

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas

Maria Luíza Calderaro Moreira

**COMPORTAMENTO AO FOGO DE SOLUÇÕES DE FACHADA DE
EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS SUJEITOS A INCÊNDIOS INTERNOS E
EXTERNOS**

Belo Horizonte
2025

Maria Luíza Calderaro Moreira

**COMPORTAMENTO AO FOGO DE SOLUÇÕES DE FACHADA DE
EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS SUJEITOS A INCÊNDIOS INTERNOS E
EXTERNOS**

Dissertação apresentada ao programa de Pós
Graduação em Engenharia de Estruturas
da Universidade Federal de Minas Gerais
como requisito parcial à obtenção do título
de mestre em Engenharia de Estruturas

Orientador: Dr. João Paulo Correia
Rodrigues

Belo Horizonte
2025

M838c Moreira, Maria Luíza Calderaro.
Comportamento ao fogo de soluções de fachada de edifícios industriais sujeitos a incêndios internos e externos [recurso eletrônico] / Maria Luíza Calderaro Moreira. - 2025.
1 recurso online (205 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: João Paulo Correia Rodrigues.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Incêndios e prevenção de incêndios - Teses. 3. Edifícios industriais - Teses. 4. Incêndios florestais - Prevenção e controle - Teses. 5. Fachadas - Teses. 6. Calor - Transmissão - Teses. I. Rodrigues, João Paulo Correia. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624(043)

Processo:

23072.220965/2025-35

Documento:

4137087



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE Mestrado EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS Nº: 412 DA ALUNA MARIA LUIZA CALDERARO MOREIRA

Aos 11 (onze) dias do mês de abril de 2025 (dois mil e vinte e cinco), às 15:30 horas, reuniu-se em ambiente virtual, na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, a Comissão Examinadora indicada pelo Colegiado do Programa em 18 de março de 2025 para julgar a Defesa da Dissertação de Mestrado intitulada: "**Comportamento ao Fogo de Soluções de Fachada de Edifícios Industriais Sujeitos a Incêndios Internos e Externos**", cuja aprovação é um dos requisitos para a obtenção do Grau de MESTRE EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS na área de ESTRUTURAS.

Abrindo a Sessão, o Presidente da Comissão, Prof. Dr. João Paulo Correia Rodrigues, após dar conhecimento aos presentes do teor das Normas Regulamentares, passou a palavra a aluna para apresentação de seu trabalho. Finalizada a apresentação, seguiu-se para a fase de arguição pelos examinadores, com as respectivas respostas da aluna. Logo após a fase de arguição, a Comissão se reuniu, sem a presença da aluna e do público, para julgamento e expedição do resultado final, a saber:

- (x) Aprovado
() Reprovado

O resultado final foi comunicado publicamente a aluna pelo Presidente da Comissão.

Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ata, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora e pelo aluno.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. João Paulo Correia Rodrigues - DEES - UFMG (Orientador)

Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas - DEES - UFMG

Prof. Dr. Alexandre Landesmann - UFRJ

A aprovação da aluna na Defesa da Dissertação de Mestrado não significa que a mesma tenha cumprido todos os requisitos necessários para obtenção do DIPLOMA de Mestre em Engenharia de Estruturas.

Para ciência da aluna:

1. Atesto que as alterações solicitadas pela Comissão Examinadora serão cumpridas no prazo determinado pela banca de **ATÉ 60 dias** corridos.
2. Atesto estar ciente que a versão corrigida da dissertação deverá ser entregue ao Repositório Institucional da UFMG, conforme orientações disponíveis em: <https://repositorio.ufmg.br/custom/instructions.jsp>

Ciente:

Maria Luiza Calderaro Moreira

Aluna

Belo Horizonte, 11 de abril de 2025

Este documento não terá validade sem a assinatura do Coordenador do Programa de Pós-Graduação.

Após a Homologação da Defesa pelo Colegiado do Programa, este documento será assinado pela Coordenação e disponibilizado ao aluno.



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Landesmann, Usuário Externo**, em 15/04/2025, às 22:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Barreto Caldas, Professor do Magistério Superior**, em 16/04/2025, às 08:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Paulo Correia Rodrigues, Professor do Magistério Superior - Visitante**, em 22/04/2025, às 07:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Luiza Calderaro Moreira, Usuário Externo**, em 22/04/2025, às 13:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4137087** e o código CRC **67DE04D6**.

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho simboliza o encerramento de mais uma etapa acadêmica, de grande aprendizado. À essa conquista eu tenho uma profunda gratidão pelo incentivo de todos presentes comigo nessa caminhada.

Primeiramente, agradeço ao João Paulo, pela orientação, e pelas valiosas contribuições durante todas as fases do mestrado. Seus ensinamentos foram fundamentais para o desenvolvimento dessa dissertação.

Aos membros da banca examinadora, agradeço pela disponibilidade e sugestões que enriquecerão este trabalho.

À minha família, dedico um agradecimento especial. Não tenho palavras para descrever o quanto o apoio de vocês foi essencial para que eu completasse essa etapa. Seu amor incondicional e ajuda nos momentos mais difíceis me deu forças para continuar, e serei eternamente grata.

Ao meu namorado, Afonso, te agradeço pela parceria, pelo companheirismo e pelos conselhos. A sua torcida e apoio em meio às dificuldades foi fundamental para a minha caminhada.

Agradeço também aos meus amigos, pessoas incríveis que eu tive a oportunidade de conhecer durante o mestrado. Guardarei para sempre os momentos vividos.

Agradeço também à Universidade Federal de Minas Gerais que proporcionou os recursos e o ambiente necessário para o desenvolvimento deste estudo, e à CAPES, pelo apoio financeiro concedido.

Agradeço aos colegas Deives e Rúben, pelo auxílio durante a elaboração deste trabalho. Seu apoio foi essencial e de grande contribuição para o resultado alcançado.

A todos, meu muito obrigada.

RESUMO

Com a presença de elevadas cargas de incêndio, armazenamento de materiais combustíveis e a localização frequente próximas às zonas florestais, os edifícios industriais são extremamente suscetíveis ao incêndio. Em particular, as mudanças climáticas alteram as temperaturas e o regime de chuvas, aumentando a ocorrência de incêndios florestais, sendo crucial o estudo do desempenho de sistemas de fachada frente a essa ação. Este trabalho tem como objetivo principal investigar o comportamento térmico e mecânico de sistemas de fachada de edifícios industriais. Para isso, serão analisados dois cenários de incêndio: (1) os incêndios originados no interior da edificação, sendo avaliada a influência da carga de incêndio, aberturas e origem da ignição; e (2) incêndios de interface urbano-florestal, onde são analisadas a velocidade do vento, inclinação do terreno e a vegetação. A metodologia baseou-se no estudo numérico utilizando o *software* FDS (*Fire Dynamics Simulator*) para simulação da propagação do incêndio e o Abaqus para transferência de calor e análise mecânica. Essa combinação permitiu uma análise abrangente de simulações em CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional) e Elementos Finitos, para avaliar o desempenho das fachadas em painel sanduíche, fabricadas com o núcleo interno em PIR (poliisocianurato) e lã de rocha. Os resultados indicam que a inserção de novas aberturas exerceu influência significativa, promovendo aumentos de até 513% sobre as temperaturas internas da edificação. Para o incêndio florestal, o aumento da carga de incêndio foi crítico à edificação, elevando em até 109,47% a taxa de liberação de calor e em até 59,27% as temperaturas. A combinação entre o aumento da velocidade do vento e a inclinação do terreno também se destacou como um fator crítico, elevando significativamente a severidade do incêndio. Entre os materiais analisados, a lã de rocha apresentou melhor desempenho térmico, garantindo maior isolamento frente ao aquecimento. No que diz respeito ao comportamento mecânico, as ligações foram severamente impactadas pelo aquecimento em ambos os cenários de exposição analisados. As conclusões auxiliam a compreender a dinâmica do incêndio em edifícios industriais e as principais variáveis que impactam no desenvolvimento de ocorrências de maior severidade. Além disso, reforçam a necessidade do estudo de soluções de fachada resistentes à ação do incêndio, especialmente para os edifícios localizados em zonas de interface urbano-florestais, para a garantia da segurança da edificação.

Palavras-chave: incêndio; industrial; interface urbano-florestal; fachada; transferência de calor; comportamento mecânico.

ABSTRACT

Industrial buildings are highly susceptible to fires due to the presence of high fire loads, storage of combustible materials, and their frequent location near forested areas. In particular, climate change alters ambient temperatures and rainfall patterns, increasing the occurrence of wildfires, making it crucial to study the performance of facade systems under such conditions. This study aims to investigate the thermal and mechanical behavior of industrial building facade systems. Two fire scenarios are analyzed: (1) fires originating inside the building, considering the influence of fire load, openings, and ignition source; and (2) wildland-urban interface fires, analyzing wind speed, terrain slope, and vegetation. The methodology was based on numerical simulations using FDS (Fire Dynamics Simulator) software for fire propagation modeling and Abaqus for heat transfer and mechanical analysis. This approach enabled a comprehensive evaluation combining CFD (Computational Fluid Dynamics) and Finite Element simulations to assess the performance of sandwich panel facades with PIR (polyisocyanurate) and mineral wool cores. The results indicate that the introduction of new openings had a significant influence on the internal temperatures of the building, leading to increases of up to 513%. In the wildfire scenario, the fire load increase was critical to the building, rising the heat release rate by up to 109.47% and temperatures by up to 59.27%. The combined effect of wind presence and terrain slope also emerged as a critical factor, significantly intensifying fire severity. Among the analyzed materials, mineral wool exhibited superior thermal performance, providing better insulation under high temperatures. Regarding the mechanical behavior, the connections were severely impacted by the heat in both the exposure scenarios evaluated. The findings contribute to understanding fire dynamics in industrial buildings and the key variables that influence the development of more severe events. Additionally, they highlight the need to study fire-resistant facade solutions, particularly for buildings located in wildland-urban interface areas, to ensure structural safety.

Keywords: fire; industrial; wildland-urban interface; façade; heat transfer; mechanical behavior.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Fases de desenvolvimento do incêndio em edifícios industriais	21
Figura 1.2 – Colapso das estruturas pós incêndio	22
Figura 2.1 – Mecanismos de ignição	26
Figura 2.2 – Área afetada por incêndios ocorridos na Europa entre 2007 - 2017 . . .	28
Figura 2.3 – Fachada do Grenfell Tower pós-incêndio	32
Figura 2.4 – Representação esquemática de um sistema de fachada composto por painéis ACP	33
Figura 2.5 – Tempo até a ignição e pico da taxa de liberação de calor para revestimentos em ACP	34
Figura 2.6 – Comportamento do sistema, sob aquecimento (a) Painel com tinta, (b) Painel com núcleo de classe A2 e 25 kW/m ² , (c) Painel com núcleo de classe A2 e 40 kW/m ² , (c) Painel com núcleo de classe B e 25 kW/m ² , and (d) Painel com núcleo de classe B e 40 kW/m ²	36
Figura 2.7 – Curvatura dos painéis a) ACP-A2 e b) ACP-B	37
Figura 2.8 – Painel ACP com núcleo interno em lã de rocha e poliisocianurato (PIR) pós-incêndio	38
Figura 2.9 – Aspectos relativos à ligação do painel à edificação. a) Detalhe da ligação do painel à edificação b) Queda do painel após rompimento na ligação . .	38
Figura 2.10–Detalhes do sistema de ensaio	40
Figura 2.11–Modelo das Duas Zonas - Representação gráfica da divisão do compartimento em duas camadas e temperaturas associadas (T_{inf} e T_{sup})	41
Figura 2.12–a) Modelo das duas zonas b) Modelo de campos	42
Figura 2.13–Modelagem CFD de um jato turbulento utilizando abordagens modelos RANS, LES e DNS	44
Figura 2.14–Curvas de Temperatura x tempo para a) Árvores; b) Arbustos	51
Figura 2.15–Fluxograma - Metodologias <i>one-way coupling</i> e <i>two-way coupling</i> . . .	53
Figura 2.16–Fluxograma - Etapas envolvidas no processo de integração CFD-FEM .	54
Figura 2.17–Abordagens de acoplamento por: (a) <i>Outputs</i> de fronteira - &BNDF e (b) Dispositivos - &DEVC	55
Figura 3.1 – Fluxograma com resumo das simulações que foram desenvolvidas neste trabalho	60
Figura 3.2 – Vistas frontal, lateral e superior da edificação	61
Figura 3.3 – Planta baixa e corte transversal. Dimensões em metros	62
Figura 3.4 – Imagem de satélite da região de Tocha, Portugal, com destaque à edificação estudada	62
Figura 3.5 – Edificação de estudo após os Grandes Incêndios de 2017, em Portugal .	63
Figura 3.6 – Medidas de proteção previstas para edifícios industriais em Minas Gerais	64

Figura 3.7 – Corpos de prova durante os ensaios: E7-PUR-A(<i>a, b, c</i>) e E8-PUR-B(<i>d, e</i>)	66
Figura 3.8 – Corpos de prova durante os ensaios: E3-PIR-A (<i>a, b</i>) e E4-PIR-B (<i>c, d, e</i>)	67
Figura 3.9 – Corpos de prova durante os ensaios: E5-OP-A(<i>a, b, c</i>) e E6-OP-B(<i>d, e, f</i>)	67
Figura 3.10–Comparação entre temperaturas medidas no termopar 2 em ensaios com a carga de incêndio interna e externa - Núcleo interno em lã de rocha . . .	68
Figura 3.11–Modelos utilizados para calibração com resultados experimentais	70
Figura 3.12–Curva de HRR adotada para a carga de incêndio	71
Figura 3.13–Comparação da propagação das chamas no ensaio experimental e simulação numérica - Fachada com núcleo interno em lã de rocha e carga de incêndio interna	72
Figura 3.14–Leituras - TP3, TP7, TP11 e TP15 - SIM_001_CALIB_INT_MW . .	73
Figura 3.15–Leituras - TP3, TP7, TP11 e TP15 - SIM_002_CALIB_INT_PIR . .	73
Figura 3.16–Leituras - TP3, TP7, TP11 e TP15 - SIM_003_CALIB_INT_PUR . .	74
Figura 3.17–Leituras - TP3, TP7, TP11 e TP15 - SIM_004_CALIB_INT_OP . .	74
Figura 3.18–Leituras - TP3, TP7, TP11 e TP15 - SIM_005_CALIB_EXT_MW . .	75
Figura 3.19–Leituras - TP3, TP7, TP11 e TP15 - SIM_006_CALIB_EXT_PIR . .	75
Figura 3.20–Leituras - TP3, TP7, TP11 e TP15 - SIM_007_CALIB_EXT_PUR . .	76
Figura 3.21–Leituras - TP3, TP7, TP11 e TP15 - SIM_008_CALIB_EXT_OP . .	76
Figura 3.22–Detalhes relativos ao modelo desenvolvido para a avaliação do incêndio em compartimento	78
Figura 3.23–Métodos para modelagem da carga de incêndio em engradado de madeira	80
Figura 3.24–Taxa de liberação de calor x tempo - Ensaio	82
Figura 3.25–Comparação da taxa de liberação de calor (HRR) x tempo, obtidos por ensaios realizados pelo NIST e simulações numéricas no FDS	82
Figura 3.26–Comparação entre as curvas de HRR para as cargas de incêndio (FL) de 200 e 500 MJ/m ²	83
Figura 3.27–Detalhe origem do sistema de coordenadas e divisão da edificação em re- giões	84
Figura 3.28–Posição relativa dos termopares TP04, TP06, TP08, TP10, TP12, TP14, TP16, TP19, TP20, TP25 e os ASTs A1.2 e A4.2 na edificação	86
Figura 3.29–Propagação do incêndio em função do tempo - Slice Y = 45 metros . .	87
Figura 3.30–Termopares Internos (h = 5,0m) - SIM_009(VA50_HF_OA_FL200)	87
Figura 3.31–Fração molar de oxigênio aos 7200 segundos de análise - Carga de incêndio de 200 MJ/m ²	88
Figura 3.32–Taxa de queima do combustível - t = 1000, 2000 e 3000 segundos . . .	89
Figura 3.33–Taxa de queima do combustível - t = 5000, 6000 e 7200 segundos . . .	90
Figura 3.34–Taxa de queima do combustível - t = 7200 segundos	91
Figura 3.35–Termopares Internos (h = 5,0m) - SIM_010(VA50_HF_OA_FL500)	92

Figura 3.36–Comparação das temperaturas registradas por ASTs nas fachadas oeste (AST A4.2) e norte (AST A1.2) para as cargas de incêndio de 200 MJ/m ² e 500 MJ/m ²	93
Figura 3.37–Propagação das chamas e <i>slices</i> de temperatura e fração molar de oxigênio – SIM_009(VA50_HF_OA_FL200)	94
Figura 3.38– a) Aberturas A_{H1} a A_{H4} na cobertura; b) Aberturas A1 a A4	95
Figura 3.39–Termopares Internos (h = 5,0m) - SIM_011(VA-50_HA_FL500)	96
Figura 3.40–Comparação entre TP8 e TP10 para SIM_010 (VA-50_HF_FL500) e SIM_011 (VA-50_HA_FL500)	96
Figura 3.41–Comparação das temperaturas registradas pelo AST A4.2 para SIM_009, SIM_010 e SIM_011	97
Figura 3.42–Termopares Internos (h = 5,0m) - SIM_012(VA100_HF_OA_FL200)	98
Figura 3.43–Termopares Internos (h = 5,0m) - SIM_013(VA100_HF_OA_FL500)	98
Figura 3.44–Comparação das temperaturas registradas pelo AST A4.2 para SIM_009, SIM_010, SIM_012 e SIM_013	99
Figura 3.45–Disposição da carga de incêndio para a simulações	100
Figura 3.46–Termopares Internos (h = 5,0m) - SIM_014(VA50_HF_OB_FL500)	100
Figura 3.47–Comparação das temperaturas registradas pelo AST A4.2 para SIM_010 e SIM_014	101
Figura 3.48–Modelo desenvolvido para estudo da propagação do incêndio em combustível vegetal	102
Figura 3.49– a) Vegetação nos arredores da edificação de estudo b) Árvore da espécie <i>Douglas Fir</i>	104
Figura 3.50–Comparação entre resultados numéricos e experimentais em árvores <i>Douglas Fir</i> de 2 metros	105
Figura 3.51–Taxa de perda de massa (MLR), em simulação no FDS, comparado com os ensaios de Mell <i>et al.</i> (2009) - Árvore de 2 metros e umidade de 14%	107
Figura 3.52–Taxa de liberação de calor para a SIM_015, com destaque a propagação das chamas nos pontos de interesse	111
Figura 3.53–Propagação do incêndio em diferentes condições: a) Terreno plano e sem vento; b) Terreno plano e com vento	112
Figura 3.54–Distribuição de velocidades ($v_v = 1,5$ m/s)	113
Figura 3.55–Distribuição de velocidades ($v_v = 5,0$ m/s)	113
Figura 3.56–Distribuição de velocidades ($v_v = 12$ m/s)	114
Figura 3.57–Propagação das chamas - Vento a 1,5 m/s	115
Figura 3.58–Propagação das chamas - Vento a 12 m/s	115
Figura 3.59–Taxa de liberação de calor, em função da velocidade do vento	116
Figura 3.60–Temperaturas registradas pelo AST_17, em função da velocidade do vento	116
Figura 3.61–Evolução do incêndio com o terreno composto por gramíneas	117

Figura 3.62–Taxa de liberação de calor, em função da vegetação	118
Figura 3.63–Temperaturas registradas pelo AST_17, em função da vegetação	118
Figura 3.64–Modelo desenvolvido para a avaliação da propagação das chamas em terreno inclinado	119
Figura 3.65–Propagação das chamas pelo terreno inclinado	119
Figura 3.66–Taxa de liberação de calor, em função da inclinação do terreno - Comparação SIM_020 e SIM_022	120
Figura 3.67–Propagação das chamas, em $t = 500$ segundos	120
Figura 3.68–Taxa de liberação de calor, em função da variação da carga de incêndio - Comparação SIM_015 e SIM_023	121
Figura 3.69–Temperaturas registradas pelo AST_17, em função do incremento da carga de incêndio	121
Figura 3.70–Temperaturas registradas pelo AST A4.2 nas simulações realizadas . .	123
Figura 3.71–Temperaturas registradas na fachada, em função da velocidade do vento (v_v $= 1,5$ m/s, $v_v = 5,0$ m/s e $v_v = 12,0$ m/s)	125
Figura 3.72–Influência da vegetação, inclinação do terreno e carga de incêndio nas tempe- raturas registradas na fachada	125
Figura 3.73–Influência da velocidade do vento e inclinação do vento nas temperaturas registradas na fachada	126
Figura 4.1 – Posições dos termopares no sistema de fachada	127
Figura 4.2 – Evolução temporal das temperaturas simuladas na superfície exposta da fachada (FDS)	128
Figura 4.3 – Seleção dos nós da superfície exposta da fachada para realização do processo de acoplamento CFD-FEM	129
Figura 4.4 – Dimensões dos painéis e detalhes de fixação, em milímetros	129
Figura 4.5 – a) Malha gerada para simulação da transferência de calor na parede principal; b) Elemento DC3D8	130
Figura 4.6 – Resultados de temperaturas para $t=1000$ s, na face exposta da parede principal, com núcleo interno em lã de rocha (a) Temperatura da superfície adiabática (AST), no FDS (b) Temperaturas nodais (NT11), no Abaqus	131
Figura 4.7 – a) Comparação entre medições experimentais realizadas por Paula <i>et al.</i> (2024a) e acoplamento de simulações [FDS + Abaqus] - Termopar 12 _{INT} ; b) Posições dos termopares no sistema de fachada	132
Figura 4.8 – Distribuição em área das temperaturas na parede principal - Núcleo interno em lã de rocha	133
Figura 4.9 – Distribuição em área das temperaturas na parede principal - Núcleo interno em PIR	134
Figura 4.10–Regiões de coleta de ASTs para os cenários de: a) Incêndio Interno; b) Incêndio Externo	135

Figura 4.11–Propagação das chamas pela edificação e temperatura (AST) coletada na face externa da fachada	136
Figura 4.12–Dimensões dos painéis e detalhes de fixação, em milímetros	137
Figura 4.13–Montagem dos painéis a) Vista Frontal; b) Vista traseira; c) Parafuso	138
Figura 4.14–Malha a) Vista Frontal; b) Vista traseira	138
Figura 4.15– a) Numeração dos painéis b) Numeração dos Parafusos	139
Figura 4.16–Análise de Transferência de Calor - Evolução das temperaturas máximas nos elementos - Exposição de Incêndio Interna	140
Figura 4.17–Pontos de integração 2x2x2 - Elemento DC3D8	140
Figura 4.18–Comparação entre os <i>outputs</i> do tipo NT11 e TEMP	141
Figura 4.19–Distribuição de Temperaturas na Fachada - Exposição de Incêndio Interna	142
Figura 4.20–Evolução temporal - Temperaturas dos parafusos - Níveis 1 e 2 - Exposição de incêndio interna	143
Figura 4.21–Evolução temporal - Temperaturas dos parafusos - Níveis 3 e 4 - Exposição de incêndio interna	143
Figura 4.22–Aquecimento do núcleo causado pelo parafuso	144
Figura 4.23–Distribuição de temperaturas do elemento de suporte - Exposição de Incêndio Interna	144
Figura 4.24–Propagação das chamas pela vegetação - SIM_023	145
Figura 4.25–Análise de Transferência de Calor - Evolução das temperaturas nos elementos - Exposição de Incêndio Externa	145
Figura 4.26–Distribuição de Temperaturas na Seção Transversal - Exposição de Incêndio Externa	146
Figura 4.27–Evolução temporal - Temperaturas dos parafusos - Níveis 1 e 2 - Exposição de incêndio externa	147
Figura 4.28–Evolução temporal - Temperaturas dos parafusos - Níveis 3 e 4 - Exposição de incêndio externa	147
Figura 4.29–Aquecimento causado pelo parafuso (<i>Temperaturas em °C; $t = 2500$ s</i>)	148
Figura 4.30–Distribuição de temperaturas do elemento de suporte - Exposição de Incêndio Externa (<i>Temperaturas em °C; $t = 2500$ s</i>)	148
Figura 4.31–Diagrama tensão x deformação - Aço S355	150
Figura 4.32–Detalhes da malha, com destaque à conformidade da malha	151
Figura 4.33–Apoios considerados na definição do modelo	151
Figura 4.34–Corte transversal na região do furo	152
Figura 4.35– a) Detalhe da malha definida na região do furo b) Malha definida para o parafuso	152
Figura 4.36–Instabilidades registradas nas chapas frontais a) Exposição de Incêndio Interna (<i>$t = 7200$ seg; Deformation Scale Factor = 2</i>); b) Exposição de Incêndio Externa (<i>$t = 2500$ seg; Deformation Scale Factor = 5</i>)	153

Figura 4.37–Instabilidades na chapa frontal - Exposição de incêndio Interna em $t = 7200$ segundos (<i>Deformation Scale Factor</i> = 1). Tensões em Pa	154
Figura 4.38–Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) na parede de fachada (SIM_028), com destaque a região crítica (<i>Deformation Scale Factor</i> = 1)	155
Figura 4.39–Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) no Parafuso-4 (SIM_028), com destaque a região crítica	155
Figura 4.40–Evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos 1 a 6 - Exposição de Incêndio Interna (<i>o "X"marca quando alguma região do parafuso atinge a tensão de ruptura</i>)	156
Figura 4.41–Evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos 7 a 12 - Exposição de Incêndio Interna (<i>o "X"marca quando alguma região do parafuso atinge a tensão de ruptura</i>)	156
Figura 4.42–Evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos 13 a 18 - Exposição de Incêndio Interna (<i>o "X"marca quando alguma região do parafuso atinge a tensão de ruptura</i>)	157
Figura 4.43–Evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos 19 a 24 - Exposição de Incêndio Interna (<i>o "X"marca quando alguma região do parafuso atinge a tensão de ruptura</i>)	157
Figura 4.44–Seção Transversal - Parafuso 4, com destaque a a) Tensões máximas (<i>em Pa</i>) b) Temperaturas máximas (<i>em °C</i>)	158
Figura 4.45–Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) ao elemento de suporte (SIM_028), com destaque a região crítica	158
Figura 4.46–Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa), com destaque para regiões críticas - SIM_028: a) Chapa traseira; b) Núcleo interno	159
Figura 4.47–Magnitude dos deslocamentos (em metros) dos painéis - $t = 600$ segundos	159
Figura 4.48–Detalhe da malha adotada para as simulações	160
Figura 4.49–Deslocamento U1 (em metros), aos 6000 segundos	160
Figura 4.50–Instabilidades registradas pelos painéis - Deslocamento U1 (em metros). <i>Deformation Scale Factor</i> = 2	161
Figura 4.51–Deformada da chapa frontal - P3 (SIM_029) (<i>Deformation Scale Factor</i> = 2). Tensões em Pa; $t = 2500$ s	162
Figura 4.52–Distribuição de tensões de Von Mises (<i>em Pa</i>) na parede de fachada (SIM_029), com destaque a região crítica (<i>Deformation Scale Factor</i> = 1)	162
Figura 4.53–Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) no Parafuso-7 (SIM_029), com destaque a região crítica	163
Figura 4.54–Evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos 1 a 6 - Exposição de Incêndio Externa (<i>o "X"marca quando alguma região do parafuso atinge a tensão de ruptura</i>)	163

Figura 4.55–Evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos 7 a 12 - Exposição de Incêndio Externa (<i>o "X"marca quando alguma região do parafuso atinge a tensão de ruptura</i>)	164
Figura 4.56–Evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos 13 a 18 - Exposição de Incêndio Externa (<i>o "X"marca quando alguma região do parafuso atinge a tensão de ruptura</i>)	164
Figura 4.57–Evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos 19 a 24 - Exposição de Incêndio Externa (<i>o "X"marca quando alguma região do parafuso atinge a tensão de ruptura</i>)	165
Figura 4.58–Seção Transversal - Parafuso 7, com destaque a a) Tensões máximas (<i>em Pa</i>) b) Temperaturas máximas (<i>em °C</i>)	165
Figura 4.59–Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) ao elemento de suporte (SIM_029), com destaque a região crítica	166
Figura 4.60–Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) no núcleo interno (SIM_029)	166
Figura 4.61–Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) na chapa traseira, com destaque a região crítica - SIM_029	167
Figura 4.62–Deslocamento U1 (em metros) para os painéis com exposição externa .	167
Figura 4.63–Deslocamento U1 (em metros) para os painéis com exposição externa - Enfoque nas ligações	168
Figura 4.64– a) Velocidade do fluido, obtida a partir de simulação no FDS; b) Temperatura registrada na face externa da fachada (Abaqus)	168
Figura 4.65–Comparação entre as deformadas obtidas pelo (a) experimento realizado por de Paula <i>et al.</i> (2024a); (b) Simulações numéricas no Abaqus	170
Figura 4.66–Observação pós-ensaio (E4-PIR-B) da estrutura de suporte	171
Figura A.1–Termopares 1 a 4 - SIM_001_CALIB_CFD_INT_MW	189
Figura A.2–Termopares 5 a 8 - SIM_001_CALIB_CFD_INT_MW	190
Figura A.3–Termopares 9 a 12 - SIM_001_CALIB_CFD_INT_MW	190
Figura A.4–Termopares 13 a 16 - SIM_001_CALIB_CFD_INT_MW	191
Figura A.5–Termopares 1 a 4 - SIM_002_CALIB_CFD_INT_PIR	191
Figura A.6–Termopares 5 a 8 - SIM_002_CALIB_CFD_INT_PIR	192
Figura A.7–Termopares 9 a 12 - SIM_002_CALIB_CFD_INT_PIR	192
Figura A.8–Termopares 13 a 16 - SIM_002_CALIB_CFD_INT_PIR	193
Figura A.9–Termopares 1 a 4 - SIM_003_CALIB_CFD_INT_PUR	193
Figura A.10–Termopares 5 a 8 - SIM_003_CALIB_CFD_INT_PUR	194
Figura A.11–Termopares 9 a 12 - SIM_003_CALIB_CFD_INT_PUR	194
Figura A.12–Termopares 13 a 16 - SIM_003_CALIB_CFD_INT_PUR	195
Figura A.13–Termopares 1 a 4 - SIM_004_CALIB_CFD_INT_OP	195
Figura A.14–Termopares 5 a 8 - SIM_004_CALIB_CFD_INT_OP	196
Figura A.15–Termopares 9 a 12 - SIM_004_CALIB_CFD_INT_OP	196

Figura A.16–Termopares 13 a 16 - SIM_004_CALIB_CFD_INT_OP	197
Figura A.17–Termopares 1 a 4 - SIM_005_CALIB_CFD_EXT_MW	197
Figura A.18–Termopares 5 a 8 - SIM_005_CALIB_CFD_EXT_MW	198
Figura A.19–Termopares 9 a 12 - SIM_005_CALIB_CFD_EXT_MW	198
Figura A.20–Termopares 13 a 16 - SIM_005_CALIB_CFD_EXT_MW	199
Figura A.21–Termopares 1 a 4 - SIM_006_CALIB_CFD_EXT_PIR	199
Figura A.22–Termopares 5 a 8 - SIM_006_CALIB_CFD_EXT_PIR	200
Figura A.23–Termopares 9 a 12 - SIM_006_CALIB_CFD_EXT_PIR	200
Figura A.24–Termopares 13 a 16 - SIM_006_CALIB_CFD_EXT_PIR	201
Figura A.25–Termopares 1 a 4 - SIM_007_CALIB_CFD_EXT_PUR	201
Figura A.26–Termopares 5 a 8 - SIM_007_CALIB_CFD_EXT_PUR	202
Figura A.27–Termopares 9 a 12 - SIM_007_CALIB_CFD_EXT_PUR	202
Figura A.28–Termopares 13 a 16 - SIM_007_CALIB_CFD_EXT_PUR	203
Figura A.29–Termopares 1 a 4 - SIM_008_CALIB_CFD_EXT_OP	203
Figura A.30–Termopares 5 a 8 - SIM_008_CALIB_CFD_EXT_OP	204
Figura A.31–Termopares 9 a 12 - SIM_008_CALIB_CFD_EXT_OP	204
Figura A.32–Termopares 13 a 16 - SIM_008_CALIB_CFD_EXT_OP	205

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Mudança de características dos depósitos	23
Tabela 2.1 – Resultados de testes de cone-calorímetro para revestimento em ACP	34
Tabela 2.2 – Taxa de liberação de calor máxima em cada composição ensaiada	35
Tabela 2.3 – Comparação de entre revestimentos de fachada em ACP-A2 e ACP-B	36
Tabela 3.1 – Programa de ensaios conduzidos pelo <i>InduForestFire</i>	66
Tabela 3.2 – Temperaturas máximas obtidas nos ensaios em função do material do núcleo interno e posição da carga de incêndio	68
Tabela 3.3 – Propriedades térmicas dos materiais utilizados na simulação	69
Tabela 3.4 – Propriedades térmicas adotadas para o engradado de madeira - <i>NIST/NRC Transient Combustibles</i>	70
Tabela 3.5 – Plano de Simulações para calibração do modelo no FDS	71
Tabela 3.6 – Simulações para avaliação da propagação do incêndio em compartimento	79
Tabela 3.7 – Coordenadas das aberturas A1 e A4	79
Tabela 3.8 – <i>Outputs</i> coletados	84
Tabela 3.9 – Lista de dispositivos utilizados nas simulações	85
Tabela 3.10–Coordenadas e resumo de aberturas por simulação	95
Tabela 3.11–Plano de Simulações - Incêndio de Interface Urbano-Florestal	103
Tabela 3.12–Parâmetros térmicos adotados	105
Tabela 3.13–Propriedades assumidas para a modelagem das árvores <i>Douglas Fir</i>	106
Tabela 3.14–Parâmetros de Rothermel-Albini adotados para a grama	107
Tabela 3.15–Valores sugeridos para o comprimento de Obukhov, L (m)	108
Tabela 3.16–Classificação do comprimento de rugosidade de Davenport-Wieringa (z_0)	109
Tabela 3.17– <i>Outputs</i> coletados	109
Tabela 3.18–Resumo dos dispositivos e <i>slices</i>	110
Tabela 3.19–HRR e Temperaturas no AST_17, sob diferentes velocidades de vento	117
Tabela 3.20–Avaliação percentual das temperaturas registradas pelo AST A4.2 nas simulações realizadas	123
Tabela 3.21–Avaliação percentual das temperaturas máximas registradas na fachada nas simulações realizadas - Incêndio florestal	124
Tabela 4.1 – Plano de simulações para a calibração da transferência de calor no Abaqus	130
Tabela 4.2 – Comparação entre resultados numéricos e experimentais para os painéis com núcleo interno em lã de rocha e PIR	132
Tabela 4.3 – Plano de simulações - Análises de transferência de calor	135
Tabela 4.4 – Plano de simulações - Comportamento mecânico	149
Tabela 4.5 – Definições de contato entre as <i>parts</i>	152
Tabela 4.6 – Divisão dos <i>steps</i> de análise - Exposição de Incêndio Interna	154
Tabela 4.7 – Divisão dos <i>steps</i> de análise - Exposição de Incêndio Externa	161

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACM	<i>Aluminum Composite Material</i>
ACP	<i>Aluminum Cladding Panels</i>
AST	Temperatura na superfície adiabática (<i>Adiabatic Surface Temperature</i>)
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional (<i>Computational Fluid Dynamic</i>)
DNS	Simulação Numérica Direta
EIFS	<i>Exterior Insulated Finished System</i>
ETICS	<i>External Thermal Insulation Composite System</i>
FDS	<i>Fire Dynamics Simulator</i>
FEM	Método dos Elementos Finitos (<i>Finite Element Method</i>)
FL	Carga de Incêndio (<i>Fire Load</i>)
FR	Resistente ao fogo (<i>Fire Resistant</i>)
FTMI	<i>Fire-thermomechanical Interface</i>
HRR	Taxa de Liberação de Calor (<i>Heat Release Rate</i>)
HRR_{max}	Taxa de Liberação de Calor Máxima
HRRPUA	Taxa de Liberação de Calor por Unidade de Área (<i>Heat Release Rate per Unit Area</i>)
LES	Simulação de Grandes Vórtices (<i>Large-eddy Simulation</i>)
MW	Lã de Rocha (<i>Mineral Wool</i>)
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
PE	Polietileno
PIR	Poliisocianurato
PUR	Poliuretano
RANS	Média de Reynolds da Equação de Navier-Stokes (<i>Reynolds-averaged Navier-Stokes equations</i>)
RoS	Taxa de propagação (<i>Rate of Spread</i>)
T_{max}	Temperatura máxima
TP	Termopar
$t_{T_{max}}$	Tempo até a temperatura máxima
VTT	<i>Technical Research Centre of Finland</i>
v_w	Velocidade do Vento
WUI	Interface Urbano-Florestal (<i>Wildland Urban Interface</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Justificativa	21
1.2	Objetivos	24
1.2.1	Objetivo Geral	24
1.2.2	Objetivos Específicos	24
1.3	Metodologia	24
1.4	Estrutura da Dissertação	25
2	REVISÃO DA LITERATURA	26
2.1	Incêndios de Interface Urbano-Florestal	26
2.1.1	Histórico	27
2.1.2	Fatores Influenciadores	29
2.1.2.1	Fatores climáticos	30
2.1.2.2	Vegetação	30
2.1.2.3	Fatores humanos	31
2.2	Comportamento ao Fogo da Fachada	31
2.3	Modelagem Numérica do Incêndio	40
2.3.1	Modelos de Uma e Duas Zonas	41
2.3.2	Modelo de Campos	42
2.3.2.1	<i>Fire Dynamics Simulator (FDS)</i>	44
2.3.3	Estudos Acerca da Modelagem Numérica de Incêndios em Compartimentos	44
2.3.4	Modelagem Numérica de Incêndio em Combustível Vegetal	46
2.3.4.1	Partículas Lagrangeanas	46
2.3.4.2	Level Set Mode	48
2.3.4.3	Modelo de degradação térmica para vegetação	49
2.3.4.4	Estudos Desenvolvidos na Área	50
2.4	Integração CFD-FEM	52
2.5	Síntese	57
3	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA PROPAGAÇÃO DO INCÊNDIO	59
3.1	Descrição do Caso de Estudo	59
3.1.1	O Edifício	61
3.1.2	Levantamento de medidas de segurança previstas pelas Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros	63
3.2	Calibração do Modelo com Dados Experimentais	65
3.2.1	Resumo dos ensaios experimentais realizados na Universidade de Coimbra (UC)	65
3.2.2	Simulações Numéricas para Calibração do FDS	68
3.3	Simulação Numérica do Incêndio em Compartimento	77

3.3.1	Modelagem da Carga de Incêndio	80
3.3.2	Resultados e Discussões	84
3.3.2.1	Carga de Incêndio	86
3.3.2.2	Fator de Abertura	94
3.3.2.3	Origem do incêndio	99
3.4	Simulação Numérica do Incêndio em Zona de Interface Urbano-Florestal	101
3.4.1	Carga de Incêndio	103
3.4.1.1	Árvores	104
3.4.1.2	Grama	107
3.4.2	Vento	108
3.4.3	Resultados e Discussões	109
3.4.3.1	Velocidade do vento	111
3.4.3.2	Vegetação	117
3.4.3.3	Inclinação do Terreno	119
3.4.3.4	Carga de Incêndio	120
3.5	Síntese	122
3.5.1	Incêndio em Compartimento	122
3.5.2	Incêndio em Zona de Interface Urbano-Florestal	124
4	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E MECÂNICO DA FACHADA	127
4.1	Calibração do Modelo com Dados Experimentais	127
4.1.1	Resultados e Discussões	131
4.2	Simulação Numérica da Transferência de Calor	135
4.2.1	Resultados e Discussões	139
4.2.1.1	Propagação de Incêndio Interna	139
4.2.1.2	Propagação de Incêndio Externa	144
4.3	Comportamento Mecânico da Fachada	148
4.3.1	Malha	150
4.3.2	Condições de Contorno	151
4.3.3	Resultados e Discussões	153
4.3.3.1	Propagação de Incêndio Interna	153
4.3.3.2	Propagação de Incêndio Externa	161
4.4	Síntese	169
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	172
5.1	Sugestão para Trabalhos Futuros	174
	REFERÊNCIAS	176
	APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO DO MODELO DE PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO EM PAREDES DE FACHADA COM DADOS EXPERIMENTAIS	189

A.1	SIM_001_CALIB_CFD_INT_MW	189
A.2	SIM_002_CALIB_CFD_INT_PIR	191
A.3	SIM_003_CALIB_CFD_INT_PUR	193
A.4	SIM_004_CALIB_CFD_INT_OP	195
A.5	SIM_005_CALIB_CFD_EXT_MW	197
A.6	SIM_006_CALIB_CFD_EXT_PIR	199
A.7	SIM_007_CALIB_CFD_EXT_PUR	201
A.8	SIM_008_CALIB_CFD_EXT_OP	203

1 INTRODUÇÃO

O comportamento do fogo em um compartimento envolve a interação de um conjunto complexo de processos (QUINTIERE, 1989), sendo influenciado por fatores como a geometria do compartimento, a ventilação, bem como o tipo e quantidade de combustível (KARLSSON; QUINTIERE, 1999).

A previsão das temperaturas em um compartimento durante o desenvolvimento de um incêndio é de fundamental importância para o estudo da segurança contra incêndios. Conforme apontado por Walton *et al.* (2016), essa análise permite prever a taxa de queima, a ignição de materiais e o início do flashover, o que contribui significativamente para orientar o projeto de segurança da edificação contra a ação térmica.

De uma maneira genérica, o desenvolvimento do incêndio no interior de um compartimento segue as seguintes etapas:

1. **Ignição.**
2. **Crescimento.** Após a fase inicial de ignição, o fogo se desenvolve principalmente devido às características do combustível, podendo ser descrito em termos da taxa de produção de energia e dos produtos gerados durante a combustão. Nessa fase, portanto, há reduzida influência das características do compartimento. Enquanto houver combustível e oxigênio em quantidade suficiente, o fogo continuará a se propagar, resultando no aumento da temperatura no compartimento.
3. **Flashover.** É comumente definido como a transição de um incêndio em crescimento para um incêndio totalmente desenvolvido, no qual todos os materiais inflamáveis no ambiente entram em ignição.
4. **Incêndio totalmente desenvolvido.** Nessa etapa, tem-se a maior taxa de liberação de calor (HRR). O combustível sofre pirólise a uma taxa superior ao que pode ser queimado com o oxigênio disponível.
5. **Resfriamento.** Quando todo o combustível for consumido, há uma diminuição da taxa de liberação de calor.

No contexto de edifícios industriais, contudo, a evolução dos incêndios diverge daquela observada em outras edificações (COSGROVE, 1996). Essa distinção deve ser cuidadosamente ponderada a fim de obter uma previsão mais assertiva das temperaturas internas. Em geral, são percebidos três estágios - Figura 1.1.

1. **Crescimento do incêndio.** O crescimento do incêndio ocorre até que seja atingida a taxa de liberação de calor máxima do combustível, ou em alguns casos, o *flashover*;

2. **Estado estacionário.** Essa fase pode ser influenciada tanto pela disponibilidade de combustível quanto pela ventilação. Em caso de derretimento das claraboias (frequentemente fabricadas com materiais poliméricos combustíveis) ou colapso da cobertura, há a possibilidade de um aumento na taxa de liberação de calor, devido ao acréscimo de oxigênio, alimentando o incêndio.

Cabe ressaltar que, em incêndios controlados pelo combustível, existe oxigênio suficiente para queimar todo o material disponível, fazendo com que o crescimento dependa apenas da quantidade de combustível. Nos incêndios controlados pela ventilação, mesmo havendo combustível, o crescimento é limitado pela quantidade insuficiente de oxigênio. Além disso, Janardhan e Hostikka (2021) pontuam haver uma tendência em incêndios controlados pela ventilação possuírem uma menor taxa de queima, quando comparados aos incêndios controlados pelo combustível, com uma mesma carga de incêndio.

3. **Resfriamento.** Após a queima do combustível, ou até mesmo o abafamento do mesmo em um eventual colapso, entra-se na fase de resfriamento, com redução da taxa de liberação de calor.

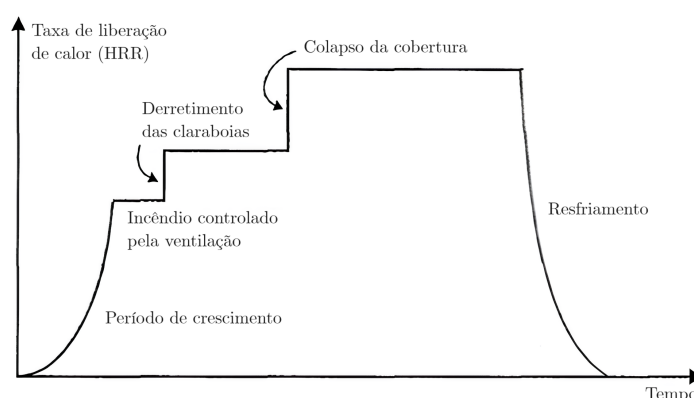


Figura 1.1: Fases de desenvolvimento do incêndio em edifícios industriais

Fonte: Adaptado de Cosgrove (1996)

1.1 Justificativa

Os incêndios em edifícios industriais representam uma séria ameaça à segurança de trabalhadores, população e às operações comerciais. Estes incidentes são potencialmente catastróficos, visto que essas edificações armazenam, usualmente, elevada carga de incêndio e substâncias inflamáveis, fatores que podem intensificar tanto a probabilidade quanto a gravidade de um incêndio.

As causas dos incêndios que acometem esse tipo de edificação são diversas. O levantamento elaborado pela Resilinc (2022) aponta como principais: falhas em equipamentos e

maquinários (59%), líquidos e gases inflamáveis (18%), curto-circuito em equipamentos elétricos (10%) e erros humanos (4%). Com relação à origem dos incêndios, o relatório destaca que 50% foram originados no interior da edificação, 18% na área de montagem, 15% em depósitos, 8% no exterior, 7% na casa de máquinas e 3% na cobertura.

De maneira específica em relação aos incêndios ocorridos em depósitos, a avaliação dos incidentes documentados pela NFPA (2022), nos Estados Unidos, durante o período de 2014 a 2020, evidenciou uma mudança no perfil dos incêndios. Notavelmente, embora tenha havido uma redução no número de casos registrados, o relatório revelou um incremento significativo nos danos diretos, em milhões de dólares, indicando uma tendência de incidentes de maior gravidade.

Essa severidade é ilustrada em três casos ocorridos em 2022, nos Estados Unidos, dos quais todos levaram ao colapso da estrutura - Figura 1.2.

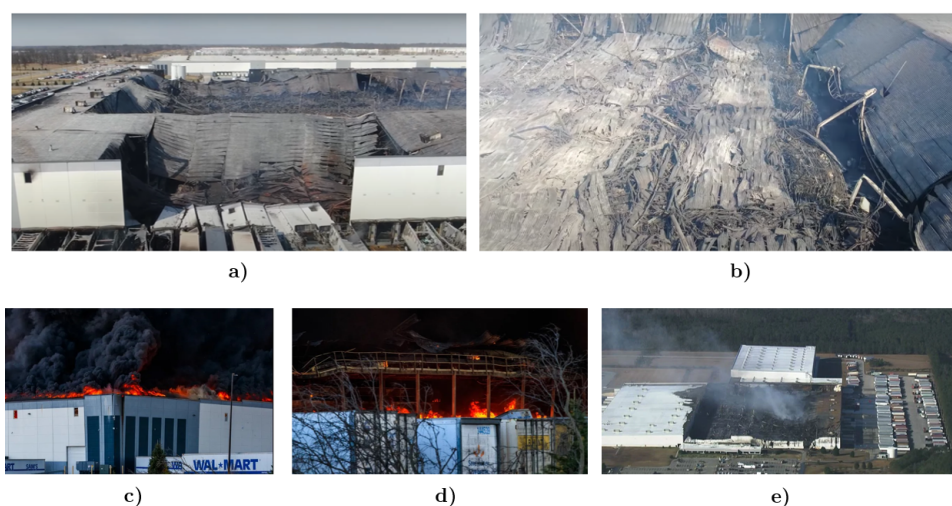


Figura 1.2: Colapso das estruturas pós incêndio

Fontes: a) e b) WTHR (2022); c) e d) Allen (2022); e) WITN (2022)

Essa preocupante tendência é respaldada pela análise da seguradora Zurich (MISHALL, 2022), que aponta alterações significativas na geometria e na carga de incêndio observadas nos depósitos contemporâneos, em comparação aos padrões de 60 anos atrás, conforme ilustrado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Mudança de características dos depósitos

Característica	60 anos atrás	Atualmente
Área	5.000 - 10.000 m ²	53.000 - 160.000 m ² , ou mais
Altura da edificação	6.1 - 7.6 m	13.7 m, ou mais
Altura do material armazenado	4.6 - 6.1 m	12.2 m, ou mais
Largura dos corredores	2.4 - 3.6 m	1.5 m
Materiais armazenados	Papel, metal, vidro	Plásticos, aerossóis e baterias de lítio
Localização	Urbano/Periferias	Zonas de Interface Urbano-Florestais

Fonte: Zurich (2022)

A partir da análise dos dados, observa-se um aumento de pelo menos 430% na área das edificações, de 5.000 - 10.000 m² há 60 anos, para 53.000 - 160.000 m², ou mais, atualmente. Além disso, a altura das edificações atuais é consideravelmente maior, com no mínimo 13,7 m, que permite um aumento na altura de alocação de materiais. Todos os pontos citados colaboram para aumentar a carga de incêndio e severidade das ocorrências.

Além disso, os materiais armazenados atualmente são potencialmente mais inflamáveis, incluindo plásticos, aerossóis e baterias de lítio, em comparação com materiais como papel, metal e vidro utilizados no passado. Essa mudança não apenas aumenta o risco de incêndio, mas também acelera a propagação das chamas. Outro fator que contribui para o desafio no controle de incêndios em edificações atuais é a localização em áreas rurais, onde há um menor controle das chamas em comparação com áreas urbanas.

Em função disso, destaca-se a relevância do estudo do incêndio em edifícios em zonas de interface urbano-florestal, dada a considerável capacidade destrutiva desses eventos e a complexidade associada ao seu controle por parte equipe de bombeiros.

Tendo em vista os pontos supracitados, os edifícios industriais abrigam uma complexa relação para a deflagração do incêndio. Contudo, apesar deste risco iminente, ainda é frequente a carência de medidas de proteção e projeto da edificação para este fim. Na Inglaterra, a seguradora Zurich alertou que os incêndios em edifícios industriais registraram, em 2022, um aumento de 26% em comparação com o ano anterior. Esse debate está pautado no fato de que, entre as 3400 ocorrências registradas entre 2010 e 2021, somente 51% das edificações contava com alarmes de incêndio e apenas 6% possuíam chuveiros automáticos (FSM, 2022). No Brasil, a tendência é análoga. Em um levantamento realizado pelo Instituto Sprinkler Brasil (ISB, 2024), nos últimos anos houve um aumento expressivo dos casos de incêndios em indústrias, 71% de 2019 para 2020 e 27% de 2020 para 2021.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é investigar o comportamento ao fogo de fachadas em painel sanduíche de edifícios industriais, em estrutura de aço submetido a incêndios de origem interna (*i.e. incêndio em compartimento*) e externa (*i.e. incêndio de interface urbano-florestal*). Pretende-se examinar a propagação do incêndio na edificação e o comportamento térmico e mecânico da fachada mediante a essa ação.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir ao objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Modelagem numérica da propagação do incêndio utilizando o *software* de simulação FDS (*Fire Dynamics Simulator*), para avaliar a evolução do incêndio em diferentes cenários;
2. Análise da influência das condições climáticas, tais como a velocidade do vento, na severidade e propagação de incêndios de interface urbano-florestal;
3. Análise comparativa de diferentes tipos de materiais de revestimento utilizados na fachada, avaliando a influência da escolha do núcleo interno do painel sanduíche nas temperaturas desenvolvidas;
4. Modelagem numérica do comportamento térmico e mecânico da fachada utilizando *software* de simulação Abaqus para prever a evolução da temperatura e deformações na estrutura durante o incêndio;

1.3 Metodologia

Buscando atingir aos objetivos estabelecidos, foram desenvolvidos, essencialmente, quatro modelos numéricos, divididos em três etapas:

1. **Modelos numéricos de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para a propagação do incêndio.** Utilizando o *software* FDS (*Fire Dynamics Simulator*), a propagação do incêndio em compartimento foi avaliada com base em parâmetros como: ventilação, carga de incêndio e origem da ignição. Já para o incêndio florestal, a influência da velocidade do vento, vegetação e inclinação do terreno.
2. **Modelo de transferência de calor para avaliação das temperaturas nos elementos.** Utilizando o *software* Abaqus, foi desenvolvido um modelo para a avaliação da transferência de calor na parede de fachada com base no aquecimento obtido pelas simulações de propagação do incêndio realizadas no FDS.

3. **Modelo mecânico para avaliar o comportamento da fachada.** Com base nas temperaturas obtidas nos diversos cenários analisados nas etapas anteriores, será estudado o comportamento mecânico do sistema de fachadas.

1.4 Estrutura da Dissertação

A seguir, são apresentados os capítulos que compõem esta dissertação, detalhando as etapas de desenvolvimento da pesquisa:

Capítulo 2: Revisão da Literatura. Este capítulo trata dos incêndios de interface urbano-florestal (WUI), característicos de zonas de transição entre áreas urbanas e vegetação. Nele, são apresentados um histórico, os fatores que influenciam a ignição e propagação desses incêndios e estudos relevantes. Discute-se também, o comportamento ao fogo de fachadas, com ênfase em análises numéricas e experimentais sobre materiais de isolamento e núcleo interno. Além disso, aborda-se a modelagem numérica de incêndios pelo modelo de campos, detalhando as formulações matemáticas. Por fim, explora-se o acoplamento de simulações numéricas CFD-FEM.

Capítulo 3: Simulação Numérica da Propagação do Incêndio. Este capítulo apresenta a análise da propagação do incêndio em dois cenários distintos. O primeiro cenário examina o incêndio no interior da edificação, considerando o impacto de variáveis como a carga de incêndio, o fator de aberturas e a localização da ignição na dinâmica do fogo. O segundo cenário aborda o incêndio na interface urbano-florestal, com base na modelagem da vegetação, composta por árvores e gramíneas. Nesse contexto, avalia-se a influência de fatores como a carga de incêndio, a inclinação do terreno e a velocidade do vento. Como resultado, são apresentados os efeitos na taxa de liberação de calor e nas temperaturas registradas na superfície da fachada da edificação analisada.

Capítulo 4: Simulação Numérica do Comportamento Térmico e Mecânico da Fachada. Neste capítulo, é descrito o processo de integração de simulações CFD e Elementos Finitos. Esse procedimento é utilizado para as simulações termomecânicas subsequentes. Para tanto, os cenários de propagação do incêndio previamente analisados no Capítulo 3, serão utilizados como *input*. Assim, é realizada a análise de transferência de calor, e obtidas as temperaturas nos diversos elementos que compõem a fachada. Em seguida, essas temperaturas são utilizadas como entrada para a análise de comportamento mecânico. Neste capítulo é ainda descrito o processo de definição do modelo e a etapa de calibração com resultados experimentais na literatura para a garantia da confiabilidade do modelo desenvolvido.

Capítulo 5: Considerações Finais. Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Incêndios de Interface Urbano-Florestal

A complexa relação entre áreas urbanas e ambientes florestais frequentemente dá origem a um desafio crítico e multifacetado: os incêndios de interface urbano-florestal (WUI - *Wildland-Urban Interface*). Esses eventos resultam em cenários de alto risco e dificuldades na contenção e controle.

Essa área é caracterizada por ser a zona de transição entre terras não-ocupadas (áreas naturais, como florestas, matas e vegetação densa) e o desenvolvimento urbano (USFA, 2023). Essa definição abrange o conceito de "interface urbano-florestal" (*urban-wildland interface*), inicialmente proposto por Butler (1974):

Qualquer ponto onde o combustível que alimenta um incêndio florestal muda de combustível natural para combustível produzido pelo homem (urbano). [...] Para que isso aconteça, o incêndio florestal deve estar próximo o suficiente para que suas partículas incandescentes (*firebrands*) entrem em contato com as partes inflamáveis da estrutura.

A partir dessa definição conclui-se, que para haver a ignição de uma estrutura, não é necessário contato efetivo com as chamas, visto que pode ocorrer por intermédio de partículas incandescentes (*firebrands*). Existem, portanto, três mecanismos para a propagação das chamas em incêndios florestais: contato direto com as chamas, radiação térmica ou contato de partículas incandescentes (Figura 2.1) (SUZUKI; MANZELLO, 2021). Esses mecanismos estão intrinsecamente relacionados aos processos de condução, radiação e convecção.

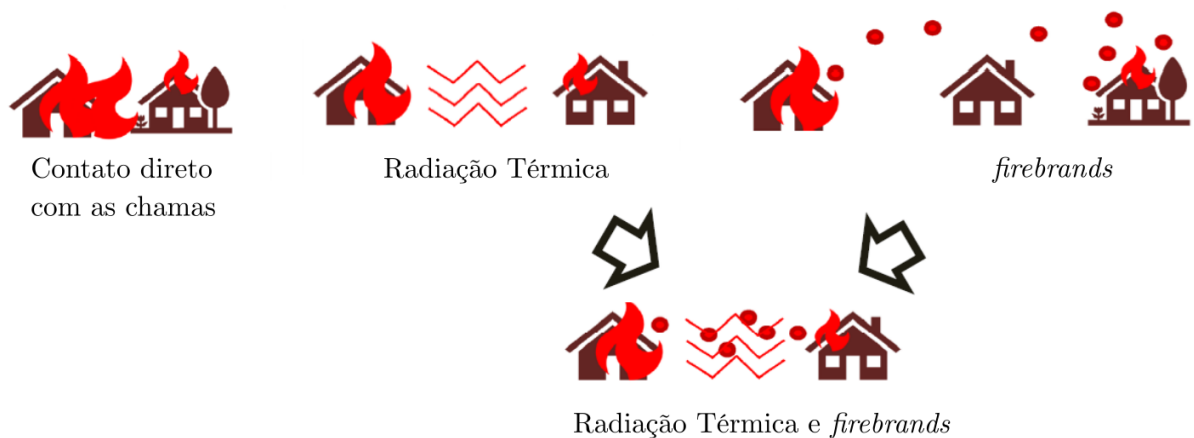


Figura 2.1: Mecanismos de ignição

Fonte: Adaptado de Suzuki e Manzello (2021)

As partículas incandescentes (*firebrands*), são produzidas a partir da queima de combustível vegetal (MANZELLO *et al.*, 2008). A quantidade, dimensões e velocidade inicial das *firebrands*, dependem da espécie da árvore (ALMEIDA *et al.*, 2021). Essas partículas desempenham um papel crucial no fenômeno conhecido como *spotting*, a principal causa de ignição em estruturas localizadas em áreas de interface urbano-florestal (MANZELLO *et al.*, 2007).

O *spotting* ocorre quando as partículas incandescentes são elevadas verticalmente por correntes de convecção e, em seguida, transportadas pelo vento para áreas distantes do foco original do incêndio, podendo iniciar novos focos em estruturas ou vegetação (FERNANDEZ-PELLO, 2017). Como ponto de atenção, a ameaça de ignição por *spotting* aumenta proporcionalmente com a extensão do incêndio, uma vez que as *firebrands* de longo alcance podem chegar até 40 km, consoante Wadhwani *et al.* (2022). Isso ocorre porque, quanto maior o incêndio, maior a coluna de fumaça produzida e mais rápida a velocidade vertical e radial do vento produzido. Por conta disso, é facilitado o transporte de partículas de maior dimensão, e à uma maior distância (TARIFA *et al.*, 1965; PITTS, 1991; KOO *et al.*, 2010).

Medidas de proteção das edificações, como a manutenção de uma distância adequada entre a estrutura e a vegetação, além do uso de materiais de revestimento para fachadas e coberturas com resistência ao fogo, contribuem para a redução dos riscos de ignição por partículas (GAO, 2005; PAULA *et al.*, 2023).

2.1.1 Histórico

Os incêndios florestais têm se tornado frequentes a uma escala global, com significativos danos humanos, ambientais, sociais e econômicos. Entre 2002 e 2016 foi registrada uma média anual de 423 milhões de hectares queimados (United Nations Environment Programme, 2022). Tal cenário, no entanto, têm tendência ao agravamento, previsto aumento máximo de 50% até 2100 (ONU, 2022).

Nas últimas décadas foram registradas uma série de ocorrências com elevado número de vítimas (HAYNES *et al.*, 2020), como os incêndios de 2009, na Austrália, com 173 mortes (HAYNES *et al.*, 2010), os incêndios em Pedrógão Grande, Portugal (2017), com 66 fatalidades (MOLINA-TERRÉN *et al.*, 2019) e em Mati, Grécia (2018), com 99 mortos (MOLINA-TERRÉN *et al.*, 2019).

Ao investigar o histórico desses incêndios, é possível avaliar tendências sazonais, áreas geográficas de maior incidência e as consequências que esses eventos têm sobre as comunidades afetadas, o meio ambiente e às construções. Portanto, a seguir, serão descritos com mais detalhes, ocorrências nos Estados Unidos, Europa, Austrália e Brasil.

Estados Unidos

Em dados fornecidos pelo *Calfire*, Departamento Florestal e de Incêndios da

Califórnia, entre os 20 eventos classificados como mais destrutivos, nove deles ocorreram entre 2017-2022 (CALFIRE, 2022b). Ao longo dos anos, motivado por fatores climáticos, é observada uma tendência de aumento da área atingida pelos incêndios florestais no estado.

Como um dos fatores que corrobora para a grande frequência dessas ocorrências na Califórnia, o estado abriga uma variedade de climas em sua extensão, embora predomine o clima mediterrâneo. Em função das características inerentes a ele, sobretudo de verões mais secos, implica em um maior risco de incêndio florestal nessa região.

Europa

Os incêndios florestais atingem a Europa anualmente, com maior incidência nos países localizados ao sul. Estes países (*Portugal, Espanha, França, Itália e Grécia*), entre 2000 e 2012, registraram uma média anual de 55 mil incêndios florestais, atingindo 410 mil hectares (SCHMUCK *et al.*, 2013). Uma análise anual dos casos, entre 2007 e 2017, por país, é apresentada na Figura 2.2. A partir da análise do gráfico, podem ser verificados ciclos de casos de maior escala a cada 5 anos. E, seguindo essa tendência, 2022 foi um ano com extensos danos: “*The EU 2022 wildfire season was the second worst on record*” — A temporada de incêndios florestais de 2022 na União Europeia foi a segunda pior registrada (COMMISSION, 2023).

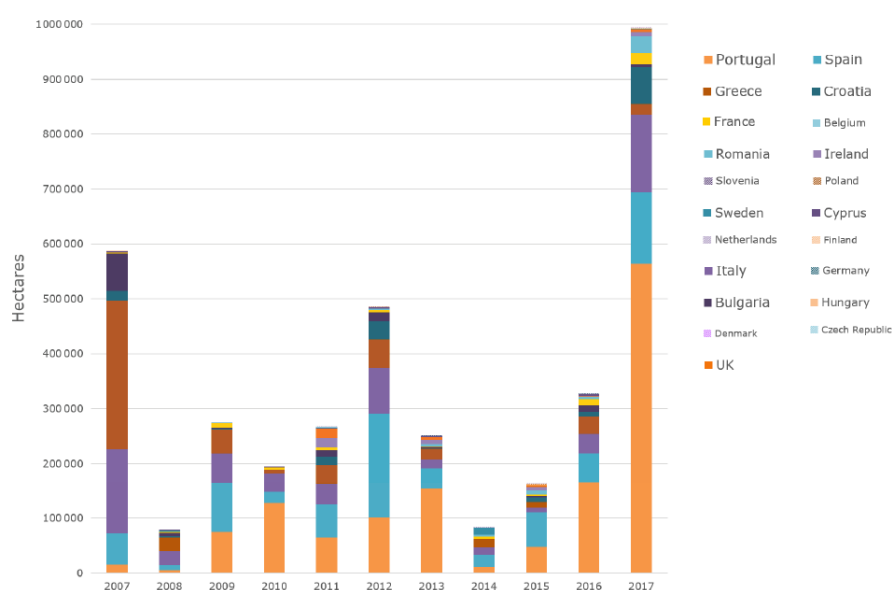


Figura 2.2: Área afetada por incêndios ocorridos na Europa entre 2007 - 2017

Fonte: Costa *et al.* (2020)

Na Figura 2.2, pode ser visto um caso de expressiva dimensão em Portugal em 2017, o incêndio mais letal da história do país. Agravado pela presença do furacão Ophelia, o incêndio consumiu 563 674 hectares (JESUS *et al.*, 2017), sendo 1,4% desta área em zona urbana. Especificamente com relação aos edifícios industriais, 521 empresas foram afetadas, com um prejuízo estimado de 275 milhões de euros (GUERREIRO *et al.*, 2018).

Para efeitos comparativos, tal área afetada pelo incêndio em 2017 é superior ao acumulado dos seis anos anteriores (JESUS *et al.*, 2017).

Um fator de influência substancial é o clima mediterrâneo presente na porção sul do continente. Esse tipo de clima se caracteriza por períodos de precipitação, que contribuem para o crescimento da vegetação (resultando em um acúmulo maior de material combustível suscetível a incêndios), alternados por períodos de seca, que favorece a ocorrência de incêndios (PAUSAS, 2004).

Austrália

A Austrália, tem registrado nos últimos anos incêndios de grande escala. Notavelmente, em 2019-2020, o *Black Summer* foi um incêndio de proporções sem precedentes na história do país (DAVEY; SARRE, 2020). Nessa ocorrência, a área afetada foi de 10,2 milhões de hectares, cerca de 86% superior ao recorde anterior (Incêndios de 1951/52 em Nova Gales do Sul, com 5,467 milhões de hectares) (DAVEY; SARRE, 2020; MORGAN *et al.*, 2020).

As condições climáticas da Austrália, que apresentam um aumento médio anual de 1,4 °C desde 1910, juntamente com extensas áreas de Eucalipto — uma espécie com alta taxa de propagação de incêndios — colaboram para a ocorrência de tais casos (CANADELL *et al.*, 2021).

Brasil

No Brasil, ainda não há uma definição clara de áreas urbanas e rurais, o que dificulta a identificação e o registro de ocorrências em zonas de interface urbano-florestal (SAKAKIBARA, 2019). Embora os incêndios nessas zonas ocorram em menor proporção em relação aos países previamente citados, o Brasil ainda ocupa o quarto lugar entre as nações com maior perda de área vegetal devido a queimadas (GLOBALFORESTWATCH, 2023) e é o maior na América Latina (OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Acerca de incêndios florestais no Brasil, Oliveira *et al.* (2022) destaca que o Pantanal é a região com maior número de ocorrências (45%), seguida do Cerrado (34%), Amazônia (9%), Mata Atlântica (8,2%), Caatinga (5,6%) e Pampa (1,8%). Os autores afirmam ainda que a queima para desmatamento é a maior causa para a origem de incêndios de grandes proporções no país.

2.1.2 Fatores Influenciadores

Atualmente, com o crescente desenvolvimento urbano e sua consequente expansão em direção às áreas florestais, os incêndios de interface urbano-florestal se tornaram mais frequentes e mais perigosos (RIBEIRO *et al.*, 2020). A literatura científica tem fornecido evidências robustas sobre as causas dos incêndios florestais. Diversos estudos apontam a influência de fatores naturais, como condições climáticas desfavoráveis, como altas

temperaturas, baixa umidade do ar e ventos fortes, que propiciam a propagação rápida das chamas (REGO *et al.*, 2021; PYNE, 2015; ROGERS *et al.*, 2020).

Estudos preveem a ocorrência de fenômenos de maior gravidade motivados por mudanças climáticas e aumento de gases de efeito estufa, atuação antropogênica e alterações no uso e ocupação do solo (CANADELL *et al.*, 2021; United Nations Environment Programme, 2022; ABATZOGLOU; WILLIAMS, 2016; MASSON-DELMOTTE *et al.*, 2021). Como consequência, a cada 1 °C de aumento nas temperaturas médias, Madadgar *et al.* (2020) argumenta haver 30% de aumento na probabilidade de ocorrer um incêndio que supere o ano anterior.

2.1.2.1 Fatores climáticos

O clima é um parâmetro impulsionador de incêndios florestais, propício a elevadas variações (ABATZOGLOU; KOLDEN, 2013; JOLLY *et al.*, 2015). Assim sendo, a temperatura, umidade relativa, precipitação e velocidade do vento são intervenientes na intensidade e velocidade de evolução do incêndio (JOLLY *et al.*, 2015). Os parâmetros mencionados atuam influenciando diretamente a vegetação (combustível de um incêndio florestal). Assim, em função da umidade, um determinado tipo de vegetação pode tornar-se mais suscetível à ignição (COSTA *et al.*, 2020).

E em consequência dessa relação intrínseca, os incêndios florestais são diretamente impactados pelas mudanças climáticas. As temperaturas mundiais têm registrado aumento de 0,2 °C por década desde 1970 (HANSEN *et al.*, 2010), propiciando alterações no regime de chuvas e influenciando diretamente os incêndios florestais (TRENBERTH *et al.*, 2003). Nos locais com aumento das precipitações, é observado um crescimento da vegetação (combustível), colaborando para que, nos períodos de seca, aumente-se o risco de incêndios florestais de maior gravidade (CORELOGIC, 2021; SYPHARD *et al.*, 2022; WILLIAMS *et al.*, 2019).

2.1.2.2 Vegetação

A vegetação desempenha um papel crucial na dinâmica dos incêndios florestais, influenciando tanto a propagação quanto a intensidade das chamas. Diante disso, Fernandes *et al.* (2016) estabelece uma relação entre as condições climáticas, a disponibilidade de combustível e a ocorrência de incêndios de grandes proporções. No que diz respeito à vegetação, os autores apontam que 43,9% da vegetação queimada por grandes incêndios era composta por Pinus (*P. pinaster*), enquanto 30,6% apresentava uma mistura de Pinus e Eucalipto.

Segundo Fernandes (2009), essa seleção de espécies possui um maior potencial para o fenômeno do *crowning*, que descreve o estágio de um incêndio florestal em que as chamas se propagam para a copa das árvores. Além disso, essas espécies apresentam uma maior

velocidade de propagação do incêndio e contribuem para a ocorrência de incêndios de maior intensidade.

2.1.2.3 Fatores humanos

Em adição aos fatores previamente citados, a ação humana é substancialmente relevante a essa análise, provocando incidentes com grande perda de vida, além de impactos ambientais, econômicos e sociais (ALEXANDRE *et al.*, 2016).

A ação antrópica se configura como um fator significativo de análise em incêndios de interface urbano-florestal. Na Europa, os incêndios florestais foram majoritariamente causados pela ação humana. Em um levantamento realizado em 19 países do continente (*Bulgária, Croácia, Chipre, Estônia, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Itália, Letônia, Lituânia, Polônia, Portugal, România, Eslovênia, Espanha, Suíça, Suécia*), 96% dos incêndios florestais até 2016 foram de origem humana, seja ele acidental ou proposital (COMMISSION *et al.*, 2018).

A fonte humana de ignição de incêndios foi também preponderante na Califórnia, sendo responsável por originar pelo menos 95% dos casos registrados (KEELEY; SYPHARD, 2018).

Para além do supracitado, a supressão dos incêndios impacta diretamente na modificação do regime dos incêndios. A constante supressão de incêndios naturais em florestas de pinheiros da espécie *Pinus ponderosa*, no norte do Colorado, Estados Unidos, durante o século XX, provocou mudanças substanciais na região. O incêndio, que era essencial ao ciclo de vida desse ecossistema, passou a ser combatido. Como consequência, ao longo dos anos houve aumento da densidade de árvores na região, que contribuiu para que depois houvesse incêndios de grandes proporções, o que não era historicamente registrado (VEBLEN *et al.*, 2000; SCHOENNAGEL *et al.*, 2004). Nesse cenário, o gerenciamento de risco mais assertivo visa controlar os fatores intervenientes em um incêndio florestal, de forma planejada, evitando a supressão constante de incêndios (COCHRANE; BOWMAN, 2021).

2.2 Comportamento ao Fogo da Fachada

A seleção criteriosa do sistema de fachada e seus materiais em zonas susceptíveis a incêndios florestais é de suma importância para a mitigação dos riscos associados a essas ocorrências. A adoção de soluções construtivas que incorporem materiais com bom desempenho ao fogo auxilia na proteção das edificações frente à propagação de chamas.

Recentemente, a importância desse componente em situação de incêndio tornou-se evidente. No incêndio da Grenfell Tower, em Londres (2017), a presença de revestimentos inflamáveis na fachada contribuiu para a rápida propagação das chamas pelo edifício

(MCKENNA *et al.*, 2019) - Figura 2.3. Esse evento trágico evidenciou o papel crítico desempenhado pelos sistemas de vedação externos na dinâmica do incêndio e fomentou uma série de estudos voltados à compreensão do comportamento desses elementos construtivos e dos materiais de revestimento quando expostos ao fogo.



Figura 2.3: Fachada do Grenfell Tower pós-incêndio

Fonte: Tran *et al.* (2018)

Um incidente recente, em Valência - Espanha, em fevereiro de 2024, expõe que, mesmo após ocorrências de grandes proporções, como foi o Grenfell Tower, ainda há uma latente necessidade de adaptações necessárias nas edificações já existentes para a garantia da segurança ao fogo. No edifício residencial espanhol, 10 pessoas perderam a vida após o incêndio ser rapidamente propagado pela edificação através da fachada. Especialistas consultados pela agência de notícias Reuters (ZAFRA; KIYADA, 2024), em setembro afirmam que as chamas se propagaram rapidamente pela fachada ventilada, fabricada em painel sanduíche com núcleo interno em polietileno (PE). O uso desse tipo de revestimento é proibido em novas edificações com mais de 18 pavimentos no país, assim como em outros países do continente (Inglaterra, França, Alemanha, Portugal, Suécia e Finlândia). Contudo, ainda está presente em edificações antigas. Na Inglaterra, o Ministério da Habitação, Comunidades e Governo Local (*Ministry of Housing, Communities and Local Government*) implementou, em 2019, um programa de financiamento para a troca de revestimentos de fachada em ACM que pudessem representar um risco para a segurança ao fogo de edificações residenciais do setor privado, com mais de 18 pavimentos (INGLATERRA, 2020). Essa política, portanto, avança na garantia da segurança das edificações frente ao incêndio e deveria ser uma prática presente em um número maior de países, dado o potencial destrutivo deste tipo de solução de fachada.

A crescente utilização de soluções como polímeros para revestimento externo de edificações, são opções viáveis, tendo em vista o aspecto econômico, estético, isolamento térmico e resistência a intempéries (KHAN *et al.*, 2021). No entanto, sob a ótica do incêndio, esse tipo de revestimento, com materiais inflamáveis, pode ser um risco à

segurança (CHEN *et al.*, 2019). Portanto, considerando as propriedades térmicas dos materiais de revestimento da fachada, é importante ressaltar o potencial desses elementos de intensificar o incêndio, alimentando-o ativamente, ou permitindo a entrada das chamas no interior da construção (BONNER *et al.*, 2020; CHEN *et al.*, 2019).

Com base em um levantamento realizado em Portugal, Lopes *et al.* (2022) destaca as soluções comuns para sistemas de fachada em edifícios industriais, que incluem: paredes inteiramente em alvenaria, paredes compostas por alvenaria e painéis sanduíche, além de revestimentos em chapas metálicas (*single steel sheathing*). Outra solução é o sistema EIFS - *Exterior Insulated Finished System*, também conhecido como ETICS - *External Thermal Insulation Composite System*. Estudos sobre o comportamento ao fogo desse tipo de revestimento são apresentados por Baptista *et al.* (2024) e Zhou *et al.* (2018).

Os painéis de revestimento em alumínio, ACP (*Aluminum Cladding Panels*), também conhecidos como ACM (*Aluminum Composite Material*), ou painel sanduíche, constitui um revestimento composto por chapas de alumínio unidas a um núcleo polimérico central. Para além dos materiais utilizados para o revestimento, que se for propício ao derretimento e inflamável, pode provocar a rápida propagação do incêndio.

Outros fatores são apontados como influenciadores. Entre eles, a largura da cavidade entre o isolamento e o painel externo (Figura 2.4), bem como a instalação de barreiras contra incêndio entre os níveis e a ligação entre os painéis (YUEN *et al.*, 2021).

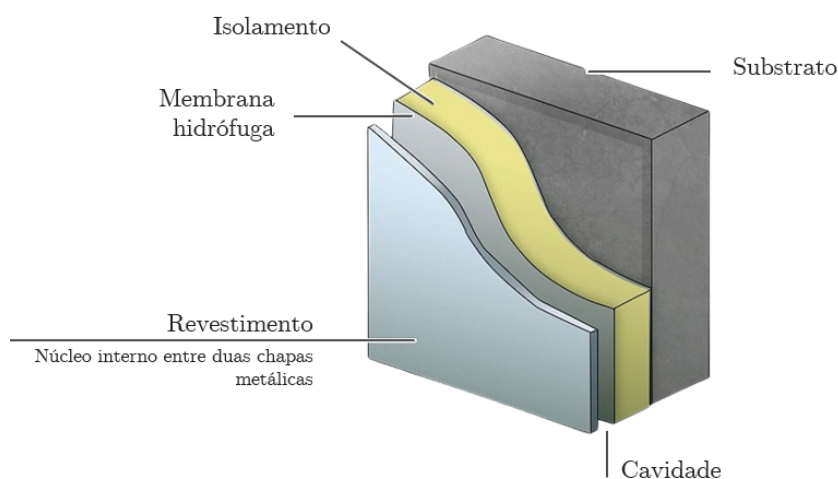


Figura 2.4: Representação esquemática de um sistema de fachada composto por painéis ACP

Fonte: Adaptado de Robinson e Gordon (2017)

Para avaliar a influência do material do núcleo interno, Yuen *et al.* (2021) realizou um estudo baseado no banco de dados da Universidade de Queensland (MCLAGGAN *et al.*, 2019). No conjunto de revestimentos elencados na Tabela 2.1, o ACP 03 e ACP

07, ambos com núcleo em PE (polietileno), tiveram os piores desempenhos em ensaio de cone-calorímetro, com significativo pico na taxa de liberação de calor (HRR), em comparação aos demais. Isso implica em um maior risco, em caso de incêndio. Não obstante, estes dois revestimentos ainda registraram aumento da HRR, sob um maior fluxo de calor durante o ensaio - Figura 2.5b.

