor & Francis Group, 2010. ISBN 978-0-415-60685-1.

ZHAO, B.; FRAUD, C. Fire resistance analysis of open car parks with composite structures under real car fire. In: *Composite Construction in Steel and Concrete V*. p. 595-606, 2004.

ZHAO, B.; KRUPPA, J. Structural Behaviour of an Open Car Park Under Real Fire Scenarios. *Fire and Materials*, v. 28, p. 269-280, 2004.

APÊNDICE A – ANÁLISE COMPARATIVA DAS TEMPERATURAS DOS GASES EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA NOS CENÁRIOS SIMULADOS

Este apêndice apresenta uma análise detalhada e comparativa das temperaturas dos gases registradas nos diferentes cenários simulados, com ênfase na variação dos valores em função da distância do foco do incêndio.

A partir dos testes experimentais e a afirmação do INERIS (2001, 2022), que em estacionamentos, nem todos os veículos são afetados simultaneamente pelo incêndio, o que coloca em dúvida a adequação da curva ISO 834 (ISO, 1999) nesses contextos.

A partir dos dados obtidos, busca-se identificar padrões de comportamento térmico e avaliar o impacto do distanciamento na propagação de calor para estruturas adjacentes.

Os gráficos presentes na Figura 1 e 2 apresentados a seguir sintetizam os resultados obtidos em cada cenário, destacando as temperaturas máximas e médias registradas em pontos específicos, como 3,00 m, 12,00 m, 18,00 m e 21,00 m de distância do foco no eixo X e 0,90 m, 3,00 m, 12,00 m e 21,00 m de distância do foco no eixo Y.

As legendas das Figuras abaixo são:

— CEN 01
— CEN 03
— CEN 05
— ISO 834

Figura 1 - Distâncias em relação ao eixo X

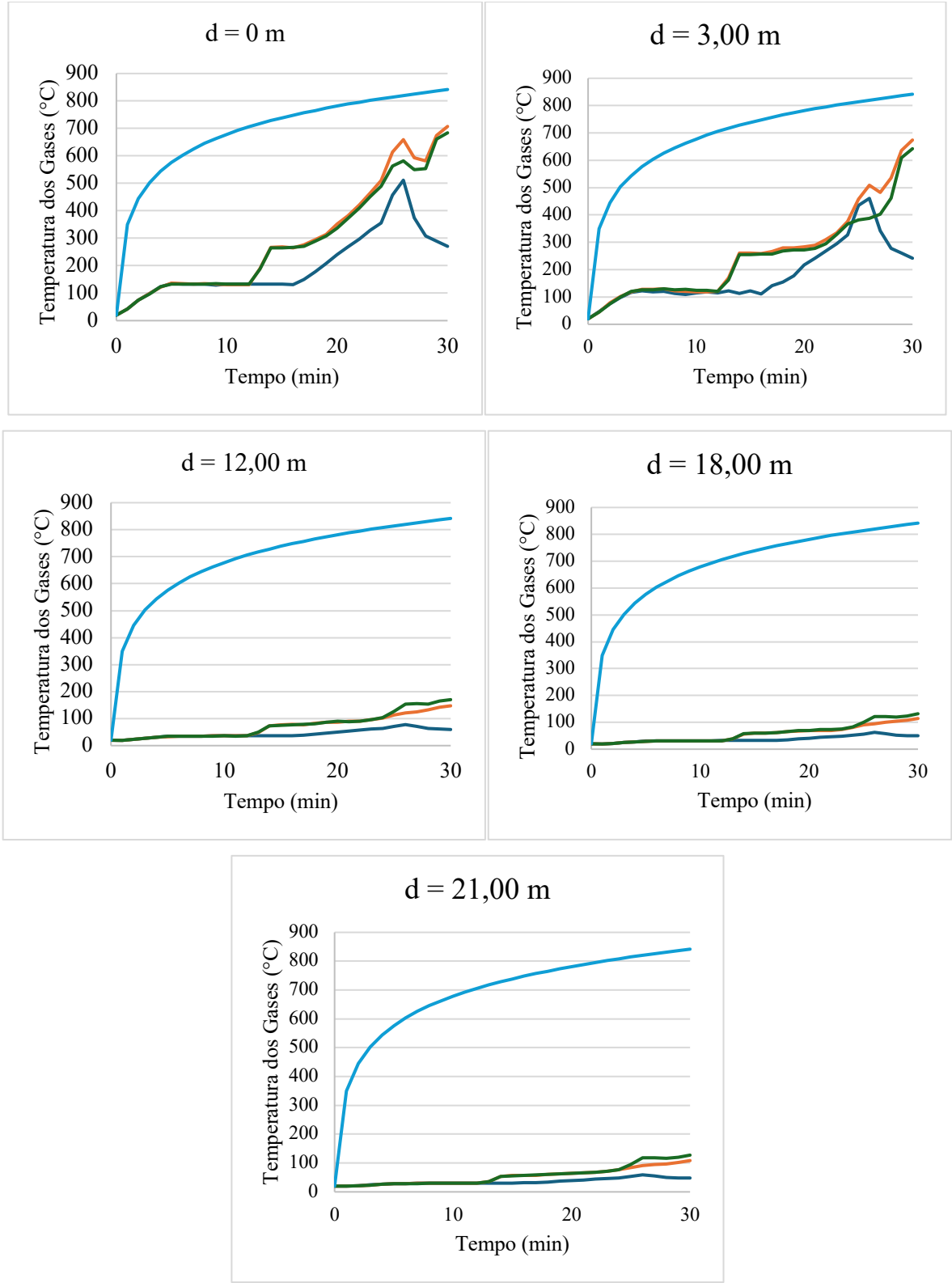
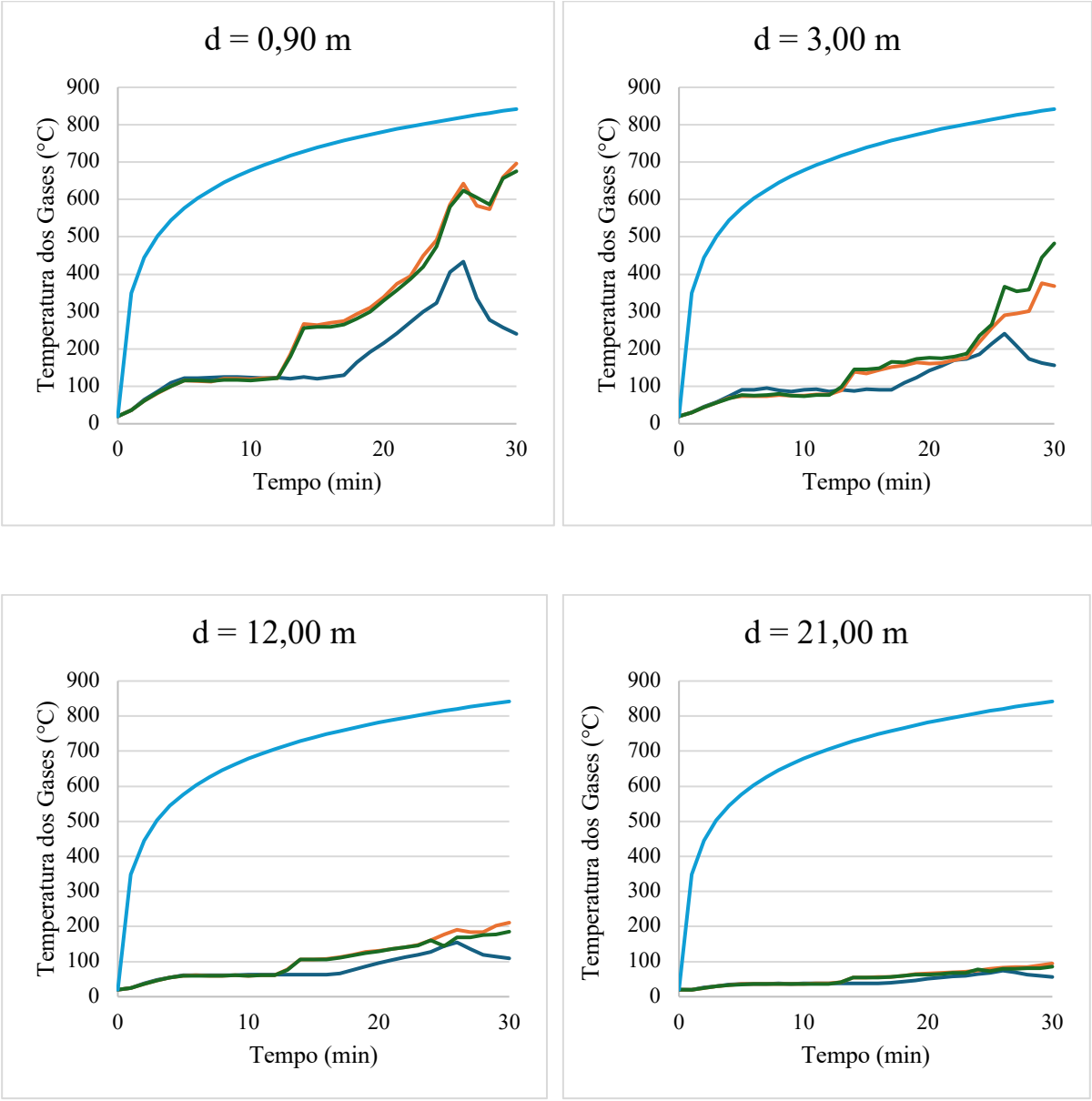


Figura 2 - Distâncias em relação ao eixo Y



APÊNDICE B – ANÁLISE MECÂNICA

Este apêndice demonstra uma aplicação do método simplificado descrito na NBR 14323 (ABNT, 2013), considerando a variação da temperatura no perfil de aço e a determinação da capacidade resistente em situação de incêndio ($N_{fi,Rd}$).

