

Modelação da Propagação de Incêndios em Edifícios – Análise do Comportamento Estrutural em Situação de Incêndio

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil – Especialização em Construção Urbana

Autor
Hugo Miguel Casimiro Nunes

Orientador
Prof. Doutor António José Pedroso de Moura Correia
Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, dezembro, 2015

“The Titanic complied with all codes.
Lawyers can make any device legal,
only engineers can make them safe.”

Prof. Vincent Brannigan
Universidade de Maryland

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor António Correia, agradeço toda a disponibilidade, entusiasmo e apoio científico na definição do rumo deste trabalho, e por despertar em mim o interesse para a engenharia de segurança contra incêndio.

Ao ISISE, Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering, agradeço as facilidades concedidas na utilização dos meios informáticos para a realização da componente numérica desta dissertação.

Aos investigadores Amit H. Varma, Ian Burgess e Spencer E. Quiel, agradeço os artigos que me disponibilizaram, e aos engenheiros Bryan Klein e Geoff Merryweather, o esclarecimento de dúvidas relativas ao Fire Dynamics Simulator.

Aos colegas de licenciatura, Paulo Moreira e Pedro Cartaxo, e de mestrado, João Pereira, Patrícia Mendes e Paula Lopes, com quem de mais perto partilhei o percurso académico, agradeço a amizade e o companheirismo.

Aos amigos Fausto, Paulo e Teresa, agradeço por acreditarem em mim e me incentivarem nos momentos menos fáceis.

Aos meus pais e irmã, agradeço a educação e todo o amor e carinho.

RESUMO

A adoção de métodos prescritivos para determinação da capacidade resistente de uma estrutura em situação de incêndio resulta frequentemente em soluções desadequadas à realidade: a resistência atribuída é menor que a real. Estas metodologias pecam por não considerarem condições reais de incêndio nem o comportamento global da estrutura. Ensaios de laboratório para este fim também não são viáveis devido aos custos associados.

Este trabalho segue uma abordagem baseada no desempenho e tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo numérico que consiga simular o comportamento real de uma estrutura em situação de incêndio.

Com o código de dinâmica computacional de fluidos Fire Dynamics Simulator, criou-se o modelo de campo de um incêndio de compartimento. No software comercial de elementos finitos ABAQUS, desenvolveu-se o modelo de um edifício de dez pisos em estrutura mista, previamente dimensionado, ao qual se aplicou o campo de temperaturas atrás obtido. Foi feita a análise térmica e mecânica da estrutura.

Palavras-chave

Modelação de Incêndio, Comportamento Estrutural, Dinâmica Computacional de Fluidos, Análise por Elementos Finitos

ABSTRACT

Minimum structural fire resistance imposed by prescriptive design methods is usually of lesser value than the actual performance of an individual building under fire. The behaviour of the entire structure as a whole is not considered. Real fire conditions are not taken into account. Full-scale fire tests are also proven not to be economically feasible as standard procedure.

The work presented in this dissertation follows a performance-based approach, with the purpose of arriving at a numerical model capable of simulating the structural response of a building under fire conditions.

A field model for a compartment fire was created with computational fluid dynamics software Fire Dynamics Simulator. A ten-storey previously designed steel-concrete composite building was modelled using commercially available finite element analysis software ABAQUS. The effects of fire from the field model were simulated with a thermal-stress analysis.

Keywords

Fire Modelling, Structural Behaviour, Computational Fluid Dynamics, Finite Element Analysis

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento do Tema.....	1
1.2. Objetivos e Metodologia	4
1.3. Estrutura da Dissertação	4
2. ESTADO DA ARTE	7
2.1. Modelação Computacional de Incêndios em Edifícios.....	7
2.2. Estruturas Metálicas e Mistas em Situação de Incêndio	12
2.3. Aplicação da Modelação Computacional de Incêndios à Análise Estrutural	18
3. DINÂMICA DE INCÊNDIOS	23
3.1. Generalidades	23
3.2. Transferência de Calor	23
3.2.1. Condução	24
3.2.2. Convecção	24
3.2.3. Radiação	24
3.3. Taxa de Libertação de Calor.....	25
3.4. Propagação	27
3.5. Incêndios de Compartmento.....	27
3.6. Curvas de Projeto	29
3.7. Propriedades dos Materiais a Elevadas Temperaturas.....	29
3.7.1. Propriedades Mecânicas	29
3.7.2. Propriedades Térmicas.....	33
4. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	35
4.1. Estrutura do Edifício.....	35
4.2. Cenário de Incêndio.....	36
5. MODELAÇÃO COMPUTACIONAL DO INCÊNDIO	39
5.1. Fire Dynamics Simulator.....	39
5.2. PyroSim	40
5.3. Volume de Controlo	41
5.4. Materiais.....	42

5.5. Envolvente do Incêndio	42
5.6. Produtos Combustíveis	44
5.6.1. Cubículo de Escritório com 2 Painéis	44
5.6.2. Cubículo de Escritório com 3 Painéis	45
5.6.3. Cadeira de Madeira	46
5.6.4. Estante de Madeira	47
5.6.5. Conjunto de Estantes Metálicas	47
5.6.6. Estação de Trabalho	49
5.6.7. Sofá Individual	50
5.6.8. Sofá Longo	51
5.6.9. Televisor	52
5.6.10. Revestimento de Paredes	53
5.6.11. Revestimento de Piso e Teto	54
5.7. Resultados	55
6. MODELAÇÃO NUMÉRICA DA ESTRUTURA SUJEITA AO INCÊNDIO	59
6.1. ABAQUS	59
6.2. Modelação Numérica	60
7. ANÁLISE DE RESULTADOS	69
7.1. Temperaturas nos elementos metálicos	69
7.2. Deformações	71
7.3. Tensões de Von Mises	73
7.4. Esforços axiais nos pilares	75
8. CONCLUSÃO	83
8.1. Síntese do Trabalho	83
8.2. Principais Conclusões	84
8.2.1. Modelação Computacional de Incêndios	84
8.2.2. Análise Estrutural	84
8.3. Desenvolvimentos Futuros	85
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXO A. TEMPERATURAS NOS PILARES	95
A.1. Pilar P1	97

A.2.	Pilar P2.....	99
A.3.	Pilar P6.....	102
A.4.	Pilar P7.....	105
A.5.	Pilar P11.....	108
A.6.	Pilar P12.....	111
A.7.	Pilar P20.....	114
A.8.	Pilar P21.....	116

ANEXO B. TEMPERATURAS NAS VIGAS 119

B.1.	Viga V1-2.....	121
B.2.	Viga V5-2.....	122
B.3.	Viga V9-2.....	125
B.4.	Viga V16-2.....	128
B.5.	Viga V21-2.....	129
B.6.	Viga V22-2.....	130
B.7.	Viga V25-2.....	133
B.8.	Viga V26-2.....	134
B.9.	Viga V29-2.....	137
B.10.	Viga V30-2.....	138

ANEXO C. TEMPERATURAS NAS LAJES 141

C.1.	Laje inferior (L1)	143
C.2.	Laje superior (L2)	148

ANEXO D. COMPORTAMENTO TÉRMICO 153

D.1.	Pilares.....	153
D.2.	Vigas	157

ANEXO E. DEFORMAÇÕES 162

ANEXO F. TENSÕES DE VON MISES 168

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Fotografia do incêndio, minutos após ignição, retirada de Barylick (2012).....	7
Figura 2.2 Gravações (a) utilizadas na modelação (b) por Grosshandler <i>et al.</i> (2005).....	8
Figura 2.3 Modelos analisados no estudo round-robin de Rein <i>et al.</i> (2007).....	9
Figura 2.4 Último segundo da simulação de Glasa <i>et al.</i> (2012)	11
Figura 2.5 Ação de membrana de tração em lajes mistas, por Costa (2008).....	13
Figura 2.6 Mecanismos de colapso estudados por Usmani <i>et al.</i> (2006)	14
Figura 2.7 Deformadas obtidas por Usmani <i>et al.</i> (2006)	15
Figura 2.8 Situações estudadas por Selamet (2013) – pisos aquecidos a vermelho.....	16
Figura 2.9 Deformadas dos dois casos analisados por Agarwal e Varma (2014)	18
Figura 2.10 A torre norte antes do impacto, no modelo CFD do NIST (2005).....	19
Figura 2.11 Análise do colapso do 7 WTC, aprofundada por McAllister <i>et al.</i> (2008).....	20
Figura 2.12 O edifício durante e após o incêndio, retirado de Wang <i>et al.</i> (2014)	22
Figura 2.13 Análises CFD e estrutural do incêndio no CCTV, por Wang <i>et al.</i> (2014)	22
Figura 3.1 Calorímetro NORDTEST NT FIRE 032	26
Figura 3.2 Curvas da HRR de ensaios de calorímetro à escala real	26
Figura 3.3 Curva temperatura-tempo para um incêndio de compartimento.....	28
Figura 3.4 Curvas temperatura-tempo frequentemente adotadas em projeto.....	29
Figura 3.5 Relação tensões-extensões para o aço carbono a temperaturas elevadas.....	30
Figura 3.6 Factores de redução para a relação tensões-extensões do aço carbono	31
Figura 3.7 Relações tensões-extensões do betão em compressão a temperaturas elevadas	32
Figura 3.8 Coeficiente de redução da tensão de rotura do betão à tracção.....	32
Figura 3.9 Extensão térmica relativa do aço carbono em função da temperatura	33
Figura 3.10 Calor específico do aço carbono em função da temperatura.....	33
Figura 3.11 Condutibilidade térmica do aço carbono em função da temperatura.....	33
Figura 3.12 Extensão térmica total considerada para o betão em função da temperatura.....	34
Figura 3.13 Calor específico considerado para o betão em função da temperatura	34
Figura 3.14 Condutibilidade térmica do betão em função da temperatura.....	34
Figura 4.1 Geometria do edifício.....	35
Figura 4.2 Localização do compartimento de incêndio.....	36
Figura 4.3 Identificação e localização dos equipamentos combustíveis	37
Figura 4.4 Caracterização do cenário de incêndio.....	38
Figura 5.1 Limites exteriores da malha do modelo de CFD.....	41
Figura 5.2 Modelo do compartimento onde ocorre o incêndio	42
Figura 5.3 Ensaio ao cubículo de escritório com 2 painéis	44
Figura 5.4 Rasterização da geometria do cubículo de escritório de 2 painéis.....	45
Figura 5.5 Evolução da HRR do cubículo de escritório de 2 painéis	45

Figura 5.6 Rasterização da geometria do cubículo de escritório de 3 painéis.....	45
Figura 5.7 Evolução da HRR do cubículo de escritório de 3 painéis.....	46
Figura 5.8 Evolução da HRR da cadeira de madeira.....	46
Figura 5.9 Rasterização da geometria da cadeira de madeira.....	46
Figura 5.10 Evolução da HRR da estante de madeira.....	47
Figura 5.11 Rasterização da geometria da estante de madeira.....	47
Figura 5.12 Dimensões do conjunto de estantes metálicas.....	48
Figura 5.13 Rasterização da geometria do conjunto de estantes metálicas.....	48
Figura 5.14 Evolução da HRR do conjunto de estantes metálicas.....	49
Figura 5.15 Dimensões da estação de trabalho.....	49
Figura 5.16 Rasterização da geometria da estação de trabalho.....	50
Figura 5.17 Evolução da HRR da estação de trabalho.....	50
Figura 5.18 Dimensões do sofá individual.....	50
Figura 5.19 Evolução da HRR do sofá individual.....	51
Figura 5.20 Rasterização da geometria do sofá individual.....	51
Figura 5.21 Dimensões do sofá longo.....	51
Figura 5.22 Rasterização da geometria do sofá longo.....	52
Figura 5.23 Evolução da HRR do sofá longo.....	52
Figura 5.24 Ensaio de um televisor, levado a cabo por Hietaniemi <i>et al.</i> (2001).....	52
Figura 5.25 Rasterização da geometria atribuída ao televisor.....	53
Figura 5.26 Evolução da HRR no televisor.....	53
Figura 5.27 Evolução da HRR por unidade de área do revestimento das paredes.....	54
Figura 5.28 Rasterização da geometria do revestimento das paredes.....	54
Figura 5.29 Evolução da HRR por unidade de área do contraplacado.....	54
Figura 5.30 Rasterização da geometria do contraplacado.....	55
Figura 5.31 A simulação do incêndio em diferentes fases.....	56
Figura 5.32 Evolução de temperaturas na camada de gases quentes.....	57
Figura 6.1 Estrutura modelada no ABAQUS.....	60
Figura 6.2 Parte criada para as vigas V34.....	61
Figura 6.3 Partes criadas com o módulo Part do ABAQUS.....	62
Figura 6.4 Construção do modelo estrutural no módulo Assembly.....	63
Figura 6.5 Aplicação de temperaturas nas superfícies V9-2 Meio (a) e P7 Baixo (b).....	64
Figura 6.6 Malhas dos pilares (a) afetos ao compartimento de incêndio e (b) restantes.....	66
Figura 6.7 Malhas das vigas V25 e V26 (a) afetos ao compartimento e (b) nos restantes.....	66
Figura 6.8 Malhas atribuídas (a) às lajes e (b) paredes.....	66
Figura 6.9 Malha de todo o edifício e detalhes.....	67
Figura 7.1 Temperaturas médias observadas no pilar P1.....	70
Figura 7.2 Temperaturas médias observadas no pilar P11.....	70
Figura 7.3 Temperaturas médias observadas na viga V5-2.....	71

Figura 7.4 Deformação máxima (m) nas lajes – fator de ampliação 5	72
Figura 7.5 Flechas (m) verticais em vigas, com alguns valores aproximados	72
Figura 7.6 Tensões de Von Mises (Pa) no compartimento de incêndio	73
Figura 7.7 Tensões de Von Mises (Pa) na zona mais crítica	74
Figura 7.8 Temperaturas (°C) na zona mais crítica	74
Figura 7.9 Tensões de Von Mises (Pa) na zona crítica com maior detalhe	75
Figura 7.10 Secção para quantificação do esforço axial de um pilar	76
Figura 7.11 Evolução do esforço axial no pilar de canto P1	76
Figura 7.12 Evolução do esforço axial no pilar de fachada P2	77
Figura 7.13 Evolução do esforço axial no pilar de fachada P6	77
Figura 7.14 Evolução do esforço axial no pilar interior P7	78
Figura 7.15 Evolução do esforço axial no pilar de fachada P11	78
Figura 7.16 Evolução do esforço axial no pilar interior P12	79
Figura 7.17 Evolução do esforço axial no pilar de canto P20	79
Figura 7.18 Evolução do esforço axial no pilar de fachada P21	80
Figura 7.19 Variações de esforço axial nos pilares, relativamente ao valor inicial	81
Figura A.1 Cotas dos dispositivos de medição de temperatura nos pilares	95
Figura A.2 Faces de aplicação dos dispositivos de medição nos pilares	95
Figura A.3 Metodologia para a determinação das curvas a atribuir aos pilares	96
Figura A.4 Pilar P1: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação	97
Figura A.5 Registo do dispositivo P1 Face2 Cima	97
Figura A.6 Registo do dispositivo P1 Face2 Meio	97
Figura A.7 Registo do dispositivo P1 Face2 Baixo	97
Figura A.8 Registo do dispositivo P1 Face3 Cima	97
Figura A.9 Registo do dispositivo P1 Face3 Meio	98
Figura A.10 Registo do dispositivo P1 Face3 Baixo	98
Figura A.11 Temperaturas para a superfície P1 Cima	98
Figura A.12 Temperaturas para a superfície P1 Meio	98
Figura A.13 Temperaturas para a superfície P1 Baixo	98
Figura A.14 Pilar P2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação	99
Figura A.15 Registo do dispositivo P2 Face2 Cima	99
Figura A.16 Registo do dispositivo P2 Face2 Meio	99
Figura A.17 Registo do dispositivo P2 Face2 Baixo	99
Figura A.18 Registo do dispositivo P2 Face3 Cima	99
Figura A.19 Registo do dispositivo P2 Face3 Meio	100
Figura A.20 Registo do dispositivo P2 Face3 Baixo	100
Figura A.21 Registo do dispositivo P2 Face4 Cima	100
Figura A.22 Registo do dispositivo P2 Face4 Meio	100

Figura A.23 Registo do dispositivo P2 Face4 Baixo.....	100
Figura A.24 Temperaturas para a superfície P2 Cima.....	101
Figura A.25 Temperaturas para a superfície P2 Meio.....	101
Figura A.26 Temperaturas para a superfície P2 Baixo.....	101
Figura A.27 Pilar P6: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação	102
Figura A.28 Registo do dispositivo P6 Face1 Cima.....	102
Figura A.29 Registo do dispositivo P6 Face1 Meio.....	102
Figura A.30 Registo do dispositivo P6 Face1 Baixo.....	102
Figura A.31 Registo do dispositivo P6 Face2 Cima.....	102
Figura A.32 Registo do dispositivo P6 Face2 Meio.....	103
Figura A.33 Registo do dispositivo P6 Face2 Baixo.....	103
Figura A.34 Registo do dispositivo P6 Face3 Cima.....	103
Figura A.35 Registo do dispositivo P6 Face3 Meio.....	103
Figura A.36 Registo do dispositivo P6 Face3 Baixo.....	103
Figura A.37 Temperaturas para a superfície P6 Cima.....	104
Figura A.38 Temperaturas para a superfície P6 Meio.....	104
Figura A.39 Temperaturas para a superfície P6 Baixo.....	104
Figura A.40 Pilar P7: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação	105
Figura A.41 Registo do dispositivo P7 Face1 Cima.....	105
Figura A.42 Registo do dispositivo P7 Face1 Meio.....	105
Figura A.43 Registo do dispositivo P7 Face1 Baixo.....	105
Figura A.44 Registo do dispositivo P7 Face2 Cima.....	105
Figura A.45 Registo do dispositivo P7 Face2 Meio.....	106
Figura A.46 Registo do dispositivo P7 Face2 Baixo.....	106
Figura A.47 Registo do dispositivo P7 Face3 Cima.....	106
Figura A.48 Registo do dispositivo P7 Face3 Meio.....	106
Figura A.49 Registo do dispositivo P7 Face3 Baixo.....	106
Figura A.50 Registo do dispositivo P7 Face4 Cima.....	106
Figura A.51 Registo do dispositivo P7 Face4 Meio.....	107
Figura A.52 Registo do dispositivo P7 Face4 Baixo.....	107
Figura A.53 Temperaturas para a superfície P7 Cima.....	107
Figura A.54 Temperaturas para a superfície P7 Meio.....	107
Figura A.55 Temperaturas para a superfície P7 Baixo.....	107
Figura A.56 Pilar P11: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação	108
Figura A.57 Registo do dispositivo P11 Face1 Cima.....	108
Figura A.58 Registo do dispositivo P11 Face1 Meio.....	108
Figura A.59 Registo do dispositivo P11 Face1 Baixo.....	108
Figura A.60 Registo do dispositivo P11 Face2 Cima.....	108
Figura A.61 Registo do dispositivo P11 Face2 Meio.....	109

Figura A.62 Registo do dispositivo P11 Face2 Baixo.....	109
Figura A.63 Registo do dispositivo P11 Face3 Cima.....	109
Figura A.64 Registo do dispositivo P11 Face3 Meio.....	109
Figura A.65 Registo do dispositivo P11 Face3 Baixo.....	109
Figura A.66 Temperaturas para a superfície P11 Cima.....	110
Figura A.67 Temperaturas para a superfície P11 Meio.....	110
Figura A.68 Temperaturas para a superfície P11 Baixo.....	110
Figura A.69 Pilar P12: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação	111
Figura A.70 Registo do dispositivo P12 Face1 Cima.....	111
Figura A.71 Registo do dispositivo P12 Face1 Meio.....	111
Figura A.72 Registo do dispositivo P12 Face1 Baixo.....	111
Figura A.73 Registo do dispositivo P12 Face2 Cima.....	111
Figura A.74 Registo do dispositivo P12 Face2 Meio.....	112
Figura A.75 Registo do dispositivo P12 Face2 Baixo.....	112
Figura A.76 Registo do dispositivo P12 Face3 Cima.....	112
Figura A.77 Registo do dispositivo P12 Face3 Meio.....	112
Figura A.78 Registo do dispositivo P12 Face3 Baixo.....	112
Figura A.79 Registo do dispositivo P12 Face4 Cima.....	112
Figura A.80 Registo do dispositivo P12 Face4 Meio.....	113
Figura A.81 Registo do dispositivo P12 Face4 Baixo.....	113
Figura A.82 Temperaturas para a superfície P12 Cima.....	113
Figura A.83 Temperaturas para a superfície P12 Meio.....	113
Figura A.84 Temperaturas para a superfície P12 Baixo.....	113
Figura A. 85 Pilar P20: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação	114
Figura A.86 Registo do dispositivo P20 Face1 Cima.....	114
Figura A.87 Registo do dispositivo P20 Face1 Meio.....	114
Figura A.88 Registo do dispositivo P20 Face1 Baixo.....	114
Figura A.89 Registo do dispositivo P20 Face2 Cima.....	114
Figura A.90 Registo do dispositivo P20 Face2 Meio.....	115
Figura A.91 Registo do dispositivo P20 Face2 Baixo.....	115
Figura A.92 Temperaturas para a superfície P20 Cima.....	115
Figura A.93 Temperaturas para a superfície P20 Meio.....	115
Figura A.94 Temperaturas para a superfície P20 Baixo.....	115
Figura A.95 Pilar P21: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação	116
Figura A.96 Registo do dispositivo P21 Face1 Cima.....	116
Figura A.97 Registo do dispositivo P21 Face1 Meio.....	116
Figura A.98 Registo do dispositivo P21 Face1 Baixo.....	116
Figura A.99 Registo do dispositivo P21 Face2 Cima.....	116
Figura A.100 Registo do dispositivo P21 Face2 Meio.....	117

Figura A.101 Registo do dispositivo P21 Face2 Baixo.....	117
Figura A.102 Registo do dispositivo P21 Face4 Cima.....	117
Figura A.103 Registo do dispositivo P21 Face4 Meio.....	117
Figura A.104 Registo do dispositivo P21 Face4 Baixo.....	117
Figura A.105 Temperaturas para a superfície P21 Cima.....	118
Figura A.106 Temperaturas para a superfície P21 Meio.....	118
Figura A.107 Temperaturas para a superfície P21 Baixo.....	118
Figura B.1 Posicionamento, em planta, dos dispositivos nas vigas	119
Figura B.2 Faces de aplicação dos dispositivos de medição nas vigas	120
Figura B.3 Metodologia para a determinação das curvas a atribuir às vigas	120
Figura B.4 Viga V1-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação	121
Figura B.5 Temperaturas para a superfície V1-2 Esq (disp. V1-2 Face4 Esq)	121
Figura B.6 Temperaturas para a superfície V1-2 Meio (disp. V1-2 Face4 Meio)	121
Figura B.7 Temperaturas para a superfície V1-2 Dir (disp. V1-2 Face4 Dir).....	121
Figura B.8 Viga V5-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação	122
Figura B.9 Registo do dispositivo V5-2 Face2 Dir	122
Figura B.10 Registo do dispositivo V5-2 Face2 Meio	122
Figura B.11 Registo do dispositivo V5-2 Face2 Esq.....	122
Figura B.12 Registo do dispositivo V5-2 Face3 Dir	122
Figura B.13 Registo do dispositivo V5-2 Face3 Meio	123
Figura B.14 Registo do dispositivo V5-2 Face3 Esq.....	123
Figura B.15 Registo do dispositivo V5-2 Face4 Dir	123
Figura B.16 Registo do dispositivo V5-2 Face4 Meio	123
Figura B.17 Registo do dispositivo V5-2 Face4 Esq.....	123
Figura B.18 Temperaturas para a superfície V5-2 Dir	124
Figura B.19 Temperaturas para a superfície V5-2 Meio	124
Figura B.20 Temperaturas para a superfície V5-2 Esq	124
Figura B.21 Viga V9-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação	125
Figura B.22 Registo do dispositivo V9-2 Face2 Dir	125
Figura B.23 Registo do dispositivo V9-2 Face2 Meio	125
Figura B.24 Registo do dispositivo V9-2 Face2 Esq.....	125
Figura B.25 Registo do dispositivo V9-2 Face3 Dir	125
Figura B.26 Registo do dispositivo V9-2 Face3 Meio	126
Figura B.27 Registo do dispositivo V9-2 Face3 Esq.....	126
Figura B.28 Registo do dispositivo V9-2 Face4 Dir	126
Figura B.29 Registo do dispositivo V9-2 Face4 Meio	126
Figura B.30 Registo do dispositivo V9-2 Face4 Esq.....	126
Figura B.31 Temperaturas para a superfície V9-2 Dir	127

Figura B.32	Temperaturas para a superfície V9-2 Meio	127
Figura B.33	Temperaturas para a superfície V9-2 Esq	127
Figura B.34	Viga V16-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação ...	128
Figura B.35	Temperaturas para a superfície V16-2 Esq (disp. V16-2 Face2 Esq)	128
Figura B.36	Temperaturas para a superfície V16-2 Meio (disp. V16-2 Face2 Meio)	128
Figura B.37	Temperaturas para a superfície V16-2 Dir (disp. V16-2 Face2 Dir).....	128
Figura B.38	Viga V21-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação ...	129
Figura B.39	Temperaturas para a superfície V21-2 Cima (disp. V21-2 Face2 Cima).....	129
Figura B.40	Temperaturas para a superfície V21-2 Meio (disp. V21-2 Face2 Meio)	129
Figura B.41	Temperaturas para a superfície V21-2 Baixo (disp. V21-2 Face2 Baixo)	129
Figura B.42	Viga V22-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação ...	130
Figura B.43	Registo do dispositivo V22-2 Face2 Cima.....	130
Figura B.44	Registo do dispositivo V22-2 Face2 Meio	130
Figura B.45	Registo do dispositivo V22-2 Face2 Baixo	130
Figura B.46	Registo do dispositivo V22-2 Face3 Cima.....	130
Figura B.47	Registo do dispositivo V22-2 Face3 Meio	131
Figura B.48	Registo do dispositivo V22-2 Face3 Baixo	131
Figura B.49	Registo do dispositivo V22-2 Face4 Cima.....	131
Figura B.50	Registo do dispositivo V22-2 Face4 Meio	131
Figura B.51	Registo do dispositivo V22-2 Face4 Baixo	131
Figura B.52	Temperaturas para a superfície V22-2 Cima.....	132
Figura B.53	Temperaturas para a superfície V22-2 Meio	132
Figura B.54	Temperaturas para a superfície V22-2 Baixo.....	132
Figura B.55	Viga V25-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação ...	133
Figura B.56	Temperaturas para a superfície V25-2 Cima (disp. V25-2 Face2 Cima).....	133
Figura B.57	Temperaturas para a superfície V25-2 Meio (disp. V25-2 Face2 Meio)	133
Figura B.58	Temperaturas para a superfície V25-2 Baixo (disp. V25-2 Face2 Baixo)	133
Figura B.59	Viga V26-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação ...	134
Figura B.60	Registo do dispositivo V26-2 Face2 Cima.....	134
Figura B.61	Registo do dispositivo V26-2 Face2 Meio	134
Figura B.62	Registo do dispositivo V26-2 Face2 Baixo	134
Figura B.63	Registo do dispositivo V26-2 Face3 Cima.....	134
Figura B.64	Registo do dispositivo V26-2 Face3 Meio	135
Figura B.65	Registo do dispositivo V26-2 Face3 Baixo	135
Figura B.66	Registo do dispositivo V26-2 Face4 Cima.....	135
Figura B.67	Registo do dispositivo V26-2 Face4 Meio	135
Figura B.68	Registo do dispositivo V26-2 Face4 Baixo	135
Figura B.69	Temperaturas para a superfície V26-2 Cima.....	136
Figura B.70	Temperaturas para a superfície V26-2 Meio	136

Figura B.71	Temperaturas para a superfície V26-2 Baixo	136
Figura B.72	Viga V29-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação ...	137
Figura B.73	Temperaturas para a superfície V29-2 Cima (disp. V29-2 Face2 Cima)	137
Figura B.74	Temperaturas para a superfície V29-2 Meio (disp. V29-2 Face2 Meio)	137
Figura B.75	Temperaturas para a superfície V29-2 Baixo (disp. V29-2 Face2 Baixo)	137
Figura B.76	Viga V30-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação ...	138
Figura B.77	Registo do dispositivo V30-2 Face2 Cima	138
Figura B.78	Registo do dispositivo V30-2 Face2 Meio	138
Figura B.79	Registo do dispositivo V30-2 Face2 Baixo	138
Figura B.80	Registo do dispositivo V30-2 Face3 Cima	138
Figura B.81	Registo do dispositivo V30-2 Face3 Meio	139
Figura B.82	Registo do dispositivo V30-2 Face3 Baixo	139
Figura B.83	Registo do dispositivo V30-2 Face4 Cima	139
Figura B.84	Registo do dispositivo V30-2 Face4 Meio	139
Figura B.85	Registo do dispositivo V30-2 Face4 Baixo	139
Figura B.86	Temperaturas para a superfície V30-2 Cima	140
Figura B.87	Temperaturas para a superfície V30-2 Meio	140
Figura B.88	Temperaturas para a superfície V30-2 Baixo	140
Figura C.1	Laje L1: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação	141
Figura C.2	Laje L2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação	142
Figura C.3	Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 1	143
Figura C.4	Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 2	143
Figura C.5	Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 3	143
Figura C.6	Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 4	143
Figura C.7	Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 5	143
Figura C.8	Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 6	143
Figura C.9	Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 7	144
Figura C.10	Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 8	144
Figura C.11	Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 9	144
Figura C.12	Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 1	144
Figura C.13	Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 2	144
Figura C.14	Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 3	144
Figura C.15	Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 4	145
Figura C.16	Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 5	145
Figura C.17	Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 6	145
Figura C.18	Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 7	145
Figura C.19	Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 8	145
Figura C.20	Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 9	145

Figura C.21 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 1.....	146
Figura C.22 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 2.....	146
Figura C.23 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 3.....	146
Figura C.24 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 4.....	146
Figura C.25 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 5.....	146
Figura C.26 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 6.....	146
Figura C.27 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 7.....	147
Figura C.28 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 8.....	147
Figura C.29 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 9.....	147
Figura C.30 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 1	148
Figura C.31 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 2	148
Figura C.32 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 3	148
Figura C.33 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 4	148
Figura C.34 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 5	148
Figura C.35 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 6	148
Figura C.36 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 7	149
Figura C.37 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 8	149
Figura C.38 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 9	149
Figura C.39 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 1.....	149
Figura C.40 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 2.....	149
Figura C.41 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 3.....	149
Figura C.42 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 4.....	150
Figura C.43 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 5.....	150
Figura C.44 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 6.....	150
Figura C.45 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 7.....	150
Figura C.46 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 8.....	150
Figura C.47 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 9.....	150
Figura C.48 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 1.....	151
Figura C.49 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 2.....	151
Figura C.50 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 3.....	151
Figura C.51 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 4.....	151
Figura C.52 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 5.....	151
Figura C.53 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 6.....	151
Figura C.54 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 7.....	152
Figura C.55 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 8.....	152
Figura C.56 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 9.....	152
Figura D.1 Temperaturas médias observadas no pilar P1	153
Figura D.2 Temperaturas médias observadas no pilar P2	153

Figura D.3 Temperaturas médias observadas no pilar P6	154
Figura D.4 Temperaturas médias observadas no pilar P7	154
Figura D.5 Temperaturas médias observadas no pilar P11	155
Figura D.6 Temperaturas médias observadas no pilar P12	155
Figura D.7 Temperaturas médias observadas no pilar P20	156
Figura D.8 Temperaturas médias observadas no pilar P21	156
Figura D.9 Temperaturas médias observadas na viga V1-2.....	157
Figura D.10 Temperaturas médias observadas na viga V5-2.....	157
Figura D.11 Temperaturas médias observadas na viga V9-2.....	158
Figura D.12 Temperaturas médias observadas na viga V16-2.....	158
Figura D.13 Temperaturas médias observadas na viga V21-2.....	159
Figura D.14 Temperaturas médias observadas na viga V22-2.....	159
Figura D.15 Temperaturas médias observadas na viga V25-2.....	160
Figura D.16 Temperaturas médias observadas na viga V26-2.....	160
Figura D.17 Temperaturas médias observadas na viga V29-2.....	161
Figura D.18 Temperaturas médias observadas na viga V30-2.....	161
Figura E.1 Deslocamentos verticais (m) em toda a estrutura	162
Figura E.2 Flechas (m) na laje L2	163
Figura E.3 Flechas (m) na laje L1	164
Figura E.4 Deformação vertical (m) nas vigas segundo x.....	165
Figura E.5 Deformação vertical (m) nas vigas segundo z.....	166
Figura F.1 Tensões de Von Mises (Pa) em toda a estrutura	168
Figura F.2 Tensões de Von Mises (Pa) no exterior do compartimento.....	169
Figura F.3 Tensões de Von Mises (Pa) no interior do compartimento - zona do pilar P1	170
Figura F.4 Tensões de Von Mises (Pa) no interior do compartimento - zona do pilar P2	170
Figura F.5 Tensões de Von Mises (Pa) no interior do compartimento - zona do pilar P6.....	171
Figura F.6 Tensões de Von Mises (Pa) no interior do compartimento - zona do pilar P7	171
Figura F.7 Tensões de Von Mises (Pa) no interior do compartimento - zona do pilar P11 ...	172
Figura F.8 Tensões de Von Mises (Pa) no interior do compartimento - zona do pilar P12 ...	172
Figura F.9 Tensões de Von Mises (Pa) no interior do compartimento - zona do pilar P20 ...	173
Figura F.10 Tensões de Von Mises (Pa) no interior do compartimento - zona do pilar P21 .	173

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 Classificação da análise com base nos modelos estrutural e de incêndio	3
Quadro 3.1 Relação tensões-extensões para o aço carbono a temperaturas elevadas	31
Quadro 5.1 Características da malha do modelo de CFD.....	42
Quadro 5.2 Propriedades térmicas dos materiais.....	43
Quadro 6.1 Constituição e atribuição de secções no módulo Property	62
Quadro 6.2 Tipos de elementos finitos adotados.....	65
Quadro 7.1 Temperaturas máximas e acréscimos de esforço axial nos pilares.....	82

SIMBOLOGIA

Caracteres Romanos

A	Área
c	Calor específico
c_a	Calor específico do aço
c_c	Calor específico do betão
E	Módulo de elasticidade
E_a	Módulo de elasticidade do aço à temperatura normal
$E_{a,\theta}$	Inclinação da recta que representa o domínio elástico para o aço a temperaturas elevadas θ_a
f_c	Tensão de rotura do betão à compressão
$f_{c,\theta}$	Tensão de rotura do betão à compressão em função da temperatura
f_{ck}	Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 28 d de idade
$f_{ck,t}(\theta)$	Valor característico da tensão de rotura do betão à tracção à temperatura θ para uma extensão especificada
$f_{p,\theta}$	Tensão limite de proporcionalidade do aço a temperaturas elevadas θ_a
f_y	Tensão de cedência a 20 °C
$f_{y,\theta}$	Tensão de cedência efectiva do aço a temperaturas elevadas θ_a
F	Factor de vista
$k_{c,t}(\theta)$	Factor de redução da tensão de rotura do betão à tracção em função da temperatura do material θ
$k_{E,\theta}$	Factor de redução para a inclinação da recta que representa o domínio elástico do aço à temperatura θ_a atingida no instante t
$k_{p,\theta}$	Factor de redução para a tensão limite de proporcionalidade do aço à temperatura θ_a atingida no instante t
$k_{y,\theta}$	Factor de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura θ_a atingida no instante t
\dot{m}	Taxa de combustão, ou taxa de perda de massa

\dot{m}''	Taxa de combustão por unidade de área
N	Esforço axial
q	Fluxo de calor, ou taxa de libertação de calor por unidade de área
Q	Calor, ou energia térmica
\dot{Q}	Taxa de libertação de calor
t	Tempo
T	Temperatura

Caracteres Gregos

α	Coeficiente de absorção
α_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção
Δh_c	Poder calorífico
$\Delta l/l$	Extensão térmica
ε	Emissividade; Extensão
ε_{c1}	Extensão do betão à compressão correspondente à tensão máxima f_c
ε_{cu}	Extensão última do betão à compressão
$\varepsilon_{p,\theta}$	Extensão limite de proporcionalidade
$\varepsilon_{t,\theta}$	Extensão limite para o patamar de cedência
$\varepsilon_{u,\theta}$	Extensão última
$\varepsilon_{y,\theta}$	Extensão de cedência
θ	Temperatura
θ_a	Temperatura do aço
λ	Condutibilidade térmica
λ_a	Condutibilidade térmica do aço
ρ	Massa volúmica ou densidade
σ	Constante de Stefan-Boltzmann; Tensão

ABREVIATURAS

ASCE	American Society of Civil Engineers
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar condicionado
BFRL	Building and Fire Research Laboratory
BRE	Building Research Establishment
CAD	Computer-aided design
CAE	Complete Abaqus Environment
CCF	Câmara corta-fogo
CCTV	China Central Television
CFAST	Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport
CFD	Computational fluid dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
FDS	Fire Dynamics Simulator
FEM	Finite element method
FEMA	Federal Emergency Management Agency
HRR	Heat release rate
HRRPUA	Heat release rate per unit area
IBC	International Building Code
ISISE	Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering
ISO	International Organization for Standardization
LES	Large Eddy Simulation
MLR	Mass loss rate
MPI	Message Passing Interface
NFPA	National Fire Protection Association
NIST	National Institute of Standards and Technology
REAE	Regulamento de Estruturas de Aço para Edifícios
REBAP	Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado
RSAEEP	Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes

SFPE	Society of Fire Protection Engineers
TVCC	Television Cultural Center
WTC	World Trade Center

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do Tema

Após os ataques terroristas do 11 de setembro de 2001 ao World Trade Center (WTC), em Nova Iorque, o National Institute of Standards and Technology, ou NIST (2005; 2008), levou a cabo investigações detalhadas que tinham como principal objectivo justificar o colapso dos edifícios 1 WTC (torre norte, com 417 m de altura), 2 WTC (torre sul, com 415 m) e 7 WTC (edifício adjacente, com 190 m).

Os investigadores atribuíram o colapso das torres gémeas (1 WTC e 2 WTC) à combinação das acções do impacto das aeronaves, do incêndio em vários pisos e da destruição da protecção dos elementos estruturais.

O caso do edifício 7 do WTC (7 WTC) foi o primeiro registo de colapso progressivo e total de um edifício devido exclusivamente ao fogo. O impacto de detritos com a queda do 1 WTC originou incêndios em 10 pisos que se prolongaram por várias horas, e que se agravaram com uma falha no funcionamento dos sprinklers (aspersores) em metade do edifício. Este desastre foi o grande catalisador na investigação do comportamento das estruturas em situação de incêndio: chamou a atenção dos engenheiros para a necessidade de implementar práticas de projeto mais eficazes na prevenção do colapso dos edifícios.

A ASCE (2010), American Society of Civil Engineers, define colapso progressivo como a propagação de uma rotura inicial localizada de elemento para elemento, resultando eventualmente no colapso de toda a estrutura, ou de, pelo menos, uma parte desproporcionalmente grande desta. Haberland e Starossek (2009), num artigo com o objetivo de clarificar vários termos relacionados o colapso progressivo de estruturas, aprofundaram os conceitos de projeto prescritivo e projeto baseado no desempenho.

O primeiro, esclareceram, visa incorporar num sistema construtivo características que melhorem comprovadamente a segurança das estruturas, prescritas por regulamentos que abrangem critérios relativos a materiais de construção, sistemas estruturais aprovados, valores mínimos de resistência e rigidez, e pormenorização. Este tipo de cálculo pretende garantir certos padrões de desempenho numa determinada estrutura, sem que seja necessário verificar efetivamente o seu desempenho individual. Contudo, estas prescrições são empíricas, baseadas na experiência passada com estruturas semelhantes, e adequam-se por isso apenas ao projeto de edifícios com configurações regulares.

Por outro o lado, o projeto baseado no desempenho procura avaliar o desempenho provável da estrutura em questão perante um cenário de risco plausível de ocorrer no futuro. A identificação dos objetivos de desempenho a cumprir serve de base para o começo do projeto. O projetista tem que demonstrar que o sistema estrutural cumpre todos estes critérios. Como não existem prescrições técnicas para atingir este fim, os engenheiros têm maior flexibilidade para adotarem

sistemas e materiais não tradicionais, conseguindo soluções mais inovadoras. Esta abordagem permite uma avaliação quantitativa do desempenho de várias alternativas, ajudando na otimização do projeto. É fulcral que os níveis de desempenho estrutural sejam quantificados por indicadores mensuráveis e que o comportamento estrutural seja realisticamente previsto.

Garlock *et al.* (2014), num livro branco publicado pelo NIST sobre o comportamento ao fogo de estruturas metálicas, afirmaram que, na análise estrutural em situação de incêndio, as abordagens prescritivas convencionais não refletem com precisão quer o desenvolvimento da temperatura ao longo do tempo, quer o comportamento de uma estrutura global sujeita a distribuições de temperatura não uniformes. Concluíram assim que este tipo de procedimento não cobre o desempenho real de uma estrutura em situação de incêndio. Como procedimentos baseados no desempenho a utilizar para este fim, referiram métodos de cálculo, nomeadamente analíticos ou numéricos. Caso os métodos de cálculo seguidos precisem de calibração ou validação, os autores preconizam também a realização de ensaios experimentais.

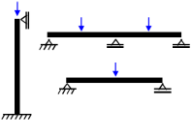
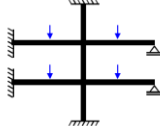
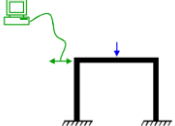
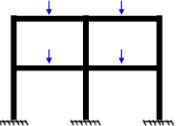
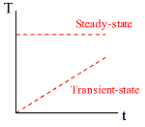
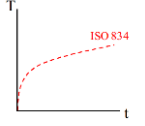
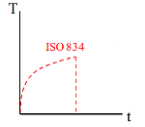
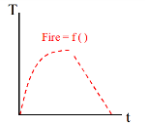
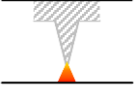
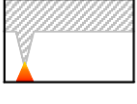
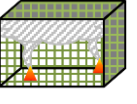

O trabalho desenvolvido nesta dissertação segue uma análise computacional numérica, com recurso a duas ferramentas de elementos finitos: desenvolve-se um modelo de campo para um incêndio de compartimento com um software de dinâmica computacional de fluidos (computational fluid dynamics, ou CFD) e, com o programa ABAQUS, estuda-se o comportamento da estrutura onde este ocorre (edifício com dez pisos).

Gales *et al.* (2012) apresentaram na forma de uma matriz o enquadramento da investigação ao comportamento estrutural em situação de incêndio (adaptado no Quadro 1.1). Estruturaram segundo o eixo vertical os vários níveis de complexidade que podem ser considerados para quantificar o fogo: desde um incêndio com temperatura constante ao longo do tempo (*steady-state*) até ao incêndio real. No eixo horizontal organizaram, também com grau de complexidade crescente, os vários tipos de estrutura a analisar. As células no centro do quadro identificam o objectivo da investigação levada a cabo para determinada combinação de modelo de incêndio e modelo estrutural.

Os autores afirmaram que, embora a maior parte dos engenheiros estruturais compreendam as diferenças entre a análise um elemento isolado e o de uma estrutura completa, apenas uma pequena parte reconhece as implicações de se considerar um aquecimento uniforme, uma curva de incêndio padrão, um modelo de zona, um modelo de campo ou um incêndio real. Deixaram por isso como recomendação que, para certo grau de complexidade da estrutura a estudar, se faça corresponder um modelo de incêndio com grau de complexidade semelhante, percorrendo o quadro na diagonal de acordo com o indicado pela seta.

Identificou-se a vermelho no Quadro 1.1 onde se enquadra o trabalho desenvolvendo nesta dissertação. Com um modelo estrutural tridimensional à escala real e a simulação do incêndio com um modelo de campo, é classificado como “investigação ocasional”. Posiciona-se perto da diagonal central de referência, sendo apenas superado por ensaios experimentais de incêndio em estruturas à escala real.

Quadro 1.1 Classificação da análise com base nos modelos estrutural e de incêndio

Incêndio		Estrutura	Elementos individuais	Sub pórtico	Simulação variável de ligações restringidas	Estrutura tridimensional à escala real
						
Exposição a temperaturas elevadas		Investigação ocasional	De credibilidade marginal	De credibilidade marginal	De credibilidade marginal	
Incêndio padrão		Determinação da resistência ao fogo (PADRÃO)	Investigação ocasional	De credibilidade marginal	De credibilidade marginal	
Gravidade equivalente a incêndio padrão		Determinação da resistência ao fogo (classificações alternativas)	Investigação ocasional	Investigação ocasional	De credibilidade marginal	
Modelo paramétrico		Investigação ocasional	Investigação ocasional	Investigação ocasional	Investigação ocasional	
Modelo localizado		Investigação ocasional	Investigação ocasional	Investigação ocasional	Investigação ocasional	
Modelo de zona		De credibilidade marginal	Investigação ocasional	Investigação ocasional	Investigação ocasional	
Modelo de campo		De credibilidade marginal	De credibilidade marginal	Investigação ocasional	Investigação ocasional	
Incêndio real		De credibilidade marginal	De credibilidade marginal	Investigação ocasional	Comportamento REAL num incêndio REAL	

1.2. Objetivos e Metodologia

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo numérico que consiga simular o comportamento real de uma estrutura em situação de incêndio, tendo em conta as distribuições de temperatura não uniformes e o comportamento global da estrutura.

Para simular uma situação realística de incêndio, desenvolve-se um modelo de campo, a partir da interface gráfica PyroSim, baseado no código de dinâmica computacional de fluidos Fire Dynamics Simulator (FDS). Admite-se o cenário de um incêndio de escritório. Consultam-se na literatura as curvas de variação de taxa de libertação de calor e os pontos de ignição para os diversos produtos combustíveis considerados. Registam-se as temperaturas da fase gasosa em vários pontos situados na superfície de todos os elementos estruturais afetos ao compartimento de incêndio: pilares, vigas e lajes.

Com o programa de elementos finitos ABAQUS, desenvolve-se o modelo tridimensional e à escala real da estrutura que estará sujeita ao incêndio – um edifício de dez pisos em estrutura mista, previamente dimensionado. As temperaturas obtidas na modelação CFD são lidas e aplicadas nas superfícies correspondentes – os mecanismos de transferência de calor considerados são a convecção e a radiação. É feita a análise térmica e mecânica da estrutura – avaliam-se temperaturas, deformações, tensões de Von Mises e esforços axiais nos pilares.

1.3. Estrutura da Dissertação

A dissertação está organizada em nove capítulos. Nos seguintes parágrafos, apresenta-se uma breve descrição dos conteúdos de cada um:

Capítulo 1 – Introdução

O Capítulo 1 é a introdução ao trabalho desenvolvido nesta dissertação.

Capítulo 2 – Estado da Arte

No Capítulo 2, apresenta-se uma breve revisão do estado da arte. Abordam-se os temas da modelação computacional de incêndios em edifícios e do comportamento ao fogo de estruturas metálicas e mistas, aprofundando posteriormente a ligação entre ambos – a aplicação da modelação computacional de incêndios à análise estrutural.

Capítulo 3 – Dinâmica de Incêndios

O Capítulo 3 introduz os principais conceitos relacionados com a dinâmica de incêndios: pirólise, combustão, mecanismos de transferência de calor, taxa de libertação de calor, propagação, incêndios de compartimento, curvas de projeto e propriedades dos materiais a elevadas temperaturas.

Capítulo 4 – Apresentação do Caso de Estudo

No Capítulo 4, aborda-se brevemente o caso de estudo da dissertação, apresentando a estrutura do edifício e o cenário de incêndio considerado.

Capítulo 5 – Modelação Computacional do Incêndio

No Capítulo 5, é abordado o trabalho de modelação do incêndio desenvolvido com o código Fire Dynamics Simulator, através do software PyroSim. Descrevem-se as opções realizadas relativamente à malha, materiais, envolvente do incêndio e produtos combustíveis. Apresentam-se os resultados obtidos.

Capítulo 6 – Modelação Numérica da Estrutura Sujeita ao Incêndio

No Capítulo 6 é descrita a modelação numérica realizada com o programa de elementos finitos ABAQUS, clarificando as tarefas executadas nos vários módulos deste software.

Capítulo 7 – Análise de Resultados

No Capítulo 7 são analisados os resultados da modelação numérica da estrutura, nomeadamente temperaturas em elementos metálicos, deformações, tensões de Von Mises e esforços axiais em pilares.

Capítulo 8 – Conclusão

O Capítulo 8 faz a síntese do trabalho desenvolvido, apresenta as principais conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros.

Capítulo 9 – Referências Bibliográficas

Apresentam-se no Capítulo 9 todas as fontes bibliográficas consultadas na execução desta dissertação.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Modelação Computacional de Incêndios em Edifícios

Em 2005, Capote Abreu *et al.* (2005) realizaram uma análise comparativa entre dois tipos de modelação computacional de incêndios, modelos de zona e modelos de campo, para duas situações de incêndio: num edifício industrial e num edifício de escritórios. Os modelos de zona foram desenvolvidos nos programas OZone e Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (CFAST), versão 6. Para os modelos de campo, ou modelos de dinâmica computacional de fluidos, utilizou-se o software FDS, versão 4. Os autores comparam as variações da temperatura em determinados pontos, obtidas pelos três modelos. Concluíram que, embora exijam maiores tempos de computação, os modelos de campo fornecem resultados com maior precisão, porque dividem a zona de análise num número de unidades elementares muito superior.

No mesmo ano, o NIST divulgou o relatório da investigação técnica do incêndio ocorrido em fevereiro de 2003 (Figura 2.1), no clube noturno The Station, em West Warwick, Estados Unidos, levada a cabo por Grosshandler *et al.* (2005). O evento foi desencadeado pela ignição do isolamento sonoro das paredes e teto do palco por efeitos pirotécnicos, ativados pelo gerente da banda em atuação, e resultou em 100 vítimas mortais. O edifício não estava equipado com sprinklers.



Figura 2.1 Fotografia do incêndio, minutos após ignição, retirada de Barylick (2012)

Foram executados ensaios experimentais à escala real da zona de início do fogo – palco, plateia e alcova. Foi assim possível observar a propagação do fogo e naquele cenário. Estes dados permitiram a calibração das simulações computacionais desenvolvidas no software FDS, versão 4. As gravações vídeo e o mapa de distribuição das vítimas também serviram para este efeito

(Figura 2.2). Realizou-se uma análise comparativa da situação de incêndio: com e sem a existência de sprinklers automáticos. Os resultados de laboratório e dos modelos de campo permitiram concluir que o funcionamento de sprinklers naquela situação teria criado condições mais favoráveis aos ocupantes (temperaturas inferiores e níveis de oxigênio suportáveis) durante a evacuação e contribuído para a rápida extinção do incêndio.



(a)

(b)

Figura 2.2 Gravações (a) utilizadas na modelação (b) por Grosshandler *et al.* (2005)

Em 2007, Rein *et al.* (2007; 2009) descreveram um estudo realizado com o objetivo de avaliar o estado da arte da modelação de incêndio, seguindo uma abordagem interlaboratorial, ou round-robin. Este tipo de investigação consiste na análise de um determinado cenário por várias equipas independentes, procurando chegar a conclusões por comparação dos resultados. O cenário de incêndio em estudo foi o Dalmarnock Fire Test One – o primeiro de três ensaios ao fogo de grande escala conduzidos em julho de 2006, num edifício de 23 pisos, em Glasgow, Escócia. O estudo round-robin foi desenvolvido *a priori*, *i.e.* antes da realização do ensaio. Com base nas mesmas informações (relativas à geometria dos compartimento, combustível, fonte de ignição e condições de ventilação) cada uma das sete equipas de investigação procurou simular o desenvolvimento do fogo com a maior precisão possível, sem recorrer a suposições conservativas ou fatores de segurança – práticas comuns na engenharia de segurança contra incêndio. As equipas eram constituídas por profissionais da área, de várias nacionalidades e com experiência na modelação de incêndio. No total, submeteram dez simulações diferentes (Figura 2.3): oito realizadas com modelos de campo, desenvolvidas no software FDS, versão 4, e duas com modelos de zona, com recurso ao CFAST, versão 6.

Uma vez realizado o Dalmarnock Fire Test One, os resultados das previsões por modelação foram ainda comparados com os resultados experimentais obtidos no ensaio. Os dados obtidos nas simulações (comportamento do fogo, taxas de libertação de calor, temperaturas) foram muito dispersos, cobrindo uma larga gama de valores, não sendo possível estabelecer uma relação entre as previsões e os resultados experimentais para além de uma pequena tendência qualitativa. Os autores referiram, contudo, que este tipo de modelação poderia ter aplicação na

resolução de problemas de engenharia, caso seja seguida uma metodologia suficientemente conservativa, que aplique fatores de segurança apropriados e utilize previsões com graus de precisão grosseiros.

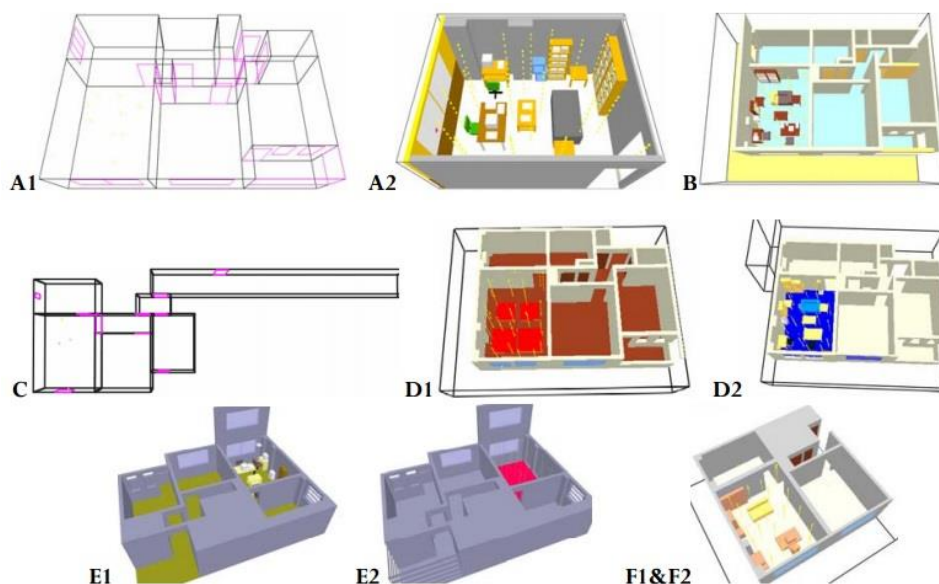


Figura 2.3 Modelos analisados no estudo round-robin de Rein *et al.* (2007)

Jahn *et al.* (2007; 2011) divulgaram outro estudo desenvolvido que consistiu na modelação *a posteriori* da fase de propagação do Dalmarnock Fire Test One, utilizando o software FDS, versão 4, com acesso total aos resultados do ensaio: descrição da carga de incêndio, traçado do compartimento, temperatura, fluxo de calor e gravação vídeo. Pretendia-se demonstrar que é possível reproduzir o comportamento do fogo de uma maneira satisfatória, se houver acesso a dados de medições que sejam suficientes para preparar o ficheiro de entrada (input) para a simulação. Nenhum outro ensaio ao fogo até à data tinha atingido medições experimentais com resolução espacial tão elevada, e nenhuma modelação levada a cabo tinha disposto de uma quantidade de dados desta magnitude. As simulações foram comparadas com os resultados do ensaio, e os parâmetros mais incertos do ficheiro de input foram consecutivamente alterados, até ser conseguido um melhor ajuste. Concluiu-se que, mesmo com acesso a um grande conjunto de dados experimentais, não é fácil reproduzir satisfatoriamente o desenvolvimento do incêndio. Tendo sido colocado grande ênfase na calibração da taxa de libertação de calor de calor (heat release rate, ou HRR) global, esta prática, mais adequada para modelos de zona do que para modelos de campo, poderá ter afetado a estimativa do comportamento local, onde foram verificadas maiores discrepâncias. Os parâmetros da turbulência, combustão e radiação no FDS não foram considerados neste estudo, induzindo alguns deles um grau de incerteza considerável na modelação do incêndio. Ainda assim, os autores defenderam que simulações *a*

posteriori baseadas em medições do ensaio permitem a reconstrução de cenários de incêndio realísticos, tanto qualitativamente como quantitativamente.

Em 2011, Kolaitis *et al.* (2011) apresentaram a simulação de um incêndio numa moradia unifamiliar de dois pisos com o programa FDS, versão 5. O objetivo do estudo foi averiguar a capacidade do software para simular com eficácia os campos de escoamento e temperatura, tendo em conta propriedades detalhadas dos materiais. Com base nas temperaturas das paredes, foi avaliada a resistência ao fogo para duas soluções construtivas: estrutura metálica com paredes de placa de gesso e estrutura de betão armado com paredes de alvenaria de tijolo. As previsões da concentração de gás tóxico e da produção de fumo permitiram a análise do risco para os ocupantes em caso de incêndio. Os autores provaram a capacidade qualitativa do software para simular a propagação do incêndio num cenário realístico, recomendando, contudo, a realização de outros estudos para validar a precisão quantitativa dos resultados.

Mariani e Silva (2011) utilizaram o software FDS, para a reconstrução de um incêndio ocorrido numa habitação em dezembro de 2008, na cidade de Samambaia, Brasil. O material constituinte predominante era a madeira. Os autores compararam o registo visual do material carbonizado obtido no fim da simulação com as fotografias dos vestígios deixados pelo incêndio, tendo observado semelhanças satisfatórias. Atestaram assim a capacidade do programa na produção de dados relevantes na simulação de incêndios em estruturas.

Dolvitsch *et al.* (2011) também adotaram este software para a reconstrução de um acontecimento – o incêndio do Shopping Total, na cidade de Porto Alegre, Brasil, em julho de 2007. Foi utilizado o programa PyroSim, que possibilita a conceção de modelos para o FDS através de uma interface gráfica. A simulação apresentou resultados qualitativos aceitáveis, relativamente à distribuição das temperaturas e à propagação do fumo. Os autores concluíram que, com acesso a informações sobre o estado inicial da estrutura, é possível modelar incêndios reais de grandes dimensões com uma aproximação razoável à dinâmica do acontecimento.

Em 2012, Glasa *et al.* (2012) modelaram um incêndio numa sala de cinema recorrendo ao software FDS, versão 5, através do PyroSim, versão 2010.2. Este tipo de acontecimento, não sendo muito frequente, pode contudo ser extremamente perigoso e danoso, devido à elevada concentração de espectadores e à toxicidade do fumo. Foi simulado o primeiro minuto do incêndio, por ser o período mais crítico para a evacuação dos espectadores em segurança. Os autores analisaram a propagação do fogo e do fumo (Figura 2.4), e inferiram as zonas da sala que constituiriam um maior risco.

Em 2013, Hurtado *et al.* (2013) utilizaram o FDS, versão 5.5.3, para a modelação de um ensaio ao fogo previamente realizado num apartamento – o protótipo de uma residência de baixo custo enquadrada num programa do governo brasileiro. Este tipo de habitações é geralmente caracterizado por uma elevada densidade de pessoas e bens. O modelo foi capaz de simular

adequadamente os resultados experimentais quanto à distribuição de temperaturas nas diferentes divisões.

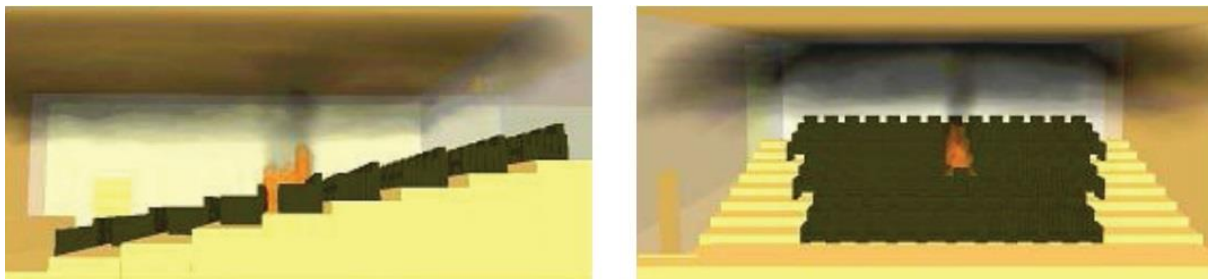


Figura 2.4 Último segundo da simulação de Glasa *et al.* (2012)

Sekret *et al.* (2013) levaram a cabo dois ensaios ao fogo, à escala real, num edifício abandonado, na cidade de Bytom, Polónia. Tinham como objetivo averiguar as temperaturas dos gases e as condições de toxicidade, em caso de incêndio, para habitações que tivessem sido alvo de medidas de eficiência energética para redução das perdas de calor. O primeiro ensaio foi conduzido num apartamento consideravelmente isolado; o segundo num apartamento com as aberturas e fugas normalmente observadas nas habitações. Complementarmente, realizaram também simulações *a priori* e *a posteriori* do primeiro ensaio, com recurso ao FDS, versão 5, de modo a validar a capacidade do software para modelar incêndios em condições de baixa ventilação. As temperaturas na camada quente de gás (camada superior, junto ao teto) obtidas na simulação apresentaram valores inferiores aos experimentais, com uma diferença de 25% na fase das temperaturas de pico, e posteriormente de 50% quando já tinha sido consumida grande parte do oxigénio. Por outro lado, o software sobrestimou as temperaturas na camada fria de gás (1 m acima do solo). Os autores afirmaram que estas discrepâncias poderiam possivelmente ser evitadas com a introdução no modelo de informação mais precisa a respeito da combustão, e com a utilização de uma malha com resolução superior. Destacaram a utilidade da modelação por CFD na engenharia de segurança contra incêndio como ferramenta para previsão de temperaturas em elementos estruturais expostos ao fogo, recomendando, contudo, especial rigor na aplicação deste método em situações de ventilação reduzida.