Tabela 2.1: Resultados de testes de cone-calorímetro para revestimento em ACP

ID	Material do núcleo interno	ID	Material do núcleo interno
ACP 01	Predominantemente inorgânico	ACP 06	Núcleo do tipo caixa de ovo com adesivo de polímero em ambos os lados - S1 - lado perfilado
ACP 02	Acetato-vinilo de etileno (EVA) com núcleo retardante (FR)	ACP 07	Polietileno (PE) e enchimento inorgânico
ACP 03	Núcleo em polietileno (PE)	ACP 09	Polietileno (PE) modificado com vinil/acetato (VA) e núcleo retardante de fogo
ACP 04	Composição predominantemente orgânica rica em aromáticos, como polímeros à base de celulose e/ou fenólicos	ACP 10	Sistema em <i>honeycomb</i> entre folhas de alumínio conectados por um adesivo à base de poliuretano contendo um enchimento inorgânico
ACP 05	Polietileno modificado com acetato de vinila (PE-VA) e núcleo ignífugo	ACP 11	Polietileno (PE) e núcleo retardante (FR)

Fonte: Adaptado de Yuen *et al.* (2021)

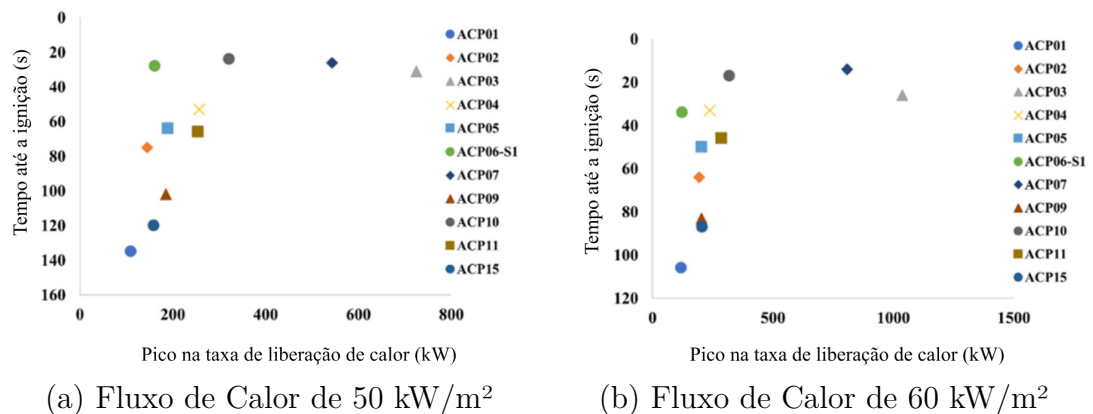


Figura 2.5: Tempo até a ignição e pico da taxa de liberação de calor para revestimentos em ACP

Fonte: Adaptado de Yuen *et al.* (2021)

Salientando a influência do material do isolamento, Thevega *et al.* (2022), em experimentos com corpo de prova normatizado pela BS 8414 (BSI, 2017), atesta que, em painel ACM, com núcleo interno em PE e isolamento em PIR (poliisocianurato), a temperatura na parede é 21,48% superior ao isolamento com lã de rocha (820°C e 675°C). Quando comparada a temperatura no isolamento, a primeira solução é 340% superior ao obtido com o isolamento em lã de rocha (220°C e 50°C).

O estudo do comportamento ao fogo da composição (núcleo interno e isolamento) foi realizado também por Guillaume *et al.* (2018). Foram testadas nove combinações, variando o material do núcleo interno — classificado como resistente à chamas (FR), não combustível (A2 - (CEN, 2018)) ou de polietileno (PE) — e o tipo de isolamento térmico: poliisocianurato (PIR), lã de rocha (MW) ou espuma fenólica (K15). A Tabela 2.2 apresenta a taxa de liberação de calor máxima obtida experimentalmente em cada composição. Destaca-se a significativa diferença nos casos com ACM-PE (1566%, 2014% e 2417% superior, respectivamente, quando comparado com o ACM-A2).

Tabela 2.2: Taxa de liberação de calor máxima em cada composição ensaiada

	ACM-FR			ACM-A2			ACM-PE		
	PIR	K15	MW	PIR	K15	MW	PIR	K15	MW
HRR máxima (kW)	397	280	298	306	244	194	5100	5159	4883

Fonte: Adaptado de Guillaume *et al.* (2018)

Agarwal *et al.* (2021) avaliou o comportamento ao fogo de um sistema de fachada, utilizando um corpo de prova de 16 pés (4,87 metros) normatizado pela ANSI/FM 4880 (ANSI, 2017). Nos ensaios, foi estudada a influência do material do núcleo interno, o isolamento e a espessura da cavidade. Todos ensaios com polipropileno e polietileno foram interrompidos aos 4 minutos, devido a propagação das chamas acima do limite superior do corpo de prova (critério de parada do ensaio), tendo até esse momento, atingido elevada taxa de liberação de calor (> 6 MW) e chamas de mais de 7,6 metros. Os corpos de prova com núcleo em material resistente ao incêndio (FR) tiveram melhor desempenho, independente do material de isolamento utilizado, com menor pico da taxa de liberação de calor. Neste estudo, os autores concluem que a influência do núcleo interno foi superior ao isolamento nos quesitos avaliados.

Khan *et al.* (2021) avalia condições semelhantes, ao analisar experimentalmente 5 composições, sendo: painel com uma camada de pintura, revestimentos de classe A2 e B (material de combustibilidade limitada - (CEN, 2018)), sob fluxo de calor de 25 e 40 kW/m². Nos revestimentos de classe A2 e B (Figura 2.6b - Figura 2.6e), seja com 25 ou 40 kW/m², foi observado o descolamento da chapa de alumínio, expondo o núcleo interno ao incêndio. Em todas as 4 situações analisadas foi constatado descolamento, queima ou carbonização do núcleo interno.

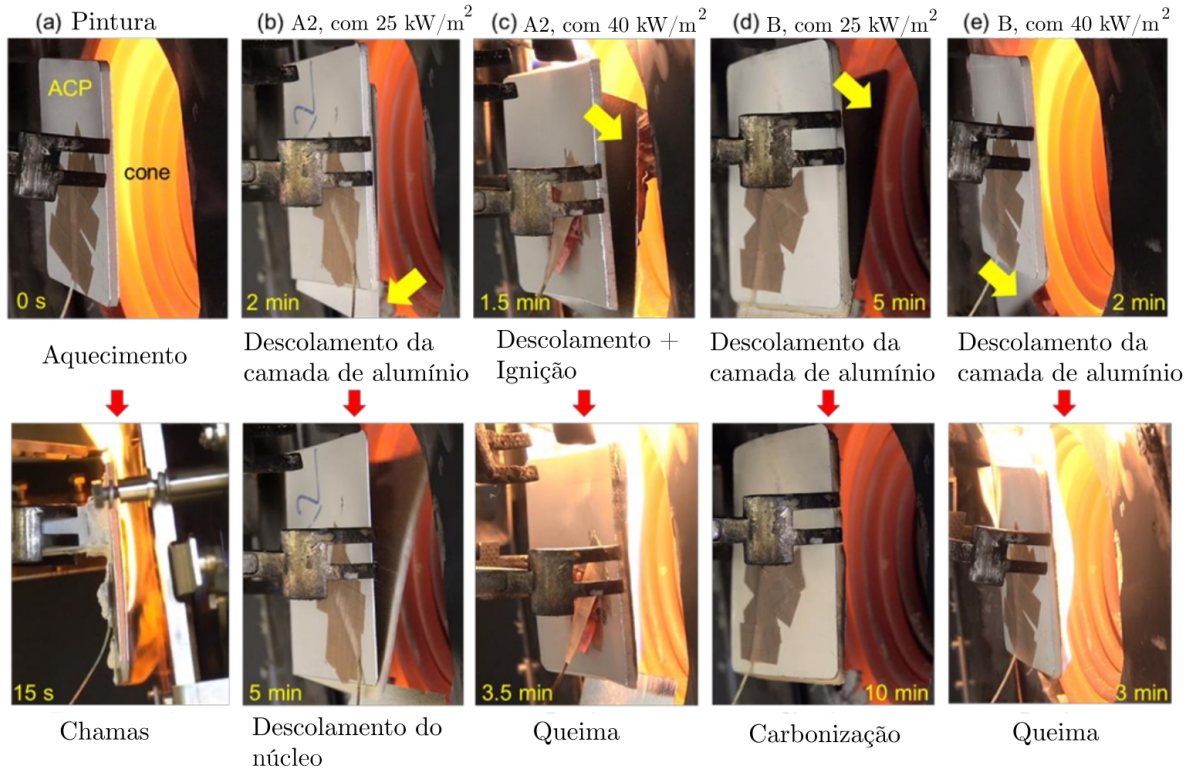


Figura 2.6: Comportamento do sistema, sob aquecimento (a) Paineis com tinta, (b) Paineis com núcleo de classe A2 e 25 kW/m^2 , (c) Paineis com núcleo de classe A2 e 40 kW/m^2 , (d) Paineis com núcleo de classe B e 25 kW/m^2 , and (e) Paineis com núcleo de classe B e 40 kW/m^2

Fonte: Adaptado de Khan *et al.* (2021)

A Tabela 2.3 apresenta resultados adicionais dos experimentos, comparando as duas classes - A2 e B. A partir da análise dos dados, o revestimento ACP-A2, apesar de ser de uma classe de reação ao fogo superior, apresentou um tempo inferior para ignição, além do descolamento do núcleo interno, que podem implicar em riscos ao incêndio. Portanto, os autores destacam que a classificação apenas baseada na combustibilidade ou reação ao fogo do núcleo interno é insuficiente para avaliar globalmente o desempenho do sistema de fachada.

Tabela 2.3: Comparação de entre revestimentos de fachada em ACP-A2 e ACP-B

Parâmetro	ACP-A2	ACP-B
Irradiação mínima para ignição	-	Menor
Tempo para ignição	Inferior	-
Descolamento do núcleo interno	Sim	Não
Pico de HRR	-	Maior
Duração das chamas	Superior	-
Perda de massa do núcleo interno	-	Superior

Fonte: Khan *et al.* (2021)

O estudo desenvolvido por Khan *et al.* (2021) avalia ainda aspectos que impactam diretamente na integridade estrutural dos painéis submetidos ao incêndio.

Descolamento. As chapas de alumínio são coladas ao núcleo interno por um adesivo a base de polímeros. Khan *et al.* (2021) destaca que, durante o experimento, o adesivo que unia o núcleo à chapa frontal teve perda de resistência e descolou quando a face externa da chapa de alumínio atingiu os 400°C.

Para a chapa traseira, o processo foi influenciado pela composição do núcleo interno. No caso do ACP-B, a maior proporção de polietileno (PE) contribuiu significativamente para a prevenção da separação do núcleo, pois este material se fundiu sob o calor, melhorando a adesão entre as camadas. Por outro lado, para o ACP-A2, a proporção de PE é insuficiente para auxiliar na aderência entre a chapa e o núcleo, especialmente quando exposto a taxas de aquecimento menores. Como resultado, o núcleo interno descola gradualmente, acelerado pelo seu peso próprio.

Curvatura devido ao aquecimento. O gradiente térmico originado durante o aquecimento pode provocar curvaturas e flexão do painel. Como a face frontal apresenta uma temperatura consideravelmente superior à traseira, a expansão diferencial é responsável por este efeito, ilustrado na Figura 2.7.

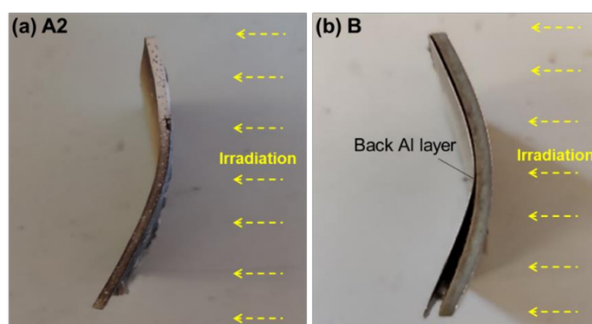


Figura 2.7: Curvatura dos painéis a) ACP-A2 e b) ACP-B

Fonte: Khan *et al.* (2021)

O impacto desses fenômenos, que afetam estruturalmente os painéis, foi analisado por Pyl *et al.* (2012) por meio de ensaios realizados em um galpão de escala real com dimensões de 8 x 20 x 3,2 metros. Os resultados indicaram deformações significativas nos painéis com núcleo de poliisocianurato (PIR), acompanhada da carbonização do material, conforme evidenciado na Figura 2.8b. Esse comportamento contrastou com o desempenho observado nos painéis revestidos com lã de rocha, os quais apresentaram resultados substancialmente superiores (Figura 2.8a).



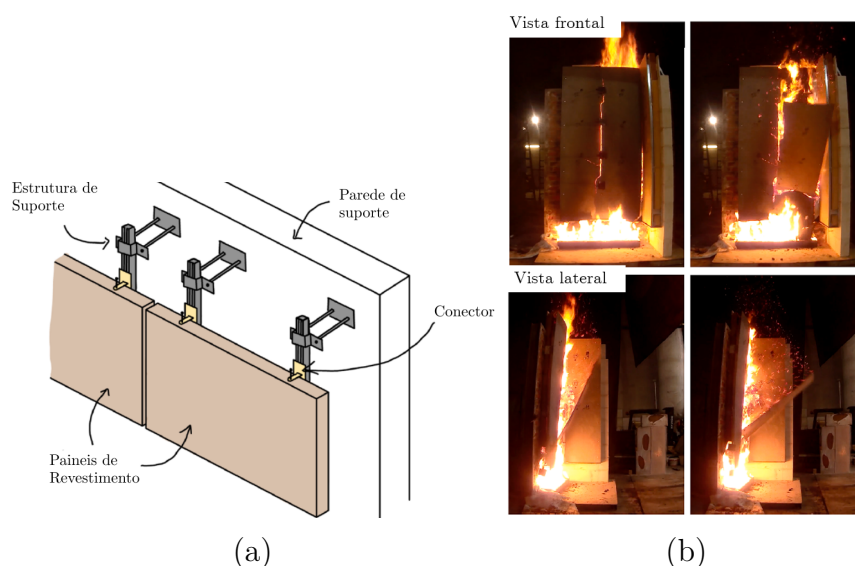
(a) Lã de rocha

(b) Poliisocianurato (PIR)

Figura 2.8: Painel ACP com núcleo interno em lã de rocha e poliisocianurato (PIR) pós-incêndio

Fonte: Pyl *et al.* (2012)

No que diz respeito ao aspecto mecânico, Lugaresi *et al.* (2022) reuniu estudos relacionados à falha mecânica de painéis submetidos ao incêndio. A cavidade existente entre o isolamento e o revestimento facilita a ocorrência de um efeito chaminé. Esse aquecimento, que incide diretamente na ligação (Figura 2.9a), pode ser crítico para a integridade da fachada. Bonner (2021), em seus experimentos, obteve resultados semelhantes, conforme ilustrado na Figura 2.9b. Adicionalmente, os elementos que atuam na transferência das cargas da fachada à estrutura principal também podem ser afetados pelo incêndio. Durante o aquecimento, a expansão gera um aumento da tensão na ligação, que pode romper por esforço cortante ou pelo arrancamento dos fixadores, provocando a queda do painel (LUGARESÍ *et al.*, 2022).



(a)

(b)

Figura 2.9: Aspectos relativos à ligação do painel à edificação. **a)** Detalhe da ligação do painel à edificação **b)** Queda do painel após rompimento na ligação

Fonte: a) Adaptado de Lugaresi *et al.* (2022) b) Adaptado de Bonner (2021)

Visando a caracterização do comportamento ao fogo de paredes de fachada, as

normas técnicas ISO 13785, Parte 2 (ISO, 2002), BS 8414, Partes 1 e 2 (BSI, 2020; BSI, 2017), LEPİR 2 (FRANÇA, 1970), SP Fire 105 (SP, 1994), ANSI FM 4880 (ANSI, 2017) e NFPA 285 (NFPA, 2012) preveem metodologias que podem ser empregadas para o ensaio em escala real.

Conforme Paula *et al.* (2022), elas se diferenciam sobretudo em relação a:

1. Características dos métodos o ensaio;
2. Dimensões e especificidades do corpo de prova;
3. Valores de referência para calibração;
4. Critérios para avaliação e classificação dos danos nos corpos de prova.

Em especial para a BS 8414-2 (BSI, 2020), a normatização descreve o sistema de ensaio para paredes de fachadas não estruturais. O corpo de prova previsto é apresentado na Figura 2.10, composto por duas paredes ortogonais, com 2,6 x 9,7 m e 1,5 x 9,7 m.

A carga de incêndio é composta por um engradado de madeira, de 1,5 x 1,0 m por 1,0 m de altura. Os barrotes que o compõem devem ter uma seção quadrada de (50 ± 2) mm e comprimentos de (1500 ± 5) mm e (1000 ± 5) mm. A densidade da madeira deve ser entre 400 e 650 kg/m³ e umidade de 10 a 15%.

O teste tem duração de 60 minutos, sendo a fonte de calor extinta 30 minutos após a ignição. São admitidos como critérios de parada as chamas ultrapassarem o nível 3 e também caso seja verificado risco de segurança às pessoas presentes.

Como principal observação pós-ensaio está a extensão dos danos, tanto verticais quanto horizontais. Também é registrada a propagação das chamas no revestimento, tanto durante a realização do ensaio, quanto após a extinção.

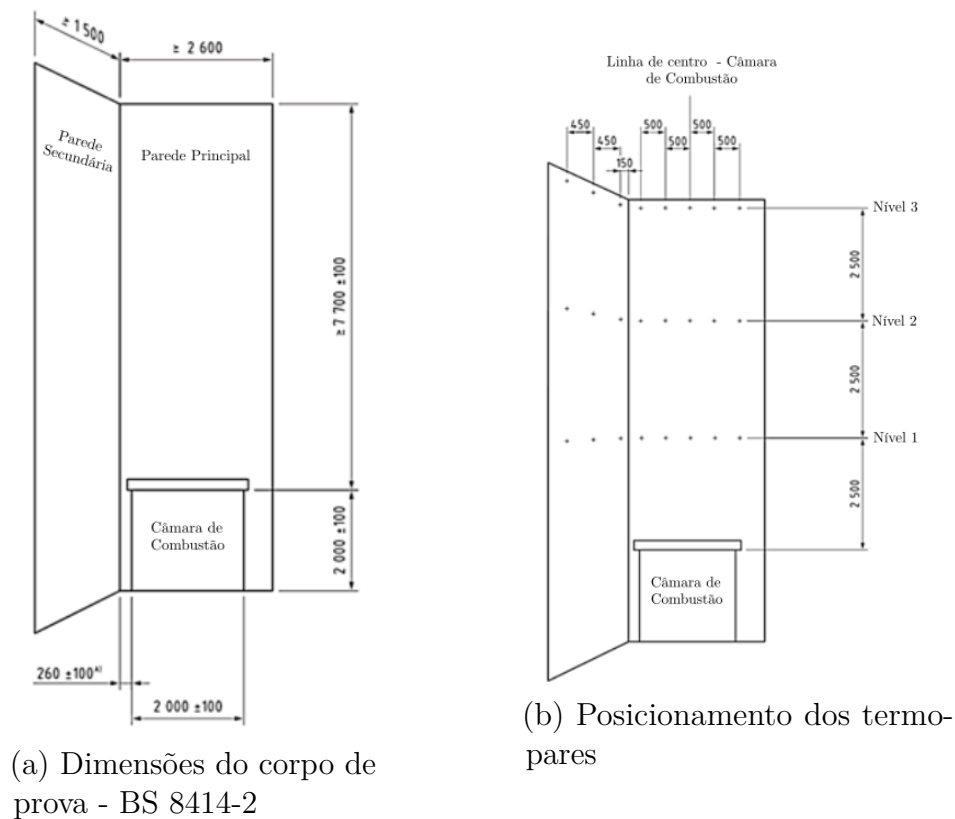


Figura 2.10: Detalhes do sistema de ensaio

Fonte: BSI (2020)

2.3 Modelagem Numérica do Incêndio

Para estimar propriedades físicas em um compartimento submetido ao incêndio, como temperatura, concentração de gases ou pressão interna, é possível a aplicação de procedimentos experimentais ou a condução de simulações numéricas para conceber um modelo do incêndio. Nesse contexto, formulações matemáticas permitem prever o incêndio, sejam elas utilizando abordagens não determinísticas ou determinísticas, desempenhando um papel fundamental como instrumento para tais análises (JANSSENS, 2000).

Os modelos não determinísticos podem ser classificados em dois tipos: (1) probabilísticos e (2) estocásticos. O primeiro tipo trata o resultado considerando uma variável atingindo valores aleatórios com base em uma distribuição probabilística. Já o segundo, pode ser tratado de forma "dinâmica", uma vez que a variável aleatória em análise evolui com o tempo, sendo ainda associada a uma distribuição probabilística (RAMACHANDRAN, 1995).

Em contrapartida, os modelos determinísticos resolvem formulações matemáticas que descrevem o comportamento físico e químico do incêndio (JANSSENS, 2000). Esta abordagem é comumente aplicada em *softwares* de simulação e inclui exemplos como o modelo de duas zonas e o modelo de campos.

2.3.1 Modelos de Uma e Duas Zonas

O modelo de Uma Zona é uma abordagem simplificada para a modelagem de incêndios em compartimentos, que se baseia na premissa de que todo o compartimento de análise possui propriedades físicas constantes. Sendo assim, os estudos apontam a utilização deste modelo em situações pós-flashover, situação na qual o incêndio está totalmente desenvolvido (PORTERIE *et al.*, 2022).

O modelo das Duas Zonas consiste na divisão de um volume de controle em duas camadas, cujas propriedades físicas como temperatura, pressão e concentração de gases são admitidas constantes (PEACOCK, 1993; SUZUKI *et al.*, 2002). Em termos de temperatura, considera-se que a camada inferior possua menor temperatura, enquanto a superior, mais elevada - Figura 2.11.

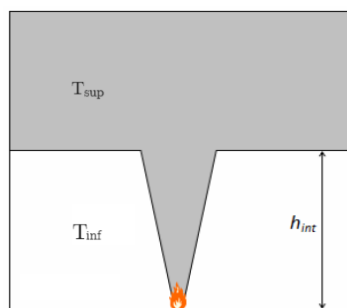


Figura 2.11: Modelo das Duas Zonas - Representação gráfica da divisão do compartimento em duas camadas e temperaturas associadas (T_{inf} e T_{sup})

Fonte: Adaptado de Verstockt *et al.* (2011)

Os resultados obtidos pelo modelo são determinados a partir de equações que preveem a mudança de entalpia e de massa em função do tempo, derivadas a partir de equações de conservação de energia, massa e da lei dos gases ideais (FORNEY; MOSS, 1994; ISO, 2013; PEACOCK, 1993).

A utilização deste modelo possui como vantagem um menor custo computacional. Todavia, apresenta algumas limitações. A primeira, que ele é passível de ser empregado apenas em compartimentos, ou seja, sua aplicação não é válida para incêndios florestais. Segunda, em compartimentos de maiores dimensões, estudos apontam que a simplificação admitida como premissa inicial do modelo (camadas com propriedades físicas constantes) pode se tornar mais distante da realidade. Isso porque a camada mais quente pode não ser uniforme (JOHANSSON, 2021). Conforme recomendação dada pela ISO TS 13447 (ISO, 2013), o fogo deve ser de no mínimo 0,1 kW por m³ para uma maior garantia de estabelecimento de uma camada quente.

Portanto, com base no exposto, para as simulações numéricas realizadas nesse trabalho, será utilizado o modelo de campos, abordado com mais detalhes na Seção 2.3.2.

2.3.2 Modelo de Campos

O modelo de campos descreve a dinâmica do incêndio com maior precisão, sendo baseado no modelo de dinâmica dos fluidos computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) (YEOH; YUEN, 2009). Nesse modelo, a geometria é discretizada em elementos volumétricos e, de maneira esquemática, essa abordagem, comparada com o modelo das duas zonas, pode ser observado na Figura 2.12.

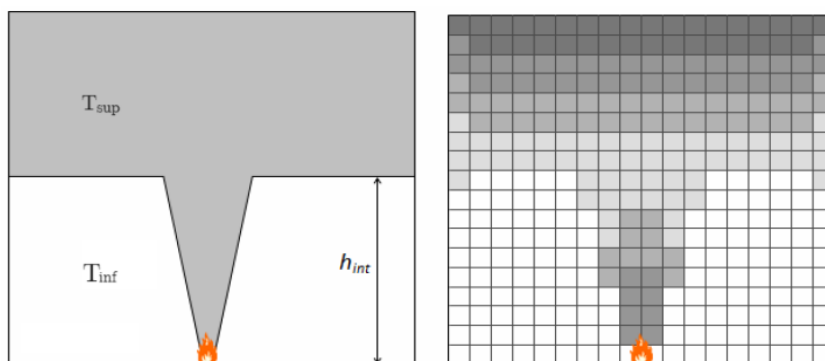


Figura 2.12: a) Modelo das duas zonas b) Modelo de campos

Fonte: Adaptado de Verstockt *et al.* (2011)

Como base teórica, o ponto de partida do modelo reside em um sistema de equações diferenciais parciais acopladas, consideradas “exatas”. Elas descrevem o equilíbrio entre as diversas influências que afetam o transporte de massa, momento, espécies químicas e energia durante o incêndio e ao longo do compartimento que o contém. Contudo, resolver de maneira rigorosa essas equações, abrangendo completamente os complexos processos envolvidos, exige uma capacidade de processamento incompatível à maioria dos computadores atuais. Em virtude disso, torna-se necessário simplificar o conjunto de equações por meio de alguma forma de modelagem (COX; KUMAR, 2002).

Os fluxos turbulentos são modelados com maior precisão a partir da abordagem de simulação numérica direta (DNS), que resolve numericamente as equações de Navier-Stokes de maneira direta, com a malha refinada ao ponto de capturar a turbulência no fluido (ZHIYIN, 2015). Contudo, com elevado custo computacional. Como uma solução, algumas abordagens lidam com a Média de Reynolds da Equação de Navier-Stokes (RANS, do inglês *Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*), que parte das equações exatas e realiza a média temporal, resolvendo as equações contínuas de maneira discreta sob o domínio de interesse (COX; KUMAR, 2002).

Após operações de decomposição de Reynolds (BAUER *et al.*, 2000) e subsequentes operações, é obtido o sistema de equações diferenciais RANS que governam a velocidade média e o campo de pressão de um fluido compressível em escoamento turbulento. O desafio de solucionar o sistema de equações de Navier-Stokes envolve, essencialmente, a

resolução do termo referente às tensões de Reynolds ($\rho u'_i u'_j$), gerado do cálculo da média temporal. E, para isso, os modelos de turbulência são empregados para o fechamento (COX; KUMAR, 2002).

A partir da aplicação desses modelos de turbulência é possível calcular a viscosidade turbulenta (μ_t), termo que se relaciona às tensões de Reynolds através Equação 2.1, proposta por Boussinesq em 1877 (BOUSSINESQ, 1877). Nela é possível observar a relação das tensões de Reynolds com a viscosidade turbulenta, o gradiente de velocidade média, a densidade e a energia cinética turbulenta.

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{1}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.1)$$

onde,

ρ é a densidade;

$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$ é a energia cinética de turbulência por unidade de massa;

δ_{ij} é o delta de Kronecker ($\delta_{ij} = 1$, para $i = j$; $\delta_{ij} = 0$, para $i \neq j$)

Em alternativa às equações RANS, nos anos 60, foi desenvolvido por Smagorinsky o modelo de Simulação de Grandes Vórtices (LES, do inglês *Large-eddy Simulation*) (SMAGORINSKY, 1963), inicialmente para a simulação de fenômenos atmosféricos. No modelo LES, os movimentos em grande escala (grandes vórtices) do fluxo turbulento são calculados de maneira direta (utilizando o modelo DNS), enquanto apenas nos movimentos de pequena escala (SGS, *sub-grid scale*) são utilizados modelos similares ao RANS (COX; KUMAR, 2002). Portanto, a utilização dessa abordagem resulta em uma redução significativa nos custos computacionais, em comparação com a Simulação Numérica Direta (DNS), sendo uma das vantagens notáveis do LES sobre os métodos tradicionais (MCGRATTAN *et al.*, 1998; ZHOU *et al.*, 2000; ZHIYIN, 2015).

O resultado de simulações com os modelos RANS, LES e DNS são comparados na Figura 2.13. Nela percebe-se que o LES se aproxima mais ao resultado do cálculo direto (DNS) que o RANS.

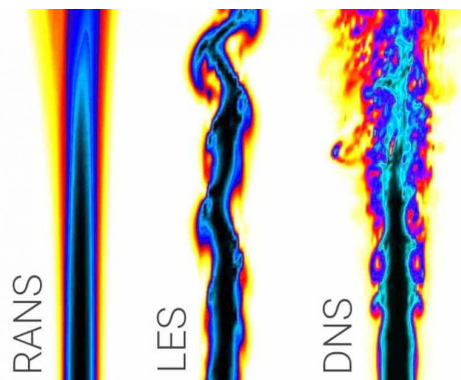


Figura 2.13: Modelagem CFD de um jato turbulento utilizando abordagens modelos RANS, LES e DNS

Fonte: Simulations (2023)

2.3.2.1 *Fire Dynamics Simulator (FDS)*

O FDS (*Fire Dynamics Simulator*) é um *software*, desenvolvido em Fortran pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*), que permite a modelagem de incêndio utilizando o modelo de campos. Sua fundamentação teórica é baseada nas expressões formuladas por Rehm e Baum (1978), sendo aplicado o modelo numérico de Simulação de Grandes Vórtices (LES - Large Eddy Simulation) para resolver as equações de Navier-Stokes para escoamentos a baixa velocidade (números de Mach baixos) (ARCOS, 2018).

2.3.3 Estudos Acerca da Modelagem Numérica de Incêndios em Compartimentos

Nesta seção, serão apresentados estudos relacionados às simulações numéricas de incêndio, utilizando o modelo de campos, e discutidas as principais conclusões, bem como a comparação com resultados experimentais, quando aplicável.

Como parte do processo de validação do *software*, o NIST conduziu uma série de comparações entre os resultados numéricos e experimentais (MCGRATTAN *et al.*, 2022). Foram conduzidos 15 ensaios (HAMINS *et al.*, 2006), com potências de 350 kW a 2,2 MW e dimensões de 21,7 x 7,1 e 3,8 m de altura, com boa previsão de temperatura da camada quente, fluxo de calor e concentração de espécies gasosas.

Todavia, ainda há poucos estudos acerca da modelagem de incêndio de edifícios industriais, em escala real, tendo em vista sua grande dimensão e o custo computacional requerido para tais simulações. Vigne *et al.* (2021) realizou experimentos em um compartimento cúbico de 20 m de lado, para avaliar a influência da dinâmica da fumaça, utilizando 4 fontes de calor, com taxa de liberação de calor combinada de 5,2 MW. Como conclusão dos experimentos, os autores pontuam a obtenção de condições mais severas, quando comparadas com a presença de apenas uma fonte de calor. Em relação às análises numéricas, os autores afirmam ter obtido bons resultados para a previsão de temperaturas

em regiões distantes da fonte de calor. Contudo, discrepâncias maiores, na ordem de 20%, foram obtidas para a previsão da interface da camada de fumaça.

Yang *et al.* (2011) descreve experimentos e simulações acerca do incêndio em depósitos, avaliando a propagação do incêndio e características da combustão. Foi modelada uma prateleira de 2,6 x 1,1 m e 4,85 m de altura, com caixas para replicar um depósito. As temperaturas e a chama obtida na simulação numérica foram comparadas com o experimento, sendo obtidos bons resultados, além da formação de chaminé, em conformidade ao ensaio. Ainda com relação à depósitos, o trabalho desenvolvido Trapp *et al.* (2015) discorre sobre a influência de chuveiros automáticos no desenvolvimento do incêndio originado neste tipo de edificação e propõe uma metodologia para determinação da posição ideal desses dispositivos para a contenção do incêndio.

Em um estudo mais amplo, McGrattan *et al.* (2022) comparou resultados de diversos ensaios experimentais ao obtido em simulações no FDS para validação do *software*. As situações analisadas cobrem uma gama de aplicações. A partir da utilização do *software*, foram obtidos bons resultados, quando comparados com dados experimentais. Em especial para incêndios de escala industrial, McGrattan *et al.* (2013) cita que, sabida a HRR, o modelo é capaz de prever as velocidades e temperatura do fluido com diferenças da ordem de 5 a 20%, quando comparados aos resultados experimentais. Essa faixa se deve, sobretudo, à precisão da malha.

A modelagem de incêndio em compartimentos utilizando engradados de madeira (*wood cribs*) foi estudada por Koutlas (2006). No trabalho, o autor simulou numericamente no FDS o compartimento ensaiado pelo BRE/FRS (KIRBY *et al.*, 1994), utilizando as mesmas condições e propriedades dos materiais. Foi avaliada a influência da dimensão do compartimento, carga de incêndio, fator de ventilação e quantidade de *cribs* ignizados em $t=0$. Os *cribs* foram modelados como camadas espessas ("*thick layer*"), adotada pelo autor como uma abordagem alternativa à modelagem com as dimensões dos barrotes de madeira, conforme o experimento (que exigiria uma malha mais refinada e maior tempo de processamento). Como resultado, é apontado que, em todas as situações analisadas, houve boa previsão, em comparação com as medições experimentais. Em especial para a temperatura, as diferenças variaram entre 5 e 20%.

No contexto da modelagem dos *cribs*, Sandström *et al.* (2011) também empregaram simplificações em seus estudos. Nesse trabalho, foi considerado o fenômeno de *travelling fire*, que descreve o deslocamento progressivo do fogo ao longo do compartimento devido à queima heterogênea dos materiais combustíveis (DAI *et al.*, 2017; STERN-GOTTFRIED; REIN, 2012; CHARLIER *et al.*, 2021a). Para reproduzir essa condição, foram definidas superfícies compostas por queimadores (*burners*) ativados em tempos distintos. Cada queimador foi caracterizado por uma taxa de liberação de calor previamente especificada, mantendo a combustão até o consumo completo do combustível disponível.

Em contrapartida, o trabalho desenvolvido por Dai *et al.* (2022) utiliza uma modelagem dos *cribs* alinhada ao experimento TRAFIR-Liège LB7, que consistiu em um ensaio projetado para estudar a propagação de *travelling fires*. Os autores representaram os *cribs* por meio de uma malha de 2x2 elementos na seção transversal dos barrotes de madeira ($15\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 17,5\text{ mm}$) e empregaram uma resolução menos refinada para a fase gasosa ($60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ e $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 35\text{ mm}$). Utilizando um modelo simples de pirólise e uma temperatura de ignição definida, os resultados obtidos apresentaram maior precisão na taxa de liberação de calor, na propagação do incêndio, nas temperaturas dos gases e na combustão da madeira, quando comparados aos dados experimentais.

2.3.4 Modelagem Numérica de Incêndio em Combustível Vegetal

O estudo acerca da dinâmica de incêndio em combustível florestal tem sido um tópico de pesquisa nas últimas décadas (EVANS *et al.*, 2004). A modelagem desse tipo de combustível, em geral, requer a análise da interação entre o incêndio-combustível, bem como incêndio-atmosfera.

A primeira está relacionada à produção de gases pela pirólise do combustível sólido, seguida da combustão desses gases e, por fim, o fluxo de calor que retorna ao combustível sólido, alimentando novamente a pirólise e propagação do incêndio. Já a interação incêndio-atmosfera envolve a resposta do incêndio e sua pluma às correntes de ar do ambiente, assim como a resposta da atmosfera (MELL *et al.*, 2007).

O FDS permite a modelagem da propagação do incêndio florestal utilizando três abordagens (MCGRATTAN *et al.*, 2023):

1. **Modelo de partículas:** A vegetação é representada por um conjunto de partículas Lagrangeanas, que se aquecem por convecção ou radiação.
2. **Modelo de Combustível Limite (*Boundary Fuel Model*):** A vegetação rasteira é modelada como um sólido poroso, de espessura igual à altura da vegetação.
3. **Modelo de Conjunto de Níveis (*Level Set Model*):** A frente do incêndio possui propagação modelada empiricamente.

2.3.4.1 Partículas Lagrangeanas

Partículas Lagrangeanas são utilizadas para representar uma ampla variedade de objetos que não podem ser resolvidos no *grid* numérico. Partindo dessa abordagem, as partículas são utilizadas para representar vegetação estacionária (gramíneas ou folhas), como fragmentos em chamas (MCGRATTAN *et al.*, 2013) e sua aplicação para modelagem de combustível vegetal tem sido documentada na literatura (WADHWANI *et al.*, 2017; CHENEY *et al.*, 1998)

Nessa abordagem, a vegetação é modelada por um conjunto de partículas - uma em cada célula do *grid*, embora sejam permitidas múltiplas, com um custo computacional maior. As partículas podem ser assumidas com formato cilíndrico ou esférico, atribuído um diâmetro baseado na relação entre área de superfície e volume (σ'). O comprimento é um parâmetro menos relevante, mas recomendado que seja superior ao diâmetro.

As propriedades dos materiais são assumidas para a vegetação úmida, que se presume secar, decompor-se em carvão e, então, oxidar exotermicamente quando exposta ao calor do incêndio (VANILLA *et al.*, 2021).

Mais detalhes acerca da formulação matemática relacionada às partículas Lagrangeanas pode ser consultados em Vanella *et al.* (2021).

Modelagem de Árvores utilizando partículas Lagrangeanas

Para fins de exemplificação, o caso apresentado abaixo, retirado de McGrattan *et al.* (2023), ilustra a sintaxe utilizada pelo FDS para a modelagem de árvores em partículas Lagrangeanas. Neste exemplo é modelado um pinheiro cônico, de base 0,2 metros (CROWN_BASE_HEIGHT) e altura de 2,0 metros (TREE_HEIGHT).

1. Definição de propriedades da partícula

```
&PART ID='needles', DRAG_COEFFICIENT=2.8, SURF_ID='needle surface',  
STATIC=T, COLOR='FOREST GREEN' /
```

onde,

- **PART ID.** Especifica o nome a ser dado pelo usuário às partículas;
- **DRAG_COEFFICIENT.** Coeficiente de arrasto da vegetação. Valores de referência para espécies vegetais podem ser consultados em Falkenstein-Smith *et al.* (2019), obtidos experimentalmente em ensaios em túnel de vento;
- **SURF_ID.** Atribui à partícula uma superfície já criada;
- **STATIC=T.** Utilizado no caso no qual não há movimento das partículas;

2. Criação da vegetação pelo conjunto das partículas criadas previamente

```
&INIT ID='needles', PART_ID='needles', XYZ=..., CROWN_BASE_WIDTH=3.2,  
CROWN_BASE_HEIGHT=0.2, TREE_HEIGHT=2, SHAPE='CONE',  
N_PARTICLES_PER_CELL=1, MASS_PER_VOLUME=10., DRY=T /
```

onde,

- **INIT ID.** Atribui um nome às condições iniciais (*INIT* - *Initial Conditions*)

- **PART_ID**. Atribui ao conjunto de pontos, as propriedades da partícula `PART_ID='needles'`;
- **XYZ**. Especifica as coordenadas do centro da geometria a ser criada;
- **SHAPE**. Especifica o formato geométrico para a árvore. Segundo McGrattan *et al.* (2023), as possíveis entradas são: 'BLOCK', 'CYLINDER', 'CONE', 'LINE' ou 'RING'.
- **N_PARTICLES_PER_CELL**. Parâmetro no qual fornece a quantidade de partículas por elemento da malha;
- **MASS_PER_VOLUME**. Estabelece a razão entre a massa (kg), dividida pelo seu volume (m³).
- **DRY**. Parâmetro para a caracterização da umidade da vegetação: seca (`DRY = T`) ou úmida (`DRY = F`).

2.3.4.2 Level Set Mode

O modelo *level set* é um modelo existente no FDS que permite a modelagem da vegetação de forma empírica, auxiliando nos casos que há uma grande área a ser simulada (BOVA *et al.*, 2015). Essa abordagem utiliza da formulação de Rothermel-Albini (ROTHERMEL, 1972; ALBINI, 1976) para a propagação do incêndio em superfícies, assumindo que o fogo se propaga em formato elíptico. Além disso, essa formulação considera os efeitos combinados do vento, da inclinação do terreno e das características da vegetação (MCGRATTAN *et al.*, 2023).

Para a aplicação dessa metodologia no FDS, é necessário utilizar, na linha `&MISC`, o comando `LEVEL_SET_MODE = n`, onde $n = \{1, 2, 3, 4\}$:

- **LEVEL_SET_MODE=1**. Somente a simulação do modelo *level set* é realizada. O vento não sofre influência do terreno, e também não há incêndio.
- **LEVEL_SET_MODE=2**. O vento é estabelecido em função do terreno, mas não sofre variações após a ignição.
- **LEVEL_SET_MODE=3**. O vento acompanha o terreno, mas também não há incêndio.
- **LEVEL_SET_MODE=4**. O vento e o incêndio são acoplados e, quando o fogo atinge a vegetação, queima a uma taxa de liberação de calor condizente com o caso analisado.

Neste modelo, a ignição é definida em uma área especificada pelo usuário por meio do comando `&VENT`, conforme descrito a seguir, sendo as coordenadas estabelecidas no parâmetro `XB`.

```
&SURF ID='area_ignicao', VEG_LSET_IGNITE_TIME=0., COLOR='RED' /
&VENT XB=..., SURF_ID='area_ignicao' /
```

A vegetação pode ser definida a partir de um conjunto de valores tabelados, disponíveis em McGrattan *et al.* (2023), os quais descrevem uma série de casos, dentre eles: grama alta, grama baixa, arbustos, madeira e depósito de madeira. Na referida tabela, os casos são descritos em termos do carregamento (em kg/m³), e a razão entre a área de superfície e o volume (em m⁻¹), para o combustível morto (*dead fuel*) e vivo (*live fuel*). Além disso, é estabelecida também a altura da vegetação, umidade e taxa de propagação das chamas (*Rate of Spread* - RoS), para a condição sem vento e sem inclinação.

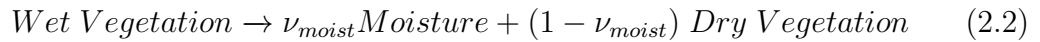
2.3.4.3 Modelo de degradação térmica para vegetação

McGrattan *et al.* (2023) descreve o modelo de degradação térmica utilizado nas simulações numéricas para o combustível vegetal, com distinção e especificidades para as fases sólida e gasosa, tais como apresentadas a seguir.

Fase Sólida

O processo de degradação térmica para a fase sólida consiste em um conjunto de três reações:

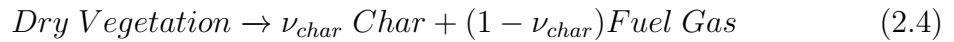
1. Evaporação endotérmica da umidade



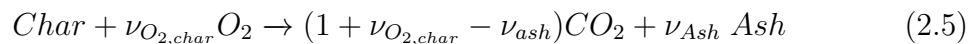
onde,

$$\nu_{moist} = \frac{M}{1 + M} \quad (2.3)$$

2. Pirólise endotérmica da vegetação seca



3. Oxidação exotérmica do carvão vegetal



onde,

M é a taxa de umidade da vegetação ou fração de umidade [-];

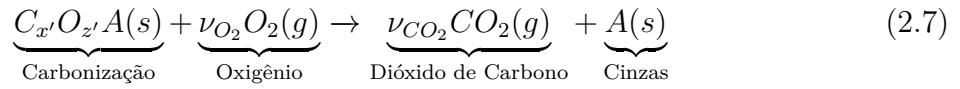
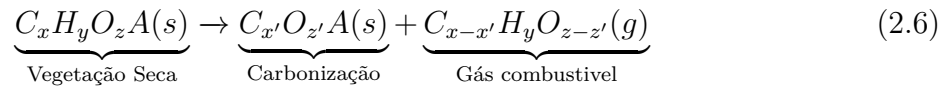
ν_{char} é a fração de massa de vegetação seca que é convertida a carvão vegetal durante a pirólise [kg/kg];

$\nu_{O_2, char}$ é a massa de oxigênio consumido por unidade de massa de carvão oxidado [kg/kg];

ν_{Ash} é a fração em massa de carvão que é convertida a cinza durante a oxidação [kg/kg];

Fase Gasosa

Para a fase gasosa, as equações de decomposição são dadas pelas Equações 2.6 e 2.7, na qual a parcela relativa à vegetação seca é dada por $C_xH_yO_zA$, onde A representa a parcela inorgânica que eventualmente formarão as cinzas.



onde,

$$\nu_{O_2} = \frac{\nu_{O_2, char}\nu_{char}W_{fuel}}{W_{O_2}}$$

$$\nu_{CO_2} = \frac{(1 + \nu_{O_2, char} - \nu_{ash})\nu_{char}W_{fuel}}{W_{CO_2}} ; \quad W_{fuel} = \frac{12x + y + 16z}{1 - \nu_{ash}\nu_{char}} ;$$

$$x' = \nu_{CO_2} ; \quad z' = 2(\nu_{CO_2} - \nu_{O_2})$$

2.3.4.4 Estudos Desenvolvidos na Área

O campo de estudo de incêndios em zonas de interface urbano-florestal, consoante McGrattan *et al.* (2022), ainda carece de progresso, sobretudo quanto ao entendimento e previsão da propagação do incêndio nessa área.

Em Countryman *et al.* (1976) são abordados diversos conceitos relacionados ao incêndio em combustível vegetal. Dentre eles, a influência da umidade da vegetação na desaceleração do aquecimento em etapas iniciais do incêndio.

No estudo conduzido por Tihay *et al.* (2014), os autores investigaram, por meio de ensaios, a influência de diversos parâmetros em incêndios florestais em terrenos inclinados. Entre os parâmetros analisados destacam-se a taxa de queima, a taxa de liberação de calor, as frações radiativas e convectivas, além da carga de incêndio. Como conclusão, os autores observaram que, com o aumento da inclinação do terreno, há uma elevação na taxa de liberação de calor. Ademais, foi constatado que, nessa condição, a contribuição da

convecção é predominante, enquanto a radiação desempenha um papel mais relevante com o incremento da carga de incêndio.

Castillo Soto *et al.* (2022), em seu estudo, focaram em estudar a contribuição da distância de segurança de estruturas à vegetação. O cálculo da distância foi estabelecido com base em um modelo de transferência de calor radiante. Como resultados, as faixas recomendadas variaram entre 5 e 32 metros, em função de restrições da edificação e da topografia do terreno.

Alexander e Cruz (2006) coletaram dados referentes a 57 incêndios em copas de árvores (*crown fires*) ocorridos nos Estados Unidos e Canadá, entre 1965 e 2003, especificando em cada caso: a umidade relativa, a temperatura do ambiente, dados relativos à vegetação afetada (umidade, densidade aparente) e velocidade do vento.

No estudo elaborado por Cantor *et al.* (2022), os autores se basearam em uma série de ensaios da literatura, analisando dados da evolução temporal das temperaturas. De forma geral, observou-se que os incêndios em árvores atingiram temperaturas mais elevadas (até 1100°C), mas de menor duração (2 a 4 minutos). Em contraste, os arbustos apresentaram temperaturas mais baixas (500 - 800°C), mas maior duração (5 a 10 minutos) - Figura 2.14. Com base nesses dados, os autores desenvolveram uma curva de elevação de temperatura para o combustível vegetal composto por árvores e arbustos, visando orientar o projeto de habitações situadas em zonas de interface urbano-florestal.

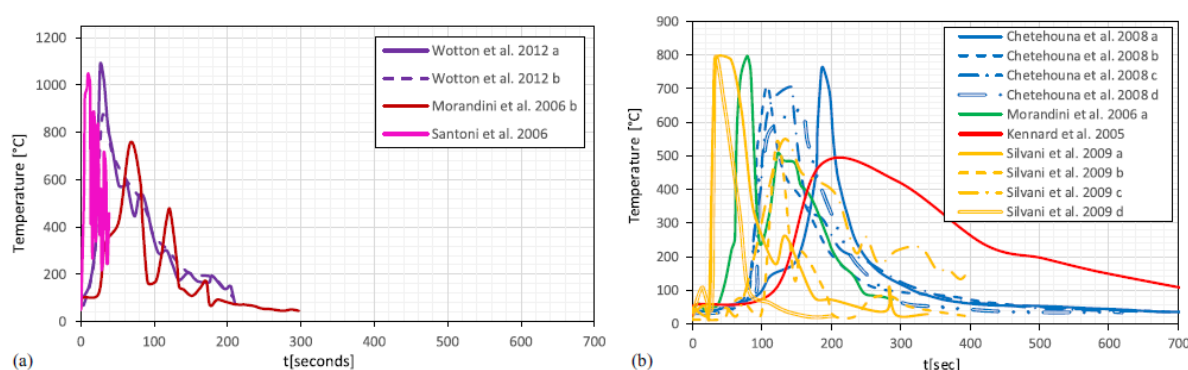


Figura 2.14: Curvas de Temperatura x tempo para a) Árvores; b) Arbustos

Fonte: Cantor *et al.* (2022)

Fiorini *et al.* (2023) investigaram a influência de diferentes parâmetros (carga de incêndio, velocidade e direção do vento, inclinação do terreno, distância entre a vegetação e fachada e umidade da vegetação) na taxa de liberação de calor e temperatura na fachada, medida com dispositivos AST (temperatura de superfície adiabática).

No contexto brasileiro, Bufacchi *et al.* (2016) simularam numericamente no WFDS (*Wildland-Urban Interface Fire Dynamics Simulator*) o incêndio de superfície na Amazônia, avaliando a influência da umidade do ar, temperatura, umidade da vegetação, densidade

aparente e razão superfície/volume. Os resultados indicaram que os parâmetros de maior impacto foram a umidade da vegetação, a razão entre área de superfície e volume, e a densidade aparente. Por outro lado, a temperatura inicial da vegetação e a umidade do ar não apresentaram influência significativa na taxa de propagação das chamas. Os autores concluíram que o modelo desenvolvido foi capaz de prever com boa precisão os principais efeitos originados do incêndio de superfície na Amazônia, sendo uma ferramenta adequada para a previsão deste tipo de incêndio.

Khan *et al.* (2021) investigam a propagação do incêndio, sendo a carga de incêndio modelada com árvores e vegetação rasteira (*Australian Grassland*) e velocidade do vento variando entre 2.5 a 12.5 m/s. Como principais pontos, os autores avaliaram a intensidade do fogo, fluxo de calor e temperatura da superfície. O principal objetivo do trabalho era avaliar a mínima distância de *firebrakes*, técnica de interrupção na vegetação visando impedir a propagação do incêndio florestal. Mediante os cenários analisados, concluiu-se que 15 metros foi capaz de conter a propagação.

2.4 Integração CFD-FEM

A avaliação do comportamento das estruturas frente ao aquecimento provocado pelo incêndio tem sido objeto de estudo na literatura. Em alguns desses trabalhos, são destacadas metodologias para o acoplamento dos resultados de temperatura, inicialmente determinados pelo FDS, como entrada para análises estruturais subsequentes - Figura 2.15.

Baseado no fluxograma, são possíveis, essencialmente, duas abordagens: os acoplamentos unidirecional (*one-way coupling*) e bidirecional (*two-way coupling*):

1. Acoplamento unidirecional (*one-way coupling*). Nessa abordagem, as simulações são realizadas de forma individual, começando pela propagação do incêndio. Os resultados gerados servem como *input* para análises subsequentes de transferência de calor e comportamento mecânico, utilizando o método de Elementos Finitos (FEM).

2. Acoplamento bidirecional (*two-way coupling*). Nesta alternativa, as mesmas equações de temperatura e transferência de calor são resolvidas. Porém, em intervalos de tempo discretos, a simulação em Elementos Finitos retroalimenta o modelo CFD com informações sobre deslocamentos e possíveis colapsos. Essas mudanças geométricas, especialmente relacionadas ao colapso, exercem grande influência no desenvolvimento do incêndio, pois afetam diretamente a ventilação e a disponibilidade de oxigênio. Contudo, essa abordagem possui uma implementação mais complexa e maior custo computacional (ZHANG *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2016).

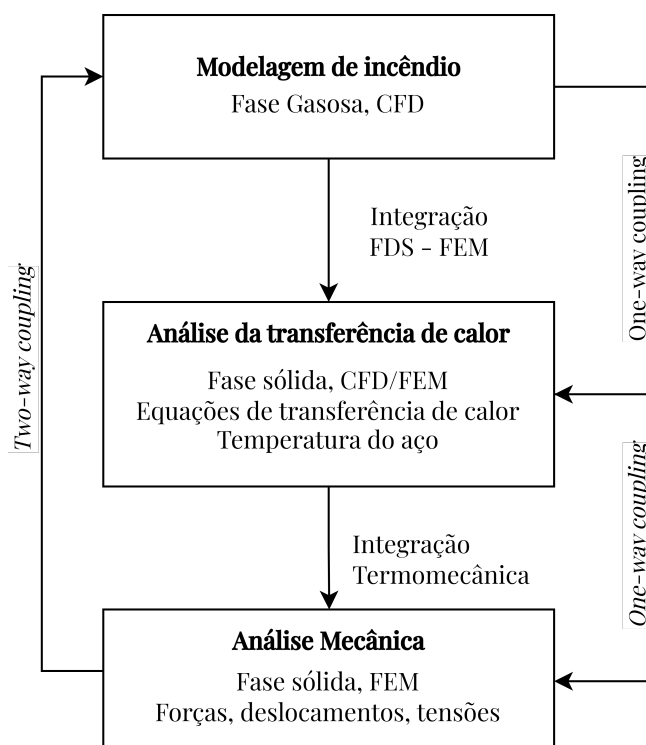


Figura 2.15: Fluxograma - Metodologias *one-way coupling* e *two-way coupling*

Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2016)

Para o caso da metodologia unidirecional, um passo importante na simulação é o acoplamento CFD-FEM. Nesse contexto, a ferramenta *FDS2FEM*, elaborada por pesquisadores do VTT - *Technical Research Centre of Finland* (PAAJANEN *et al.*, 2013), é uma alternativa que facilita e automatiza o processo de integração CFD-FEM. O fluxograma apresentado na Figura 2.16 esboça, de maneira esquemática, o procedimento adotado pela mencionada ferramenta. Sua finalidade consiste em integrar os resultados obtidos no FDS à análise mecânica subsequente.

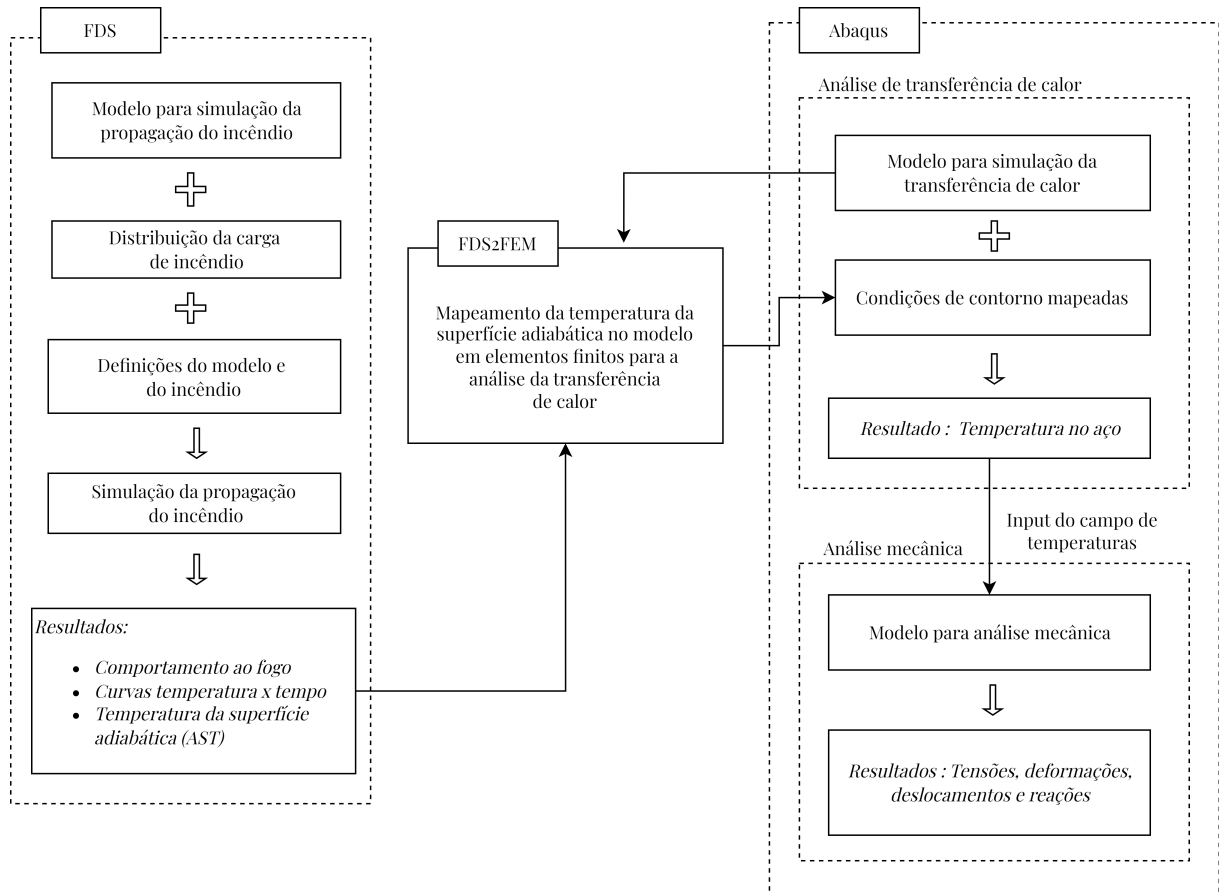


Figura 2.16: Fluxograma - Etapas envolvidas no processo de integração CFD-FEM

Fonte: Adaptado de Janardhan *et al.* (2022)

Para a correta aplicação da ferramenta *FDS2FEM*, é imprescindível o fornecimento de determinados *inputs*, essenciais para o seu funcionamento adequado. Estes incluem:

- **Resultados do FDS.** Os resultados obtidos em simulações realizadas no *Fire Dynamics Simulator* (FDS) constituem a base fundamental para a realização do acoplamento CFD-FEM. Esses resultados geralmente envolvem dados de temperatura da superfície adiabática (*adiabatic surface temperature*), seja através de outputs de fronteira (&BNDF), que fornece uma melhor representação dos dados, em função de uma distribuição mais contínua; ou por dispositivos (&DEVC) - Figura 2.17.

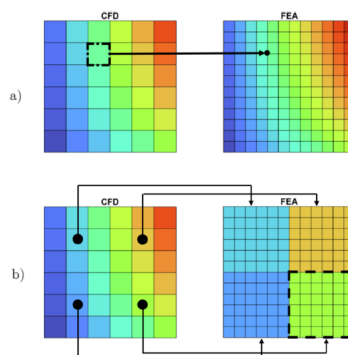


Figura 2.17: Abordagens de acoplamento por: (a) *Outputs* de fronteira - &BNDF e (b) Dispositivos - &DEV

Fonte: Janardhan *et al.* (2022)

O conceito de temperatura da superfície adiabática é discutido por Wickström (2011). Ela é definida como a temperatura que um sólido atinge após um longo tempo de exposição. Nesse ponto, ela não perde, nem recebe calor. Esse conceito é utilizado no estudo da segurança contra incêndio, tendo em vista que indica valores de temperaturas relativos à combinação dos efeitos de radiação e convecção.

- **Geometria do Modelo.** É necessário desenvolver um modelo preliminar utilizando Elementos Finitos, que incorpora a geometria, propriedades dos materiais, condições de contorno e uma malha apropriada, para ser empregado como entrada pelo programa. Relativo ao Abaqus, o modelo previamente elaborado é utilizado como input no *FDS2FEM* através do *input file* de extensão *.inp*.

Ao fornecer esses *inputs*, a ferramenta *FDS2FEM* descreve, ao conjunto de nós pertinentes, interações de radiação e convecção, em função das temperaturas discretizadas na forma de amplitude em função do tempo. Por fim, é realizada a análise termomecânica para a obtenção das temperaturas nos elementos estruturais, bem como sua resposta ao aquecimento - tensões e deformações.

A seguir, serão abordados com mais detalhes os parâmetros de *input* e *output* na ferramenta *FDS2FEM*.

1. *Inputs*

a) Arquivo de *input* do FDS, de extensão *.fds*.

O arquivo utilizado para a simulação no FDS é utilizado pela ferramenta para que sejam analisadas as dimensões das obstruções, coordenadas dos dispositivos e superfícies &BNDF.

b) Arquivos de *input* no Abaqus, de extensão *.inp*.

Para o *input*, é necessário criar um modelo preliminar no Abaqus, composto pela geometria, propriedades dos materiais, malha, interações e condições de contorno.

Além disso, é preciso definir os nós de interesse para a importação das temperaturas. Para isso, devem ser criados *Sets* no Abaqus, selecionando os nós (neste caso, na face exposta ao incêndio) que receberão as temperaturas importadas.

c) Arquivos de configuração da ferramenta **FDS2FEM**.

Nessa etapa, são necessários dois arquivos. O primeiro, com as definições básicas da ferramenta e configurações de mapeamento (*config.in*). Nele são descritos os nomes dos arquivos de *input* - FDS e Abaqus -, o *software* de Elementos Finitos que será utilizado (Abaqus ou Ansys), o tipo output coletado no FDS (BNDF ou DEVC), emissividade (*e_coeff*) e o coeficiente de transferência de calor por convecção (*h_coeff*).

Um exemplo ilustrativo encontra-se abaixo:

```

1  fds_input  fds_model.fds
2  fem_input  fem_model.inp
3  fem_mode   abaqus
4  fds_output bndf
5
6  e_coeff    0.8
7  h_coeff    25.0
8
9  # Quantidade a ser transferida
10 quantity   adiabatic_surface_temperature
11
12 # Conectividade
13 nset_input  nset.in
14
15 # Mapeamento da Malha
16 mapping     nearest
17 mp_n        4
18 mp_nmx      8
19 mp_deg      2.0

```

Cabe ainda destacar que o processo de acoplamento é realizado por meio do mapeamento dos nós, cujos detalhes são descritos pelos desenvolvedores. No exemplo citado, foi utilizado o mapeamento do tipo *nearest*, isto é, buscando os nós mais próximos. Esta é a configuração padrão da ferramenta e consiste em atribuir a cada nó do Abaqus (alvo), os dados de um ou mais nós do FDS (fonte). Assim, é realizada uma média ponderada da temperatura e a respectiva distância alvo-fonte. Neste sentido, o usuário atribui os valores *mp_n* e *mp_nmx* para os números mínimos e máximos de

nós utilizados no mapeamento e mp_deg para o peso atribuído ($1/(distancia^{mp_deg})$).

O segundo arquivo de entrada é um arquivo de conectividade (*nset_bndf.in*) que tem como objetivo estabelecer a correspondência entre os nós da malha gerada no Abaqus com os *outputs* obtidos do FDS. Nesse sentido, são relacionados o *Set* de nós definido no Abaqus e a *Instance* na qual se refere. A partir de então, esses parâmetros são correlacionados à posição (*patch*) do *output* de interesse, seja ele o número da face (&BNDF), ou do dispositivo (&DEVC).

A estrutura sintática desse arquivo é definida pela documentação da ferramenta e segue o formato apresentado abaixo:

NomeInstance.NomeSet PosiçãoOutput

No exemplo a seguir, é associado o *output* gerado no FDS (PosiçãoOutput = 1) aos nós selecionados no Abaqus (por exemplo, Set-Temperature-720), relativo ao painel ChapaFrontal-720. Analogamente, o processo é repetido aos demais painéis modelados - Linhas 2 e 3.

```
1 ChapaFrontal-720.Set-Temperature-720 1
2 ChapaFrontal-1150_1.Set-Temperature-1150_1 1
3 ChapaFrontal-1150_2.Set-Temperature-1150_2 1
```

2. Outputs

Após passar pela ferramenta *FDS2FEM*, a distribuição de temperaturas obtidas no FDS é utilizada para criar amplitudes tabulares, que servirão de base para a definição de interações de radiação e convecção dos tipos *Concentrated Film Condition* e *Concentrated Radiation to Ambient*.

O arquivo *.inp* de inputs no Abaqus é editado e são gerados arquivos de extensão *.cfilm*, *.cradiate* e *.amp* com os dados relativos a essas *Interactions*.

2.5 Síntese

Ao longo deste capítulo, foi possível explorar a complexa dinâmica dos incêndios em zonas de interface urbano-florestal. A investigação destes incêndios revelou fatores de atenção. Em um contexto atual, o estudo de incêndios florestais tem ganhado relevância frente às mudanças climáticas e previsões de agravamento do quadro nos próximos anos.

Como um relevante mecanismo de ignição de edificações em zonas de interface urbano-florestal, as partículas incandescentes, também referidas por *firebrands* são geradas durante a queima e possuem um grande potencial destrutivo para as edificações, até mesmo, a dezenas de quilômetros de distância. Isso reforça a necessidade do projeto de edificações

focadas na proteção ao fogo. Tais medidas incluem a escolha de materiais adequados, manutenção de uma distância de segurança em relação às áreas vegetais, bem como a limpeza dos arredores das edificações. Isso significa não armazenar objetos próximos a fachada, que pode contribuir para a ignição dos mesmos e consequente propagação à edificação.

Neste sentido, a fachada desempenha um papel fundamental no contexto de incêndios. Esse elemento, deve ser capaz de conter, ou retardar, a ação do incêndio até que seja realizado o combate das chamas. Contudo, em muitos casos levantados durante esse capítulo, o efeito foi o contrário. Ela foi a responsável por propagar o incêndio pela edificação. Diversas soluções de fachada se destacam por inúmeras vantagens, como baixo peso, isolamento térmico e aspecto econômico, mas de baixo desempenho frente ao incêndio. Contudo, nos estudos apresentados na Seção 2.2, foi destacado que painéis sanduíche com núcleo interno em polietileno e polipropileno se comportaram mal durante o aquecimento, com rápida propagação das chamas. Em contrapartida, a lã de rocha se destacou como sendo um material com bom comportamento durante o incêndio.

Além disso, como efeito do aquecimento, estudos apontam como sendo frequente o descolamento das chapas de alumínio que compõem os painéis, o que pode gerar a queima e carbonização do núcleo interno. Ademais, a flexão dos painéis e ocorrência de instabilidades são frequentes durante o incêndio e podem comprometer a integridade mecânica da fachada.

Assim, destaca-se a relevância do estudo do comportamento das paredes de fachada mediante ao incêndio. Tendo em vista os elevados custos oriundos de um experimento em escala real de uma fachada, simulações numéricas são ferramentas fundamentais nesse processo. Para a garantia da validade dos modelos, diversos estudos apresentados nesse Capítulo comparam os resultados de simulações com experimentos. A partir dessa comparação, são constatados os bons resultados obtidos pelas simulações de propagação do incêndio em *softwares* CFD, como por exemplo, o FDS.

Além de ser capaz de obter bons resultados, as simulações em CFD podem ainda ser integradas com outras disciplinas, o que permite análises posteriores para a avaliação do comportamento térmico e mecânico das fachadas, cujo processo foi apresentado com mais detalhes na Seção 2.4.

Em suma, este capítulo destaca a importância de reconhecer as especificidades deste tipo de incêndio e suas interações com o ambiente circundante. Esses pontos servirão de base para os estudos a serem realizados neste trabalho.

3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA PROPAGAÇÃO DO INCÊNDIO

3.1 Descrição do Caso de Estudo

Neste capítulo, explora-se a simulação da propagação de incêndios em um contexto industrial, empregando o *software* FDS (*Fire Dynamics Simulator* — Versão 6.8.0). Dois cenários distintos são avaliados. No primeiro caso, o foco recai sobre o incêndio originado no interior da edificação (*também referido posteriormente como incêndio interno*), com uma análise da influência das aberturas e da carga de incêndio na propagação das chamas. No segundo cenário, a atenção é direcionada aos incêndios em zonas de interface urbano-florestal (*também referido posteriormente como incêndio externo*). Neste caso, a análise concentra-se no estudo da influência da velocidade do vento, inclinação do terreno e variações na carga de incêndio.

É importante destacar que a edificação escolhida para estudo possui uma relevância concreta, uma vez que foi gravemente afetada pelos incêndios florestais que atingiram Portugal em 2017.

O fluxograma apresentado na Figura 3.1 detalha as etapas das simulações realizadas no presente estudo. Em um primeiro momento, desenvolve-se um modelo preliminar no FDS, baseado no ensaio descrito pela norma BS 8414-2 (BSI, 2017), com o objetivo de calibrar o modelo desenvolvido a partir de um banco de dados de ensaios experimentais, cedidos por de Paula *et al.* (2024a). Simultaneamente, elabora-se um modelo preliminar no Abaqus, com a geometria correspondente ao sistema de ensaio descrito na BS 8414-2 (BSI, 2017), utilizando os resultados das simulações no FDS como *input* para a calibração do modelo em Elementos Finitos.

Com as propriedades calibradas, passa-se para os estudos pretendidos neste trabalho. Relativo ao FDS, foram elaborados dois modelos: um para o estudo do incêndio interno e outro para o estudo do incêndio externo, avaliando a influência das variáveis de análise.

Os resultados mais críticos das simulações realizadas prosseguiram para avaliação no Abaqus. A distribuição de temperaturas nas fachadas foi importada ao modelo final do Abaqus, para análise da transferência de calor e subsequente estudo do comportamento mecânico da estrutura.

Para as simulações realizadas neste trabalho, foi utilizado um computador com processador i5 de 9^a Geração e com 96 GB de RAM.

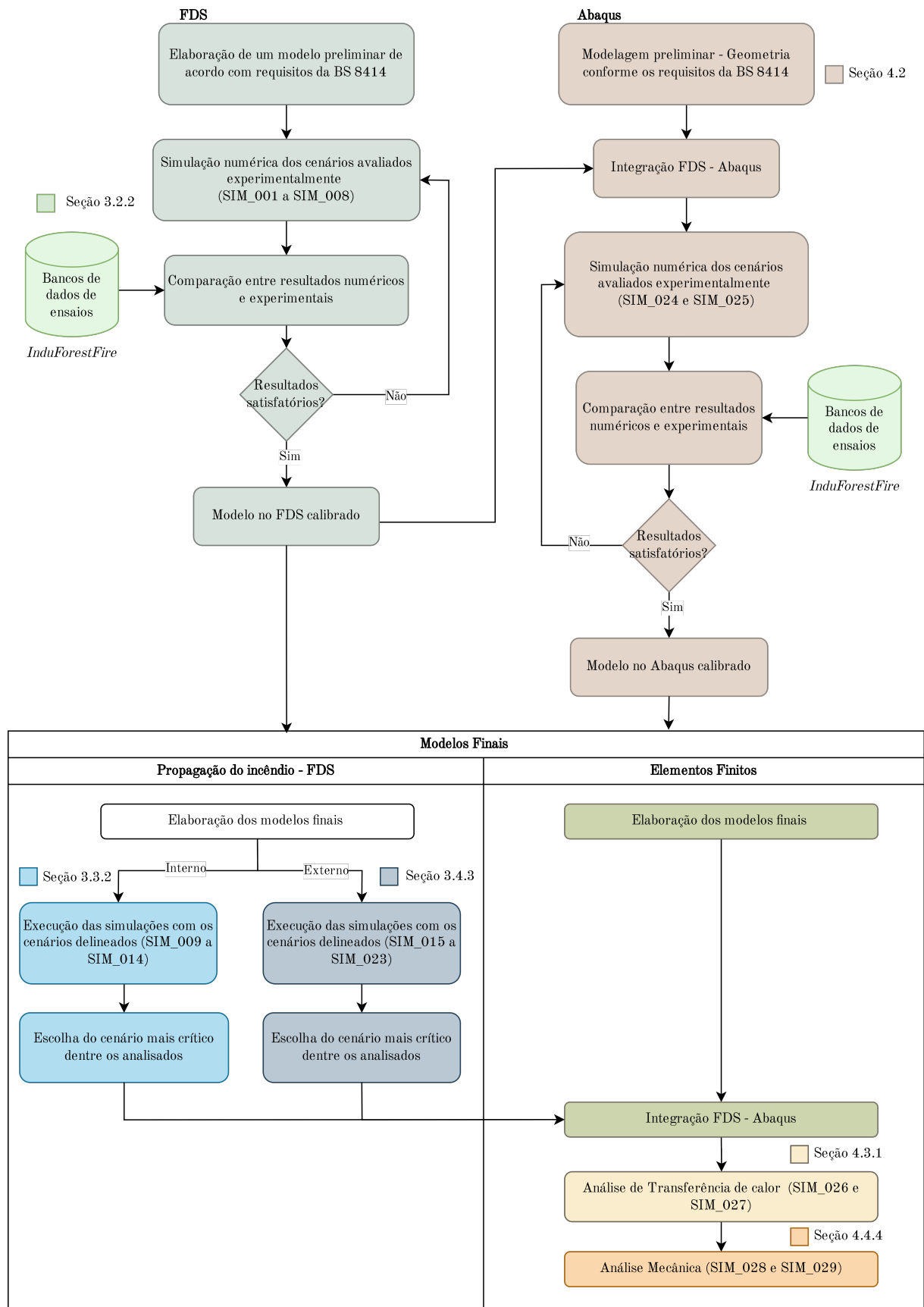


Figura 3.1: Fluxograma com resumo das simulações que foram desenvolvidas neste trabalho

Ademais, ressalta-se que, nas simulações realizadas, as propriedades térmicas da fachada foram validadas por meio de ensaios experimentais desenvolvidos pelo projeto português *InduForestFire* PCIF/MOS/0129/2018, que visa estudar três frentes principais (INDUFORESTFIRE, 2020):

- **Industrial.** No âmbito industrial, foram estudadas soluções a respeito das construções, com objetivo de dificultar ou impedir a propagação do incêndio em zonas industriais, mediante a definição da melhor malha de construção para cada zona envolvida.
- **Florestais.** Neste contexto, foram propostas medidas de gestão do combustível florestal visando minimizar a propagação do incêndio ao redor de zonas industriais.
- **Incêndio.** Com base em simulações relacionadas ao comportamento de fogo, busca-se a obtenção de resultados com o objetivo de basear políticas públicas para gestão do fogo em zonas industriais.

Os ensaios conduzidos pelo projeto foram utilizados como base para a calibração dos modelos numéricos desenvolvidos no presente trabalho.

3.1.1 O Edifício

A edificação analisada consiste em um galpão industrial de cerca de 23000 m², em estrutura metálica, destinada à produção e depósito de artigos cerâmicos para uso sanitário. A Figura 3.2 apresenta suas vistas frontal, lateral e superior.



Figura 3.2: Vistas frontal, lateral e superior da edificação

Fonte: Imagens - Google (2025)

A Figura 3.3 apresenta a planta baixa da edificação.

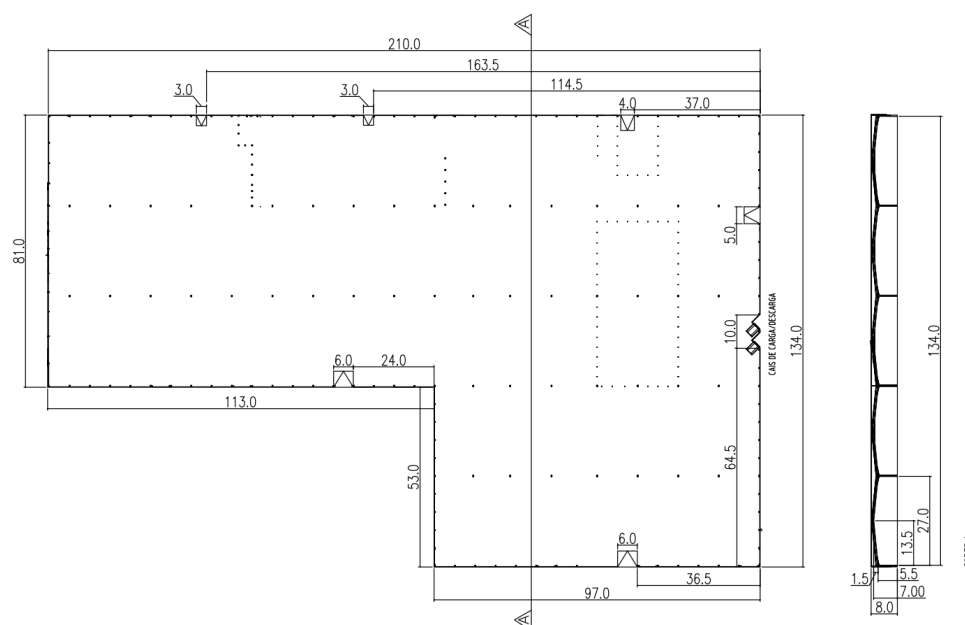


Figura 3.3: Planta baixa e corte transversal. Dimensões em metros

A edificação utilizada para este estudo está localizada na Zona Industrial da Tocha, em Portugal ($40^{\circ}19'01''\text{N}$ $8^{\circ}47'31''\text{W}$), a cerca de 4 km da faixa litorânea. A Figura 3.4 apresenta uma imagem de satélite, com destaque à edificação.

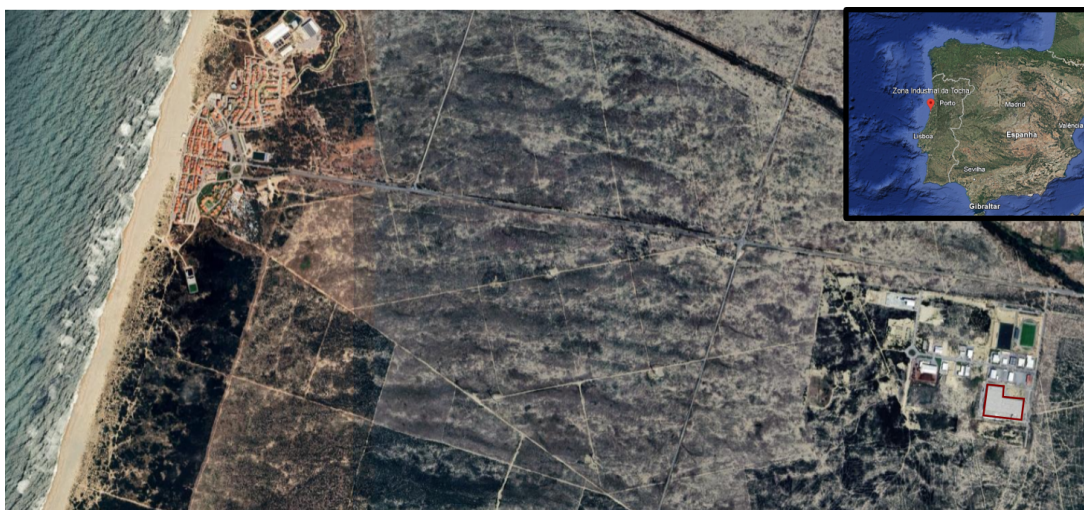


Figura 3.4: Imagem de satélite da região de Tocha, Portugal, com destaque à edificação estudada

Fonte: Google Earth - Imagens de 19 de maio de 2024

Como já referido, essa edificação sofreu com os Grandes Incêndios de 2017, ocorridos em Portugal. A Figura 3.5 destaca a edificação após o incêndio. A partir da análise da imagem, é possível perceber que a fachada foi severamente impactada pelas chamas, com a queima do núcleo interno, rompimento de ligações e instabilidades nas chapas que compõem os painéis.



Figura 3.5: Edificação de estudo após os Grandes Incêndios de 2017, em Portugal

Fonte: de Paula *et al.* (2024a)

A edificação analisada, embora originalmente situada em Portugal, apresenta, do ponto de vista arquitetônico, dos sistemas construtivos e dos materiais empregados (estrutura metálica, fachadas em painéis do tipo sanduíche e cobertura em aço) características compatíveis com o contexto brasileiro. No entanto, devido às condições climáticas predominantes em Portugal (clima mediterrâneo, caracterizado por verões com altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar), o projeto europeu contempla condições de incêndio mais rigorosas. Considerando que tais exigências podem exceder aquelas geralmente aplicadas no Brasil, a edificação tende a apresentar uma margem adicional de segurança ao ser avaliada no contexto brasileiro.

3.1.2 Levantamento de medidas de segurança previstas pelas Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros

Em edificações industriais, devido às elevadas cargas de incêndio armazenadas, o Corpo de Bombeiros estabelece medidas de proteção obrigatórias que devem ser atendidas de forma a garantir, em caso de deflagração do incêndio, condições adequadas de segurança para a evacuação dos ocupantes da edificação. No estado de Minas Gerais, a IT-01 (CBMMG, 2024a) reúne as medidas obrigatórias para um edifício industrial.

Em função do tipo de material armazenado no interior da edificação de estudo (cerâmico), ela se enquadra na Divisão I-1 (CBMMG, 2020a), com $H \leq 12$ metros. A Figura 3.6 apresenta as referidas medidas. As que competem a edificação de análise são enumeradas abaixo, com detalhes adicionais das normatizações que as orientam.

