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

isise Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering

# Dimensionamento ao fogo de pavilhões industriais e comerciais em estruturas metálicas com o cenário de incêndio natural

**Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Construção Metálica e Mista**

**Autor**

**Pedro Daniel Pinto Taveira Pereira**

**Orientador**

**Professora Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago**

**Professor Doutor Luís Miguel dos Santos Laím**

ISISE, Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Coimbra

**Coimbra, 20-09-2021**

# AGRADECIMENTOS

Quero expressar o meu profundo agradecimento a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Deixo o meu sincero agradecimento aos meus orientadores, a Professora Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago e o Professor Doutor Luís Miguel dos Santos Laím, pela disponibilidade constante, pelos conhecimentos transmitidos, paciência e dedicação, por todas as críticas construtivas e por todos os incentivos prestados.

A toda a minha família, nomeadamente aos meus pais, pelo apoio incondicional, esforço, sacrifício, e confiança ao longo destes anos.

À Dalila pelo apoio e paciência demonstrados no decorrer deste percurso académico.

A todos os amigos e colegas que através do seu companheirismo, amizade e boa disposição permitiram a realização deste trabalho com maior ânimo.

Esta dissertação teve ainda o apoio de fundos nacionais pelo Programa Centro 2020, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), no âmbito do Sistema de Incentivos à Investigação e Desenvolvimento pelo Projeto Switch2Steel – Plataforma de cálculo e otimização do custo de pavilhões industriais e comerciais construídos com estruturas metálicas, com a referência CENTRO-01-0247-FEDER-047136 e o Projeto NANOFIRE - Comportamento térmico e mecânico da Nano Cimentos e sua aplicação na construção de aço como revestimento de proteção contra incêndios, com a referência PTDC/ECI-EGC/31850/2017.

Pedro Daniel Pinto Taveira Pereira

# RESUMO

Uma das grandes limitações na utilização de estrutura metálica em pavilhões de grandes dimensões é o cumprimento dos tempos de resistência ao fogo regulamentares. O método convencional de proteção ao fogo nestas estruturas metálicas é a aplicação de tintas intumescentes, uma vez que é o mais prático de aplicar e o que oferece uma solução esteticamente agradável. Essa solução implica um investimento avultado, podendo em alguns casos anular a competitividade que as estruturas metálicas oferecem.

Para o dimensionamento de uma estrutura em situação de incêndio, os programas de cálculo existentes recorrem essencialmente à curva de incêndio padrão ISO 834, que não é adequada a grandes compartimentos, como espaços comerciais e industriais. Estas simplificações de cálculo conduzem a cenários de incêndio potencialmente irrealistas, não garantindo uma segurança proporcional ao capital investido.

O presente trabalho apresenta uma avaliação das metodologias de dimensionamento de estruturas metálicas em situação de incêndio de forma a permitir uma redução de custos. Pretende-se obter através de estudos numéricos, curvas mais próximas do desenvolvimento real da evolução da temperatura ao longo do tempo de incêndio, otimizando-se assim a proteção ao fogo a aplicar na estrutura.

Realizaram-se dois tipos de avaliações: numa primeira fase recorreu-se a modelos de duas zonas, simulando vários cenários de densidade de carga de incêndio e condições de ventilação. Numa 2ª fase, os cenários mais gravosos foram igualmente simulados através de modelos de dinâmica de fluidos e foram comparados e discutidos os resultados de ambos.

No final do documento, são apresentadas as conclusões mais relevantes, entre elas a não necessidade de proteção adicional contra o fogo dos elementos analisados. São ainda indicadas algumas linhas de desenvolvimento futuro no aprofundamento do tema.

**Palavras-chave:** Grandes compartimentos | Dimensionamento ao fogo | Estruturas metálicas | Modelos de duas zonas | Modelos de dinâmica de fluidos | Análise de temperatura

# ABSTRACT

One of the major limitations associated with steel structures in large compartments is compliance with the regulatory time of fire resistance. The conventional method of fire protection is the application of intumescent paint since it is the most practical method and the one that offers an aesthetically pleasing solution. This solution implies a large investment, and in some cases, it can reduce the competitiveness of steel structures.

The existing calculation software for the design of a structure in a fire situation essentially uses the standard ISO 834 curve, which is not suitable for large rooms, such as commercial and industrial buildings. These calculation simplifications lead to potentially unrealistic fire scenarios, not guaranteeing safety proportional to the invested capital.

The present work focuses on the evaluation of the design methodologies of steel structures in a fire situation, in order to allow a cost reduction. It is intended to obtain, through numerical studies, curves closer to the real development of temperature, thus optimizing the fire protection to be applied to the structure.

Two types of evaluations were made in a first phase, two zone models were used, simulating various fire load density scenarios and ventilation conditions. In a second phase, the most serious scenarios were also simulated using fluid dynamics models and the results of both were compared and discussed.

Finally, the most relevant conclusions are drawn and some lines of future development are indicated.

**Keywords:** Large compartments | Fire design | Steel structures | Two-zone models | Fluid dynamics models | Temperature analysis

# ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO ..... 1
1.1 Enquadramento do tema ..... 1
1.2 Organização da dissertação ..... 2
2 ESTRUTURAS METÁLICAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: ENQUADRAMENTO E ESTADO DA ARTE ..... 5
2.1 Proteção de estruturas metálicas em situação de incêndio ..... 5
2.1.1 Métodos de proteção de estruturas metálicas ..... 6
2.1.1.1 Revestimento em betão ..... 6
2.1.1.2 Revestimento com placas ..... 7
2.1.1.3 Materiais projetados ..... 7
2.1.1.4 Pintura com tintas intumescentes ..... 8
2.1.1.5 Revestimento com mantas ..... 9
2.1.1.6 Proteção com alvenaria ..... 10
2.1.1.7 Proteção com madeira ..... 10
2.1.1.8 Enchimento com água ..... 10
2.2 Incêndios naturais em grandes compartimentos ..... 11
2.2.1 Condições gerais ..... 11
2.2.2 Enquadramento prescritivo ..... 12
2.2.3 Escolha da abordagem ideal ..... 14
2.2.4 Estudos numéricos ..... 18
2.2.4.1 Centro de exposições em Taiyuan ..... 18
2.2.4.2 Pavilhão desportivo em Pequim ..... 22
2.2.5 Estudos experimentais ..... 24
2.2.5.1 “Parc des Expositions” em Paris ..... 24
2.2.5.2 Ensaio no Laboratório da Universidade de Minas e Tecnologia da China ..... 29
2.2.5.3 Ensaios no Centro de Testes de Múrcia ..... 32
2.2.5.4 Ensaio de uma Cobertura em Treliça Metálica ..... 36
2.3 Requisitos de resistência ao fogo ..... 42
2.3.1 Portugal ..... 42
2.3.2 Espanha ..... 43
2.3.3 Inglaterra ..... 43

2.3.4 França ... 43
2.3.5 Bélgica ... 44
2.3.6 Resumo ... 44
2.4 Pavilhões industriais e comerciais comuns em Portugal ... 45
3 APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO E ANÁLISE ... 49
3.1 Preâmbulo ... 49
3.2 Apresentação do caso de estudo ... 49
3.3 Dimensionamento à temperatura ambiente ... 50
3.3.1 Ações ... 50
3.3.1.1 Peso próprio dos elementos estruturais ... 50
3.3.1.2 Restantes cargas permanentes ... 51
3.3.1.3 Sobrecarga ... 51
3.3.1.4 Ação da temperatura ... 51
3.3.1.5 Ação da neve ... 51
3.3.1.6 Ação do vento ... 51
3.3.1.7 Ação sísmica ... 52
3.3.2 Combinações ... 52
3.3.2.1 Estados limites últimos ... 52
3.3.2.2 Estados limites de serviço ... 52
3.3.3 Análise ... 53
3.4 Dimensionamento em situação de incêndio ... 54
3.4.1 Determinação da temperatura crítica através da combinação acidental ... 56
3.4.2 Determinação da temperatura crítica através do fator de redução de 0.65 ... 57
3.4.3 Discussão ... 57
3.5 Ações térmicas para análise de temperatura ... 58
3.5.1 Curva de incêndio padrão ... 59
3.5.2 Curvas de incêndio paramétricas ... 60
3.5.3 Curvas de incêndio paramétricas modificadas ... 65
3.5.4 Incêndios localizados ... 68
3.6 Análise de custos para métodos de proteção ao fogo ... 72
3.7 Considerações finais ... 74
4 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE INCÊNDIO PARA O CASO DE ESTUDO ... 75
4.1 Preâmbulo ... 75
4.2 Simulação através do programa CFAST ... 81
4.2.1 Definição do modelo e parâmetros de entrada ... 82
4.2.2 Resultados ... 85

4.3 Simulação através do programa FDS ..... 95
4.3.1 Definição do modelo e parâmetros de entrada ..... 95
4.3.2 Análise de sensibilidade de malha ..... 97
4.3.3 Resultados ..... 101
4.4 Outros estudos paramétricos ..... 112
4.4.1 Aumento das dimensões em planta do compartimento ..... 112
4.4.2 Ignição a 2 m do pavimento ..... 114
4.5 Considerações finais ..... 116
5 CONCLUSÕES ..... 121
5.1 Conclusões finais ..... 121
5.2 Sugestões para trabalhos futuros ..... 123
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 125
ANEXO A. ..... A-1
ANEXO B. ..... B-1

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Viga e coluna metálicas protegidas com placas [5] ..... 7
Figura 2.2 - Proteção com materiais projetados numa viga metálica que suporta uma laje de betão pré-fabricada [5] ..... 8
Figura 2.3 - Estrutura metálica protegida com tinta intumescente [8] ..... 9
Figura 2.4 - Coluna totalmente embutida em paredes de alvenaria [8] ..... 10
Figura 2.5 - Taxa de libertação de calor de um edifício industrial (adaptado de [10]) ..... 11
Figura 2.6 - Curvas de temperatura nominais (adaptado de [16]) ..... 13
Figura 2.7 - Influência da altura da zona sem fumo (zona de ar frio) na ignição de materiais combustíveis presentes no compartimento (adaptado de [17]) ..... 15
Figura 2.8 - Curva da taxa de libertação de calor e respetivas fases (adaptado de [24]) ..... 17
Figura 2.9 - Planta e áreas das diferentes zonas do centro de exposições de Taiyuan (adaptado de [12]) ..... 18
Figura 2.10 - Localização dos focos de incêndio no centro de exposições em Taiyuan (adaptado de [12]) ..... 19
Figura 2.11 - Modelo desenvolvido para a simulação do centro de exposições de Taiyuan (adaptado de [12]) ..... 20
Figura 2.12 - Previsão de distribuição de fumo e gases para os cenários 1 e 3 da simulação do centro de exposições de Taiyuan (adaptado de [12]) ..... 21
Figura 2.13 - Previsão da distribuição de temperaturas para os cenários 1 e 3 (a uma altura de 12 m) para a simulação do centro de exposições de Taiyuan (adaptado de [12]) ..... 22
Figura 2.14 - Esquema estrutural do pavilhão desportivo em Pequim (adaptado de [25]) ..... 22
Figura 2.15 - Modelo do pavilhão desportivo em Pequim (adaptado de [25]) ..... 23
Figura 2.16 - Cenário de incêndio admitido na simulação do pavilhão desportivo de Pequim (adaptado de [25]) ..... 23
Figura 2.17 - Distribuição de temperatura aos 1134 s ma simulação do pavilhão desportivo de Pequim (adaptado de [25]) ..... 24
Figura 2.18 - Planta e localização dos cortes do edifício “Parc des expositions” em Paris (adaptado de [17]) ..... 25
Figura 2.19 - Corte do edifício “Parc des expositions” em Paris (adaptado de [17]) ..... 25
Figura 2.20 - Posição dos termopares numa secção-tipo no “Parc des expositions” em Paris [17] ..... 26
Figura 2.21 - Temperatura do compartimento na secção A-A para o primeiro teste no “Parc des expositions” em Paris (adaptado de [17]) ..... 26
Figura 2.22 - Temperatura do compartimento na secção B-B para o primeiro teste no “Parc des expositions” em Paris (adaptado de [17]) ..... 27
Figura 2.23 - Temperatura do compartimento na secção C-C para o primeiro teste no “Parc des expositions” em Paris (adaptado de [17]) ..... 27
Figura 2.24 - Temperatura do compartimento na secção A-A para o segundo teste no “Parc des expositions” em Paris (HRR de 6.29MW) (adaptado de [17]) ..... 28
Figura 2.25 – Edifício onde foi realizado o ensaio experimental na Universidade de Minas e Tecnologia da China (adaptado de [26]) ..... 29

Figura 2.26 - Disposição dos dispositivos de aquisição de dados. a) foto do edifício e disposição de equipamentos; b) esquema 3D (adaptado de [26]) ..... 30
Figura 2.27 - Processo de desenvolvimento do incêndio no ensaio experimental na Universidade de Minas e Tecnologia da China [26] ..... 31
Figura 2.28 - Temperatura registada em altura no ensaio experimental na Universidade de Minas e Tecnologia da China (adaptado de [26]) ..... 31
Figura 2.29 - Distribuição espacial dos valores médios da temperatura do incêndio na fase de pleno desenvolvimento no ensaio experimental na Universidade de Minas e Tecnologia da China (adaptado de [26]) ..... 32
Figura 2.30 - Fotografia das instalações utilizadas para os estudos experimentais em Múrcia, Espanha [28] ..... 33
Figura 2.31 - Esquema tridimensional e dimensões das instalações de teste em Múrcia, Espanha (adaptado de [28]) ..... 33
Figura 2.32 - Comparação entre a temperatura medida e as previsões para diferentes malhas utilizadas nas simulações para o teste com 1.32 MW. a) temperatura a 12.55 m de altura no eixo da pluma; b) temperatura nas aberturas da cobertura c) temperatura a 10 m de altura junto a parede A [28] ..... 34
Figura 2.33 - Medições de temperatura identificadas pelo número dos termopares e resultados das simulações realizadas para o Teste 2 (2.28 MW). a) temperaturas a 4.55 m de altura; b) temperatura a 8.55 m de altura; c) temperatura a 12.55 m de altura; d) temperatura nas aberturas da cobertura [28] ..... 35
Figura 2.34 - Medições de temperatura identificadas pelo número dos termopares e resultados das simulações realizadas para o Teste 3 (2.34 MW). a) temperaturas a 4.55 m de altura; b) temperatura a 8.55 m de altura; c) temperatura a 12.55 m de altura; d) temperatura nas aberturas da cobertura [28] ..... 35
Figura 2.35 - Configuração geral do ensaio. a) foto do compartimento; b) planta da cobertura (adaptado de [29]) ..... 36
Figura 2.36 - Localização do incêndio nos dois cenários não destrutivos. a) cenário 1; b) cenário 2 (adaptado de [29]) ..... 37
Figura 2.37 - Localização dos berços de madeira para o terceiro cenário (adaptado de [29]) 37
Figura 2.38 - Localização dos termopares (adaptado de [29]) ..... 38
Figura 2.39 - Aspeto do ensaio para o Cenário 1 e 2 no momento do registo do altura máxima de chama (adaptado de [29]) ..... 39
Figura 2.40 - Temperatura registada para o cenário 1. a) temperatura no ar; b) temperatura nos elementos estruturais da cobertura [29] ..... 39
Figura 2.41 - Temperatura registada para o cenário 2. a) temperatura no ar; b) temperatura nos elementos estruturais da cobertura [29] ..... 40
Figura 2.42 - Temperatura registada para o cenário 3. a) temperatura no ar; b) temperatura na corda superior da treliça de cobertura; c) temperatura na corda inferior da treliça de cobertura; d) temperatura nos nós da treliça de cobertura; f) comparação entre a temperatura do ar e a temperatura dos elementos estruturais [29] ..... 41
Figura 2.43 - Aspeto do ensaio para o Cenário 3 aos 600 s [29] ..... 42
Figura 3.1 - Dimensões do pavilhão industrial e comercial proposto como caso de estudo ... 49
Figura 3.2 - Corte transversal tipo do pavilhão industrial e comercial proposto ..... 50
Figura 3.3 – Diagrama de momentos fletores do pórtico em estudo para a combinação em estado limite último mais gravosa (ação variável base sobrecarga com ação acompanhante temperatura) ..... 54

Figura 3.4 - Deformada do pórtico em estudo numa análise de 1ª ordem para a combinação em estado limite de serviço mais gravosa: ação variável base vento com ação acompanhante temperatura (valores em mm) ..... 54
Figura 3.5 - Temperatura no compartimento através da curva de incêndio padrão, temperatura no aço e temperatura crítica em: a) coluna; b) viga. ..... 60
Figura 3.6 - Curva de incêndio paramétrica obtida, comparação com curva padrão e resposta térmica de uma coluna e viga do caso de estudo ..... 65
Figura 3.7 - Corte vertical no compartimento com aberturas horizontais e verticais (adaptado de [51]) ..... 66
Figura 3.8 - Curva de incêndio paramétrica modificada obtida, comparação com curva padrão e resposta térmica de uma coluna e viga do caso de estudo ..... 67
Figura 3.9 - Esquema do modelo de incêndio localizado presente na EN1991-1-2 [13] ..... 69
Figura 3.10 - Curva da taxa de libertação de calor obtida no programa Elefir-EN [51] para o modelo de incêndios localizados ..... 70
Figura 3.11 - Comprimento das chamas obtido no programa Elefir-EN [51] ..... 70
Figura 3.12 – Curva de temperatura obtida para o compartimento e para o elemento estrutural coluna a uma altura de 2.05 m no programa Elefir-EN [51] ..... 71
Figura 3.13 - Curva de temperatura obtida para o compartimento e para o elemento estrutural viga a uma altura de 2.05 m no programa Elefir-EN [51] ..... 71
Figura 3.14 - Curva de temperatura obtida para o compartimento e para o elemento estrutural coluna a uma altura de 1 m no programa Elefir-EN [51] ..... 72
Figura 4.1 - Aberturas na cobertura consideradas para as simulações realizadas ..... 76
Figura 4.2 - Aberturas na fachada consideradas para as simulações realizadas ..... 77
Figura 4.3 - Aberturas na fachada e cobertura consideradas para as simulações realizadas ..... 77
Figura 4.4 – Cenário de ignição junto a uma coluna nas simulações realizadas ..... 78
Figura 4.5 - Cenário de ignição junto a uma viga nas simulações realizadas ..... 78
Figura 4.6 - Taxa de libertação de calor para cada cenário de categoria de risco e área de incêndio ..... 81
Figura 4.7 - Esquema de volumes de controlo de um modelo de duas zonas (adaptado de [58]) ..... 82
Figura 4.8 - Caso de estudo modelado no CFAST recorrendo ao conceito de multi-compartimentos (compartimentos numerados de 1 a 6): a) aberturas na cobertura (AbCob); b) aberturas na fachada (AbFach); c) aberturas na fachada e cobertura (AbFachCob) ..... 83
Figura 4.9 - Implantação dos sensores de medição de temperatura e fluxo de calor por radiação no CFAST ..... 85
Figura 4.10 - Temperatura da camada superior obtida no CFAST para os cenários com aberturas na cobertura para a 2ª e 3ª categoria de risco ..... 86
Figura 4.11 - Mapa de temperaturas obtidas (corte longitudinal no eixo da pluma) no programa CFAST para o caso 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna ..... 87
Figura 4.12 - Mapa de temperaturas obtidas (corte longitudinal no eixo da pluma) no programa CFAST para o caso 3Cat_A36_AbCob_H_IgnViga ..... 88
Figura 4.13 - Temperatura da camada superior obtida no CFAST para os três cenários de aberturas, com incêndio definido como 3ª categoria de risco, área de 36 $m^2$, e ignição junto a uma coluna ..... 90
Figura 4.14 - Fluxo de calor por radiação a 1 m de altura do pavimento para o caso 3Cat_A36_AbCob_H_IgnViga ..... 92
Figura 4.15 - Temperatura da camada superior obtida no CFAST para os três cenários de aberturas e variação da altura do compartimento, com incêndio definido como 3ª categoria de risco, área de 36 $m^2$ e ignição junto a uma coluna ..... 93

Figura 4.16 - Temperatura do gás próximo do sensor colocado no eixo da pluma para três cenários de aberturas, com incêndio definido como 3ª categoria de risco, área de 36 $m^2$, e ignição junto a uma coluna ..... 94
Figura 4.17 - Caso de estudo modelado no FDS: a) aberturas na cobertura (AbCob); b) aberturas na fachada (AbFach); c) aberturas na fachada e cobertura (AbFachCob) ..... 96
Figura 4.18 - Implantação dos sensores de medição de temperatura e fluxo de calor por radiação no FDS ..... 96
Figura 4.19 - Malha definida para análise de sensibilidade de malha com dimensões 0.50 m x 0.50 m x 0.50 m (32 760 células)..... 98
Figura 4.20 - Malha definida para análise de sensibilidade de malha com dimensões 0.25 m x 0.25 m x 0.25 m (262 080 células)..... 99
Figura 4.21 - Malha definida para análise de sensibilidade de malha com dimensões 0.50 m a 0.125 m (68 965 células)..... 99
Figura 4.22 - Curvas de temperatura obtidas no eixo da pluma junto ao teto do compartimento, para as três malhas em estudo na análise de sensibilidade de malha..... 100
Figura 4.23 – Fluxo de calor por radiação obtido para as três malhas em estudo na análise de sensibilidade de malha ..... 100
Figura 4.24 - Temperatura obtida no sensor colocado no eixo do incêndio a altura do compartimento para o cenário 3Cat_A36_AbFach_H_IgnViga, com representação dos valores calculados para a média e quantilho 80% da fase de desenvolvimento do incêndio..... 103
Figura 4.25 – Fluxo de calor por radiação obtido para o cenário 3Cat_A36_AbFach_H_IgnViga no FDS, com representação dos valores calculados para a média e quantilho 80%..... 104
Figura 4.26 - Mapa de temperaturas obtidas e fumo gerado no programa FDS para o caso 3Cat_A36_AbFach_H_IgnViga..... 105
Figura 4.27 - Mapa de temperaturas obtidas e fumo gerado no programa FDS para o caso 3Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna..... 105
Figura 4.28 - Temperatura obtida no FDS para o sensor colocado no eixo do incêndio a altura do compartimento para o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna e temperatura da camada superior obtida no CFAST ..... 107
Figura 4.29 - Taxa de libertação de calor obtida no FDS para o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna..... 107
Figura 4.30 - Vetores de velocidade obtidos num plano no eixo das aberturas da cobertura para o instante 760 s no cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna (valores em m/s) ..... 108
Figura 4.31 - Vetores de velocidade obtidos num plano no eixo das aberturas da cobertura para o instante 877 s no cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna (valores em m/s) ..... 109
Figura 4.32 - Vetores de velocidade obtidos num plano no eixo das aberturas da cobertura para o instante 884 s no cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna (valores em m/s) ..... 109
Figura 4.33 - Vetores de velocidade obtidos num plano no eixo das aberturas da cobertura para o instante 1556 s no cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna (valores em m/s) ..... 110
Figura 4.34 - Temperatura obtida no FDS para o sensor colocado junto às colunas para o cenário 3Cat_A36_AbCob2.25_H_IgnColuna e temperatura da camada superior obtida no CFAST para o mesmo cenário ..... 111
Figura 4.35 - Temperatura obtida no FDS para o sensor colocado junto às colunas para o cenário 3Cat_A36_AbFachCob2.25_H_IgnColuna e temperatura da camada superior obtida no CFAST para o mesmo cenário ..... 111
Figura 4.36 - Caso de estudo 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna_20x40 modelado no CFAST recorrendo ao conceito de multi-compartimentos..... 113

Figura 4.37 - Temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para o cenário com dimensões em planta de 20 m x 40 m (3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna_20x40) e comparação com o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna ..... 113
Figura 4.38 - Mapa de temperaturas obtidas aos 6000 s (corte longitudinal no eixo da pluma) no programa CFAST para o caso 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna2m ..... 114
Figura 4.39 - Temperatura da camada superior e temperatura do gás próximo do sensor colocado no eixo da pluma obtida no programa CFAST para o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna e 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna2m ..... 115
Figura 4.40 - Curva de temperatura obtida através dos valores máximos obtidos através das simulações e comparação com a curva ISO 834 ..... 118
Figura 4.41 - Temperatura obtida nos elementos estruturais a partir da curva de temperatura máxima ..... 118

# ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1: Parâmetros recomendados para definir um incêndio em grandes compartimentos em função da ocupação prevista segundo CEN TR 12101-5 [22]. ..... 16
Quadro 2.2: Parâmetros para definir um incêndio em grandes compartimentos em função da ocupação prevista [17] [23]. ..... 16
Quadro 2.3: Taxa de crescimento de incêndio, $HRR_f$ e densidade de carga de incêndio (quantilho 80%) para diferentes tipos de ocupação [13] ..... 17
Quadro 2.4: Cenários de incêndio utilizados para o estudo do centro de exposições em Taiyuan (adaptado de [12]) ..... 20
Quadro 2.5 - Requisitos de resistência ao fogo em Portugal para edifícios de um piso no plano de referência ..... 42
Quadro 2.6: Áreas máximas autorizadas em metros quadrados de um compartimento e duração da resistência ao fogo dos elementos estruturais do tipo II [37] ..... 44
Quadro 2.7: Requisitos de resistência ao fogo de vários países para edifícios comerciais e industriais de um piso ..... 45
Quadro 2.8: Quadro resumo de pavilhões industriais e comerciais em Portugal ..... 45
Quadro 3.1 - Valores característicos admitidos para as restantes cargas permanentes ..... 51
Quadro 3.2 - Verificações de segurança para os elementos do pórtico em estado limite último ..... 53
Quadro 3.3 - Determinação da temperatura crítica para os elementos do pórtico utilizando a combinação acidental ..... 56
Quadro 3.4 - Determinação da temperatura crítica para os elementos do pórtico utilizando o fator de redução do valor de cálculo do nível de carregamento de 0.65. ..... 57
Quadro 3.5 - Propriedades térmicas dos materiais adotados no caso de estudo [14] ..... 63
Quadro 3.6 - Parâmetros para a definição das curvas de incêndio paramétricas para o caso de estudo ..... 64
Quadro 3.7 - Parâmetros para a definição das curvas de incêndio paramétricas modificadas para o caso de estudo ..... 66
Quadro 3.8 - Análise de custos para dois métodos de proteção ao fogo e sem proteção ao fogo, para um pórtico do caso de estudo ..... 73
Quadro 4.1 - Grupos e respetivos casos que serviram de base para gerar os cenários de incêndio simulados ..... 79
Quadro 4.2 - Cenários considerados nas simulações realizadas ..... 79
Quadro 4.3 - Proporções recomendadas para compartimentos em modelos de zona [59] ..... 82
Quadro 4.4 - Propriedades dos materiais adotados no caso de estudo para simulação no programa CFAST ..... 84
Quadro 4.5 - Parâmetros de entrada para simulação com o programa CFAST ..... 84
Quadro 4.6 - Resumo da temperatura máxima obtida no programa CFAST para a camada superior em função da ocupação prevista e categoria de risco ..... 89
Quadro 4.7 - Temperatura obtida no programa FDS e comparação com resultados obtidos no programa CFAST ..... 102

Quadro 4.8 – Fluxo de calor por radiação obtido no programa FDS e comparação com resultados obtidos no programa CFAST ..... 103
Quadro 4.9 - Temperatura obtida no programa FDS para os sensores no eixo do incêndio e nas colunas mais próximos do incêndio (valores máximos para cada cenário sublinhados) ..... 106
Quadro 4.10 - Resumo da temperatura máxima obtida nas simulações em função da ocupação prevista e categoria de risco ..... 117

# SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

## SIMBOLOGIA

### Letras maiúsculas

| | |
|---|---|
| $A_{fi}$ | Área máxima em planta de material em combustão simultânea |
| $A_d$ | Valor de cálculo das ações indiretas do incêndio |
| $A_{fi}$ | Área máxima em planta de material em combustão simultânea |
| $A_m/V$ | Fator de massividade para os elementos de aço não protegidos |
| $[A_m/V]_b$ | Fator de massividade calculado como se o perfil tivesse proteção em caixão |
| $A_t$ | Área total da superfície envolvente |
| $A_v$ | Área total das aberturas verticais em todas as paredes |
| CO | Monóxido de carbono |
| D | Diâmetro do incêndio |
| $D^*$ | Diâmetro característico do incêndio |
| $E_d$ | Valor de cálculo da força ou do momento correspondentes ao cálculo à temperatura normal, para a combinação fundamental de ações |
| $E_{fi,d}$ | Valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio |
| $G_{k,j}$ | Valor das ações permanentes j |
| H | Distância entre a origem do incêndio e o teto |
| HCN | Cianeto de hidrogénio |
| $HRR_f$ | Taxa máxima de libertação de calor produzida por 1 $m^2$ de fogo no caso de um incêndio controlado pelo combustível |
| $L_{cr,LT}$ | Valor do comprimento do elemento para a encurvadura lateral |
| $L_{cr,y}$ | Valor do comprimento do elemento para a encurvadura em torno do eixo y-y |
| $L_{cr,z}$ | Valor do comprimento do elemento para a encurvadura em torno do eixo z-z |
| $L_f$ | Comprimento da chama segundo o eixo |
| $M_{b,Rd}$ | Valor do momento fletor resistente à encurvadura lateral |
| $M_{cr}$ | Momento crítico elástico de encurvadura lateral |
| $M_{Ed}$ | Valor do momento fletor atuante |
| $M_{fi,Ed}$ | Valor do momento fletor atuante em situação de incêndio |
| $N_{Ed}$ | Valor do esforço axial atuante |
| $N_{fi,Ed}$ | Valor do esforço axial atuante em situação de incêndio |
| O | Fator de abertura |
| $O_{lim}$ | Fator de abertura reduzido no caso de incêndio controlado por combustível |
| Q | Taxa de libertação de calor |

| | |
|---|---|
| $Q_c$ | Parcela da taxa de libertação de valor de convecção |
| $Q_{desenvolvimento}$ | Taxa de libertação de calor da fase de desenvolvimento |
| $Q_{k,1}$ | Valor da ação variável base |
| $Q_{k,i}$ | Valor característico da ação variável i |
| $Q_{max}$ | Taxa de libertação de calor máxima |
| $R_{fi,d,0}$ | Valor de $R_{fi,d,t}$ para o instante t=0 |
| $R_{fi,d,t}$ | Valor de cálculo da resistência em situação de incêndio |
| $T_\infty$ | Valor da temperatura ambiente |
| $V_{Ed}$ | Valor do esforço transverso atuante |
| $V_{fi,Ed}$ | Valor do esforço transverso atuante em situação de incêndio |

Letras minúsculas

| | |
|---|---|
| b | Absortividade térmica da superfície envolvente total |
| $c_a$ | Calor específico do aço |
| $c_p$ | Calor específico do ar |
| $g$ | Aceleração da gravidade |
| $h_{eq}$ | Média ponderada dos valores das alturas das aberturas em todas as paredes |
| $\dot{h}_{net,c}$ | Fluxo de calor efetivo por convecção por unidade de área |
| $\dot{h}_{net,d}$ | Valor de cálculo do fluxo efetivo por unidade de área |
| $\dot{h}_{net,r}$ | Fluxo de calor efetivo por radiação por unidade de área |
| $k_{sh}$ | Fator de correção para o efeito de sombra |
| $k_{yy}$ | Fator de interação |
| $q_{f,d}$ | Valor de cálculo da densidade de carga de incêndio por unidade de área do pavimento |
| $q_{t,d}$ | Valor de cálculo da densidade de carga de incêndio por unidade de área da envolvente |
| t | Tempo |
| $t_{lim}$ | Instante de tempo em que ocorre a temperatura máxima dos gases no caso de incêndio controlado por combustível |
| $t_{max}$ | Instante de tempo em que ocorre a temperatura máxima dos gases |
| $t_\alpha$ | Tempo necessário para atingir uma taxa de libertação de calor de 1 MW |
| $x_c$ | Fator de abertura |
| z | Altura ao longo do eixo da chama |
| $z_0$ | Origem virtual do eixo |

Letras maiúsculas gregas

| | |
|---|---|
| $\Delta t$ | Intervalo de tempo |
| $\Delta_{\theta a,t}$ | Aumento de temperatura num elemento de aço não protegido durante um intervalo de tempo |
| $\Gamma$ | Fator de conversão do tempo, função do fator de abertura O e da absortividade térmica b |
| $\Gamma_{lim}$ | Fator de conversão do tempo, função do fator de abertura $O_{lim}$ e da absortividade térmica b |
| $\Phi$ | Fator de vista |

Letras minúsculas gregas

| | |
|---|---|
| $\alpha_c$ | Coeficiente de transferência de calor por convecção |
| $\Upsilon_{G,j}$ | Coeficientes parcial para as ações permanentes |
| $\Upsilon_{Q,i}$ | Coeficientes parcial para as ações variáveis |
| $\delta_x$ | Dimensão da célula |
| $\delta_{xc}$ | Dimensão das células mais esparsas |
| $\delta_{xf}$ | Dimensão das células mais apertadas |
| $\varepsilon_f$ | Emissividade do fogo |
| $\varepsilon_m$ | Emissividade da superfície do elemento |
| $\eta_{fi}$ | Fator de redução para o valor de cálculo do nível de carregamento em situação de incêndio |
| $\theta_{cr}$ | Temperatura crítica |
| $\theta_{cr,d}$ | Valor de cálculo da temperatura crítica do elemento |
| $\theta_d$ | Valor de cálculo da temperatura no elemento |
| $\theta_g$ | Temperatura dos gases na proximidade do elemento exposto ao fogo |
| $\theta_m$ | Temperatura da superfície do elemento |
| $\lambda$ | Condutibilidade térmica |
| $\bar{\lambda}_{LT}$ | Valor da esbelteza normalizada associado à encurvadura lateral |
| $\bar{\lambda}_y$ | Esbelteza normalizada em torno do eixo y-y |
| $\bar{\lambda}_z$ | Esbelteza normalizada em torno do eixo z-z |
| $\mu_0$ | Grau de utilização no instante t = 0 |
| $\rho_a$ | Massa específica do aço |
| $\rho_\infty$ | Densidade do ar |
| $\sigma$ | Constante de Stephan Boltzmann |
| $\phi_{LT}$ | Parâmetro adicional de cálculo do fator de redução da resistência devido à encurvadura lateral $\chi_{LT}$ |
| $\chi_{LT}$ | Coeficiente de redução da resistência devido à encurvadura lateral |
| $\chi_y$ | Coeficiente de redução associado à encurvadura por flexão em torno do eixo y-y |
| $\chi_z$ | Coeficiente de redução associado à encurvadura por flexão em torno do eixo z-z |
| $\psi_i$ | Coeficiente de redução |

ABREVIATURAS

| | |
|---|---|
| CFD | *Computational fluid dynamics* |
| FDS | *Fire Dynamics Simulator* |
| HRR | *Heat Release Rate* |
| NIST | *National Institute of Standards and Technology* |
| ODEs | *Ordinary Differencial Equations* |
| TS | *Trace species* |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento do tema

O rápido desenvolvimento da construção em poucas décadas aumentou significativamente a complexidade de um projeto. Os edifícios de grande altura com um só piso, tais como cais, terminais de aeroporto, pavilhões desportivos e grandes áreas de retalho estão a tornar-se cada vez mais comuns. O aumento do tamanho dos edifícios introduziu continuamente novos paradigmas e fatores de risco anteriormente não estudados.

As estruturas metálicas encaixam-se perfeitamente nos novos desafios da construção pois apresentam uma excelente relação entre peso e resistência, possibilitando a realização de grandes vãos, uma execução industrializada e montagem rápida. A sua grande desvantagem reside na vulnerabilidade a incêndios, tendo por isso que ser dimensionadas para ter em conta esta ação acidental e dotá-las de proteção adequada para o cumprimento dos tempos de resistência ao fogo regulamentares. As soluções com proteção implicam um investimento avultado, podendo em alguns casos anular a competitividade que as estruturas metálicas oferecem.

A regulamentação de segurança contra incêndios tem um grande impacto no projeto de um edifício. Reduzir os acidentes pessoais e as perdas é uma preocupação constante e deve ser o objetivo principal da legislação existente nesta área.

Avanços no conhecimento permitiram uma melhor compreensão sobre as estruturas e a sua resposta quando sujeitas a elevadas temperaturas. Atualmente, é possível incluir uma grande variedade de fenómenos nos modelos estruturais e prever com boa precisão a resposta da estrutura quando sujeita a uma ação de incêndio.

No domínio dos pequenos compartimentos, a suposição da formação de uma camada de gás homogénea tornou possível derivar equações e encontrar correlações com a ajuda de dados experimentais. A camada de gás não uniforme que se gera em grandes compartimentos é mais difícil de estudar teoricamente e experimentalmente.

Existem muito poucos estudos experimentais relatados na bibliografia em grandes compartimentos sujeitos a incêndio, devido aos custos envolvidos dos ensaios em grande escala. Esta falta de dados leva a um conhecimento limitado do problema e limita a sua aplicação em projetos de engenharia estrutural e segurança contra incêndios.

A investigação científica relacionada com a segurança contra incêndios ganhou ênfase, levando ao desenvolvimento de regulamentações, estratégias e tecnologias destinadas a minimizar perdas decorrentes de incêndios e o aumento do conhecimento sobre o comportamento dos materiais contra o fogo. Foi assim possível ganhar consciência de que os efeitos de incêndios

podem ser avaliados e estimados através de alguns parâmetros como a densidade de carga de incêndio, aberturas no compartimento e as características da envolvente.

Os Eurocódigos fornecem atualmente uma ampla gama de métodos de cálculo. Permitem que projetistas adotem uma abordagem prescritiva para atender aos requisitos de segurança contra incêndio, conforme especificado nos regulamentos nacionais, ou realizar um projeto com base em regras baseadas no desempenho. Tal envolve, em geral, análises computacionais mais complexas e respostas mais precisas aos objetivos de segurança contra incêndio. As problemáticas a serem abordadas em termos de desempenho são essencialmente o transporte de fumo e calor, evacuação e curvas de temperatura em função do tempo em elementos estruturais.

Para o dimensionamento da estrutura em situação de incêndio, os programas de cálculo existentes recorrem essencialmente à curva de incêndio padrão ISO 834, que não é adequada a grandes compartimentos, conduzindo por isso, a soluções economicamente pouco competitivas em espaços comerciais e industriais.

É assim relevante obter curvas de temperatura mais próximas do desenvolvimento real da evolução da temperatura ao longo do tempo de incêndio, otimizando-se a proteção ao fogo a aplicar na estrutura. Para a realização deste tipo de análises é necessário recorrer a modelos computacionais. Devido ao tempo e custos envolvidos, os modelos de duas zonas são os mais utilizados; a aplicação de modelos mais completos leva a uma representação mais realista do incêndio mas requerem um custo computacional mais elevado. Estas soluções permitem a projetistas alguma liberdade de dimensionar estruturas para resistir a elevadas temperaturas de forma inovadora e eficiente.

O presente trabalho é dedicado ao estudo do dimensionamento ao fogo em edifícios industriais e comerciais construídos com estruturas metálicas com o cenário de incêndio natural. Procurou-se simular vários cenários de densidade de carga de incêndio, área de incêndio e condições de ventilação num pavilhão comercial de dimensões correntemente utilizadas em Portugal. Pretende-se auxiliar projetistas a compreender as diferentes metodologias de cálculo e realizar um projeto de acordo com os Eurocódigos, utilizando análises relativamente simples de elementos individuais a uma análise mais complexa com condições reais de incêndio.

## 1.2 Organização da dissertação

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos e dois anexos:

- No capítulo 1 é feita uma introdução ao tema da dissertação, na qual se encontra uma breve referência acerca das necessidades de desenvolver metodologias de dimensionamento de estruturas metálicas em situação de incêndio que permita uma redução de custos proporcional à segurança e capital investido. Este capítulo refere, também, de forma sucinta, os objetivos e a metodologia adotada na dissertação, bem como, a forma como esta está organizada;
- No capítulo 2 é apresentado o estado da arte, onde se identificam os diversos tipos de proteção em estruturas metálicas, seguido de um enquadramento e estudos já realizados em grandes compartimentos sujeitos a incêndio. São ainda

apresentados os requisitos de resistência ao fogo de vários países e as dimensões comuns de pavilhões industriais e comerciais em Portugal;

- No capítulo 3 é apresentado o caso de estudo desta dissertação; é feito o dimensionamento à temperatura ambiente e em situação de incêndio, considerando vários desenvolvimentos para a ação térmica;
- No capítulo 4 apresentam-se os estudos realizados nos programas CFAST e FDS com o objetivo de compreender o comportamento da estrutura definida em caso de estudo em situação de incêndio: efeito da temperatura, evolução das chamas e fumo. São ainda realizados estudos paramétricos;
- No capítulo 5 são apresentadas as conclusões mais relevantes do presente trabalho, referindo-se algumas possibilidades de desenvolvimento futuro do tema;
- No anexo A são apresentados os resultados obtidos através do programa CFAST;
- No anexo B são apresentados os resultados obtidos através do programa FDS.

# 2 ESTRUTURAS METÁLICAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: ENQUADRAMENTO E ESTADO DA ARTE

No presente capítulo é apresentada a revisão bibliográfica realizada, incidindo inicialmente nas medidas passivas de proteção de estruturas metálicas em situação de incêndio. O principal objetivo consiste em apresentar os principais métodos de proteção de estruturas metálicas disponíveis no mercado, discutindo vantagens e desvantagens da sua utilização.

De seguida são apresentadas as principais condicionantes e características de incêndios naturais em grandes compartimentos, fazendo um enquadramento prescritivo e soluções para a sua implementação à luz da regulamentação em vigor.

São apresentados seis casos de estudo presentes na bibliografia: dois casos de estudos numéricos e quatro casos de estudos experimentais em escala real.

Serão apresentados os requisitos de resistência ao fogo de vários países para edifícios de um só piso com utilizações compatíveis com comércio e indústria.

Por último foi realizado um levantamento das dimensões mais relevantes de pavilhões industriais e comerciais em Portugal.

## 2.1 Proteção de estruturas metálicas em situação de incêndio

As estruturas de aço, quando expostas ao fogo, apresentam redução de resistência e rigidez, podendo em algumas situações conduzir ao seu colapso. Assim, é prática comum dotar as estruturas metálicas com proteção para que a integridade da estrutura seja preservada por um período de tempo suficiente que permita a evacuação dos ocupantes ou que limite os danos materiais [1].

Dizer que um elemento estrutural não cumpre os critérios de segurança de em situação de incêndio, significa que o elemento não satisfaz os critérios de resistência mecânica de forma a manter a sua função resistente durante o tempo de exposição ao fogo requerido [2].

Uma das soluções para atingir a resistência ao fogo necessária, é proteger os elementos estruturais de modo a atrasar o aumento de temperatura, atrasando igualmente a perda de resistência. O método mais comum de proteção de um elemento em aço é envolvê-lo num material que atua como isolante térmico [1]. A resistência ao fogo pode ser alcançada em virtude do desempenho próprio ao fogo do elemento. Em certos casos, resistência ao fogo de 30 minutos pode ser atingida sem proteção [3], sendo mais fácil em elementos com fator de forma mais reduzido, que se pode dever ao perímetro exposto ao fogo reduzido [4].

### 2.1.1 Métodos de proteção de estruturas metálicas

Existem muitos métodos e sistemas para proteger os elementos de aço aumentando assim a sua resistência ao fogo [2] [5]. Os mecanismos que permitem o atraso do aumento de temperatura são [6]:

- Baixa condutividade térmica;
- Alta capacidade calorífica;
- Reações físicas de absorção de calor (transpiração, evaporação, sublimação, ablação) ou reações químicas (decomposição endotérmica, pirólise);
- Intumescência, ou seja, formação de uma espuma isolante mais espessa após o aquecimento.

Os materiais mais comuns de proteção funcionam geralmente de uma das seguintes formas [6]:

- Isolantes – materiais resistentes ao fogo de baixa condutividade, leves e aplicados por projeção de partículas; placas de fibra cerâmica, lã de rocha ou outro material fibroso;
- Absorção de energia – produtos à base de gesso ou betão, libertando água de cristalização quando expostos a altas temperaturas;
- Intumescente – aplicado como tinta multicamadas, expandindo quando expostos a altas temperaturas, formando uma camada isolante. São tradicionalmente mais caros, mas apresentam um peso reduzido, durabilidade, bom aspeto estético, boa aderência e a opção de aplicação em ambiente controlado antes da montagem em obra, poupando tempo.

Os materiais de proteção podem ser classificados como orgânicos e inorgânicos, dependendo da constituição química dos seus componentes. Assim, materiais aplicados por projeção são usualmente referidos como sistemas inorgânicos, enquanto que as pinturas intumescentes são referidas como sistemas orgânicos [6].

#### 2.1.1.1 Revestimento em betão

Um método tradicional de proteção contra o fogo consiste em aplicar betão nos elementos de aço. Uma das vantagens deste sistema é a durabilidade em ambientes corrosivos. Será necessária a adição de armadura ordinária apenas para um revestimento nominal, de forma a impedir o betão de fendilhar e desagregar-se em situação de incêndio ou um revestimento substancial, e neste caso, o elemento é projetado considerando o seu comportamento misto [5].

Este método não é muito utilizado, devido em parte ao custo combinado da estrutura metálica e os trabalhos inerentes à colocação do betão em torno do elemento a proteger [5], mas também devido ao carregamento adicional imposto à estrutura que contradiz o reduzido rácio peso/resistência associado às estruturas metálicas. Alguns destes problemas podem ser mitigados através de betão pré-fabricado, mas será sempre necessária cofragem e colocação de betão fresco em volta das ligações viga-coluna ou viga-viga [7].

#### 2.1.1.2 Revestimento com placas

A maioria das placas de proteção contra incêndio são constituídas por silicato de cálcio ou gesso. As placas de silicato de cálcio são constituídas por um material inerte que sofre poucos danos durante um incêndio e protege o aço através das suas propriedades isolantes. As placas de gesso também apresentam boas propriedades de isolamento e o seu comportamento é melhorado pela água de cristalização que é expulsa à medida que a placa é aquecida, permitindo assim um atraso substancial no tempo de aquecimento dos perfis metálicos [5].

Este método é muito comum em países como o Reino Unido. As placas são rápidas e fáceis de aplicar e reparar, não criando muita sujidade por usarem um processo de instalação seco. As placas são aplicadas para formar um sistema de caixa de proteção ou aplicadas em ripas. Uma outra vantagem deste sistema de placas consiste na facilidade de aplicação direta de acabamentos do edifício, acelerando assim o processo de construção [7], conforme ilustrado na Figura 2.1.

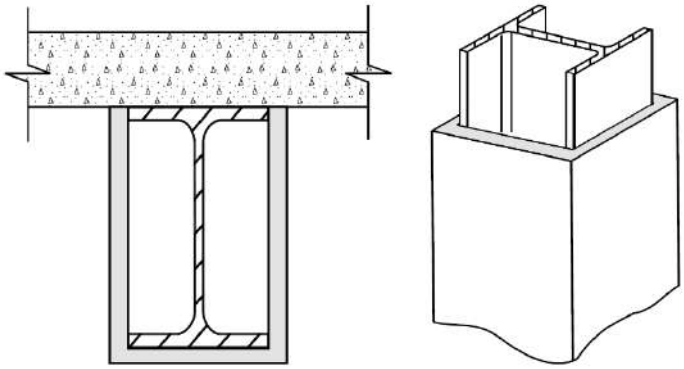


Figura 2.1 - Viga e coluna metálicas protegidas com placas [5]

As principais limitações prendem-se com a dificuldade de aplicação em geometrias complexas, o tempo despendido para trabalhos de fixação e a fraca adequabilidade para uso externo ou em zonas de muita humidade [8].

#### 2.1.1.3 Materiais projetados

A proteção através da projeção de materiais é geralmente a forma mais barata de proteção passiva contra o fogo para elementos de aço [5].

A maioria dos materiais utiliza fibras minerais: fibras de vidro ou fibras celulósicas [5], ou materiais cimentícios. A mistura de fibras minerais combina as fibras minerais com aglutinantes (geralmente cimento *Portland*), ar e água. É aplicada por pulverização com equipamento específico que alimenta a mistura seca de fibras minerais e vários agentes de ligação, adicionando água à medida que se pulveriza a superfície a ser protegida. Depois de curada, o revestimento projetado com fibras minerais é geralmente leve, essencialmente não combustível, quimicamente inerte e fraco condutor do calor [6].

Materiais projetados cimentícios são compostos por um material aglutinante misturado com agregados e aditivos. Os ligantes mais comuns são o gesso calcinado e o cimento *Portland*. Os agregados mais comuns são vermiculite e perlite [6].

O material pulverizado é geralmente bastante macio, devendo por isso ser protegido contra danos se estiver colocado num local vulnerável. Por essa razão, os materiais de proteção projetados são mais frequentemente utilizados em vigas do que em colunas, como se mostra na Figura 2.2. Este tipo de proteção é de fácil aplicação em detalhes complicados, como ligações aparafusadas [5].

Figura 2.2 - Proteção com materiais projetados numa viga metálica que suporta uma laje de betão pré-fabricada [5]

As desvantagens da proteção por materiais projetados prendem-se com o processo de aplicação húmido que gera sujidade e o acabamento esteticamente pouco apelativo [5], limitando assim a sua aplicação a zonas sem exigências estéticas ou vigas em zonas com tetos falsos. Além disso, um menor rigor no controlo da quantidade de água e na uniformização da espessura da proteção, pode conduzir a diferentes capacidades térmicas de proteção ao longo dos elementos [7].

#### 2.1.1.4 Pintura com tintas intumescentes

Uma das técnicas mais amplamente utilizadas para alcançar a proteção necessária em estruturas metálicas é o uso de revestimentos retardadores de camada fina do tipo intumescente. Quando aquecidos, estes revestimentos formam uma camada de proteção com uma espessura muitas vezes superior à espessura do revestimento original [9]. O material forma assim uma espessa massa carbonizada que isola termicamente o elemento em aço. Normalmente, são aplicadas várias camadas de pintura com tinta intumescente para obter a espessura necessária de proteção e uma boa ligação ao substrato [5], tendo cada camada diferentes propriedades e funções [6].

As tintas intumescentes têm as vantagens de serem leves e não ocuparem muito volume (i.e., apresentam um acréscimo de peso pouco significativo), podem ser aplicadas rapidamente e permitem que os elementos estruturais possam ficar à vista sem um choque estético

significativo. Não é assim necessário um acabamento final para além da própria tinta intumescente [5], tal como se mostra na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Estrutura metálica protegida com tinta intumescente [8]

A grande desvantagem destes produtos reside no preço elevado, quando comparado com as proteções anteriormente referidas, especialmente para resistências requeridas ao fogo muito elevadas. Muitas tintas intumescentes não são adequadas para uso exterior, devido aos agentes atmosféricos que podem comprometer a sua intumescência ao longo da sua vida de utilização. Outra desvantagem reside no facto desta proteção não ser tão óbvia para um observador casual, sendo muito difícil de verificar e manter ao fim de algum tempo [5]. Assim, é necessária uma inspeção contínua para examinar a integridade da espessura da tinta [7].

Os elementos estruturais revestidos com pinturas com tintas intumescentes devem ter espaço suficiente para permitir a expansão da tinta com o aquecimento, especialmente quando em contacto com outros elementos construtivos [5].

No mercado existem duas categorias distintas de pinturas intumescentes: à base de água ou solvente (também conhecidas como tintas intumescentes ou revestimentos de filme fino) e à base de epóxi (também conhecido como mástiques ou revestimentos de filme espesso). Os revestimentos à base de água e solvente apresentam espessuras menores (geralmente até 5 mm) e são destinados a ambientes controlados dentro de edifícios. Os revestimentos à base de epóxi são mais espessos (até 45 mm) e são utilizados em instalações petroquímicas [6].

#### 2.1.1.5 Revestimento com mantas

Os revestimentos com mantas são relativamente fáceis de instalar e manter, uma vez que não são instalados por via húmida. São muito utilizados em reabilitação em que a velocidade de instalação é de extrema prioridade. São materiais flexíveis que se fixam à estrutura em aço, utilizando uma vasta variedade de métodos: aplicados no contorno por meio de pinos de aço soldados à estrutura, pregos especiais, parafusos e por vezes adesivos [6].

#### 2.1.1.6 Proteção com alvenaria

Este método pode ser utilizado como uma maneira conveniente de fornecer proteção a colunas isoladas ou colunas parcial ou totalmente embutidas em paredes de alvenaria. A alvenaria não tem função de suporte de carga e atua apenas como material de proteção térmico parcial, reduzindo o aumento de temperatura no elemento de aço [7], conforme ilustrado na Figura 2.4.

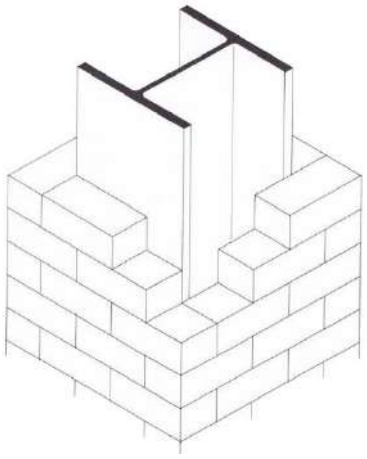


Figura 2.4 - Coluna totalmente embutida em paredes de alvenaria [8]

#### 2.1.1.7 Proteção com madeira

À semelhança da proteção com placas, é possível proteger vigas e colunas de aço com placas de madeira. Para tal, é essencial que a madeira envolva completamente o elemento de aço e seja firmemente fixa através de adesivo termo endurecido como resorcinol. A madeira a aplicar deve ser seca para remover o máximo de humidade possível; como a madeira é um material combustível, pode contribuir para a produção de fumos no compartimento [5].

#### 2.1.1.8 Enchimento com água

Uma forma menos comum, mas eficaz de prevenir o aquecimento rápido de secções ocas, consiste no seu preenchimento com água [5]. Este método permite uma resistência ao fogo da estrutura metálica virtualmente ilimitada. A água absorve o calor e através de processos de circulação natural, permite a sua dissipação [8]. É assim necessário um sistema que garanta que a água possa fluir por convecção de um elemento para outro para evitar pressões excessivas quando a água for aquecida. Este método exige detalhes específicos nas ligações entre elementos e estudos adicionais para prevenir a corrosão e o congelamento em climas frios. Trata-se, pois, de um método caro e limitado a estruturas especiais, levando a um possível aumento no peso das estruturas [5].

## 2.2 Incêndios naturais em grandes compartimentos

### 2.2.1 Condições gerais

Para um incêndio num edifício industrial e comercial de grande área e de um só piso, a taxa de libertação de calor pode ser simplificada de acordo com a Figura 2.5 [10]:

- Fase de crescimento - pode ocorrer até ao instante em que se verifica o *flashover* ou até que a todo o combustível seja totalmente consumido;
- Estado estacionário – controlado pela ventilação ou controlado pelo combustível, dependendo das aberturas de ventilação disponíveis. O facto de as claraboias fundirem e a cobertura colapsar, aumenta a ventilação disponível e pode alterar a taxa de libertação de calor, ou seja, permitir maior consumo de combustível;
- Fase de arrefecimento – o decréscimo na taxa de libertação de calor ocorre assim que a área do incêndio diminui devido ao consumo de combustível.

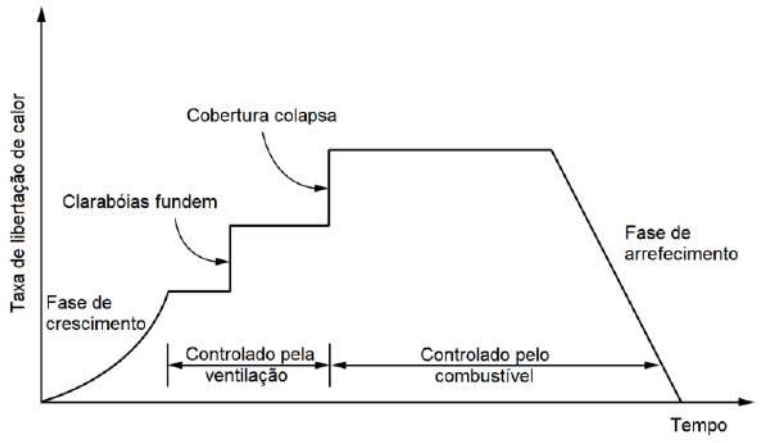



Figura 2.5 - Taxa de libertação de calor de um edifício industrial (adaptado de [10])

De acordo com a função do edifício, existem três tipos de grandes compartimentos [11]:

- Com uma área útil elevada, mas com altura baixa, como supermercados ou pequenos edifícios industriais. A área do pavimento pode ser de várias dezenas de milhar de metros quadrados e a altura da cobertura é geralmente inferior a 6 metros;
- Com grande área útil e grande altura, como auditórios, salas de exposições, teatros, ginásios ou armazém. A área do pavimento é geralmente de várias dezenas a centenas de milhar de metros quadrados e a altura da cobertura é geralmente de 10 a 20 metros;
- Com uma área pequena, mas com uma altura elevada, como é o caso dos átrios. A área do pavimento é geralmente de várias centenas de metros quadrados, mas a altura pode chegar a dezenas de metros.

As características de um incêndio num compartimento de grandes dimensões diferem dos restantes incêndios em edifícios correntes devido aos seguintes aspetos [11]:

- O incêndio é difícil de detetar por um sistema automático de deteção. O sistema de deteção automática de incêndio inclui o sistema de deteção de fumo e o sistema de deteção de temperatura, que são normalmente instalados na cobertura. No entanto, para um incêndio num grande compartimento, a densidade e temperatura do fumo são diluídas e muito reduzidas antes de atingir a cobertura, podendo não ativar o detetor;
- O sistema de *sprinkler* não funciona. Para um edifício com uma altura superior a 20 metros, a temperatura do fumo não ativa o sistema de *sprinkler*, e por outro lado, a água libertada por um aspersor instalado na cobertura não consegue alcançar o fogo a uma distância tão grande;
- É difícil evacuar o edifício. Um edifício público de grandes dimensões pode alojar uma grande quantidade de pessoas que, em situação de pânico, movimentam-se de forma desorganizada. Por exemplo, quando ocorre um incêndio num teatro ou ginásio, a operação de evacuação é uma das tarefas mais difíceis;
- Em grandes compartimentos, o colapso ou danos na estrutura podem causar perda de vidas e bens.

### 2.2.2 Enquadramento prescritivo

Com o desenvolvimento da tecnologia e da economia, os edifícios complexos em grande escala estão a tornar-se cada vez mais populares. Para satisfazer os requisitos dos projetos de arquitetura modernos, são definidas estruturas metálicas com vãos progressivamente maiores. Assim, o método prescritivo preconizado nos Eurocódigos estruturais pode não atender às necessidades reais deste tipo de edifícios, nomeadamente no que se refere ao dimensionamento ao fogo de grandes edifícios como museus, estádios, teatros ou espaços gerais com pé direito elevado [12].

As curvas de temperatura nominais são funções analíticas que permitem obter a temperatura para um determinado tempo, conforme indicado na Figura 2.6. São curvas convencionais, sendo utilizadas num ambiente normativo de fácil implementação. Qualquer requisito expresso em termos de curva nominal é também prescritivo e, em certo sentido, arbitrário [13] [14] [15]:

- A curva de incêndio padrão, ou curva ISO 834, representa um incêndio totalmente desenvolvido num compartimento. Historicamente é a mais utilizada;
- A curva de incêndio para elementos exteriores é aplicável à face exterior de paredes exteriores que podem ser expostas ao fogo a partir de diferentes zonas da fachada ou a chamas que se projetam pelas janelas de um compartimento situado abaixo ou adjacente a uma parede exterior;
- A curva de incêndio de hidrocarbonetos destina-se a representar os efeitos de um incêndio do tipo hidrocarbonetos.

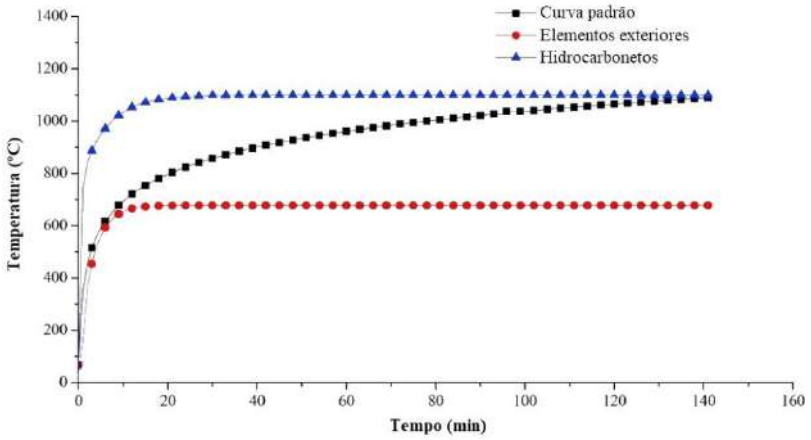



Figura 2.6 - Curvas de temperatura nominais (adaptado de [16])

A curva padrão, a curva mais utilizada, estabelece que a temperatura dos gases quentes aumenta continuamente até ao tempo de resistência ao fogo requerido [17], desprezando completamente a fase de crescimento anterior à combustão generalizada (pré-*flashover*) [18]. Estabelece também apenas uma variação de temperatura para vários tipos de edifícios, independentemente da carga de incêndio ou condições de ventilação, assumindo igualmente um aquecimento uniforme, mesmo que o compartimento tenha dimensões elevadas [18]. Por estas razões, a curva padrão é mais adequada para representar incêndios em pequenos compartimentos [19].

O comportamento de um incêndio num compartimento de pequenas dimensões não é comparável a um incêndio num grande compartimento [19]. As cargas de incêndio para construções como átrios, centros comerciais, pavilhões desportivos, salas polivalentes, cais de estações ou supermercados são geralmente bastante pequenas, não sendo possível alcançar as altas temperaturas que a curva padrão determina [17].

Um incêndio num compartimento de grandes dimensões ocorre numa área limitada e o ar quente resultante da combustão influencia apenas essa área [12], ou seja, um incêndio uniforme pós-*flashover* não vai ocupar toda a área num único momento no tempo [5]. Além disso, está disponível uma grande quantidade de ar, fator relevante na redução da temperatura [17].

Nos edifícios de grandes alturas, a pluma de fogo sobe em altura durante um incêndio, arrastando uma grande quantidade de ar frio. Os gases quentes espalham-se pela cobertura e a flutuação dos produtos da combustão arrastam o ar frio num fluxo rápido de gás, numa camada superficial abaixo do teto do compartimento, alastrando lateralmente. Desta forma, o fluxo de calor radiante da camada quente superior pode não ser suficiente para causar a combustão generalizada, ou *flashover* [19]. Regra geral, a probabilidade de ocorrer *flashover* e um envolvimento total do compartimento é menor com o aumento do tamanho do compartimento [5]. Assim, a curva de incêndio padrão não é adequada para representar a distribuição de temperatura dentro de grandes compartimentos [12], sendo até bastante irrealista e economicamente desfavorável [17], não garantindo uma segurança proporcional ao capital investido [18].