Em 2014, Yuen *et al.* (2014) divulgaram um ensaio ao fogo realizado num compartimento mobilado de uma habitação abandonada, em Parkes, Austrália, com o FDS, versão 5.5.3. O objetivo do estudo foi a obtenção de simulações de cenários de incêndio para um programa de formação online para bombeiros, que lhes permitiriam uma melhor compreensão do desenvolvimento do fogo num compartimento com determinada carga de incêndio. A validação do modelo foi conseguida por comparação dos resultados com as medições experimentais dos termopares, e por comparação da simulação da propagação do fogo e fumo com as gravações vídeo do ensaio. O software demonstrou ser capaz de obter estimativas razoáveis de temperaturas e fluxos de calor, caso as características da reação e do material combustível

estejam devidamente estabelecidas. A propagação do fogo e fumo foi bem simulada: conseguiu-se o desenvolvimento do fogo no sofá e a ignição do tapete induzida pela radiação da camada quente. A fase de crescimento do incêndio foi sobrestimada pelo programa, e o flashover foi, por isso, antecipado. Os autores concluíram que a modelação por FDS pode ser considerada uma metodologia fiável na reconstrução de incêndios. A simulação desenvolvida foi adotada com sucesso como ferramenta na formação de bombeiros.

2.2. Estruturas Metálicas e Mistas em Situação de Incêndio

Nos anos 90, em Cardington, Inglaterra, foi levado a cabo, pelo Building Research Establishment (BRE), um programa de ensaios ao fogo num modelo à escala real de um edifício metálico porticado de oito pisos – os ensaios ao fogo de Cardington. Pretendia-se investigar o comportamento de um edifício em aço sujeito a uma série de incêndios de compartimento localizados. Em 1999, Bailey *et al.* (1999) comunicaram os resultados de dois destes ensaios – o ensaio a um compartimento de canto e a um compartimento de grandes dimensões. Como carga de incêndio, utilizaram-se em ambos os casos paletes de madeira com uma distribuição de 40 kg por m² de área do compartimento. Os resultados revelaram que a legislação em vigor era demasiado conservativa, antecipando o colapso estrutural de vigas para uma temperatura de 680°C, quando a temperatura máxima registada foi de 903°C e tal não se verificou. O colapso global também não ocorreu. Outra observação muito importante foi a contribuição da laje mista (betão leve com rede de aço, em chapa perfilada trapezoidal) para a conservação da integridade estrutural devido à introdução do efeito membrana no pavimento. O nome deste efeito deve-se à curvatura verificada nas lajes que se manifesta segundo as duas direções principais. Ficou demonstrado que a ação composta da estrutura metálica com lajes mistas era capaz de proporcionar uma resistência ao fogo muito superior às que eram até então assumidas, que se baseavam em ensaios normalizados a elementos estruturais isolados.

No relatório de investigação aos ensaios de Cardington publicado pela empresa British Steel PLC (1999) no mesmo ano, foi aprofundado o desenvolvimento das ações de membrana de tração nas lajes mistas em situação de incêndio, para grandes flechas: em lajes encastradas, o suporte é conseguido por forças de tração na armadura de reforço da laje que está ancorada aos seus apoios (Figura 2.5a); em lajes com apoios simples, como lajes de bordo, desenvolve-se um anel de compressão em torno do perímetro que equilibra as forças internas de tração (Figura 2.5b). Como fatores mais preponderantes para o funcionamento destas ações, os investigadores referiram as dimensões do compartimento, o aquecimento de apenas uma zona da laje, e restrição suficiente garantida pelos apoios.

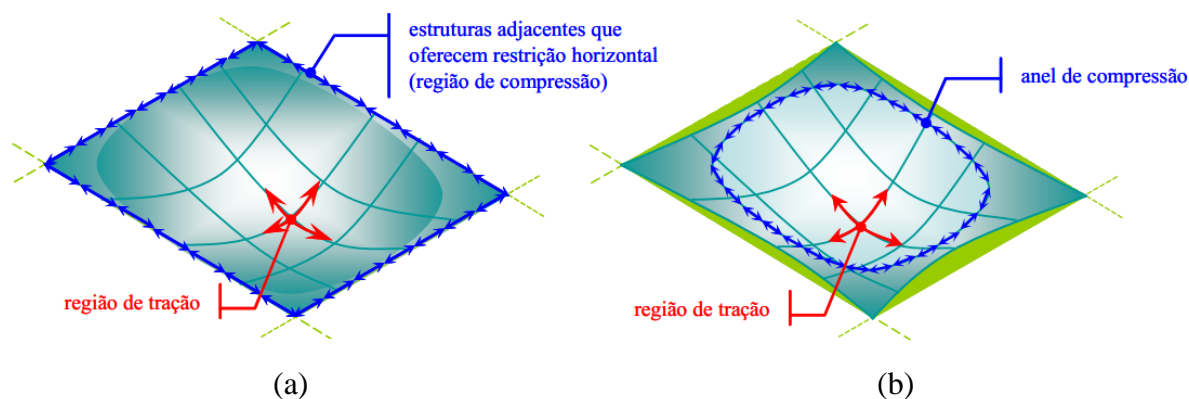


Figura 2.5 Ação de membrana de tração em lajes mistas, por Costa (2008)

Lim (2003) concluiu em 2003 o seu estudo sobre as ações de membrana em lajes maciças de betão armado. Através de ensaios experimentais e da análise por elementos finitos com o programa SAFIR, confirmou o acréscimo na resistência ao fogo devido às ações de membrana de tração em lajes armadas em duas direções. Concluiu que a mobilização deste efeito está dependente das dimensões do elemento – em lajes muito alongadas ($L_y/L_x \geq 2,5$) os benefícios são reduzidos – e das suas condições de apoio – para que a laje possa desenvolver a curvatura nas duas direções principais, as vigas nos quatro bordos não podem deformar excessivamente.

Em 2004, Burgess *et al.* (2004) divulgaram um estudo que consistiu na modelação numérica de três dos ensaios ao fogo de Cardington: viga restringida, compartimento de canto e compartimento de grandes dimensões. Foi utilizado o software Vulcan, desenvolvido na Universidade de Sheffield. Por comparação com os resultados experimentais, os autores demonstraram a capacidade do programa para prever o comportamento do edifício. Ficou evidenciado que a ação de membrana pode ter grande influência na integridade dos compartimentos, e que deve ser levada em consideração na modelação de estruturas com lajes mistas em situação de incêndio. As propriedades da armadura de aço utilizada e a espessura da camada de recobrimento revelaram-se os fatores mais importantes na prevenção da rotura do sistema de pavimento.

Usmani *et al.* (2006) apresentaram em 2006 o estudo de dois mecanismos de colapso de edifícios em situação de incêndio, previamente descobertos no contexto da investigação da queda das torres do WTC, em setembro de 2001: na situação de pilar rígido com piso frágil (Figura 2.6a), e na situação pilar frágil com piso rígido (Figura 2.6b). Assumiu-se à partida que não ocorreriam falhas nas ligações. Verifica-se em ambos os mecanismos a deformação acentuada dos pisos aquecidos, gerando deslocamentos horizontais no pilar, que causam a compressão dos pisos não aquecidos.

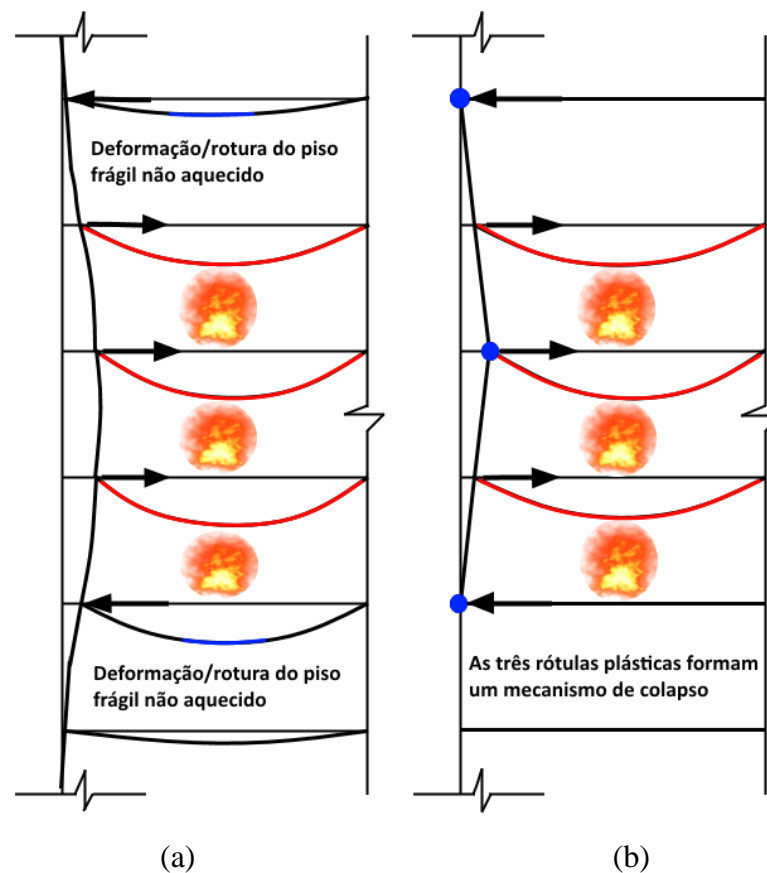


Figura 2.6 Mecanismos de colapso estudados por Usmani *et al.* (2006)

No caso da esquerda, há a deformação destes pisos (frágeis) que, em caso de rotura, desencadeiam o colapso progressivo da estrutura. Na situação da direita, as reações horizontais ao nível dos pisos não aquecidos (rígidos) são tais que não permitem a deformação do pilar. Estabelece-se um mecanismo de três rótulas plásticas, que origina o colapso progressivo. O objetivo da análise desenvolvida pelos autores era averiguar se estes mecanismos eram também aplicáveis a edifícios em altura mais convencionais. Esta hipótese foi testada com a modelação por elementos finitos de uma estrutura metálica com laje mista para as duas situações. Todas as secções foram modeladas com elementos viga. A configuração deformada obtida confirmou a ocorrência do mecanismo, quer no caso com pisos frágeis (Figura 2.7a), quer no caso com pisos rígidos (Figura 2.7b). Com base nestes resultados, os autores propuseram ainda um método de cálculo simplificado para a verificação da segurança de edifícios em altura com incêndio em um ou mais pisos.

Em 2010, Quiel e Garlock (2010) procuraram investigar o grau de detalhe e complexidade que deve ser garantido no modelo computacional de elementos finitos de um edifício metálico porticado em altura, de modo a prever a sua resposta térmica e estrutural em situação de incêndio. Realizaram por isso análises comparativas do desempenho de modelos que

desenvolveram, em termos de precisão e eficiência, relativamente a três parâmetros: a representação tridimensional ou bidimensional do sistema estrutural, a consideração ou não da laje num modelo bidimensional, e a aplicação uniforme ou não uniforme de temperaturas aos elementos de aço de um modelo bidimensional. Os resultados obtidos indicaram que modelos bidimensionais poderiam ter utilidade na previsão do desempenho dos pilares exteriores e vigas adjacentes de pórticos rígidos em altura sujeitos ao incêndio, com tempos de análise 250 vezes inferiores aos de modelos tridimensionais. Contudo, no estudo do comportamento das restantes vigas, foram observadas menores flechas nos modelos tridimensionais, e estes demonstraram ser uma melhor opção por contabilizarem a ação das lajes contínuas. Os autores concluíram ainda que, em situação de incêndio, a inclusão das lajes num modelo bidimensional vai influenciar as temperaturas nas vigas e, por consequência, também o comportamento estrutural do pórtico. A consideração de gradientes térmicos nos elementos estruturais também provou ser importante na previsão do comportamento de um modelo deste tipo.

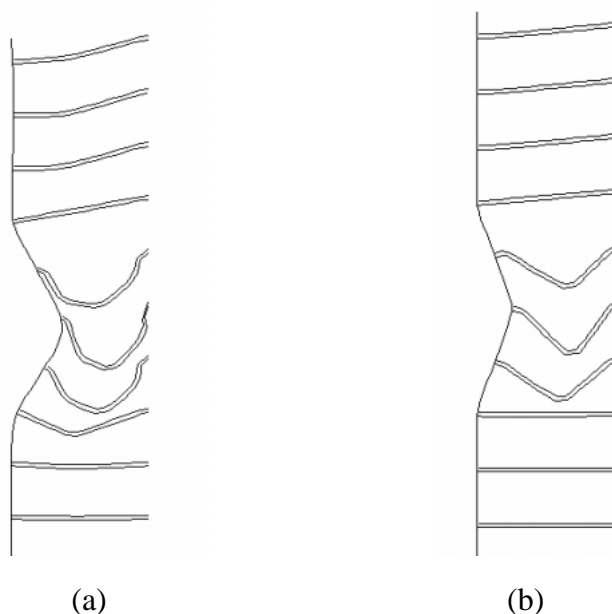


Figura 2.7 Deformadas obtidas por Usmani *et al.* (2006)

No mesmo ano, Correia *et al.* (2010) levaram a cabo um estudo numérico, para averiguar o comportamento de pilares de aço inseridos em paredes, com dilatação térmica restringida, em situação de incêndio. Por um lado, a presença de paredes têm um efeito negativo nos pilares: ao contribuírem para o aquecimento diferencial ao longo da secção, introduzem momentos fletores desfavoráveis, que podem levar à instabilidade destes elementos – fenómeno conhecido como “thermal bowing”. Por outro lado, funcionam também como isolamento térmico e ajudam na redução das temperaturas, o que contribui para um melhor comportamento ao fogo.

Utilizando o software de elementos finitos ABAQUS, desenvolveram-se modelos de pilares HEA 160 e HEA 200 sujeitos ao fogo, em duas situações diferentes: isolados e embebidos em paredes simples de alvenaria. Para estes últimos, testaram-se ainda várias combinações possíveis: fez-se variar a espessura da parede e também a orientação da alma da secção em relação à superfície da parede (paralela ou perpendicular). Os modelos numéricos foram construídos com elementos sólidos, e os resultados das análises computacionais foram validados com base nos dados obtidos em ensaios laboratoriais. Os pilares inseridos em paredes apresentaram melhor resistência ao fogo que os pilares isolados. Os autores concluíram assim que o efeito benéfico conseguido com o isolamento térmico dos pilares pelas paredes é mais preponderante que o efeito negativo dos gradientes térmicos. A espessura das paredes circundantes demonstrou ser o parâmetro com maior influência no comportamento dos pilares: paredes mais espessas resultaram em resistências ao fogo superiores.

Em 2013, Selamet (2013) aplicou uma carga de incêndio ao modelo de um edifício com 49 pisos em estrutura metálica, segundo a curva padrão ISO 834, da International Organization for Standardization, ou ISO (1999). Pretendia avaliar o comportamento estrutural e chegar a uma melhor compreensão da influência das cargas de incêndio no mecanismo de colapso de um edifício em altura. Recorreu ao software de elementos finitos LS-DYNA, utilizando elementos viga para os pilares e vigas, e elementos casca para os pisos de betão. O autor procurou simular o comportamento de um pavimento misto através da ação composta de vigas secundárias metálicas com a laje de betão. Adotou ligações rígidas entre os pilares e as vigas principais, e ligações articuladas nos extremos das vigas secundárias e elementos de contraventamento. Foram consideradas as ações permanente e sísmica, e realizadas seis simulações de incêndio (Figura 2.8). Cada caso consistiu no aquecimento simultâneo de três pisos adjacentes, mas fez-se variar a posição do fogo em altura (nos pisos inferiores, médios ou superiores) e segundo no plano horizontal (com aquecimento simétrico ou assimétrico).

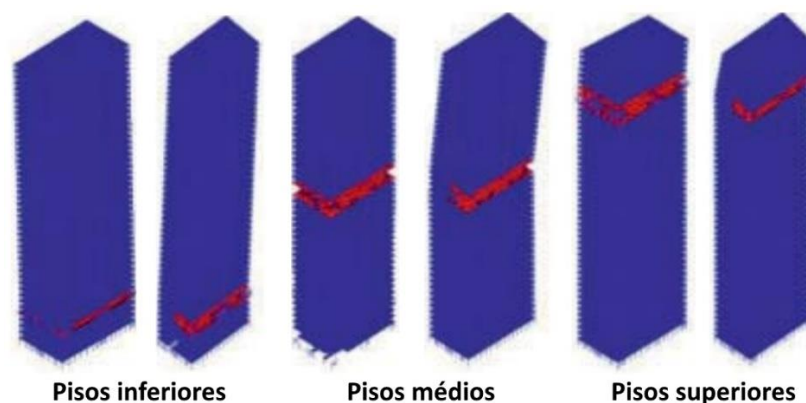


Figura 2.8 Situações estudadas por Selamet (2013) – pisos aquecidos a vermelho

Os resultados indicaram que uma carga de incêndio a atuar de modo assimétrico no plano horizontal é mais danosa e antecipa o colapso global, ao fazer com que a estrutura se incline para o lado correspondente à região aquecida. Para além disso, sugerem que, mesmo um edifício dimensionado para resistir a um sismo de grande magnitude, não resiste ao enfraquecimento dos pisos devido ao incêndio. A aplicação da carga de incêndio a diferentes cotas não revelou ter grande influência no desenvolvimento do colapso estrutural. Em todos os casos analisados, verificou-se que, devido à expansão lateral dos pisos, os pilares entraram em tração nos níveis imediatamente acima e abaixo das zonas aquecidas.

Em 2014, Agarwal e Varma (2014) realizaram uma avaliação qualitativa da importância dos pilares interiores na estabilidade de um edifício de 10 pisos, em estrutura metálica, sujeito a um incêndio num compartimento de canto. Desenvolveram modelos de elementos finitos no programa ABAQUS. Utilizaram elementos viga para modelar pilares e vigas, e elementos casca para modelar lajes de betão. Como pretendiam simular o comportamento de um pavimento misto, estabeleceram ligações rígidas entre lajes de betão e vigas metálicas secundárias, com um determinado espaçamento. Modelaram o comportamento das ligações aparafusadas com elementos mola. Seguindo a orientação do International Building Code (IBC) que recomenda a estabilidade ao fogo de uma hora nos elementos estruturais deste tipo de edifícios, os investigadores optaram por aplicar uma curva de incêndio que tinha um desenvolvimento idêntico ao da curva temperatura-tempo ($T - t$) padrão da norma ASTM E-119 durante este período, e assumia depois uma fase de arrefecimento linear de duas horas, até atingir a temperatura ambiente. A espessura do pavimento era tal que não foi necessário considerar qualquer proteção ao fogo na chapa perfilada para cumprir este requisito. Em pilares e vigas adotou-se um material projetado. Os autores investigaram duas situações distintas: um edifício com um núcleo interior de paredes em betão armado, e um edifício com pórticos exteriores rígidos. No primeiro caso (Figura 2.9a), verificou-se aos 60 minutos de incêndio que os quatro pilares aquecidos tinham expandido cerca de 16 mm. Pouco depois, entraram em cedência e atingiram a rotura aos 85 minutos, quando apresentavam uma temperatura de aproximadamente 560°C. Constatou-se o colapso progressivo daquele canto do edifício. Já no segundo caso (Figura 2.9b), também se verificou a rotura aos 85 minutos, mas apenas do pilar interior, que encurvou em torno do eixo de menor inércia. Observou-se um deslocamento vertical local nos pisos acima da zona danificada, que parou aos 1,1 m quando o sistema estrutural voltou a estabilizar. Não houve quaisquer outros colapsos, roturas ou instabilidades a registar. Os pilares exteriores apresentavam neste caso secções maiores e foram dimensionados para conferir rigidez e resistência superiores aos pórticos em que se enquadravam, de modo a garantir a estabilidade do sistema estrutural perante ações laterais do vento e sismo. Os graus de utilização destes elementos eram por isso inferiores, comparativamente com os pilares exteriores do edifício com núcleo rígido, e esta foi a razão pela qual não chegaram à rotura.

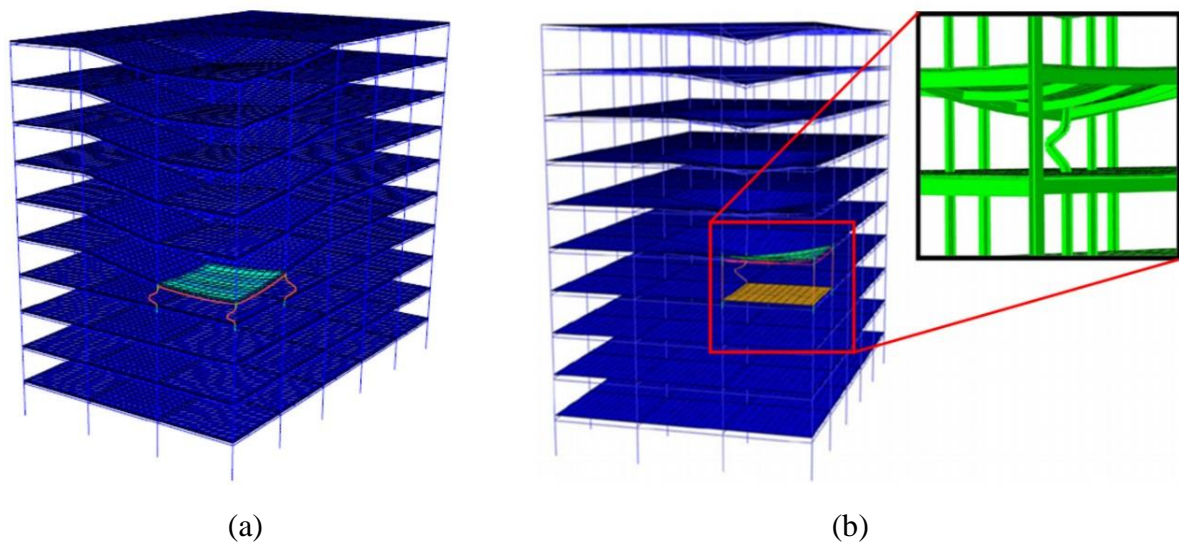


Figura 2.9 Deformadas dos dois casos analisados por Agarwal e Varma (2014)

De um modo geral, os resultados demonstraram que os pilares interiores são os mais preponderantes para a estabilidade deste tipo de estruturas em situação de incêndio – apresentam maiores graus de utilização e estão por isso predispostos a atingir as temperaturas críticas mais cedo. Em caso de rotura, os carregamentos são suportados pelos pilares adjacentes. Esta redistribuição desenvolve-se através do pavimento por caminhos de carga alternativos, seguindo comportamentos como a ação de catenária em lajes armadas numa direção, ou a ação de membrana nas lajes armadas em duas direções. A presença do aço na laje mista (na chapa perfilada e na armadura), ao melhorar as suas resistências à tração e à flexão, contribui para uma redistribuição mais uniforme.

2.3. Aplicação da Modelação Computacional de Incêndios à Análise Estrutural

Em 2005, Jowsey *et al.* (2005), no âmbito de uma investigação de maior dimensão com o objetivo de avaliar o desempenho de edifícios metálicos em altura em caso de incêndio, realizaram a modelação computacional de um incêndio de compartimento através do software FDS, versão 4, para averiguar a variação das temperaturas ao longo do tempo em três pilares de aço que atravessavam a divisão, a três cotas: na base, a meia altura e no topo. Estes elementos estruturais estavam enquadrados num sistema com uma treliça, no topo da qual se desenvolve um pilar até ao cume do edifício. Os autores previam que a rotura desta treliça pudesse conduzir ao colapso global. Com as temperaturas calculadas, levaram ainda a cabo a análise estrutural desta por elementos finitos, com um modelo bidimensional desenvolvido no programa ABAQUS. Atingiu-se o colapso por rotura de uma das diagonais da treliça. Os autores concluíram que modelos tridimensionais de estruturas permitem análises mais precisas e podem

levar em consideração o efeito da redistribuição de esforços – a modelação bidimensional dos componentes estruturais principais apenas permite identificar o tipo de mecanismo de colapso.

No mesmo ano, o NIST (2005) divulgou o relatório final da investigação do colapso das torres 1 e 2 do WTC. No decorrer desta, foram conduzidos registos visuais e análises forenses nos destroços, e utilizaram-se simulações do comportamento do incêndio com o programa FDS, versão 4, para estimar as temperaturas nos elementos estruturais em diferentes fases do incêndio (Figura 2.10). O comportamento estrutural global dos dois edifícios foi estudado com o software de análise por elementos finitos ANSYS, através do qual se desenvolveram modelos tridimensionais. Utilizaram elementos viga para modelar os elementos metálicos e elementos casca para as lajes.

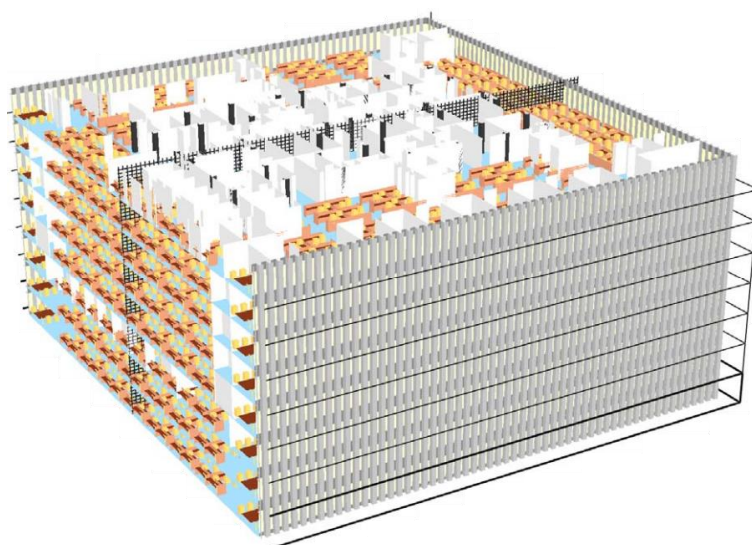


Figura 2.10 A torre norte antes do impacto, no modelo CFD do NIST (2005)

Os modelos numéricos foram capazes de simular a cronologia dos acontecimentos com uma precisão satisfatória, tendo-se observado um desfasamento de dois a três minutos da situação real. Ambos os edifícios tinham uma treliça no topo (“hat truss”) que ligava o núcleo rígido à estrutura periférica, e, no caso da torre norte (1 WTC), ajudava também a sustentar a antena gigante. Os pisos encontravam apoiados no núcleo e nos pórticos exteriores que constituíam os painéis de parede. Após a perda de alguns pilares exteriores causada pelos impactos dos aviões, as treliças foram capazes de redistribuir as cargas para o núcleo. Mas, com o desenvolvimento do incêndio nesta zona, ocorreu a destruição da proteção dos elementos estruturais, que tinha sido dimensionada para um incêndio típico de escritório. Os investigadores identificaram este evento como o mais preponderante no colapso. Com a exposição às temperaturas elevadas, o núcleo perdeu rigidez e os pisos deformaram, puxando os pilares exteriores para dentro. A rotura destes elementos deu origem ao colapso progressivo.

Caldas *et al.* (2006) apresentaram em 2006 um estudo ao comportamento de um pavimento misto (betão em chapa perfilada trapezoidal) em duas situações distintas: sujeito ao incêndio definido pela curva padrão da norma brasileira NBR 5628, e sujeito a um incêndio natural com curva $T - t$ obtida no programa de CFD SmartFire. A modelação do comportamento estrutural foi realizada no software de elementos finitos Vulcan, e compararam-se as flechas em diferentes pontos da laje. Os autores observaram deformações muito superiores no pavimento a que se aplicou a curva padrão, que considera um crescimento indefinido das temperaturas. Concluíram assim que, se forem consideradas curvas de incêndio natural no dimensionamento de pavimentos mistos, é possível obter soluções consideravelmente mais económicas sem comprometer a segurança estrutural.

Em 2008, o NIST (2008) publicou o relatório final da investigação do colapso do edifício 7 WTC, em 2001. Apresentava um sistema estrutural mais convencional, em aço, dependendo de elementos de contraventamento para resistir às ações laterais. Numa fase inicial, os investigadores utilizaram o código FDS, versão 5, para estimar as temperaturas em diferentes compartimentos e elementos estruturais durante as 7 horas de duração do incêndio. Recorreram então ao software de elementos finitos ANSYS para modelar o comportamento estrutural dos pisos sob ação do fogo, até se verificar rotura. Por fim, com o programa LS-DYNA, conduziram uma simulação numérica do comportamento global edifício até ao colapso (Figura 2.11). Os resultados demonstraram que a falha consecutiva das ligações de vigas a um dos pilares interiores causou a sua rotura por encurvadura, e precipitou o colapso global.

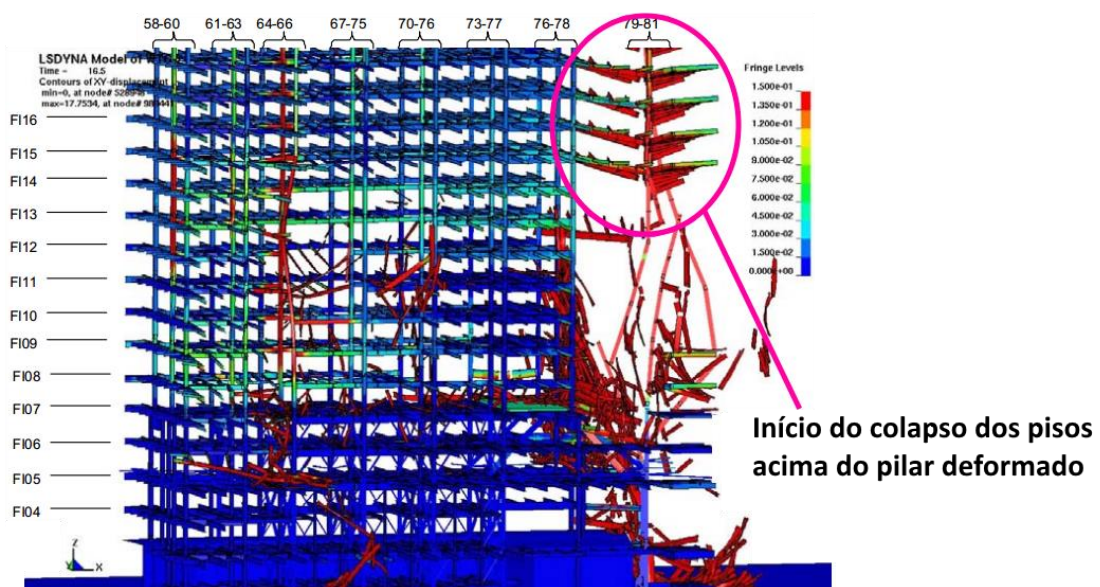


Figura 2.11 Análise do colapso do 7 WTC, aprofundada por McAllister *et al.* (2008)

Quintana *et al.* (2010) realizaram, em 2010, um estudo com o objetivo de garantir o cumprimento da legislação de segurança contra incêndio numa nova estação de autocarros em

San Sebastián, Espanha. Tratava-se de uma estrutura metálica em aço corten, composta por uma coluna central ligada a várias vigas ocas com vinte metros de comprimento, dispostas radialmente. Os autores pretendiam justificar a aplicação de um sistema de proteção ativa em substituição da aplicação de proteção aos elementos estruturais (proteção passiva), de modo a preservar o valor estético do projeto. Com base num ensaio de uma carrinha ao fogo previamente realizado, estabeleceram um cenário de incêndio. Simularam o respetivo comportamento num modelo de campo, levando em conta o funcionamento de um sistema de sprinklers dimensionado de acordo com o regulamento espanhol. A análise por elementos finitos centrou-se nas vigas metálicas, considerando-as encastradas, e assumiu as temperaturas determinadas na modelação do incêndio, e combinações de ações recomendadas pelos Eurocódigos. Devido às temperaturas previstas (inferiores a 350°C) e às condições de apoio (encastramento), os autores esperavam que se desenvolvesse ação de catenária no elemento, e que não se atingisse a rotura. Contudo, observaram encurvadura lateral aos 241°C, sem ocorrência da ação de catenária. Para verificar os resultados da modelação numérica, realizaram um ensaio à escala (viga com 5 metros). Os valores laboratoriais que obtiveram estavam em concordância com a análise computacional. Concluíram afirmando que a metodologia de verificação da resistência ao fogo proposta pelos Eurocódigos, em que se estuda o comportamento de elementos estruturais isolados sujeitos à curva padrão ISO 834, seria melhor para garantir a segurança em edifícios com estruturas regulares. Alegaram que, caso tivessem adotado este procedimento nas vigas que estudaram, poderiam não ter garantido a verificação da resistência.

Em 2012, Tonicello *et al.* (2012a) levaram a cabo a avaliação da segurança contra incêndio da estrutura da “Maison de la Paix”, a construir em Genebra. O edifício, de elevado valor arquitetónico, teria fachadas envidraçadas, lajes de betão pré-esforçado e seções metálicas ocas nos restantes elementos estruturais, e destinava-se a alojar salas de aula, salas de reuniões, um auditório, uma biblioteca e um café. Devido à inviabilidade económica da aplicação de proteção passiva nos elementos de aço expostos, os autores procuraram averiguar se estes poderiam permanecer desprotegidos e garantir a resistência ao fogo pretendida para o edifício (60 minutos). O procedimento recomendado pelos Eurocódigos (curva padrão ISO 834) demonstrou rapidamente que esta resistência não seria atingida, por isso adotou-se uma abordagem baseada no desempenho: a modelação CFD do incêndio, pelo software FDS, e a análise estrutural por elementos finitos com o programa SAFIR. Estudou-se o comportamento de uma treliça da cobertura, dos pórticos de fachada e dos pilares interiores. Os autores foram bem-sucedidos com esta metodologia de otimização. Adotando medidas de proteção ativa, foi possível deixar a treliça e as secções de aço da fachada completamente desprotegidas. Os pilares metálicos interiores com carregamentos axiais mais baixos também permaneceram sem proteção, e os restantes foram substituídos por pilares mistos.

Em 2014, Wang *et al.* (2014), na sequência do incêndio ocorrido em fevereiro de 2009 nas futuras instalações do Television Cultural Center (TVCC), em Pequim, China, apresentaram a avaliação realizada ao desempenho mecânico da estrutura após o evento (Figura 2.12). O edifício, de estrutura mista e com 159 metros de altura, tinha inauguração agendada para maio daquele ano, e o desastre veio adiar a sua data de abertura, que permanece ainda indefinida. O fogo foi desencadeado por efeitos pirotécnicos nas celebrações do ano-novo chinês e durou 6 horas, tomando a vida de um bombeiro por inalação de fumo.

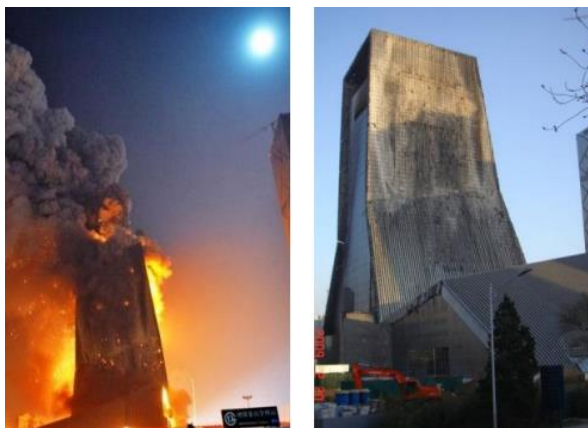


Figura 2.12 O edifício durante e após o incêndio, retirado de Wang *et al.* (2014)

Na investigação foi desenvolvido um modelo de campo com o código FDS para a simulação do incêndio em todo o complexo (Figura 2.13 Análises CFD e estrutural do incêndio no CCTV, por Wang *et al.* Figura 2.13a). Devido aos recursos computacionais disponíveis, a análise estrutural por elementos finitos centrou-se na zona mais afetada pelo fogo (Figura 2.13b).

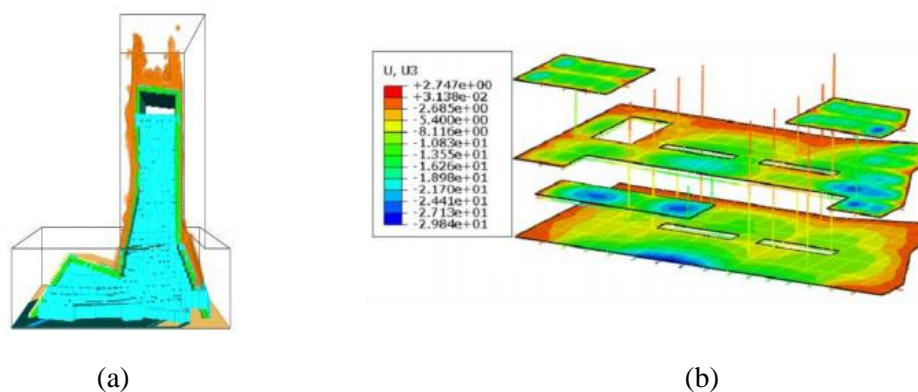


Figura 2.13 Análises CFD e estrutural do incêndio no CCTV, por Wang *et al.* (2014)

Foi ainda conduzido um extenso programa de ensaios laboratoriais a elementos estruturais de betão armado para averiguar o seu desempenho após incêndio e validar a análise computacional efetuada. Os autores referiram que os dados obtidos nesta avaliação foram relevantes para o processo de revitalização da construção.

3. DINÂMICA DE INCÊNDIOS

3.1. Generalidades

São várias as definições de fogo que se podem encontrar na literatura. Segundo a National Fire Protection Association, ou NFPA (2013), trata-se de um processo rápido de oxidação (reação química) que resulta na evolução de luz e calor a intensidades variadas. São três os componentes que devem estar presentes para a ocorrência deste fenómeno: calor, combustível e oxigénio. Aprofunda-se a seguir o mecanismo do fogo nos materiais sólidos, sendo o que melhor se enquadra no âmbito da dissertação.

Primeiro, a ação do calor aquece o material, que, ao atingir um determinado limiar de temperatura, entra em pirólise. Segundo Rein (2012), pirólise é um processo de decomposição irreversível que altera não só a composição química do material (decompondo cadeias longas de hidrocarbonetos, por exemplo), mas também o seu estado físico (para a fase líquida ou gasosa).

São os gases combustíveis libertados na pirólise que, na presença de oxigénio, entram em combustão – não o material sólido em si. A equação seguinte, retirada de Caldas (2008), representa a combustão completa de um elemento formado por carbono e hidrogénio, típica de um incêndio de compartimento:



Onde r , s , t , u e v são variáveis que expressam a quantidade dos componentes.

Combustão define-se assim como uma reação química exotérmica que envolve oxidação de matéria orgânica e libertação de vapor de água e dióxido de carbono, que depende da presença de oxigénio para ocorrer, de acordo com Buchanan (2001). A energia térmica libertada (calor) origina novamente o processo de pirólise, e está desenvolvida uma reacção em cadeia.

Caldas (2008) designa por incêndio todo o fogo que lava com intensidade, em material que não lhe estava destinado, causando destruição e, por vezes, prejuízos.

3.2. Transferência de Calor

Existem três mecanismos através dos quais o calor ou energia térmica (Q), medido em Joule (J), é transferido de um objecto para outro: condução, convecção e radiação. Para melhor quantificar a sua transmissão, é habitual utilizar-se o fluxo de calor (q), que traduz a quantidade de energia que flui através de uma determinada superfície por unidade de área e por unidade de tempo, medindo-se em $J/s \cdot m^2$, equivalente a W/m^2 . Segue-se uma breve introdução aos três processos, semelhante à descrição por Fu (2015).

3.2.1. Condução

A condução é o mecanismo de transmissão de calor em materiais sólidos. Esta transferência pode ser quantificada com recurso à Lei de Fourier da condução térmica:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3.2)$$

Onde:

- q é o fluxo de calor (W/m^2);
- λ é a condutibilidade térmica do material ($W/m K$);
- $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura através do material (K/m).

3.2.2. Convecção

A convecção é a transferência de calor entre uma superfície e um fluido em movimento. É extremamente importante num incêndio, pois é o principal mecanismo envolvido na transferência de calor – aproximadamente 70% da energia das chamas, segundo o manual da Federal Emergency Management Agency, ou FEMA (2014). Contribui assim em grande parte para a propagação das chamas, gases quentes e fumos. Exprime-se pela Lei do Arrefecimento de Newton:

$$q = h \cdot \Delta T \quad (3.3)$$

Onde:

- α_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2 K$);
- ΔT é a diferença de temperaturas entre a superfície e do fluido (K).

3.2.3. Radiação

A radiação é a transferência de calor por ondas electromagnéticas. Num incêndio, é responsável pela transmissão de cerca de 30% da energia da chama. Descreve-se pela seguinte equação (deduzida a partir da Lei de Stefan-Boltzmann):

$$q = F \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_e^4 - T_r^4) \quad (3.4)$$

Onde:

- F o fator de vista ($0 \leq F \leq 1$);
- ε é a emissividade ($0 \leq \varepsilon \leq 1$);
- σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$);
- T_e é a temperatura absoluta da superfície emissora (K);

— T_r é a temperatura absoluta da superfície recetora (K).

O fator de vista representa a quantidade de radiação que colide directamente com a superfície recetora, tomando valor 1 quando as duas superfícies são planos paralelos. A emissividade traduz as condições de emissão da radiação, sendo bastante elevada numa situação de fumo preto.

3.3. Taxa de Libertação de Calor

Taxa de libertação de calor (abreviatura HRR, símbolo \dot{Q}) é o termo comumente adotado pelos engenheiros de segurança contra incêndio para representar a taxa de produção de energia pelo fogo – a taxa de variação da entalpia devido a reacções químicas, a 25 °C e à pressão atmosférica. A unidade mais utilizada é o quilowatt (kW , ou kJ/s). Este conceito é traduzido pela equação seguinte, retirada de Rein (2012).

$$\dot{Q} = \Delta h_c \cdot \dot{m} = \Delta h_c \cdot \dot{m}'' \cdot A \quad (3.5)$$

Onde:

- Δh_c é o poder calorífico (kJ/kg de combustível);
- \dot{m} é a taxa de combustão, ou taxa de perda de massa (kg/s);
- \dot{m}'' é a taxa de combustão por unidade de área ($kg/s m^2$);
- A é a área do incêndio (m^2).

Está implícito nesta formulação que a HRR e a taxa de combustão (mass loss rate, ou MLR) estão relacionadas entre si pelo valor fixo do poder calorífico do material. Contudo, verifica-se em grande parte dos casos que esta grandeza não se mantém constante. É por isso comum o recurso a procedimentos experimentais praconizados para a medição directa da HRR, que podem ser ensaios de compartimento (à escala real) ou ensaios de calorímetro (escala real, reduzida ou intermédia). A Figura 3.1, adaptada do manual da SFPE (2002), Society of Fire Protection Engineers, representa um calorímetro aberto para ensaios de mobiliário à escala real.

Torna-se assim possível determinar a variação da taxa de libertação de calor de um produto ao longo do tempo, como se apresenta na Figura 3.2, retirada de Benichou (2002), para alguns itens de mobiliário. Quando um objeto deste tipo entra em ignição e é deixado em combustão sem restrições, observa-se normalmente um aumento exponencial da taxa de libertação de calor, à medida que as chamas aumentam de tamanho e radiam mais calor para o combustível. Atinge-se depois um valor máximo da HRR, seguido de combustão em regime permanente (HRR constante) e por fim, o decréscimo.

Caso se pretenda estudar a combustão de produtos que possam tomar configurações variadas, como revestimentos, realiza-se o ensaio de um provete com pequenas dimensões. A curva da variação da HRR é depois ajustada para traduzir a taxa de libertação de calor por unidade de área (*heat release rate per unit area*, HRRPUA), ou seja, o fluxo de calor. Estas curvas designam-se por curvas normalizadas.

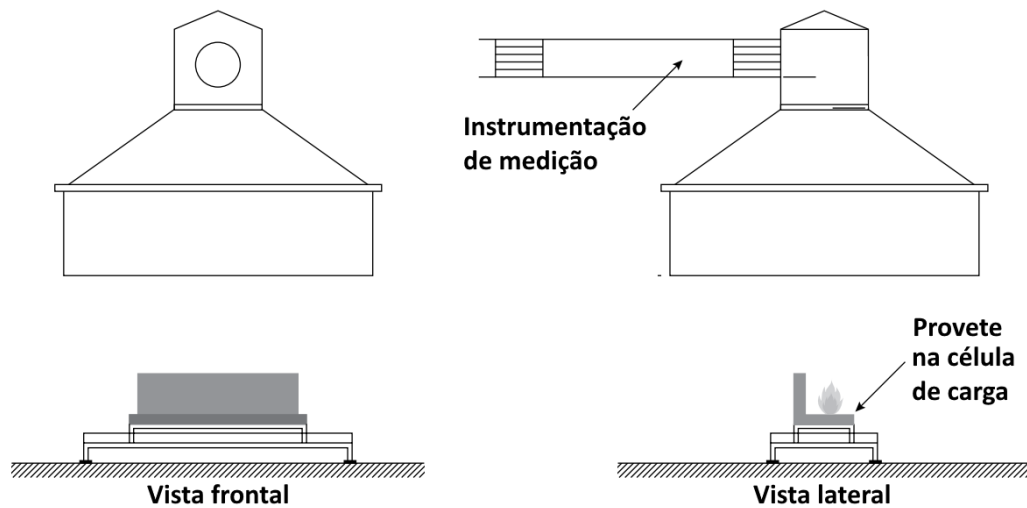


Figura 3.1 Calorímetro NORDTEST NT FIRE 032

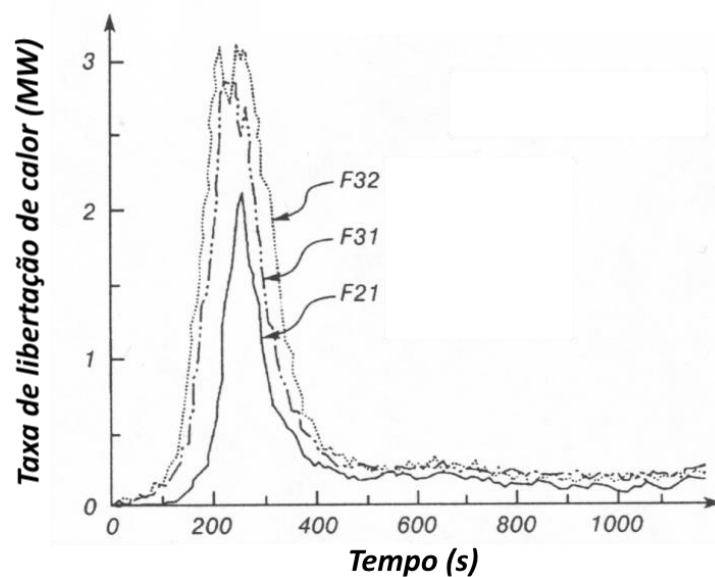


Figura 3.2 Curvas da HRR de ensaios de calorímetro à escala real

Ficou demonstrado em 1992, por Babrauskas e Peacock (1992), que a HRR de um elemento é a variável mais importante e significativa na caracterização da sua flamabilidade e, conseqüentemente, do seu risco de incêndio. Estudaram também outros parâmetros, como a toxicidade dos gases da combustão e o desfasamento entre tempos de ignição, que se revelaram pouco relevantes na previsão da ocorrência de um incêndio. Alguns autores, como Quintiere (2006), consideram taxa de libertação de calor uma designação incorreta e preferem o termo “potência de incêndio” (*firepower*).

3.4. Propagação

Segundo Benichou (2002), a propagação de incêndios em edifícios pode dividir-se em quatro categorias:

- No compartimento de origem;
- Para outros compartimentos no mesmo piso;
- Para outros pisos no mesmo edifício;
- Para outros edifícios.

Aborda-se de seguida a primeira das quatro, sendo a mais relevante no âmbito desta dissertação.

Segundo este autor, o desenvolvimento inicial de um incêndio no compartimento onde este se deflagra depende da taxa de libertação de calor do elemento em combustão, onde se dá a ignição. A propagação para os objetos adjacentes pode dever-se diretamente às chamas (convecção) ou transmissão de calor por radiação. Com o crescimento do fogo, o movimento de gases quentes sob o teto pode gerar o avanço para outras partes do compartimento. A difusão horizontal e vertical é significativamente agravada caso a divisão esteja revestida com materiais combustíveis, em especial nas paredes e teto.

3.5. Incêndios de Compartimento

A Figura 3.3, retirada de Fu (2015), traduz a evolução de um incêndio em desenvolvimento livre num compartimento típico, apresentando as seguintes fases: ignição, crescimento ou propagação, flashover ou inflamação generalizada, pleno desenvolvimento, declínio e extinção.

Dependendo da quantidade de combustível, as temperaturas no elemento em combustão aumentam a transferência de calor por convecção e radiação, abrangendo toda a divisão, chegando, a certo ponto, à combustão generalizada de todos os objetos. Verifica-se assim um aumento abrupto da temperatura. A fase de flashover traduz então a transição de um incêndio

localizado para um incêndio em todo o compartimento, e ocorre, segundo Resende (2009), entre os 450 e os 600 °C.

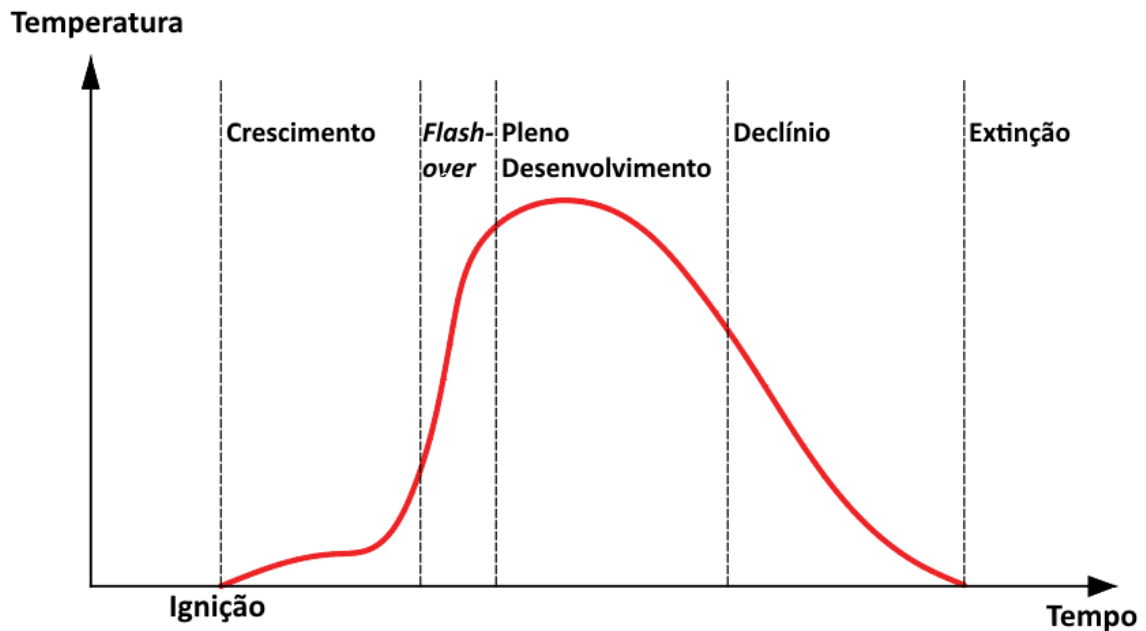


Figura 3.3 Curva temperatura-tempo para um incêndio de compartimento

Na fase de pleno desenvolvimento, tem-se a queima do material combustível. A liberação de calor está normalmente dependente do oxigênio disponível, ou seja, das condições de ventilação: dimensões e a forma das aberturas. Resende (2009) refere que as temperaturas podem ser superiores aos 1000 °C, junto ao teto, nos maiores incêndios. Um compartimento fortemente ventilado traduz uma situação semelhante a um incêndio a céu aberto e, neste caso, o fator condicionante é o combustível.

Na fase de declínio, a liberação de calor diminui, à medida que o combustível acaba de ser consumido.

Nem todos os incêndios de compartimento seguem esta sequência. Rein (2012) refere que em compartimentos de grandes dimensões não é comum verificar-se a inflamação generalizada da fração. Nestas situações observa-se normalmente um incêndio localizado que se desloca pela divisão. Este fenómeno já foi validado por dados experimentais e comprovado em vários incêndios reais: torres do WTC, em 2001; torre de Windsor, em 2005; Faculdade de Arquitetura da Universidade Técnica de Delft, em 2008.

3.6. Curvas de Projeto

Em projeto, um incêndio pode caracterizar-se com uma curva temperatura-tempo para a atmosfera na vizinhança imediata dos elementos estruturais. Feng (2015) refere que são dois os principais tipos de curvas utilizados diretamente na análise estrutural ao fogo:

- Curva de incêndio padrão ISO 834 – ISO (1999) – apresentada na Figura 3.4a;
- Curvas de incêndio paramétricas, como a presente no Anexo A da NP EN 1991-1-2 (2010), descrita pela Figura 3.4b.

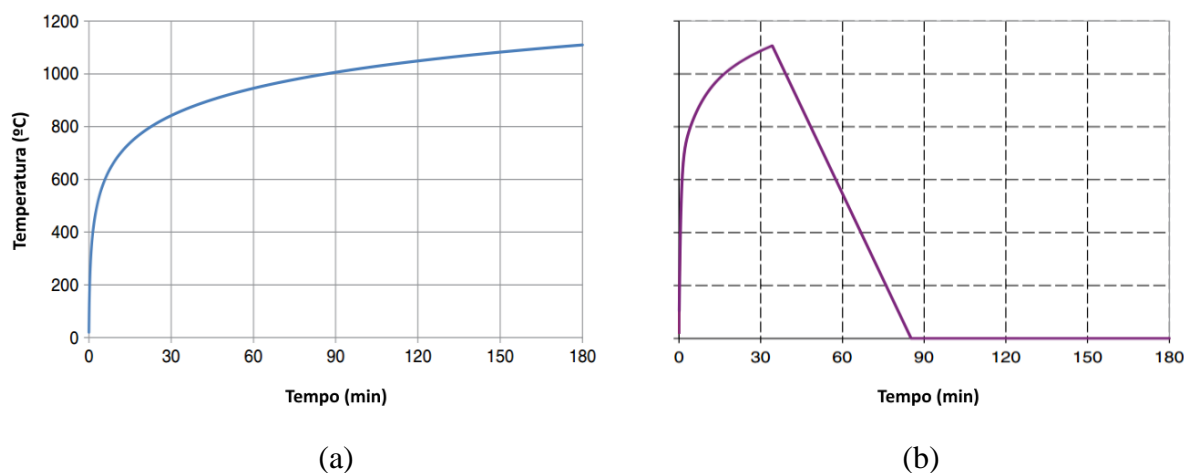


Figura 3.4 Curvas temperatura-tempo frequentemente adotadas em projeto

A subida da temperatura está definida em ambas as curvas por equações em função do tempo.

A curva paramétrica considera a existência da fase de arrefecimento do incêndio, atribuindo-lhe um troço linear decrescente. Torna-se necessário determinar até que ponto se desenvolve a subida da temperatura. Tal é conseguido com base na área total da superfície envolvente (paredes, teto e pavimento, incluindo aberturas) e nas propriedades térmicas da envolvente.

3.7. Propriedades dos Materiais a Elevadas Temperaturas

Os Eurocódigos 2 e 3, Parte 1-2, referem as propriedades mecânicas e térmicas que se considerar para o betão e para o aço em situação de incêndio. Foram estas as que se adotaram para os modelos computacionais desenvolvidos e que neste subcapítulo se apresentam.

3.7.1. Propriedades Mecânicas

Segundo a NP EN 1993-1-2 (2010), para determinar a resistência à tracção, à compressão, à flexão ou ao corte, deve ser utilizada a relação apresentada na Figura 3.5.

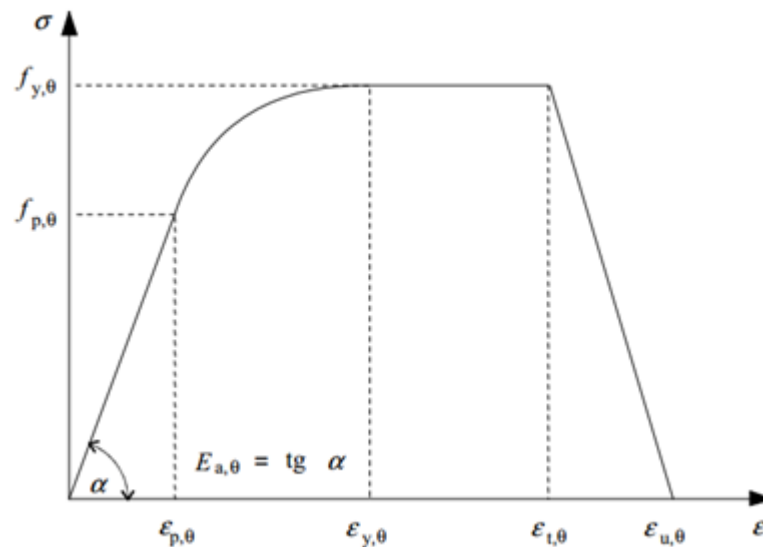


Figura 3.5 Relação tensões-extensões para o aço carbono a temperaturas elevadas

Onde:

- $f_{y,\theta}$ é a tensão de cedência efectiva;
- $f_{p,\theta}$ é a tensão limite de proporcionalidade;
- $E_{a,\theta}$ é a inclinação da recta que representa o domínio elástico;
- $\varepsilon_{p,\theta}$ é a extensão limite de proporcionalidade;
- $\varepsilon_{y,\theta}$ é a extensão de cedência;
- $\varepsilon_{t,\theta}$ é a extensão limite para o patamar de cedência;
- $\varepsilon_{u,\theta}$ é a extensão última.

Observam-se no gráfico quatro zonas distintas. Na primeira, é válida a Lei de Hooke, limitada pela tensão limite de proporcionalidade. A segunda zona é definida por uma curva elíptica, limitada pela tensão de cedência efectiva. Na terceira, verifica-se uma tensão constante, igual à tensão de cedência efectiva (zona plástica). Por fim, tem-se um decréscimo linear da tensão de cedência. O Quadro 3.1 define o desenvolvimento desta relação tensões-extensões.

Os factores de redução para a relação tensões-extensões do aço a temperaturas elevadas (Figura 3.6) são, por esta norma, definidos do seguinte modo:

- Tensão de cedência efectiva, referida à tensão de cedência a 20 °C: $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$;
- Tensão limite de proporcionalidade, referida à tensão de cedência a 20 °C: $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$;

— Inclinação da recta que representa o domínio elástico, referida à inclinação a 20 °C:

$$k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a.$$

Quadro 3.1 Relação tensões-extensões para o aço carbono a temperaturas elevadas

Domínio de extensões	Tensão σ	Módulo tangente
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + (b/a) \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}}$
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} \left[1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}) \right]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0,00	-
Parâmetros	$\varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta}/E_{a,\theta}$ $\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$ $\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$	
Funções	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c/E_{a,\theta})$ $b^2 = c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$	

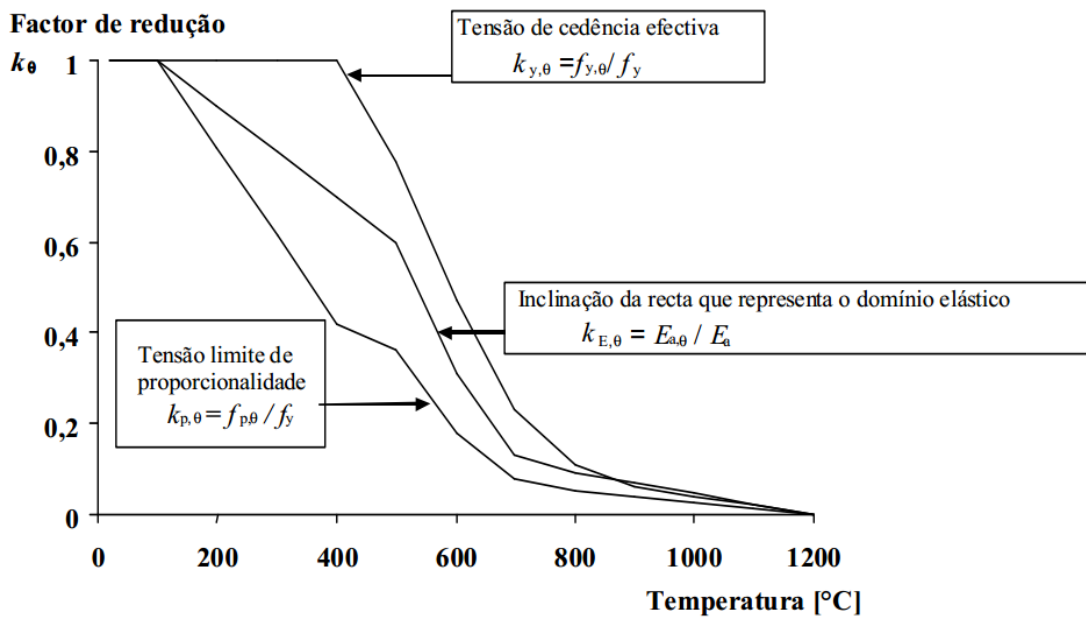


Figura 3.6 Factores de redução para a relação tensões-extensões do aço carbono

Observa-se que o factor de redução $k_{y,\theta}$ sofre um decréscimo súbito a partir dos 400 °C. A tensão limite de proporcionalidade, referida à tensão de cedência, é reduzida pelo factor $k_{p,\theta}$ e decresce abruptamente após os 100 °C. O módulo de elasticidade é reduzido pelo factor $k_{E,\theta}$, que também decresce a partir dos 100 °C por estar associado à tensão limite de proporcionalidade.