GRUPO I (INDÚSTRIA)								
Divisão	I-1 e I-2				I-3			
Medidas de Segurança contra Incêndio e Pânico	Classificação quanto à altura (em metros)				Classificação quanto à altura (em metros)			
	H ≤ 12	12 < H ≤ 30	30 < H ≤ 54	H > 54	H ≤ 12	12 < H ≤ 30	30 < H ≤ 54	H > 54
Acesso de viaturas	X ⁽⁸⁾	X	X	X	X ⁽⁸⁾	X	X	X
Segurança Estrutural contra Incêndio	X ^{(2) (7)}	X	X	X	X ⁽²⁾	X	X	X
Compartimentação Horizontal	X ^{(5) (6)}	X ⁽⁵⁾	X	X	X ^{(2) (5)}	X	X	X
Compartimentação Vertical	-	X ^{(5) (7)}	X	X	-	X	X	X
Saídas de Emergência	X	X	X	X	X	X	X	X
Plano de Intervenção de Incêndio	-	X ⁽⁷⁾	X	X	X ⁽¹⁾	X	X	X
Brigada de Incêndio	X ⁽³⁾	X	X	X	X ⁽¹⁾	X	X	X
Iluminação de Emergência	X	X	X	X	X	X	X	X
Deteção de Incêndio	-	X ⁽⁷⁾	X ⁽⁷⁾	X	-	X	X	X
Alarme de Incêndio	X ^{(3) (7)}	X	X	X	X ⁽¹⁾	X	X	X
Sinalização de Emergência	X	X	X	X	X	X	X	X
Extintores	X	X	X	X	X	X	X	X
Hidrantes e Mangotinhos	X ⁽¹⁾	X	X	X	X ⁽¹⁾	X	X	X
Chuveiros Automáticos	-	-	X ⁽⁷⁾	X ⁽⁷⁾	-	X	X	X
Controle de Materiais de Acabamento e de Revestimento	-	X	X	X	X ⁽⁴⁾	X	X	X
Controle de Fumaça	-	-	-	X	-	X	X	X
NOTAS: 1 - Exigido quando a área total for superior a 930 m², exceto para as construções concluídas até 01 de julho de 2005, onde será considerada, para fins de exigência, área total superior a 1.200m². 2 - Exigido quando a área total for superior a 930 m². 3 - Exigido quando a área total for superior a 2.000m². 4 - Exigido quando a área total for superior a 5.000m². 5 - Pode ser substituída por chuveiros automáticos. 6 - Exceto para edificações térreas ou com área total inferior a 930m². 7 - Somente para a divisão I-2. 8 - Exigido quando a área total for superior a 930 m² e para condomínios com arruamento interno, independentemente da área.								

Figura 3.6: Medidas de proteção previstas para edifícios industriais em Minas Gerais

Fonte: IT-01 - Corpo de Bombeiros de Minas Gerais (CBMMG, 2020a)

1. **Acesso de viaturas.** *Instrução Técnica 04 – Acesso de Viaturas nas Edificações e Áreas de Risco* (CBMMG, 2022a).
2. **Segurança Estrutural contra Incêndio.** *IT 06 - Segurança Estrutural das Edificações* (CBMMG, 2022b).
3. **Compartimentação Horizontal.** *Instrução Técnica 07 – Compartimentação Horizontal e Compartimentação Vertical* (CBMMG, 2024b).
4. **Saídas de Emergência.** *Instrução Técnica 08 – Saídas de Emergência em Edificações* (CBMMG, 2022c).
5. **Brigada de Incêndio.** *IT 12 - Brigada de Incêndio* (CBMMG, 2023).

6. **Alarme de Incêndio.** *IT 14 - Sistema de Detecção e Alarme de Incêndio* (CBMMG, 2020b).
7. **Hidrantes e Mangotinhos.** *Instrução Técnica 17 – Sistema de Hidrantes e Mangotinhos para Combate a Incêndio* (CBMMG, 2022d).

A sistematização das medidas de segurança previstas pelas Instruções Técnicas aplicáveis a edificações industriais permite compreender o escopo das exigências normativas vigentes no estado de Minas Gerais. Este levantamento auxilia na contextualização do cenário regulatório de edifícios industriais no estado, que tem por objetivo o aumento da segurança das edificações frente à ação das chamas. Cabe destacar, entretanto, que não foi possível aferir a adequação integral da edificação às referidas exigências normativas, em razão da indisponibilidade de informações de projeto necessárias para essa verificação.

3.2 Calibração do Modelo com Dados Experimentais

3.2.1 Resumo dos ensaios experimentais realizados na Universidade de Coimbra (UC)

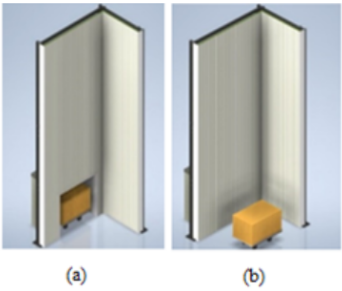
O comportamento ao fogo de paredes de fachada foi estudado pelo projeto *InduForestFire*, na Universidade de Coimbra - Portugal, em uma campanha de ensaios experimentais. Os ensaios, em escala real, e baseados na BS 8414-2 (BSI, 2017) compreenderam oito cenários de incêndio, com variações na posição da carga de incêndio e material do núcleo interno - Tabela 3.1.

Quanto ao revestimento, foram avaliadas soluções com núcleo interno em Lã de rocha (MW), PIR (poliisocianurato), PUR (poliuretano) e em Polímero Orgânico. Esses materiais são classificados, em termos da reação ao fogo, conforme a EN 13501-1 (CEN, 2018): Lã de Rocha: A2, s1, d0; Poliisocianurato e Polímero Orgânico: B, s1, d0; Poliuretano: Sem desempenho declarado.

Para os cenários de exposição do incêndio, foram consideradas duas situações. No primeiro caso (Cenário A), a carga de incêndio é posicionada na câmara de combustão, conforme o sistema de ensaio normatizado pela BS 8414 (BSI, 2017). Essa situação reflete a condição de um incêndio plenamente desenvolvido (pós-*flashover*) no interior da edificação, e que atinge a fachada através de uma abertura. Na segunda situação (Cenário B), a carga de incêndio está localizada a 100 mm da parede principal e 500 mm da parede secundária, condição que reflete a ação de um incêndio exterior à edificação e que igniza materiais depositados próximos a fachada.

Tabela 3.1: Programa de ensaios conduzidos pelo *InduForestFire*

Ensaio	Material do Núcleo Interno	Cenário
E1-MW-A	Lã de Rocha (MW)	A ^(a)
E2-MW-B	Lã de Rocha (MW)	B ^(b)
E3-PIR-A	PIR	A ^(a)
E4-PIR-B	PIR	B ^(b)
E5-OP-A	Polímero Orgânico (OP)	A ^(a)
E6-OP-B	Polímero Orgânico (OP)	B ^(b)
E7-PUR-A	PUR	A ^(a)
E8-PUR-B	PUR	B ^(b)



Fonte: de Paula *et al.* (2024a)

Quanto aos resultados, os experimentos revelaram que o PUR, como esperado devido à sua natureza combustível, apresenta uma rápida propagação das chamas. Aos 5 minutos, observa-se uma presença significativamente maior de chamas para este material em comparação com os demais. Esse fato fez com que o ensaio tivesse que ser interrompido, uma vez atingido um dos critérios de parada do ensaio - *as chamas ultrapassarem a face superior do corpo de prova* (Figuras 3.7c e 3.7e).

Além disso, nos ensaios com esse material, constatou-se a ignição do núcleo interno. Para o cenário com carga de incêndio interna, a ignição ocorreu aos 338 s na parede principal, e aos 413 s na parede secundária (Figuras 3.7a e 3.7b). Para o cenário de carga de incêndio externa, a ignição ocorreu aos 440 s e 520 s, respectivamente (Figura 3.7d).

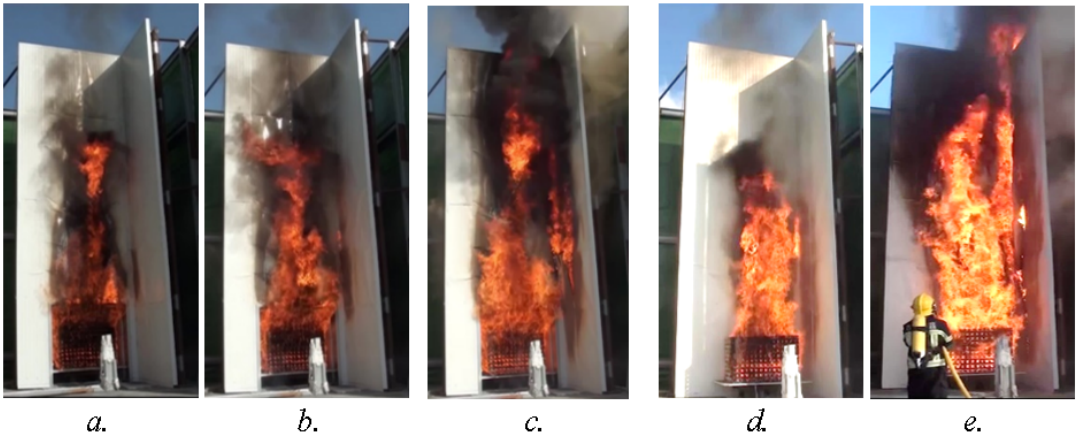


Figura 3.7: Corpos de prova durante os ensaios: E7-PUR-A(a, b, c) e E8-PUR-B(d, e)

Fonte: de Paula *et al.* (2024b)

De maneira análoga, os ensaios com o núcleo interno em PIR também destacaram-se pela ignição do material nas regiões de ligação entre os painéis, cujo início foi registrado

aos 480 s na parede principal e aos 584 s, na parede secundária (Figuras 3.8a e 3.8b - Cenário A). Já para o cenário com a carga de incêndio externa, tal fato ocorreu aos 360 s e 540 s (Figuras 3.8c e 3.8d).

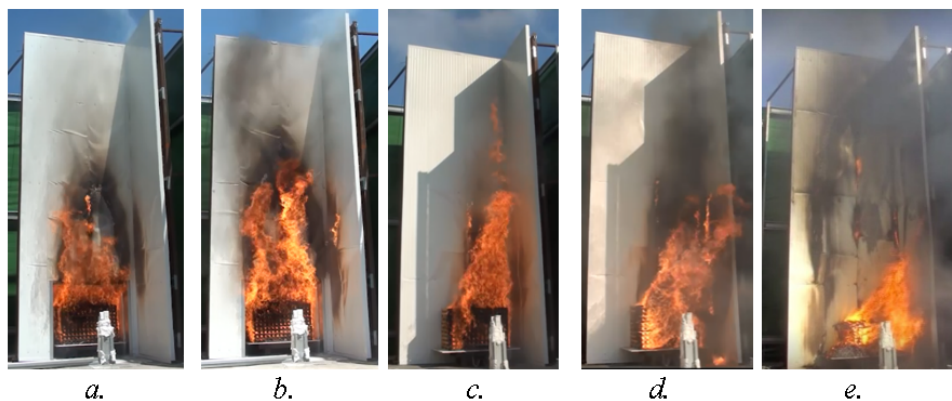


Figura 3.8: Corpos de prova durante os ensaios: E3-PIR-A (*a, b*) e E4-PIR-B (*c, d, e*)

Fonte: de Paula *et al.* (2024b)

Para o polímero orgânico, comportamento semelhante também foi observado durante os ensaios. Contudo, a ignição neste material ocorreu posteriormente. Aos 600 s, para a parede principal e 821 s para a parede secundária (Figuras 3.9a a 3.9c). Já para o cenário com a carga de incêndio externa, aos 660 s e 900 s (Figuras 3.9d a 3.9f).

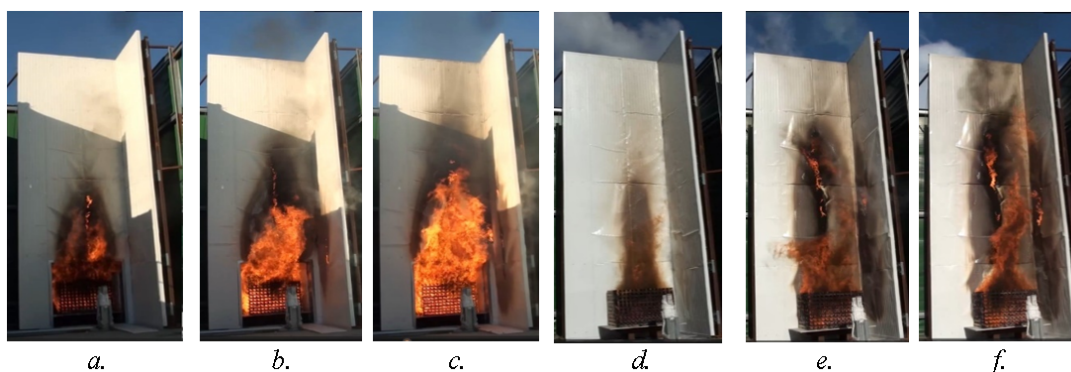


Figura 3.9: Corpos de prova durante os ensaios: E5-OP-A(*a, b, c*) e E6-OP-B(*d, e, f*)

Fonte: de Paula *et al.* (2024b)

Em termos de temperaturas, constatou-se que o valor registrado para o PUR foi 16% superior ao da lã de rocha (Tabela 3.2). Tal fato indica que a utilização de materiais combustíveis contribui ativamente no incêndio.

Tabela 3.2: Temperaturas máximas obtidas nos ensaios em função do material do núcleo interno e posição da carga de incêndio

	Interna				Externa			
	MW	PIR	PUR	OP	MW	PIR	PUR	OP
Temperatura (°C)	920,07	932,01	955,79	933,42	933,95	1004,46	1084,21	1039,95

Fonte: *InduForestFire*

Em comparação à evolução das temperaturas obtidas nos ensaios com o engradado de madeira interno e externo, a exposição da carga de incêndio ao ambiente (com uma maior disponibilidade de oxigênio e mais sensível ao vento), provocou alterações na combustão. A Figura 3.10 apresenta uma comparação entre as temperaturas registradas pelo termopar 2. Em ambos os ensaios houve temperaturas máximas na ordem dos 850°C. No entanto, pode ser observada uma compressão horizontal da curva, isto é, uma combustão mais acelerada e um decaimento mais rápido das temperaturas após os 700 segundos para o ensaio com carga de incêndio externa.

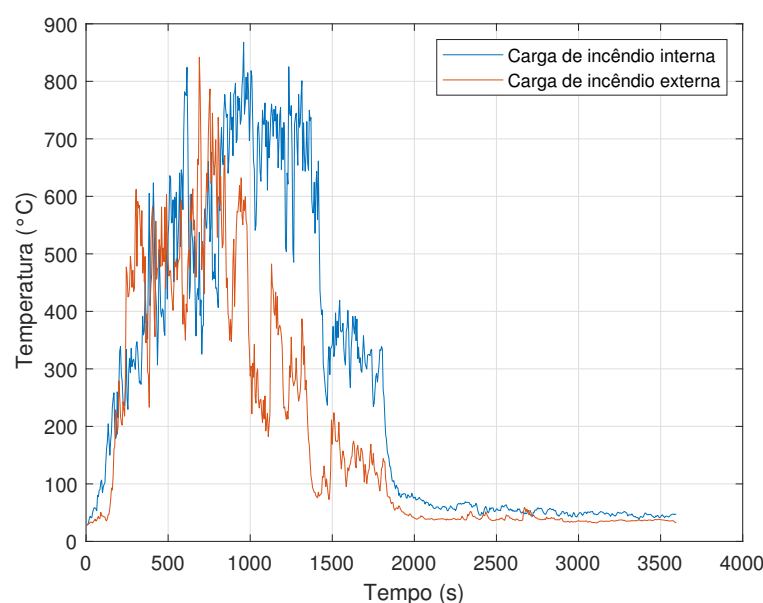


Figura 3.10: Comparação entre temperaturas medidas no termopar 2 em ensaios com a carga de incêndio interna e externa - Núcleo interno em lã de rocha

3.2.2 Simulações Numéricas para Calibração do FDS

As simulações realizadas compreendem os quatro materiais de núcleo interno ensaiados - *Lã de rocha*, *PIR*, *PUR* e *Polímero Orgânico* - e carga de incêndio interna e externa. As propriedades térmicas utilizadas estão resumidas na Tabela 3.3.

O domínio numérico possui dimensões 5600 x 4400 x 12000 mm nas simulações com carga de incêndio interna, e para carga de incêndio externa, 5000 x 4400 x 12000 mm.

A fronteira considerada é do tipo OPEN, nos planos laterais e superior.

Para a malha, é recomendado que a dimensão dos elementos seja de 1/10 da dimensão máxima característica (D^*) - Equação 3.1.

$$D^* = \left(\frac{Q}{p_\infty T_\infty c_p \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (3.1)$$

onde, Q é a taxa de liberação de calor do incêndio (kW), p_∞ é a densidade do ar (kg/m^3), c_p , o calor específico do ar (kJ/kgK), T_∞ é a temperatura ambiente (K) e g é a aceleração da gravidade (m/s^2).

Portanto, para o pico da taxa de liberação de calor de 3,5 MW, obtém-se uma dimensão de 100mm para os elementos da malha, totalizando 295.680 elementos para o primeiro cenário e 264.000 para o segundo.

Os painéis de revestimento da fachada foram modelados no *software* FDS a partir da definição de uma superfície com múltiplas camadas (*layers*). Assim sendo, foram definidos os respectivos materiais e espessuras. Para as chapas de aço, considerada espessura de 0,5 mm, e para o núcleo interno, 100 mm.

Para o combustível utilizado na reação (REAC FUEL), considerou-se $C_{1,0}H_{1,7}O_{0,83}N_{0,0}$ e $\text{CO YIELD} = 5 \cdot 10^{-3}$.

A Tabela 3.3 apresenta as propriedades dos materiais, utilizadas nas simulações.

Tabela 3.3: Propriedades térmicas dos materiais utilizados na simulação

Material	Propriedades		
	C_p (kJ/kgK)	k (W/mK)	ρ (kg/m ³)
Lã de Rocha	0,67	0,042	100,0
PIR	1,10	0,048	36,0
PUR	1,40	0,039	40,0
OP	0,7	0,0189	40,0
Aço	0,46	45,8	7850,0
Concreto	1,04	1,80	2280

Nota: C_p - Calor específico; k = Condutividade Térmica; ρ = Densidade

Para a medição das temperaturas no modelo numérico, foram definidos 16 termopares, em posições análogas aos existentes nos experimentos realizados por de Paula *et al.* (2024a) e prescrito pela BS 8414-2 (BSI, 2017). Além disso, nas simulações numéricas foi adotado o mesmo intervalo de coleta dos termopares utilizados nos ensaios, 5 s.

A Figura 3.11a, apresenta de forma esquemática o modelo adotado, elaborado no *software* Pyrosim, versão 2023.3.1312.

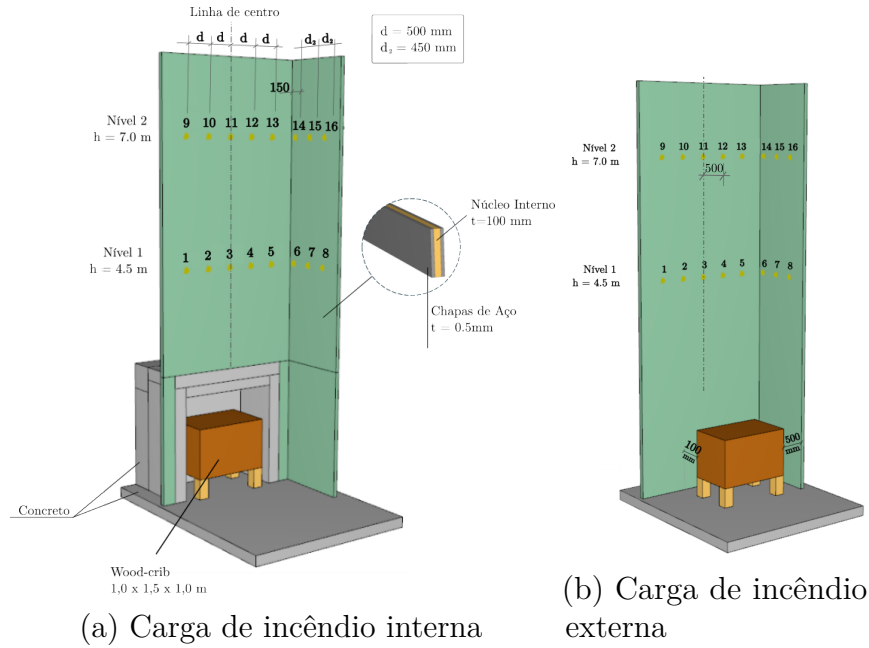


Figura 3.11: Modelos utilizados para calibração com resultados experimentais

Para a definição do engradado de madeira, foram definidas propriedades térmicas baseadas no estudo *NIST/NRC Transient Combustibles* (MCGRATTAN *et al.*, 2022), resumidas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Propriedades térmicas adotadas para o engradado de madeira - *NIST/NRC Transient Combustibles*

Propriedade	Temperatura (°C)	Magnitude
Densidade (kg/m ³)	-	463,00
Calor específico	20	0,90
(kJ/kgK)	800	2,73
Condutividade Térmica	20	0,096
W/(mK)	800	0,37

Fonte: McGrattan *et al.* (2022)

Para a combustão da carga de incêndio, foi prescrita uma curva de taxa de liberação de calor (HRR), que atende aos requisitos da BS 8414-2 (BSI, 2017): *Energia total de 4500 MJ ao longo de 30 minutos, com pico de (3.0 ± 0.5) MW.*

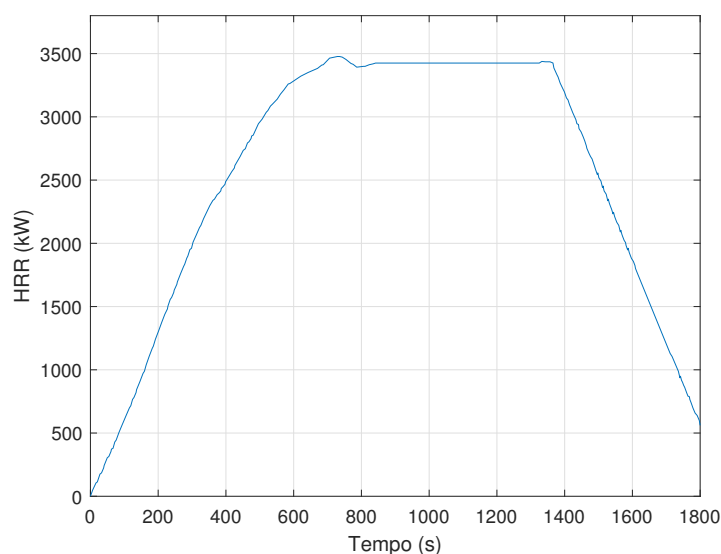


Figura 3.12: Curva de HRR adotada para a carga de incêndio

Fonte: Dréan *et al.* (2019)

Com o modelo finalizado, foram realizadas as simulações, replicando os casos ensaiados, cujos parâmetros de análise foram resumidos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Plano de Simulações para calibração do modelo no FDS

ID	Posição da Carga	Material do núcleo
	de Incêndio	interno
SIM_001_CALIB_CFD_INT_MW	Interna	MW
SIM_002_CALIB_CFD_INT_PIR	Interna	PIR
SIM_003_CALIB_CFD_INT_PUR	Interna	PUR
SIM_004_CALIB_CFD_INT_OP	Interna	OP
SIM_005_CALIB_CFD_EXT_MW	Externa	MW
SIM_006_CALIB_CFD_EXT_PIR	Externa	PIR
SIM_007_CALIB_CFD_EXT_PUR	Externa	PUR
SIM_008_CALIB_CFD_EXT_OP	Externa	OP

A Figura 3.13 compara a propagação das chamas entre a simulação numérica e os ensaios experimentais, para a fachada com núcleo em lã de rocha e carga de incêndio interna. Observa-se que a ignição do engradado de madeira e a propagação para a fachada ocorrem rapidamente, aproximadamente 5 minutos após o início. Embora haja um aumento nas chamas entre 10 e 15 minutos, correspondente ao intervalo de maior HRR (Figura 3.12), o revestimento em lã de rocha, devido ao seu bom desempenho frente ao fogo, não gera um grande volume de chamas, apresentando uma diminuição após 20 minutos.

A partir da comparação, conseguiu-se obter uma boa previsão do incêndio, frente aos ensaios. Cabe destacar também a influência do vento nos ensaios, cujo efeito pode ser observado no ligeiro deslocamento das chamas nas Figuras 3.13c e 3.13e, tendo um papel fundamental na propagação das chamas para a parede secundária. Nas simulações numéricas foram consideradas variações na velocidade e direção do vento. No entanto, a calibração com total fidelidade quanto a esse parâmetro é complexa.

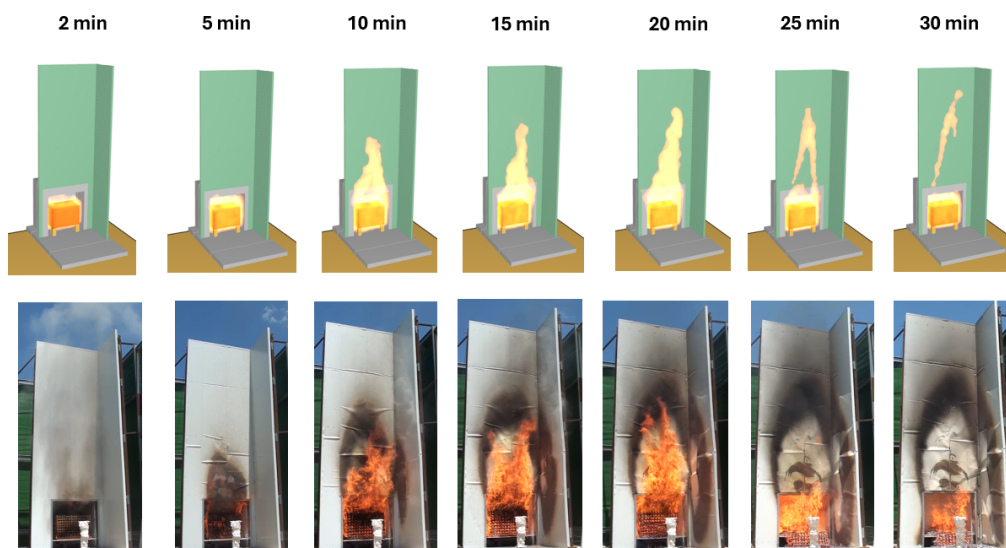


Figura 3.13: Comparação da propagação das chamas no ensaio experimental e simulação numérica - Fachada com núcleo interno em lã de rocha e carga de incêndio interna

As Figuras 3.14 a 3.21 comparam as temperaturas do gás obtidas nas simulações numéricas, e as registradas durante o ensaio realizado por de Paula *et al.* (2024a). Com o objetivo de facilitar a análise comparativa de cada configuração, são apresentados os gráficos para quatro termopares (Termopares 3, 7, 11 e 15, localizados no centro das respectivas paredes, nos níveis 1 e 2). Os dados referentes aos demais termopares estão disponíveis integralmente no Apêndice 1.

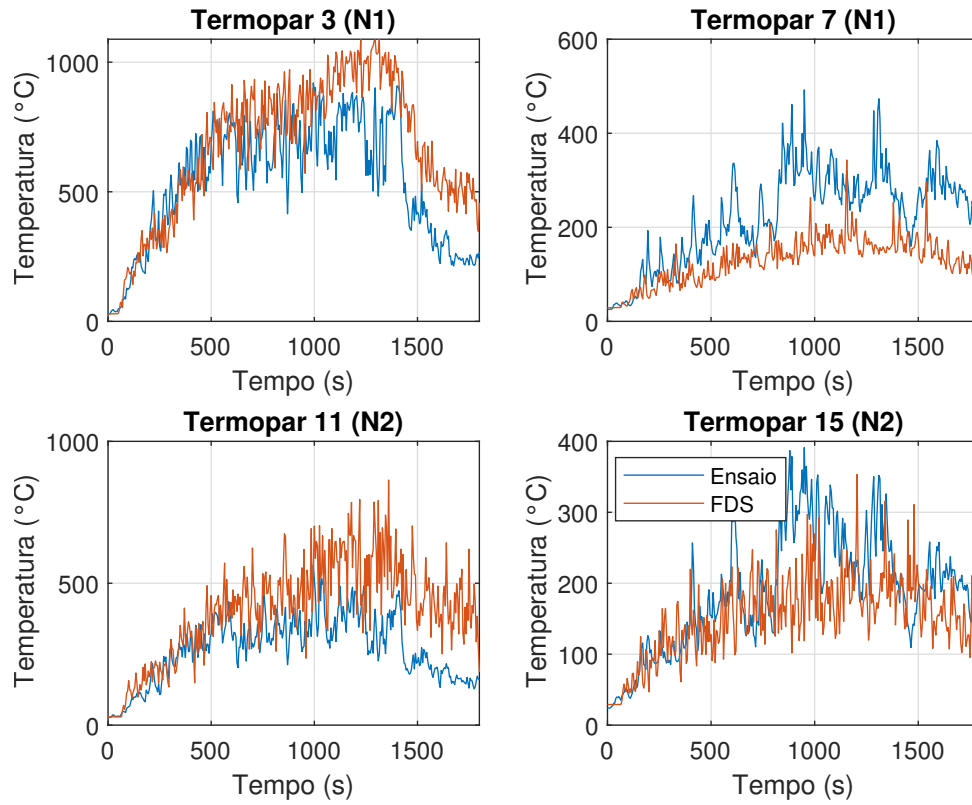


Figura 3.14: Leituras - TP3, TP7, TP11 e TP15 - SIM_001_CALIB_INT_MW

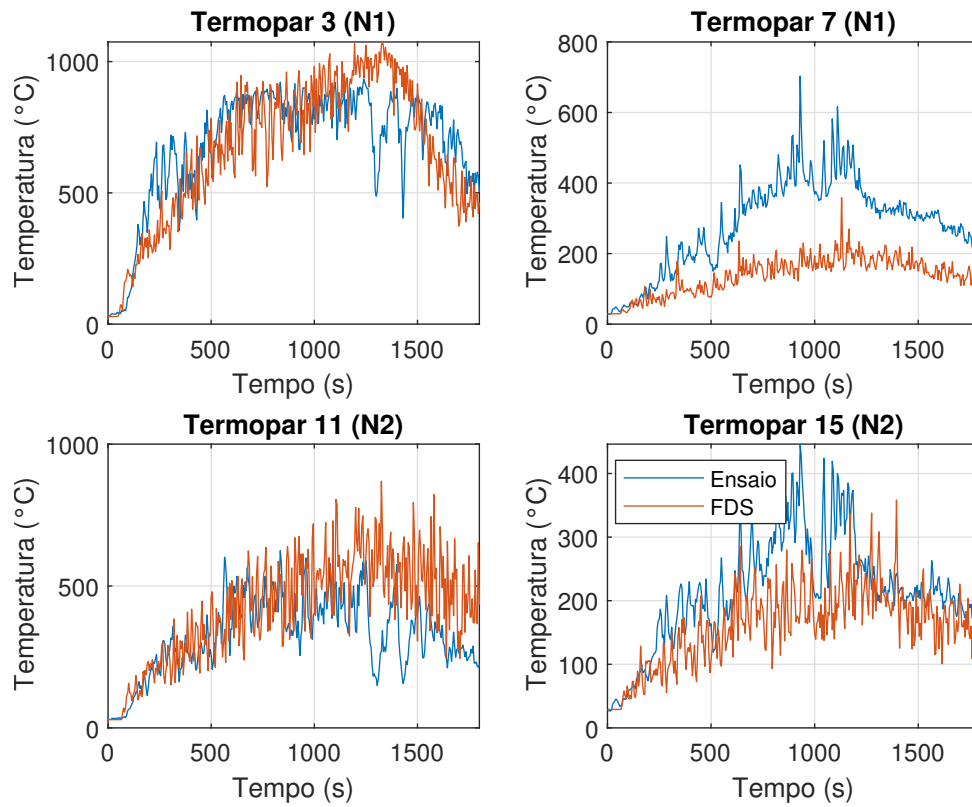


Figura 3.15: Leituras - TP3, TP7, TP11 e TP15 - SIM_002_CALIB_INT_PIR

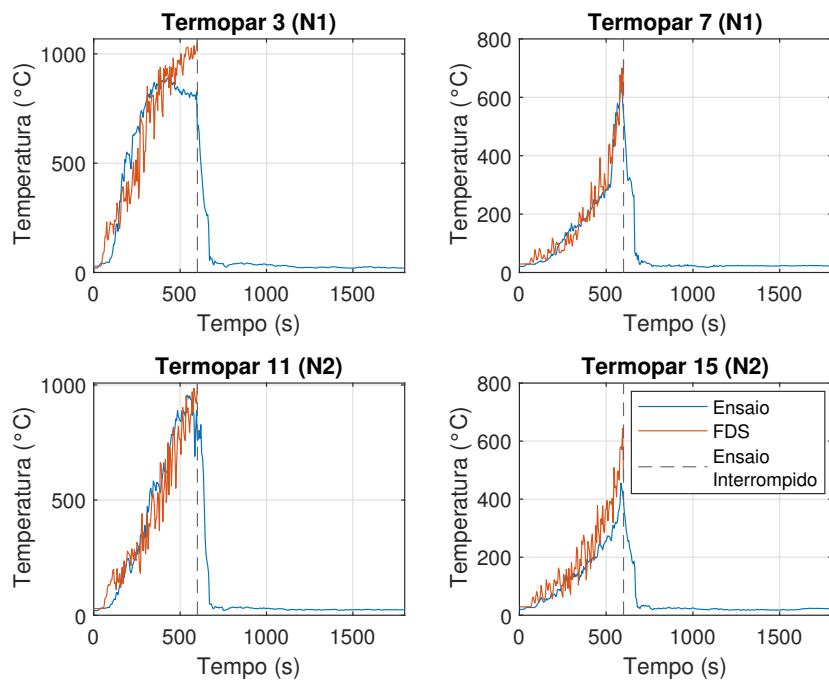


Figura 3.16: Leituras - TP3, TP7, TP11 e TP15 - SIM_003_CALIB_INT_PUR

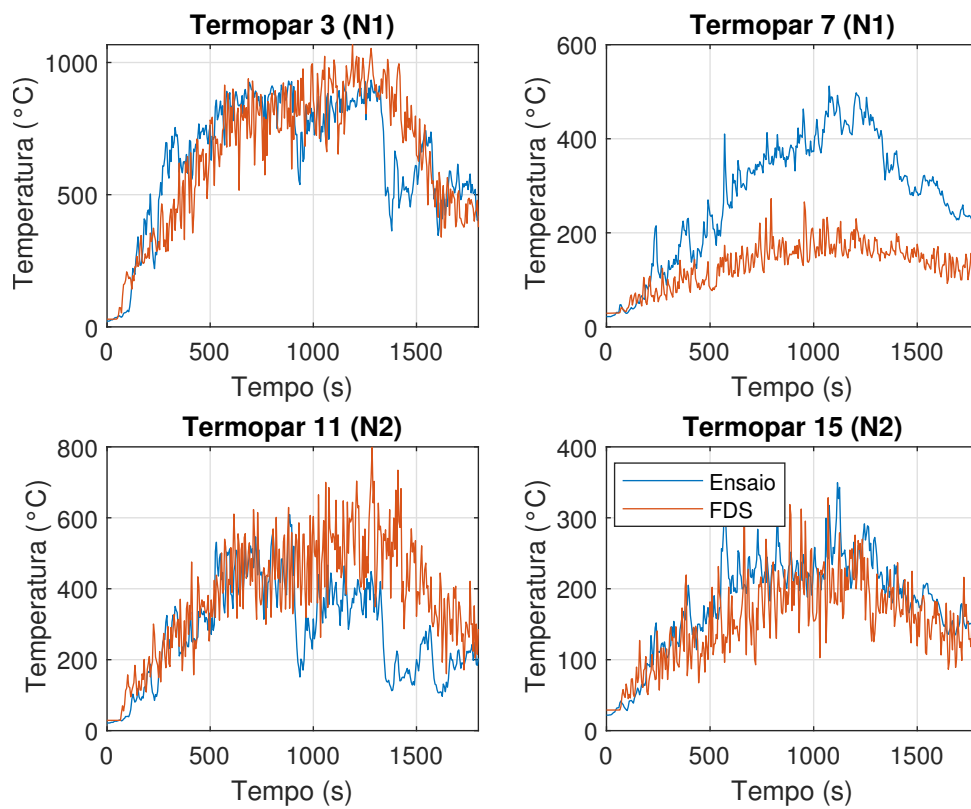


Figura 3.17: Leituras - TP3, TP7, TP11 e TP15 - SIM_004_CALIB_INT_OP

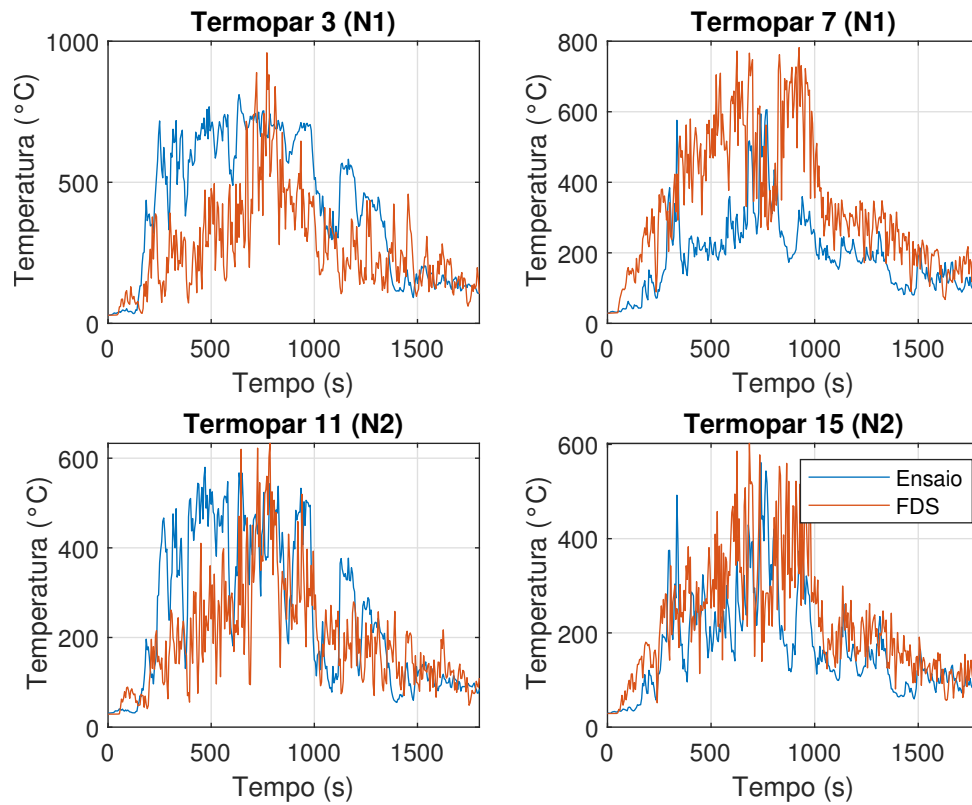


Figura 3.18: Leituras - TP3, TP7, TP11 e TP15 - SIM_005_CALIB_EXT_MW

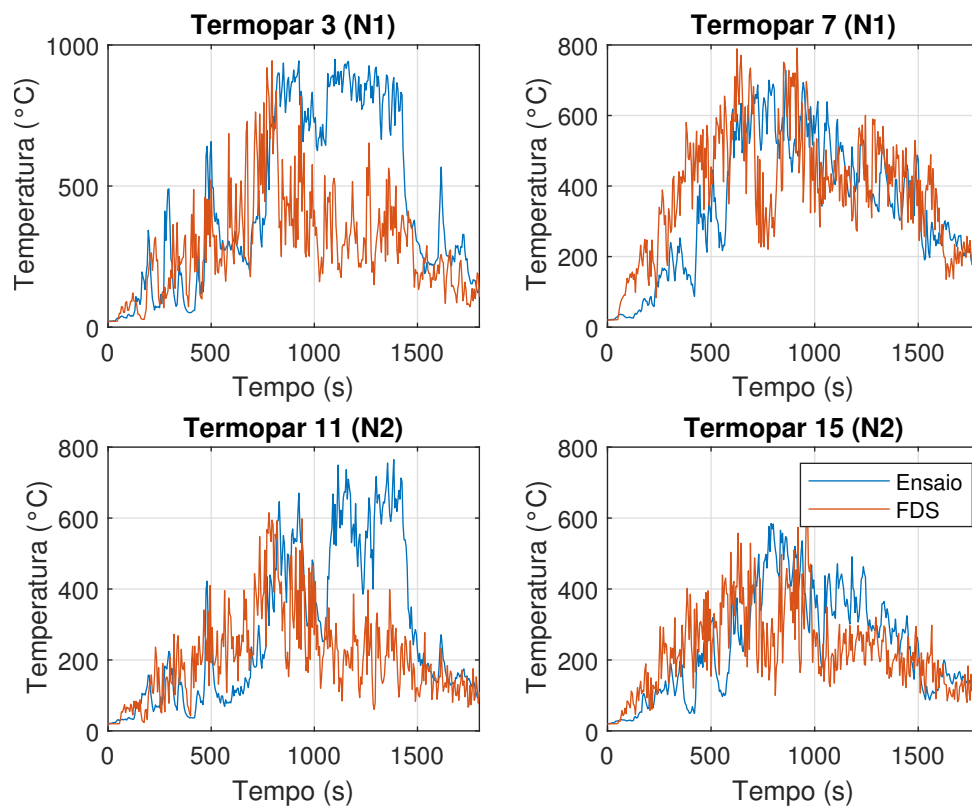


Figura 3.19: Leituras - TP3, TP7, TP11 e TP15 - SIM_006_CALIB_EXT_PIR

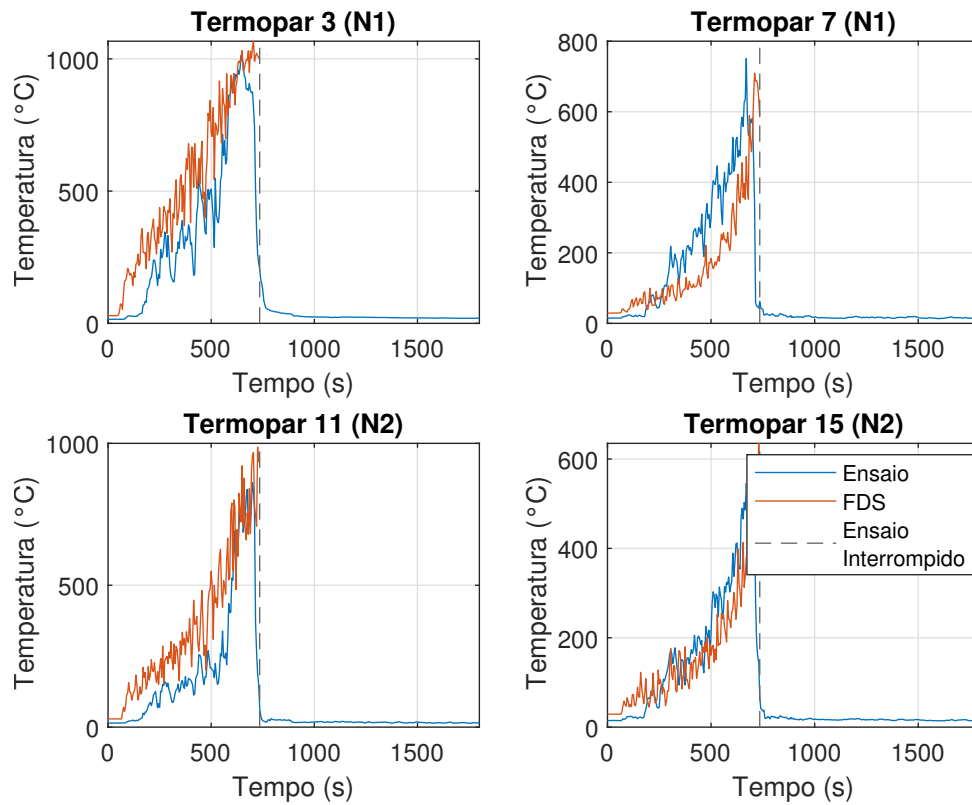


Figura 3.20: Leituras - TP3, TP7, TP11 e TP15 - SIM_007_CALIB_EXT_PUR

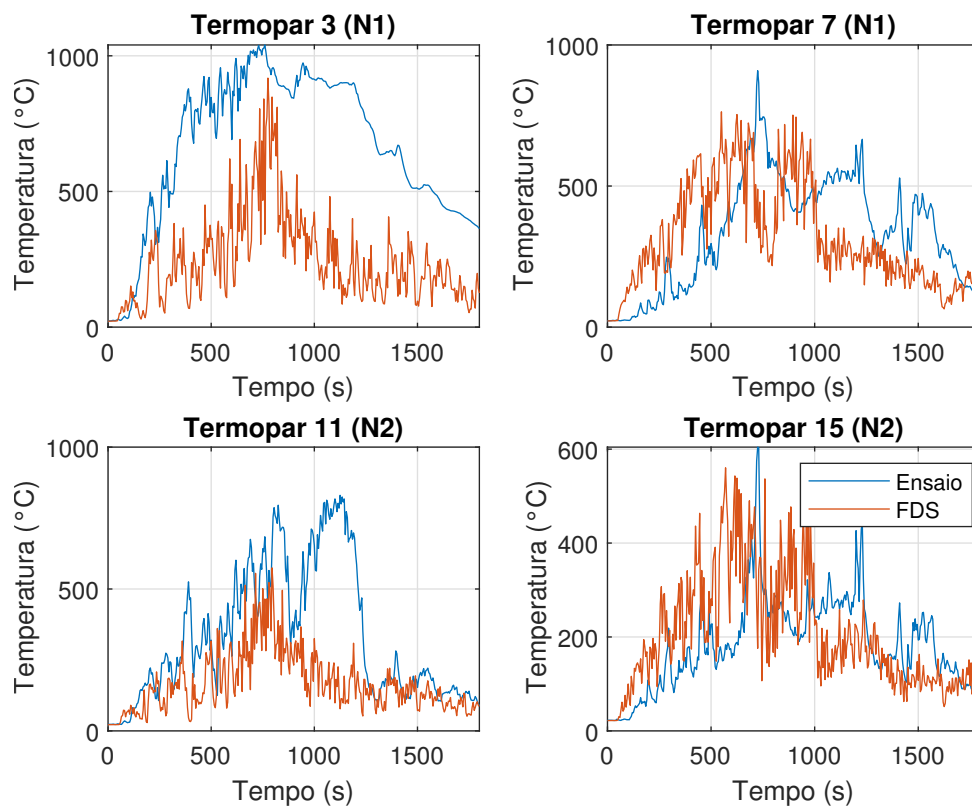


Figura 3.21: Leituras - TP3, TP7, TP11 e TP15 - SIM_008_CALIB_EXT_OP

Em termos gerais, nas simulações realizadas, as temperaturas obtidas são com-

paráveis em magnitude e em evolução aos experimentos. Nos cenários com a carga de incêndio interna, a previsão de temperaturas foi realizada com maior acurácia pelos termopares centralizados à câmara de combustão, em contramão dos termopares próximos ao encontro das paredes. É sabido que nessa região há uma concentração de calor, que foi subestimada numericamente. Cabe ressaltar que variações ambientais, principalmente do vento, atuam como um ponto crucial no desenvolvimento das temperaturas, tornando mais complexo o processo de calibração. Nesse sentido, nos cenários com a carga de incêndio externa, os fenômenos de turbulência, aliados à exposição da carga de incêndio ao ambiente (maior disponibilidade de oxigênio e mais sensível ao vento), provocaram alterações nas temperaturas obtidas, com maiores diferenças no modelo numérico.

Portanto, tendo em vista a boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, as simulações subsequentes prosseguiram com as propriedades térmicas calibradas.

3.3 Simulação Numérica do Incêndio em Compartimento

No que concerne o incêndio desenvolvido em compartimento, *i.e. incêndio interno*, a edificação de estudo foi modelada, retratando a construção em escala real, com dimensões máximas de 210 e 134 m (Figura 3.22). O domínio considerado foi de 220.000 x 144.000 x 8000 mm, com as fronteiras laterais e superior do tipo OPEN. As simulações conduzidas consideram um tempo de análise de 120 minutos (7200 segundos), condizente com o tempo requerido de resistência ao fogo de edificações industriais, prescrito pela NBR 14432 (ABNT, 2001).

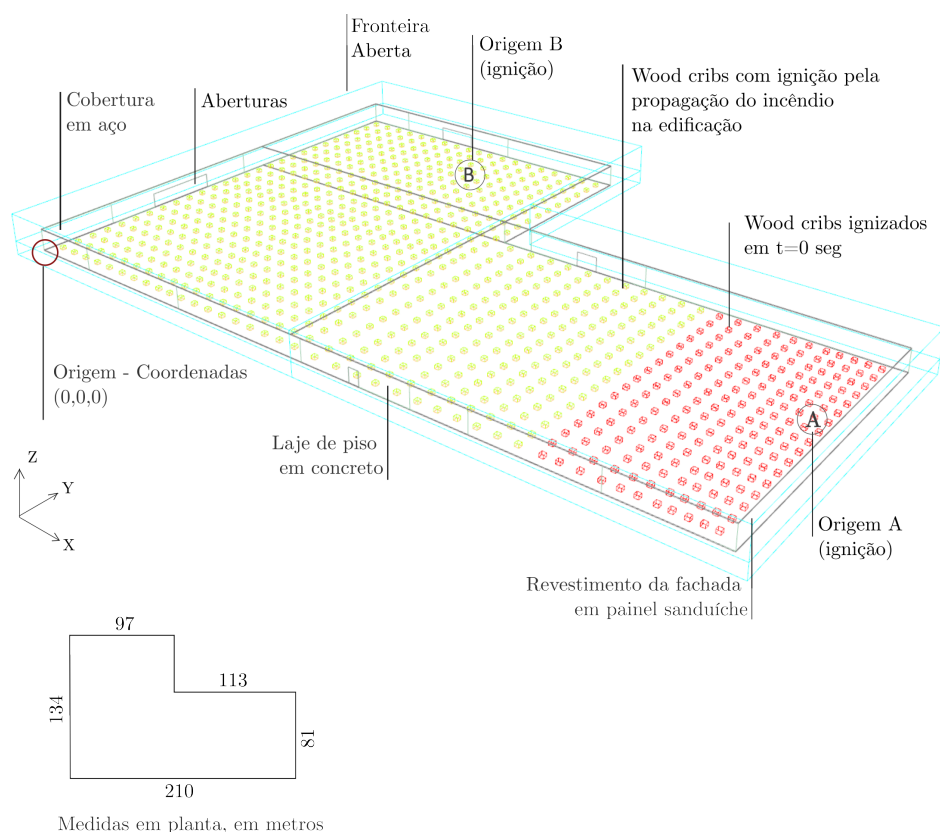


Figura 3.22: Detalhes relativos ao modelo desenvolvido para a avaliação do incêndio em compartimento

Como parâmetros de avaliação, foram analisadas a carga de incêndio, a origem da ignição (ilustrada na Figura 3.22), bem como as aberturas verticais (nas paredes) e as aberturas horizontais (na cobertura) - Tabela 3.6.

A escolha da carga de incêndio (200 MJ/m^2) foi pautada no valor recomendado pela NBR 14432 (ABNT, 2001) para edifícios industriais com artigos cerâmicos (*Industrial I-1: Artigos de argila, cerâmica ou porcelanas*). Em uma simulação posterior, para avaliar a influência deste parâmetro na dinâmica do incêndio, foi alterada para 500 MJ/m^2 , relativo ao armazenamento de papéis (*Industrial I-1: Papéis - Acabamento*).

Para as aberturas, buscou-se variar as alternativas de aberturas presentes em edifícios industriais. Em um primeiro momento, com a inserção de claraboias (SIM_011). Em seguida, aumentando a quantidade de portas (SIM_012 e SIM_013).

Tabela 3.6: Simulações para avaliação da propagação do incêndio em compartimento

ID	Abertura Vertical	Abertura Horizontal	Origem	Carga de Incêndio (MJ/m ²)
SIM_009_CFD_INT_VA-50_HF_A_FL200	Aberta (50%)	Fechada	A	200
SIM_010_CFD_INT_VA-50_HF_A_FL500	Aberta (50%)	Fechada	A	500
SIM_011_CFD_INT_VA-50_HA_A_FL500	Aberta (50%)	Aberta	A	500
SIM_012_CFD_INT_VA-100_HF_A_FL200	Aberta (100%)	Fechada	A	200
SIM_013_CFD_INT_VA-100_HF_A_FL500	Aberta (100%)	Fechada	A	500
SIM_014_CFD_INT_VA-50_HF_B_FL500	Aberta (50%)	Fechada	B	500

Inicialmente, foram modeladas duas aberturas (A1 e A4), cujas coordenadas estão apresentadas na Tabela 3.7, com a origem do sistema de coordenadas indicada na Figura 3.22. No entanto, a variação do fator de aberturas constitui um parâmetro de análise nas simulações, e as novas configurações são descritas em detalhes na Seção 3.3.2.2.

Tabela 3.7: Coordenadas das aberturas A1 e A4

Abertura	Coordenadas					
	X_{min}	X_{max}	Y_{min}	Y_{max}	Z_{min}	Z_{max}
A1	30,0	35,0	134,0	134,0	0,0	4,0
A4	0,0	0,0	38,0	58,0	0,0	4,0

Para os materiais, considerou-se as propriedades térmicas previamente validadas na etapa de calibração do modelo. As lajes de piso e cobertura foram modeladas em concreto e aço, respectivamente, e a parede de fachada em painel sanduíche, com núcleo interno em lã de rocha. Nessa etapa, o objetivo é analisar a propagação do incêndio, tendo em vista os parâmetros delineados na Tabela 3.6, não sendo de interesse, nesse momento, a variação do material do núcleo interno da parede de fachada.

Além disso, cabe ressaltar que nas simulações realizadas, o foco era avaliar a fachada sob o ponto de vista dos ensaios conduzidos por de Paula et al. (2024a), que investigaram experimentalmente o sistema de fachada sob dois cenários de incêndios. No cenário interno, conforme prescrito pela BS 8414-2 (BSI, 2017), a carga de incêndio é posicionada na câmara de combustão. Essa situação busca replicar a condição de um incêndio que está em desenvolvimento no interior do compartimento e atinge a fachada por meio de uma abertura. Portanto, a fim de replicar essa condição, foi estabelecido que a face interna da fachada está isolada do incêndio, não sendo realizada a modelagem de demais elementos que compõem o sistema de fachada, como o isolamento e a cavidade.

3.3.1 Modelagem da Carga de Incêndio

Diversas abordagens para a modelagem da carga de incêndio foram examinadas no estudo realizado por Degler *et al.* (2015), conforme esquematizado na Figura 3.23.

No Método 1, o engradado de madeira é modelado e submetido ao processo de pirólise em duas etapas. Na primeira, o combustível é aquecido até a gaseificação. Em seguida, na segunda etapa, o combustível igniza a madeira e é iniciado o processo de combustão natural.

No Método 2, é realizada a simplificação do processo, excluída a etapa de definição de parâmetros relacionados à pirólise. Em função dessa redução de complexidade, há uma diminuição do tempo de processamento. A geometria, análoga ao do Método 1, consiste na modelagem do engradado de madeira, porém sendo definida a taxa de liberação de calor por unidade de área (HRRPUA) e a temperatura de ignição.

Por fim, o Método 3 consiste em inserir como *input* a taxa de liberação de calor (HRR) e a geometria é modelada como um cubo.

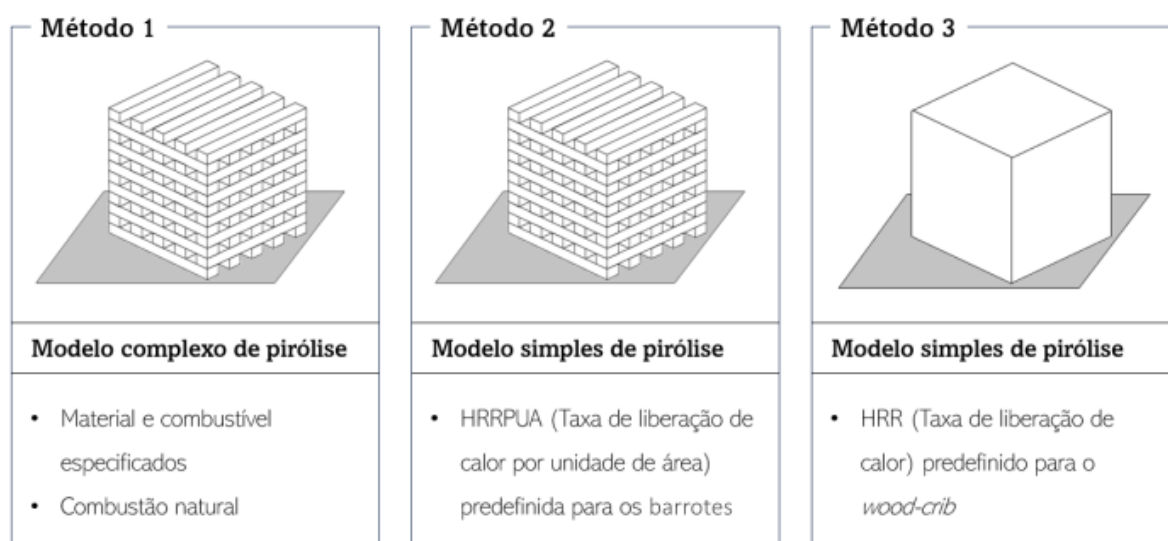


Figura 3.23: Métodos para modelagem da carga de incêndio em engradado de madeira

Fonte: Adaptado de Degler *et al.* (2015)

Os autores mencionados revelam desvantagens para a modelagem da carga de incêndio utilizando o Método 3, como: limitar o tempo de queima dos engradados de madeira a um período fixo; os objetos queimam uniformemente em toda a área de superfície após a ignição; a forma cúbica impede qualquer fluxo de ar através do objeto. Contudo, nas simulações realizadas no referido trabalho, os autores concluem que, para os *cribs* de alturas 0,6 e 1,0 m, os resultados obtidos utilizando os Métodos 2 e 3 foram semelhantes. Diante disso, mesmo com as desvantagens previamente apontadas, os pesquisadores consideraram os resultados aceitáveis e optaram por prosseguir com a modelagem com o Método 3.

Nesta dissertação, dada a grande escala da edificação, optou-se por utilizar o Método 3 para a modelagem da carga de incêndio. Tal decisão foi fundamentada no considerável custo computacional associado ao Método 1 e nas conclusões extraídas do estudo conduzido por Degler *et al.* (2015).

Consoante o apresentado na Figura 3.22, a carga de incêndio considerada nas simulações compreende um conjunto de engradados de madeira, distribuídos de forma homogênea pelo compartimento, seguindo uma distribuição probabilística da carga de incêndio, tomando como base o valor estabelecido pela NBR 14432 (ABNT, 2001). Essa escolha é justificada pelo fato de que a edificação em questão abriga uma combinação heterogênea de materiais combustíveis, incluindo peças cerâmicas, equipamentos elétricos, papéis e consumíveis diversos. Mas, para que não haja perda de representatividade do caso inicialmente proposto, a escolha da curva da taxa de liberação de calor foi criteriosa e ponderou todos os pontos acima levantados.

Nas simulações, a carga de incêndio adotada foi de engradados de madeira, tomando como base um experimento realizado pelo NIST (*Test16_8woodCrib_r1*), composto por 8 engradados de dimensões 22"x 22"x 18" (55,88 x 55,88 x 45,72 cm) dispostos 2 x 2 x 2. Informações adicionais relacionadas ao experimento incluem (NIST, 2021):

- Taxa de liberação de calor máxima de 2.301 kW e energia total liberada de 5.120 MJ;
- Razão de O_2 consumido por massa de combustível (*O2 Yield*): 1,247 kg/kg
- Razão de CO_2 gerado por massa de combustível (*CO2 Yield*): 1,633 kg/kg
- Razão de CO gerado por massa de combustível (*CO Yield*): 0,02625 kg/kg
- Quantidade de fuligem gerada (*Soot Yield*): 0,00239 kg/kg
- Calor líquido de combustão por unidade de massa de oxigênio consumido (Ef): 13,61 MJ/kg

A curva experimental de liberação de calor em função do tempo é apresentada na Figura 3.24, com destaque a ignição (1), pico (P), *fire embers* (2) e extinção (3).

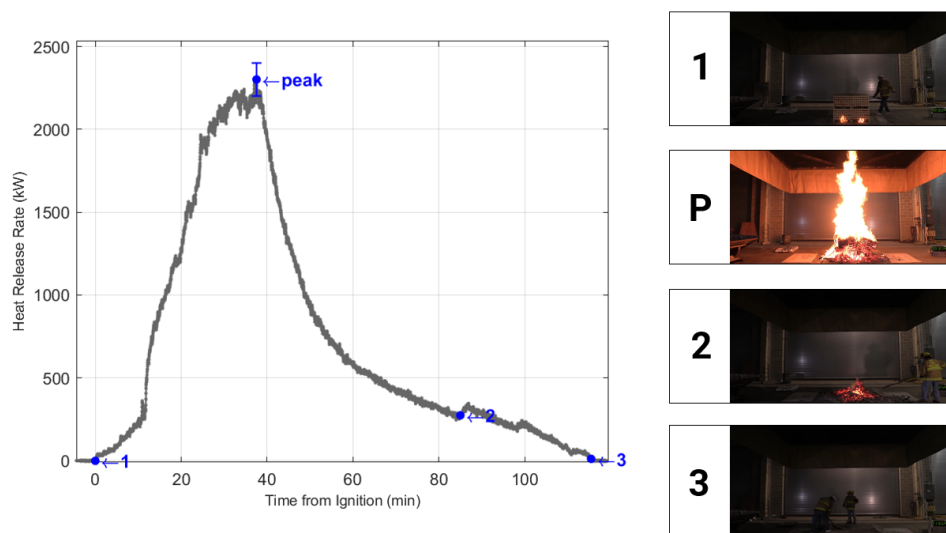


Figura 3.24: Taxa de liberação de calor x tempo - Ensaio

Fonte: Adaptado de NIST (2021)

A carga de incêndio com tais características e dimensões foi modelada, simulada e validada em análises numéricas realizadas no FDS (Figura 3.25 - Curva laranja). Mesmo com as simplificações adotadas durante a modelagem (Método 3), foram obtidos erros máximos na ordem de 6%, o que valida a metodologia adotada.

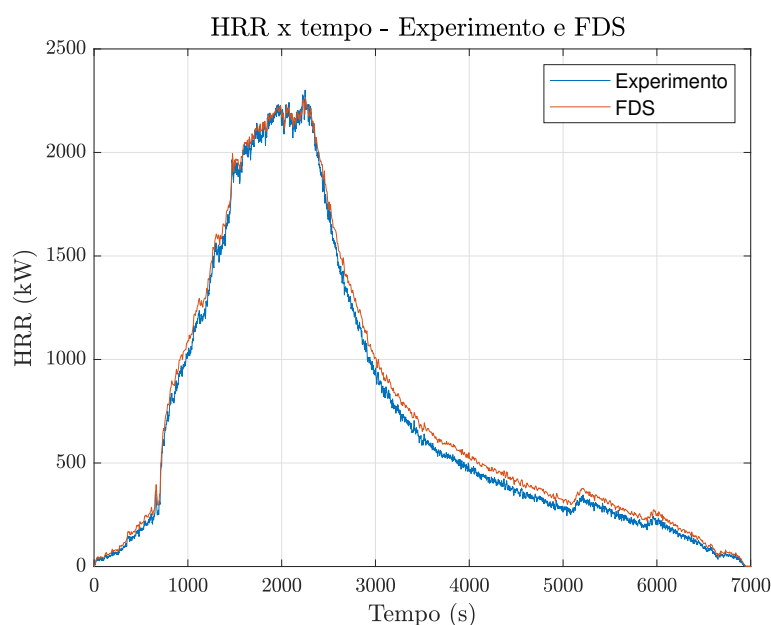


Figura 3.25: Comparação da taxa de liberação de calor (HRR) x tempo, obtidos por ensaios realizados pelo NIST e simulações numéricas no FDS

A escolha dessa configuração de engradado de madeira, ao invés da BS 8414-2 (BSI, 2017), é fundamentada em um maior tempo ($t = 2000$ s) até o pico de HRR, representando

melhor uma carga de incêndio de artigos cerâmicos, que possui uma combustão mais lenta, em comparação à madeira.

A distribuição da carga de incêndio pela edificação é representada de forma ilustrativa na Figura 3.22, com os engradados afastados entre 3 e 4 metros. Como pode ser observado na imagem, a carga de incêndio foi modelada por elementos em vermelho e amarelo. Os primeiros, possuem um *burner*, ativado em $t=0$ segundos. O incêndio iniciado nesse conjunto de engradados é propagado aos demais, sendo definida temperatura de ignição de 260°C , baseado em Janardhan e Hostikka (2021).

Para as simulações com variação da carga de incêndio, foi mantida a quantidade de engradados, bem como as propriedades previamente validadas, e alterada a HRRPUA (Taxa de Liberação de Calor por Unidade de Área). A Figura 3.26 compara a taxa de liberação de calor obtida para as cargas de incêndio de 200 MJ/m^2 e 500 MJ/m^2 .

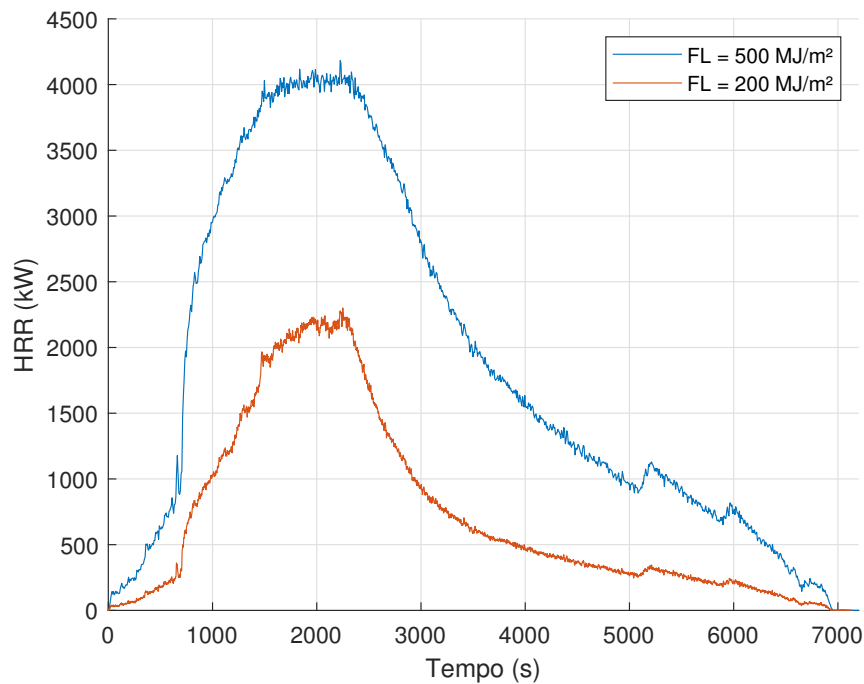


Figura 3.26: Comparação entre as curvas de HRR para as cargas de incêndio (FL) de 200 e 500 MJ/m^2

Neste processo, a HRRPUA foi variada iterativamente, alterando diretamente a energia total liberada por cada engradado (integral da curva HRR x tempo). Esse parâmetro, juntamente com o número de engradados e área da edificação, fornece a carga de incêndio - Equação 3.2.

$$FL = \frac{\text{Energia}_{\text{engradado}} * \text{num}_{\text{engradado}}}{\text{Area}} \quad (3.2)$$

3.3.2 Resultados e Discussões

As simulações foram conduzidas, com tempo médio de processamento de 12 horas. Nos diferentes cenários analisados foram extraídos *outputs* relacionados às temperaturas - Tabela 3.8.

Tabela 3.8: *Outputs* coletados

Variável	Comando no FDS	Nome da variável no FDS	Unidade
Temperatura	DEVC, SLCF	TEMPERATURE	°C
Temperatura da superfície adiabática	DEVC	ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE	°C
Temperatura da parede	BNDF	WALL_TEMPERATURE	°C

A Tabela 3.9 resume os dispositivos e *2D Slices* adicionados à simulação, bem como a sua posição relativa e as coordenadas em relação à origem (Figura 3.27). Para a coordenada Z, considerou-se a face superior da laje de piso com $Z = 0\text{m}$. A Figura destaca ainda a divisão da edificação nas Regiões 1 e 2, que serão referidas nas discussões dos resultados.

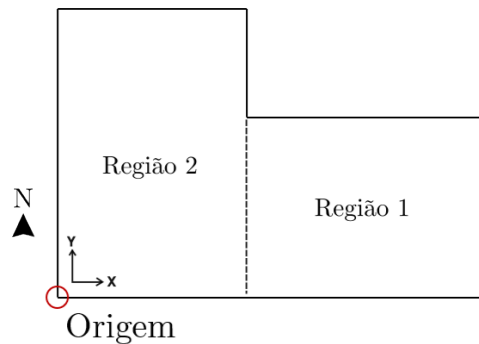


Figura 3.27: Detalhe origem do sistema de coordenadas e divisão da edificação em regiões

Tabela 3.9: Lista de dispositivos utilizados nas simulações

Dispositivo	Descrição	Coordenadas
TP1 e TP2	Termopares na transição entre Regiões 1 e 2	96.0, 20.3, Z(1.0 e 2.0)
TP3 e TP4	Termopares na Região 1	150.0, 20.0, Z(4.0 e 5.0)
TP5 e TP6	Termopares na Região 1	150.0, 50.0, Z(4.0 e 5.0)
TP7 e TP8	Termopares na Região 2	20.0, 20.0, Z(4.0 e 5.0)
TP9 e TP10	Termopares na Região 2	60.0, 20.0, Z(4.0 e 5.0)
TP11 e TP12	Termopares na Região 2	20.0, 110.0, Z(4.0 e 5.0)
TP13 e TP14	Termopares na Região 2	20.0, 65.0, Z(4.0 e 5.0)
TP15 e TP16	Termopares na Região 2	60.0, 65.0, Z(4.0 e 5.0)
TP17 e TP19	Termopares na transição entre Regiões 1 e 2	96.0, 20.3, Z(3.0 e 5.0)
TP20 a TP24	Termopares na transição entre Regiões 1 e 2	96.0, 40.5, 1.0:1.0:5.0
TP25 a TP29	Termopares na transição entre Regiões 1 e 2	96.0, 60.8, 1.0:1.0:5.0
AST A4.1 a A4.4	AST na fachada oeste, próximos à abertura	0.0, 38.0:8.0:58.0, 5.0
AST A4.1 a A4.4	AST na fachada oeste, próximos à abertura	0.0, 38.0:8.0:58.0, 5.0
AST A4.5 e A4.6	AST na fachada oeste, próximos à abertura	0.0, 37.0, Z(1.0 e 3.0)
AST A4.7 e A4.8	AST na fachada oeste, próximos à abertura	0.0, 59.0, Z(1.0 e 3.0)
AST A1.1 a A1.3	AST na fachada norte, próximos à abertura	30.0:2.5:35.0, 134.0, 5.0
AST A1.4 e A1.5	AST na fachada norte, próximos à abertura	29.0, 134.0, Z(1.0 e 3.0)
AST A1.6 e A1.7	AST na fachada norte, próximos à abertura	36.0, 134.0, Z(1.0 e 3.0)

A Figura 3.28 apresenta os termopares TP04, TP06, TP08, TP10, TP12, TP14, TP16, TP19, TP20, TP25 e os ASTs A1.2 e A4.2, mencionados na Tabela 3.9. Esses dispositivos citados na discussão de resultados para a comparação entre a evolução das temperaturas ao longo do tempo, com ênfase em suas respectivas localizações (Região 1, 2 ou Transição).

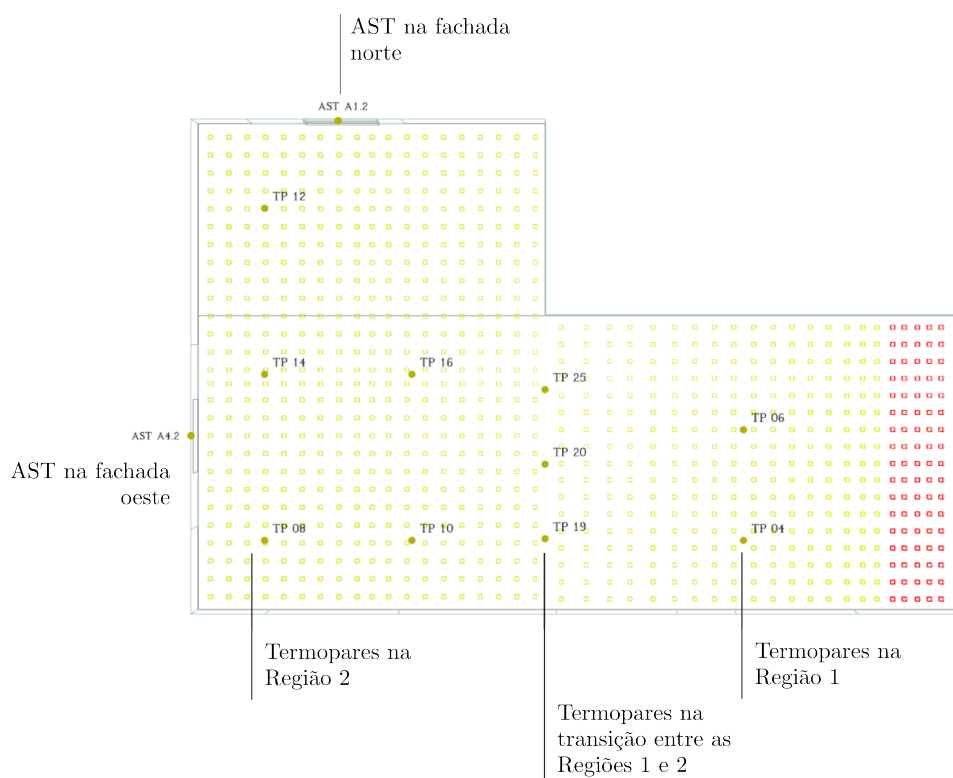


Figura 3.28: Posição relativa dos termopares TP04, TP06, TP08, TP10, TP12, TP14, TP16, TP19, TP20, TP25 e os ASTs A1.2 e A4.2 na edificação

Assim, com base nos dados coletados, serão apresentadas, a seguir, as principais conclusões, considerando os parâmetros de análise: carga de incêndio, fator de abertura e direção de propagação do incêndio.

3.3.2.1 Carga de Incêndio

A carga de incêndio foi analisada numericamente nas simulações SIM_009 e SIM_010, cujas variáveis analisadas foram resumidas na Tabela 3.6. O estudo dessa variável permite avaliar a severidade e extensão do incêndio e impacta diretamente nas temperaturas registradas.

Uma análise preliminar da propagação das chamas pelo compartimento aponta que na SIM_009, a propagação ocorre de forma lenta e, em sua totalidade, contida na Região 1 da edificação - Figura 3.29.

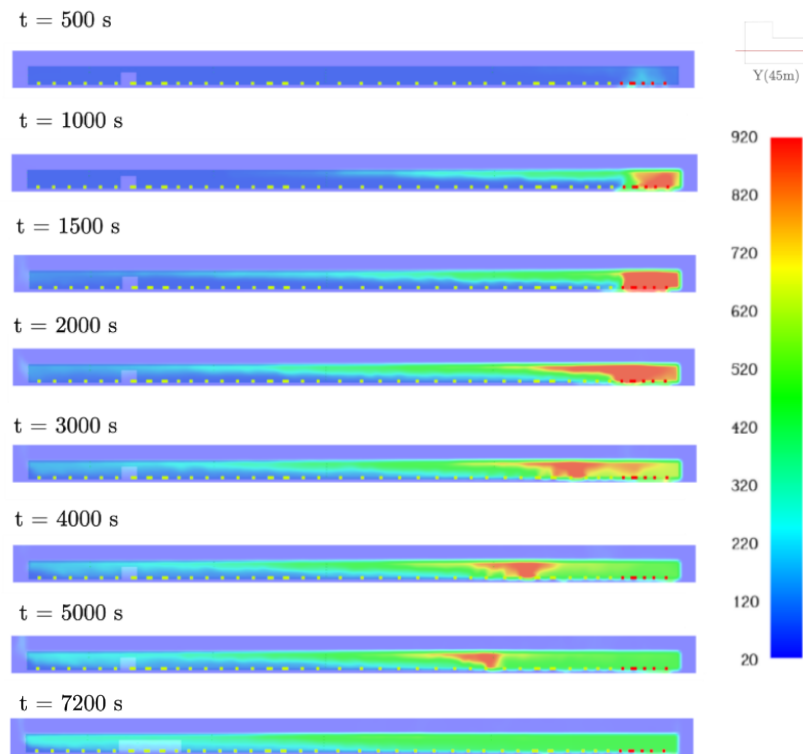


Figura 3.29: Propagação do incêndio em função do tempo - Slice Y = 45 metros

Em termos de temperaturas, a Figura 3.30 reúne os termopares nas Regiões 1, 2 e na Transição, localizados a 5,0 metros de altura.

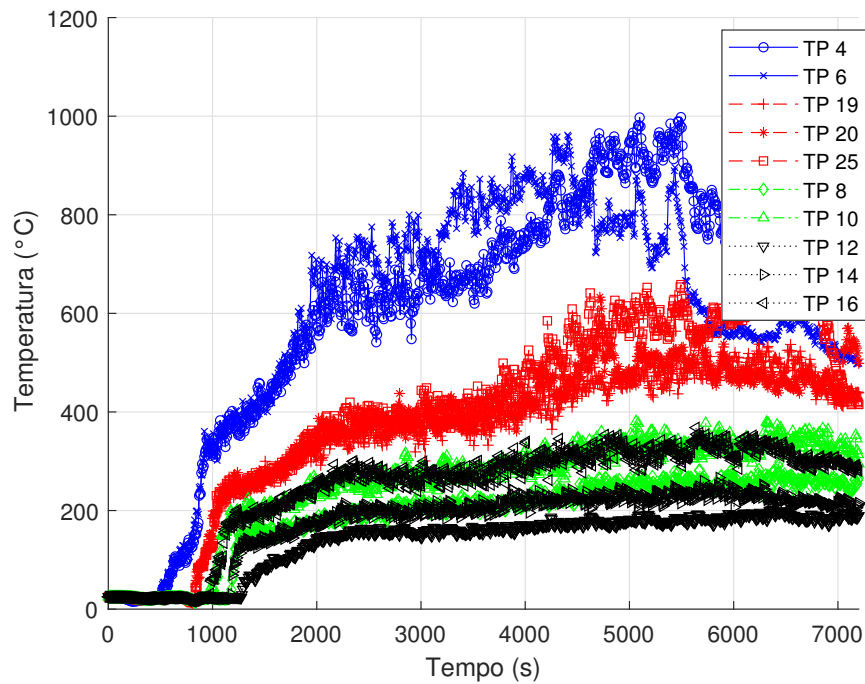


Figura 3.30: Termopares Internos ($h = 5,0\text{m}$) - SIM_009(VA50_HF_OA_FL200)

Após a análise do gráfico, algumas conclusões podem ser inferidas:

- Foram registrados valores máximos na ordem de 1000°C (TP4 e TP6 - Região 1).
- Os Termopares TP19, TP20 e TP25, localizados na transição entre as Regiões 1 e 2, apresentam aumento de temperatura após os 4000 segundos, quando a frente do incêndio se aproxima. Contudo, a variação de temperaturas ainda é pouco expressiva e se estabiliza próximo aos 5000 segundos.
- Os termopares TP8, TP10, TP12, TP14 e TP16, localizados na Região 2, possuem um crescimento aos 1350 segundos, porém tendem a se estabilizar após os 2000 segundos, em uma temperatura média de 250°C .

A análise conjunta das Figuras 3.29 e 3.30 evidencia que o incêndio é governado substancialmente pela ventilação. A carga de incêndio presente se mostra insuficiente para a propagação por toda a edificação (Figura 3.29). Assim sendo, o incêndio fica restrito à Região 1, sem aberturas e baixa disponibilidade de oxigênio. Nesse sentido, com a propagação mais restrita, a edificação é menos afetada pela ação das chamas e possui uma extinção mais facilitada. Contudo, a baixa disponibilidade de oxigênio se torna crítica às pessoas no interior da edificação.

Tal análise é complementada pela Figura 3.31, que apresenta a fração molar de oxigênio no compartimento (razão entre o número de mols de O_2 em relação ao número de mols da mistura). Nela, é possível observar que entre os 5000 e 7200 segundos, a Região 1 está, em sua maioria, em concentrações baixas, ou nulas de oxigênio.