### 2.2.3 Escolha da abordagem ideal

Num incêndio real, a distribuição de temperatura no compartimento é bastante não uniforme, pelo menos durante os primeiros instantes e em alguns casos durante a duração de todo o incêndio, se as dimensões do incêndio forem reduzidas quando comparadas com o tamanho do compartimento [17]. Assim, a ação térmica pode ser determinada, não através de curvas nominais, mas pelos seguintes métodos preconizados na EN 1991-1-2 [14] [13]:

- Curvas padrão de incêndio, como definidas anteriormente;
- Curvas paramétricas, que sendo funções analíticas, permitem conhecer a evolução da temperatura do gás em função do tempo, baseando-se em parâmetros que representam os fenómenos físicos mais importantes de incêndios em compartimentos: densidade de carga de incêndio, condições de ventilação e as propriedades térmicas dos elementos. No campo dos grandes compartimentos, a sua aplicabilidade é limitada pois apenas são válidas para compartimentos até 500 $m^2$ de área de pavimento, sem aberturas na cobertura e altura máxima de 4 m;
- Modelos de duas zonas, que permitem calcular o desenvolvimento da temperatura num compartimento com base em equações diferenciais que têm em conta a transferência de massa e de energia. Os modelos de uma zona admitem uma distribuição de temperatura uniforme no compartimento dependente do tempo. Os modelos de duas zonas admitem uma camada superior com uma espessura dependente do tempo e com uma temperatura uniforme também dependente do tempo, e uma camada inferior com uma temperatura menor e uniforme dependente do tempo. Significa, pois, que equações diferenciais necessitam de ser integradas com o tempo para se obter uma curva tempo-temperatura. Este procedimento é impraticável através de cálculo manual, sendo utilizados programas específicos.
- Modelos de cálculo de dinâmica de fluidos ou CFD (*computational fluid dynamics*) que indiquem a evolução da temperatura no compartimento de uma forma completamente dependente do tempo e do espaço, através da divisão do compartimento num grande número de elementos em que as equações de Navier-Stokes são escritas e resolvidas. Permitem obter um grande número de resultados com elevado detalhe, como por exemplo, pressão, temperatura, velocidade, componentes químicos e obstrução ótica em cada elemento em qualquer intervalo de tempo selecionado;
- Incêndios localizados, para casos em que a combustão generalizada ainda não tenha ocorrido. Os efeitos de um incêndio localizado são automaticamente tidos em conta num modelo CFD, pelo menos durante a primeira fase do incêndio e tidos igualmente em conta num modelo de duas zonas, pelos menos até a não ocorrência de uma combustão generalizada. Podem ser resolvidos através de cálculo manual ou com auxílio de programas específicos.

É expectável que para grandes compartimentos seja possível definir condições de incêndio menos severas e economicamente mais vantajosas, considerando-se curvas reais de incêndio naturais e uma variação real não uniforme da temperatura. As condições gerais para grandes compartimentos são a formação de uma camada não uniforme de temperatura no ar, com a presença de uma camada de ar frio junto ao pavimento e a não ocorrência de uma combustão generalizada. Esta última implica que a carga de incêndio não é uniformemente distribuída (incêndio localizado) e a temperatura média da camada de ar quente é inferior a 500ºC (não

ocorrência de combustão generalizada) [17]. Outros autores sugerem que a não ocorrência de combustão generalizada implica satisfazer uma temperatura máxima no teto de 600ºC, fluxo de calor por radiação ao nível do pavimento inferior a 15 kW/m$^2$ ou 20 kW/m$^2$ e a não projeção de chamas para o exterior a partir das aberturas no compartimento [4] [5] [20] [21]. O relatório técnico CEN/TR 12101-5 indica valores de temperatura superiores a 550ºC como um procedimento aproximado para avaliar a ocorrência de combustão generalizada no compartimento [22].

Um procedimento recomendado para estudar o comportamento de um compartimento de grandes dimensões numa situação de incêndio, engloba os seguintes passos [17]:

1. Definição do cenário de incêndio através da densidade de carga de incêndio, taxa de libertação de calor, área ou perímetro e posição do incêndio. Devem ser analisados os cenários necessários para abranger as situações mais críticas para a estrutura;
2. Determinação da altura da zona sem fumo e da temperatura média da camada superior. A temperatura necessita de ser inferior a 500ºC para assegurar que o incêndio permanece localizado e não ocorre uma combustão generalizada do compartimento. É necessário conhecer a altura da camada sem fumo para verificar que não existe perigo de ignição de materiais combustíveis na zona quente (Figura 2.7);
3. Verificação se o incêndio permanece localizado ou não;
4. Determinação da temperatura do ar através de modelos de zona;
5. Determinação da distribuição de temperatura na secção transversal dos elementos estruturais;
6. Análise termomecânica dos elementos estruturais do compartimento de acordo com a EN 1993-1-2.

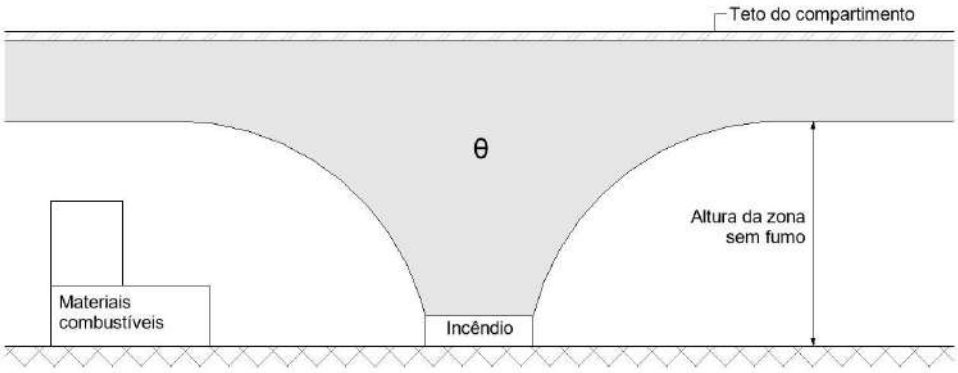



Figura 2.7 - Influência da altura da zona sem fumo (zona de ar frio) na ignição de materiais combustíveis presentes no compartimento (adaptado de [17])

O relatório técnico CEN/TR 12101-5 apresenta algumas recomendações para a definição da área de incêndio, perímetro e taxa de libertação de calor por unidade de área. Este relatório técnico também apresenta recomendações e orientações sobre métodos funcionais e de cálculo de sistemas de ventilação e exaustão para projeto de incêndios em estado estacionário. No que a grandes compartimentos diz respeito, o relatório técnico indica valores para áreas de retalho e escritórios [22]. Os valores estão reproduzidos no Quadro 2.1.

Quadro 2.1: Parâmetros recomendados para definir um incêndio em grandes compartimentos em função da ocupação prevista segundo CEN TR 12101-5 [22].

| Ocupação | Área do incêndio ($m^2$) | Perímetro do incêndio (m) | Taxa máxima de libertação de calor máxima por unidade de área ($HRR_f$) ($kW/m^2$) |
|---|---|---|---|
| Áreas de retalho (resposta normal de *sprinklers*) | 10 | 12 | 625 |
| Áreas de retalho (resposta rápida de *sprinklers*) | 5 | 9 | 625 |
| Escritórios (resposta normal de *sprinklers*) | 16 | 14 | 225 |
| Escritórios (sem *sprinklers*) | 47 | 24 | 255 |

Podem ser encontrados outros valores na literatura. Os valores presentes no Quadro 2.2 são propostos nos casos em que não existem dados suficientes para definir o incêndio [17] [23].

Quadro 2.2: Parâmetros para definir um incêndio em grandes compartimentos em função da ocupação prevista [17] [23].

| Ocupação | Área do incêndio ($m^2$) | Perímetro do incêndio (m) | Taxa máxima de libertação de calor máxima por unidade de área ($HRR_f$) ($kW/m^2$) |
|---|---|---|---|
| Átrio de um edifício de escritórios<br>Receção de um hotel<br>Galeria de arte<br>Cais de estação<br>Terminal de aeroporto<br>Pavilhão desportivo | 9 | 12 | 250 |
| Igreja<br>Pavilhão multiusos<br>Sala de restaurante | 20 | 18 | 250 |
| Supermercado<br>Centro comercial<br>Escritório (grandes áreas) | 36 | 24 | 250 |
| Sala de exposição | | | 500 |

A taxa de libertação de calor (HRR) é a fonte do aumento da temperatura do gás e a força que propicia a libertação de fumo e gases da combustão [18]. Para definir a totalidade da curva da taxa de libertação de calor, as fases de aquecimento, de desenvolvimento e de arrefecimento têm de ser especificadas. A fase de desenvolvimento é limitada por um patamar horizontal que corresponde ao estado estacionário e a um valor de taxa de libertação de calor obtido pela multiplicação de $HRR_f$ pela área do incêndio. A fase de arrefecimento pode ser assumida como linear e inicia-se quando 70% da carga de incêndio for consumida. A fase de crescimento pode ser definida de acordo com a equação (2.1) e o patamar horizontal pode ser definido de acordo com a equação (2.2) [13].

$$Q_{crescimento} = 10^6 \left(\frac{t}{t_\alpha}\right)^2 \quad (2.1)$$

$$Q_{max} = HRR_f \times A_{fi} \quad (2.2)$$

Onde,

- Q é a taxa de libertação de calor (W);
- t é o tempo (s);
- $t_\alpha$ é o tempo necessário para atingir uma taxa de libertação de calor de 1 MW (s);
- $A_{fi}$ é a área máxima em planta de material em combustão simultânea ($m^2$);
- $HRR_f$ é a taxa máxima de libertação de calor produzida por 1 $m^2$ de fogo no caso de um incêndio controlado pelo combustível ($kW/m^2$).

No Anexo E da EN1991-1-2 [13] é possível consultar o parâmetro $t_\alpha$, $HRR_f$ e a densidade de carga de incêndio para diferentes tipos de ocupação. Apresentam-se estes valores no Quadro 2.3.

Quadro 2.3: Taxa de crescimento de incêndio, $HRR_f$ e densidade de carga de incêndio (quantilho 80%) para diferentes tipos de ocupação [13]

| Ocupação | Densidade de carga de incêndio ($MJ/m^2$) | Taxa de crescimento de incêndio | $t_\alpha$ (s) | $HRR_f$ ($kW/m^2$) |
|---|---|---|---|---|
| Habitação | 948 | Média | 300 | 250 |
| Hospital (quarto) | 280 | Média | 300 | 250 |
| Hotel (quarto) | 377 | Média | 300 | 250 |
| Biblioteca | 1824 | Rápida | 150 | 500 |
| Escritório | 511 | Média | 300 | 250 |
| Sala de aulas de uma escola | 347 | Média | 300 | 250 |
| Centro comercial | 730 | Rápida | 150 | 250 |
| Teatro (cinema) | 365 | Rápida | 150 | 500 |
| Transporte (espaço público) | 122 | Lenta | 600 | 250 |

A Figura 2.8 mostra a curva tipo proposta para a taxa de libertação de calor.

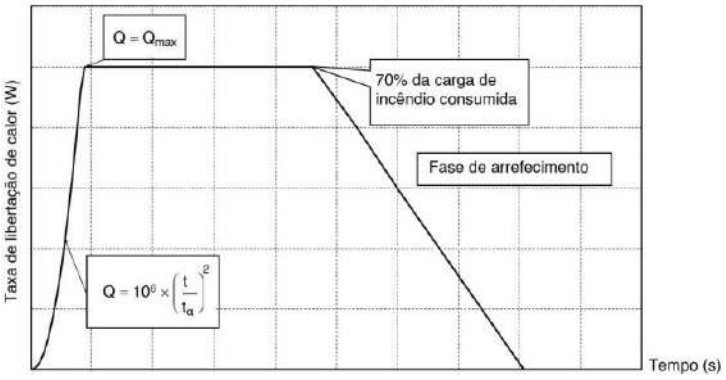



Figura 2.8 - Curva da taxa de libertação de calor e respetivas fases (adaptado de [24])

### 2.2.4 Estudos numéricos

Embora a investigação baseada em estudos experimentais seja bastante relevante e significativa, torna-se bastante difícil e caro estudar o processo de evolução de um incêndio num edifício real num laboratório: a preparação do ensaio é demorada, os custos são elevados e é difícil lidar com fogo real. Com o desenvolvimento da tecnologia de simulação computacional, a simulação pode, até certo ponto, tomar o lugar da investigação experimental, ou pelo menos, reduzir a carga de trabalho experimental a ser realizada [25].

Apresentam-se de seguida dois casos relevantes de simulação computacional de incêndios em grandes compartimentos.

#### 2.2.4.1 Centro de exposições em Taiyuan

O estudo numérico que se apresenta neste subcapítulo incide na avaliação do desempenho de um centro de exposições de grandes dimensões através de cenários reais de incêndio. A estrutura está localizada em Taiyuan, província de Shanxi, China, A distribuição não uniforme de temperatura no compartimento de grandes dimensões foi gerada utilizando o programa *Fire Dynamics Simulator* (FDS). Foi também realizado um modelo pelo método dos elementos finitos utilizando o programa ANSYS, de forma a simular o comportamento estrutural da estrutura em diferentes cenários de incêndio [12].

Conforme ilustrado na Figura 2.9, o edifício contém uma cobertura de grande vão, construída com uma treliça espacial. O edifício é composto por dois círculos, o mais exterior com 229 m de diâmetro e o interior com 50 m de diâmetro. Com a função de centro de exposições, o edifício engloba seis compartimentos de exposições (compartimento 1 e 6 com 6518 $m^2$, e compartimento 2 a 5 com 4675 $m^2$), um hall de entrada de 3693 $m^2$ e uma galeria em círculo no centro com 3670 $m^2$. A altura mais baixa da corda inferior das treliças ao pavimento é de 12 m e a maior altura é de 26 m [12].

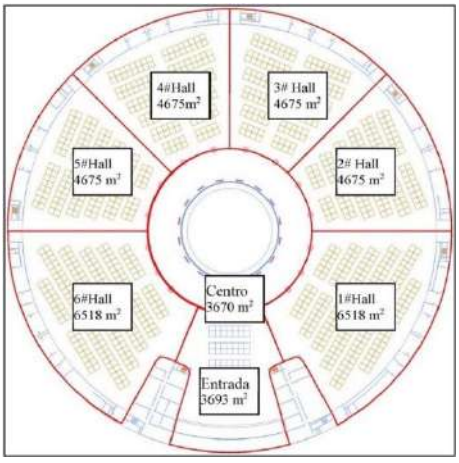



Figura 2.9 - Planta e áreas das diferentes zonas do centro de exposições de Taiyuan (adaptado de [12])

Como um centro de exposições, o principal foco de incêndio devem ser os elementos em exposição. A magnitude da carga de incêndio dos materiais combustíveis difere com as várias zonas. Segundo o autor, foram ponderadas densidades de carga de incêndio correspondentes a uma exposição automóvel (200 MJ/m$^2$), exposição de móveis (500 MJ/m$^2$), exposição de máquinas (80 MJ/m$^2$) e exposição de arte (200 MJ/m$^2$), sendo adotado nos estudos efetuados um valor de 500 MJ/m$^2$ por ser mais desfavorável [12].

Uma vez que o topo da galeria circular na zona central é um espaço aberto, caso algum incêndio ocorra nessa zona ou numa área próxima, o ar quente pode ser ventilado para o exterior do edifício diretamente. Por esta razão, não foram investigados focos de incêndio que ocorram perto do círculo central. Pela análise da Figura 2.9, pode-se observar que incêndios que ocorram numa zona próxima da entrada, afetarão diretamente a evacuação dos ocupantes, constituindo um cenário de grande gravidade. A altura admitida do foco de incêndio foi de 4 m, que corresponde à altura da plataforma que contém os artigos a serem expostos. Com base nas condicionantes apresentadas, foram admitidas duas localizações para os focos de incêndio, conforme indicado na Figura 2.10 [12]:

- Localização A: incêndio a ocorrer na plataforma de exibição próxima da parede exterior do Hall 5;
- Localização B: incêndio a ocorrer na plataforma de exibição na zona central do Hall 6.

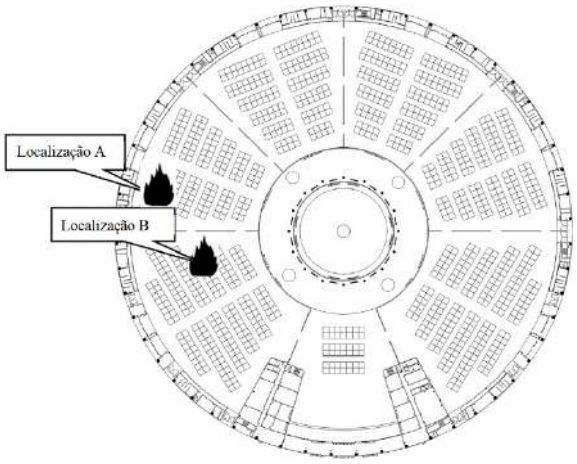



Figura 2.10 - Localização dos focos de incêndio no centro de exposições em Taiyuan (adaptado de [12])

Em linha com a escolha dos pressupostos mais desfavoráveis, foi considerada uma taxa de crescimento rápida de incêndio. Em sintonia com a regulamentação chinesa, foi considerada uma taxa de libertação de calor por unidade de área de 100 kW/m$^2$, que corresponde a uma exposição de móveis. Foram consideradas duas áreas de incêndio: a primeira teve como princípio orientador a área de uma plataforma de exibição, que corresponde a 9 x 9 m$^2$; a segunda corresponde a duas plataformas de exibição, que corresponde a 18 x 18 m$^2$. Na realidade, este último caso com uma grande área, representa um cenário extremo que é improvável que ocorra. É esperado que o caso com a área mais reduzida aconteça com maior incidência. Na realidade, o material com possibilidade de combustão na proximidade do foco de incêndio pode entrar em combustão devido à transferência de calor por radiação, levando a

uma propagação do incêndio pelo centro de exposições. Simplificadamente esta situação não foi considerada neste estudo [12]. Foram assim considerados os quatro cenários, apresentados no Quadro 2.4. Admitiu-se que o sistema de extinção de incêndio não operava em todos os casos analisados [12].

Quadro 2.4: Cenários de incêndio utilizados para o estudo do centro de exposições em Taiyuan (adaptado de [12])

| Cenário | Localização (ver Figura 2.10) | Fonte de ignição | HRR ($kW/m^2$) | Área do incêndio ($m^2$) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | A | Artigos em exibição | 100 | 18 x 18 |
| 2 | B | Artigos em exibição | 100 | 18 x 18 |
| 3 | A | Artigos em exibição | 100 | 9 x 9 |
| 4 | B | Artigos em exibição | 100 | 9 x 9 |

A Figura 2.11 mostra o modelo desenvolvido no programa FDS. Foi considerada uma malha de 1 x 1 x 0.5 $m^3$ de elementos de volume e uma duração de incêndio de 1.5 h (5400 s), com intervalos de tempo de 10 s [12].

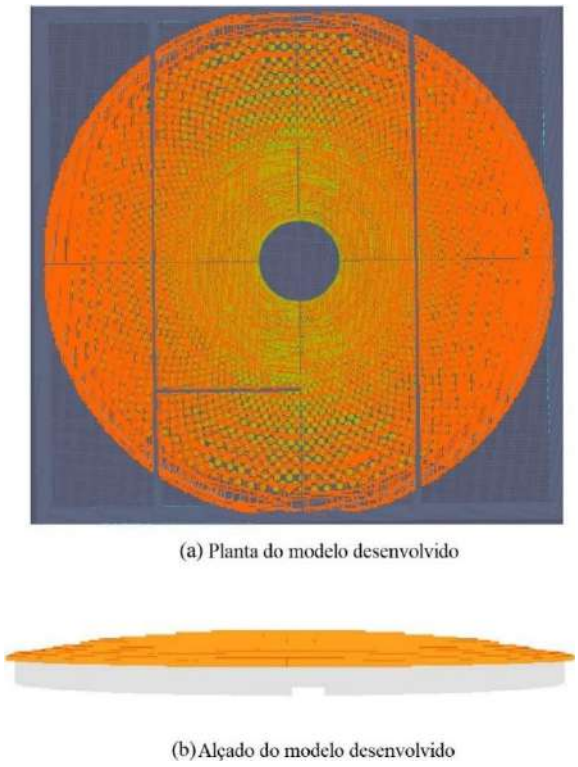



Figura 2.11 - Modelo desenvolvido para a simulação do centro de exposições de Taiyuan (adaptado de [12])

Concluiu-se que as maiores temperaturas registadas ocorreram na localização A, quando comparadas com as temperaturas registadas na localização B, para a mesma área de incêndio. Tal deveu-se à escolha da localização do foco de ignição da localização B, que se encontra mais

próxima do centro do edifício, altura livre disponível também é maior e os gases quentes e fumo são mais facilmente ventilados. A Figura 2.12 mostra o resultado da simulação de fumo e gases para os cenários 1 e 3 [12].

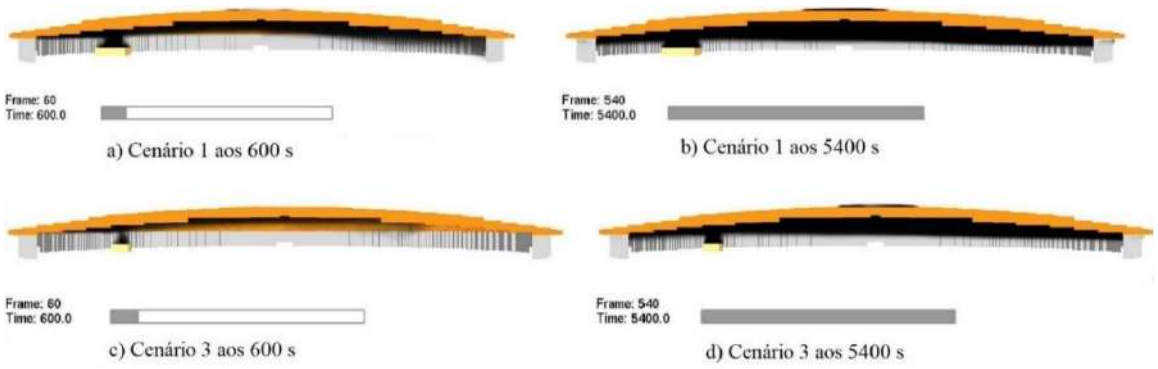



Figura 2.12 - Previsão de distribuição de fumo e gases para os cenários 1 e 3 da simulação do centro de exposições de Taiyuan (adaptado de [12])

A previsão da distribuição de temperaturas para os cenários 1 e 3 a uma altura de 12 m estão representadas na Figura 2.13.

Do estudo realizado pode-se concluir que para a pior localização (localização A), o fumo subiu na forma de pluma axial simétrica e quando este atingiu a cobertura, parte alastrou para a zona central do edifício, sendo posteriormente ventilado para o exterior. Consequentemente, após 600 s de incêndio, apenas os gases próximos do local da fonte de ignição tiveram um aumento óbvio de temperatura. Verificou-se uma distribuição não uniforme de temperatura na proximidade do incêndio, com uma temperatura mais elevada acima do foco de incêndio, diminuindo com o aumento da distância ao incêndio. Devido à influência do pátio central do edifício, a temperatura dos gases do lado esquerdo do edifício foi superior à temperatura dos gases do lado direito, para a mesma distância ao foco de incêndio. Após 5400 s, as temperaturas mais elevadas foram cerca de 400ºC e 300ºC, para os cenários 1 e 3, respetivamente. Os resultados mostram igualmente que a influência da área do incêndio é mais significativa para o aumento da temperatura do que a localização do incêndio. Ficou igualmente evidente que as distribuições de temperatura obtidas neste estudo são altamente não uniformes e a curva padrão não é adequada para o dimensionamento ao fogo de estruturas inseridas em grandes compartimentos [12].

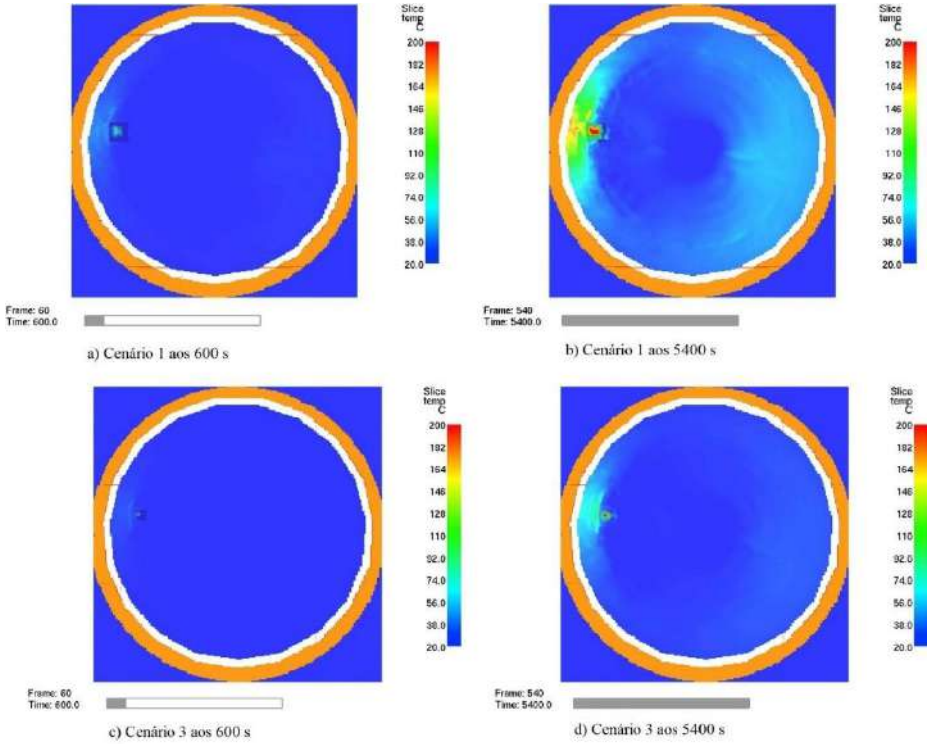



Figura 2.13 - Previsão da distribuição de temperaturas para os cenários 1 e 3 (a uma altura de 12 m) para a simulação do centro de exposições de Taiyuan (adaptado de [12])

#### 2.2.4.2 Pavilhão desportivo em Pequim

O estudo numérico que se apresenta de seguida recai na análise de um pavilhão desportivo construído para os jogos olímpicos de 2008 em Pequim. O edifício tem uma geometria circular com um grande vão de 12 000 $m^2$ e uma altura total de 36.5 m, medida da cúpula ao pavimento. A estrutura da cobertura é suportada por 288 cabos de aço radiais pré-esforçados com um diâmetro de 50 mm em duas camadas, com 144 cabos em cada camada. No centro da cobertura existe uma treliça espacial circular em aço que suporta os conjuntos de cabos superior e inferior. As extremidades de todos os cabos são ancoradas em vigas e pilares em betão armado ao redor do edifício, como indicado na Figura 2.14 [25].

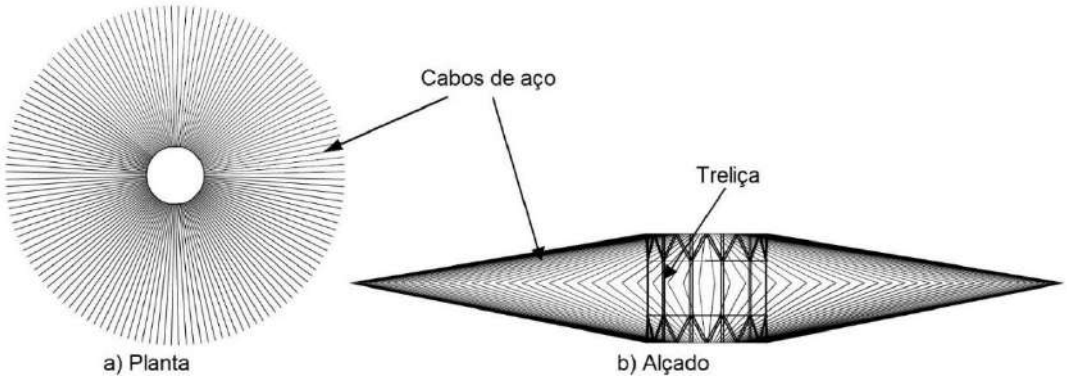



Figura 2.14 - Esquema estrutural do pavilhão desportivo em Pequim (adaptado de [25])

Com base na análise da estrutura e das instalações desportivas, a posição possível onde a probabilidade de ocorrência de um incêndio é mais elevada e mais danosa para a estrutura metálica, é nas bancadas mais próximas da cobertura. O local do incêndio foi assim considerado no ponto mais alto da bancada, como mostra a Figura 2.15 [25].

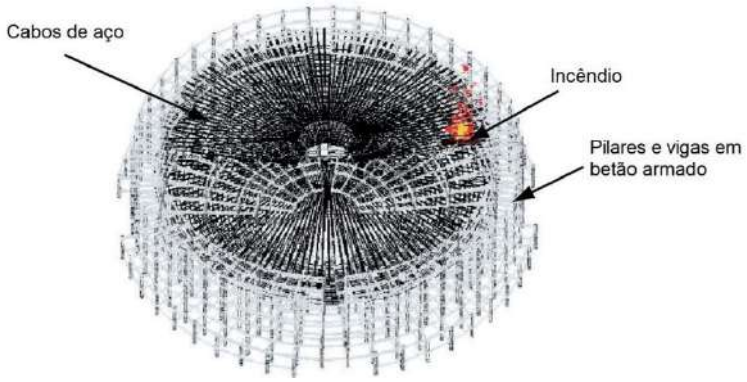



Figura 2.15 - Modelo do pavilhão desportivo em Pequim (adaptado de [25])

As cargas de incêndio foram projetadas para 8 MW, de acordo com testes realizados a um grupo de assentos de sofá e cadeiras de poliamida numa bancada. Os dispositivos de ventilação e controlo de incêndio não foram considerados para simular as piores condições. O cenário de incêndio é ilustrado na Figura 2.16 [25].

Figura 2.16 - Cenário de incêndio admitido na simulação do pavilhão desportivo de Pequim (adaptado de [25])

Com base nas simulações realizadas com auxílio do programa FDS, a temperatura máxima ocorre aos 1134 s e corresponde a 298.58ºC. A distribuição de temperatura revelou ser não uniforme, como indicado na Figura 2.17 [25].

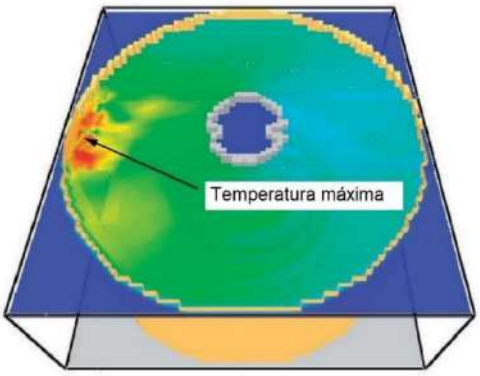



Figura 2.17 - Distribuição de temperatura aos 1134 s ma simulação do pavilhão desportivo de Pequim (adaptado de [25])

### 2.2.5 Estudos experimentais

Devido às condições necessárias para realizar um ensaio experimental e às restrições orçamentais, ainda há uma relativa falta de ensaios de incêndios em escala real. Estes ensaios experimentais são bastante relevantes para melhorar ou afinar a precisão de modelos numéricos [26].

Apresentam-se de seguida quatro casos relevantes de ensaios experimentais de incêndios em grandes compartimentos.

#### 2.2.5.1 "Parc des Expositions" em Paris

Na estrutura dum centro de exposições em Paris foram realizados dois estudos experimentais. O objetivo dos testes era a determinação da temperatura dos gases e da temperatura na estrutura em diferentes zonas, composição dos gases da combustão e a velocidade nas aberturas do compartimento em situação de incêndio. As dimensões do compartimento, denominado 1B, são: 144 m de comprimento, 65 m de largura e 28 m de altura. A estrutura metálica em treliça na cobertura foi separada do compartimento por uma tela horizontal situada a uma altura de 26 m. A existência de aberturas horizontais na cobertura permitiram a evacuação do fumo [17]. A planta do edifício está representada na Figura 2.18 e o corte na Figura 2.19.

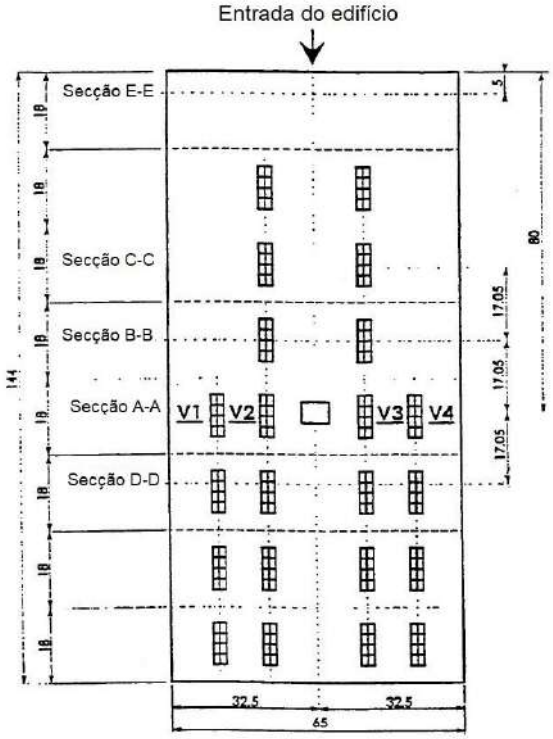



Figura 2.18 - Planta e localização dos cortes do edifício "Parc des expositions" em Paris (adaptado de [17])

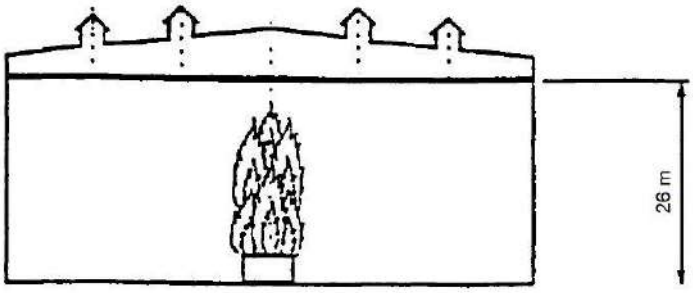



Figura 2.19 - Corte do edifício "Parc des expositions" em Paris (adaptado de [17])

Em ambos os ensaios, as temperaturas no compartimento foram medidas através de termopares. Foram instalados cerca de 50 termopares em quatro secções: A-A, B-B, C-C, D-D e E-E, como indicado na Figura 2.18 [17]. A posição e numeração dos termopares instalados estão indicados na Figura 2.20.

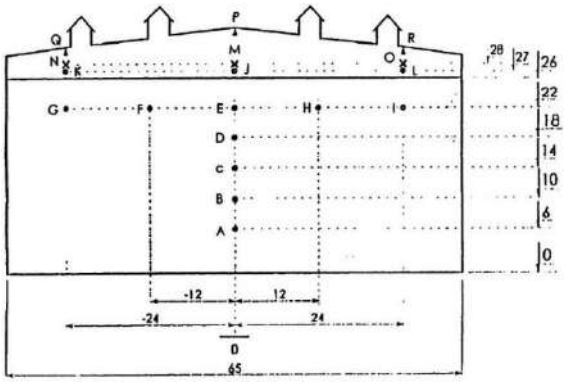



Figura 2.20 - Posição dos termopares numa secção-tipo no "Parc des expositions" em Paris [17]

O primeiro teste realizado teve como material combustível 133 paletes de madeira, distribuída em 8 conjuntos. Cada conjunto foi dividido em dois e separados por paredes divisórias de madeira do mesmo tipo das paletes, com uma altura de 2.5 m. A massa total contabilizou 3458 kg. No início do ensaio, foram incendiados dois compartimentos em simultâneo e o incêndio propagou a outros dois compartimentos de forma natural. A parede divisória criada colapsou 6 minutos após a ignição [17].

O segundo teste teve como material combustível 120 paletes divididas em 10 conjuntos uniformemente distribuídos, com uma massa total de 3562 kg de madeira. Todos os conjuntos foram incendiados ao mesmo tempo [17].

Os resultados mais gravosos obtidos para o primeiro teste estão representados na Figura 2.21 para a secção A-A, na Figura 2.22 para a secção B-B e na Figura 2.23 para a secção C-C.

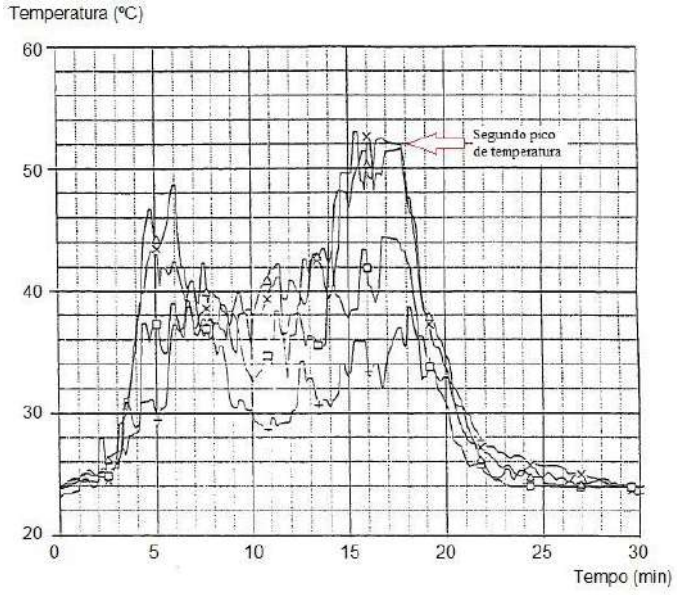



Figura 2.21 - Temperatura do compartimento na secção A-A para o primeiro teste no "Parc des expositions" em Paris (adaptado de [17])

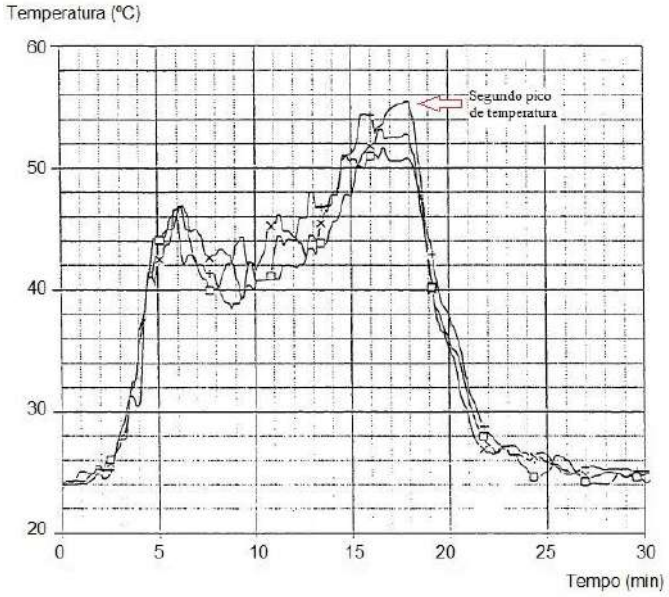



Figura 2.22 - Temperatura do compartimento na secção B-B para o primeiro teste no "Parc des expositions" em Paris (adaptado de [17])

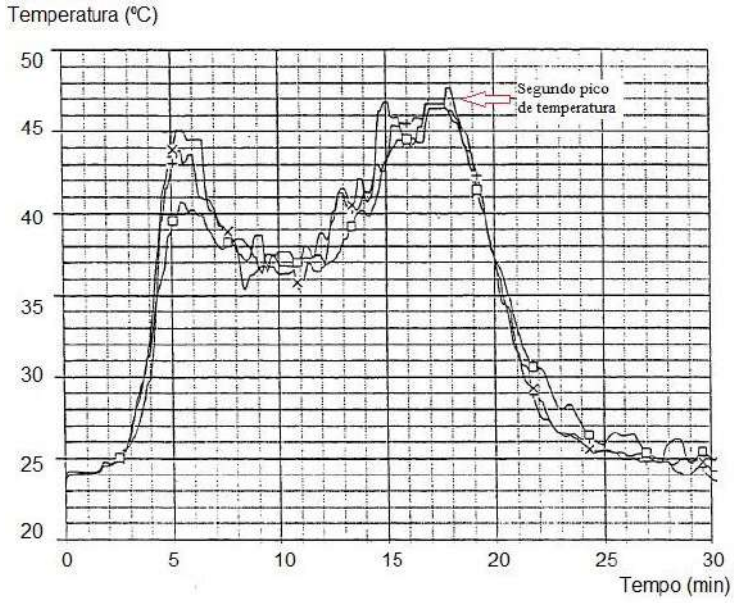



Figura 2.23 - Temperatura do compartimento na secção C-C para o primeiro teste no "Parc des expositions" em Paris (adaptado de [17])

Pela análise das figuras anteriores, é possível identificar o colapso da parede divisória e a ignição dos outros dois conjuntos (não incendiadas no início), dando início a um segundo pico de temperatura, que não ultrapassou os 56ºC [17].

No segundo teste, as leituras dos termopares indicaram uma homogeneidade de temperaturas a 22 m de altura, apesar de se registarem temperaturas superiores na tela de separação instalada acima do foco de incêndio e de algumas irregularidades na evolução temporal. As

irregularidades são o resultado das zonas de circulação de ar e da entrada de ar fresco com o desenvolvimento do fogo, especialmente durante a taxa máxima de pirólise [17].

Para uma taxa máxima de libertação de calor de 6.29 MW, pode-se observar na Figura 2.24 que os termopares situados acima do incêndio (secção A-A), mediram temperaturas em torno dos 800ºC a 10 m acima do pavimento, 500ºC a 14 m, 300ºC a 18 m e 200ºC a 22 m. A 27 m acima do pavimento as temperaturas registadas foram na ordem dos 100ºC e a 28 m de altura registaram-se temperaturas de 60ºC [17].

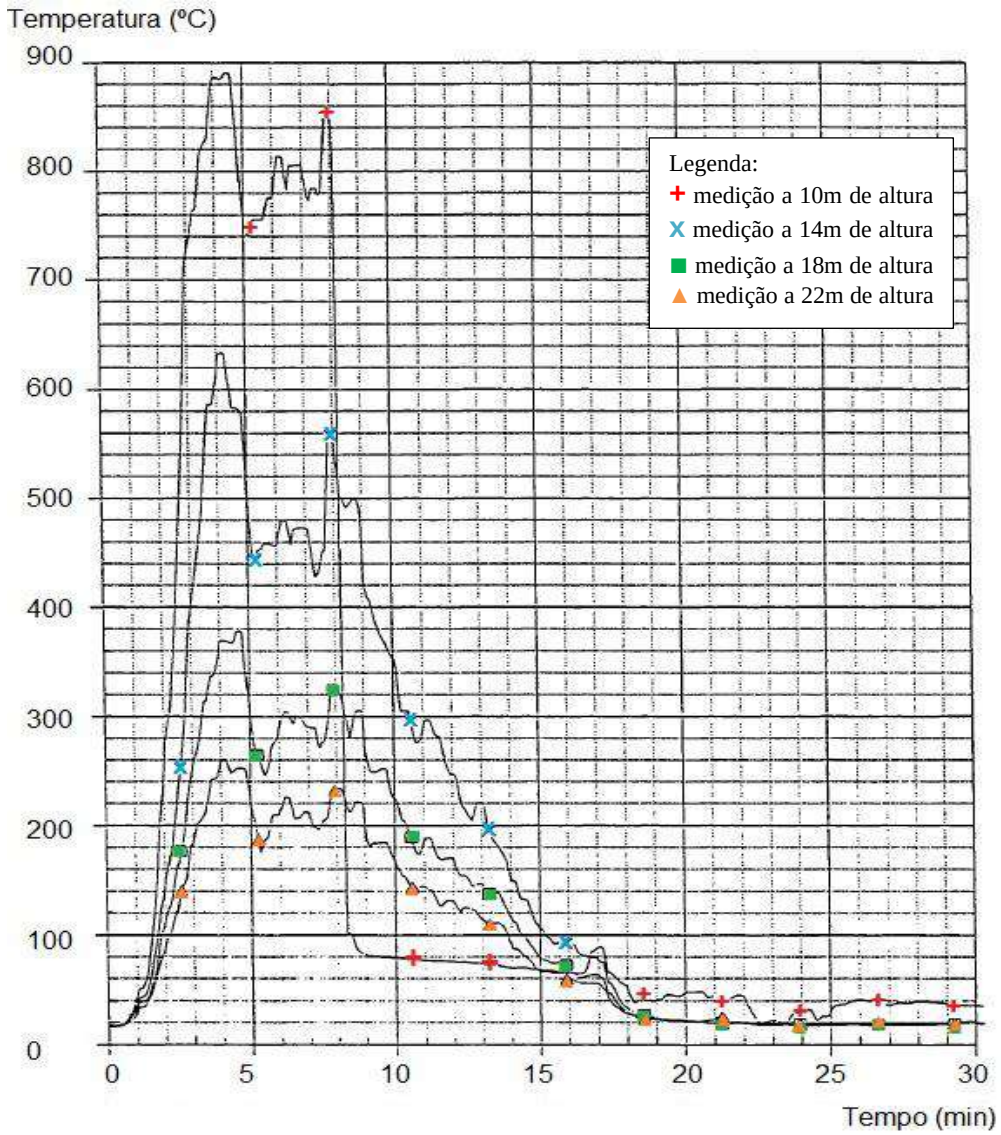



Figura 2.24 - Temperatura do compartimento na secção A-A para o segundo teste no "Parc des expositions" em Paris (HRR de 6.29MW) (adaptado de [17])

Os resultados obtidos para a secção A-A mostram que a zona superior (zona dos gases quentes) não é exatamente homogénea e as temperaturas mais elevadas foram medidas nas zonas mais próximas do incêndio. Estes resultados indicam que a altura do compartimento testado foi suficiente para que não existisse interação direta entre chamas, zona superior de gases quentes e estrutura da cobertura [17].

#### 2.2.5.2 Ensaio no Laboratório da Universidade de Minas e Tecnologia da China

Para investigar incêndios naturais em grandes compartimentos, foi realizado um ensaio experimental em grande escala no laboratório experimental da Universidade de Minas e Tecnologia da China, como mostra a Figura 2.25. Neste estudo, o combustível do incêndio considerado foi a queima de automóveis [26].

Figura 2.25 – Edifício onde foi realizado o ensaio experimental na Universidade de Minas e Tecnologia da China (adaptado de [26])

Foram utilizadas câmaras de alta definição para registar o desenvolvimento do incêndio e propagação do fumo. Para recolher dados da temperatura em tempo real, foram instalados Termopares tipo K. Como material isolante dos condutores dos termopares, envolveu-se externamente os termopares com uma malha de aço inoxidável e fibra de vidro. Foram igualmente utilizados termopares colocados em coluna vertical de forma a medir temperaturas de forma espacial. Estes termopares foram colocados diretamente acima do carro, existindo também uma coluna de termopares horizontais posicionada num plano 8.5 m acima do solo. O carro estava posicionado no centro do edifício e a ignição do incêndio foi ativada no motor [26].

Foi também colocada uma coluna horizontal de termopares nas proximidades da cobertura do edifício, com os termopares espaçados de 1 m ao longo do eixo próximo do incêndio e termopares espaçados de 2 m na zona mais afastada do incêndio. Com esta coluna horizontal, as mudanças de temperatura na zona próxima da cobertura foram medidas, fornecendo assim dados sobre a distribuição não uniforme de temperatura. Foi ainda instalado um medidor de fluxo de calor por radiação a 4 m de distância do incêndio, de forma a calcular a taxa de libertação de calor [26]. A Figura 2.26 mostra a disposição dos dispositivos de aquisição de dados.

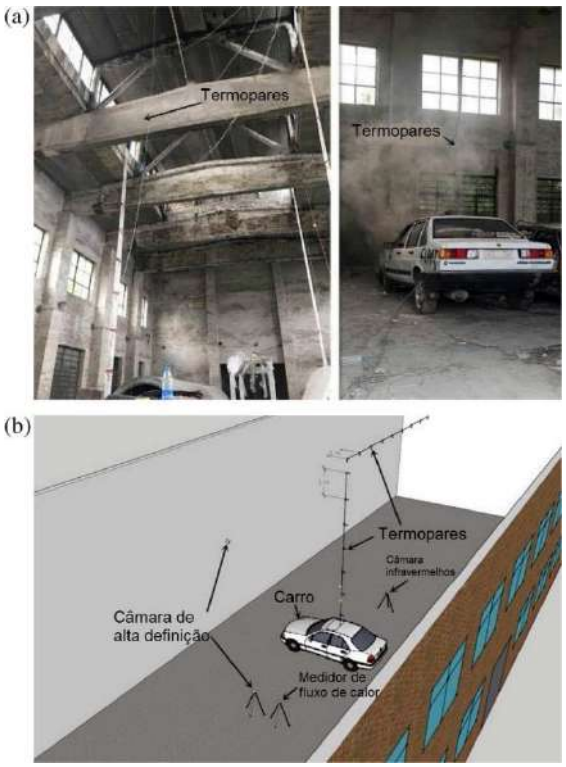



Figura 2.26 - Disposição dos dispositivos de aquisição de dados. a) foto do edifício e disposição de equipamentos; b) esquema 3D (adaptado de [26])

Tal como já referido, o incêndio iniciou-se no motor do carro. Nos primeiros 1000 s, o incêndio ficou maioritariamente confinado ao interior do capô do motor. De seguida observou-se o crescimento das chamas até aos pneus dianteiros. Após os 1200 s, o incêndio começou a espalhar-se para a parte traseira do carro e gradualmente entrou numa fase de crescimento rápido. Por volta dos 1750 s, o incêndio entrou na fase de desenvolvimento, estando a totalidade do carro em chamas. Por volta dos 2200 s, os materiais combustíveis na zona dianteira do carro foram gradualmente consumidos, mas o incêndio na zona traseira do carro permanecia bastante intenso. Posteriormente, a equipa de bombeiros começou a extinguir o incêndio, entrando este na sua fase de arrefecimento [26]. O processo de desenvolvimento descrito pode ser observado na Figura 2.27. Estes tempos de incêndio vêm corroborar estudos similares realizados em parques de estacionamento, tal como reportado por Haremza [27].

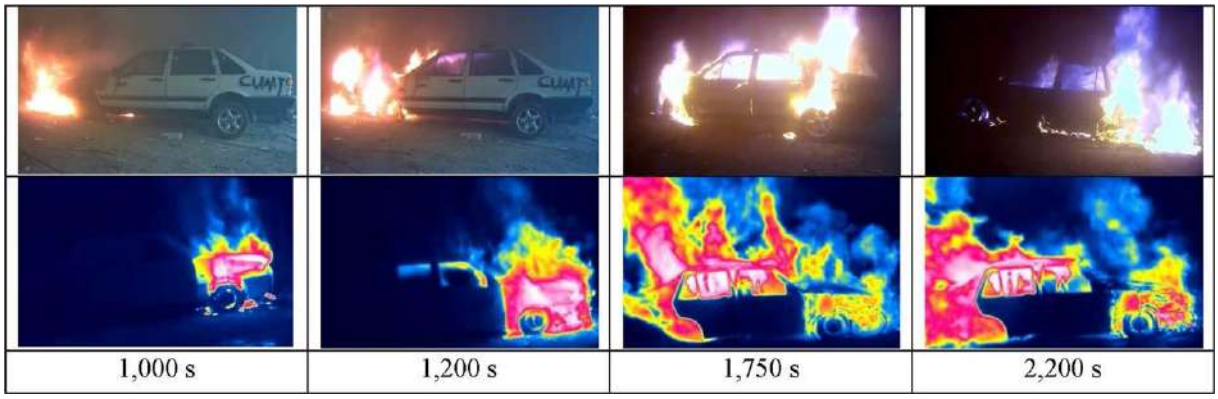



Figura 2.27 - Processo de desenvolvimento do incêndio no ensaio experimental na Universidade de Minas e Tecnologia da China [26]

O valor da taxa máxima de libertação de calor foi calculado através da medição do fluxo de calor e a distância do ponto medido ao foco de incêndio. A taxa máxima de libertação de calor calculada variou entre 3.5 MW e 5.5 MW. De acordo com a Figura 2.28, podem-se observar três fases que correspondem às fases de um incêndio natural. Calculando a temperatura média durante a fase de desenvolvimento completo em cada ponto de medição, obteve-se a distribuição não uniforme de temperatura representada na Figura 2.29 [26].

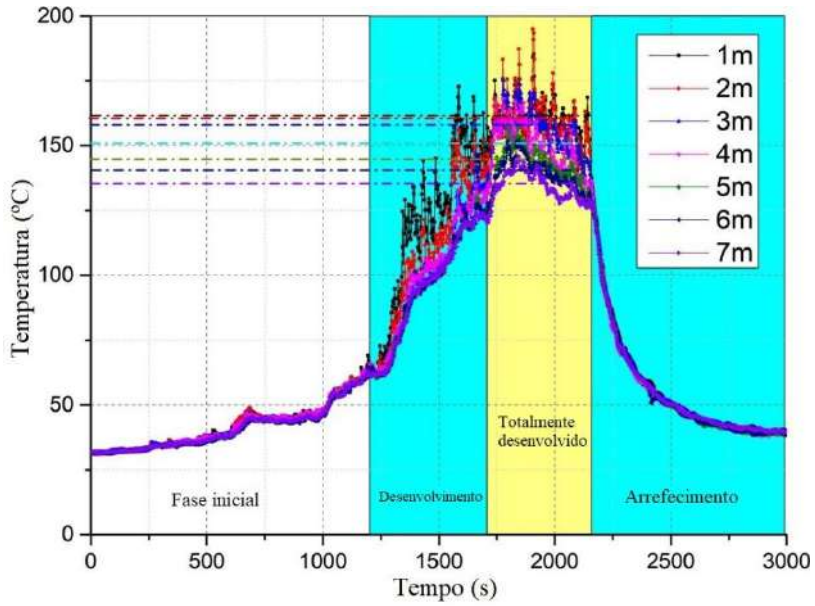



Figura 2.28 - Temperatura registada em altura no ensaio experimental na Universidade de Minas e Tecnologia da China (adaptado de [26])

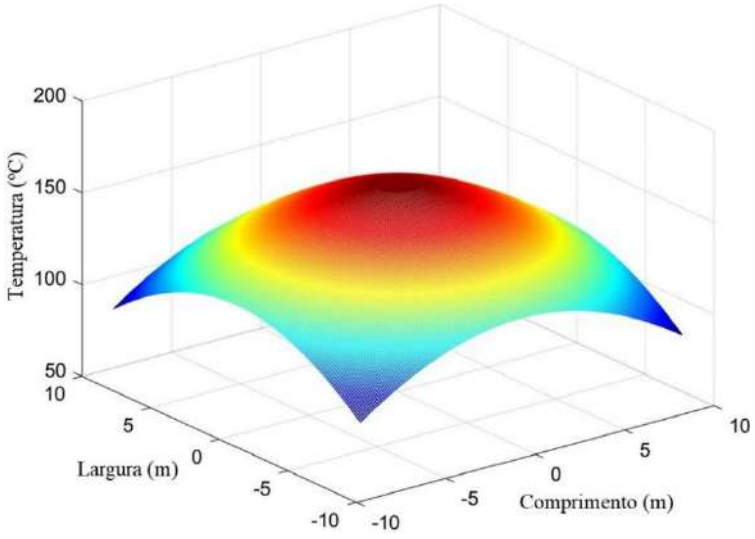



Figura 2.29 - Distribuição espacial dos valores médios da temperatura do incêndio na fase de pleno desenvolvimento no ensaio experimental na Universidade de Minas e Tecnologia da China (adaptado de [26])

A partir da Figura 2.29, pode-se constatar que a distribuição da temperatura no compartimento testado não é uniforme. Para um ponto de medição mais distante da linha central do incêndio, a temperatura diminui gradualmente. Ou seja, quanto mais próximo do incêndio, menor é a redução da temperatura e quanto mais afastado do incêndio, maior é a redução da temperatura [26].

#### 2.2.5.3 Ensaios no Centro de Testes de Múrcia

Com o objetivo de preencher lacunas de dados experimentais em grandes compartimentos, foram realizados três ensaios experimentais no Centro Tecnológico de Madrid, em Espanha. As instalações de teste consistiram numa estrutura prismática 19.5 m x 19.5 m x 17.5 m e uma cobertura piramidal com altura máxima de 2.5 m [28]. A Figura 2.30 mostra as instalações de teste e a Figura 2.31 um esquema com as principais dimensões.

Figura 2.30 - Fotografia das instalações utilizadas para os estudos experimentais em Múrcia, Espanha [28]

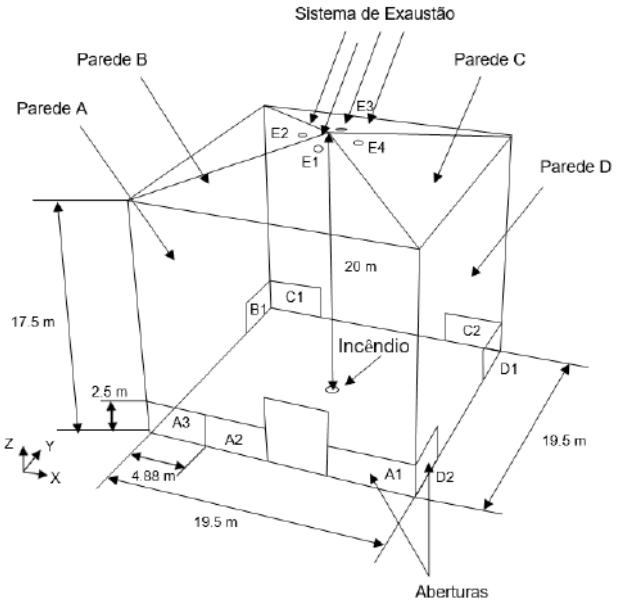



Figura 2.31 - Esquema tridimensional e dimensões das instalações de teste em Múrcia, Espanha (adaptado de [28])

As paredes e cobertura são em aço com 6 mm de espessura e o pavimento é constituído por betão. O sistema de evacuação de fumos é constituído por quatro exaustores instalados na cobertura, cada um com um diâmetro de 0.56 m, que permitiu a exaustão de 3.8 $m^3/s$, existindo ainda oito aberturas com grelha nas paredes junto ao pavimento, com dimensões de 4.88 m x 2.50 m. Nos dois primeiros testes, foi utilizado um sistema de exaustão de fumos. No terceiro teste, o fumo foi evacuado por ventilação natural através das aberturas [28].

O combustível utilizado foi heptano contido numa placa circular em aço, colocada no centro do compartimento. Foram utilizados dois diâmetros diferentes nos testes realizados: 0.92 m no

primeiro teste e 1.17 m no segundo e terceiro teste. O valor calculado da taxa de libertação de calor máxima para o primeiro teste foi de 1.32 MW, 2.38 MW para o segundo teste e 2.34 MW para o terceiro teste [28].

Para além dos resultados experimentais, os autores realizaram simulações numéricas recorrendo a análises CFD com auxílio do programa FDS. Os resultados experimentais e numéricos serão comparados neste subcapítulo.

A Figura 2.32 compara os resultados medidos e obtidos na simulação para o teste com 1.32 MW. São apresentados os resultados a uma altura de 12.55 m, com ventilação forçada por exaustão de fumos na cobertura e os resultados a uma altura de 10 m nas imediações da Parede A. Os valores medidos por termopares encontram-se a linha contínua. Os resultados das simulações são representados a linha tracejada para uma malha de 40 células por lado, linha pontilhada para uma malha de 60 células por lado, linha ponto-traço para uma malha de 90 células por lado, símbolo triangular para uma malha de 120 células por lado, símbolo losango para uma malha de 150 células por lado e símbolo quadrado para uma malha de 180 células por lado [28].

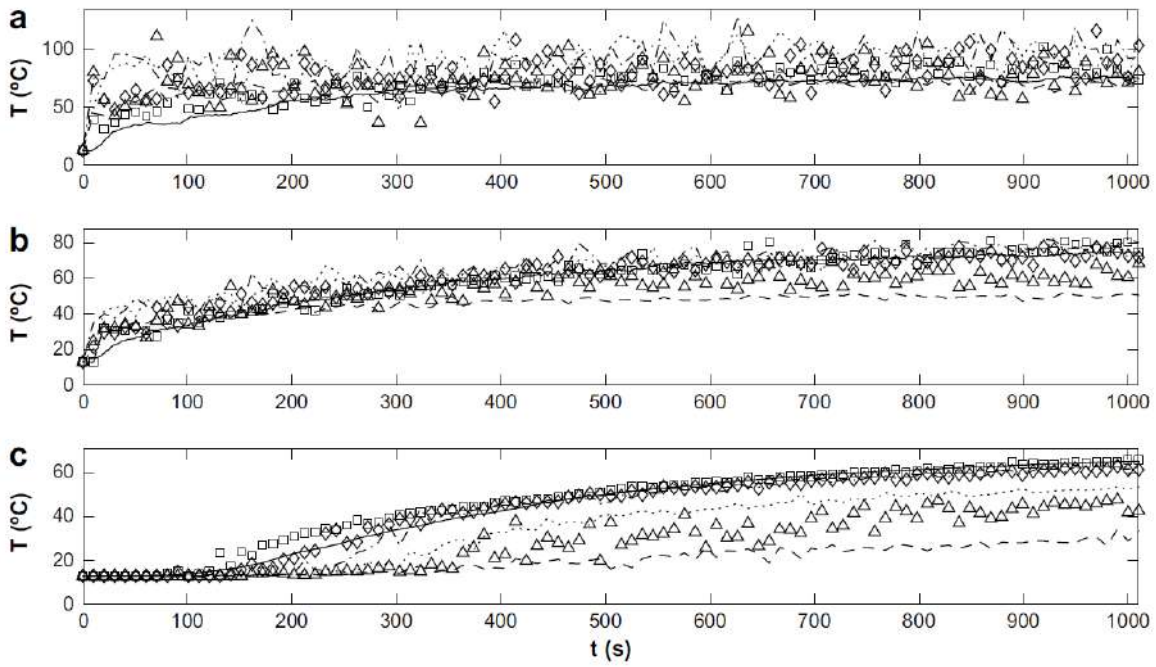



Figura 2.32 - Comparação entre a temperatura medida e as previsões para diferentes malhas utilizadas nas simulações para o teste com 1.32 MW. a) temperatura a 12.55 m de altura no eixo da pluma; b) temperatura nas aberturas da cobertura c) temperatura a 10 m de altura junto a parede A [28]

Os resultados obtidos para o teste 2 e teste 3 apresentam-se na Figura 2.33 e na Figura 2.34, respetivamente.