Para o betão, seguindo as recomendações da NP EN 1992-1-2 (2010), as propriedades de resistência e de deformação sob tensão uniaxial a temperaturas elevadas devem ser obtidas a partir das relações tensões-extensões representadas na Figura 3.7.

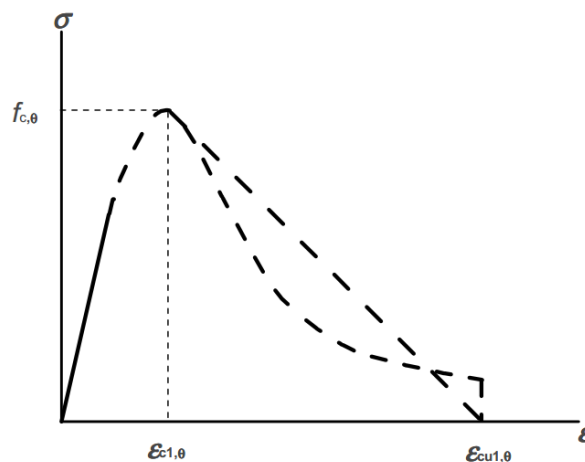


Figura 3.7 Relações tensões-extensões do betão em compressão a temperaturas elevadas

A norma recomenda que se ignore a resistência do betão à tracção. Em métodos simplificados ou avançados de cálculo, no caso de ser necessário considerar a resistência à tracção, deve ser aplicado um factor de redução $k_{c,t}(\theta)$ à tensão de rotura do betão à tracção, a temperaturas elevadas (Figura 3.8). Considera-se que o betão conserva a sua resistência à tracção até aos 100 °C, começando depois a reduzir linearmente até aos 600 °C, quando toma valor nulo.

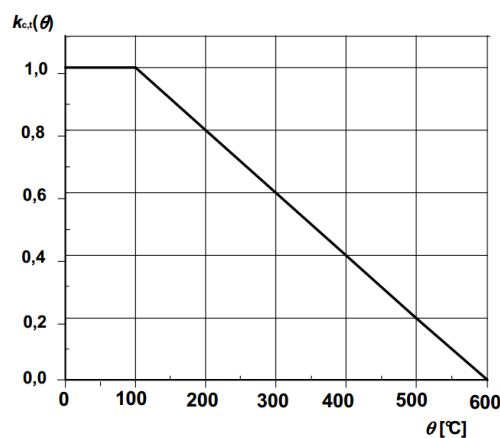


Figura 3.8 Coeficiente de redução da tensão de rotura do betão à tracção

3.7.2. Propriedades Térmicas

A extensão térmica, $\Delta l/l$, e o calor específico do aço, c_a , estão definidos na NP EN 1993-1-2 (2010) de acordo com a Figura 3.9 e a Figura 3.10, respetivamente.

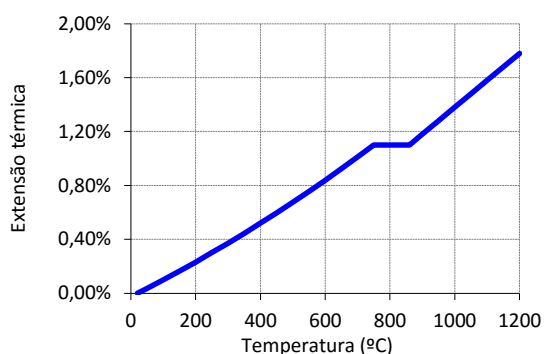


Figura 3.9 Extensão térmica relativa do aço carbono em função da temperatura

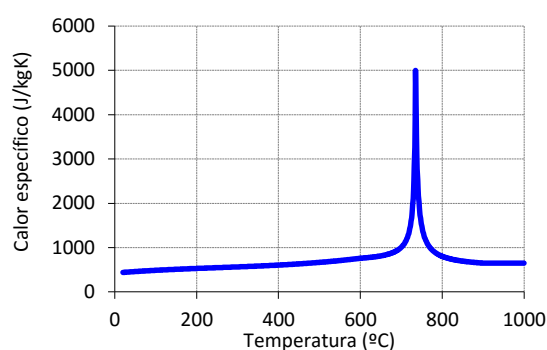


Figura 3.10 Calor específico do aço carbono em função da temperatura

A mesma norma estabelece a condutibilidade térmica do aço, λ_a , segundo o ilustrado na Figura 3.11.

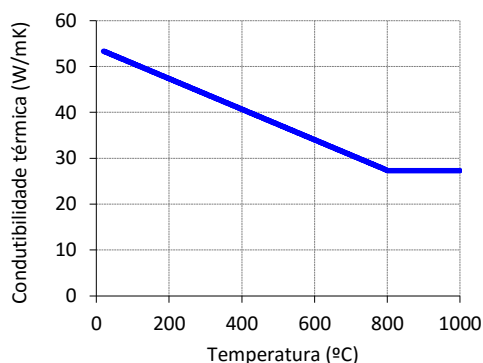


Figura 3.11 Condutibilidade térmica do aço carbono em função da temperatura

A extensão térmica do betão utilizada foi a definida na NP EN 1992-1-2 (2010), em função da temperatura, considerando agregados siliciosos na constituição (Figura 3.12). Como calor específico do betão, c_c , considerou-se a curva definida por esta norma para um teor de água de 3,0% do peso, para betão com agregados siliciosos (Figura 3.13).

A condutibilidade térmica do betão, λ_c , pela NP EN 1992-1-2 (2010), pode ser determinada entre os valores dos limites inferior e superior indicados na Figura 3.14. Adotaram-se valores intermédios na modelação.

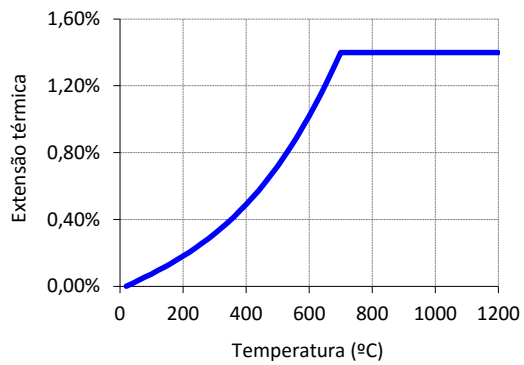


Figura 3.12 Extensão térmica total considerada para o betão em função da temperatura

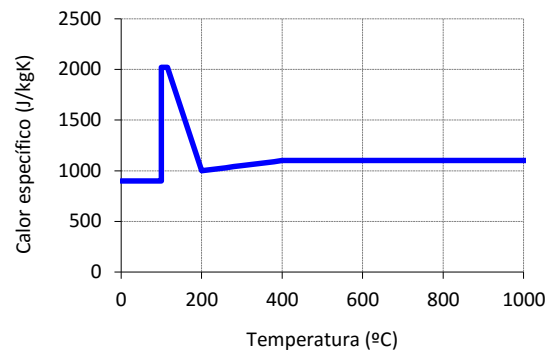


Figura 3.13 Calor específico considerado para o betão em função da temperatura

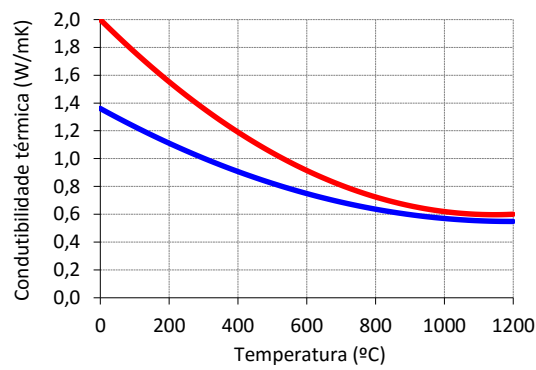


Figura 3.14 Condutibilidade térmica do betão em função da temperatura

4. APRESENTAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

4.1. Estrutura do Edifício

O objeto de estudo é um edifício em estrutura mista (pilares e vigas metálicos e lajes maciças de betão armado) de 10 pisos e 30 metros de altura, regular em altura, com as características geométricas indicadas na Figura 4.1.

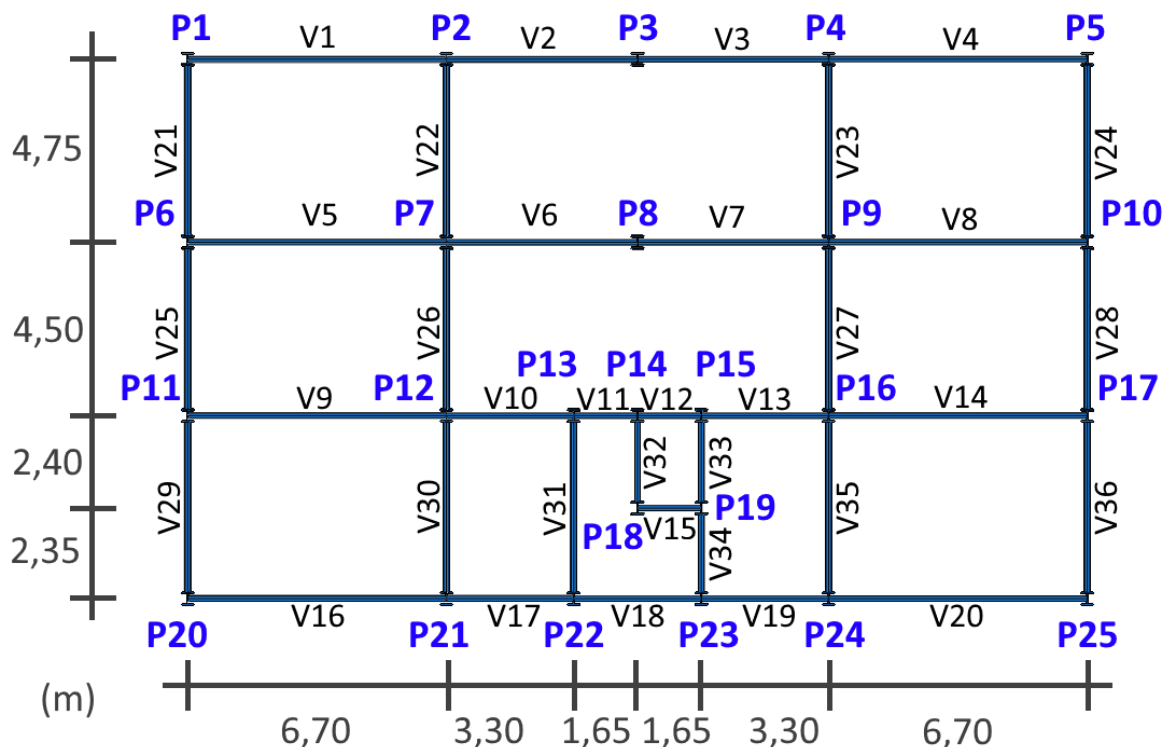


Figura 4.1 Geometria do edifício

A estrutura foi calculada no programa comercial Cypecad – CYPE Ingenieros, S.A. (2013) – versão 2014, sem verificação da resistência ao fogo, seguindo o Regulamento de Estruturas de Aço para Edifícios (REAE) para os aços laminados e o Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP) para os elementos de betão armado.

As acções do vento e do sismo foram determinadas a partir do Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSAEEP). Considerou-se o vento segundo as duas direcções principais, a atuar nos dois sentidos (coeficientes de cargas 1,00). A acção do sismo seguiu uma análise dinâmica modal espectral (6 modos).

Admitiu-se a categoria de utilização 2 (edifício privado). Aplicou-se em todos os pisos a sobrecarga de valor $2,00 \text{ kN/m}^2$ e uma carga permanente distribuída (revestimentos e paredes) de $2,75 \text{ kN/m}^2$ – Brazão Farinha e Correia dos Reis. (1993)

Os materiais utilizados foram o betão B30 (C25/30), o aço A400 para os varões e o aço Fe 510 (S355) para os perfis.

As secções dos elementos estruturais foram homogeneizadas para a seguinte solução:

- Pilares com o perfil HEM 300;
- Vigas com o perfil IPE 270;
- Diagonais de travamento com o perfil IPE 200;
- Lajes com 0,20 m de espessura.

4.2. Cenário de Incêndio

Admitiu-se que a estrutura dimensionada estaria submetida à acção do fogo durante jeita a um incêndio de 30 minutos. O cenário que se considerou foi um incêndio de compartimento a ocorrer do primeiro piso do edifício, de acordo com o indicado na Figura 4.2, tendo a divisão as dimensões aproximadas de 6,70 m de largura por 14 m de comprimento por 3 m de altura.

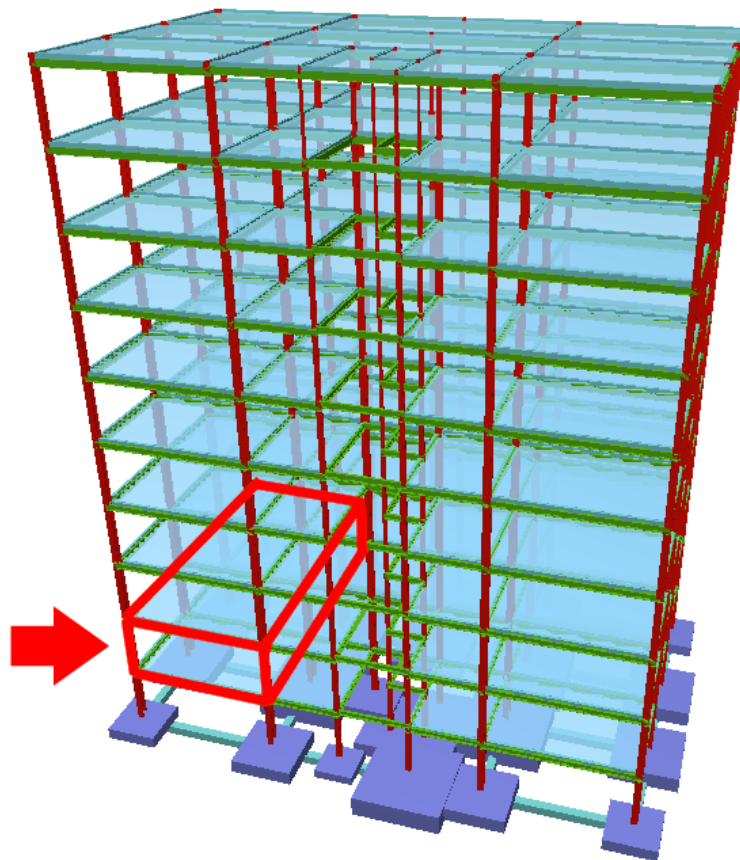


Figura 4.2 Localização do compartimento de incêndio

As paredes circundantes são de alvenaria. Admite-se a existência de uma janela de vidro, e considera-se que a porta interior de acesso ao compartimento se encontra aberta. As paredes interiores estão revestidas a papel de parede aplicado sobre placas de gesso com 13 mm de espessura. O piso e o teto do compartimento estão revestidos a contraplacado, com 8 mm de espessura. Os elementos estruturais metálicos estão totalmente expostos à acção térmica do incêndio, e não é contemplada qualquer medida de protecção ativa ou passiva.

O compartimento trata-se de um escritório para um efectivo aproximado de 10 pessoas. Encontra-se equipado com vários produtos combustíveis (Figura 4.3): mesas, armários, cadeiras, estantes, sofás e um televisor. Admite-se que a ignição do incêndio ocorre na zona dos sofás.

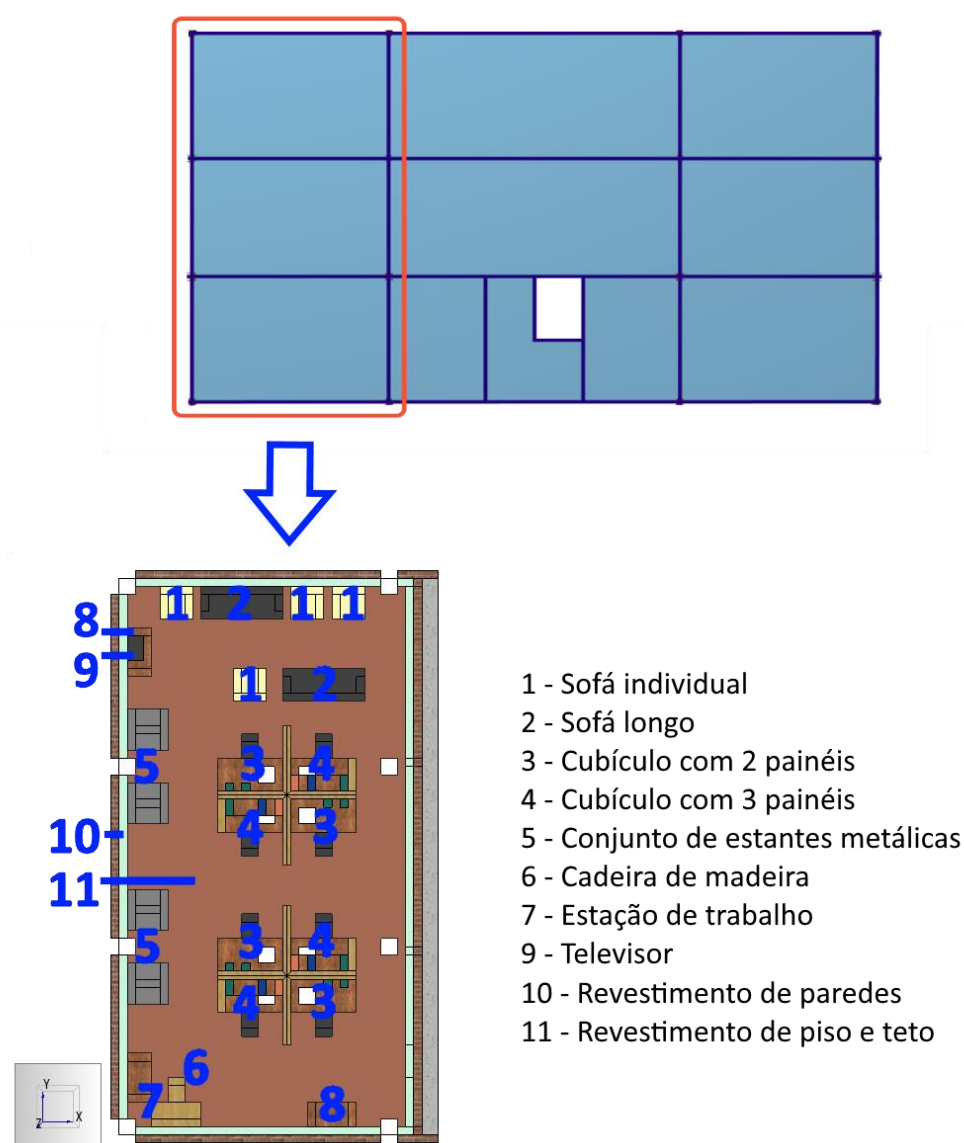


Figura 4.3 Identificação e localização dos equipamentos combustíveis

A Figura 4.4 faz um enquadramento tridimensional do cenário apresentado.

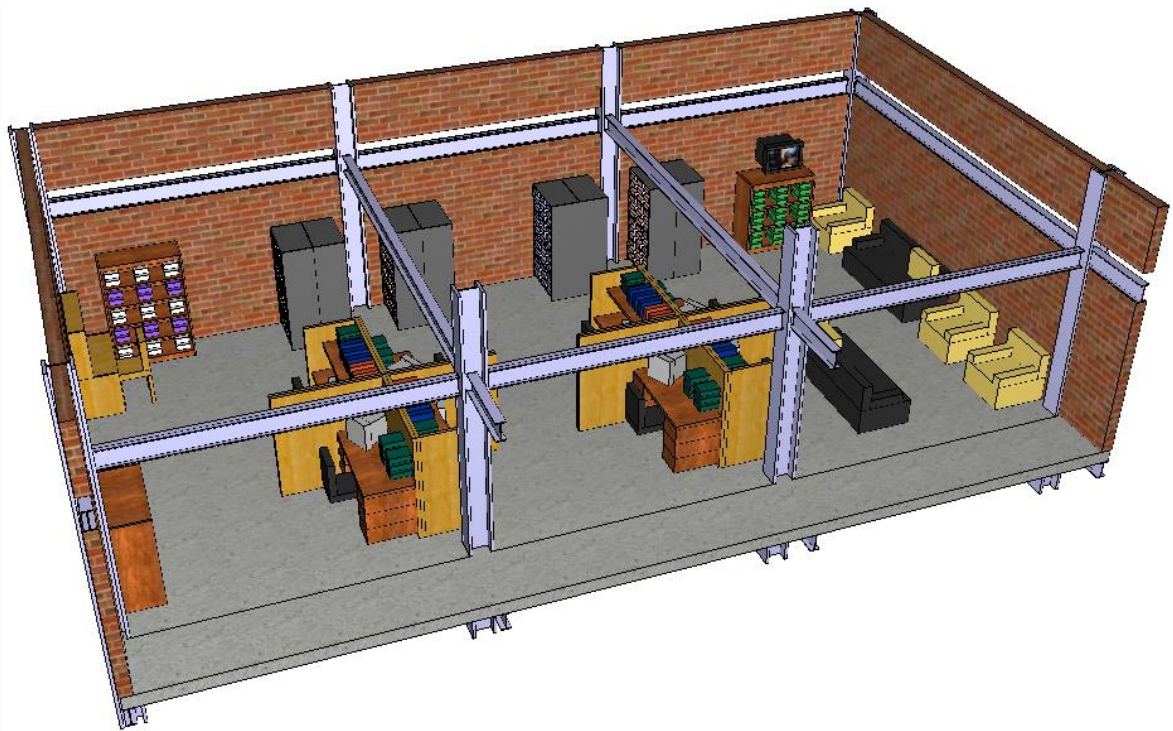


Figura 4.4 Caracterização do cenário de incêndio

5. MODELAÇÃO COMPUTACIONAL DO INCÊNDIO

5.1. Fire Dynamics Simulator

O programa FDS é o resultado do esforço internacional conjunto de duas instituições: o NIST e o VTT Technical Research Centre, na Finlândia. O desenvolvimento deste produto começou há 25 anos e a primeira versão foi lançada em 2000. Está em constante atualização, sendo-lhe periodicamente adicionadas novas características pelos autores – *vide McGrattan et al. (2014)*.

Os responsáveis pretendiam uma ferramenta para a resolução de problemas práticos da engenharia de segurança contra incêndio e para o estudo da dinâmica fundamental de incêndios e da combustão. As suas principais aplicações têm sido o projeto e estudo de sistemas de sprinklers e de deteção e controlo de fumos, e também a reconstrução de incêndios residenciais e industriais.

As principais características deste software são as seguintes:

Modelo hidrodinâmico: O FDS faz a resolução numérica de equações de Navier-Stokes apropriadas para escoamentos de baixas velocidades, com ênfase no transporte de fumos e calor em situação de incêndio. O algoritmo central é um método preditor corretor explícito, com precisão de segunda ordem no espaço e tempo. A turbulência, por defeito, é tratada por meio de uma simulação das grandes escalas (Large Eddy Simulation, ou LES), sendo possível utilizar também uma simulação numérica direta (Direct Numerical Simulation, ou DNS) com malhas numéricas suficientemente apertadas.

Modelo de combustão: Para a maior parte das aplicações, o programa considera uma reação química controlada por difusão, com uma única fase que utiliza três espécies químicas agrupadas: o ar, o combustível e os produtos. Por defeito, as últimas duas são computadas explicitamente. Há a opção de incluir reações que não sejam necessariamente deste tipo, assim como reações múltiplas.

Transporte de radiação: A transferência de calor por radiação está incluída no modelo por meio da resolução de uma equação de transporte de radiação para gás cinzento e, nalguns casos, por meio de um modelo de banda larga. A equação é resolvida utilizando uma técnica semelhante aos métodos de volumes finitos para o transporte de convecção. Recorrendo a aproximadamente 100 ângulos discretos, o resolvente de volumes finitos necessita de apenas 20% do tempo total de cálculo do processador – um custo modesto dada a complexidade do mecanismo de transferência de calor por radiação. Os coeficientes de absorção do fumo negro são computados com o modelo de banda estreita RadCal desenvolvido por Grosshandler (1993). As gotículas podem absorver e dispersar a radiação térmica. Esta característica é relevante nas situações em que há sprinklers, especialmente no caso de sprinklers de névoa. Os coeficientes de absorção e de dispersão baseiam-se na Teoria de Mie.

Geometria: O FDS aproxima as equações fundamentais numa malha rectilínea. As obstruções retangulares (objetos) são obrigados a enquadrar-se na malha subjacente.

Várias malhas: É possível prescrever várias malhas retangulares para analisar situações em que o domínio computacional não se enquadra facilmente numa única malha.

Processamento em paralelo: O FDS utiliza a interface de programação OpenMP que explora várias unidades de processamento no mesmo computador. Para clusters, emprega a interface MPI (Message Passing Interface).

Condições de fronteira: A todas as superfícies sólidas são atribuídas condições térmicas de fronteira, assim como informações sobre o comportamento do material na combustão. As transferências de calor e massa, de e para superfícies sólidas, é normalmente levada a cabo com correlações empíricas, embora seja possível computar directamente estes mecanismos com uma DNS.

O desenvolvimento de determinado cenário para análise no FDS consiste na conceção de um ficheiro de texto a partir da linguagem de programação desenvolvida pelos criadores, com a extensão `.fds`.

Este ficheiro é corrido a partir da linha de comandos ou de qualquer interface gráfica do utilizador. Posteriormente, a visualização das previsões numéricas calculadas (fumos, temperaturas, velocidades, toxicidade, ou outras variáveis) é conseguida através de outro software, o Smokeview. Este programa foi desenvolvido em conjunto com o FDS, por Forney (2014), e é instalado simultaneamente.

5.2. PyroSim

A dificuldade em criar modelos para o FDS e a longa curva de aprendizagem que este programa impõe, levou a empresa Thunderhead Engineering (2014) a desenvolver uma interface gráfica que, perante a introdução de dados, proporcionasse *feedback* imediato e garantisse a execução correta do ficheiro `.fds`. Neste trabalho recorreu-se a essa ferramenta, o PyroSim, para desenvolver o modelo de dinâmica computacional de fluidos. A versão utilizada foi a 2015.1.0130, que tem como base a versão 6.1.2 do FDS e do Smokeview.

Das várias potencialidades deste programa, destacam-se:

Importação de modelos CAD: O PyroSim permite a importação dos ficheiros de desenho assistido por computador (computer-aided design, ou CAD) dos formatos `.dxf` ou `.dwg` para que se proceda à construção do modelo directamente sobre a imagem. O software também possibilita a importação de imagens `.gif`, `.jpg` ou `.png`.

Gestão de malhas: O PyroSim facilita o processo de implementação de várias malhas retangulares no mesmo modelo ao validar os dados introduzidos pelo utilizador.

Sistemas AVAC: É possível a integração de sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) que transportem contaminantes e calor ao longo do edifício. É possível modelar escoamentos nestes sistemas independentemente da análise de qualquer situação de incêndio. Também podem funcionar como parte integrante do sistema de protecção, ao fazer a exaustão de fumos ou mantendo a pressurização das câmaras corta-fogo (CCF).

Importação de modelos do FDS: O programa permite importar e editar modelos `.fds` que não tenham sido criados no PyroSim.

Bibliotecas de propriedades: O software fornece bibliotecas de propriedades que se podem importar para os modelos e alterar. Incluem reações químicas, detetores de calor, materiais, partículas, superfícies e outros parâmetros.

Ferramentas de desenho: O conjunto das ferramentas de desenho disponibilizadas no PyroSim aceleram o processo de criação de um modelo, permitindo rapidamente editar obstruções (objetos), copiar, colar e aplicar texturas em superfícies.

Visualização de resultados: O programa permite lançar o Smokeview a qualquer altura e avaliar o progresso da simulação. Também traça automaticamente os gráficos de evolução dos parâmetros pretendidos ao longo do tempo.

5.3. Volume de Controlo

A malha (*mesh*) define o volume que vai ser analisado pelo programa e as células que o constituem. Tem que envolver todo o espaço relevante para a análise pretendida. Procurou-se assim que todo o compartimento e os elementos estruturais expostos ao fogo estivessem enquadrados neste domínio computacional (Figura 5.1).

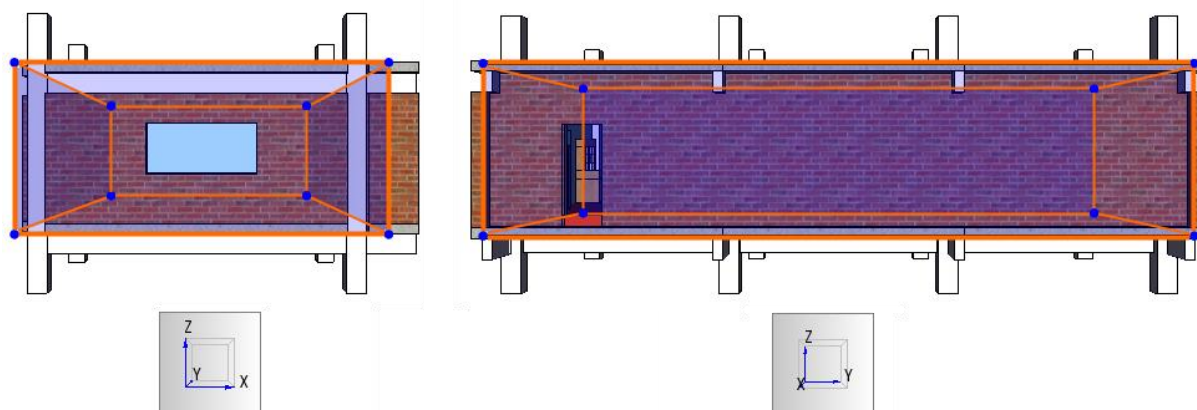


Figura 5.1 Limites exteriores da malha do modelo de CFD

O número de células que constituem a malha deve ser suficiente para garantir alguma precisão aos resultados obtidos, mas não elevado ao ponto de não permitir uma utilização eficiente dos recursos computacionais disponíveis. Neste estudo, o meio-termo foi encontrado com

elementos cúbicos de 20 cm de lado, num total 44030 células – solução que o Quadro 5.1 traduz com mais detalhe.

Quadro 5.1 Características da malha do modelo de CFD

Direção	Número de células	Dimensão de cada célula (m)	Limite superior (m)	Limite inferior (m)
X	37	0,20	4,00	-3,40
Y	70	0,20	7,00	-7,00
Z	17	0,20	4,60	1,20

5.4. Materiais

Para permitir a simulação da transferência de calor para as superfícies sólidas, foi necessário especificar as propriedades térmicas dos materiais utilizados. O Quadro 5.2 apresenta os valores considerados e as fontes onde foram consultados.

5.5. Envolvente do Incêndio

A envolvente do incêndio é constituída pelos pilares e vigas metálicos, lajes de betão e paredes de alvenaria (Figura 5.2). Consideraram-se dois vãos: uma abertura na parede interior, que representa uma porta aberta, e uma janela de vidro de 3 mm. Para simular a fratura do vidro com o desenvolvimento do incêndio, foi introduzido um controlo que remove este objeto caso a sua superfície atinja a temperatura de 360 °C – valor consultado em Babrauskas (1997).

Reformulou-se a geometria real de todos estes elementos com células cúbicas de 0,20 m para os enquadrar na malha escolhida.

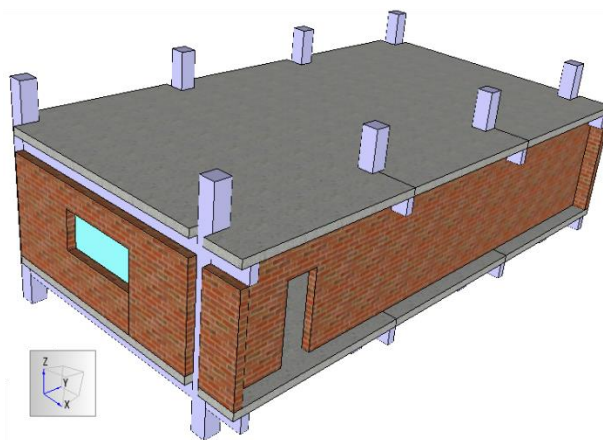


Figura 5.2 Modelo do compartimento onde ocorre o incêndio

Quadro 5.2 Propriedades térmicas dos materiais

Material	c (kJ/kgK)	λ (W/mK)	ε	α (m ⁻¹)
<i>Aço</i>	Variável	Variável	0,95	5×10^4
	Secção 3.7.2		Biblioteca do PyroSim 2015.1.0130	
<i>Betão</i>	Variável	Variável	0,90	5×10^4
	Secção 3.7.2		Biblioteca do PyroSim 2015.1.0130	
<i>Cerâmica</i>	0,840	0,72	0,90	5×10^4
	Biblioteca do CFAST v6.2.0.291			
<i>Vidro</i>	1,000	1,40	0,10	5×10^4
	Biblioteca do CFAST v6.2.0.291			
<i>Contraplacado</i>	1,215	0,12	0,90	5×10^4
	Biblioteca do CFAST v6.2.0.291			
<i>Gesso</i>	1,090	0,17	0,90	5×10^4
	Biblioteca do PyroSim 2015.1.0130			
<i>Espuma de sofás</i>	1,700	0,05	0,90	5×10^4
	Biblioteca do PyroSim 2015.1.0130			
<i>Madeira de coníferas</i>	1,380	0,12	0,90	5×10^4
	Biblioteca do CFAST v6.2.0.291			
<i>Papel</i>	1,336	0,05	0,93	5×10^4
	Engineering ToolBox (2015)			Bib. CFAST v6.2.0.291: material por defeito
<i>Poliestireno de alto impacto</i>	1,400	0,22	0,90	5×10^4
	MakeItFrom.com (2015)		Biblioteca do CFAST v6.2.0.291: material por defeito	

5.6. Produtos Combustíveis

O programa estima a propagação do incêndio com base na temperatura de autoignição (ou ponto de ignição) e na evolução da taxa de libertação de calor de cada produto combustível. Os objetos que constituem a fonte de ignição do incêndio (sofás) seguem imediatamente a sua curva de HRR com o arrancar da simulação.

5.6.1. Cubículo de Escritório com 2 Painéis

A curva da HRR ao longo do tempo para este conjunto foi determinada num ensaio realizado pelo NIST (2011a), em 1991, no Building and Fire Research Laboratory, ou BFRL. A Figura 5.3 relata o registo visual da experiência laboratorial.

Ao modelar, procurou-se replicar a geometria real do elemento com base no ficheiro vídeo do ensaio disponibilizado online (Figura 5.4a). Estas características dimensionais foram depois corrigidas para se enquadrarem na malha de elementos previamente definida (Figura 5.4b). O gráfico da Figura 5.5 traça a curva da HRR obtida em laboratório.

Estabeleceu-se a autoignição deste elemento para 225 °C – de acordo com T.C. Forensic (2015) – a verificar numa superfície de madeira de coníferas com 3 cm de espessura.



Figura 5.3 Ensaio ao cubículo de escritório com 2 painéis

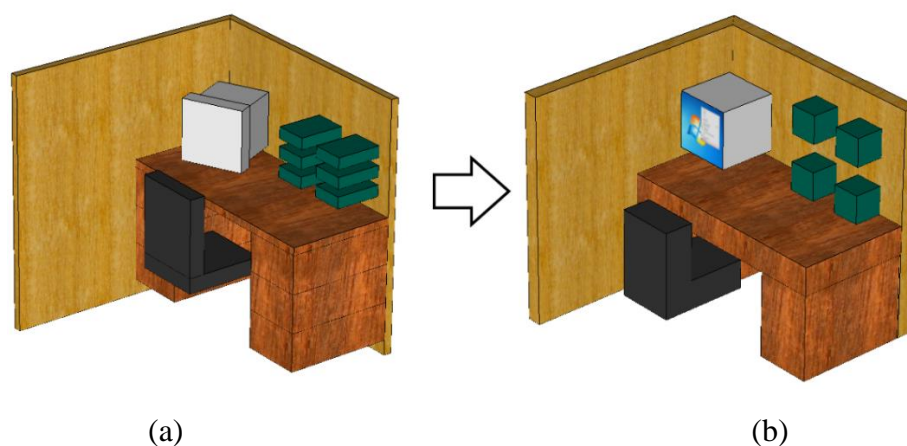


Figura 5.4 Rasterização da geometria do cubículo de escritório de 2 painéis

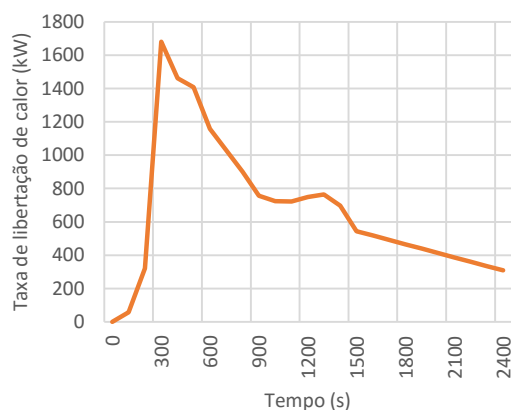


Figura 5.5 Evolução da HRR do cubículo de escritório de 2 painéis

5.6.2. Cubículo de Escritório com 3 Painéis

No mesmo programa experimental, o NIST (2011b) ensaiou também um cubículo de escritório com 3 painéis. A metodologia seguida na modelação deste objeto foi idêntica à do anterior (Figura 5.6), tendo-se-lhe atribuído a curva da HRR apresentada na Figura 5.7.

Os parâmetros estabelecidos para a autoignição deste elemento foram idênticos aos do anterior.

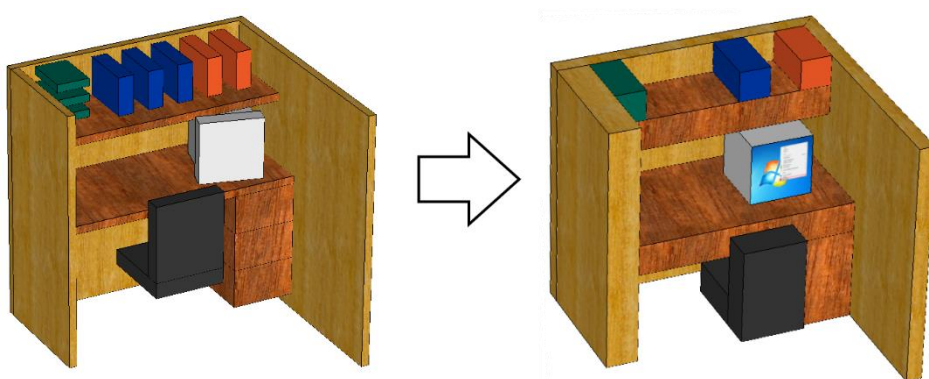


Figura 5.6 Rasterização da geometria do cubículo de escritório de 3 painéis

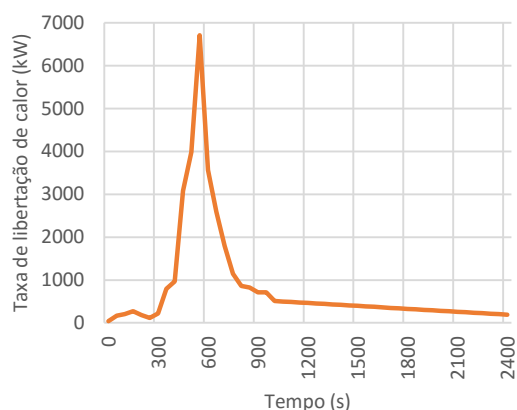


Figura 5.7 Evolução da HRR do cubículo de escritório de 3 painéis

5.6.3. Cadeira de Madeira

Para a modelação de uma cadeira de madeira, adotou-se a curva de HRR (Figura 5.8) determinada num programa de ensaios levado a cabo por Ahonen *et al.* (1984) em 1984, na Finlândia. O relatório técnico que elaboraram não apresenta as dimensões do objeto. Procurou-se assim atribuir-lhe uma geometria típica desde tipo de móvel, (Figura 5.9).

Os parâmetros estabelecidos para a autoignição deste elemento foram idênticos aos do anterior.

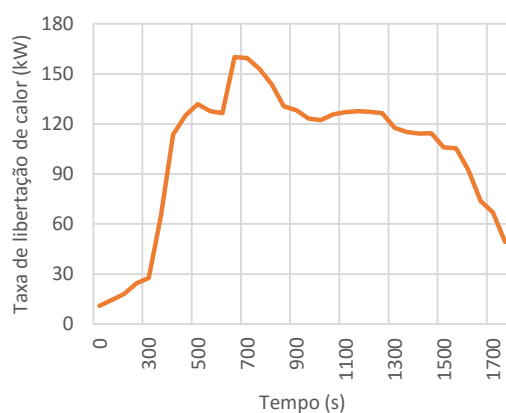


Figura 5.8 Evolução da HRR da cadeira de madeira



Figura 5.9 Rasterização da geometria da cadeira de madeira

5.6.4. Estante de Madeira

Para a curva de HRR deste elemento (Figura 5.10), consultou-se o relatório técnico divulgado em 1993 por Särqvist (1993), que reúne os resultados de vários ensaios laboratoriais à escala real previamente realizados. O documento refere as dimensões exteriores da estante e o material que suporta. Modelou-se a geometria do objeto com base nestas informações (Figura 5.11).

Os parâmetros estabelecidos para a autoignição deste elemento foram idênticos aos do anterior.

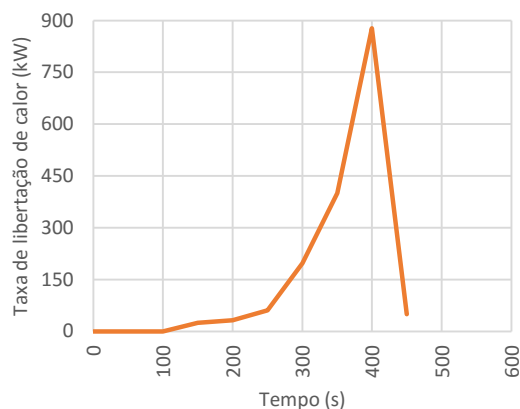


Figura 5.10 Evolução da HRR da estante de madeira

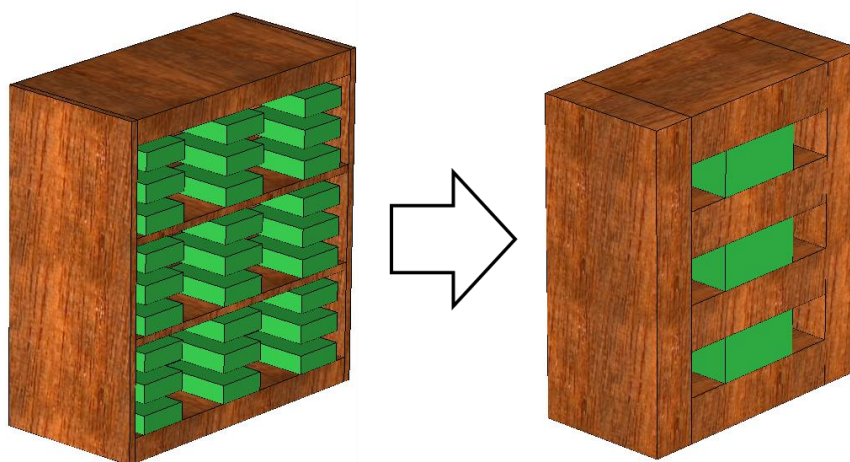


Figura 5.11 Rasterização da geometria da estante de madeira

5.6.5. Conjunto de Estantes Metálicas

Walton e Budnick (1988) ensaiaram o incêndio de um conjunto de quatro estantes metálicas carregadas com produtos de papel, com as características apresentadas na Figura 5.12. Reproduziu-se esta geometria na modelação computacional, que foi depois ajustada à malha de elementos finitos (Figura 5.13). A HRR que se atribuiu ao elemento foi a descrita pela curva da Figura 5.14. Estabeleceu-se a autoignição deste elemento para 225 °C – de acordo com T.C. Forensic (2015) – a verificar numa superfície de papel com 3 cm de espessura.

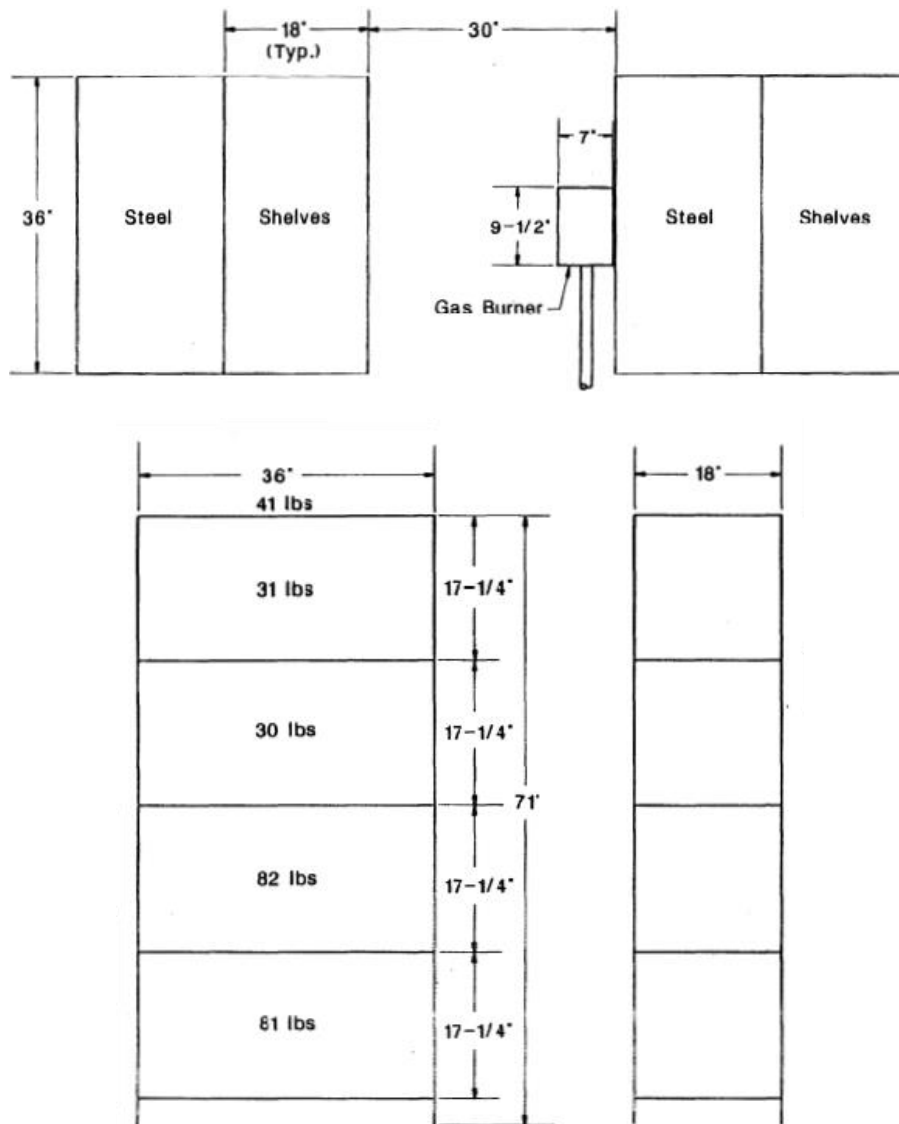


Figura 5.12 Dimensões do conjunto de estantes metálicas

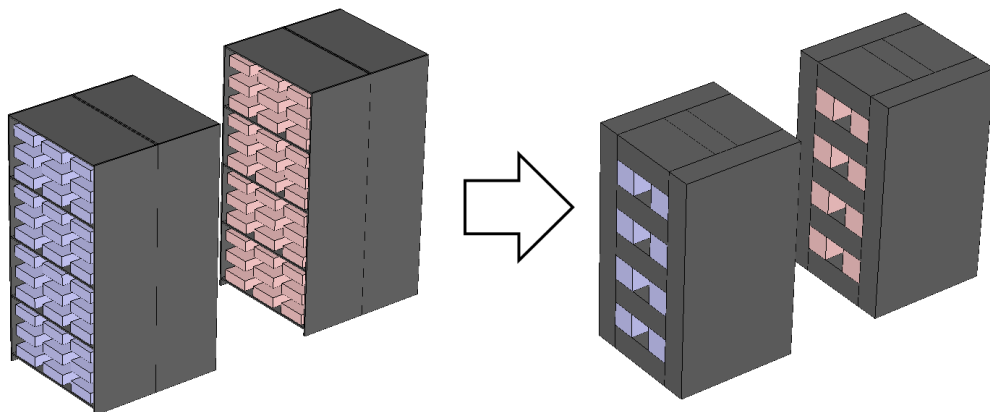


Figura 5.13 Rasterização da geometria do conjunto de estantes metálicas

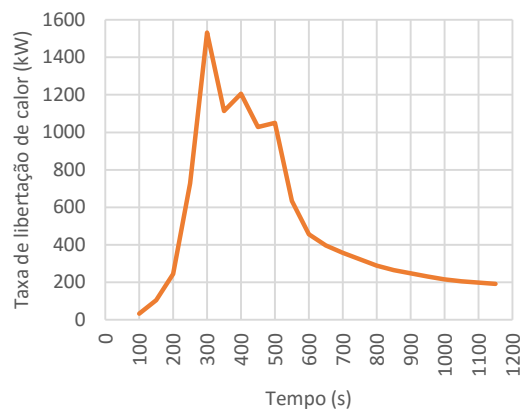


Figura 5.14 Evolução da HRR do conjunto de estantes metálicas

5.6.6. Estação de Trabalho

Os mesmos investigadores ensaiaram também o conjunto de uma secretária e uma estante carregadas com produtos de papel, com as características apresentadas na Figura 5.15.

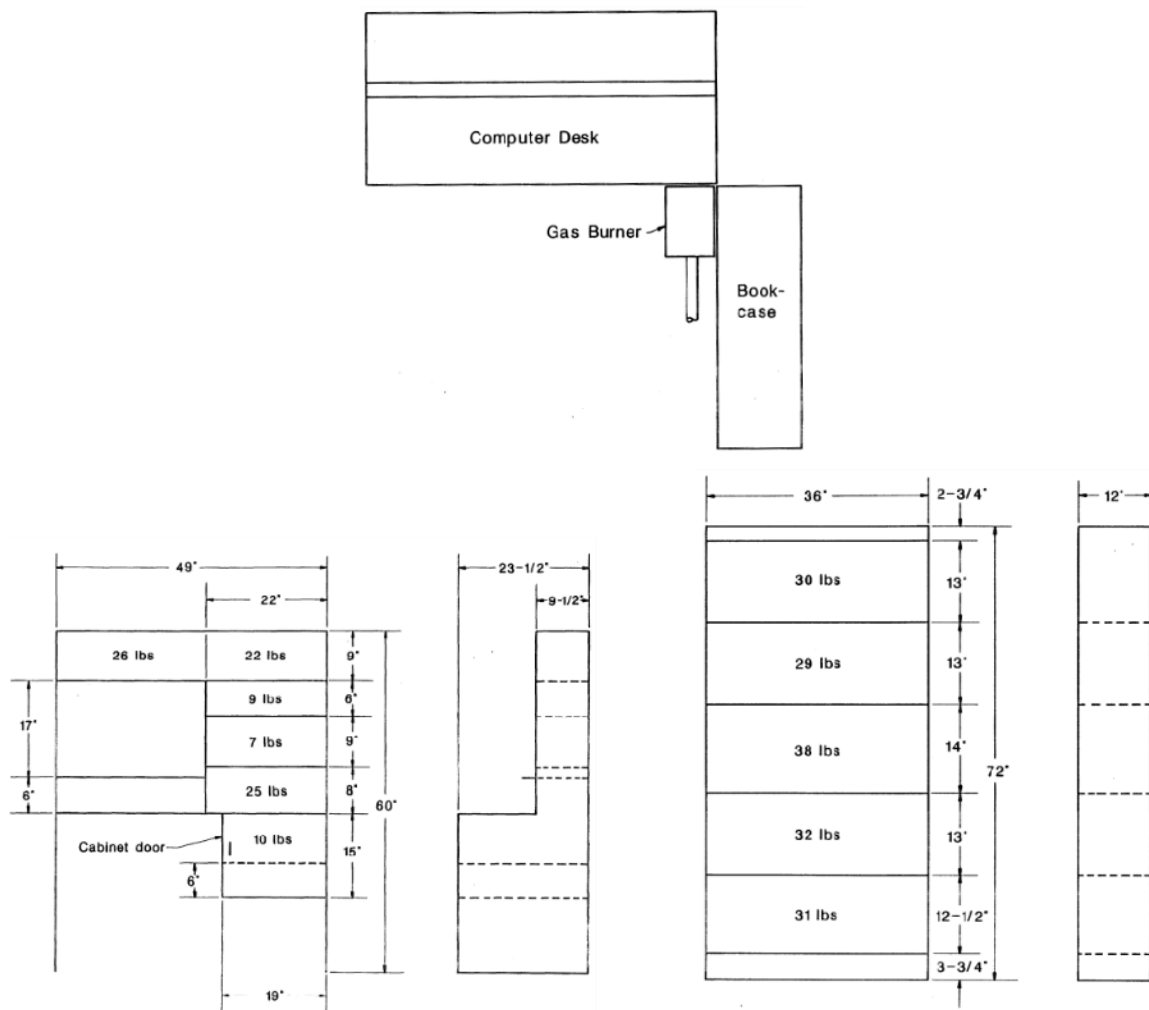


Figura 5.15 Dimensões da estação de trabalho

O elemento desenvolvido no software CFD e a curva de HRR que se lhe associou estão apresentados, respetivamente, na Figura 5.16 e na Figura 5.17.

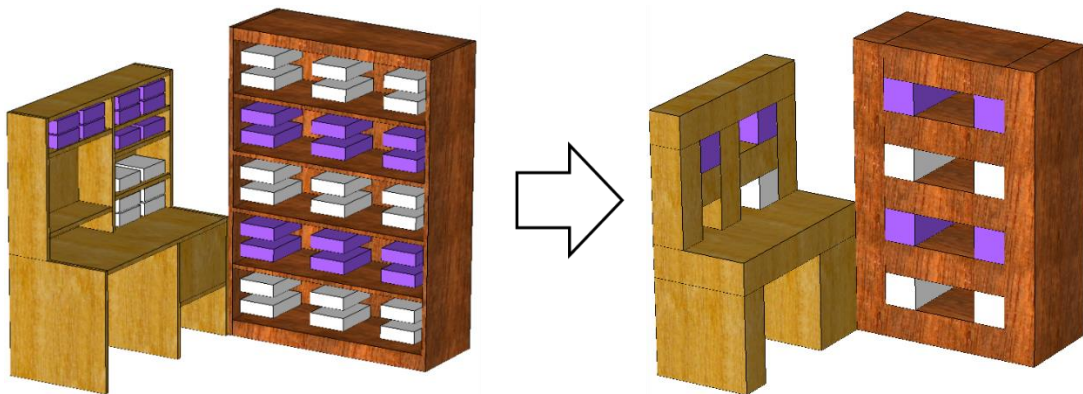


Figura 5.16 Rasterização da geometria da estação de trabalho

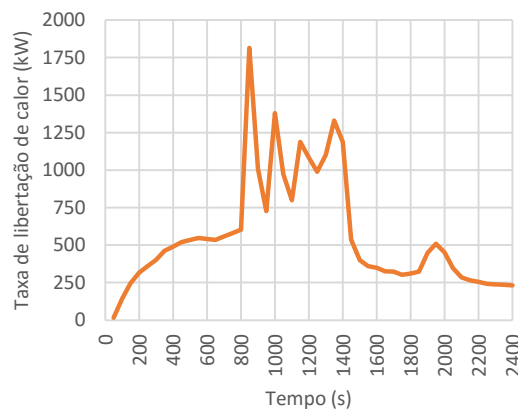


Figura 5.17 Evolução da HRR da estação de trabalho

Os parâmetros estabelecidos para a autoignição deste elemento foram idênticos aos do anterior.

5.6.7. Sofá Individual

As informações relativas ao incêndio de um sofá individual (Figura 5.18) foram encontradas no relatório técnico do programa de ensaios levado a cabo por Lawson *et al.* (1983).

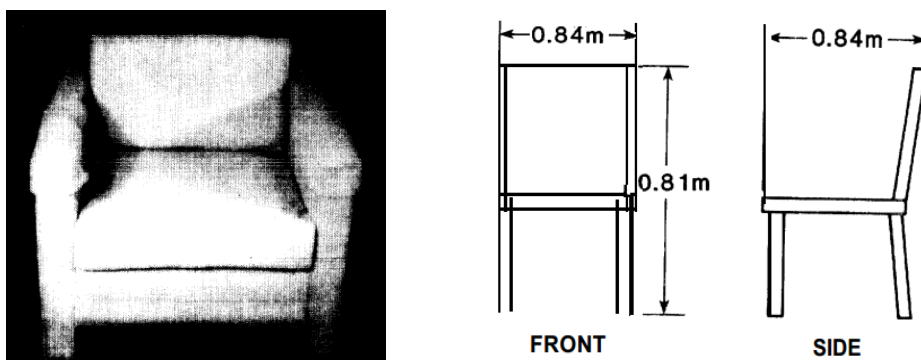


Figura 5.18 Dimensões do sofá individual

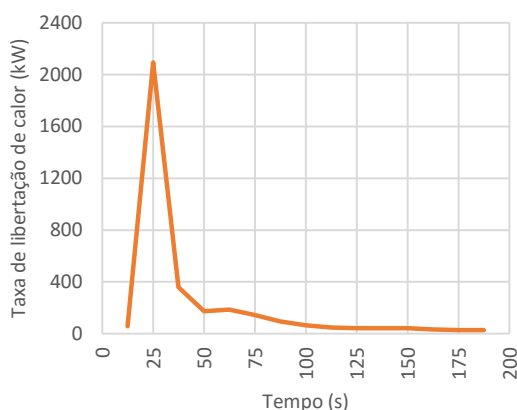


Figura 5.19 Evolução da HRR do sofá individual

A geometria desenvolvida para este objeto é apresentada na Figura 5.20.

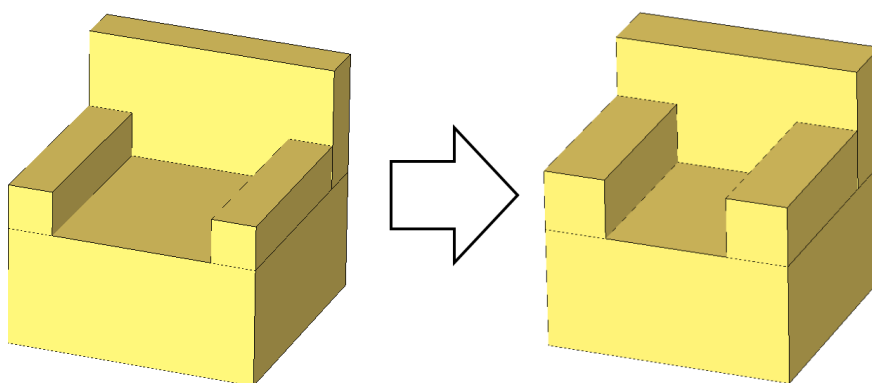


Figura 5.20 Rasterização da geometria do sofá individual

5.6.8. Sofá Longo

Modelou-se um outro sofá de maiores dimensões (Figura 5.21), estudado pelos mesmos investigadores, tendo-se seguido o mesmo procedimento de modelação (Figura 5.22 e Figura 5.23).