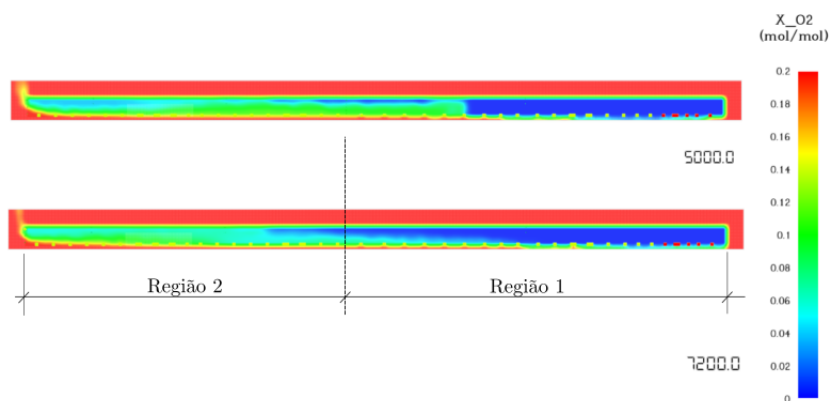


Figura 3.31: Fração molar de oxigênio aos 7200 segundos de análise - Carga de incêndio de 200 MJ/m^2

Para complementar a hipótese de combustão incompleta da carga de incêndio, as Figuras 3.32 e 3.33 apresentam a taxa de queima do combustível no interior do compartimento.

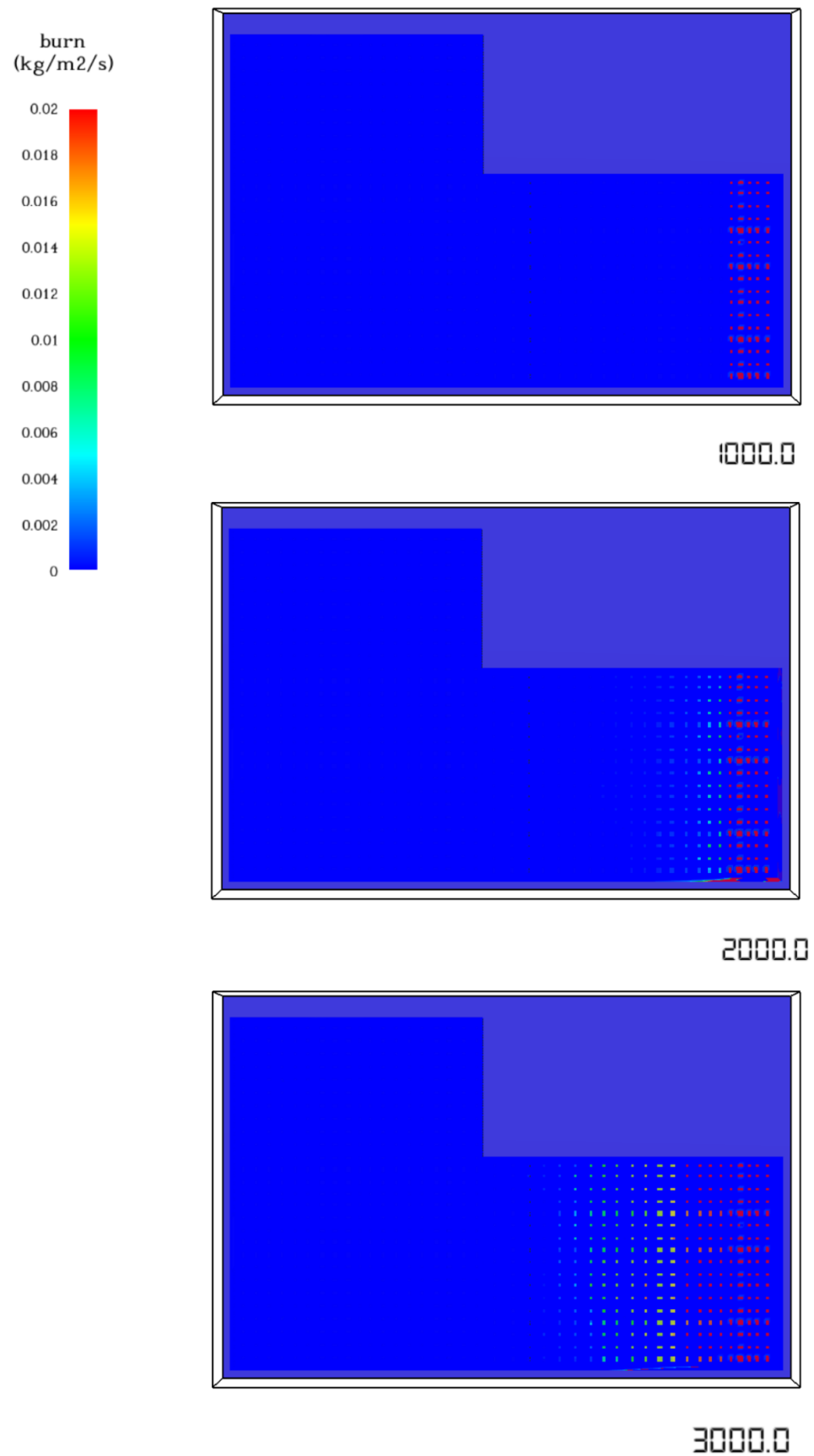


Figura 3.32: Taxa de queima do combustível - $t = 1000, 2000$ e 3000 segundos

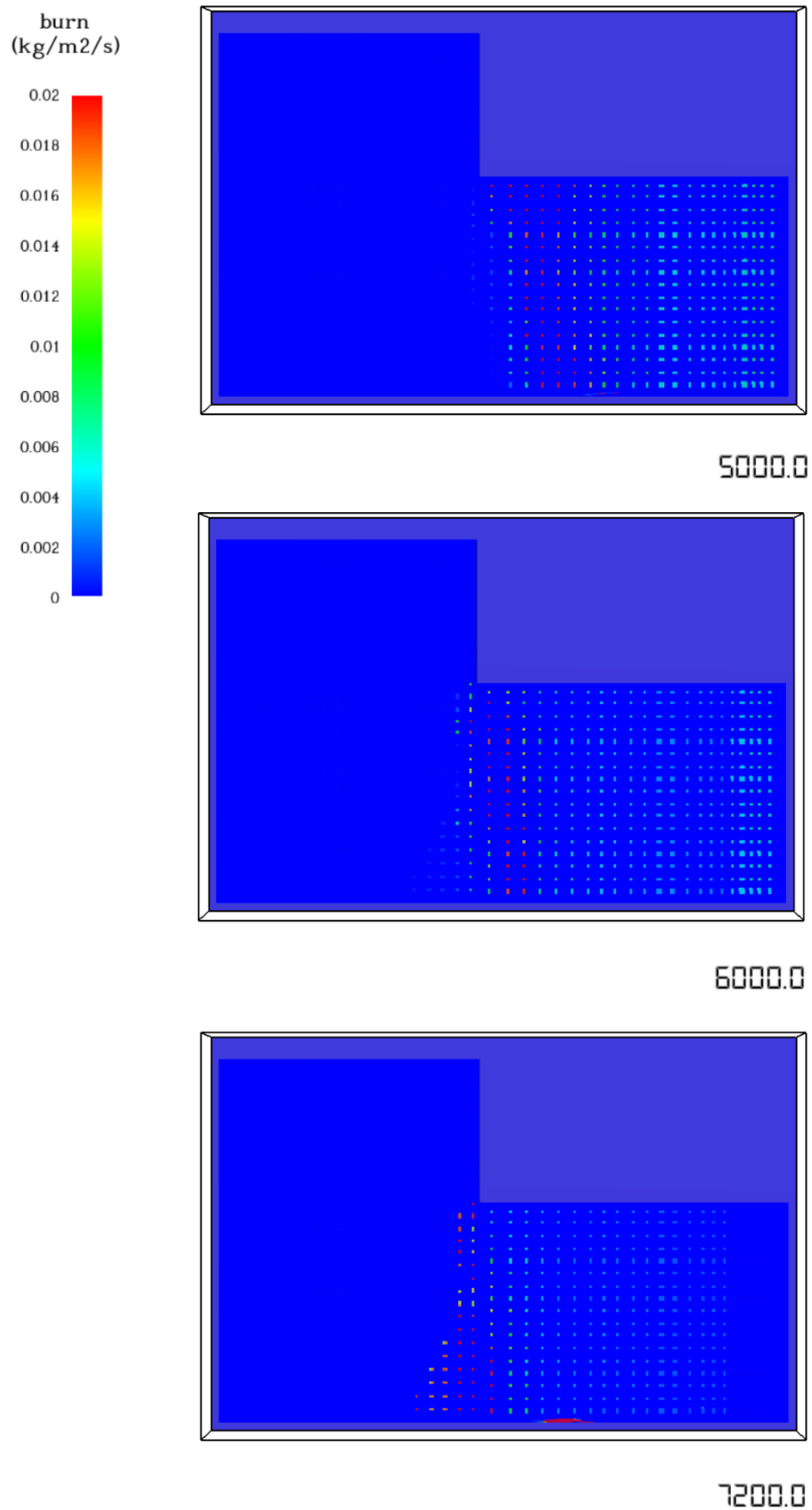


Figura 3.33: Taxa de queima do combustível - $t = 5000, 6000$ e 7200 segundos

A análise das imagens permite observar que, ao término da simulação, a região onde foram posicionados os termopares apresenta uma taxa de queima relativamente baixa, da ordem de $0,003 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ (Figura 3.34). Dessa forma, a combinação entre a reduzida taxa de queima e a baixa concentração de oxigênio sugere que o incêndio está limitado pela ventilação.

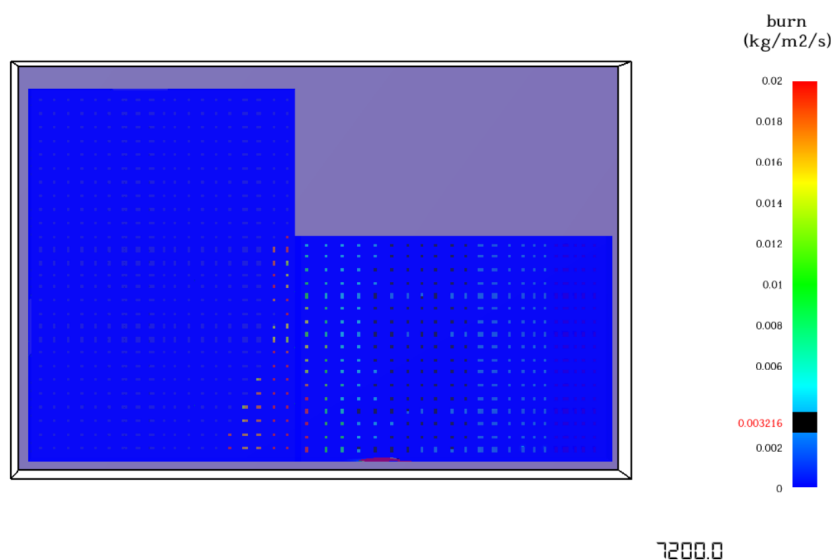


Figura 3.34: Taxa de queima do combustível - $t = 7200$ segundos

Em seguida, analisando a carga de incêndio de 500 MJ/m^2 , percebe-se que tal alteração impacta tanto nas temperaturas máximas registradas dentro do compartimento, quanto em características do incêndio. A Figura 3.35 destaca que, para a carga de incêndio de 500 MJ/m^2 , o cenário de um incêndio controlado pela ventilação, previamente descrito, não é percebido.

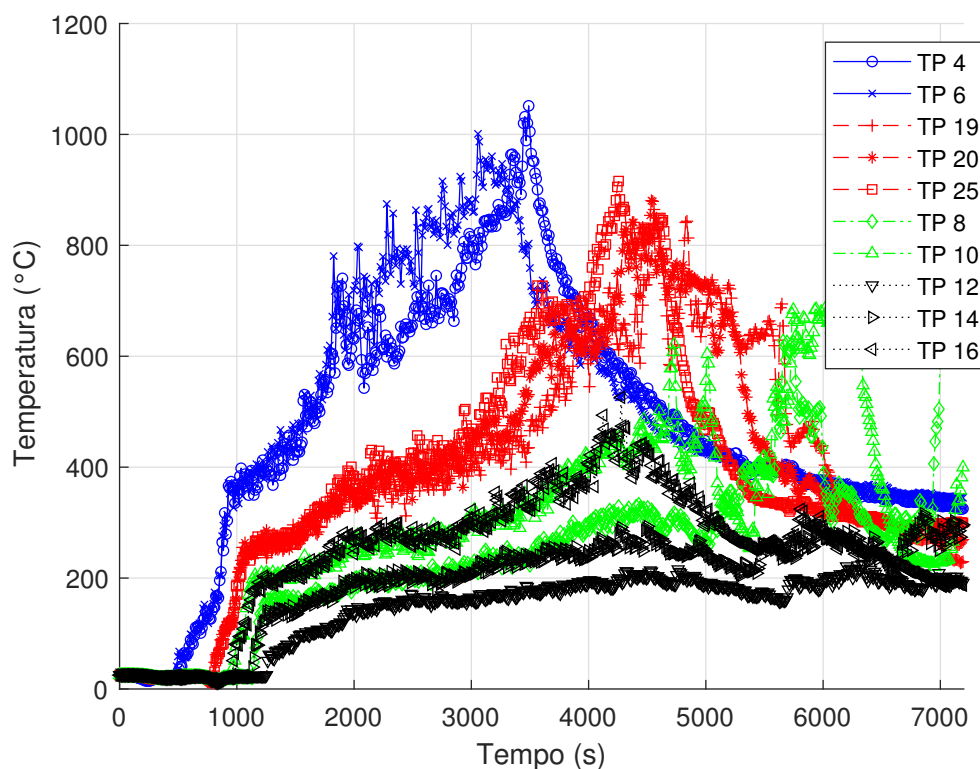


Figura 3.35: Termopares Internos ($h = 5,0\text{m}$) - SIM_010(VA50_HF_OA_FL500)

Assim, como principais conclusões:

- Os Termopares TP4 e TP6 (Região 1) registram temperaturas crescentes até os 3500 segundos e, em seguida, decaimento exponencial evidenciando uma completa queima do combustível.
- Um comportamento análogo também é registrado para os Termopares TP19, TP20 e TP25, localizados na transição.
- Para os termopares na Região 2, também é percebido um aumento de temperaturas, sobretudo nos Termopares TP8, TP10 e TP16, que registram picos de temperatura entre os 600 e 700°C, seguidos da redução.

Pode-se concluir que o aumento da energia liberada na queima dos engradados de madeira impactou diretamente na área afetada pelo incêndio. Ademais, a modificação da carga de incêndio reflete também nas temperaturas registradas na fachada - Figura 3.36.

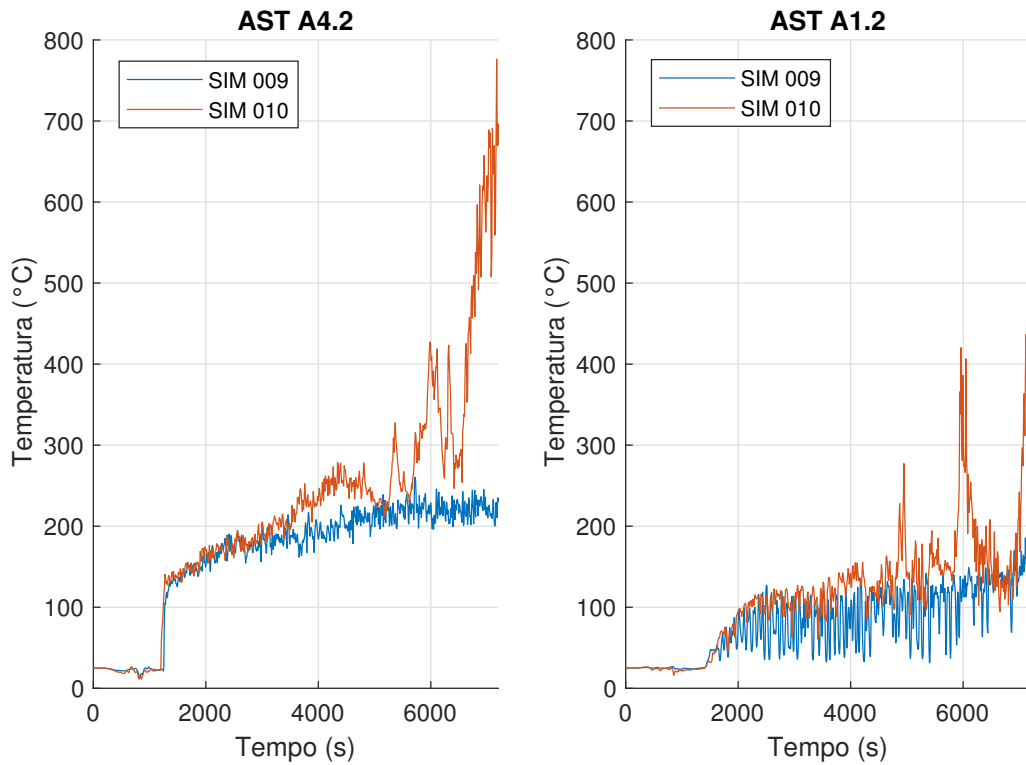


Figura 3.36: Comparação das temperaturas registradas por ASTs nas fachadas oeste (AST A4.2) e norte (AST A1.2) para as cargas de incêndio de 200 MJ/m² e 500 MJ/m²

Para a SIM_009, em ambos os ASTs analisados (AST A4.2, na fachada oeste e AST A1.2, na fachada norte), as temperaturas registradas foram baixas, ficando próximas a 220°C, durante quase toda a janela de análise.

Em contrapartida, para a SIM_010, percebe-se que aos 5000 segundos há um rápido crescimento das temperaturas até aos 776°C (AST A4.2). Nessa simulação, também é possível perceber uma propagação mais limitada do incêndio na direção da porção norte da edificação ($81 \leq y \leq 134$). Essa dinâmica é refletida nas temperaturas registradas pelo AST A1.2, que apresentam valores 44% inferiores em comparação ao AST A4.2.

Por fim, para resumir os pontos tratados previamente, a Figura 3.37 reúne graficamente a propagação das chamas pela edificação, as temperaturas registradas pelo *slice* Y=45,0m e a fração molar de oxigênio, referente à carga de incêndio de 200 MJ/m².

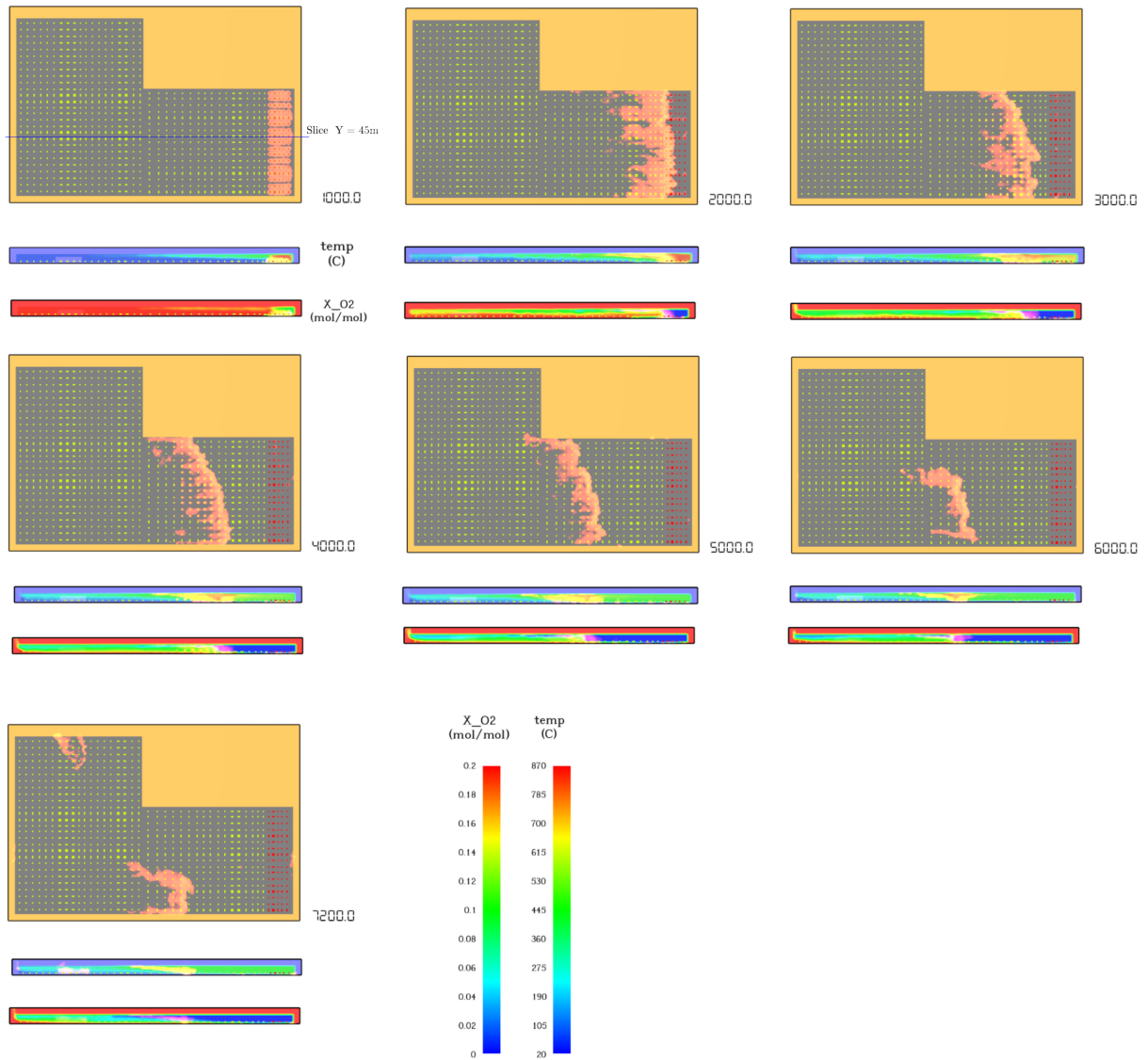


Figura 3.37: Propagação das chamas e *slices* de temperatura e fração molar de oxigênio – SIM_009($V_{A50_HF_OA_FL200}$)

3.3.2.2 Fator de Abertura

Tendo em vista os resultados obtidos nas simulações prévias, foram avaliadas mudanças no fator de abertura para o estudo da influência da ventilação no incêndio desenvolvido no compartimento - Tabela 3.6.

Para a SIM_011, foram incorporadas quatro aberturas na cobertura, com dimensões de 2,0 x 2,0 metros, centralizadas na Região 2 (designadas como A_{H1} a A_{H4}), conforme ilustrado na Figura 3.38a.

Nas simulações SIM_012 e SIM_013, duas novas aberturas na Região 1 (A2 e A3) foram adicionadas, conforme mostrado na Figura 3.38b.

As coordenadas das respectivas aberturas são resumidas na Tabela 3.10.

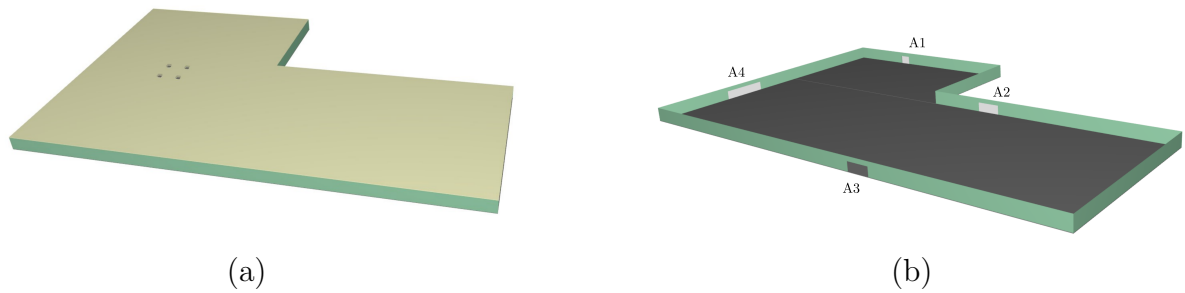


Figura 3.38: a) Aberturas A_{H1} a A_{H4} na cobertura; b) Aberturas A1 a A4

Tabela 3.10: Coordenadas e resumo de aberturas por simulação

Abertura	Coordenadas						Aberturas por simulação - SIM_0xx						
	X_{min}	X_{max}	Y_{min}	Y_{max}	Z_{min}	Z_{max}	009	010	011	012	013	014	
A1	30,0	35,0	134,0	134,0	0,0	4,0	x	x	x	x	x	x	
A2	120,0	130,0	81,0	81,0	0,0	4,0				x	x		
A3	120,0	130,0	0,0	0,0	0,0	4,0				x	x		
A4	0,0	0,0	38,0	58,0	0,0	4,0	x	x	x	x	x	x	
A5	210,0	210,0	33,0	48,0	0,0	4,0						x	
A_{H1}	41,0	43,0	60,0	62,0	6,0	6,0			x				
A_{H2}	51,0	53,0	60,0	62,0	6,0	6,0			x				
A_{H3}	41,0	43,0	70,0	72,0	6,0	6,0			x				
A_{H4}	51,0	53,0	70,0	72,0	6,0	6,0			x				

Analisando inicialmente a SIM_011, a inserção de aberturas na cobertura impacta diretamente a disponibilidade de oxigênio no compartimento. A Figura 3.39 apresenta a distribuição de temperaturas por região. Em comparação com a SIM_010 (Figura 3.35), percebe-se que não há alterações nos registros dos Termopares TP4, TP6, TP19, TP20 e TP25, localizados na Região 1 e Transição. Já para a Região 2, as diferenças foram mais pronunciadas, especialmente nos Termopares TP8 e TP10. Esses dispositivos registraram diferenças máximas entre 540 e 600°C, conforme destacado na Figura 3.40.

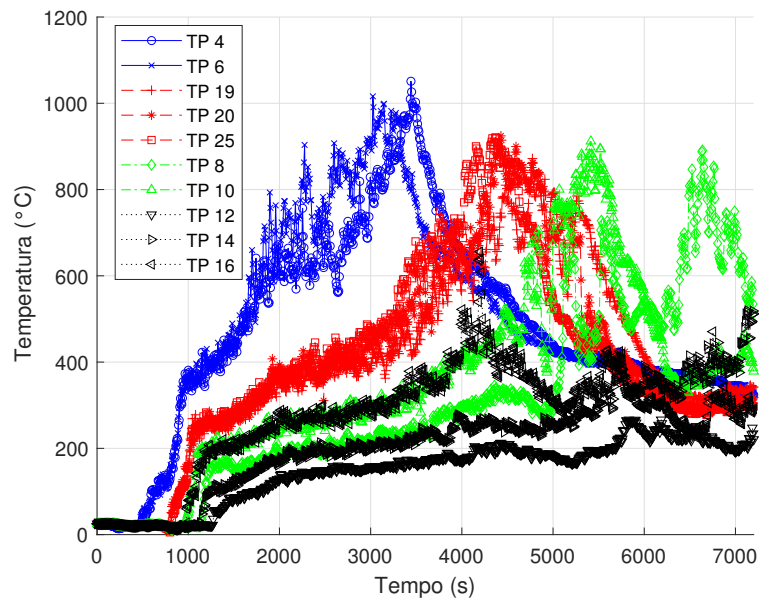


Figura 3.39: Termopares Internos ($h = 5,0\text{m}$) - SIM_011($VA-50_HA_FL500$)

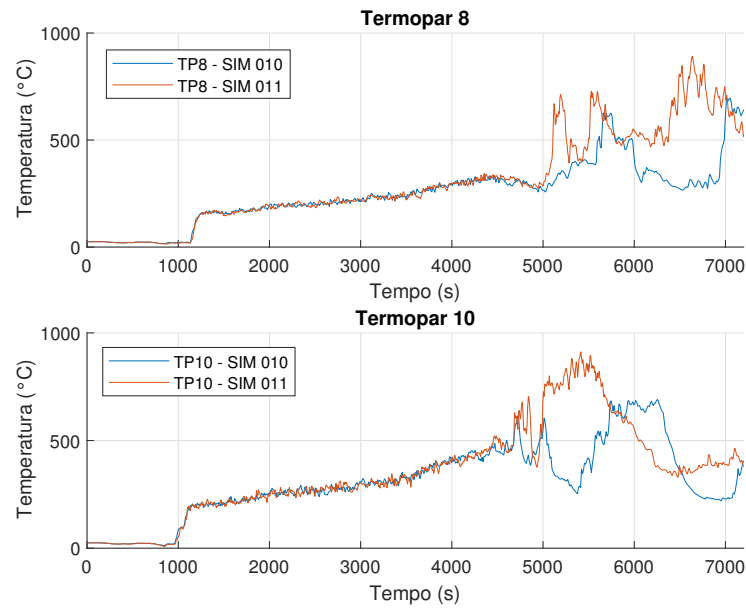


Figura 3.40: Comparação entre TP8 e TP10 para SIM_010 ($VA-50_HF_FL500$) e SIM_011 ($VA-50_HA_FL500$)

Analisando os dispositivos localizados na fachada oeste (AST A4.2), constata-se que a inserção de aberturas na cobertura impactou nas temperaturas registradas. A Figura 3.41 compara a evolução das temperaturas, em função do tempo para as SIM_009 ($FL = 200 \text{ MJ/m}^2$), SIM_010 ($FL = 500 \text{ MJ/m}^2$) e SIM_011 ($FL = 500 \text{ MJ/m}^2$, e aberturas na cobertura).

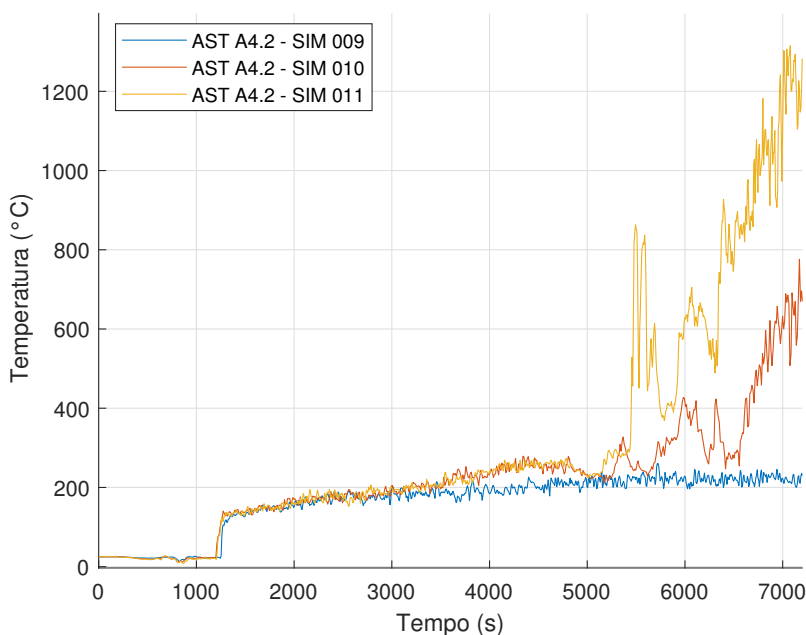


Figura 3.41: Comparação das temperaturas registradas pelo AST A4.2 para SIM_009, SIM_010 e SIM_011

Os resultados obtidos indicam um aumento de 68,3% na temperatura registrada pelo AST A4.2 (de 776°C para 1306°C) para as simulações SIM_010 e SIM_011. Em comparação com a simulação SIM_009 ($FL = 200 \text{ MJ/m}^2$), foi obtido um incremento ainda mais acentuado, de 513,6%. Esses achados reforçam as observações anteriores sobre a limitação na disponibilidade de oxigênio dentro do compartimento. Com a abertura de uma área de 16 m^2 na cobertura, foi possível observar um aumento significativo na temperatura, atribuída à maior alimentação do incêndio proporcionada por essa nova configuração.

Esse ponto deve ser avaliado com cautela, tendo em vista que as claraboias de edifícios industriais são frequentemente fabricadas em material polimérico, com baixa resistência ao calor. E, portanto, o derretimento desse elemento contribui ativamente nas temperaturas no interior, podendo aumentar substancialmente a gravidade do incêndio.

No que se refere às SIM_012 e SIM_013, a análise é complementada pela introdução de aberturas na Região 1 (A2 e A3), motivada pelos resultados das SIM_009 e SIM_010, que indicaram uma baixa disponibilidade de oxigênio.

A distribuição de temperaturas nas SIM_012 e SIM_013 é apresentada, respectivamente, nas Figuras 3.42 e 3.43.

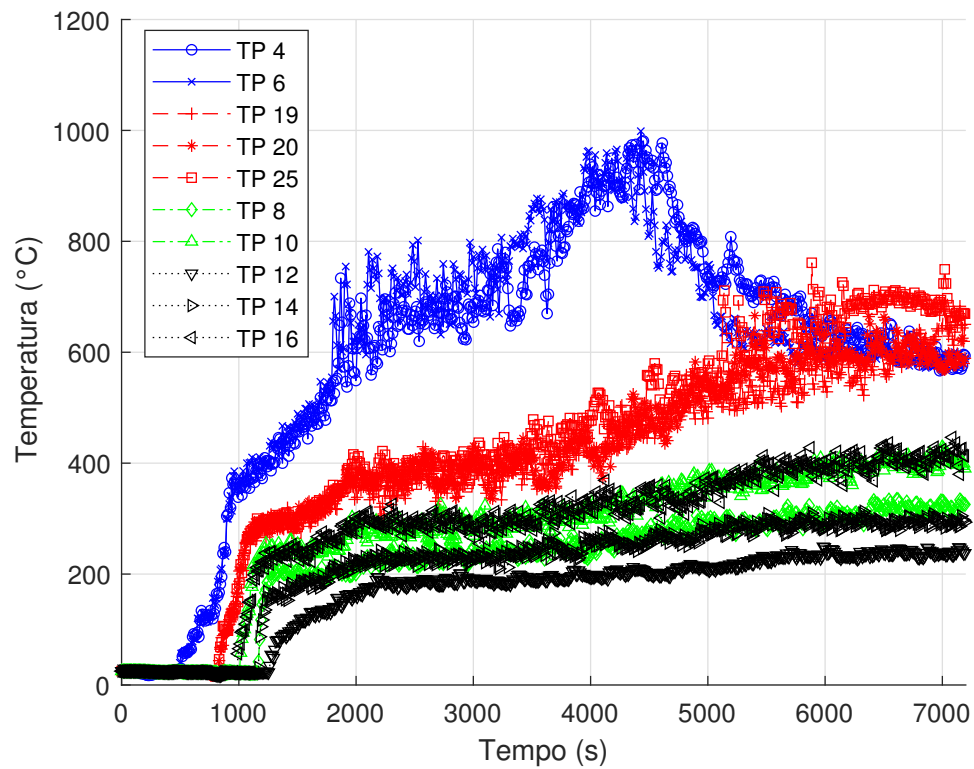


Figura 3.42: Termopares Internos ($h = 5,0\text{m}$) - SIM_012_(VA100_HF_OA_FL200)

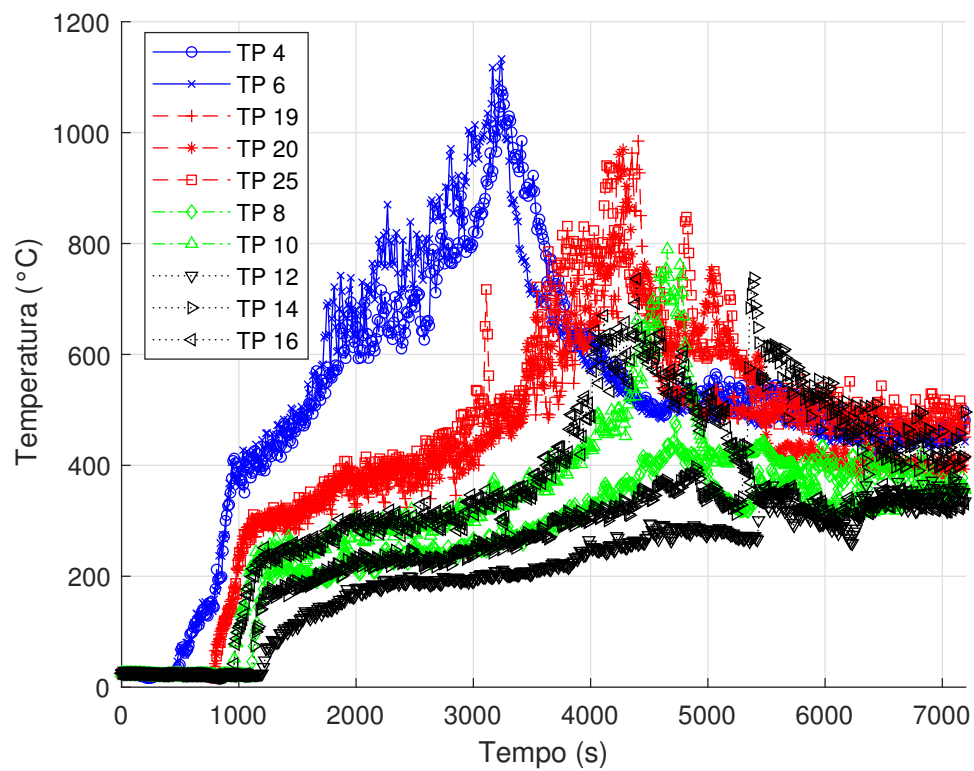


Figura 3.43: Termopares Internos ($h = 5,0\text{m}$) - SIM_013_(VA100_HF_OA_FL500)

A avaliação do impacto causado pela adição de tais aberturas é realizada mediante a comparação entre [SIM_009 e SIM_012] e [SIM_010 e SIM_013] - Figura 3.44, agrupadas em função da carga de incêndio.

Para o primeiro caso, [SIM_009 e SIM_012], a análise dos dados indica que, para as simulações com carga de incêndio de 200 MJ/m^2 , a adição das aberturas A2 e A3 provocou um aumento de 24,5 % nas temperaturas registradas na fachada. A criação de novas aberturas na Região 1 propiciou um aumento nas chamas, o que impacta nas temperaturas registradas na fachada.

Para o segundo caso, [SIM_010 e SIM_013], a influência do aumento das aberturas no incêndio foi ainda mais substancial, 57% de aumento nas temperaturas na fachada.

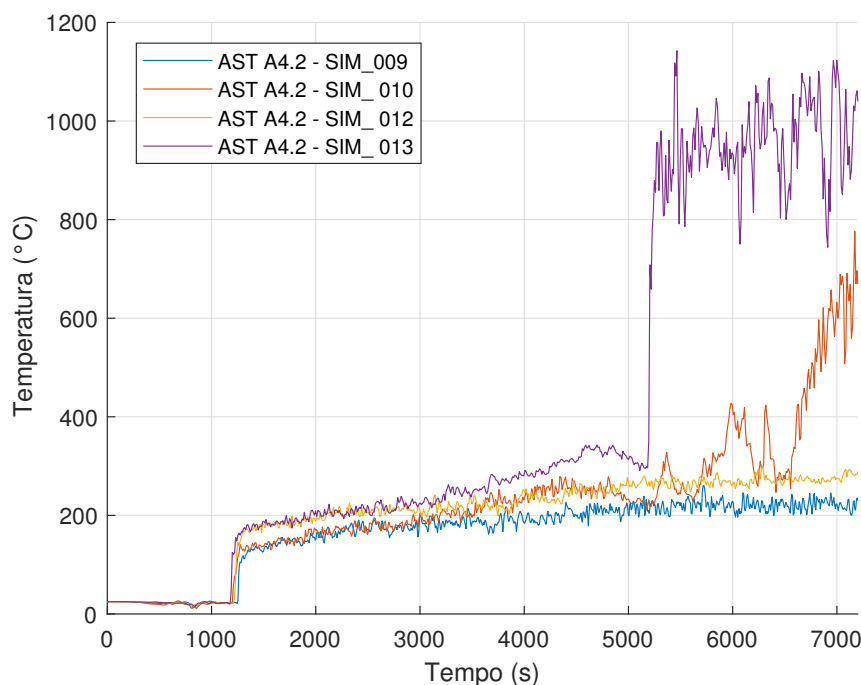


Figura 3.44: Comparação das temperaturas registradas pelo AST A4.2 para SIM_009, SIM_010, SIM_012 e SIM_013

3.3.2.3 Origem do incêndio

Nessa última alteração, foi avaliada a influência do local da ignição nas temperaturas desenvolvidas. A Figura 3.45 apresenta a configuração simulada. Buscou-se nessa etapa, manter uma quantidade semelhante de engradados de madeira para a ignição em $t=0$ segundos.

Para replicar a configuração inicialmente simulada, foi adicionada a abertura A5, com coordenadas na Tabela 3.10, localizada na fachada leste da edificação - Figura 3.45.

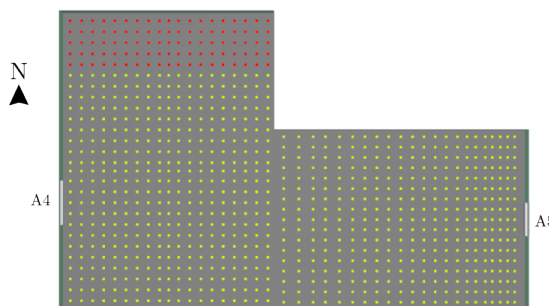


Figura 3.45: Disposição da carga de incêndio para a simulações

Como resultado, os termopares localizados na Região 2 (TP12, TP14 e TP16), como esperado pela maior proximidade, registraram as maiores temperaturas, atingindo o valor máximo de 1150°C (Figura 3.46). Esse valor, em ordem de grandeza, é semelhante, ao obtido em simulações prévias, uma vez que, foram mantidas constantes a carga de incêndio e disponibilidade de oxigênio. Assim, apenas a distribuição interna das temperaturas sofreu alteração.

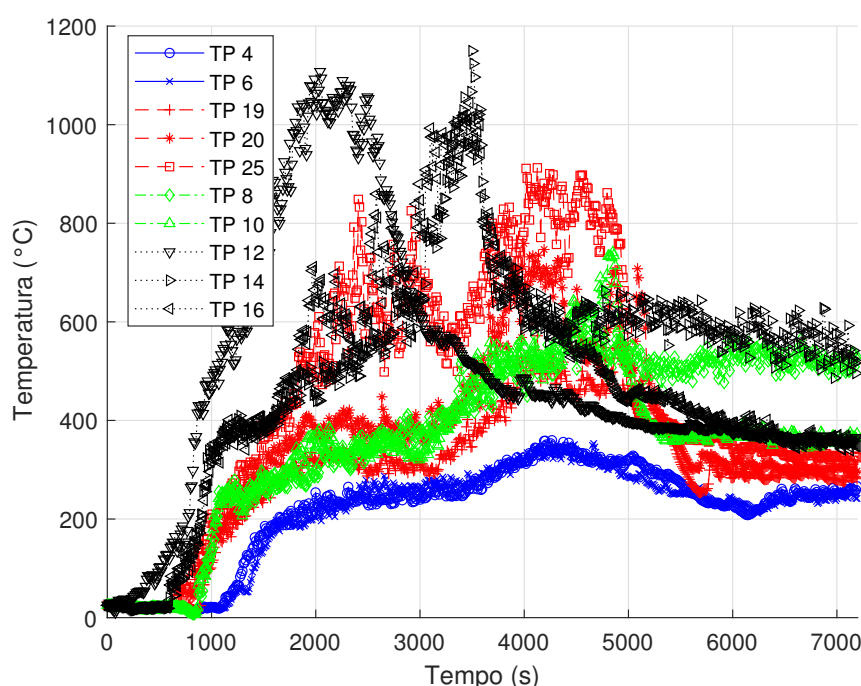


Figura 3.46: Termopares Internos ($h = 5,0\text{m}$) - SIM_014_(VA50_HF_OB_FL500)

A temperatura na abertura A4.2, avaliada em todas as simulações, sofre um impacto maior com essa modificação. A Figura 3.47 compara as temperaturas obtidas para a SIM_010_(OA_FL500) e a SIM_014_(OB_FL500). Como esperado, devido à menor distância, o aquecimento foi iniciado aos 730 segundos (464 segundos antes da SIM_010) e apresentando um aumento mais acentuado aos 3000 segundos. Em termos de temperaturas máximas, foi registrado 1257°C , para a SIM_014, 62% superior ao obtido para a SIM_010.

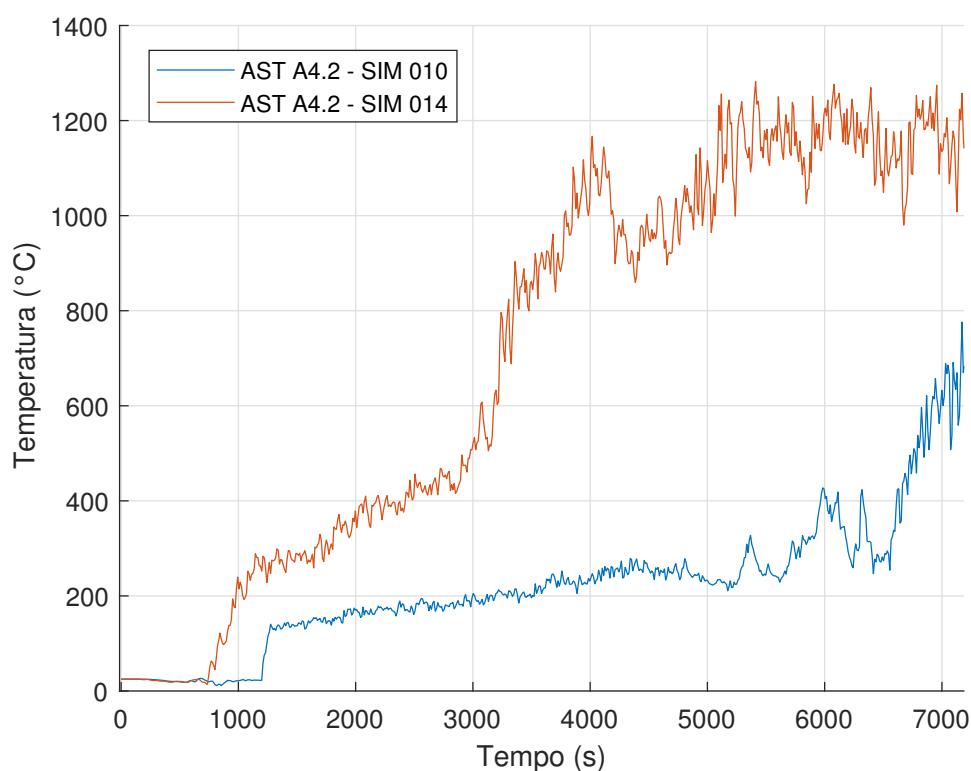


Figura 3.47: Comparação das temperaturas registradas pelo AST A4.2 para SIM_010 e SIM_014

3.4 Simulação Numérica do Incêndio em Zona de Interface Urbano-Florestal

A propagação do incêndio em combustível vegetal foi estudada utilizando o FDS, versão 6.8.0. Para atender aos cenários delineados (Tabela 3.11), foi modelada a envoltória externa da edificação, bem como a vegetação ao redor, conforme a Figura 3.48.

Inicialmente foram consideradas 25 árvores, em formato cônico, com 2,9 m de diâmetro e 4,3 m de altura, espaçadas de 10 m (centro a centro). O conjunto de árvores está localizado a 30 m da ignição, e a 5 m da fachada da edificação.

O domínio computacional estabelecido foi $X = 200,0$, $Y = 120,0$ m e $Z = 40,0$ m, com fronteiras do tipo OPEN para os limites laterais e superior. Foram utilizados elementos cúbicos de 50 cm, totalizando 7.680.000 elementos.

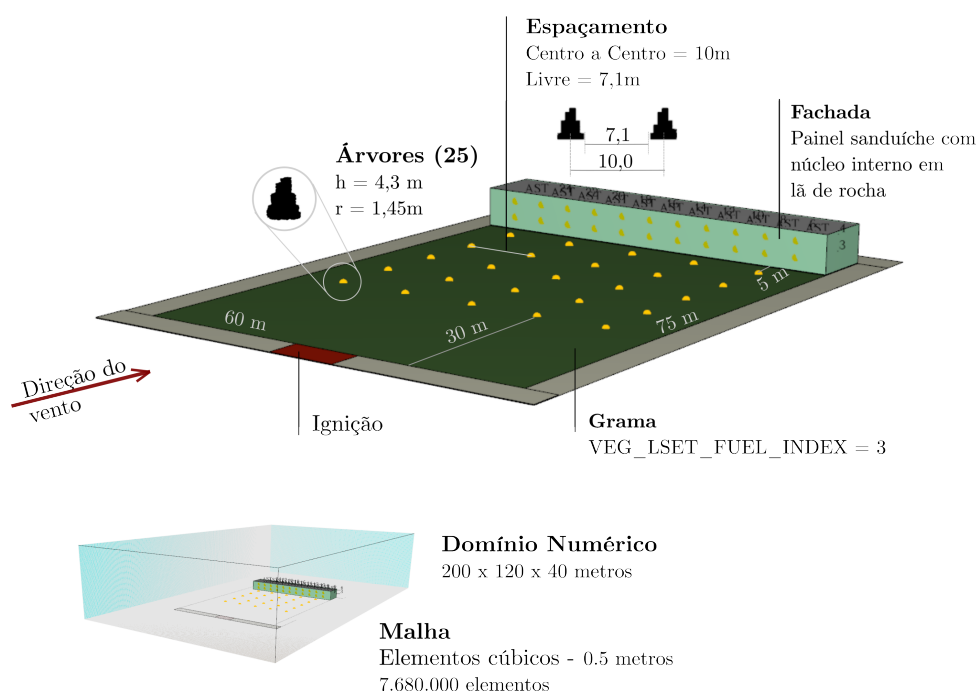


Figura 3.48: Modelo desenvolvido para estudo da propagação do incêndio em combustível vegetal

Para a avaliação da propagação do incêndio em combustível vegetal, buscou-se avaliar os principais parâmetros levantados no Capítulo 2. No que diz respeito às variáveis ambientais, a velocidade do vento foi o parâmetro escolhido. Iniciou-se com 1,5 m/s, velocidade inferior ao prescrito pela (CEN, 2012), que delineia velocidades do vento para o ensaio de propagação de chamas em coberturas. Nas demais simulações, o valor foi crescente, até a velocidade final de 12 m/s.

A vegetação também foi levantada como um fator de grande impacto em incêndios florestais, representando uma majoritária parte da carga de incêndio deste tipo de ocorrência. Assim, iniciou-se com um afastamento de 10 m, e depois reduzido, para avaliar a influência do aumento da carga de incêndio gerado pela supressão de incêndios, citada na Seção 2.1.2.3.

Por fim, a inclinação do terreno foi escolhido como um parâmetro de análise, a fim de estudar o impacto da topografia em incêndios florestais.

A Tabela 3.11 resume as simulações realizadas.

Tabela 3.11: Plano de Simulações - Incêndio de Interface Urbano-Florestal

ID	v_v^a (m/s)	Inclinação do Terreno (°)	Vegetação	Árvores (N/E) ^b
SIM_015_CFD_EXT_W5_AeG-I0	5,0	0	Árvore e Grama	25 / 7,1 m
SIM_016_CFD_EXT_W1p5_AeG-I0	1,5	0	Árvore e Grama	25 / 7,1 m
SIM_017_CFD_EXT_W3_AeG-I0	3,0	0	Árvore e Grama	25 / 7,1 m
SIM_018_CFD_EXT_W4_AeG-I0	4,0	0	Árvore e Grama	25 / 7,1 m
SIM_019_CFD_EXT_W6_AeG-I0	6,0	0	Árvore e Grama	25 / 7,1 m
SIM_020_CFD_EXT_W12_AeG-I0	12,0	0	Árvore e Grama	25 / 7,1 m
SIM_021_CFD_EXT_W5_G-I0	5,0	0	Grama	-
SIM_022_CFD_EXT_W12_AeG-I10	12,0	10	Árvore e Grama	25 / 7,1 m
SIM_023_CFD_EXT_W5_AeG-FL-I0	5,0	0	Árvore e Grama	72 / 3,0 m

v_v^a : Velocidade do vento; N/E^b : Número de árvores e espaçamento livre

A edificação foi modelada considerando a fachada em painel sanduíche com núcleo interno em lã de rocha e a cobertura em aço. Para o referido revestimento da fachada, foram utilizadas as propriedades térmicas calibradas na Seção 3.2.2.

3.4.1 Carga de Incêndio

A carga de incêndio considerada para a modelagem do combustível vegetal compreende árvores da espécie *Douglas fir* e grama. A escolha das espécies vegetais foi pautada na disponibilidade de experimentos na literatura para a calibração e validação do modelo. Além disso, essas espécies têm sido amplamente empregadas em estudos relacionados à propagação de incêndios em áreas de interface urbano-florestal (FIORINI *et al.*, 2023; MOINUDDIN; SUTHERLAND, 2020). Por fim, para as árvores buscou-se uma espécie, dentre os critérios previamente estipulados, que se assemelhasse a vegetação nativa da região, apresentada na Figura 3.49a.



Figura 3.49: a) Vegetação nos arredores da edificação de estudo b) Árvore da espécie *Douglas Fir*

Fontes: a) Imagens - Google (2025) b) Bartling (2020)

Para a modelagem da carga de incêndio, o FDS permite a utilização de três metodologias: a) Modelo de partículas (*particle model*); b) Modelo de combustível de fronteira (*Boundary Fuel Model*); c) Modelo de conjunto de níveis (*level set model*). Para as simulações desenvolvidas neste trabalho, optou-se pela utilização do modelo de partículas Lagrangeanas para a modelagem das árvores e *Level set model* para a vegetação rasteira. Mais detalhes com relação a esses modelos estão apresentados nas Seções 2.3.4.1 e 2.3.4.2.

3.4.1.1 Árvores

Para as árvores, considerou-se a espécie de pinheiro *Douglas fir*. A modelagem da vegetação foi orientada pelos resultados obtidos por Mell *et al.* (2009), os quais conduziram experimentos e simulações numéricas em árvores desta espécie. Os autores avaliaram o fluxo de calor radiante e taxa de perda de massa, em função do tempo, para amostras com: 2 m de altura, 49% de umidade; 2 m de altura, 14% de umidade; e 5 m de altura, 26% de umidade. Durante o ensaio, a árvore foi ignizada por um queimador de gás natural com HRR de 30 kW. A Figura 3.50 compara de maneira ilustrativa a propagação do incêndio numérica e experimentalmente.

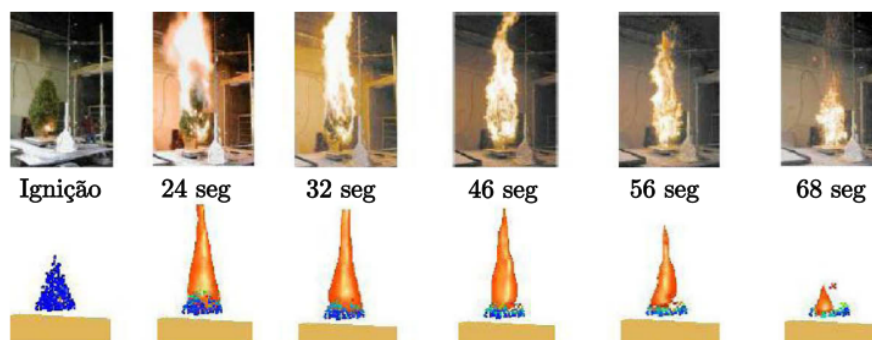


Figura 3.50: Comparação entre resultados numéricos e experimentais em árvores *Douglas Fir* de 2 metros

Fonte: Mell *et al.* (2009)

Nos ensaios, foi observada a influência da umidade da vegetação no processo de combustão. Contudo, de uma maneira geral, as árvores queimaram a uma taxa de $HRR_{max} = 5,2 \pm 1,3$ MW, para os corpos de prova de 2 m e $HRR_{max} = 26 \pm 2,6$ MW, para os de 5 m. Ainda neste estudo, nas simulações numéricas as árvores foram modeladas com forma cônica, sendo representadas por 4 conjuntos de partículas, em função do seu tamanho: folhagem (*0.05m de comprimento e 0.0005m de espessura*), *small roundwood* com diâmetro inferior a 3mm (*0.1 m de comprimento e 0.001 m de espessura*), *medium roundwood* com diâmetro entre 3 e 6mm (*0.1 m de comprimento e 0.002 m de espessura*) e *large roundwood* com diâmetro entre 6 e 10mm (*0.1 m de comprimento e 0.003 m de espessura*). A distribuição em massa desses conjuntos foi considerada como 64%, 11%, 10% e 15%, respectivamente.

Com base nos dados fornecidos por esses estudos, a vegetação foi modelada. As Tabelas 3.13 e 3.12 resumem as propriedades assumidas para a vegetação.

Tabela 3.12: Parâmetros térmicos adotados

Parâmetro	Umidade	Vegetação	Carvão (<i>char</i>)
Condutividade Térmica (W/mK)	2,0	2,0	2,0
Calor específico (kJ/kgK)	1,184	1,2	1,2
Densidade (kg/m ³)	1000	514	300
REFERENCE_TEMPERATURE (°C)	100	200	350
REFERENCE_RATE	0,002	0,0005	0,0002
HEATING_RATE (°C/min)	1,6	1,6	1,6
Heat of Reaction (kJ/kg)	2500	418	418
Mass Fraction	0,123	0,649	0,228

Fonte: Moinuddin e Sutherland (2020)

Tabela 3.13: Propriedades assumidas para a modelagem das árvores *Douglas Fir*

Parâmetro	Partículas - Composição da Vegetação				Unidade
	Needles	0-3 mm	3-6 mm	6-10 mm	
Fração em massa ^[1]	64%	11%	10%	15%	
VEG_SV ^[2]	3940	2667	889	500	m^{-1}
VEG_BULK_DENSITY ^[2]	1,66	0,34	0,26	0,37	kg/m ³
Composição Química ^[3]	$C_{3,4}H_{6,2}N_{2,5}$				-
VEG_CHAR_FRACTION ^[1,3]	0,26				-
VEG_SOOT_YIELD ^[3]	0,02				-
VEG_MOISTURE (Umidade)	26%				-
VEG_DRAG_COEFFICIENT ^[4]	2,8				-
VEG_DENSITY ^[1]	514				kg/m ³
HEAT_OF_PYROLYSIS (Calor de pirólise) ^[3]	416				kJ/kg
HEAT_OF_COMBUSTION (Calor de combustão) ^[1,3]	17700				kJ/kg
N_PARTICLES_PER_CELL ^[n]	1000				-
Geometria - Partículas ^[2]	Cilíndrica				-
Geometria - Árvores	Cônica				-
VEG_INITIAL_TEMPERATURE (Temperatura Inicial)	25				°C
CROWN_WIDTH	1,45				m
TREE_HEIGHT	4,30				m

[1] Mell et al. (2009) [2] Moinuddin e Sutherland (2020) [3] McGrattan et al. (2022) [4] Falkenstein et al. (2019)

Em uma etapa prévia, foi modelada uma árvore de 2 metros e umidade de 14%, tal como foi ensaiado por Mell et al. (2009), para a validação do modelo. A Figura 3.51 apresenta a comparação entre os resultados.

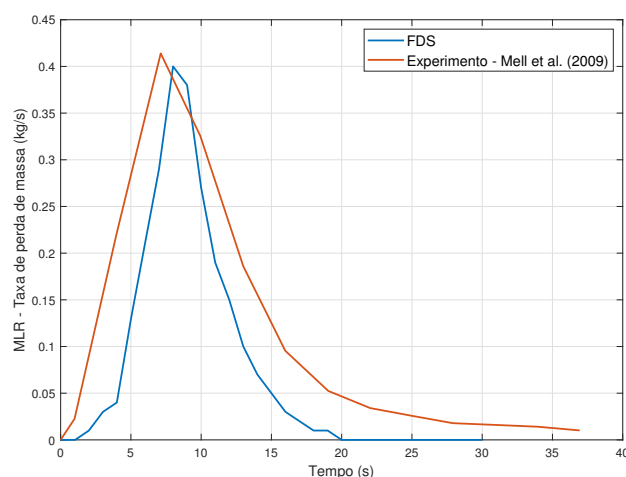


Figura 3.51: Taxa de perda de massa (MLR), em simulação no FDS, comparado com os ensaios de Mell *et al.* (2009) - Árvore de 2 metros e umidade de 14%

3.4.1.2 Grama

De maneira análoga, as propriedades físicas e térmicas utilizadas para a caracterização da grama foram baseadas em estudos experimentais e numéricos disponíveis na literatura.

Para as simulações realizadas, foram adotadas as propriedades da vegetação do combustível número 3 - Grama Alta, conforme proposto por Rothermel-Albini (Tabela 3.14). O estudo de McGrattan *et al.* (2022) foi utilizado como base, o qual considera a umidade M1 (*1-h fuel moisture*), igual a 0,058. Esse parâmetro está associado a objetos que respondem rapidamente às variações de umidade devido às suas pequenas dimensões.

Adicionalmente, foi adotado LEVEL_SET_MODE=4, indicando que o vento e o incêndio estão completamente acoplados, e calor de combustão de 17700 kJ/kg.

Tabela 3.14: Parâmetros de Rothermel-Albini adotados para a grama

ID	Tipo de combustível	Combustível morto		Profundidade do combustível	$M_{x,dead}$	RoS (m/s) ^c
		Fino				
		$\sigma(m^{-1})$ ^a	m” (kg/m²) ^b			
3	Grama alta	4920	0.68	0,76	0,25	0,034

^a σ ^a: Razão entre a área de superfície e o volume (*surface to volume ratio*)

^b m": Carregamento de combustível seco, obtido pela razão da massa de combustível pela área

^c Taxa de propagação (RoS - Rate of Spread), para condição sem vento e terreno plano

* As parcelas média e larga (combustível morto) e madeira e herbáceos (combustível vivo), não são aplicáveis a este tipo de combustível.

Fonte: Adaptado de McGrattan *et al.* (2022)

A metodologia adotada neste trabalho foi selecionada devido à sua capacidade de proporcionar uma boa concordância entre os valores experimentais e numéricos. Além de ser amplamente validada na literatura como uma abordagem viável para a modelagem de grama, essa metodologia apresenta a vantagem de exigir um menor custo computacional, reduzindo o tempo de processamento.

3.4.2 Vento

Para a consideração do efeito do vento em simulações numéricas, é frequente na literatura o uso da metodologia de similaridade de Monin-Obukhov, que considera o perfil de velocidade e temperatura baseada em características da superfície e condições atmosféricas (MCGRATTAN *et al.*, 2023).

Como principais parâmetros de entrada, estão o comprimento de Obukhov (L) e comprimento de rugosidade aerodinâmica (z_0). O primeiro caracteriza a estabilidade térmica da atmosfera. Quando L é negativo, a atmosfera está instavelmente estratificada, e quando positivo, estavelmente estratificada. Quanto mais próximo de zero, maiores os efeitos estabilizadores ou desestabilizadores da estratificação. Consequentemente, a estratificação neutra seria definida como um comprimento L infinito - Tabela 3.15.

Geralmente, uma atmosfera instável apresenta uma diminuição da temperatura, com a altitude e flutuações relativamente grandes na direção e velocidade do vento. As atmosferas instáveis são fortemente afetadas pela turbulência gerada pela flutuabilidade, resultando em um incremento da mistura. Por outro lado, condições atmosféricas altamente estáveis suprimem a mistura turbulenta. (MCGRATTAN *et al.*, 2023).

Tabela 3.15: Valores sugeridos para o comprimento de Obukhov, L (m)

Estabilidade	Intervalo	Valor Sugerido
Muito instável	$-200 \leq L < 0$	-100
Instável	$-500 \leq L < -200$	-350
Neutro	$ L > 500$	1000000
Estável	$200 < L \leq 500$	350
Muito estável	$0 < L \leq 200$	100

Fonte: McGrattan *et al.* (2023)

O segundo parâmetro, z_0 , relaciona a rugosidade aerodinâmica às características físicas do terreno, utilizado para prever o comportamento do vento em diferentes tipos de terreno ou superfície - Tabela 3.16.

Tabela 3.16: Classificação do comprimento de rugosidade de Davenport-Wieringa (z_0)

z_0 (m)	Classificação	Paisagem
0,002	Mar	Mar, áreas pavimentadas, planície plana coberta de neve, áreas de maré, deserto liso
0,005	Suave	Praias, gelo compactado, campos cobertos de neve
0,03	Aberto	Pradaria de gramíneas, campos agrícolas, tundra, aeroportos
0,1	Aproximadamente Aberto	Culturas baixas e obstáculos ocasionais (arbustos isolados)
0,25	Rugoso	Culturas altas, obstáculos espalhados, como árvores
0,5	Muito rugoso	Campos agrícolas mistos e aglomerados florestais, pomares, edifícios dispersos
1,0	Fechado	Subúrbios, vilarejos, florestas
>2,0	Caótico	Grandes cidades e aglomerados urbanos, florestas irregulares

Fonte: McGrattan *et al.* (2023)

Com base no exposto, nas simulações realizadas, adotou-se um comprimento de $L = 350$ m e $z_0 = 0,25$ m. Portanto, nas simulações realizadas, somente a velocidade do vento foi o parâmetro variado, conforme mostrado na Tabela 3.11.

3.4.3 Resultados e Discussões

Os cenários previamente delineados foram simulados, com tempo médio de processamento de 190 horas (aproximadamente 8 dias) por simulação.

A coleta dos *outputs* foi realizada através de dispositivos, resumidos nas Tabelas 3.17 e 3.18.

Tabela 3.17: *Outputs* coletados

Variável	Comando	FDS	Unidade
Temperatura adiabática	DEVC	ADIABATIC SURFACE TEMPERATURE	°C
Slice	SLCF	TEMPERATURE	°C
Velocidade	SLCF	VELOCITY	m/s

Tabela 3.18: Resumo dos dispositivos e *slices*

Medição	Descrição	Coordenadas
AST_01 a AST_11	Temperatura da superfície adiabática na parede de fachada (h = 2m)	XYZ = 125.0, Y(-25:5:25), 2.0
AST_12 a AST_22	Temperatura da superfície adiabática na parede de fachada (h = 4,5m)	XYZ = 125.0, Y(-25:5:25), 4.5
Slice_1	Slice para temperaturas, com destaque à vegetação	Y = 0m
Velocidade	Slice para medição de velocidade	Z = 2m

A Figura 3.52 apresenta de forma esquemática a variação da taxa de liberação de calor (SIM_015), em função do tempo. Observa-se que, até os 200 segundos, há um rápido aumento da curva, associado à propagação das chamas pela vegetação rasteira. De 200 a 600 segundos, esse crescimento continua, mas de forma mais sutil. Entre 600 e 800 segundos, ocorre o início da ignição das árvores, embora ainda de forma incipiente, enquanto as chamas na vegetação rasteira entram em declínio. A partir dos 800 segundos, a ignição das árvores torna-se mais intensa, atingindo o pico de liberação de calor aos 1200 segundos, seguido do declínio.

Pelos resultados apresentados, percebe-se a capacidade do modelo de transicionar de um incêndio em vegetação rasteira (*surface fire*), para um incêndio que atinge a copa das árvores (*crown fire*). conclusões específicas referentes aos casos analisados serão abordadas nas seções subsequentes.

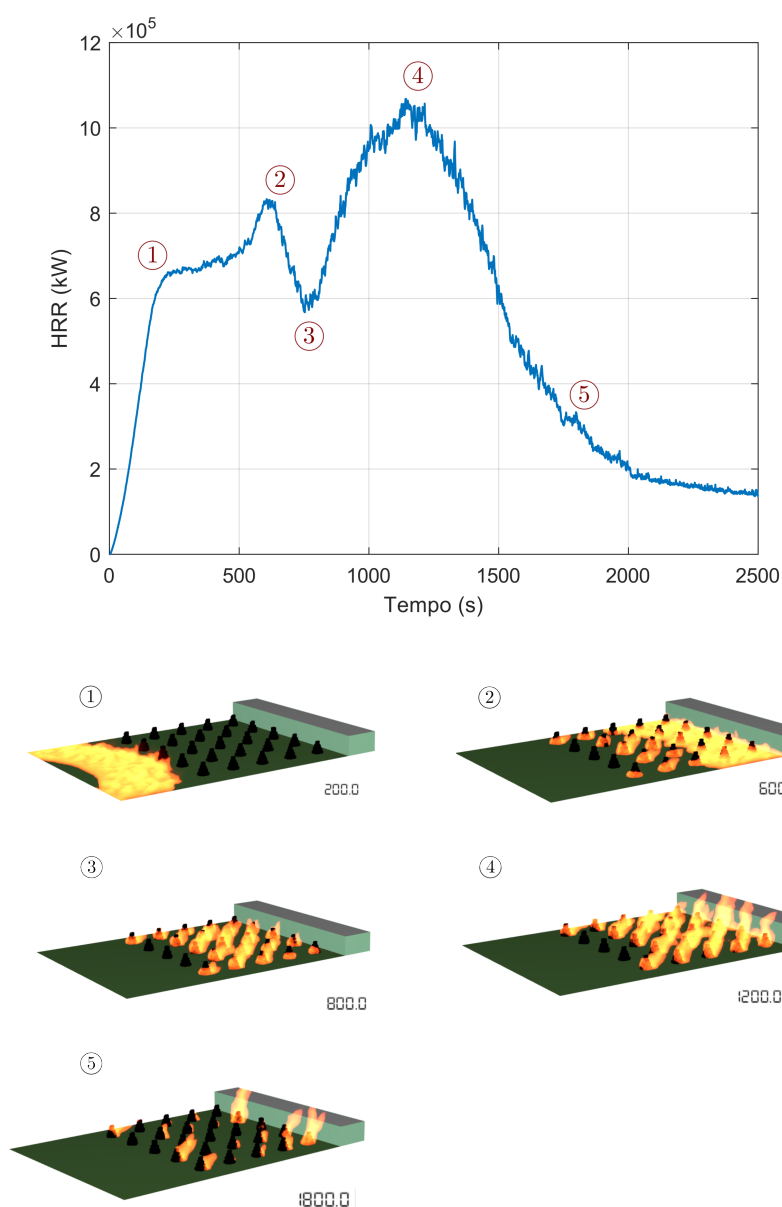


Figura 3.52: Taxa de liberação de calor para a SIM_015, com destaque a propagação das chamas nos pontos de interesse

3.4.3.1 Velocidade do vento

O vento é um parâmetro que tem um impacto direto em um incêndio florestal. A mudança geométrica, causada por esta ação expõe o combustível a calores convectivo e radiante adicionais, impactando diretamente na dinâmica do incêndio (Figura 3.53) (ROTHERMEL, 1972).

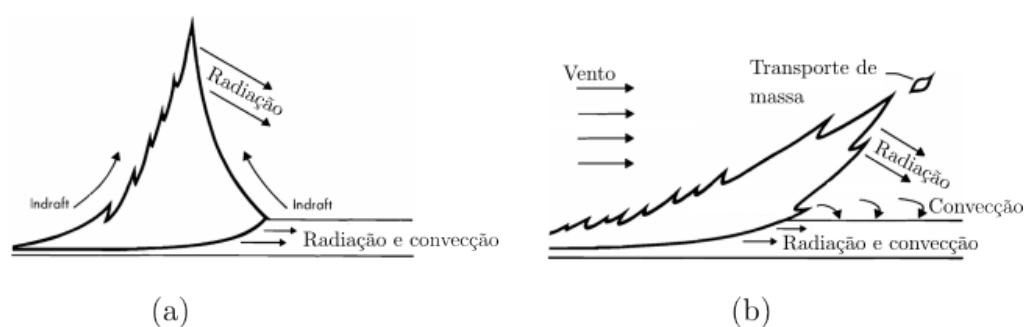


Figura 3.53: Propagação do incêndio em diferentes condições: **a)** Terreno plano e sem vento; **b)** Terreno plano e com vento

Fonte: Adaptado de Rothermel (1972)

Neste estudo, a influência da velocidade do vento sobre incêndios na interface urbano-florestal foi analisada por meio de simulações conduzidas com velocidades de 1,5 m/s, 3,0 m/s, 4,0 m/s, 5,0 m/s, 6,0 m/s e 12 m/s. Os demais parâmetros relacionados ao vento, tais como sua direção e as variáveis relacionadas ao método de Monin-Obukhov, incluindo estabilidade atmosférica e rugosidade do solo, permaneceram inalteradas.

Nas simulações realizadas, foi possível avaliar os efeitos da interferência da edificação sobre o escoamento do ar. Esse fenômeno, no contexto dos incêndios em fachadas, pode alterar de forma significativa a propagação das chamas ao longo da superfície externa da construção, em virtude da interação entre o fluxo de ar e a geometria da fachada (ABU-ZIDAN *et al.*, 2022).

Em geral, são observadas três zonas:

1. **Zona de estagnação.** Ela se forma nas superfícies expostas ao vento, quando o fluxo é bloqueado pela edificação. Nela, são registradas baixas velocidades e pressões positivas elevadas. Esse ponto é mais crítico em edifícios altos, uma vez que a diferença de pressão gerada ao longo da altura, pode levar as chamas serem direcionadas para baixo, sendo o incêndio propagado para outras regiões da fachada.
2. **Região de esteira.** Nessa região, a separação fluido-obstáculo cria uma zona que envolve o topo e a superfície oposta ao vento. Nela, é percebida a alta turbulência, baixa velocidade do vento e alta pressão negativa. Essas condições favorecem a propagação da fumaça e gases quentes, tornando mais complexo o controle do incêndio.
3. **Camadas de cisalhamento.** Essa zona ocorre na fronteira entre as regiões previamente citadas. Nela são observadas altas velocidades e trajetória instável. Por esse motivo, podem ser registradas variações bruscas de pressão e velocidade do ar, possuindo um impacto direto na propagação das chamas na fachada.

Essas três zonas citadas podem ser percebidas nas Figuras 3.54 a 3.56, em função da velocidade do vento (v_v) - 1,50 m/s , 5 m/s e 12 m/s.

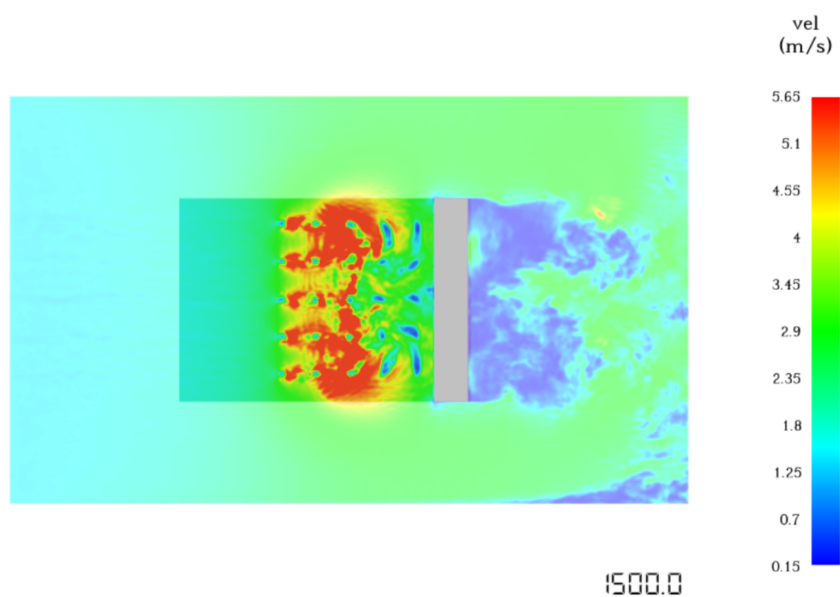


Figura 3.54: Distribuição de velocidades ($v_v = 1,5$ m/s)

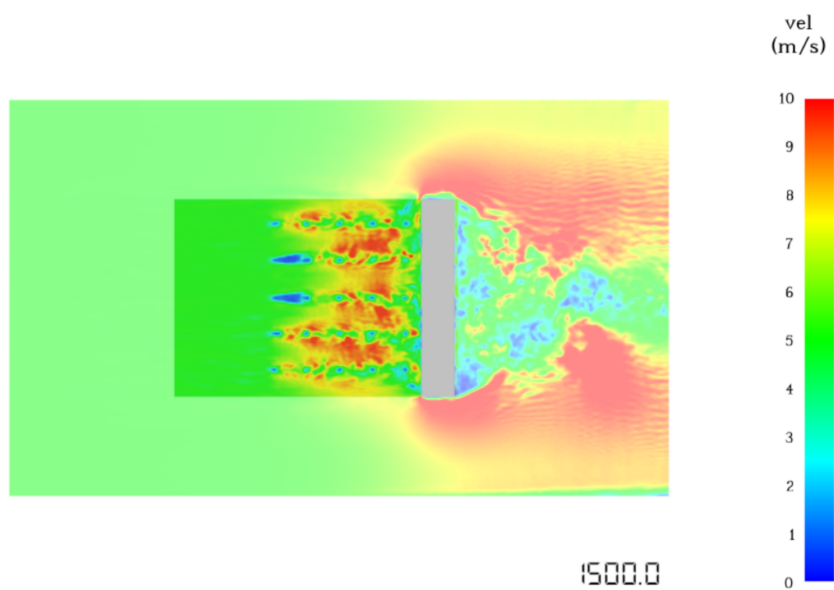


Figura 3.55: Distribuição de velocidades ($v_v = 5,0$ m/s)

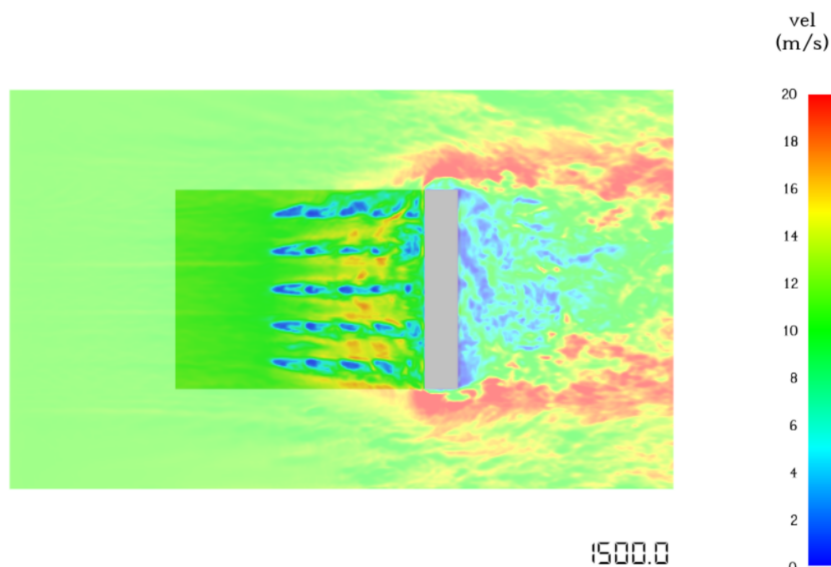


Figura 3.56: Distribuição de velocidades ($v_v = 12$ m/s)

A velocidade do fluido e a frequência de desprendimento de vórtices são relacionadas pelo número de Strouhal (Su) (Equação 3.3), evidenciando uma relação proporcional entre ambas. Essa relação corrobora os resultados obtidos nas simulações para diferentes velocidades do vento (Figuras 3.54 a 3.56).

$$Su = \frac{f_\mu L}{U_\infty} \quad (3.3)$$

onde, f_μ é a frequência de desprendimento de vórtices (Hz); L é a dimensão característica da obstrução (m) e U_∞ é a velocidade do fluido (m/s).

Adicionalmente, observa-se que os demais resultados obtidos estão em concordância com o apresentado por Rothermel (1972). A análise das curvas demonstra que a velocidade do vento exerce um impacto direto na taxa de propagação das chamas. Esse efeito é evidenciado pela dilatação horizontal observada nas curvas correspondentes às menores velocidades.

Com o vento à 1,5 m/s, as chamas levaram aproximadamente 1150 segundos para alcançar as árvores, resultando em uma taxa de propagação de 0,026 m/s. Quando a velocidade do vento foi aumentada para 6 m/s, esse tempo reduziu-se para 476 segundos, com uma taxa de propagação de 0,063 m/s, representando um aumento de 142%. Já com ventos a 12 m/s, o tempo foi substancialmente menor, apenas 80 segundos, com uma taxa de propagação de 0,375 m/s, o que equivale a um incremento de mais de 1346% em relação à condição de menor velocidade.