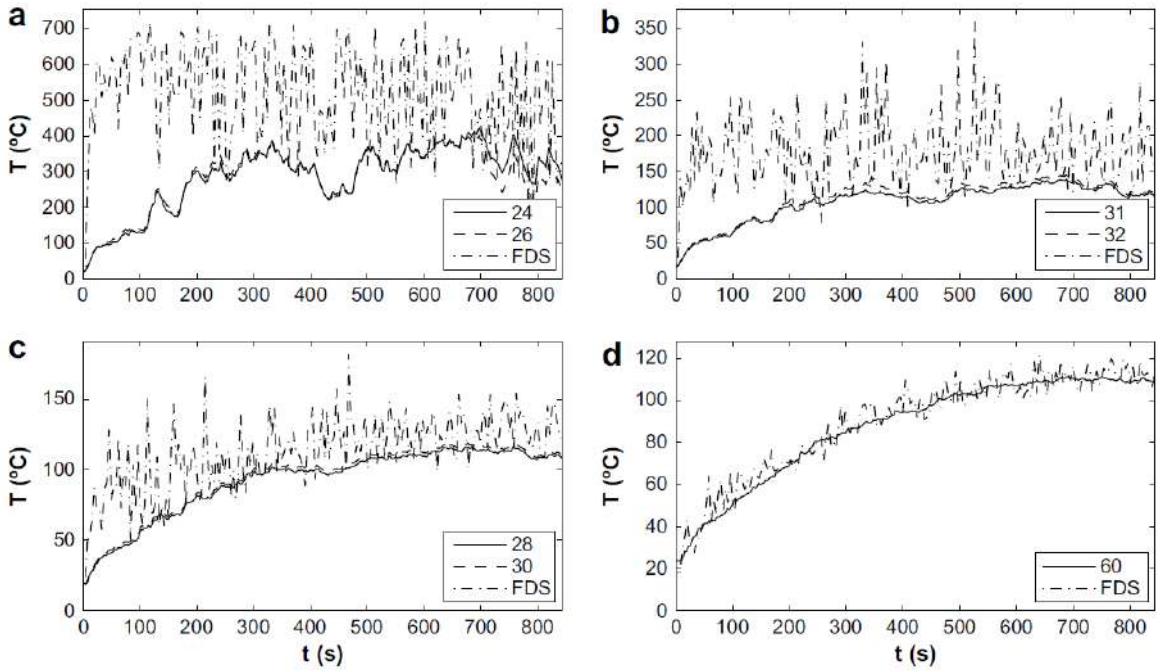



Figura 2.33 - Medições de temperatura identificadas pelo número dos termopares e resultados das simulações realizadas para o Teste 2 (2.28 MW). a) temperaturas a 4.55 m de altura; b) temperatura a 8.55 m de altura; c) temperatura a 12.55 m de altura; d) temperatura nas aberturas da cobertura [28]

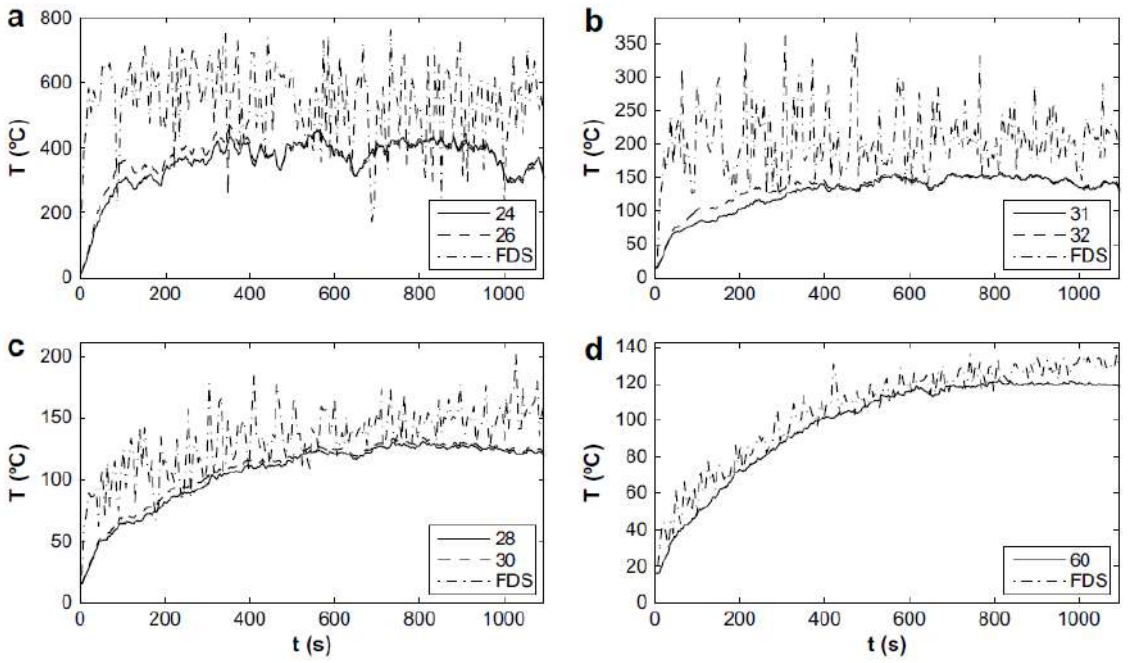



Figura 2.34 - Medições de temperatura identificadas pelo número dos termopares e resultados das simulações realizadas para o Teste 3 (2.34 MW). a) temperaturas a 4.55 m de altura; b) temperatura a 8.55 m de altura; c) temperatura a 12.55 m de altura; d) temperatura nas aberturas da cobertura [28]

Comparando os resultados para uma combinação de ventilação natural e forçada (Teste 2) e apenas ventilação natural (Teste 3) para o mesmo diâmetro de incêndio, observa-se que para os casos particulares em estudo, o uso de exaustão mecânica apresenta pequenas diferenças da temperatura na cobertura (19% menor). Observaram-se igualmente pequenas diferenças na altura da camada com fumo (7% superior) e uma redução de 40% da velocidade da camada de fumo descendente para a altura mais baixa [28].

No que às simulações diz respeito, observou-se que estas estimam por excesso (40%-80%) a temperatura da pluma na zona próxima da chama (abaixo de 9 m), estimando igualmente por excesso (10%-25%) a temperatura da pluma acima de 9 m. Os resultados obtidos por simulação são satisfatórios e, segundo os autores, enquadram-se com os encontrados na literatura [28].

#### 2.2.5.4 Ensaio de uma Cobertura em Treliça Metálica

O elemento ensaiado consistiu numa cobertura de um edifício circular, com diâmetro de 8 m e altura total de 4.02 m. A cobertura é constituída por seis treliças planares em perfis tubulares retangulares em aço. Foram realizadas duas aberturas com as dimensões de 1.2 m x 2.0 m para fornecer o oxigénio suficiente durante o ensaio [29]. Na Figura 2.35 apresenta-se o compartimento e uma planta da treliça da cobertura.

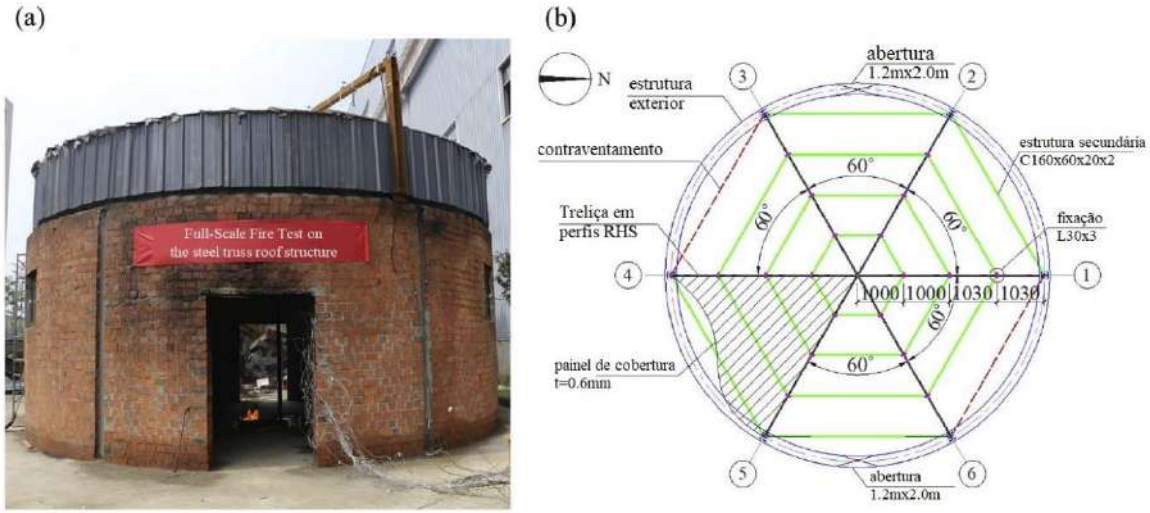



Figura 2.35 - Configuração geral do ensaio. a) foto do compartimento; b) planta da cobertura (adaptado de [29])

Para garantir a integridade dos dispositivos de medição e de forma a fornecer dados experimentais em incêndios localizados de reduzida área, realizaram-se dois ensaios não destrutivos. O combustível utilizado foi óleo *diesel*, colocado numa placa de dimensões 0.70 m x 0.70 m e a taxa de libertação de calor calculada foi de 360 kW. Foi definido o cenário 1 com a localização do incêndio no centro do compartimento e o cenário 2 com o incêndio localizado na periferia do compartimento, de acordo com a Figura 2.36 [29].

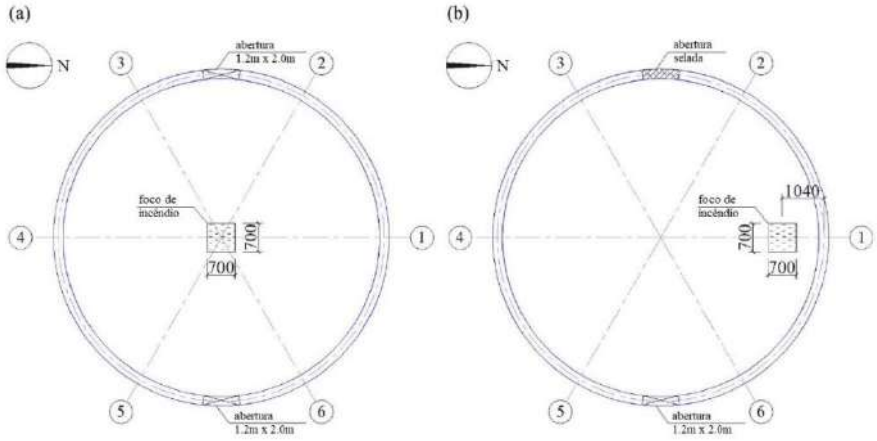



Figura 2.36 - Localização do incêndio nos dois cenários não destrutivos. a) cenário 1; b) cenário 2 (adaptado de [29])

Para averiguar o comportamento da treliça em aço num cenário de colapso induzido pelo fogo, foi considerado um terceiro cenário. Foram utilizados berços em madeira, pois a sua geometria possibilita que as chamas se aproximem mais da estrutura da cobertura, quando comparado com um incêndio iniciado apenas com óleo *diesel*. Colocaram-se seis berços em madeira com dimensões de 1.0 m x 1.0 m x 1.12 m e uma placa com dimensões 0.70 m x 0.70 m com dois litros de óleo *diesel* para provocar uma ignição [29]. A Figura 2.37 apresenta a localização da estrutura na planta do compartimento.

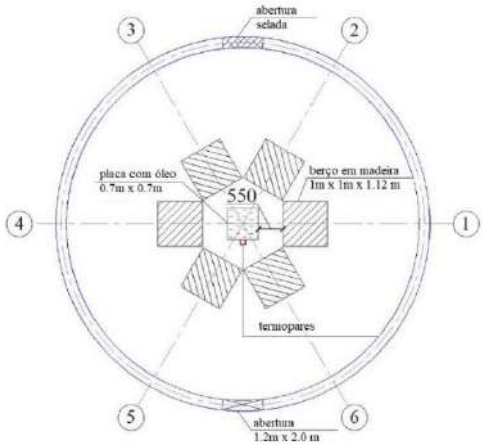



Figura 2.37 - Localização dos berços de madeira para o terceiro cenário (adaptado de [29])

Instalaram-se no total 56 termopares, com a função de medição da temperatura do ar interior, temperatura do ar acima do foco de ignição e medição de temperatura junto aos elementos estruturais [29]. A distribuição parcial dos termopares encontra-se na Figura 2.38.

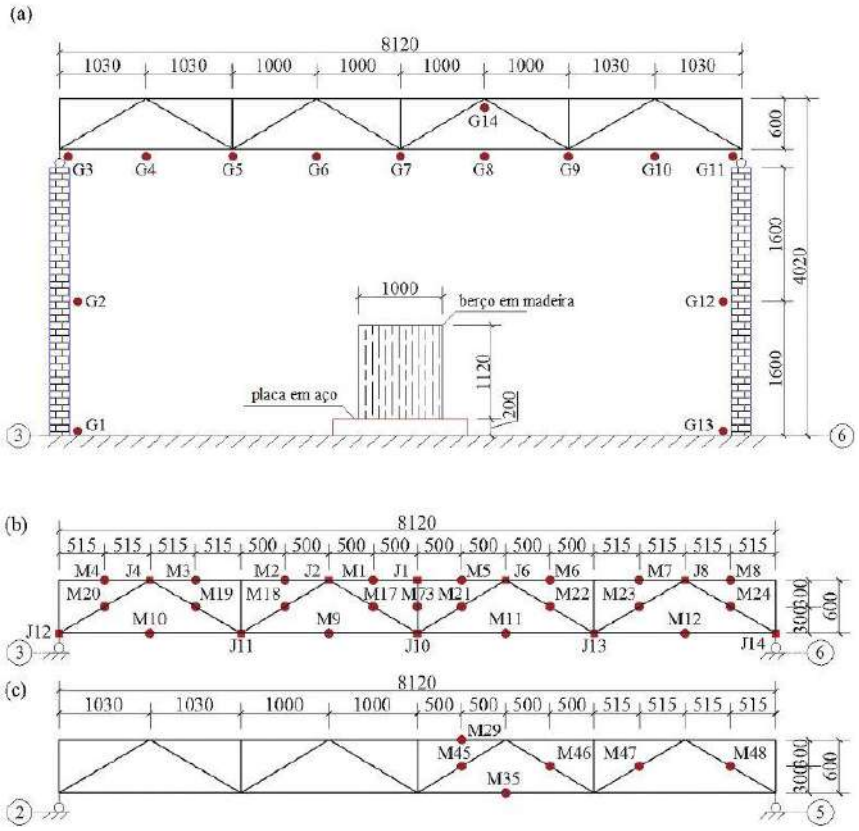



Figura 2.38 - Localização dos termopares (adaptado de [29])

Para o cenário 1, a altura máxima registada da chama foi de 2 m aos 230 s. Devido à influência do vento, o incêndio iniciou uma fase de arrefecimento aos 536 s. A combustão terminou aos 900 s devido ao consumo total do combustível [29].

O processo para o cenário 2 foi muito similar ao descrito para o cenário 1 em relação ao tempo de incêndio. A grande diferença residiu na posição do incêndio e a existência de apenas uma abertura para minimizar a influência do vento no processo de combustão. A altura máxima registada da chama foi de 2 m aos 369 s, entrando-se numa fase de arrefecimento aos 540 s e terminando aos 900 s devido ao consumo total do combustível. A Figura 2.39 regista o momento em que se atingiu a altura máxima da chama para os dois cenários ensaiados.

Figura 2.39 - Aspeto do ensaio para o Cenário 1 e 2 no momento do registo do altura máxima de chama (adaptado de [29])

As curvas de temperatura em função do tempo podem ser consultadas na Figura 2.40 para o cenário 1 e na Figura 2.41 para o cenário 2. Para o cenário 1 observa-se que a temperatura registada tem uma redução acentuada aos 530 s, subindo novamente até aos 720 s. A temperatura registada para o cenário 2 é mais estável, acentuando a necessidade de selar uma das aberturas para minimizar a influência do vento. Verifica-se igualmente que o incêndio localizado de pequenas dimensões influencia a distribuição da temperatura do ar no espaço interior e a temperatura não pode ser considerada como uniformemente distribuída [29].

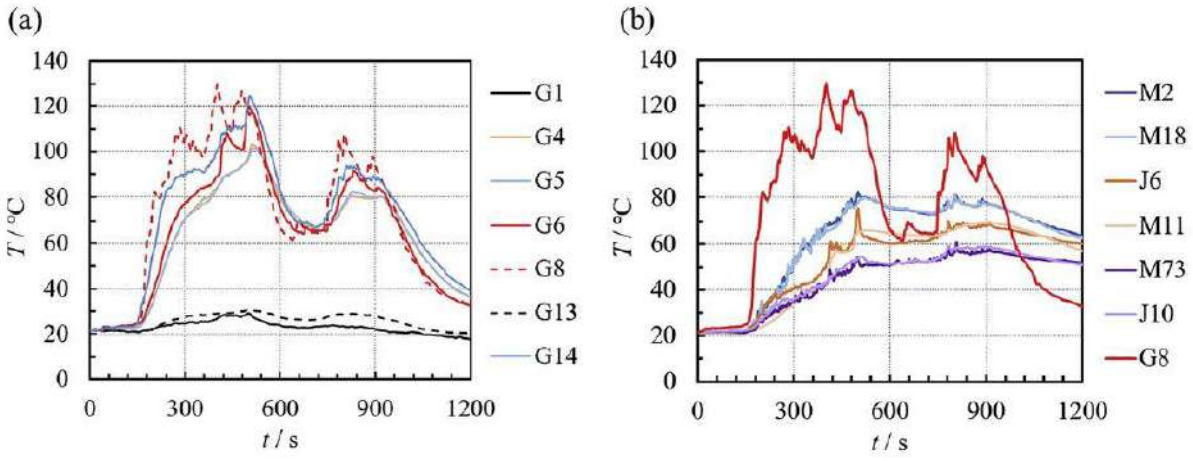



Figura 2.40 - Temperatura registada para o cenário 1. a) temperatura no ar; b) temperatura nos elementos estruturais da cobertura [29]

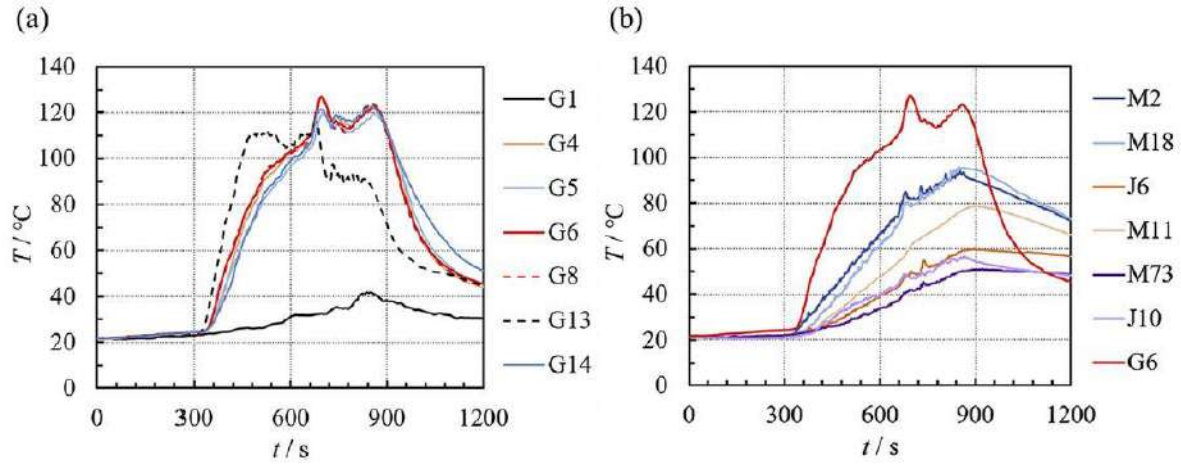



Figura 2.41 - Temperatura registada para o cenário 2. a) temperatura no ar; b) temperatura nos elementos estruturais da cobertura [29]

Relativamente ao cenário 3, a intensidade do incêndio atingiu o seu máximo aos 600 s e aos 750 s a chama tinha atingido completamente a cobertura. Aos 900 s observou-se uma grande deformação da estrutura da cobertura. O incêndio só foi controlado aos 1800 s, sendo extinto manualmente aos 3000 s. As curvas de temperatura em função do tempo apresentam-se na Figura 2.42. Pode-se observar uma divisão em quatro fases: até aos 210 s a temperatura permaneceu em valores reduzidos, aumentando muito lentamente; entre 210 s e 810 s a temperatura aumentou rapidamente, observando-se uma fase de crescimento significativo; entre os 810 s e 900 s a temperatura máxima manteve-se estável, correspondendo a uma combustão constante, e após os 900 s verificou-se uma redução rápida da temperatura. A Figura 2.43 regista o momento em que o incêndio atingiu o seu máximo [29].

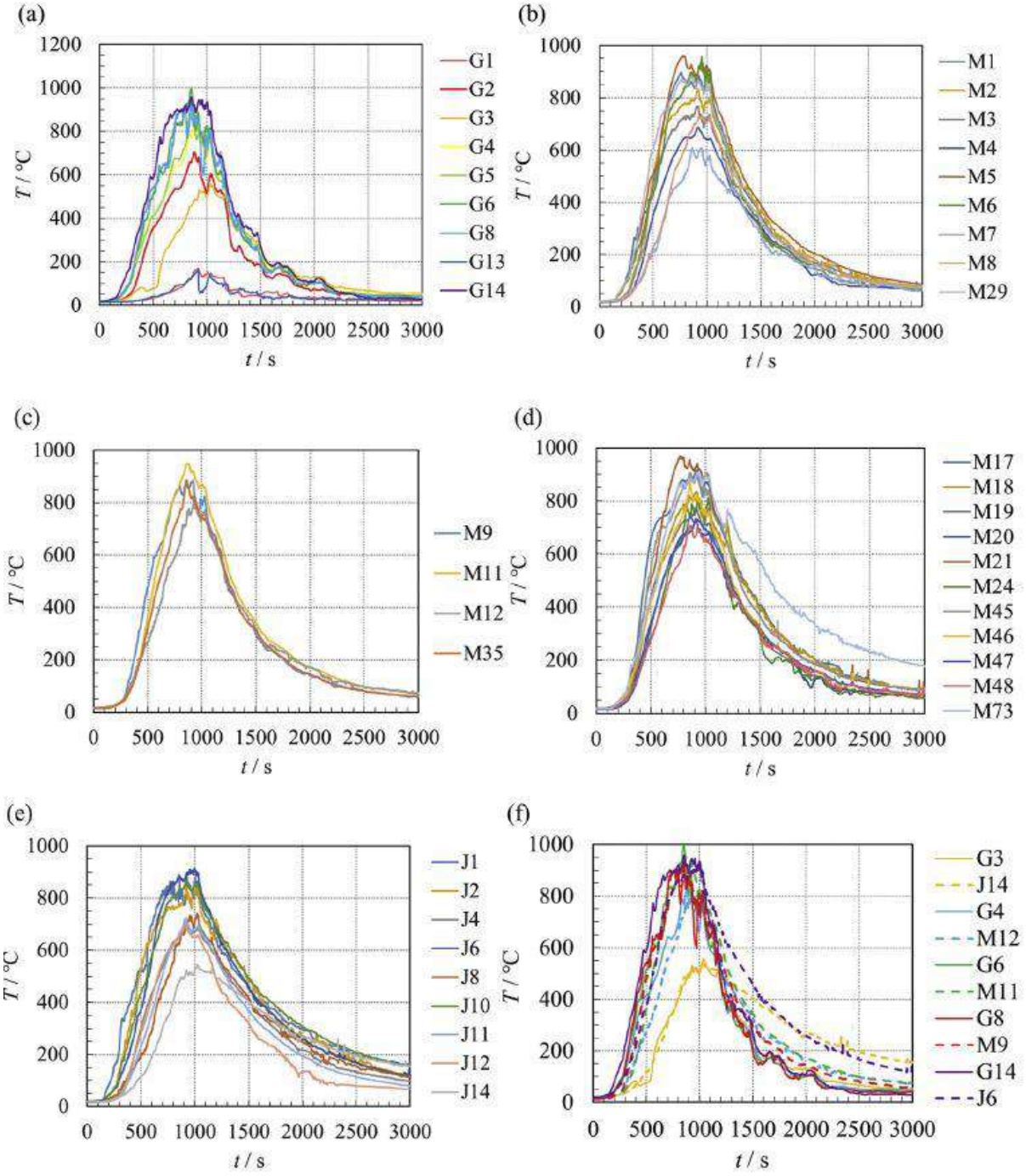



Figura 2.42 - Temperatura registada para o cenário 3. a) temperatura no ar; b) temperatura na corda superior da treliça de cobertura; c) temperatura na corda inferior da treliça de cobertura; d) temperatura nos nós da treliça de cobertura; f) comparação entre a temperatura do ar e a temperatura dos elementos estruturais [29]

Figura 2.43 - Aspeto do ensaio para o Cenário 3 aos 600 s [29]

## 2.3 Requisitos de resistência ao fogo

De acordo com a EN 1993-1-2 [2], para uma exposição padrão ao fogo, os elementos devem cumprir o critério de resistência ao fogo R (capacidade de suporte de carga). Este critério está definido na regulamentação nacional de segurança contra incêndios de edifícios, sendo definido em função do tipo de edifício, ocupação e altura. Deve ser identificado pela letra R seguida de um número que representa o período de resistência exigido ao fogo. Por exemplo, R60 significa que este critério é considerado satisfeito quando a função de suporte de carga é mantida por 60 minutos de exposição padrão ao fogo [14].

Apresentam-se de seguida os requisitos de resistência ao fogo de vários países para edifícios de grande área de um só piso.

### 2.3.1 Portugal

Na Portaria nº 135/2020 [30] são feitas alterações ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios. Neste documento, para edifícios de um só piso no plano de referência com utilização - tipo II a XII, a resistência ao fogo exigida é R60, para 2ª, 3ª e 4ª categorias de risco. Para edifícios da 1ª categoria de risco, não são feitas exigências relativas à resistência ao fogo [30]. No Quadro 2.5 encontram-se resumidas as exigências para edifícios de um só piso no plano de referência.

Quadro 2.5 - Requisitos de resistência ao fogo em Portugal para edifícios de um piso no plano de referência

| Utilizações-tipo | Categorias de risco | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1ª | 2ª | 3ª | 4ª |
| I | Sem exigência | R60 | R90 | R120 |
| II a XII | Sem exigência | R60 | R60 | R60 |

### 2.3.2 Espanha

O documento DB-SI [31] especifica os requisitos mínimos de resistência ao fogo dos elementos estruturais, exceto no caso de edifícios, estabelecimentos e zonas de uso industrial. Para estes aplicam-se as normas de segurança contra incêndio em elementos industriais (RSIEI) [32].

De acordo com o documento DB-SI, para alturas de evacuação inferiores a 15 m, aplica-se o critério R90 a edifícios comerciais, edifícios públicos e hospitais [31].

Para edifícios industriais, é necessário classificar o edifício em função do seu uso; o caso em estudo nesta dissertação é do tipo B (uso industrial que ocupa integralmente o edifício a uma distância igual ou inferior a 3 m de outros edifícios) e o tipo C (uso industrial que ocupa integralmente o edifício a uma distância superior a 3 m de outros edifícios). É ainda necessário classificar o edifício de acordo com 3 níveis de risco (baixo, médio e alto), avaliados de acordo com a densidade de carga de incêndio [32].

Assim, para edifícios industriais tipo B, os critérios são R60, R90 e R120 para risco baixo, médio e alto, respetivamente. Para edifícios industriais tipo C, os critérios são R30, R60 e R90 para risco baixo, médio e alto, respetivamente. Para edifícios industriais tipo C a mais de 10 m de outro edifício, não são feitas exigências de resistência ao fogo. Todos os critérios apresentados podem ser reduzidos caso o edifício tenha uma carga na cobertura inferior a 1 $kN/m^2$ e disponha de um sistema de extração de fumos, exigindo-se R15, R30 e R60 para edifícios tipo B com risco baixo, médio e alto, respetivamente. Para os edifícios tipo C, não há exigência de resistência ao fogo para nível de risco baixo, exigindo-se R15 e R30 para risco médio e alto, respetivamente [32].

### 2.3.3 Inglaterra

Em Inglaterra, para edifícios de um só piso, as exigências relativas à resistência ao fogo com sistema de *sprinklers* diferem das exigências sem sistema de *sprinklers*. Para edifícios comerciais, recreativos, industriais e de armazenamento é exigido R60 para edifícios sem sistema de *sprinklers* e R30 para edifícios com sistema de *sprinklers* [33].

### 2.3.4 França

A regulamentação francesa indica que para edifícios com menos de 8 m de altura que recebem público, a resistência ao fogo exigida para a estrutura é R30 para a 2ª, 3ª e 4ª categorias e R60 para a 1ª categoria [34].

Qualquer operação industrial com probabilidade de criar riscos ou causar poluição ou incómodos, em particular para a segurança e saúde dos residentes locais, é uma instalação que deve ser incluída nos requisitos gerais aplicáveis a instalações classificadas para a proteção do meio ambiente. Assim, para edifícios industriais a resistência ao fogo exigida é de R15. A exceção ocorre para elementos estruturais que servem de suporte a pisos que contenham

armazenados produtos com solventes inflamáveis, neste caso é exigido uma resistência ao fogo de R120 [35].

### 2.3.5 Bélgica

Para elementos estruturais inseridos num edifício com altura inferior a 10 m com um piso acima do nível mais baixo de evacuação, é exigido R30 à estrutura da cobertura e aos restantes elementos estruturais. Caso a estrutura da cobertura seja separada do resto do edifício por um elemento de construção EI 30, não existem requisitos a cumprir relativos à resistência ao fogo [36].

Para edifícios industriais é necessário definir a que classe do edifício em função da densidade de carga de incêndio: classe A ($q_{f,d} \leq 350$ MJ/m$^2$), B (350 MJ/m$^2$ $< q_{f,d} \leq 900$ MJ/m$^2$) e C ($q_{f,d} >$ 900 MJ/m$^2$). É ainda necessário definir o elemento estrutural como tipo I ou tipo II. Elementos do tipo I correspondem a elementos estruturais que caso entrem em colapso, podem ocasionar colapsos progressivos, provocando danos fora do limite do edifício e pondo em perigo edifícios adjacentes. Elementos tipo II correspondem a elementos estruturais que em caso de colapso, dão origem a um colapso progressivo limitado ao edifício afetado [37].

Assim, para elementos estruturais tipo I, a resistência exigida é R60 para edifícios classe A e R120 para edifícios classe B e classe C. Para elementos estruturais tipo II, a exigência necessária não é definida "arbitrariamente", mas deve ser calculada. Existem soluções pré-calculadas que dependem da área do compartimento, da sua função e da existência de sistema de *sprinklers*. A exigência de resistência ao fogo pode ser no mínimo R30 ou não haver exigência sequer [37]. O Quadro 2.6 resume as exigências para elementos estruturais deste tipo.

Quadro 2.6: Áreas máximas autorizadas em metros quadrados de um compartimento e duração da resistência ao fogo dos elementos estruturais do tipo II [37]

| Classe | | Sem *sprinklers* | | Com *sprinklers* | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Sem exigência | ≥ R30 | Sem exigência | ≥ R30 |
| Produção (ou misto) | A | 25 000 | 25 000 | 150 000 | 150 000 |
| | B | 5 000 | 10 000 | 40 000 | 60 000 |
| | C | 2 000 | 5 000 | 7 000 | 30 000 |
| Armazenamento | C | 5 000 | 5 000 | 12 500 | 30 000 |

### 2.3.6 Resumo

Apresenta-se no Quadro 2.7 um resumo dos requisitos de resistência ao fogo do levantamento realizado para edifícios de um piso.

Quadro 2.7: Requisitos de resistência ao fogo de vários países para edifícios comerciais e industriais de um piso

| | Países | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Tipo de edifício | Portugal | Espanha | França [6] | Inglaterra | Bélgica |
| Comercial | R60 | R90 [1] | R30 [7] / R60 | R30 [8] / R60 | R30 [9] |
| Industrial | R60 | R60 a R120 [2] [4]<br>R30 a R90 [3] [5] | R15 | R30 [8] / R60 | R60 / R120 [10]<br>R0 / R30 [11] |

Notas:
[1] altura inferior a 15 m;
[2] edifícios tipo B
[3] edifícios tipo C
[4] possível redução até R15
[5] possível redução até R0
[6] altura inferior a 8 m
[7] 2ª, 3ª e 4ª categorias
[8] com sistema de *sprinklers*
[9] altura inferior a 10 m
[10] tipo I
[11] tipo II

## 2.4 Pavilhões industriais e comerciais comuns em Portugal

De seguida apresentam-se alguns dos pavilhões comerciais e industriais construídos em Portugal, dando-se particular relevância às dimensões em planta e altura.

Quadro 2.8: Quadro resumo de pavilhões industriais e comerciais em Portugal

| Edifício | Dimensões | Fotografia | |
|---|---|---|---|
| Armazém de produto acabado Mabor (Vila Nova de Famalicão) | Área: 40 921 m$^2$<br>Altura: 9.5 m | | [38] |
| Renault Cacia (Aveiro) | Área: 20 000 m$^2$<br>Altura: 8 m | | [39] |

| Edifício | Dimensões | Fotografia | |
|---|---|---|---|
| Pavilhão de Modalidades João Rocha (Lisboa) | Área: 4 250 m$^2$<br>Altura: 12.5 m | | [40] |
| Pavilhão Multiusos do Cevadeiro (Vila Franca de Xira) | Área: 1 950 m$^2$<br>Altura: 11m | | [40] |
| Supermercado Pingo Doce (Guimarães) | Área: 2 456 m$^2$<br>Altura: 8.4 m | | [41] |
| Supermercado Pingo Doce (Freamunde) | Área: 1 865 m$^2$<br>Altura: 6 m | | [42] |

| Edifício | Dimensões | Fotografia | |
|---|---|---|---|
| Decathlon Coimbra | Área: 3 541 $m^2$<br>Altura: 7 m | | [43] |

Perante os exemplos apresentados, pode-se constatar que as áreas dos edifícios são bastante distintas, uma vez que as utilizações e necessidades dos edifícios variam. As alturas apresentadas variam entre 6 m e 8.4 m para atividades comerciais, 8 m a 9.5 m para edifícios de atividade industrial e 11 m a 12.5 m para edifícios desportivos e pavilhões multiusos.

# 3 APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO E ANÁLISE

## 3.1 Preâmbulo

Neste capítulo é apresentado o caso de estudo que corresponde a um pavilhão comercial e industrial genérico de um só piso. Procura-se efetuar uma análise e dimensionamento de um pórtico metálico do pavilhão à temperatura ambiente e em cenário de incêndio. Para tal, pretende-se utilizar os modelos de incêndio presentes na EN1991-1-2 de forma estimar de forma simplificada a ação térmica, complementando-se com outros modelos semelhantes de reconhecido valor. Por fim são comparadas as soluções obtidas utilizando diferentes tipos de proteção ao fogo em estruturas metálicas, realizando-se uma análise de custos.

## 3.2 Apresentação do caso de estudo

O pavilhão comercial que se propõe servir de caso de estudo tem as dimensões em planta de 30 m x 20 m e uma altura até ao topo das colunas de 6 m. A cobertura tem uma inclinação de 8%, que corresponde ao valor mínimo recomendado pelos fabricantes de painéis *sandwich* de forma a garantir estanquidade. Optou-se pela solução de painéis *sandwich* por ser uma solução bastante utilizada em pavilhões deste género. Com base nestes dados, a altura total até à cumeeira é de 6.8 m. A Figura 3.1 mostra as dimensões gerais do pavilhão proposto.

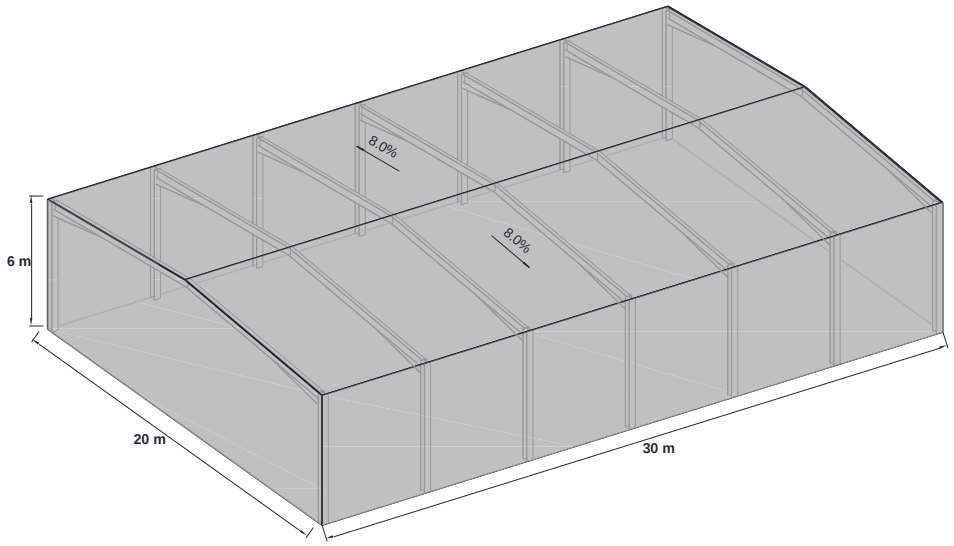



Figura 3.1 - Dimensões do pavilhão industrial e comercial proposto como caso de estudo

Os elementos envolventes do compartimento foram selecionados com base na sua grande aplicabilidade em edifícios semelhantes em Portugal. Assim, para o pavimento foi selecionado

betão com 0.20 m de espessura. Para as fachadas e cobertura, foram selecionados painéis *sandwich* com uma espessura de 0.04 m, com núcleo em de lã de rocha.

## 3.3 Dimensionamento à temperatura ambiente

A solução estrutural proposta tem como princípio orientador conseguir uma solução económica com geometria uniformizada. Para tal analisou-se um pórtico com uma largura de influência de 5 m. A solução estrutural é genericamente caracterizada por apoios rotulados nas bases das colunas e ligações de continuidade na zona viga-coluna e viga-viga (cumeeira). O pórtico vence os 20 m de vão, como se indica no corte transversal apresentado na Figura 3.2. O sistema de contraventamento do pavilhão e a estrutura secundária de suporte de cobertura e fachada não foram analisados. Esta decisão prende-se com a necessidade estudar a otimização da proteção contra incêndio dos elementos coluna e viga, os elementos que se consideram mais relevantes a investigar nestas análises preliminares.

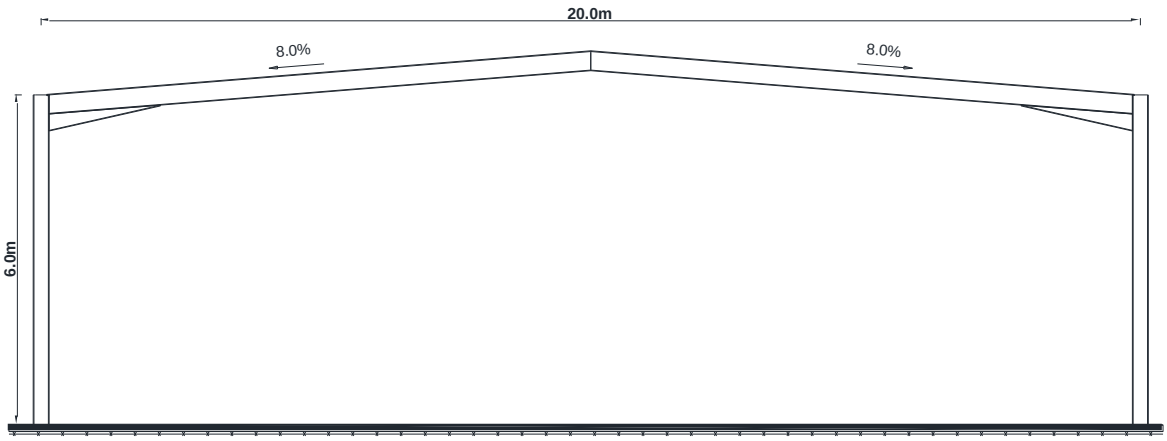



Figura 3.2 - Corte transversal tipo do pavilhão industrial e comercial proposto

A escolha da classe de resistência do aço estrutural foi condicionada pela economia da solução. Considerou-se a classe S275 JR (EN 10025-2) para todos os elementos estruturais analisados.

Para a análise da estrutura foi desenvolvido um modelo numérico bidimensional com recurso ao programa *Robot Structural Analysis* [44].

### 3.3.1 Ações

#### 3.3.1.1 Peso próprio dos elementos estruturais

O peso próprio dos elementos estruturais foi obtido multiplicando o volume dos elementos pelo peso específico do aço: 77 kN/m$^3$.

#### 3.3.1.2 Restantes cargas permanentes

Considerou-se 0.50 kN/m$^2$ como valor característico para as restantes cargas permanentes na cobertura e 0.25 kN/m$^2$ nas fachadas. Os valores admitidos encontram-se detalhados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Valores característicos admitidos para as restantes cargas permanentes

| | Elemento | Carga característica admitida | Total |
|---|---|---|---|
| 1. | Painel de revestimento de cobertura | 0.15 kN/m$^2$ | 0.50 kN/m$^2$ |
| 2. | Estrutura de suporte da cobertura em perfis enformados a frio | 0.10 kN/m$^2$ | |
| 3. | Iluminação | 0.10 kN/m$^2$ | |
| 4. | AVAC | 0.10 kN/m$^2$ | |
| 5. | Claraboias | 0.05 kN/m$^2$ | |
| 6. | Painel de revestimento de fachada | 0.15 kN/m$^2$ | 0.25 kN/m$^2$ |
| 7. | Estrutura de suporte da fachada em perfis enformados a frio | 0.10 kN/m$^2$ | |

#### 3.3.1.3 Sobrecarga

De acordo com a cláusula NA-6.3.4.2(1) do anexo nacional português da EN 1991-1-1 [45], considera-se uma sobrecarga uniformemente distribuída na cobertura da Categoria H de 0.40 kN/m$^2$.

#### 3.3.1.4 Ação da temperatura

A variação da temperatura (exceto incêndio) nos elementos metálicos foi calculada tendo em conta o preconizado na EN 1991-1-5 [46]. Foi admitida a zona nacional B e uma superfície clara brilhante, resultando num valor de 17.5 ºC de expansão e -6 ºC de contração.

#### 3.3.1.5 Ação da neve

A ação da neve não foi tida em conta por se entender que não é uma ação condicionante na maioria do território português.

#### 3.3.1.6 Ação do vento

A avaliação da ação do vento foi realizada de acordo com a EN1991-1-4 [47] e respetivo anexo nacional português. Para a sua definição, estabeleceu-se que a estrutura se situa na zona A, que contempla as zonas continentais afastadas em mais de 5 km da costa, com uma altitude inferior a 600 m. Para a rugosidade do terreno classificou-se como tipo II (zona de vegetação rasteira e obstáculos isolados como árvores e edifícios com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura). O período de retorno utilizado para a ação foi de 50 anos. O valor característico da pressão dinâmica de pico foi assim calculado como 0.96 kN/m$^2$.

Segundo a EN1991-1-4 [47], as pressões interiores e exteriores devem ser consideradas como atuando simultaneamente, devendo ser considerada a combinação mais desfavorável das pressões exteriores e interiores para cada combinação de possíveis aberturas e outras vias de passagem de ar. Para os casos em que haja incerteza na definição na área de aberturas em cada fachada ou na permeabilidade das mesmas num edifício, deve-se considerar para o dimensionamento o cenário mais gravoso entre um coeficiente de pressão interior ($c_{pi}$) de +0.20 (pressão nas faces interiores do edifício) ou -0.30 (sucção nas faces interiores do edifício). Para o dimensionamento do pórtico em estudo, consideraram-se precisamente os dois cenários de carga: aplicação de $c_{pi}$=+0.20 e um outro com a aplicação de $c_{pi}$=-0.30.

#### 3.3.1.7 Ação sísmica

Na contabilização da massa total em situação sísmica consideram-se apenas as cargas permanentes que contabilizam o peso próprio dos elementos estruturais e revestimentos. A consideração de massa associada às ações variáveis assume o valor de zero, pois a sobrecarga de utilização corresponde a coberturas não acessíveis, exceto para manutenção. Tendo em conta que a massa da estrutura é reduzida, admitiu-se que a ação sísmica não desempenha um papel relevante, quando comparada com a ação do vento.

### 3.3.2 Combinações

#### 3.3.2.1 Estados limites últimos

Na verificação para os estados limites últimos, os valores de cálculo das ações atuantes foram obtidos de acordo com a equação (3.1) definida na EN1990 [48]:

$$\sum_{j\geq 1} \Upsilon_{G,j} G_{k,j} + \Upsilon_{Q.1} Q_{k.1} + \sum_{i>1} \Upsilon_{Q.i} \psi_{0.i} Q_{k.i} \qquad (3.1)$$

Em que,

- $G_{k,j}$ é o valor das ações permanentes j;
- $Q_{k.1}$ é o valor da ação variável base;
- $Q_{k.i}$ é o valor característico da ação variável i;
- $\Upsilon_{G,j}$ e $\Upsilon_{Q,i}$ são coeficientes parciais de acordo com o especificado na EN1990 [48];
- $\psi_i$ é um coeficiente de redução de acordo com o Anexo 2 da EN1990 [48].

#### 3.3.2.2 Estados limites de serviço

Conforme especificado na EN1990 [48] para verificação para os Estados limites de serviço, os valores de cálculo das ações atuantes foram obtidos pela seguinte equação referente à combinação característica:

$$\sum_{j\geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{0.i} Q_{k,i} \quad (3.2)$$

Onde,

- $G_{k,j}$ é o valor das ações permanentes j;
- $Q_{k.1}$ é o valor da ação variável base;
- $Q_{k.i}$ é o valor característico da ação variável i;
- $\psi_i$ é um coeficiente de redução de acordo com o Anexo 2 da EN1990 [48].

### 3.3.3 Análise

A verificação de segurança dos diferentes elementos estruturais foi feita à luz da EN1993-1-1 [49], verificando-se a resistência à flexão e compressão, encurvadura por flexão, encurvadura lateral e esforço transverso. Para as colunas foi selecionado o perfil HEA 300 e para as vigas o perfil IPE 360. Os resultados obtidos para as verificações mais gravosas encontram-se resumidos no Quadro 3.2. Na Figura 3.3 apresenta-se o diagrama de momentos fletores para a combinação mais gravosa.

Quadro 3.2 - Verificações de segurança para os elementos do pórtico em estado limite último

| | Coluna | Viga |
|---|---|---|
| Perfil | HEA 300 | IPE 360 |
| $N_{Ed}$ (kN) | 84.58 | 40.31 |
| $M_{Ed}$ (kN.m) | -208.19 | -208.19 |
| $V_{Ed}$ (kN) | -34.70 | 68.73 |
| Classe | 2 | 2 |
| $L_{cr,LT}$ (m) | 6.00 | 3.00 |
| $M_{cr}$ (kN.m) | 1291.92 | 924.92 |
| $\bar{\lambda}_{LT}$ | 0.54 | 0.80 |
| $\phi_{LT}$ | 0.68 | 1.05 |
| $\chi_{LT}$ | 0.91 | 0.58 |
| $M_{b,Rd}$ (kN.m) | 346.38 | 342.64 |
| $M_{Ed} / M_{b,Rd}$ | 0.60 | 0.61 |
| $L_{cr,y}$ (m) | 6.00 | 10.00 |
| $\bar{\lambda}_y$ | 0.54 | 0.72 |
| $\chi_y$ | 0.86 | 0.77 |
| $L_{cr,z}$ (m) | 6.00 | 5.00 |
| $\bar{\lambda}_z$ | 0.92 | 1.52 |
| $\chi_z$ | 0.59 | 0.31 |
| $k_{yy}$ | 0.97 | 0.60 |
| Expressão 6.61 [50] | $0.61 \leq 1.00$ | $0.60 \leq 1.00$ |

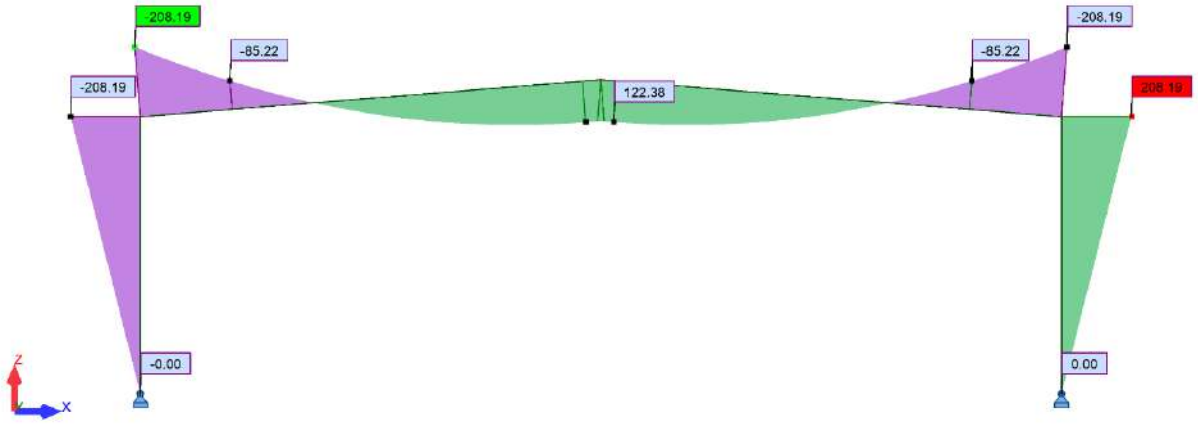



Figura 3.3 – Diagrama de momentos fletores do pórtico em estudo para a combinação em estado limite último mais gravosa (ação variável base sobrecarga com ação acompanhante temperatura)

A verificação dos estados limites de serviço foi efetuada de acordo com NA-7.2.1 da EN1993-1-1 [50], sendo mais gravoso o controlo de deformações horizontais. Utilizou-se o limite de deformação horizontal definido para pórticos sem aparelhos de elevação de H/150. O limite ficou assim definido em 40 mm. A Figura 3.4 mostra a deformada da estrutura para a combinação característica mais gravosa.

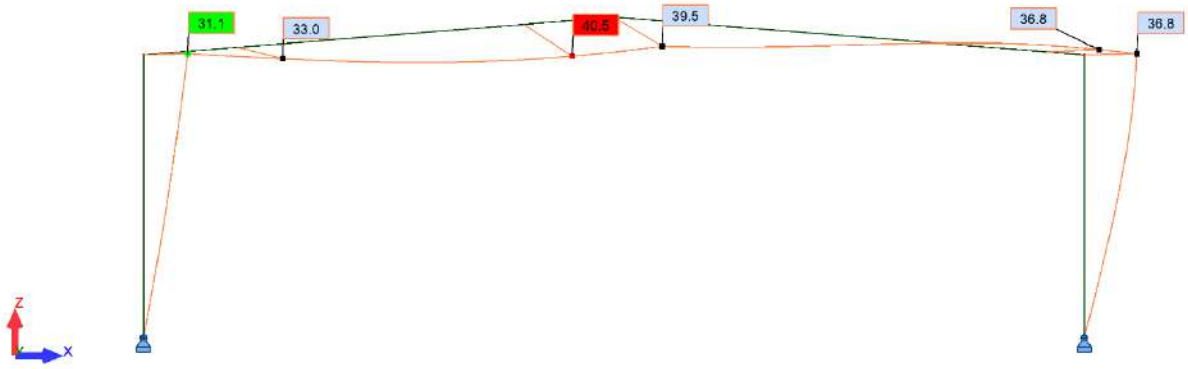



Figura 3.4 - Deformada do pórtico em estudo numa análise de 1ª ordem para a combinação em estado limite de serviço mais gravosa: ação variável base vento com ação acompanhante temperatura (valores em mm)

## 3.4 Dimensionamento em situação de incêndio

A verificação da resistência ao fogo foi realizada no domínio da temperatura. Para que seja garantida a resistência ao fogo de um elemento, é necessário que o valor de cálculo da temperatura no elemento $\theta_d$ no instante $t_{fi,requ}$, seja menor ou igual ao valor de cálculo da temperatura crítica do elemento $\theta_{cr,d}$ [14], de acordo com a equação (3.3).

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d} \text{ no instante } t_{fi,requ} \quad (3.3)$$

Segundo a EN1993-1-2 [2], a temperatura crítica do aço carbono no instante *t* para uma distribuição de temperatura uniforme num elemento poderá ser determinada para qualquer grau de utilização no instante *t*=0 através da equação (3.4):

$$\theta_{cr} = 39.19\ ln\left[\frac{1}{0.9674{\mu_0}^{3.833}} - 1\right] + 482 \tag{3.4}$$

Onde,

- $\theta_{cr}$ é a temperatura crítica do aço;
- $\mu_0$ é o grau de utilização no instante *t*=0.

Para elementos com secções transversais das classes 1, 2 ou 3 e para todos os elementos tracionados, o grau de utilização no instante *t*=0 poderá ser obtido por:

$$\mu_0 = {E_{fi,d}}\Big/{R_{fi,d,0}} \tag{3.5}$$

Em que,

- $E_{fi,d}$ é o valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio;
- $R_{fi,d,0}$ é o valor de $R_{fi,d,t}$ para o instante t=0;
- $R_{fi,d,t}$ é o valor de cálculo da resistência em situação de incêndio.

Este procedimento só pode ser utilizado para os casos de elementos em tração e vigas restringidas. Para os casos em que a instabilidade desempenha um papel relevante, não é possível aplicar diretamente a equação (3.5). No caso de encurvadura por flexão de colunas, encurvadura lateral de vigas e elementos submetidos a uma combinação de compressão e flexão, a determinação da temperatura crítica pode ser realizada por um processo iterativo [14].

A situação de incêndio é considerada uma ação acidental, por essa razão o valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio ($E_{fi,d}$) pode ser obtido através da combinação acidental definida na EN1990 [48]:

$$\sum_{j\geq 1} \mathrm{G_{k,j}} + A_d + (\psi_{1.1}\text{ou}\ \psi_{2,1})\mathrm{Q_{k.1}} + \sum_{i>1} \psi_{2.i}\mathrm{Q_{k.i}} \tag{3.6}$$

O valor de $A_d$ corresponde ao valor de cálculo das ações indiretas do incêndio como esforços axiais, forças de corte e momentos fletores que se geram devido ao aumento de temperatura e restrições na estrutura [14]. A utilização de $\psi_{1,1}$ ou $\psi_{2,1}$ deverá ter em conta o estipulado no Anexo Nacional de cada país. No âmbito desta dissertação, foi utilizado o valor de $\psi_{1,1}$ por ser o indicado no Anexo Nacional Português.

Como simplificação, a EN1993-1-2 [2] indica que os efeitos das ações podem ser obtidos a partir de uma análise estrutural à temperatura normal, através da utilização de um fator de redução para o valor de cálculo do nível de carregamento em situação de incêndio:

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} \mathrm{E_d} \tag{3.7}$$

Onde,

- $E_d$ é o valor de cálculo da força ou do momento correspondentes ao cálculo à temperatura normal, para a combinação fundamental de ações;
- $\eta_{fi}$ é o fator de redução para o valor de cálculo do nível de carregamento em situação de incêndio.

Segundo a EN1993-1-2 [2], poderá utilizar-se o valor recomendado de $\eta_{fi} = 0.65$, exceto para edifícios da Categoria E (áreas suscetíveis de acumulação de mercadorias, incluindo áreas de acesso) em que o valor recomendado é $\eta_{fi} = 0.70$.

As ações variáveis reduzem o valor de cálculo do nível de carregamento em situação de incêndio, mais concretamente quando o rácio $Q_{k,1}/G_k$ é elevado e $\psi_{1,1}$ é baixo. Exceto para valores de $\psi_{1,1}$ muito elevados, o valor de cálculo do nível de carregamento não é normalmente superior a 0.65. É por esta razão que a EN1993-1-2 [2] permite a utilização das simplificações enumeradas [14].

Para a classificação das secções transversais foi considerado um fator de redução de 0.85 para se ter em conta as influências devidas ao aumento de temperatura, de acordo com o estipulado na EN1993-1-2 [2].

### 3.4.1 Determinação da temperatura crítica através da combinação acidental

Neste subcapítulo será calculada a temperatura crítica dos elementos do pórtico em estudo, utilizando para a definição das ações a combinação acidental definida na equação (3.6).

Para a determinação da temperatura crítica foi utilizado o programa Elefir-EN [51]. Os resultados obtidos encontram-se resumidos no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Determinação da temperatura crítica para os elementos do pórtico utilizando a combinação acidental

| | Coluna | Viga |
|---|---|---|
| Perfil | HEA 300 | IPE 360 |
| $N_{fi,Ed}$ (kN) | 30.83 | 17.06 |
| $M_{fi,Ed}$ (kN.m) | -89.47 | -89.12 |
| $V_{fi,Ed}$ (kN) | -14.91 | 27.76 |
| Classe | 3 | 3 |
| $L_{cr,LT}$ (m) | 6.00 | 3.00 |
| $M_{cr}$ (kN.m) | 1291.92 | 924.92 |

| | Coluna | Viga |
|---|---|---|
| $L_{cr,y}$ (m) | 6.00 | 10.00 |
| $L_{cr,z}$ (m) | 6.00 | 5.00 |
| $k_{y\theta}$ | 0.416 | 0.498 |
| **$\theta_{cr}$ (ºC)** | **622.50** | **591.10** |

### 3.4.2 Determinação da temperatura crítica através do fator de redução de 0.65

De forma a averiguar a influência das simplificações previstas na EN1993-1-2 [2], a temperatura crítica dos elementos do pórtico foi determinada através do fator de redução para o valor de cálculo do nível de carregamento em situação de incêndio. O valor utilizado neste subcapítulo foi de 0.65, uma vez que a sobrecarga de utilização não é abrangida pela Categoria E.

Com o auxílio do programa Elefir-EN [51], determinaram-se as temperaturas críticas registadas no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - Determinação da temperatura crítica para os elementos do pórtico utilizando o fator de redução do valor de cálculo do nível de carregamento de 0.65.

| | Coluna | Viga |
|---|---|---|
| Perfil | HEA 300 | IPE 360 |
| $N_{fi,Ed}$ (kN) | 54.98 | 26.20 |
| $M_{fi,Ed}$ (kN.m) | -135.32 | -135.32 |
| $V_{fi,Ed}$ (kN) | -22.56 | 44.67 |
| Classe | 3 | 3 |
| $L_{cr,LT}$ (m) | 6.00 | 3.00 |
| $M_{cr}$ (kN.m) | 1291.92 | 924.92 |
| $L_{cr,y}$ (m) | 6.00 | 10.00 |
| $L_{cr,z}$ (m) | 6.00 | 5.00 |
| $k_{y\theta}$ | 0.616 | 0.732 |
| **$\theta_{cr}$ (ºC)** | **552.80** | **515.50** |

### 3.4.3 Discussão

Foi selecionada uma verificação da resistência ao fogo no domínio da temperatura devido à pouca informação sobre as características físico-químicas dos materiais de proteção correntemente utilizados no mercado. Tal situação impõe ao projetista o cálculo da temperatura crítica para que, depois de consultar as tabelas de fabricantes, consiga estimar a espessura de material de proteção a aplicar. Este exercício é fundamental para otimizar soluções que resultem em menos custos para o dono de obra e assim criar soluções competitivas e sustentáveis.

O valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio tem um papel importante na determinação da temperatura crítica de um dado elemento. O projetista tem ao seu dispor vias de estimar este valor de forma mais célere e pela segurança, podendo nesse processo comprometer a competitividade da solução, consoante o elemento e estrutura que analisa.

Verificou-se que para o caso de estudo, a utilização da combinação acidental definida na EN1990 [48] conduz a valores de temperatura crítica mais elevados, quando comparado com a utilização do fator de redução para o valor de cálculo do nível de carregamento igual a 0.65, conforme definido na EN1993-1-2 [2]. No elemento coluna, o aumento é cerca de 13% e no elemento viga, o aumento é de aproximadamente 15%.

É assim penalizador a utilização do fator de redução para o valor de cálculo do nível de carregamento em situação de incêndio para o caso de estudo. Tal deve-se, em parte, ao facto de na combinação fundamental de ações ser possível obter combinações com uma ação variável acompanhante que incrementa a ação. Numa combinação acidental tal não se verifica, já que as ações acompanhantes definidas têm valores de $\psi_2$ igual a zero. Acresce ainda que o caso de estudo se inclui na categoria de elementos estruturais de um só piso, em que a sobrecarga de utilização corresponde a coberturas não acessíveis, exceto para manutenção (Categoria H de acordo com a EN1990 [48]). Tal implica obter valores de $\psi_0$, $\psi_1$ e $\psi_2$ igual a zero, algo que não ocorre para edifícios correntes inseridos nas restantes categorias (A a G). Da mesma forma, os valores de $\psi_1$ utilizados são baixos, o que distancia ainda mais o nível de carregamento em situação de incêndio do valor máximo normalmente esperado de $0.65E_d$.

De forma a otimizar a proteção contra incêndios no caso em estudo e por se considerar que tal consideração se encontra fundamentada no que a legislação em vigor autoriza, as temperaturas críticas utilizadas nos próximos capítulos desta dissertação serão as obtidas pela combinação acidental: 622.5 ºC para as colunas e 591.1 ºC para as vigas.

## 3.5 Ações térmicas para análise de temperatura

A resposta térmica dos elementos de aço foi calculada para as várias ações térmicas apresentadas nos próximos subcapítulos. Serão analisadas a curva de incêndio padrão, as curvas de incêndio paramétricas, as curvas de incêndio paramétricas modificadas de acordo com propostas relevantes da literatura e o modelo de incêndios localizados. Para tal, utilizou-se a equação de distribuição equivalente de temperatura uniforme presente na EN1993-1-2 [2]. O aumento de temperatura num elemento de aço não protegido durante um intervalo de tempo pode ser determinado a partir da seguinte equação (não deverão ser utilizados valores de $\Delta t$ superiores a 5 s):

$$\Delta\Theta_{a,t} = k_{sh}\frac{A_m/V}{c_a\rho_a}\dot{h}_{net,d}\Delta t \tag{3.8}$$

Em que,

- $k_{sh}$ é o fator de correção para o efeito de sombra;
- $A_m/V$ é o fator de massividade para os elementos de aço não protegidos (1/m);
- $V$ é o volume do elemento por unidade de comprimento ($m^3/m$);
- $c_a$ é o calor específico do aço (J/kgK);

- $\rho_a$ é a massa específica do aço (kg/m$^3$);
- $\Delta t$ é o intervalo de tempo (s);
- $\dot{h}_{net,d}$ é o valor de cálculo do fluxo efetivo por unidade de área (W/m$^2$).

O fluxo de calor efetivo deverá ser determinado considerando a transferência de calor por convecção e radiação através de [13]:

$$\dot{h}_{\mathrm{net,d}} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \tag{3.9}$$

Em que:

$$\dot{h}_{\mathrm{net,c}} = \alpha_c(\Theta_g - \Theta_m) \quad [W/m^2] \tag{3.10}$$

$$\dot{h}_{\mathrm{net,r}} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4] \quad [W/m^2] \tag{3.11}$$

Onde,

- $\alpha_c$ é o coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m$^2$K);
- $\Theta_g$ é a temperatura dos gases na proximidade do elemento exposto ao fogo (ºC);
- $\Theta_m$ é a temperatura da superfície do elemento (ºC);
- $\Phi$ é o fator de vista (normalmente igual a 1);
- $\varepsilon_m$ é a emissividade da superfície do elemento (0.70 para aço carbono, 0.40 para aço inoxidável);
- $\varepsilon_f$ é a emissividade do fogo (normalmente igual a 1);
- $\sigma$ é a constante de Stephan Boltzmann (5.67x10$^{-8}$ [W/m$^2$K$^4$]);
- $\Theta_r$ é a temperatura de radiação efetiva do ambiente de incêndio (normalmente igual a $\Theta_g$) (ºC);

A resistência ao fogo admitida foi a exigida pela legislação portuguesa. Para o edifício em estudo é de 60 minutos (R60), conforme fundamentado no capítulo 2.3.1. Foi considerado de forma conservativa que os elementos de aço se encontram expostos ao fogo em todos os lados.

### 3.5.1 Curva de incêndio padrão

A curva de incêndio padrão ISO 834 é definida pela equação (3.12) [13]:

$$\Theta_{\mathrm{g}} = 20 + 345 log_{10}(8t + 1) \quad [ºC] \tag{3.12}$$

Onde,

- $\Theta_g$ é a temperatura dos gases no compartimento de incêndio (ºC);
- $t$ é o tempo em minutos.

Com o auxílio do programa Elefir-EN [51], foi possível calcular a temperatura nos elementos estruturais para o tempo requerido de resistência ao fogo. Para as colunas sem proteção, a temperatura crítica é atingida ao fim de 17.8 minutos e para as vigas, a temperatura crítica é atingida ao fim de 13.8 minutos. Os resultados podem ser consultados na Figura 3.5.