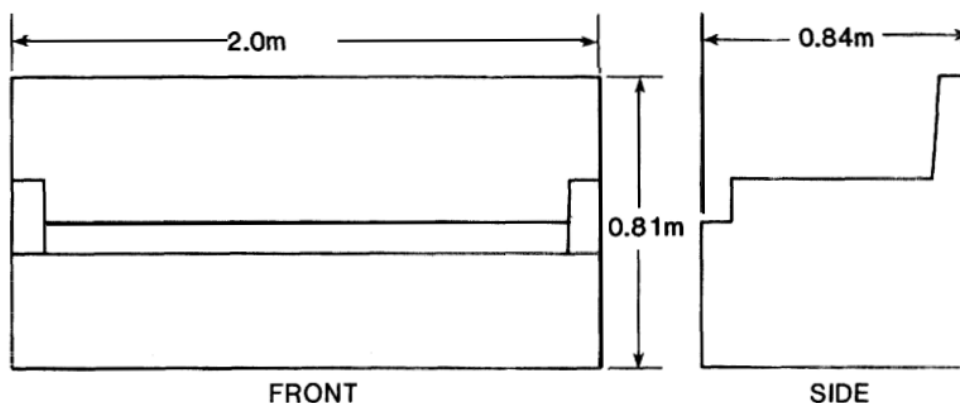


Figura 5.21 Dimensões do sofá longo

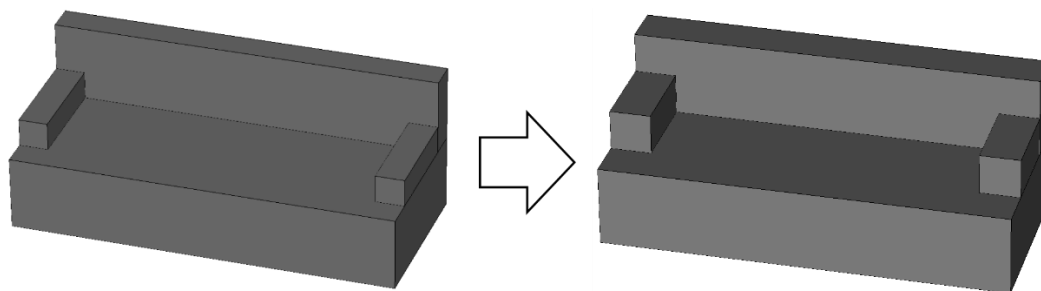


Figura 5.22 Rasterização da geometria do sofá longo

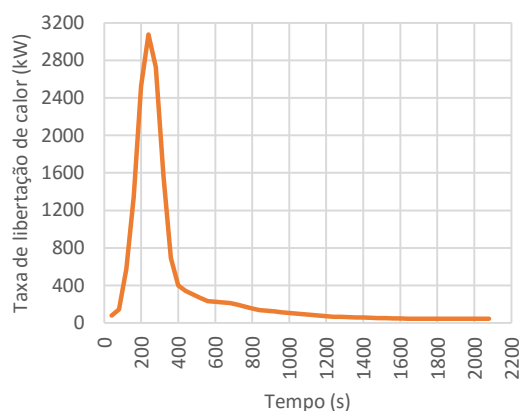
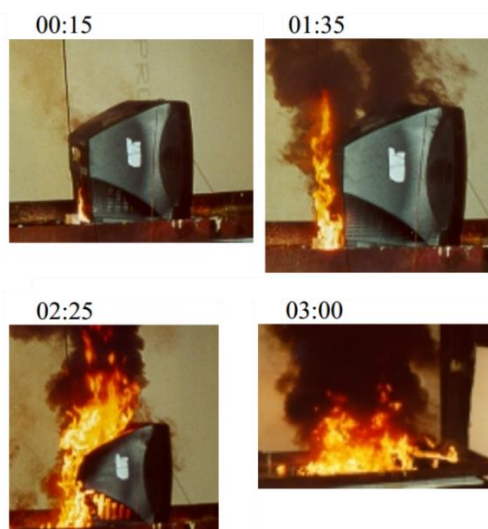


Figura 5.23 Evolução da HRR do sofá longo

5.6.9. Televisor

Hietaniemi *et al.* (2001) realizaram ensaios de incêndio a vários aparelhos elétricos. Consultou-se o relatório técnico desta investigação para incluir um televisor (Figura 5.24) no modelo do incêndio de compartimento.

Figura 5.24 Ensaio de um televisor, levado a cabo por Hietaniemi *et al.* (2001)

O elemento desenvolvido no software CFD e a curva de HRR que se lhe associou estão apresentados, respetivamente, na Figura 5.25 e na Figura 5.26.

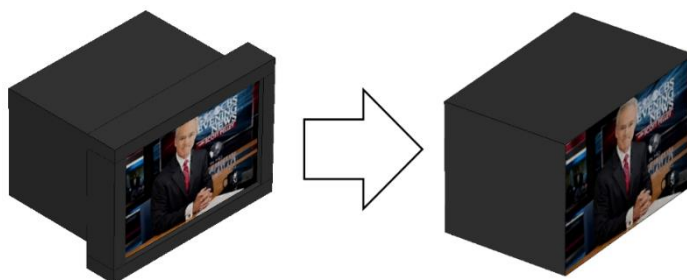


Figura 5.25 Rasterização da geometria atribuída ao televisor

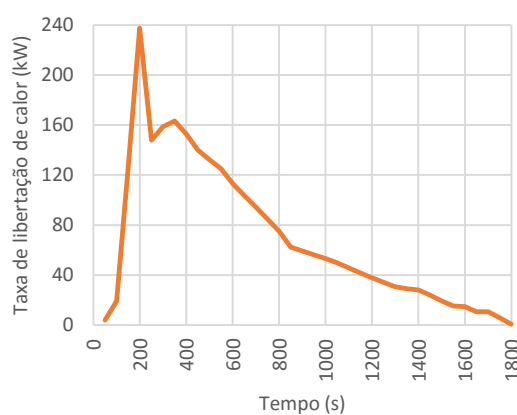


Figura 5.26 Evolução da HRR no televisor

Estabeleceu-se a autoignição deste elemento para $440\text{ }^{\circ}\text{C}$ – de acordo com Total (2012) – a verificar numa superfície de poliestireno de alto impacto com 0,5 cm de espessura.

5.6.10. Revestimento de Paredes

Como revestimento nas paredes no interior do compartimento, considerou-se papel de parede aplicado em placas de gesso com 13 mm de espessura, cujo desempenho em situação de incêndio foi estudado em laboratório por Chew (1999), que obteve a curva normalizada apresentada na Figura 5.27.

Assim como para os outros materiais combustíveis, foi necessário corrigir a geometria deste elemento, tendo-se aumentado a sua espessura para 20 cm (Figura 5.28).

Estabeleceu-se a autoignição deste elemento para $225\text{ }^{\circ}\text{C}$ – de acordo com T.C. Forensic (2015) – a verificar numa superfície de papel com 1 mm de espessura.

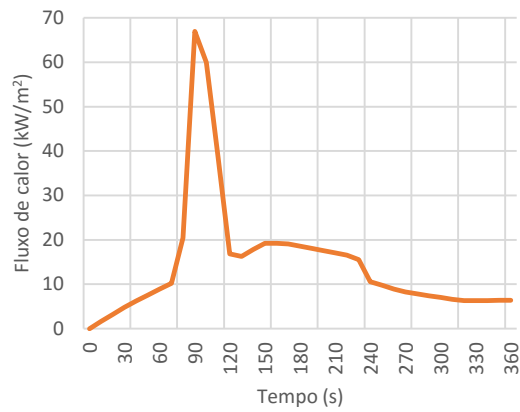


Figura 5.27 Evolução da HRR por unidade de área do revestimento das paredes

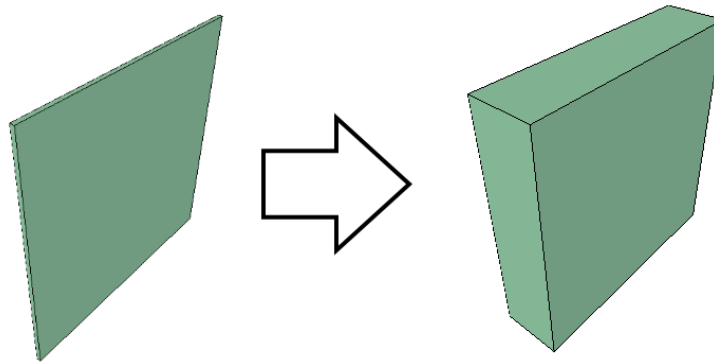


Figura 5.28 Rasterização da geometria do revestimento das paredes

5.6.11. Revestimento de Piso e Teto

Como revestimento do chão e do teto do compartimento, adotou-se contraplacado com 8 mm de espessura. A curva de libertação de calor para esta solução construtiva (Figura 5.29) foi determinada por Kim *et al.* (2011).

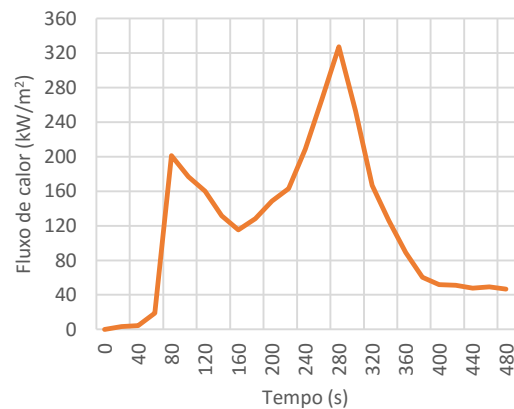


Figura 5.29 Evolução da HRR por unidade de área do contraplacado

Adequou-se também a geometria deste elemento à malha do modelo computacional, tendo ficado assim com 20 cm de espessura (Figura 5.30).

Estabeleceu-se a autoignição deste elemento para 225 °C – de acordo com T.C. Forensic (2015) – a verificar numa superfície de contraplacado com 8 mm de espessura.

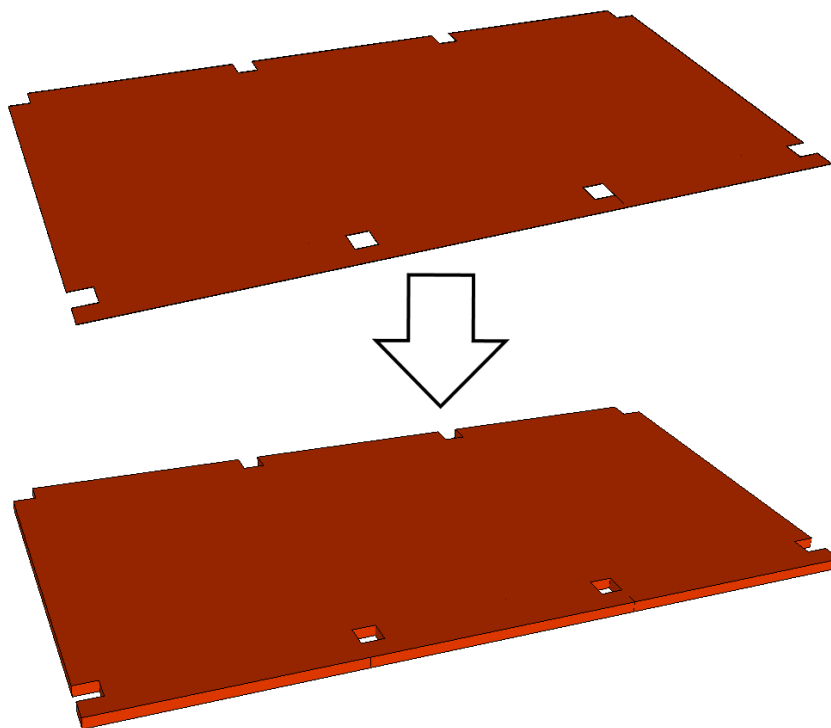


Figura 5.30 Rasterização da geometria do contraplacado

5.7. Resultados

O tempo de cálculo total da simulação foi 76170 s – aproximadamente 21 horas e 10 minutos.

A Figura 5.31 traduz a propagação do incêndio dentro do compartimento. Na Figura 5.32 é visível a evolução das temperaturas num plano horizontal (fatia, ou *slice*) implementado no topo da divisão.

Não se registou a ocorrência de flashover (inflamação generalizada), mas sim o deslocamento do fogo pelo compartimento.

A ignição ocorreu na zona dos sofás, conforme se definiu na modelação. Por volta dos 200 s, verificou-se autoignição por radiação junto a um cubículo de escritório. A remoção (quebra) do vidro foi aos 254 s. Com as novas condições de ventilação, o incêndio ganhou maior dimensão e percorreu toda a fracção até aos 550 s, aproximadamente. A partir desta altura, e até ao fim da simulação, a concentração mais significativa de chamas manteve-se junto do vão de janela.

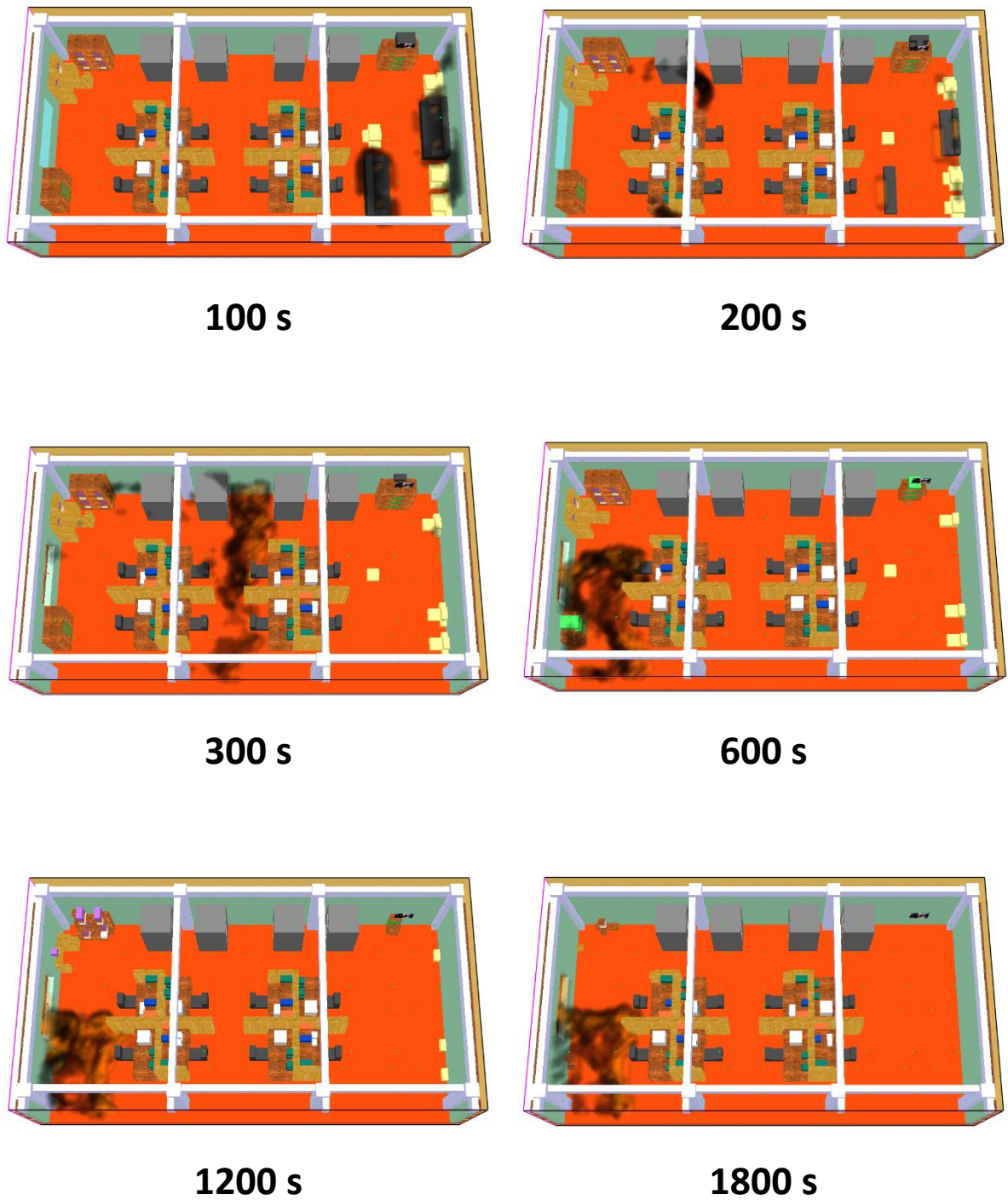


Figura 5.31 A simulação do incêndio em diferentes fases

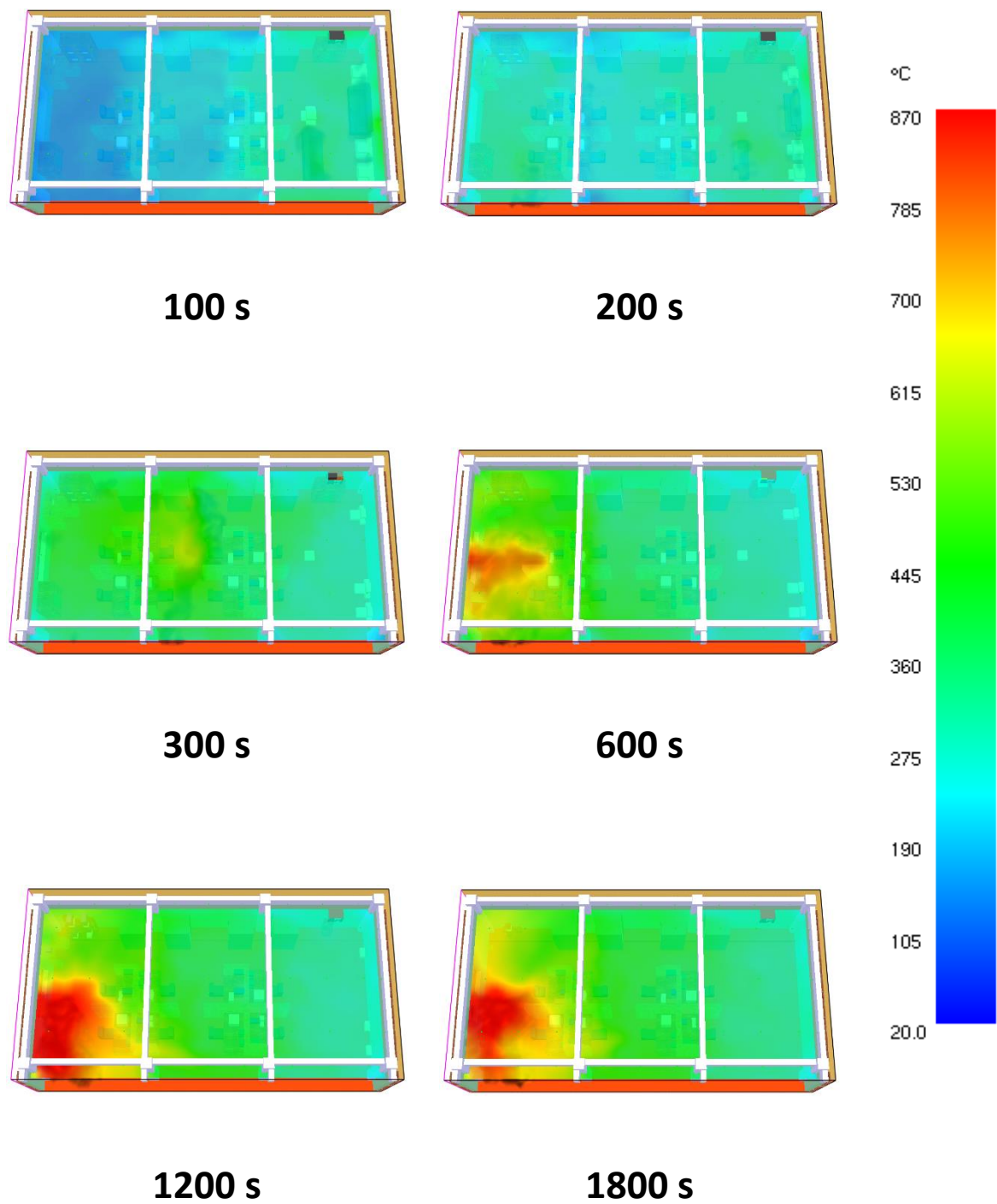


Figura 5.32 Evolução de temperaturas na camada de gases quentes

Para proceder à análise estrutural do edifício, os resultados retirados da simulação da dinâmica computacional de fluidos foram as temperaturas da fase gasosa registadas à superfície dos elementos estruturais no compartimento: pilares, vigas e lajes.

A medição destas temperaturas no modelo CFD e aplicação subsequente no software utilizado para a análise estrutural, ABAQUS, estão desenvolvidas em detalhe nos seguintes anexos:

- ANEXO A: Temperaturas nos Pilares;
- ANEXO B: Temperaturas nas Vigas;
- ANEXO C: Temperaturas nas Lajes.

Como comparação entre a aplicação de um método prescritivo e um método baseado no desempenho, apresenta-se também nos gráficos a curva de incêndio padrão ISO 834.

6. MODELAÇÃO NUMÉRICA DA ESTRUTURA SUJEITA AO INCÊNDIO

6.1. ABAQUS

Para a análise térmica e estrutural do edifício ao fogo, desenvolveu-se um modelo computacional do mesmo com o programa de elementos finitos ABAQUS (2007), versão 6.13-2 – um software versátil utilizado em vários ramos da engenharia. Segue-se uma breve introdução às três principais unidades que o constituem.

ABAQUS/CAE

O ABAQUS/CAE (Complete Abaqus Environment) é a interface gráfica utilizada para desenvolver as análises pretendidas; as unidades restantes (ABAQUS/Standard e ABAQUS/Explicit) são responsáveis pelo cálculo das simulações com o método dos elementos finitos (finite element method, ou FEM).

Trata-se de uma plataforma intuitiva que inclui funcionalidades informáticas de engenharia comuns, como modelação paramétrica ou baseada em características, funcionamento predefinido ou interativo, e personalização da interface. É possível importar modelos de CAD para definir a malha de elementos finitos, ou solicitar a atribuição de uma malha com base na geometria introduzida.

O ABAQUS/CAE está estruturado em módulos, cada um definindo um aspeto lógico da sequência da modelação – o desenvolvimento do ficheiro `.cae`. Terminado este processo, gera-se outro ficheiro que corresponde à tarefa de análise que se pretende submeter às unidades seguintes. Esta interface também permite monitorizar, diagnosticar e visualizar os resultados do cálculo. Para efeitos de pré e pós-processamento, o ABAQUS/Standard e o ABAQUS/Explicit baseiam-se ambos na interface do ABAQUS/CAE.

ABAQUS/Standard

O ABAQUS/Standard emprega uma tecnologia de cálculo ideal para situações estáticas ou dinâmicas a baixas velocidades, em que a precisão dos resultados toma uma importância crítica. São exemplos a pressão de selagem numa junta de vedação, o rolamento de pneus em regime permanente ou a propagação de uma fenda na fuselagem de uma aeronave.

Com uma única simulação, é possível analisar um modelo nos domínios do tempo e da frequência. Pode-se, por exemplo, realizar uma análise não linear à fixação da tampa de um motor tendo em consideração os aspetos mecânicos complexos de uma junta da cabeça. Consegue-se determinar a frequência própria da tampa, ou a sua frequência induzida pelas vibrações do motor, nos domínios mecânico e acústico.

ABAQUS/Explicit

O ABAQUS/Explicit é um produto de elementos finitos especialmente adaptado para simular acontecimentos dinâmicos muito breves, como queda de aparelhos eletrónicos, acidentes de automóvel ou impacto balístico. A capacidade para analisar comportamentos altamente não lineares torna esta unidade também muito útil na simulação de processos quase estáticos, como por exemplo a laminação a quente de metais.

Os resultados de um modelo corrido no ABAQUS/Standard podem ser utilizados como a condição inicial de uma análise a executar no ABAQUS/Explicit, e vice-versa. A flexibilidade garantida com esta integração permite aplicar o ABAQUS/Standard nas fases que se adequam a uma resolução por métodos implícitos (análises estáticas, a baixas velocidades, ou em regime permanente), e o ABAQUS/Explicit nas restantes (altas velocidades ou regime variável).

6.2. Modelação Numérica

Este subcapítulo descreve sequencialmente o trabalho de modelação numérica da estrutura (ABAQUS/CAE), constituída por pilares, vigas, lajes e diagonais de contraventamento. Também se incluíram as paredes exteriores de alvenaria na zona do compartimento de incêndio (Figura 6.1).

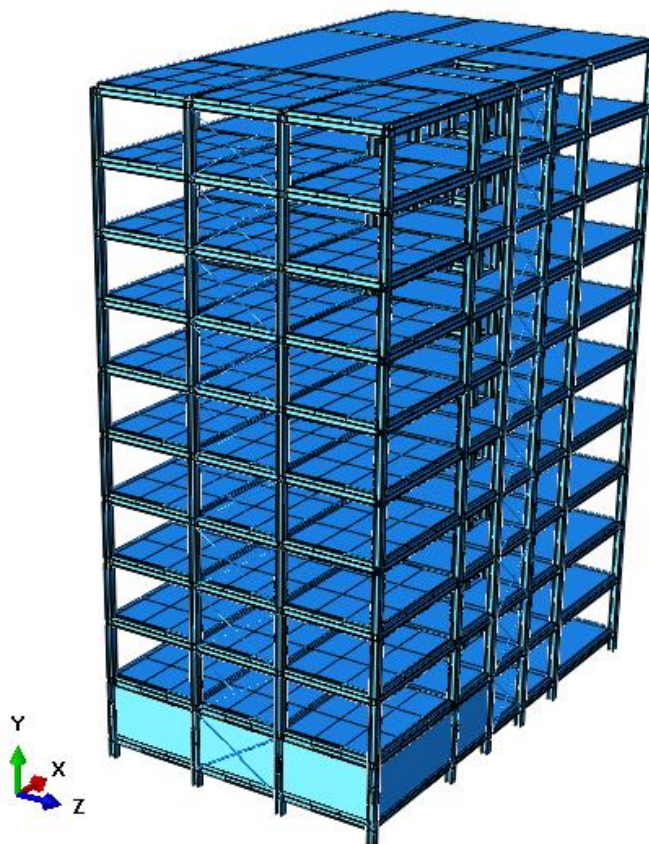


Figura 6.1 Estrutura modelada no ABAQUS

Módulo Part

Este módulo é utilizado para criar, editar e gerir as partes no modelo em desenvolvimento. Uma parte criada no módulo Part designa-se por parte nativa e é armazenada na forma de uma lista de características (Figura 6.2). Estas características contêm a informação geométrica da peça e as regras que governam o seu comportamento.

Foram criadas 22 partes diferentes que traduzem:

- Os pilares, com elementos sólidos, de secção HEM 300;
- As vigas, com elementos sólidos, de secção IPE 270;
- As lajes, com elementos casca (shell);
- As paredes, com elementos sólidos, com espessura de 0,17 m;
- As diagonais de contraventamento, com elementos linha (beam).

Cada parte é independente das restantes e tem o seu próprio sistema de coordenadas. A Figura 6.3 apresenta algumas partes nativas desenvolvidas neste módulo.

Módulo Property

O módulo Property é utilizado para criar e editar materiais, definir e atribuir secções, normais e tangentes nas várias partes, e definir dados gerais e propriedades mecânicas e térmicas dos materiais.

Os materiais introduzidos foram aço, betão, e cerâmica, cujas propriedades tomaram valores consultados nas fontes já referenciadas nos subcapítulos 3.7 e 5.4. As secções atribuídas estão descritas no Quadro 6.1.

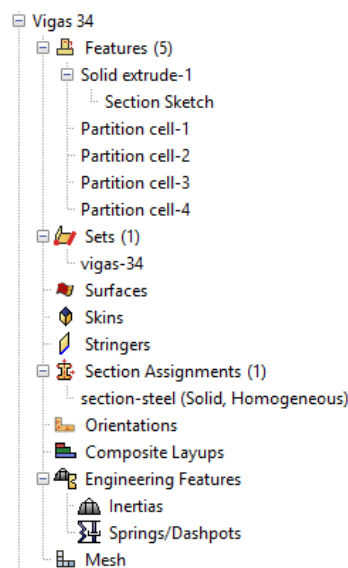


Figura 6.2 Parte criada para as vigas V34

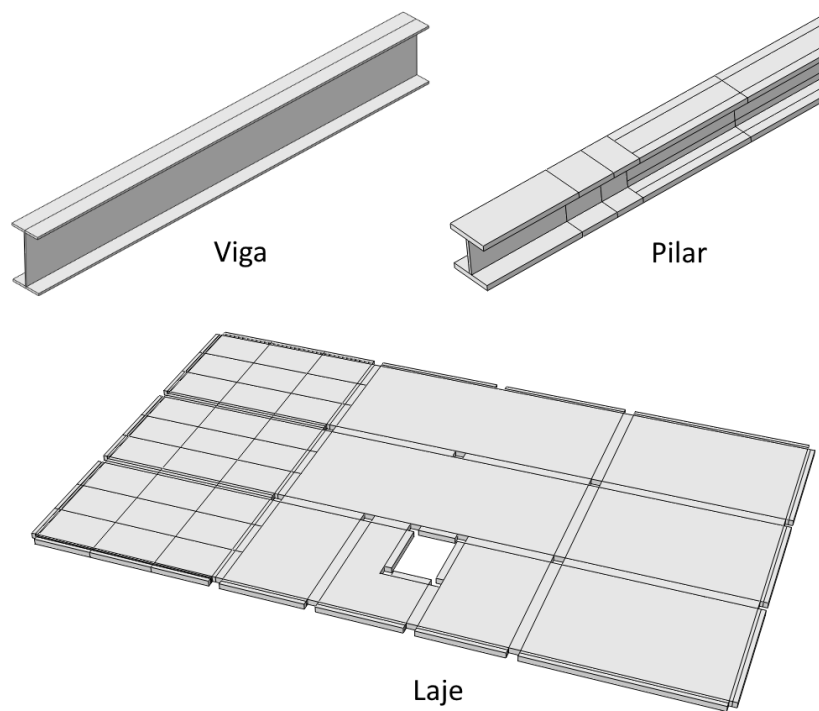


Figura 6.3 Partes criadas com o módulo Part do ABAQUS

Quadro 6.1 Constituição e atribuição de secções no módulo Property

Nome da secção	Tipo	Características	Atribuição
<i>section-steel</i>	Sólida Homogénea	Material: aço	Pilares Vigas
<i>section-ceramic</i>	Sólida Homogénea	Material: cerâmica	Paredes
<i>section-slab</i>	Casca Homogénea	Material: betão Espessura: 0,20 m Varões (material aço, elementos linha) $\Phi 12 // 0,15$ m, armados nas duas direcções a 4 cm das faces superior e inferior	Lajes
<i>section-diagonal</i>	Treliça	Material: aço Secção equivalente à de um perfil IPE200 (0,00285 m ²)	Diagonais

Módulo Assembly

No módulo Assembly cria-se e modifica-se a montagem do modelo, que é composta por exemplares das partes criadas no primeiro módulo.

Criam-se exemplares das partes atrás desenvolvidas e aloca-se os mesmos às posições que se pretendem, segundo o mesmo referencial. O posicionamento dos exemplares das partes é conseguido com a aplicação de restrições de posição que permitem alinhar faces, arestas ou vértices seleccionados, ou com recurso a translações e rotações.

Um exemplar mantém uma associação com a parte que lhe deu origem. Se a geometria de uma parte for modificada, o ABAQUS corrige automaticamente todos os exemplares dessa mesma parte, refletindo as alterações. Todos os carregamentos, condições de fronteira, campos predefinidos e malhas são aplicados à montagem da estrutura nos módulos seguintes.

A Figura 6.4 apresenta três fases do processo montagem do modelo tridimensional: posicionamento dos pilares, das vigas e dos restantes elementos (lajes, paredes e diagonais de contraventamento).

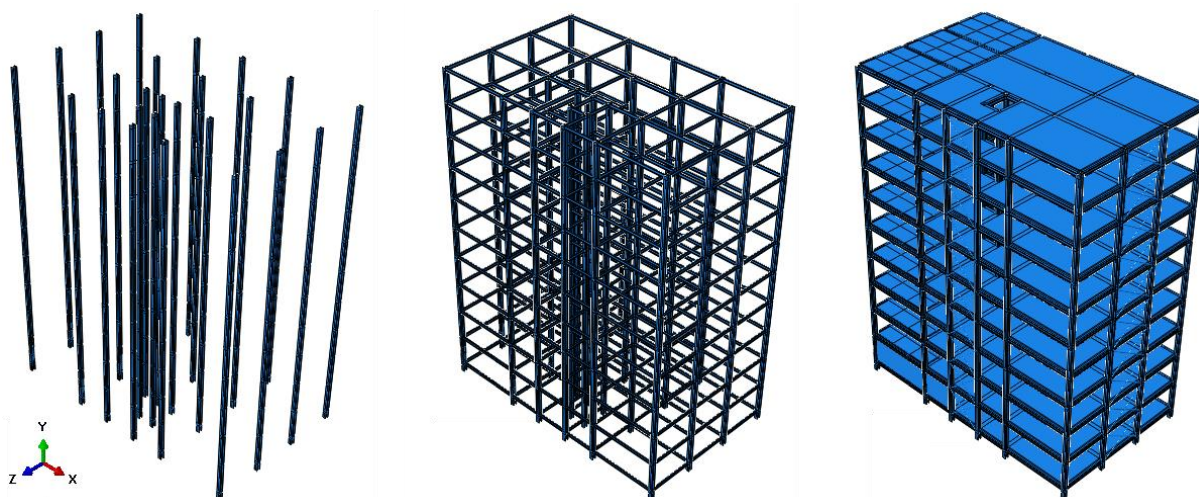


Figura 6.4 Construção do modelo estrutural no módulo Assembly

Módulo Step

O módulo Step é utilizado para criar fases de análise, que permitam capturar convenientemente mudanças nos carregamentos e condições de fronteira, alterar interações e acrescentar ou remover partes.

Quando a primeira fase é criada, o ABAQUS seleciona um conjunto de variáveis que correspondem ao procedimento de análise da fase. Por defeito, são pedidos dados de saída para cada nó ou ponto de integração e é também estabelecida uma taxa de escrita das variáveis na base de dados. Este módulo permite modificar o procedimento de análise e a taxa de saída dos dados, e estabelecer controlos de análise.

No modelo desenvolvido só se incluiu uma fase de análise. Como consequência desta opção, foi necessário desprezar os resultados dos primeiros 15 segundos de simulação, que foi o tempo necessário para a aplicação das cargas na estrutura ficar concluída.

Módulo Interaction

As interações introduzidas no programa são objetos dependentes da fase de análise – ao definir uma interação, é necessário indicar a que fase se aplica. O módulo Interaction pode ser utilizado para definir e gerir várias interações e funcionalidades num modelo:

- Interações mecânicas e térmicas entre regiões ou entre estas regiões e a envolvente;
- Restrições de análise entre regiões;
- Características relacionadas com a montagem de elementos linha;
- Definição e atribuição de secções a conectores;
- Inércia e fendas em regiões;
- Molas e amortecedores.

Neste módulo ficaram definidas as ligações entre todas as peças do modelo. Entre elementos sólidos e entre elementos sólidos e casca, definiram-se ligações rígidas sem graus de liberdade (tie). Entre as diagonais de contraventamento (elementos linha) e os pilares (sólidos), introduziram-se ligações rotuladas (MPC pin).

Procedeu-se também à aplicação das curvas $T - t$ nas superfícies sujeitas ao incêndio, conforme o descrito nos Anexos A a C. Adotaram-se para as faces expostas de ambos os materiais (aço e betão) o coeficiente de transferência de calor por convecção α_c de valor $25W/m^2 K$, e emissividade ε de valor 0,7 – valores retirados de Correia (2011). A Figura 6.5 ilustra este processo.

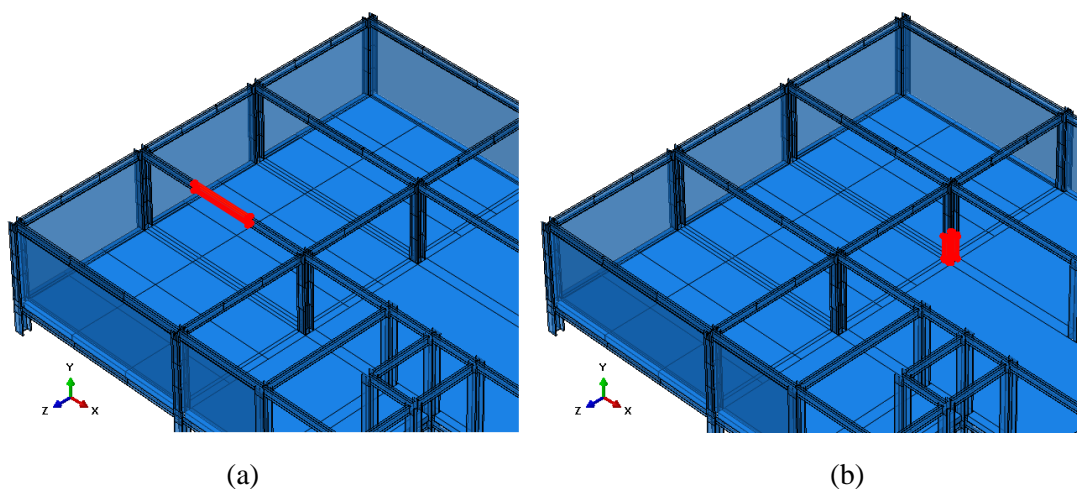


Figura 6.5 Aplicação de temperaturas nas superfícies V9-2 Meio (a) e P7 Baixo (b)

Módulo Load

O Módulo Load é utilizado para definir e gerir carregamentos, condições de fronteira, campos predefinidos e combinações de ações. Tal como no módulo anterior, as prescrições realizadas são dependentes da fase de análise. Os parâmetros introduzidos foram:

- Acção da gravidade, aplicada a todo o modelo;
- Carregamentos distribuídos nas lajes e cargas correspondentes às paredes exteriores;
- Campo predefinido, correspondente à temperatura ambiente de 20 °C, aplicado a todo o modelo;
- Condição de fronteira, aplicada na base dos pilares, a limitar o deslocamento em todas as direções.

Módulo Mesh

O módulo Mesh permite gerar as malhas das partes criadas ou da montagem completa. Estão disponíveis vários níveis de automação para que a malha desenvolvida vá de encontro às necessidades da análise: marcas (seeds), controlos de malha e tipos de elementos.

Às partes dos pilares e vigas cujos exemplares delimitam o compartimento de incêndio, foram aplicadas malhas mais apertadas (maior número de elementos finitos), de modo a conseguir resultados com maior precisão.

Os tipos de elementos finitos atribuídos foram os indicados no Quadro 6.2.

Quadro 6.2 Tipos de elementos finitos adotados

Tipo		Partes
<i>C3D8RT</i>	Bloco (elemento sólido) acoplado de 8 nós, deslocamento e temperatura trilineares, integração reduzida e controlo hourglass	Pilares, vigas e paredes
<i>S4RT</i>	Elemento casca acoplado de 4 nós, com dupla curvatura, integração reduzida, controlo hourglass e extensões de membrana finitas	Lajes
<i>T3D2T</i>	Elemento tridimensional de treliça (linear) acoplado de 2 nós	Diagonais

As figuras seguintes representam as malhas de elementos finitos alocadas às diversas peças. Na Figura 6.6 é possível comparar a malha de cada um dos oito pilares afetos ao compartimento

de incêndio (12 751 elementos e 21 216 nós), com a malha atribuídos aos restantes (434 elementos e 1 008 nós).

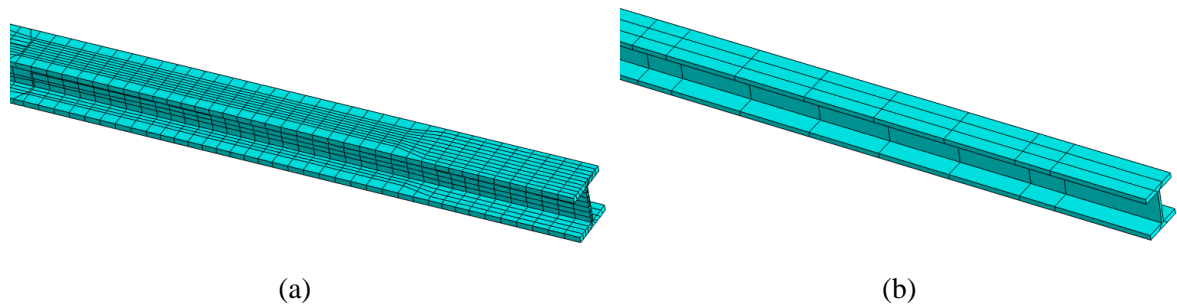


Figura 6.6 Malhas dos pilares (a) afetos ao compartimento de incêndio e (b) restantes

A Figura 6.7a apresenta a malha das vigas V25 e V26 que se atribuíram ao compartimento de incêndio. Contempla 504 elementos e 989 nós. No mesmo elemento estrutural aplicado nos restantes pisos atribuiu-se uma malha de 80 elementos finitos e 180 nós (Figura 6.7b).

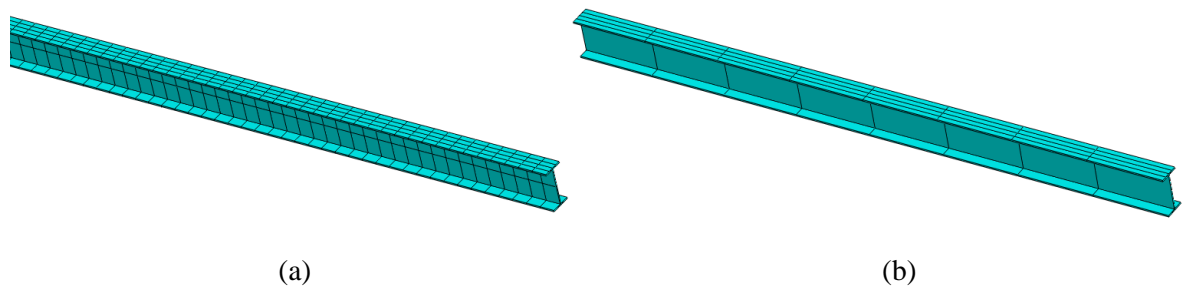


Figura 6.7 Malhas das vigas V25 e V26 (a) afetas ao compartimento e (b) nos restantes

A Figura 6.8a traduz a malha atribuída à parte que constitui as lajes de todos os pisos, com 8748 elementos finitos e 9020 nós. Na Figura 6.8b, apresenta-se a malha de uma das paredes, posicionada nos limites do compartimento de incêndio. Tem 65 elementos e 168 nós.

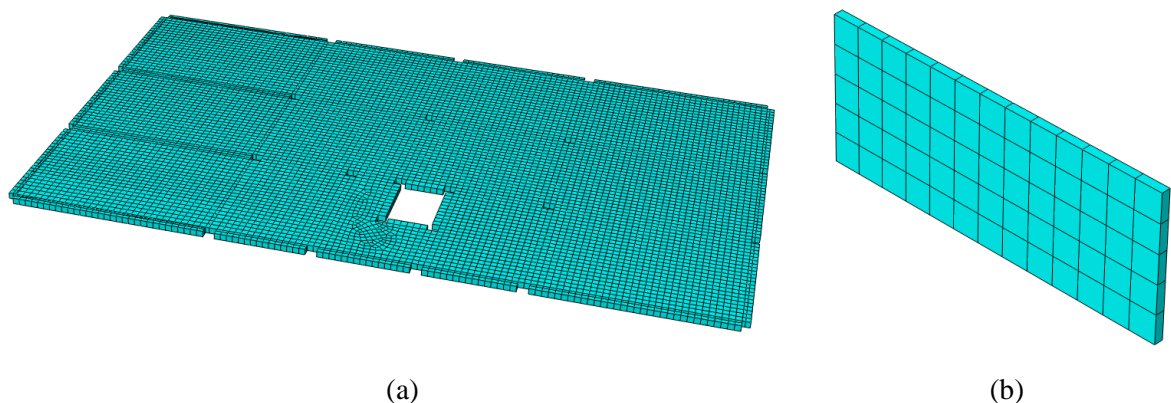


Figura 6.8 Malhas atribuídas (a) às lajes e (b) paredes

A Figura 6.9 demonstra a malha de elementos finitos do sistema estrutural completo, com pormenores de duas zonas distintas. Resultou em 251 761 elementos e 384 824 nós.

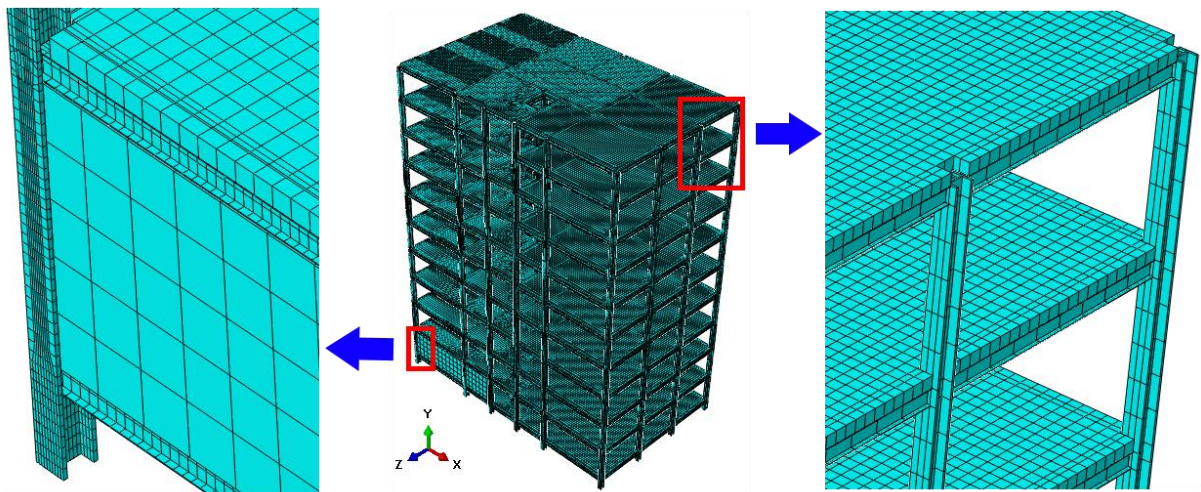


Figura 6.9 Malha de todo o edifício e detalhes

Módulo Job

O módulo Job é utilizado para analisar o modelo. Permite criar, submeter e monitorizar uma tarefa. Caso o modelo tenha várias fases de análise, não é necessário correr todas na mesma tarefa.

Cada tarefa é armazenada num ficheiro de entrada (input), de extensão `.inp`. O programa escreve os resultados numa base de dados – o ficheiro de extensão `.odb` (output database), que se abre através do módulo Visualization.

7. ANÁLISE DE RESULTADOS

O ABAQUS correu o modelo introduzido durante 528 369 s (aproximadamente 6 d e 3 h) até atingir problemas de convergência. Este tempo de cálculo traduziu-se em 1037,68 s (17 min e 17 s) de simulação de incêndio, não chegando aos 1800 s (30 min) pretendidos.

O FEM divide um meio contínuo num conjunto de elementos cujo comportamento é governado por determinado número de condições. O método resolve iterativamente o mesmo número de equações enquanto se verificar a convergência das soluções por comparação com valores de tolerância.

Neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos no software.

7.1. Temperaturas nos elementos metálicos

Foi estudado o desenvolvimento das temperaturas nos elementos estruturais metálicos sujeitos ao incêndio de compartimento. Nos pilares, avaliaram-se as secções subjacentes às vigas do segundo piso, onde se verificam normalmente as temperaturas mais elevadas. Para as vigas considerou-se a secção a meio vão.

As secções foram divididas em várias parcelas de análise, dependendo das condições de exposição ao fogo. Em cada parcela foi calculada a média das temperaturas verificadas em todos os nós. O ANEXO D apresenta as curvas $T - t$ determinadas para todos os elementos. As figuras seguintes traduzem alguns destes resultados.

Na Figura 7.1 pode observar-se o desenvolvimento das temperaturas no pilar de canto P1. A temperatura média no banzo não exposto ao incêndio mantém-se praticamente constante, perto do valor inicial de 20 °C, sendo influenciada apenas pela condução de calor através da secção. Já o meio banzo aquecido, com maior área de exposição ao incêndio, atinge maiores temperaturas médias. É também possível verificar que o meio banzo não aquecido e a alma, com pouca superfície de exposição, apresentam curvas com desenvolvimentos idênticos, e valores intermédios relativamente às anteriores.

A Figura 7.2 traduz as temperaturas médias no pilar de fachada P11, com a alma do perfil paralela às paredes em que está embebido. Nota-se que a alma aquecida atinge as temperaturas mais altas, devido à grande superfície de exposição que apresenta. Os meios banzos não expostos aumentam de temperatura, mas apenas por influência da condução de calor através da secção. Os meios banzos aquecidos, embora apresentem uma área de exposição ao incêndio considerável, vêm as suas temperaturas afetadas negativamente por transmitirem calor para as paredes de alvenaria e para as zonas não aquecidas do pilar. Atingem assim valores intermédios relativamente às outras situações.

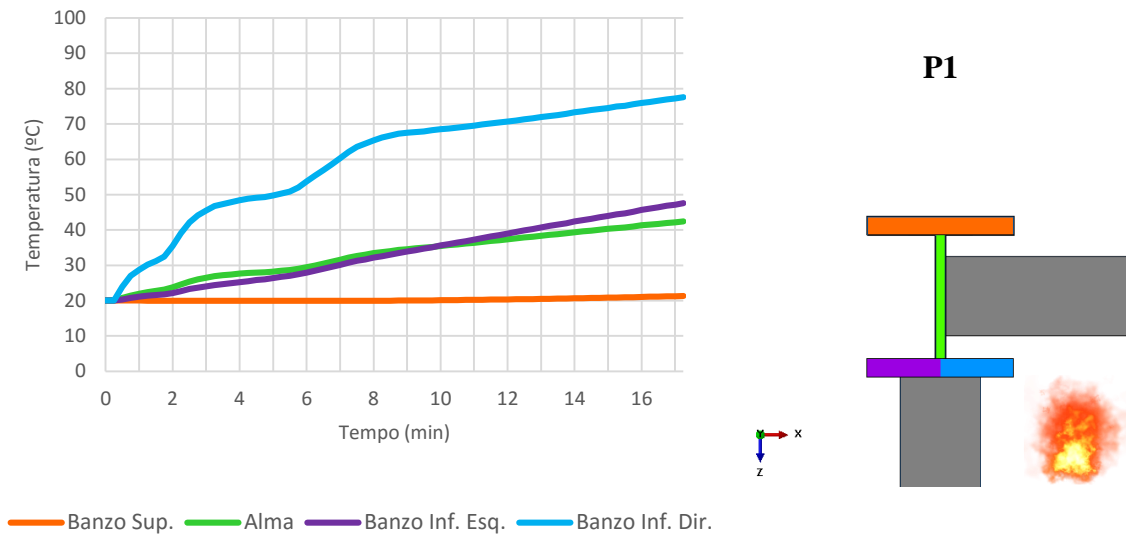


Figura 7.1 Temperaturas médias observadas no pilar P1

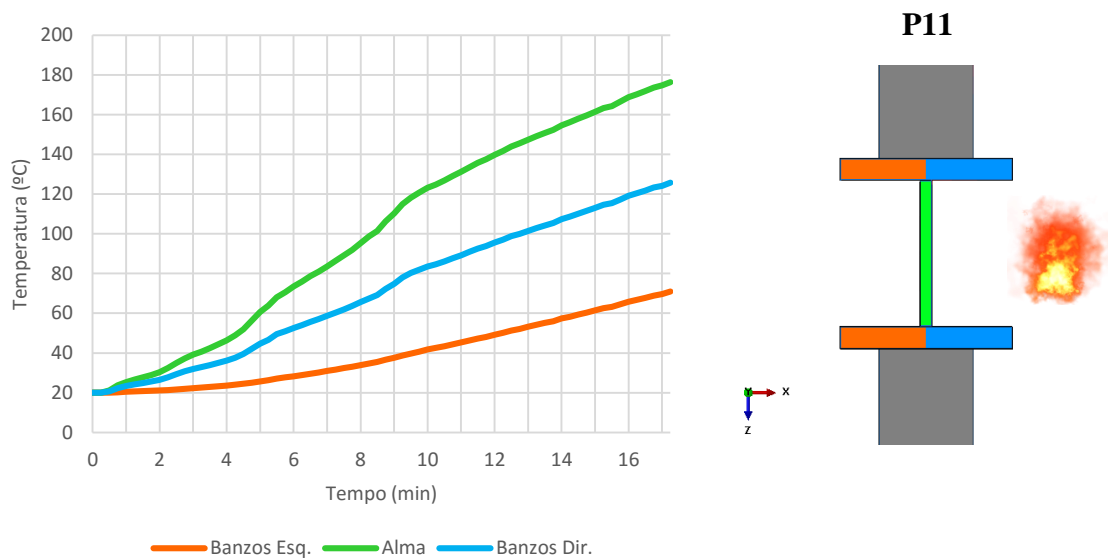


Figura 7.2 Temperaturas médias observadas no pilar P11

A Figura 7.3 apresenta o desenvolvimento de temperaturas na viga V5-2, que sustenta a laje do segundo piso e está posicionada entre os pilares P6 e P7. O banzo superior é aquecido mas está também em contacto com a laje de betão armado, à qual transmite calor. Apresenta a curva de evolução da temperatura com valores mais baixos. O banzo inferior tem praticamente toda a sua área exposta ao incêndio, e atinge as temperaturas médias mais elevadas. A alma está

também bastante exposta ao fogo, mas conduz alguma energia térmica para o banzo superior, cujas temperaturas são menores.

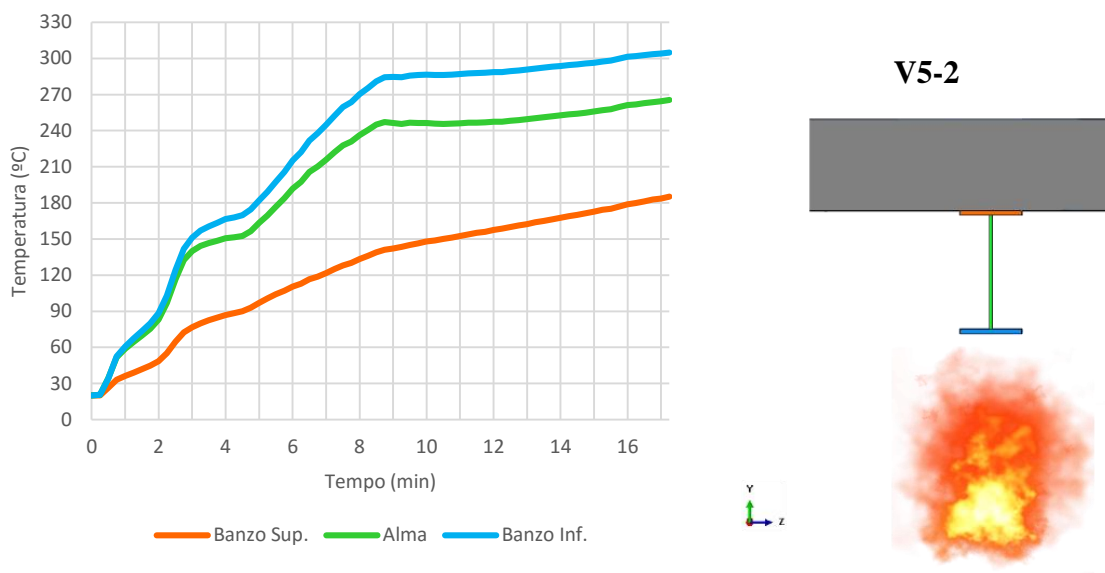


Figura 7.3 Temperaturas médias observadas na viga V5-2

Foi possível verificar os gradientes térmicos ao longo das secções dos elementos estruturais metálicos devido ao aquecimento diferencial a que estão sujeitos, que contribuem para a instalação de tensões internas e consequentes deformações.

7.2. Deformações

As deformações mais evidentes no fim da simulação foram as flechas verticais. O ANEXO E apresenta com mais detalhe o desenvolvimento destes deslocamentos na estrutura.

A laje L2 registou o valor mais elevado, com aproximadamente 0,12 m, com se pode observar na representação gráfica da Figura 7.4, à qual foi aplicado um fator de ampliação das deformações de valor 5. É de notar que a laje que limita superiormente o compartimento de incêndio (L2) apresenta deslocamentos verticais mais significativos que a laje inferior (L1). Tal é justificado com o gradiente de temperaturas que desenvolve no compartimento: as temperaturas na camada superior de gases quentes são superiores às verificadas na zona inferior, junto à laje L1.

As vigas manifestaram no geral deformações reduzidas. Foi possível verificar a contribuição das paredes de alvenaria na limitação dos deslocamentos (Figura 7.5): observou-se que a presença deste elemento apenas no piso inferior foi suficiente para reduzir o desenvolvimento de flechas nas vigas que suportam os pisos restantes.

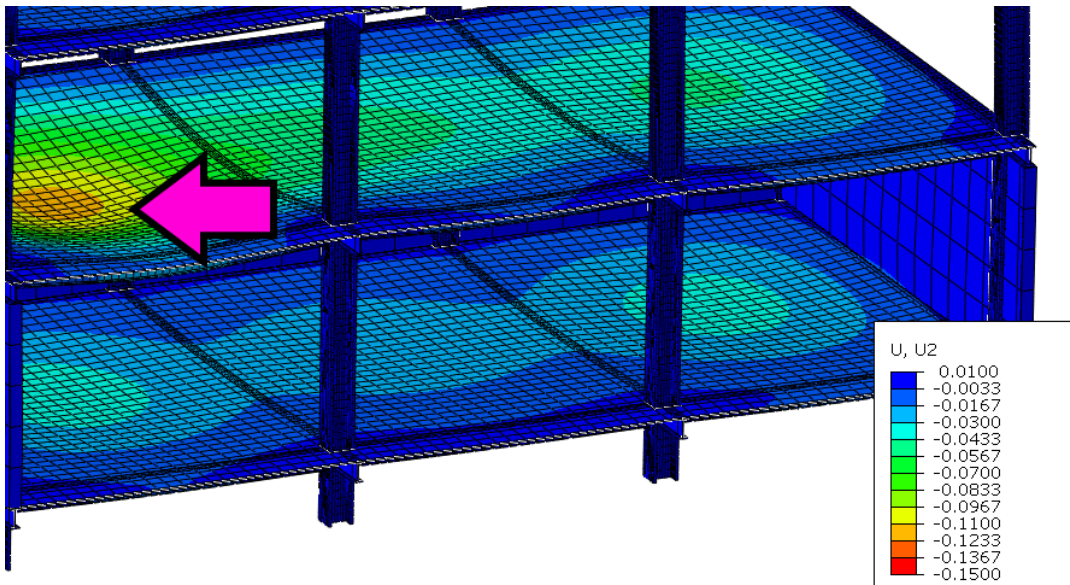


Figura 7.4 Deformação máxima (m) nas lajes – fator de ampliação 5

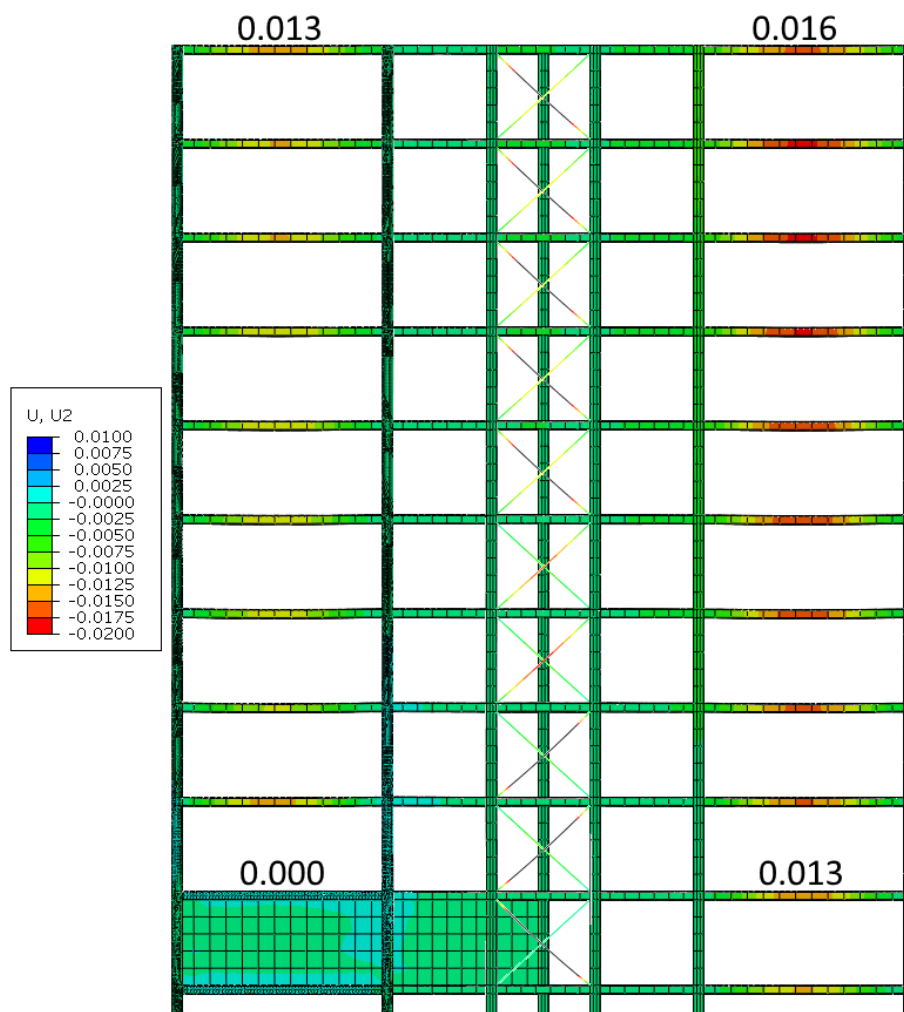


Figura 7.5 Flechas (m) verticais em vigas, com alguns valores aproximados

7.3. Tensões de Von Mises

A tensão equivalente de Von Mises é uma grandeza escalar que traduz o estado de tensão de um material dúctil – NPL (2007). Pode exprimir-se em função das tensões normais nas três direcções principais (σ_1 , σ_2 e σ_3) como:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (7.1)$$

O ANEXO F faz o enquadramento da distribuição das tensões de Von Mises no edifício no fim da simulação. Os valores mais significativos em toda a estrutura foram observados no limite superior do compartimento de incêndio, junto das ligações pilar-viga (Figura 7.6). Corresponde à parte da fracção em que temperaturas aplicadas (retiradas da simulação CFD) são em geral mais elevadas, devido à camada superior de gases quentes.