A partir da comparação entre as Figuras 3.57 e 3.58, pode-se perceber que, para o vento de 1,5 m/s, a frente de incêndio se propaga de forma uniforme, comportamento que não é percebido para os 12 m/s. Nessa segunda situação, a propagação das chamas no

sentido do vento (Direção X) ocorre de forma muito mais intensa, em comparação com a direção ortogonal (Direção Y). Como resultado, observa-se uma propagação elíptica das chamas e uma vasta porção do terreno tomada pelo fogo aos 200 segundos.

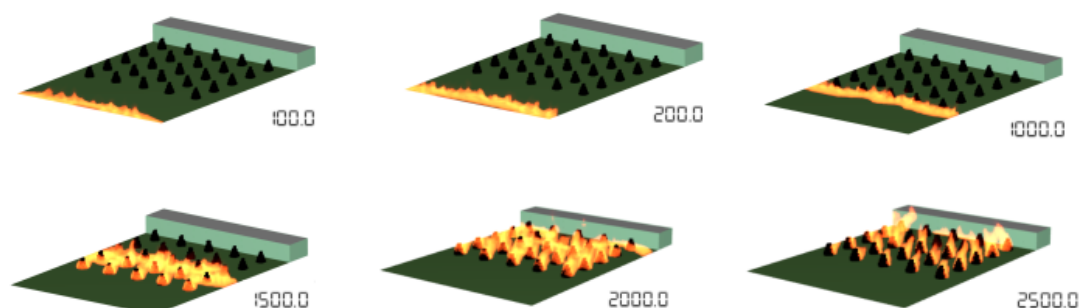


Figura 3.57: Propagação das chamas - Vento a 1,5 m/s

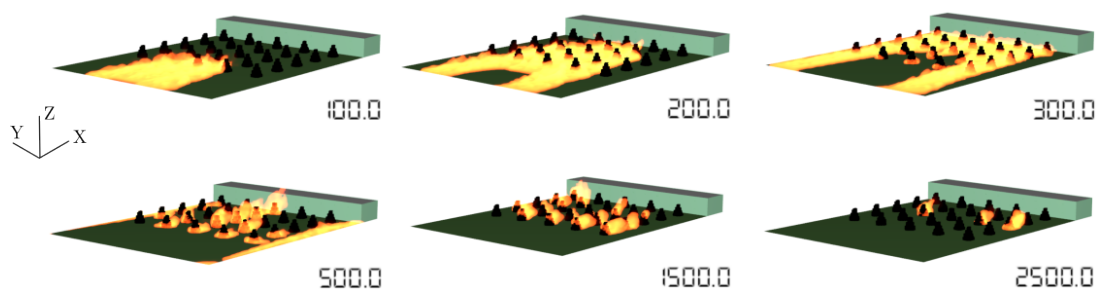


Figura 3.58: Propagação das chamas - Vento a 12 m/s

A Figura 3.59 apresenta a taxa de liberação de calor, para as velocidades de vento analisadas. A partir da comparação entre as curvas, percebe-se que a variação da velocidade do vento atua modificando o valor máximo de liberação de calor (HRR_{max}), bem como o tempo até o pico ($t_{HRR_{max}}$). Em comparação com as velocidades de 1,5 e 6 m/s, há um atraso de 972 segundos no $t_{HRR_{max}}$ e uma redução de 30% na HRR_{max} , para a menor velocidade.

Além disso, observa-se que o gráfico correspondente à velocidade de 12 m/s apresenta uma tendência distinta dos demais. O comportamento previamente registrado mostrava, inicialmente, um aumento na curva de liberação de calor, associado à queima da vegetação rasteira. Após esse período, havia um patamar seguido de um novo incremento, referente à ignição das árvores. Para 12 m/s, contudo, o incêndio é mais agressivo, propagando-se rapidamente por grande parte do terreno e ignizando as árvores rapidamente. Assim, registra-se apenas um pico, aos 270 segundos.

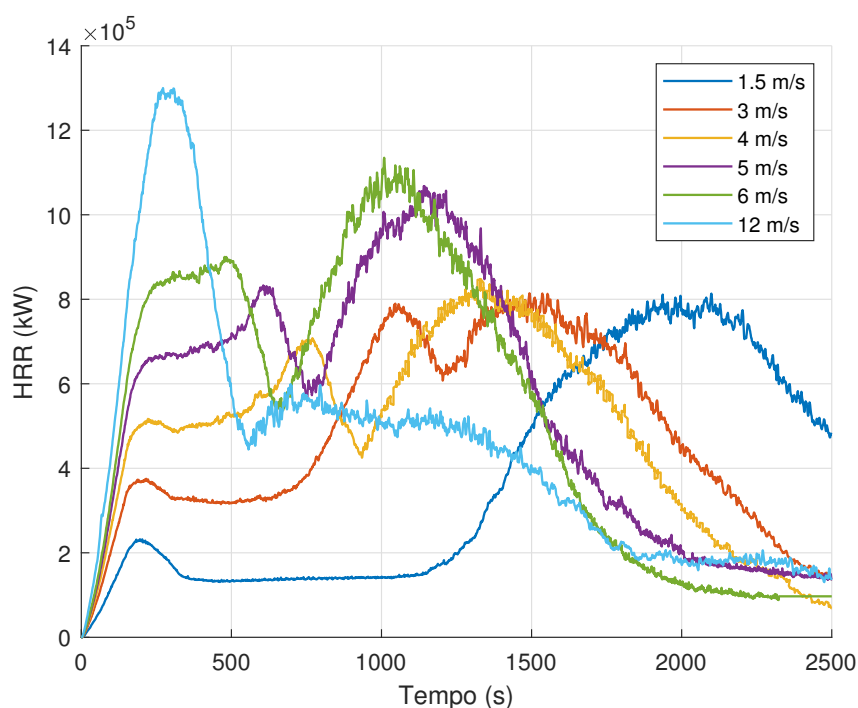


Figura 3.59: Taxa de liberação de calor, em função da velocidade do vento

A Figura 3.60 reúne as temperaturas registradas pelo AST_17, localizado na linha central da edificação ($X = 125,0\text{m}$, $Y = 0,0\text{ m}$ e $Z = 4,5\text{m}$). A partir da análise do gráfico, é possível observar comportamento análogo ao obtido para a HRR. A velocidade do vento influenciou tanto o valor máximo da temperatura (T_{max}) quanto o tempo até o pico ($t_{T_{max}}$).

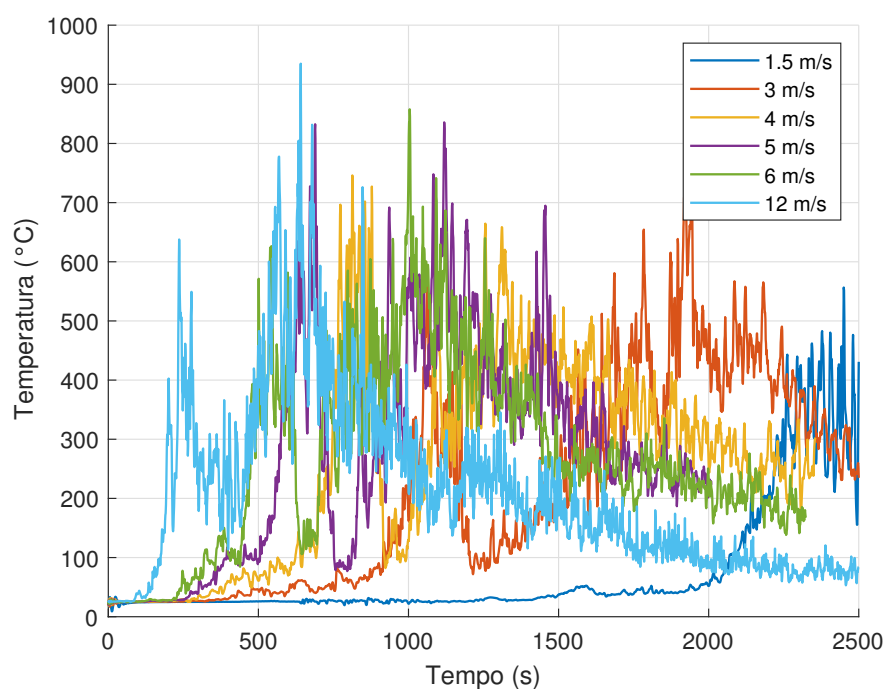


Figura 3.60: Temperaturas registradas pelo AST_17, em função da velocidade do vento

A Tabela 3.19 compara a HRR obtida para cada simulação, bem como a temperatura registrada pelo AST_17.

Tabela 3.19: HRR e Temperaturas no AST_17, sob diferentes velocidades de vento

Velocidade do vento (m/s)	$t_{HRR_{max}}$ (s)	HRR_{max} (kW)	Dif. HRR* (%)	$t_{T_{max}}$ (s)	T_{max} (°C)	Dif. T_{max} * (%)
1,5	2100	813 500	-23,78%	2451	556	-33,40
3,0	1494	814 300	-23,73%	1943	742	-11,10
4,0	1335	848 000	-20,58%	813	746	-10,73
5,0	1142	1 068 000	-	1119	835	-
6,0	1010	1 135 000	6,27%	1005	846	2,64
12,0	273	1 300 000	21,72%	641	935	11,87

* Variação percentual em relação à simulação com $v_v = 5,0$ m/s

3.4.3.2 Vegetação

Em um incêndio florestal, o combustível é predominantemente composto pela vegetação que compõe a região afetada. Portanto, as espécies presentes e suas propriedades térmicas e físicas possuem grande influência na dinâmica do incêndio. Na SIM_021 foram avaliadas as temperaturas e a taxa de liberação de calor considerando a vegetação composta apenas por gramíneas, cujas propriedades térmicas foram apresentadas na Seção 3.4.1.2.

A Figura 3.61 apresenta a evolução do incêndio em quatro etapas (150, 300, 450 e 600 segundos).

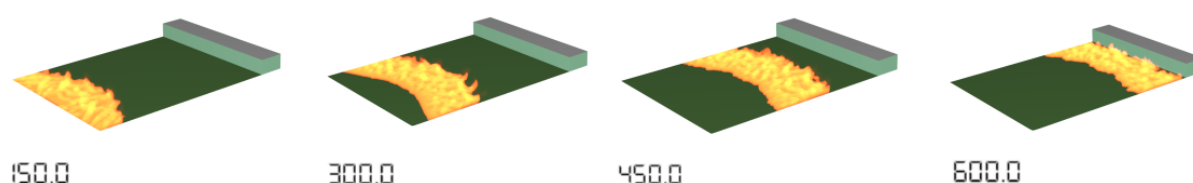


Figura 3.61: Evolução do incêndio com o terreno composto por gramíneas

A Figura 3.62 apresenta as curvas de liberação de calor, para as simulações realizadas. A partir da análise dos resultados, pode-se perceber que, na simulação com a vegetação rasteira, o incêndio possui uma menor duração, cessando aos 800 segundos. Em contraste, neste mesmo momento, a simulação com combinação de vegetações [Árvores + Grama] encontra-se em ascensão, relativo à ignição das árvores.

Essa diferença resulta em uma redução de 37,03% na taxa de liberação de calor nessa configuração, além de uma redução de 71% na energia total liberada (calculada pela integral da taxa de liberação de calor pelo tempo).

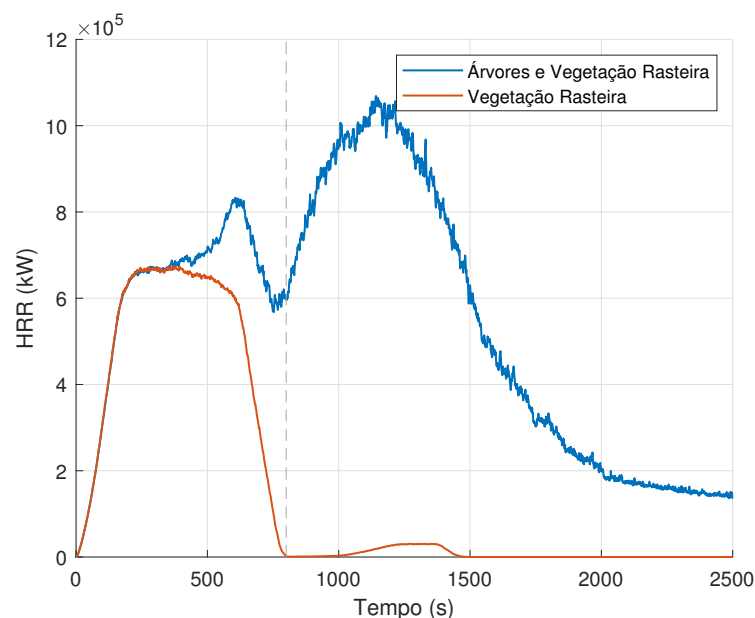


Figura 3.62: Taxa de liberação de calor, em função da vegetação

Tais resultados se traduzem na distribuição de temperaturas apresentada na Figura 3.63.

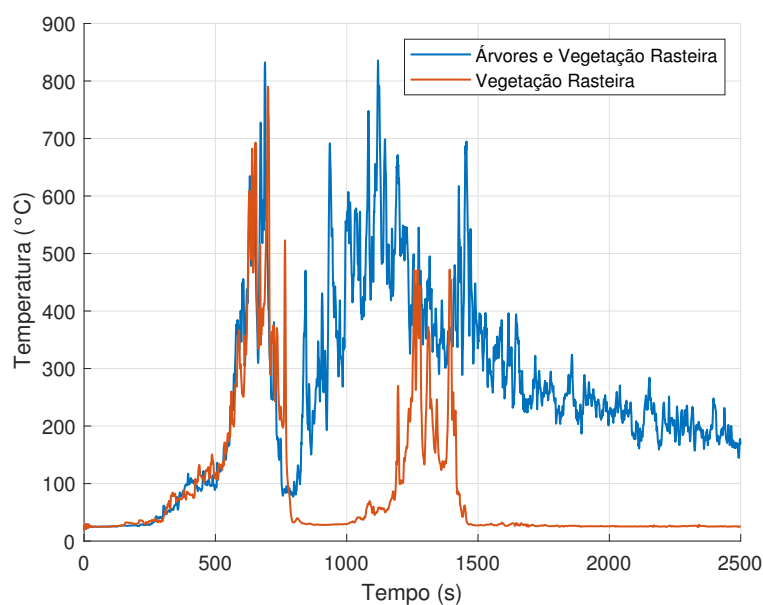


Figura 3.63: Temperaturas registradas pelo AST_17, em função da vegetação

3.4.3.3 Inclinação do Terreno

A inclinação do terreno, tal como foi citado por Rothermel (1972), altera geometricamente as chamas e, de forma análoga ao vento, também promove uma aproximação das chamas ao combustível e aumenta os efeitos de radiação e convecção. Para analisar o efeito da inclinação do terreno na propagação das chamas, o modelo foi alterado, conforme a Figura 3.64:

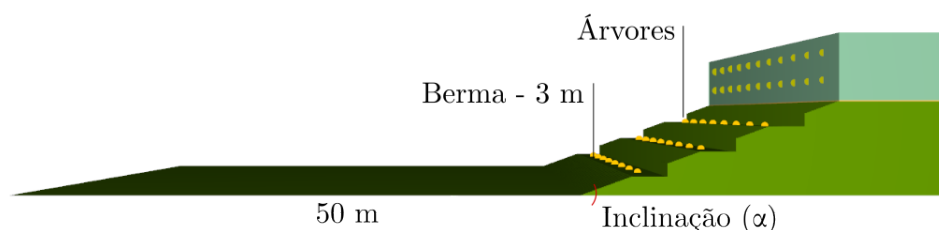


Figura 3.64: Modelo desenvolvido para a avaliação da propagação das chamas em terreno inclinado

A Figura 3.65 apresenta a propagação das chamas na simulação realizada para $t = 200, 300, 500, 1000, 1500$ e 2000 segundos.

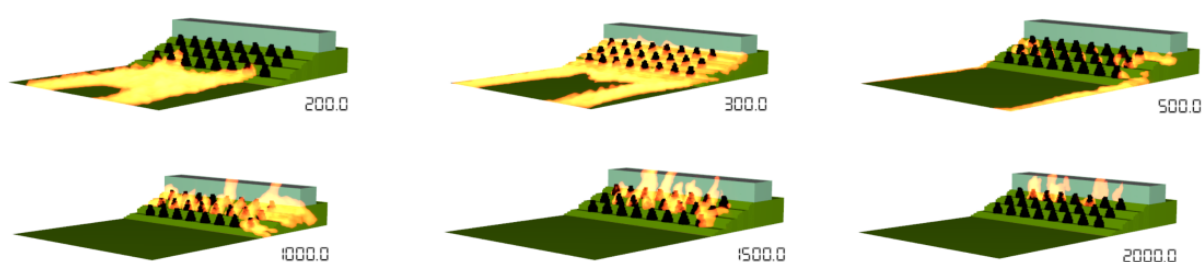


Figura 3.65: Propagação das chamas pelo terreno inclinado

A taxa de liberação de calor para a configuração de terreno inclinado é superior à original, com terreno plano. A esperada modificação geométrica das chamas pode ser vista na Figura 3.65 que, combinada a presença da inclinação do terreno e do vento, provocou o aumento da taxa de liberação de calor, como esperado.

Na Figura 3.66, é possível comparar a taxa de calor resultante das simulações com terreno plano e inclinado. De forma análoga à simulação anterior ($v_v = 12\text{m/s}$), há uma rápida propagação das chamas até os 270 segundos. Em seguida, após os 500 segundos, há a ignição das árvores, sendo registrado um pico na taxa de liberação de calor aos 1225 segundos.

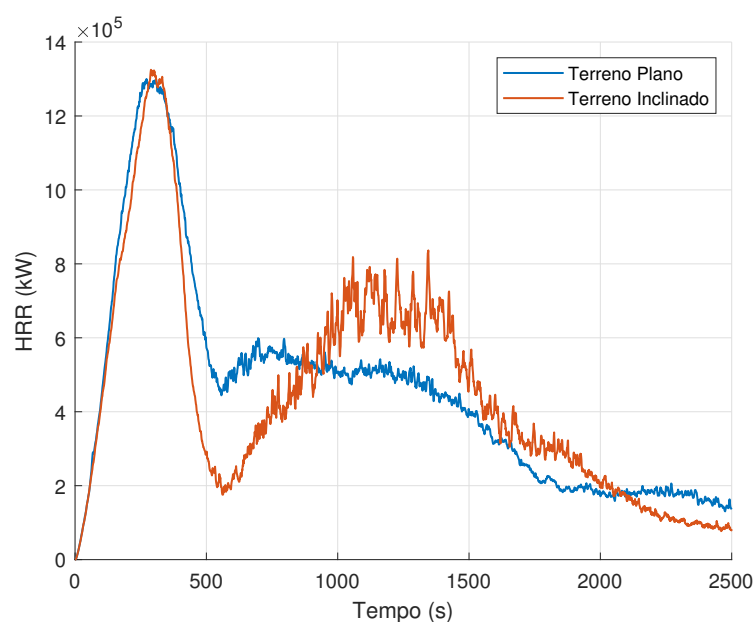


Figura 3.66: Taxa de liberação de calor, em função da inclinação do terreno - Comparação SIM_020 e SIM_022

3.4.3.4 Carga de Incêndio

Por fim, a variação da carga de incêndio foi avaliada. Nessa simulação, o espaçamento entre as árvores, inicialmente de 10 metros (medidos de centro a centro), foi reduzido para 5,9 metros. Essa modificação resultou em um espaçamento livre de 3 metros entre as árvores, com um total de 72 árvores na nova disposição.

A Figura 3.67 apresenta graficamente a propagação das chamas pela vegetação, aos 500 segundos. Em comparação às demais simulações realizadas, percebe-se um significativo aumento da severidade do incêndio nessa configuração, sendo a área completamente tomada pelo fogo.

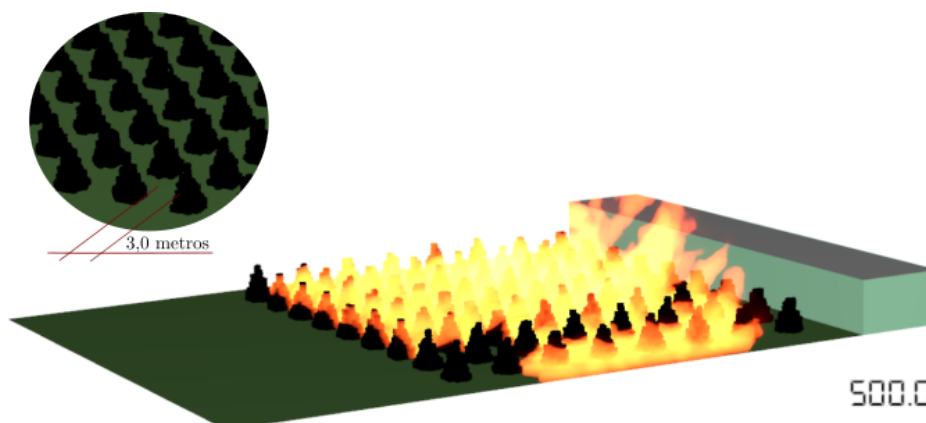


Figura 3.67: Propagação das chamas, em $t = 500$ segundos

Essa afirmação pode ser corroborada pela comparação entre a taxa de liberação de

calor (Figura 3.68) e temperatura registrada pelo AST_17 (Figura 3.69), considerando tanto a configuração original (25 árvores com espaçamento livre de 7,1 metros) quanto a nova configuração (72 árvores com espaçamento livre de 3 metros).

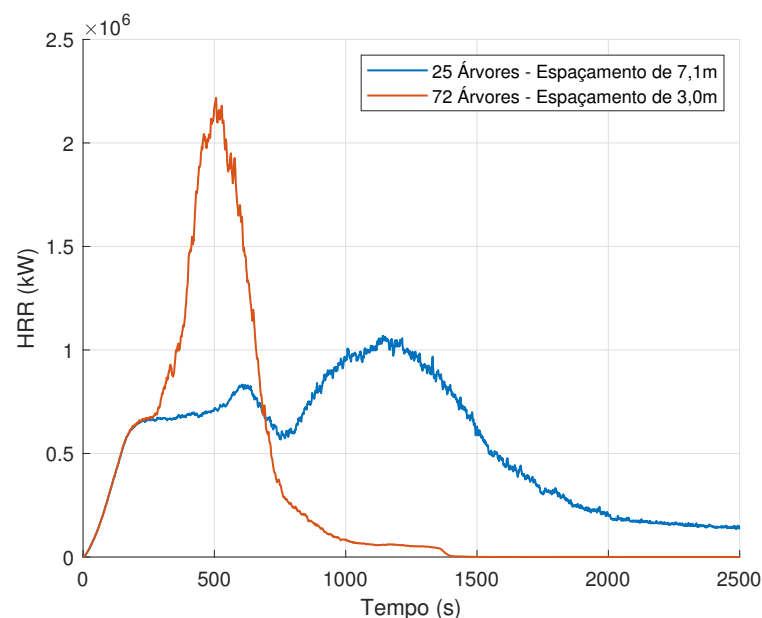


Figura 3.68: Taxa de liberação de calor, em função da variação da carga de incêndio - Comparação SIM_015 e SIM_023

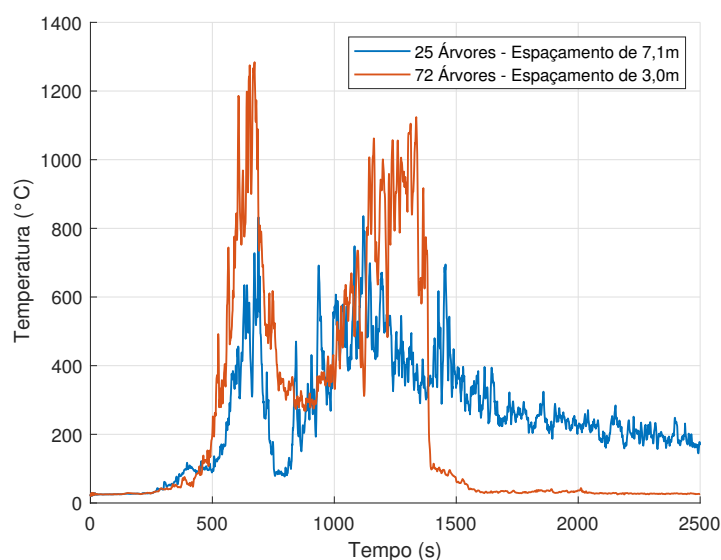


Figura 3.69: Temperaturas registradas pelo AST_17, em função do incremento da carga de incêndio

A partir da análise dos resultados, é possível concluir que o incremento da carga de incêndio teve significativo impacto nos resultados obtidos. Tal configuração originou um incêndio de maior agressividade, sendo registrado aumento de 109,47% na taxa de

liberação de calor e redução de pelo menos 48% no tempo gasto para a combustão da vegetação. Em termos de temperatura, o AST_17 registrou 1284°C, 56% superior ao obtido para a carga de incêndio original.

3.5 Síntese

3.5.1 Incêndio em Compartimento

No primeiro conjunto de simulações realizadas, foi avaliada numericamente a dinâmica do incêndio dentro de um compartimento.

A carga de incêndio foi inicialmente determinada com base na NBR 14432 (ABNT, 2001), referente ao armazenamento de artigos cerâmicos, mas posteriormente variada para avaliação da influência desse parâmetro. Em seguida, o fator de aberturas também foi alterado, seja por porcentagem das aberturas, ou inserção de aberturas na cobertura.

Além de compreender a dinâmica do incêndio em um compartimento de grandes dimensões, sob diversos cenários, um dos objetivos dessas simulações é a avaliação das temperaturas registradas na fachada, para posterior simulação no Abaqus.

A Figura 3.70 resume as curvas de temperaturas para o AST A4.2, localizado na fachada oeste. Pode-se perceber que em ambas as simulações com a carga de incêndio de 200 MJ/m², as temperaturas foram mais baixas, na ordem dos 200 a 300°C (SIM_009 e SIM_012). Isso porque, a configuração das aberturas existentes na edificação impactou na disponibilidade de oxigênio e a propagação ficou restrita à uma região da edificação.

Em contrapartida, a alteração da carga de incêndio para 500 MJ/m² contribuiu para um significativo aumento das temperaturas, internamente e na fachada. O mesmo foi observado para as situações nas quais houve o aumento da quantidade de aberturas, seja nas paredes, quanto na cobertura.

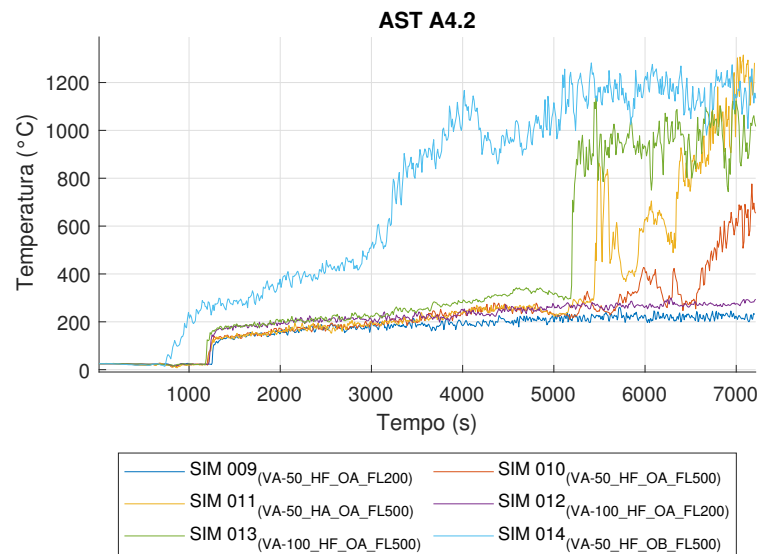


Figura 3.70: Temperaturas registradas pelo AST A4.2 nas simulações realizadas

A Tabela 3.20 resume as variações percentuais obtidas pelas simulações realizadas, em referência às SIM_009 e SIM_010.

Tabela 3.20: Avaliação percentual das temperaturas registradas pelo AST A4.2 nas simulações realizadas

Simulação de referência	SIM_010	SIM_011	SIM_012	SIM_013	SIM_014
SIM_009	+ 264%	+ 513%	+ 24%	+ 398%	+ 490%
SIM_010	-	+ 68%	- 64%	+ 57%	+ 62%

A partir da análise dos dados, pode-se concluir que:

- A carga de incêndio foi o parâmetro que mais influenciou nos resultados das simulações, registrando uma variação de 264% nas temperaturas máximas quando elevada de 200 para 500 MJ/m².
- A inclusão de aberturas na cobertura (SIM_011), com área total de 16m², gerou um aumento de 68% nas temperaturas da fachada. Em comparação, as aberturas A2 e A3, que somam 80m² (SIM_013), resultaram em um aumento de 57%. Essa diferença pode ser explicada pela localização das aberturas A2 e A3, posicionadas na Região 1.
- A interação entre os fatores [Carga de Incêndio + Aberturas] foi avaliada nas simulações SIM_011 e SIM_013. Analogamente ao observado anteriormente, a simulação com aberturas na cobertura levou a um aumento de 513% nas temperaturas,

enquanto a configuração com aberturas nas paredes resultou em um aumento de 398%, evidenciando a maior influência das aberturas na cobertura.

3.5.2 Incêndio em Zona de Interface Urbano-Florestal

No que tange ao incêndio externo, foi realizado um estudo para avaliar a influência de diversas variáveis, incluindo fatores ambientais, características do terreno e a carga de incêndio, os quais foram identificados como fatores influenciadores na Seção 2.1.2.

As simulações indicam que a velocidade do vento e a carga de incêndio são fatores de significativa influência em incêndios florestais. O incremento desses parâmetros em relação aos valores de base (aumento da velocidade do vento de 5 m/s para 12 m/s, e a redução do espaçamento entre as árvores de 7,1 para 5,9 metros) resultou em um impacto expressivo nos resultados. Tais alterações geraram um aumento substancial na taxa de liberação de calor, além de uma redução no tempo necessário para atingir o pico da HRR. Esses fatores indicam que o incêndio é de maior severidade, o que, por sua vez, eleva consideravelmente a dificuldade de controle pelas equipes de combate.

A Tabela 3.21 resume a variação percentual das temperaturas registradas na fachada para as simulações realizadas. Alinhada às conclusões obtidas para a variação da taxa de liberação de calor, a alteração na velocidade do vento e na carga de incêndio foram os parâmetros de maior impacto nos resultados, com aumentos de até 59,27%.

Tabela 3.21: Avaliação percentual das temperaturas máximas registradas na fachada nas simulações realizadas - Incêndio florestal

Simulação de referência	SIM_016 ^a	SIM_017 ^b	SIM_018 ^c	SIM_019 ^d	SIM_020 ^e	SIM_021 ^f	SIM_022 ^g	SIM_023 ^h
SIM_015	-33,40%	-11,10%	-10,73%	2,64%	11,87%	-6,39%	56,15%	59,27%

^a $v_v = 1,5 \text{ m/s}$ ^b $v_v = 3,0 \text{ m/s}$ ^c $v_v = 4,0 \text{ m/s}$ ^d $v_v = 6,0 \text{ m/s}$ ^e $v_v = 12,0 \text{ m/s}$
^f Vegetação rasteira ^g Inclinação do terreno = $10^\circ + \text{Vento}_{12\text{m/s}}$ ^h Aumento da carga de incêndio

As Figuras 3.71 e 3.72 apresentam graficamente a evolução de temperaturas para os cenários avaliados. Para melhor visualização, as imagens foram divididas, considerando a velocidade do vento na Figura 3.71 e alterações na vegetação e terreno na Figura 3.72.

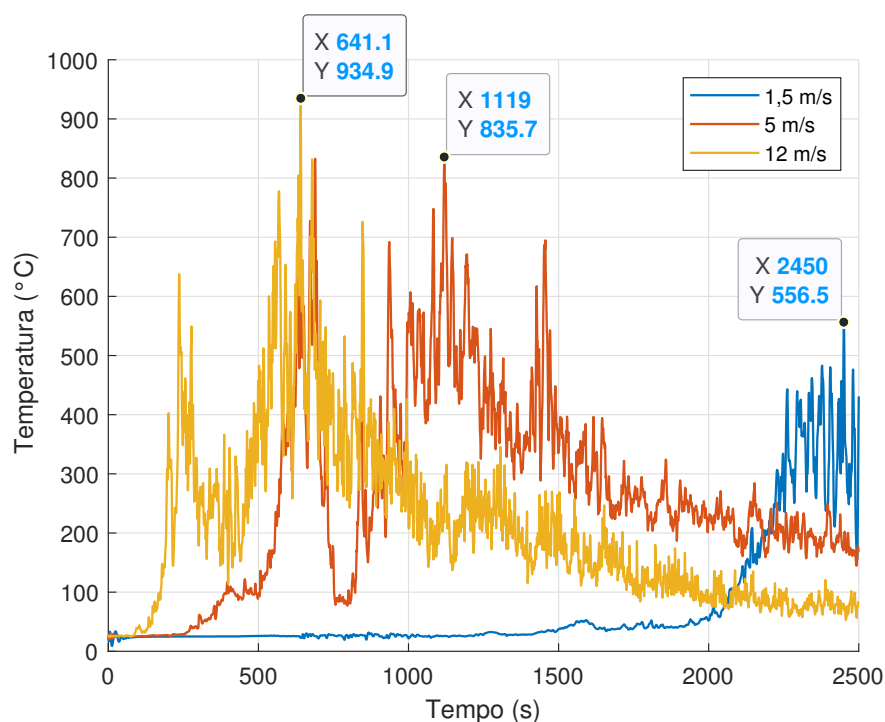


Figura 3.71: Temperaturas registradas na fachada, em função da velocidade do vento ($v_v = 1,5$ m/s, $v_v = 5,0$ m/s e $v_v = 12,0$ m/s)

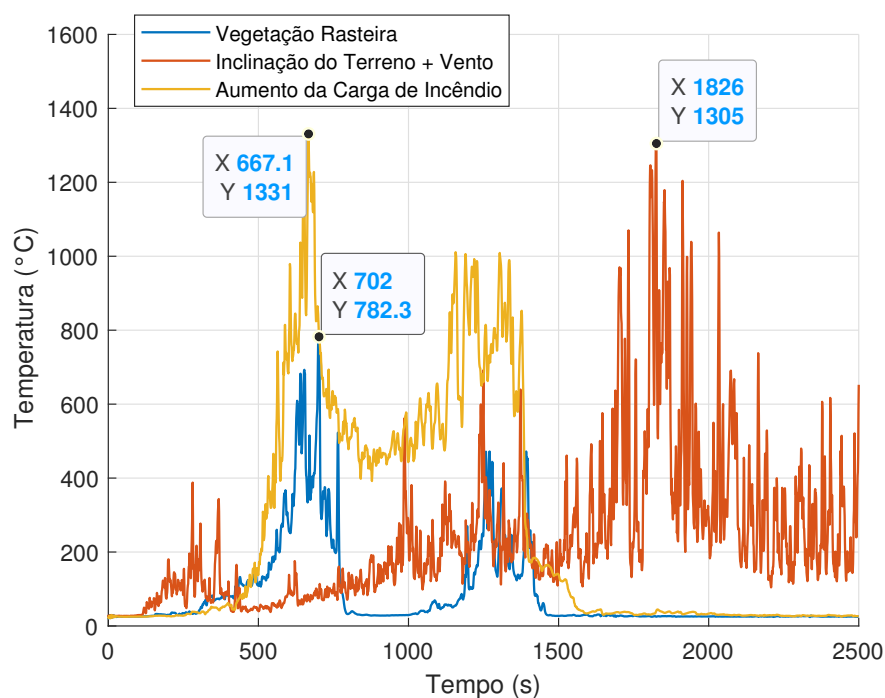


Figura 3.72: Influência da vegetação, inclinação do terreno e carga de incêndio nas temperaturas registradas na fachada

As conclusões obtidas por esse estudo estão alinhadas com a literatura, que afirma que a taxa de liberação de calor é diretamente impactada com alterações na velocidade do vento, inclinação do terreno (ROTHERMEL, 1972) e carga de incêndio.

Especificamente com relação aos parâmetros descritos por Rothermel (1972), a simulação SIM_022 avaliou o efeito combinado da velocidade do vento com a inclinação do terreno, para mensurar o impacto da ação conjunta de tais parâmetros críticos. A Figura 3.73 apresenta a comparação entre as temperaturas máximas registradas na fachada para a situação com terrenos inclinado e plano, ambos com vento de 12 m/s. Comparando os resultados, foi registrado um aumento de 40% nas temperaturas com a adoção de um terreno inclinado.

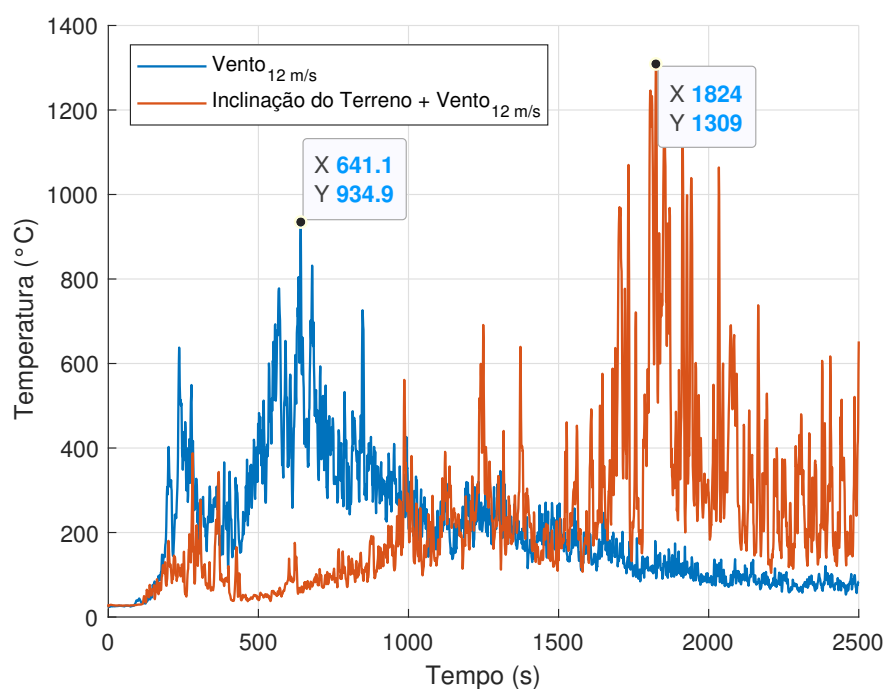


Figura 3.73: Influência da velocidade do vento e inclinação do vento nas temperaturas registradas na fachada

4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E MECÂNICO DA FACHADA

4.1 Calibração do Modelo com Dados Experimentais

Com o intuito de validar o modelo numérico proposto, foi realizada uma etapa preliminar de calibração fundamentada em dados experimentais realizados por de Paula *et al.* (2024a). Para essa finalidade, utilizaram-se os dados de temperatura registrados na superfície exposta da fachada, os quais foram obtidos por meio das simulações conduzidas com o *software* FDS. Esses dados foram empregados como condições de contorno no processo de acoplamento CFD e FEM, possibilitando, assim, a execução da etapa de calibração.

A calibração consistiu, portanto, na comparação entre os dados experimentais e os resultados numéricos oriundos do acoplamento das simulações realizadas no FDS e no Abaqus, conforme descrito a seguir:

1. **Dados experimentais.** O corpo de prova utilizado nos ensaios foi previamente instrumentado com termopares, instalados em posições específicas no interior do núcleo interno, conforme ilustrado na Figura 4.1. Esses sensores foram posicionados a uma profundidade de 10 mm, medida a partir da face exposta da fachada, permitindo o monitoramento da temperatura interna durante o ensaio.

Na etapa de calibração do modelo no FDS, as condições ambientais, especialmente a intensidade do vento, influenciaram os resultados dos termopares. Visando reduzir a propagação de erros entre simulações numéricas, a calibração do modelo de transferência de calor será realizada com foco no termopar TP_12, que apresentou boa correspondência entre os dados numéricos e experimentais.

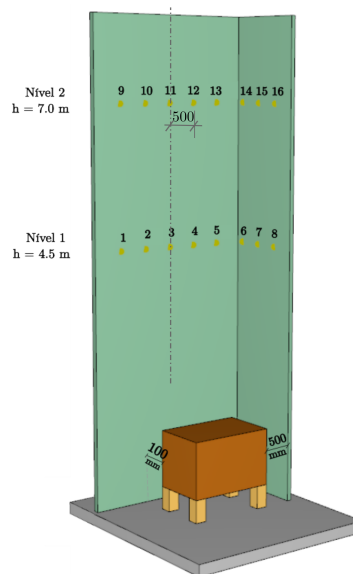


Figura 4.1: Posições dos termopares no sistema de fachada

2. **Resultados numéricos.** As simulações de calibração do modelo no FDS (Seção 3.2.2) foram acopladas ao *software* Abaqus, com o objetivo de realizar a análise de transferência de calor. Para tanto, foi especificada no FDS a geração de *output* de fronteira (&BNDF), com a finalidade de coletar a temperatura adiabática da superfície (*adiabatic surface temperature*).

Para fins ilustrativos, a Figura 4.2 apresenta a evolução temporal das temperaturas registradas pelo referido *output*. Tal configuração corresponde ao cenário com carga de incêndio externa e núcleo interno composto por lâ de rocha e as simulações foram conduzidas considerando um intervalo de 1800 segundos, correspondente à duração do ensaio, definida pela norma BS 8414-2 (BSI, 2017).

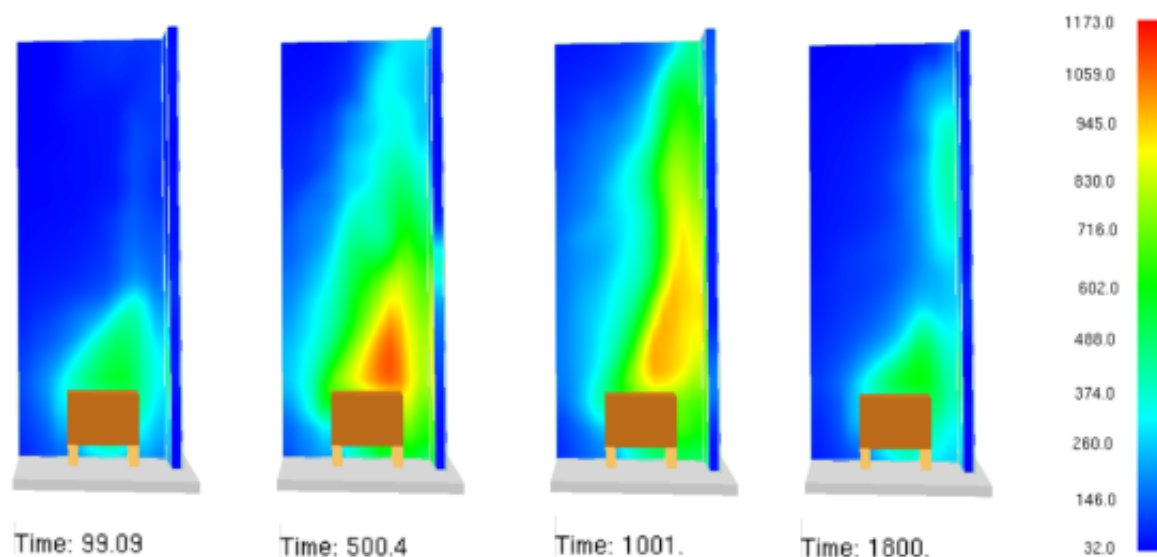


Figura 4.2: Evolução temporal das temperaturas simuladas na superfície exposta da fachada (FDS)

Após a importação dos dados provenientes do FDS, o modelo previamente desenvolvido no Abaqus foi modificado, atribuindo a cada nó da superfície exposta da fachada *Interactions* do tipo *Concentrated Film Condition* e *Concentrated Radiation to Ambient*, parametrizadas por dados tabulares de temperatura. Ao todo, nesta etapa foram gerados 890 conjuntos de dados de amplitude para representar a evolução temporal das temperaturas ao longo do período de análise para cada um dos respectivos nós, como destacado na Figura 4.3.

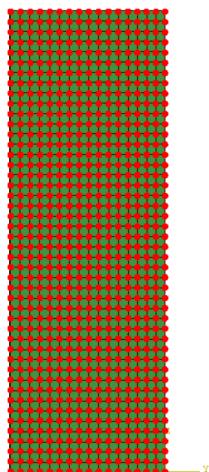


Figura 4.3: Seleção dos nós da superfície exposta da fachada para realização do processo de acoplamento CFD-FEM

A geometria adotada foi compatível com o projeto desenvolvido para os ensaios experimentais da literatura. No que se refere à parede principal, foram considerados quatro painéis com dimensões de 720 mm, 1150 mm e 92 mm. Para a parede secundária, adotaram-se dois painéis com dimensões de 858 mm e 953 mm, respeitando a configuração geométrica empregada nos ensaios. A fixação dos painéis foi realizada por meio de parafusos com diâmetro de 6,3 mm ligados, em quatro níveis distintos às vigas de suporte. A Figura 4.4 apresenta os detalhes de projeto previamente descritos.

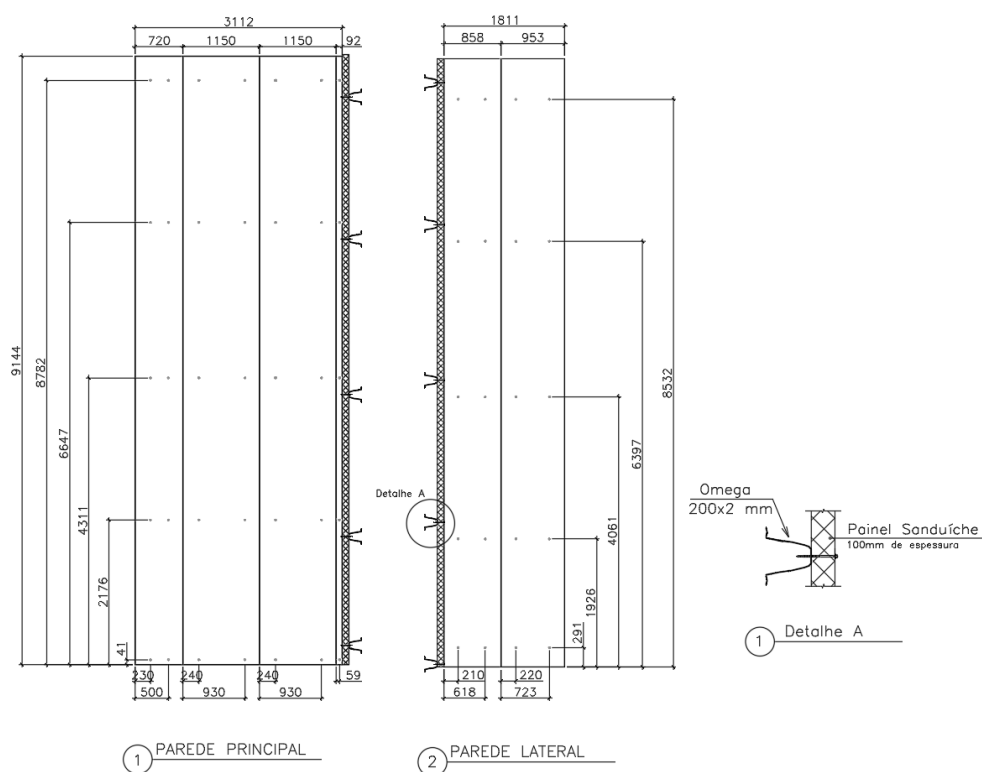


Figura 4.4: Dimensões dos painéis e detalhes de fixação, em milímetros

Fonte: *InduForestFire*

Os painéis foram modelados em *parts* - chapas de aço e núcleos internos - unidas por contato do tipo TIE. Para a malha, foi utilizado o elemento hexaédrico DC3D8 (Figura 4.5b) com dimensões de 20 cm, proporcional ao utilizado para as simulações do FDS, e que se mostrou adequada durante a etapa de análise de sensibilidade da malha.

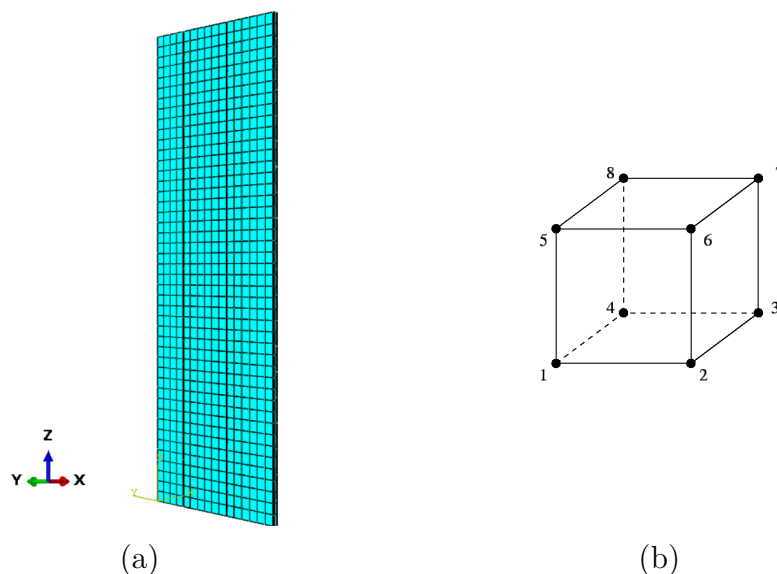


Figura 4.5: a) Malha gerada para simulação da transferência de calor na parede principal; b) Elemento DC3D8

Optou-se, para as simulações de transferência de calor e comportamento mecânico, analisar as soluções com núcleo interno em lã de rocha e em PIR. Elas foram escolhidas, tendo em vista a maior utilização dessas configurações no mercado. A Tabela 4.1, portanto, resume as simulações realizadas na etapa de calibração do modelo, contemplando tais revestimentos.

Tabela 4.1: Plano de simulações para a calibração da transferência de calor no Abaqus

ID	Posição da Carga de Incêndio	Material do núcleo interno
SIM_024_CALIB_FEM_EXT_MW	Externa ^a	MW
SIM_025_CALIB_FEM_EXT_PIR	Externa ^a	PIR

^a Carga de incêndio a 100mm da parede principal e 500 mm da secundária

Nas simulações conduzidas nesta etapa, foram consideradas as propriedades térmicas apresentadas na Tabela 3.3, referentes ao núcleo interno composto por Lã de Rocha e PIR. Para o aço, os valores de calor específico e condutividade térmica foram adotados com base nas relações estabelecidas pela NBR 14323 (ABNT, 2013), enquanto para a densidade, assumido o valor de 7850 kg/m³.

4.1.1 Resultados e Discussões

A calibração foi realizada para os painéis com núcleos de lã de rocha e PIR. Após a simulação de transferência de calor (*heat transfer, transient*), obteve-se a distribuição de temperaturas na face externa da fachada. A Figura 4.6 compara a distribuição de temperaturas para as simulações realizadas no FDS (Figura 4.6a) e Abaqus (Figura 4.6b). Tal comparação permite a avaliação da capacidade do procedimento de acoplamento em representar adequadamente as temperaturas na simulação em Elementos Finitos.

A partir da análise das mesmas pode-se observar a distribuição das temperaturas, com destaque para o instante de 1000 segundos. A escala indica picos superiores a 1100°C próximos à região da chama, com gradiente decrescente ao longo da altura da parede. Adicionalmente, observa-se a compatibilidade entre a distribuição térmica nos dois domínios, sendo a região de maior temperatura nas duas simulações concentrada próxima à carga de incêndio. Além disso, é observado um deslocamento lateral das chamas causado pela ação do vento durante os experimentos, que foi capturado pelas simulações.

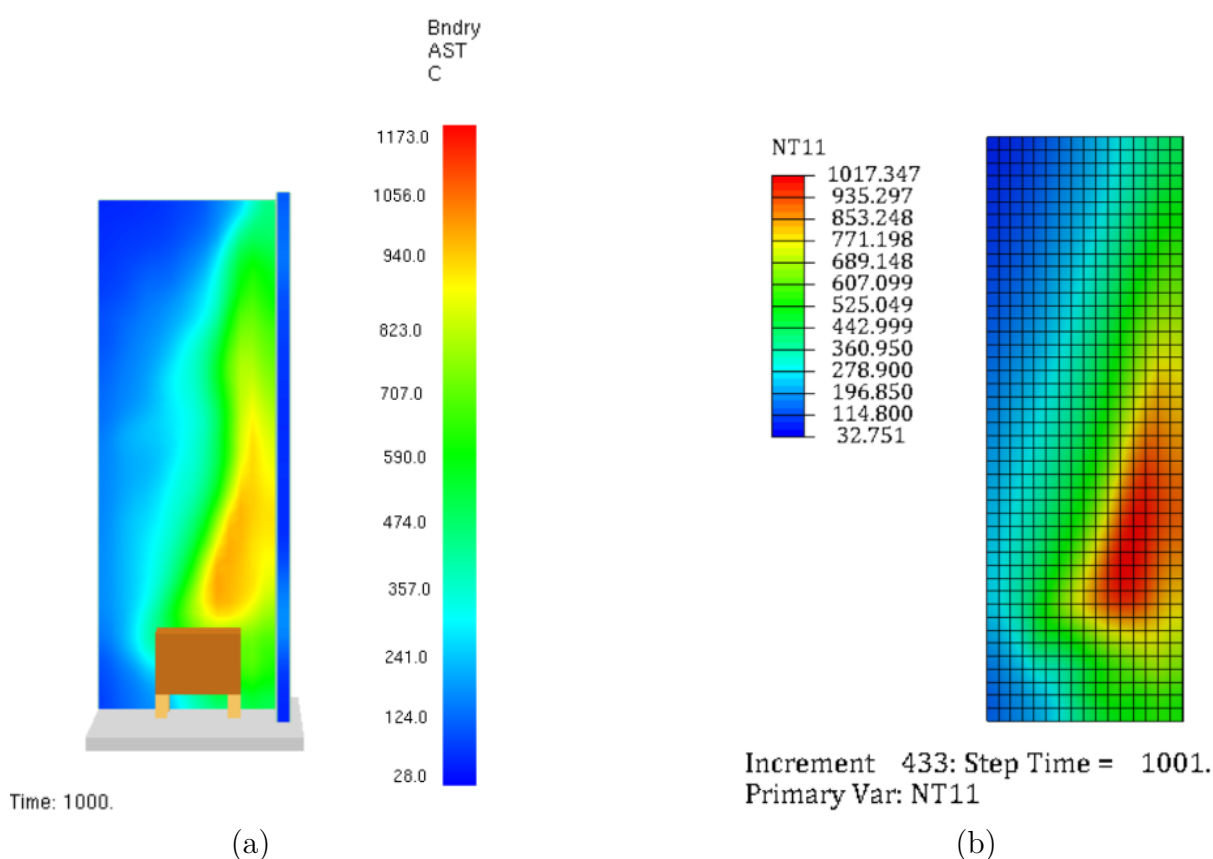


Figura 4.6: Resultados de temperaturas para $t=1000\text{s}$, na face exposta da parede principal, com núcleo interno em lã de rocha (a) Temperatura da superfície adiabática (AST), no FDS (b) Temperaturas nodais (NT11), no Abaqus

A Figura 4.7a compara as temperaturas obtidas em ensaios e simulação numérica [FDS + Abaqus], ambas coletadas a 10 mm de profundidade ($TP12_{INT}$ - Figura 4.7b),

para os painéis com núcleo interno em lã de rocha e PIR.

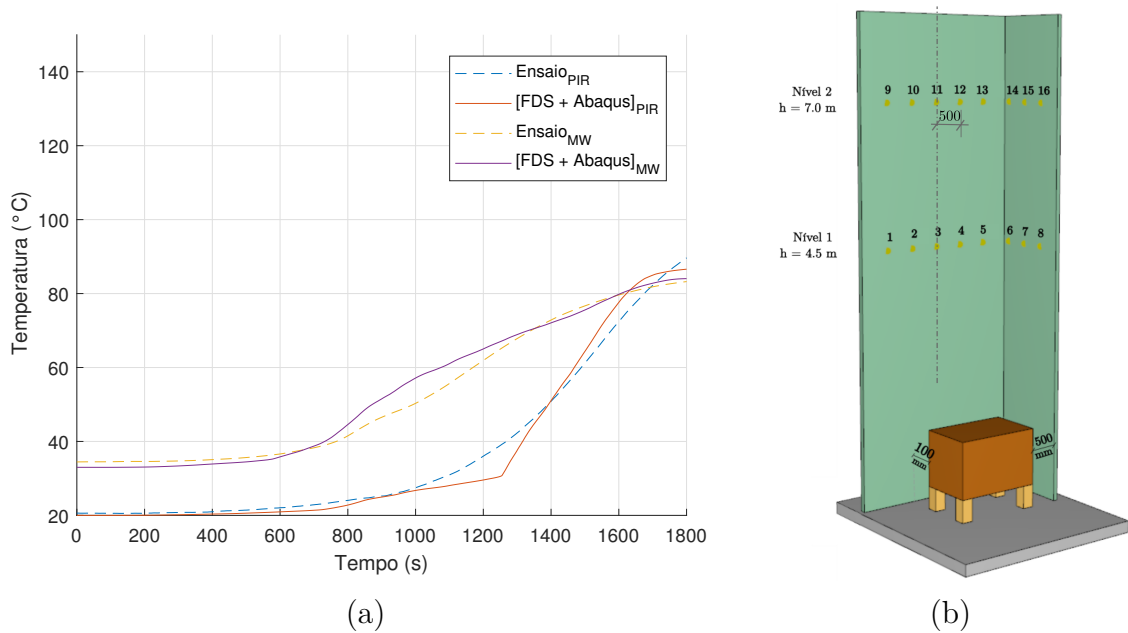


Figura 4.7: a) Comparação entre medições experimentais realizadas por Paula *et al.* (2024a) e acoplamento de simulações [FDS + Abaqus] - Termopar 12_{INT}; b) Posições dos termopares no sistema de fachada

A partir da análise dos resultados, percebe-se uma boa aproximação na previsão de temperaturas entre as simulações numéricas e experimentos - Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Comparação entre resultados numéricos e experimentais para os painéis com núcleo interno em lã de rocha e PIR

	Lã de Rocha		PIR	
	Ensaio	Numérico	Ensaio	Numérico
Temperatura - TP12_INT (°C)	83,24	84,04	89,64	86,59

Assim, foi possível identificar que o modelo numérico conseguiu capturar, com precisão, a evolução temporal das temperaturas. A validade da simulação realizada é atestada pelas diferença de 0,96% e 3,41% entre os resultados numéricos e experimentais para a lã de rocha e PIR, respectivamente. Isso sugere que o uso de simulações numéricas no Abaqus é uma ferramenta valiosa para a previsão do comportamento térmico em sistemas de fachada.

Ao comparar os revestimentos, observa-se que a fachada com núcleo interno em lã de rocha apresentou melhor desempenho em termos de isolamento térmico, evidenciado por um aumento de 155% na temperatura registrada pelo $TP12_{INT}$, em comparação com a temperatura inicial. Em contrapartida, o núcleo em PIR demonstrou um incremento de 332%, conforme ilustrado na Figura 4.7a. As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam a evolução temporal das temperaturas na face exposta da fachada em ambas as simulações realizadas.

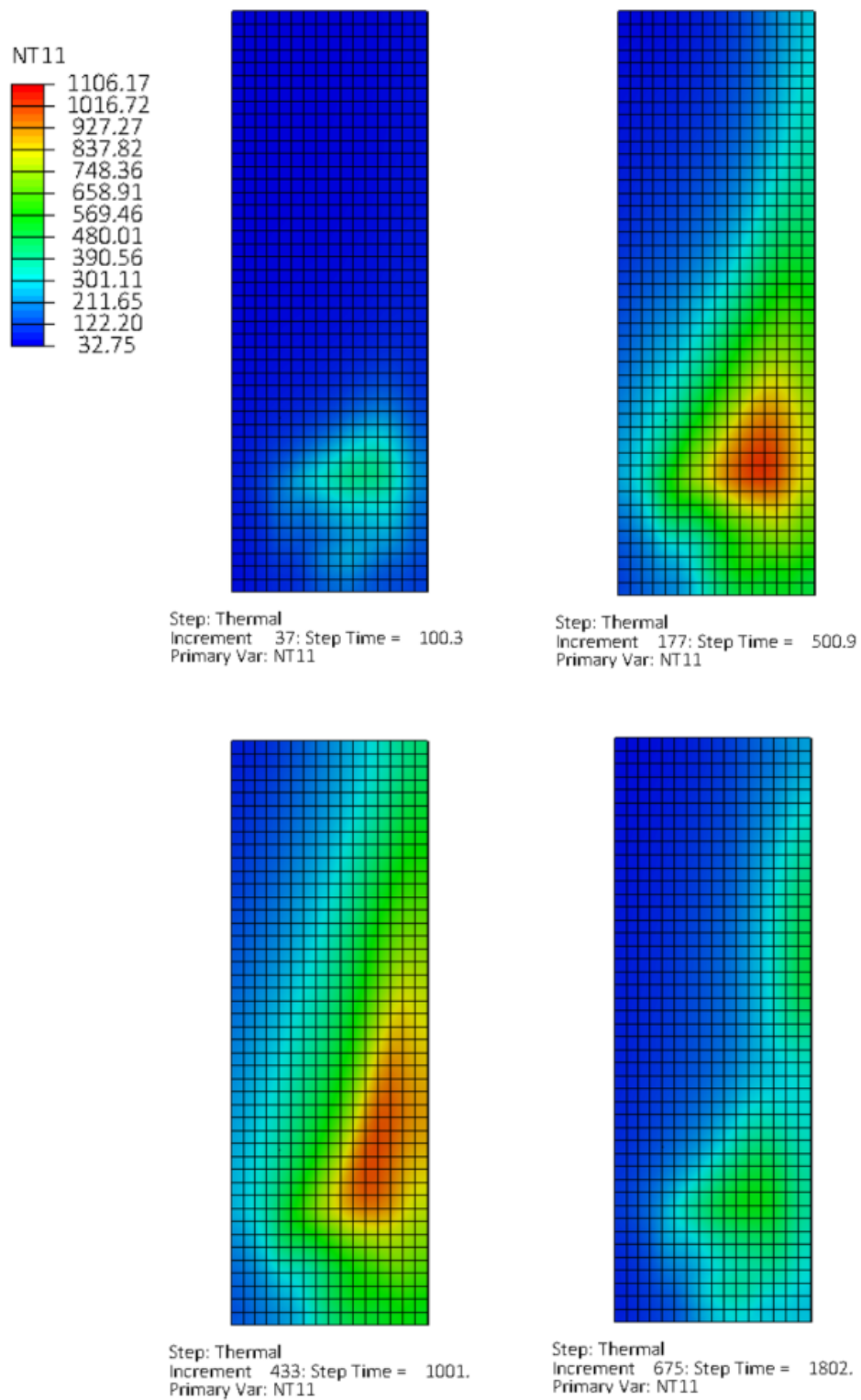


Figura 4.8: Distribuição em área das temperaturas na parede principal - Núcleo interno em lâ de rocha

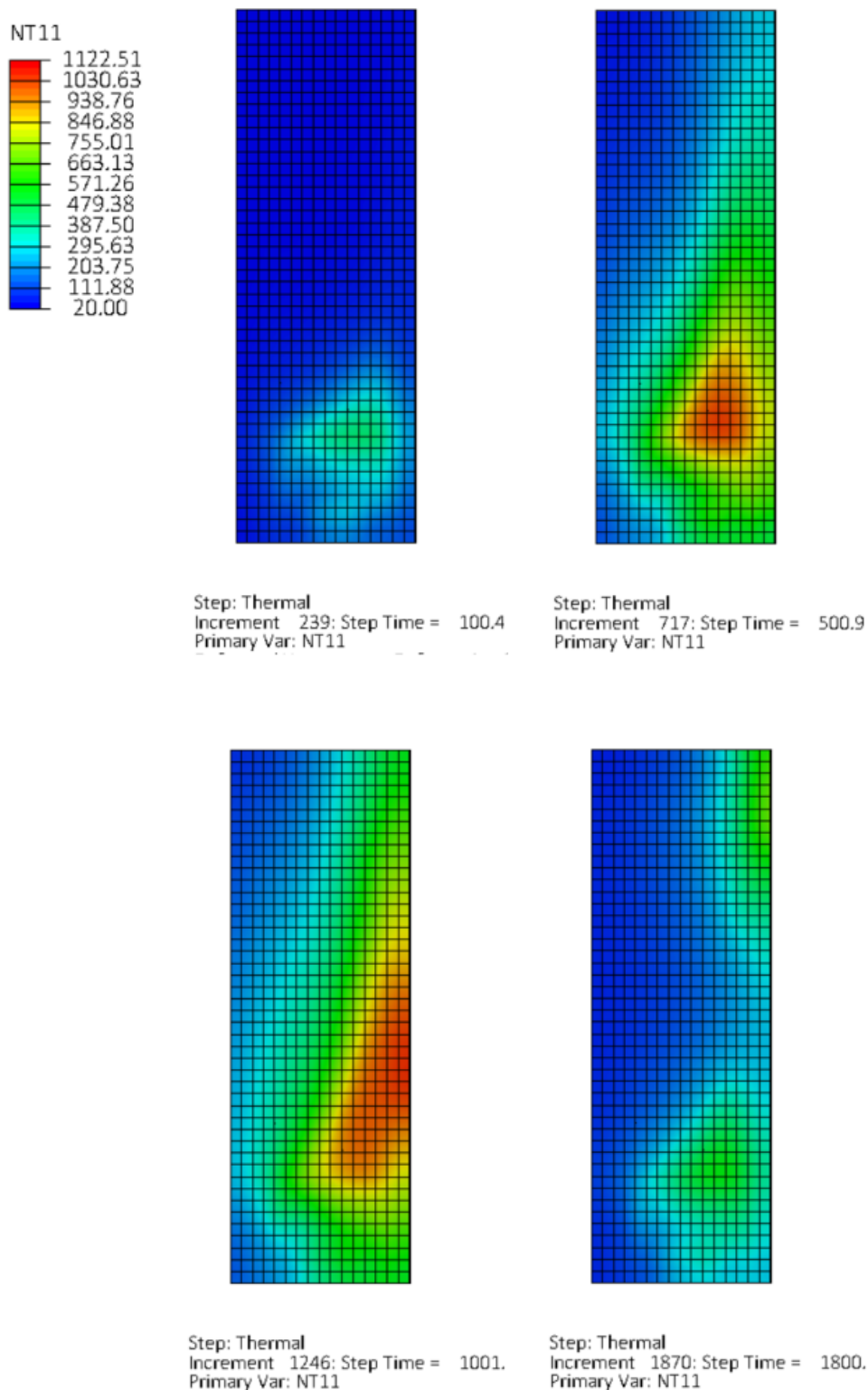


Figura 4.9: Distribuição em área das temperaturas na parede principal - Núcleo interno em PIR

Assim, como conclusões adicionais acerca da etapa de calibração realizada, cabe ressaltar que o resultado apresentado na Figura 4.7a é um resultado acumulado de ambas as simulações realizadas [FDS + Abaqus]. Mesmo com as incertezas inerentes aos *softwares*, e a variação das condições ambientais durante os ensaios, eles foram capazes de prever os

resultados experimentais com boa precisão.

4.2 Simulação Numérica da Transferência de Calor

Nessa seção será descrito o processo de simulação de transferência de calor pelos painéis de revestimento da parede de fachada. Dentre os diferentes cenários simulados no FDS, foram selecionadas, para importação no Abaqus, as configurações que apresentaram os resultados mais críticos nos contextos de incêndio interno e externo. Ressalta-se que, no contexto deste trabalho, adotou-se a abordagem de acoplamento unidirecional (one-way coupling) para a integração CFD-FEM.

Considerando o desempenho térmico inferior apresentado pelo PIR na etapa de calibração (Figura 4.7a), optou-se por empregá-lo nas simulações de transferência de calor e na análise do comportamento mecânico, com o propósito de investigar o desempenho térmico da fachada sob condições mais severas.

Tabela 4.3: Plano de simulações - Análises de transferência de calor

ID	Carga de incêndio	
	Origem	Simulação de Referência (FDS)
SIM_026_FEM_TERM_INT_HA_PIR	Interna	SIM_011_CFD_INT_VA-50_HA_A_FL500
SIM_027_FEM_TERM_EXT_FL_PIR	Externa	SIM_023_CFD_EXT_W5_AeH-FL-I0

No FDS, foram configuradas saídas de dados na forma de *Adiabatic Surface Temperature* (AST), aplicadas a superfícies com dimensões equivalentes à fachada considerada nas simulações térmicas no Abaqus ($3,02 \times 6$ metros). Para o cenário de incêndio interno, a região selecionada para extração dos dados foi aquela adjacente à abertura A4 (Figura 4.10a). No caso do incêndio externo, a área escolhida correspondeu à porção central da fachada da edificação (Figura 4.10b).

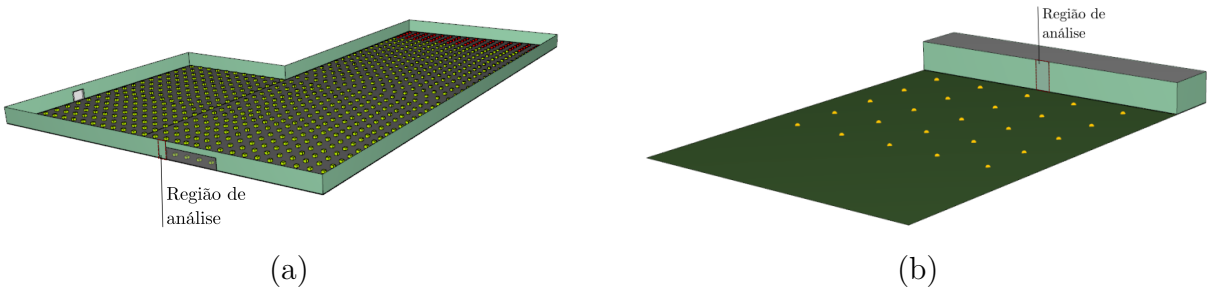


Figura 4.10: Regiões de coleta de ASTs para os cenários de: a) Incêndio Interno; b) Incêndio Externo

A Figura 4.11 ilustra o efeito da propagação do incêndio nas temperaturas registradas pela superfície AST, localizada na fachada. Essa imagem permite visualizar a região

de coleta das temperaturas, utilizadas para etapa posterior, o acoplamento CFD-FEM.

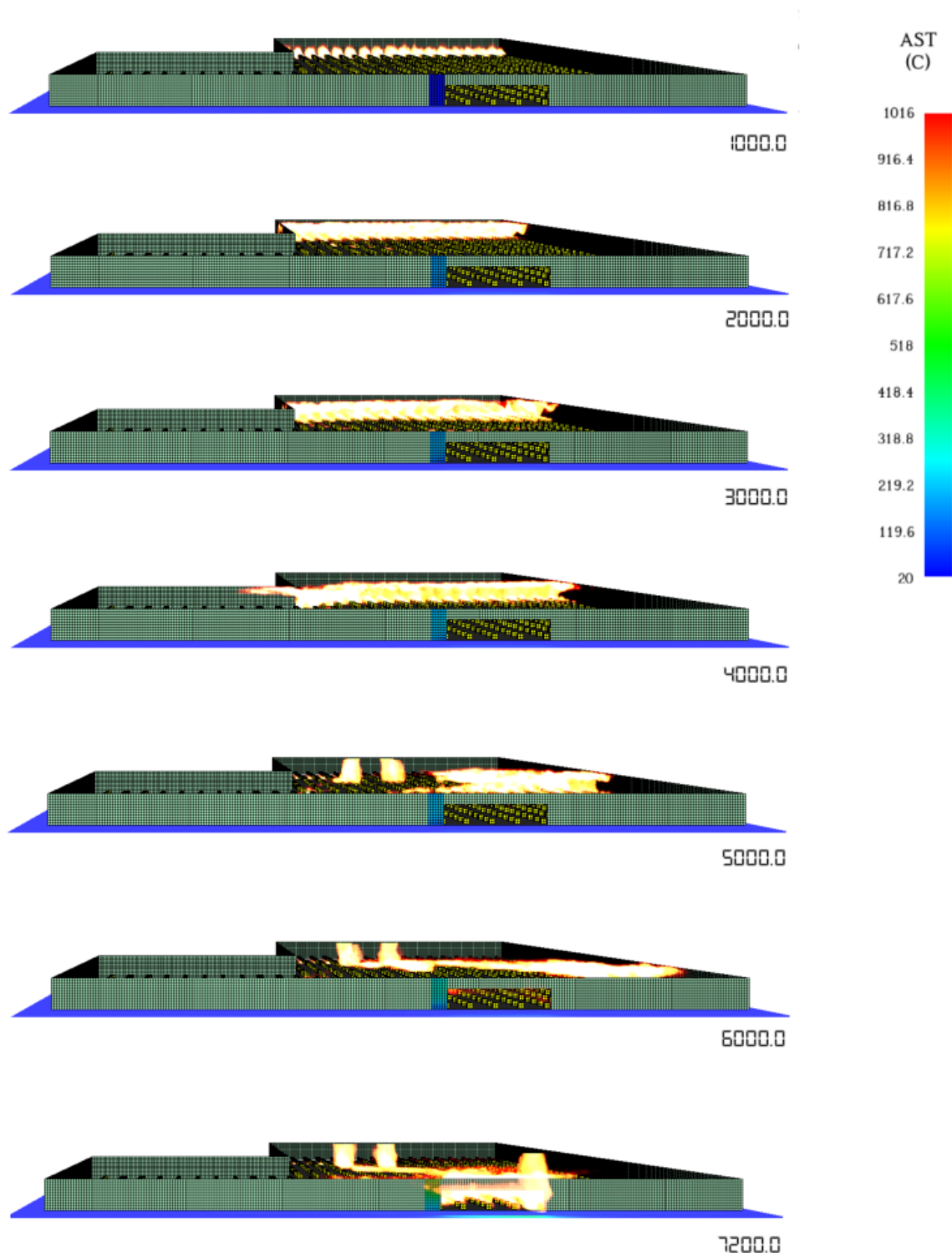


Figura 4.11: Propagação das chamas pela edificação e temperatura (AST) coletada na face externa da fachada

A geometria considerada para essa etapa consiste em uma parede de 3020 mm, composta por 3 painéis, conforme apresentado na Figura 4.12. Para tanto, o modelo previamente calibrado foi utilizado como base, sendo alterada a altura dos painéis para 6

metros, compatível à altura da edificação.

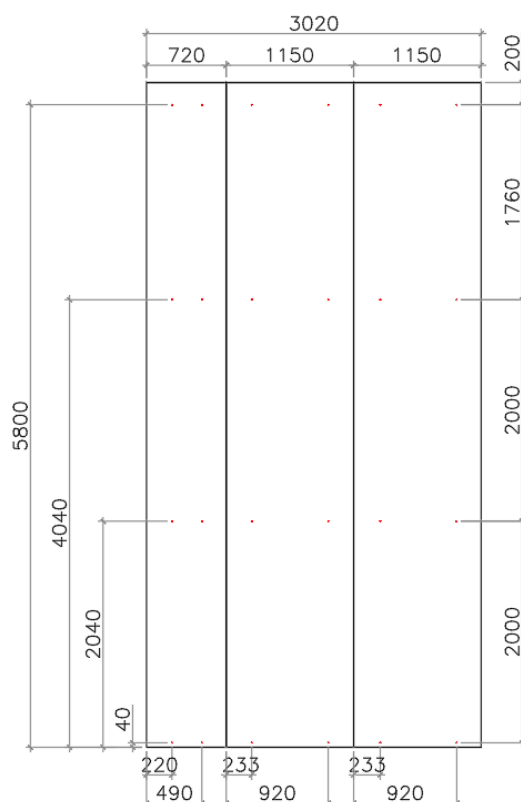


Figura 4.12: Dimensões dos painéis e detalhes de fixação, em milímetros

As chapas são em aço S355, de 0,5mm de espessura e núcleo interno com 100mm de espessura. Em virtude do maior custo computacional associado à representação precisa da malha com a chapa de seção trapezoidal (corrugada), esta foi modelada como plana, o que pode ter implicações na estabilidade da chapa. Conclusões a respeito dessa consideração serão tratadas na Seção 4.3.

As propriedades dos materiais foram definidas com base nos valores previamente calibrados, conforme apresentado na Seção 4.1.

O sistema de apoio é composto por quatro travessas de perfil ômega 200x2 (Figura 4.4), dispostas com espaçamentos verticais de 2,0 m e 1,76 m, conforme ilustrado na Figura 4.12. A ligação foi realizada por meio de parafusos de aço classe 8.8, com diâmetro de 6,3 mm. A modelagem dos parafusos foi realizada conforme a imagem ilustrativa apresentada na Figura 4.13c, de forma unificada, integrando o corpo do parafuso e a porca em um único componente.

As Figuras 4.13a e 4.13b apresentam as vistas frontal e traseira, referentes a montagem dos painéis.

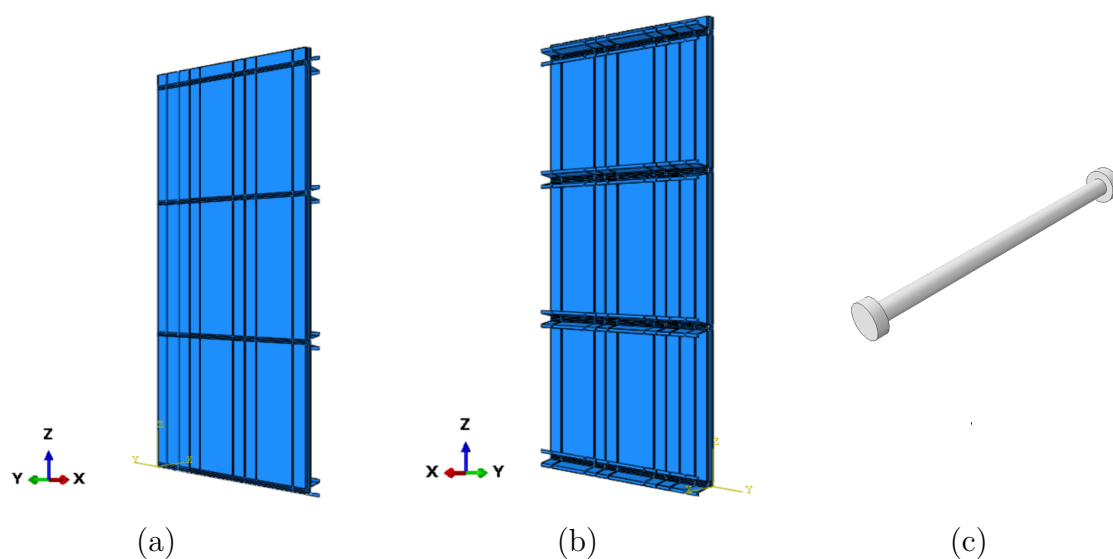


Figura 4.13: Montagem dos painéis a) Vista Frontal; b) Vista traseira; c) Parafuso

A definição da malha visou equilibrar o nível de detalhamento da simulação com a viabilidade computacional. Foram adotados elementos do tipo DC3D8 (*8-node linear heat transfer brick*), com 4cm (Figuras 4.14a e 4.14b). Essa escolha demonstrou-se eficaz, proporcionando resultados consistentes e uma distribuição suave do campo de temperaturas. Ressalta-se que, durante a etapa de modelagem, as *parts* foram particionadas de modo a garantir uma malha conforme nas interfaces entre os componentes em contato.