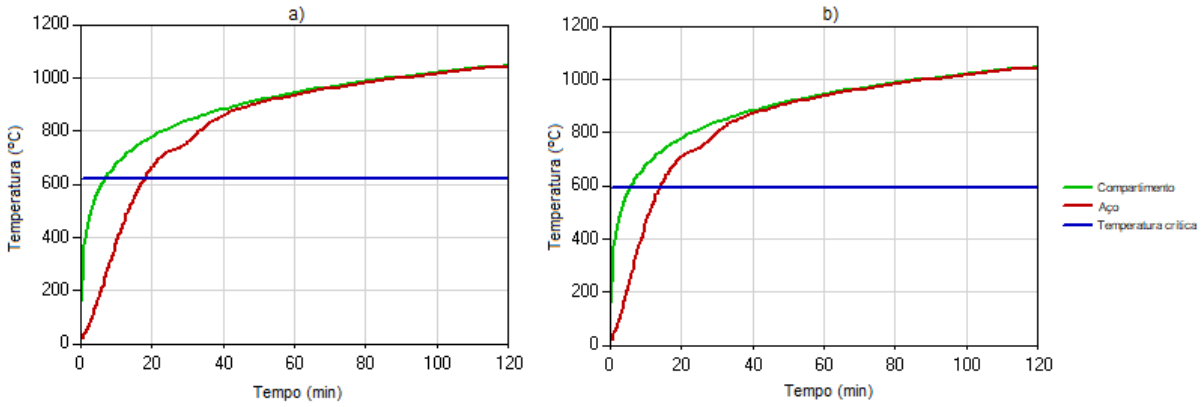



Figura 3.5 - Temperatura no compartimento através da curva de incêndio padrão, temperatura no aço e temperatura crítica em: a) coluna; b) viga.

### 3.5.2 Curvas de incêndio paramétricas

As curvas de incêndio paramétricas são funções analíticas que indicam a evolução da temperatura num compartimento em função do tempo. Estas curvas diferem das curvas nominais por dependerem da densidade de carga de incêndio, condições de ventilação e as características térmicas das paredes, pavimento e teto. Estas curvas têm algumas limitações e são válidas apenas nos seguintes casos:

- Área em planta máxima de 500 $m^2$;
- Sem aberturas no teto;
- Altura máxima de 4 m;
- Carga de incêndio do compartimento completamente consumida;
- Propriedades térmicas dos elementos envolventes do compartimento (coeficiente $b$) entre 100 $J/m^2s^{1/2}K$ e 2200 $J/m^2s^{1/2}K$;
- Fator de abertura (coeficiente $O$) entre 0.02 $m^{1/2}$ e 0.20 $m^{1/2}$.

As curvas de incêndio na fase de aquecimento são obtidas por [13]:

$$\Theta_g = 20 + 1325\left(1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*}\right) \quad (3.13)$$

$$t^* = t \cdot \Gamma \tag{3.14}$$

$$\Gamma = [O/b]^2/(0.04/1160)^2 \tag{3.15}$$

$$b = \sqrt{(\rho c \lambda)} \tag{3.16}$$

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}}/A_t \tag{3.17}$$

Onde,

- $\Theta_g$ é a temperatura dos gases no compartimento de incêndio (ºC);
- $t$ é o tempo (h);
- $\rho$ é a massa volúmica da envolvente do compartimento (kg/m$^3$);
- $c$ é o calor específico da envolvente do compartimento (J/kgK);
- $O$ é o fator de abertura (m$^{1/2}$);
- $A_v$ é a área total das aberturas verticais em todas as paredes (m$^2$);
- $h_{eq}$ é a média ponderada dos valores das alturas das aberturas em todas as paredes (m);
- $A_t$ é a área total da superfície envolvente (paredes, teto e pavimento, incluindo aberturas) (m$^2$).

A temperatura máxima $\Theta_{max}$ na fase de aquecimento ocorre para $t^* = {t^*}_{max}$ de acordo com [13]:

$${t^*}_{max} = t_{max}\Gamma \tag{3.18}$$

$$t_{max} = max\left[\left(0.2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}/O\right); t_{lim}\right] \tag{3.19}$$

$$q_{t,d} = q_{f,d} \cdot A_f/A_t \tag{3.20}$$

Onde,

- $A_f$ é a área do pavimento do compartimento de incêndio;
- $q_{t,d}$ é o valor de cálculo da densidade de carga de incêndio por unidade de área da envolvente;
- $q_{f,d}$ é o valor de cálculo da densidade de carga de incêndio por unidade de área do pavimento;
- $t_{lim}$ é o instante de tempo em que ocorre a temperatura máxima dos gases no caso de incêndio controlado por combustível. No caso de uma taxa de crescimento de incêndio lenta, $t_{lim} = 25$ minutos; no caso de uma taxa de crescimento de

incêndio média, $t_{lim} = 20$ minutos; e no caso de uma taxa de crescimento de incêndio rápida, $t_{lim} = 15$ minutos;

- $t_{max}$ é o instante de tempo em que ocorre a temperatura máxima dos gases. Se $t_{max}$ for obtido por $\left(0.2 \times 10^{-3} \cdot q_{t,d}/O\right)$, o incêndio é controlado pela ventilação.

Quando $t_{max} = t_{lim}$, $t^*$na equação (3.13) é substituído por:

$$t^* = t \cdot \Gamma_{lim} \quad [h] \tag{3.21}$$

$$\text{Com } \Gamma_{lim} = [O_{lim}/b]^2/(0.04/1160)^2 \tag{3.22}$$

Em que,

$$\mathrm{O_{lim}} = 0.1 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}/t_{lim} \tag{3.23}$$

Se $O > 0.04$ e $q_{t,d} < 75$ e $b < 1160$, o valor de $\Gamma_{lim}$ tem que ser multiplicado por $k$. Este valor de $k$ é obtido por:

$$k = 1 + \left(\frac{O - 0.04}{0.04}\right)\left(\frac{q_{t,d} - 75}{75}\right)\left(\frac{1160 - b}{1160}\right) \tag{3.24}$$

As curvas de incêndio na fase de arrefecimento são obtidas por [13]:

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 625\ (t^* - t^*_{max} \cdot x)\ para\ t^*_{max} \leq 0.5 \tag{3.25}$$

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 250\ (3 - t^*_{max})(t^* - t^*_{max} \cdot x)\ para\ 0.5 < t^*_{max} < 2 \tag{3.26}$$

$$\Theta_g = \Theta_{max} - 250\ (t^* - t^*_{max} \cdot x)\ para\ t^*_{max} \geq 2 \tag{3.27}$$

Com

$$t^*_{max} = \left(0.2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d}/O\right) \cdot \Gamma \tag{3.28}$$

$$x = 1.0 \text{ se } t_{max} > t_{lim} \text{ ou } x = t_{lim} \cdot \frac{\Gamma}{t^*_{max}} \text{ se } t_{max} = t_{lim} \tag{3.29}$$

Conforme salientado acima, estas curvas têm limitações na sua aplicabilidade. De acordo com a EN1991-1-2 [13], as curvas de incêndio paramétricas não são aplicáveis ao caso de estudo. Tendo como ponto de partida apenas a geometria do pavilhão considerado, a aplicabilidade é negada, pois a área em planta excede os 500 m$^2$ e a altura excede os 4 m. Apesar destas

condicionantes, considerou-se interessante aplicar estas curvas ao caso de estudo para analisar as condicionantes prescritivas associadas.

Considerou-se assim uma área em planta de 600 $m^2$ e uma altura de 6.4 m, que corresponde à altura média do compartimento. Foram consideradas duas aberturas nas fachadas que correspondem a dois portões abertos, com dimensões 3 m por 3 m, perfazendo uma área total das aberturas verticais em todas as paredes de 18 $m^2$. O coeficiente $b$ teve em conta as propriedades térmicas da envolvente, admitindo-se o pavimento em betão e restante envolvente em lã de rocha com 0.04 m de espessura. No que às propriedades térmicas diz respeito, não seria correto aplicar a este modelo propriedades de um painel *sandwich* comum, ou seja, um painel de fachada e cobertura com uma chapa de aço de espessura reduzida e isolamento térmico no interior. Este modelo seria válido apenas se a chapa de aço tivesse espessura infinita. Para além disso, o coeficiente $b$ do aço é cerca de 13400 $J/m^2s^{1/2}K$, que excede o valor máximo de 2200 [14]. As propriedades térmicas consideradas encontram-se no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 - Propriedades térmicas dos materiais adotados no caso de estudo [14]

| Material | Massa volúmica ($kg/m^3$) | Condutividade térmica (W/mk) | Calor específico (J/kgK) |
|---|---|---|---|
| Betão de densidade normal | 2300 | 1.600 | 1000 |
| Lã de rocha | 60 | 0.037 | 1030 |

Uma vez que se indicam diferentes valores de $b$ para o pavimento e paredes/teto, este coeficiente deverá ser calculado através de [13]:

$$b = \left(\sum \left(b_j A_j\right)\right) / (A_t - A_v) \tag{3.30}$$

Onde,

- $A_j$ é a área da superfície envolvente *j*, não incluindo as aberturas;
- $b_j$ é a propriedade térmica da superfície envolvente *j*.

Foi utilizado o valor de cálculo da densidade de carga de incêndio de 730 $MJ/m^2$, que corresponde ao valor característico da densidade de carga de incêndio para o quantilho de 80% para uma ocupação definida como centro comercial, de acordo com o Quadro 2.3 ou o Anexo E da EN1991-1-2 [13].

Os parâmetros utilizados para a definição da curva de incêndio encontram-se no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 - Parâmetros para a definição das curvas de incêndio paramétricas para o caso de estudo

| Parâmetro | Valor |
|---|---|
| $A_f$ ($m^2$) | 600 (*) |
| $A_t$ ($m^2$) | 1840 |
| $A_v$ ($m^2$) | 18 |
| O ($m^{1/2}$) | 0.0169 (*) |
| b ($J/m^2s^{1/2}K$) | 664 |
| Γ | 0.548 |
| $q_{f,d}$ ($MJ/m^2$) | 730 |
| $q_{t,d}$ ($MJ/m^2$) | 238 |
| $t_{lim}$ (h) | 0.25 |
| $t_{max}$ (h) | 2.81 |

(*) valor fora do intervalo permitido pela EN1991-1-2

A resposta térmica dos elementos de aço foi calculada de acordo com a equação (3.8), sendo o coeficiente de transferência de calor por convecção igual a 35 $W/m^2K$ e o fator de correção para o efeito de sombra calculado de acordo com a EN1993-1-2 [2] para secções não sujeitas a fogo nominal:

$$k_{sh} = {[A_m/V]_b}\Big/{[A_m/V]} \tag{3.31}$$

Onde,

- $A_m/V$ é o fator de massividade para os elementos de aço não protegidos;
- $[A_m/V]_b$ é o fator de massividade calculado como se o perfil tivesse proteção em caixão.

Os resultados obtidos encontram-se representados na Figura 3.6. Optou-se por traçar a curva de incêndio padrão para auxiliar na comparação à curva paramétrica obtida. As curvas de temperatura na coluna e da viga representam a resposta térmica dos elementos à ação da curva de incêndio paramétrica.

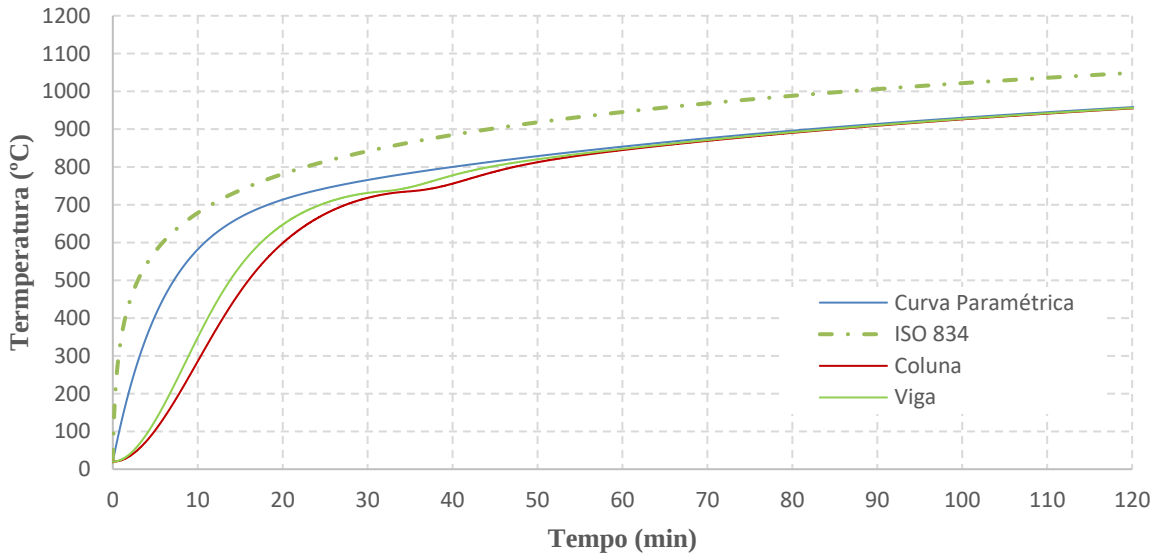



Figura 3.6 - Curva de incêndio paramétrica obtida, comparação com curva padrão e resposta térmica de uma coluna e viga do caso de estudo

A temperatura crítica da coluna é atingida ao fim de 21.3 minutos e a temperatura crítica da viga é atingida ao fim de 17.1 minutos.

Observou-se que não se atinge a fase de arrefecimento antes dos 120 minutos já que o fator de abertura é reduzido, encontrando-se inclusive abaixo do valor mínimo permitido de 0.02. Compartimentos com fatores de abertura mais baixos originam picos de temperatura mais tardios, logo incêndios mais longos e mais severos. Tal deve-se ao facto de não existir oxigénio suficiente no compartimento para suportar o incêndio, demorando mais tempo até que a carga de incêndio seja totalmente consumida.

Perante os resultados obtidos, fica evidente que a curva paramétrica obtida se desenvolve mais lentamente que a curva de incêndio padrão. Esta observação era previsível, devido ao fator $\Gamma$ ser inferior à unidade. Apesar de estar evidente que as curvas de incêndio paramétricas não podem ser aplicadas para o caso em estudo, mostrou-se que estas, quando aplicadas ao caso de estudo, apresentam resultados muito similares com a curva de incêndio padrão.

### 3.5.3 Curvas de incêndio paramétricas modificadas

As modificações sugeridas apresentadas neste subcapítulo foram propostas para abordar a descontinuidade nas equações das curvas de incêndio paramétricas presentes na EN1991-1-2 [13] [52]. Os autores da metodologia abordam a questão de que uma pequena variação da carga de incêndio ou do fator de abertura leva a curvas significativamente diferentes. Um aumento do fator de abertura resulta numa combustão mais rápida da carga de incêndio, levando a um aumento rápido da temperatura durante a fase de aquecimento e a uma duração mais curta dessa mesma fase. A descontinuidade no modelo desaparece se um único valor for usado para o

coeficiente das equações (3.19), (3.23) e (3.28) [52]. O valor proposto para o coeficiente que ofereceu um ajuste melhor entre o modelo e 50 testes experimentais em escala real foi o valor de $0.14 \cdot 10^{-3}$ [52].

Uma alteração adicional às equações paramétricas presentes na EN1991-1-2 [13] consiste na incorporação dos efeitos de ventilação na cobertura [53]. O método introduz na equação (3.17) um fator de abertura $x_c$:

$$x_c = \left(1 + 0.03(y - 1)\right)y \tag{3.32}$$

$$y = 2\left(A_h h_h^{1/2}\right)/\left(A_v h_{eq}^{1/2}\right) + 1 \tag{3.33}$$

Com geometria de acordo com a Figura 3.7.

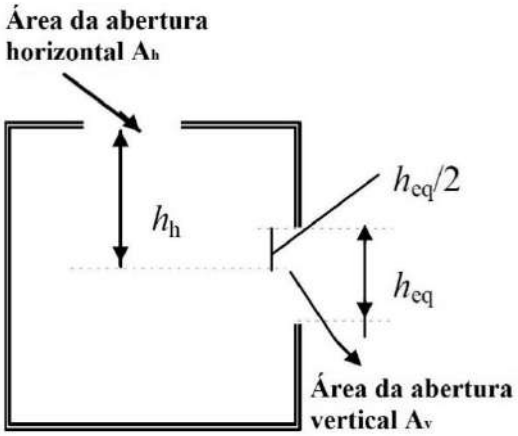



Figura 3.7 - Corte vertical no compartimento com aberturas horizontais e verticais (adaptado de [51])

Para ter em conta o efeito de aberturas na cobertura, foram consideradas 8 claraboias de área de 1.5 $m^2$, perfazendo um total de 12 $m^2$ de área total de aberturas na cobertura. Foram consideradas apenas um terço das aberturas na fachada, perfazendo uma área total das aberturas verticais em todas as paredes de 6 $m^2$. No total, as aberturas contabilizam 18 $m^2$ de área, igual à área total de aberturas considerada no subcapítulo anterior.

Os parâmetros utilizados para a definição da curva de incêndio paramétrica modificada encontram-se no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 - Parâmetros para a definição das curvas de incêndio paramétricas modificadas para o caso de estudo

| Parâmetro | Valor |
|---|---|
| $A_f$ ($m^2$) | 600 |
| $A_t$ ($m^2$) | 1840 |

| Parâmetro | Valor |
|---|---|
| $A_v$ ($m^2$) | 6 |
| $A_h$ ($m^2$) | 12 |
| $h_h$ (m) | 4.9 |
| $y$ | 6.1 |
| $x_c$ | 7.0 |
| O ($m^{1/2}$) | 0.0398 |
| b ($J/m^2s^{1/2}K$) | 660 |
| Γ | 3.063 |
| $q_{f,d}$ ($MJ/m^2$) | 730 |
| $q_{t,d}$ ($MJ/m^2$) | 238 |
| $t_{lim}$ (h) | 0.25 |
| $t_{max}$ (h) | 0.84 |

Os resultados obtidos encontram-se representados na Figura 3.8.

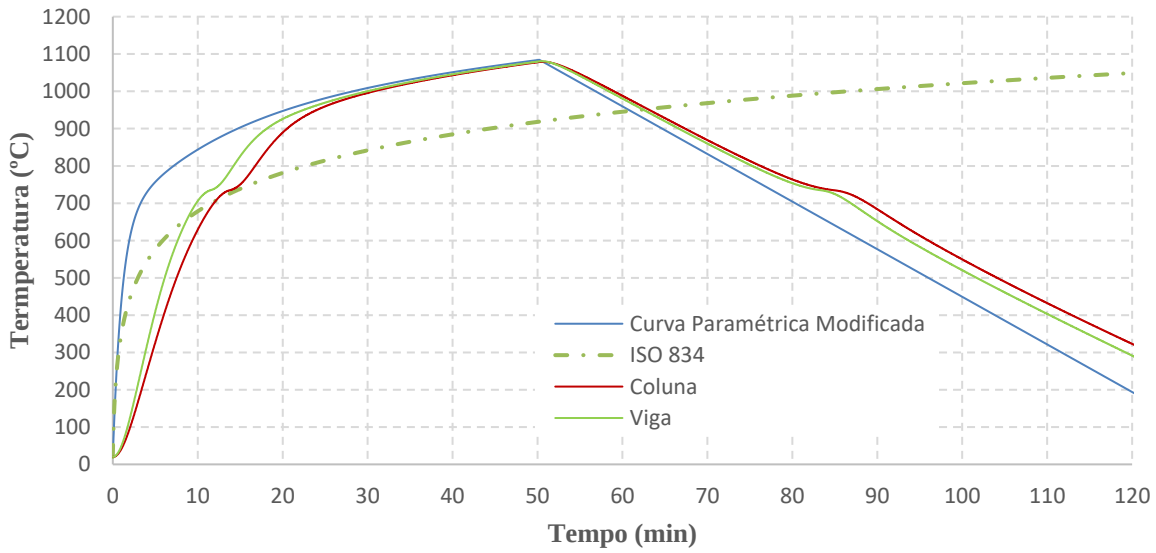



Figura 3.8 - Curva de incêndio paramétrica modificada obtida, comparação com curva padrão e resposta térmica de uma coluna e viga do caso de estudo

A temperatura crítica da coluna é atingida ao fim de 9.9 minutos e a temperatura crítica da viga é atingida ao fim de 7.5 minutos.

Com as modificações implementadas, observa-se a fase de arrefecimento a partir dos 50 minutos. Tal como explicado anteriormente, com o aumento do fator de abertura, o pico de temperatura é atingido mais rapidamente, pois ocorre uma entrada de maior volume de ar pelas aberturas verticais porque a exaustão pode ser efetuada pela cobertura, alimentando o incêndio e consumindo mais rapidamente a sua carga.

Perante os resultados obtidos, apesar da área de aberturas ser idêntica à utilizada no subcapítulo anterior, fica evidente que a curva paramétrica modificada obtida se desenvolve mais rapidamente que a curva de incêndio padrão, quando se aumenta o número de aberturas.

### 3.5.4 Incêndios localizados

Para avaliar a ação térmica de um incêndio localizado, a EN1991-1-2 [13] prevê dois modelos em que é necessário distinguir se a chama não atinge o teto e um caso em que o atinge. Devido às dimensões do compartimento em estudo, prevalece o caso da chama não atingir o teto. Segundo a EN1991-1-2 [13], o comprimento das chamas de um incêndio localizado é obtido por:

$$L_f = -1.02D + 0.0148Q^{2/5} \quad [m] \tag{3.34}$$

Quando a chama não atinge o teto ($L_f < H$), a temperatura na pluma ao longo do eixo vertical de simetria da chama é obtida por:

$$\Theta_{(Z)} = 20 + 0.25{Q_C}^{2/3}(z - z_0)^{-5/3} \leq 900 \quad [°C] \tag{3.35}$$

Em que,

- $\Theta_{(Z)}$ é a temperatura na pluma ao longo do eixo vertical de simetria da chama;
- $D$ é o diâmetro do incêndio (m) com $D \leq 10\ m$;
- $Q$ é a taxa de libertação de calor (W) com $Q \leq 50\ MW$;
- $Q_C$ é a parcela da taxa de libertação de valor de convecção (W) com $Q_C = 0.8Q$ na ausência de mais informação;
- $z$ é a altura ao longo do eixo da chama (m);
- $H$ é a distância entre a origem do incêndio e o teto;
- $z_0$ é a origem virtual do eixo.

A origem virtual do eixo é obtida por:

$$z_0 = -1.02D + 0.00524Q^{2/5} \quad [m] \tag{3.36}$$

Na Figura 3.9 pode ser consultado um esquema do modelo de incêndio presente na EN1991-1-2 [13].

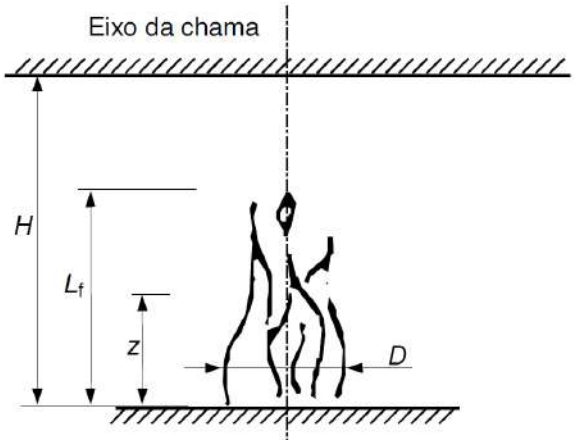



Figura 3.9 - Esquema do modelo de incêndio localizado presente na EN1991-1-2 [13]

Foi considerada uma distância entre a origem do incêndio e o teto igual a 6.4 m, que corresponde à altura média do pavilhão. Foi definida uma área de incêndio igual a 36 $m^2$, valor máximo obtido do Quadro 2.2. Foi igualmente considerada uma densidade de carga de incêndio igual a 730 $MJ/m^2$, que corresponde ao valor característico da densidade de carga de incêndio para o quantilho de 80% (ocupação definida como centro comercial) de acordo com o Quadro 2.3 ou o Anexo E da EN1991-1-2 [13]. Esta definição da densidade de carga de incêndio resulta num valor de HRR de 9 MW.

Com o auxílio do programa Elefir-EN [51], foi possível calcular a temperatura nos elementos estruturais para o tempo requerido de resistência ao fogo. A temperatura para o elemento coluna foi obtida a 2.05 m de altura, que corresponde ao comprimento máximo das chamas. Para o elemento viga, a temperatura obtida foi retirada a uma altura de 6 m, que corresponde à menor altura que o elemento viga se encontra.

A curva da taxa de libertação de calor obtida encontra-se representada na Figura 3.10 e o comprimento das chamas na Figura 3.11. Através da análise da Figura 3.11, constata-se que a chama não atinge o teto do compartimento.

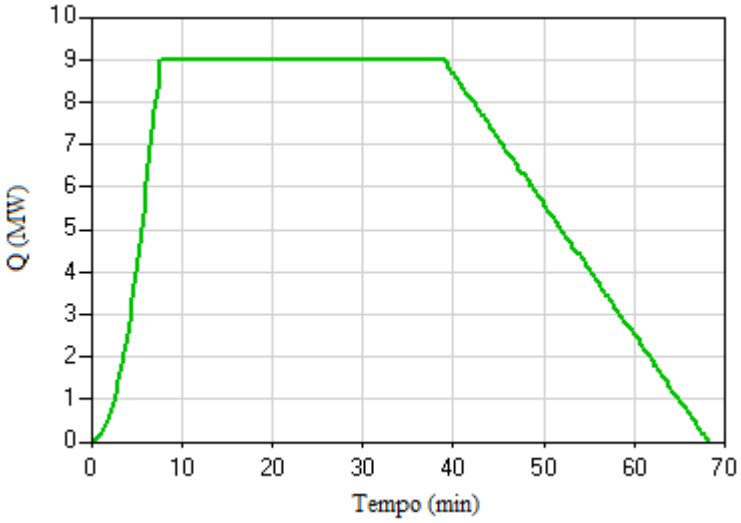



Figura 3.10 - Curva da taxa de libertação de calor obtida no programa Elefir-EN [51] para o modelo de incêndios localizados

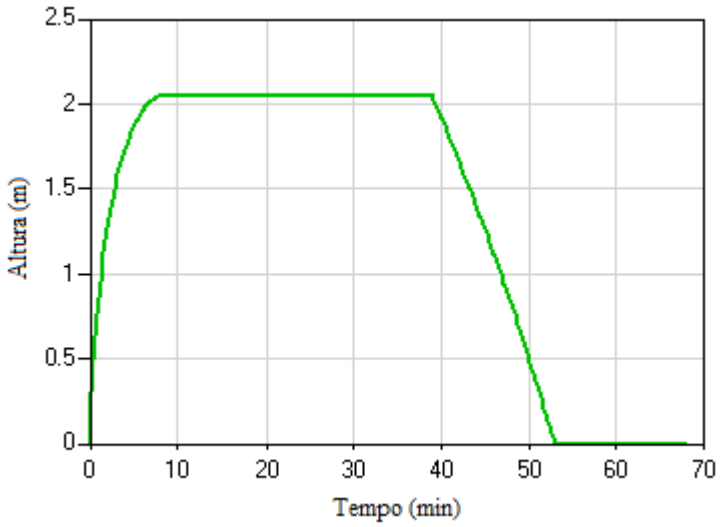



Figura 3.11 - Comprimento das chamas obtido no programa Elefir-EN [51]

A temperatura obtida para o compartimento e para os elementos estruturais pode ser consultada na Figura 3.12 para o elemento coluna e na Figura 3.13 para o elemento viga. Para a coluna, a temperatura máxima é de 515.5 ºC aos 39.3 minutos. A temperatura máxima obtida para a viga é de 226.2 ºC ao fim de 39.7 minutos.

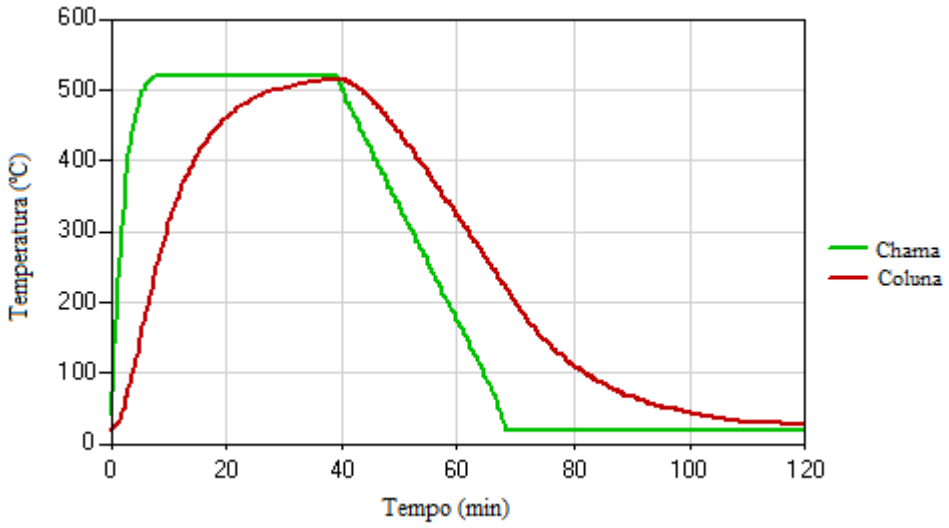



Figura 3.12 – Curva de temperatura obtida para o compartimento e para o elemento estrutural coluna a uma altura de 2.05 m no programa Elefir-EN [51]

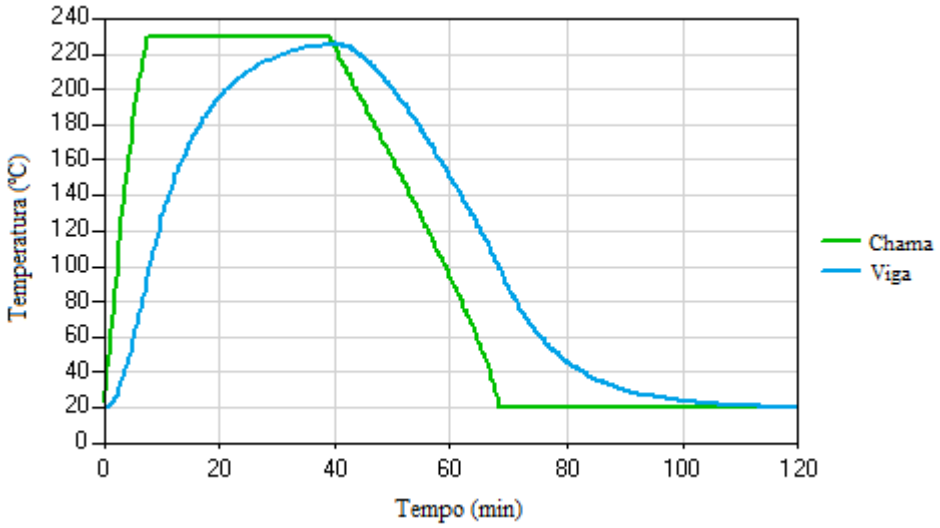



Figura 3.13 - Curva de temperatura obtida para o compartimento e para o elemento estrutural viga a uma altura de 2.05 m no programa Elefir-EN [51]

Em complemento à análise realizada para a coluna a uma altura de 2.05 m, foi calculada a temperatura para o tempo requerido de resistência ao fogo para a coluna a 1 m de altura, que corresponde sensivelmente a metade do comprimento máximo que as chamas atingem. Os resultados obtidos podem ser consultados na Figura 3.14. A temperatura máxima é de 715.9 ºC aos 39.2 minutos.

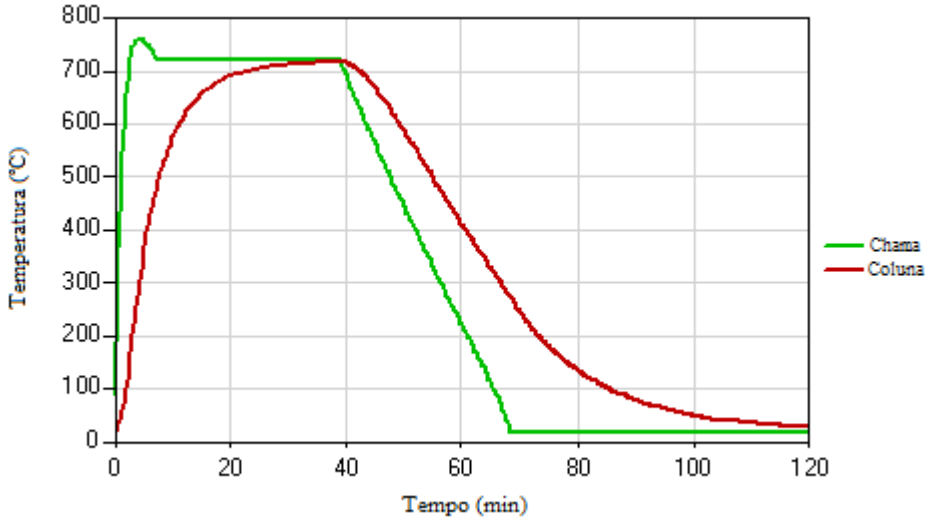



Figura 3.14 - Curva de temperatura obtida para o compartimento e para o elemento estrutural coluna a uma altura de 1 m no programa Elefir-EN [51]

Perante os resultados obtidos, verifica-se que o modelo de incêndios localizados permite obter uma curva de temperatura menos gravosa, quando comparada com a curva de temperatura obtida para a curva de incêndio padrão. A temperatura obtida para os elementos estruturais ganha especial relevância, pois as temperaturas determinadas são inferiores às temperaturas críticas, com a exceção das colunas até uma altura de cerca de 1 m. Tal implica que numa situação em que o modelo de incêndios localizados seja válido e represente fielmente a realidade de utilização do edifício, os elementos estruturais do caso de estudo não necessitam de proteção adicional contra o fogo, pois resistem à ação térmica sem se verificar o seu colapso, com a exceção das colunas até uma altura de cerca de 1 m, em que é necessária proteção contra o fogo.

## 3.6 Análise de custos para métodos de proteção ao fogo

A análise de custos realizada neste subcapítulo incidiu na influência da aplicação da proteção ao fogo nos elementos estruturais analisados no caso de estudo. É analisada proteção através de tintas intumescentes, argamassas projetadas e os elementos sem proteção.

Para a avaliação do custo das soluções tornou-se imperativo definir os custos da matéria-prima, transformação, pintura anticorrosiva, proteção ao fogo, transporte e montagem. De salientar que os custos associados a matéria-prima, pintura, transporte e montagem foram obtidos na literatura e têm por base o ano 2010. Uma vez que estes custos são constantes, independentemente da solução de proteção ao fogo adotada, a comparação de soluções de proteção pode ser realizada, tendo sempre presente que podem não representar os valores reais atuais. Os preços obtidos para tinta intumescente e argamassa projetada foram obtidos em €/m$^2$ e enquadram-se nos preços normalmente praticados para as temperaturas críticas obtidas com uma resistência ao fogo de R60 em estrutura metálica em perfis abertos. Os valores adotados foram os seguintes:

- Custo da matéria-prima: 0.75 €/kg [54];
- Custo de fabrico: 0.65 €/kg [54];
- Custo de pintura: 9.00 €/$m^2$ [54];
- Custo de tinta intumescente: 40.68 €/$m^2$ [55];
- Custo de argamassa projetada: 17.13 €/$m^2$ [55];
- Custo de transporte: 0.15 €/kg [54];
- Custo de montagem: 0.30 €/kg [54].

Foi analisado um pórtico do caso de estudo, que corresponde a duas colunas HEA300 e duas vigas IPE360. Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 - Análise de custos para dois métodos de proteção ao fogo e sem proteção ao fogo, para um pórtico do caso de estudo

| Proteção | Perfil | Peso (kg) | Área de Pintura ($m^2$) | Matéria-prima (€) | Fabrico (€) | Pintura (€) | Proteção ao fogo (€) | Transporte (€) | Montagem (€) | Total (€) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tinta intumescente | HEA 300 | 1060 | 20.6 | 794.70 | 688.74 | 185.44 | 838.17 | 158.94 | 317.88 | 2 983.87 |
| | IPE 360 | 1142 | 27.1 | 856.50 | 742.30 | 243.54 | 1 100.80 | 171.30 | 342.60 | 3 457.04 |
| | | | | | | | | | Total | 6 440.91 |
| Argamassa projetada | HEA 300 | 1060 | 20.6 | 794.70 | 688.74 | 185.44 | 352.95 | 158.94 | 317.88 | 2 498.64 |
| | IPE 360 | 1142 | 27.1 | 856.50 | 742.30 | 243.54 | 463.54 | 171.30 | 342.60 | 2 819.78 |
| | | | | | | | | | Total | 5 318.42 |
| Sem proteção | HEA 300 | 1060 | 20.6 | 794.70 | 688.74 | 185.44 | 0.00 | 158.94 | 317.88 | 2 145.70 |
| | IPE 360 | 1142 | 27.1 | 856.50 | 742.30 | 243.54 | 0.00 | 171.30 | 342.60 | 2 356.24 |
| | | | | | | | | | Total | 4 501.94 |

De acordo com o Quadro 3.8, é possível observar que a escolha do tipo de proteção a utilizar tem um custo relevante. O acréscimo de custo entre argamassa projetada e tinta intumescente é de cerca de 17%. A consideração de proteção ao fogo implica um acréscimo de custo de cerca de 15% para uma proteção com argamassa projetada e cerca de 30%, quando comparada com uma proteção com tinta intumescente.

O método convencional de proteção ao fogo para estruturas metálicas em pavilhões é a aplicação de tintas intumescentes, pois oferecem uma solução esteticamente agradável. Essa solução implica, como se viu, um investimento não negligenciável.

## 3.7 Considerações finais

A análise dos resultados apresentados permite perceber que existem diferenças na temperatura crítica obtida quando se utiliza o fator de redução para o valor de cálculo do nível de carregamento ou a combinação acidental. Para o caso de estudo concluiu-se que é mais competitivo utilizar a combinação acidental para a definição do valor de cálculo dos efeitos das ações em situação de incêndio.

Foram analisadas várias ações térmicas para a análise de temperatura. Utilizando a curva de incêndio padrão, conclui-se que os elementos estruturais estudados necessitam de proteção ao fogo, uma vez que a temperatura crítica é atingida muito rapidamente. Foram ainda utilizadas as curvas de incêndio paramétricas, ressalvando que a sua utilização não é permitida para o caso em estudo. Alterando as expressões das curvas de incêndio paramétricas por intermédio da modificação de coeficientes e definindo um parâmetro de afetação para ter em conta aberturas na cobertura, é possível um melhor ajuste para o caso particular em estudo. Tais modificações permitiram uma temperatura máxima superior à obtida na curva de incêndio padrão. Verificou-se igualmente uma menor duração do incêndio, quando comparada com a curva de incêndio padrão.

Os resultados obtidos para o modelo de incêndios localizados revelaram uma curva de temperatura inferior à curva de temperatura obtida para a curva de incêndio padrão. As temperaturas máximas calculadas para o elemento viga foram inferiores às respetivas temperaturas críticas. Para o elemento coluna, verificou-se que é necessária proteção contra o fogo apenas até uma altura de 1 m, posição a partir da qual a temperatura no elemento é inferior à sua temperatura crítica. Os resultados são encorajadores no que à economia da solução diz respeito. O modelo de incêndios localizados é utilizado para casos em que uma combustão generalizada no compartimento ainda não tenha ocorrido, logo torna-se necessário avaliar se o incêndio permanece localizado de forma a validar os resultados obtidos.

A grande relevância de obter curvas de temperatura realistas e adaptadas a compartimentos de grandes áreas, como o compartimento do caso de estudo, prende-se com a necessidade de implementar uma solução de proteção ao fogo proporcional ao investimento. Mostrou-se no capítulo 3.6 o aumento de custo expectável para o caso de estudo com proteção comparativamente ao custo sem proteção ao fogo. Tal exercício torna-se pertinente, pois prescrever uma proteção ao fogo sobredimensionada leva a soluções mais seguras, mas muito conservativas. A diferença de custos associados para uma proteção ao fogo com tinta intumescente e sem necessidade de proteção ao fogo foi de cerca 30%. Para os casos em que o tempo requerido de resistência ao fogo seja superior (por exemplo 90 ou 120 minutos), esta diferença de custos irá aumentar.

# 4 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE INCÊNDIO PARA O CASO DE ESTUDO

## 4.1 Preâmbulo

A simulação computacional de incêndio é bastante importante para a análise do comportamento do fogo em edifícios, os efeitos da temperatura, a evolução das chamas e do fumo. Através da simulação é possível obter curvas de temperatura em função do tempo mais próximas do desenvolvimento real de um incêndio. Procurou-se neste capítulo simular vários cenários de densidade de carga de incêndio, taxa de libertação de calor, altura do compartimento, condições de ventilação e altura. A metodologia utilizada assemelha-se à metodologia apresentada no capítulo 2.2.3 e engloba os seguintes passos:

- Definição do cenário de incêndio através da densidade de carga de incêndio, taxa de libertação de calor, área de incêndio e posição do incêndio;
- Verificação de não ocorrência de *flashover* no compartimento, garantindo uma temperatura no teto do compartimento inferior a 600ºC e fluxo de calor por radiação ao nível do pavimento inferior a 15 kW/m$^2$;
- Determinação da temperatura do ar através de modelos de zona e modelos de dinâmica de fluidos;
- Determinação da distribuição de temperatura na secção transversal dos elementos estruturais;

Utilizaram-se modelos de cálculo avançados, nomeadamente modelos de duas zonas com auxílio do programa CFAST [56] e de modelos de dinâmica de fluidos, através do programa *Fire Dynamics Simulator* [57], ambos desenvolvidos pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*).

Foram criados cinco grupos que se combinam entre si para gerar os cenários simulados (Quadro 4.1). No primeiro grupo estão definidos dois cenários de incêndio que correspondem a 2ª categoria de risco e a 3ª categoria de risco de incêndio, de acordo com o Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios [30] para a utilização-tipo mais gravosa (utilização-tipo XII, industriais, oficinas e armazéns). Para o cenário que contempla a 2ª categoria de risco, foi considerada uma densidade de carga de incêndio de 730 MJ/m$^2$, de acordo com o Anexo E da EN1991-1-2 [13] para uma ocupação de centro comercial e ainda dentro da gama de carga de incêndio de 2ª categoria para pavilhões industriais. Para o cenário relativo a uma 3ª categoria de risco, foi considerada uma densidade de carga de incêndio de 15000 MJ/m$^2$. O limite superior de densidade de carga de incêndio que corresponde à 3ª categoria de risco para pavilhões industriais é precisamente o valor de 15000 MJ/m$^2$ e o limite inferior para a mesma categoria corresponde a valores superiores a 5000 MJ/m$^2$. Apesar de ter sido considerada uma densidade de carga de incêndio igual ao limite superior definido para a 3ª categoria de risco, valores compreendidos entre 5000 MJ/m$^2$ e 15000 MJ/m$^2$ poderiam ter sido adotados. A diferença reside na quantidade de energia combustível disponível e não na taxa de libertação de calor

máxima, ou seja, a curva obtida para a taxa de libertação de calor para valores de densidade de carga de incêndio entre 5000 MJ/m$^2$ e 15000 MJ/m$^2$ é igual para o período definido de duração máxima da combustão do incêndio nas simulações realizadas. O valor máximo estabelecido para a duração da combustão foi de 120 minutos pois entendeu-se que o relevante nestas análises é obter a temperatura atingida no compartimento e não a duração do incêndio. Excluíram-se cenários que se enquadram na 1ª categoria de risco pois não são feitas exigências relativas à resistência ao fogo para edifícios com apenas um piso ao nível do plano de referência para pavilhões industriais. Excluíram-se igualmente cenários da 4ª categoria de risco por se entender que os edifícios que se incluem nesta categoria representam uma percentagem muito reduzida da totalidade dos edifícios em estudo nesta dissertação.

Para o segundo grupo foram considerados 3 cenários de área de incêndio, de acordo com o Quadro 2.2. A taxa de crescimento de incêndio foi definida como rápida e corresponde a valores de taxa máxima de libertação de calor por metro quadrado de 250 kW/m$^2$, de acordo com o Quadro 2.3 para uma ocupação de Centro Comercial. A taxa máxima de libertação de calor determinada tendo por base a equação (2.2) corresponde a 2.25 MW, 5 MW e 9 MW para uma área de incêndio de 9 m$^2$, 20 m$^2$ e 36 m$^2$, respetivamente.

As condições de ventilação natural no compartimento encontram-se definidas no terceiro grupo. Consideraram-se três condições de aberturas no compartimento. Foram admitidas 12 aberturas na cobertura que simulam a existência de claraboias, com uma área de 1.5 m$^2$ cada uma, como representado na Figura 4.1.

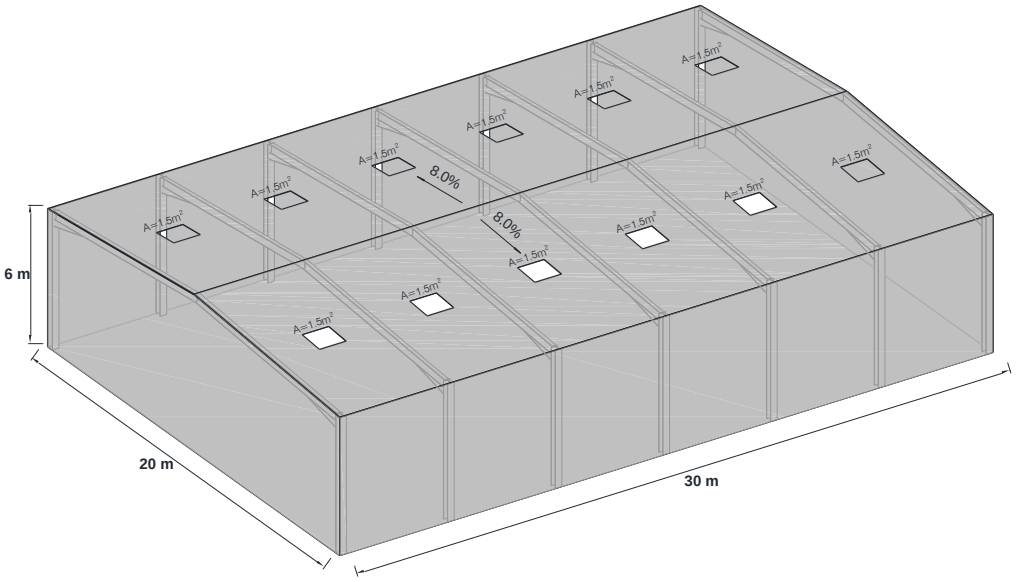



Figura 4.1 - Aberturas na cobertura consideradas para as simulações realizadas

Foram consideradas para um segundo caso, duas aberturas na fachada do compartimento com área de 9 m$^2$ cada uma, que simulam a existência de portões no compartimento. Entendeu-se que as dimensões consideradas são correntemente utilizadas nas utilizações-tipo em estudo, apesar da largura considerada ser superior ao número mínimo de unidades de passagem requeridas (uma unidade de passagem por 100 pessoas mais uma ou 4 unidades de passagem

[30]) Na Figura 4.2 encontram-se representadas as aberturas consideradas para a fachada do compartimento.

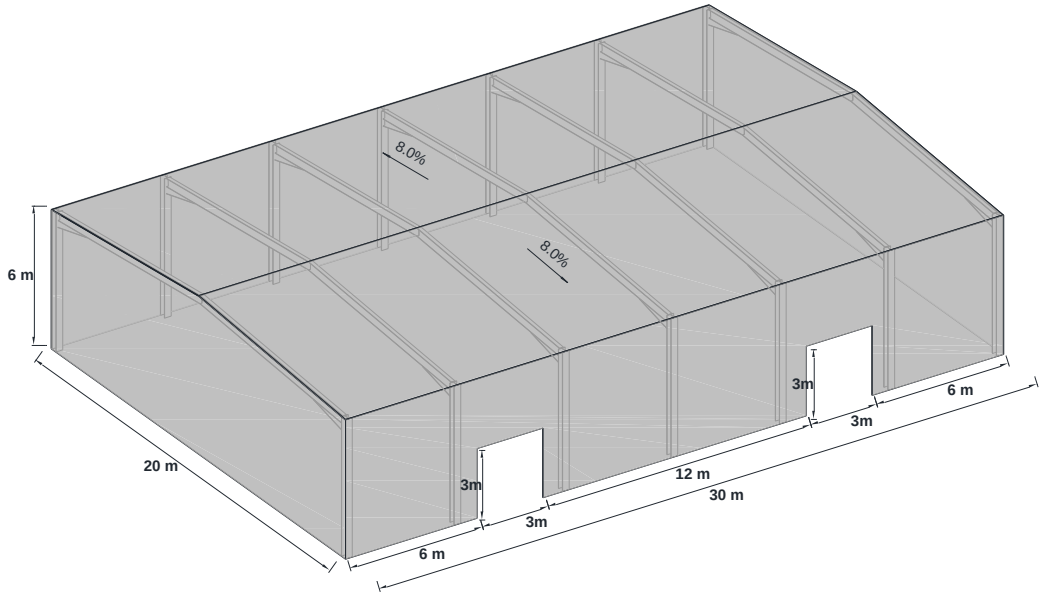



Figura 4.2 - Aberturas na fachada consideradas para as simulações realizadas

Para o terceiro caso, foram admitidas aberturas na fachada e cobertura para averiguar a influência das aberturas. Mantiveram-se as aberturas anteriormente definidas na cobertura e adicionaram-se aberturas na fachada que correspondem a um terço da área dos portões, ou seja, portões entreabertos, de acordo com a Figura 4.3.

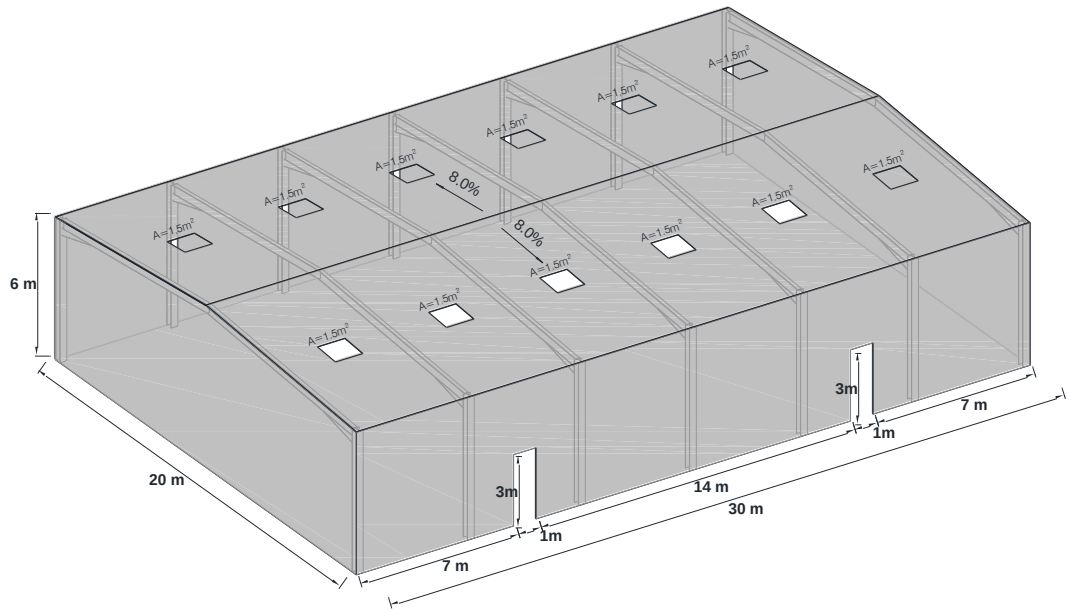



Figura 4.3 - Aberturas na fachada e cobertura consideradas para as simulações realizadas

A influência da altura do compartimento foi considerada no quarto grupo por intermédio de dois casos: a altura até às colunas de 6 m e essa altura acrescida de 2 m.

No quinto e último grupo, foram consideradas duas localizações de ignição no compartimento que se entenderam como mais desfavoráveis: ignição junto a uma coluna a um canto do pavilhão e ignição no centro do pavilhão, que corresponde a um cenário desfavorável para a viga. As localizações selecionadas encontram-se ilustradas na Figura 4.4 e na Figura 4.5, para uma ignição mais desfavorável para uma coluna e para uma ignição mais desfavorável para uma viga, respetivamente.

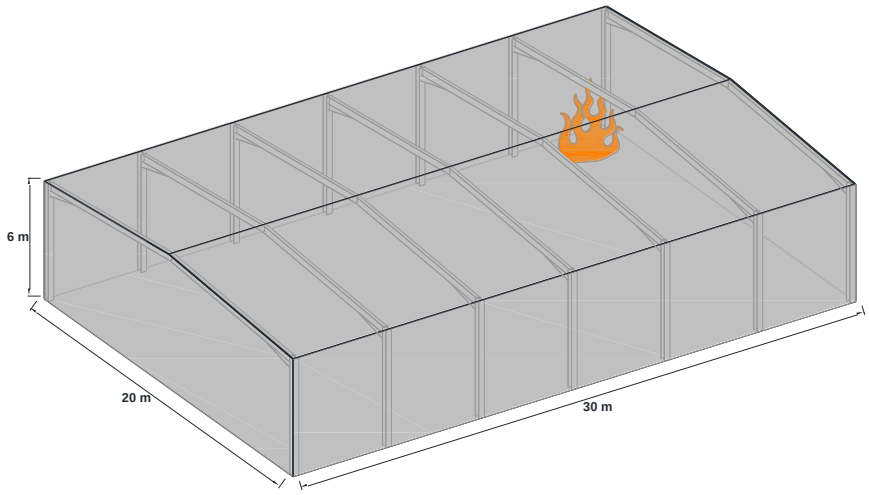



Figura 4.4 – Cenário de ignição junto a uma coluna nas simulações realizadas

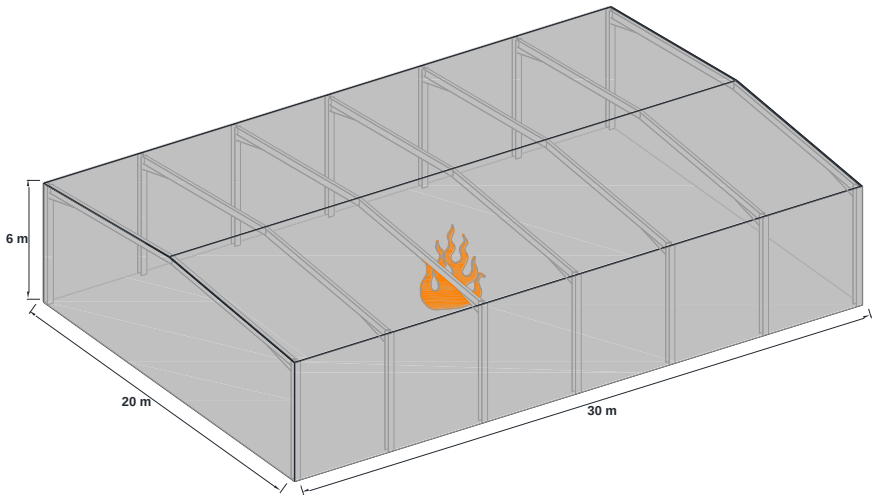



Figura 4.5 - Cenário de ignição junto a uma viga nas simulações realizadas

No Quadro 4.1 apresentam-se os grupos e respetivos casos enumerados anteriormente.

Quadro 4.1 - Grupos e respetivos casos que serviram de base para gerar os cenários de incêndio simulados

| Grupo | Caso | Descrição |
|---|---|---|
| I | 2Cat | 2ª categoria de risco e densidade de carga de incêndio de 730 MJ/m$^2$ |
| | 3Cat | 3ª categoria de risco e densidade de carga de incêndio de 5000 MJ/m$^2$ (exclusive) a 15000 MJ/m$^2$ (inclusive) |
| II | A9 | Área de incêndio de 9 m$^2$, que corresponde a 2.25 MW |
| | A20 | Área de incêndio de 20 m$^2$, que corresponde a 5 MW |
| | A36 | Área de incêndio de 36 m$^2$, que corresponde a 9 MW |
| III | AbCob | Aberturas na cobertura (18 m$^2$) |
| | AbFach | Aberturas na fachada (18 m$^2$) |
| | AbFachCob | Aberturas na cobertura e fachada (24 m$^2$) |
| IV | H | Altura ao topo das colunas de 6 m |
| | H+2 | Altura ao topo das colunas de 8 m |
| V | IgnColuna | Ignição junto a uma coluna |
| | IgnViga | Ignição junto a uma viga |

A partir dos casos enunciados, geraram-se 72 cenários de incêndio selecionando um caso de cada grupo para combinar todos os cenários possíveis. A título de exemplo, o cenário 2Cat_A9_AbCob_H_IgnColuna representa um incêndio de 2ª categoria de risco com uma densidade de carga de incêndio de 730 MJ/m$^2$ (2Cat), área de incêndio de 9 m$^2$ com 2.25 MW (A9), aberturas na cobertura (AbCob), altura de 6 m até à cota de topo das colunas (H) e ignição junto a uma coluna (IgnColuna). No Quadro 4.2 encontram-se sintetizados os cenários nas simulações realizadas.

Quadro 4.2 - Cenários considerados nas simulações realizadas

| Cenário para simulação |
|---|
| 2Cat_A9_AbCob_H_IgnColuna |
| 2Cat_A9_AbCob_H_IgnViga |
| 2Cat_A9_AbCob_H+2_IgnColuna |
| 2Cat_A9_AbCob_H+2_IgnViga |
| 2Cat_A9_AbFach_H_IgnColuna |
| 2Cat_A9_AbFach_H_IgnViga |
| 2Cat_A9_AbFach_H+2_IgnColuna |

| Cenário para simulação |
|---|
| 2Cat_A9_AbFach_H+2_IgnViga |
| 2Cat_A9_AbFachCob_H_IgnColuna |
| 2Cat_A9_AbFachCob_H_IgnViga |
| 2Cat_A9_AbFachCob_H+2_IgnColuna |
| 2Cat_A9_AbFachCob_H+2_IgnViga |
| 2Cat_A20_AbCob_H_IgnColuna |
| 2Cat_A20_AbCob_H_IgnViga |

| Cenário para simulação |
|---|
| 2Cat_A20_AbCob_H+2_IgnColuna |
| 2Cat_A20_AbCob_H+2_IgnViga |
| 2Cat_A20_AbFach_H_IgnColuna |
| 2Cat_A20_AbFach_H_IgnViga |
| 2Cat_A20_AbFach_H+2_IgnColuna |
| 2Cat_A20_AbFach_H+2_IgnViga |
| 2Cat_A20_AbFachCob_H_IgnColuna |
| 2Cat_A20_AbFachCob_H_IgnViga |
| 2Cat_A20_AbFachCob_H+2_IgnColuna |
| 2Cat_A20_AbFachCob_H+2_IgnViga |
| 2Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna |
| 2Cat_A36_AbCob_H_IgnViga |
| 2Cat_A36_AbCob_H+2_IgnColuna |
| 2Cat_A36_AbCob_H+2_IgnViga |
| 2Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna |
| 2Cat_A36_AbFach_H_IgnViga |
| 2Cat_A36_AbFach_H+2_IgnColuna |
| 2Cat_A36_AbFach_H+2_IgnViga |
| 2Cat_A36_AbFachCob_H_IgnColuna |
| 2Cat_A36_AbFachCob_H_IgnViga |
| 2Cat_A36_AbFachCob_H+2_IgnColuna |
| 2Cat_A36_AbFachCob_H+2_IgnViga |
| 3Cat_A9_AbCob_H_IgnColuna |
| 3Cat_A9_AbCob_H_IgnViga |
| 3Cat_A9_AbCob_H+2_IgnColuna |
| 3Cat_A9_AbCob_H+2_IgnViga |
| 3Cat_A9_AbFach_H_IgnColuna |
| 3Cat_A9_AbFach_H_IgnViga |
| 3Cat_A9_AbFach_H+2_IgnColuna |

| Cenário para simulação |
|---|
| 3Cat_A9_AbFach_H+2_IgnViga |
| 3Cat_A9_AbFachCob_H_IgnColuna |
| 3Cat_A9_AbFachCob_H_IgnViga |
| 3Cat_A9_AbFachCob_H+2_IgnColuna |
| 3Cat_A9_AbFachCob_H+2_IgnViga |
| 3Cat_A20_AbCob_H_IgnColuna |
| 3Cat_A20_AbCob_H_IgnViga |
| 3Cat_A20_AbCob_H+2_IgnColuna |
| 3Cat_A20_AbCob_H+2_IgnViga |
| 3Cat_A20_AbFach_H_IgnColuna |
| 3Cat_A20_AbFach_H_IgnViga |
| 3Cat_A20_AbFach_H+2_IgnColuna |
| 3Cat_A20_AbFach_H+2_IgnViga |
| 3Cat_A20_AbFachCob_H_IgnColuna |
| 3Cat_A20_AbFachCob_H_IgnViga |
| 3Cat_A20_AbFachCob_H+2_IgnColuna |
| 3Cat_A20_AbFachCob_H+2_IgnViga |
| 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna |
| 3Cat_A36_AbCob_H_IgnViga |
| 3Cat_A36_AbCob_H+2_IgnColuna |
| 3Cat_A36_AbCob_H+2_IgnViga |
| 3Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna |
| 3Cat_A36_AbFach_H_IgnViga |
| 3Cat_A36_AbFach_H+2_IgnColuna |
| 3Cat_A36_AbFach_H+2_IgnViga |
| 3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnColuna |
| 3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnViga |
| 3Cat_A36_AbFachCob_H+2_IgnColuna |
| 3Cat_A36_AbFachCob_H+2_IgnViga |

Em todas as simulações realizadas foram consideradas as aberturas no compartimento sem qualquer tipo de obstrução e admitidas simplificadamente como desobstruídas durante a totalidade da duração do incêndio. Simplificadamente não foi também considerada a possibilidade de material na proximidade do incêndio entrar em combustão devido à transferência de calor por radiação, devido sobretudo à dificuldade de assumir geometrias, espaçamentos e características dos materiais no interior de um edifício para um caso de estudo que se pretende que seja geral.

A curva da taxa de libertação de calor foi determinada de acordo com o indicado no capítulo 2.2.3 para cada área de incêndio e categoria de risco. A taxa de crescimento foi definida como rápida, de acordo com o Quadro 2.3 para uma utilização de centro comercial. As curvas obtidas encontram-se representadas na Figura 4.6.