Elementos: Pilares	d	bf	tf	tw
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Pilar 1	300	300	16	8
Pilar 2	250	250	12,5	6,35
Pilar 3	250	250	8	6,35
Pilar 4	250	250	9,5	6,35
Pilar 5	300	300	9,5	8

	ISO-834	Ag (m ²)	u/Ag	Fatores Redutores				FL-AA	FL-AL	FG	N _{fi,Sd} (kN)	N _{fi,rd} (kN)	N _{fi,sd} / N _{fi,rd}	Verificação
Temperatura dos Gases	Temperatura do aço		(m ⁻¹)	ksh	ky	kE	kσ	Qa	Qs	χ _{fi}				
842	782	0,0120	100,00	0,675	0,103	0,085	0,065	0,99	1	0,6088	2660	338,61	7,856	FE
842	649	0,0077	135,10	0,30	0,103	0,085	0,065	0,99	1	0,7649	1836	272,24	6,744	FE
842	774	0,0055	185,80	0,30	0,106	0,087	0,067	0,97	0,82	0,7881	1350	206,23	6,546	FE
842	820	0,0062	239,20	0,435	0,101	0,083	0,064	0,98	0,92	0,7768	1390	219,49	6,333	FE
842	818	0,0079	224,50	0,438	0,107	0,084	0,064	0,98	0,82	0,8271	868	316,53	2,742	FE

	CEN 01		u/Ag	Fatores Redutores				FL-AA	FL-AL	FG	N _{fi,Sd} (kN)	N _{fi,rd} (kN)	N _{fi,sd} / N _{fi,rd}	Verificação
Temperatura dos Gases	Temperatura do aço	Ag (m2)	(m ⁻¹)	ksh	ky	kE	kσ	Qa	Qs	χ _{fi}				
511,55	165	0,012	100	0,675	0,935	0,935	0,928	0,99	1	0,6088	2660	3075,15	0,865	R30
460,72	102	0,0076788	135,1	0,30	0,998	0,998	0,99784	0,99	1	0,7649	1836	2637,78	0,696	R30
89,90	36	0,0054859	185,8	0,30	1,000	1	1	0,97	0,82	0,7881	1350	1945,55	0,694	R30
77,85	40	0,0062169	239,2	0,435	1,000	1	1	0,98	0,92	0,7768	1390	2173,16	0,640	R30
62,71	34	0,007948	224,5	0,438	1,000	1	1	0,98	0,82	0,8271	868	2958,21	0,293	R30

	CEN 02		u/Ag	Fatores Redutores				FL-AA	FL-AL	FG	N _{fi,Sd} (kN)	N _{fi,rd} (kN)	N _{fi,sd} / N _{fi,rd}	Verificação
Temperatura dos Gases	Temperatura do aço	Ag (m2)	(m ⁻¹)	ksh	ky	kE	kσ	Qa	Qs	χ _{fi}				
707,28335	323	0,012	100	0,675	0,993	0,087	0,067	0,99	1	0,6088	2660	3264,51	0,815	R30
674,2229	168	0,0076788	135,1	0,30	0,932	0,932	0,925	0,99	1	0,7649	1836	2464,08	0,745	R30
227,89484	62	0,0054859	185,8	0,30	1,000	1	1	0,97	0,82	0,7881	1350	1945,55	0,694	R30
147,56383	65	0,0062169	239,2	0,435	1,000	1	1	0,98	0,92	0,7768	1390	2173,16	0,640	R30
114,27023	51	0,007948	224,5	0,438	1,000	1	1	0,98	0,82	0,8271	868	2958,21	0,293	R30

	CEN 03		u/Ag	Fatores Redutores				FL-AA	FL-AL	FG	N _{fi,Sd} (kN)	N _{fi,rd} (kN)	N _{fi,sd} / N _{fi,rd}	Verificação
Temperatura dos Gases	Temperatura do aço	Ag (m2)	(m ⁻¹)	ksh	ky	kE	kσ	Qa	Qs	χ _{fi}				
684,05045	237	0,012	100	0,675	0,953	0,95312	0,94836	0,99	1	0,6088	2660	3133,40	0,849	R30
642,44006	147	0,0076788	135,1	0,30	1,000	1	0,966	0,99	1	0,7649	1836	2643,06	0,695	R30
261,55162	70	0,0054859	185,8	0,30	1,000	1	1	0,97	0,82	0,7881	1350	1945,55	0,694	R30
170,35198	71	0,0062169	239,2	0,435	1,000	1	1	0,98	0,92	0,7768	1390	2173,16	0,640	R30
132,01712	55	0,007948	224,5	0,438	1,000	1	1	0,98	0,82	0,8271	868	2958,21	0,293	R30