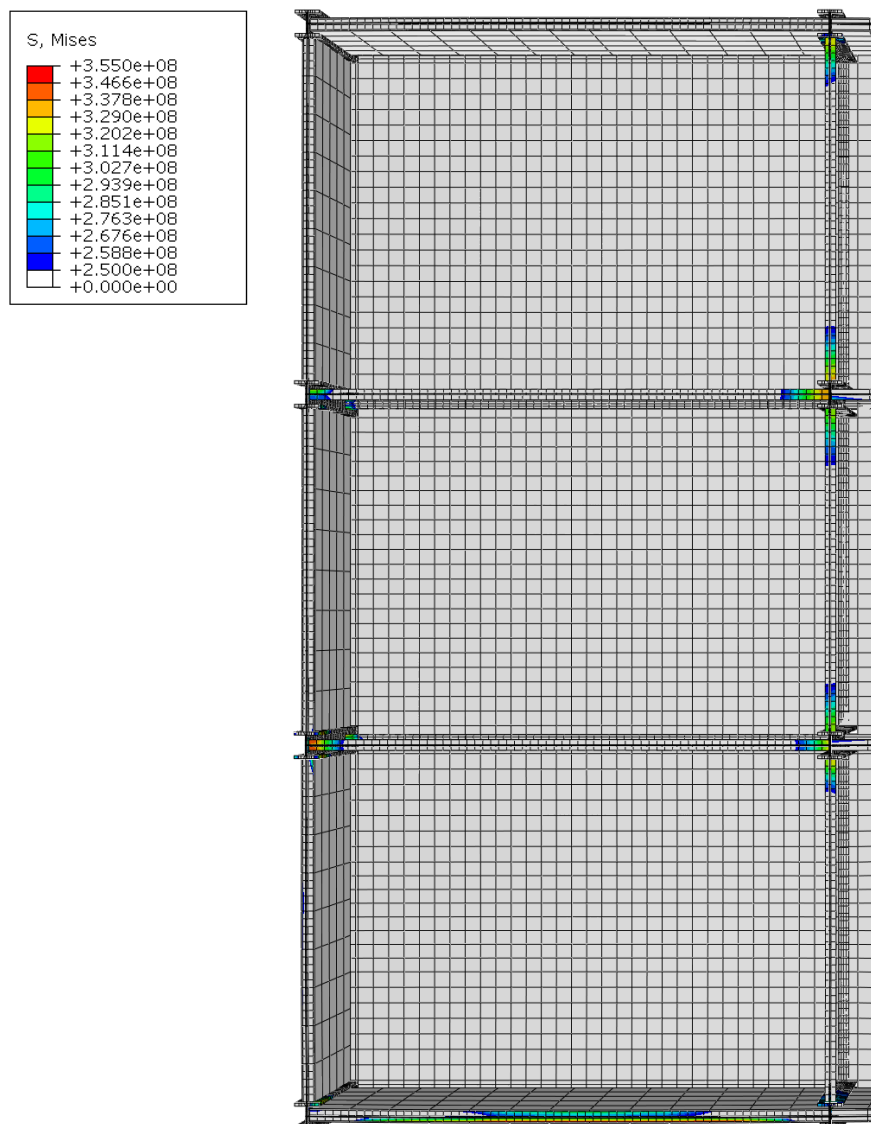


Figura 7.6 Tensões de Von Mises (Pa) no compartimento de incêndio

Foi no banzo inferior da viga V9-2, na ligação com o pilar P11, que se atingiu a tensão de Von Mises mais elevada (Figura 7.7).

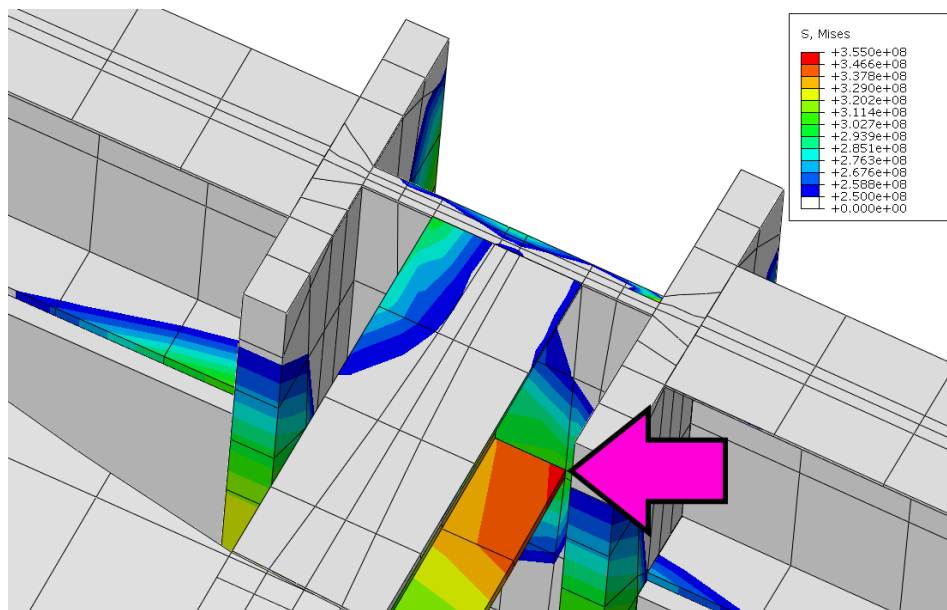


Figura 7.7 Tensões de Von Mises (Pa) na zona mais crítica

A área observada é ainda pouco significativa para que ocorra o desenvolvimento de uma rótula plástica. Ainda assim, tentou averiguar-se se, na zona em questão, as tensões de Von Mises excedem o limite elástico do material.

É assim relevante determinar se as temperaturas nesta zona são de tal ordem que causam a redução da tensão de cêdencia efetiva do aço. Observa-se no aço uma temperatura na ordem dos 200 °C (Figura 7.8).

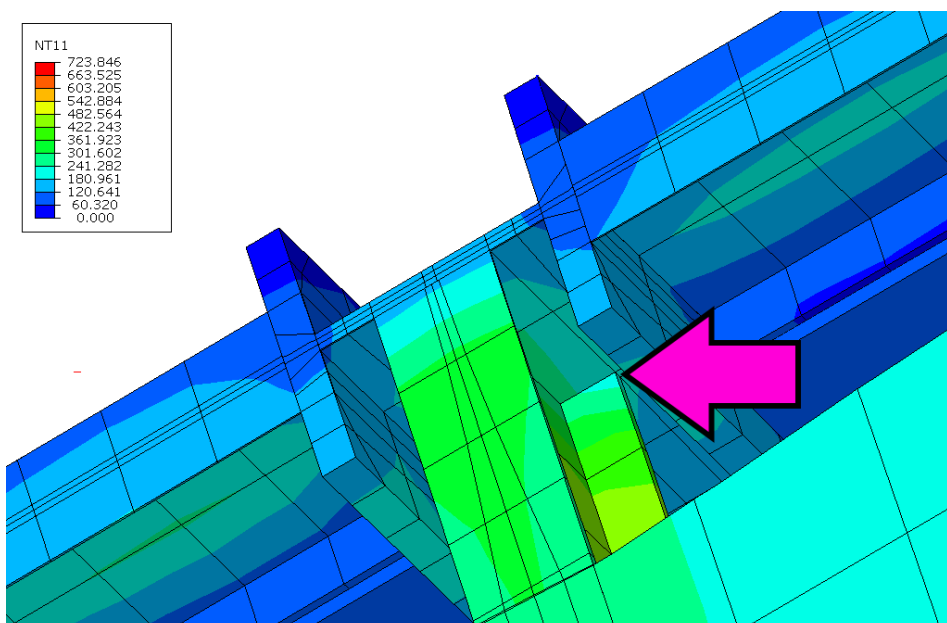


Figura 7.8 Temperaturas (°C) na zona mais crítica

Pelo gráfico da Figura 3.6, retirado da NP EN 1993-1-2 (2010), o factor de redução a considerar nesta situação é $k_{y,200\text{ }^{\circ}\text{C}} = 1$. A temperatura não reduz a tensão de cedência efetiva do aço:

$$f_{y,\theta} = k_{y,\theta} \times f_y = 1 \times 355 = 355 \text{ MPa} \quad (7.2)$$

Uma análise mais detalhada às tensões de Von Mises, por calibração da gama de valores apresentada pelo programa, permitiu obter um valor mais preciso, na ordem dos 348 MPa (Figura 7.9).

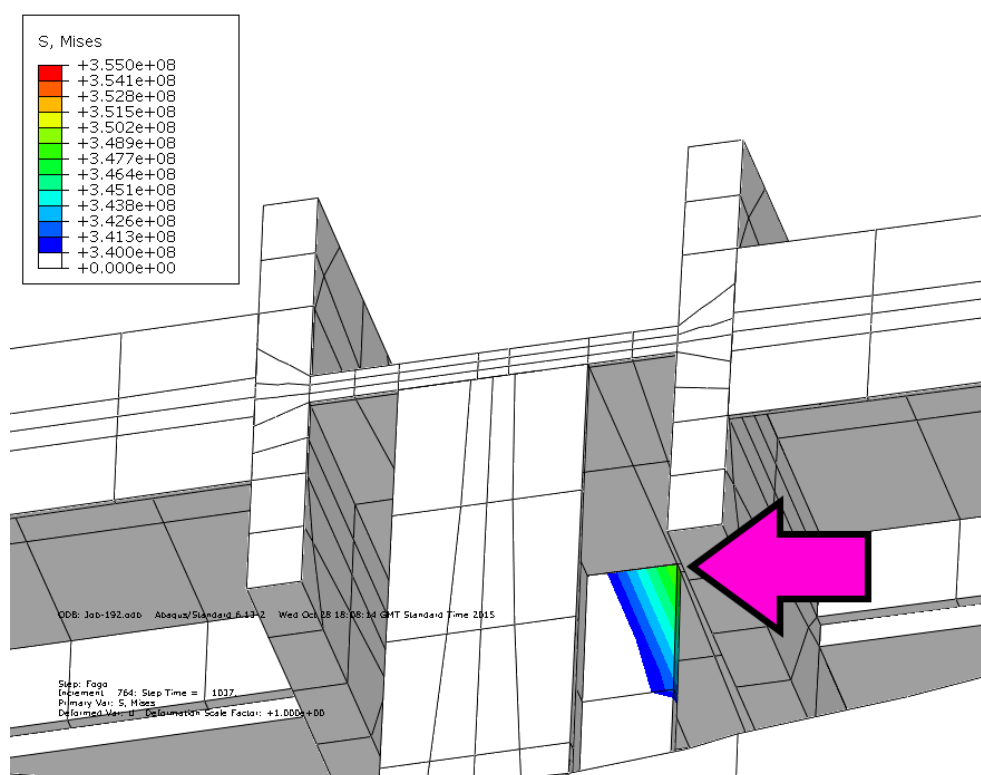


Figura 7.9 Tensões de Von Mises (Pa) na zona crítica com maior detalhe

Foi assim possível concluir que não se verifica cedência do material na zona em questão – a tensão de Von Mises é menor que o limite elástico do aço S355 aos 200 °C.

7.4. Esforços axiais nos pilares

Neste subcapítulo, analisam-se os esforços axiais nos pilares afetos ao compartimento.

Os valores foram calculados através da multiplicação da média das tensões (na direção vertical) dos elementos finitos de uma secção pela área da mesma. Escolheu-se a secção mais elevada imediatamente subjacente às vigas do segundo piso (Figura 7.10).

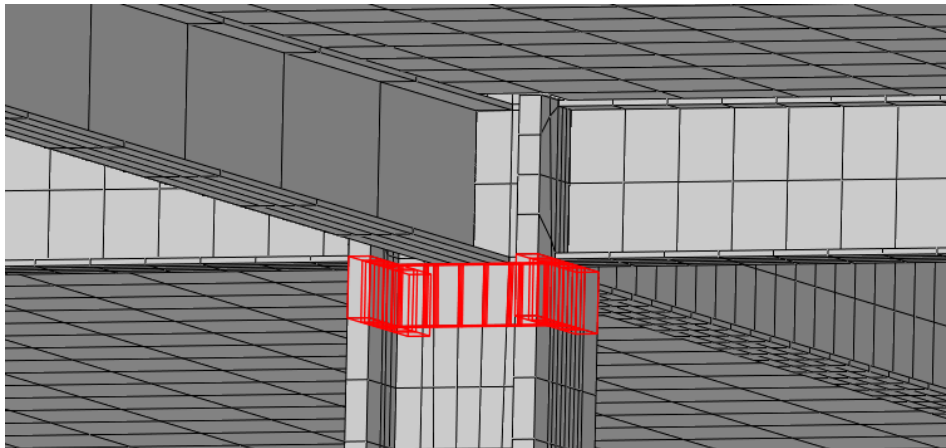


Figura 7.10 Secção para quantificação do esforço axial de um pilar

Os gráficos seguintes traduzem a evolução do esforço axial nas oito secções estudadas. O sinal negativo representa um esforço de compressão. Considerou-se em todos os gráficos um eixo vertical a contemplar um intervalo de 2000 kN, de modo a permitir uma melhor compreensão quantitativa das variações de esforço nos vários pilares. Como já foi explicado no capítulo anterior, desprezaram-se os primeiros 15 segundos de simulação, que foi o tempo necessário até a aplicação de cargas estar concluída.

No pilar de canto P1, o esforço axial de compressão manteve-se praticamente constante, tendo sofrido apenas uma ligeira redução de 20,5 kN, relativamente ao valor inicial de 916,1 kN (Figura 7.11).

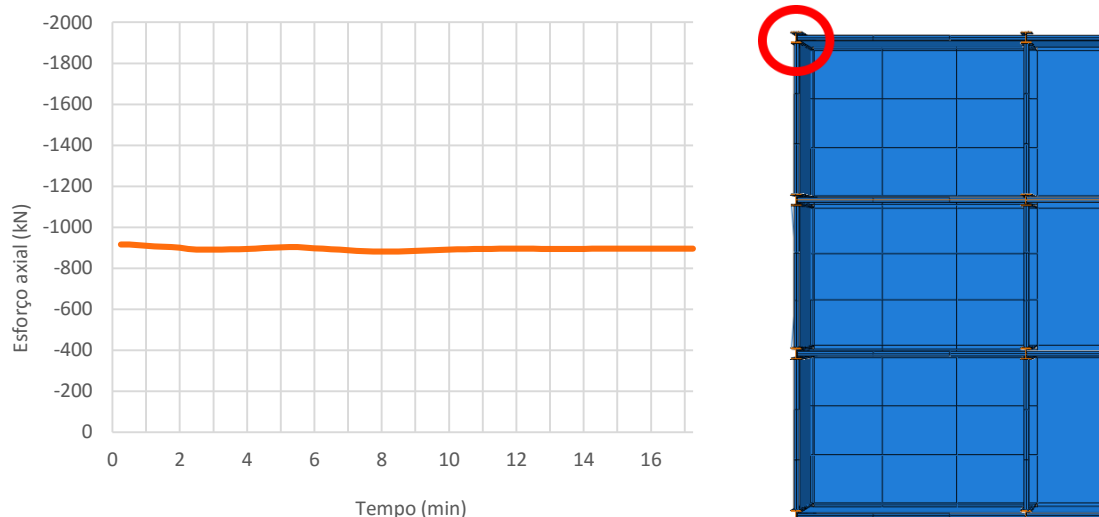


Figura 7.11 Evolução do esforço axial no pilar de canto P1

No pilar de fachada P2, registou-se também uma redução de esforço, mais acentuada nos primeiros minutos de cálculo e depois mais atenuada. O valor inicial era de 1970,8 kN e a variação total negativa foi de 621,8 kN (Figura 7.12).

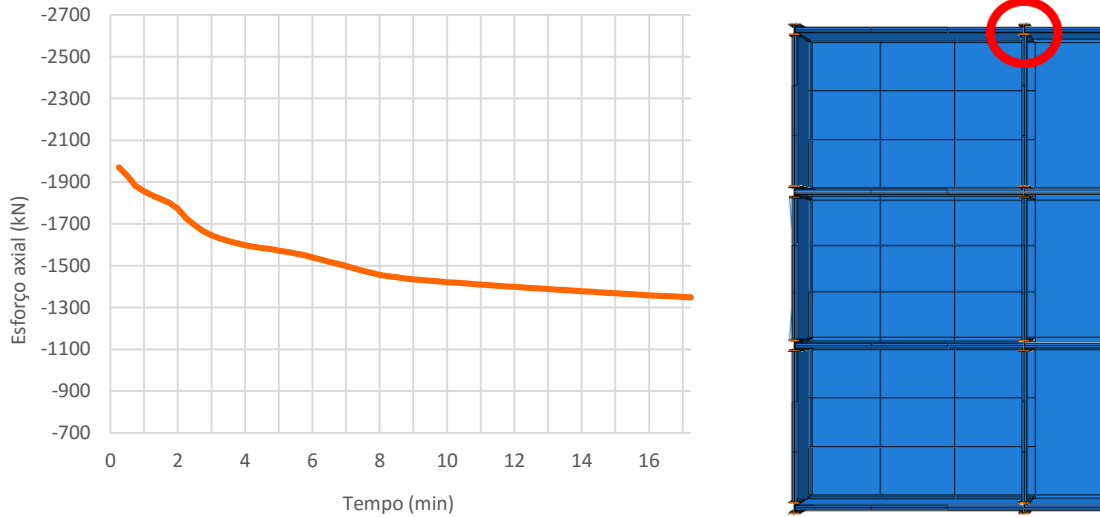


Figura 7.12 Evolução do esforço axial no pilar de fachada P2

No pilar de fachada P6, houve um aumento considerável do esforço de compressão, de 1925,6 kN para 3108,2 kN, que se deu principalmente na primeira metade da simulação, período após o qual este crescimento atenuou (Figura 7.13).

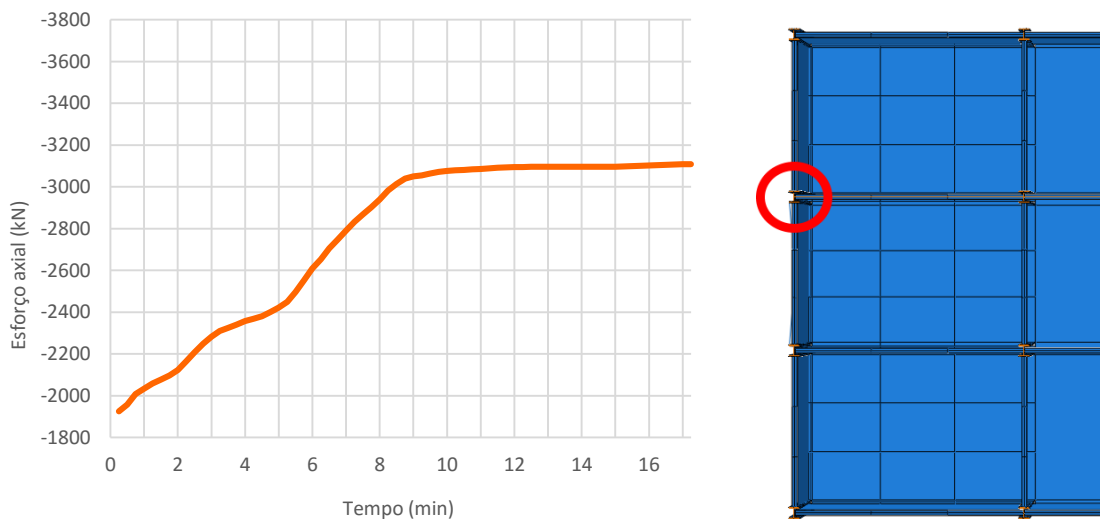


Figura 7.13 Evolução do esforço axial no pilar de fachada P6

No pilar interior P7, o esforço axial de compressão também aumentou, somando 846,9 kN ao seu valor inicial e atingindo no fim do cálculo os 4452,6 kN. A curva teve um desenvolvimento ligeiramente mais acentuado no início do cálculo e reduziu gradualmente o seu declive (Figura 7.14).

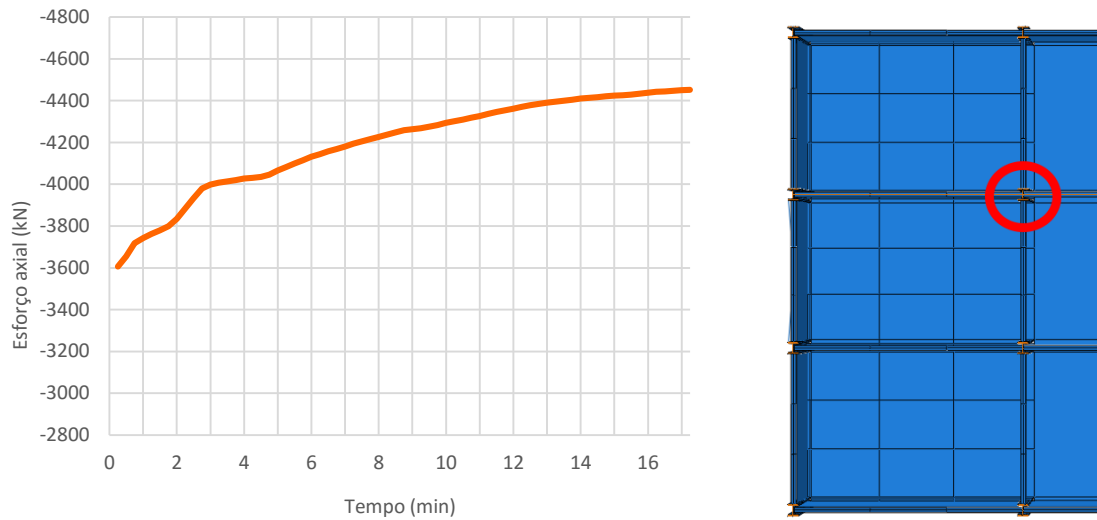


Figura 7.14 Evolução do esforço axial no pilar interior P7

O pilar de fachada P11 foi o que registou a maior variação de esforço, aumentando os 1932,1 kN de compressão para 3712,6 kN, numa evolução praticamente linear (Figura 7.15).

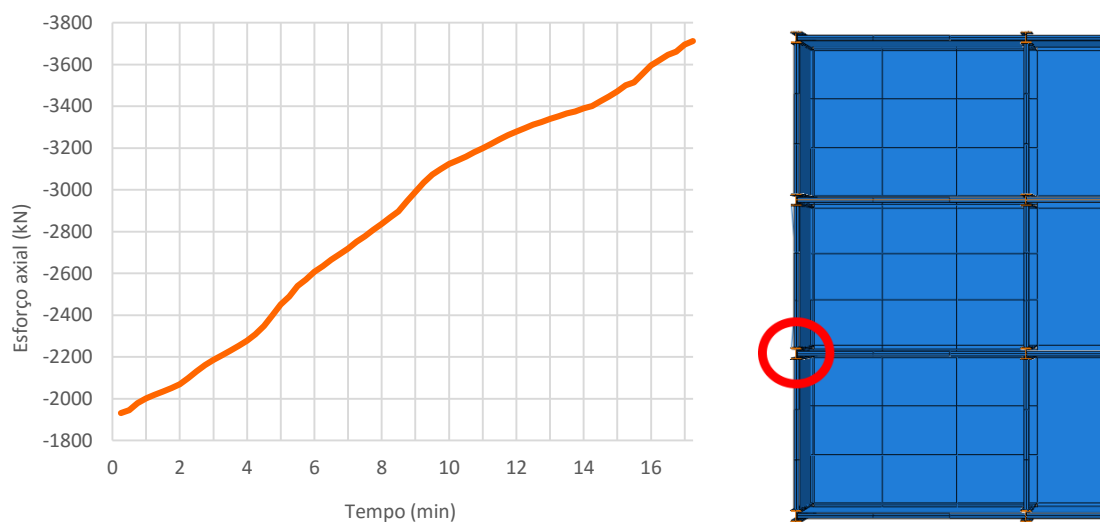


Figura 7.15 Evolução do esforço axial no pilar de fachada P11

O pilar interior P12 teve uma evolução do esforço axial de compressão semelhante ao anterior, com um crescimento linear. O valor inicial era 3189,0 kN e evoluiu até aos 4558,8 kN (Figura 7.16).

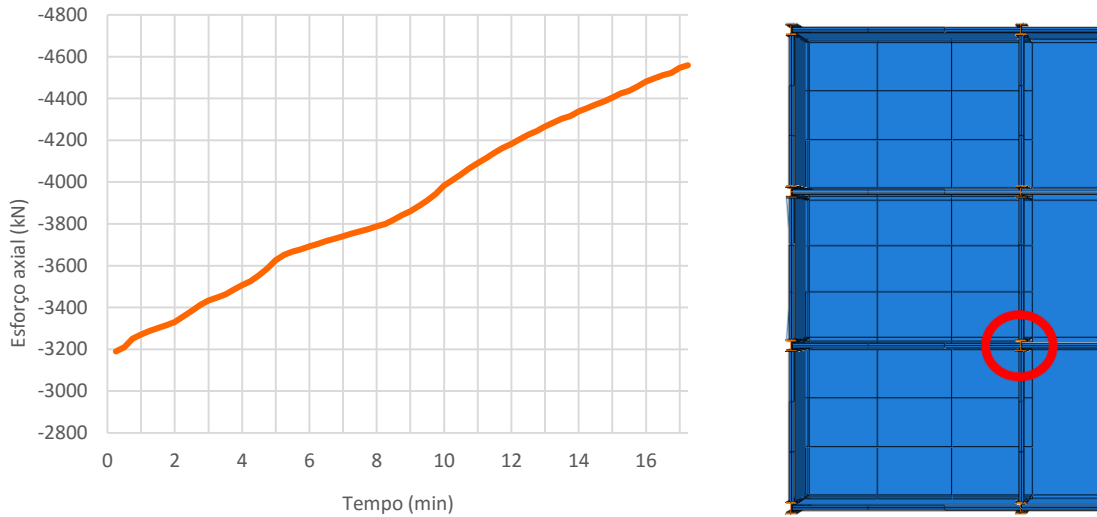


Figura 7.16 Evolução do esforço axial no pilar interior P12

No pilar de canto P20, verificou-se um ligeiro decréscimo do esforço de compressão inicial de 935,5 kN aproximadamente constante, com, até aos 10 minutos de cálculo, e aumentou depois gradualmente até aos 1153,9 kN (Figura 7.17).

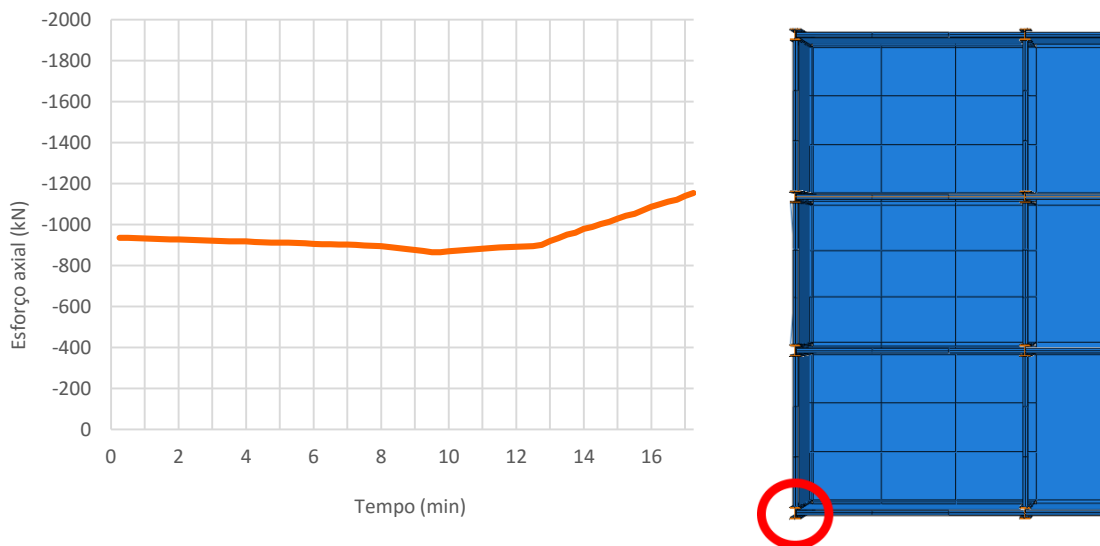


Figura 7.17 Evolução do esforço axial no pilar de canto P20

O pilar de fachada P21 apresentou a evolução de esforço axial mais irregular. um decréscimo linear considerável dos 1692,0 kN para os 993,7 kN registados aos 12 minutos de simulação, e depois uma inversão drástica de sentido, aumentando continuamente até ao valor final de 2533,1 kN (Figura 7.18).

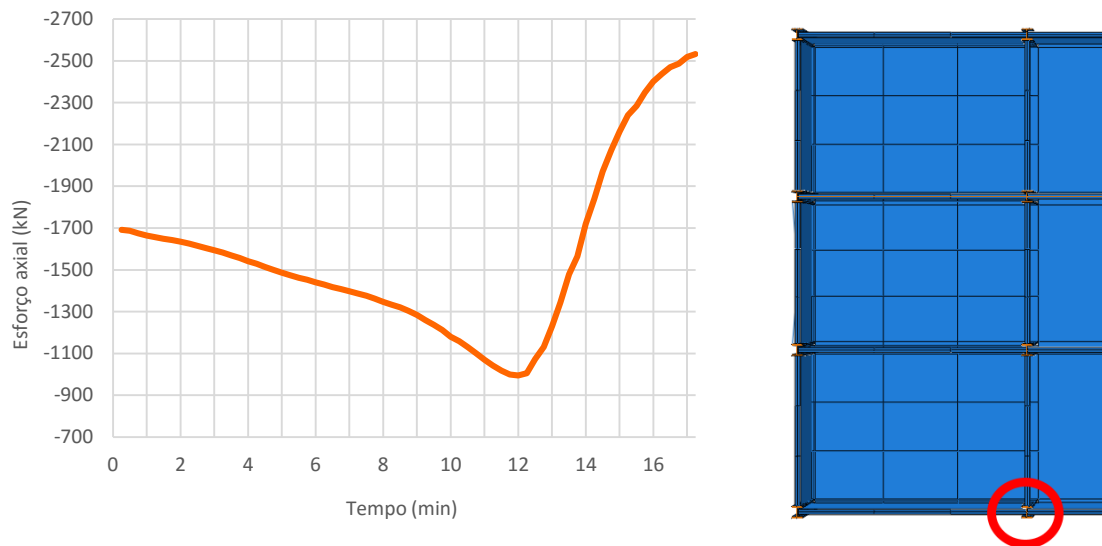


Figura 7.18 Evolução do esforço axial no pilar de fachada P21

Concluída esta análise individual, repara-se que é possível identificar uma relação entre o posicionamento dos pilares e o comportamento estrutural que apresentam:

- Ambos os pilares P1 e P2 apresentam um ligeiro decréscimo de esforço axial durante a simulação;
- Os pilares dos dois pórticos seguintes P6, P7, P11 e P12, apresentaram todos um aumento contínuo de esforço axial, com o último par a demonstrar um incremento mais significativo;
- Os restantes dois pilares, P20 e P21, registaram ambos uma diminuição do esforço de compressão seguida de um aumento para um valor superior ao inicial.

Segue-se uma breve análise aos valores percentuais de variação de esforço axial relativamente ao valor inicial, para os diferentes pilares, através do gráfico apresentado na Figura 7.19. São consideradas as variações atingidas em três instantes distintos: os 6 minutos de cálculo, os 12 minutos, e o instante final.

É possível observar o aumento generalizado dos esforços axiais dos pilares ao longo do tempo. A progressão espacial destes incrementos parece seguir a propagação do incêndio de compartimento simulado no modelo de campo.

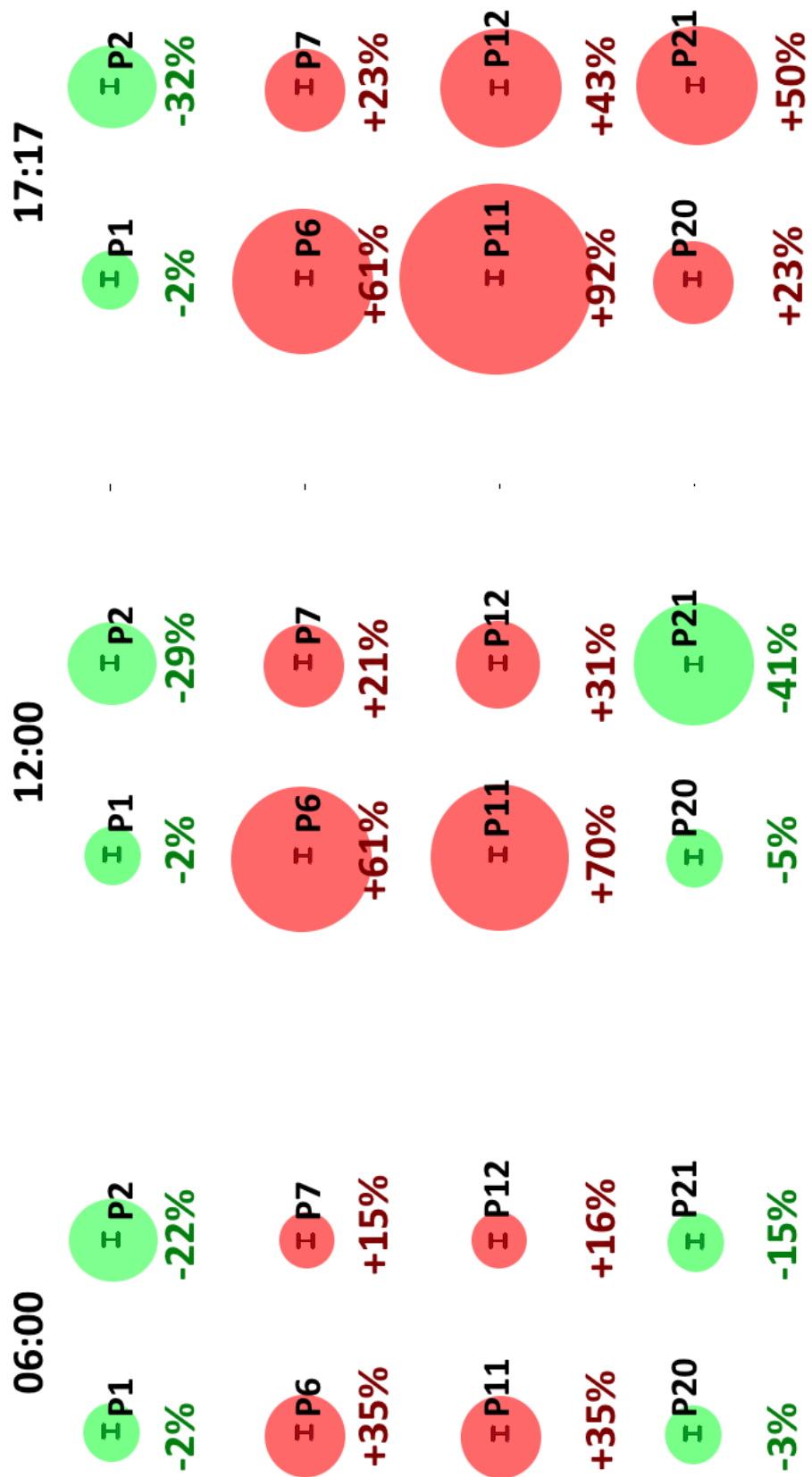


Figura 7.19 Variações de esforço axial nos pilares, relativamente ao valor inicial

Através da comparação de pilares em condições iniciais semelhantes (Quadro 7.1) é possível verificar uma correlação entre a temperatura e a variação do esforço axial: as situações em que o aumento de temperatura foi maior resultaram sempre em esforços axiais finais mais elevados.

Quadro 7.1 Temperaturas máximas e acréscimos de esforço axial nos pilares

Elementos		$N_{inicial}$ (kN)	$T_{final\ máx.}$ (°C)	$\Delta N / N_{inicial}$
Pilares de canto	P1	-916,1	77,6	-2%
	P20	-935,5	139,5	+23%
Pilares de fachada	P2	-1970,8	141,5	-32%
	P21	-1692,0	374,4	+50%
Pilares de fachada	P6	-1925,6	136,4	+61%
	P11	-1932,11	176,4	+92%
Pilares interiores	P7	-3605,7	187,9	+23%
	P12	-3189,04	256,4	+43%

Os resultados obtidos confirmam o aumento de esforços internos nos pilares provocado pelas restrições à dilatação térmica impostas pela estrutura.

8. CONCLUSÃO

8.1. Síntese do Trabalho

O dimensionamento estrutural de edifícios requer a atenção a uma grande variedade de tipos de carregamentos e combinações. Contudo, o complexo comportamento de um edifício em situação de incêndio tem sido correntemente baseado em métodos simplificados. O incêndio em particular, não tem sido em Portugal considerado como uma ação a ter em conta no dimensionamento. Quando é feito, esse dimensionamento é levado a cabo por métodos simplificados, seguindo uma análise baseada no “tempo de resistência ao fogo”, que é determinado por ensaios de laboratório em fornos com ações térmicas definidas pela curva padrão ISO 834. Este conceito de tempo de resistência ao fogo de um elemento estrutural até ao colapso, existe desde o final do século passado e tem permanecido sem alterações desde o seu desenvolvimento inicial, apesar dos enormes avanços das técnicas computacionais de modelação do fenómeno do incêndio e do comportamento estrutural de edifícios.

A modelação por elementos finitos com análises geométricas e materiais não lineares de edifícios serviu neste estudo para uma investigação mais detalhada da complexidade da resposta de uma estrutura sob a solicitação de uma ação térmica e mecânica. Nestes cálculos, o principal objetivo foi considerar da forma mais realista possível a ação térmica a atuar nos elementos estruturais (vigas, pilares e lajes), e as ações mecânicas impostas pela sua inserção num sistema estrutural. As condições de fronteira de cada elemento estrutural também são desta forma tidas em conta de forma mais realística. Procurou-se assim realizar-se uma análise real sob um incêndio real.

A partir da interface gráfica PyroSim, desenvolveu-se o modelo de campo para o incêndio de compartimento (escritório), tendo por base o código de dinâmica computacional de fluidos FDS.

Foi possível simular as diferentes características de um incêndio real de compartimento: ignição; libertação de calor; condições de ventilação e propagação. Foi assim possível obter os registos de temperatura na proximidade dos vários elementos estruturais.

Do ponto de vista do comportamento estrutural, maior relevo foi dado ao desempenho dos pilares do edifício. O comportamento típico de aumento do esforço axial de origem térmica até um pico, com posterior redução descendo até ao valor inicial já foi largamente descrito e estudado por vários autores. Contudo, a inserção dos pilares nos edifícios introduzem condições de fronteira que são totalmente diferentes de se considerar os pilares separados da sua estrutura.

Neste trabalho, no programa de elementos finitos ABAQUS, foi desenvolvido o modelo tridimensional da estrutura, e realizou-se a análise térmica e mecânica, aplicando o campo de temperaturas obtido na modelação CFD. Adotaram-se elementos sólidos na modelação dos pilares e vigas. A revisão da literatura demonstrou que, para edifícios desta dimensão, a maior

parte dos investigadores utiliza elementos linha ou casca. Deste modo, poupam recursos computacionais, mas obtêm resultados de menor precisão.

Conseguiu-se simular o aquecimento diferencial da estrutura induzido por um incêndio real, por radiação e condução, ao aplicar as diferentes curvas $T - t$ num número considerável de superfícies diferentes. Concluída a análise numérica, verificou-se que foi possível simular o desempenho de uma estrutura real em várias medidas:

- Desenvolvimento de gradientes térmicos ao longo das secções devido ao aquecimento diferencial, observados nos elementos sólidos dos pilares e vigas;
- Aumento da deformação em lajes (elementos casca), devido à ação térmica;
- Travamento de flechas nas vigas por contribuição das paredes;
- Agravamento do estado de tensão dos elementos estruturais por ação do fogo.

8.2. Principais Conclusões

8.2.1. Modelação Computacional de Incêndios

Relativamente à modelação por FDS da evolução do incêndio de compartimento considerado neste estudo, são de destacar as seguintes conclusões:

- Como se pode observar nos Anexos A a C, as curvas obtidas por este método baseado no desempenho apresentam valores quase sempre inferiores à curva ISO 834, que considera uma carga de incêndio infinita. Neste sentido, pode afirmar-se que a análise estrutural de elementos estruturais isolados da estrutura e utilização de curvas de incêndio padrão, como seja a curva supracitada, é extremamente penalizadora;
- O FDS é uma ferramenta poderosa na engenharia de segurança contra incêndio, com inúmeras aplicações. Contudo, a precisão do cálculo depende do rigor aplicado na modelação;
- Num primeiro passo, é recomendável replicar a geometria exata das obstruções que se pretendem modelar. Depois, trabalhando sobre cópias do ficheiro inicial, podem ser testadas diferentes malhas e rasterizações. Isto permite encontrar o ponto de compromisso entre a duração do cálculo e a precisão dos resultados;
- Embora seja possível definir a geometria das células da malha segundo as três direções principais, as células cúbicas representam a melhor opção.

8.2.2. Análise Estrutural

Relativamente ao trabalho de modelação do comportamento estrutural realizado com o ABAQUS neste estudo, são de destacar as seguintes conclusões:

- O cálculo estrutural pela análise de elementos isolados segundo uma curva $T - t$ padrão, embora traduza um cenário de incêndio mais gravoso que uma situação real, não considera as ações indirectas do incêndio – os esforços internos devido à inserção do elemento em estudo na estrutura;
- devido à restrição da dilatação térmica imposta pela estrutura;
- A adopção de métodos baseados no desempenho, que seguem uma análise estrutural global e fazem a avaliação dos esforços internos, permite ter em consideração a sua redistribuição no caso da perda de resistência da estrutura;
- A utilização de elementos sólidos na modelação estrutural permite obter resultados mais aproximados da situação real, quando comparado com elementos casca ou linha, que não permitem, por exemplo, avaliar os gradientes térmicos ao longo de uma secção;
- Modelos com grande número de elementos finitos sólidos precisam de recursos computacionais muito sofisticados e potentes.

8.3. Desenvolvimentos Futuros

Uma vez não se verificou a ocorrência de flashover no compartimento estudado, e no seguimento da constatação de Rein (2012) em que referiu que não era comum a ocorrência deste fenómeno em compartimentos de grandes dimensões, seria interessante a realização de um estudo paramétrico com recurso ao FDS para averiguar quais as condições mais propícias à inflamação generalizada de uma divisão, fazendo variar parâmetros como as características geométricas do compartimento, as condições de ventilação e a quantidade de material combustível.

Seria também relevante a análise numérica do comportamento estrutural de um edifício com a inclusão total de paredes nas fachadas. Se por um lado parecem contribuir para resultados mais favoráveis ao limitar deformações, por outro poderão introduzir momentos fletores desfavoráveis ao ajudar no aquecimento diferencial dos elementos estruturais, e levar à instabilidade dos mesmos (thermal bowing).

Outra proposta seria a análise do comportamento estrutural de um edifício em que a propagação de incêndio se estenda a todo o piso, ou aos pisos superiores.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAQUS (2007). <http://www.egr.msu.edu/software/abaqus/Documentation/docs/>. Dassault Systèmes - Abaqus Version 6.7 Documentation.
- Agarwal, A. e Varma, H.A. (2014). *Fire induced progressive collapse of steel building structures: The role of interior gravity columns*. Engineering Structures, Vol. 58, pp. 129-140.
- Ahonen, A., Kokkala, M. e Weckman, H. (1984). *Burning Characteristics of Potential Ignition Sources of Room Fires*. Technical Research Centre of Finland, Espoo.
- ASCE (2010). *ASCE/SEI 7-10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers, Estados Unidos da América.
- Babrauskas, V. (1997). *Glass breakage in fires*.
- Babrauskas, V. e Peacock, R.D. (1992). *Heat Release Rate: The Single Most Important Variable in Fire Hazard*. Fire Safety Journal, Vol. 18, Issue 3, pp. 255-272.
- Bailey, C.G., Lennon, T. e Moore, D.B. (1999). *The behaviour of full-scale steel-framed buildings subjected to compartment fires*. The Structural Engineer, Vol. 77, Issue 8, pp. 15-21.
- Barylick, J. (2012). *Killer Show: The Station Nightclub Fire, America's Deadliest Rock Concert*. University Press of New England, Lebanon. ISBN-13 978-1611682656.
- Beata, P.A. e Jeffers, A.E. (2014). *3D spatial homogenization algorithm for coupling CFD fire simulations with finite element heat transfer analyses of structures*. Proceedings of the 8th International Conference on Structures in Fire, Xangai.
- Benichou, N. (2002). *82.579 Design for Fire Resistance*. Department of Civil & Environmental Engineering, Universidade de Carleton, Ottawa.
- Brazão Farinha, J.S. e Correia dos Reis, A. (1993). *Tabelas Técnicas*. Edição P.O.B., Setúbal.
- British Steel PLC (1999). *The Behaviour of Multi-Storey Steel Framed Buildings in Fire*. British Steel PLC, Swinden Technology Centre, Rotherham.
- Buchanan, A.H. (2001). *Structural Design for Fire Safety*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester. ISBN 978-0-471-89060-7.
- Burgess, I.W., Huang, Z. e Plank, R.J. (2004). *Non-Linear Modelling of Steel and Composite Structures in Fire*. Progress in Steel Building Structures, Issue 3, pp. 23-30.

- Caldas, R.B. (2008). *Análise Numérica de Estruturas de Aço, Concreto e Mistas em Situação de Incêndio*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Caldas, R.B., Fakury, R.H., Sousa Jr., J.B.M. e Pannoni, F.D. (2006). *A Utilização de Métodos Avançados de Cálculo para a Análise de Pisos Mistos de Aço e Concreto em Situação de Incêndio*. XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, Campinas.
- Caldas, R.B., Rodrigues, F.C., Marinho, A.C.B. e Fakury, R.H. (2010). *Simulação Computacional do Comportamento de um Incêndio Real em um Apartamento de Edificação Popular*. Nono Simpósio de Mecânica Computacional, São João del Rei.
- Capote Abreu, J.A., Alvear Portilla, D., Lázaro Urrutia, M. e Espina Santos, P. (2005). *Dinamica del Incendio en Edificios mediante Modelado y Simulación Computacional: CFAST, OZONE, FDS*. Grupo GIDAI - Seguridad contra Incendios - Investigación y Tecnología.
- Chew, M.Y.L. (1999). *HRR, smoke and toxicity of ceiling and wall linings and finishes*. International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Vol. 1, Number 3, pp. 204-212.
- Choi, J. (2008). *Concurrent Fire Dynamics Models and Thermomechanical Analysis of Steel and Concrete Structures*. Dissertação de Doutorado, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Correia, A.M. (2011). *Fire Resistance of Steel and Composite Steel-Concrete Columns*. Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Correia, A.M., Rodrigues, J.P.C. e Silva, V.P. (2010). *Numerical Study on the Behavior of Steel Columns Embedded on Brick Walls Subjected To Fire*. International Symposium "Steel Structures: Culture & Sustainability 2010", Istanbul.
- Correia, A.M., Rodrigues, J.P. e Vila Real, P. (2012). *Parametric Study on the Behaviour of Steel Columns Embedded on Walls*. Proceedings of the 7th International Conference on Structures in Fire, Zurique.
- Costa, C.N. (2008). *Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- CYPE Ingenieros, S.A. (2013). Cypecad - Memória de Cálculo, Braga.
- Dassault Systèmes (2012). Abaqus 6.12 - Abaqus/CAE User's Manual, Providence.
- Dassault Systèmes (2012). Abaqus 6.12 - Getting Started with Abaqus: Interactive Edition, Providence.
-

- Dolvitsch, J.N., Ruschel, F. e Silva Filho, L.C.P. (2011). *Avaliação da Utilização de Métodos Computacionais na Reconstituição de Incêndios em Edificações: Caso do Shopping Total em Porto Alegre - Rio Grande do Sul*. Anais: I Congresso Ibero-Latino Americano sobre Segurança Contra Incêndio, Natal.
- El-Dardiry, E. e Ji, T. (2006). *Modelling of the dynamic behaviour of profiled composite floors*. Engineering Structures, Vol. 28, Issue 4, pp. 567-579.
- Ellingwood, B.R., Smilowitz, R., Dusenberry, D.O., Duthinh, D. e Carino, N.J. (2007). *NISTIR 7396: Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings*. Washington, D. C., National Institute of Standards and Technology (NIST).
- Engineering ToolBox (2015). <http://www.engineeringtoolbox.com>. The Engineering ToolBox - Resources, Tools and Basic Information for Engineering and Design of Technical Applications.
- FEMA (2014). *Practical Applications of Fire Dynamics and Modeling - Student Manual*. Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, D. C.
- Forney, G.P. (2014). *Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data - Volume I: User's Guide - Version 6.1.12*.
- Foster, S., Chladná, M., Hsieh, C., Burgess, I. e Plank, R. (2007). *Thermal and structural behaviour of a full-scale composite building subject to a severe compartment fire*. Fire Safety Journal, Vol. 42, Issue 3, pp. 183-199.
- Fu, F. (2009). *Progressive collapse analysis of high-rise building with 3-D finite element modeling method*. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 65, Issue 6, pp. 1269-1278.
- Fu, F. (2015). *Advanced Modelling Techniques in Structural Design*. John Wiley & Sons, Ltd., Londres. ISBN 978-1-118-82543-3.
- Gales, J., Maluk, C. e Bisby, L. (2012). *Structural Fire Testing - Where are we, how did we get here, and where are we going?* 15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto.
- Gann, G.R., Hamins, A., McGrattan, K.B., Mulholland, G.W., Nelson, H.E., Ohlemiller, T.J., Pitts, W.M. e Prasad, K.R. (2005). *NIST NCSTAR 1-5: Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster - Reconstruction of the Fires in the World Trade Center Towers*. National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington, D. C.
- Garlock, M., Kruppa, J., Li, G.-Q. e Zhao, B. (2014). *White Paper on Fire Behavior of Steel Structures (Draft)*. National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington, D. C.

- Gentili, F., Grossi, L. e Bontempi, F. (2011). *Role of CFD in the Quantitative Assessment of Structural Performance in Fire Scenarios*. Proceedings of International Conference - Applications of Structural Fire Engineering, Praga.
- Glasa, J., Valasek, L., Weisenpacher, P. e Halada, L. (2012). *Use of PyroSim for Simulation of Cinema Fire*. International Journal on Recent Trends in Engineering & Technology, Vol. 7, Issue 2, pp. 51-56.
- Grosshandler, W. (1993). NIST Technical Note 1402 - RadCal: A Narrow Band Model for Radiation Calculations in a Combustion Environment, Gaithersburg.
- Grosshandler, W., Bryner, N., Madrzykowski, D. e Kuntz, K. (2005). *NIST NCSTAR 2: Vol. I - Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire*. National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington, D. C.
- Haberland, M. e Starossek, U. (2009). *Progressive Collapse Nomenclature*. Structures Congress 2009: Don't Mess with Structural Engineers: Expanding Our Role, Austin.
- Hietaniemi, J., Mangs, J. e Hakkarainen, T. (2001). *Burning of Electrical Household Appliances: An Experimental Study*. VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo.
- Hurtado, J.P., Caldas, R.B., Rodrigues, F.C. e Meira, L.O. (2013). *Simulação Computacional de um Incêndio em Edificação Residencial de Baixo Custo*. Atas do 2º Congresso Ibero-Latino-Americano em Segurança Contra Incêndios, Coimbra.
- ISO (1999). *ISO 834-1:1999 Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements*. International Organization for Standardization, Geneva.
- Iwankiw, N. (2006). *Segmentation of Analysis/Design Levels for Structural Fire Engineering*. Proceedings of the Fourth International Workshop - Structures in Fire, Volume 2, Aveiro.
- Jahn, W., Rein, G. e Torero, J.L. (2007). *The Dalmarnock Fire Tests: Experiments and Modelling - 11. A Posteriori Modelling of Fire Test One*. School of Engineering and Electronics, Universidade de Edimburgo, Edimburgo. ISBN 978-0-9557497-0-4.
- Jahn, W., Rein, G. e Torero, J.L. (2011). *A posteriori modelling of the growth phase of Dalmarnock Fire Test One*. Building and Environment, Vol. 46, pp. 1065-1073.
- Jowsey, A., Torero, J.L., Usmani, A., Lane, B. e Lamont, S. (2005). *Determination of Fire Induced Collapse Mechanisms of Multi-Storey Steel Framed Structures - A Case Study*. EUROSTEEL 2005: 4th European Conference on Steel and Composite Structures, Maastricht.
- Kim, J., Lee, J.-H. e Kim, S. (2011). *Estimating the fire behavior of wood flooring using a cone calorimeter*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 110, Issue 2, pp. 677-683.

- Kolaitis, I.D., Asimakopoulou, E. e Founti, M.A. (2011). *Simulation of Fire Spreading in a Residential Building: Comparing Alternative Building Techniques*. First Middle East Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, Dubai.
- Lange, D., Röben, C. e Usmani, A. (2012). *Tall building collapse mechanisms initiated by fire: Mechanisms and design methodology*. Engineering Structures, Vol. 36, pp. 90-103.
- Lawson, J.R., Walton, W.D. e Twilley, W.H. (1983). *NBSIR 83-2787 Fire Performance of Furnishings As Measured in the NBS Furniture Calorimeter. Part I*. Center for Fire Research, National Engineering Laboratory, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, Washington, D. C.
- Lilley, D.G. (2008). *Fire Dynamics: A Practical Oriented Course for Safety Engineers*. Second International Energy 2030 Conference - 2008 Proceedings, Abu Dabi.
- Lim, L.C.S. (2003). *Membrane Action In Fire Exposed Concrete Floor Systems*. Tese de Doutoramento, Universidade de Canterbury, Christchurch.
- Luo, C., Chen, L., Lua, J. e Liu, P. (2010). *Abaqus Fire Interface Simulator Toolkit (AFIST) For Coupled Fire and Structural Response Prediction*. 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Orlando.
- MakeItFrom.com (2015). <http://www.makeitfrom.com/material-properties/High-Impact-Polystyrene-HIPS/>. High Impact Polystyrene (HIPS) Material Properties : MakeItFrom.com.
- Malendowski, M., Gglema, A., Kurzawa, Z. e Polus, L. (2013). *Structural Response Under Natural Fire of Barrel Shape Shell Construction*. Proceedings of International Conference - Applications of Structural Fire Engineering, Praga.
- Malendowski, M., Glema, A. e Szymkuc, W. (2014). *Determination of the series of crucial fire scenarios for the skeletal structures*. Proceedings of the 8th International Conference on Structures in Fire, Xangai.
- Mariani, L.M. e Silva, L.C. (2011). *Aplicação do Programa Fire Dynamics Simulator em Simulação de Incêndio Estrutural*. Anais: I Congresso Ibero-Latino Americano sobre Segurança Contra Incêndio, Natal.
- McAllister, T.P., Gann, R.G., Averill, J.D., Gross, J.L., Grosshandler, W.L., Lawson, J.R., McGrattan, K.B., Pitts, W.M., Prasad, K.R. e Sadek, F.H. (2008). *NIST NCSTAR 1-9: Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster - Structural Fire Response and Probable Collapse Sequence of the World Trade Center Building 7*. National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington, D. C.

- McGrattan, K., McDermott, R., Weinschenk, C. e Overholt, K. (2014). *Fire Dynamics Simulator - User's Guide - Version 6.1.2*, Baltimore.
- NFPA (2013). *NFPA Glossary of Terms*. National Fire Protection Association, Quincy.
- NIST (2005). *NIST NCSTAR 1: Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster - Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers*. National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington, D. C.
- NIST (2008). *NIST NCSTAR 1A: Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster - Final Report on the Collapse of World Trade Center Building 7*. National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington, D. C.
- NIST (2011a). <http://fire.nist.gov/fire/fires/work2/work2.html>. National Institute of Standards and Technology - Engineering Laboratory - Two Panel Workstation Fire (página desativada; consultada através do arquivo da internet <http://web.archive.org>), Washington, D. C.
- NIST (2011b). <http://www.fire.nist.gov/fire/fires/work3/work3.html>. National Institute of Standards and Technology - Engineering Laboratory - Three Panel Workstation Fire (página desativada; consultada através do arquivo <http://web.archive.org>), Washington, D. C.
- NP EN 1991-1-2 (2010). *Eurocódigo 1 - Acções em estruturas, Parte 1-2: Acções gerais, Acções em estruturas expostas ao fogo*. Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- NP EN 1992-1-2 (2010). *Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão, Parte 1-2: Regras gerais, Verificação da resistência ao fogo*. Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- NP EN 1993-1-2 (2010). *Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço, Parte 1-2: Regras gerais, Verificação da resistência ao fogo*. Instituto Português da Qualidade, Caparica.
- NPL (2007). *Manual for the Calculation of Elastic-Plastic Materials Models Parameters*. National Physical Laboratory, Londres.
- Peacock, D.R., Reneke, P.A. e Forney, G.P. (2012). NIST Special Publication 1041r1: CFAST - Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6) - User's Guide.
- Polus, L., Szumigala, M., Kurzawa, Z. e Malendowski, M. (2013). *CFD Modelling of the Braced Barrel Vault*. Proceedings of International Conference - Applications of Structural Fire Engineering, Praga.
- Quiel, S.E. e Garlock, M.E.M. (2008). *Modeling High-Rise Steel Framed Buildings under Fire*. Structures Congress 2008: Crossing Borders, Vancouver.
- Quiel, S.E. e Garlock, M.E.M. (2010). *Parameters for Modeling a High-Rise Steel Building Frame Subject to Fire*. Journal of Structural Fire Engineering, Vol. 1, Issue 2, pp. 115-134.

- Quintana, J., Aurtenetxe, J., Morente, F. e Eguia, S. (2010). *Restrained Steel Beam Behaviour in Case of Fire, Depending on Load Ratio, Performed in Case Study of a Bus Station*. Structures in Fire - Proceedings of the Sixth International Conference, East Lansing.
- Quintiere, J.G. (2006). *Fundamentals of Fire Phenomena*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester. ISBN-13 978-0-470-09113-5.
- Rein, G. (2012). *Introduction to Fire Dynamics for Structural Engineers*. School of Engineering, Universidade de Edimburgo, Malta.
- Rein, G., Torero, J.L., Jahn, W., Stern-Gottfried, J., Ryder, N.L., Desanghere, S., Lázaro, M., Mowrer, F., Coles, A., Joyeux, D., Alvear, D., Capote, J.A., Jowsey, A., Abecassis-Empis, C. e Reszka, P. (2009). *Round-Robin Study of a priori Modelling Predictions of The Dalmarnock Fire Test One*. Fire Safety Journal, Vol. 44, Issue 4, pp. 590-602.
- Rein, G., Torero, J.L., Jahn, W., Stern-Gottfried, J., Ryder, N.L., Desanghere, S., Lázaro, M., Mowrer, F., Coles, A., Joyeux, D., Alvear, D., Capote, J.A., Jowsey, A. e Reszka, P. (2007). *The Dalmarnock Fire Tests: Experiments and Modelling - 10. A Priori Modelling of Fire Test One*. School of Engineering and Electronics, Universidade de Edimburgo, Edimburgo. ISBN 978-0-9557497-0-4.
- Resende, R.M. (2009). *Detecção e Alarme de Incêndio - Sistemas Actuais*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Särdqvist, S. (1993). *Initial Fires: RHR, Smoke Production and CO Generation from Single Items and Room Fire Tests*. Department of Fire Safety Engineering, Institute of Technology, Universidade de Lund, Lund.
- Sekret, R., Saleta, D., Sztarbala, G. e Smardz, P. (2013). *Comparison of CFD Modelling with Fire Tests*. Proceedings of International Conference - Applications of Structural Fire Engineering, Praga.
- Selamet, S. (2013). *The impact of fire scenario to the collapse of a tall structure*. Proceedings of the Fifth International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, Cidade do Cabo.
- SFPE (2002). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3ª Edição*. Society of Fire Protection Engineers, Quincy. ISBN 087765-451-4.
- Sun, R., Burgess, I.W. e Huang, Z. (2012). *The collapse behaviour of braced steel frames exposed to fire*. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 72, pp. 130-142.
- T.C. Forensic (2015). <http://www.tcforensic.com.au/docs/article10.html>. T.C. Forensic: Article 10 - Physical Constants for Investigators.
- Thunderhead Engineering (2014). PyroSim User Manual.