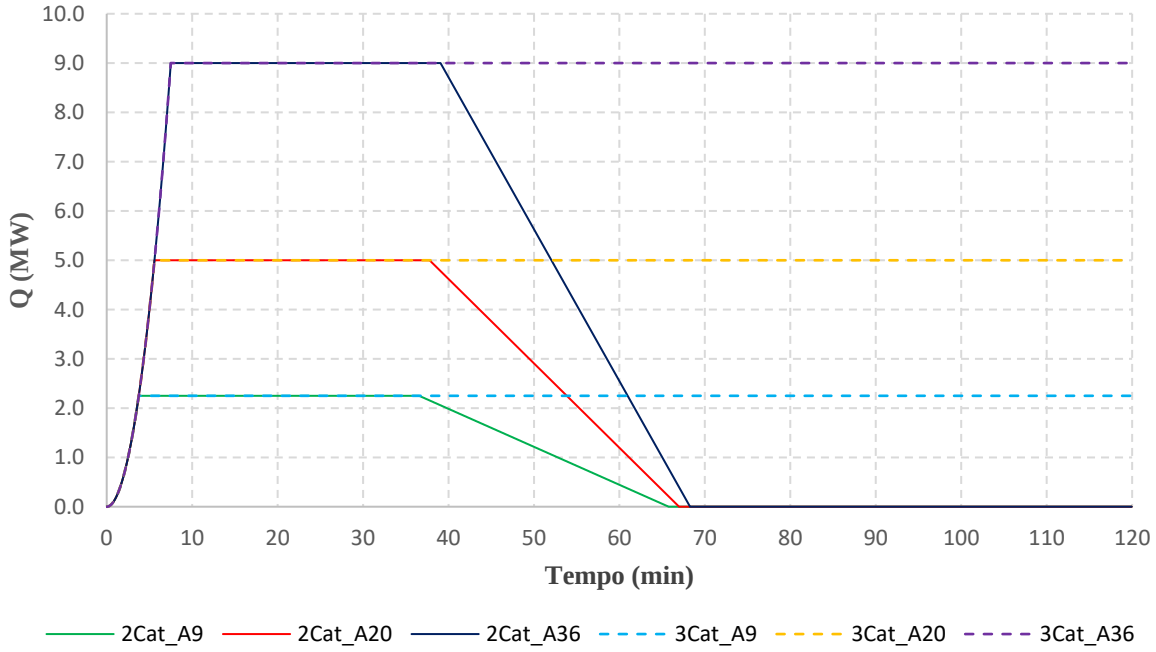



Figura 4.6 - Taxa de libertação de calor para cada cenário de categoria de risco e área de incêndio

## 4.2 Simulação através do programa CFAST

CFAST [56] é um programa de cálculo que utiliza modelos de incêndio de duas zonas, simulando o ambiente térmico causado por um incêndio num compartimento. Cada compartimento é dividido numa camada de gás superior e inferior. A temperatura dentro de cada camada é uniforme e a sua evolução no tempo é descrita por um conjunto de equações diferenciais derivadas das leis fundamentais de conservação de massa, momento e energia (Figura 4.7). No transporte de fumo e calor de uma zona para outra são utilizadas correlações empíricas. Como as equações utilizadas são relativamente simples, as simulações no CFAST requerem normalmente poucos minutos de tempo de processamento em computadores

correntes. Os principais parâmetros de entrada são as dimensões do compartimento, propriedades dos materiais, dimensões e posições de aberturas e propriedades do incêndio [58].

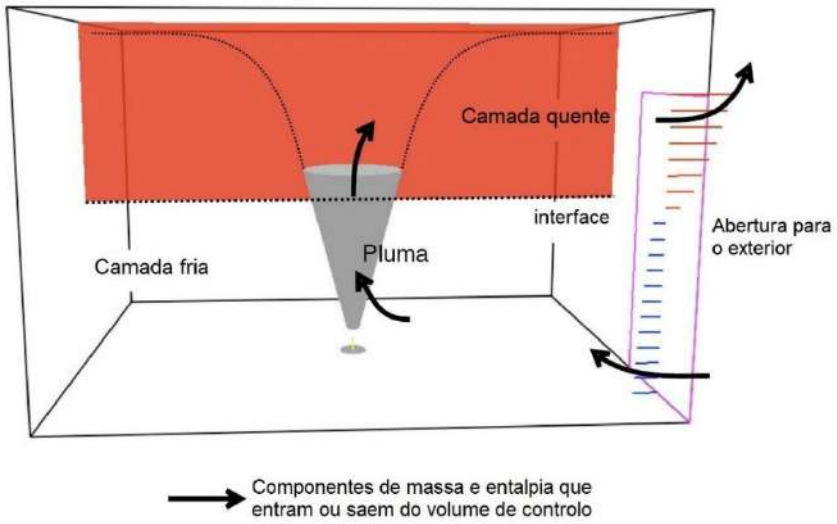



Figura 4.7 - Esquema de volumes de controlo de um modelo de duas zonas (adaptado de [58])

### 4.2.1 Definição do modelo e parâmetros de entrada

O conceito de modelo de zona é mais corretamente aplicado em compartimentos em que a largura e o comprimento não diferem substancialmente. Se as dimensões do compartimento forem muito diferentes, por exemplo um corredor, o padrão de fluxo pode tornar-se assimétrico. Se o compartimento for muito achatado, a temperatura pode ter diferenças radiais significativas. O utilizador deve utilizar proporções de comprimento, largura e altura adequadas [59], sendo recomendados os valores propostos no Quadro 4.3. As principais variáveis de interesse para simular incêndios em grandes compartimentos a partir de modelos de zona são a dimensão do incêndio, o volume do compartimento e a proporção das dimensões do compartimento [60].

Quadro 4.3 - Proporções recomendadas para compartimentos em modelos de zona [59]

| Proporção | Limite aceitável |
|---|---|
| Comprimento/Largura | < 3 |
| Comprimento/Altura | < 3 |
| Largura/Altura | > 0.4 |

As dimensões do compartimento do caso de estudo não cumprem as proporções recomendadas apresentadas anteriormente. Uma possibilidade para simular incêndios em grandes compartimentos e manter um modelo de duas zonas, consiste em utilizar o conceito de multi-compartimentos com aberturas entre si [61] [62] [63] [64]. Assim, em vez de apenas um

compartimento com dimensões de 30 m de comprimento, 20 m de largura e 6.4 m de altura (altura média do pavilhão), foram criados 6 compartimentos com dimensões 10 m x 10 m x 6.4 m. Pretende-se que fique assegurada uma regularidade em planta dos vários compartimentos e proporções dentro dos limites aceitáveis. Na Figura 4.8 estão representados os modelos desenvolvidos no CFAST com o conceito de multi-compartimentos para os três cenários de aberturas. Para a representação gráfica dos resultados recorreu-se ao programa *Smokeview*.

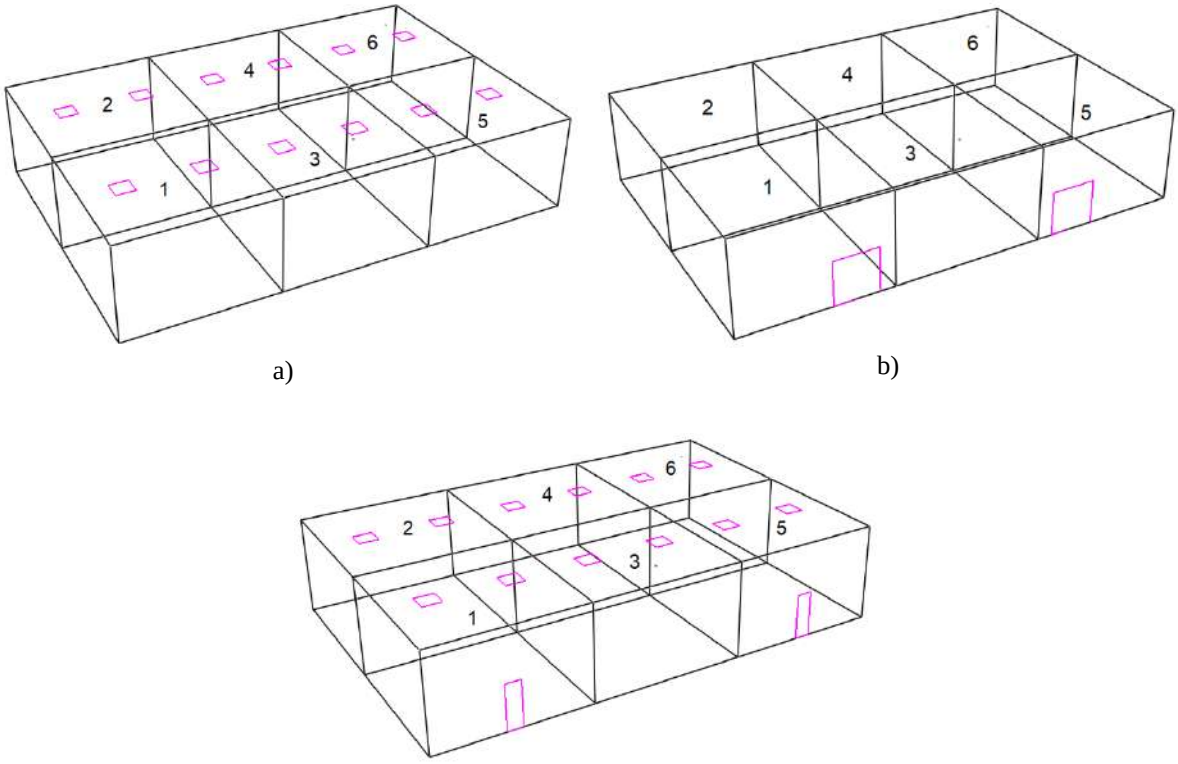



Figura 4.8 - Caso de estudo modelado no CFAST recorrendo ao conceito de multi-compartimentos (compartimentos numerados de 1 a 6): a) aberturas na cobertura (AbCob); b) aberturas na fachada (AbFach); c) aberturas na fachada e cobertura (AbFachCob)

Foram definidos dois materiais para a envolvente do compartimento, à semelhança do realizado no capítulo 3.5.2. Os parâmetros necessários para a correta definição das propriedades dos materiais no CFAST podem ser consultados no Quadro 4.4. O calor específico e a condutividade térmica são dados como constantes, todavia estas propriedades são dependentes da temperatura.

Quadro 4.4 - Propriedades dos materiais adotados no caso de estudo para simulação no programa CFAST

| Material | Massa volúmica ($kg/m^3$) [14] | Condutividade térmica (W/mk) [14] | Calor específico (J/kgK) [14] | Espessura (m) | Emissividade [65] |
|---|---|---|---|---|---|
| Betão de densidade normal | 2300 | 1.600 | 1000 | 0.20 | 0.94 |
| Lã de rocha | 60 | 0.037 | 1030 | 0.04 | 0.90 |

A geometria das aberturas para o exterior foi definida de acordo com a Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3. Entre compartimentos foram definidas aberturas com a dimensão da face em comum, para possibilitar a permuta de massa e entalpia e assim validar o conceito de multi-compartimentos.

A cobertura e paredes foram definidas como material lã de rocha e o pavimento como betão de densidade normal. O CFAST permite introduzir um parâmetro que tem em conta a estanqueidade das paredes e do pavimento. Para as paredes foi adotado o valor de $1.7x10^{-4}$ $m^2/m^2$, que corresponde a uma estanqueidade normal e para o pavimento foi utilizado o valor de $6.6x10^{-6}$ $m^2/m^2$, que representa um pavimento muito estanque [66].

A fonte do incêndio foi definida ao nível do pavimento com uma função $t^2$. A taxa de libertação de calor foi definida de acordo com a Figura 4.6, consoante o cenário analisado. Para uma ignição junto a uma coluna (IgnColuna), definiu-se a fonte de incêndio no compartimento 6 (numeração na Figura 4.8). Para uma ignição junto a uma viga (IgnViga), a fonte de incêndio foi definida no compartimento 4. Os restantes parâmetros comuns a todas as simulações realizadas e que permitem caracterizar o incêndio podem ser consultados no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 - Parâmetros de entrada para simulação com o programa CFAST

| Parâmetro | Valor adotado |
|---|---|
| Número de cada átomo da molécula de combustível à base de celulose | $C_6H_{10}O_5$ [67] |
| Poder calorífico (kJ/kg) | 17500 [13] |
| Fração da combustão emitida na forma de radiação | 0.30 [68] |
| Produção de CO | 0.005 [69] |
| Produção de *Soot* | 0.015 [66] |
| Produção de HCN | 0.00 |
| Produção de TS | 0.00 |

O parâmetro de produção de CO corresponde à massa de monóxido de carbono por unidade de massa de combustível consumido e o parâmetro de produção de *soot*, ou fuligem, corresponde à massa de fuligem produzida por unidade de massa de combustível consumido. O parâmetro

que afeta a produção de HCN (cianeto de hidrogénio) afeta a qualidade do ar, sendo relevante para estudos de evacuação. O parâmetro TS (*trace species*) representa o transporte de massa dos vestígios da espécie de combustível junto com os outros produtos da combustão, admitindo-se que não participa na reação de combustão e não representa uma parte significativa da massa total para o balanço de massa do sistema [70].

Foram definidos sensores para medição de temperatura e de radiação (Figura 4.9). O sensor definido para medição de temperatura foi colocado no centro da pluma, a uma altura ligeiramente inferior à cobertura do compartimento. O sensor para medição da radiação foi colocado no mesmo compartimento que a fonte de incêndio, a uma altura de 1 m do pavimento e a uma distância de cerca de 8 m do eixo da pluma. Considerou-se adequado colocar o sensor no mesmo compartimento em que foi colocada a fonte de incêndio a uma altura que permita medir a radiação próxima do nível do pavimento, ou seja, na camada dos gases frios.

O tempo de simulação foi de 8300 s com intervalo de saída para folha de cálculo a cada 1 s. A temperatura inicial do ambiente foi definida como 20°C e os valores iniciais para a pressão atmosférica dentro e fora do compartimento foram definidas como 101325 Pa. A humidade foi considerada 50%. Os compartimentos foram divididos numa grelha com 50 divisões.

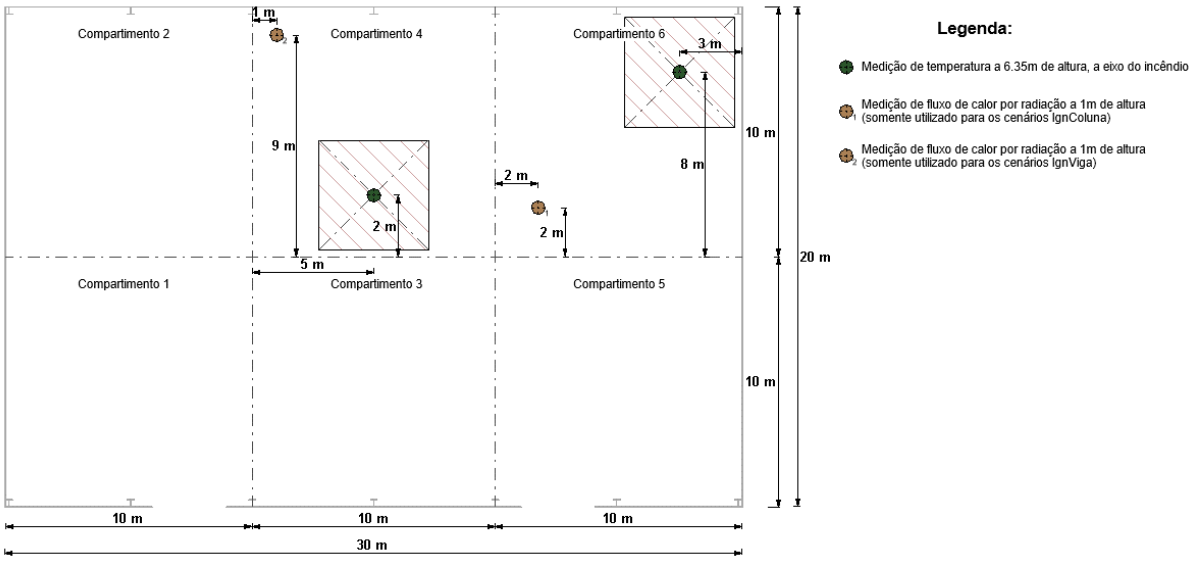



Figura 4.9 - Implantação dos sensores de medição de temperatura e fluxo de calor por radiação no CFAST

### 4.2.2 Resultados

As temperaturas máximas obtidas na camada superior do modelo de duas zonas para as simulações realizadas correspondem a uma área de incêndio de 36 $m^2$ com aberturas na cobertura (2Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna, 2Cat_A36_AbCob_H_IgnViga, 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna e 3Cat_A36_AbCob_H_IgnViga). A temperatura máxima registou-se, como expectável, para um cenário de 3ª categoria de risco.

A Figura 4.10 mostra os cenários mais gravosos para a 2ª categoria de risco e para a 3ª categoria de risco.

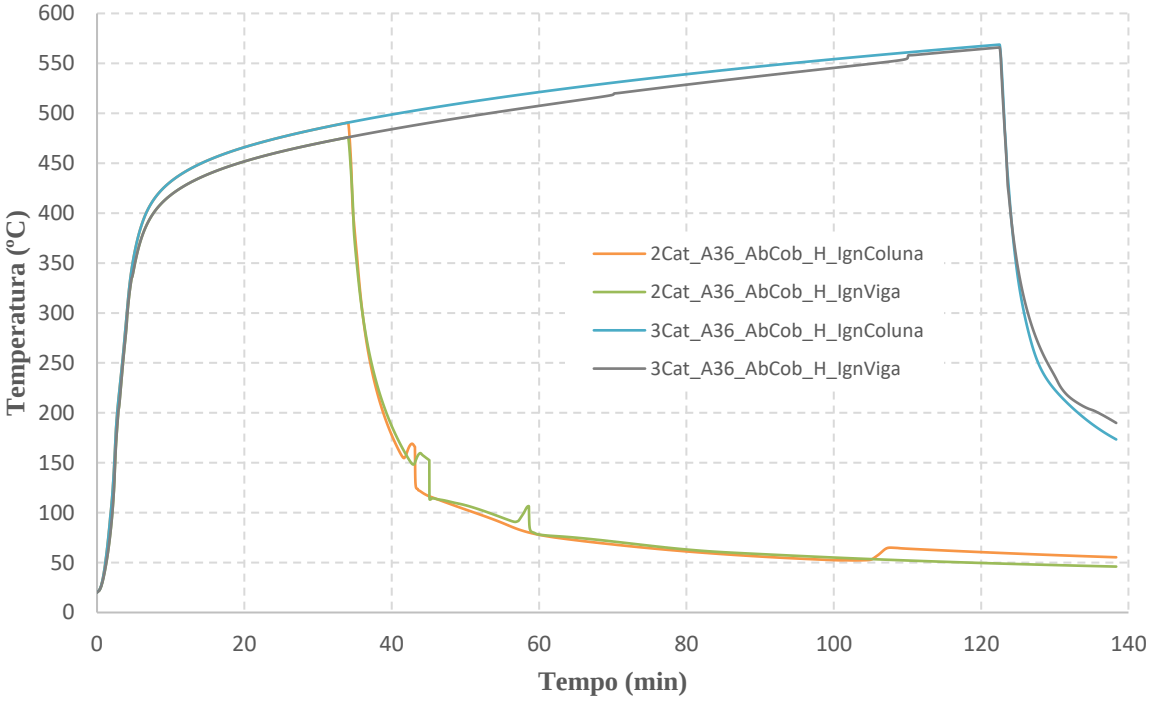



Figura 4.10 - Temperatura da camada superior obtida no CFAST para os cenários com aberturas na cobertura para a 2ª e 3ª categoria de risco

A temperatura máxima registada foi de 568.8ºC e corresponde ao cenário com 3ª categoria de risco, área de incêndio de 36 $m^2$, aberturas na cobertura e ignição junto a uma coluna (3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna). A diferença entre os dois cenários mais gravosos não é muito significativa. Apesar da evolução mais gravosa do cenário com ignição junto a uma coluna, a temperatura máxima registada é bastante similar ao cenário com ignição junto a uma viga: 568.8ºC e 566.0ºC, respetivamente.

A diferença mais notória entre as curvas de temperatura obtidas para a 2ª categoria de risco e 3ª categoria de risco reside no tempo de combustão, que provoca uma fase de arrefecimento mais precoce. As curvas de temperatura são praticamente idênticas até os 35 min, instante em que a carga de incêndio é totalmente consumida para os cenários com 2ª categoria de risco. Por esta razão, a temperatura máxima registada para os cenários de 2ª categoria de risco é de 490.7ºC.

A Figura 4.11 mostra o mapa de temperaturas para o cenário mais gravoso (3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna), correspondendo a um corte longitudinal no eixo da pluma.

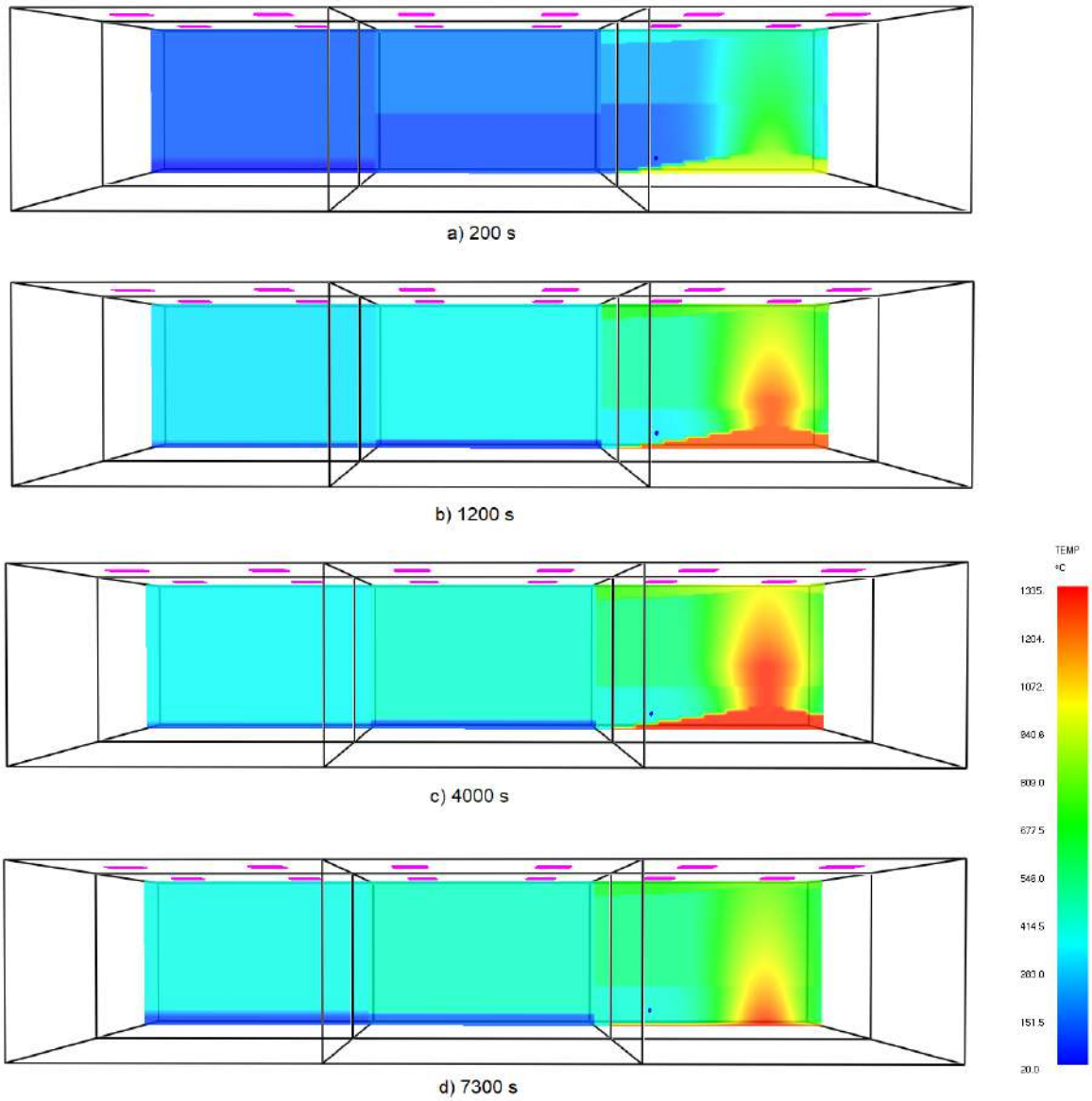



Figura 4.11 - Mapa de temperaturas obtidas (corte longitudinal no eixo da pluma) no programa CFAST para o caso 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna

Na Figura 4.12 estão representados mapas de temperatura para o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnViga, tendo-se realizado um corte longitudinal ao longo do eixo da pluma.

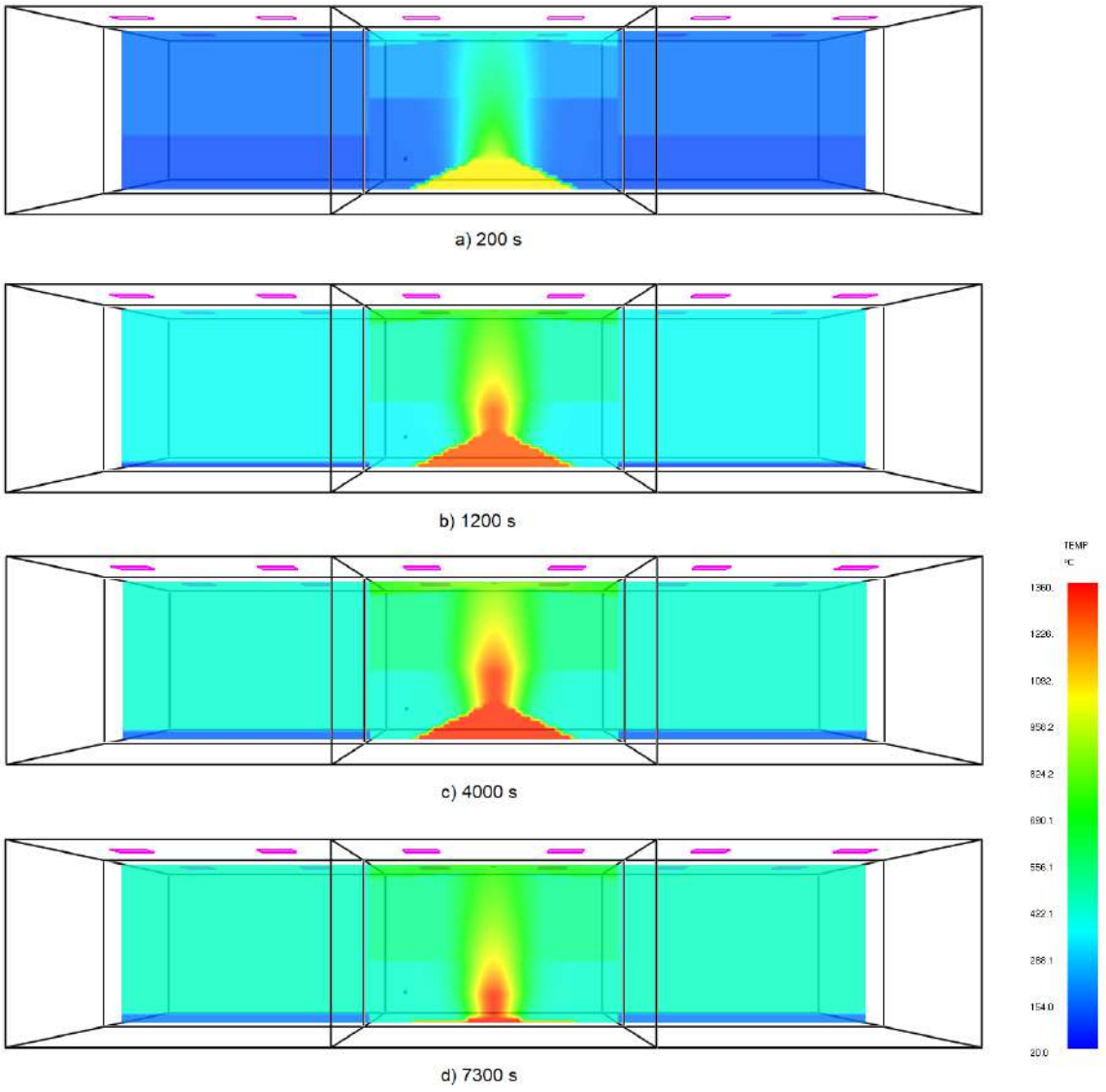



Figura 4.12 - Mapa de temperaturas obtidas (corte longitudinal no eixo da pluma) no programa CFAST para o caso 3Cat_A36_AbCob_H_IgnViga

Perante os mapas de temperatura apresentados, denota-se que a temperatura máxima representada na Figura 4.10 diz respeito à temperatura da camada superior (gases quentes). Os parâmetros de saída do programa CFAST que dizem respeito à temperatura da camada superior, são divididos por compartimento. Por esta razão a curva de temperatura obtida na Figura 4.10 mostra a temperatura média da camada superior no compartimento mais gravoso. A grande desvantagem da utilização de um modelo de duas zonas como o CFAST, é a suposição de que a camada de gás quente tem uma temperatura uniforme, não sendo possível simular uma distribuição vertical de temperatura, com a exceção dos resultados do modelo de pluma do CFAST. Apesar destas limitações, fica evidente que o programa consegue fornecer uma representação razoável do caso em estudo.

No Quadro 4.6 estão resumidas as temperaturas máximas obtidas para as categorias de risco simuladas e para as ocupações definidas em função da área de incêndio, de acordo com o Quadro 2.2.

As temperaturas apresentadas no Quadro 4.6 ganham especial relevância quando comparadas com a curva padrão ISO 834, pois a temperatura obtida por essa curva ao fim de 60 min é de 945ºC. É assim expectável que a temperatura máxima, com um edifício com a geometria e condições de ventilação admitidas para o caso de estudo, atinja um máximo de 568.8ºC, uma redução de 376ºC, em relação à curva ISO 834.

Quadro 4.6 - Resumo da temperatura máxima obtida no programa CFAST para a camada superior em função da ocupação prevista e categoria de risco

| Ocupação | Temperatura máxima 2ª categoria de risco (ºC) | Temperatura máxima 3ª categoria de risco (ºC) | Taxa máxima de libertação de calor (MW) |
|---|---|---|---|
| Átrio de um edifício de escritórios<br>Receção de um hotel<br>Galeria de arte<br>Cais de estação<br>Terminal de aeroporto<br>Pavilhão desportivo | 175.7 | 190.5 | 2.25 |
| Igreja<br>Pavilhão multiusos<br>Sala de restaurante | 318.2 | 352.0 | 5.0 |
| Supermercado<br>Centro comercial<br>Escritório (grandes áreas)<br>Sala de exposição | 490.7 | 568.8 | 9.0 |

Os resultados obtidos para as várias condições de ventilação indicam a importante influência de aberturas localizadas na fachada na redução da temperatura do compartimento, como se indica na Figura 4.13. Para o cenário da 3ª categoria de risco, área de incêndio de 36 $m^2$ e ignição junto a uma coluna, verifica-se um decréscimo na temperatura máxima de 98.5ºC entre o cenário de aberturas na cobertura (AbCob) e o cenário de aberturas na fachada (AbFach). A redução de temperatura é mais acentuada quando se compara o cenário de aberturas na cobertura (AbCob) com o cenário de aberturas na fachada e cobertura (AbFachCob), verificando-se um decréscimo de 270.4ºC.

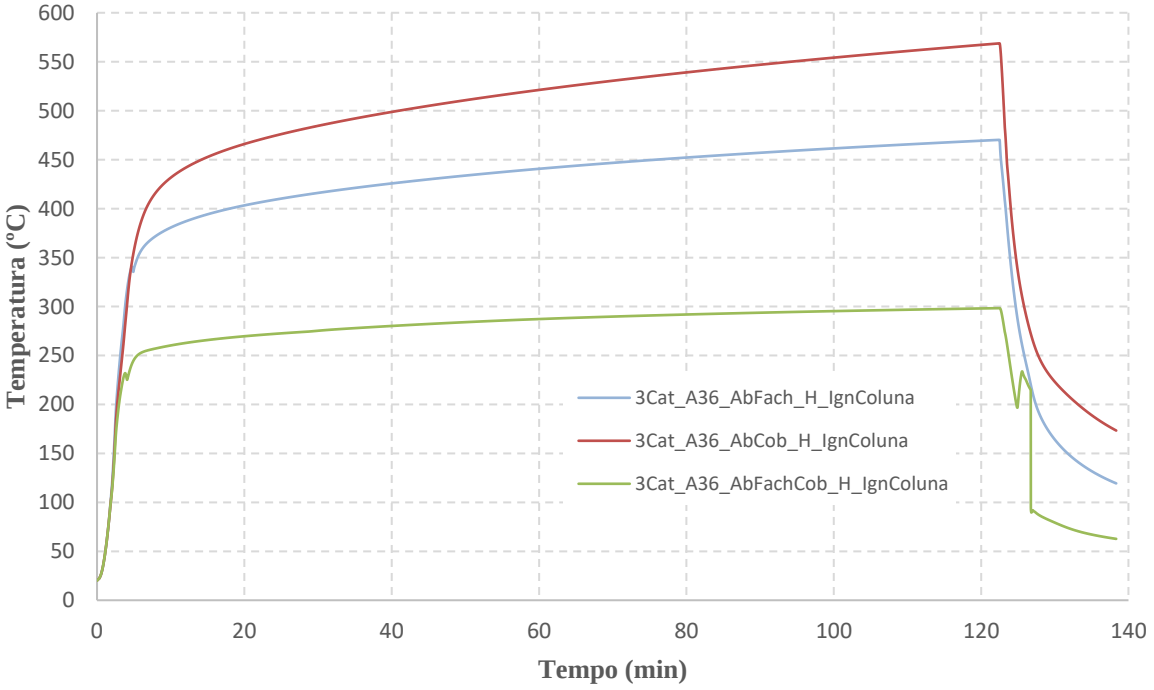



Figura 4.13 - Temperatura da camada superior obtida no CFAST para os três cenários de aberturas, com incêndio definido como 3ª categoria de risco, área de 36 $m^2$, e ignição junto a uma coluna

O objetivo da criação de aberturas consiste em alterar as condições no interior e em volta do edifício, de forma a que os gases e calor provenientes do incêndio fluam para o exterior do edifício de forma controlada. O vento pode ter um impacto muito grande na propagação dos gases do incêndio, especialmente em algumas localizações geográficas e em edifícios de grande altura. A influência do vento não foi objeto de estudo nesta dissertação.

O ar quente é menos denso que o ar frio e o mesmo se aplica aos gases provenientes de um incêndio. A densidade dos gases é inversamente proporcional à temperatura, o que significa que à medida que a temperatura aumenta, a densidade diminui. A densidade mais baixa dos gases quentes, comparativamente ao ar frio circundante, induz a que subam e formem uma camada superior que se acumula no teto do compartimento. Os produtos da combustão do incêndio formam uma pluma, ou seja, um cone que flui superiormente, transportando gases e partículas. Esta pluma é mais quente que o ar circundante e, portanto, sobe. Em adição ao ar que flui para o incêndio e participa na combustão, ar é de forma idêntica misturado na pluma enquanto se desloca para cima. Este ar é igualmente aquecido e desloca-se para cima e para o exterior. Como consequência direta, ar fluirá para o interior do compartimento, substituindo o ar que saiu, devido à diferença de pressão interior gerada. Esta entrada de ar normalmente ocorre ao nível do pavimento, porque o ar frio que entra tem uma densidade superior aos gases quentes que saem.

Devido a este fenómeno, podem ser explicados os resultados mais gravosos obtidos para o cenário de aberturas na cobertura (3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna). O facto de a ventilação ocorrer apenas por aberturas na cobertura, leva a que os gases quentes sejam expulsos pela única ligação ao exterior. Tal implica que a entrada de ar também se verifique por essas mesmas aberturas. Quando se dá a acumulação de gases quentes na camada superior do compartimento,

a entrada de ar frio é realizada de forma menos eficiente do que com aberturas ao nível do pavimento. A acumulação de gases quentes provenientes da combustão leva a que a temperatura registada seja superior aos restantes cenários onde se variou a posição das aberturas.

No cenário com aberturas na fachada (3Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna), a entrada de ar frio e a saída dos gases quentes dá-se pela mesma abertura. A altura admitida de 3 m permite a entrada de ar frio e a saída de gases quentes, como esquematizado na Figura 4.7.

A maior redução de temperatura no compartimento ocorre quando se utilizam aberturas na cobertura e na fachada (3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnColuna). Este cenário simula as condições ideais de ventilação no compartimento com vista a diminuição de temperatura. As aberturas na cobertura permitem a saída dos gases quentes de forma eficiente, pois a sua localização permite uma menor acumulação destes junto à cobertura. As aberturas na fachada possibilitam a entrada de ar frio junto ao pavimento que induz um arrefecimento do ar dentro do compartimento. Existe assim uma redução importante da temperatura através de uma entrada constante de ar frio e saída de gases quentes. O mesmo fenómeno pode ser observado por exemplo num forno com chaminé: o ar fresco entra num nível inferior, é aquecido pelo fogo, sobe e encaminha-se para o exterior pelo topo da chaminé.

As diferenças de temperatura obtidas consoante a utilização dos três tipos de aberturas foram observadas em todos os cenários simulados, ocorrendo maiores diferenças de temperatura nos cenários com maiores áreas de incêndio. A representação gráfica de todos os cenários pode ser consultada no Anexo A.

No que ao fluxo de calor por radiação ao nível do piso diz respeito, foram estudados dois parâmetros de saída do programa CFAST: fluxo de calor por radiação do sensor e fluxo de calor por radiação do gás do sensor. O fluxo de calor por radiação corresponde ao fluxo de calor por radiação líquido total para a superfície frontal do sensor. O fluxo de calor por radiação do gás do sensor indica o fluxo de calor por radiação das camadas superior e inferior do gás para a superfície frontal do sensor. A Figura 4.14 mostra a evolução destes parâmetros ao longo do tempo para o caso onde se verificou a grandeza máxima destes parâmetros (3Cat_A36_AbCob_H_IgnViga).

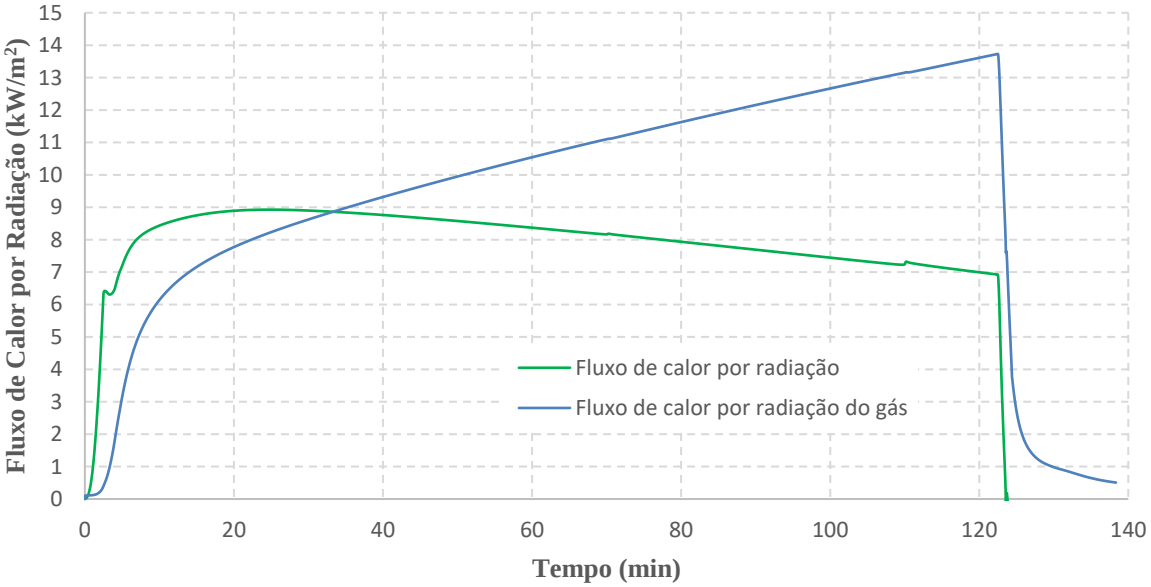



Figura 4.14 - Fluxo de calor por radiação a 1 m de altura do pavimento para o caso 3Cat_A36_AbCob_H_IgnViga

Perante os resultados obtidos mostra-se que é pouco provável a ocorrência de combustão generalizada no compartimento uma vez que a temperatura máxima registada foi de 568.8ºC (cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna) e o fluxo de calor por radiação máximo foi de 13.7 kW/m$^2$ (cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnViga).

Na Figura 4.15 estão representadas as curvas de temperatura obtidas para a camada superior para os cenários simulados correspondentes a 3ª categoria de risco, área de 36 m$^2$, e ignição junto a uma coluna. A tracejado estão representadas as curvas de temperatura obtidas para uma variação da altura do compartimento correspondente a uma altura média de 8.4 m (cenários H+2).

A influência da altura do compartimento é relevante no que à redução da temperatura diz respeito. Este efeito ocorre devido ao arrefecimento dos gases provenientes do incêndio à medida que ascendem. O arrefecimento ocorre em parte devido à mistura dos gases quentes com o ar mais frio e também em parte à transferência de calor por convecção com as paredes. Quanto maior for a altura do compartimento, mais significativo se torna este fenómeno.

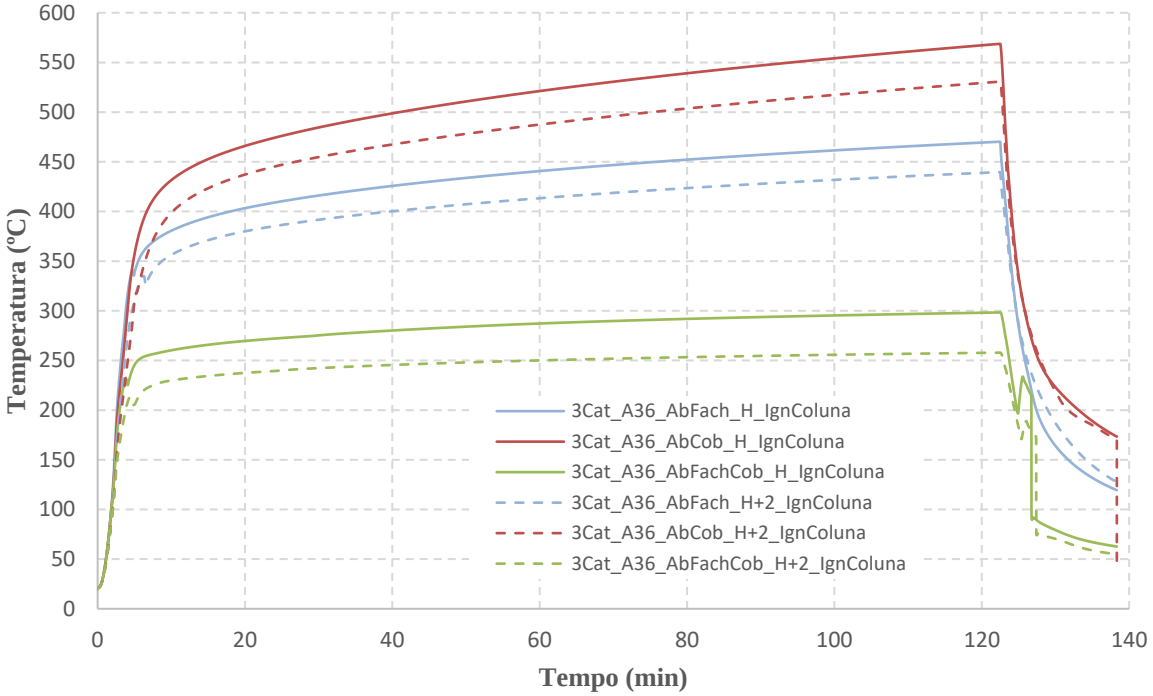



Figura 4.15 - Temperatura da camada superior obtida no CFAST para os três cenários de aberturas e variação da altura do compartimento, com incêndio definido como 3ª categoria de risco, área de 36 $m^2$ e ignição junto a uma coluna

Apesar do aumento da altura do compartimento nos cenários H+2 ser de apenas 2 m (6.4 m para 8.4 m), denota-se uma importante redução da temperatura no compartimento. Mantém-se a ordem crescente de aumento de temperatura nos cenários AbFachCob, AbFach e AbCob, verificando-se quase como uma translação das curvas na fase de desenvolvimento para níveis inferiores de temperatura quando se aumenta a altura do compartimento. A diferença entre a temperatura máxima obtida nos cenários com altura de compartimento de 6.4 m e de 8.4 m não é muito expressiva porque o aumento de altura também não o é. Nos cenários apresentados na Figura 4.15 existe uma redução de 38.0ºC entre os cenários com aberturas na cobertura (3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna e 3Cat_A36_AbCob_H+2_IgnColuna), 30.6ºC entre os cenários com aberturas na fachada (3Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna e 3Cat_A36_AbFach_H+2_IgnColuna) e 40.5ºC entre os cenários com aberturas na fachada e cobertura (3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnColuna e 3Cat_A36_AbFachCob_H+2_IgnColuna). Os cenários apresentados são aqueles em que a diferença explanada é superior. Nos restantes cenários analisados, a média da diferença entre temperaturas máximas obtidas é de cerca de 18.8ºC para os cenários de 2ª categoria de risco e de 22.5ºC para os cenários da 3ª categoria de risco. Verificam-se diferenças mais significativas nos cenários com maior área de incêndio, logo curvas de temperatura mais gravosas: média de 28.6ºC de diferença de temperatura para cenários da 2ª categoria de risco com área de incêndio de 36 $m^2$ e média de 35.5ºC de diferença de temperatura para cenários da 3ª categoria de risco para a mesma área de incêndio.

Como explicado no capítulo 4.2.1, foi definido um sensor para medição de temperatura no eixo da pluma, a uma altura igual à cobertura do compartimento. O parâmetro de saída considerado foi a temperatura do gás próximo do sensor, correspondente à temperatura proveniente do

modelo de pluma utilizado pelo CFAST, com base no modelo de McCaffrey. Os resultados obtidos podem ser consultados na Figura 4.16 e representam os cenários mais desfavoráveis.

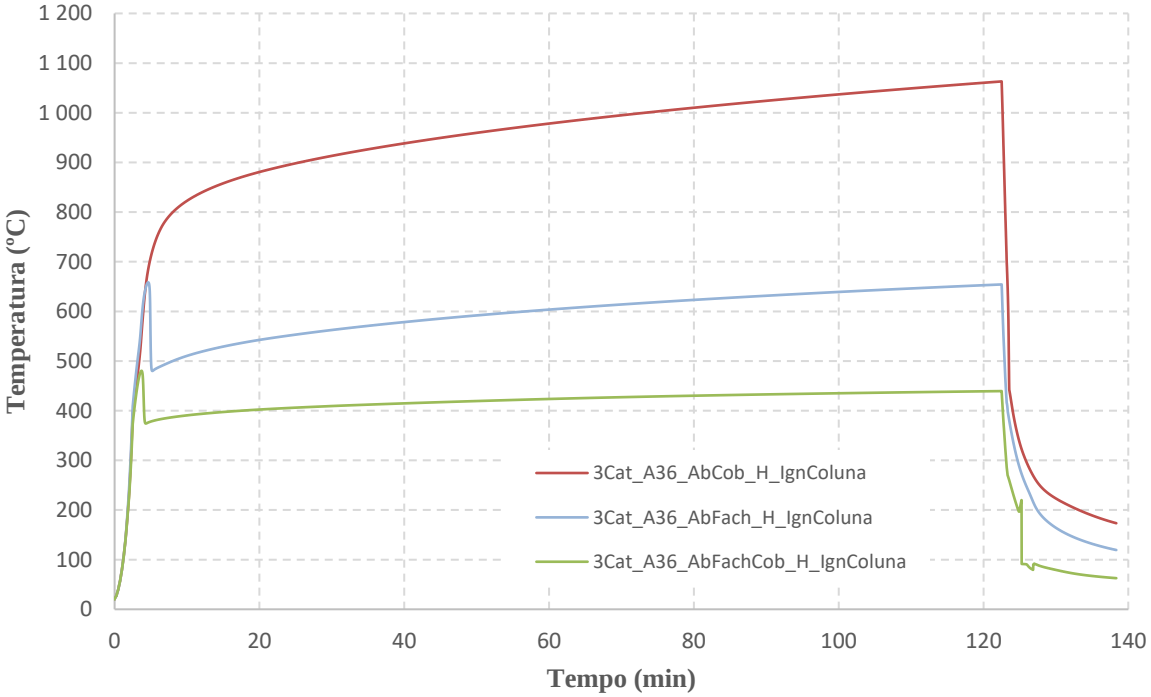



Figura 4.16 - Temperatura do gás próximo do sensor colocado no eixo da pluma para três cenários de aberturas, com incêndio definido como 3ª categoria de risco, área de 36 m$^2$, e ignição junto a uma coluna

As curvas obtidas mostram um aumento de 494.3ºC entre a temperatura máxima da camada superior e a temperatura máxima do sensor, no cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna. No cenário 3Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna a diferença foi de 188.1ºC e no cenário 3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnColuna a diferença obtida foi de 182.0ºC.

O valor de temperatura obtido pelo sensor no cenário 3Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna é sem dúvida muito elevado, refletindo as piores condições de ventilação, diâmetro do incêndio e posição do mesmo no edifício em estudo. Uma temperatura elevada era expectável, pois a pluma eleva-se até uma altura muito próxima do teto do compartimento, como se observa na Figura 4.11. É igualmente expectável que a temperatura obtida por esta via seja muito conservativa e pelo lado da segurança, se considerada no dimensionamento dos elementos estruturais. Tal afirmação baseia-se nos estudos de validação do programa [71], em que se refere que as previsões da temperatura do gás circundante do sensor são mais elevadas do que as medições experimentais. Uma análise mais detalhada da temperatura do gás no eixo da pluma, a uma altura onde se encontram os elementos estruturais, pode ser conseguida através de estudos com o auxílio de modelos de cálculo de dinâmica de fluidos.

## 4.3 Simulação através do programa FDS

*Fire Dynamics Simulator* (FDS) é um programa que se sustenta num modelo de campo baseado na mecânica dos fluidos computacional (CFD). O FDS resolve numericamente as equações de Navier-Stokes apropriadas para baixa velocidade e para fluxos acionados termicamente, com ênfase no transporte de fumo e calor proveniente de incêndios [72]. O programa *Smokeview* [57] é utilizado para visualização de resultados das simulações no FDS.

O poder de computação necessários para realizar todos os cálculos necessários para a maioria dos cenários de incêndio são limitados [73]. As equações são resolvidas numericamente dividindo o espaço físico onde o fogo será simulado num grande número de células retangulares. Dentro de cada célula a velocidade do gás, a temperatura, entre outros, são admitidos como uniformes, variando apenas com o tempo. A precisão com que a dinâmica do fogo pode ser simulada depende do número de células que podem ser utilizadas numa simulação. Esse número de células é limitado pelo poder de computação disponível [74].

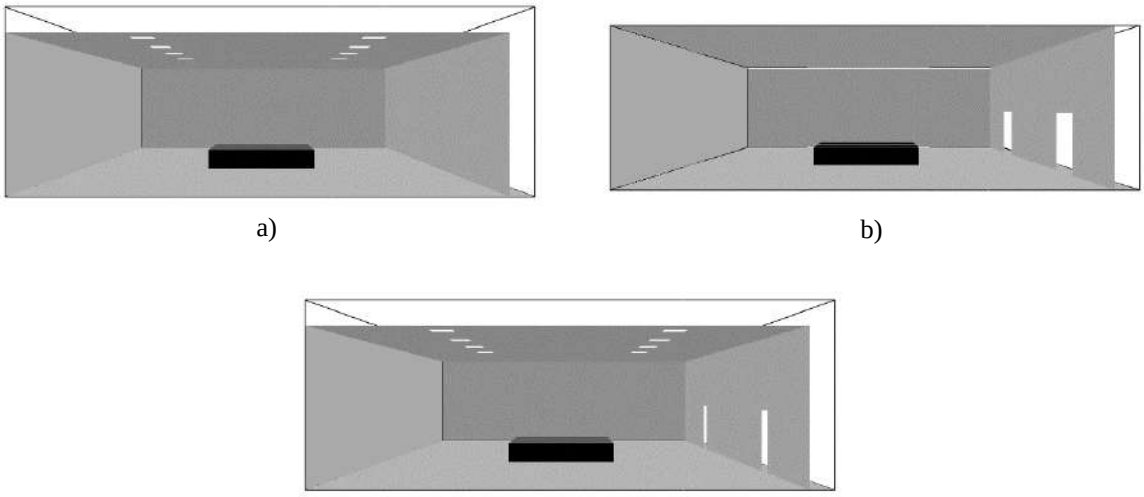
Todos os parâmetros de entrada exigidos pelo FDS para descrever um cenário específico são realizados através de um único arquivo de texto criado pelo utilizador. O arquivo contém informações sobre a malha, geometria, propriedades do material, propriedades da combustão e parâmetros de saída desejados [73].

### 4.3.1 Definição do modelo e parâmetros de entrada

Foram definidos dois materiais, à semelhança do realizado no capítulo 3.5.2 e 4.2.1. Os parâmetros necessários para a correta definição das propriedades dos materiais no FDS são idênticos aos apresentados no Quadro 4.4.

A geometria das aberturas para o exterior foi definida de forma análoga ao explicado no capítulo 4.2.1, seguindo as dimensões apresentadas na Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3. Na Figura 4.17 estão representados os modelos desenvolvidos em FDS para os três cenários de aberturas.

A definição do incêndio foi realizada através de uma função $t^2$, utilizando uma taxa de libertação de calor de acordo com a Figura 4.6, consoante o cenário analisado. A simulação inicia-se a temperatura ambiente. A temperatura do ar é considerada constante com a altura e a densidade e a pressão diminuem com a altura. Esta diminuição não é relevante no caso de estudo, sendo importante em grandes simulações de incêndios exteriores. A fonte de calor foi definida a 1 m de altura por se considerar que é um cenário realista de incêndio.



a) b)

c)

Figura 4.17 - Caso de estudo modelado no FDS: a) aberturas na cobertura (AbCob); b) aberturas na fachada (AbFach); c) aberturas na fachada e cobertura (AbFachCob)

Foram definidos sensores para medição de temperatura e fluxo de calor por radiação. Os sensores com a função de medição de temperatura foram colocados no eixo do incêndio, a uma altura igual à cobertura do compartimento, três sensores colocados em altura a 1 m do pavimento nos cantos do edifício e dois sensores colocados junto a colunas mais próximas do incêndio, a uma altura equivalente ao teto do compartimento. O sensor para medição do fluxo de calor por radiação foi colocado a 1 m de altura. A distribuição dos sensores pode ser consultada em planta na Figura 4.18.

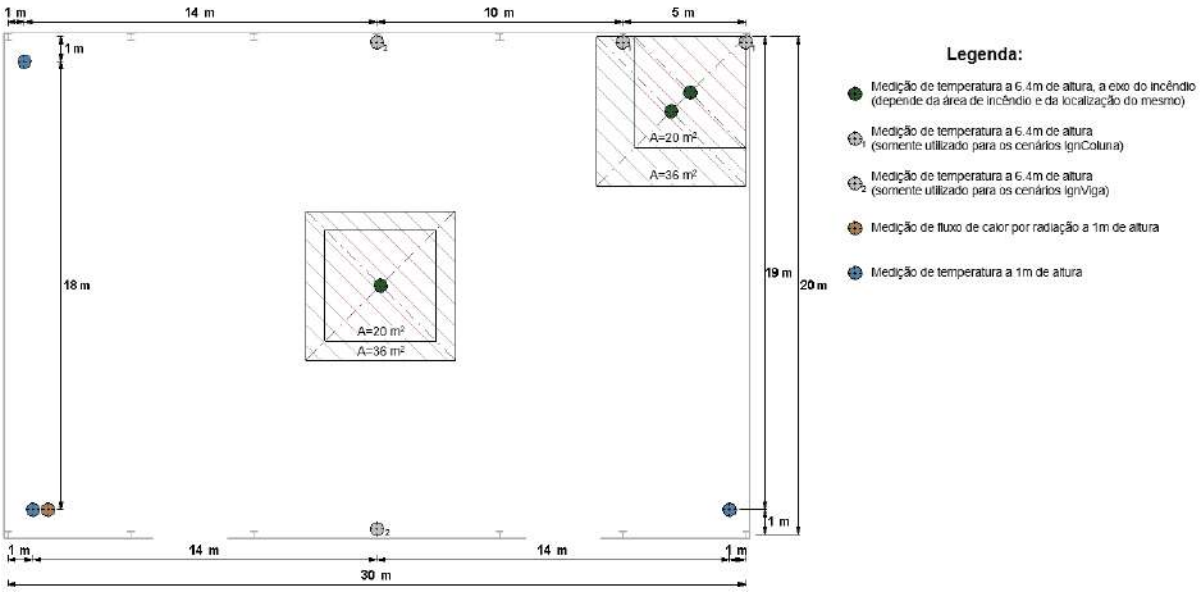



Figura 4.18 - Implantação dos sensores de medição de temperatura e fluxo de calor por radiação no FDS

Os critérios de simulação e convergência utilizados foram os seguintes [72]:

- Critério de rejeição do alinhamento de duas malhas de acordo com a equação (4.1);

$$\left|\frac{\delta_{xc} - n\delta_{xf}}{\delta_{xf}}\right| < 0.001 \quad (4.1)$$

Em que,

$\delta_{xc}$ é a dimensão das células mais esparsas;
$\delta_{xf}$ é a dimensão das células mais apertadas;
$n$ é o rácio entre células apertadas e células esparsas.

- Tolerância no cálculo da componente normal da velocidade na interface entre malhas (ou num limite sólido) igual a $\delta_x/2$ (m/s), em que $\delta_x$ é a dimensão da célula;
- Número máximo de iterações no cálculo da pressão para cada metade do *time step* igual a 10. Em complemento, as iterações no cálculo da pressão serão suspensas se o erro não for inferior a 0.95 do valor anterior;
- Tolerância no cálculo da pressão igual a $20/\delta_x{}^2$ ($s^{-2}$), em que $\delta_x$ é a dimensão da célula;
- Tolerância em unidades de átomos para a verificação da estequiometria da reação igual a $1x10^{-5}$;
- Tolerância para a verificação do balanço de massa da estequiometria da reação igual a $1x10^{-4}$;
- Número de iterações para reações químicas entre 1 e 20;
- Tolerância de $1x10^{-6}$ no cálculo das equações diferenciais ordinárias (ODEs).

### 4.3.2 Análise de sensibilidade de malha

Os resultados fornecidos pelo FDS são altamente dependentes do tamanho das células da malha, sendo por isso o parâmetro numérico mais importante a definir. Reduzir o tamanho da malha não significa automaticamente uma precisão melhorada, aumentando também consideravelmente o tempo de simulação. Em teoria, reduzir o tamanho das células da malha por um fator de 2 reduz o erro de discretização por um fator de 4, aumentado de igual forma o tempo de simulação por um fator de 16. É assim importante encontrar um equilíbrio entre a precisão desejada e manter o tempo de simulação num nível aceitável [75].

Uma avaliação inicial da dimensão das células da malha deve ser realizada através da utilização da expressão não-dimensional $D^*/\delta_x$, em que $\delta_x$ é a dimensão da célula e $D^*$ é o diâmetro característico do fogo. $D^*$ é calculado através da equação (4.2). Os valores recomendáveis para $D^*/\delta_x$ situam-se entre 4 e 16 [72] [74].

$$D^* = \left(\frac{HRR}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}}\right)^{\frac{2}{5}} \quad (4.2)$$

Em que,

- $HRR$ é a taxa de libertação de calor do incêndio (kW);
- $\rho_\infty$ é a densidade do ar, admitida como 1.204 kg/m$^3$;
- $c_p$ é o calor específico do ar, admitido como 1.005 kJ/kg K;
- $T_\infty$ é a temperatura ambiente, admitida como 293 K;
- $g$ é a aceleração da gravidade (m/s$^2$)

Para um HRR de 9 MW, obtém-se um $D^*$ de 2.3, o que resulta em células entre 0.58 m e 0.14 m. Como os valores recomendados são apenas valores-guia, uma análise de sensibilidade da malha foi realizada para três simulações para tamanhos de células da malha de 0.50 m (32760 células), 0.25 m (262080 células) e uma variação de malha mais concentrada na zona circundante ao incêndio e mais esparsa numa zona mais afastada do incêndio. Esta última malha resultou em tamanhos de células de 0.25 m x 0.25 m x 0.125 m e 0.50 m x 0.50 m x 0.125 m nas zonas mais próximas do foco de incêndio e 0.50 m x 0.50 m x 0.25 m e 0.50 m x 0.50 m x 0.50 m nas zonas mais afastadas do foco de incêndio (68965 células).

A análise de sensibilidade de malha foi realizada num cenário equivalente ao cenário 3Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna, com a alteração do tempo de simulação para 4095 s. As malhas utilizadas estão representadas na Figura 4.19, Figura 4.20 e Figura 4.21.

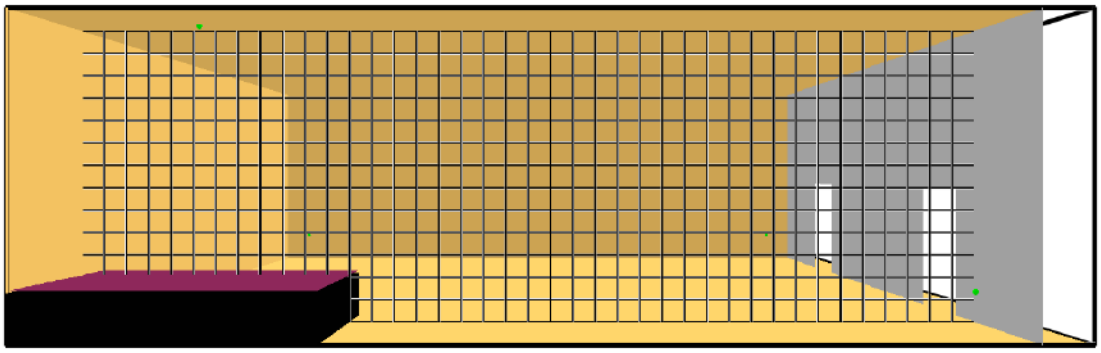


Figura 4.19 - Malha definida para análise de sensibilidade de malha com dimensões 0.50 m x 0.50 m x 0.50 m (32 760 células)

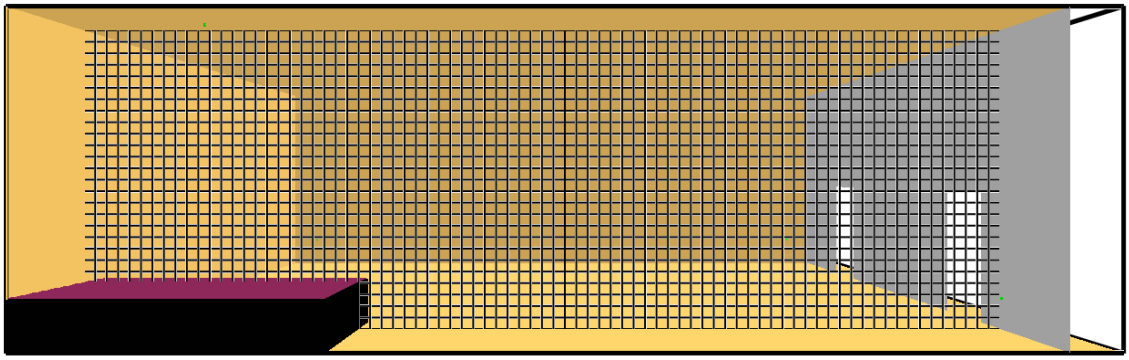


Figura 4.20 - Malha definida para análise de sensibilidade de malha com dimensões 0.25 m x 0.25 m x 0.25 m (262 080 células)

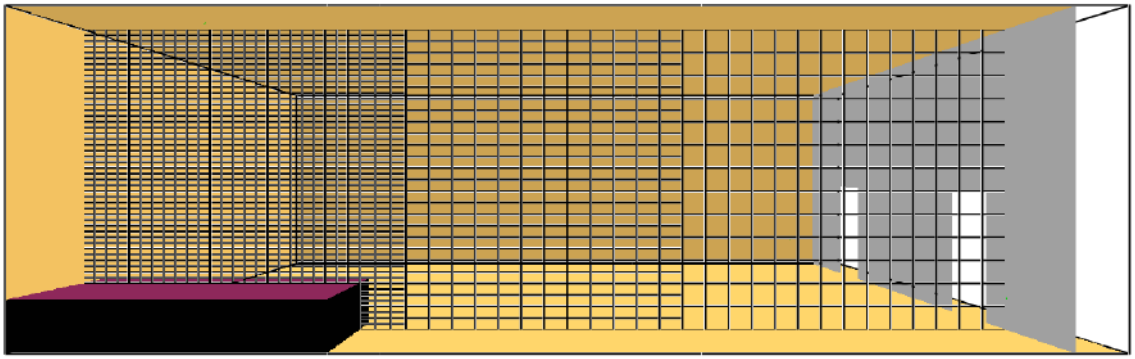


Figura 4.21 - Malha definida para análise de sensibilidade de malha com dimensões 0.50 m a 0.125 m (68 965 células)

O tempo de cálculo necessário de cálculo da malha 0.50 m x 0.50 m x 0.50 m representada na Figura 4.19 foi de 3.8 horas. O tempo de execução do FDS foi superior na malha 0.25 m x 0.25 m x 0.25 m (Figura 4.20), sendo necessário 44.3 horas de simulação. Para o cálculo da malha de dimensões 0.50 m a 0.125 m (Figura 4.21), foram necessárias 28.6 horas.