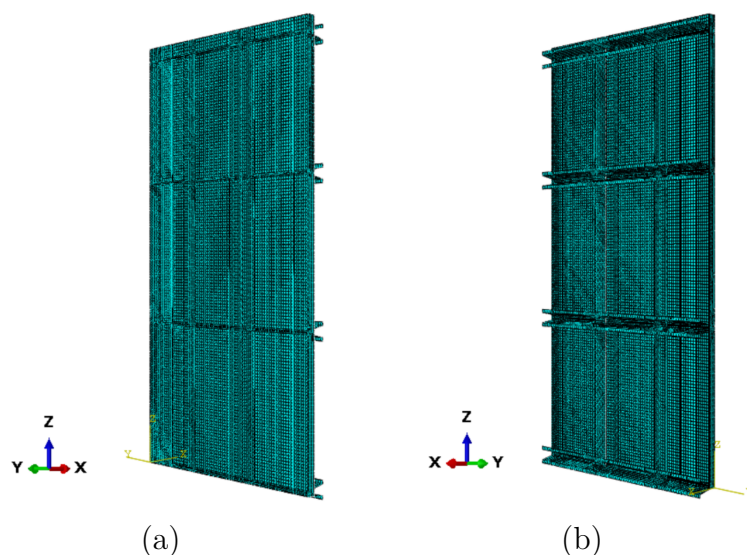


Figura 4.14: Malha a) Vista Frontal; b) Vista traseira

Tendo em vista os cenários analisados no FDS, a distribuição de temperaturas obtidas foi importada no Abaqus, com base no procedimento descrito na Seção 2.4. No caso específico da simulação correspondente ao cenário de incêndio interno, a análise térmica da fachada considerou o aquecimento apenas na face externa do elemento, de

forma a reproduzir as condições experimentais estabelecidas pela norma BS 8414-2 (BSI, 2017). A face interna, por sua vez, foi assumida como termicamente isolada.

4.2.1 Resultados e Discussões

As simulações realizadas no FDS foram utilizadas como dados de entrada para as análises de transferência de calor no Abaqus. Durante a simulação, foram coletadas as temperaturas nas chapas frontal e traseira, bem como no núcleo interno (a 50 mm de profundidade - equivalente a metade da espessura), para os três painéis, cuja numeração foi identificada na Figura 4.15a.

Adicionalmente, a Figura 4.15b apresenta a numeração adotada para os parafusos.

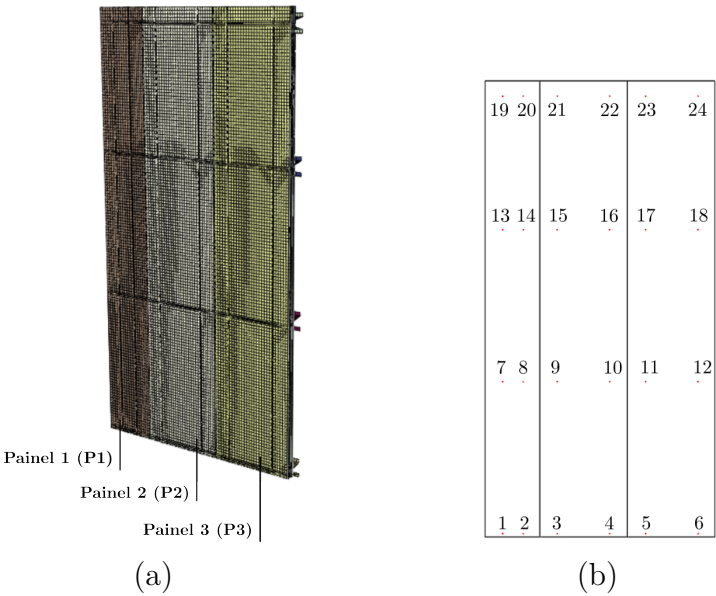


Figura 4.15: a) Numeração dos painéis b) Numeração dos Parafusos

4.2.1.1 Propagação de Incêndio Interna

Para a avaliação da transferência de calor na fachada, a distribuição de temperaturas obtida na simulação SIM_011 foi utilizada como base para a simulação no Abaqus.

Ao final dos 7200 segundos, foram obtidas temperaturas máximas na ordem de 743°C na chapa frontal, 293 °C no núcleo interno (a 50 mm de profundidade) e 63°C na chapa traseira - Figura 4.16.

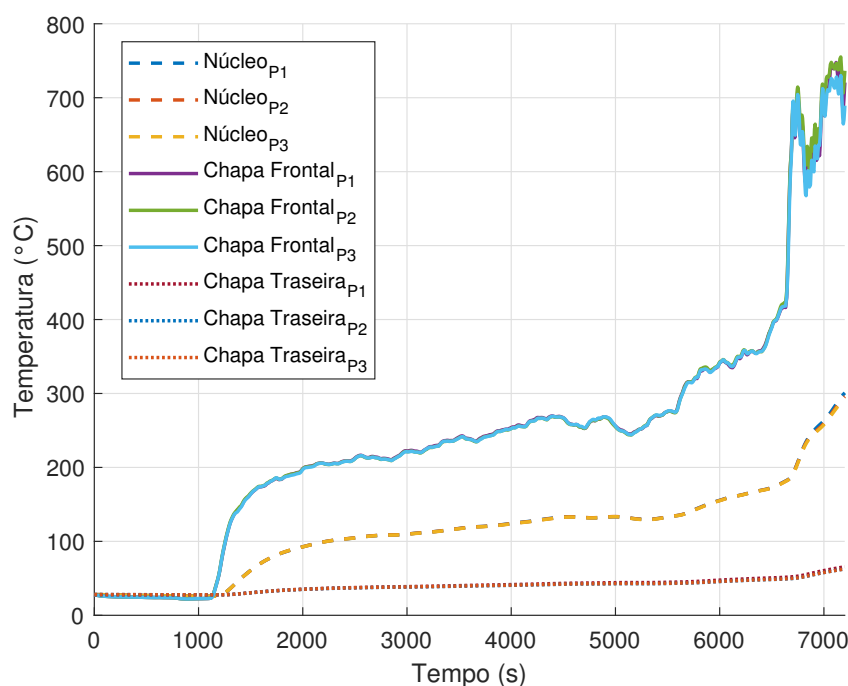


Figura 4.16: Análise de Transferência de Calor - Evolução das temperaturas máximas nos elementos - Exposição de Incêndio Interna

Durante o pré-processamento da simulação, foram solicitados os *outputs* do tipo NT11 e TEMP. O *output* NT11 (Nodal Temperature) corresponde à temperatura calculada diretamente em cada nó do modelo. Já o TEMP refere-se às temperaturas avaliadas nos pontos de integração dos elementos (Figura 4.17), as quais são posteriormente extrapoladas para os nós.

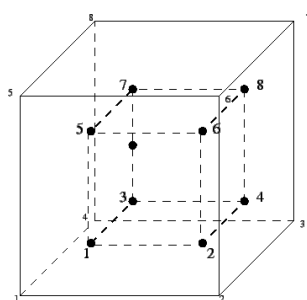


Figura 4.17: Pontos de integração 2x2x2 - Elemento DC3D8

Fonte: MIT (2025)

Em alguns casos, em virtude da extrapolação realizada, a distribuição das temperaturas pelo *output* do tipo TEMP pode apresentar descontinuidades. Contudo, ao comparar os resultados (Figura 4.18) é possível observar que ambos apresentam resultados muito próximos. Esse fato pode indicar que a malha é adequada, uma vez que a extrapolação realizada não alterou os resultados.

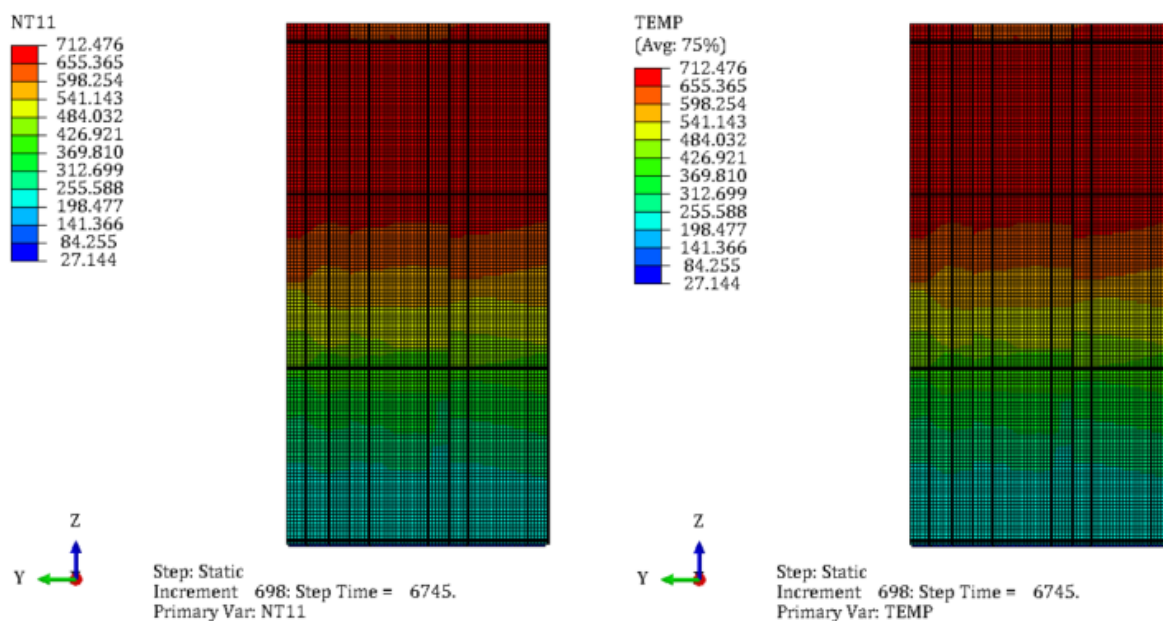


Figura 4.18: Comparação entre os *outputs* do tipo NT11 e TEMP

A evolução temporal das temperaturas é representada na Figura 4.19. A análise das imagens permite identificar temperaturas mais elevadas na porção superior da fachada. Tal fenômeno ocorre em virtude da avaliação ter sido conduzida sob a condição de incêndio interno, no qual as chamas atingem a fachada por meio de uma abertura. Consequentemente, o efeito da convecção contribuiu significativamente para a ascensão dos gases quentes, resultando no aquecimento predominante na porção superior da fachada.

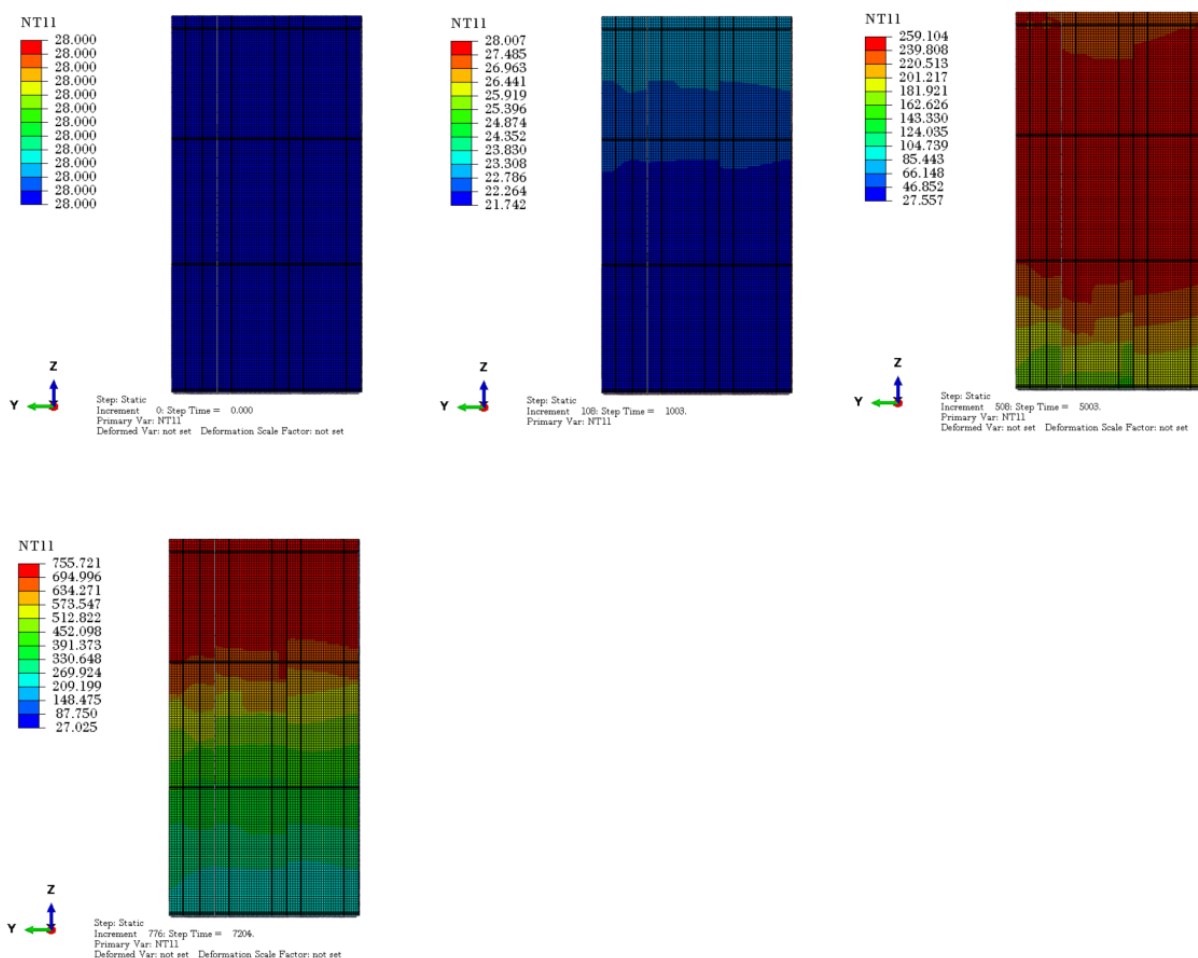


Figura 4.19: Distribuição de Temperaturas na Fachada - Exposição de Incêndio Interna

Relevante para a análise posterior de avaliação do comportamento mecânico dos painéis de fachada, as temperaturas máximas registradas pelos parafusos foram analisadas, com o objetivo de posteriormente avaliar sua integridade mecânica. As Figuras 4.20 e 4.21 apresentam os valores máximos registrados por esses elementos, em função da sua posição (Níveis 1 a 4). Como esperado, os elementos nos Níveis 3 e 4 registraram temperaturas de maior magnitude (584°C), ao passo que para os Níveis 1 e 2, 181°C e 306°C , respectivamente.

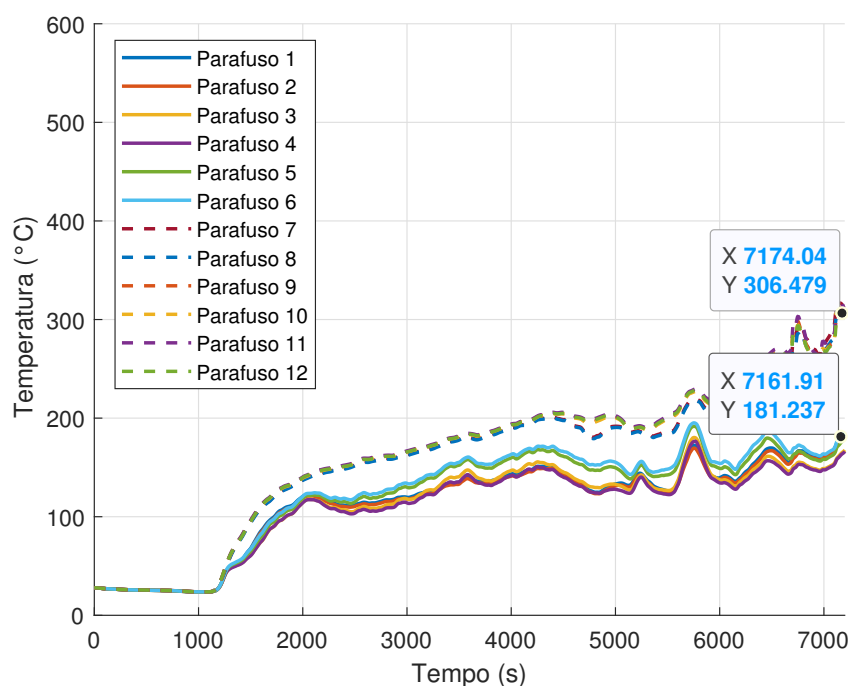


Figura 4.20: Evolução temporal - Temperaturas dos parafusos - Níveis 1 e 2 - Exposição de incêndio interna

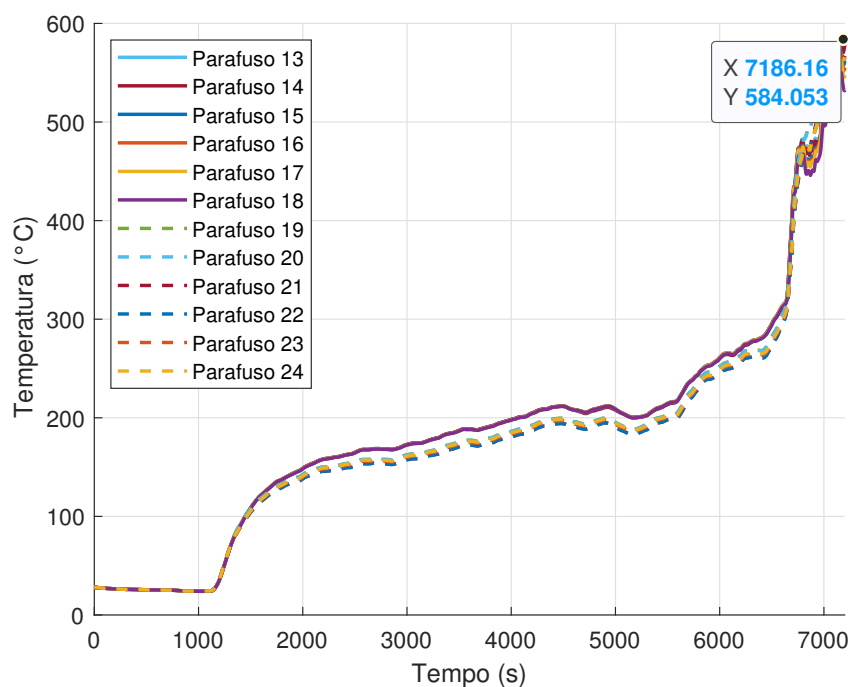


Figura 4.21: Evolução temporal - Temperaturas dos parafusos - Níveis 3 e 4 - Exposição de incêndio interna

Além disso, foi possível observar que o parafuso, devido à elevada condutividade térmica do aço, aquece o núcleo interno na região do furo, como pode ser observado na Figura 4.22.

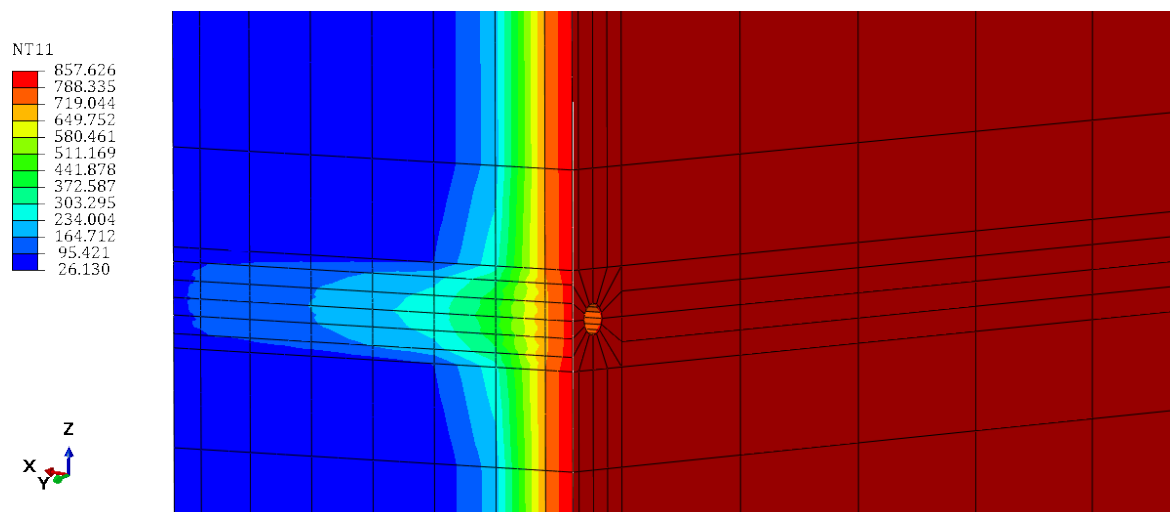


Figura 4.22: Aquecimento do núcleo causado pelo parafuso

Comportamento análogo foi registrado para os elementos de suporte. O aquecimento foi substancialmente localizado na região do furo, causado pelos parafusos - Figura 4.23.

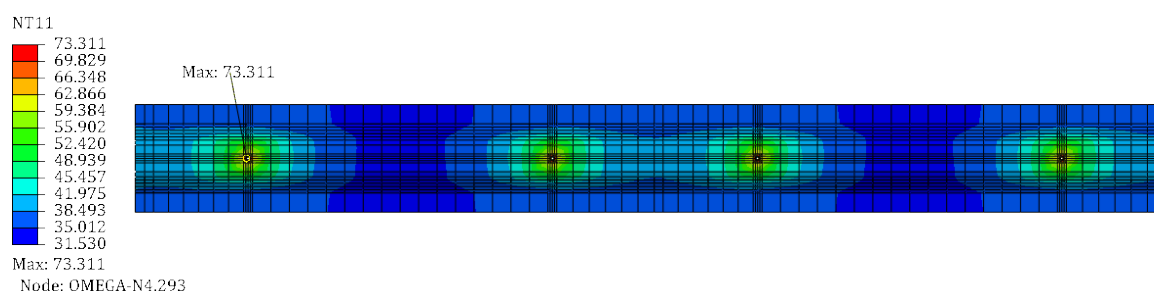


Figura 4.23: Distribuição de temperaturas do elemento de suporte - Exposição de Incêndio Interna

A partir da análise realizada foi possível avaliar termicamente a parede de fachada, utilizando como *input* as temperaturas obtidas em simulação no FDS. Novamente, o processo de acoplamento se mostrou adequado para o pretendido, realizando de forma eficiente a integração entre as temperaturas registradas em simulações em CFD e a simulação em Elementos Finitos. A distribuição das temperaturas foi coerente com a dinâmica do incêndio em um compartimento e foi possível observar o efeito que a ligação possui no aquecimento de elementos não expostos diretamente às chamas.

4.2.1.2 Propagação de Incêndio Externa

Para essa simulação, foi considerado o cenário de incêndio externo, relativo ao incremento da carga de incêndio, gerado pela redução do espaçamento entre as árvores (SIM_023), tal como ilustrado na Figura 4.24. Na imagem é possível observar as chamas que atingem a vegetação, bem como a superfície de coleta das temperaturas (AST).

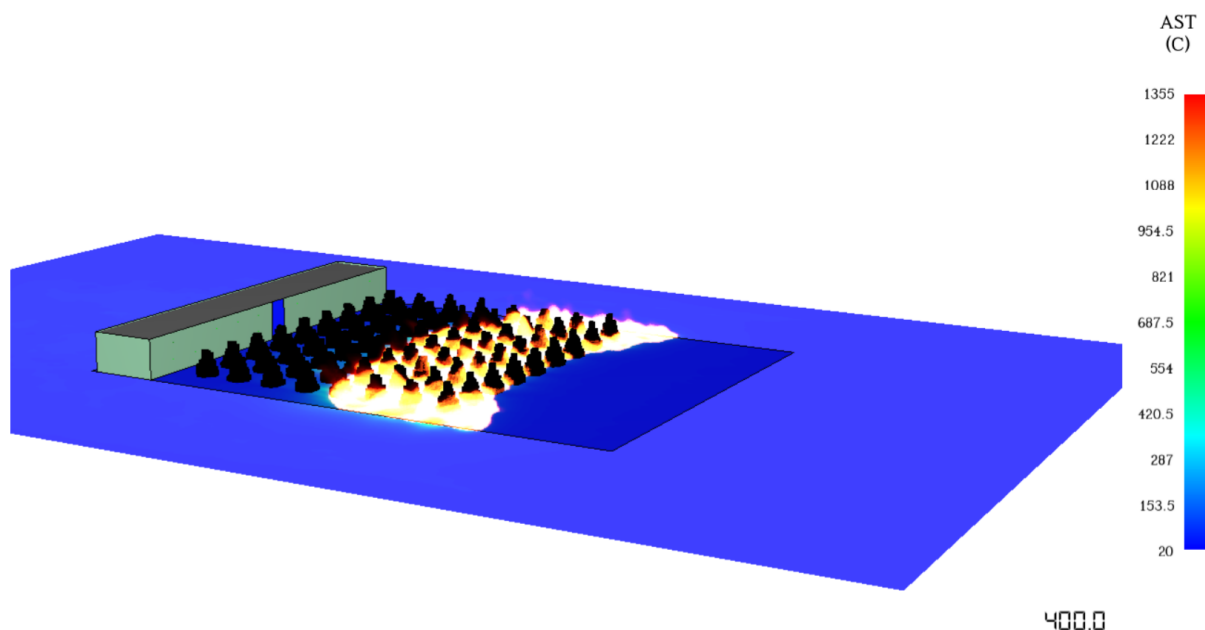


Figura 4.24: Propagação das chamas pela vegetação - SIM_023

As temperaturas máximas registradas em cada elemento que compõe os painéis foi coletada e avaliada na Figura 4.25. Nela, é possível observar um pico de temperaturas (1052°C) na face exposta da fachada, aos 696 segundos. Aos 1341 segundos é novamente registrado um aumento das temperaturas, referente a ignição da fachada, como será descrito com mais detalhes posteriormente. Quanto aos demais elementos, as temperaturas registradas foram inferiores, o que indica que o núcleo interno foi capaz de conter o aquecimento.

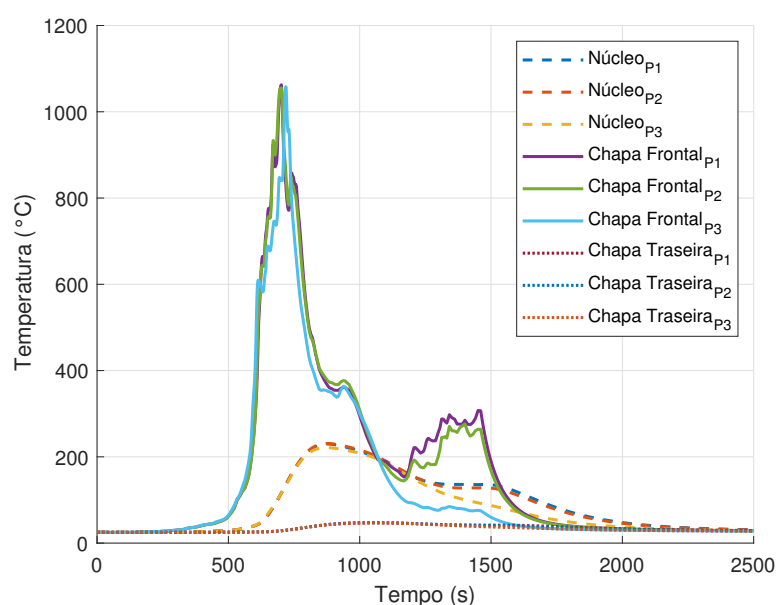


Figura 4.25: Análise de Transferência de Calor - Evolução das temperaturas nos elementos - Exposição de Incêndio Externa

A distribuição espacial das temperaturas na parede de fachada é observada na Figura 4.26 para $t = 0, 200, 500, 700, 1000$ e 1500 segundos. A análise da imagem permite identificar as etapas do incêndio, simulado no FDS. Até os 500 segundos, observa-se a propagação das chamas pelas árvores e predomínio de maiores temperaturas na porção superior da fachada, devido aos efeitos de convecção. Aos 700 segundos já se observa o predomínio do incêndio na vegetação superficial, com as temperaturas mais elevadas localizadas na porção inferior da fachada. Em seguida, aos 1000 segundos, a ignição da fachada torna-se predominante, resultando em maiores temperaturas na região central dos painéis. Por fim, o incêndio entra em declínio, com reduzidas temperaturas a partir dos 1500 segundos.

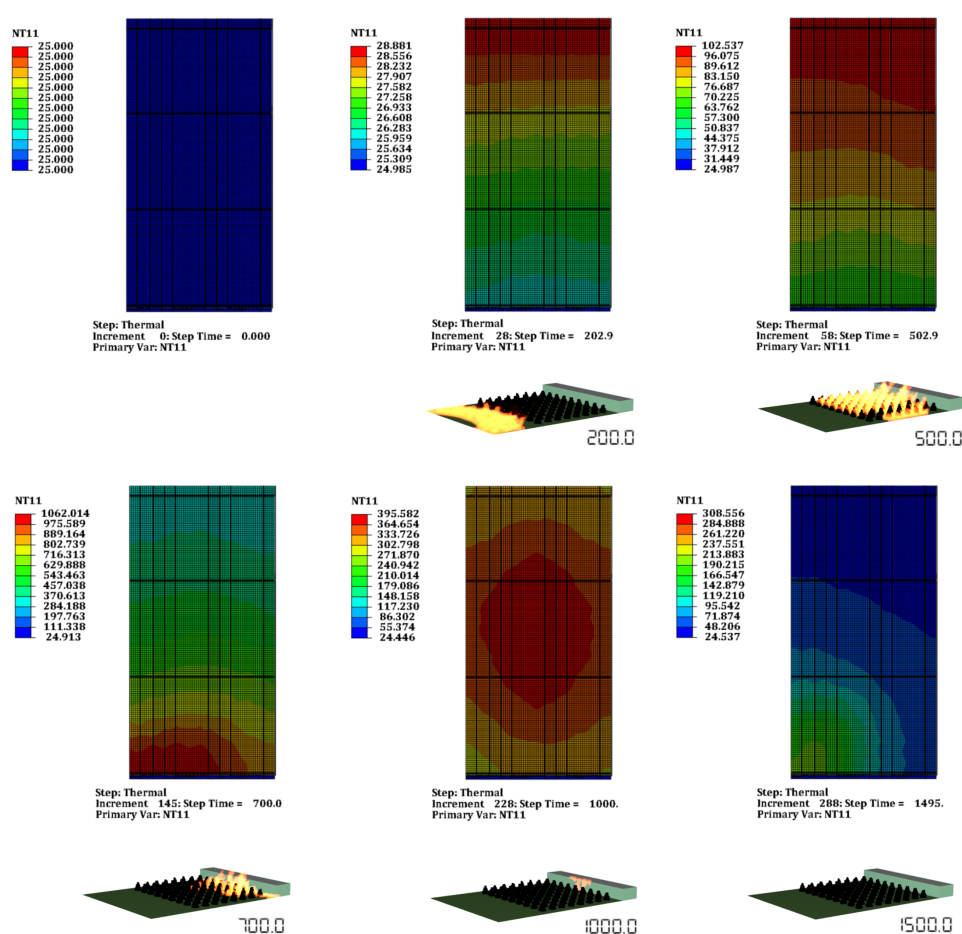


Figura 4.26: Distribuição de Temperaturas na Seção Transversal - Exposição de Incêndio Externa

As temperaturas máximas registradas pelos parafusos são apresentadas nas Figuras 4.27 e 4.28.

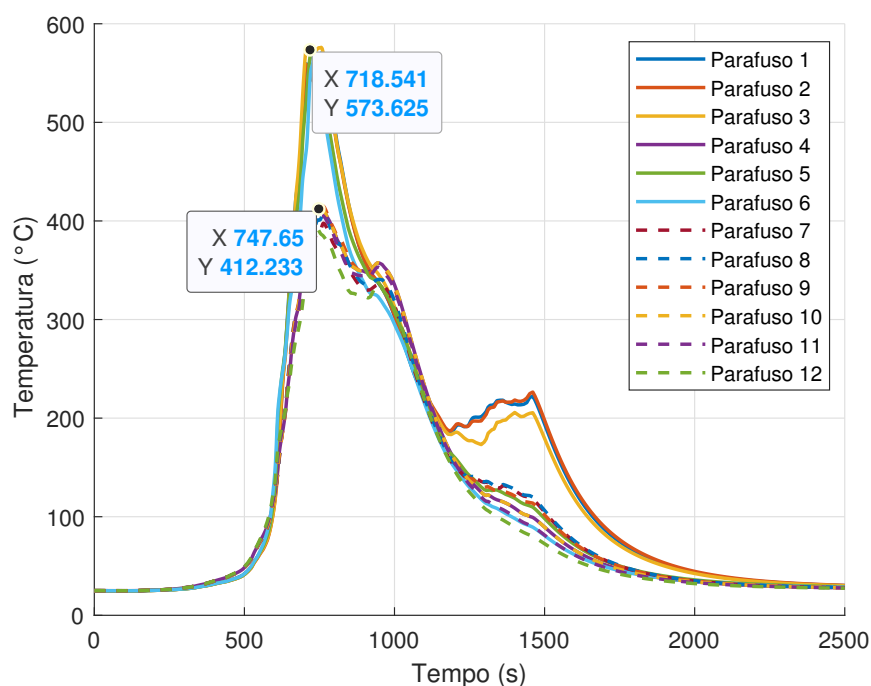


Figura 4.27: Evolução temporal - Temperaturas dos parafusos - Níveis 1 e 2 - Exposição de incêndio externa

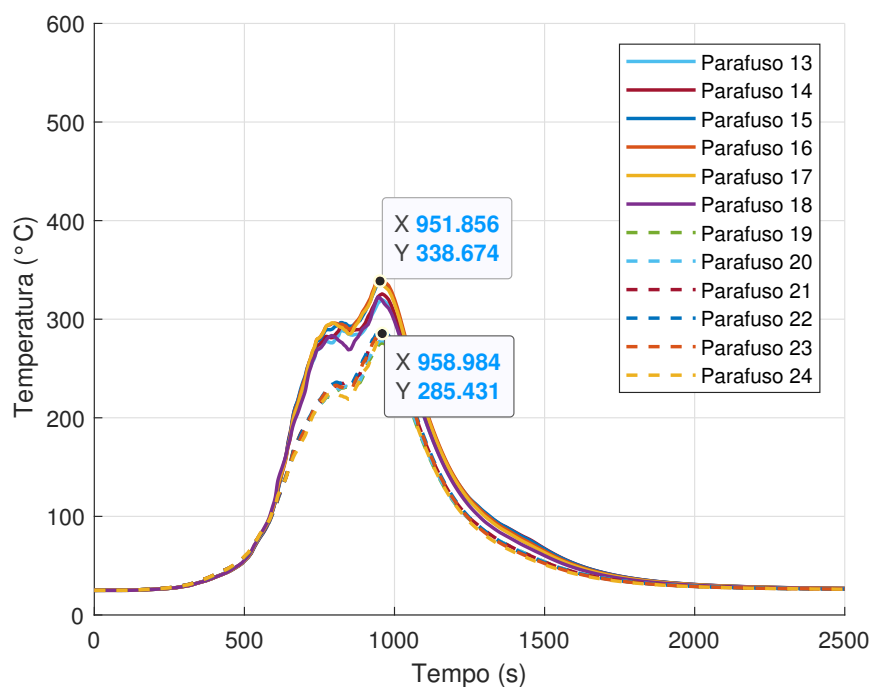


Figura 4.28: Evolução temporal - Temperaturas dos parafusos - Níveis 3 e 4 - Exposição de incêndio externa

De maneira análoga ao apresentado para o cenário de incêndio interno, o parafuso causou o aquecimento do núcleo e elemento de suporte na região do furo (Figuras 4.29 e 4.30).

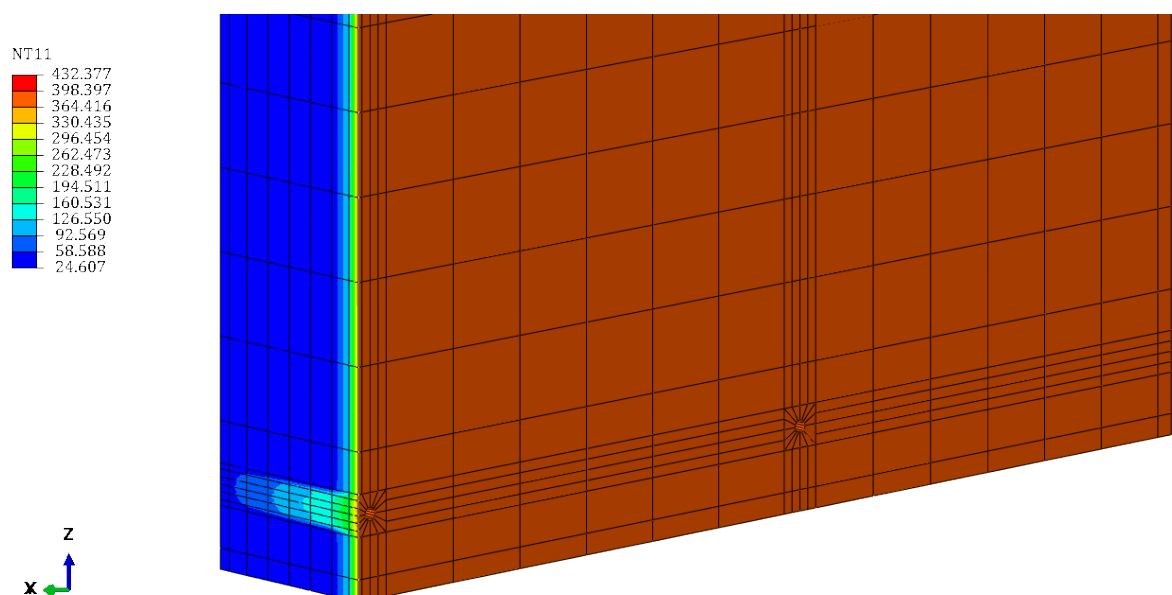


Figura 4.29: Aquecimento causado pelo parafuso (*Temperaturas em °C; $t = 2500$ s*)

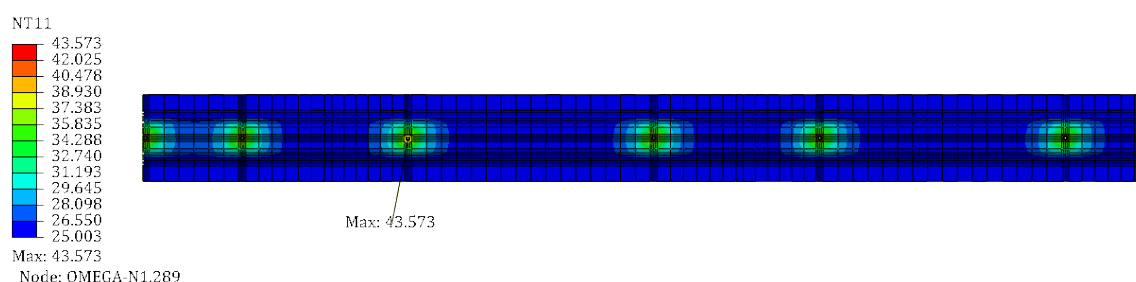


Figura 4.30: Distribuição de temperaturas do elemento de suporte - Exposição de Incêndio Externa (*Temperaturas em °C; $t = 2500$ s*)

As simulações de transferência de calor foram concluídas com bons resultados em termos do cenário de exposição externa. O incêndio simulado foi agressivo e de grande severidade, conforme descrito na Seção 3.4.3.4 e isso se traduz nos resultados apresentados nessa seção. As temperaturas na face exposta da fachada foram de grande magnitude, ultrapassando os 1000°C. Essa exposição foi responsável por ignizar a fachada, como aponta os resultados obtidos. Nesta situação, seria benéfica a avaliação da fachada sob a metodologia de acoplamento bidirecional, que realiza ambas as avaliações de propagação do incêndio e simulações em Elementos Finitos concomitante.

4.3 Comportamento Mecânico da Fachada

Concluídas as simulações de transferência de calor, a etapa final deste trabalho consiste na análise do comportamento mecânico dos painéis, mediante o aquecimento.

Para o estudo do comportamento mecânico dos painéis não portantes, foi realizada uma análise termomecânica sequencialmente acoplada. Os resultados obtidos na análise de transferência de calor (Seção 4.2) foram utilizados como dados de entrada para a análise mecânica, do tipo *Dynamic, Explicit*.

Considerando o elevado custo computacional associado à importação de todos os incrementos da simulação de transferência de calor, o processo foi simplificado, sendo adotada uma segmentação em três etapas (*steps*) de análise, definidas com base em intervalos de temperatura. Assim, foi possível reduzir a quantidade de pontos importados. Detalhes adicionais sobre essa abordagem são apresentados nas seções subsequentes.

A Tabela 4.4 apresenta as simulações realizadas para a avaliação do comportamento mecânico dos painéis.

Tabela 4.4: Plano de simulações - Comportamento mecânico

ID	Simulação base	Exposição
	(Análise de Transferência de Calor)	
SIM_028_FEM_MEC_INT_HA_PIR	SIM_026_FEM_TERM_INT_HA_PIR	Interna
SIM_029_FEM_MEC_EXT_FL_PIR	SIM_027_FEM_TERM_EXT_FL_PIR	Externa

A geometria dos painéis é equivalente a utilizada para a análise de transferência de calor - Figura 4.12. Para as propriedades térmicas, foi considerado o efeito de expansão térmica para avaliação do comportamento mecânico da fachada, conforme as equações prescritas pelo Eurocode 3 *part 1-2* (CEN, 2010). Além disso, para a avaliação do comportamento mecânico da estrutura em função da temperatura, foram considerados os fatores de redução da resistência ao escoamento do aço ($k_{y,\theta}$) e Módulo de Elasticidade ($k_{E,\theta}$), também descritos pela norma europeia.

O Eurocode 3 *part 1-2* (CEN, 2010) apresenta ainda formulações para a definição do diagrama Tensão x Deformação do material, em função da temperatura. Com base nas formulações descritas pela normatização, o diagrama tensão-deformação para o Aço S355, levando em conta as variações de temperatura, é apresentado na Figura 4.31. Este aço foi utilizado nas simulações nas chapas e elementos de suporte, sendo adotado um comportamento elasto-plástico para o material.

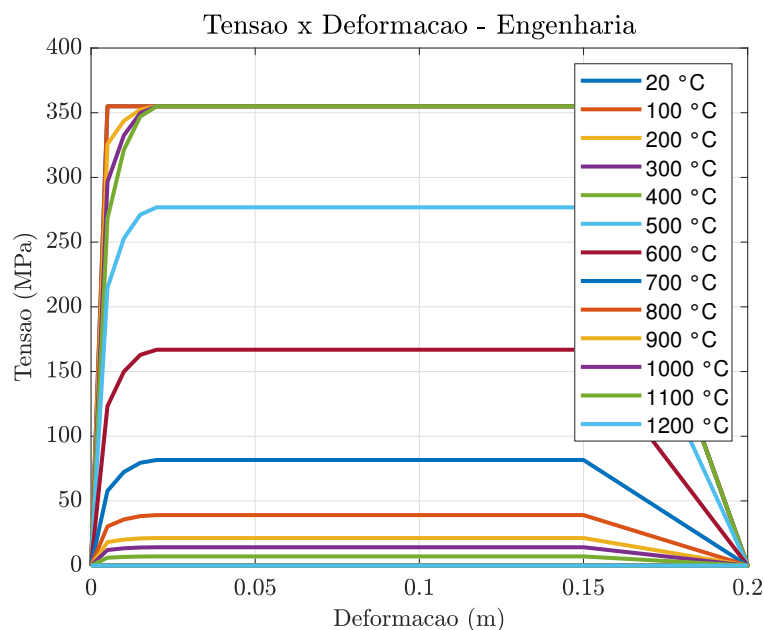


Figura 4.31: Diagrama tensão x deformação - Aço S355

Para o parafuso, foi considerado o aço de classe 8.8, com resistência ao escoamento (f_y) de 640 MPa, resistência última (f_u) de 800 MPa e módulo de elasticidade (E) de 255 GPa. Os valores foram ponderados com os coeficientes de redução de resistência em virtude do aquecimento.

Para a modelagem do núcleo interno, foi utilizado o poliisocianurato (PIR), sendo adotado um módulo de elasticidade de 4 MPa e densidade de 36 kg/m³, conforme os parâmetros indicados por Silwal *et al.* (2024) e coeficiente de Poisson igual a 0,3.

4.3.1 Malha

Para a malha, foram empregados elementos do tipo C3D8R (*8-node linear brick, reduced integration, hourglass control*), com dimensão de 1 cm para as chapas e o núcleo. Para o parafuso 0,6 cm. No total, foram gerados 5.146.400 nós e 4.324.064 elementos.

Durante a modelagem, foram realizadas partições nos elementos para garantir uma malha conforme, como pode ser observado na Figura 4.32.

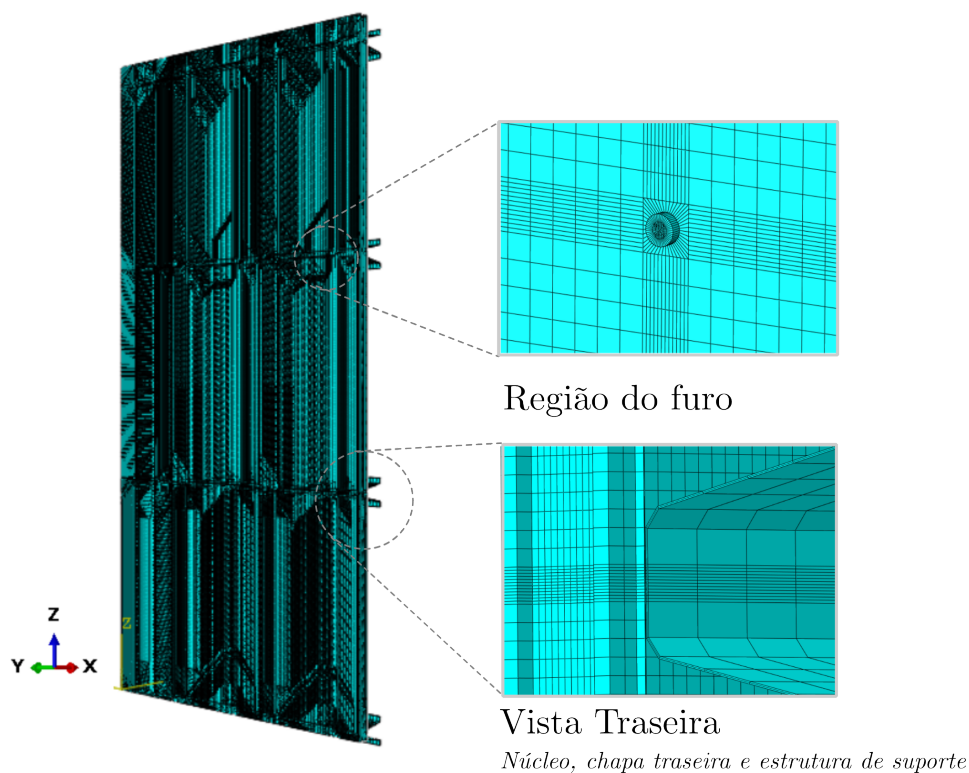


Figura 4.32: Detalhes da malha, com destaque à conformidade da malha

4.3.2 Condições de Contorno

Para simular a restrição imposta à fachada pela laje de piso e cobertura, as extremidades foram consideradas fixas, com deslocamentos e rotações restringidas. Analogamente, as extremidades dos elementos de suporte também foram consideradas engastadas - Figura 4.33.

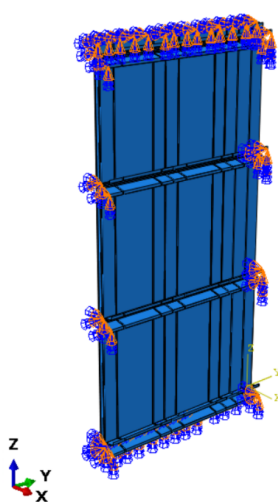


Figura 4.33: Apoios considerados na definição do modelo

Para a realização da simulação termomecânica sequencialmente acoplada, a distribuição de temperaturas obtida na análise de transferência de calor foi importada à análise

mecânica por meio de um *predefined field*.

A fixação dos painéis foi realizada com parafusos, sendo definidos contatos do tipo *General Contact*, cujos pares selecionados e as propriedades adotadas são resumidas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Definições de contato entre as *parts*

Elemento 1	Elemento 2	ID - Propriedade de contato (Int-Prop)	<i>Tangential behavior</i>	<i>Normal behavior</i>
			<i>Friction formulation</i>	<i>Pressure - Overclosure</i>
Chapa	Núcleo	IntProp-Hard Separation	<i>Penalty; 0.5</i>	<i>"Hard"Contact</i> <i>Allow Separation</i>
Arruela	Chapa	IntProp-Hard NoSeparation	<i>Rough</i>	<i>"Hard"Contact</i>
Fuste do parafuso	Núcleo	IntProp <i>Frictionless</i>	<i>Frictionless</i>	<i>"Hard"Contact</i> <i>Allow Separation</i>
Chapa	Suporte	Sem contato	-	-
Porca	Suporte	IntProp-Hard Separation	<i>Penalty; 0.5</i>	<i>"Hard"Contact</i> <i>Allow Separation</i>

A Figura 4.34 apresenta o corte transversal realizado no painel, destacando a região da ligação e malha na região do furo (Figura 4.35).

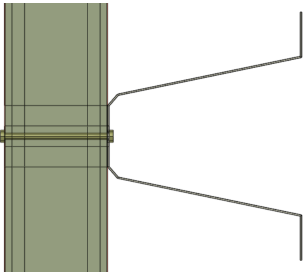
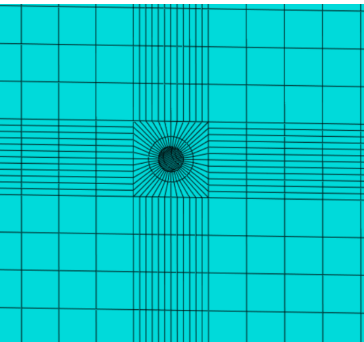
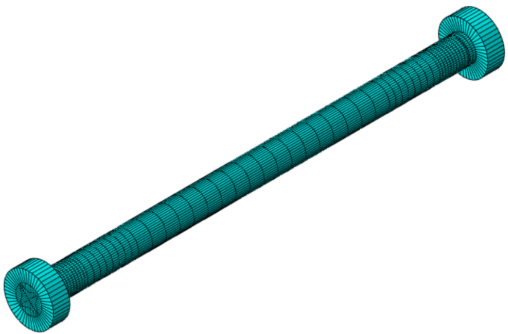


Figura 4.34: Corte transversal na região do furo



(a)



(b)

Figura 4.35: a) Detalhe da malha definida na região do furo b) Malha definida para o parafuso

4.3.3 Resultados e Discussões

Nessa seção, as simulações realizadas serão discutidas com mais detalhes. Os resultados demonstram a ocorrência de instabilidades nas chapas frontais dos painéis, causadas pelo aquecimento e pelas restrições impostas pela ligação, em ambos os cenários de exposição (Figura 4.36). Tal ponto deve ser avaliado com cautela no projeto de fachadas sob a ótica da segurança ao fogo, uma vez que, em uma situação real, a instabilidade das chapas pode provocar a exposição do núcleo interno e potencial ignição da fachada.

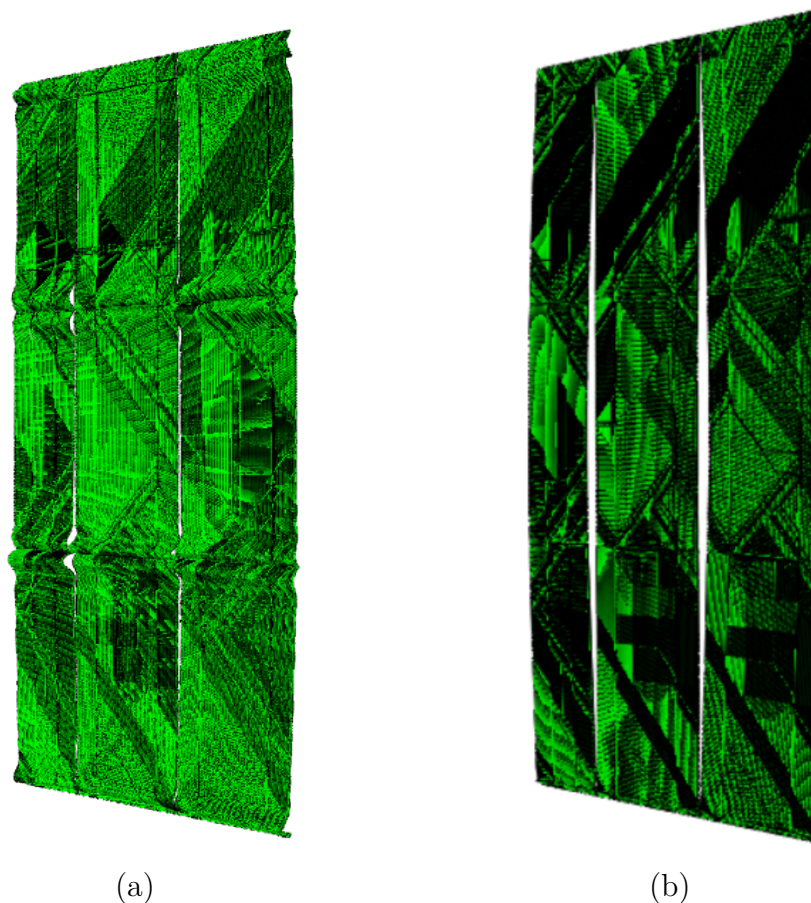


Figura 4.36: Instabilidades registradas nas chapas frontais **a)** Exposição de Incêndio Interna ($t = 7200 \text{ seg}$; *Deformation Scale Factor* = 2); **b)** Exposição de Incêndio Externa ($t = 2500 \text{ seg}$; *Deformation Scale Factor* = 5)

A seguir, serão apresentados os resultados específicos para cada simulação, sobretudo relacionados às tensões máximas registradas nos painéis, parafusos e elementos de suporte.

4.3.3.1 Propagação de Incêndio Interna

Para fins de redução do custo computacional para a importação dos dados de temperatura da análise de transferência de calor, o comportamento mecânico da parede de fachada foi avaliado considerando o cenário de exposição interna, por meio de três etapas (denominadas *Mechanical*, *Mechanical2* e *Mechanical3*), conforme descrito na Tabela

4.6. Essa segmentação foi baseada na distribuição de temperaturas obtida na análise de transferência de calor, ilustrada na Figura 4.16.

Na primeira etapa, foi definido um *step* com duração de 1000 segundos, durante o qual a parede foi mantida à temperatura ambiente. Na segunda etapa, com duração de 6000 segundos, o aquecimento foi realizado utilizando como *input* a distribuição de temperaturas obtida no instante $t = 5000$ segundos, conforme ilustrado na Figura 4.16 (valor médio). Finalmente, na terceira etapa, foi estabelecido um *step* de 200 segundos, na qual foi importada a distribuição de temperatura obtida pela análise de transferência de calor.

Ao final da simulação, foram realizadas 73061 iterações, com um tempo de processamento de 42862 segundos.

Tabela 4.6: Divisão dos *steps* de análise - Exposição de Incêndio Interna

Step	Intervalo (s)	Duração - Step	Temperatura
<i>Mechanical</i>	0 - 1000	1000	Ambiente
<i>Mechanical2</i>	1000 - 7000	6000	<i>Input</i> da distribuição de Temperaturas $t = 5000$ segundos
<i>Mechanical3</i>	7000 - 7200	200	Distribuição de Temperaturas Transferência de Calor

A simulação de avaliação do comportamento mecânico da fachada foi concluída, sendo registradas instabilidades na chapa frontal da parede de fachada, conforme destacado na Figura 4.37.

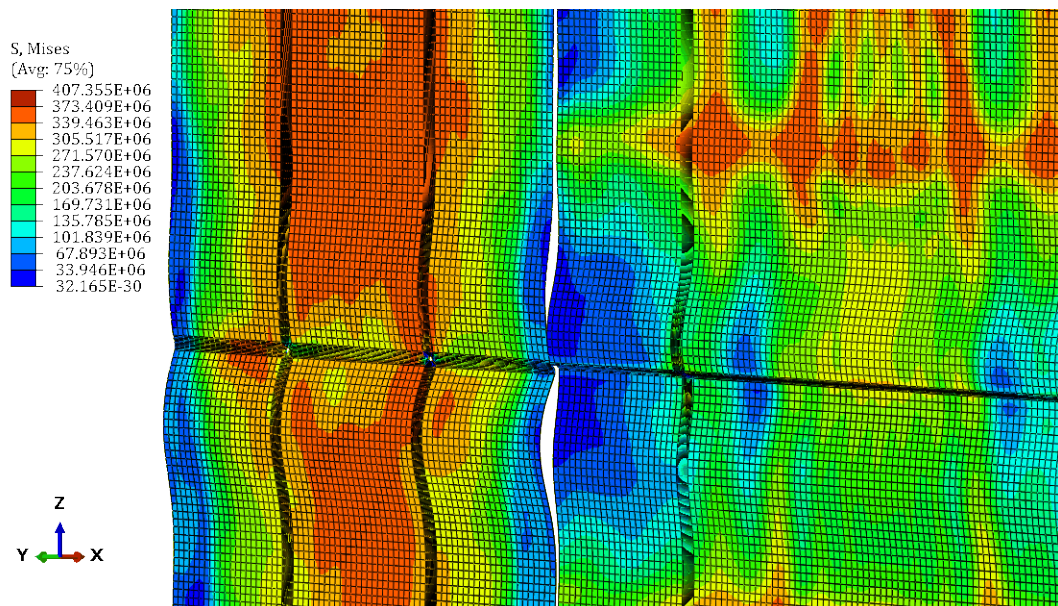


Figura 4.37: Instabilidades na chapa frontal - Exposição de incêndio Interna em $t = 7200$ segundos (*Deformation Scale Factor* = 1). Tensões em Pa

A Figura 4.38 ilustra a distribuição das tensões de Von Mises no painel, destacando um valor máximo de 893 MPa, relativo ao Parafuso-4. A tensão máxima é localizada na região adjacente à chapa frontal, atribuída às deformações registradas nesse elemento, sendo apresentado com mais detalhes na Figura 4.39.

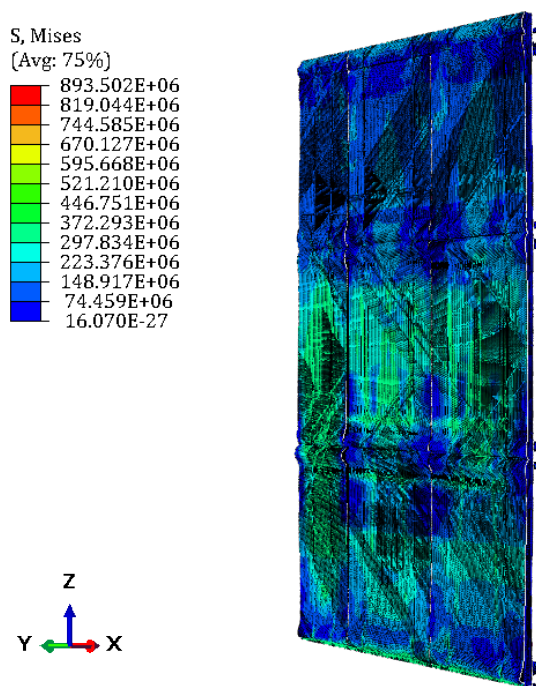


Figura 4.38: Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) na parede de fachada (SIM_028), com destaque a região crítica (*Deformation Scale Factor = 1*)

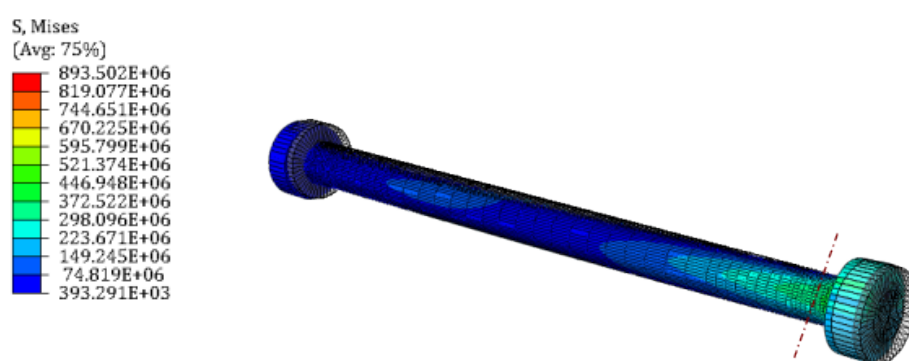


Figura 4.39: Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) no Parafuso-4 (SIM_028), com destaque a região crítica

A evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos é apresentada pelas Figuras 4.40 a 4.43. A análise dos dados indica que 23 dos 24 parafusos tiveram regiões que atingiram a tensão de ruptura do aço - considerando a temperatura que cada um dos parafusos estava submetido.

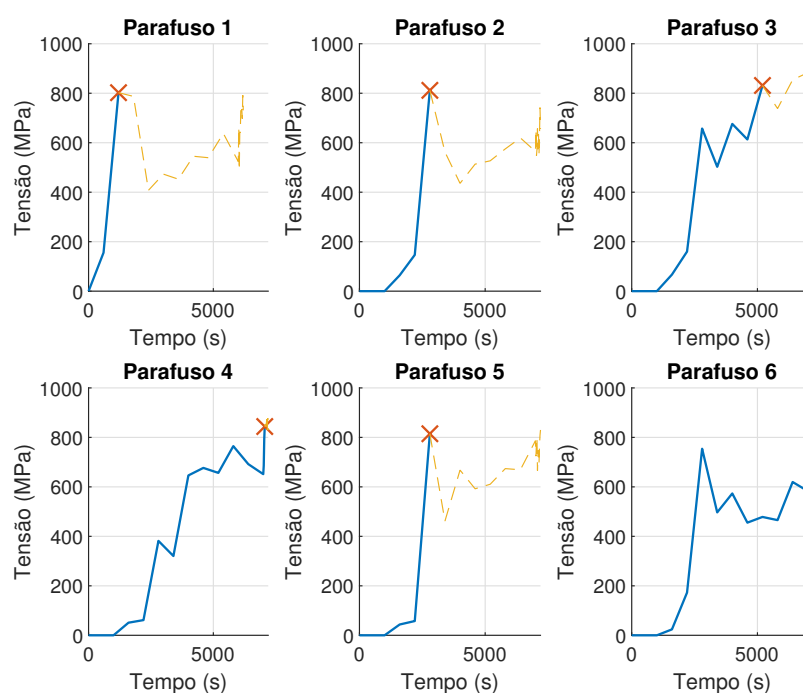


Figura 4.40: Evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos 1 a 6 - Exposição de Incêndio Interna (o "X" marca quando alguma região do parafuso atinge a tensão de ruptura)

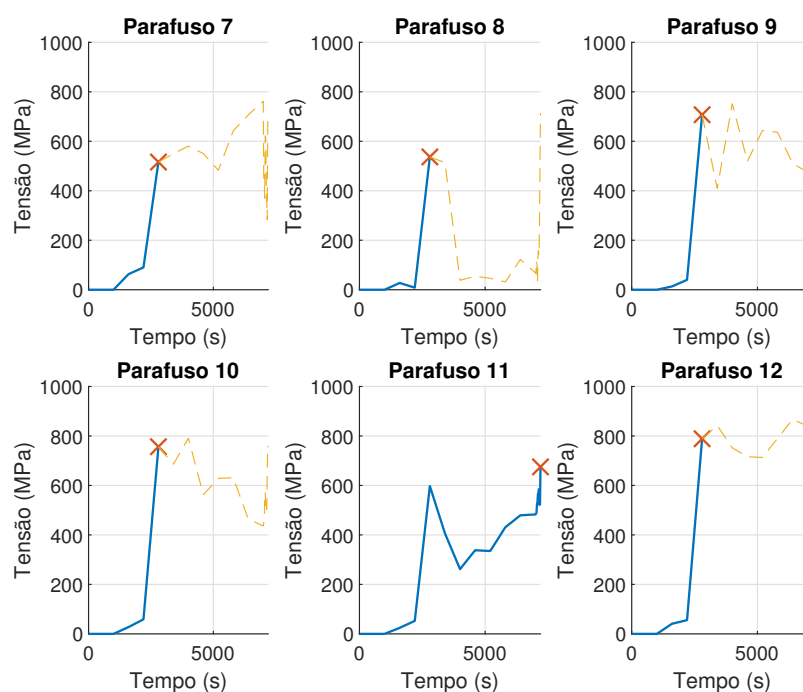


Figura 4.41: Evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos 7 a 12 - Exposição de Incêndio Interna (o "X" marca quando alguma região do parafuso atinge a tensão de ruptura)

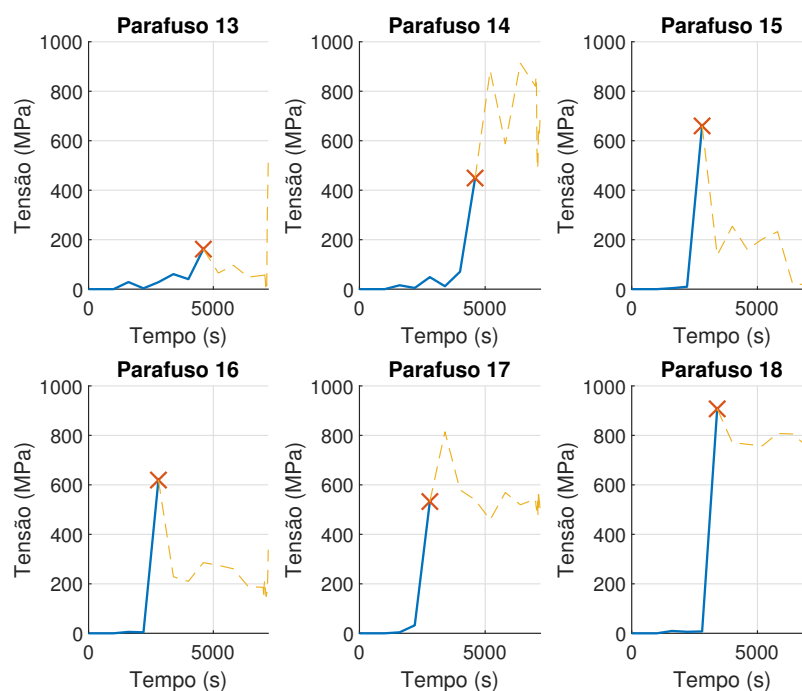


Figura 4.42: Evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos 13 a 18 - Exposição de Incêndio Interna (o "X" marca quando alguma região do parafuso atinge a tensão de ruptura)

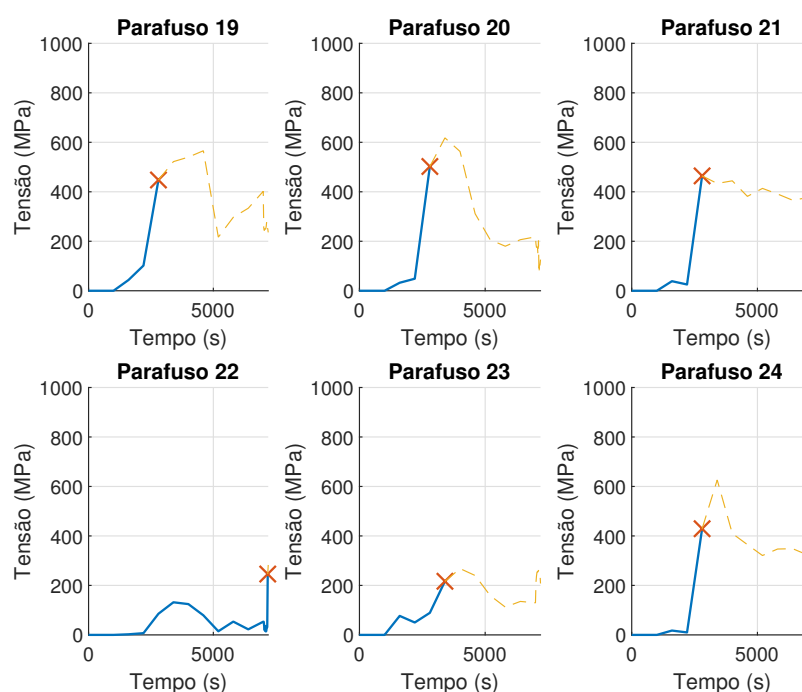


Figura 4.43: Evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos 19 a 24 - Exposição de Incêndio Interna (o "X" marca quando alguma região do parafuso atinge a tensão de ruptura)

Contudo, a distribuição de tensões na seção transversal do fuste (Figura 4.44a),

aponta que não houve o rompimento do parafuso 4, o elemento mais solicitado. Esse, como destacado na Figura 4.44b, é submetido à temperaturas de menor magnitude devido à sua localização (Nível 1), o que contribui para a manutenção da integridade da ligação.

Uma análise conjunta entre tensões máximas e temperaturas indicam que os demais elementos também apresentam comportamento adequado.

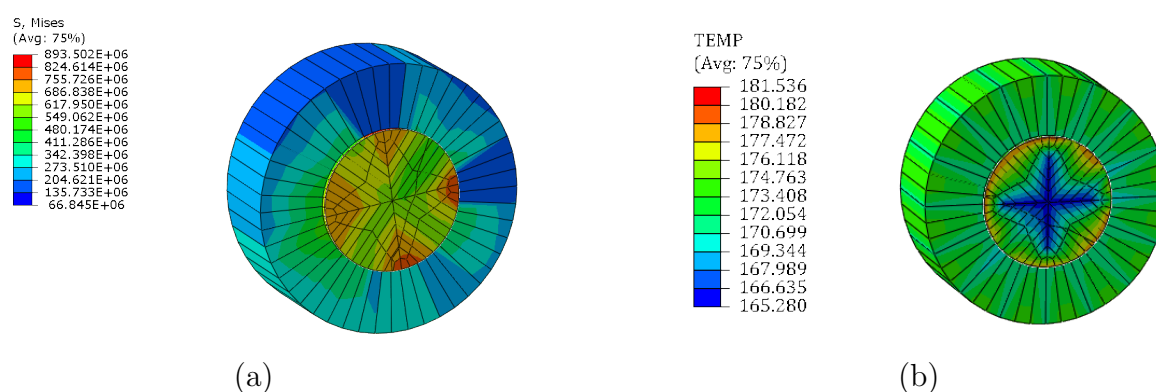


Figura 4.44: Seção Transversal - Parafuso 4, com destaque a **a)** Tensões máximas (*em Pa*) **b)** Temperaturas máximas (*em °C*)

Ainda em relação aos elementos de fixação, a travessa de suporte registrou tensões máximas de 361 MPa, o que indica o início da plastificação do aço na região do furo - Figura 4.45. A análise das tensões do elemento indica uma região crítica apenas na proximidade dos furos, não sendo registradas excessivas torções no elemento, e nem ruptura na região do engaste.

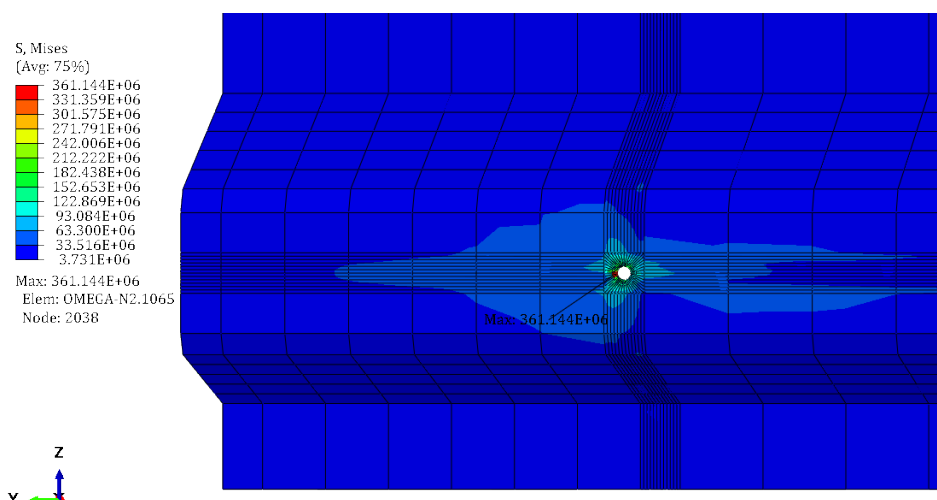


Figura 4.45: Distribuição de tensões de Von Mises (*em Pa*) ao elemento de suporte (SIM_028), com destaque a região crítica

A chapa traseira, também na região do furo, apresentou tensões elevadas (656 MPa), indicando a ocorrência de falhas na região - Figura 4.46a. O núcleo interno, contudo,

em função da sua deformabilidade, não registrou tensões críticas elevadas, com valores máximos de 6,52 MPa (Figura 4.46b).

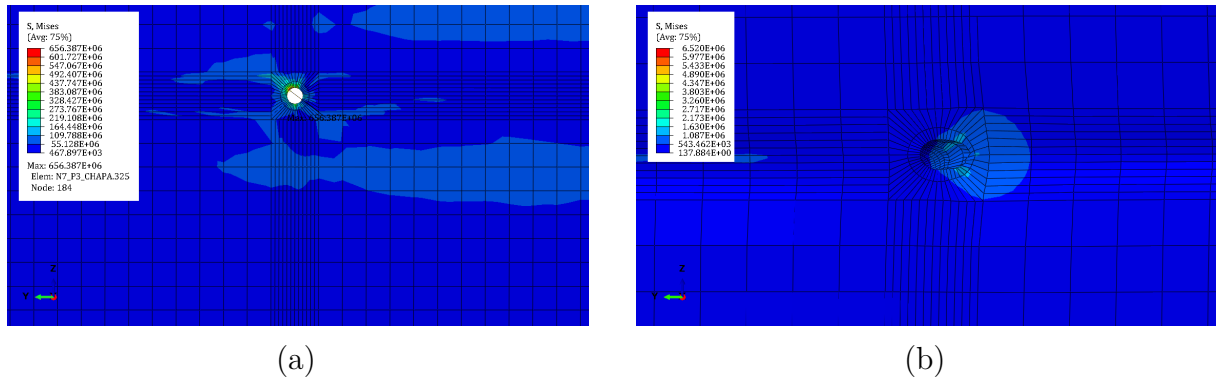


Figura 4.46: Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa), com destaque para regiões críticas - SIM_028: **a)** Chapa traseira; **b)** Núcleo interno

Em termos de deslocamentos, as Figuras 4.47 e 4.48 apresentam os resultados relativos à magnitude dos deslocamentos registrados pelas chapas frontais dos painéis, no estágio inicial, aos 600 segundos. A partir da análise da imagem, é possível observar que, com o princípio do aquecimento, os painéis tendem a se expandir lateralmente, para onde não há restrições, e sendo o painel 2 retrito pelos adjacentes. É possível observar ainda a suavidade do campo de deslocamentos, o que reforça a qualidade da malha, apresentada na Figura 4.48.

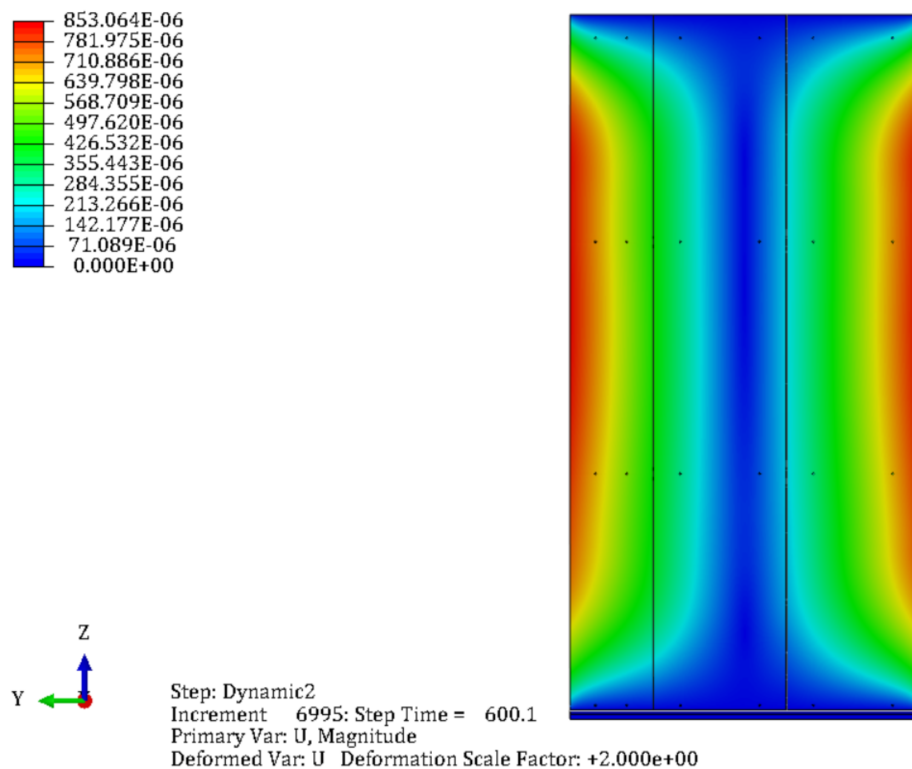


Figura 4.47: Magnitude dos deslocamentos (em metros) dos painéis - $t = 600$ segundos

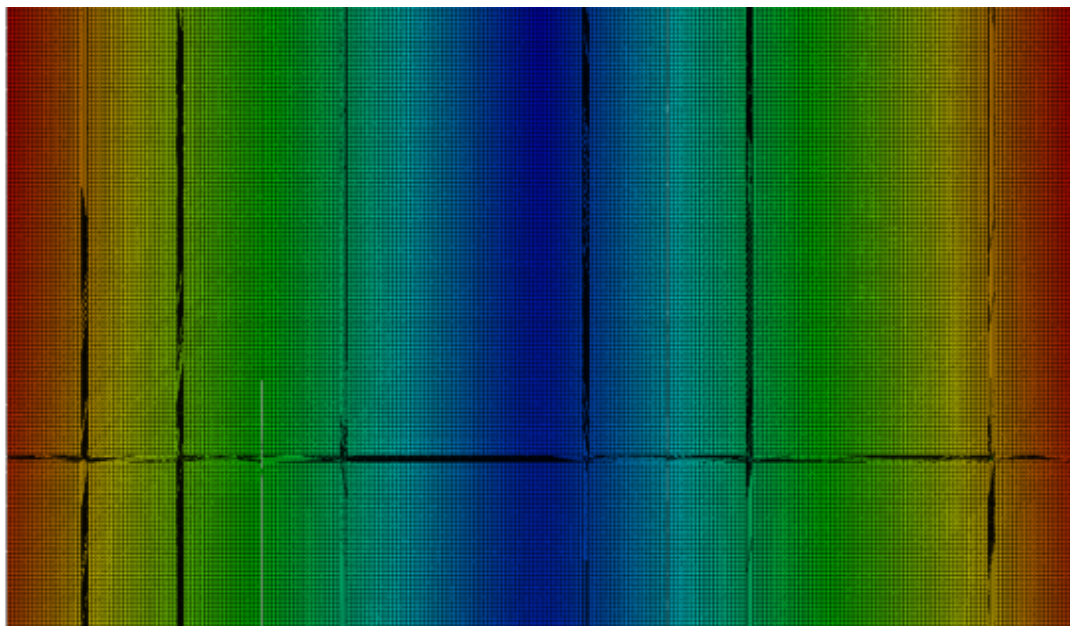


Figura 4.48: Detalhe da malha adotada para as simulações

Em especial para o deslocamento fora do plano (U_1), as Figuras 4.49 e 4.50 apresentam os resultados obtidos em $t = 6000$ segundos. Nela, é possível observar as instabilidades previamente referidas, causadas pela restrição imposta pelos parafusos.