- Tondini, N., Morbioli, A., Vassart, O., Lechêne, S. e Franssen, J.-M. (2014). *An integrated modelling strategy between FDS and SAFIR: the analysis of the fire performance of a composite steel-concrete open car park*. Proceedings of the 8th International Conference on Structures in Fire, Xangai.
- Tondini, N., Vassart, O. e Franssen, J.-M. (2012). *Development of an Interface Between CFD and FE software*. Proceedings of the 7th International Conference on Structures in Fire, Zurique.
- Tonicello, E., Desanghere, S., Vassart, O. e Franssen, J.-M. (2012b). *Fire Analysis of a New Steel Bridge*. Proceedings of the 7th International Conference on Structures in Fire, Zurique, 815-822.
- Tonicello, E., Vassart, O., Zanon, R. e Franssen, J.-M. (2012a). *Structural Fire Design and Optimisation of a Building*. Structural Engineering International, Vol. 22, Issue 4, pp. 541-544.
- Total (2012). *Material Safety Data Sheet - Impact Polystyrene*. Total Petrochemicals & Refining USA, Inc.
- Usmani, A., Roben, C., Johnston, L., Flint, G. e Jowsey, A. (2006). *Tall building collapse mechanisms initiated by fire*. Proceedings of the Fourth International Workshop - Structures in Fire, Volume 1, Aveiro.
- Walton, W.D. e Budnick, E.K. (1988). *NBSIR 88-3695 Quick Response Sprinklers in Office Configurations: Fire Test Results*. Center for Fire Research, National Engineering Laboratory, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, Gaithersburg.
- Wang, G.-Y., Li, Y.-Q., Qiu, C.-H., Han, L.-H., Yu, H.-X. e Xie, F.-D. (2014). *Post-fire performance evaluation method of high-rise buildings and its application in the television cultural center, CCTV*. Proceedings of the 8th International Conference on Structures in Fire, Xangai.
- Yuen, A.C.Y., Yeoh, G.H., Alexander, R. e Cook, M. (2014). *Fire scene reconstruction of a furnished compartment room in a house fire*. Case Studies in Fire Safety, Vol. I, pp. 29-35.

ANEXO A. TEMPERATURAS NOS PILARES

Colocaram-se, nos pilares do modelo do FDS, dispositivos de medição de temperatura nas zonas expostas ao incêndio no interior do compartimento (Figura A.1). Foram aplicados às alturas de 3,65, 2,75 e 1,85 m, relativas à cota zero do modelo, à frente especificadas com as designações “Cima”, “Meio” e “Baixo”, respetivamente.

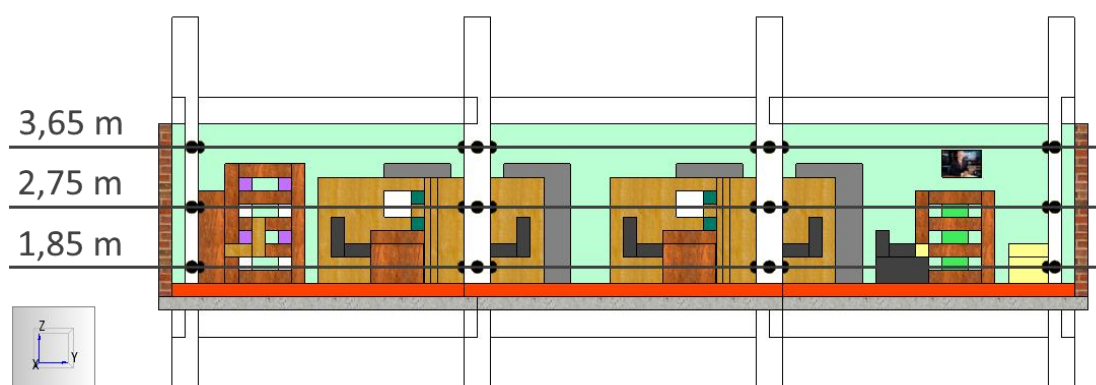


Figura A.1 Cotas dos dispositivos de medição de temperatura nos pilares

Para uma simulação eficaz com o código FDS, foi necessário adequar a geometria dos pilares à malha utilizada no modelo (células cúbicas com 0,20 m de lado). Considerou-se uma secção quadrada de (0,40 x 0,40) m², com dispositivos aplicados nas faces expostas ao incêndio, em cada uma das cotas referidas. Para identificar as faces em que se aplicaram os dispositivos, adotou-se a designação apresentada na Figura A.2.

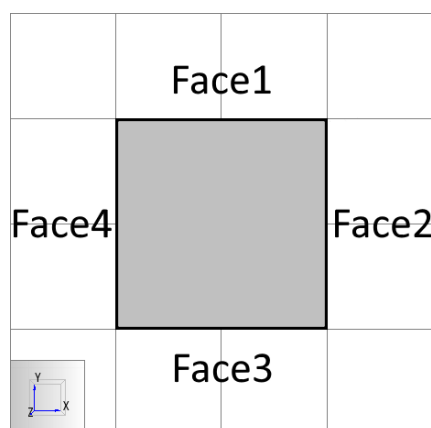


Figura A.2 Faces de aplicação dos dispositivos de medição nos pilares

Com a simulação, o software de CFD determinou uma curva T-t para cada ponto de medição. Verificou-se que as diferenças entre as temperaturas de pontos à mesma altura mas de diferentes faces não eram relevantes. Por outro lado, as discrepâncias observadas entre as temperaturas de dispositivos do mesmo pilar a diferentes cotas foram bastante significativas. Optou-se assim por aplicar apenas três curvas T-t a cada pilar do modelo estrutural desenvolvido no ABAQUS,

uma para cada altura (topo, meio e base), nas superfícies que estariam expostas ao fogo no interior do compartimento. A cada nível do pilar, atribuiu-se uma curva T-t com ordenadas que são os valores máximos das curvas dos dispositivos das diferentes faces. A Figura A.3 representa a aplicação deste raciocínio a um pilar de exemplo PX, exposto ao incêndio em todas as faces.