A curva de temperatura obtida no sensor no eixo do incêndio, a uma altura igual à cobertura do compartimento, encontra-se representada na Figura 4.22. O fluxo de calor por radiação obtido nas análises das malhas em estudo pode ser consultado na Figura 4.23.

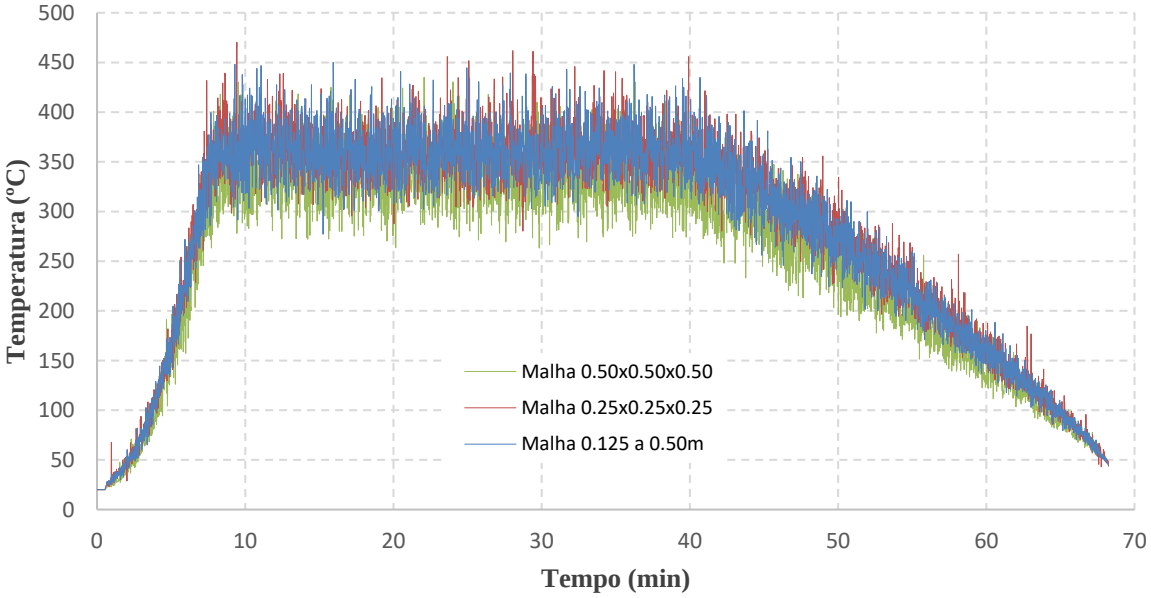



Figura 4.22 - Curvas de temperatura obtidas no eixo da pluma junto ao teto do compartimento, para as três malhas em estudo na análise de sensibilidade de malha

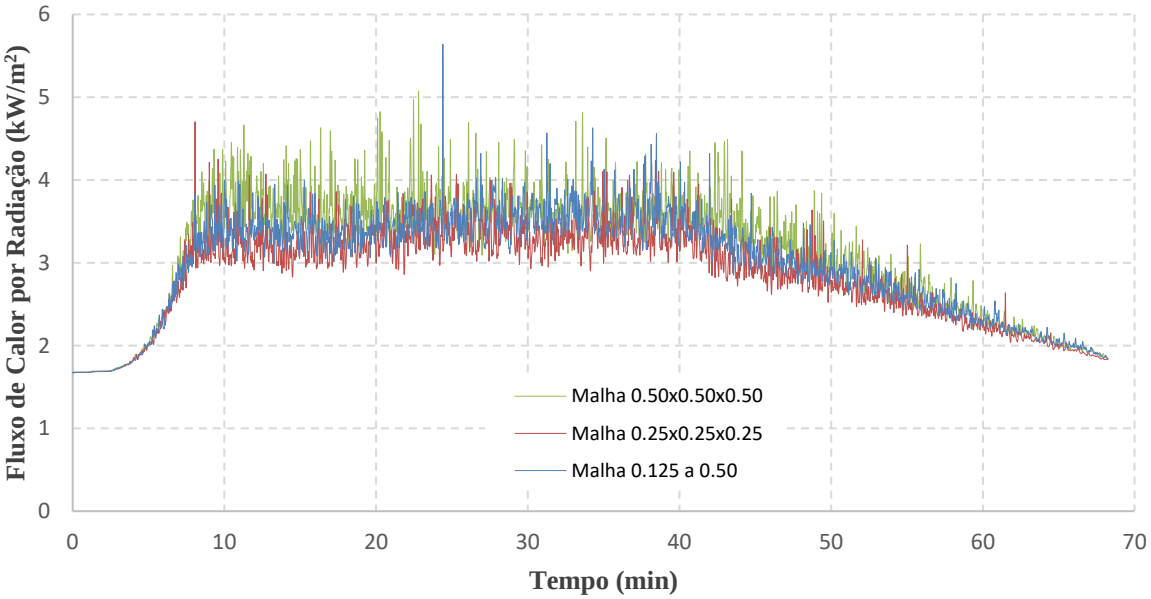



Figura 4.23 – Fluxo de calor por radiação obtido para as três malhas em estudo na análise de sensibilidade de malha

A diferença entre as malhas 0.25 m x 0.25 m x 0.25 m e 0.125 m a 0.50 m não é significativa, o que significa que a redução do tamanho das células não provoca necessariamente um aumento considerável de precisão, para cenários de incêndios definidos por uma taxa de libertação de

calor. Os resultados da malha mais esparsa (células com dimensão 0.50 m x 0.50 m x 0.50 m) são bastante estáveis, comparativamente com os resultados das malhas mais apertadas, apresentando, porém, algumas oscilações. Os valores médios obtidos para a temperatura são muito similares para as malhas mais apertadas, registando-se uma temperatura média de 279ºC e 277ºC para as malhas 0.25 m x 0.25 m x 0.25 m e 0.125 m a 0.50 m, respetivamente. A média de temperatura registada para a malha 0.50 m x 0.50 m x 0.50 m foi de 255.4ºC. A mesma dispersão de resultados ocorre na medição do fluxo de calor por radiação nas várias malhas estudadas, existindo assim uma correspondência mais próxima entre malhas mais apertadas.

De salientar que os resultados obtidos são estáveis, verificando-se ligeiras diferenças associadas a uma malha mais esparsa. Entende-se por isso, que perante os resultados obtidos os resultados da malha mais esparsa (0.50 m x 0.50 m x 0.50 m) não permitem um aumento de precisão tão significativo do que a malha 0.125 m a 0.50 m, quando comparado com a malha mais apertada e com o maior número de células (0.25 m x 0.25 m x 0.25 m).

O tempo de cálculo pesa substancialmente na tomada de decisão da escolha da malha que melhor se ajusta ao caso de estudo. A convergência de resultados entre a malha 0.25 m x 0.25 m x 0.25 m e 0.125 m a 0.50 m é significativa, verificando-se uma redução importante do tempo de computação na malha 0.125 m a 0.50 m (de 44.3 horas para 28.6 horas). Uma vez que a diferença de precisão não justifica a utilização da malha mais apertada, a malha 0.125 m a 0.50 m foi utilizada para as restantes simulações nesta dissertação.

### 4.3.3 Resultados

Devido às limitações no tempo necessário para a simulação no programa FDS, apenas foram simulados 12 cenários, que correspondem às combinações mais desfavoráveis de área de incêndio (36 $m^2$ e 20 $m^2$). A simulação dos cenários ocorreu em computadores com capacidades computacionais distintas. O tempo mínimo de simulação foi de 52 h e o máximo de 149 h.

Tal como observado no capítulo anterior, os resultados obtidos no FDS apresentam oscilações consideráveis. Considerar a temperatura máxima obtida para o dimensionamento ao fogo dos elementos estruturais é extremamente conservativo e irrealista. Por essa razão, foram consideradas duas abordagens para se obter a temperatura máxima de dimensionamento: através do cálculo da média e do quantilho 80% da temperatura atingida no patamar da fase de desenvolvimento do incêndio. Apresentam-se os valores calculados através da média com a função de comparação e de análise de sensibilidade de resultados.

Os cenários simulados estão enumerados no Quadro 4.7, apresentando-se igualmente os valores de temperatura obtidos e a sua comparação com os valores da camada superior obtidos no programa CFAST.

Quadro 4.7 - Temperatura obtida no programa FDS e comparação com resultados obtidos no programa CFAST

| Cenário | FDS | | CFAST | Rácio |
|---|---|---|---|---|
| | Temp. Média (ºC) | Temp. Quantilho 80% (ºC) | Temp. Máxima (ºC) | CFAST/ $FDS_{Q80\%}$ |
| 3Cat_A20_AbCob_H_IgnColuna | 273.1 | 343.7 | 352.0 | 1.02 |
| 3Cat_A20_AbCob_H_IgnViga | 248.0 | 310.3 | 346.7 | 1.12 |
| 3Cat_A20_AbFach_H_IgnColuna | 344.0 | 366.0 | 290.2 | 0.79 |
| 3Cat_A20_AbFach_H_IgnViga | 351.0 | 381.3 | 277.6 | 0.73 |
| 3Cat_A20_AbFachCob_H_IgnColuna | 277.4 | 299.4 | 199.4 | 0.67 |
| 3Cat_A20_AbFachCob_H_IgnViga | 261.3 | 286.3 | 191.2 | 0.67 |
| 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna | 233.0 | 294.6 | 568.8 | 1.93 |
| 3Cat_A36_AbCob_H_IgnViga | 251.7 | 312.5 | 566.0 | 1.81 |
| 3Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna | 362.2 | 383.6 | 470.3 | 1.23 |
| 3Cat_A36_AbFach_H_IgnViga | 523.3 | 564.2 | 448.9 | 0.80 |
| 3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnColuna | 312.2 | 332.8 | 298.4 | 0.90 |
| 3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnViga | 384.4 | 415.3 | 286.0 | 0.69 |

Com a exceção dos resultados obtidos para os cenários com aberturas apenas na cobertura (AbCob) que serão analisados separadamente, denota-se uma razoável correlação de resultados entre a temperatura obtida no FDS para o quantilho 80% e a temperatura da camada superior obtida no CFAST. A curva de temperatura da camada superior obtida no CFAST é inferior à curva obtida pelo FDS, com exceção do cenário 3Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna, em que se observa uma correspondência similar. As curvas de temperatura de todos os casos simulados podem ser consultadas no Anexo B.

Pode-se observar, à semelhança dos resultados obtidos para o CFAST, que a combinação de aberturas na cobertura e fachada (AbFachCob) provoca uma redução importante da temperatura, devido à entrada de ar frio junto ao pavimento e saída de gases quentes pela cobertura, como anteriormente explicado.

Na Figura 4.24 está representada a curva de temperatura obtida nos dois programas para o cenário 3Cat_A36_AbFach_H_IgnViga, mostrando-se também os valores calculados para a média e quantilho 80%. É ainda apresentada uma simulação realizada no programa CFAST com uma ignição a 1 m do pavimento, de forma a recriar mais fielmente as condições admitidas para as simulações no programa FDS e comparar com as condições admitidas nas simulações anteriormente apresentadas no programa CFAST.

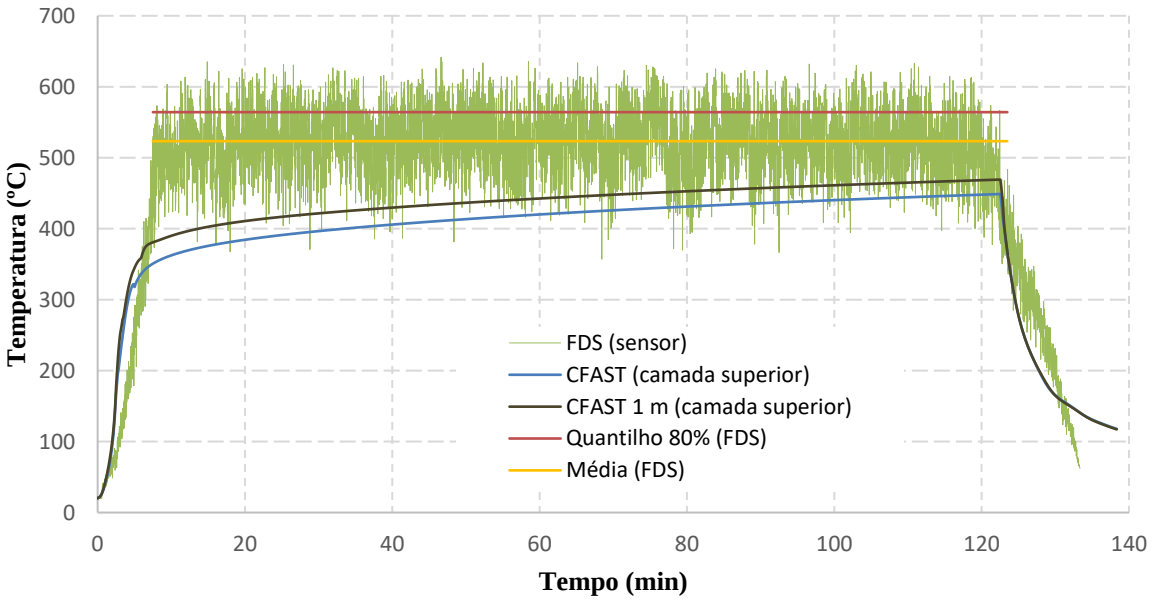



Figura 4.24 - Temperatura obtida no sensor colocado no eixo do incêndio a altura do compartimento para o cenário 3Cat_A36_AbFach_H_IgnViga, com representação dos valores calculados para a média e quantilho 80% da fase de desenvolvimento do incêndio

No Quadro 4.8 encontram-se os valores de fluxo de calor por radiação obtidos e a sua comparação com os valores obtidos no programa CFAST. À semelhança do apresentado no Quadro 4.7, são calculadas a média e quantilho 80% para os valores obtidos pelo FDS.

Quadro 4.8 – Fluxo de calor por radiação obtido no programa FDS e comparação com resultados obtidos no programa CFAST

| Cenário | FDS | | CFAST |
|---|---|---|---|
| | Fluxo de calor por radiação médio (kW/m$^2$) | Fluxo de calor por radiação quantilho 80% (kW/m$^2$) | Fluxo de calor por radiação máximo (kW/m$^2$) |
| 3Cat_A20_AbCob_H_IgnColuna | 3.5 | 4.0 | 4.9 |
| 3Cat_A20_AbCob_H_IgnViga | 5.1 | 5.8 | 4.5 |
| 3Cat_A20_AbFach_H_IgnColuna | 2.9 | 3.2 | 5.1 |
| 3Cat_A20_AbFach_H_IgnViga | 3.6 | 3.9 | 4.7 |
| 3Cat_A20_AbFachCob_H_IgnColuna | 2.0 | 2.0 | 4.9 |
| 3Cat_A20_AbFachCob_H_IgnViga | 2.1 | 2.1 | 4.6 |
| 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna | 5.0 | 5.9 | 13.6 |
| 3Cat_A36_AbCob_H_IgnViga | 5.0 | 5.8 | 13.7 |
| 3Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna | 4.2 | 4.7 | 9.4 |
| 3Cat_A36_AbFach_H_IgnViga | 5.3 | 6.1 | 8.3 |
| 3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnColuna | 2.4 | 2.5 | 7.9 |
| 3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnViga | 2.6 | 2.8 | 7.8 |

Examinando os resultados apresentados no Quadro 4.8, verifica-se que à exceção de um cenário com aberturas na cobertura que será fruto de uma análise independente, o programa CFAST sobrestima os valores do fluxo de calor por radiação, quando comparado com os resultados obtidos no FDS.

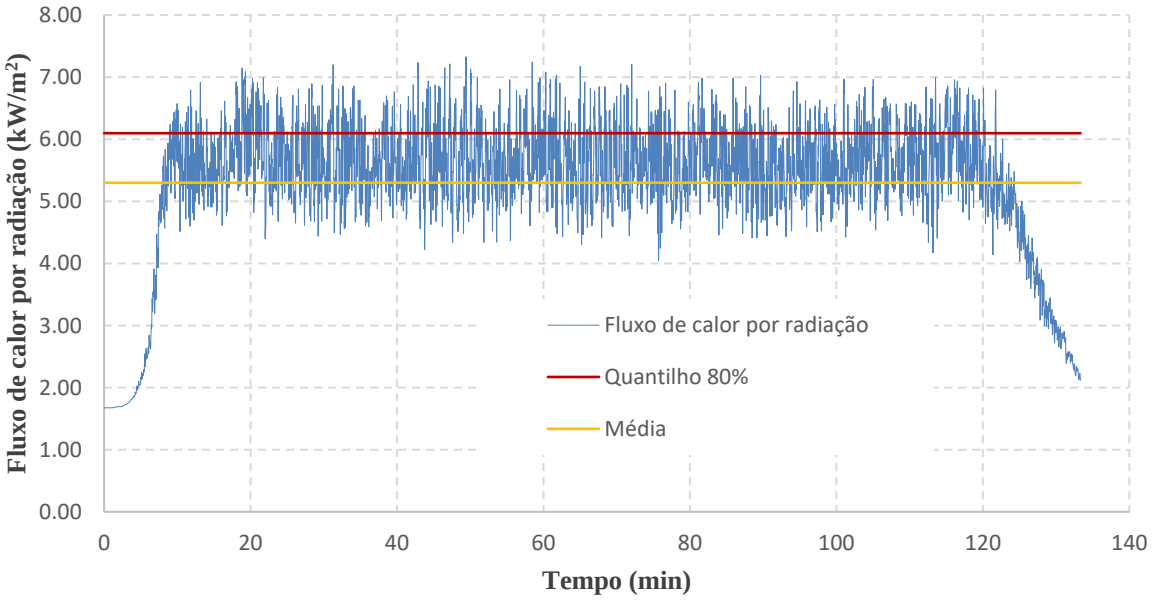



Figura 4.25 – Fluxo de calor por radiação obtido para o cenário 3Cat_A36_AbFach_H_IgnViga no FDS, com representação dos valores calculados para a média e quantilho 80%

De destacar que todos os valores, obtidos no CFAST e FDS, são abaixo de 15 kW/m$^2$, valor limite admitido que pode ser indicador de uma combustão generalizada do compartimento. Perante os resultados obtidos mostra-se que é pouco provável a ocorrência de combustão generalizada no compartimento. Considerou-se que os picos de temperatura acima dos 600ºC presentes nos cenários 3Cat_A20_AbCob_H_IgnViga e 3Cat_A36_AbCob_H_IgnViga surgem durante poucos segundos e são fruto das grandes oscilações de resultados observados, ignorando-se por essas razões a sua contribuição para averiguação de combustão generalizada no compartimento.

Na Figura 4.26 representa-se o mapa de temperaturas obtido através de um corte no eixo da pluma para o cenário 3Cat_A36_AbFach_H_IgnViga. Mostram-se três instantes do incêndio, comparando-se o mapa de temperaturas obtido com a densidade de fumo no mesmo instante. Quando se atinge os 800 s (13 min) o fumo abrange a totalidade do compartimento. Na Figura 4.27 mostra-se igualmente o mapa de temperaturas ao eixo da pluma para o cenário 3Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna, onde se observa igualmente que cerca dos 800 s o fumo envolve a totalidade do compartimento. A grande diferença entre os dois casos apresentados reside na regularidade da combustão observada quando se simulam os cenários com ignição junto a uma viga (IgnViga) e não regularidade da combustão para os cenários com ignição junto a uma coluna (IgnColuna). Nos casos com ignição junto a uma coluna (IgnColuna), observou-se que as chamas tendem a deslocar-se para o canto do edifício em ciclos irregulares. Este efeito de canto é mais pronunciado com o aumento da área de incêndio de 20 m$^2$ para 36 m$^2$, levando a que a temperatura em torno da pluma seja medida de forma mais difusa, comparativamente

com o observado numa ignição junto a uma viga, onde a pluma surge mais simétrica e controlada. Este fenómeno explica a diferença de temperaturas obtidas entre os casos de área de incêndio de 36 $m^2$ com ignições em locais diferentes, contrariando as curvas de temperaturas obtidas no CFAST. Verifica-se paralelamente que a camada de ar quente não é uniforme.

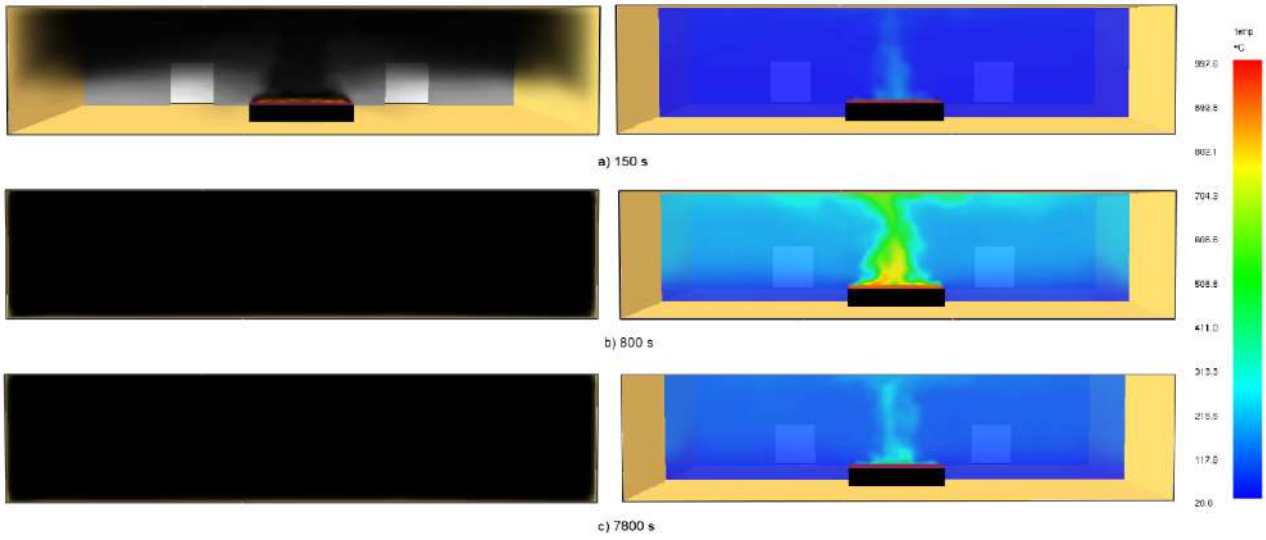



Figura 4.26 - Mapa de temperaturas obtidas e fumo gerado no programa FDS para o caso 3Cat_A36_AbFach_H_IgnViga

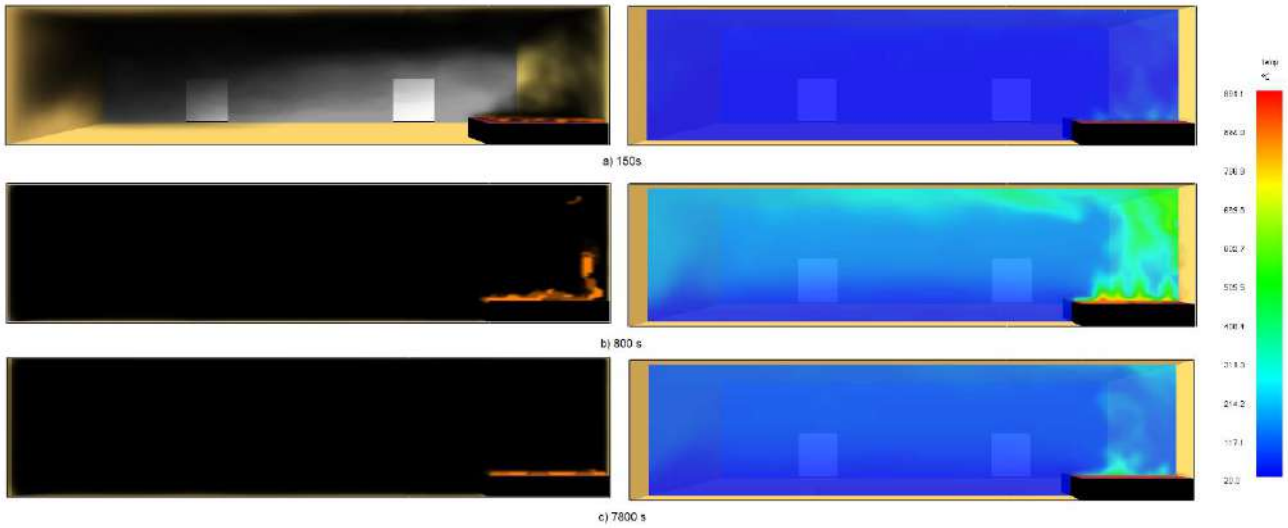



Figura 4.27 - Mapa de temperaturas obtidas e fumo gerado no programa FDS para o caso 3Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna

Perante o exposto, fica clara a pertinência de analisar a temperatura medida nos sensores colocados junto às colunas (Figura 4.18) para os cenários com ignição junto a uma coluna (IgnColuna). Assim, a temperatura a considerar deverá ser a mais desfavorável que resulta de

uma análise do sensor colocado no eixo do incêndio e dos sensores colocados na cota de topo das colunas, clarificando assim a temperatura máxima registada nas proximidades do foco de incêndio. No Quadro 4.9 estão registadas as medições efetuadas nos sensores para os cenários simulados.

Quadro 4.9 - Temperatura obtida no programa FDS para os sensores no eixo do incêndio e nas colunas mais próximos do incêndio (valores máximos para cada cenário sublinhados)

| Cenário | Sensor no eixo do incêndio | | Sensores nas colunas | |
|---|---|---|---|---|
| | Temp. Média (ºC) | Temp. Quantilho 80% (ºC) | Temp. Média (ºC) | Temp. Quantilho 80% (ºC) |
| 3Cat_A20_AbCob_H_IgnColuna | 273.1 | <u>343.7</u> | 235.9 | 299.9 |
| 3Cat_A20_AbCob_H_IgnViga | 248.0 | <u>310.3</u> | 174.6 | 199.8 |
| 3Cat_A20_AbFach_H_IgnColuna | 344.0 | 366.0 | 358.1 | <u>392.4</u> |
| 3Cat_A20_AbFach_H_IgnViga | 351.0 | <u>381.3</u> | 172.7 | 178.7 |
| 3Cat_A20_AbFachCob_H_IgnColuna | 277.4 | <u>299.4</u> | 251.5 | 291.3 |
| 3Cat_A20_AbFachCob_H_IgnViga | 261.3 | <u>286.3</u> | 133.9 | 139.3 |
| 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna | 233.0 | <u>294.6</u> | 204.0 | 250.3 |
| 3Cat_A36_AbCob_H_IgnViga | 251.7 | <u>312.5</u> | 176.4 | 203.7 |
| 3Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna | 362.2 | 383.6 | 404.1 | <u>424.1</u> |
| 3Cat_A36_AbFach_H_IgnViga | 523.3 | <u>564.2</u> | 235.7 | 245.0 |
| 3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnColuna | 312.2 | 332.8 | 345.3 | <u>385.2</u> |
| 3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnViga | 384.4 | <u>415.3</u> | 187.7 | 196.1 |

Como esperado, para os cenários com ignição junto a uma viga (IgnViga), as temperaturas registadas junto às colunas são inferiores às temperaturas registadas no eixo do incêndio. Tal deve-se à proximidade do incêndio do sensor colocado a seu eixo, em contraste com os sensores das colunas mais próximas, que se encontram a 10 m do foco de incêndio, logo mais distantes das temperaturas mais elevadas. A análise mais relevante no quadro anterior reside nos cenários com ignição junto a uma coluna (IgnColuna), pois, com exceção dos casos com aberturas na cobertura, observa-se uma medição de temperatura superior nos sensores nas colunas do que o sensor colocado no eixo do incêndio. A exceção reside no cenário 3Cat_A20_AbFachCob_H_IgnColuna, mas com uma diferença ténue (cerca de 8ºC para o quantilho 80%). Devem, por isso, ser tidas em conta as medições de temperatura junto às colunas nos casos em que tal seja relevante, para se ter em conta o fenómeno explicado anteriormente de afastamento das chamas do eixo do foco de ignição.

Os resultados mais invulgares foram os obtidos para os cenários com aberturas apenas na cobertura. Tomando como exemplo o cenário 3Cat_A20_AbCob_H_IgnColuna, apresenta-se na Figura 4.28 a curva de temperatura obtida para o sensor colocado no eixo do foco de incêndio e a respetiva curva de temperatura da camada superior obtida no CFAST para o mesmo cenário.

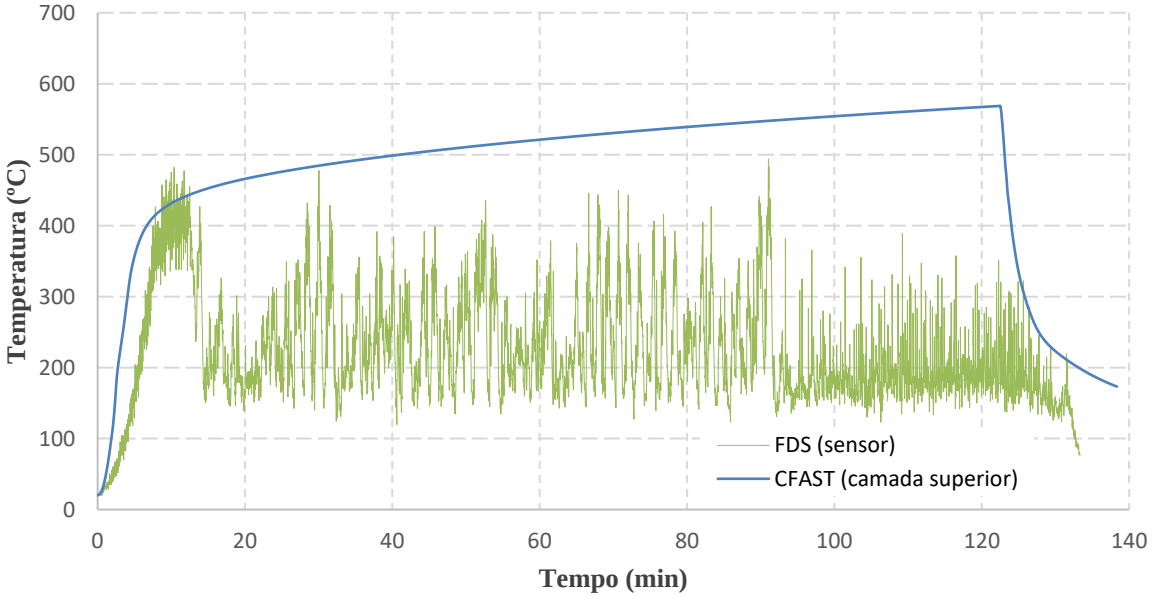



Figura 4.28 - Temperatura obtida no FDS para o sensor colocado no eixo do incêndio a altura do compartimento para o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna e temperatura da camada superior obtida no CFAST

A Figura 4.28 revela oscilações invulgares na simulação em FDS para a temperatura medida no sensor. A trajetória comum a todos os outros cenários de aberturas simulados é interrompida a partir de cerca dos 800 s (13 min), verificando-se um andamento instável e valores de temperatura inferiores. O mesmo acontece para as curvas de temperatura obtidas para os sensores colocados a 1 m do pavimento e para o sensor de medição de fluxo de calor por radiação. Da mesma forma, a curva da taxa de libertação de calor apresenta oscilações a partir de sensivelmente o mesmo instante, como se mostra na Figura 4.29.

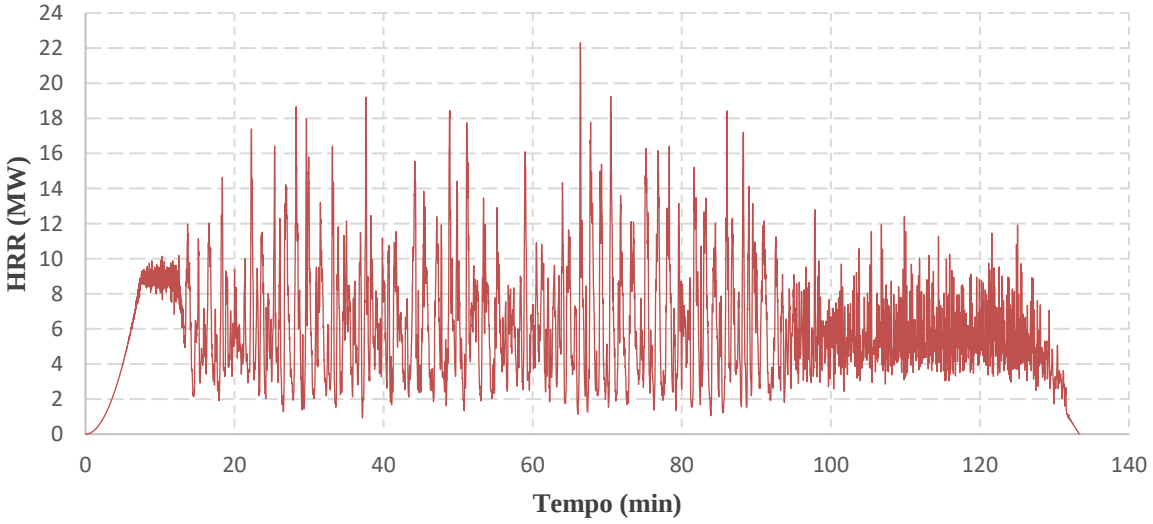



Figura 4.29 - Taxa de libertação de calor obtida no FDS para o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna

Para auxiliar a compreensão do fenómeno reportado, foram retirados do FDS vetores de velocidade para vários instantes. Na Figura 4.30 encontram-se representados os vetores de velocidade para o instante 760 s. A situação representada mostra chamas visíveis e uma combustão a decorrer normalmente e oxigénio a ser consumido gradualmente, com os gases quentes do compartimento a serem retirados pelas aberturas na cobertura. A situação representada é constante até cerca dos 800 s.

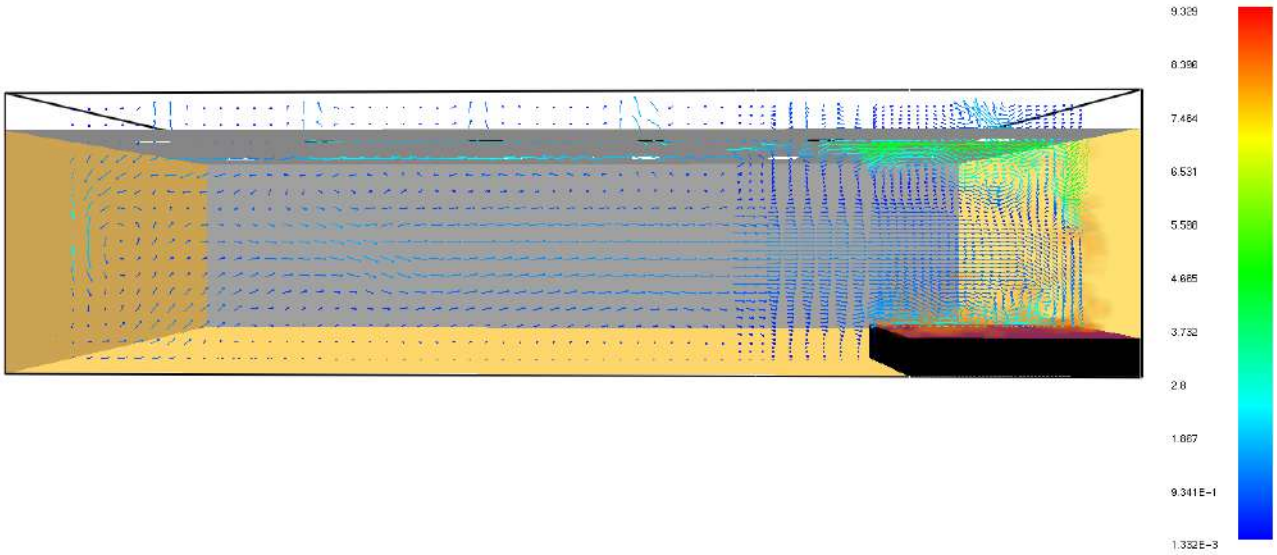



Figura 4.30 - Vetores de velocidade obtidos num plano no eixo das aberturas da cobertura para o instante 760 s no cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna (valores em m/s)

A partir de cerca dos 800 s, a chama deixa de ser visível e inicia-se a entrada de ar no compartimento a partir das aberturas localizadas na cobertura, como se indica na Figura 4.31. O ar exterior, por ser mais frio e mais denso, desloca-se para a zona inferior do compartimento.

Nos instantes seguintes à entrada de algum ar exterior e, consequentemente oxigénio, consegue-se observar chamas fora do local inicial de combustão (Figura 4.32), perto do local onde existe agora ar exterior rico em oxigénio. Vislumbram-se assim pequenas ignições onde as condições para uma combustão são mais favoráveis.

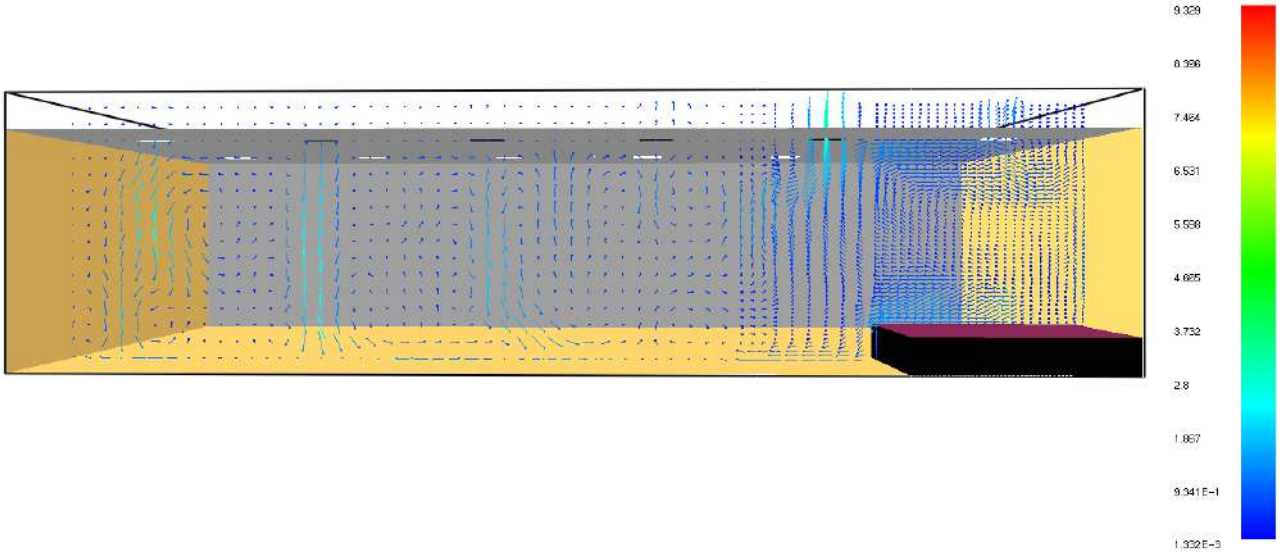



Figura 4.31 - Vetores de velocidade obtidos num plano no eixo das aberturas da cobertura para o instante 877 s no cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna (valores em m/s)

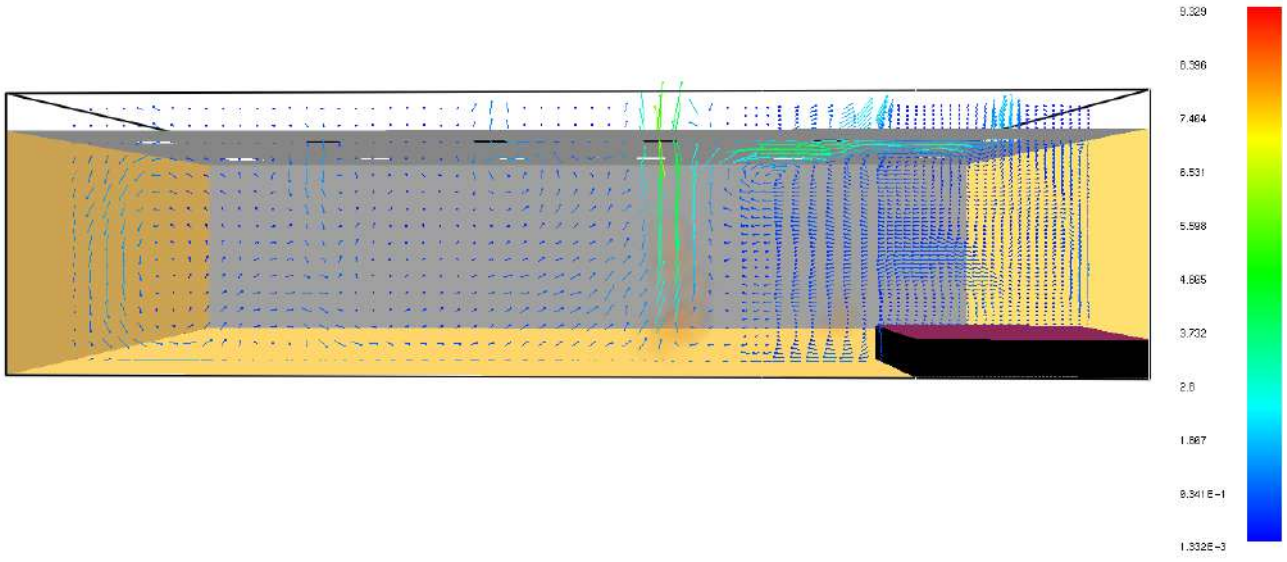



Figura 4.32 - Vetores de velocidade obtidos num plano no eixo das aberturas da cobertura para o instante 884 s no cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna (valores em m/s)

O ciclo descrito anteriormente repete-se, com a admissão e consumo de oxigénio, mantendo-se uma temperatura relativamente elevada no compartimento, apesar de não se observar uma chama ativa decorrente de uma combustão constante.

Observa-se por vezes a emissão de chamas pelas aberturas na cobertura a grande velocidade, conforme indicado na Figura 4.33. Tal fenómeno pode ser explicado pela diminuição da oferta de oxigénio devido à fraca ventilação do espaço. Os gases acumulados da combustão mantêm-se a temperaturas elevadas e, se forem oxigenados através da entrada de ar pelas aberturas, podem produzir uma deflagração repentina que expele as chamas a grande velocidade para o exterior (*backdraft*).

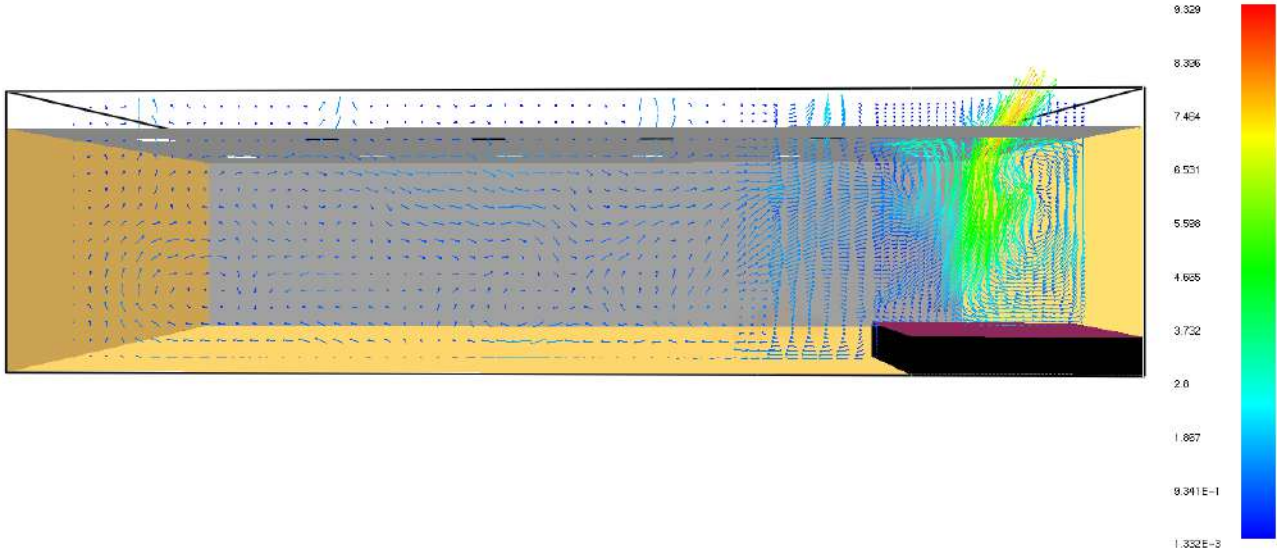



Figura 4.33 - Vetores de velocidade obtidos num plano no eixo das aberturas da cobertura para o instante 1556 s no cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna (valores em m/s)

Este fenómeno, único dos cenários simulados em FDS para aberturas na cobertura (AbCob), indica que a área de aberturas considerada não é suficiente para a correta oxigenação do compartimento, levando a oscilações nas curvas de temperatura obtidas. Por essa razão averiguou-se qual a área necessária para que os fenómenos explicados não se verifiquem. Realizaram-se simulações em FDS e CFAST onde se aumentou a área das aberturas na cobertura. Com a área de 2.25 $m^2$ por cada claraboia, em vez de 1.50 $m^2$, verificou-se que as oscilações reportadas terminavam. Simulou-se paralelamente um caso em que se manteve as aberturas na cobertura iniciais, abrindo-se uma abertura no centro da fachada oposta ao local de ignição ao nível do pavimento, permitindo a entrada de ar frio exterior com maior facilidade. A abertura obtida que não permite a oscilação de resultados tem as dimensões 1.5 m x 1.5 m (2.25 $m^2$). As curvas de temperatura obtidas encontram-se representadas na Figura 4.34 para o cenário com aberturas na cobertura de 2.25 $m^2$ por cada claraboia (designado 3Cat_A36_AbCob2.25_H_IgnColuna). Para o cenário com a manutenção da área inicial de aberturas na cobertura e uma pequena abertura na fachada (cenário designado por 3Cat_A36_AbFachCob2.25_H_IgnColuna), os resultados podem ser consultados na Figura 4.35.

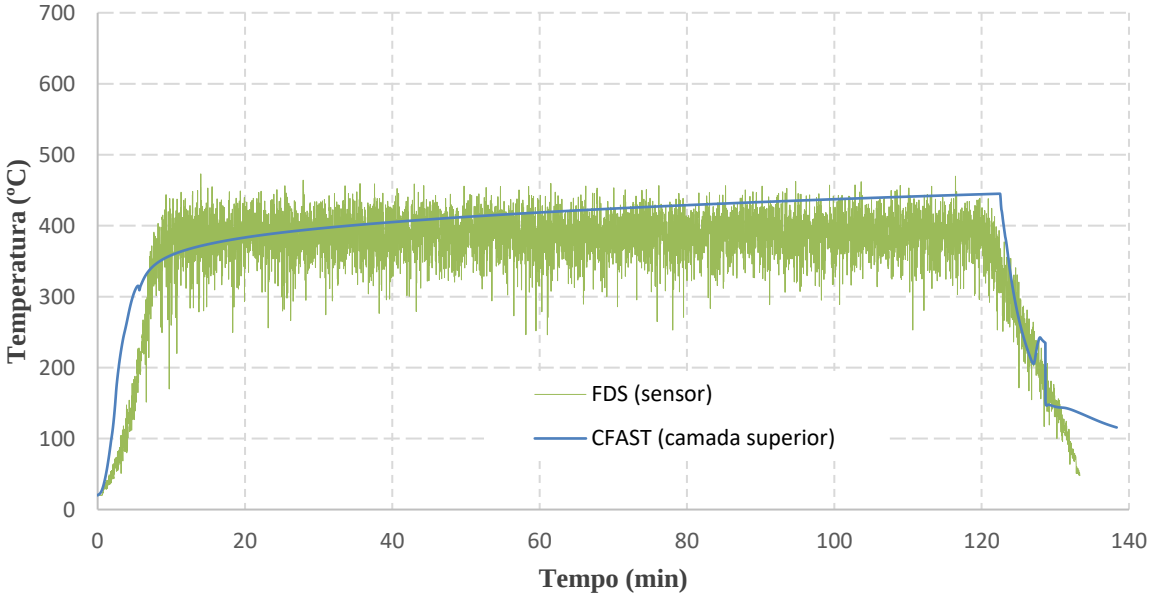



Figura 4.34 - Temperatura obtida no FDS para o sensor colocado junto às colunas para o cenário 3Cat_A36_AbCob2.25_H_IgnColuna e temperatura da camada superior obtida no CFAST para o mesmo cenário

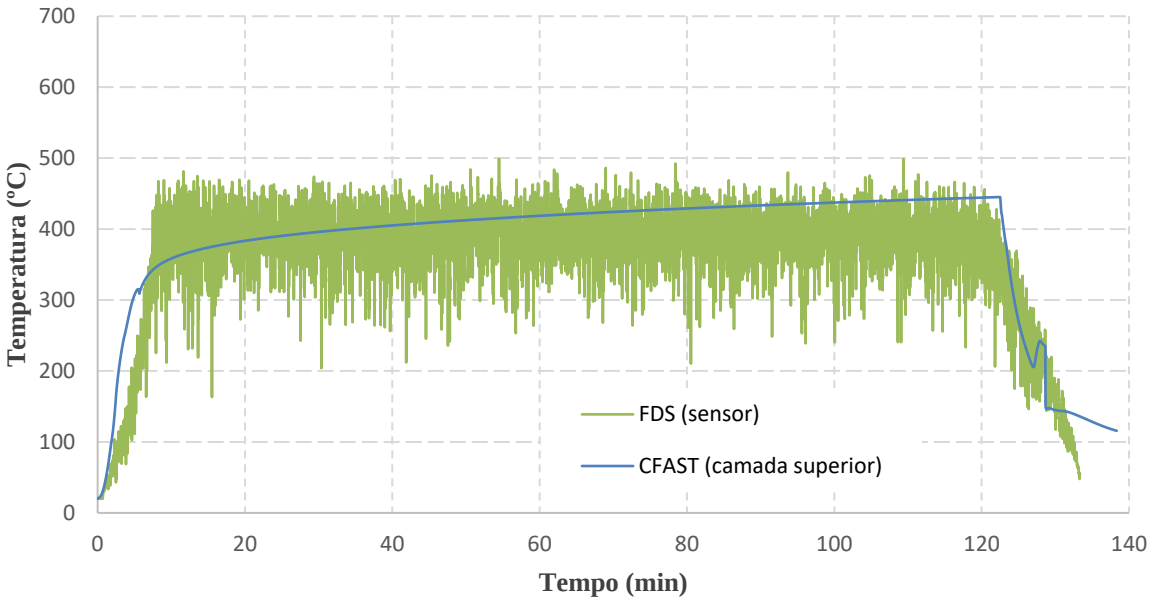



Figura 4.35 - Temperatura obtida no FDS para o sensor colocado junto às colunas para o cenário 3Cat_A36_AbFachCob2.25_H_IgnColuna e temperatura da camada superior obtida no CFAST para o mesmo cenário

A temperatura máxima do quantilho 80% obtida para o cenário com 12 aberturas de 2.25 $m^2$ na cobertura (3Cat_A36_AbCob2.25_H_IgnColuna) foi de 412.2ºC, obtendo-se a temperatura máxima da camada superior no CFAST de 445.0ºC para o mesmo cenário.

A temperatura máxima do quantilho 80% obtida para o cenário com a nova abertura na fachada de 2.25 $m^2$ (3Cat_A36_AbFachCob2.25_H_IgnColuna) foi de 421.6ºC, obtendo-se a temperatura máxima da camada superior no CFAST de 445.1ºC para o mesmo cenário.

Para os dois cenários simulados, a correspondência entre a temperatura mais desfavorável registada nos sensores em FDS obteve uma boa correlação com os valores obtidos para a camada superior do CFAST. Nos dois cenários, os resultados provenientes do CFAST foram bastante idênticos, devido sobretudo aos valores muito próximos de área de ventilação do compartimento. Os resultados obtidos em FDS foram próximos, com uma diferença de 9.4ºC.

## 4.4 Outros estudos paramétricos

Neste capítulo serão realizados dois estudos paramétricos recorrendo exclusivamente ao programa CFAST. Pretende-se estudar a influência do tamanho do compartimento e a altura da ignição e o seu impacto na temperatura obtida para fins de dimensionamento dos elementos estruturais.

### 4.4.1 Aumento das dimensões em planta do compartimento

Constatou-se no capítulo 4.2 com as várias simulações no programa CFAST que o aumento da altura do compartimento conduziu a uma diminuição da temperatura obtida. Neste capítulo, a variação imposta ao compartimento é a sua área em planta, com a manutenção da altura média de 6.4 m. Simulou-se assim um novo compartimento com dimensões em planta de 20 m x 40 m em vez de 20 m x 30 m. Uma importante análise preliminar pode ser realizada: espera-se que a temperatura máxima obtida seja inferior com o aumento do compartimento, porque a abundância de uma maior quantidade de ar no compartimento permita uma maior mistura de gases quentes com ar mais frio, atrasando a curva de temperatura e diminuindo a temperatura máxima, quando comparado com a área em planta original do caso de estudo.

O cenário escolhido para este estudo paramétrico é 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna, pois revelou ser o cenário mais desfavorável obtido no CFAST, no que à temperatura máxima diz respeito. O novo cenário com a área em planta superior foi denominado 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna_20x40. Foi considerada a mesma área de aberturas na cobertura, espaçando-se de igual forma pelos 40 m de comprimento.

Recorrendo ao conceito de multi-compartimentos, adicionaram-se mais dois compartimentos de dimensões 10 m x 10 m x 6.4 m de forma a manter regular as suas dimensões. Na Figura 4.36 está representado o modelo desenvolvido no programa CFAST.

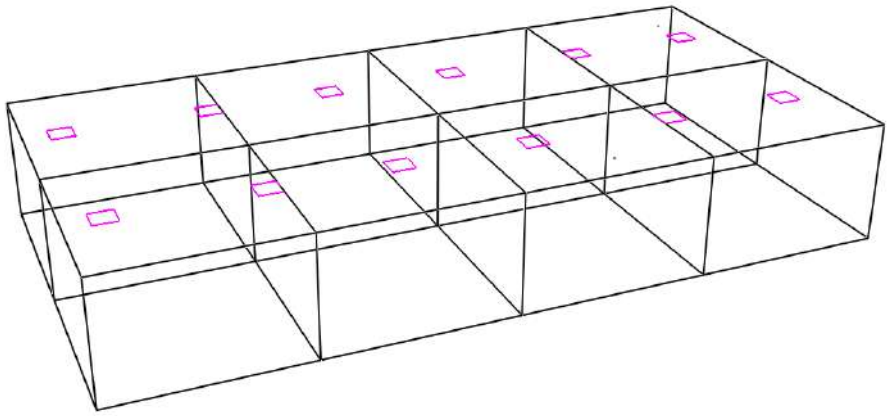


Figura 4.36 - Caso de estudo 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna_20x40 modelado no CFAST recorrendo ao conceito de multi-compartimentos

A curva de temperatura da camada superior obtida pode ser consultada na Figura 4.37, estabelecendo-se uma comparação com o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna.

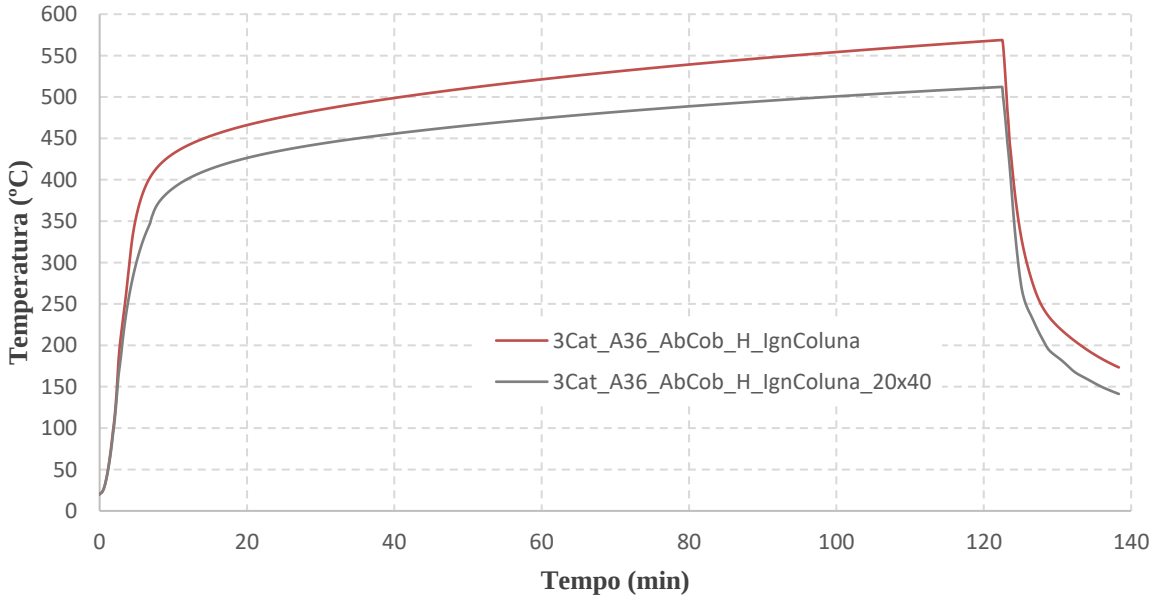



Figura 4.37 - Temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para o cenário com dimensões em planta de 20 m x 40 m (3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna_20x40) e comparação com o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna

Tal como previsto, existe uma redução da temperatura máxima obtida no cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna_20x40 (512.2ºC) e o cenário com a área em planta original (568.8ºC). A diferença é de 56.6ºC, assistindo-se igualmente a uma redução no fluxo de calor por radiação de 13.6 kW/m$^2$ para 10.3 kW/m$^2$, para os cenários 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna e 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna_20x40, respetivamente.

Perante os resultados obtidos, mostra-se que o aumento das dimensões do compartimento leva a uma diminuição da temperatura da camada superior e a uma diminuição do fluxo de calor por radiação. Tal situação leva a afirmar que para o edifício em estudo, a probabilidade de ocorrer uma combustão generalizada é menor com o aumento do tamanho do edifício.

### 4.4.2 Ignição a 2 m do pavimento

Para averiguar a influência na temperatura do compartimento da altura de ignição, foi realizada uma simulação com uma ignição a 2 m do pavimento. À semelhança do capítulo anterior, foi selecionada a comparação com o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna, por ser o cenário mais desfavorável obtido no CFAST. Foi assim criado o novo cenário denominado 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna2m, os mesmos parâmetros de entrada que o cenário original, com a exceção da definição da altura de ignição.

A Figura 4.38 mostra o mapa de temperaturas obtido para o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna2m, utilizando-se um corte longitudinal ao eixo da pluma para facilidade de apresentação de resultados.

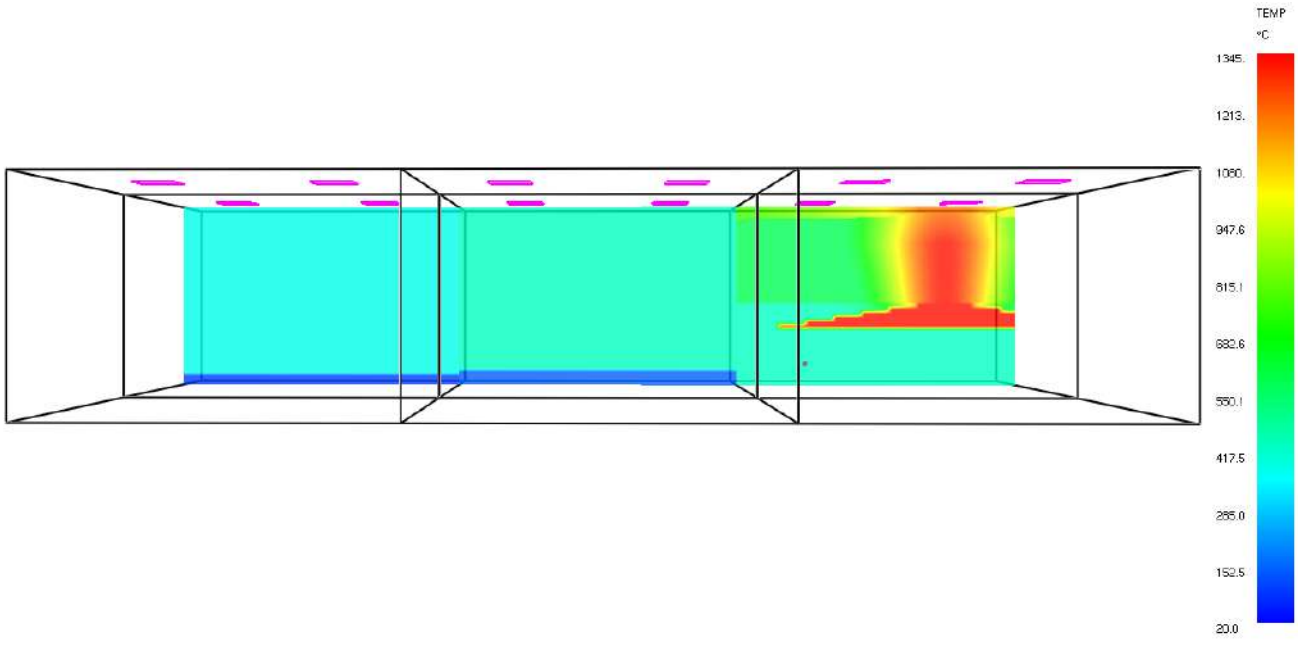



Figura 4.38 - Mapa de temperaturas obtidas aos 6000 s (corte longitudinal no eixo da pluma) no programa CFAST para o caso 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna2m

De forma análoga ao apresentado na Figura 4.11 para o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna, na simulação com uma ignição numa cota superior, a pluma eleva-se na direção do teto do compartimento, transportando consigo grandes quantidades de calor.

Na Figura 4.11 é visível que a altura das chamas é ligeiramente inferior à altura considerada para o compartimento. No caso simulado neste capítulo, verifica-se que a translação em altura da pluma leva a que as temperaturas mais altas coincidam geometricamente com o teto do compartimento. Torna-se assim relevante conhecer a medição de temperatura obtida no sensor junto ao teto do compartimento no eixo da pluma. Na Figura 4.39 encontram-se registadas as curvas de temperatura obtidas no sensor colocado no eixo da pluma e a temperatura da camada superior.