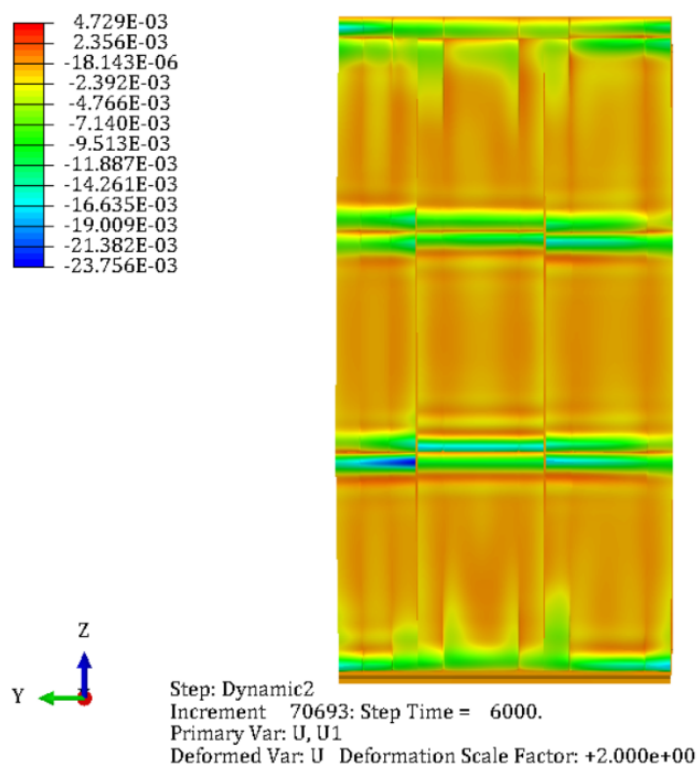


Figura 4.49: Deslocamento U_1 (em metros), aos 6000 segundos

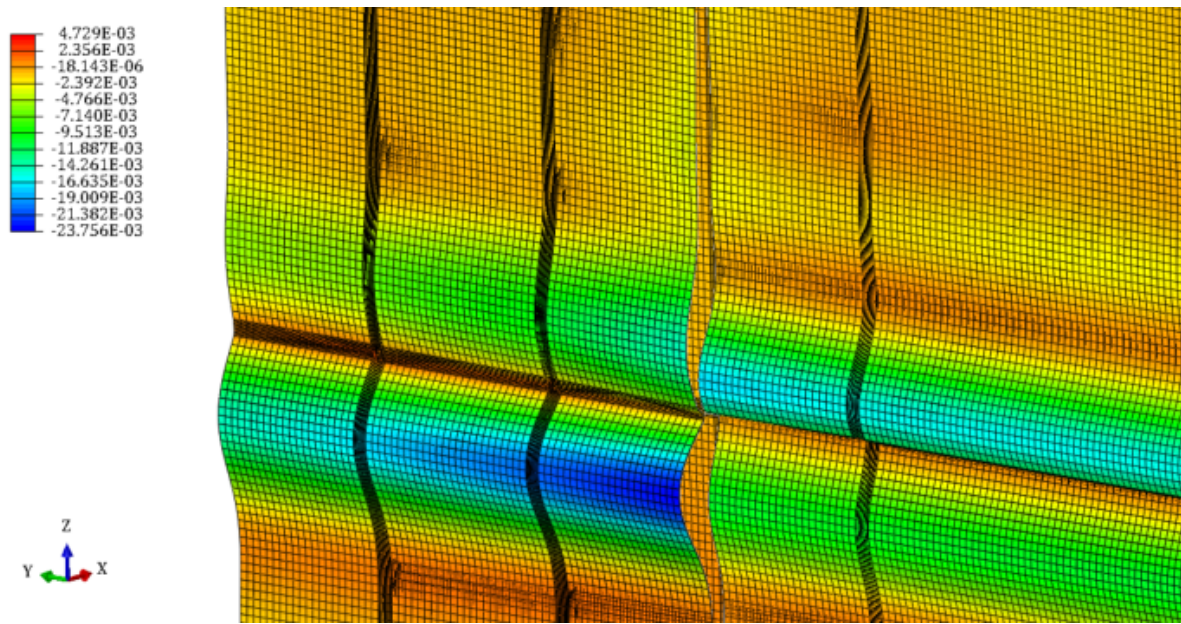


Figura 4.50: Instabilidades registradas pelos painéis - Deslocamento U1 (em metros). *Deformation Scale Factor = 2*

Como conclusões dessa simulação, os resultados apontam que a chapa frontal e os parafusos foram os elementos mais afetados pelo incêndio. A fachada foi capaz de conter a ação do incêndio, não colapsando. Contudo, consoante os estudos apresentados na Seção 2.2, excessivas deformações foram registradas na chapa frontal do painel sanduíche, caracterizando um risco de uma propagação generalizada do fogo pela fachada.

4.3.3.2 Propagação de Incêndio Externa

O comportamento mecânico da fachada mediante exposição externa foi avaliado na SIM_029. Nessa simulação, foi avaliado o efeito do aumento da quantidade de árvores (carga de incêndio) no comportamento mecânico da fachada. Para tanto, foram necessárias 17.597 iterações e 19.302 segundos de processamento. A Tabela 4.7 resume os *steps* definidos para essa simulação.

Tabela 4.7: Divisão dos *steps* de análise - Exposição de Incêndio Externa

Step	Intervalo (s)	Duração - Step (s)	Temperatura
<i>Mechanical</i>	0 - 500	500	Ambiente
<i>Mechanical</i>	500 - 1100	600	Distribuição de Temperaturas Transferência de Calor
<i>Mechanical</i>	1100 - 2500	1400	Manutenção - Temperaturas (160°C)

A Figura 4.51 detalha a chapa frontal da parede de fachada, com destaque às instabilidades locais que ocorreram na região da ligação.

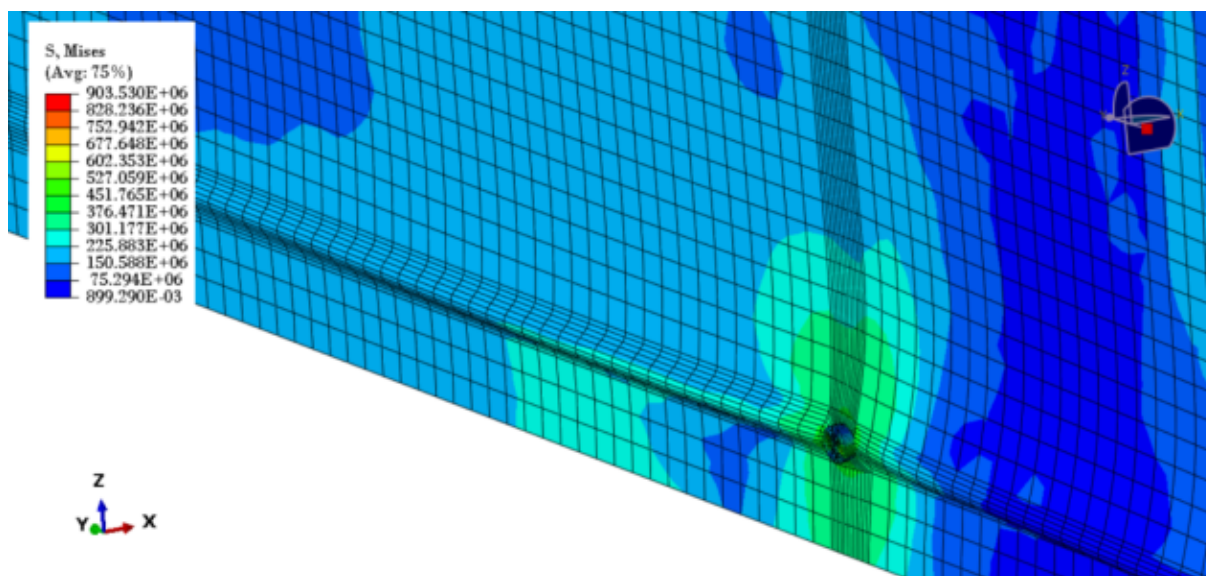


Figura 4.51: Deformada da chapa frontal - P3 (SIM_029) (*Deformation Scale Factor = 2*). Tensões em Pa; $t = 2500$ s

A distribuição das tensões de Von Mises na parede de fachada é apresentada na Figura 4.52.

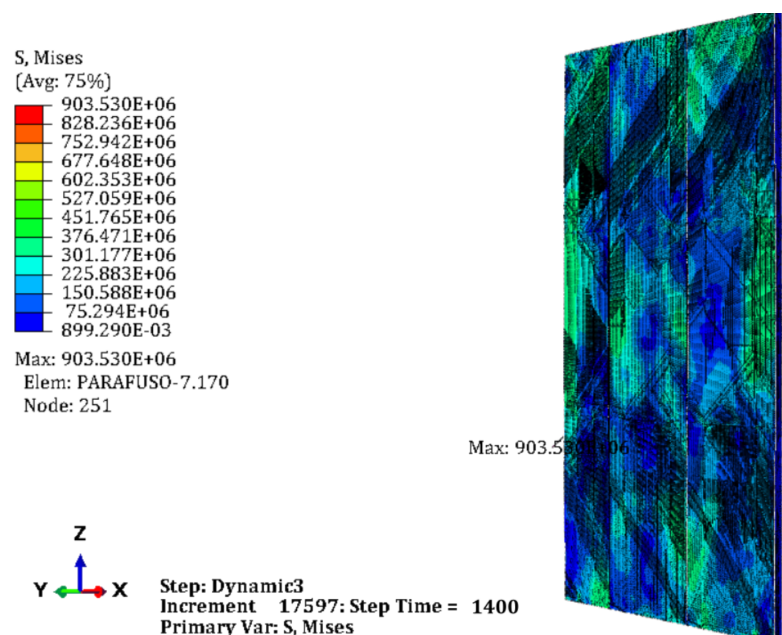


Figura 4.52: Distribuição de tensões de Von Mises (*em Pa*) na parede de fachada (SIM_029), com destaque a região crítica (*Deformation Scale Factor = 1*)

A partir da análise da Figura 4.52, observa-se tensões máximas na ordem de 903 MPa, no Parafuso-7. A Figura 4.53 apresenta com destaque esse elemento, na qual é percebida uma região de maiores tensões localizadas próximas ao elemento de suporte. Essa tensão é superior à resistência última do aço, o que indica o início da falha do elemento.

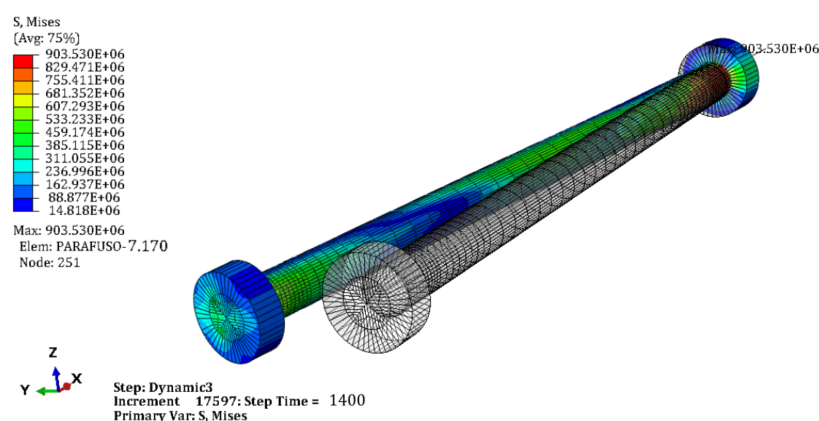


Figura 4.53: Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) no Parafuso-7 (SIM_029), com destaque a região crítica

A evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos são apresentadas nas Figuras 4.54 a 4.57. A análise dos dados indica que 21 dos 24 parafusos atinge a tensão última do aço, ponderada pelos fatores de redução da resistência em função do aquecimento.

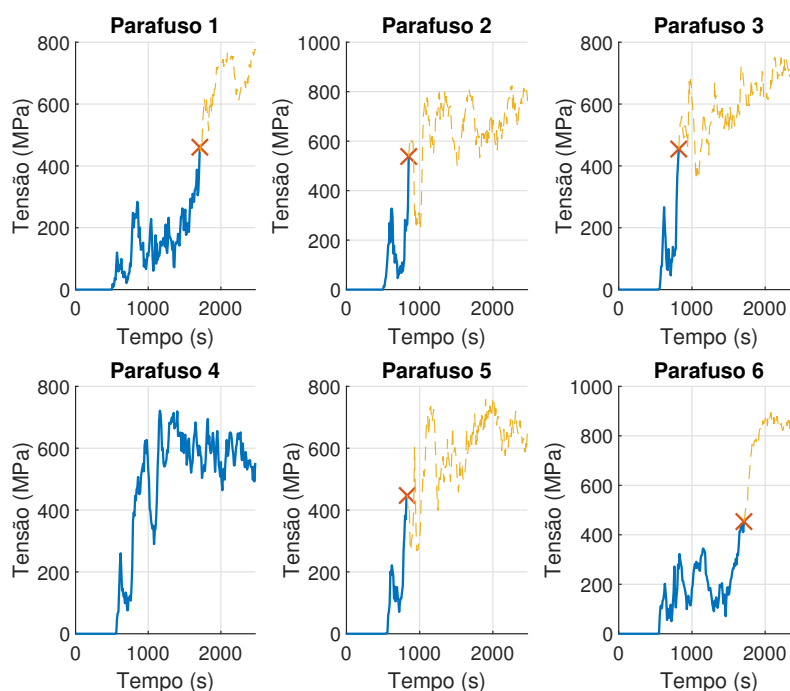


Figura 4.54: Evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos 1 a 6 - Exposição de Incêndio Externa (o "X" marca quando alguma região do parafuso atinge a tensão de ruptura)

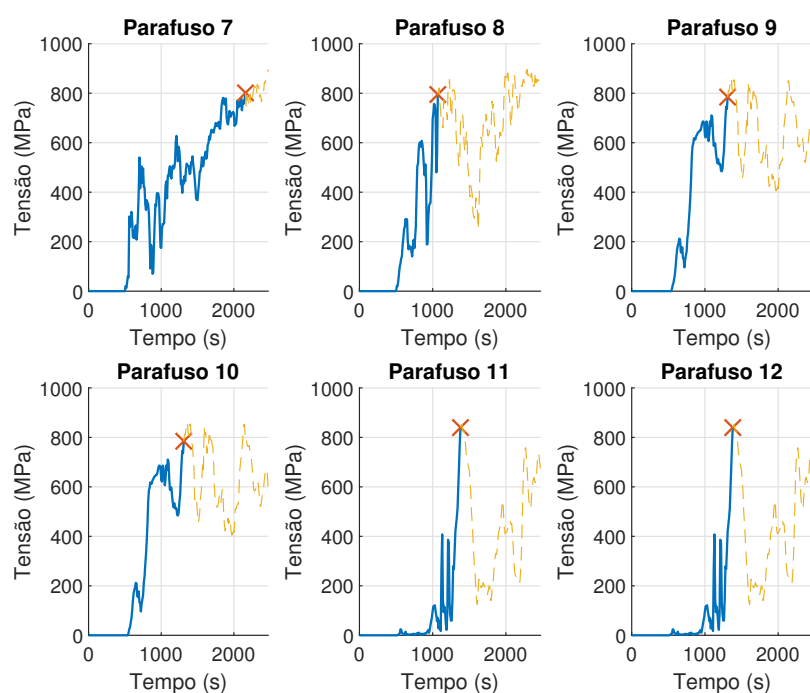


Figura 4.55: Evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos 7 a 12 - Exposição de Incêndio Externa (o "X" marca quando alguma região do parafuso atinge a tensão de ruptura)

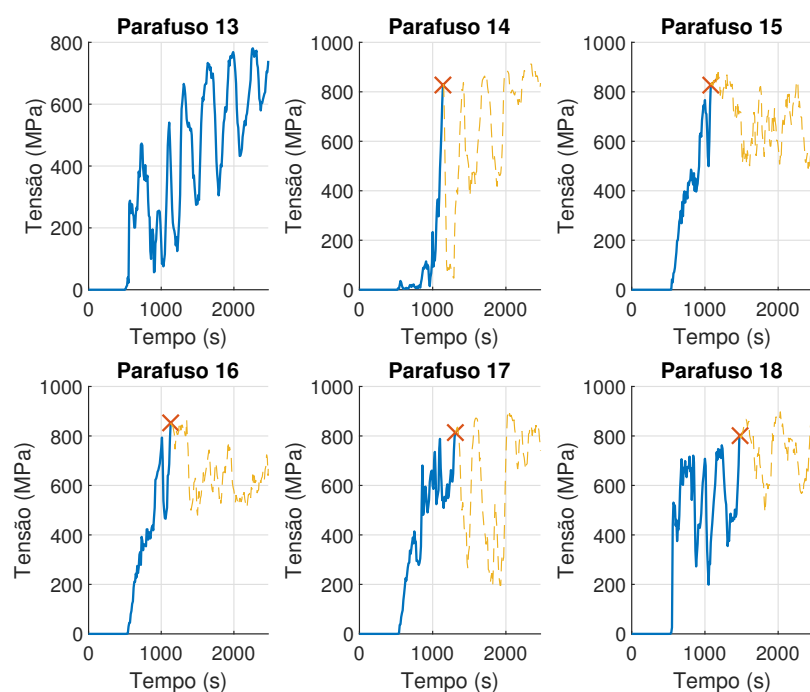


Figura 4.56: Evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos 13 a 18 - Exposição de Incêndio Externa (o "X" marca quando alguma região do parafuso atinge a tensão de ruptura)

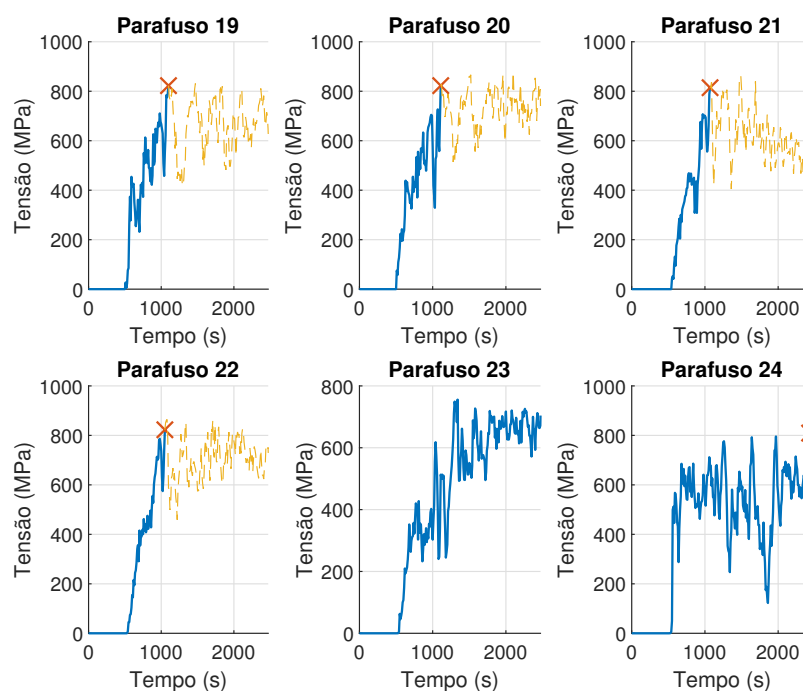


Figura 4.57: Evolução temporal das tensões de Von Misses nos parafusos 19 a 24 - Exposição de Incêndio Externa (o "X" marca quando alguma região do parafuso atinge a tensão de ruptura)

Analogamente ao apresentado anteriormente, a análise conjunta das tensões máximas e temperaturas registradas pelo Parafuso 7 indica que também não houve rompimento da ligação - Figuras 4.58a e 4.58b. Em virtude das tensões máximas estarem localizadas na região próxima a viga de apoio, as temperaturas registradas foram de menor magnitude. Conclusões semelhantes acerca da distribuição de tensões podem ser inferidas aos demais parafusos.

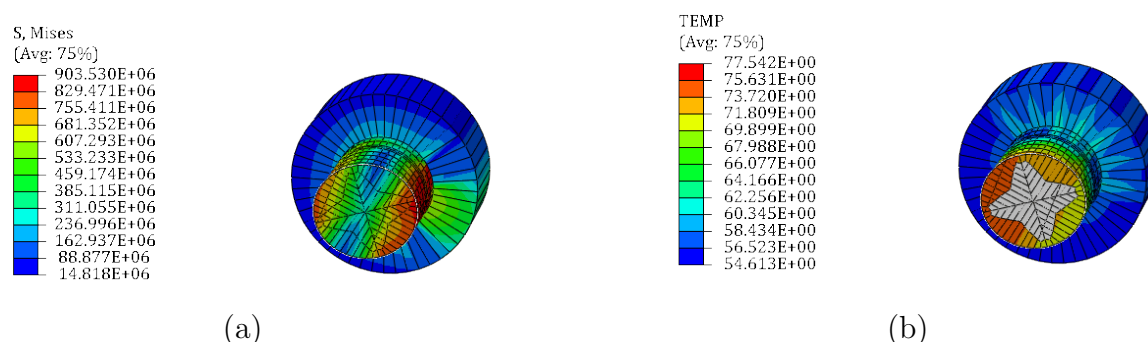


Figura 4.58: Seção Transversal - Parafuso 7, com destaque a **a)** Tensões máximas (*em Pa*) **b)** Temperaturas máximas (*em °C*)

Ainda relacionado ao sistema de fixação, foi observado o escoamento do aço na região dos furos dos elementos de fixação. De uma maneira geral, as tensões de Von Misses na região próxima aos parafusos foi na ordem de 373 MPa (Figura 4.59), valor superior a

tensão de escoamento. Contudo, devido às temperaturas de menor magnitude registradas nesses elementos, a solicitação não foi suficiente para causar a ruptura na região.

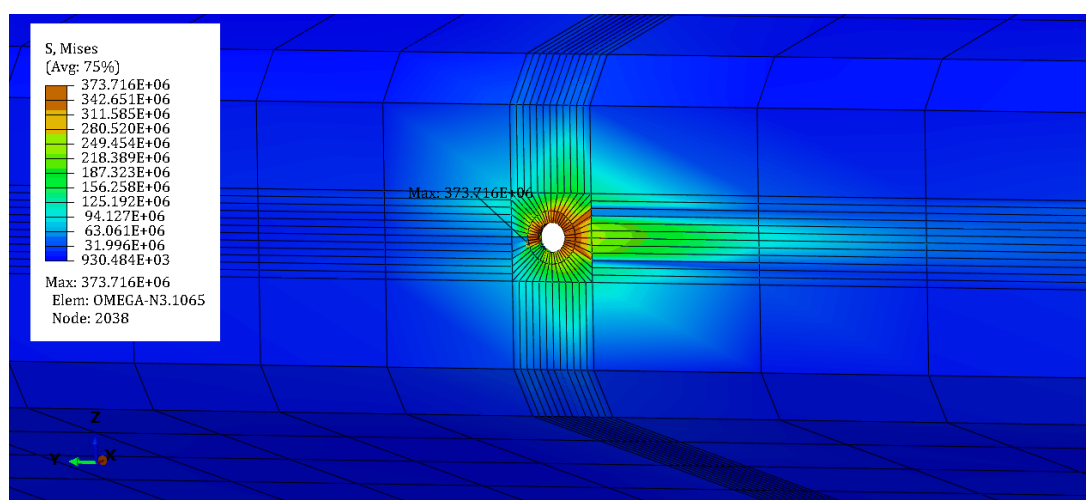


Figura 4.59: Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) ao elemento de suporte (SIM_029), com destaque a região crítica

Por fim, para os núcleos internos e as chapas traseiras, o comportamento obtido foi semelhante ao dos elementos de suporte. O aquecimento dessas peças não foi considerável, portanto, as tensões máximas ficaram restritas à região dos furos, como destacado nas Figuras 4.60 e 4.61.

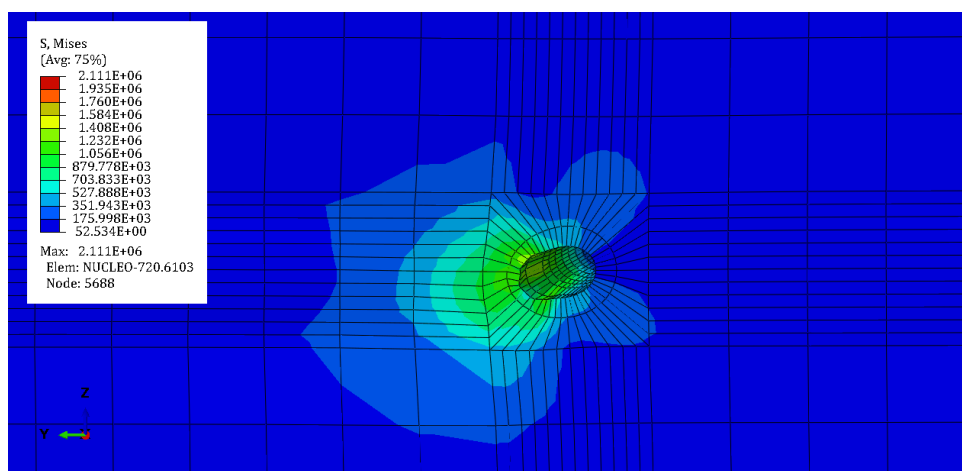


Figura 4.60: Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) no núcleo interno (SIM_029)

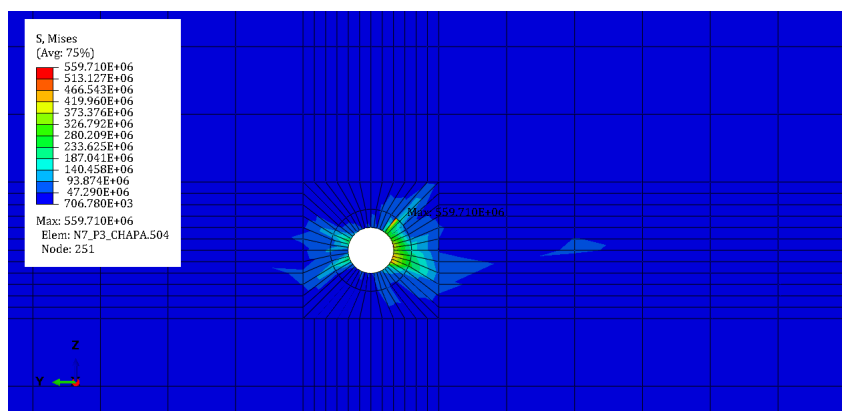


Figura 4.61: Distribuição de tensões de Von Mises (em Pa) na chapa traseira, com destaque a região crítica - SIM_029

As Figuras 4.62 e 4.63 ilustram o deslocamento fora do plano (U1) dos painéis sanduíche com exposição térmica externa. A Figura 4.63, com enfoque nas ligações, revela uma tendência à torção, com maiores deslocamentos ocorrendo predominantemente à esquerda dos parafusos, indicando um movimento assimétrico da chapa em relação à conexão. Esse comportamento sugere uma distribuição térmica não uniforme, que induz o momento torcional no painel.

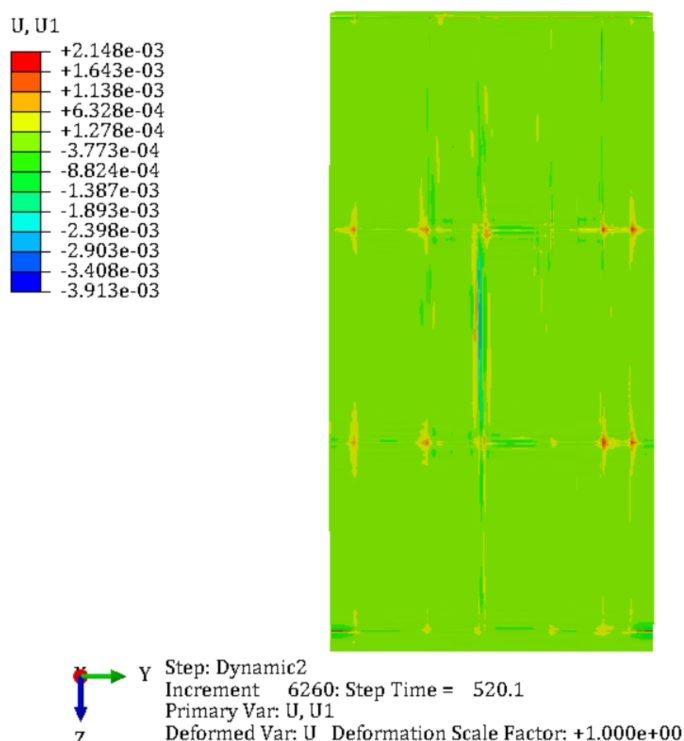


Figura 4.62: Deslocamento U1 (em metros) para os painéis com exposição externa

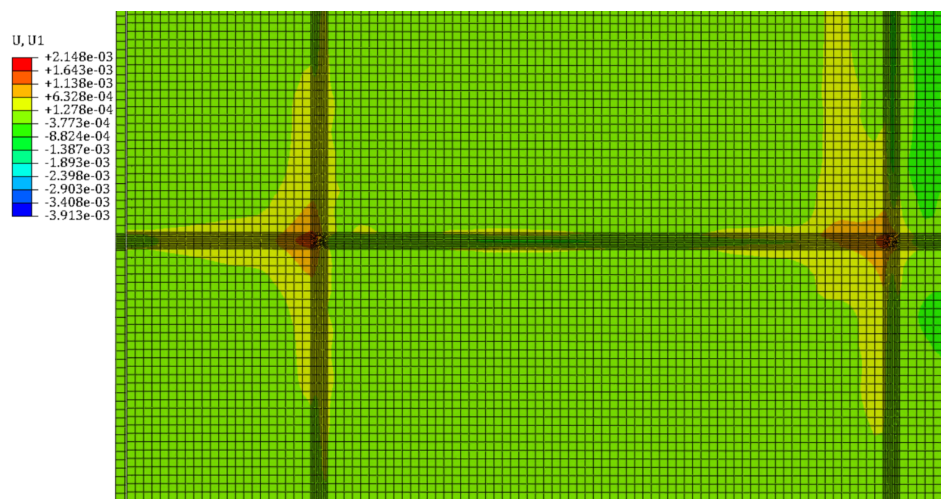


Figura 4.63: Deslocamento U1 (em metros) para os painéis com exposição externa - Enfoque nas ligações

Examinando a causa para essa torção registrada, é possível concluir que, apesar da carga térmica aplicada (distribuição e espaçamento das árvores) ser uniforme, a distribuição de temperaturas na superfície externa dos painéis é não homogênea, o que pode ser atribuído à influência do escoamento do ar ao redor da fachada (Seção 3.4.3.1). Tal efeito pode ser verificado na Figura 4.64, que apresenta o campo de velocidades na região externa da edificação ($t = 700$ segundos), evidenciando a presença de zonas com alta velocidade e regiões com escoamento turbulento. Esse comportamento afeta diretamente a transferência de calor por convecção. Como resultado, a temperatura se apresenta de forma não uniforme (Figura 4.64b), contribuindo para os deslocamentos e torções observadas na análise mecânica.

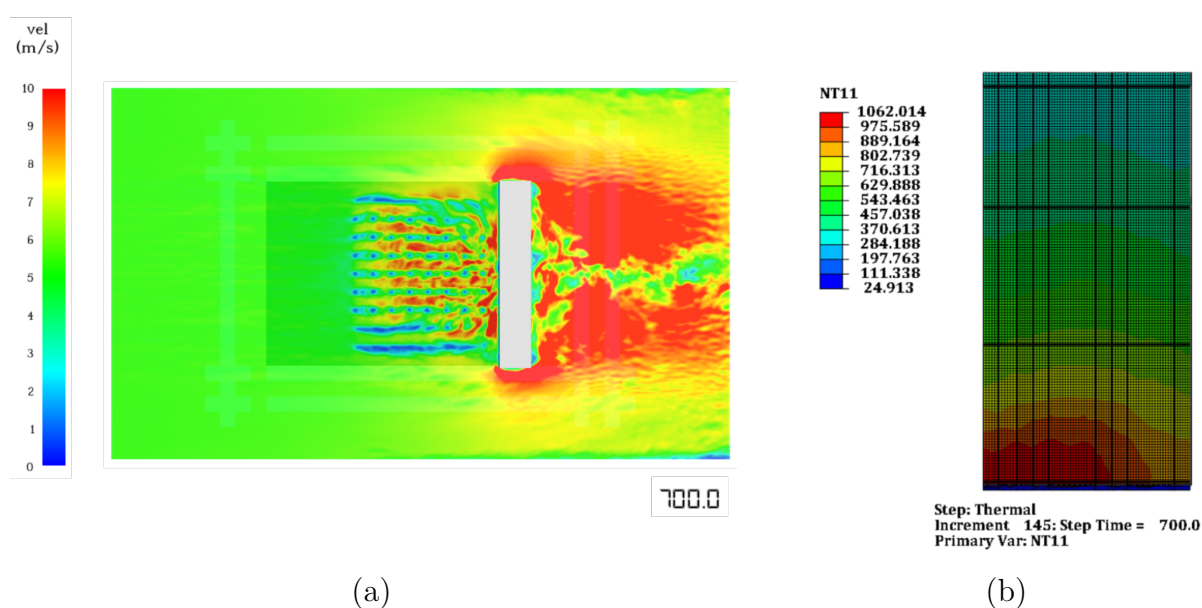


Figura 4.64: a) Velocidade do fluido, obtida a partir de simulação no FDS; b) Temperatura registrada na face externa da fachada (Abaqus)

Como conclusões, pode-se afirmar que a fachada foi significativamente impactada pelo incêndio, com destaque para a ligação. A análise das condições dos elementos revelou que 21 dos 24 parafusos possuem regiões cujas tensões equivalem a tensão de ruptura. No contexto da segurança contra incêndios em fachadas, o colapso de elementos de fachada para o exterior pode ter consequências graves, contribuindo para a propagação do incêndio em edificações adjacentes ou colocando em risco tanto as equipes de combate ao fogo, quanto as pessoas nas proximidades, e deve ser avaliado com cautela.

Adicionalmente, verificou-se que os Parafusos 1, 2, 7 e 8 registraram falhas em regiões próximas à chapa frontal, facilitando a exposição do núcleo interno ao incêndio. Esse resultado ressalta a importância de uma análise criteriosa para a seleção dos materiais empregados no revestimento da fachada. Caso esses materiais sejam combustíveis, a fachada pode atuar ativamente na propagação do incêndio, aumentando os riscos associados.

4.4 Síntese

Neste capítulo foram discutidas as simulações de transferência de calor e comportamento mecânico realizadas. Inicialmente, o modelo foi calibrado utilizando um banco de dados de ensaios experimentais. Os resultados da calibração indicam que o modelo numérico foi capaz de prever com boa precisão as temperaturas registradas durante o ensaio (erro máximo de 3,14%). Em comparação com os revestimentos avaliados (PIR e Lã de rocha), o PIR teve um desempenho inferior, com um aumento de 332% nas temperaturas no interior do núcleo ao fim de 1800 segundos. Por essa razão, tal revestimento foi escolhido para as análises posteriores de transferência de calor e comportamento mecânico.

As análises térmicas realizadas apontam temperaturas máximas de 743 e 1049°C para as simulações com cenários de exposição interna e externa, respectivamente. As distribuições de temperaturas obtidas nessas simulações foram utilizadas como *input* para análises posteriores de comportamento mecânico. De forma equivalente, em ambas as simulações, os parafusos demonstraram ser elementos críticos para a integridade estrutural da fachada, com majoritária porção dos elementos com plastificação, ou com tensões equivalentes à tensão de ruptura do aço. A segurança da ligação de edifícios industriais é discutida por países como a França no decreto *Arrêté du 17 août 2016* (FRANÇA, 2016). A normatização prescreve que não é permitido o colapso de paredes de fachadas, ou elementos constituintes dela, para o exterior da edificação. Esse ponto está pautado na garantia da segurança de equipes de combate posicionadas para o controle do incêndio, ou de pessoas ao redor da edificação. Portanto, a análise numérica da fachada, com o enfoque na integridade das ligações, é de suma importância.

Como conclusões adicionais, as chapas frontais foram severamente impactadas pelo incêndio, apresentando instabilidades locais e globais em ambos os cenários de incêndio.

A validade da simplificação adotada para a modelagem das chapas como planas

foi avaliada em comparação com os experimentos conduzidos por de Paula *et al.* (2024a). A Figura 4.65 apresenta as deformadas obtidas durante o experimento (E4-PIR-B) e a resultante da SIM_028. Apesar da diferença na carga de incêndio considerada em ambos os casos, essa comparação permite observar um comportamento análogo em termos da deformação causada pelo aquecimento em ambas as situações. Durante o experimento, foi registrada a instabilidade da chapa, como pode ser visto mais facilmente na parede secundária (Figura 4.65a). As chapas se descolaram no núcleo e, a restrição imposta pela ligação, aliada à expansão gerada pelo aquecimento, provocou a instabilidade das chapas. Comportamento análogo foi observado também na simulação numérica conduzida neste trabalho (Figura 4.65b).

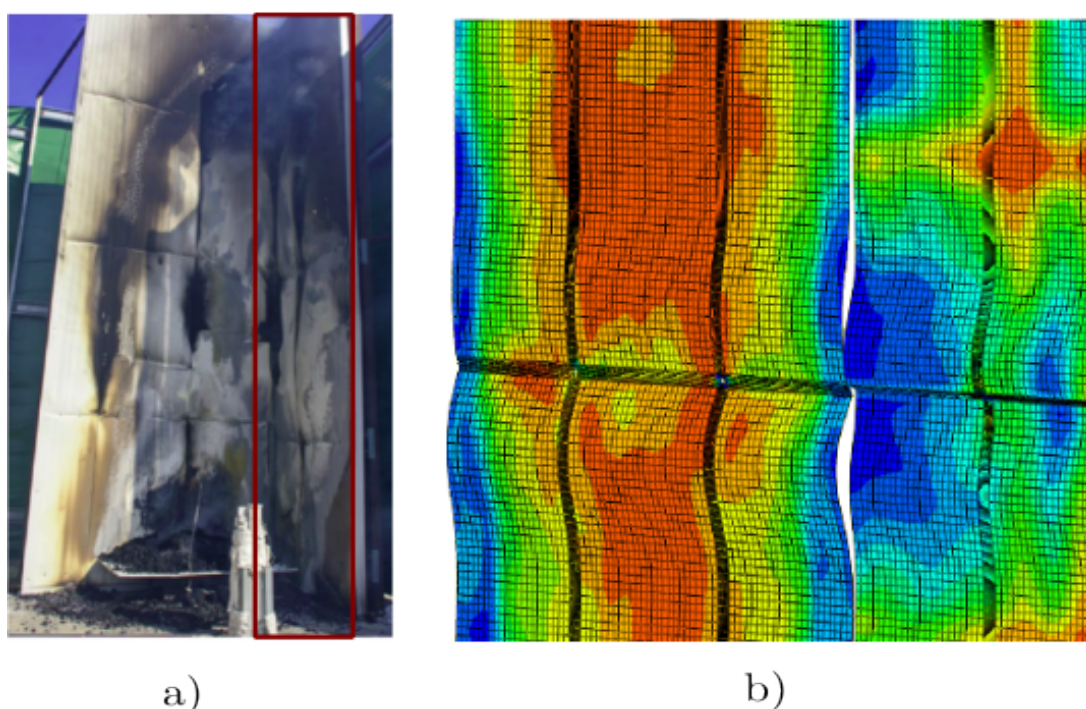


Figura 4.65: Comparação entre as deformadas obtidas pelo (a) experimento realizado por de Paula *et al.* (2024a); (b) Simulações numéricas no Abaqus

Fonte: a) de Paula *et al.* (2024a) b) Autora (2025)

Além disso, como observação pós-ensaio, assim como nas simulações realizadas, também não foi registrada deformação excessiva da estrutura de suporte - Figura 4.66.



Figura 4.66: Observação pós-ensaio (E4-PIR-B) da estrutura de suporte

Fonte: de Paula *et al.* (2024a)

Assim, este trabalho, que tinha como objetivo principal analisar o comportamento térmico e mecânico de paredes de fachada mediante dois cenários de exposição de incêndio foi capaz de avaliar diversas variáveis que um edifício industrial pode ser submetido. Neste capítulo, o processo de acoplamento de simulações foi discutido com detalhes, e os resultados obtidos atestam a validade das simulações. A comparação entre os resultados experimentais tomados como base apontam uma boa previsão das temperaturas pela análise numérica, apesar das variabilidades envolvidas. O comportamento mecânico da fachada também foi avaliado, atestando sua segurança frente ao aquecimento. E, de uma forma geral, as deformações registradas pelos painéis foram semelhantes ao observado no experimento. Portanto, conclui-se que as simulações numéricas realizadas neste trabalho foram bem sucedidas no propósito estabelecido inicialmente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar o comportamento mecânico de paredes de fachada de edifícios industriais, sob a ação do incêndio. Buscou-se fazer essa avaliação de uma forma ampla, abrangendo os diversos cenários em que essa edificação poderia ser afetada.

Assim, em um primeiro momento, para o incêndio de origem interna, foi avaliada a carga de incêndio existente no interior da edificação, as aberturas, sejam elas portas, ou claraboias na cobertura, e também a origem do incêndio. Em seguida, para o incêndio de interface urbano-florestal, de origem externa, foram avaliados parâmetros ambientais, como a velocidade do vento, a carga de incêndio (composta unicamente por grama ou o aumento da quantidade de árvores) e também a inclinação do terreno. Os resultados dessas simulações foram importados ao Abaqus, utilizando uma ferramenta de acoplamento (processo descrito com mais detalhes na Seção 2.4), para a simulação da transferência de calor e comportamento mecânico. Cabe ressaltar que, em todas as etapas numéricas realizadas, o modelo foi calibrado com resultados experimentais na literatura, para garantir a validade dos resultados.

Os resultados demonstram que:

- Foram simulados numericamente oito cenários de incêndio, baseados nos ensaios realizados pelo *InduForestFire* (INDUFORESTFIRE, 2020), normatizados pela BS 8414 (BSI, 2017). A análise dos revestimentos demonstra um caráter combustível do PUR, sendo necessária a interrupção do experimento e das simulações, uma vez que atingiu o critério de parada estabelecido pela normatização. As simulações demonstram que a parede principal registrou temperaturas superiores à parede secundária, devido à maior proximidade com a carga de incêndio, ficando o aquecimento da parede secundária mais dependente do vento. As simulações numéricas foram capazes de prever com boa precisão, em termos de magnitude e evolução temporal.
- A modelagem da carga de incêndio (engradados de madeira) para a simulação de propagação do incêndio interno foi realizada considerando a geometria cúbica, ao invés da modelagem dos barrotes. Tal fato permite a definição de uma malha de maiores dimensões, auxiliando no tempo de processamento. Mesmo com essa simplificação, a simulação numérica da carga de incêndio previu com boa precisão a evolução da taxa de liberação de calor obtida experimentalmente, com erro máximo de 6%. Essa simplificação permitiu a viabilidade da simulação com uma edificação dessas dimensões, com uma redução de até 99,92% no número de elementos da malha.
- Considerando o incêndio interno, as simulações focaram em analisar a dinâmica do

incêndio, avaliando essencialmente a dualidade de incêndio controlado pela ventilação vs. incêndio controlado pela carga de incêndio. As aberturas tiveram um impacto considerável nos resultados, com 68% de aumento nas temperaturas registradas na fachada com a inserção de aberturas na cobertura. Já para o aumento da carga de incêndio, a variação percentual foi ainda maior, com 264%.

- A concentração de oxigênio foi um parâmetro analisado em todas as simulações, sendo registrados valores baixos ou até mesmo nulos durante as simulações, o que indica que a queima dos *wood cribs* pode ter sido incompleta.
- Para o incêndio externo, a modelagem da vegetação utilizando a metodologia *level set model* para a vegetação rasteira se mostrou eficiente, também permitindo a utilização de uma malha de maiores dimensões, com menor custo computacional.
- Dentre os parâmetros analisados, a velocidade do vento atuou significativamente, aumentando a taxa de liberação de calor (em até 21,72%) e temperaturas máximas registradas na fachada (em até 11,87%). Além disso, o aumento da carga de incêndio e a análise conjunta da [Inclinação do terreno + Vento] tiveram grande impacto nos resultados. Tal fato reforça a necessidade de uma análise combinada de variáveis para a avaliação de uma situação mais gravosa.
- A fachada, em painel sanduíche, foi avaliada em simulações de transferência de calor no Abaqus, considerando os revestimentos em lã de rocha e PIR. Ao comparar os materiais utilizados no núcleo interno, verifica-se que a lã de rocha apresentou desempenho térmico superior ao PIR, resultando em um aumento de 155% na temperatura a 10 mm de profundidade em relação à temperatura inicial. Em contraste, o painel com núcleo em PIR registrou um aumento de 332% nas mesmas condições.
- No que diz respeito à validação das simulações numéricas, o processo de acoplamento entre as simulações CFD e FEM apresentou um bom desempenho, com um erro de 3,14% ao final dos 1800 segundos, quando comparado aos resultados experimentais.
- Com relação às simulações de transferência de calor, os resultados apontam temperaturas máximas na chapa frontal de 743°C e 1049°C, para as exposições de incêndio interna e externa, respectivamente. Pelo contato direto com as chamas, os parafusos e as chapas tiveram um aquecimento mais substancial.
- Além disso, o material utilizado no núcleo interno, composto por PIR, apresentou desempenho eficiente na contenção do aquecimento, mantendo as temperaturas em 300°C e 230°C nos cenários de exposição interna e externa, respectivamente. Esses valores representam 21,84% e 40,37% das temperaturas máximas registradas nas chapas frontais em ambas as simulações conduzidas.

- A análise do comportamento mecânico dos painéis revelou que a ligação foi severamente impactada pela ação do incêndio, sendo registradas tensões equivalentes à tensão de ruptura em 92% dos parafusos analisados. Contudo, na janela de análise analisada, a fachada foi capaz de manter a integridade.
- As chapas frontais registraram excessivas deformações e distorções, fato que pode comprometer a integridade do núcleo interno.

As principais contribuições deste trabalho incluem o estudo das paredes de fachada de edifícios industriais de forma ampla, em diversos cenários de incêndio, e o impacto desses fatores no comportamento mecânico da fachada. Além disso, descreve o processo de acoplamento de simulações em CFD e FEM, permitindo a análise integrada dessas simulações. Assim, esse estudo fornece bases para o projeto de fachadas de edifícios industriais, considerando aspectos arquitetônicos, aspectos relacionados à escolha de materiais e também o comportamento mecânico deste elemento.

Este trabalho, portanto, avança o estudo da segurança ao fogo de edifícios em zonas de interface urbano-florestal, com a realização de simulações numéricas focadas no incêndio, desde a sua ignição, até o comportamento da fachada frente a essa ação, contribuindo para a elaboração de projetos mais seguros.

Os objetivos inicialmente propostos neste trabalho foram atendidos ao longo do desenvolvimento da pesquisa. Realizou-se a modelagem numérica da propagação do incêndio por meio do *software* FDS, permitindo a avaliação detalhada da evolução do incêndio em diferentes cenários. A influência de variáveis ambientais, como a velocidade do vento, foi analisada, evidenciando seu papel na severidade e na dinâmica de propagação dos incêndios de interface urbano-florestal. Também foi conduzida uma análise comparativa entre diferentes materiais de revestimento de fachada, com especial atenção ao tipo de núcleo utilizado em painéis sanduíche, demonstrando seu impacto nas temperaturas desenvolvidas ao longo da fachada. Por fim, a modelagem térmica e mecânica da fachada no Abaqus permitiu simular a resposta estrutural do sistema frente à ação do fogo, fornecendo conclusões em termos de temperatura, tensões e deformações. Dessa forma, o conjunto de análises realizadas contribui para o entendimento integrado do desempenho de fachadas em situações de incêndio e reforça a importância do uso combinado de ferramentas numéricas na engenharia de segurança contra incêndio.

5.1 Sugestão para Trabalhos Futuros

Este trabalho abordou diversas esferas relacionadas ao projeto de edifícios industriais, com contribuições acerca do comportamento térmico e mecânico das fachadas. Contudo, são apontadas nessa seção, sugestões para trabalhos futuros, incorporando novas abordagens:

1. Para as simulações realizadas neste trabalho, buscou-se a avaliação das situações mais gravosas, com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico das fachada sob as condições mais críticas. Todavia, para trabalhos futuros, sugere-se a avaliação da propagação do incêndio interno, considerando a existência de mecanismos de supressão do incêndio;
2. Além disso, sugere-se também uma análise integrada dos incêndios externos e internos, ou seja, um incêndio florestal que, eventualmente encontre um caminho de entrada para o interior da edificação, avaliar a propagação interna;
3. Assim como a fachada, a cobertura é um elemento de grande responsabilidade, no contexto de proteção da edificação à incêndios florestais. Portanto, como um sugestão para um trabalho futuro, está o estudo do comportamento ao fogo deste elemento;
4. Outro ponto levantado durante a elaboração deste trabalho são as possíveis metodologias para a avaliação do acoplamento entre simulações CFD - FEM. Nesta pesquisa, foi adotada a metodologia de acoplamento unidirecional, que é baseada na realização de simulações independentes e sequenciais. A metodologia bidirecional, por sua vez, considera uma situação mais próxima da realidade, mas devido ao seu alto custo computacional, não foi realizada neste trabalho. Logo, como sugestão para trabalhos futuros, está a implementação de simulações considerando esta metodologia.

REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, J. T.; KOLDEN, C. A. Relationships between climate and macroscale area burned in the western united states. **International Journal of Wildland Fire**, CSIRO Publishing, v. 22, n. 7, p. 1003–1020, 2013.
- ABATZOGLOU, J. T.; WILLIAMS, A. P. Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western us forests. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, National Acad Sciences, v. 113, n. 42, p. 11770–11775, 2016.
- ABNT. NBR 14432 - Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. 2001.
- ABU-ZIDAN, Y.; RATHNAYAKA, S.; MENDIS, P.; NGUYEN, K. Effect of wind speed and direction on facade fire spread in an isolated rectangular building. **Fire safety journal**, Elsevier, v. 129, p. 103570, 2022.
- AGARWAL, G.; WANG, Y.; DOROFEEV, S. Fire performance evaluation of cladding wall assemblies using the 16-ft high parallel panel test method of ansi/fm 4880. **Fire and Materials**, Wiley Online Library, v. 45, n. 5, p. 609–623, 2021.
- ALBINI, F. A. **Estimating wildfire behavior and effects**. [S.l.]: Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range, 1976. v. 30.
- ALEXANDER, M. E.; CRUZ, M. G. Evaluating a model for predicting active crown fire rate of spread using wildfire observations. **Canadian Journal of Forest Research**, NRC Research Press Ottawa, Canada, v. 36, n. 11, p. 3015–3028, 2006.
- ALEXANDRE, P. M.; STEWART, S. I.; MOCKRIN, M. H.; KEULER, N. S.; SYPHARD, A. D.; BAR-MASSADA, A.; CLAYTON, M. K.; RADELOFF, V. C. The relative impacts of vegetation, topography and spatial arrangement on building loss to wildfires in case studies of california and colorado. **Landscape ecology**, Springer, v. 31, p. 415–430, 2016.
- ALLEN, J. **Indiana Walmart fulfillment center will not reopen after massive fire**. 2022. <<https://www.indystar.com/story/news/2022/04/25/indiana-walmart-fulfillment-center-not-reopen-after-massive-fire/7446811001/>>. (Accessed on 08/14/2023).
- ALMEIDA, M.; PORTO, L.; VIEGAS, D. Characterization of firebrands released from different burning tree species. **Frontiers in Mechanical Engineering**, Frontiers Media SA, v. 7, p. 651135, 2021.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI/FM Approvals Standard 4880, Evaluating The Fire Performance Of Insulated Building Panel Assemblies and Interior Finish Materials**. [S.l.], 2017.
- ARCOS, J. C. B. **Analysis of ventilation effect on fires occurred in industrial warehouses using FDS simulation tool**. Dissertação (Mestrado) — Universitat Politècnica de Catalunya, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio**. [S.l.], 2013.

BAPTISTA, J.; KOKARE, S.; GODINA, R.; AELENEI, D. A comparative life cycle assessment of etics and ventilated facade systems with timber cladding. **Energy & Buildings**, 2024.

BARTLING, D. **About the Douglas fir**. 2020. Disponível em: <<https://bonnersferryherald.com/news/2020/mar/05/about-the-douglas-fir/>>.

BAUER, W.; HAAG, O.; HENNECKE, D. Accuracy and robustness of nonlinear eddy viscosity models. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, Elsevier, v. 21, n. 3, p. 312–319, 2000.

BONNER, M. **A top-down approach to understand the fire performance of building facades using standard test data**. Tese (Doutorado) — Imperial College London, 2021.

BONNER, M.; WEGRZYNSKI, W.; PAPIS, B. K.; REIN, G. Kresnik: A top-down, statistical approach to understand the fire performance of building facades using standard test data. **Building and Environment**, v. 169, p. 106540, 2 2020. ISSN 03601323.

BOUSSINESQ, J. **Essai sur la théorie des eaux courantes**. [S.l.]: Impr. nationale, 1877.

BOVA, A. S.; MELL, W. E.; HOFFMAN, C. M. A comparison of level set and marker methods for the simulation of wildland fire front propagation. **International Journal of Wildland Fire**, CSIRO Publishing, v. 25, n. 2, p. 229–241, 2015.

BSI. **BS 8414-2:2015+A1:2017 - Fire performance of external cladding systems - Test method for non-loadbearing external cladding systems fixed to and supported by a structural steel frame**. 2017.

BSI. **BS 8414-1:2020 - Fire performance of external cladding systems - Test method for non-loadbearing external cladding systems fixed to, and supported by, a masonry substrate**. 2020.

BUFACCHI, P.; KRIEGER, G. C.; MELL, W.; ALVARADO, E.; SANTOS, J. C.; JR, J. A. C. Numerical simulation of surface forest fire in brazilian amazon. **Fire Safety Journal**, Elsevier, v. 79, p. 44–56, 2016.

BUTLER, C. P. The urban/wildlife fire interface. In: **Combustion Institute Meeting**. Spokane, Washington: [s.n.], 1974. Paper No WSS/C1 74-15.

CALFIRE. **Top 20 Most Destructive California Wildfires**. 2022b. <https://34c031f8-c9fd-4018-8c5a-4159cdff6b0d-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/calfire-website/our-impact/fire-statistics/featured-items/top20_destruction.pdf?rev=ee6ea855632a4b56a46adea1d3c8022f&hash=5B8B3A1A35CBB52CB0ED7A010F0B52E0>. (Accessed on 08/15/2023).

CANADELL, J. G.; MEYER, C. P.; COOK, G. D.; DOWDY, A.; BRIGGS, P. R.; KNAUER, J.; PEPLER, A.; HAVERD, V. Multi-decadal increase of forest burned area in australia is linked to climate change. **Nature Communications**, Springer Science and Business Media LLC, v. 12, n. 1, nov 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038%2Fs41467-021-27225-4>>.

CANTOR, P.; ARRUDA, M.; FIRMO, J.; BRANCO, F. Proposal of standard wildfire curves for the design protection of dwellings against wildland fire. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, American Society of Civil Engineers, v. 26, n. 3, p. 04022021, 2022.

CBMMG. **IT 09 - Carga Incêndio nas Edificações e Espaços destinados a Uso Coletivo - 2ª Edição**. Belo Horizonte, MG, 2020. Alterada pela Portaria nº 61/2020.

CBMMG. **IT 14 - Sistema de Detecção e Alarme de Incêndio - 2ª Edição**. Belo Horizonte, MG, 2020. Alterada pela Portaria nº 61/2020.

CBMMG. **IT 04 - Acesso de Viatura nas Edificações e Áreas de Risco - 2ª Edição**. Belo Horizonte, MG, 2022. Alterada pela Portaria nº 69/2022.

CBMMG. **IT 06 - Segurança Estrutural das Edificações**. Belo Horizonte, MG, 2022. Alterada pela Portaria nº 69/2022.

CBMMG. **IT 08 - Saídas de Emergência em Edificações - 2ª Edição**. Belo Horizonte, MG, 2022. Alterada pela Portaria nº 70/2022.

CBMMG. **IT 17 - Sistema de Hidrantes e Mangotinhos para Combate a Incêndio**. Belo Horizonte, MG, 2022. Alterada pela Portaria nº 70/2022.

CBMMG. **IT 12 - Brigada de Incêndio - 3ª Edição**. Belo Horizonte, MG, 2023. Alterada pela Portaria nº 73/2023.

CBMMG. **IT 01 - Procedimentos Administrativos - 10ª Edição**. Belo Horizonte, MG, 2024. Alterada pela Portaria nº 76/2024.

CBMMG. **IT 07 - Compartimentação Horizontal e Compartimentação Vertical**. Belo Horizonte, MG, 2024. Alterada pela Portaria nº 74/2024.

CEN. **EN 1993-1-2 - Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design**. 2010.

CEN. **CEN/TS 1187 – Test methods for external fire exposure to roofs**. 2012.

CEN. **EN 13501-1 - Fire classification of construction products and building elements. Part 1: Classification using data from reaction to fire tests**. 2018.

CHARLIER, M.; GAMBA, A.; DAI, X.; WELCH, S.; VASSART, O.; FRANSSEN, J.-M. Modelling the influence of steel structure compartment geometry on travelling fires. **Proceedings of the institution of civil engineers-structures and buildings**, Thomas Telford Ltd, v. 174, n. 9, p. 739–748, 2021a.

CHEN, T. B. Y.; YUEN, A. C. Y.; YEOH, G. H.; YANG, W.; CHAN, Q. N. Fire risk assessment of combustible exterior cladding using a collective numerical database. **Fire** **2019**, Vol. 2, Page 11, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 2, p. 11, 2019. ISSN 2571-6255. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2571-6255/2/1/11>>.

CHENEY, N.; GOULD, J.; CATCHPOLE, W. R. Prediction of fire spread in grasslands. **International Journal of Wildland Fire**, CSIRO Publishing, v. 8, n. 1, p. 1–13, 1998.

COCHRANE, M. A.; BOWMAN, D. M. Manage fire regimes, not fires. **Nature Geoscience**, Nature Publishing Group UK London, v. 14, n. 7, p. 455–457, 2021.

COMMISSION, E. **The EU 2022 wildfire season was the second worst on record**. 2023. <https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/eu-2022-wildfire-season-was-second-worst-record-2023-05-02_en>. (Accessed on 07/19/2023).

COMMISSION, E.; CENTRE, J. R.; RIGO, D. D.; LIBERTÀ, G.; DURRANT, T. H.; VIVANCOS, T. A.; SAN-MIGUEL-AYANZ, J. **Forest fire danger extremes in Europe under climate change : variability and uncertainty**. [S.l.]: Publications Office of the European Union, 2018.

CORELOGIC. **CL_wildfire-infograph_B6**. 2021. <<https://www.corelogic.com/wp-content/uploads/sites/4/2021/09/2021-Wildfire-Final-Infographic.pdf>>. (Accessed on 07/19/2023).

COSGROVE, B. W. **Fire Design of Single Storey Industrial Buildings**. 1996.

COSTA, H.; RIGO, D. de; LIBERTÀ, G.; DURRANT, T. H.; SAN-MIGUEL-AYANZ, J. **European wildfire danger and vulnerability in a changing climate: towards integrating risk dimensions**. [S.l.]: Publications Office of the European Union, 2020. 59 p.

COUNTRYMAN, C. M. **Heat: its role in wildland fire**. [S.l.]: Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and . . . , 1976.

COX, G.; KUMAR, S. Modeling enclosure fires using cfd. **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**, National Fire Protection Association Quincy, MA, USA, p. 3–194, 2002.

DAI, X.; GAMBA, A.; LIU, C.; ANDERSON, J.; CHARLIER, M.; RUSH, D.; WELCH, S. An engineering cfd model for fire spread on wood cribs for travelling fires. **Advances in Engineering Software**, Elsevier, v. 173, p. 103213, 2022.

DAI, X.; WELCH, S.; USMANI, A. A critical review of “travelling fire” scenarios for performance-based structural engineering. **Fire Safety Journal**, Elsevier, v. 91, p. 568–578, 2017.

DAVEY, S. M.; SARRE, A. **Editorial: the 2019/20 Black Summer bushfires**. [S.l.]: Taylor & Francis, 2020. 47–51 p.

DEGLER, J.; ELIASSON, A.; ANDERSON, J.; LANGE, D.; RUSH, D. A-priori modelling of the tisoa fire test as input to the experimental work. **ASFE, Dubrovnik**, v. 60, 2015.

DRÉAN, V.; GIRARDIN, B.; GUILLAUME, E.; FATEH, T. Numerical simulation of the fire behaviour of facade equipped with aluminium composite material-based claddings-model validation at large scale. **Fire and Materials**, Wiley Online Library, v. 43, n. 8, p. 981–1002, 2019.

EVANS, D. D.; EVANS, D. D.; REHM, R. G.; BAKER, E. S. **Physics-based modeling for wui fire spread: Simplified model algorithm for ignition of structures by burning vegetation**. [S.l.]: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2004.

FALKENSTEIN-SMITH, R.; MCGRATTAN, K. B.; TOMAN, B.; FERNANDEZ, M. G. **Measurement of the Flow Resistance of Vegetation**. [S.l.]: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2019.

FERNANDES, P. M. Combining forest structure data and fuel modelling to classify fire hazard in portugal. **Annals of Forest Science**, EDP Sciences, v. 66, n. 4, p. 1–9, 2009.

FERNANDES, P. M.; BARROS, A. M.; PINTO, A.; SANTOS, J. A. Characteristics and controls of extremely large wildfires in the western mediterranean basin. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, Wiley Online Library, v. 121, n. 8, p. 2141–2157, 2016.

FERNANDEZ-PELLO, A. C. Wildland fire spot ignition by sparks and firebrands. **Fire Safety Journal**, Elsevier, v. 91, p. 2–10, 2017.

FIORINI, C.; CRAVEIRO, H. D.; SANTIAGO, A.; LAÍM, L.; SILVA, L. S. da. Parametric evaluation of heat transfer mechanisms in a wui fire scenario. **International Journal of Wildland Fire**, CSIRO Publishing, 2023.

FORNEY, G. P.; MOSS, W. F. Analyzing and exploiting numerical characteristics of zone fire models. **Fire Science & Technology**, v. 14, p. 49–60, 1994.

FRANÇA. **Arrêté du 17 août 2016 relatif à la prévention des sinistres dans les entrepôts couverts soumis à autorisation sous la rubrique 1510, y compris ceux relevant également de l'une ou plusieurs des rubriques 1530, 1532, 2662 ou 2663 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement**. 2016. Disponível em: <<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000033117556/?isSuggest=true>>.

FRANÇA. **Arrêté du 10 septembre 1970 relatif à la classification des façades vitrées par rapport au danger d'incendie - LEPIR 2**. 1970.

FSM. **Insurer Zurich issues warning over “dramatic spike” in warehouse fires**. 2022. Disponível em: <<https://www.fsmatters.com/Zurich-issues-warning-on-rise-in-warehouse-fires>>.

GAO. Technology assessment: Protecting structures and improving communications during wildland fires. 2005.

GLOBALFORESTWATCH. **Global Deforestation Rates & Statistics by Country | GFW**. 2023. <<https://www.globalforestwatch.org>>. (Accessed on 07/20/2023).

GUERREIRO; FONSECA, C.; SALGUEIRO, A.; FERNANDES, P.; IGLÉSIAS, E. L.; NEUFVILLE, R. de; MATEUS, F.; RIBAU, M. C.; SILVA, J. S.; MOURA, J. M.; REGO, F. C.; CALDEIRA, D. N. **Avaliação dos incêndios ocorridos entre 14 e 16 de outubro de 2017 em Portugal Continental. Relatório Final**. 2018. 1-274 p.

GUILLAUME, E.; FATEH, T.; SCHILLINGER, R.; CHIVA, R.; UKLEJA, S. Study of fire behaviour of facade mock-ups equipped with aluminium composite material-based claddings, using intermediate-scale test method. **Fire and Materials**, Wiley Online Library, v. 42, n. 5, p. 561–577, 2018.

HAMINS, A.; MARANGHIDES, A.; JOHNSON, R.; DONNELLY, M.; YANG, J.; MULHOLLAND, G.; ANLEITNER, R. L. Report of experimental results for the international fire model benchmarking and validation exercise# 3. nist special publication. **Joint Publication of NIST and the US Nuclear Regulatory Commission (NUREG/CR-6905)**., v. 1013, n. 1, 2006.

HANSEN, J.; RUEDY, R.; SATO, M.; LO, K. Global surface temperature change. **Reviews of Geophysics**, Wiley Online Library, v. 48, n. 4, 2010.

HAYNES, K.; HANDMER, J.; MCANENEY, J.; TIBBITS, A.; COATES, L. Australian bushfire fatalities 1900–2008: exploring trends in relation to the ‘prepare, stay and defend or leave early’ policy. **Environmental Science & Policy**, Elsevier, v. 13, n. 3, p. 185–194, 2010.

HAYNES, K.; SHORT, K.; XANTHOPOULOS, G.; VIEGAS, D.; RIBEIRO, L. M.; BLANCHI, R. Wildfires and wui fire fatalities. **Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires**; Manzello, SL, Ed, p. 1–16, 2020.

INDUFORESTFIRE. **InduForestFire**. 2020. Disponível em: <<https://www.induforestfire.pt/pt/inicio>>.

INGLATERRA. **Building Safety Programme**. 2020.

ISB. **Estatísticas**. 2024. Disponível em: <<https://sprinklerbrasil.org.br/instituto-sprinkler-brasil/estatisticas>>.

ISO. **Fire safety engineering — Guidance for use of fire zone models (ISO Standard No. 13447:2013)**. 2013.

ISO, I. 13785-2. reaction-to-fire tests for façades—part 2: Large-scale test. **ISO**, Geneva, 2002.

JANARDHAN, R. K.; HOSTIKKA, S. When is the fire spreading and when it travels?—numerical simulations of compartments with wood crib fire loads. **Fire Safety Journal**, Elsevier, v. 126, p. 103485, 2021.

JANARDHAN, R. K.; SHAKIL, S.; LU, W.; HOSTIKKA, S.; PUTTONEN, J. Coupled cfd-fe analysis of a long-span truss beam exposed to spreading fires. **Engineering Structures**, Elsevier, v. 259, p. 114150, 2022.

JANSSENS, M. L. **Introduction to Mathematical Fire Modeling**. 2nd edition. ed. [S.l.]: CRC Press, 2000. 275 p. ISBN 9780429181696.

JESUS, S.; TRACY, D.; ROBERTO, B.; GIORGIO, L.; ALFREDO, B.; DANIELE, D.; FABIO, L. Advance effis report on forest fires in europe. **Middle East and North Africa**, 2017.

JOHANSSON, N. Evaluation of a zone model for fire safety engineering in large spaces. **Fire Safety Journal**, v. 120, p. 103122, 3 2021. ISSN 03797112.

JOLLY, W. M.; COCHRANE, M. A.; FREEBORN, P. H.; HOLDEN, Z. A.; BROWN, T. J.; WILLIAMSON, G. J.; BOWMAN, D. M. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. **Nature communications**, Nature Publishing Group UK London, v. 6, n. 1, p. 7537, 2015.

- KARLSSON, B.; QUINTIERE, J. **Enclosure fire dynamics**. [S.l.]: CRC press, 1999.
- KEELEY, J. E.; SYPHARD, A. D. Historical patterns of wildfire ignition sources in california ecosystems. **International journal of wildland fire**, CSIRO Publishing, v. 27, n. 12, p. 781–799, 2018.
- KHAN, A. A.; LIN, S.; HUANG, X.; USMANI, A. Facade fire hazards of bench-scale aluminum composite panel with flame-retardant core. **Fire Technology**, Springer, p. 1–24, 2021.
- KHAN, N.; MOINUDDIN, K. The role of heat flux in an idealised firebreak built in surface and crown fires. **Atmosphere**, MDPI, v. 12, n. 11, p. 1395, 2021.
- KIRBY, B.; WAINMAN, D. E.; TOMLINSON, L.; KAY, T.; PEACOCK, B. N. Natural fires in large scale compartments. **A British Steel Technical, Fire Research Station Collaborative Project**, 1994.
- KOO, E.; PAGNI, P. J.; WEISE, D. R.; WOYCHEESE, J. P. Firebrands and spotting ignition in large-scale fires. **International Journal of Wildland Fire**, CSIRO Publishing, v. 19, n. 7, p. 818–843, 2010.
- KOUTLAS, G. N. The use and predictive capability of cfd for fully developed natural fires in large compartments. p. 1–20, 2006.
- LOPES, R. F.; RODRIGUES, J. P. C.; CAMARGO, A. L.; TADEU, A. J. B. Resilience of industrial buildings to wildland-urban interface fires. In: IOP PUBLISHING. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. [S.l.], 2022. v. 1101, n. 2, p. 022034.
- LUGARESI, F.; KOTSOVINOS, P.; LENK, P.; REIN, G. Review of the mechanical failure of non-combustible facade systems in fire. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 361, p. 129506, 2022.
- MADADGAR, S.; SADEGH, M.; CHIANG, F.; RAGNO, E.; AGHAKOUCHAK, A. Quantifying increased fire risk in california in response to different levels of warming and drying. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 34, p. 2023–2031, 12 2020. ISSN 1436-3240.
- MANZELLO, S. L.; SHIELDS, J. R.; CLEARY, T. G.; MARANGHIDES, A.; MELL, W. E.; YANG, J. C.; HAYASHI, Y.; NII, D.; KURITA, T. On the development and characterization of a firebrand generator. **Fire Safety Journal**, Elsevier, v. 43, n. 4, p. 258–268, 2008.
- MANZELLO, S. L.; SHIELDS, J. R.; YANG, J. C.; HAYASHI, Y.; NII, D. On the use of a firebrand generator to investigate the ignition of structures in wildland–urban interface (wui) fires. In: **11th international conference on fire science and engineering (INTERFLAM)**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 3–5.
- MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. *et al.* Climate change 2021: the physical science basis. **Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**, Cambridge University Press Cambridge, UK, v. 2, 2021.

MCGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S.; FLOYD, J.; MCDERMOTT, R.; VANELLA, M. Nist special publication 1018-3, sixth edition. fire dynamics simulator technical reference guide - volume 3: Validation. NIST, 2022.

MCGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S.; MCDERMOTT, R.; FLOYD, J.; WEINSCHENK, C.; OVERHOLT, K. Fire dynamics simulator technical reference guide volume 1: mathematical model. **NIST special publication**, v. 1018, n. 1, p. 175, 2013.

MCGRATTAN, K. B.; BAUM, H. R.; REHM, R. G. Large eddy simulations of smoke movement. **Fire safety journal**, Elsevier, v. 30, n. 2, p. 161–178, 1998.

MCGRATTAN, K. B.; HOSTIKKA, S.; FLOYD, J.; MCDERMOTT, R.; VANELLA, M.; MUELLER, E. **Fire dynamics simulator: User's Guide (6th Edition)**. [S.l.: s.n.], 2023.

MCKENNA, S. T.; JONES, N.; PECK, G.; DICKENS, K.; PAWELEC, W.; ORADEI, S.; HARRIS, S.; STEC, A. A.; HULL, T. R. Fire behaviour of modern façade materials – understanding the grenfell tower fire. **Journal of Hazardous Materials**, Elsevier, v. 368, p. 115–123, 4 2019. ISSN 0304-3894.

MCLAGGAN, M.; HIDALGO, J.; OSORIO, A. e. a. The material library of cladding materials. 2019.

MELL, W.; JENKINS, M. A.; GOULD, J.; CHENEY, P. A physics-based approach to modelling grassland fires. **International Journal of Wildland Fire**, CSIRO Publishing, v. 16, n. 1, p. 1–22, 2007.

MELL, W.; MARANGHIDES, A.; MCDERMOTT, R.; MANZELLO, S. L. Numerical simulation and experiments of burning douglas fir trees. **Combustion and Flame**, Elsevier, v. 156, n. 10, p. 2023–2041, 2009.

MISHALL, J. **Commercial warehouse trends increase fire risks | Zurich Insurance**. 2022. Disponível em: <<https://www.zurichna.com/knowledge/articles/2022/07/storage-trends-and-new-technology-ignite-fire-risks-for-commercial-warehouses>>.

MIT. **Eight-node brick element**. 2025. Disponível em: <https://web.mit.edu/calculix_v2.7/CalculiX/ccx_2.7/doc/ccx/node26.html#:~:text=The%20C3D8%20element%20is%20a,given%20in%20the%20integration%20points.>

MOINUDDIN, K.; SUTHERLAND, D. Modelling of tree fires and fires transitioning from the forest floor to the canopy with a physics-based model. **Mathematics and Computers in Simulation**, Elsevier, v. 175, p. 81–95, 2020.

MOLINA-TERRÉN, D. M.; XANTHOPOULOS, G.; DIAKAKIS, M.; RIBEIRO, L.; CABALLERO, D.; DELOGU, G. M.; VIEGAS, D. X.; SILVA, C. A.; CARDIL, A. Analysis of forest fire fatalities in southern europe: Spain, portugal, greece and sardinia (italy). **International journal of wildland fire**, CSIRO Publishing, v. 28, n. 2, p. 85–98, 2019.

MORGAN, G.; TOLHURST, K.; POYNTER, M.; COOPER, N.; MCGUFFOG, T.; RYAN, R.; WOUTERS, M.; STEPHENS, N.; BLACK, P.; SHEEHAN, D. *et al.* Prescribed burning in south-eastern australia: history and future directions. **Australian Forestry**, Taylor & Francis, v. 83, n. 1, p. 4–28, 2020.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 285. Standard Fire Test Method for Evaluation of Fire Propagation Characteristics of Exterior Non-load-Bearing Wall Assemblies Containing Combustible Components.** [S.l.], 2012.

NFPA, N. F. P. A. **Warehouse Structure Fires - Supporting Tables.** 2022. Disponível em: <<https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Building-and-life-safety/oswarehousetables.pdf>>.

NIST. **Test16_8woodCrib_r1.** 2021. Disponível em: <<https://www.nist.gov/el/fcd/multiple-item-transient-combustion-calorimetry/test168woodcribr1>>.

OLIVEIRA, U.; SOARES-FILHO, B.; BUSTAMANTE, M.; GOMES, L.; OMETTO, J. P.; RAJÃO, R. Determinants of fire impact in the brazilian biomes. **Frontiers in Forests and Global Change**, Frontiers Media SA, v. 5, p. 735017, 2022.

ONU. Novo estudo prevê aumento dos incêndios florestais em 50Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2022/02/1780682>>.

PAAJANEN, A.; KORHONEN, T.; MERJA, S.; HOSTIKKA, S.; MALENDOWSKI, M.; GUTKIN, R. Fds2fem—a tool for coupling fire and structural analyses. In: **IABSE Workshop: Safety, Failures and Robustness of Large Structures, Helsinki, Finland, 14-15 February 2013.** [S.l.: s.n.], 2013. p. 218–224.

PAULA, D. de; RODRIGUES, J. P. C.; MOREIRA, M. L. C. Recomendações construtivas para a envolvente externa dos edifícios industriais em zonas de iif. In: OLIVEIRA, A.; RODRIGUES, J. P. C.; SILVA, S. J.; GASPAR, J. (Ed.). **Mitigação do Risco de Incêndio na Interface Industrial-Florestal.** Coimbra: ESAC UC – Escola Superior Agrária da Universidade de Coimbra; Itecons UC – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade da Universidade de Coimbra e RISCOS – Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, 2023. p. 141–183. ISBN 978-989-54499-4-1.

PAULA, D. J. de; RODRIGUES, J. P. C.; CAMARGO, A. L.; LOPES, R. F. R. Análise comparativa dos métodos de ensaio para avaliação do comportamento ao fogo em paredes de fachada. In: . [S.l.: s.n.], 2022. p. 261–274.

PAULA, D. J. de; RODRIGUES, J. P. C.; CAMARGO, A. L.; LOPES, R. F. Performance fire tests on building external walls made of sandwich panels. **Fire Safety Journal**, Elsevier, v. 150, p. 104273, 2024.

PAULA, D. J. de; RODRIGUES, J. P. C.; CAMARGO, A. L.; LOPES, R. F. Performance of industrial building external walls made with sandwich panels in case of fire. **Proceedings of FSF 2024. The 4th International Symposium on Fire Safety of Facades 2024**, p. 49–59, 2024.

PAUSAS, J. G. Changes in fire and climate in the eastern iberian peninsula (mediterranean basin). **Climatic Change**, v. 63, p. 337–350, 4 2004. ISSN 0165-0009.

PEACOCK, R. D. Cfast : The consolidated model of fire growth and smoke transport. 1993.

PITTS, W. M. Wind effects on fires. **Progress in Energy and Combustion Science**, Elsevier, v. 17, n. 2, p. 83–134, 1991.

PORTERIE, B.; PIZZO, Y.; MENSE, M.; SARDOY, N.; LOUICHE, J.; DIZET, N.; PORTERIE, T.; POUSCHAT, P. Development and validation of a zone fire model embedding multi-fuel combustion. **Applied Sciences**, MDPI, v. 12, n. 8, p. 3951, 2022.

PYL, L.; SCHUEREMANS, L.; DIERCKX, W.; GEORGIEVA, I. Fire safety analysis of a 3d frame structure based on a full-scale fire test. **Thin-Walled Structures**, Elsevier, v. 61, p. 204–212, 2012.

PYNE, S. J. **Between Two Fires: A Fire History of Contemporary America**. [S.l.]: University of Arizona Press, 2015.

QUINTIERE, J. G. Fundamentals of enclosure fire "zone" models. **Journal of Fire Protection Engineering**, v. 1, p. 99–119, 1 1989. ISSN 1042-3915.

RAMACHANDRAN, G. Stochastic models of fire growth. **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**, National Fire protection Association USA, p. 296–311, 1995.

REGO, F. C.; MORGAN, P.; FERNANDES, P.; HOFFMAN, C. Futuring: Trends in fire science and management. In: **Fire Science from Chemistry to Landscape Management**. [S.l.]: Springer International Publishing, 2021. p. 599–631.

REHM, R. G.; BAUM, H. R. The equations of motion for thermally driven, buoyant flows. **Journal of research of the National Bureau of Standards**, National Institute of Standards and Technology, v. 83, n. 3, p. 297, 1978.

RESILINC. **Spotlight on factory fire**. 2022. Disponível em: <<https://resource.resilinc.com/rs/863-OTG-034/images/white-papers-reports-factory-fires-the-top-supply-chain-disruption.pdf>>.

RIBEIRO, L. M.; RODRIGUES, A.; LUCAS, D.; VIEGAS, D. X. The impact on structures of the pedrógão grande fire complex in june 2017 (portugal). **Fire**, MDPI, v. 3, n. 4, p. 57, 2020.

ROBINSON, M.; GORDON, A. **Company boss paid £3m to clad inferno tower block is hiding in his £1m mansion as homeless residents sleep on the streets (but his wife claims there is 'nothing to say' about the disaster)**. 2017. <<https://www.dailymail.co.uk/news/article-4605674/Firm-paid-2-6m-cladding-Grenfel-l-collapsed.html>>. (Accessed on 13/03/2024).

ROGERS, B. M.; BALCH, J. K.; GOETZ, S. J.; LEHMANN, C. E.; TURETSKY, M. Focus on changing fire regimes: interactions with climate, ecosystems, and society. **Environmental Research Letters**, IOP Publishing, v. 15, n. 3, p. 030201, 2020.

ROTHERMEL, R. C. **A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels**. [S.l.]: Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, US, 1972. v. 115.

SAKAKIBARA, G. d. M. Classificação de áreas urbanas e rurais no brasil: uma discussão a partir do território municipal. 2019.

SANDSTRÖM, J.; CHENG, X.; VELJKOVIC, M.; WICKSTRÖM, U.; HEISTERMANN, T. Travelling fires for cfd. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR FIRE SAFETY SCIENCE. **International Symposium on Fire Safety Science: 19/06/2011-24/06/2011**. [S.l.], 2011. p. 1479–1488.

SCHMUCK, G.; SAN-MIGUEL-AYANZ, J.; CAMILA, A.; DURRANT, T.; BOCA, R.; LIBERTÁ, G. Forest fires in europe, middle east and north africa 2012. 2013.

SCHOENNAGEL, T.; VEBLEN, T. T.; ROMME, W. H. The interaction of fire, fuels, and climate across rocky mountain forests. **BioScience**, American Institute of Biological Sciences, v. 54, n. 7, p. 661–676, 2004.

SILVA, J. C. G.; LANDESMANN, A.; RIBEIRO, F. L. B. Fire-thermomechanical interface model for performance-based analysis of structures exposed to fire. **Fire Safety Journal**, Elsevier, v. 83, p. 66–78, 2016.

SILWAL, S.; MELA, K.; MA, Z. Test methods for determination of shear properties of sandwich panels. **Journal of Sandwich Structures Materials**, v. 26, p. 1341–1362, 10 2024. ISSN 1099-6362.

SIMULATIONS, I. **Turbulence models in CFD - RANS, DES, LES and DNS**. 2023. <<https://www.idealsimulations.com/resources/turbulence-models-in-cfd/>>. (Accessed on 08/23/2023).