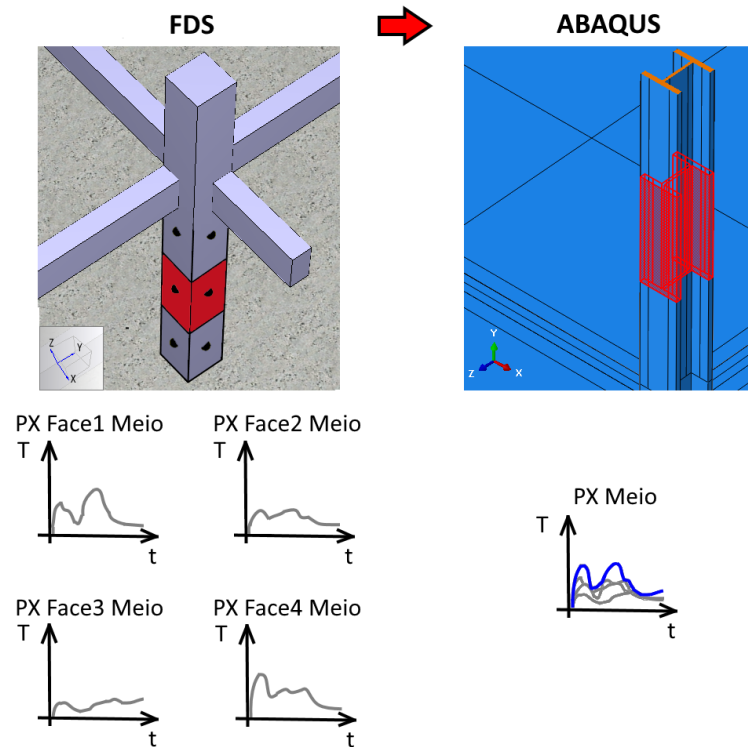


Figura A.3 Metodologia para a determinação das curvas a atribuir aos pilares

A.1. Pilar P1

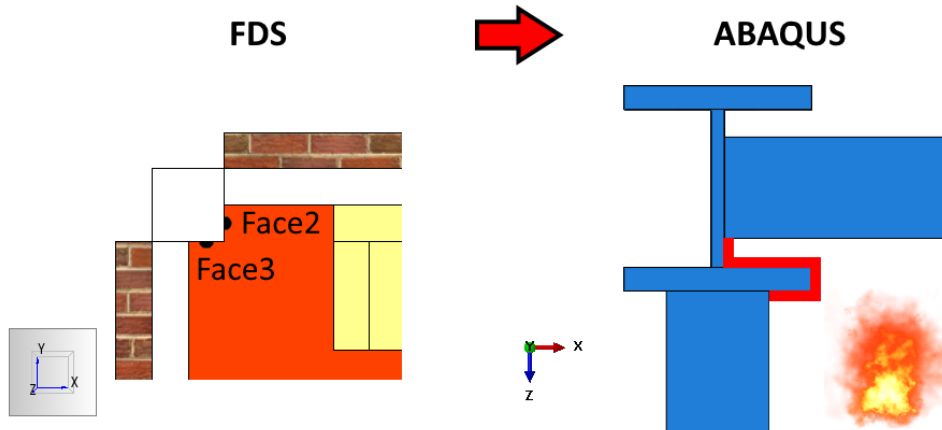


Figura A.4 Pilar P1: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

Temperaturas obtidas por CFD

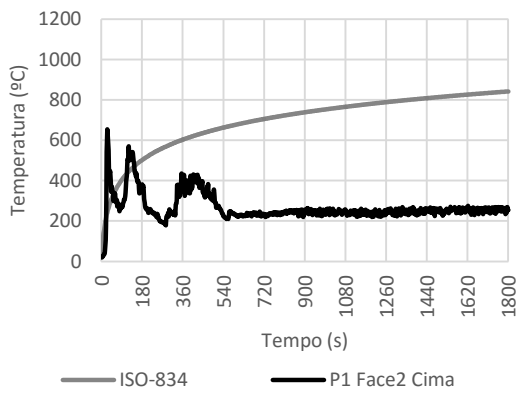


Figura A.5 Registo do dispositivo P1 Face2 Cima

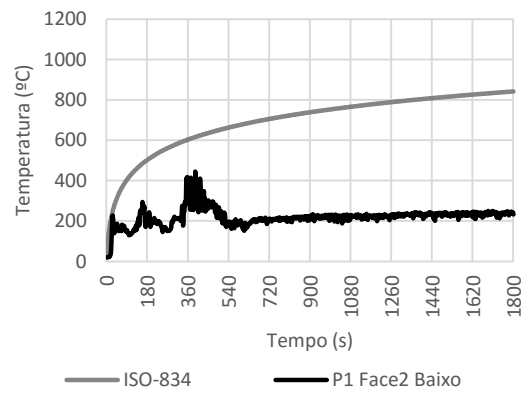


Figura A.7 Registo do dispositivo P1 Face2 Baixo

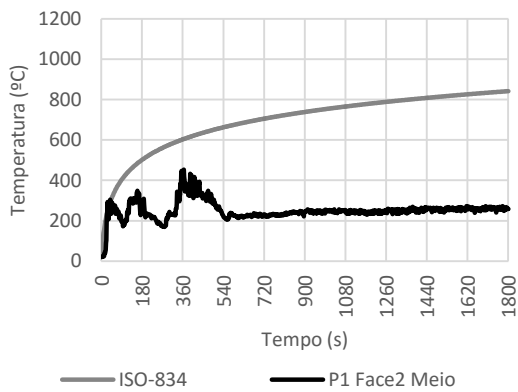


Figura A.6 Registo do dispositivo P1 Face2 Meio

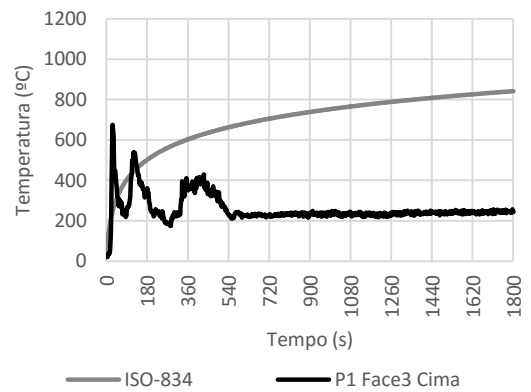


Figura A.8 Registo do dispositivo P1 Face3 Cima

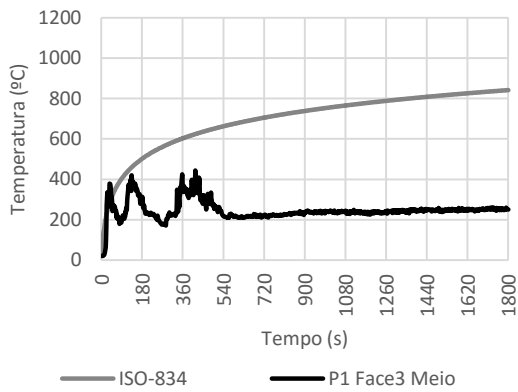


Figura A.9 Registo do dispositivo P1 Face3 Meio

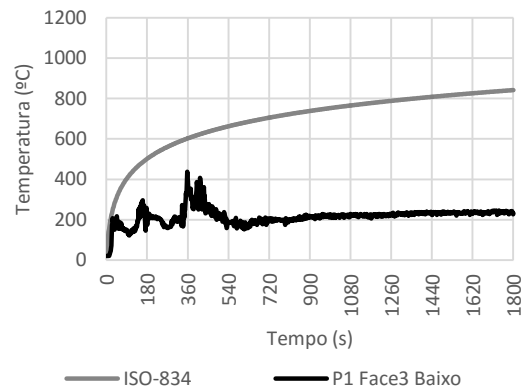


Figura A.10 Registo do dispositivo P1 Face3 Baixo

Temperaturas aplicadas no ABAQUS

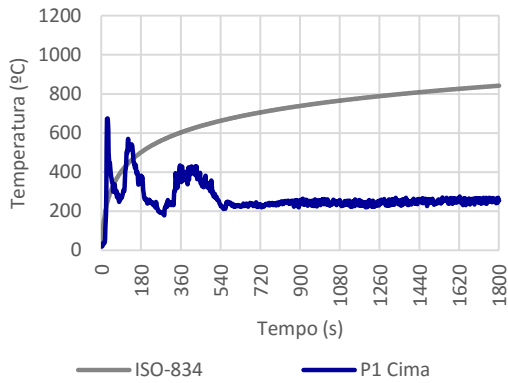


Figura A.11 Temperaturas para a superfície P1 Cima

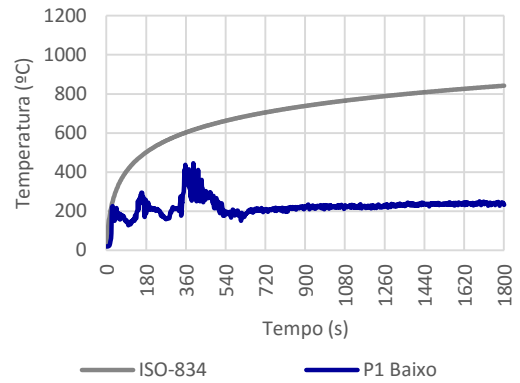


Figura A.13 Temperaturas para a superfície P1 Baixo

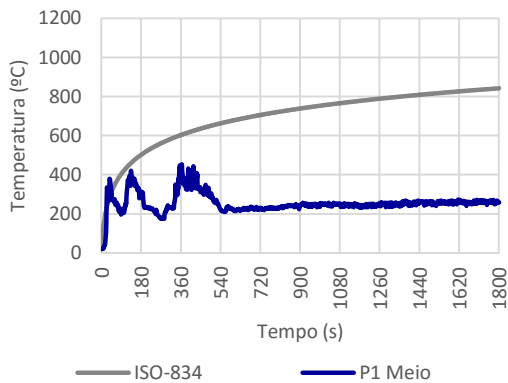


Figura A.12 Temperaturas para a superfície P1 Meio

A.2. Pilar P2

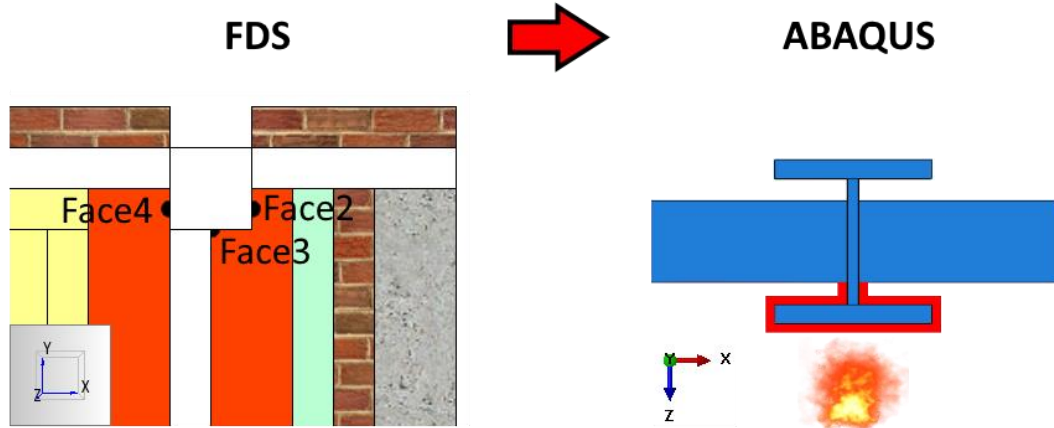


Figura A.14 Pilar P2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

Temperaturas obtidas por CFD

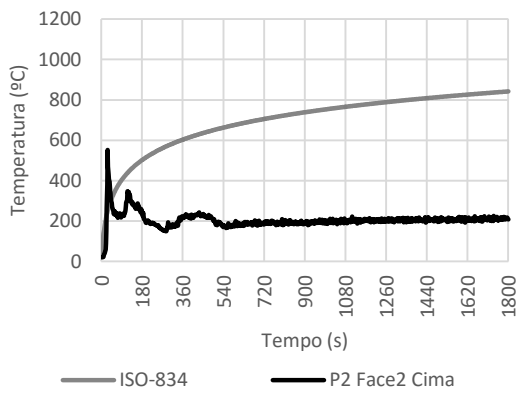


Figura A.15 Registo do dispositivo P2 Face2 Cima

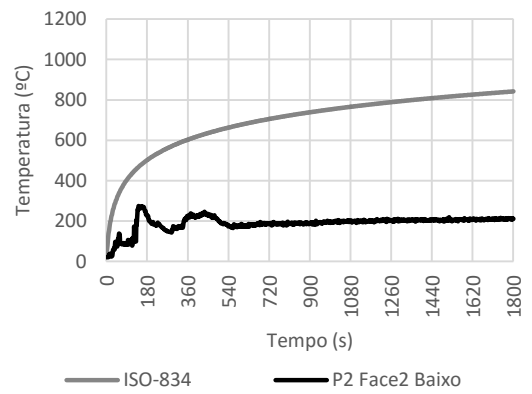


Figura A.17 Registo do dispositivo P2 Face2 Baixo

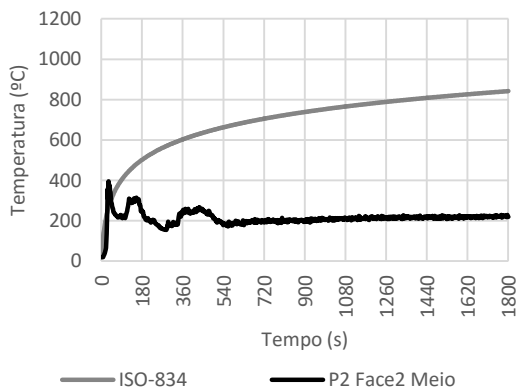


Figura A.16 Registo do dispositivo P2 Face2 Meio

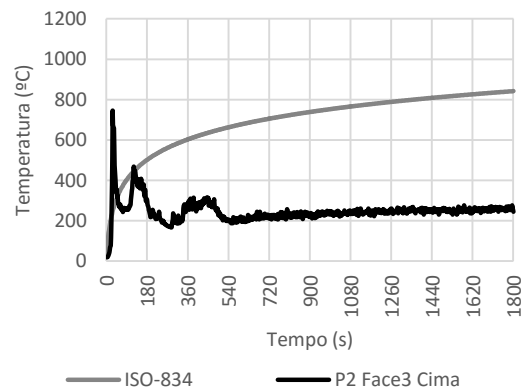


Figura A.18 Registo do dispositivo P2 Face3 Cima

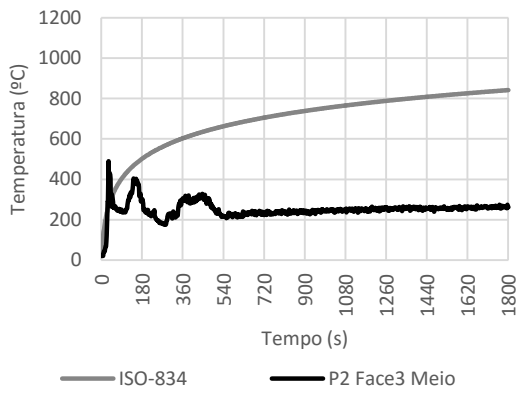


Figura A.19 Registo do dispositivo P2 Face3 Meio

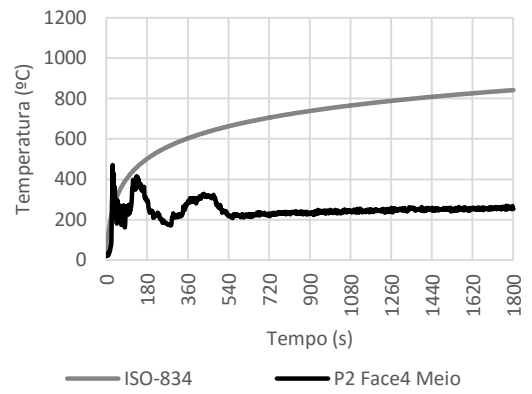


Figura A.22 Registo do dispositivo P2 Face4 Meio

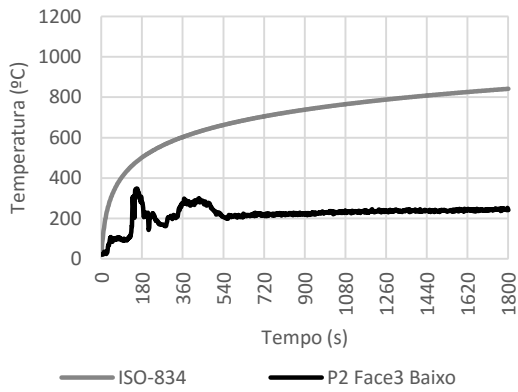


Figura A.20 Registo do dispositivo P2 Face3 Baixo

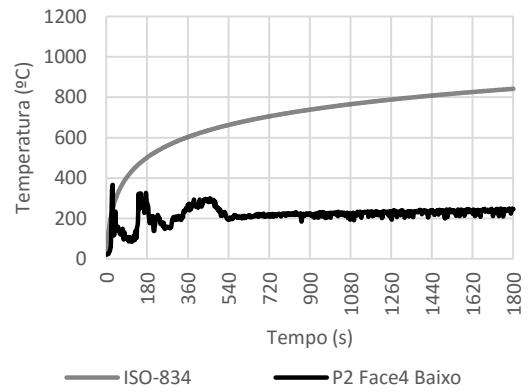


Figura A.23 Registo do dispositivo P2 Face4 Baixo

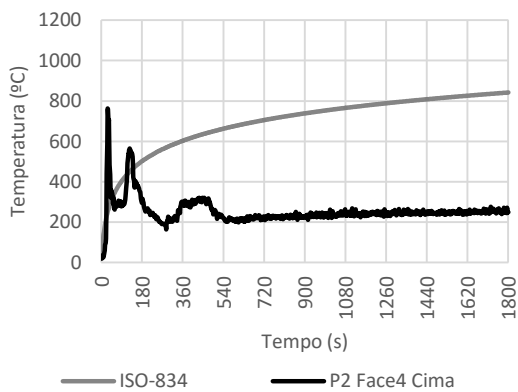


Figura A.21 Registo do dispositivo P2 Face4 Cima

Temperaturas aplicadas no ABAQUS

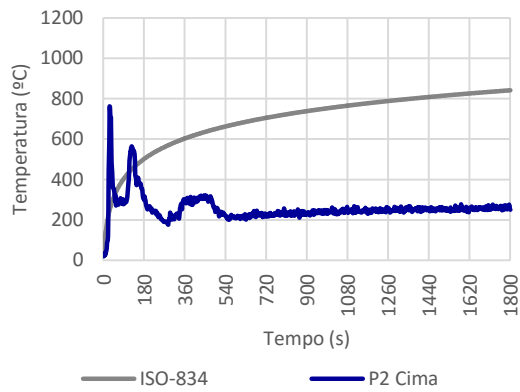


Figura A.24 Temperaturas para a superfície P2 Cima

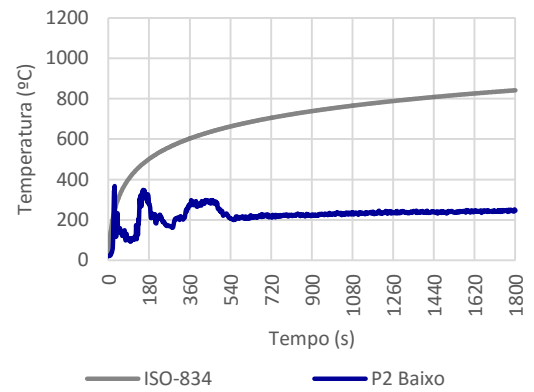


Figura A.26 Temperaturas para a superfície P2 Baixo

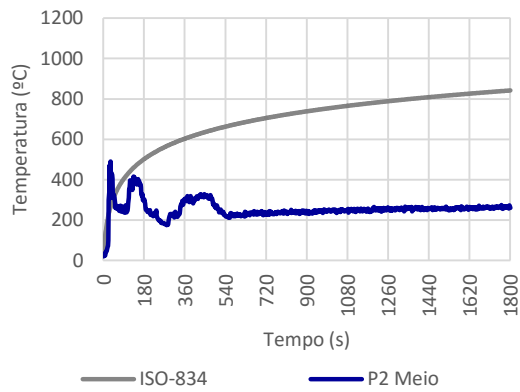


Figura A.25 Temperaturas para a superfície P2 Meio

A.3. Pilar P6

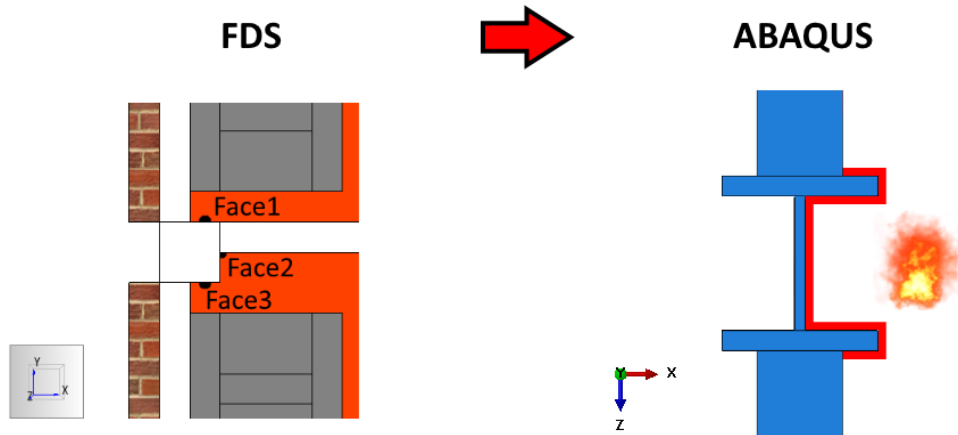


Figura A.27 Pilar P6: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

Temperaturas obtidas por CFD

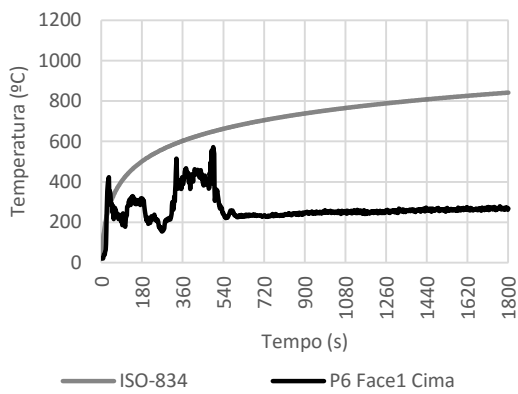


Figura A.28 Registo do dispositivo P6 Face1 Cima

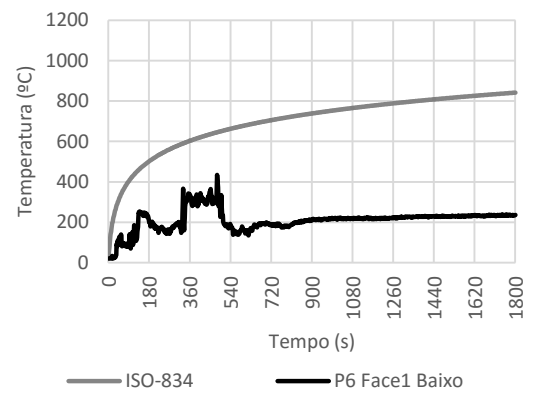


Figura A.30 Registo do dispositivo P6 Face1 Baixo

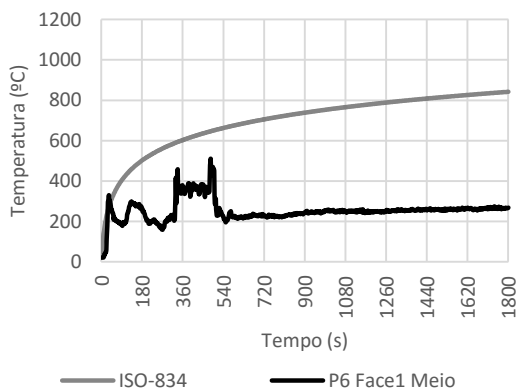


Figura A.29 Registo do dispositivo P6 Face1 Meio

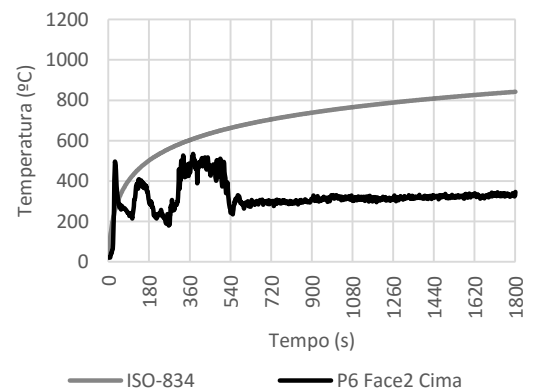


Figura A.31 Registo do dispositivo P6 Face2 Cima

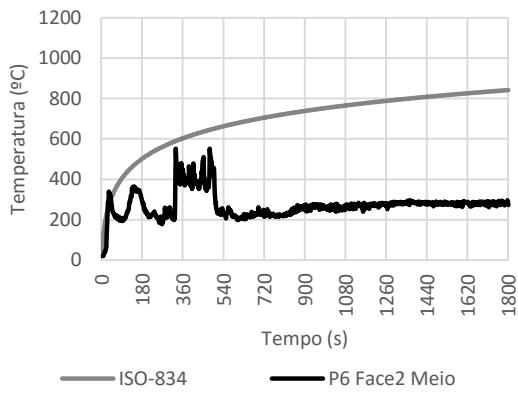


Figura A.32 Registo do dispositivo P6 Face2 Meio

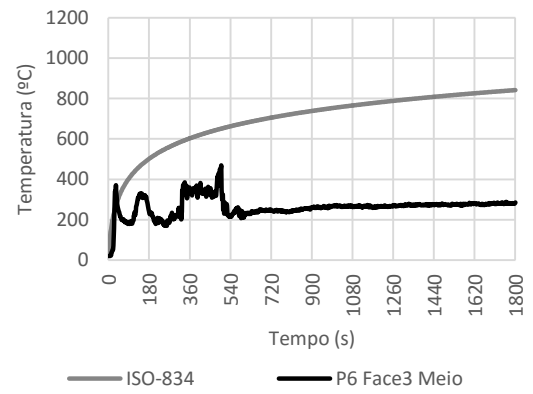


Figura A.35 Registo do dispositivo P6 Face3 Meio

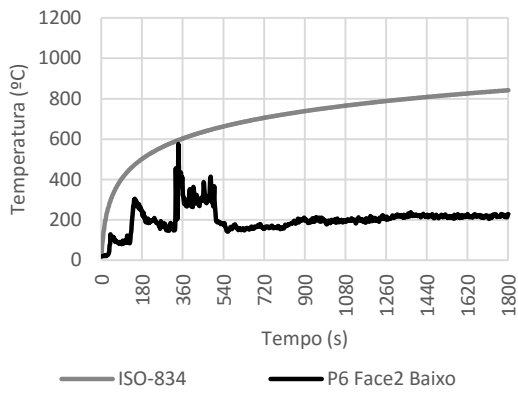


Figura A.33 Registo do dispositivo P6 Face2 Baixo

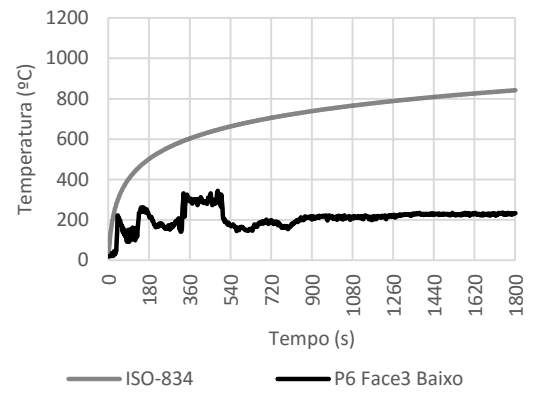


Figura A.36 Registo do dispositivo P6 Face3 Baixo

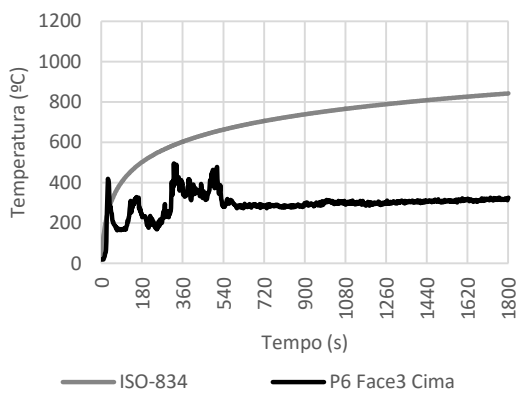


Figura A.34 Registo do dispositivo P6 Face3 Cima

Temperaturas aplicadas no ABAQUS

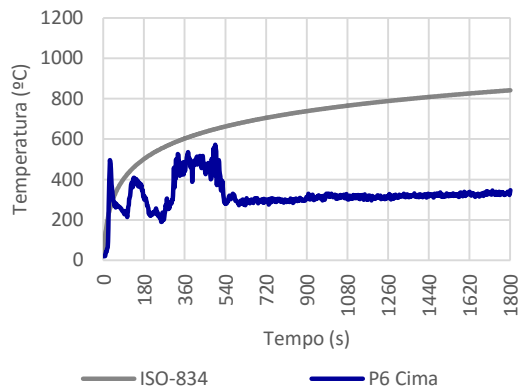


Figura A.37 Temperaturas para a superfície P6 Cima

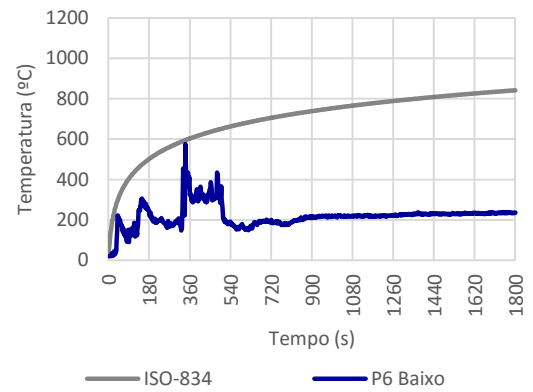


Figura A.39 Temperaturas para a superfície P6 Baixo

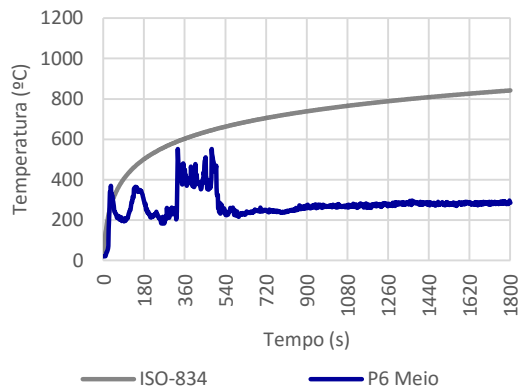


Figura A.38 Temperaturas para a superfície P6 Meio

A.4. Pilar P7

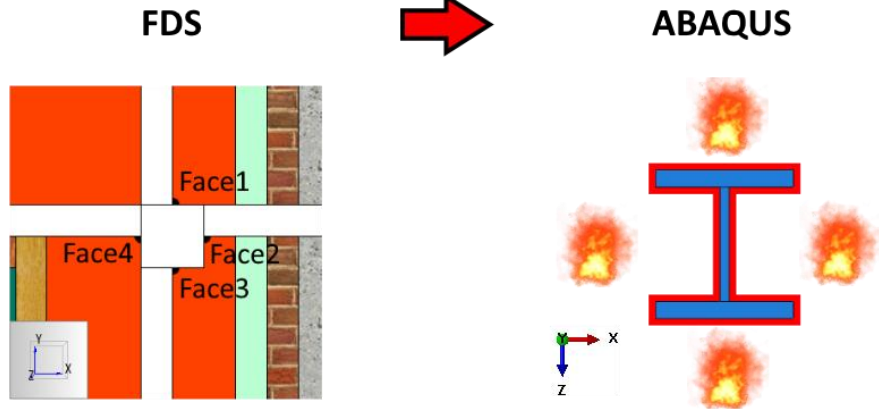


Figura A.40 Pilar P7: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

Temperaturas obtidas por CFD

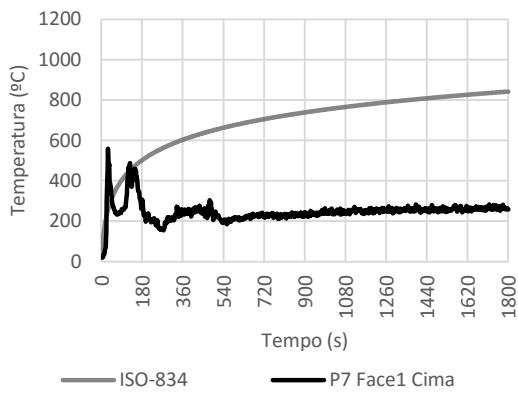


Figura A.41 Registo do dispositivo P7 Face1 Cima

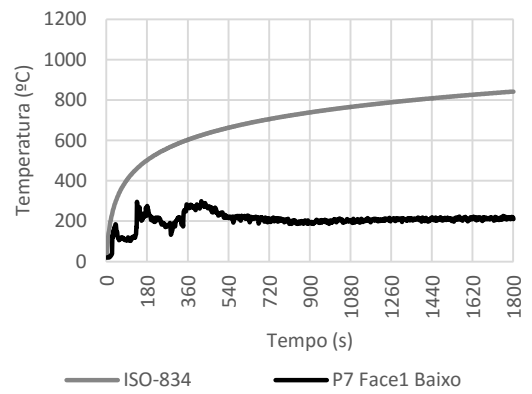


Figura A.43 Registo do dispositivo P7 Face1 Baixo

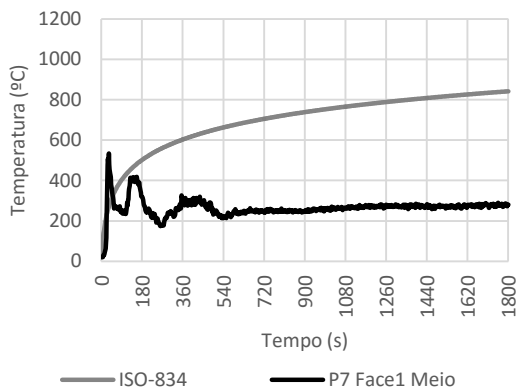


Figura A.42 Registo do dispositivo P7 Face1 Meio

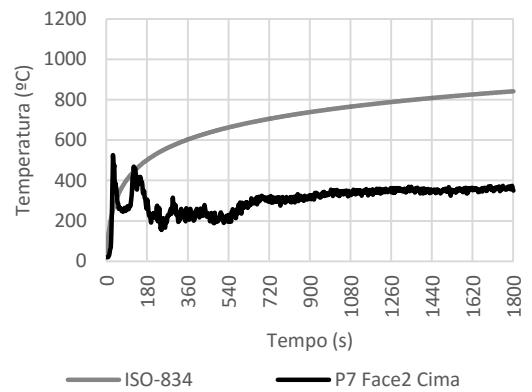


Figura A.44 Registo do dispositivo P7 Face2 Cima

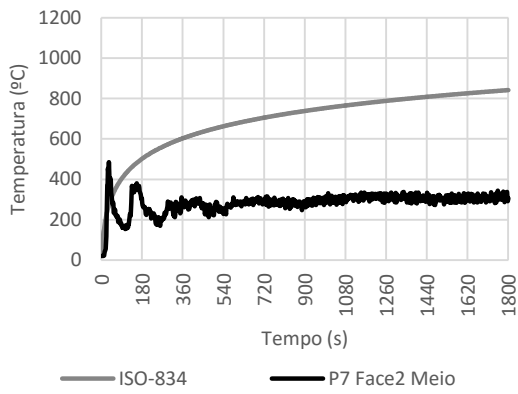


Figura A.45 Registo do dispositivo P7 Face2 Meio

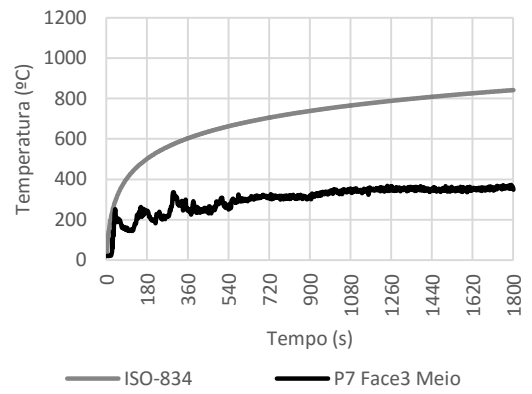


Figura A.48 Registo do dispositivo P7 Face3 Meio

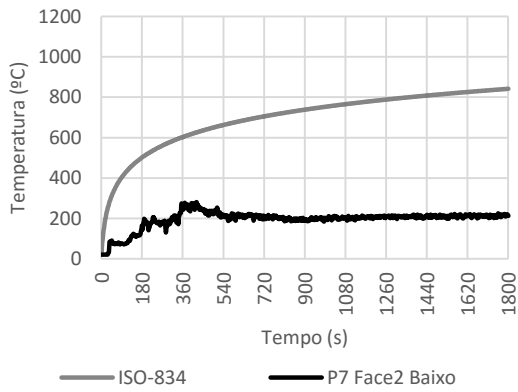


Figura A.46 Registo do dispositivo P7 Face2 Baixo

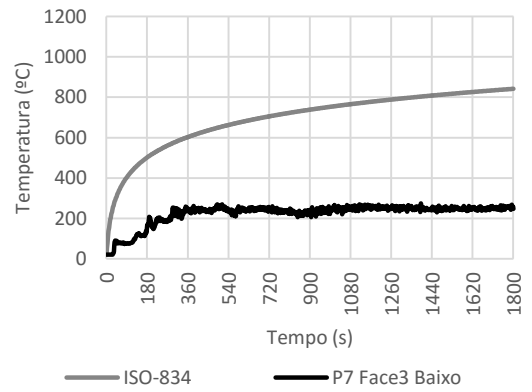


Figura A.49 Registo do dispositivo P7 Face3 Baixo

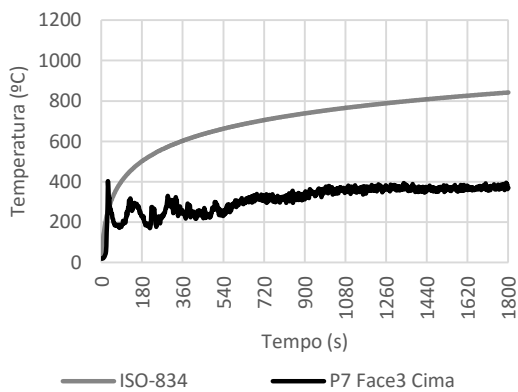


Figura A.47 Registo do dispositivo P7 Face3 Cima

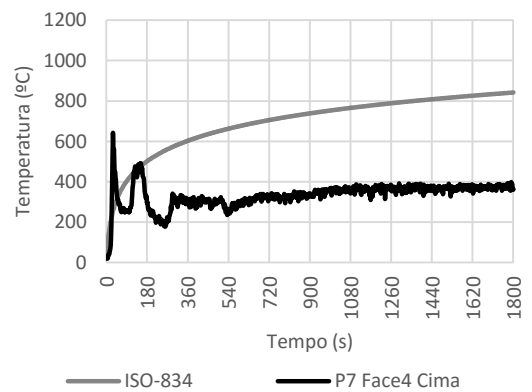


Figura A.50 Registo do dispositivo P7 Face4 Cima

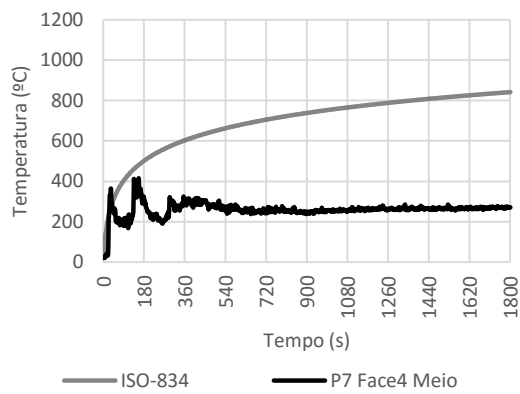


Figura A.51 Registo do dispositivo P7 Face4 Meio

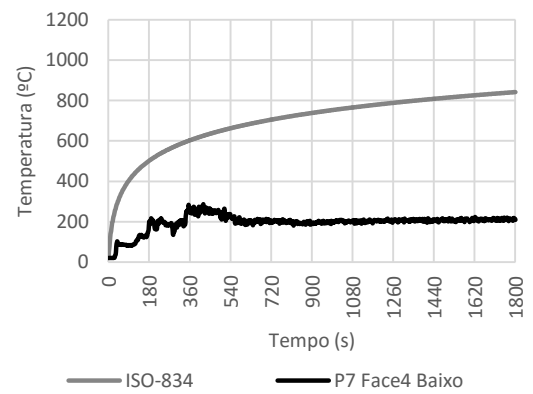


Figura A.52 Registo do dispositivo P7 Face4 Baixo

Temperaturas aplicadas no ABAQUS

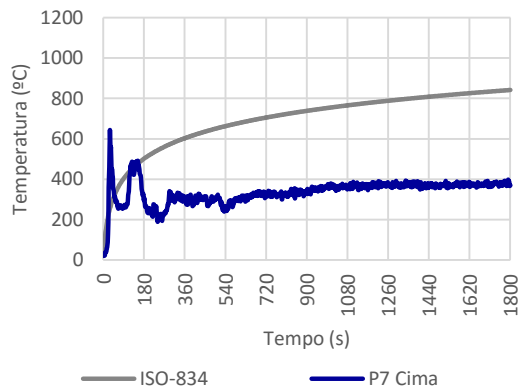


Figura A.53 Temperaturas para a superfície P7 Cima

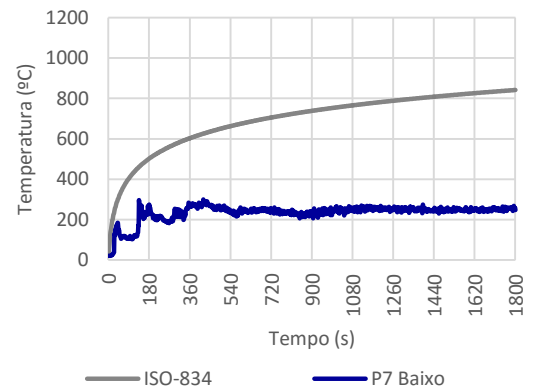


Figura A.55 Temperaturas para a superfície P7 Baixo

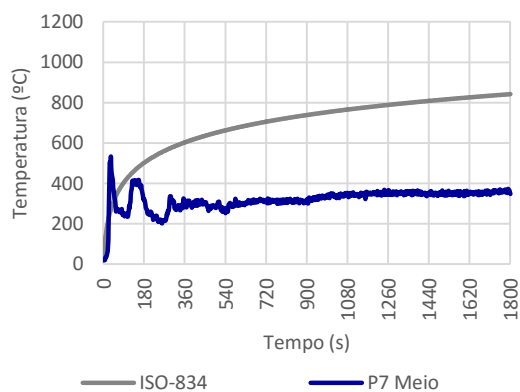


Figura A.54 Temperaturas para a superfície P7 Meio

A.5. Pilar P11

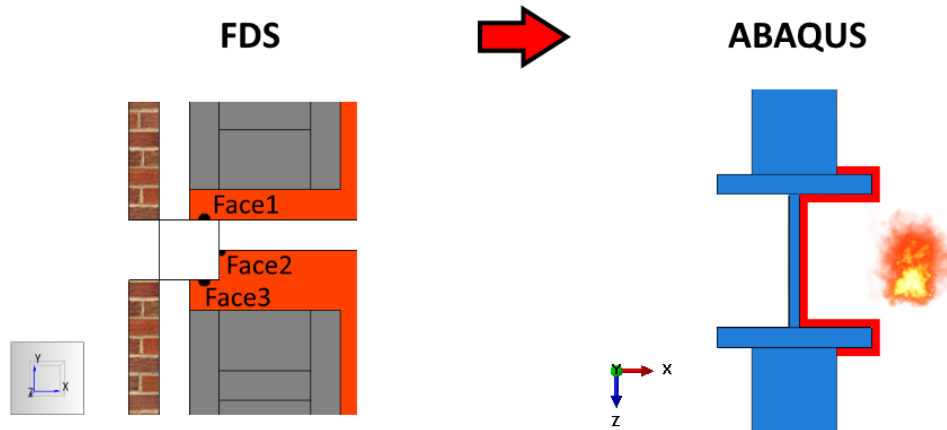


Figura A.56 Pilar P11: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

Temperaturas obtidas por CFD

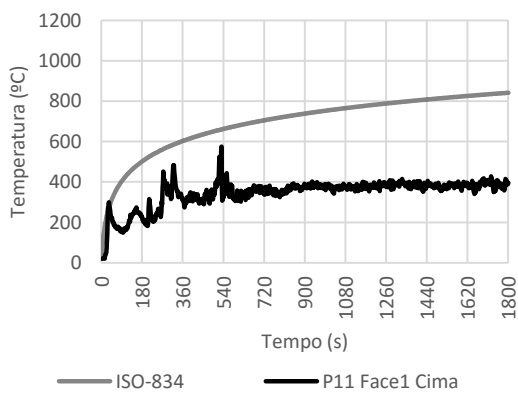


Figura A.57 Registo do dispositivo P11 Face1 Cima

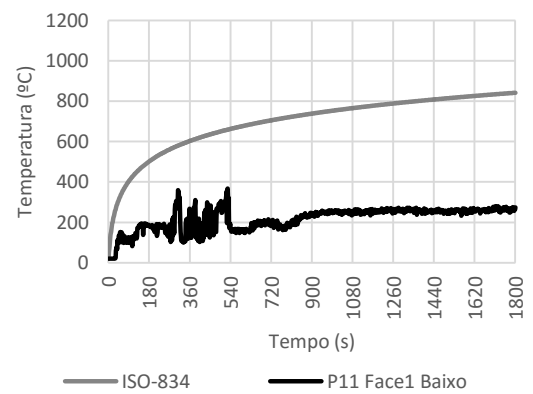


Figura A.59 Registo do dispositivo P11 Face1 Baixo

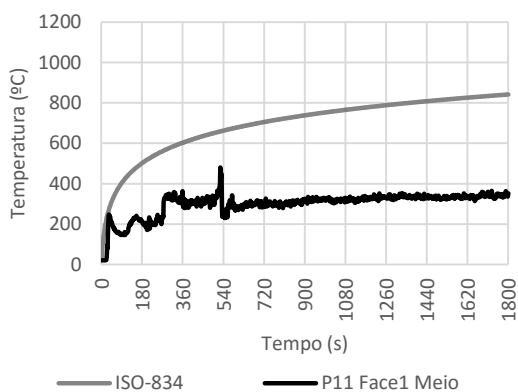


Figura A.58 Registo do dispositivo P11 Face1 Meio

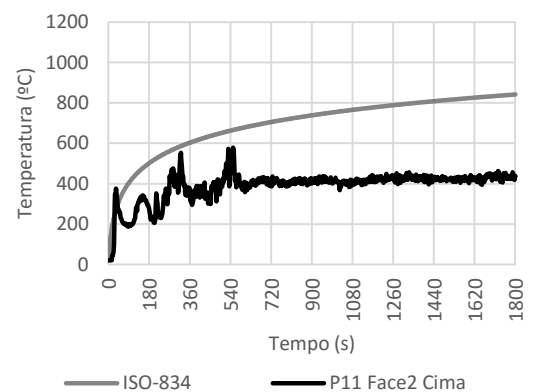


Figura A.60 Registo do dispositivo P11 Face2 Cima

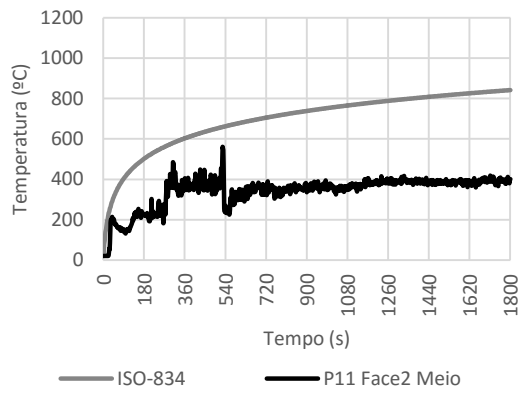


Figura A.61 Registo do dispositivo P11 Face2 Meio

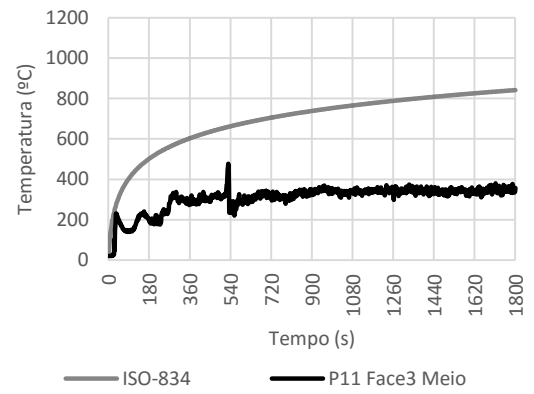


Figura A.64 Registo do dispositivo P11 Face3 Meio

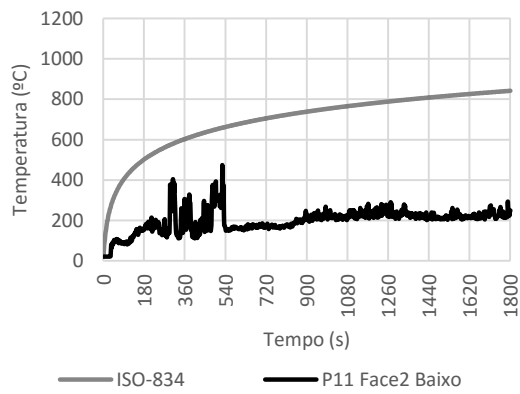


Figura A.62 Registo do dispositivo P11 Face2 Baixo

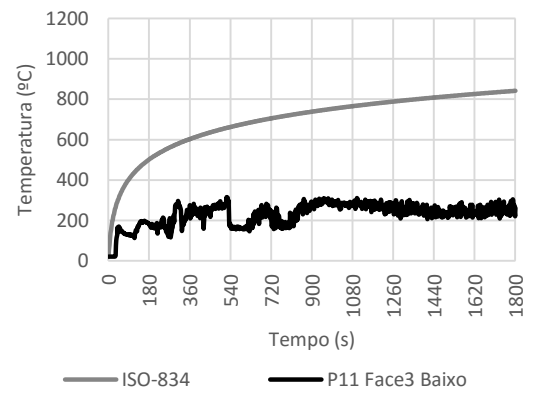


Figura A.65 Registo do dispositivo P11 Face3 Baixo

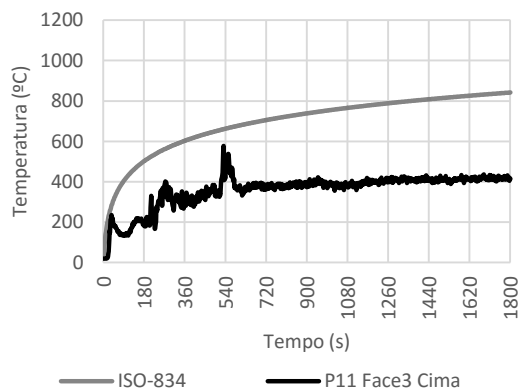


Figura A.63 Registo do dispositivo P11 Face3 Cima

Temperaturas aplicadas no ABAQUS

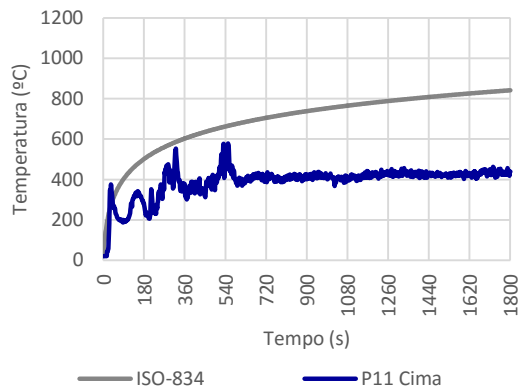


Figura A.66 Temperaturas para a superfície P11 Cima

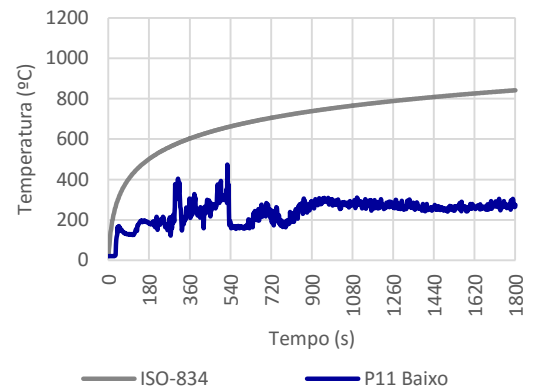


Figura A.68 Temperaturas para a superfície P11 Baixo

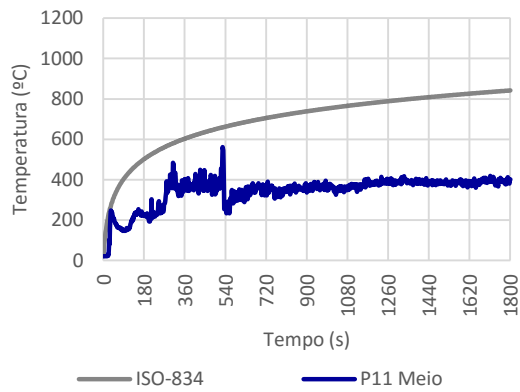


Figura A.67 Temperaturas para a superfície P11 Meio

A.6. Pilar P12

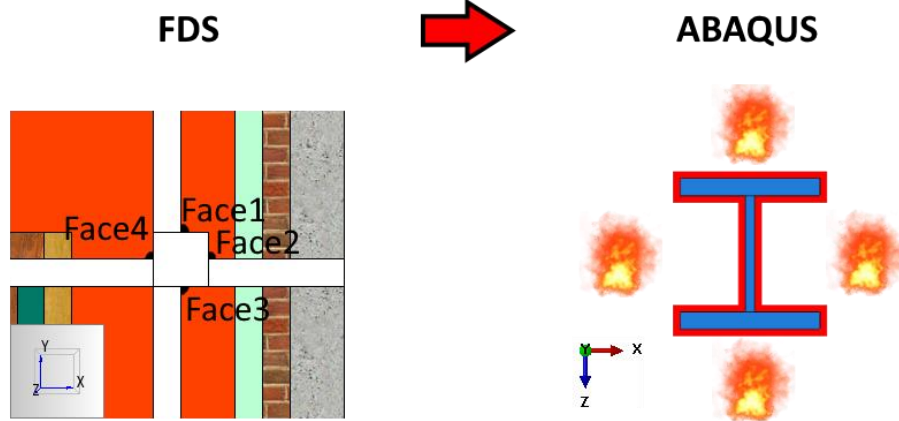


Figura A.69 Pilar P12: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

Temperaturas obtidas por CFD

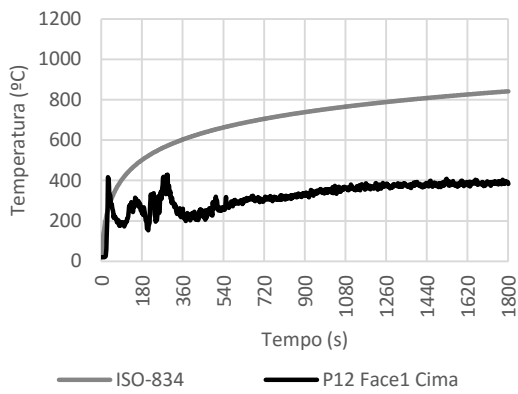


Figura A.70 Registo do dispositivo P12 Face1 Cima

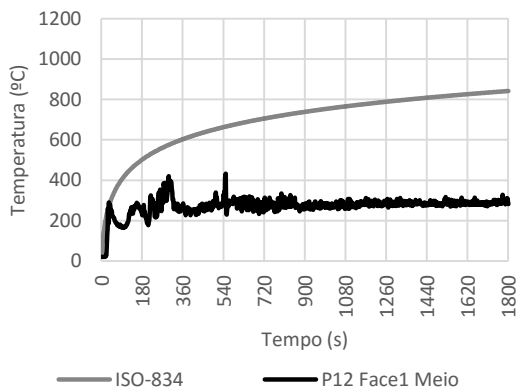


Figura A.71 Registo do dispositivo P12 Face1 Meio

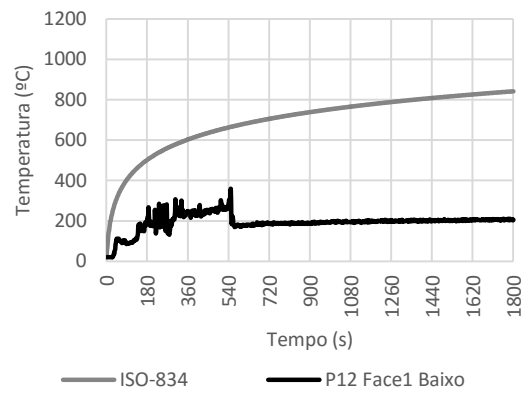


Figura A.72 Registo do dispositivo P12 Face1 Baixo

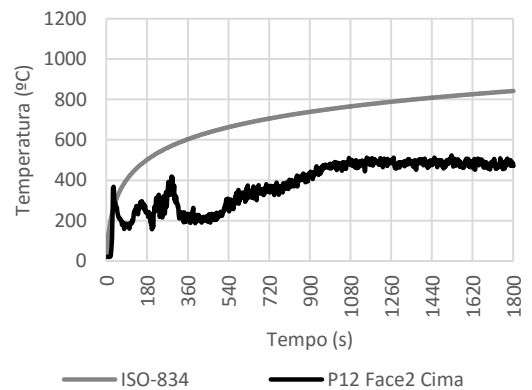


Figura A.73 Registo do dispositivo P12 Face2 Cima

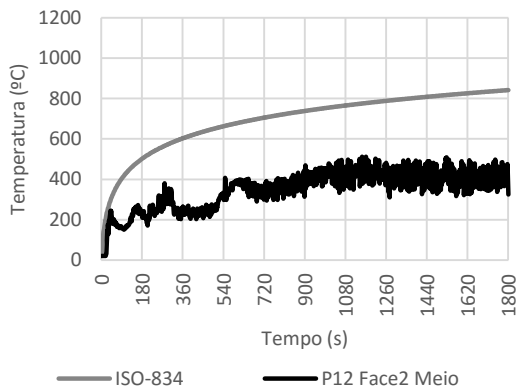


Figura A.74 Registo do dispositivo P12 Face2 Meio

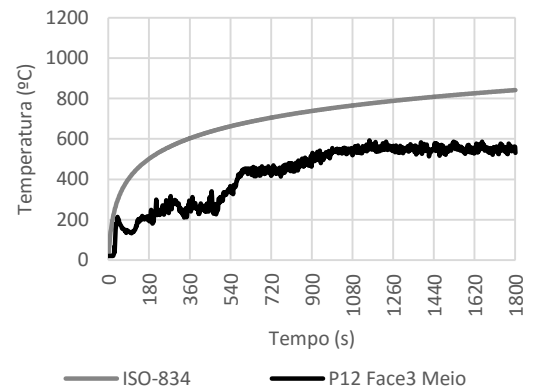


Figura A.77 Registo do dispositivo P12 Face3 Meio

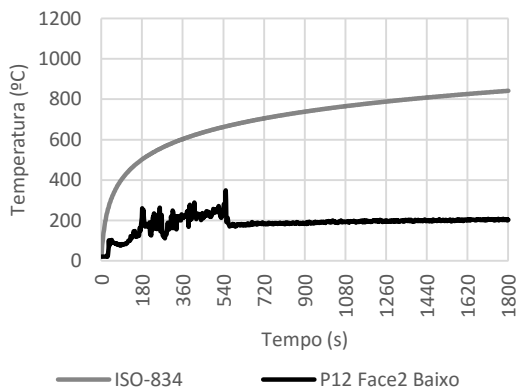


Figura A.75 Registo do dispositivo P12 Face2 Baixo

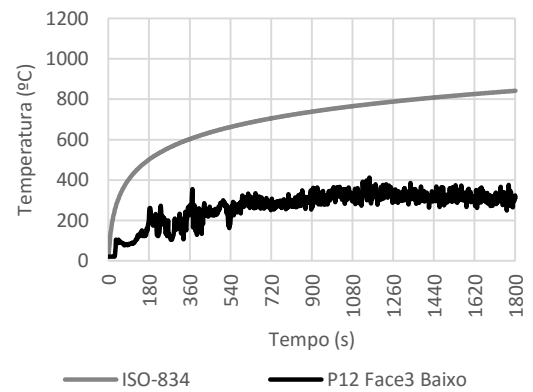


Figura A.78 Registo do dispositivo P12 Face3 Baixo

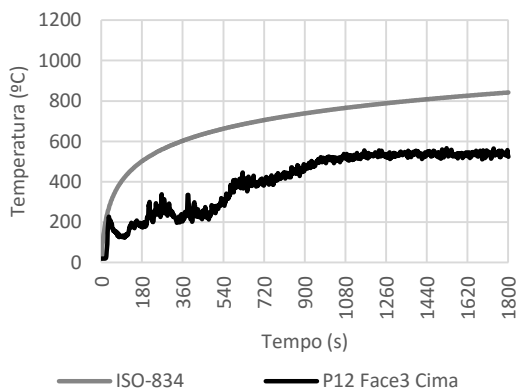


Figura A.76 Registo do dispositivo P12 Face3 Cima

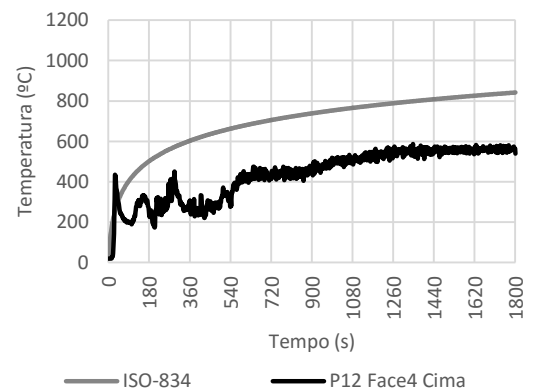


Figura A.79 Registo do dispositivo P12 Face4 Cima

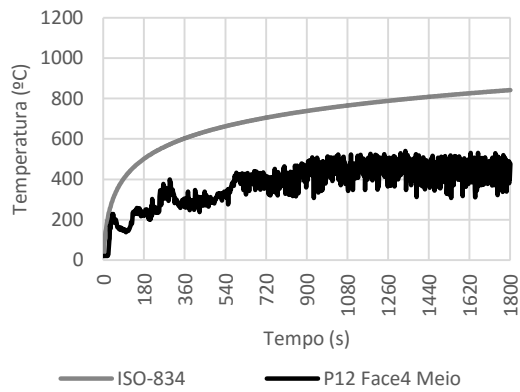


Figura A.80 Registo do dispositivo P12 Face4 Meio

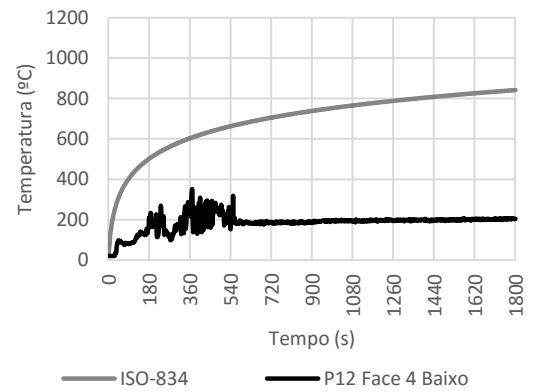


Figura A.81 Registo do dispositivo P12 Face4 Baixo

Temperaturas aplicadas no ABAQUS

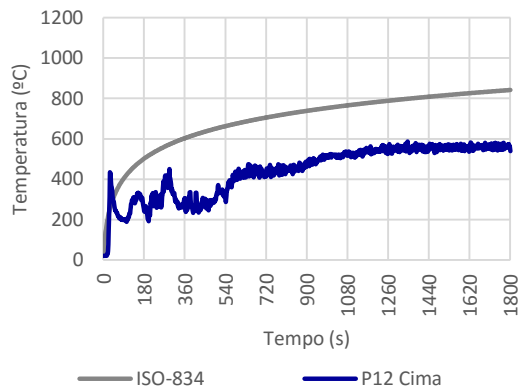


Figura A.82 Temperaturas para a superfície P12 Cima

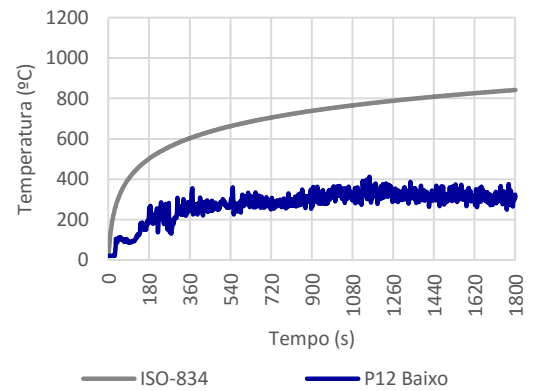


Figura A.84 Temperaturas para a superfície P12 Baixo

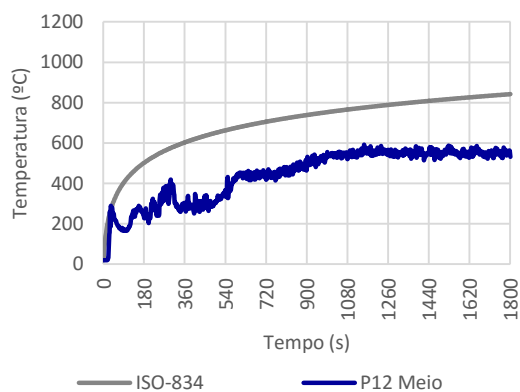


Figura A.83 Temperaturas para a superfície P12 Meio

A.7. Pilar P20

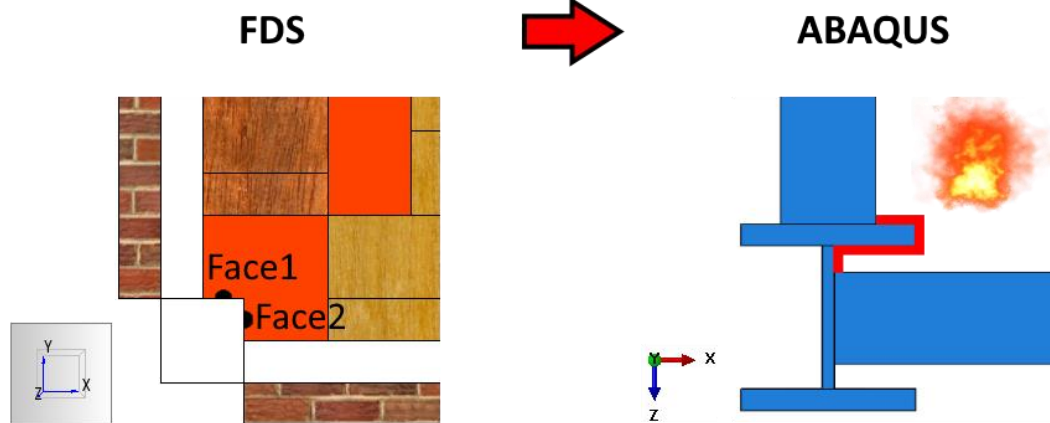


Figura A. 85 Pilar P20: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

Temperaturas obtidas por CFD

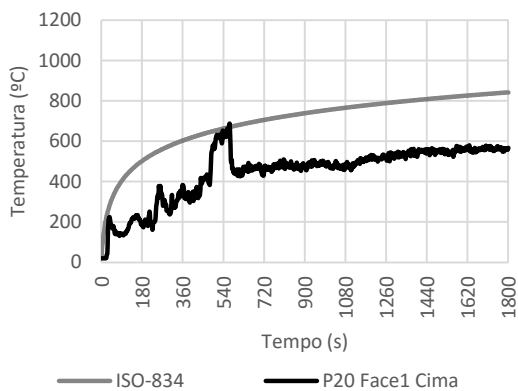


Figura A.86 Registo do dispositivo P20 Face1 Cima

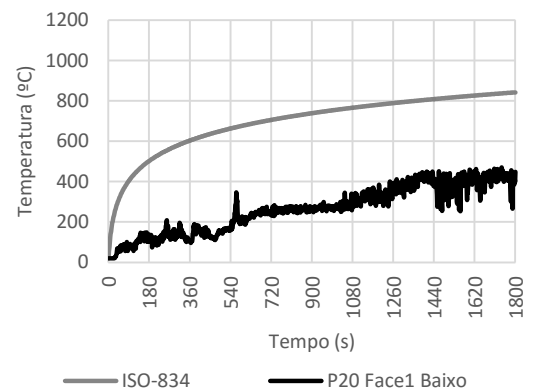


Figura A.88 Registo do dispositivo P20 Face1 Baixo

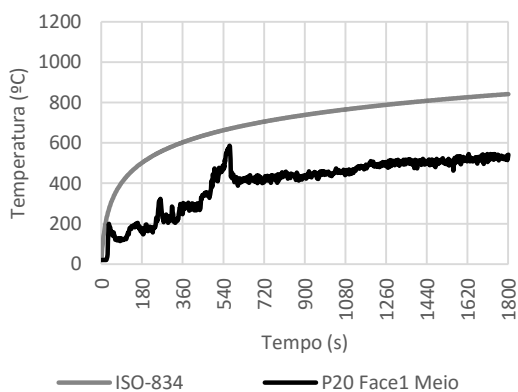


Figura A.87 Registo do dispositivo P20 Face1 Meio

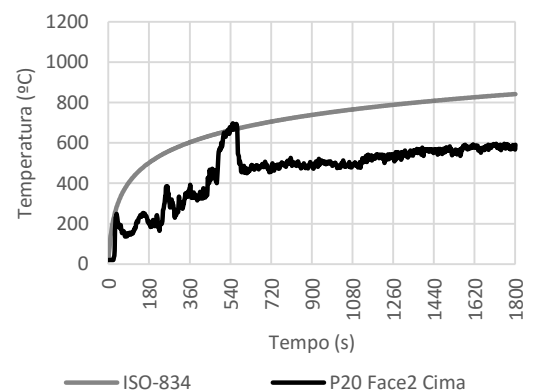


Figura A.89 Registo do dispositivo P20 Face2 Cima

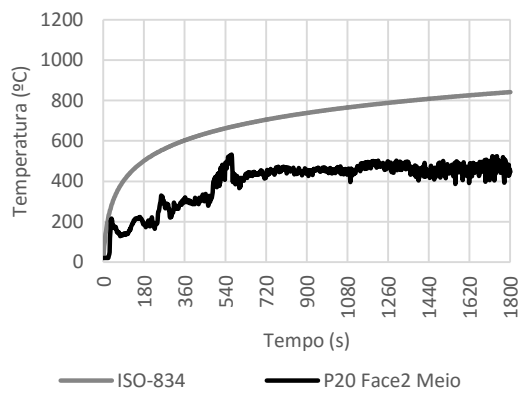


Figura A.90 Registo do dispositivo P20 Face2 Meio

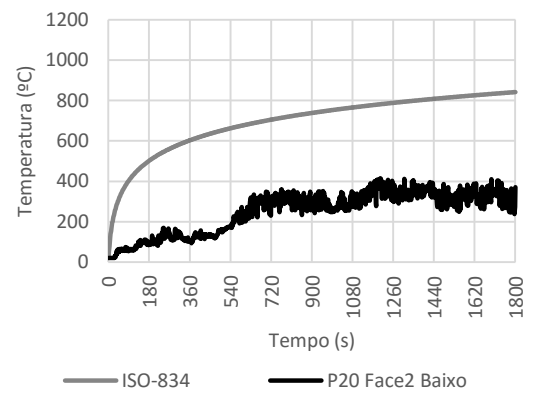


Figura A.91 Registo do dispositivo P20 Face2 Baixo

Temperaturas aplicadas no ABAQUS

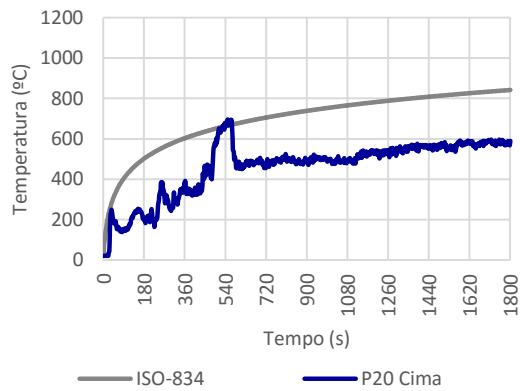


Figura A.92 Temperaturas para a superfície P20 Cima

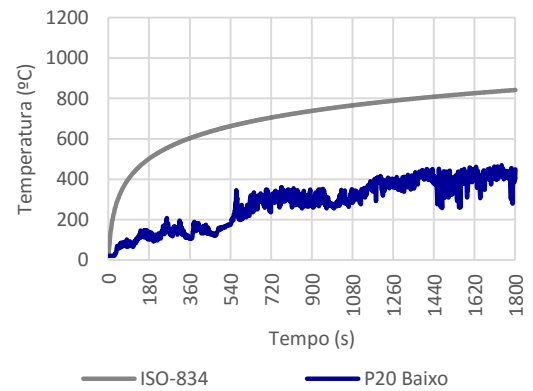


Figura A.94 Temperaturas para a superfície P20 Baixo

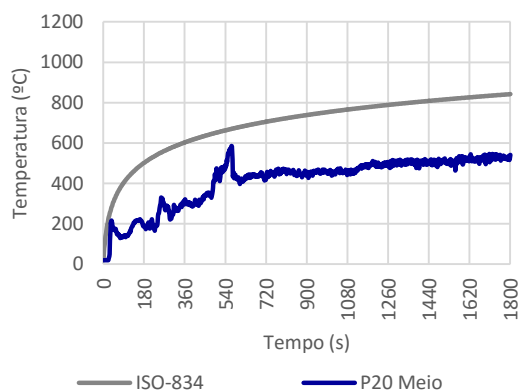


Figura A.93 Temperaturas para a superfície P20 Meio

A.8. Pilar P21

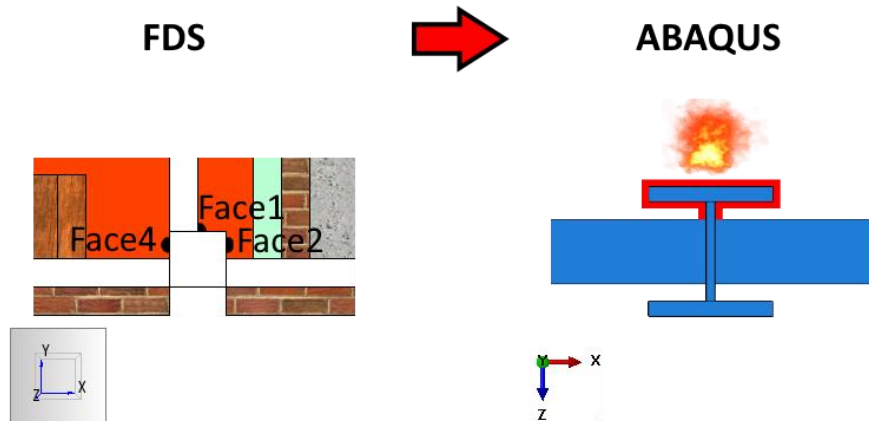


Figura A.95 Pilar P21: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

Temperaturas obtidas por CFD

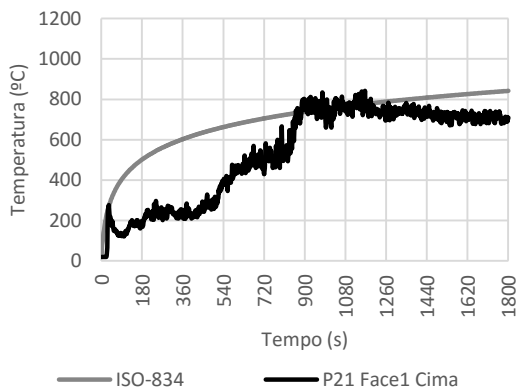


Figura A.96 Registo do dispositivo P21 Face1 Cima

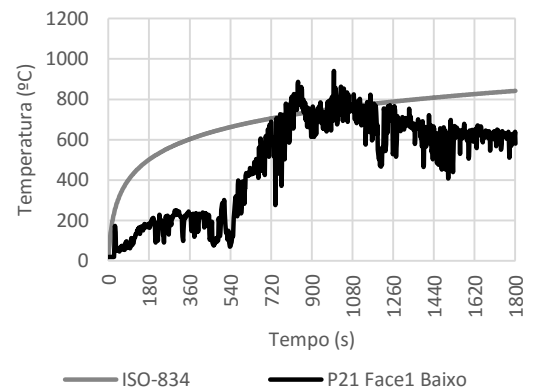


Figura A.98 Registo do dispositivo P21 Face1 Baixo

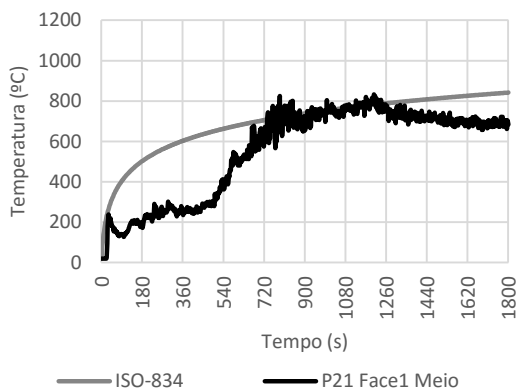


Figura A.97 Registo do dispositivo P21 Face1 Meio

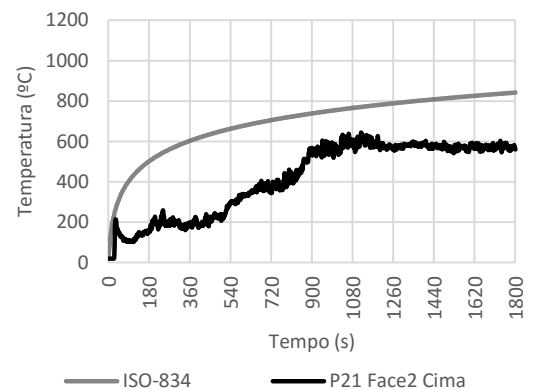


Figura A.99 Registo do dispositivo P21 Face2 Cima

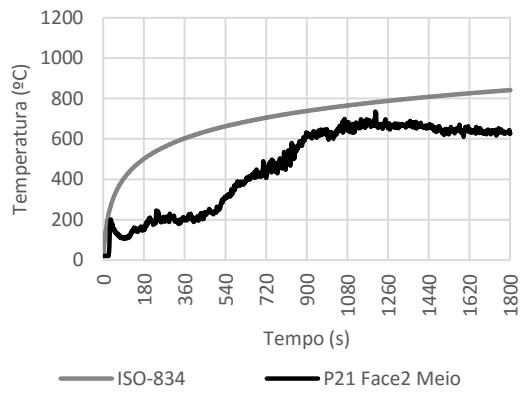


Figura A.100 Registo do dispositivo P21 Face2 Meio

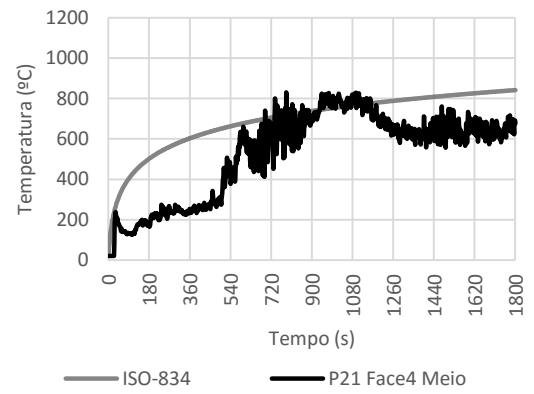


Figura A.103 Registo do dispositivo P21 Face4 Meio

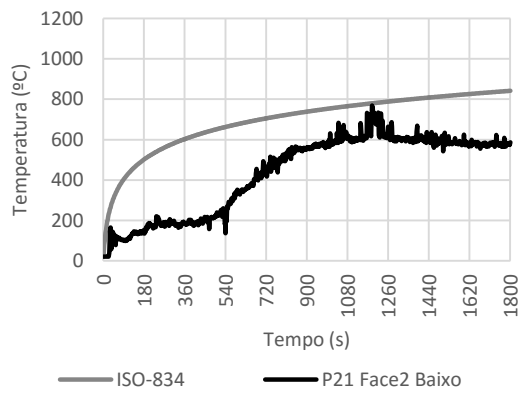


Figura A.101 Registo do dispositivo P21 Face2 Baixo

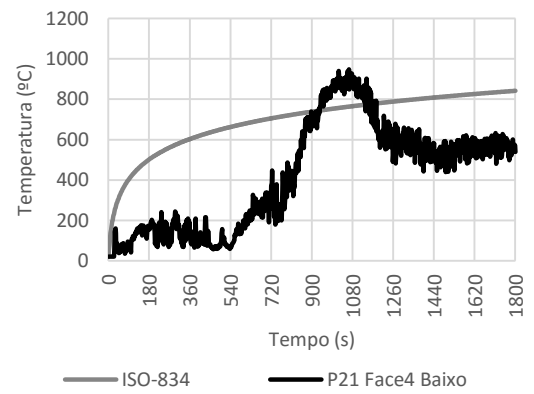


Figura A.104 Registo do dispositivo P21 Face4 Baixo

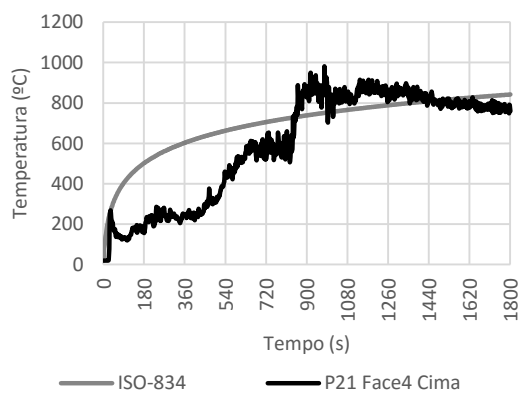


Figura A.102 Registo do dispositivo P21 Face4 Cima

Temperaturas aplicadas no ABAQUS

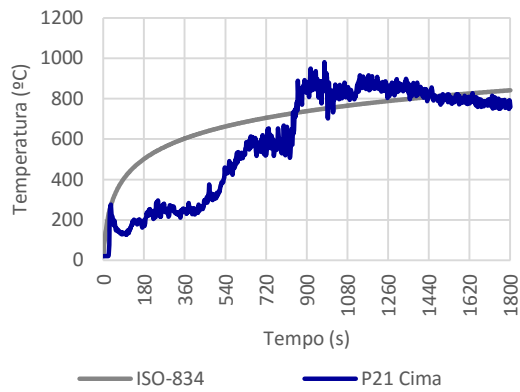


Figura A.105 Temperaturas para a superfície P21 Cima

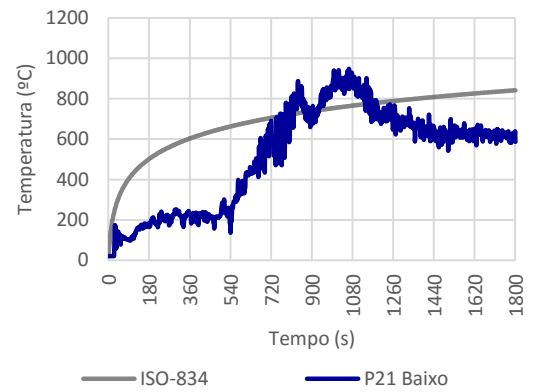


Figura A.107 Temperaturas para a superfície P21 Baixo

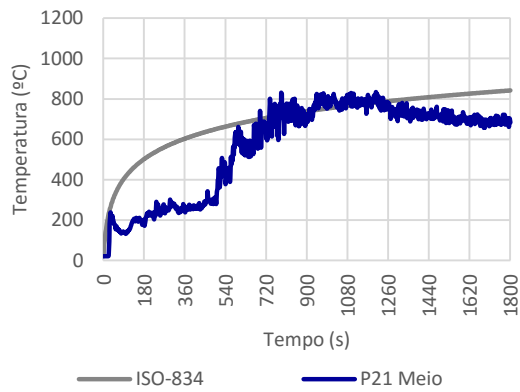


Figura A.106 Temperaturas para a superfície P21 Meio

ANEXO B. TEMPERATURAS NAS VIGAS

Colocaram-se, nas vigas do modelo do FDS, dispositivos de medição de temperatura nas zonas expostas ao incêndio no interior do compartimento. Foram aplicados nos planos indicados na Figura B.1, relativos ao referencial considerado no modelo.

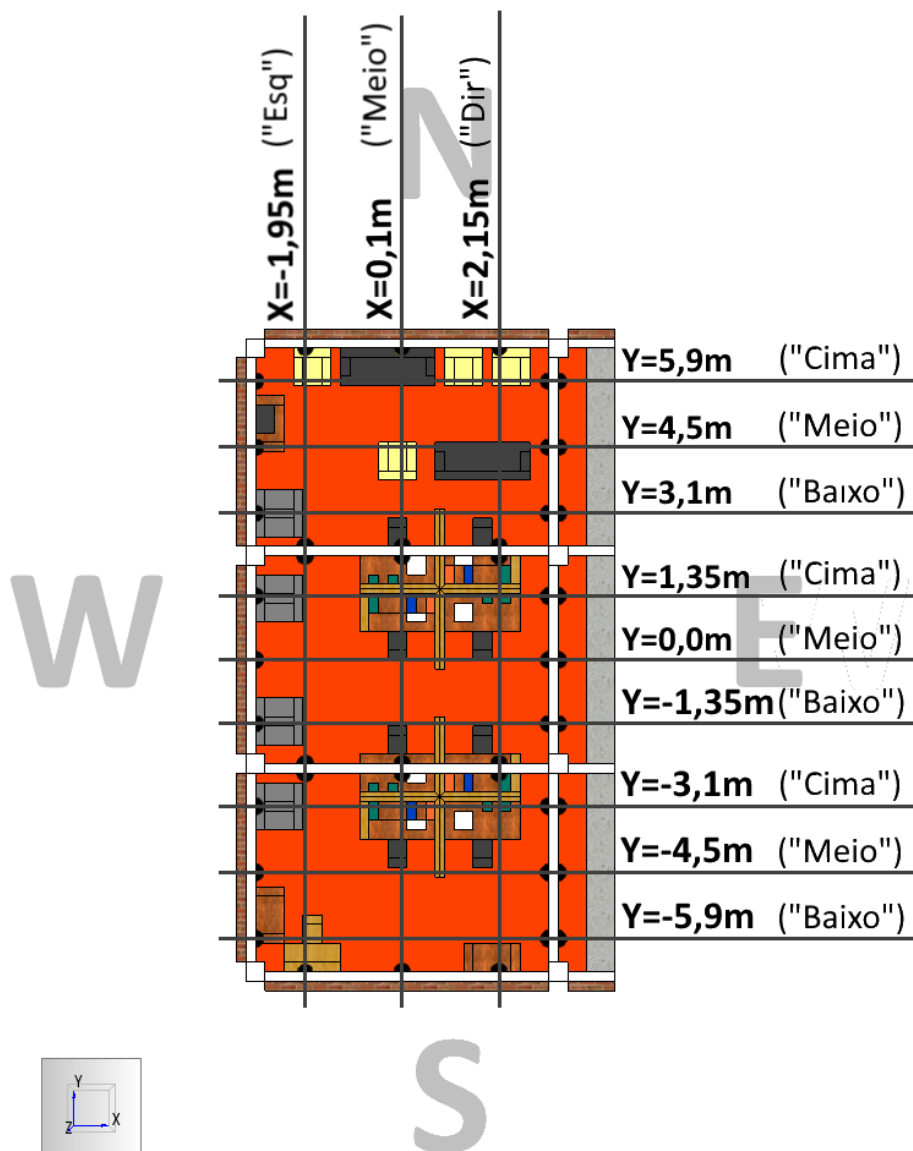


Figura B.1 Posicionamento, em planta, dos dispositivos nas vigas

Para uma simulação eficaz com o código FDS, foi necessário adequar a geometria das vigas à malha utilizada no modelo (células cúbicas com 0,20 m de lado). Considerou-se uma secção quadrada de (0,20 x 0,40) m², com dispositivos aplicados nas faces expostas ao incêndio, segundo os planos apresentados. Para identificar as faces em que se aplicaram os dispositivos, arbitrou-se a convenção da Figura B.2a para as vigas na direção x, e a da Figura B.2b para as vigas segundo y.



Figura B.2 Faces de aplicação dos dispositivos de medição nas vigas

Com a simulação, o software de CFD determinou uma curva T-t para cada ponto de medição. Verificou-se que, para uma determinada viga, as diferenças entre as temperaturas de pontos de diferentes faces no mesmo plano de corte vertical não eram relevantes. Contudo, de plano para plano, na mesma viga, registaram-se maiores disparidades entre as várias curvas T-t. Optou-se assim por aplicar apenas três curvas a cada viga do modelo estrutural desenvolvido no ABAQUS, uma em cada terço do seu comprimento, nas superfícies que estariam expostas ao fogo no interior do compartimento. Em cada zona da viga, a curva atribuída tinha como ordenadas os valores máximos das curvas dos dispositivos das diferentes faces. A Figura B.3 representa a aplicação deste raciocínio a uma viga de exemplo VX.

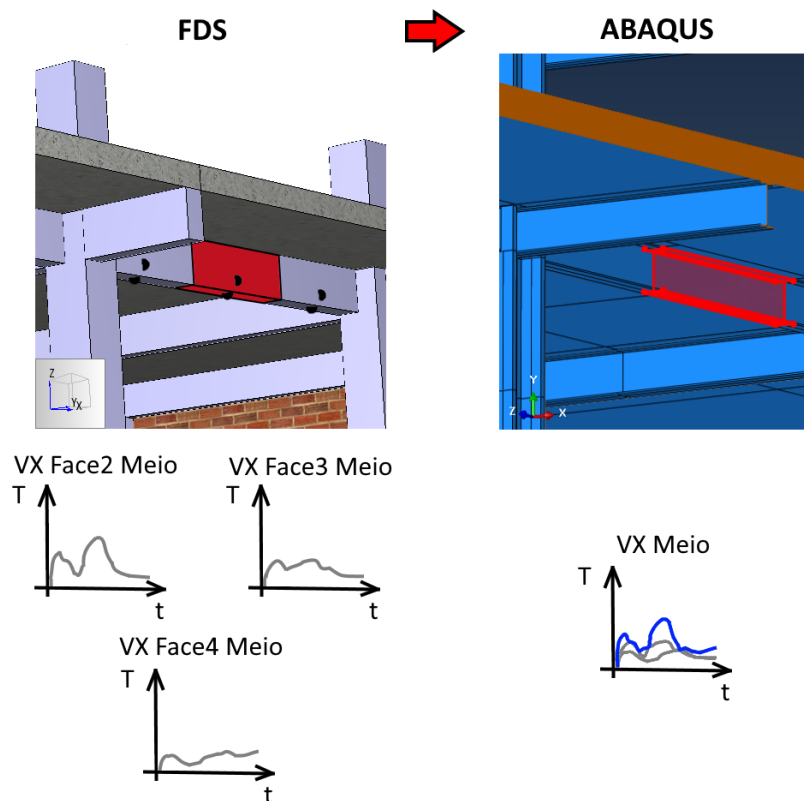


Figura B.3 Metodologia para a determinação das curvas a atribuir às vigas

B.1. Viga V1-2

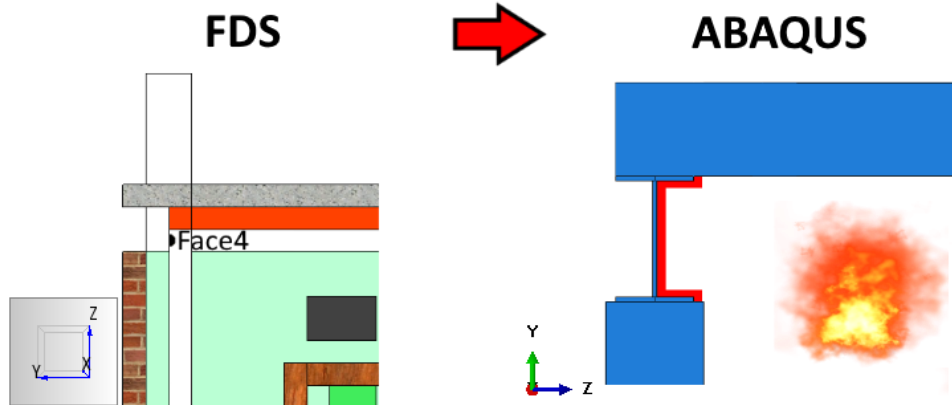


Figura B.4 Viga V1-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

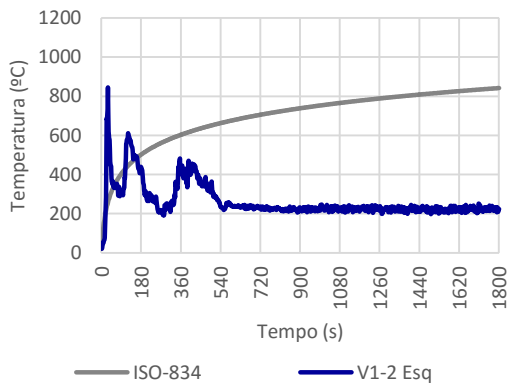


Figura B.5 Temperaturas para a superfície V1-2 Esq (disp. V1-2 Face4 Esq)

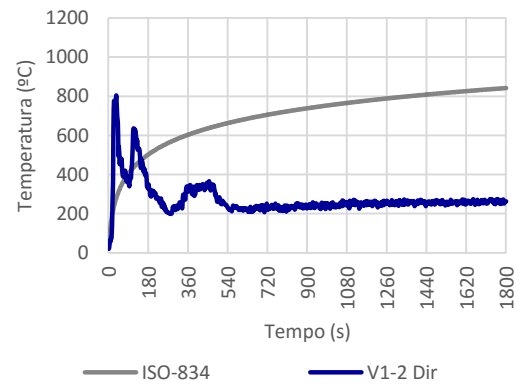


Figura B.7 Temperaturas para a superfície V1-2 Dir (disp. V1-2 Face4 Dir)

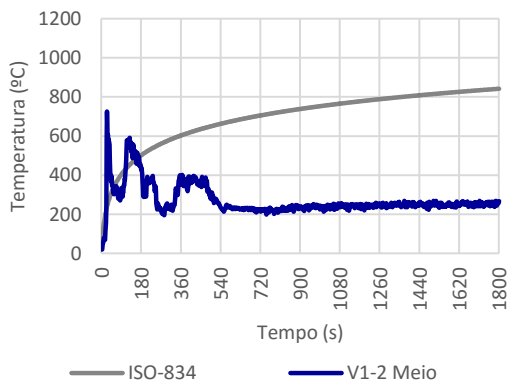


Figura B.6 Temperaturas para a superfície V1-2 Meio (disp. V1-2 Face4 Meio)

B.2. Viga V5-2

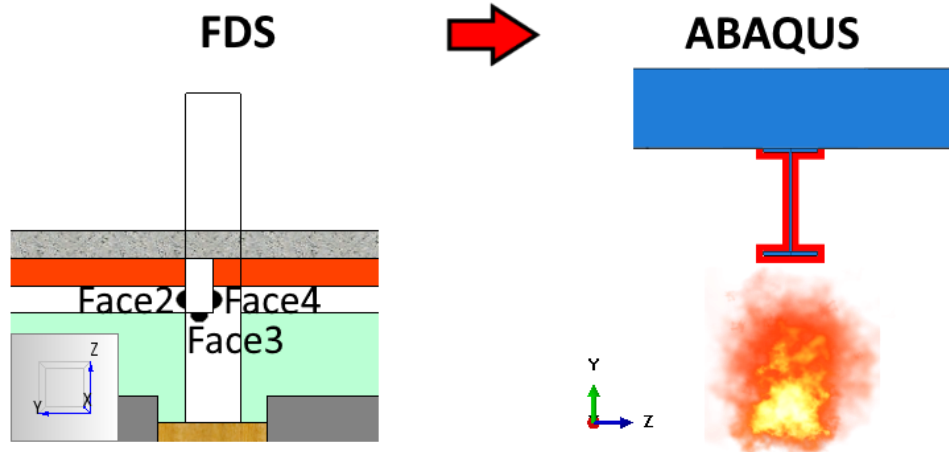


Figura B.8 Viga V5-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

Temperaturas obtidas por CFD

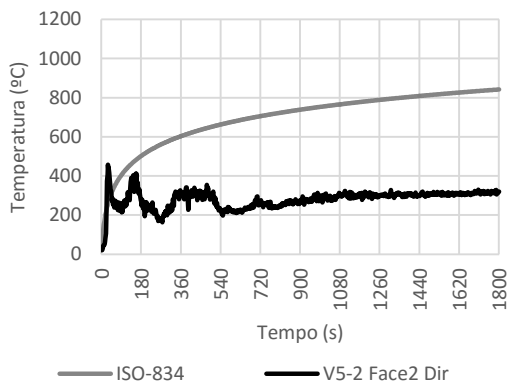


Figura B.9 Registo do dispositivo V5-2 Face2 Dir

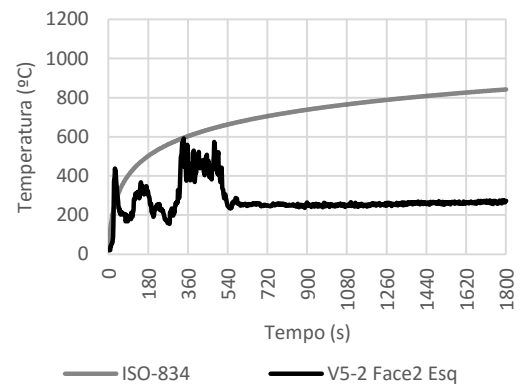


Figura B.11 Registo do dispositivo V5-2 Face2 Esq

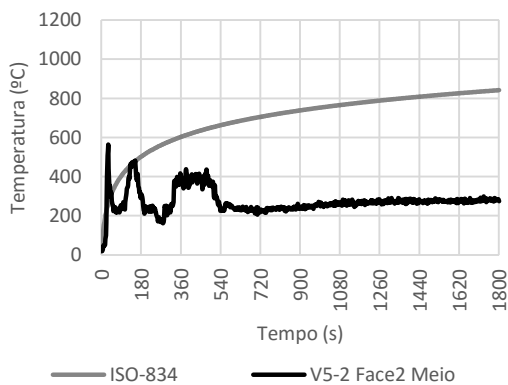


Figura B.10 Registo do dispositivo V5-2 Face2 Meio

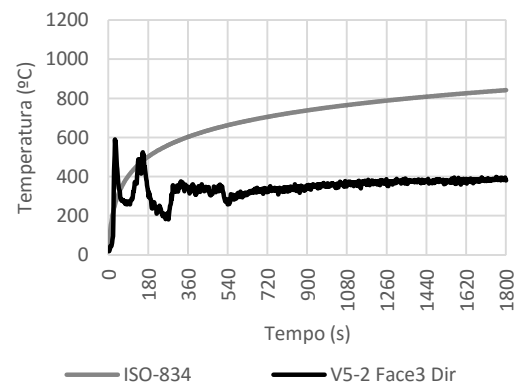


Figura B.12 Registo do dispositivo V5-2 Face3 Dir

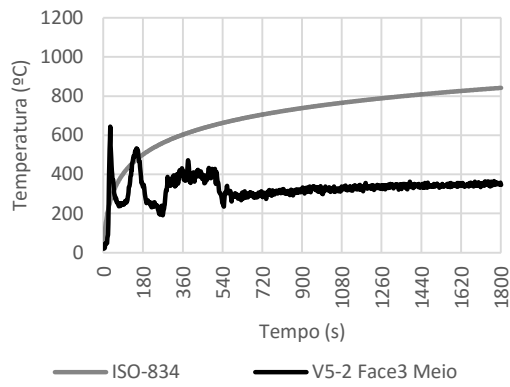


Figura B.13 Registo do dispositivo V5-2 Face3 Meio

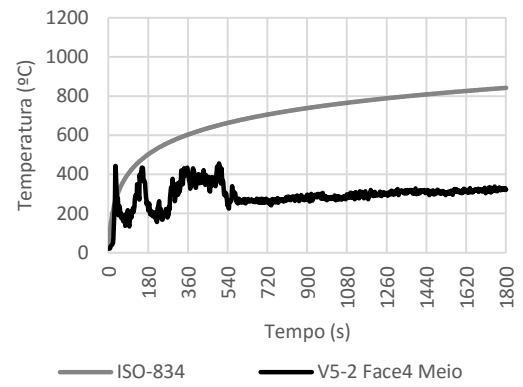


Figura B.16 Registo do dispositivo V5-2 Face4 Meio

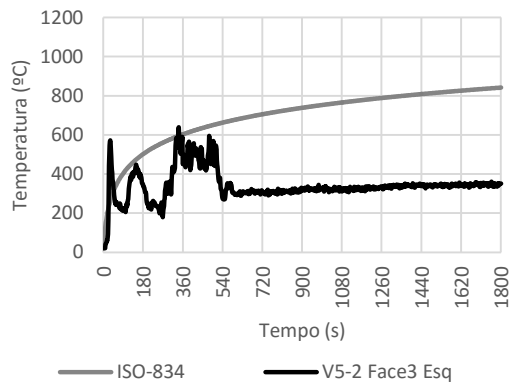


Figura B.14 Registo do dispositivo V5-2 Face3 Esq

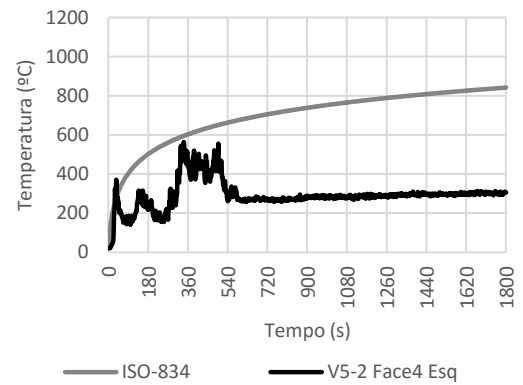


Figura B.17 Registo do dispositivo V5-2 Face4 Esq

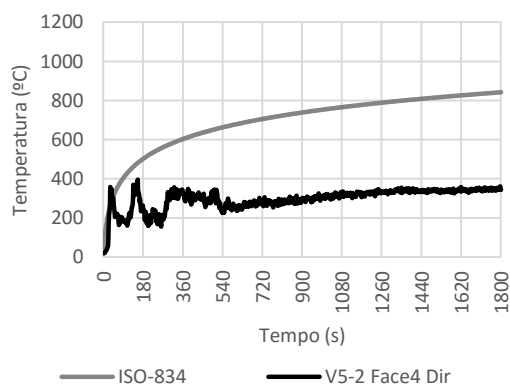


Figura B.15 Registo do dispositivo V5-2 Face4 Dir

Temperaturas aplicadas no ABAQUS

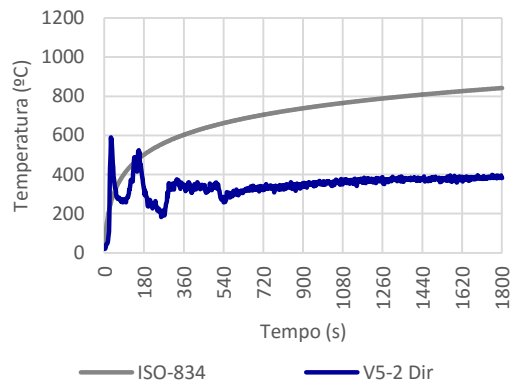


Figura B.18 Temperaturas para a superfície V5-2 Dir

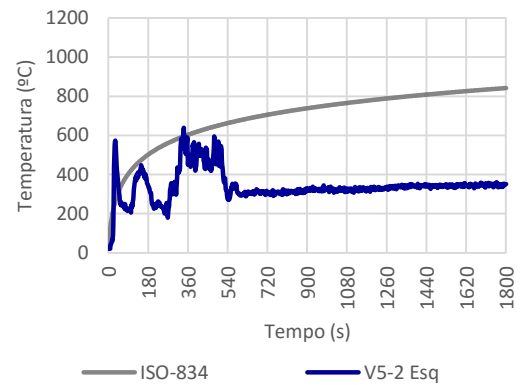


Figura B.20 Temperaturas para a superfície V5-2 Esq

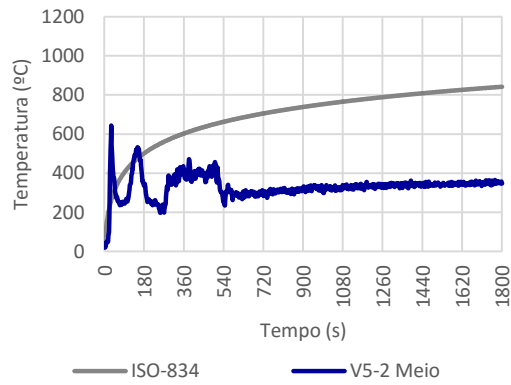


Figura B.19 Temperaturas para a superfície V5-2 Meio

B.3. Viga V9-2

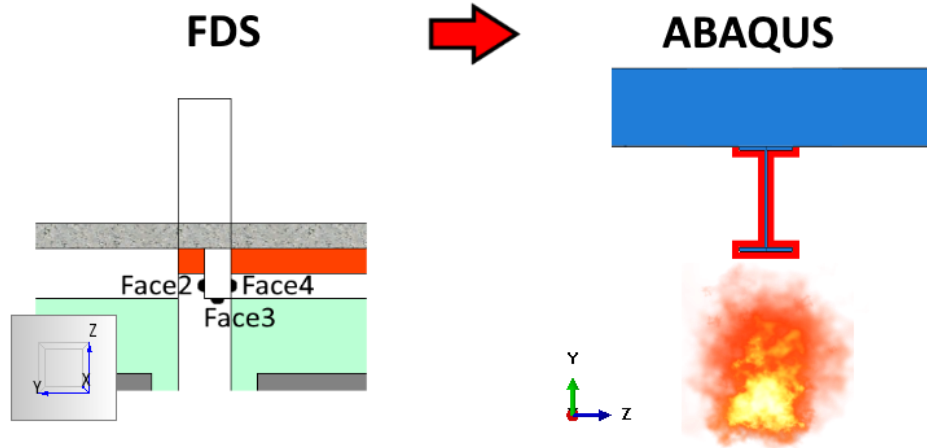


Figura B.21 Viga V9-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

Temperaturas obtidas por CFD

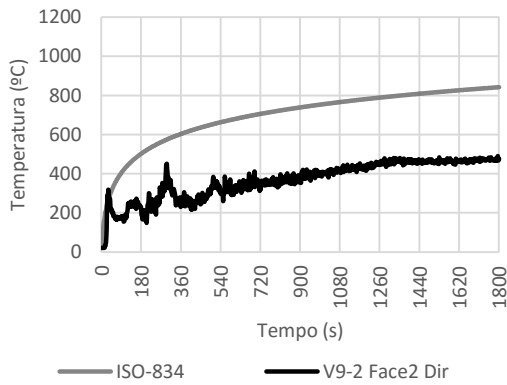


Figura B.22 Registo do dispositivo V9-2 Face2 Dir

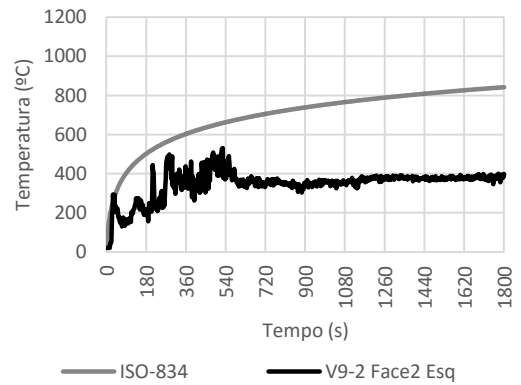


Figura B.24 Registo do dispositivo V9-2 Face2 Esq

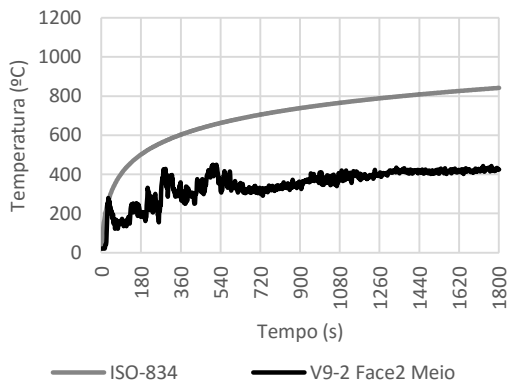


Figura B.23 Registo do dispositivo V9-2 Face2 Meio

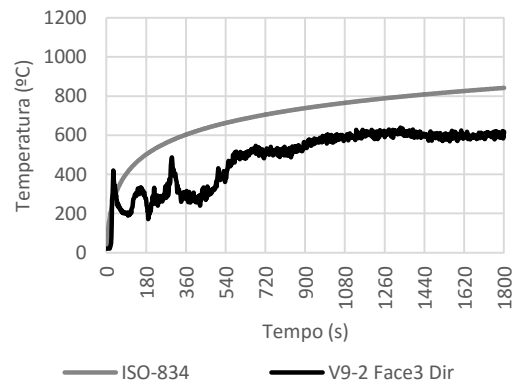


Figura B.25 Registo do dispositivo V9-2 Face3 Dir

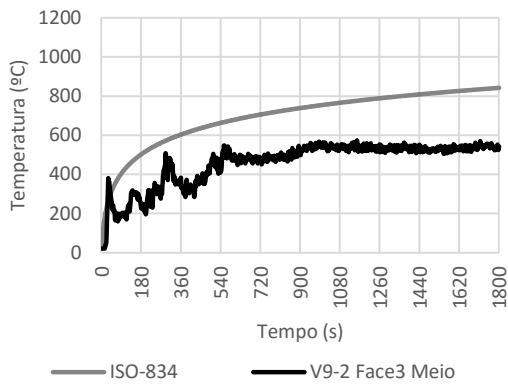


Figura B.26 Registo do dispositivo V9-2 Face3 Meio

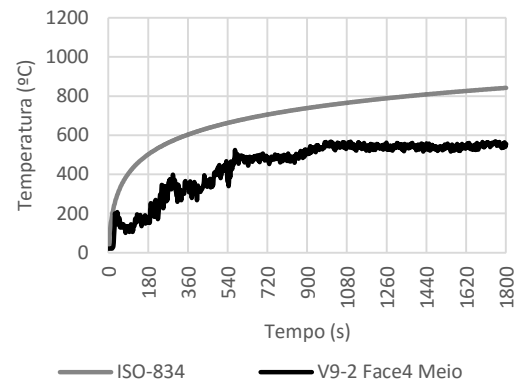


Figura B.29 Registo do dispositivo V9-2 Face4 Meio

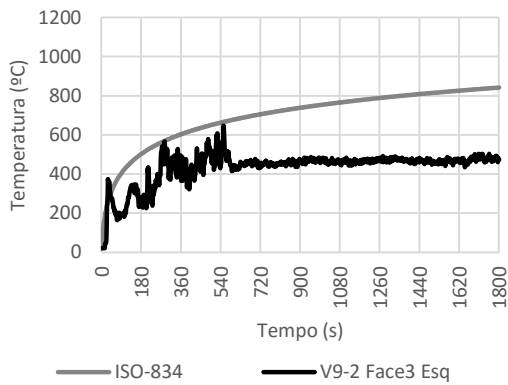


Figura B.27 Registo do dispositivo V9-2 Face3 Esq

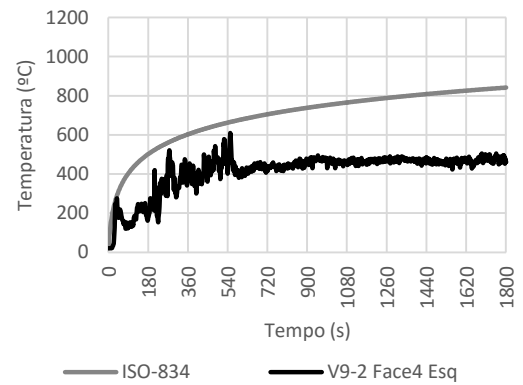


Figura B.30 Registo do dispositivo V9-2 Face4 Esq

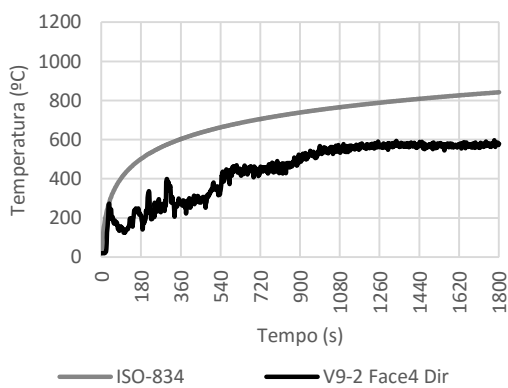


Figura B.28 Registo do dispositivo V9-2 Face4 Dir

Temperaturas aplicadas no ABAQUS

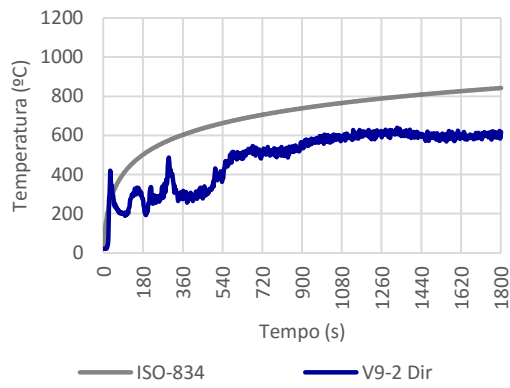


Figura B.31 Temperaturas para a superfície V9-2 Dir

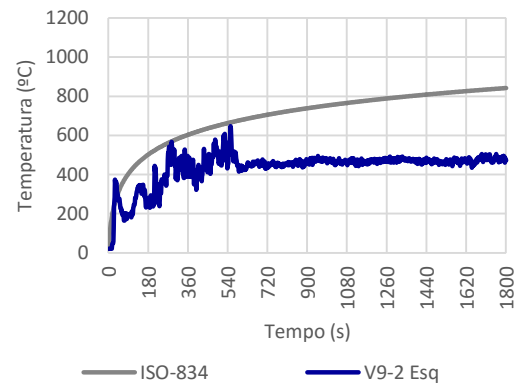


Figura B.33 Temperaturas para a superfície V9-2 Esq

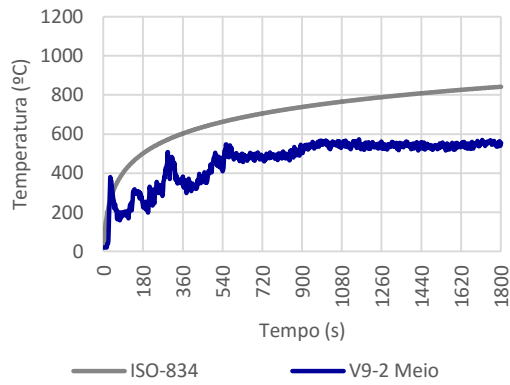


Figura B.32 Temperaturas para a superfície V9-2 Meio

B.4. Viga V16-2

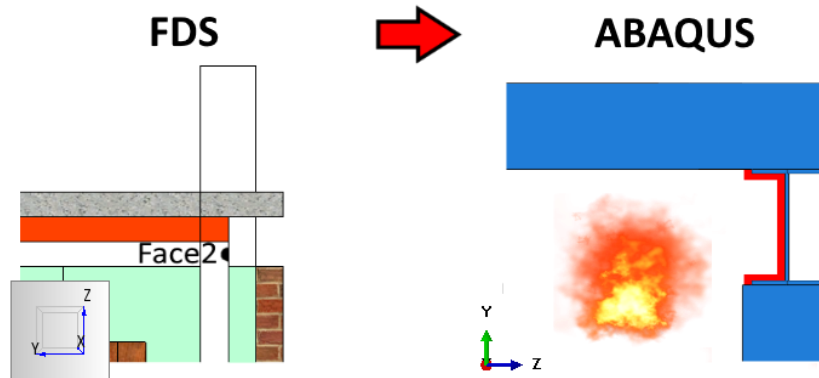


Figura B.34 Viga V16-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

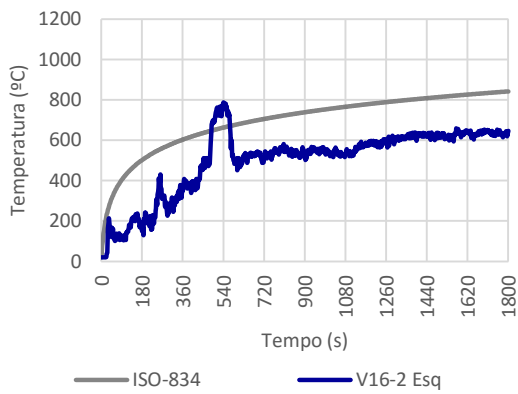


Figura B.35 Temperaturas para a superfície V16-2 Esq (disp. V16-2 Face2 Esq)