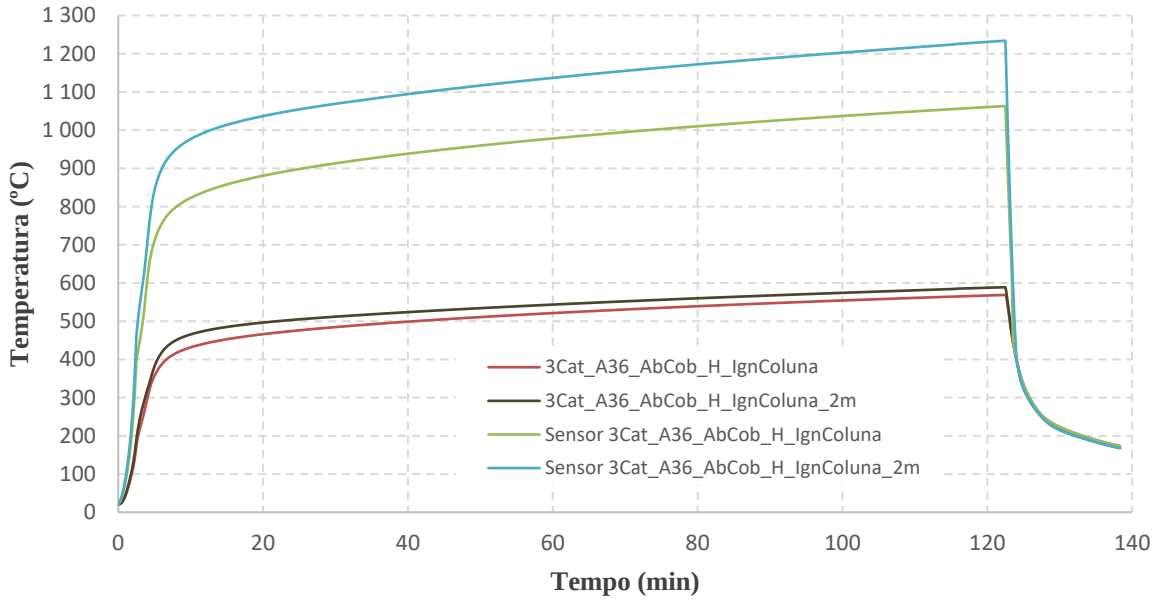



Figura 4.39 - Temperatura da camada superior e temperatura do gás próximo do sensor colocado no eixo da pluma obtida no programa CFAST para o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna e 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna2m

Os resultados obtidos revelam um ligeiro aumento da temperatura da camada superior com a ignição a 2 m do pavimento. A temperatura máxima da camada de ar quente registada para o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna2m é de 589.0ºC, um aumento é de 20.2ºC relativamente ao cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna. A influência da altura de ignição na temperatura da camada superior (gases quentes) é reduzida porque a temperatura obtida é uma média da temperatura da camada superior do compartimento. O grande aumento de temperatura ocorre na medição obtida para o sensor, registando-se 1063.1ºC para o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna e 1234.1ºC para o cenário com ignição a 2 m de altura (3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna2m). Este aumento de 171.0ºC vai de encontro ao observado na Figura 4.38, em que a região com temperaturas elevadas da pluma coincide com a posição do sensor, levando a uma medição de temperaturas elevadas.

Conclui-se desta forma que a subida da posição de ignição não afeta substancialmente a temperatura da camada superior no compartimento, penalizando por outro lado a temperatura registada junto ao teto do compartimento, onde se assistiu a um aumento não negligenciável de temperatura.

## 4.5 Considerações finais

A análise dos resultados permite perceber uma boa relação entre a temperatura da camada superior pelo método de multi-compartimentos em modelos de zona (CFAST) e a temperatura medida por sensores num modelo de cálculo de dinâmica de fluidos (FDS). As dimensões dos compartimentos no programa CFAST encontram-se dentro das dimensões aceitáveis para modelos de duas zonas. De igual forma, a malha gerada para o programa FDS encontrava-se dentro dos parâmetros recomendados.

A grande desvantagem a salientar da utilização de um modelo de duas zonas, é que a formação de uma camada uniforme de gases quentes não é realista para grandes compartimentos. Com o programa FDS, foi possível simular uma distribuição vertical da temperatura. Nos dois programas utilizados, verificou-se que o fumo gerado desenvolveu-se uniformemente, ficando igualmente distribuído em todo o espaço do edifício.

A vantagem do programa FDS reside na sua sofisticação que lhe dá as características de um modelo mais coerente com a realidade. A grande desvantagem consiste nos cálculos necessários, exigindo-se por isso grandes tempos de computação.

Os parâmetros para a definição de não combustão generalizada no compartimento foram tidos em conta, com base na bibliografia recolhida. Verificou-se como baixa a probabilidade de ocorrência de combustão generalizada em todas as simulações realizadas para o caso de estudo.

Assinala-se a ordem crescente de aumento de temperatura da camada superior obtida no CFAST para os cenários AbFachCob, AbFach e AbCob. O mesmo se verificou no FDS, com a exceção dos cenários AbCob, em que se registaram oscilações elevadas nas temperaturas medidas e um fenómeno que pode ser equivalente a *backdraft*. Por *backdraft* entende-se o fenómeno que ocorre quando ar é introduzido num espaço em que a concentração de oxigénio é muito reduzida devido a um incêndio, mas onde a temperatura é ainda elevada. Podem assim originar-se chamas que se expelem rapidamente e com alguma violência para o exterior do compartimento [76]. Destaca-se por isso a importância da ventilação no compartimento, pois permite uma importante redução da temperatura consoante a localização das aberturas. Realça-se a necessidade de entrada de ar frio exterior para se misturar com o ar quente resultante da combustão no compartimento. A forma mais eficaz de realizar esta troca consiste na utilização de aberturas na fachada o mais próximo do pavimento quanto possível para a entrada de ar frio e a utilização de aberturas na cobertura para escoar os gases quentes por flutuabilidade.

Foi possível simular com auxílio do programa CFAST alterações nas dimensões do edifício em estudo, concluindo-se que ocorre uma redução da temperatura com o aumento da altura do edifício, verificando-se igualmente a mesma tendência com o aumento das dimensões em planta com a manutenção da dimensão da altura.

É deveras importante a correta definição de todos os parâmetros que caracterizam o incêndio que se espera que ocorra. Esta definição é sem dúvida condicionada pela ocupação prevista e categoria de risco que a legislação impõe. No Quadro 4.10 estão resumidas as temperaturas máximas obtidas em todos as simulações realizadas. Nas simulações com o programa FDS foram consideradas as temperaturas obtidas para o quantilho 80%. O Quadro 4.10 tem em conta

as categorias de risco e ocupações definidas em função da área de incêndio, de acordo com o Quadro 2.2 e desprezando o perfil de temperaturas do modelo da pluma.

Quadro 4.10 - Resumo da temperatura máxima obtida nas simulações em função da ocupação prevista e categoria de risco

| Ocupação | Temperatura máxima 2ª categoria de risco (ºC) | Temperatura máxima 3ª categoria de risco (ºC) |
|---|---|---|
| Átrio de um edifício de escritórios<br>Receção de um hotel<br>Galeria de arte<br>Cais de estação<br>Terminal de aeroporto<br>Pavilhão desportivo | 175.7 | 190.5 |
| Igreja<br>Pavilhão multiusos<br>Sala de restaurante | 318.2 | 392.4 |
| Supermercado<br>Centro comercial<br>Escritório (grandes áreas)<br>Sala de exposição | 490.7 | 568.8 |

Tendo por base as curvas de temperatura geradas através das várias simulações nos dois programas utilizados, criou-se uma curva de temperatura com os valores mais desfavoráveis. De forma conservativa não se realizou distinção entre curvas de temperatura para elementos viga e elementos coluna, uma vez que os resultados obtidos no programa CFAST resultam da média de temperaturas da camada superior de um compartimento que abrange os dois elementos, não sendo possível haver uma distinção clara da temperatura entre eles. Na Figura 4.40 está representada a curva de temperatura obtida. Utilizaram-se assim os valores obtidos para a camada superior no programa CFAST e os valores do quantilho 80% para os resultados obtidos no programa FDS, comparando-se com a curva padrão ISO 834. Salienta-se que as duas curvas representam momentos diferentes de desenvolvimento de um incêndio num compartimento, nomeadamente um incêndio totalmente desenvolvido (pós-*flashover*) para a curva ISO 834 e período de tempo de um incêndio anterior a uma combustão generalizada (pré-*flashover*) para a curva de temperatura obtida. Optou-se representar as curvas unicamente para fins comparativos, ficando bem definidas as diferenças e consequências na evolução da temperatura no compartimento com a utilização de uma ou outra.

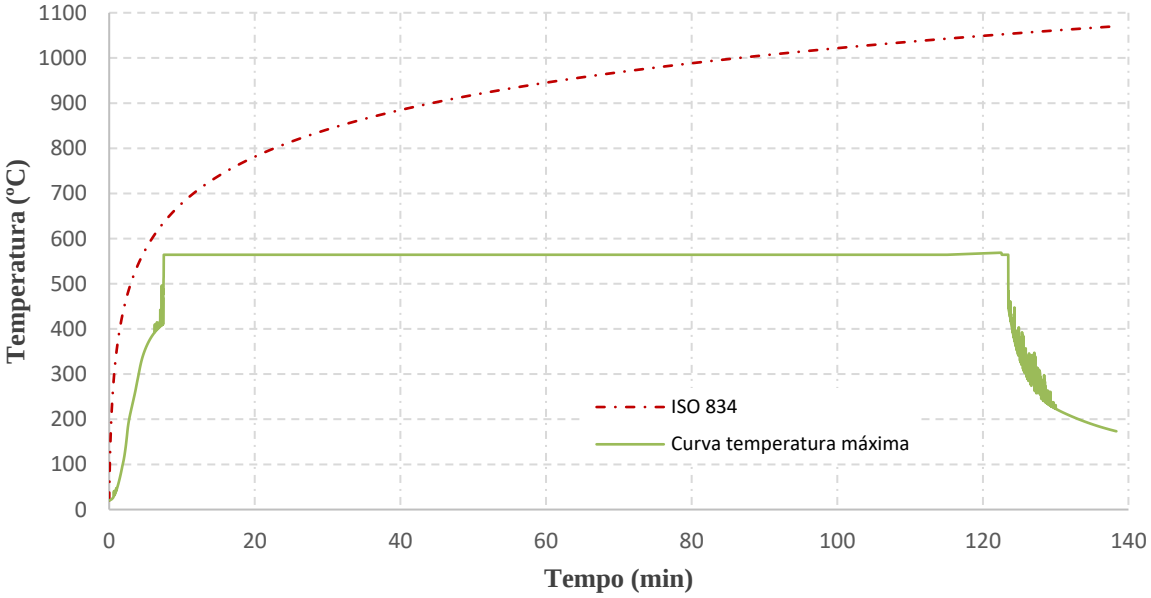



Figura 4.40 - Curva de temperatura obtida através dos valores máximos obtidos através das simulações e comparação com a curva ISO 834

Tal como referido anteriormente, para que seja garantida a resistência ao fogo de um elemento, é necessário que o valor de cálculo da temperatura no elemento no instante requerido, seja menor ou igual ao valor de cálculo da temperatura crítica do elemento. Para o cálculo da temperatura nos elementos estruturais, foram utilizadas as equações e metodologias apresentadas no capítulo 3.5, considerando-se conservativamente os elementos expostos nos 4 lados. Os resultados obtidos encontram-se representados na Figura 4.41.

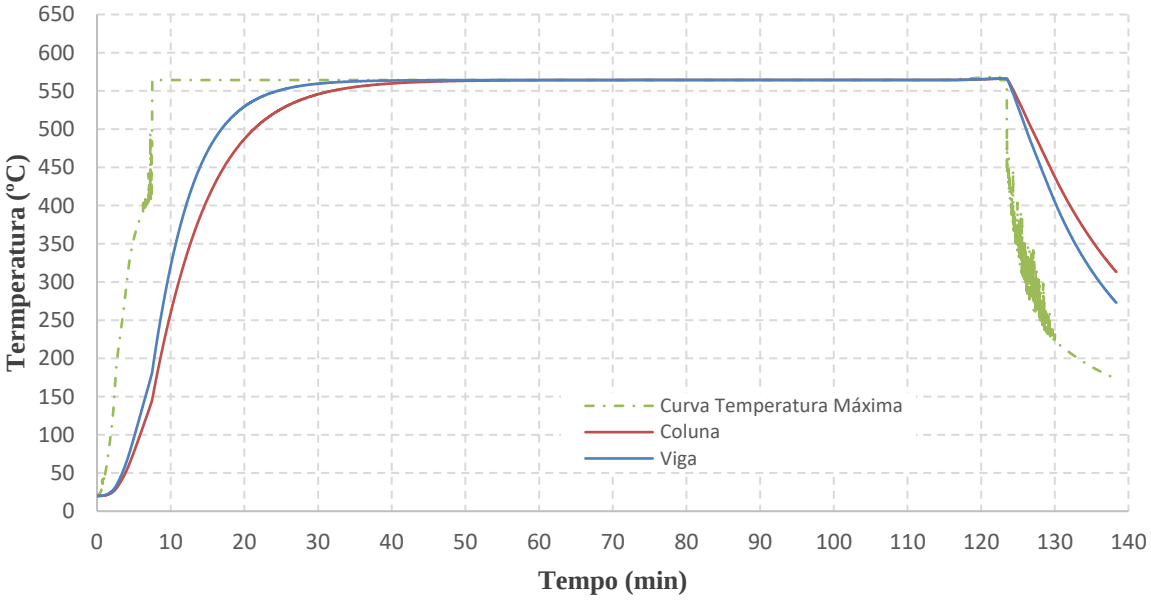



Figura 4.41 - Temperatura obtida nos elementos estruturais a partir da curva de temperatura máxima

Perante os resultados obtidos verifica-se que a temperatura máxima atingida pelos elementos estruturais é de 566.5ºC. Tendo em conta que a temperatura crítica determinada para as colunas é de 622.5ºC e 591.1ºC para as vigas, conclui-se que os elementos estruturais do caso de estudo não necessitam de proteção contra o fogo, já que a sua temperatura crítica é superior ao valor de cálculo da temperatura nos elementos em todos os instantes.

Uma grande otimização da proteção ao fogo dos elementos estruturais é conseguida devido especialmente ao patamar de temperatura no compartimento que ocorre geralmente para incêndios naturais. Ao contrário do que acontece para a curva da ISO 834, em que se observa uma subida gradual da temperatura, verifica-se uma constância do valor de temperatura na curva obtida pelas simulações realizadas. Tal constância ou patamar permite que a temperatura nos elementos estruturais em aço estabilize nesses valores.

Tendo em conta os métodos presentes na EN 1991-1-2 [13] para a determinação da ação térmica, verifica-se que apenas os modelos de duas zonas, CFD e modelo de incêndios localizados são aplicáveis ao caso de estudo. O modelo de incêndios localizados foi utilizado no capítulo 3.5.4, resultando numa temperatura de 515.5ºC para as colunas a partir de 1 m de altura e 226.2ºC para as vigas. O valor obtido para as colunas está em concordância com os valores obtidos nos modelos de duas zonas e CFD, verificando-se uma diferença de 51.0ºC para o valor máximo obtido por simulação. O valor de 226.2ºC para as vigas revela-se fora da segurança, quando comparado com os valores obtidos nas simulações. Revela-se assim insuficiente a utilização das metodologias de mais fácil implementação presentes na EN 1991-1-2 [13].

# 5 CONCLUSÕES

## 5.1 Conclusões finais

O presente estudo visa avaliar as metodologias de dimensionamento de estruturas metálicas em situação de incêndio que permitam redução de custos. Para este efeito, foram compiladas as principais metodologias prescritivas e abordagens com base no desempenho da estrutura, com especial ênfase na análise e soluções aplicáveis a grandes compartimentos onde se pretende que a segurança se encontre proporcional ao capital investido. As estratégias definidas visam assim aprofundar e contribuir para o conhecimento de incêndios em pavilhões industriais e comerciais construídos com estruturas metálicas.

Os estudos experimentais realizados em grandes compartimentos são onerosos, sendo por isso poucas vezes realizados. A sua importância é fulcral pois permite o melhor ajuste e precisão de modelos numéricos, que se apresentam como uma alternativa menos dispendiosa.

Os requisitos de resistência ao fogo dos elementos estruturais diferem consoante a legislação de cada país. Em Portugal, para os edifícios mais comuns de um só piso, são exigidos 60 minutos de resistência ao fogo. Noutros países europeus, consoante a utilização e a existência de proteção ativa de incêndio, podem ser exigidos 120 minutos ou até nem ser exigida resistência ao fogo para edifícios industriais. Existe assim uma grande variedade de requisitos exigidos para os elementos estruturais, que permite graus de segurança diferentes, mas também, em alguns casos, poupanças significativas na proteção ao fogo.

Para quantificar as estratégias de otimização da proteção contra incêndios, foram desenvolvidos modelos de cálculo para um caso de estudo, realizando-se o dimensionamento à temperatura ambiente e em situação de incêndio. As ações térmicas para análise da temperatura presentes na EN 1991-1-2 apresentaram-se como um bom ponto de partida, com a exceção das curvas paramétricas, que apresentam aplicabilidade limitada a grandes compartimentos. A curva de incêndio padrão, historicamente mais utilizada, revelou-se bastante penalizadora nos elementos estruturais. A sua aplicação encontra-se mais enquadrada no domínio dos pequenos compartimentos, onde a temperatura em todo o compartimento é uniforme ao fim de alguns minutos. Os resultados obtidos para um modelo de incêndios localizados indicaram a não necessidade de proteção contra incêndio no elemento viga pois a temperatura atingida revelou-se inferior à sua temperatura crítica. No elemento coluna, determinou-se que proteção é necessária apenas até 1 m de altura, não sendo necessária proteção na restante altura do elemento. Tal situação induz uma grande poupança, mas igualmente uma responsabilidade de manter válidas as premissas do modelo, nomeadamente a necessidade de avaliar se o incêndio permanece localizado.

A prescrição do tipo de proteção ao fogo ou a não necessidade de proteção levam a custos que variam significativamente. A diferença de custos para uma resistência requerida de 60 minutos pode chegar a cerca de 30% entre uma estrutura com proteção ao fogo com tinta intumescente e uma estrutura sem proteção contra incêndio. Para tempos de resistência requeridos superiores, a diferença de custos deverá aumentar significativamente.

Foram utilizados modelos de cálculo avançados como modelos de duas zonas e modelos de dinâmica de fluidos, com o intuito de se obter curvas de temperatura mais próximas do desenvolvimento real de um incêndio num edifício como o caso de estudo. Criaram-se cinco grupos, cada um com características diferentes que se combinam para gerar cenários com variações da densidade de carga de incêndio, área de incêndio, localização de aberturas, variação da altura do compartimento e local de ignição. Estas variações permitiram adquirir sensibilidade às várias características admitidas, sendo relevantes para estudos futuros ou comparações com uma situação equivalente de dimensionamento.

A avaliação de combustão generalizada (*flashover*) foi tida em consideração em todas as simulações realizadas. Com base na bibliografia, foi admitida uma temperatura limite de 600ºC e um fluxo de calor por radiação ao nível do piso de 15 $kW/m^2$ como critérios que podem despoletar uma combustão generalizada no compartimento. Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que a probabilidade de ocorrer é baixa, uma vez que em todas as simulações realizadas, os valores limite enunciados não foram atingidos.

Verificou-se que os modelos de duas zonas permitem obter resultados em minutos, ao contrário dos modelos de dinâmica dos fluidos, que necessitam de várias dezenas de horas para finalizar uma simulação. Os resultados obtidos nos modelos de duas zonas multi-compartimentos apresentam boas correlações com os resultados obtidos por dinâmica de fluidos. A grande desvantagem dos modelos de duas zonas reside na consideração de temperatura uniforme dos gases quentes, que se apresenta como irrealista em grandes compartimentos.

Nos resultados obtidos por modelos de dinâmica de fluidos foi possível observar uma distribuição vertical da temperatura, características mais coerentes com a realidade. A grande desvantagem destes modelos reside no tempo despendido na preparação do modelo e tempo de simulação, tornando-se por isso a sua aplicação mais difícil de implementar num âmbito de projeto de estruturas metálicas comum atual.

Os resultados obtidos são bastante promissores no que à minimização de custos em proteção passiva ao fogo diz respeito. Os elementos estruturais para o caso de estudo analisado não necessitam de proteção adicional contra o fogo, tendo como ação térmica a curva de temperatura mais desfavorável obtida por simulação. Verificou-se assim que a determinação de curvas mais próximas do desenvolvimento real da evolução da temperatura ao longo do tempo de incêndio permite otimizar os custos de pavilhões industriais e comerciais construídos com estruturas metálicas, alcançando-se passos relevantes no alcance e competitividade das mesmas.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Os temas sugeridos para potenciais trabalhos futuros consistem no aprofundar das análises preliminares realizadas. Como linhas de complemento ou continuação do tema, sugere-se que poderão ser dirigidos sobre as seguintes questões fundamentais:

- Estudo das várias tipologias de edifícios de forma a aferir a influência da geometria no controlo de temperatura.
- Realização de estudos da influência da cobertura a duas águas com grande inclinação na acumulação de gases sem capacidade de exaustão.
- Análise da influência do vento na combustão ou exaustão de fumo.
- Implementação de diferentes inícios de abertura para a ventilação natural após início do incêndio.
- Implementação de sistemas ativos de extinção de incêndio e a sua influência na temperatura atingida.
- Análise da influência de diferentes áreas de aberturas e o seu impacto económico.
- Implementação da modelação do incêndio por pirólise, ao invés de taxa de libertação de calor.
- Recolha e implementação de informação sobre a severidade do incêndio.
- Análise e avaliação de modelos que contenham a metodologia de fogos móveis (*travelling fires*).
- Realização de ficheiros de parâmetros de entrada automáticos com vista a utilização de programas de cálculo de dinâmica de fluidos aplicados a grandes compartimentos, através de *python* ou linguagem equivalente mais amiga do utilizador.
- Análise térmica não uniforme em colunas com diferentes faces expostas com vista a maximização da otimização.

# 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] D. Nwosu e V. Kodur, “Steel Structures Exposed to Fire - A State-of-the-Art Report,” NRC-CNRC, Canadá, 1997.

[2] CEN, "Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço Parte 1-2: Regras gerais- Verificação da resistência ao fogo, Bruxelas: European Committee for Standardization, 2010.

[3] Association of Specialist Fire Protection, "Fire protection for structural steel in buildings, Third Edition", UK: ASFP, FTSG, SCI, 2004.

[4] A. Buchanan, Fire engineering design guide, Christchurch, New Zealand: Centre of Advanced Engineering, 2001.

[5] A. H. Buchanan e A. K. Abu, "Structural design for fire safety, Second Edition", New Zealand: John Wiley & Sons Ltd, 2017.

[6] L. G. J. H. M. Phan, “Best practice guidelines for structural fire resistance design of concrete and steel buildings - NIST Technical report 1681,” NIST, US, 2010.

[7] J. Purkiss e L. Li, Fire safety engineering design of structures, Third Edition, CRC Press, 2014.

[8] ECCS, Fire design information sheets, Publication NO.82, Brussels, 1997.

[9] O. Zybina e M. Gravit, Intumescent coatings for fire protection of building structures and materials, St. Petersburg, Russia: Springer, 2020.

[10] B. W. Cosgrove, “Fire design of single storey industrial buildings - Fire engineering research report 96/3,” School of Engineering University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1996.

[11] G. Li e P. Wang, Advanced Analysis and Design for Fire Safety of Steel Structures, China: Springer, 2012.

[12] L. Lu, G. Yuan, Z. Huang, Q. Shu e Q. Li, Performanced-based analysis of large steel truss roof structure in fire, Fire safety journal - Elsevier, 2017.

[13] CEN, Eurocódigo 1 - Ações em estruturas Parte 1-2: Ações gerais - Ações em estruturas expostas ao fogo, Bruxelas: European Committee for Standardization, 2010.

[14] J. Franssen e P. Vila Real, Fire design of steel structures, 2nd edition, ECCS – European Convention for Constructional Steelwork, 2015.

[15] R. Obiala, L. Cajot, G. Axmann, M. May, R. Dixon, B. Pries e M. Schrader, “Single-storey steel buildings Part 7 - Fire engineering,” em *Facilitating market development for sections in industrial halls and low-rise buildings (SECHALO)*, European Commission, 2012.

[16] W. Chen, J. Ye e Q. Zhao, “Thermal performance of non-load-bearing cold-formed steel walls under different design fire conditions,” *Thin-Walled Structures*, p. Volume 143, 2019.

[17] J. Schleich, L. Cajot, M. Pierre, M. Brasseur, J. Franssen, J. Kruppa, D. Joyeux, L. Twilt, J. Van Oerle e G. Aurtenetxe, Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in the large compartments, European Commission, 1999.

[18] J. Schleich, L. Cajot, M. Pierre, D. Joyeux, G. Aurtenetxe, U. J., S. Pustorino, F. Heise, R. Salomon, L. Twilt e J. Van Oerle, Competitive steel buildings through natural fire safety concepts, European Commission, 2002.

[19] P. Moss, R. Dhakal, M. W. Bong e A. Buchanan, "Structural fire performance of steel portal frame buildings," em *4th Internation workshop on structures in fire (SiF06)*, Aveiro, Portugal, 2005.

[20] W. K. Chow, "Predictability of flashover by zone models," *Journal of fire sciences*, 1998.

[21] D. Drysdale, An introduction to fire dynamics - Third edition, Scotland, UK: Wiley, 2011.

[22] CEN, CEN/TR 12101-5: Smoke and heat control systems - Part 5: Guidelines on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems, Bruxelas: European Committee for Standardization, 2005.

[23] Norme NBN S21-208, Protection Incendie dans les Bâtiments - Conception et calcul des installations d'évacuation de fumées et de chaleur - Partie 1: grands espaces intérieurs non-cloisonnés s'étendant sur un niveau, Bureau de normalisation, 1995.

[24] J. Zehfuss e D. Hosser, A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings, Fire safety journal - Elsevier, 2006.

[25] J. Shi, W. Shi e A. Ren, An integrated model for the fire safety analysis of large space buildings, Advances in structural engineering Vol. 14 No. 5, 2011.

[26] G. Zhang, H. Li, G. Zhu e J. Li, "Temperature fields for fire resistance analysis of structures exposed to natural fires in large compartments," em *Structural Design of Tall and Special Buildings*, Wiley, 2020.

[27] C. Haremza, Robustness of open car parks under localised fire, Tese de Doutoramento em Construção Metálica e Mista apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2014.

[28] C. Gutiérrez-Montes, E. Sanmiguel-Rojas, A. Viedma e G. Rein, "Experimental data and numerical modelling of 1.3 and 2.3MW fires in a 20m cubic atrium," em *Building and Environment*, Elsevier, 2009, pp. 1827-1839.

[29] S. Jiang, S. Zhu, X. Guo e Z. Li, "Full-scale fire tests on steel roof truss structures," em *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, 2020.

[30] Portaria nº 135/2020, Diário da República, 2 Junho 2020.

[31] Documento Básico SI Seguridad en caso de incendio, Ministerio de Fomento, 2019.

[32] Real Decreto 2267/2004 Reglamento de Seguridad contra incendios en los establecimientos industriales, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

[33] Fire Safety Document B Volume 2: Buildings other than dwellings, Ministry of Housing, Communities & Local Government, 2020.

[34] Règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public, France-Sélection, 13 Juin 2017.

[35] Prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), France-Sélection, 9 Avril 2019.

[36] Annexe 1re à l'arrêté royal: Prévention contre l'incendie et l'explosion, 12 Juillet 2012.

[37] Annexe 6 à l'arrêté royal: Sécurité incendie des bâtiments industriels, 12 Juillet 2012.

[38] DSTgroup, [Online]. Available: https://dstsa.pt/portfolio/armazem-de-produto-acabado-da-mabor. [Acedido em 2 Maio 2021].

[39] Grupo Casais, [Online]. Available: https://www.casais.pt/pt/6-portfolio. [Acedido em 2 Maio 2021].

[40] SE2P - Sociedade de Engenharia, Projectos e Planeamento, Lda, [Online]. Available: http://www.se2p.pt/web1/zp/tpl1/id1/portfolio/index.asp. [Acedido em 2 Maio 2021].

[41] CGF - Coordenação, Gestão e Fiscalização de Obras, Lda, [Online]. Available: https://www.cgf.pt/edificios-e-patrimonio-construido/pingo-doce-em-guimaraes/. [Acedido em 2 Maio 2021].

[42] CGF - Coordenação, Gestão e Fiscalização de Obras, Lda, [Online]. Available: https://www.cgf.pt/edificios-e-patrimonio-construido/construcao-do-pingo-doce-em-freamunde/. [Acedido em 2 Maio 2021].

[43] Central Projetos, [Online]. Available: https://www.centralprojectos.pt/. [Acedido em 18 Julho 2021].

[44] Autodesk, 2020. [Online]. Available: www.autodesk.com.

[45] CEN, Eurocódigo 1 - Ações em estruturas Parte 1-1: Ações gerais - Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios, Bruxelas: European Committee for Standardization, 2009.

[46] CEN, Eurocódigo 1 - Ações em estruturas Parte 1-5: Ações gerais - Ações térmicas, Bruxelas: European Committee for Standardization, 2009.

[47] CEN, Eurocódigo 1 - Ações em estruturas Parte 1-4: Ações gerais - Ações do vento, Bruxelas: European Committee for Standardization, 2010.

[48] CEN, Eurocódigo - Bases para o projeto de estruturas, Bruxelas: European Committee for standardization, 2009.

[49] CEN, Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios, Bruxelas: European Committee for Standardization, 2010.

[50] CEN, "NP EN1993-1-1 - Projecto de estruturas de aço - Parte 1-1:Regras gerais e regras para edifícios", Brussels: European Committee for standardization, 2010.

[51] P. Vila Real e J. Franssen, “Elefir-EN V1.5.8: Software for Fire Design of Steel Structural Members According the Eurocode 3,” Disponível em http://elefiren.web.ua.pt/.

[52] S. Reitgruber, C. Pérez-Jiménez, C. Di Blasi e J. M. Franssen, “Some comments on the parametric fire model of Eurocode 1,” em *Conference on Fire in Enclosures, University of Ulster*, Jordanstown, 2006.

[53] J.-B. Schleich, “Implementation of Eurocodes. Handbook 5. Design of buildings for the fire situation: Guide to basis of structural reliability and risk engineering related to Eurocodes supplemented by practical examples,” CZ/02/B/F/PP-134007, Luxembourg, 2005.

[54] F. Santos e L. Simões da Silva, Manual de execução de estruturas metálicas, Coimbra: CMM - Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, 2011.

[55] “Gerador de preços,” Top-Informática Lda, [Online]. Available: http://geradordeprecos.cype.pt/. [Acedido em Junho 2021].

[56] National Institute of Standards and Technology (NIST), “CFAST - Consolidated Fire and Smoke Transport,” Disponível em https://pages.nist.gov/cfast.

[57] National Institute of Standards and Technology (NIST), "FDS-SMV: Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview (SMV)," Disponível em: https://pages.nist.gov/fds-smv/.

[58] R. D. Peacock, K. B. McGrattan, G. P. Forney e P. A. Reneke, "NIST Technical Note 1889v1 CFAST – Consolidated Fire and Smoke Transport (Version 7) Volume 1: Technical Reference Guide," National Institute of Standards and Technology - NIST, 2020.

[59] W. W. Jones, R. D. Peacock, G. P. Forney e P. A. Reneke, "NIST Special Publication 1026 CFAST – Consolidated Model of Fire (Version 6): Technical Reference Guide," National Institute of Standards and Technology - NIST, 2005.

[60] W. J. Bong, "Limitations of zone models and CFD models for natural smoke filling in large spaces," Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Incêndio no Departamento de Engenharia Civil e Recursos Naturais da Universidade de Canterbury, Christchurch, Nova Zelândia, 2011.

[61] W. K. Chow, "Multi-cell concept for simulating fire in big enclosures using a zone model," em *Journal of fire sciences 14*, 1996, pp. 186-197.

[62] N. Johansson, "Estimating gas temperatures in large enclosures," em *CONFAB 2017*, Londres, 2017.

[63] C. Xiaojun, Y. Lizhong, D. Zhihua e F. Weicheng, "A multi-layer zone model for predicting fire behavior in a fire room," em *Fire Safety Journal 40*, Elsevier, 2005, pp. 267-281.

[64] K. Suzuki, K. Harada e T. Tanaka, "A multi-layer zone model for predicting fire behavior in a single room," em *Fire Safety Science 7*, International Association for Fire Safety Science, 2002, pp. 851-862.

[65] C. Lautenberger, C. L. Tien, K. Y. Lee e A. J. Stretton, SPFE Handbook of Fire Protection Engineering Fifth Edition, chapter Radiation Heat Transfer, Springer, 2016.

[66] J. H. Klote, J. A. Milke, P. G. Turnball, A. Kashef e M. J. Ferreira, Handbook of Smoke Control Engineering, Atlanta: ASHRAE, 2012.

[67] A. S. Rangwala, SPFE Handbook of Fire Protection Engineering Fifth Edition, chapter Diffusion Flames, Springer, 2016.

[68] C. L. Beyler, SPFE Handbook of Fire Protection Engineering Fifth Edition, chapter Fire Hazard Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires, Springer, 2016.

[69] M. J. Hurley, SPFE Handbook of Fire Protection Engineering Fifth Edition, chapter Appendix 2: Thermophysical Property Data, Springer, 2016.

[70] R. D. Peacock, K. B. McGrattan e P. A. Reneke, "NIST Technical Note 1889v2 CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7) Volume 2: User's Guide," National Institute of Standards and Technology - NIST, 2020.

[71] R. D. Peacock, G. P. Forney e P. A. Reneke, "NIST Technical Note 1889v3 CFAST – Consolidated Fire And Smoke Transport (Version 7) Volume 3: Verification and Validation Guide," National Institute of Standards and Technology - NIST, 2020.

[72] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott e M. Vanella, "NIST Special Publication 1019 (Sixth Edition) - Fire Dynamics Simulator User's Guide," National Institute of Standards and Technology - NIST, 2021.

[73] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott e M. Vanella, "NIST Special Publication 1018-4 (Sixth Edition) - Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide

Volume 4: Software Quality Assurance," National Institute of Standards and Technology - NIST, 2021.

[74] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott e M. Vanella, "NIST Special Publication 1018-1 (Sixth Edition) - Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model," National Institute of Standards and Technology - NIST, 2021.

[75] I. Vermesi, G. Rein, F. Colella, M. Valkvist e G. Jomaas, "Reducing the computational requirements for simulating tunnel fires by combining multiscale modelling and multiple processor calculation," em *Tunnelling and Underground Space Technology 64*, Elsevier, 2017, pp. 146-153.

[76] S. Svensson, Fire ventilation, Swedish Civil Contingencies Agency (MSB), 2020.

# ANEXO A.

## I. Resultados obtidos através do programa CFAST

Quadro A.1 – Temperatura máxima obtida para a camada superior e fluxo de calor por radiação para todos os cenários simulados com auxílio do programa CFAST

| Cenário | Temperatura máxima da camada superior (ºC) | Fluxo de calor por radiação (kW/m$^2$) |
|---|---|---|
| 2Cat_A9_AbCob_H_IgnColuna | 175.7 | 2.2 |
| 2Cat_A9_AbCob_H_IgnViga | 175.7 | 2.0 |
| 2Cat_A9_AbCob_H+2_IgnColuna | 165.2 | 1.8 |
| 2Cat_A9_AbCob_H+2_IgnViga | 165.0 | 1.7 |
| 2Cat_A9_AbFach_H_IgnColuna | 157.4 | 2.3 |
| 2Cat_A9_AbFach_H_IgnViga | 152.3 | 2.1 |
| 2Cat_A9_AbFach_H+2_IgnColuna | 148.2 | 1.9 |
| 2Cat_A9_AbFach_H+2_IgnViga | 144.7 | 1.8 |
| 2Cat_A9_AbFachCob_H_IgnColuna | 118.0 | 2.2 |
| 2Cat_A9_AbFachCob_H_IgnViga | 112.9 | 2.1 |
| 2Cat_A9_AbFachCob_H+2_IgnColuna | 105.3 | 1.8 |
| 2Cat_A9_AbFachCob_H+2_IgnViga | 101.5 | 1.7 |
| 2Cat_A20_AbCob_H_IgnColuna | 318.2 | 4.9 |
| 2Cat_A20_AbCob_H_IgnViga | 311.4 | 4.5 |
| 2Cat_A20_AbCob_H+2_IgnColuna | 297.9 | 4.2 |
| 2Cat_A20_AbCob_H+2_IgnViga | 293.5 | 3.9 |
| 2Cat_A20_AbFach_H_IgnColuna | 268.7 | 5.1 |
| 2Cat_A20_AbFach_H_IgnViga | 256.9 | 4.7 |
| 2Cat_A20_AbFach_H+2_IgnColuna | 254.7 | 4.3 |
| 2Cat_A20_AbFach_H+2_IgnViga | 245.2 | 3.9 |
| 2Cat_A20_AbFachCob_H_IgnColuna | 189.1 | 4.9 |
| 2Cat_A20_AbFachCob_H_IgnViga | 181.4 | 4.6 |
| 2Cat_A20_AbFachCob_H+2_IgnColuna | 167.7 | 3.9 |
| 2Cat_A20_AbFachCob_H+2_IgnViga | 161.8 | 3.7 |
| 2Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna | 490.7 | 10.2 |
| 2Cat_A36_AbCob_H_IgnViga | 476.0 | 8.9 |
| 2Cat_A36_AbCob_H+2_IgnColuna | 460.3 | 8.4 |
| 2Cat_A36_AbCob_H+2_IgnViga | 448.3 | 7.9 |
| 2Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna | 420.3 | 9.4 |
| 2Cat_A36_AbFach_H_IgnViga | 400.6 | 8.3 |
| 2Cat_A36_AbFach_H+2_IgnColuna | 395.4 | 8.0 |
| 2Cat_A36_AbFach_H+2_IgnViga | 379.2 | 7.1 |
| 2Cat_A36_AbFachCob_H_IgnColuna | 277.5 | 7.9 |
| 2Cat_A36_AbFachCob_H_IgnViga | 269.2 | 7.8 |
| 2Cat_A36_AbFachCob_H+2_IgnColuna | 243.7 | 6.7 |
| 2Cat_A36_AbFachCob_H+2_IgnViga | 236.1 | 6.4 |
| 3Cat_A9_AbCob_H_IgnColuna | 189.9 | 2.2 |
| 3Cat_A9_AbCob_H_IgnViga | 190.5 | 2.0 |
| 3Cat_A9_AbCob_H+2_IgnColuna | 178.4 | 1.8 |
| 3Cat_A9_AbCob_H+2_IgnViga | 178.8 | 1.7 |
| 3Cat_A9_AbFach_H_IgnColuna | 166.5 | 2.3 |
| 3Cat_A9_AbFach_H_IgnViga | 160.9 | 2.1 |

| Cenário | Temperatura máxima da camada superior (ºC) | Fluxo de calor por radiação (kW/m$^2$) |
|---|---|---|
| 3Cat_A9_AbFach_H+2_IgnColuna | 156.3 | 1.9 |
| 3Cat_A9_AbFach_H+2_IgnViga | 152.7 | 1.8 |
| 3Cat_A9_AbFachCob_H_IgnColuna | 122.9 | 2.2 |
| 3Cat_A9_AbFachCob_H_IgnViga | 117.6 | 2.1 |
| 3Cat_A9_AbFachCob_H+2_IgnColuna | 108.7 | 1.8 |
| 3Cat_A9_AbFachCob_H+2_IgnViga | 104.7 | 1.7 |
| 3Cat_A20_AbCob_H_IgnColuna | 352.0 | 4.9 |
| 3Cat_A20_AbCob_H_IgnViga | 346.7 | 4.5 |
| 3Cat_A20_AbCob_H+2_IgnColuna | 328.1 | 4.2 |
| 3Cat_A20_AbCob_H+2_IgnViga | 325.6 | 3.9 |
| 3Cat_A20_AbFach_H_IgnColuna | 290.2 | 5.1 |
| 3Cat_A20_AbFach_H_IgnViga | 277.6 | 4.7 |
| 3Cat_A20_AbFach_H+2_IgnColuna | 273.6 | 4.3 |
| 3Cat_A20_AbFach_H+2_IgnViga | 263.5 | 3.9 |
| 3Cat_A20_AbFachCob_H_IgnColuna | 199.4 | 4.9 |
| 3Cat_A20_AbFachCob_H_IgnViga | 191.2 | 4.6 |
| 3Cat_A20_AbFachCob_H+2_IgnColuna | 175.1 | 3.9 |
| 3Cat_A20_AbFachCob_H+2_IgnViga | 168.8 | 3.7 |
| 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna | 568.8 | 13.6 |
| 3Cat_A36_AbCob_H_IgnViga | 566.0 | 13.7 |
| 3Cat_A36_AbCob_H+2_IgnColuna | 530.8 | 11.0 |
| 3Cat_A36_AbCob_H+2_IgnViga | 526.2 | 12.0 |
| 3Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna | 470.3 | 9.4 |
| 3Cat_A36_AbFach_H_IgnViga | 448.9 | 8.3 |
| 3Cat_A36_AbFach_H+2_IgnColuna | 439.7 | 8.0 |
| 3Cat_A36_AbFach_H+2_IgnViga | 422.3 | 7.1 |
| 3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnColuna | 298.4 | 7.9 |
| 3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnViga | 286.0 | 7.8 |
| 3Cat_A36_AbFachCob_H+2_IgnColuna | 257.9 | 6.7 |
| 3Cat_A36_AbFachCob_H+2_IgnViga | 248.5 | 6.4 |

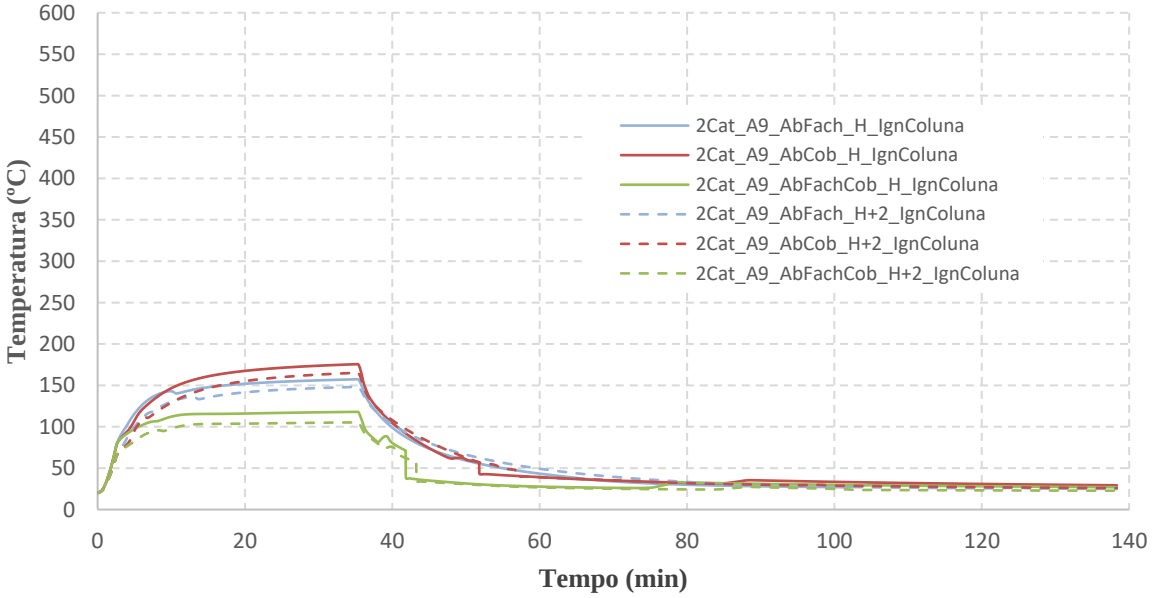



Figura A.1 – Temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para os cenários da 2ª categoria de risco, área de incêndio de 9 $m^2$ e ignição junto a uma coluna

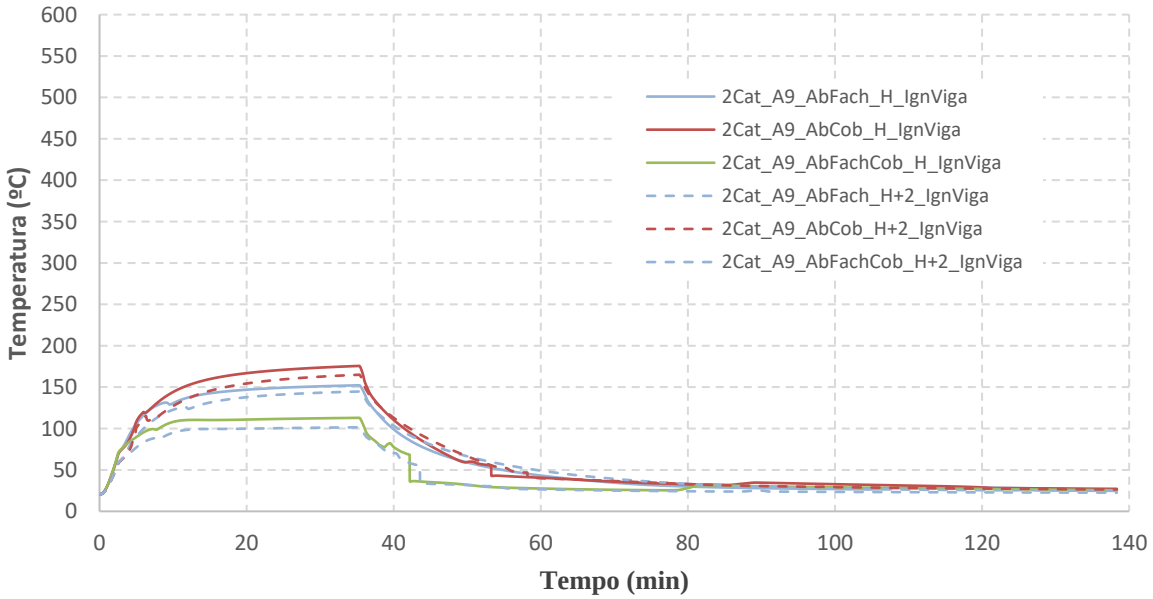



Figura A.2 – Temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para os cenários da 2ª categoria de risco, área de incêndio de 9 $m^2$ e ignição junto a uma viga

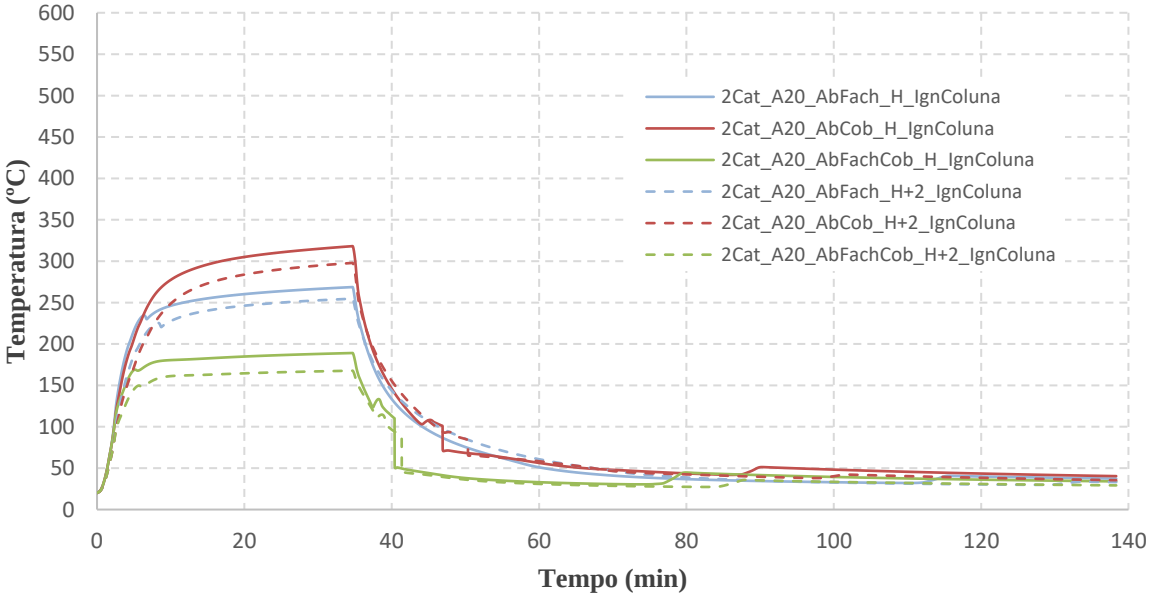



Figura A.3 – Temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para os cenários da 2ª categoria de risco, área de incêndio de 20 m$^2$ e ignição junto a uma coluna

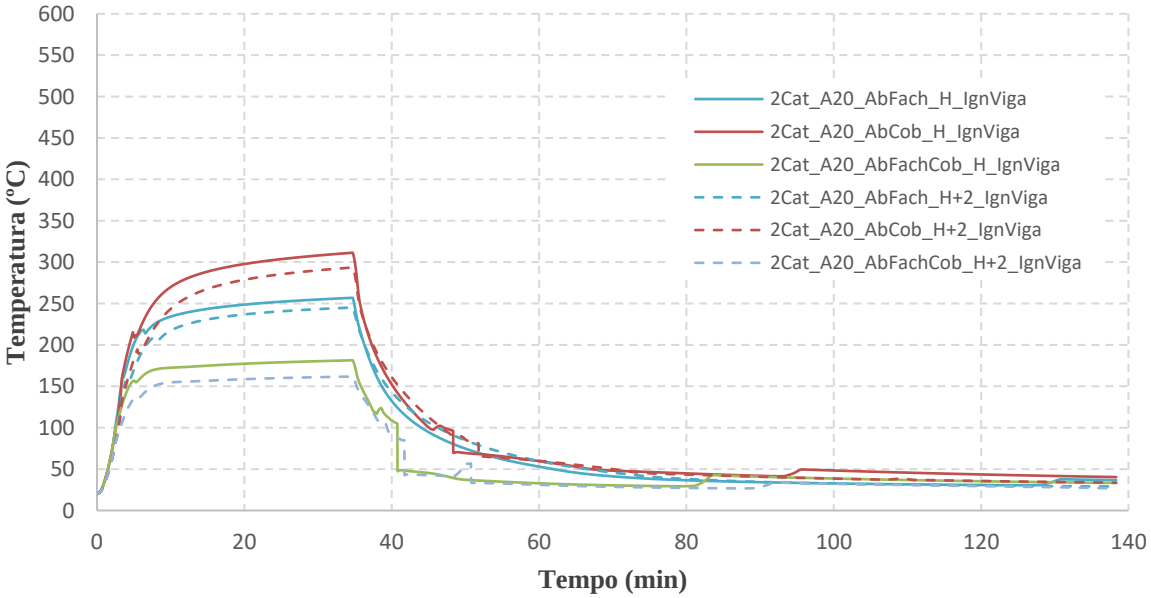



Figura A.4 – Temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para os cenários da 2ª categoria de risco, área de incêndio de 20 m$^2$ e ignição junto a uma viga

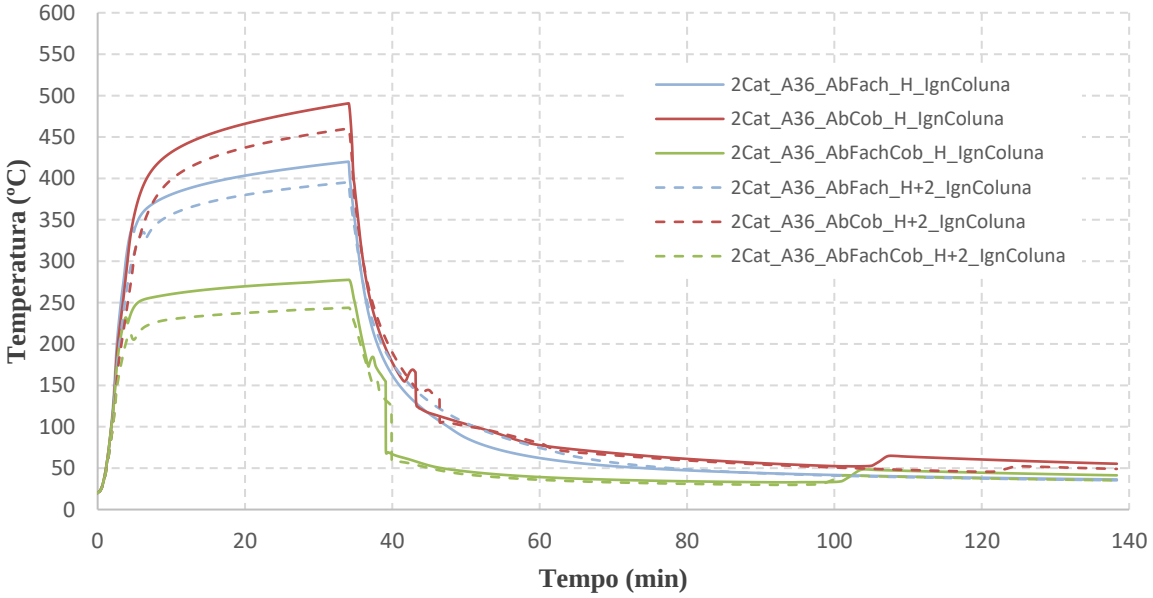



Figura A.5 – Temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para os cenários da 2ª categoria de risco, área de incêndio de 36 $m^2$ e ignição junto a uma coluna

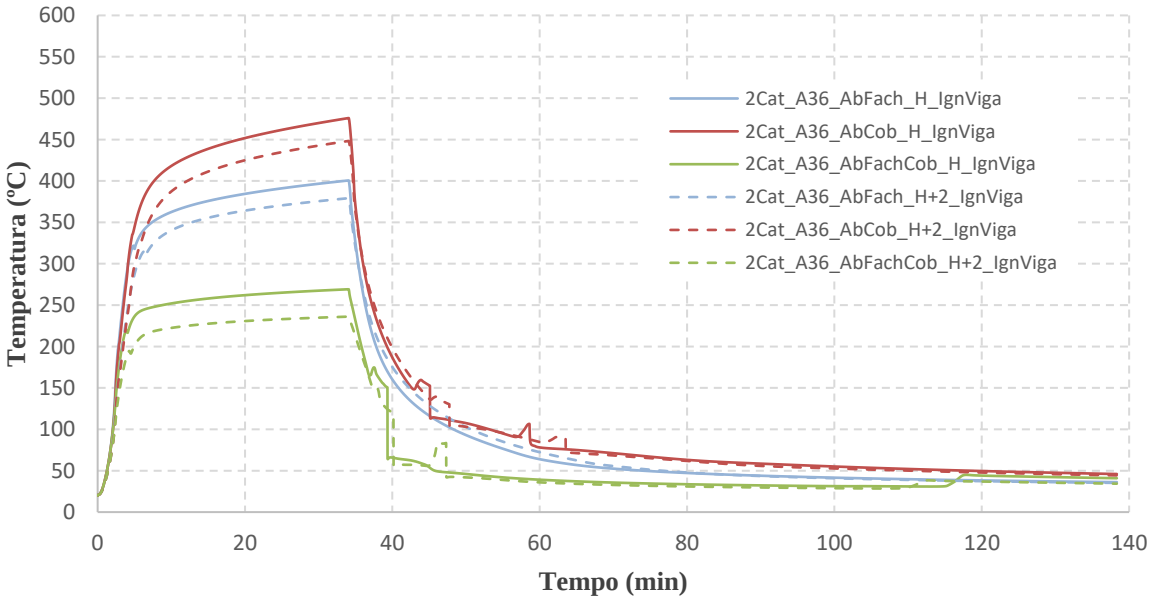



Figura A.6 – Temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para os cenários da 2ª categoria de risco, área de incêndio de 36 $m^2$ e ignição junto a uma viga

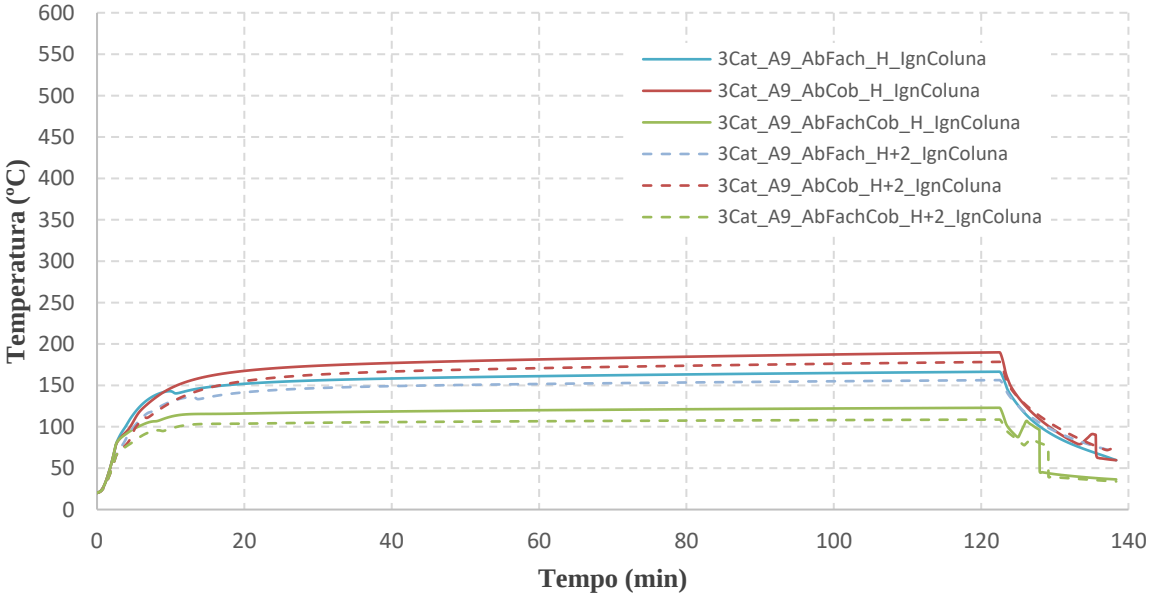



Figura A.7 – Temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para os cenários da 3ª categoria de risco, área de incêndio de 9 m$^2$ e ignição junto a uma coluna

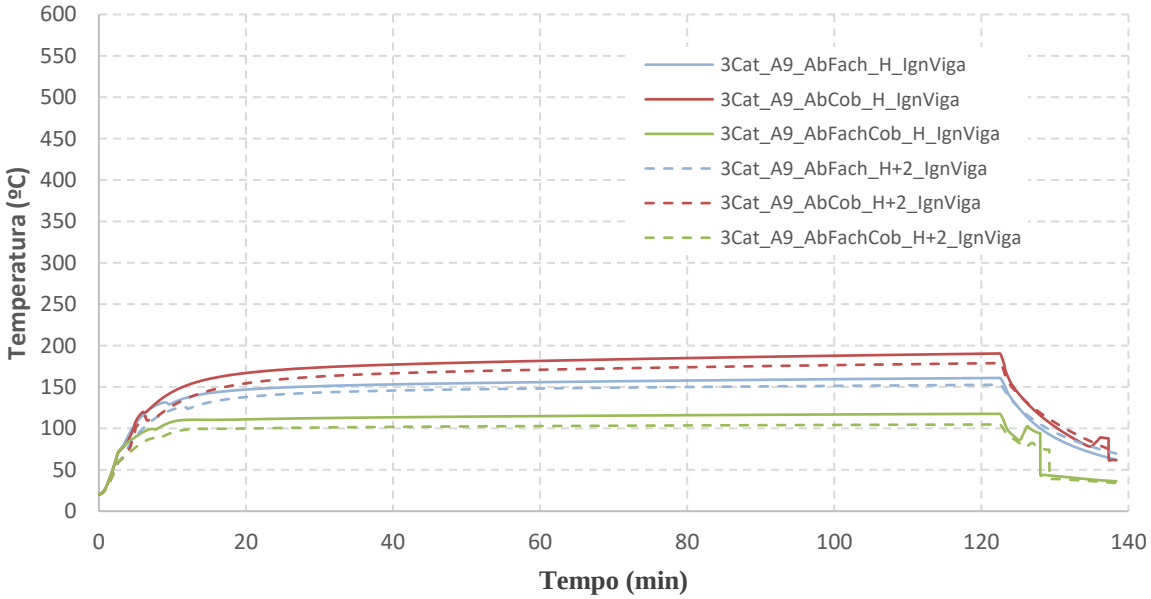



Figura A.8 – Temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para os cenários da 3ª categoria de risco, área de incêndio de 9 m$^2$ e ignição junto a uma viga

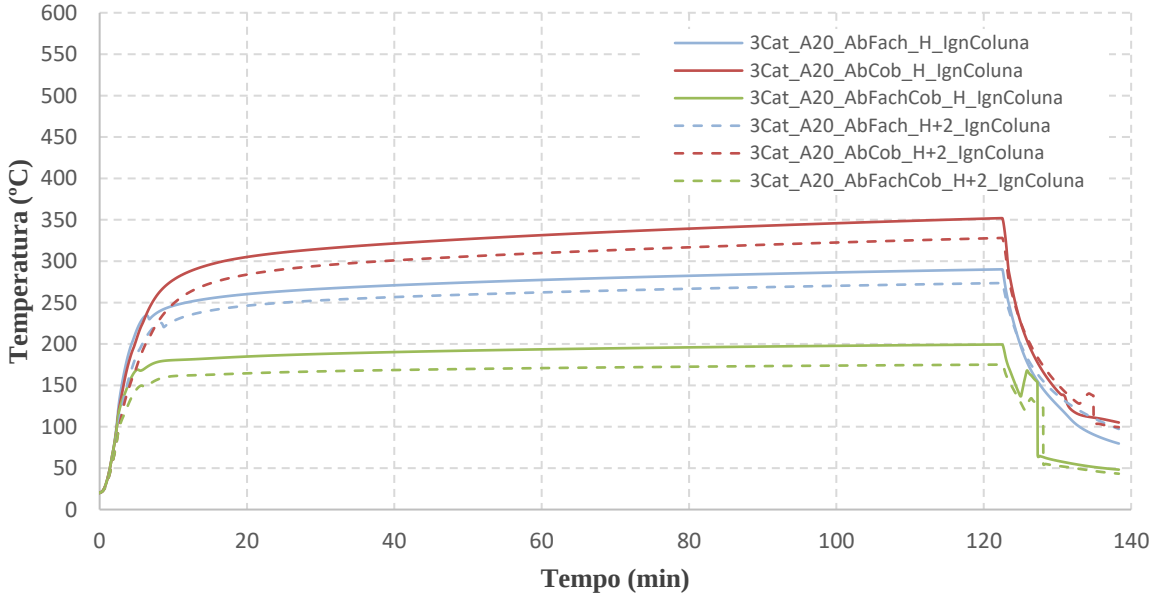



Figura A.9 – Temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para os cenários da 3ª categoria de risco, área de incêndio de 20 m$^2$ e ignição junto a uma coluna

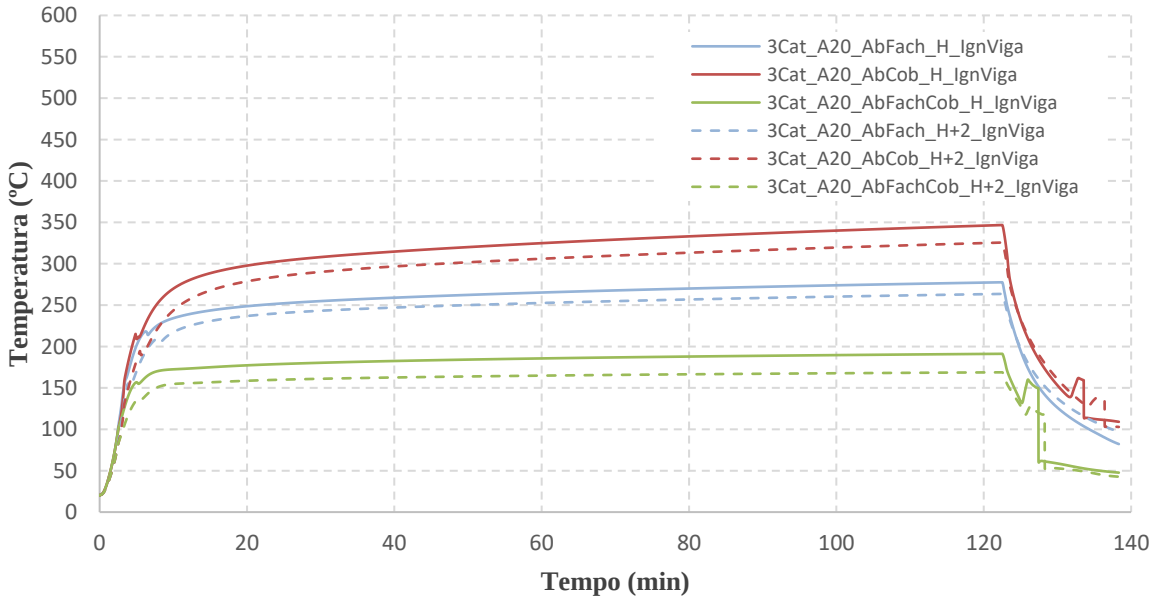



Figura A.10 – Temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para os cenários da 3ª categoria de risco, área de incêndio de 20 m$^2$ e ignição junto a uma viga