SMAGORINSKY, J. General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiment. **Monthly weather review**, American Meteorological Society, v. 91, n. 3, p. 99–164, 1963.

SOTO, M. E. C.; MARTÍNEZ, J. R. M.; BONILLA, S.; GARCÍA, R. A. M. Calculating minimum safety distance against wildfires at the wildland-urban interface in chile and spain. **Heliyon**, Elsevier, v. 8, n. 11, 2022.

STERN-GOTTFRIED, J.; REIN, G. Travelling fires for structural design–part i: Literature review. **Fire Safety Journal**, Elsevier, v. 54, p. 74–85, 2012.

SUZUKI, K.; HARADA, K.; TANAKA, T. "a multi-layer zone model for predicting fire behavior in a single room. In: . [S.l.: s.n.], 2002.

SUZUKI, S.; MANZELLO, S. L. Investigating coupled effect of radiative heat flux and firebrand showers on ignition of fuel beds. **Fire technology**, Springer, v. 57, p. 683–697, 2021.

SWEDISH NATIONAL TESTING AND RESEARCH INSTITUTE. **SP FIRE 105 - External wall assemblies and façade claddings – Reaction to Fire. Issue 5**. [S.l.], 1994.

SYPHARD, A. D.; KEELEY, J. E.; GOUGH, M.; LAZARZ, M.; ROGAN, J. What makes wildfires destructive in california? **Fire**, MDPI, v. 5, n. 5, p. 133, 2022.

TARIFA, C. S.; NOTARIO, P. P. D.; MORENO, F. G. On the flight paths and lifetimes of burning particles of wood. In: ELSEVIER. **Symposium (international) on combustion**. [S.l.], 1965. v. 10, n. 1, p. 1021–1037.

THEVEGA, T.; JAYASINGHE, J.; ROBERT, D.; BANDARA, C.; KANDARE, E.; SETUNGE, S. Fire compliance of construction materials for building claddings: A critical review. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 361, p. 129582, 2022.

TIHAY, V.; MORANDINI, F.; SANTONI, P.-A.; PEREZ-RAMIREZ, Y.; BARBONI, T. Combustion of forest litters under slope conditions: burning rate, heat release rate, convective and radiant fractions for different loads. **Combustion and flame**, Elsevier, v. 161, n. 12, p. 3237–3248, 2014.

TRAN, T. T.; KHELIFA, M.; NADJAI, A.; OUDJENE, M.; ROGAUME, Y. Modelling of fire performance of cross laminated timber (clt) panels. In: IOP PUBLISHING. **Journal of Physics: Conference Series**. [S.l.], 2018. v. 1107, n. 3, p. 032002.

TRAPP, A. C.; RANGWALA, A. S. Analyzing the impact of in-rack sprinklers in a warehouse fire: A demonstration of the role optimization has in mitigating damage. **Fire Safety Journal**, Elsevier, v. 73, p. 55–62, 2015.

TRENBERTH, K. E.; DAI, A.; RASMUSSEN, R. M.; PARSONS, D. B. The changing character of precipitation. **Bulletin of the American Meteorological Society**, American Meteorological Society, v. 84, n. 9, p. 1205–1218, 2003.

United Nations Environment Programme. **Frontiers 2022: Noise, Blazes and Mismatches**. 2022. <<https://www.unep.org/resources/frontiers-2022-noise-blazes-and-mismatches>>.

USFA. **What is the WUI?** 2023. Disponível em: <<https://www.usfa.fema.gov/wui/what-is-the-wui.html>>.

VANELLA, M.; MCGRATTAN, K.; MCDERMOTT, R.; FORNEY, G.; MELL, W.; GISSI, E.; FIORUCCI, P. A multi-fidelity framework for wildland fire behavior simulations over complex terrain. **atmosphere**, MDPI, v. 12, n. 2, p. 273, 2021.

VEBLEN, T. T.; KITZBERGER, T.; DONNEGAN, J. Climatic and human influences on fire regimes in ponderosa pine forests in the colorado front range. **Ecological applications**, Wiley Online Library, v. 10, n. 4, p. 1178–1195, 2000.

VERSTOCKT, S.; HOECKE, S. V.; TILLEY, N.; MERCI, B.; SETTE, B.; LAMBERT, P.; HOLLEMEERSCH, C.; WALLE, R. Van de. Hot topics in video fire surveillance. In: **Video Surveillance**. [S.l.]: Intech, 2011. p. 443–458.

VIGNE, G.; WĘGRZYŃSKI, W.; CANTIZANO, A.; AYALA, P.; REIN, G.; GUTIÉRREZ-MONTES, C. Experimental and computational study of smoke dynamics from multiple fire sources inside a large-volume building. In: SPRINGER. **Building simulation**. [S.l.], 2021. v. 14, p. 1147–1161.

WADHWANI, R.; SULLIVAN, C.; WICKRAMASINGHE, A.; KYNG, M.; KHAN, N.; MOINUDDIN, K. A review of firebrand studies on generation and transport. **Fire safety journal**, Elsevier, v. 134, p. 103674, 2022.

WADHWANI, R.; SUTHERLAND, D.; OOI, A.; MOINUDDIN, K.; THORPE, G. Verification of a lagrangian particle model for short-range firebrand transport. **Fire Safety Journal**, Elsevier, v. 91, p. 776–783, 2017.

WALTON, W. D.; THOMAS, P. H.; OHMIYA, Y. **Estimating temperatures in compartment fires**. [S.l.]: Springer, 2016.

WICKSTRÖM, U. The adiabatic surface temperature and the plate thermometer. **Fire safety science**, v. 10, p. 1001–1011, 2011.

WILLIAMS, A. P.; ABATZOGLOU, J. T.; GERSHUNOV, A.; GUZMAN-MORALES, J.; BISHOP, D. A.; BALCH, J. K.; LETTENMAIER, D. P. Observed impacts of anthropogenic climate change on wildfire in california. **Earth's Future**, Wiley Online Library, v. 7, n. 8, p. 892–910, 2019.

WITN. **OFFICIALS: QVC fire ‘largest structure fire’ in state history**. 2022. Disponível em: <<https://www.witn.com/2022/02/15/officials-qvc-fire-largest-structure-fire-state-history/>>.

WTHR. **13News drone video of the aftermath of Plainfield Walmart fulfillment center fire - YouTube**. 2022. <<https://www.youtube.com/watch?v=afKdkGMdabk&t=5s>>. (Accessed on 08/14/2023).

YANG, P.; TAN, X.; XIN, W. Experimental study and numerical simulation for a storehouse fire accident. **Building and Environment**, Elsevier, v. 46, n. 7, p. 1445–1459, 2011.

YEOH, G. H.; YUEN, K. K. **Computational fluid dynamics in fire engineering: theory, modelling and practice**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2009.

YUEN, A. C. Y.; CHEN, T. B. Y.; LI, A.; CORDEIRO, I. M. D. C.; LIU, L.; LIU, H.; LO, A. L. P.; CHAN, Q. N.; YEOH, G. H. Evaluating the fire risk associated with cladding panels: An overview of fire incidents, policies, and future perspective in fire standards. **Fire and materials**, Wiley Online Library, v. 45, n. 5, p. 663–689, 2021.

ZAFRA, M.; KIYADA, S. **Buildings wrapped in solid gasoline**. 2024. Disponível em: <<https://www.reuters.com/graphics/BUILDING-FIRES/byprqyryzve/>>.

ZHANG, C.; SILVA, J. G.; WEINSCHENK, C.; KAMIKAWA, D.; HASEMI, Y. Simulation methodology for coupled fire-structure analysis: modeling localized fire tests on a steel column. **Fire Technology**, Springer, v. 52, p. 239–262, 2016.

ZHIYIN, Y. Large-eddy simulation: Past, present and the future. **Chinese journal of Aeronautics**, Elsevier, v. 28, n. 1, p. 11–24, 2015.

ZHOU, B.; YOSHIOKA, H.; NOGUCHI, T.; ANDO, T. Experimental study of expanded polystyrene (eps) external thermal insulation composite systems (etics) masonry façade reaction-to-fire performance. **Thermal Science and Engineering Progress**, Elsevier, v. 8, p. 83–92, 2018.

ZHOU, X.; LUO, K.; WILLIAMS, J. Dynamic behavior in reacting plumes. **Proceedings of the Combustion Institute**, Elsevier, v. 28, n. 2, p. 2859–2865, 2000.

APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO DO MODELO DE PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO EM PAREDES DE FACHADA COM DADOS EXPERIMENTAIS

Nesse apêndice serão apresentados na íntegra os gráficos relativos a calibração do modelo numérico com dados experimentais, cujos parâmetros analisados foram resumidos na Tabela 3.5.

A seguir, os gráficos relativos a cada um dos cenários.

A.1 SIM_001_CALIB_CFD_INT_MW

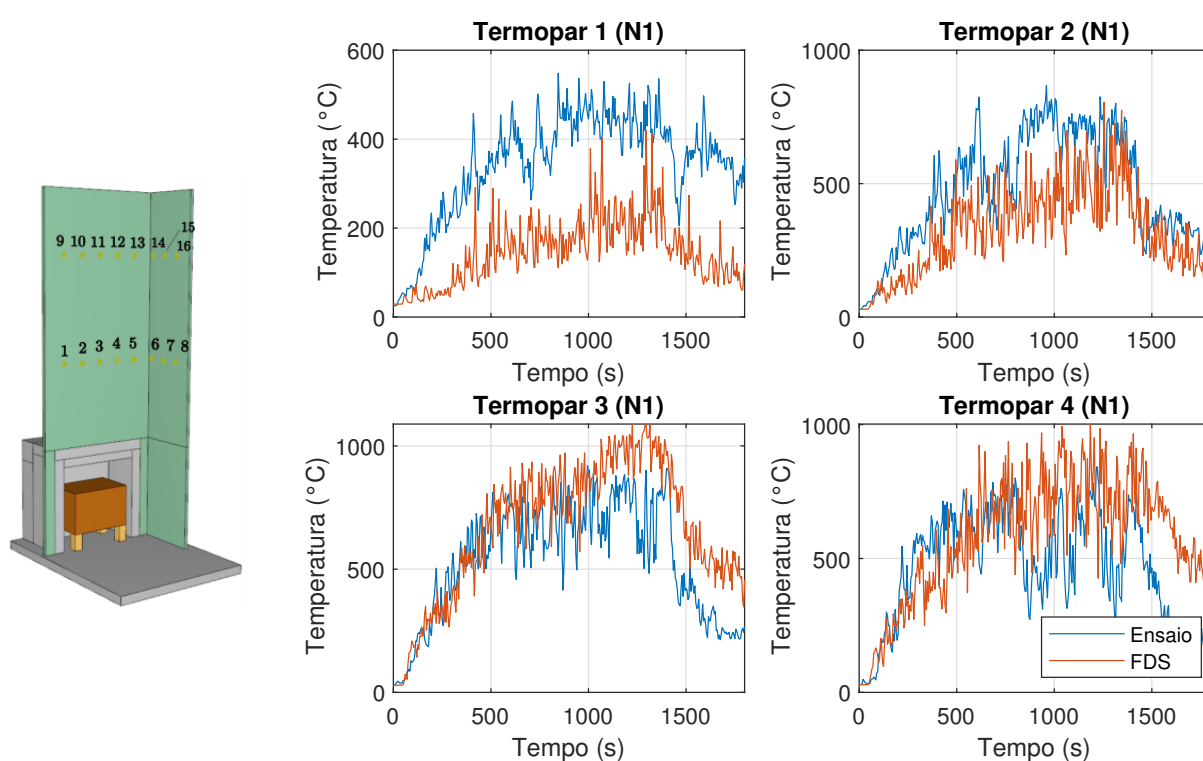


Figura A.1: Termopares 1 a 4 - SIM_001_CALIB_CFD_INT_MW

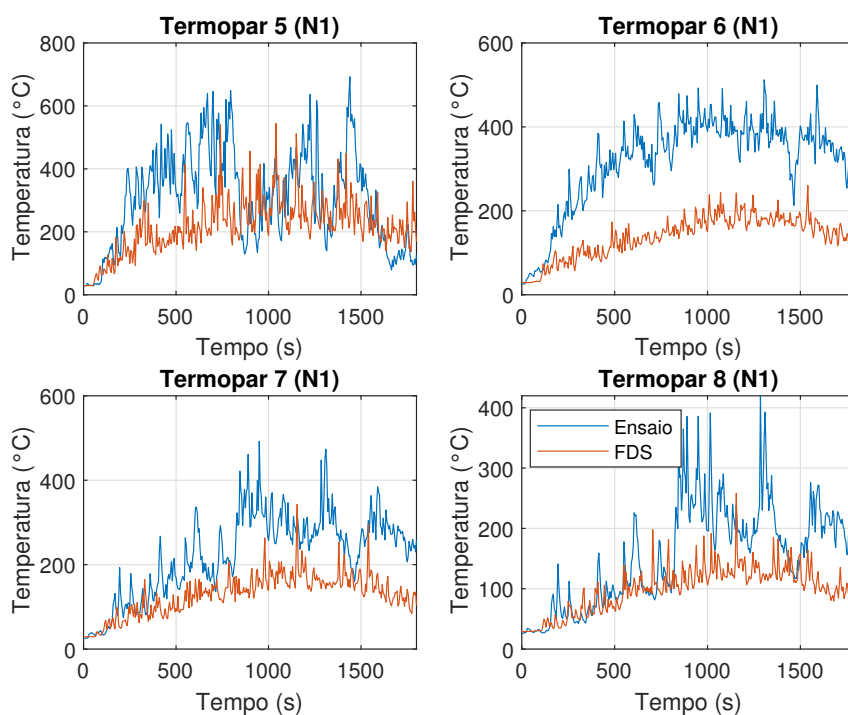


Figura A.2: Termopares 5 a 8 - SIM_001_CALIB_CFD_INT_MW

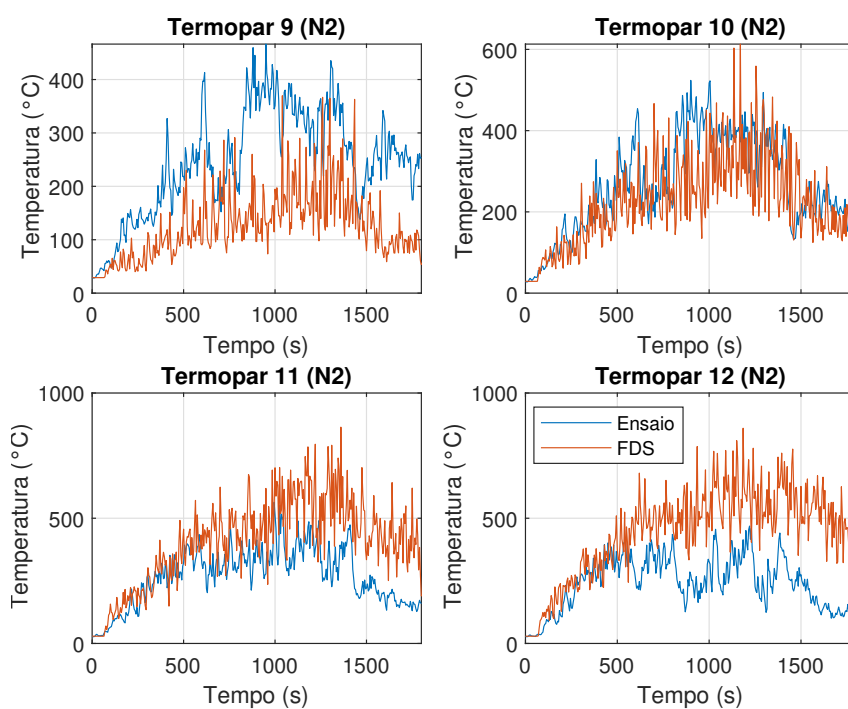


Figura A.3: Termopares 9 a 12 - SIM_001_CALIB_CFD_INT_MW

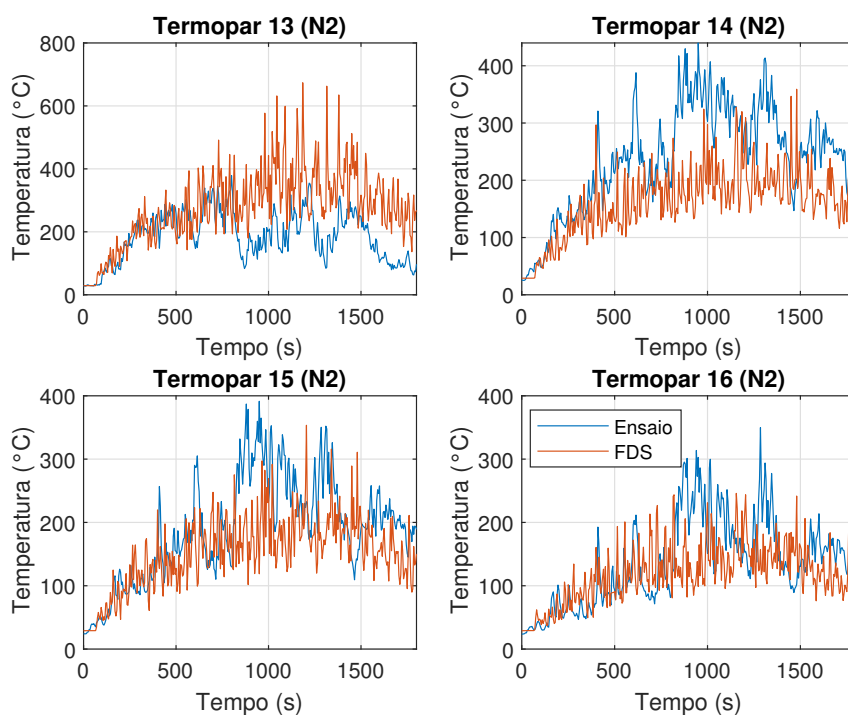


Figura A.4: Termopares 13 a 16 - SIM_001_CALIB_CFD_INT_MW

A.2 SIM_002_CALIB_CFD_INT_PIR

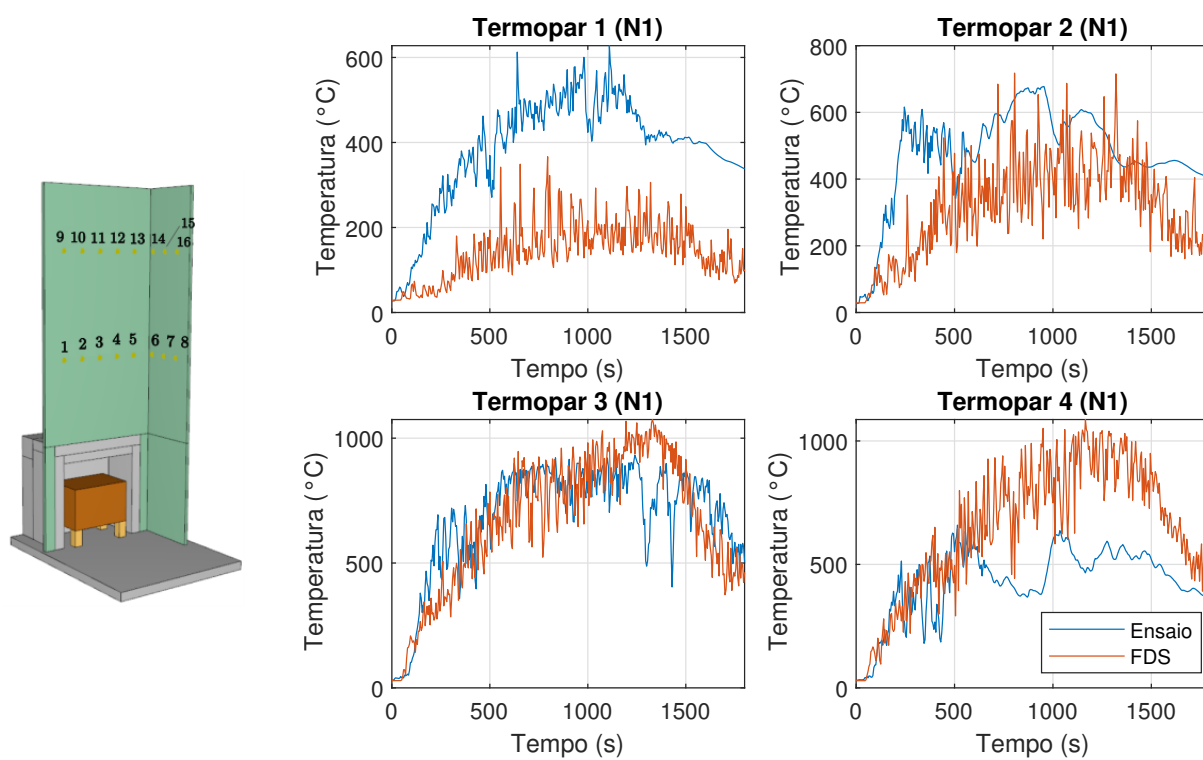


Figura A.5: Termopares 1 a 4 - SIM_002_CALIB_CFD_INT_PIR

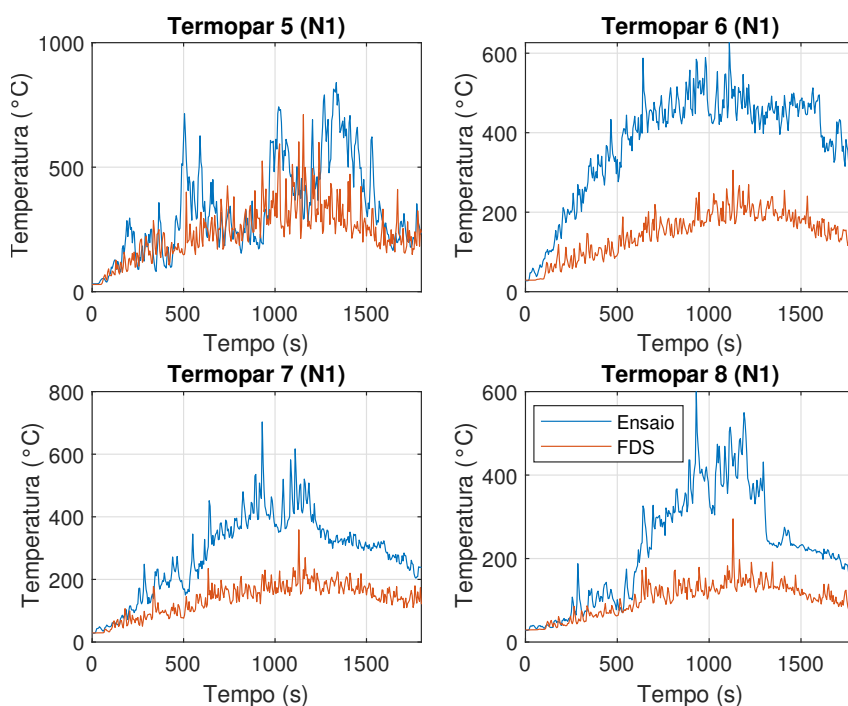


Figura A.6: Termopares 5 a 8 - SIM_002_CALIB_CFD_INT_PIR

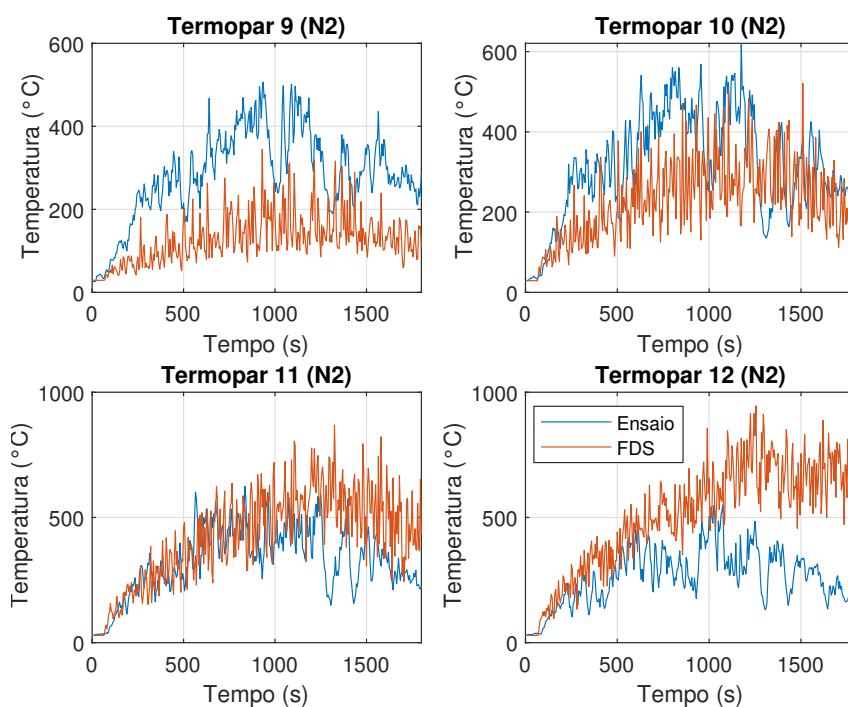


Figura A.7: Termopares 9 a 12 - SIM_002_CALIB_CFD_INT_PIR

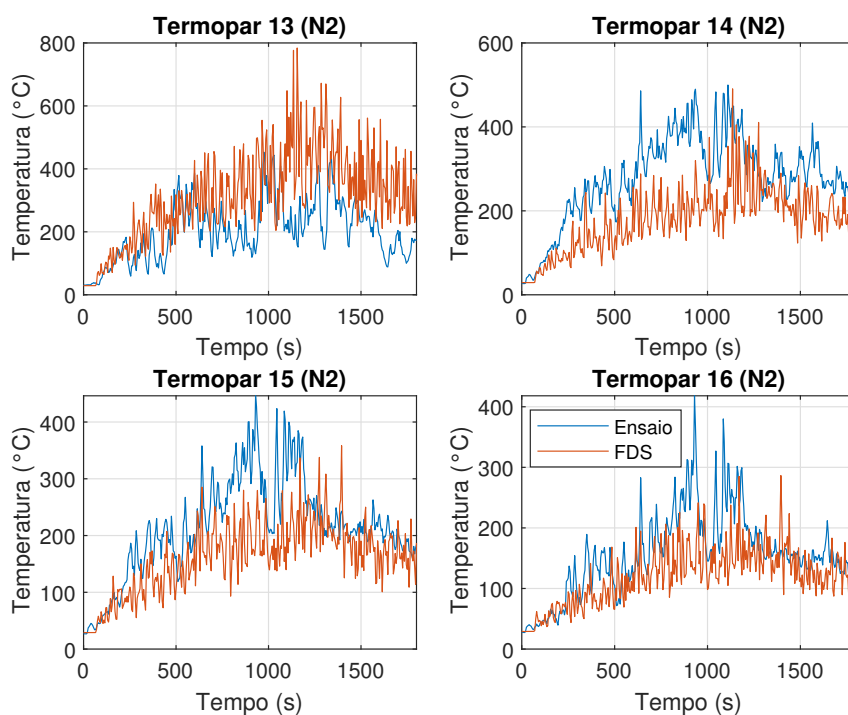


Figura A.8: Termopares 13 a 16 - SIM_002_CALIB_CFD_INT_PIR

A.3 SIM_003_CALIB_CFD_INT_PUR

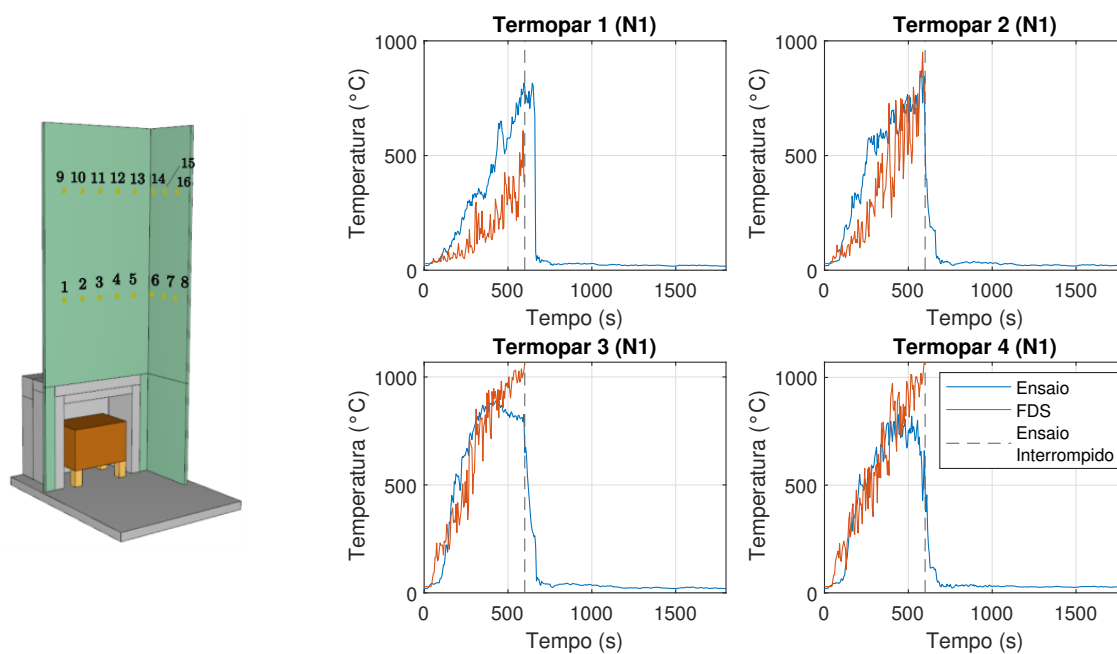


Figura A.9: Termopares 1 a 4 - SIM_003_CALIB_CFD_INT_PUR

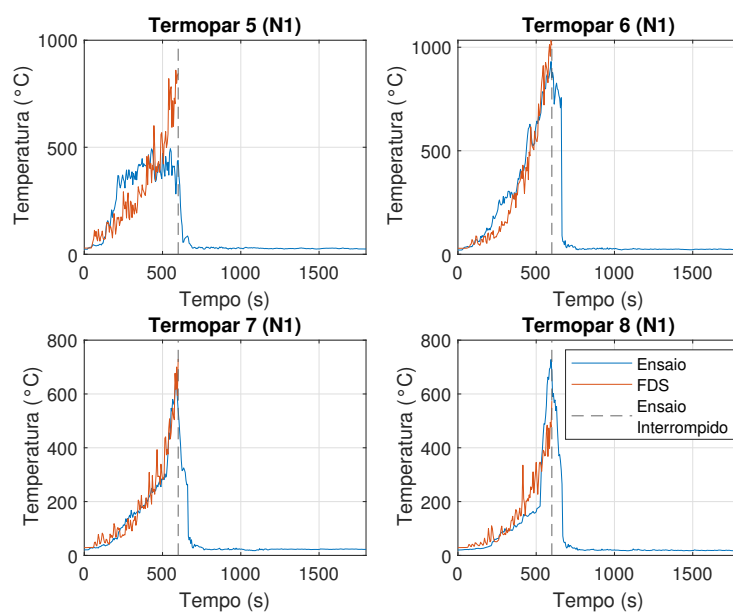


Figura A.10: Termopares 5 a 8 - SIM_003_CALIB_CFD_INT_PUR

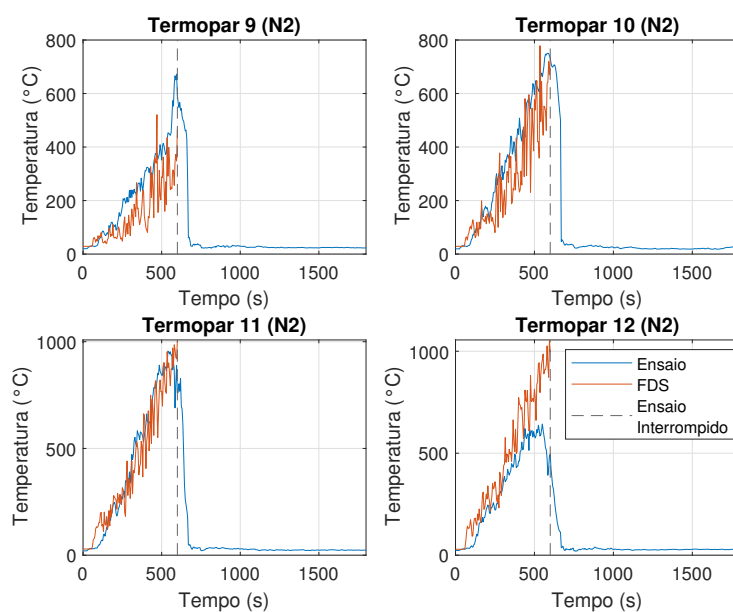


Figura A.11: Termopares 9 a 12 - SIM_003_CALIB_CFD_INT_PUR

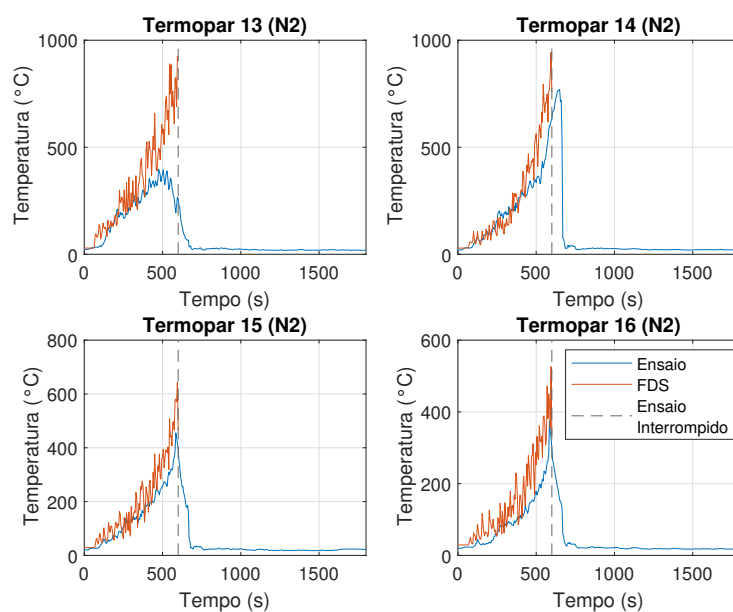


Figura A.12: Termopares 13 a 16 - SIM_003_CALIB_CFD_INT_PUR

A.4 SIM_004_CALIB_CFD_INT_OP

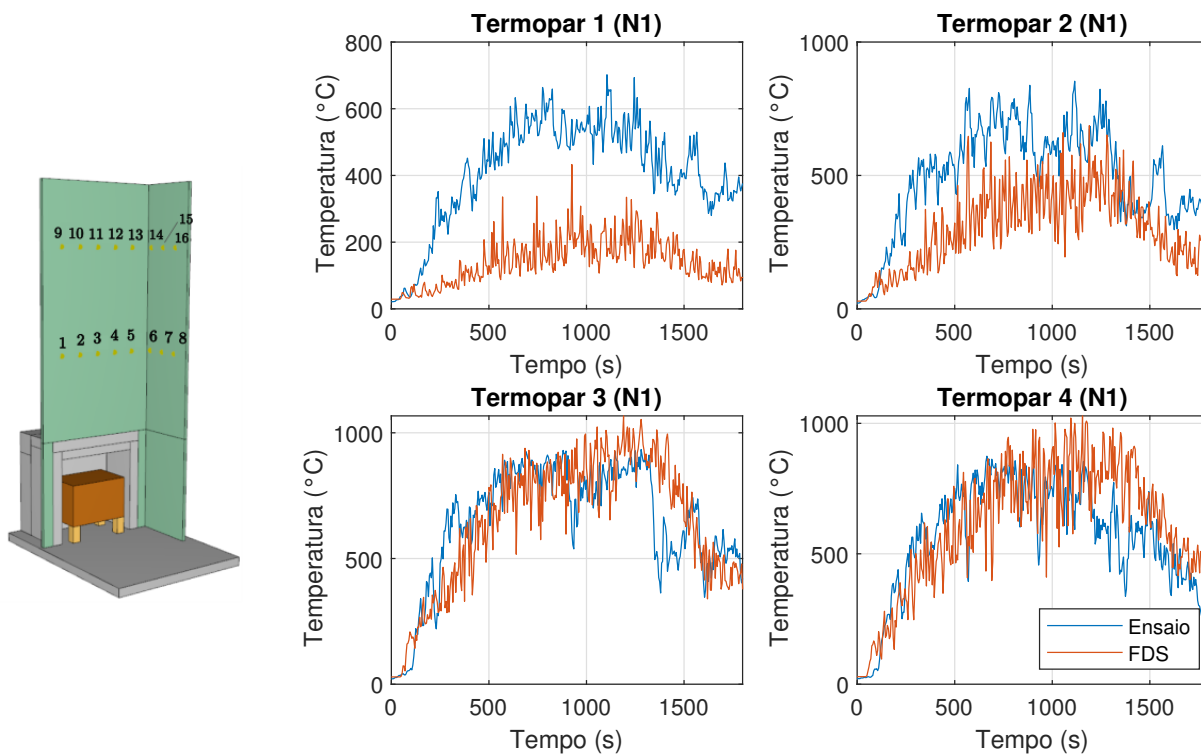


Figura A.13: Termopares 1 a 4 - SIM_004_CALIB_CFD_INT_OP

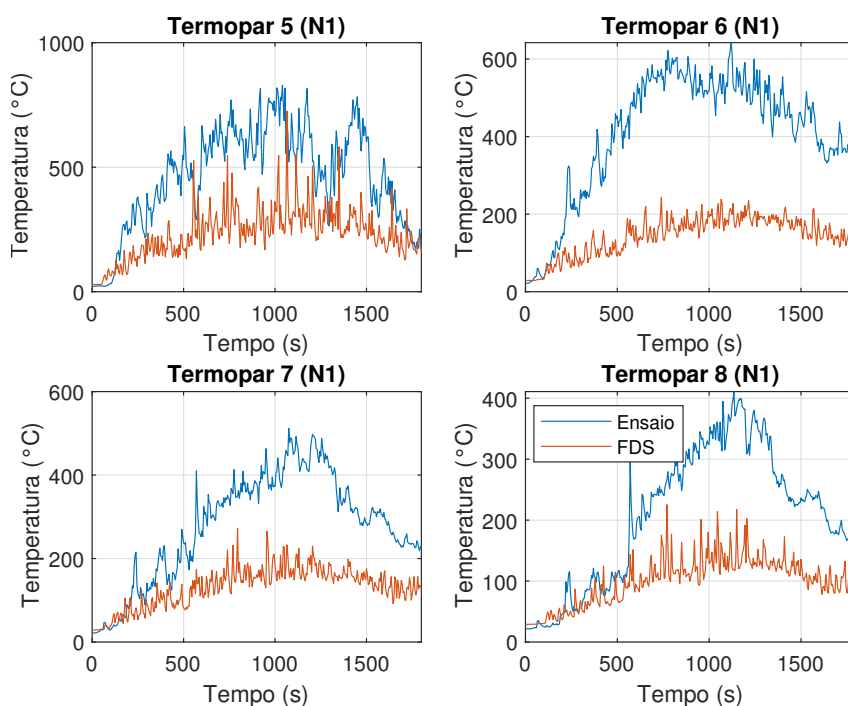


Figura A.14: Termopares 5 a 8 - SIM_004_CALIB_CFD_INT_OP

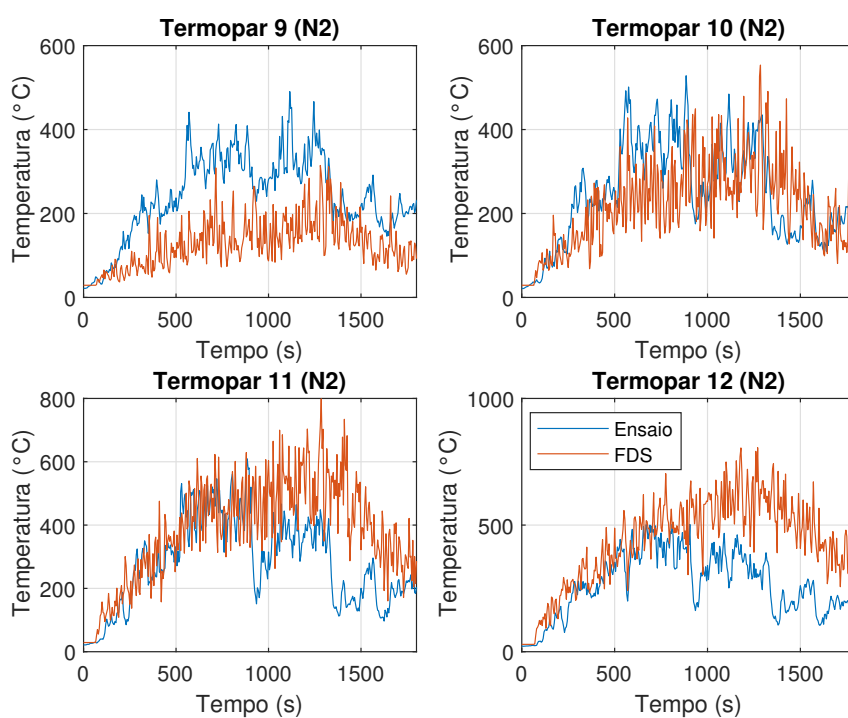


Figura A.15: Termopares 9 a 12 - SIM_004_CALIB_CFD_INT_OP

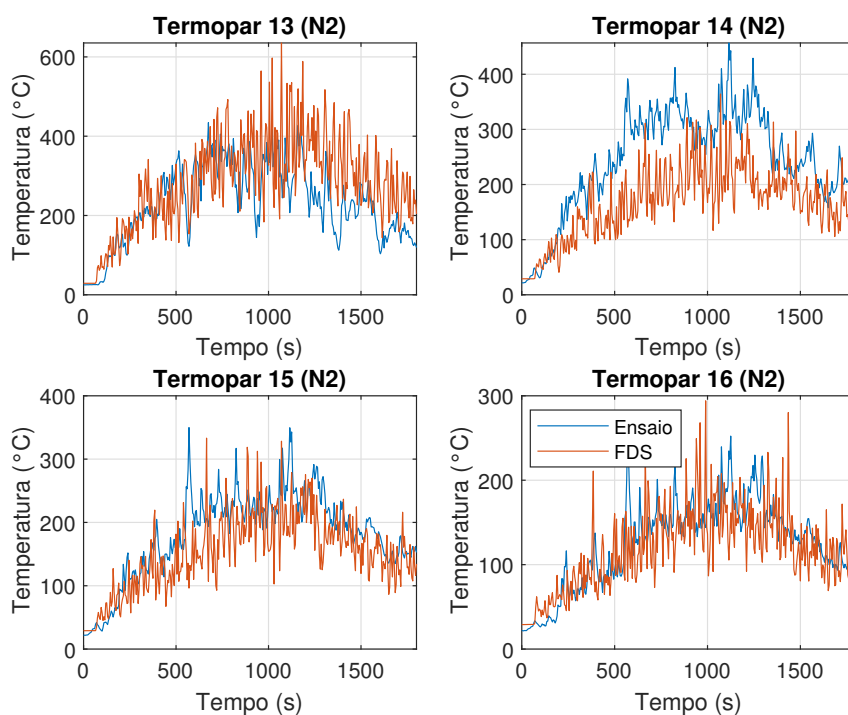


Figura A.16: Termopares 13 a 16 - SIM_004_CALIB_CFD_INT_OP

A.5 SIM_005_CALIB_CFD_EXT_MW

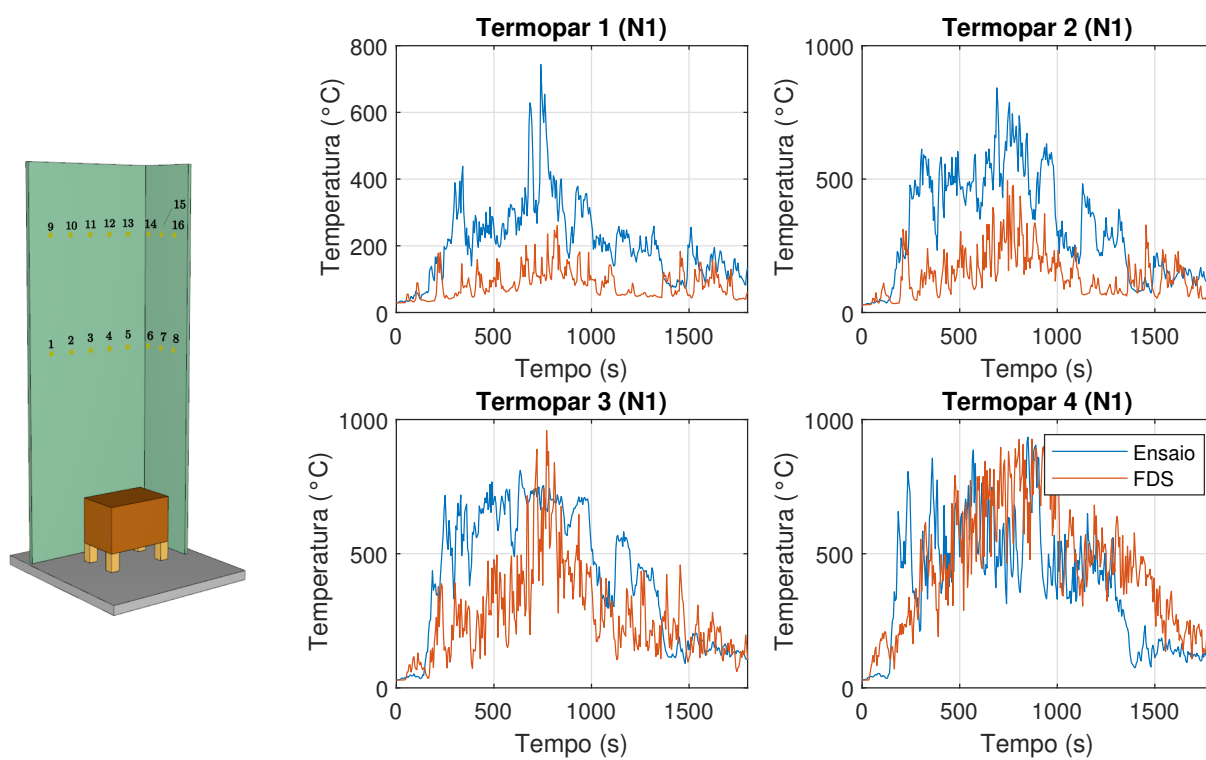


Figura A.17: Termopares 1 a 4 - SIM_005_CALIB_CFD_EXT_MW

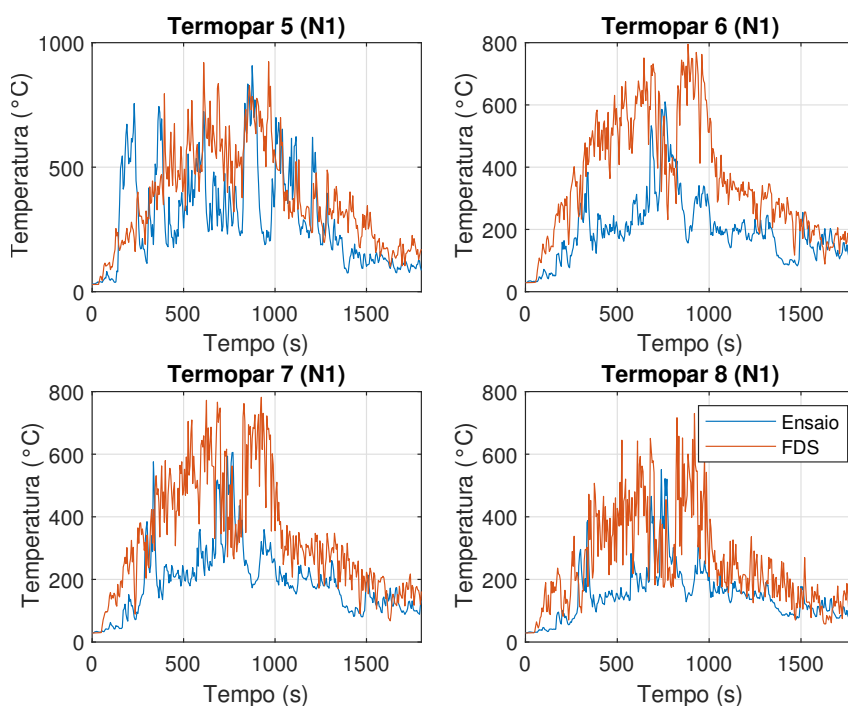


Figura A.18: Termopares 5 a 8 - SIM_005_CALIB_CFD_EXT_MW

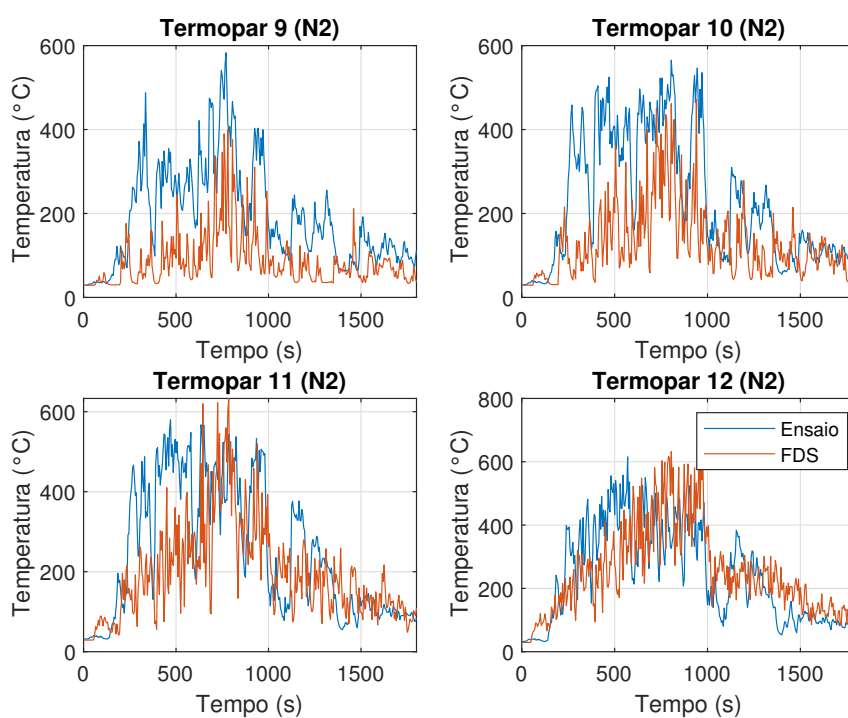


Figura A.19: Termopares 9 a 12 - SIM_005_CALIB_CFD_EXT_MW

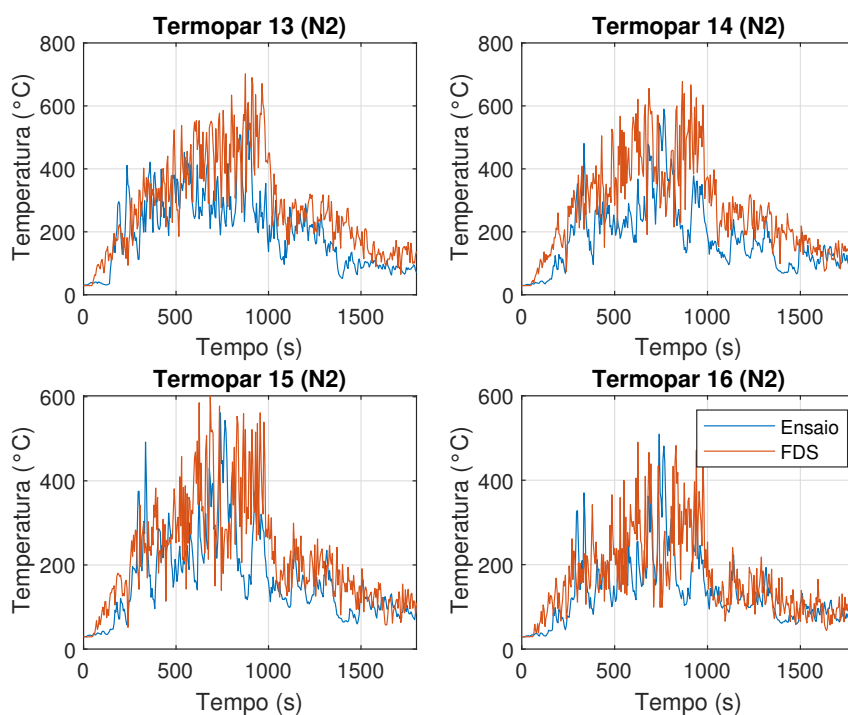


Figura A.20: Termopares 13 a 16 - SIM_005_CALIB_CFD_EXT_MW

A.6 SIM_006_CALIB_CFD_EXT_PIR

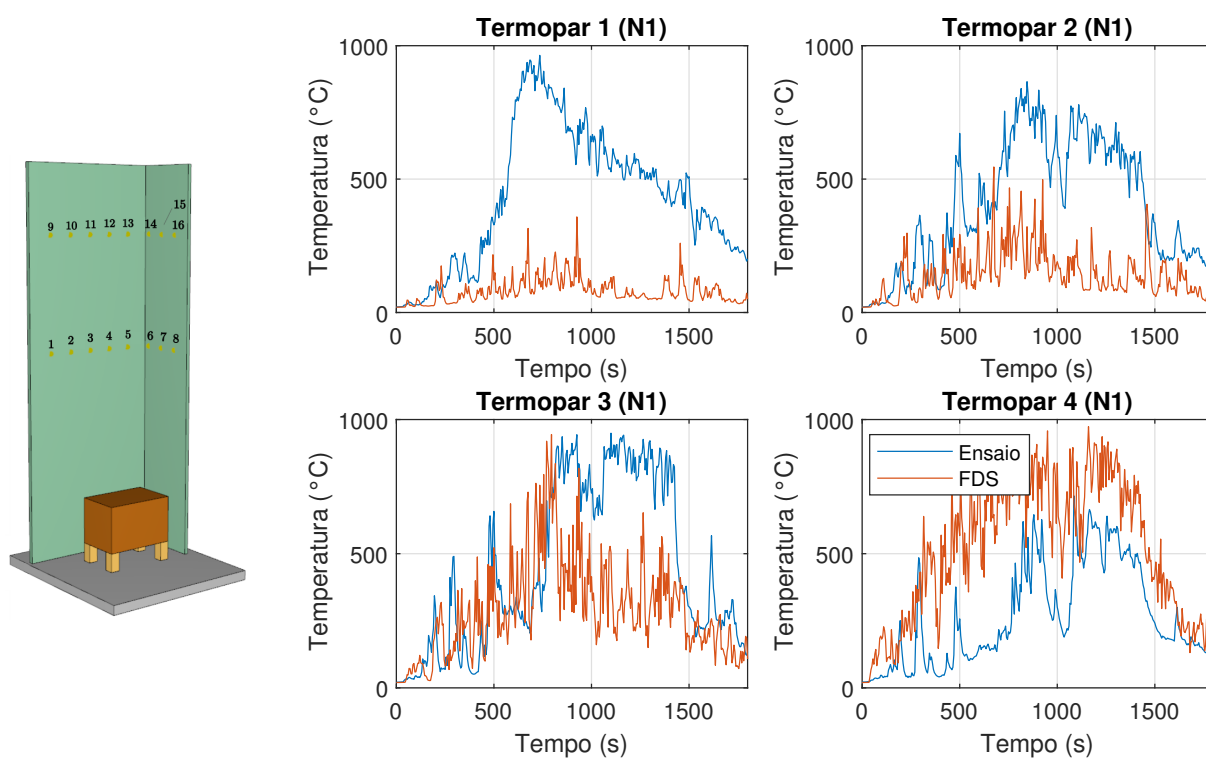


Figura A.21: Termopares 1 a 4 - SIM_006_CALIB_CFD_EXT_PIR

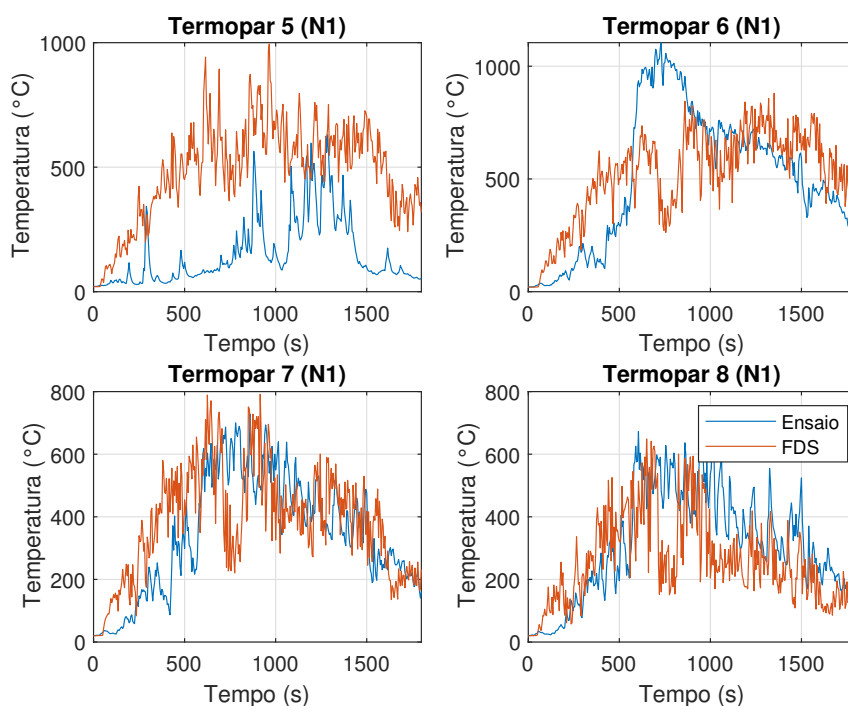


Figura A.22: Termopares 5 a 8 - SIM_006_CALIB_CFD_EXT_PIR

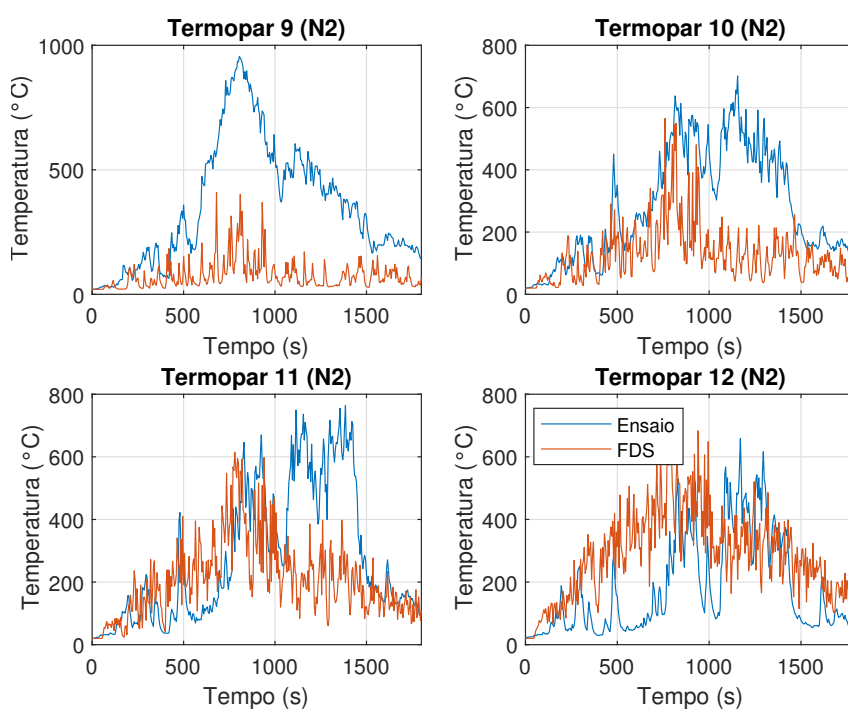


Figura A.23: Termopares 9 a 12 - SIM_006_CALIB_CFD_EXT_PIR

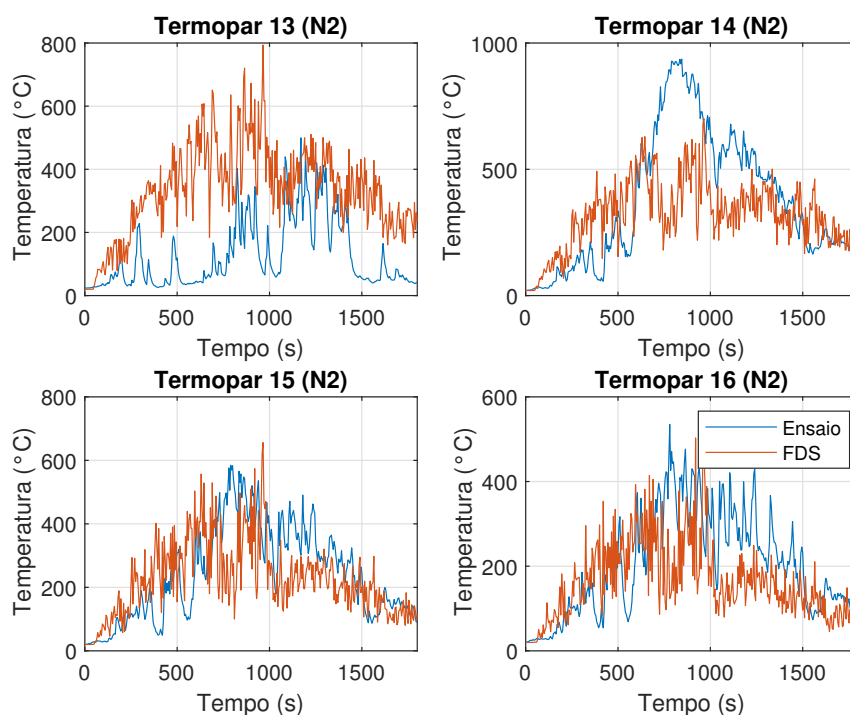


Figura A.24: Termopares 13 a 16 - SIM_006_CALIB_CFD_EXT_PIR

A.7 SIM_007_CALIB_CFD_EXT_PUR

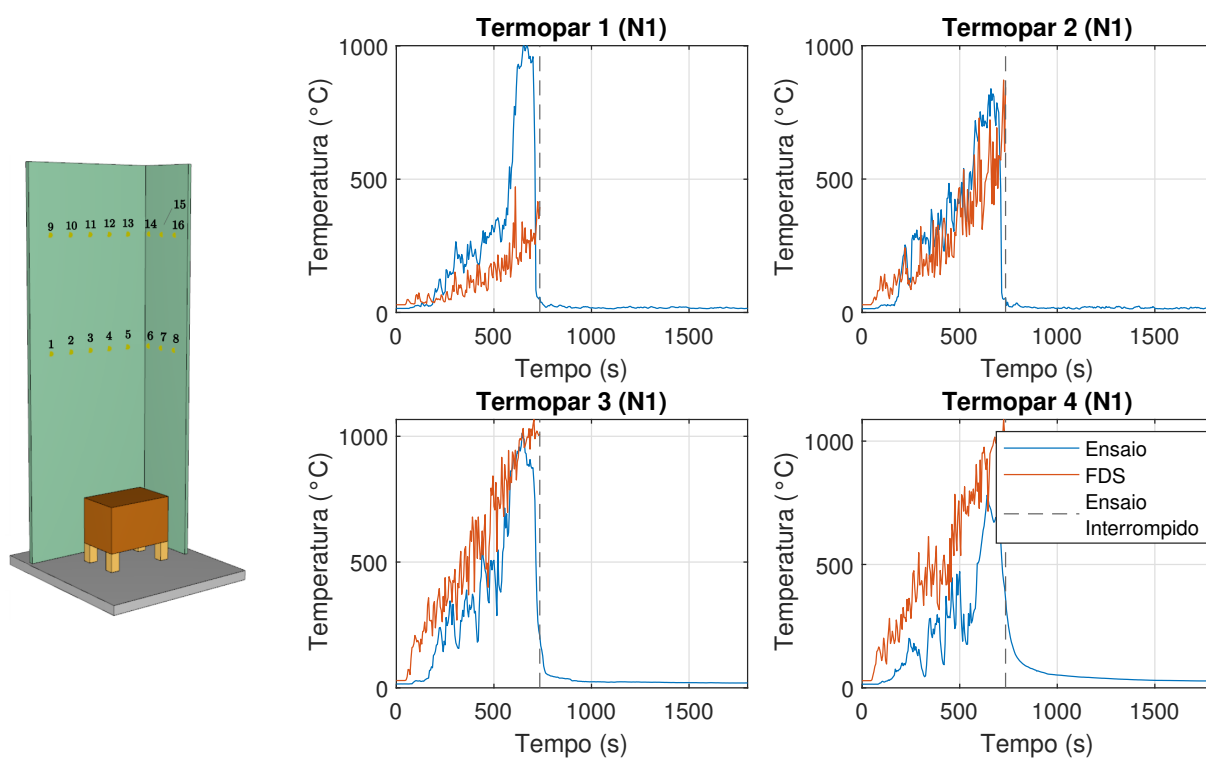


Figura A.25: Termopares 1 a 4 - SIM_007_CALIB_CFD_EXT_PUR

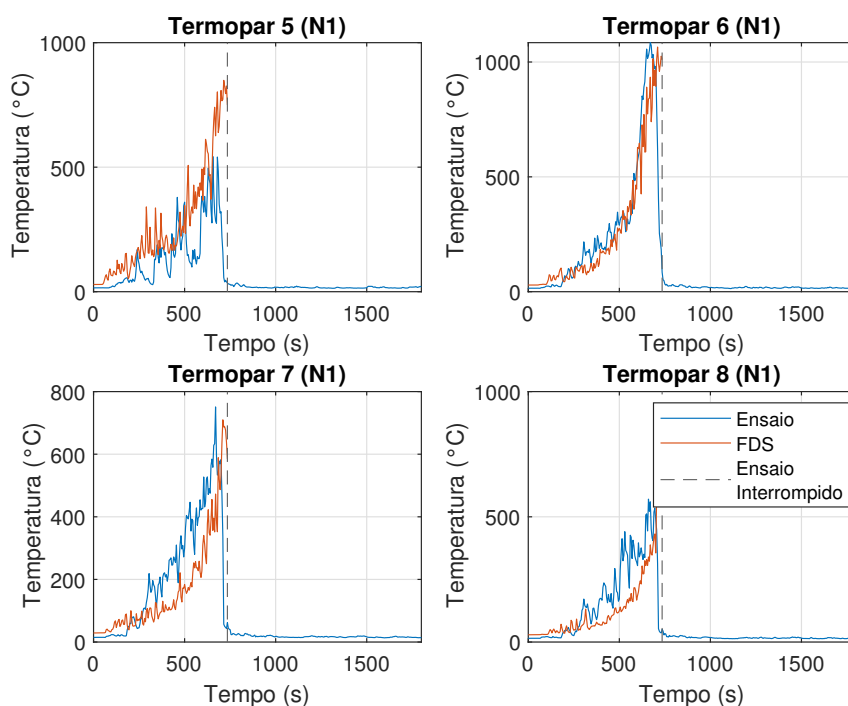


Figura A.26: Termopares 5 a 8 - SIM_007_CALIB_CFD_EXT_PUR

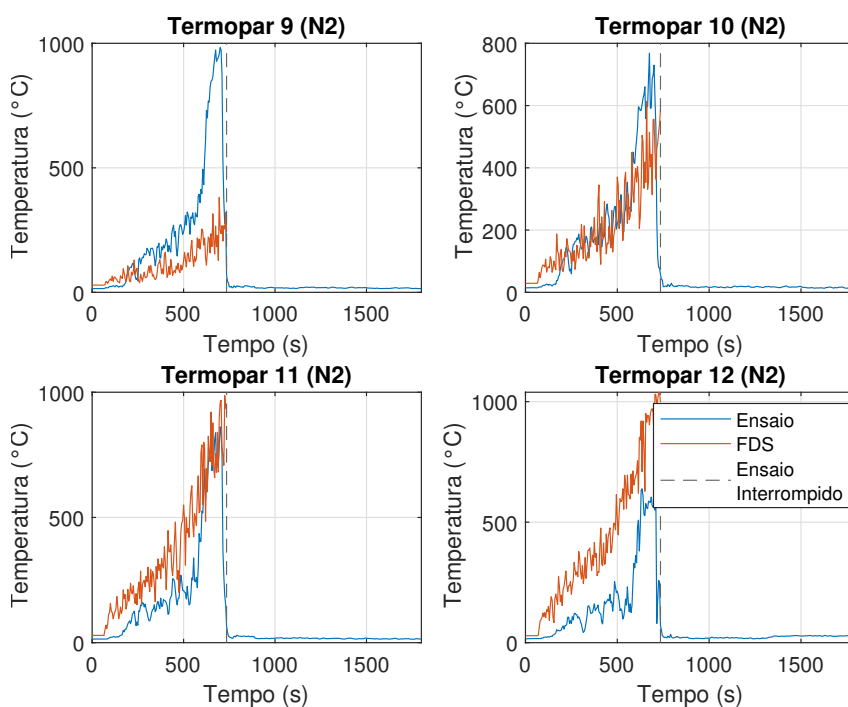


Figura A.27: Termopares 9 a 12 - SIM_007_CALIB_CFD_EXT_PUR

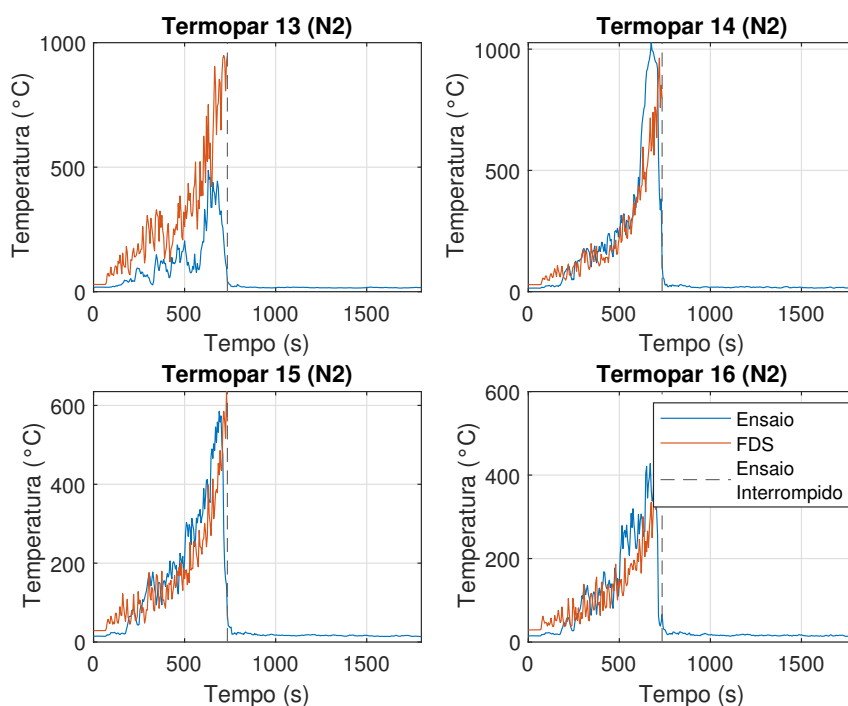


Figura A.28: Termopares 13 a 16 - SIM_007_CALIB_CFD_EXT_PUR

A.8 SIM_008_CALIB_CFD_EXT_OP

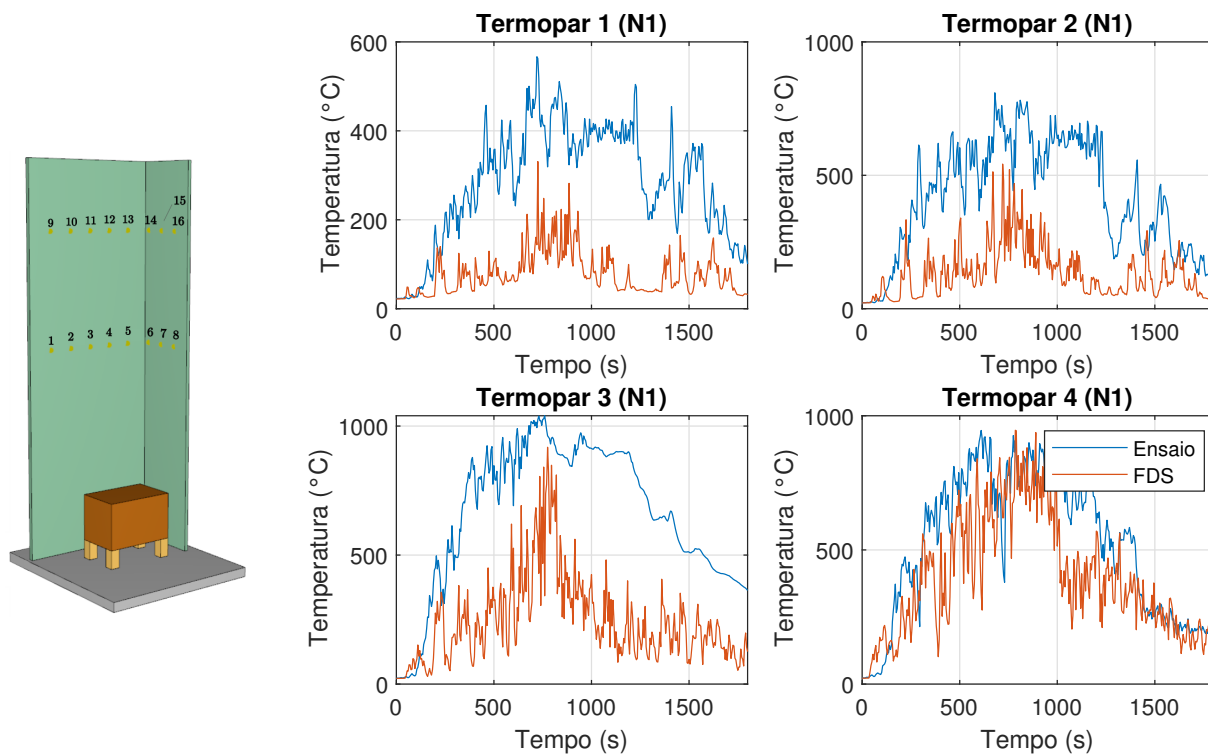


Figura A.29: Termopares 1 a 4 - SIM_008_CALIB_CFD_EXT_OP

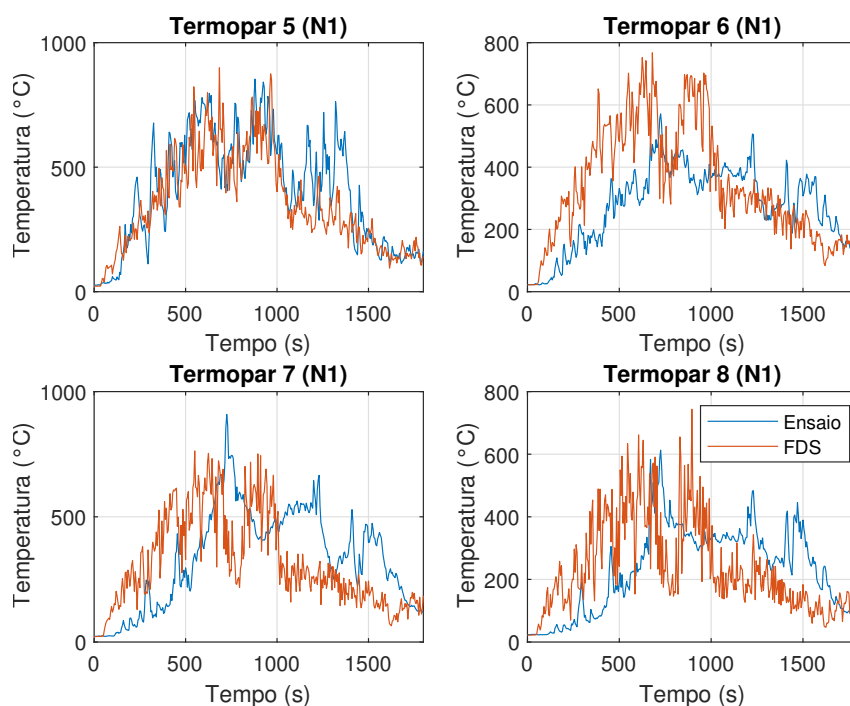


Figura A.30: Termopares 5 a 8 - SIM_008_CALIB_CFD_EXT_OP

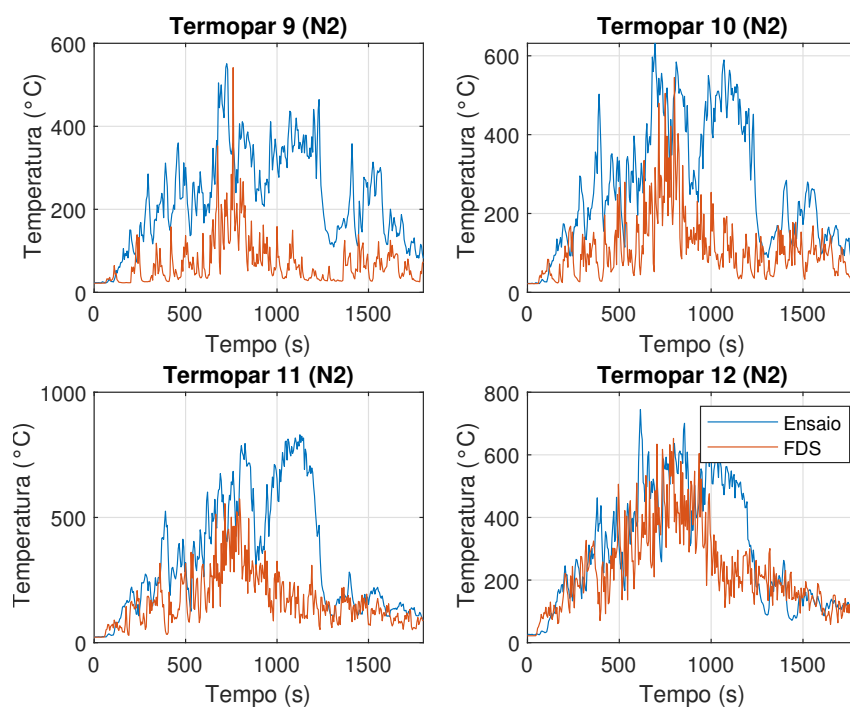


Figura A.31: Termopares 9 a 12 - SIM_008_CALIB_CFD_EXT_OP

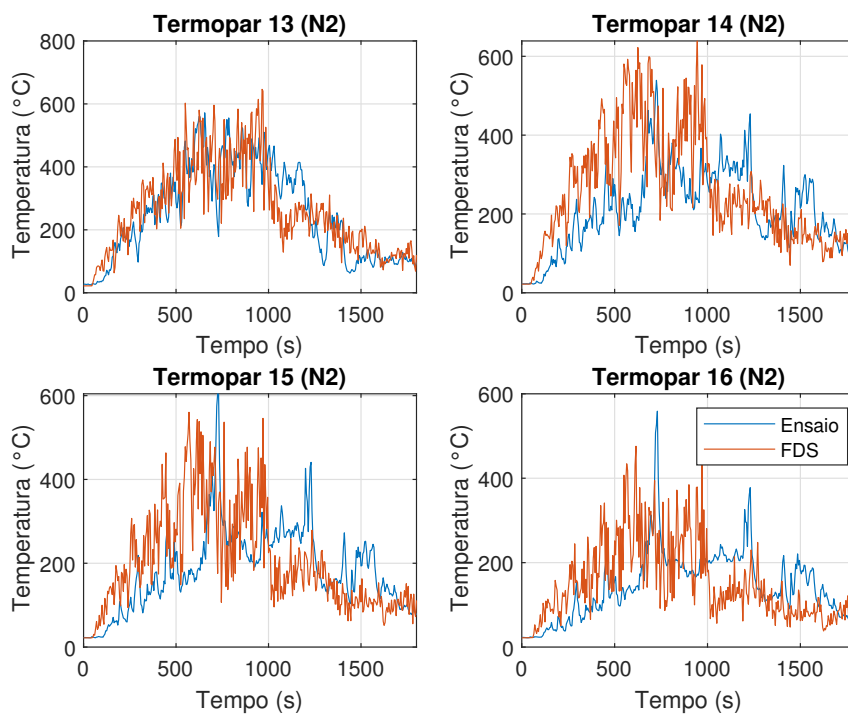


Figura A.32: Termopares 13 a 16 - SIM_008_CALIB_CFD_EXT_OP