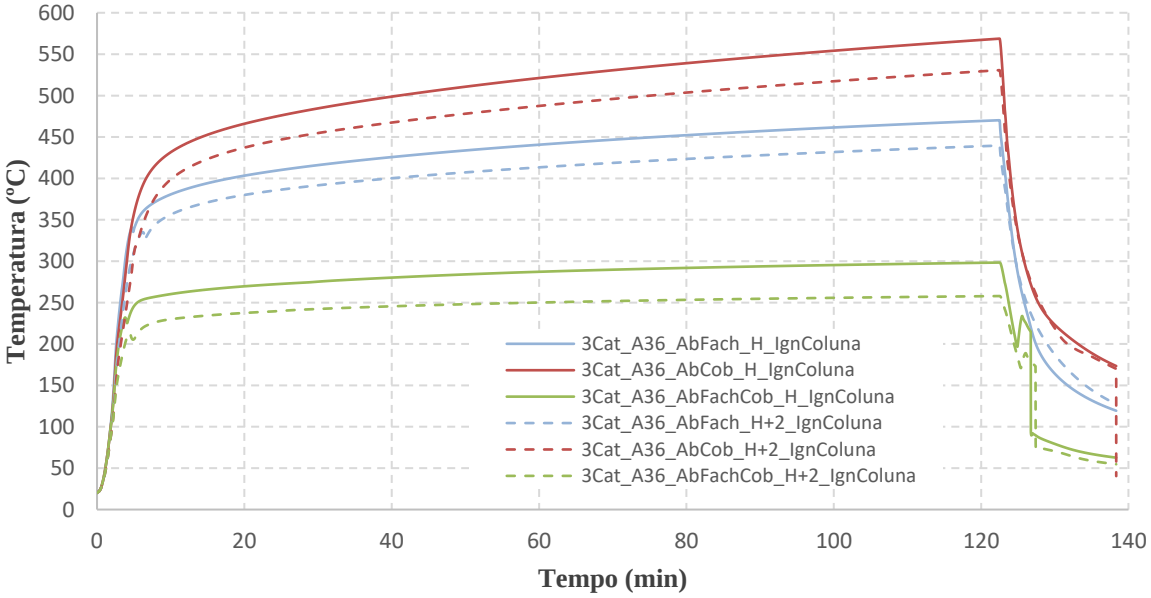



Figura A.11 – Temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para os cenários da 3ª categoria de risco, área de incêndio de 36 m$^2$ e ignição junto a uma coluna

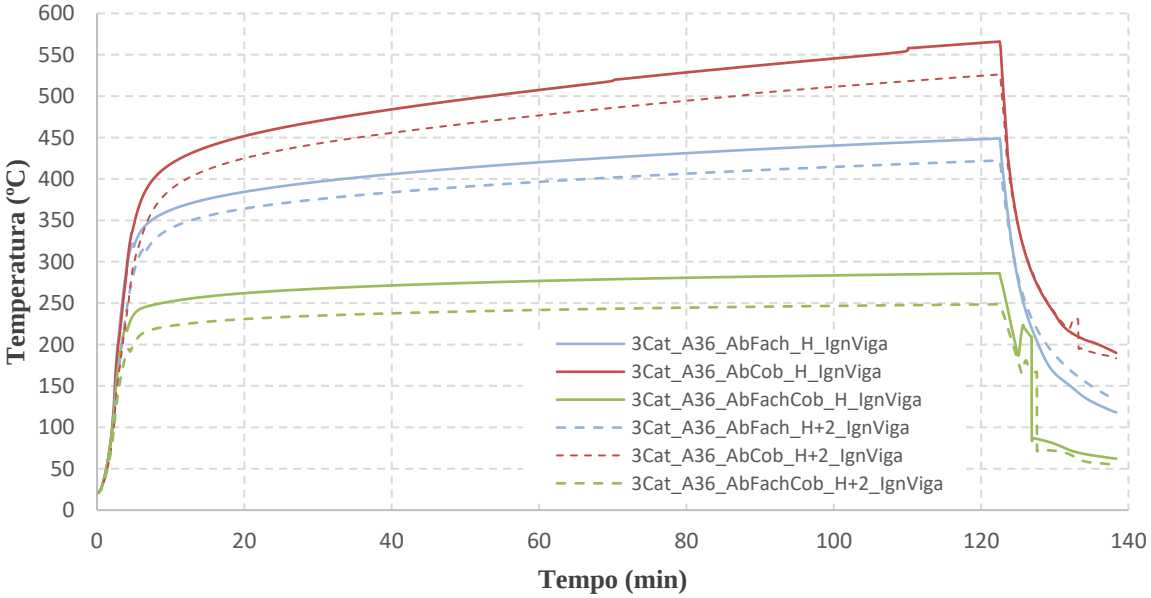



Figura A.12 – Temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para os cenários da 3ª categoria de risco, área de incêndio de 36 m$^2$ e ignição junto a uma viga

# ANEXO B.

## II. Resultados obtidos através do programa FDS

Quadro B.1 – Temperatura máxima obtida nos sensores e fluxo de calor por radiação para os cenários simulados com auxílio do programa FDS

| Cenário | Temperatura máxima nos sensores (ºC) | | Fluxo de calor por radiação (kW/m$^2$) | |
|---|---|---|---|---|
| | Média | Quantilho 80% | Média | Quantilho 80% |
| 3Cat_A20_AbCob_H_IgnColuna | 273.1 | 343.7 | 3.5 | 4.0 |
| 3Cat_A20_AbCob_H_IgnViga | 248.0 | 310.3 | 5.1 | 5.8 |
| 3Cat_A20_AbFach_H_IgnColuna | 358.1 | 392.4 | 2.9 | 3.2 |
| 3Cat_A20_AbFach_H_IgnViga | 351.0 | 381.3 | 3.6 | 3.9 |
| 3Cat_A20_AbFachCob_H_IgnColuna | 277.4 | 299.4 | 2.0 | 2.0 |
| 3Cat_A20_AbFachCob_H_IgnViga | 261.3 | 286.3 | 2.1 | 2.1 |
| 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna | 233.0 | 294.6 | 5.0 | 5.9 |
| 3Cat_A36_AbCob_H_IgnViga | 251.7 | 312.5 | 5.0 | 5.8 |
| 3Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna | 404.1 | 424.1 | 4.2 | 4.7 |
| 3Cat_A36_AbFach_H_IgnViga | 523.3 | 564.2 | 5.3 | 6.1 |
| 3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnColuna | 345.3 | 385.2 | 2.4 | 2.5 |
| 3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnViga | 384.4 | 415.3 | 2.6 | 2.8 |

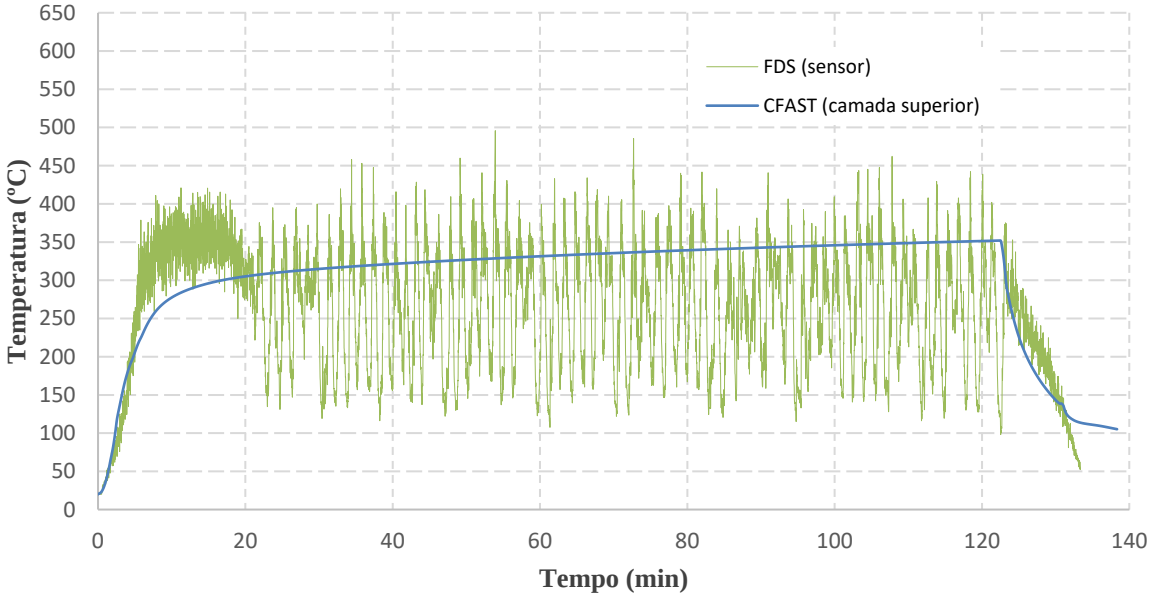



Figura B.1 – Temperatura mais desfavorável medida nos sensores e temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para o cenário 3Cat_A20_AbCob_H_IgnColuna

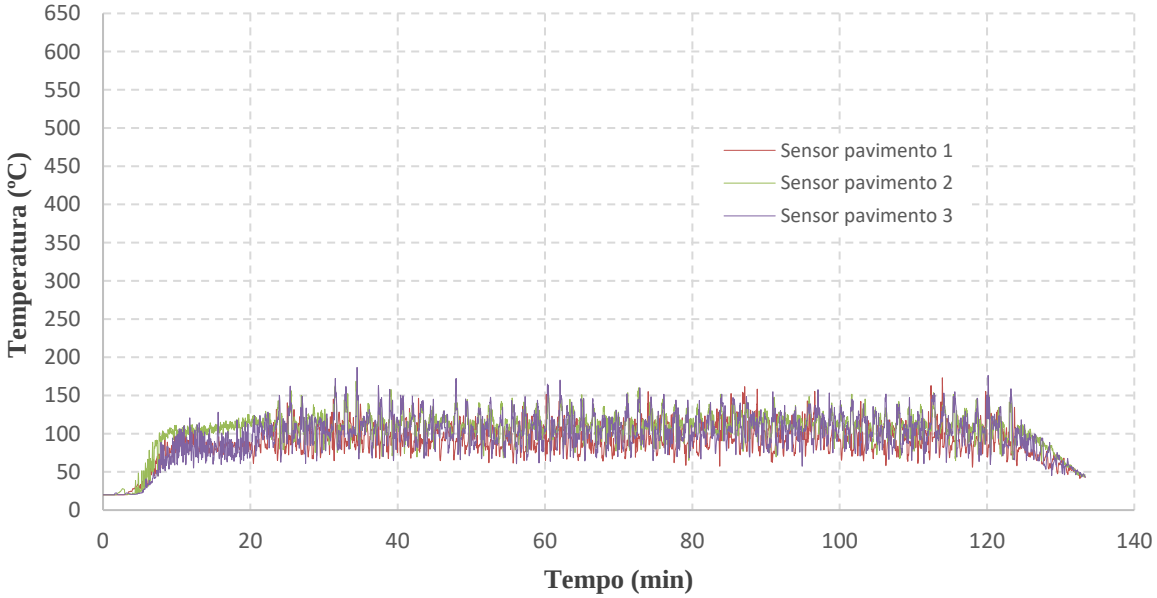



Figura B.2 – Temperatura nos sensores a 1 m do pavimento para o cenário 3Cat_A20_AbCob_H_IgnColuna

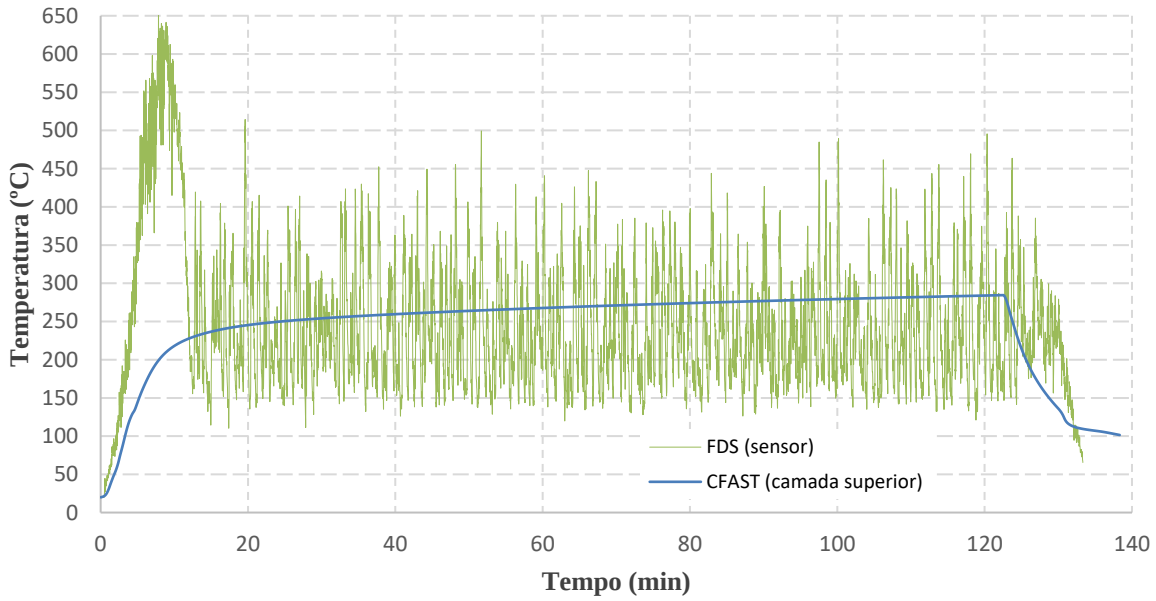



Figura B.3 – Temperatura mais desfavorável medida nos sensores e temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para o cenário 3Cat_A20_AbCob_H_IgnViga

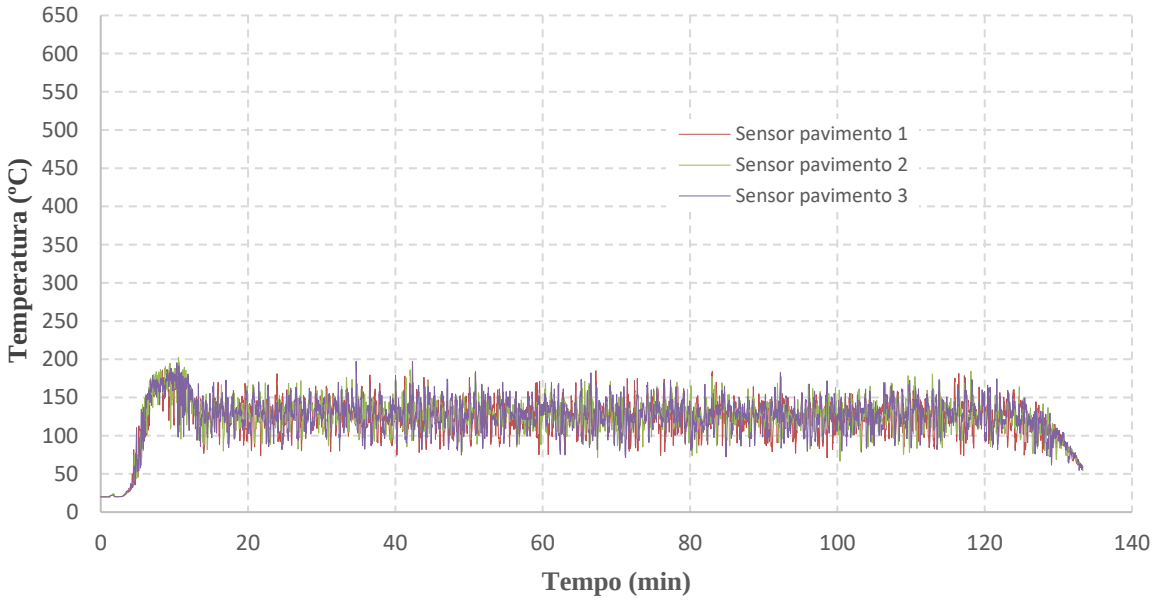



Figura B.4 – Temperatura nos sensores a 1 m do pavimento para o cenário 3Cat_A20_AbCob_H_IgnViga

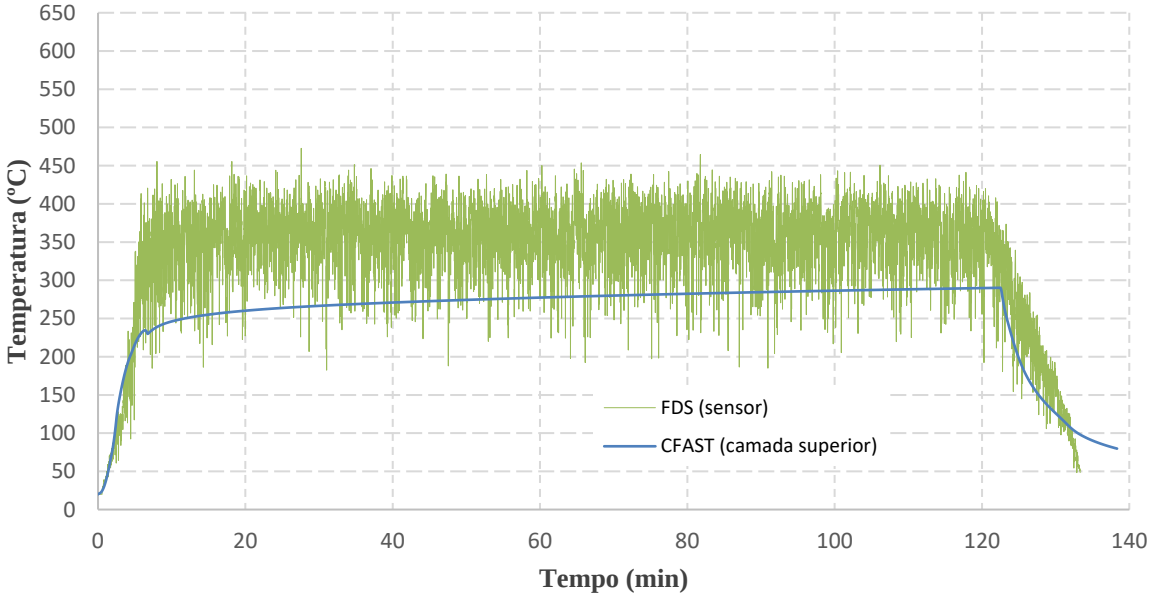



Figura B.5 – Temperatura mais desfavorável medida nos sensores e temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para o cenário 3Cat_A20_AbFach_H_IgnColuna

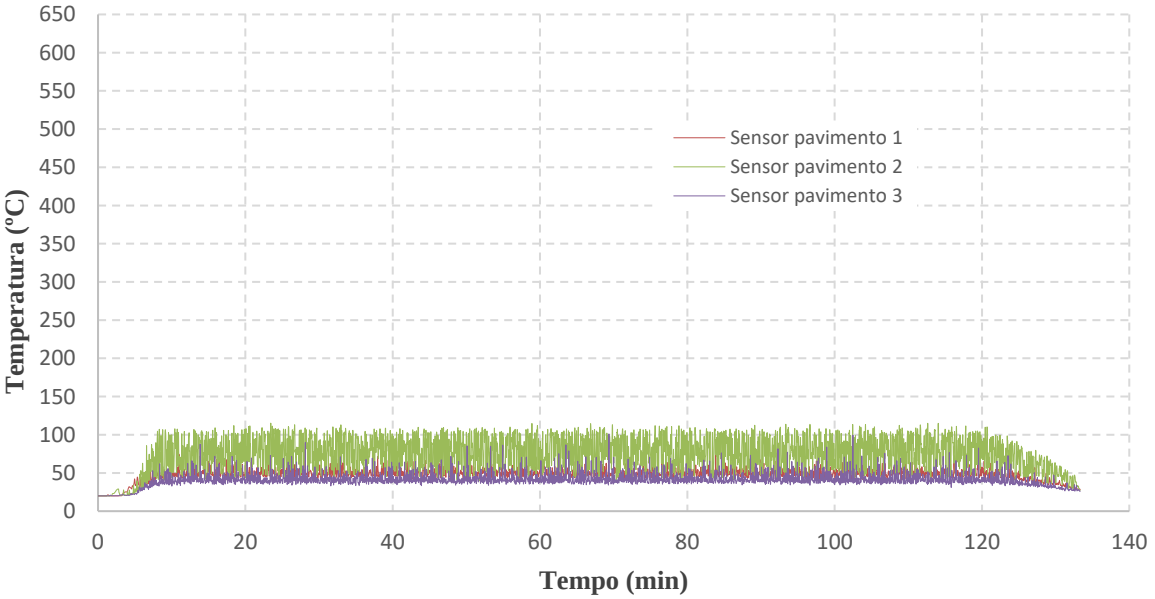



Figura B.6 – Temperatura nos sensores a 1 m do pavimento para o cenário 3Cat_A20_AbFach_H_IgnColuna

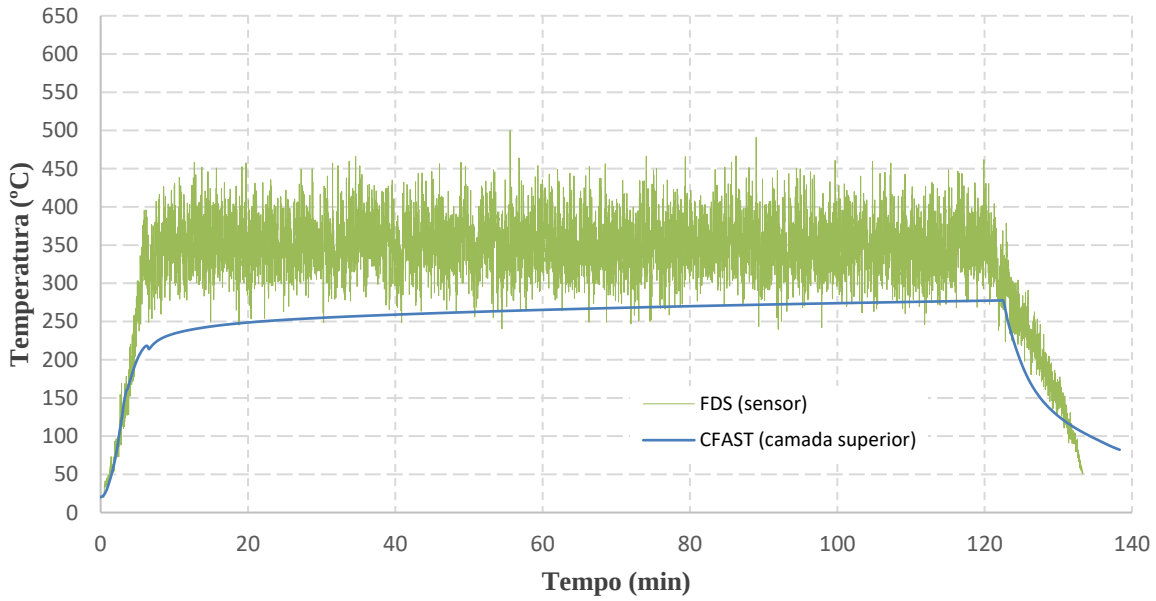



Figura B.7 – Temperatura mais desfavorável medida nos sensores e temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para o cenário 3Cat_A20_AbFach_H_IgnViga

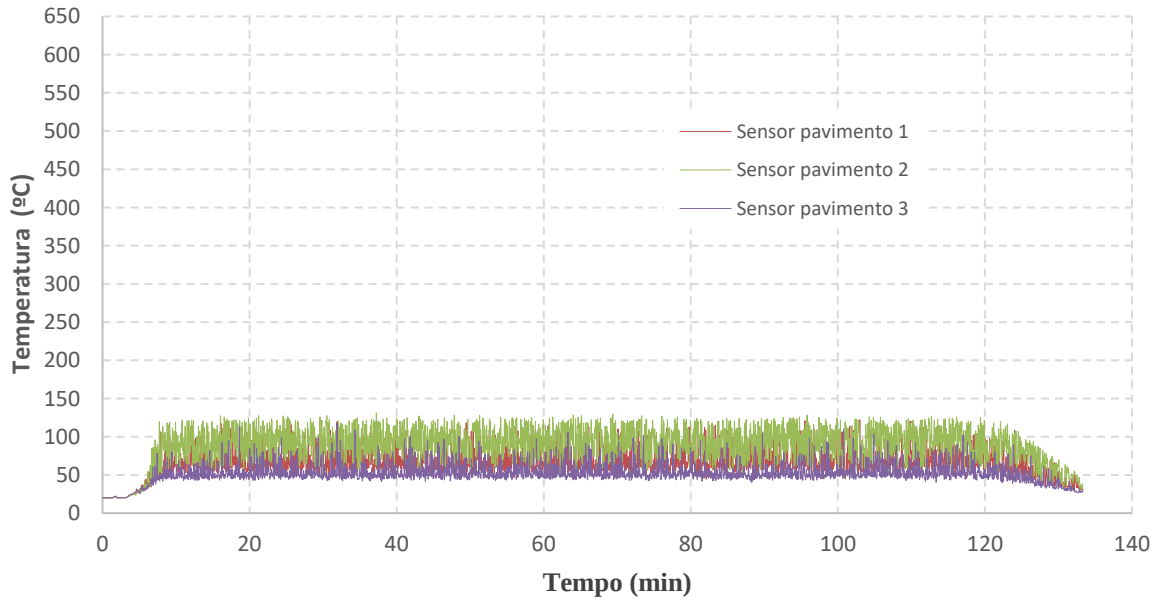



Figura B.8 – Temperatura nos sensores a 1 m do pavimento para o cenário 3Cat_A20_AbFach_H_IgnViga

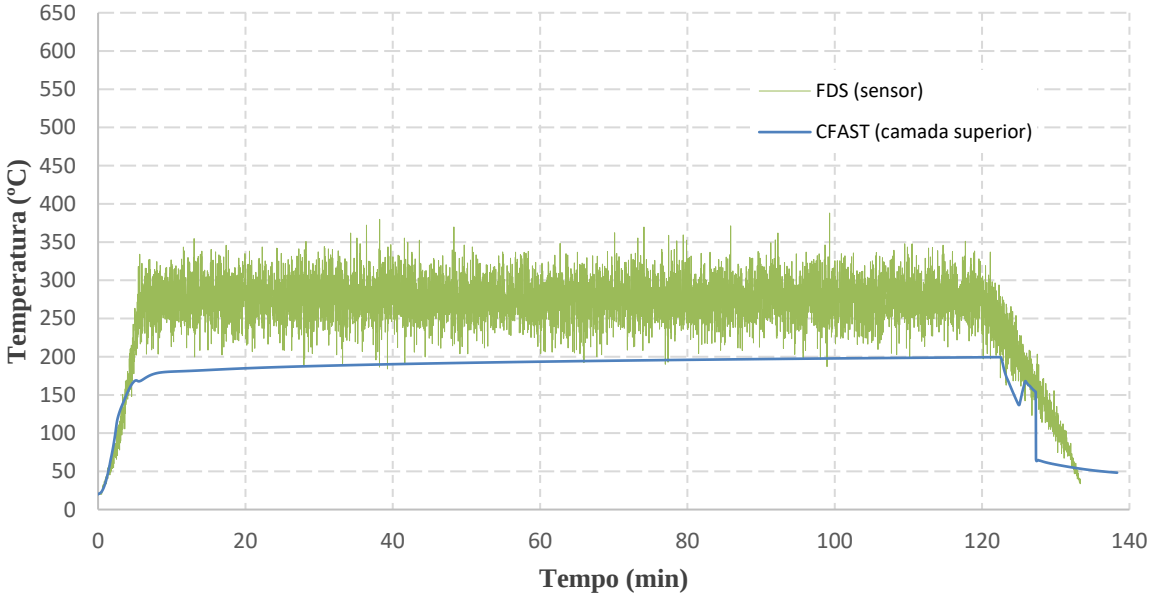



Figura B.9 – Temperatura mais desfavorável medida nos sensores e temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para o cenário 3Cat_A20_AbFachCob_H_IgnColuna

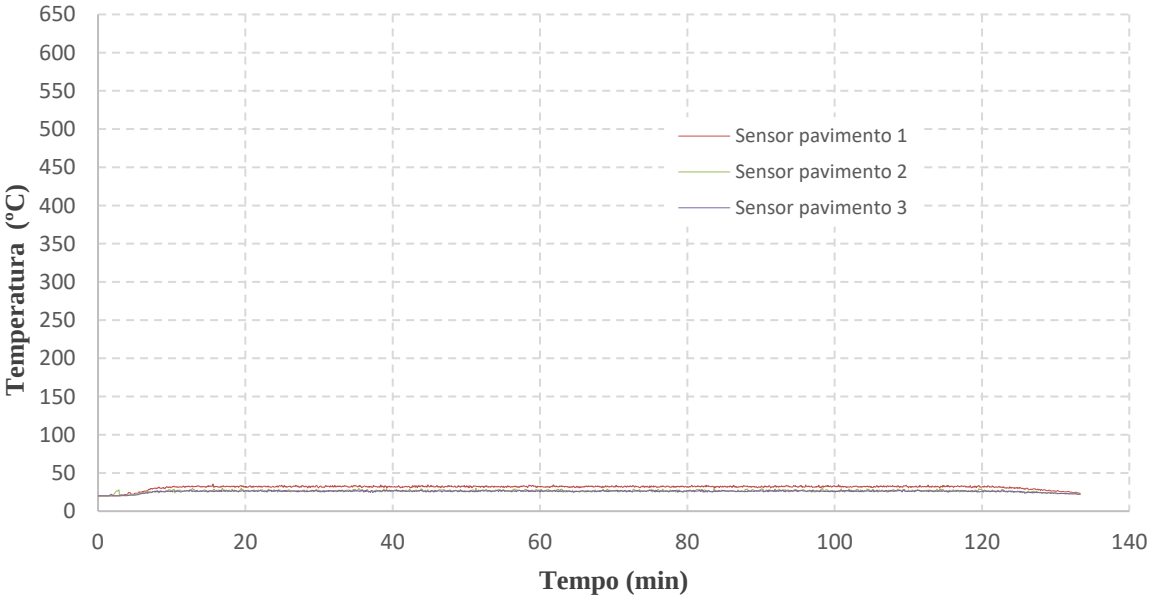



Figura B.10 – Temperatura nos sensores a 1 m do pavimento para o cenário 3Cat_A20_AbFachCob_H_IgnColuna

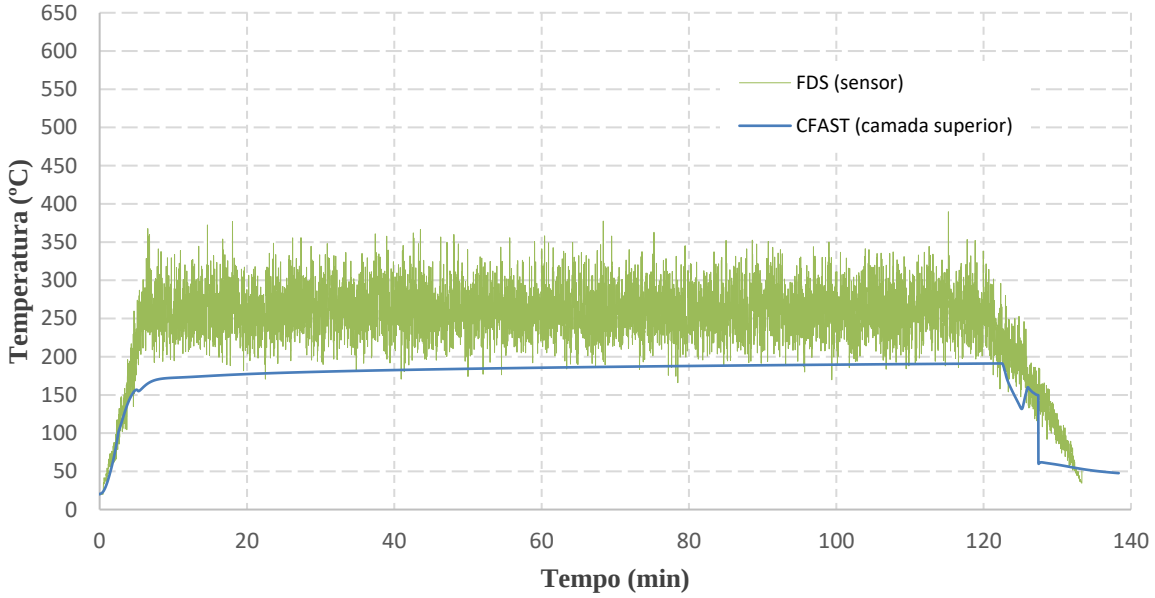



Figura B.11 – Temperatura mais desfavorável medida nos sensores e temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para o cenário 3Cat_A20_AbFachCob_H_IgnViga

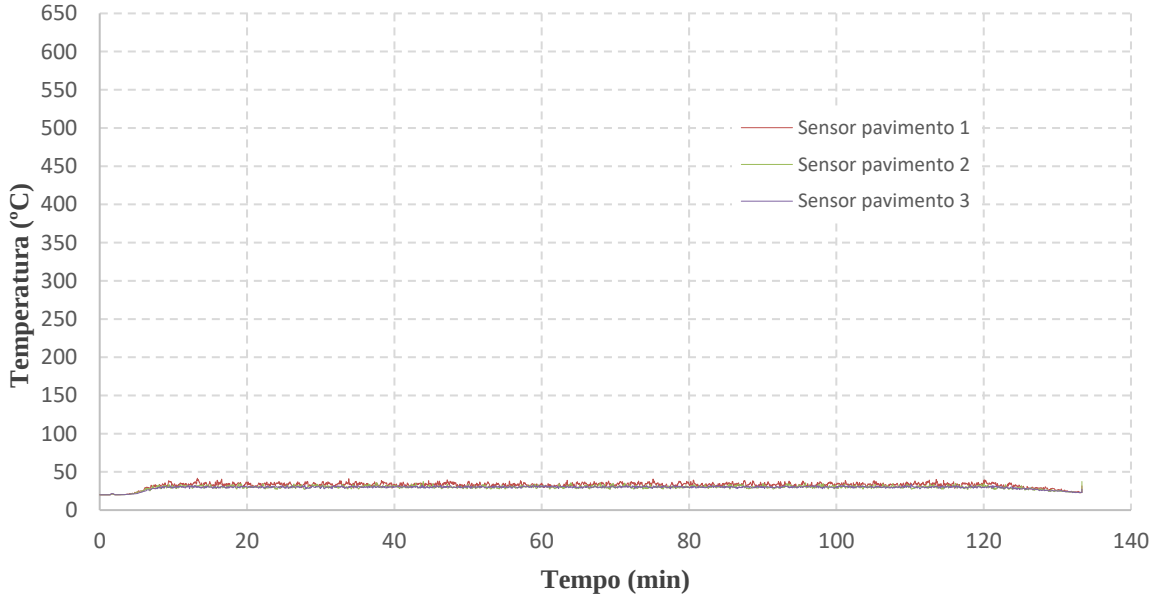



Figura B.12 – Temperatura nos sensores a 1 m do pavimento para o cenário 3Cat_A20_AbFachCob_H_IgnViga

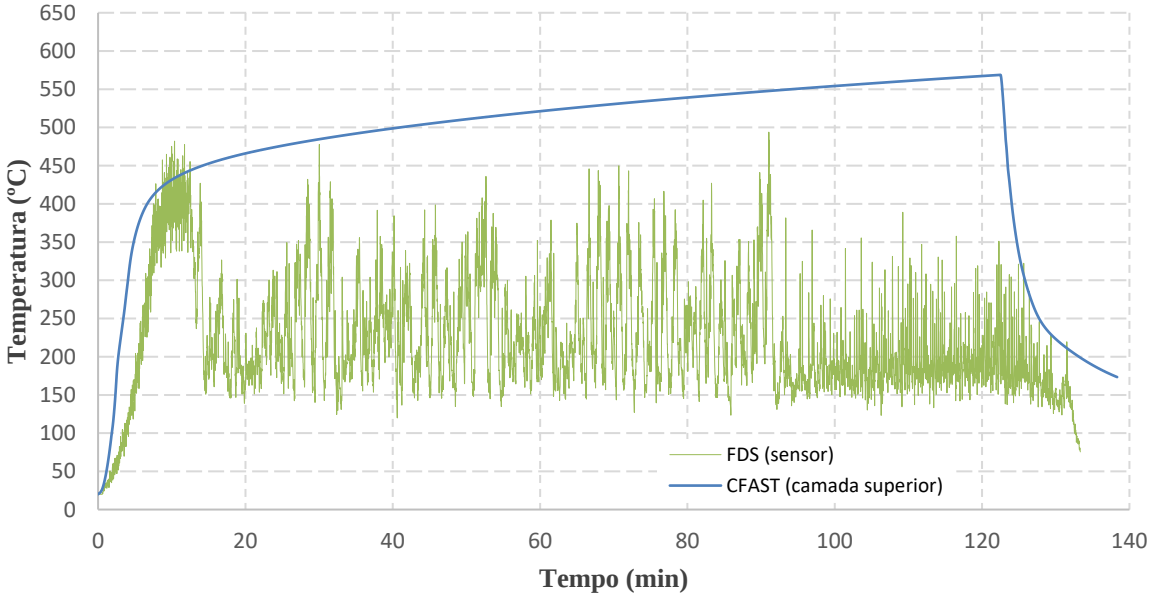



Figura B.13 – Temperatura mais desfavorável medida nos sensores e temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna

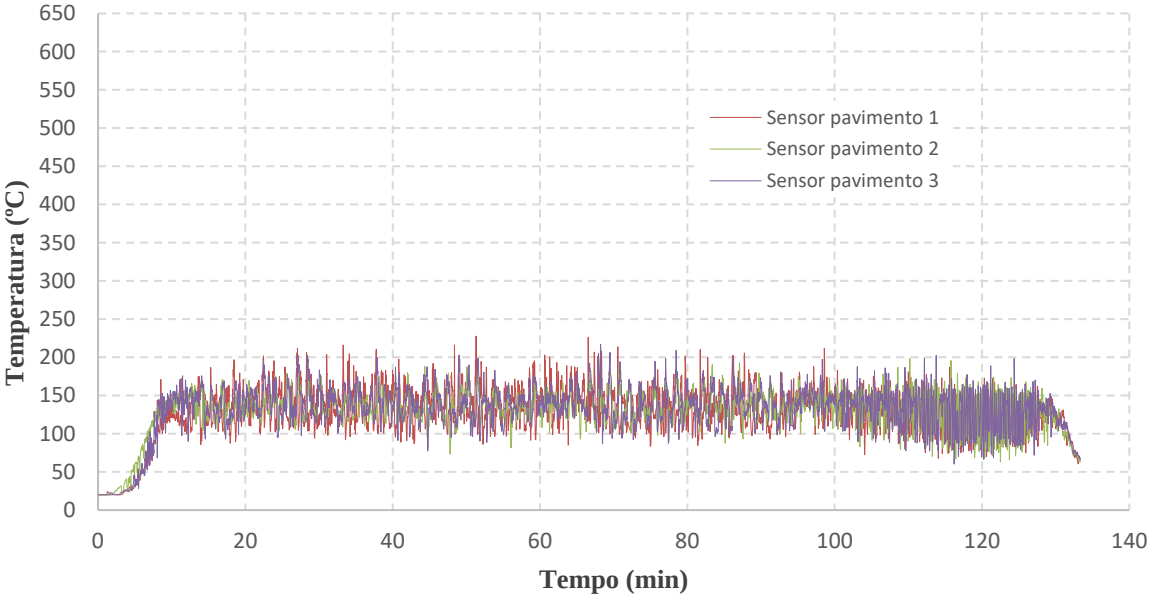



Figura B.14 – Temperatura nos sensores a 1 m do pavimento para o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnColuna

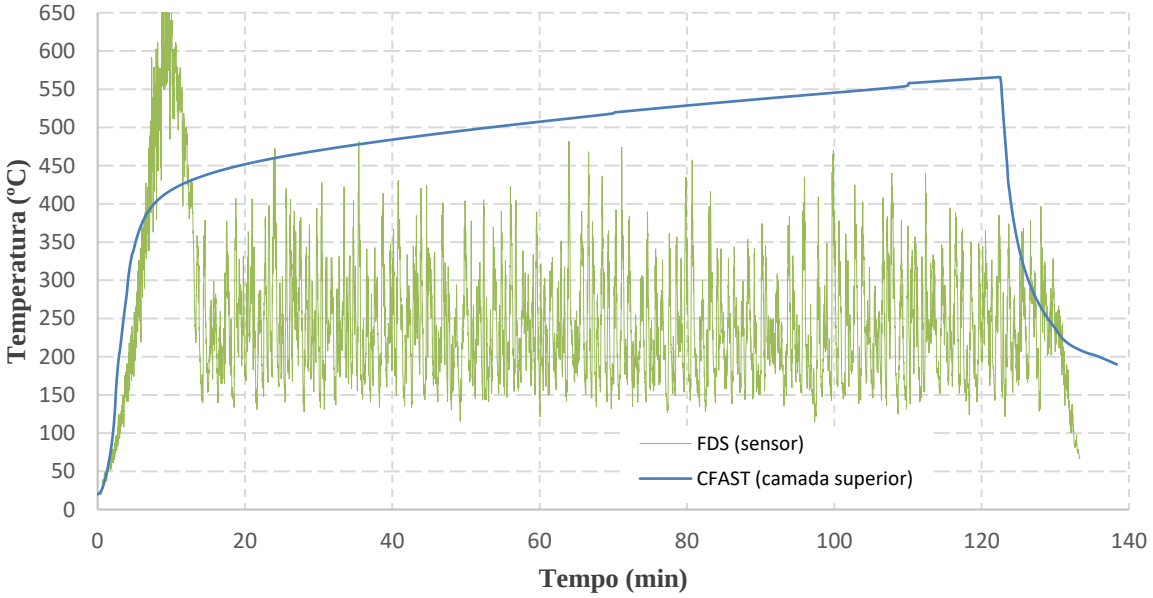



Figura B.15 – Temperatura mais desfavorável medida nos sensores e temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnViga

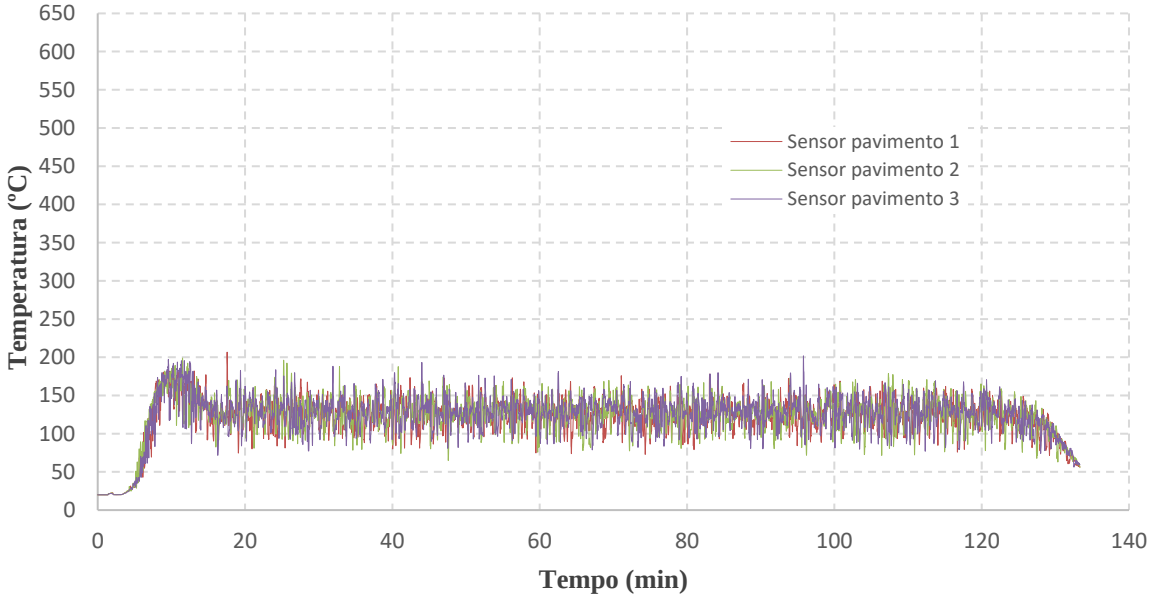



Figura B.16 – Temperatura nos sensores a 1 m do pavimento para o cenário 3Cat_A36_AbCob_H_IgnViga

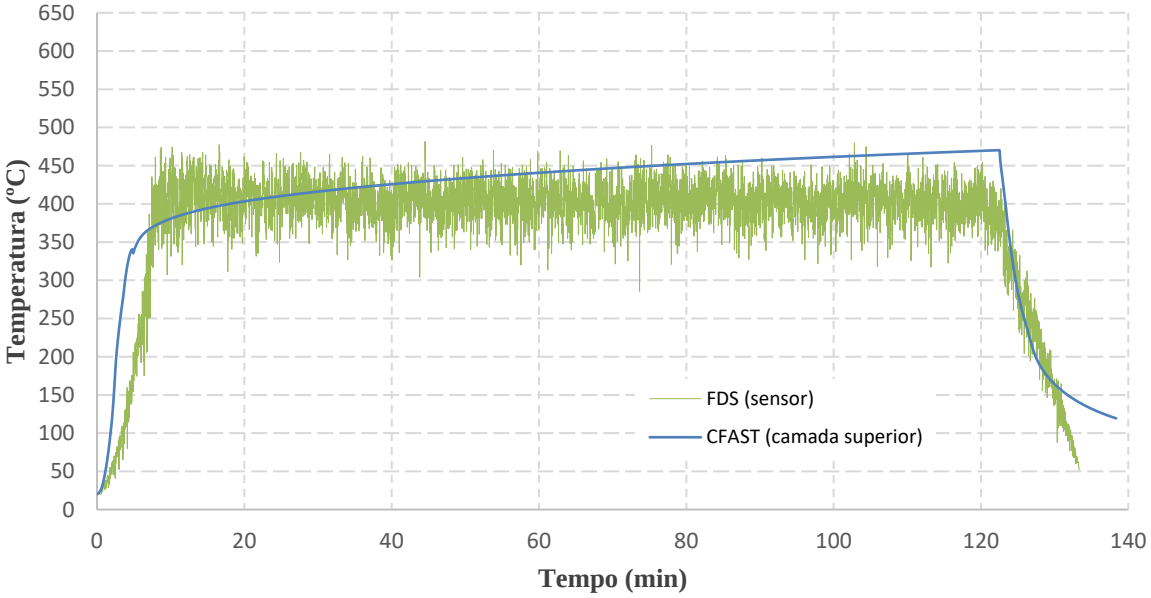



Figura B.17 – Temperatura mais desfavorável medida nos sensores e temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para o cenário 3Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna

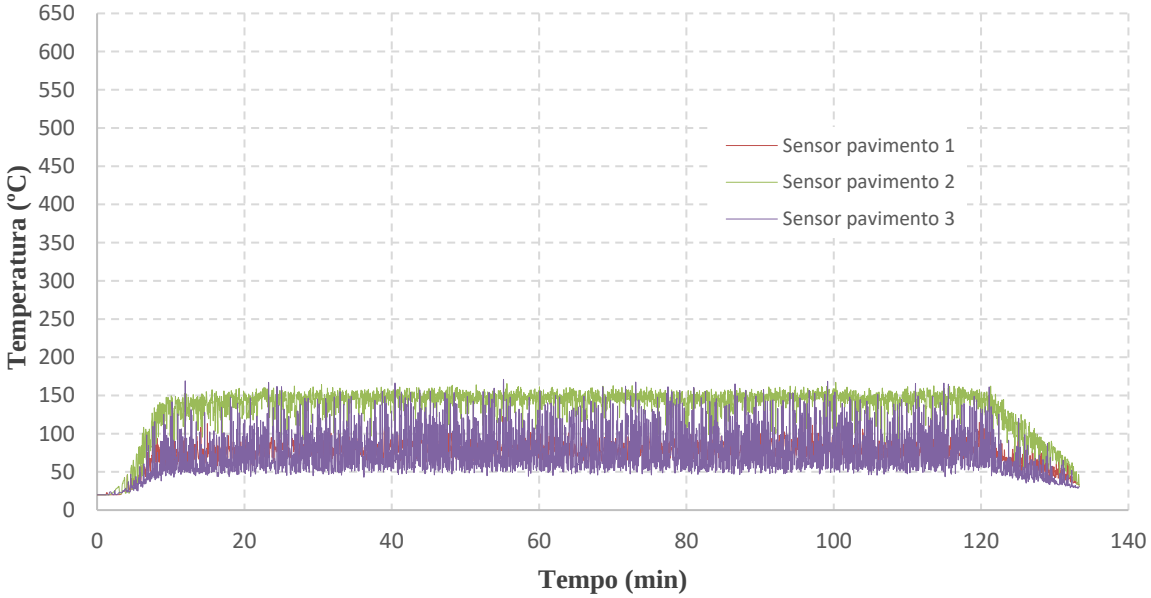



Figura B.18 – Temperatura nos sensores a 1 m do pavimento para o cenário 3Cat_A36_AbFach_H_IgnColuna

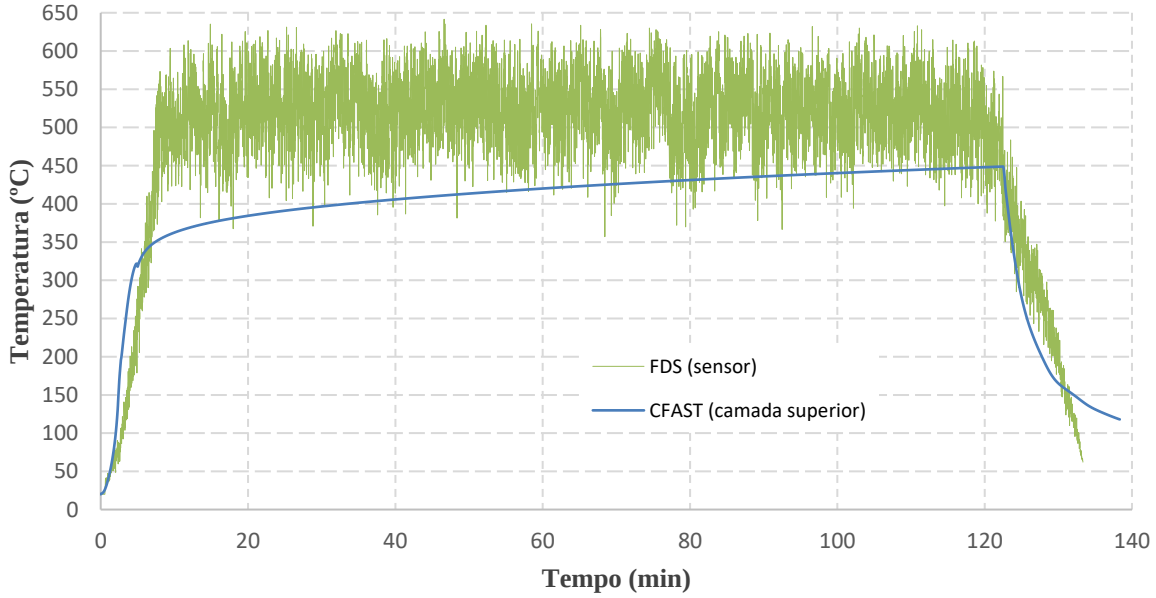



Figura B.19 – Temperatura mais desfavorável medida nos sensores e temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para o cenário 3Cat_A36_AbFach_H_IgnViga

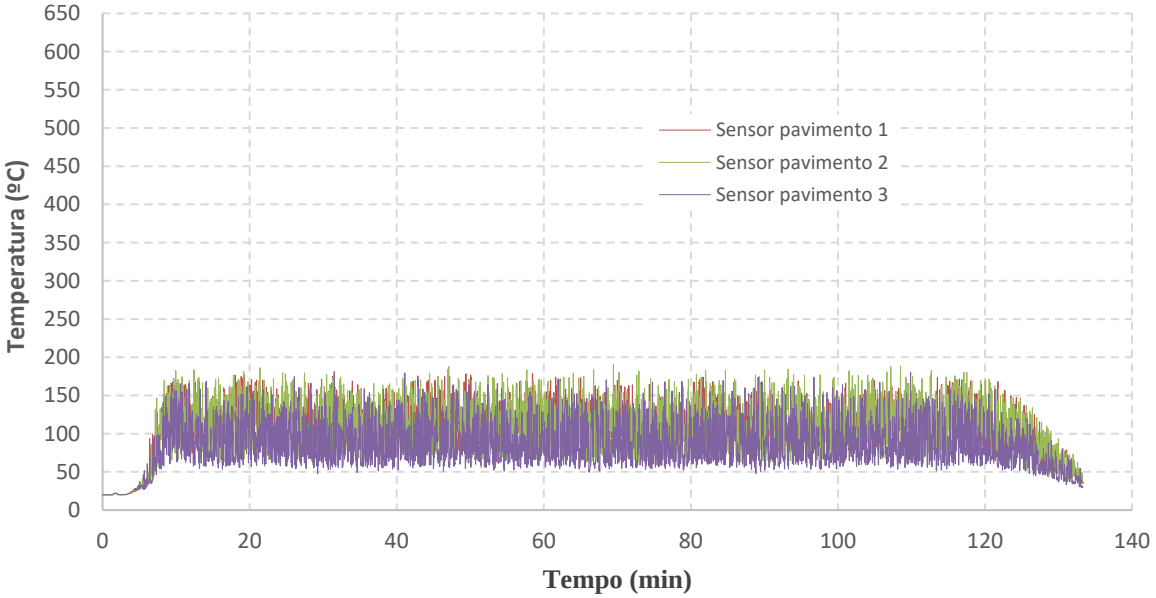



Figura B.20 – Temperatura nos sensores a 1 m do pavimento para o cenário 3Cat_A36_AbFach_H_IgnViga

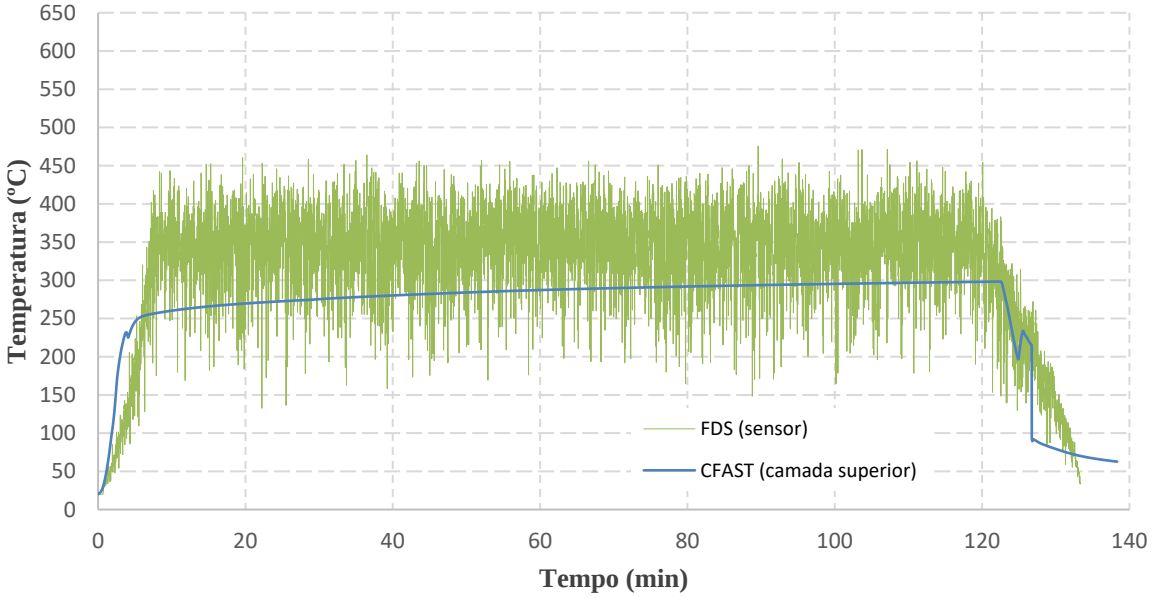



Figura B.21 – Temperatura mais desfavorável medida nos sensores e temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para o cenário 3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnColuna

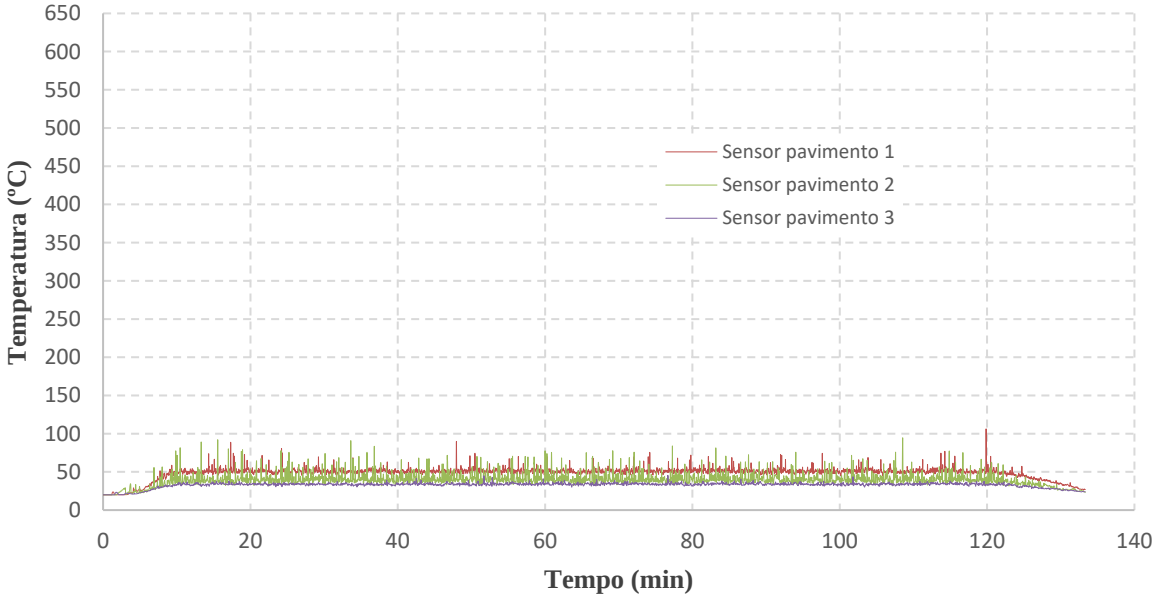



Figura B.22 – Temperatura nos sensores a 1 m do pavimento para o cenário 3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnColuna

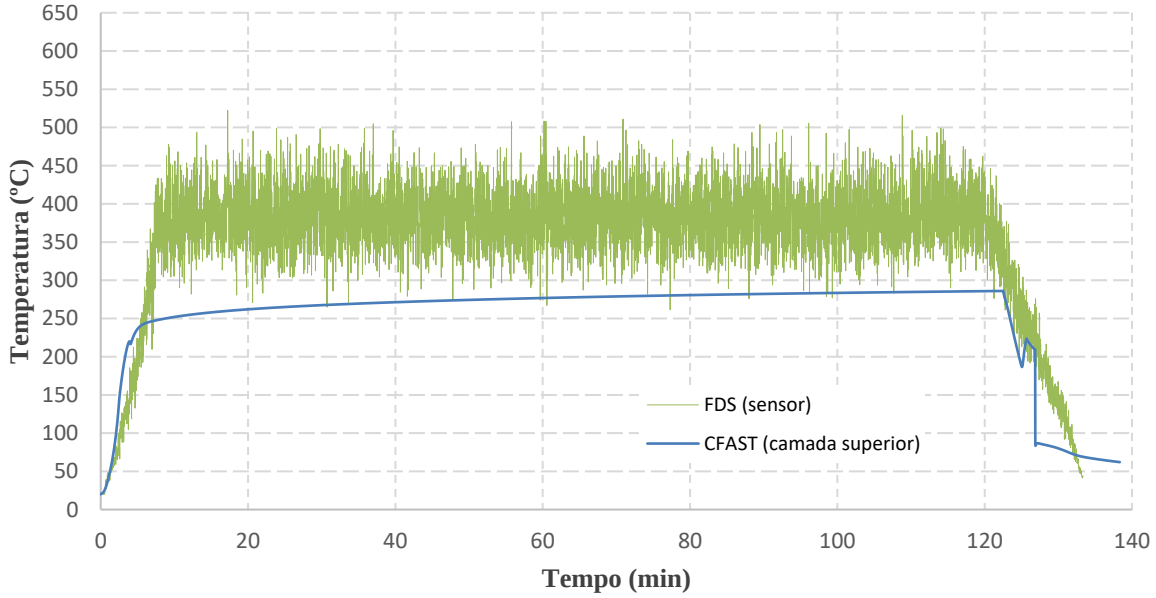



Figura B.23 – Temperatura mais desfavorável medida nos sensores e temperatura da camada superior obtida no programa CFAST para o cenário 3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnViga

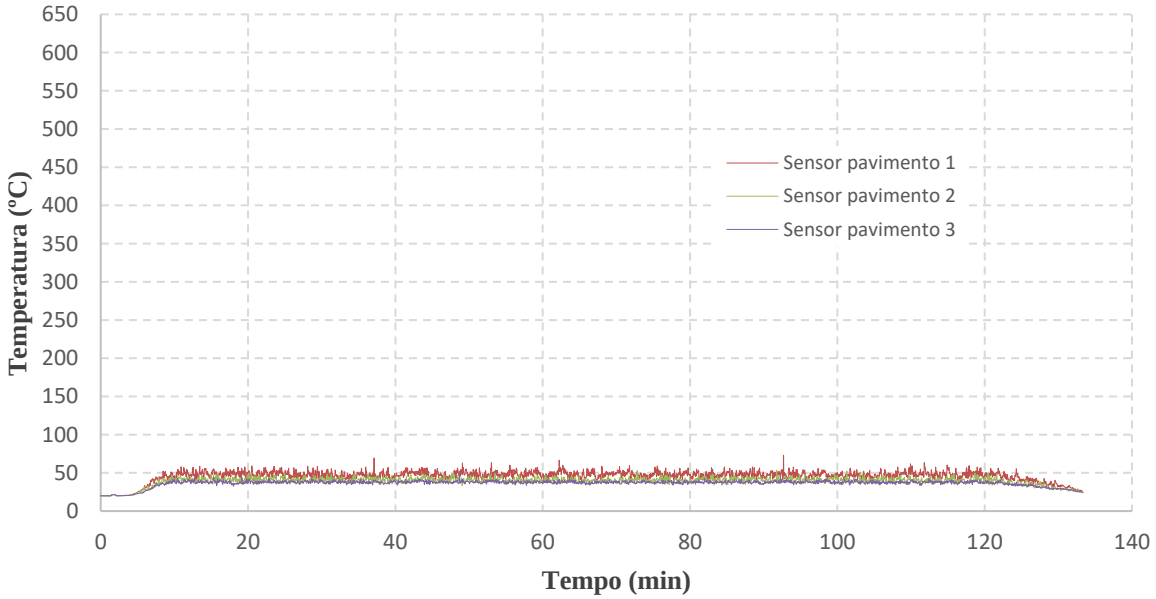



Figura B.24 – Temperatura nos sensores a 1 m do pavimento para o cenário 3Cat_A36_AbFachCob_H_IgnViga