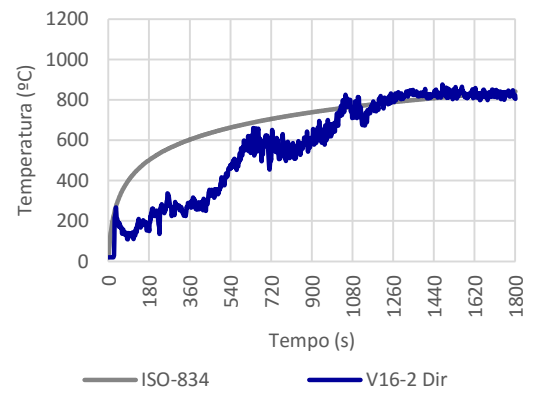


Figura B.37 Temperaturas para a superfície V16-2 Dir (disp. V16-2 Face2 Dir)

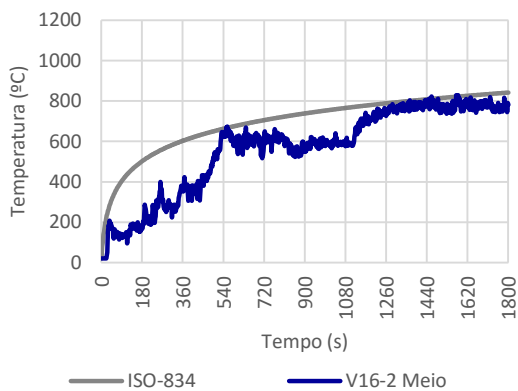


Figura B.36 Temperaturas para a superfície V16-2 Meio (disp. V16-2 Face2 Meio)

B.5. Viga V21-2

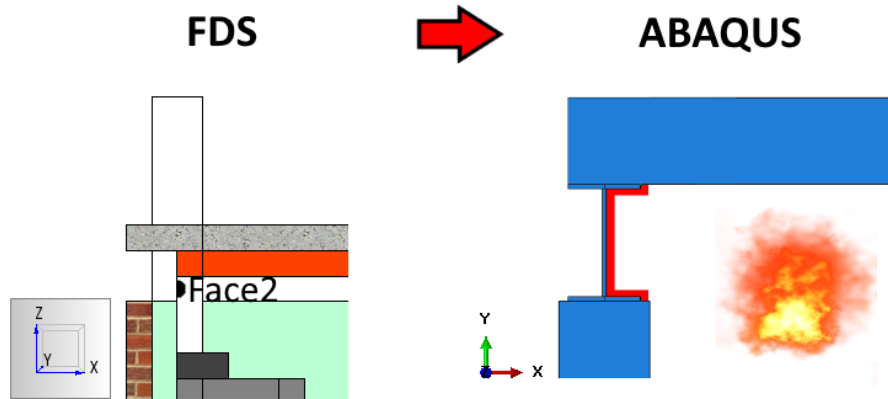


Figura B.38 Viga V21-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

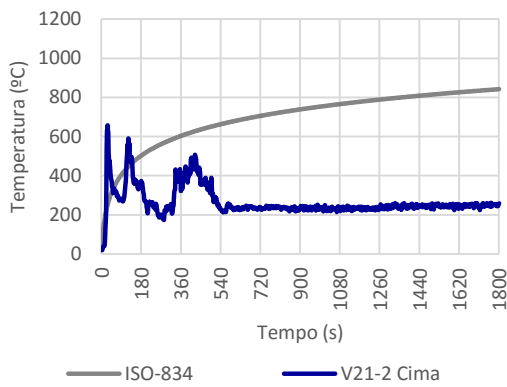


Figura B.39 Temperaturas para a superfície V21-2 Cima (disp. V21-2 Face2 Cima)

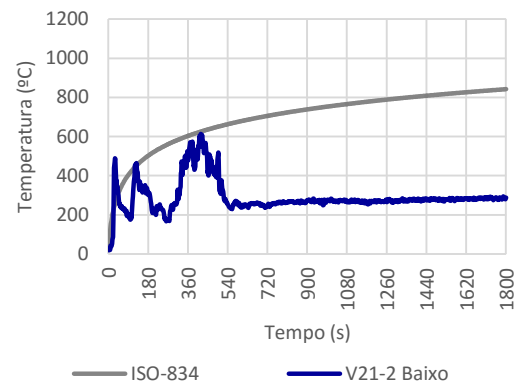


Figura B.41 Temperaturas para a superfície V21-2 Baixo (disp. V21-2 Face2 Baixo)

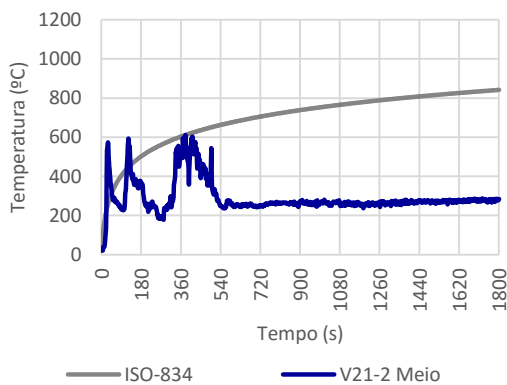


Figura B.40 Temperaturas para a superfície V21-2 Meio (disp. V21-2 Face2 Meio)

B.6. Viga V22-2

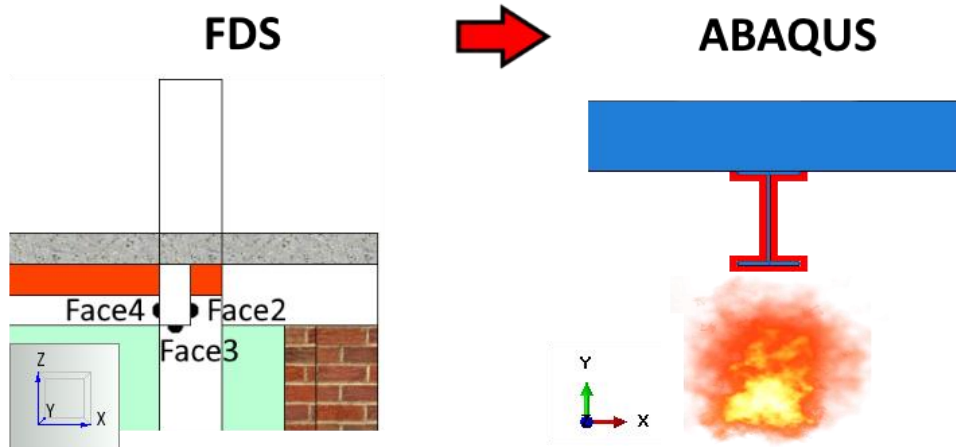


Figura B.42 Viga V22-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

Temperaturas obtidas por CFD

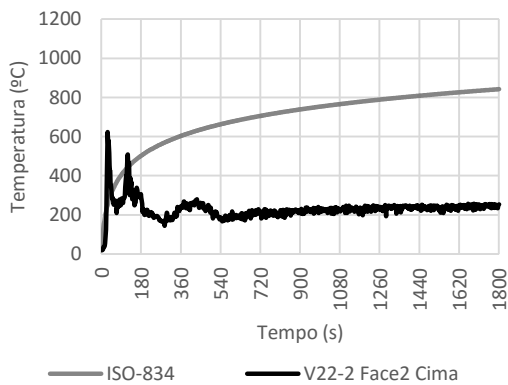


Figura B.43 Registo do dispositivo V22-2 Face2 Cima

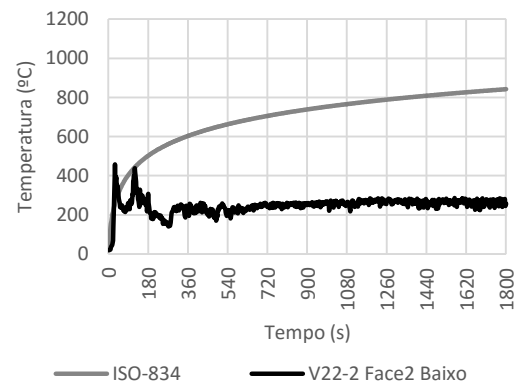


Figura B.45 Registo do dispositivo V22-2 Face2 Baixo

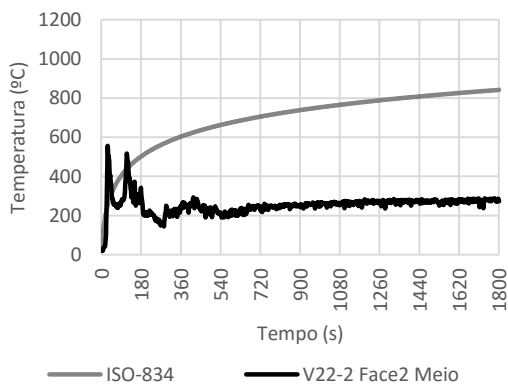


Figura B.44 Registo do dispositivo V22-2 Face2 Meio

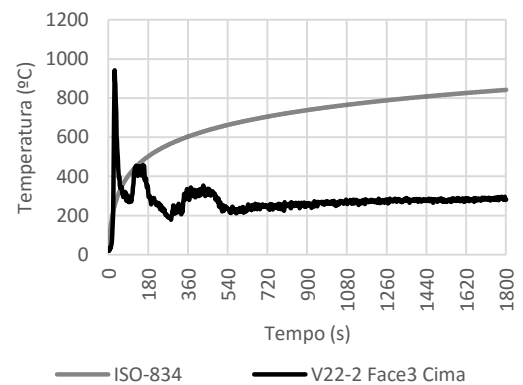


Figura B.46 Registo do dispositivo V22-2 Face3 Cima

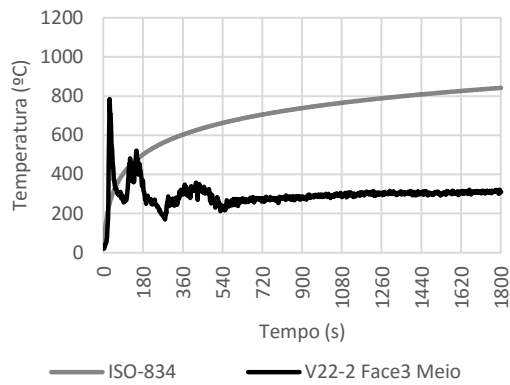


Figura B.47 Registo do dispositivo V22-2 Face3 Meio

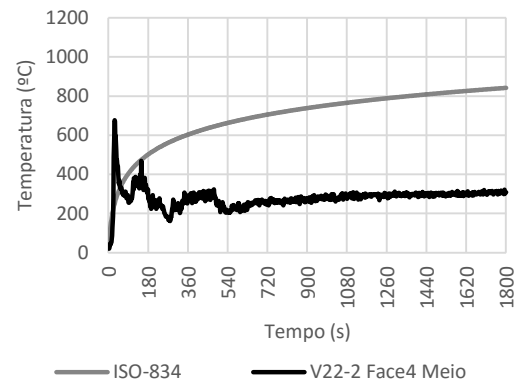


Figura B.50 Registo do dispositivo V22-2 Face4 Meio

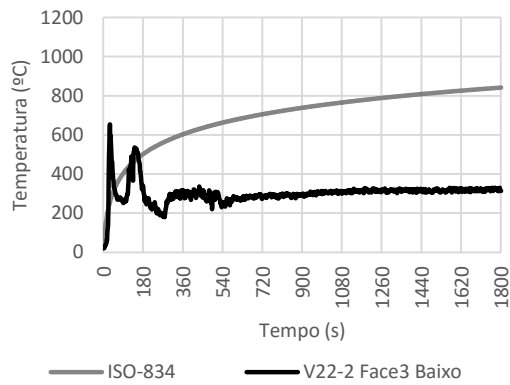


Figura B.48 Registo do dispositivo V22-2 Face3 Baixo

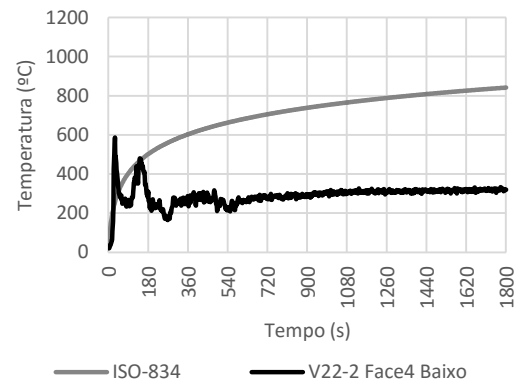


Figura B.51 Registo do dispositivo V22-2 Face4 Baixo

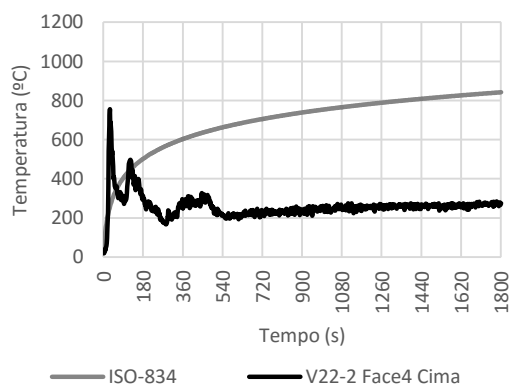


Figura B.49 Registo do dispositivo V22-2 Face4 Cima

Temperaturas aplicadas no ABAQUS

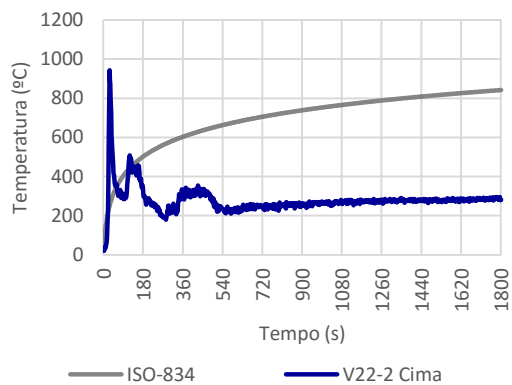


Figura B.52 Temperaturas para a superfície V22-2 Cima

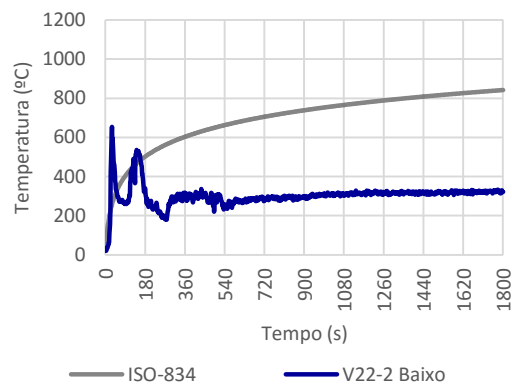


Figura B.54 Temperaturas para a superfície V22-2 Baixo

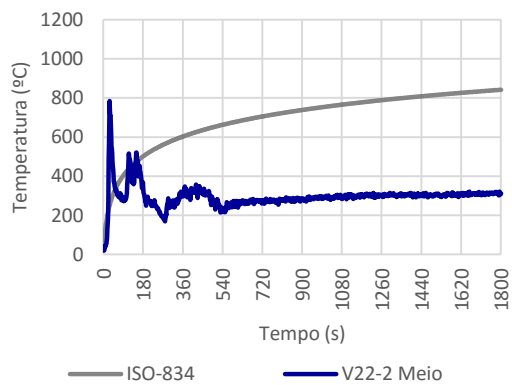


Figura B.53 Temperaturas para a superfície V22-2 Meio

B.7. Viga V25-2

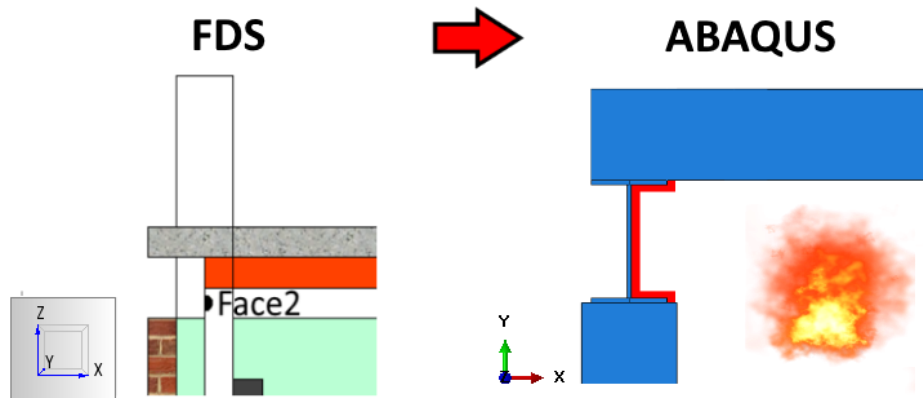


Figura B.55 Viga V25-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

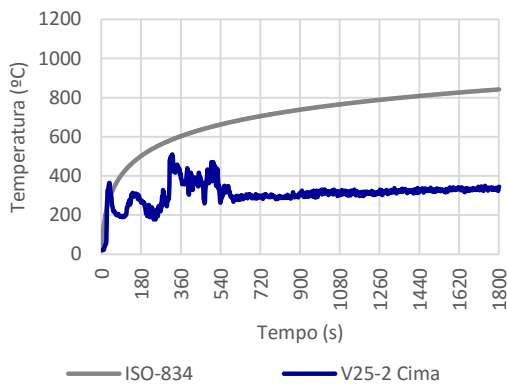


Figura B.56 Temperaturas para a superfície V25-2 Cima (disp. V25-2 Face2 Cima)

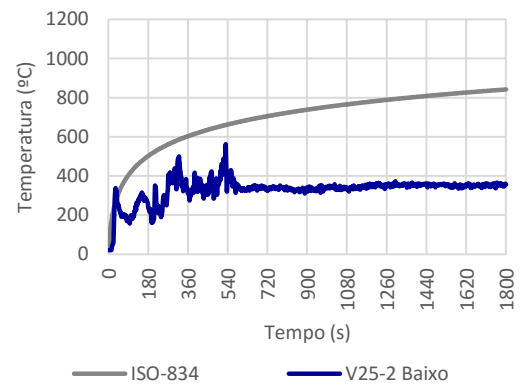


Figura B.58 Temperaturas para a superfície V25-2 Baixo (disp. V25-2 Face2 Baixo)

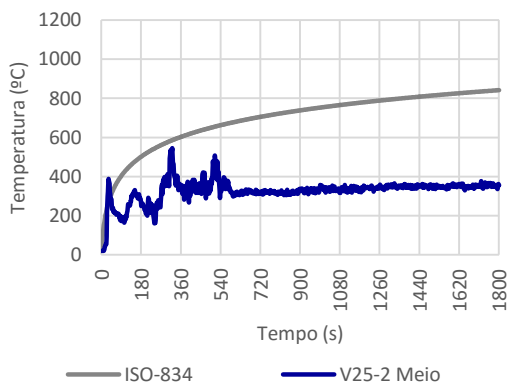


Figura B.57 Temperaturas para a superfície V25-2 Meio (disp. V25-2 Face2 Meio)

B.8. Viga V26-2

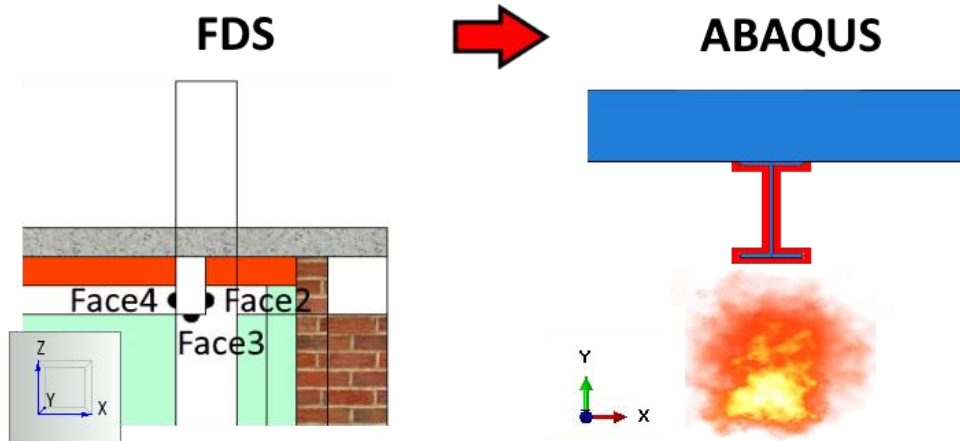


Figura B.59 Viga V26-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

Temperaturas obtidas por CFD

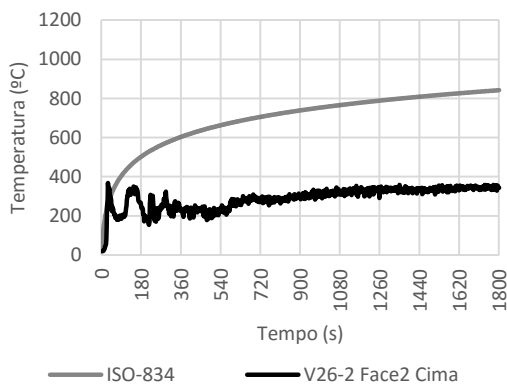


Figura B.60 Registo do dispositivo V26-2 Face2 Cima

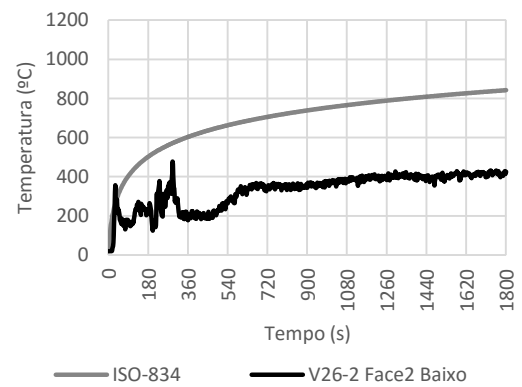


Figura B.62 Registo do dispositivo V26-2 Face2 Baixo

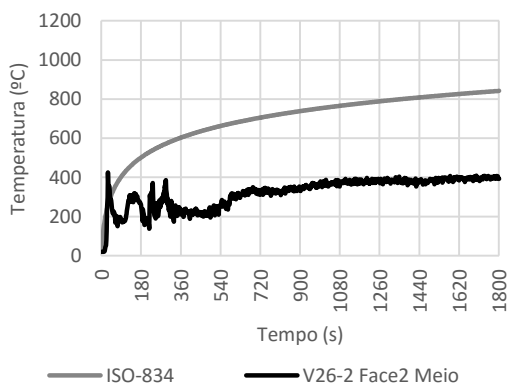


Figura B.61 Registo do dispositivo V26-2 Face2 Meio

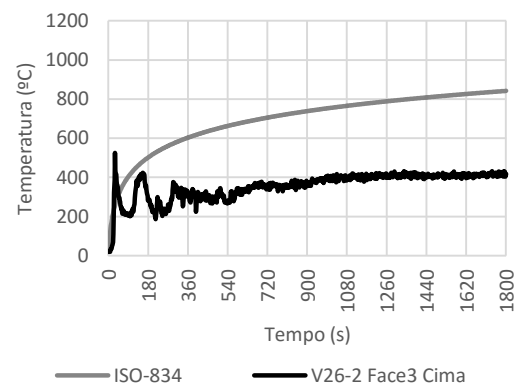


Figura B.63 Registo do dispositivo V26-2 Face3 Cima

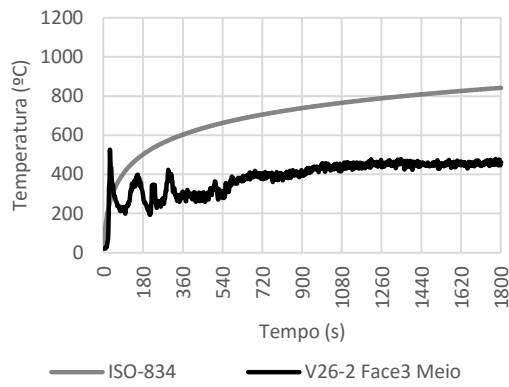


Figura B.64 Registo do dispositivo V26-2 Face3 Meio

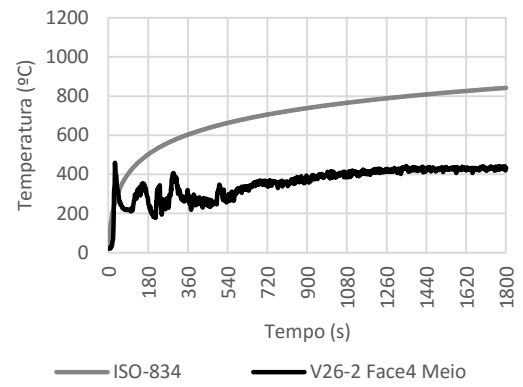


Figura B.67 Registo do dispositivo V26-2 Face4 Meio

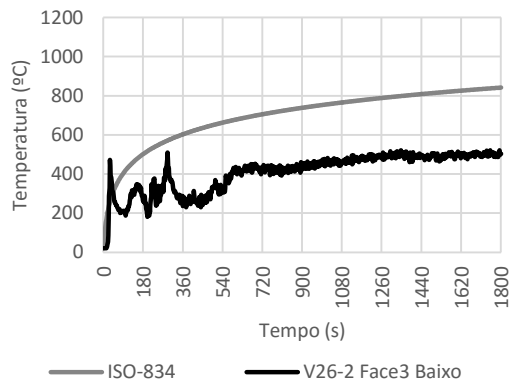


Figura B.65 Registo do dispositivo V26-2 Face3 Baixo

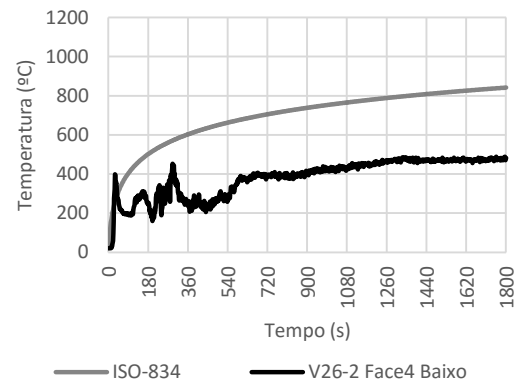


Figura B.68 Registo do dispositivo V26-2 Face4 Baixo

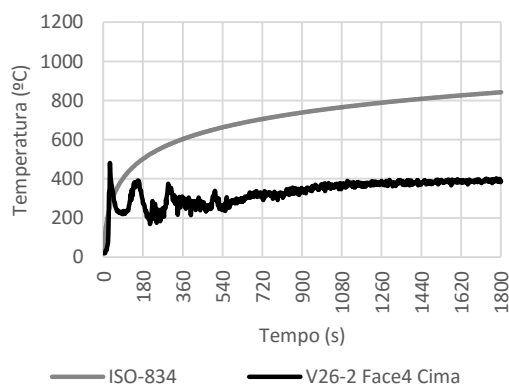


Figura B.66 Registo do dispositivo V26-2 Face4 Cima

Temperaturas aplicadas no ABAQUS

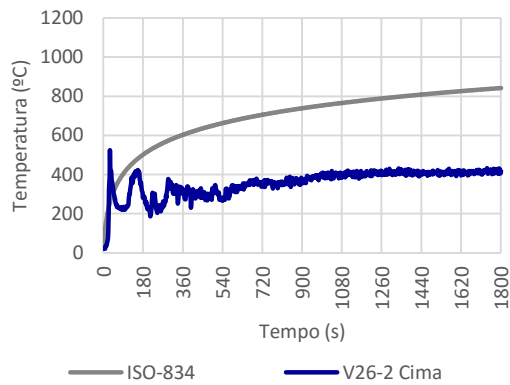


Figura B.69 Temperaturas para a superfície V26-2 Cima

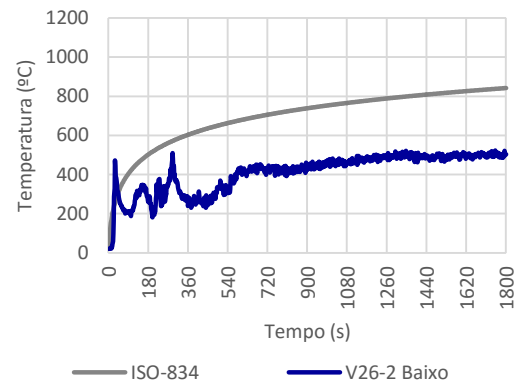


Figura B.71 Temperaturas para a superfície V26-2 Baixo

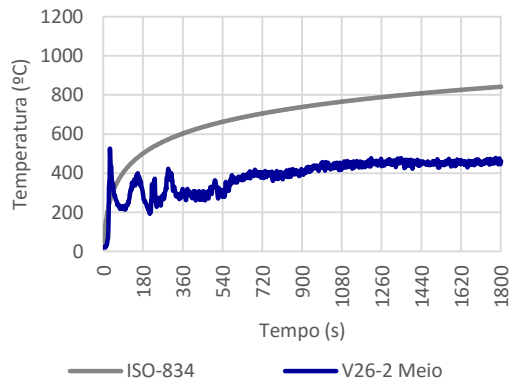


Figura B.70 Temperaturas para a superfície V26-2 Meio

B.9. Viga V29-2

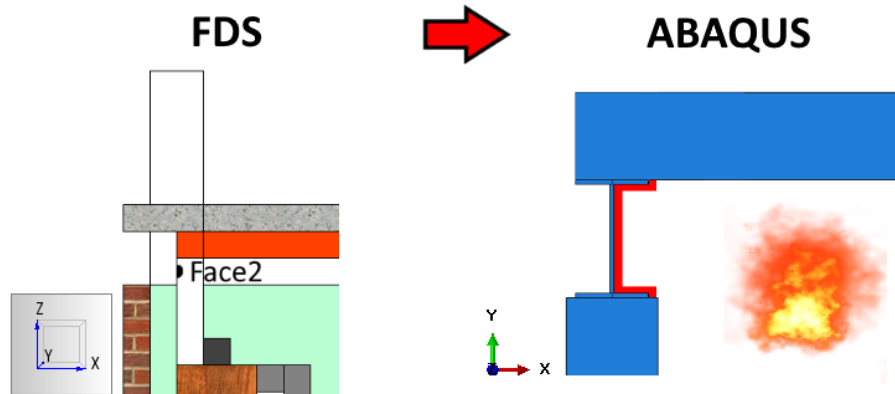


Figura B.72 Viga V29-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

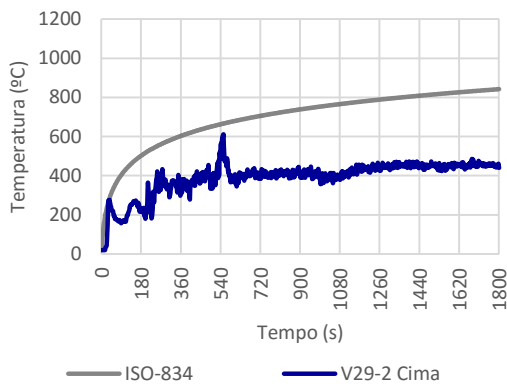


Figura B.73 Temperaturas para a superfície V29-2 Cima (disp. V29-2 Face2 Cima)

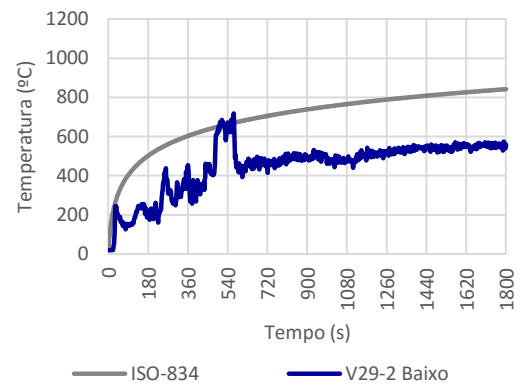


Figura B.75 Temperaturas para a superfície V29-2 Baixo (disp. V29-2 Face2 Baixo)

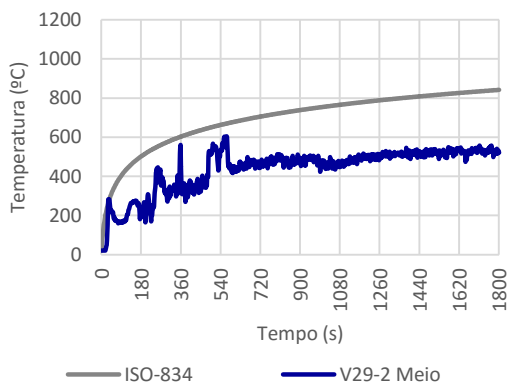


Figura B.74 Temperaturas para a superfície V29-2 Meio (disp. V29-2 Face2 Meio)

B.10. Viga V30-2

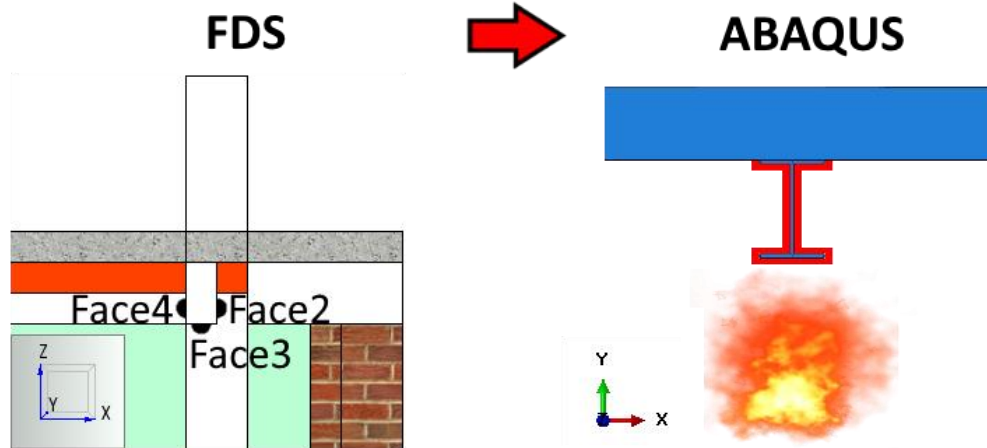


Figura B.76 Viga V30-2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

Temperaturas obtidas por CFD

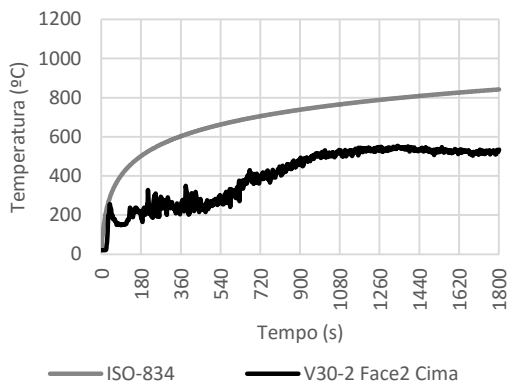


Figura B.77 Registo do dispositivo V30-2 Face2 Cima

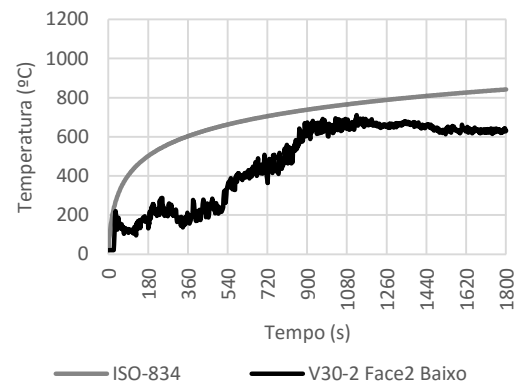


Figura B.79 Registo do dispositivo V30-2 Face2 Baixo

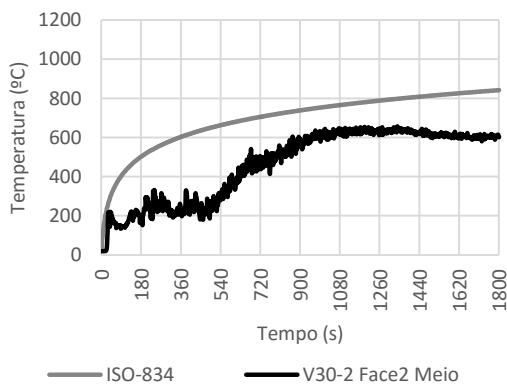


Figura B.78 Registo do dispositivo V30-2 Face2 Meio

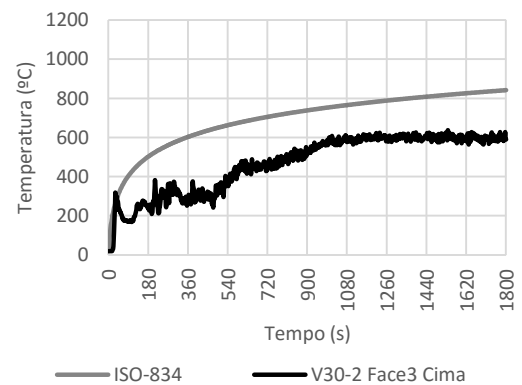


Figura B.80 Registo do dispositivo V30-2 Face3 Cima

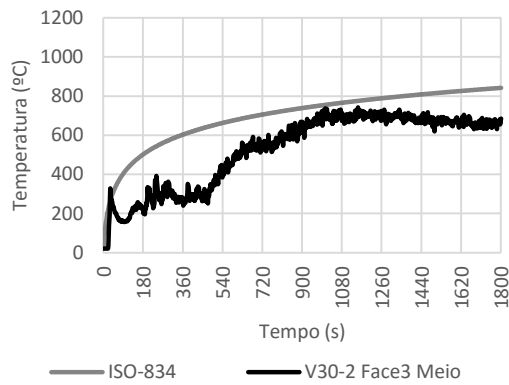


Figura B.81 Registo do dispositivo V30-2 Face3 Meio

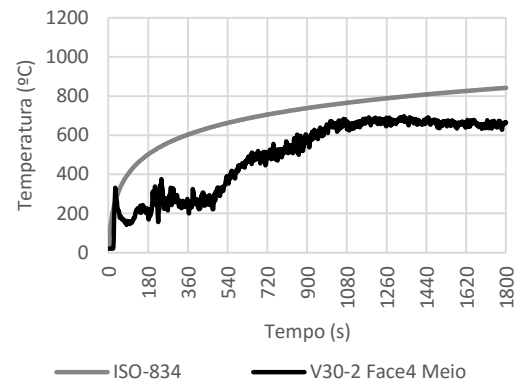


Figura B.84 Registo do dispositivo V30-2 Face4 Meio

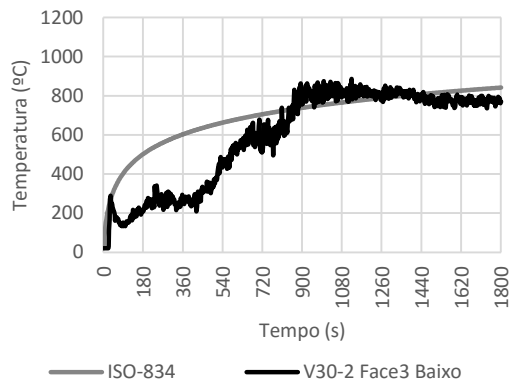


Figura B.82 Registo do dispositivo V30-2 Face3 Baixo

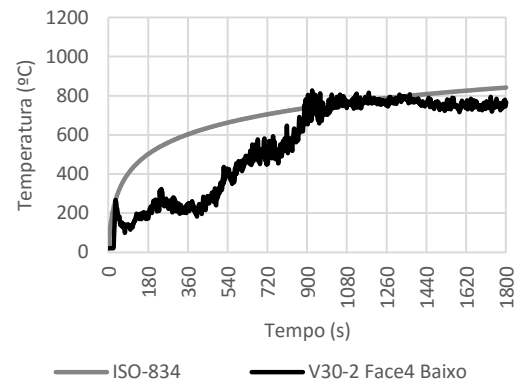


Figura B.85 Registo do dispositivo V30-2 Face4 Baixo

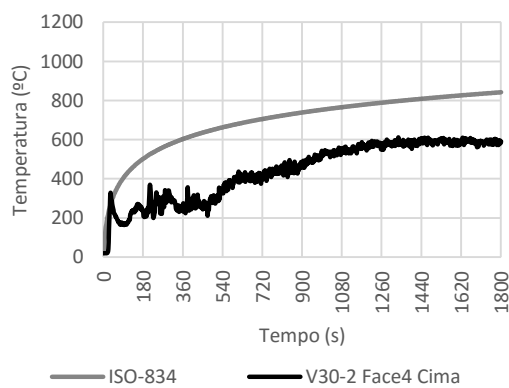


Figura B.83 Registo do dispositivo V30-2 Face4 Cima

Temperaturas aplicadas no ABAQUS

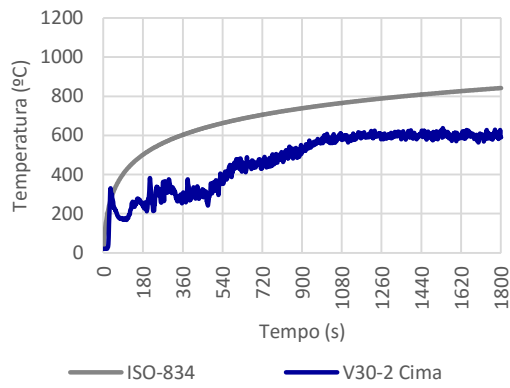


Figura B.86 Temperaturas para a superfície V30-2 Cima

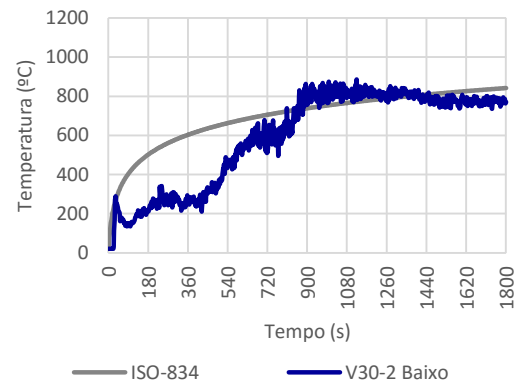


Figura B.88 Temperaturas para a superfície V30-2 Baixo

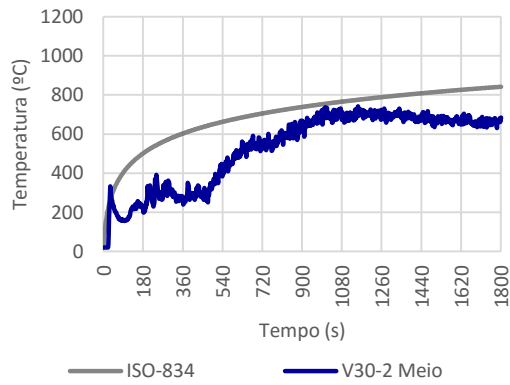


Figura B.87 Temperaturas para a superfície V30-2 Meio

ANEXO C. TEMPERATURAS NAS LAJES

Colocaram-se dispositivos de medição de temperatura junto às lajes que delimitam o compartimento de incêndio do modelo do FDS – no topo do piso inferior (Figura C.1a) e na base do piso superior (Figura C.2a). Com a simulação, o software de CFD determinou curvas T-t para todos os pontos de medição. Cada curva foi aplicada numa superfície de laje no modelo estrutural desenvolvido no ABAQUS (Figura C.1b e Figura C.2b).

Foi necessário alterar ligeiramente o posicionamento dos dispositivos L1 Cima 1, L1 Cima 2, L1 Cima 3, L1 Cima 5 e L1 Cima 6 no modelo FDS, relativamente aos planos verticais indicados – como estavam inicialmente instalados sob as peças de mobiliário, não eram capazes de registar as temperaturas do ar.

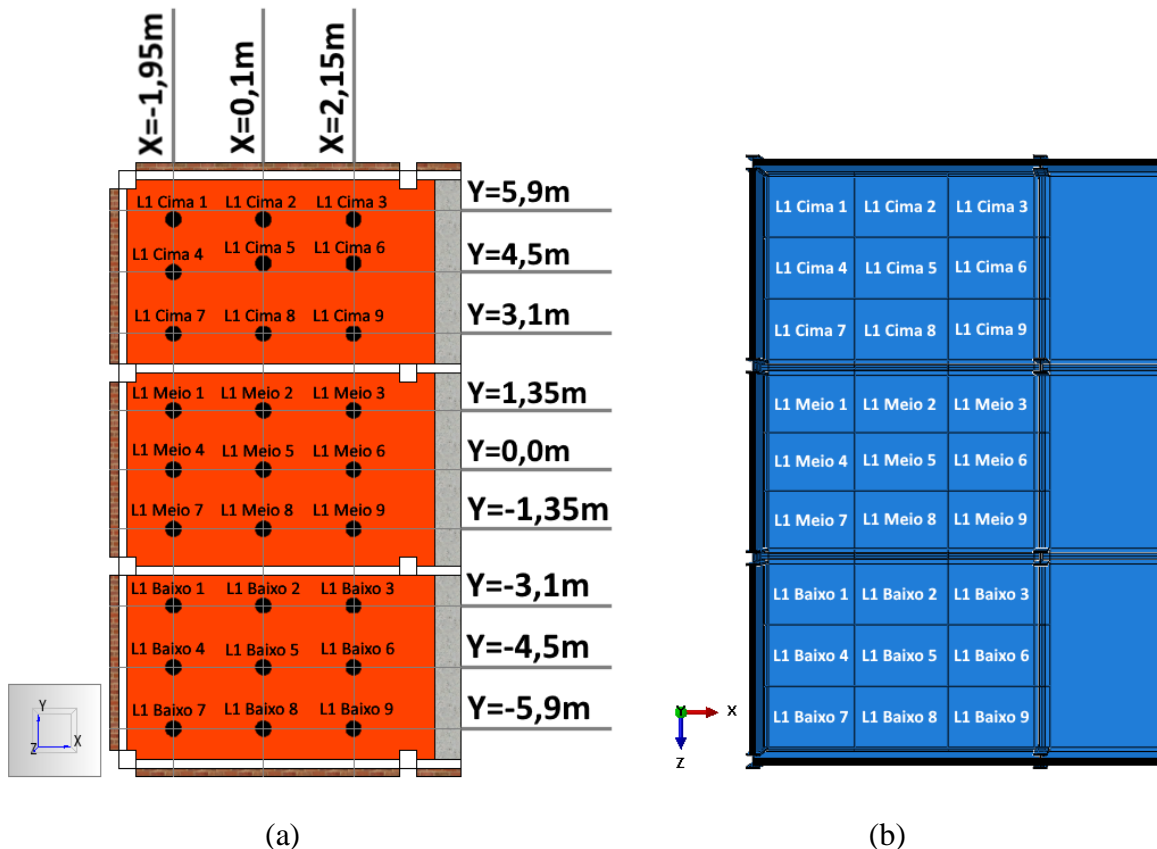


Figura C.1 Laje L1: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

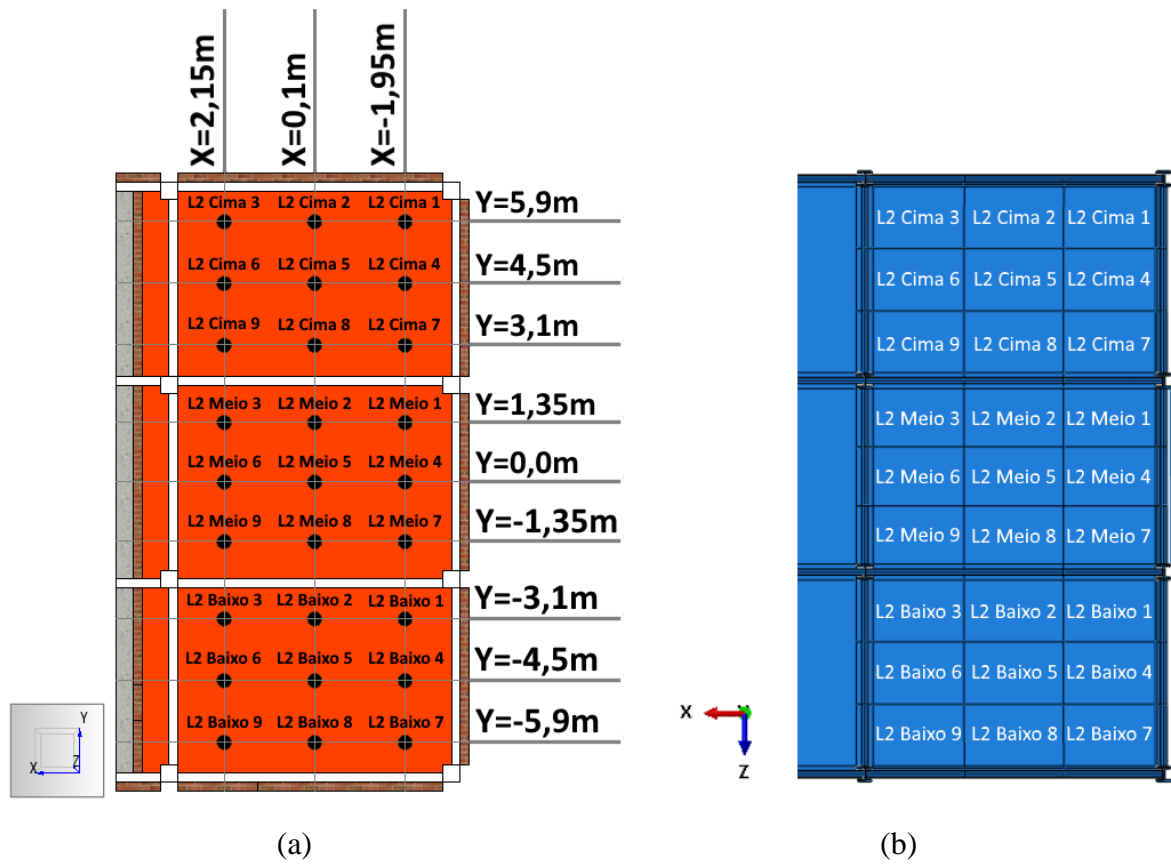


Figura C.2 Laje L2: pontos de medição das temperaturas e superfícies de aplicação

C.1. Laje inferior (L1)

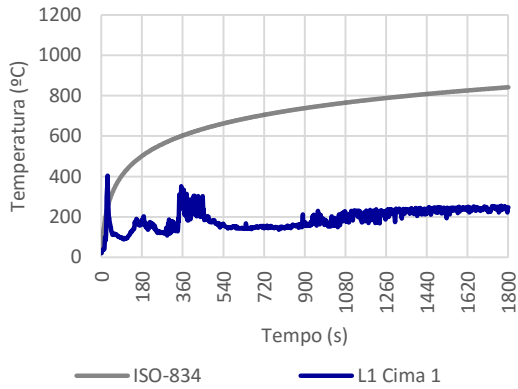


Figura C.3 Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 1

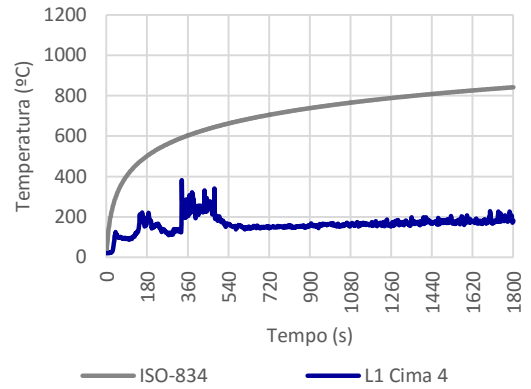


Figura C.6 Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 4

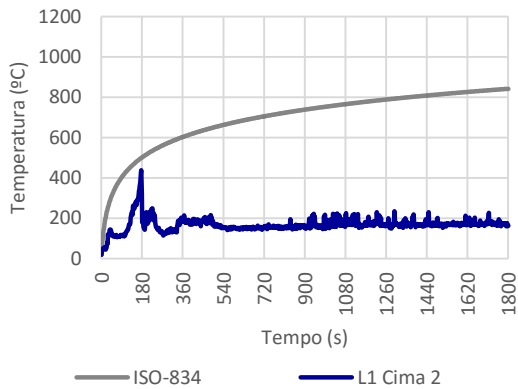


Figura C.4 Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 2

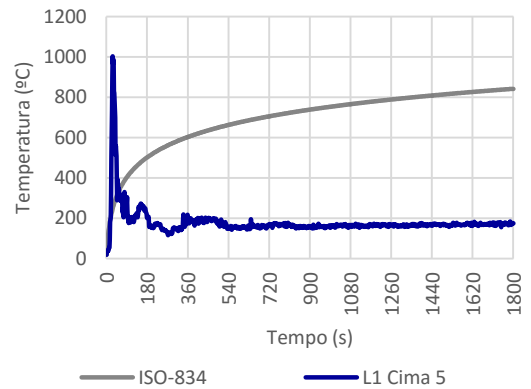


Figura C.7 Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 5

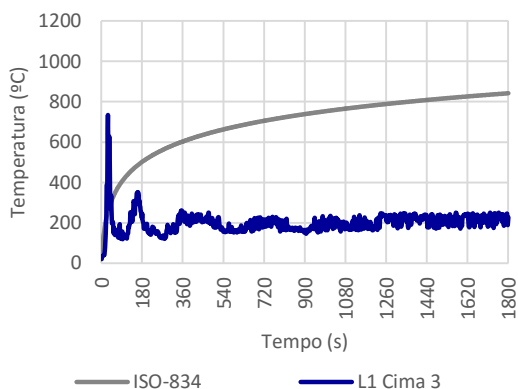


Figura C.5 Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 3

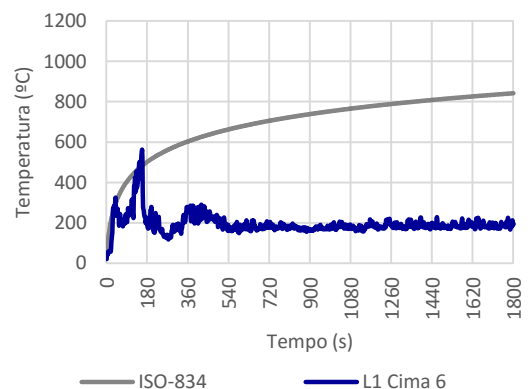


Figura C.8 Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 6

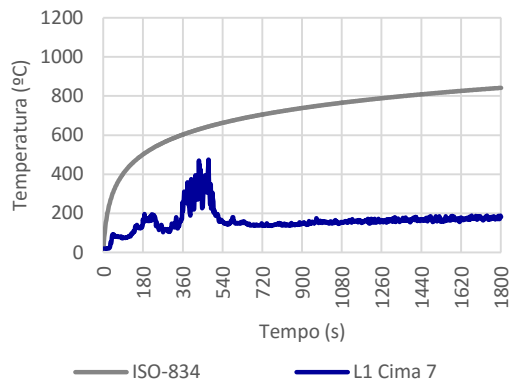


Figura C.9 Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 7

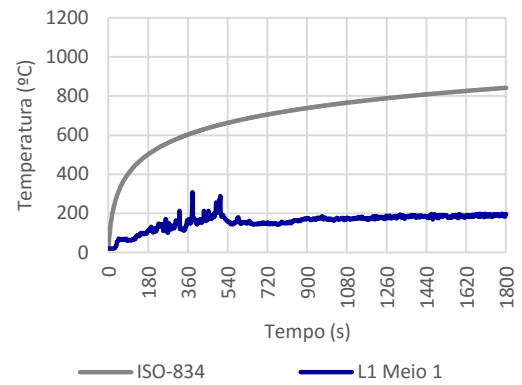


Figura C.12 Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 1

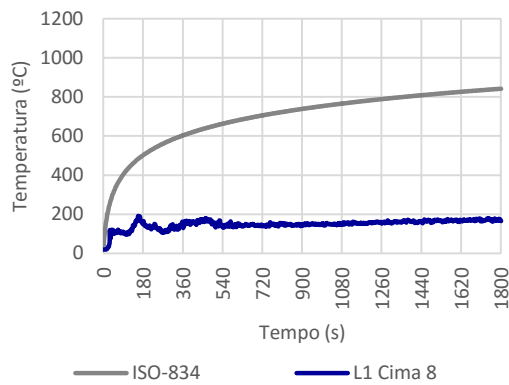


Figura C.10 Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 8

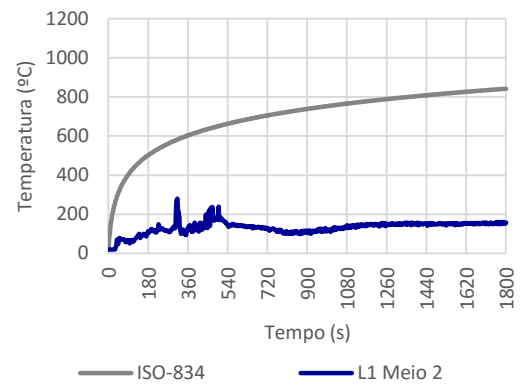


Figura C.13 Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 2

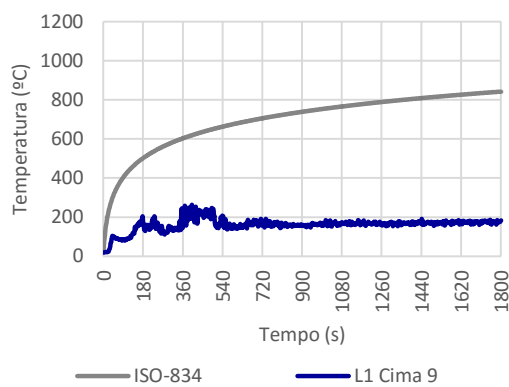


Figura C.11 Evolução da temperatura na superfície L1 Cima 9

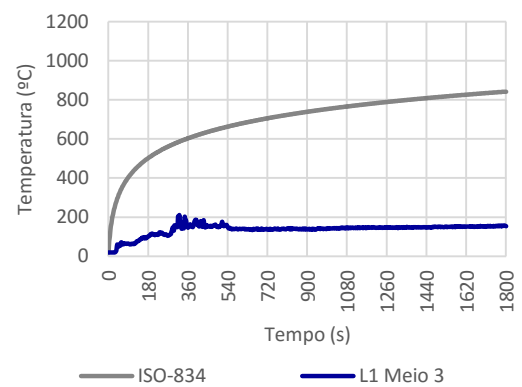


Figura C.14 Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 3

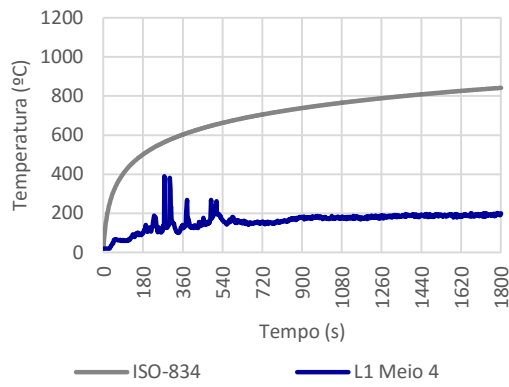


Figura C.15 Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 4

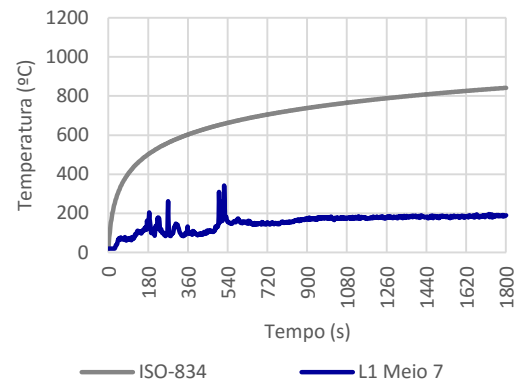


Figura C.18 Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 7

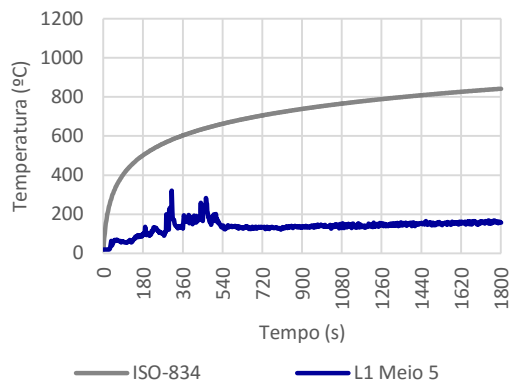


Figura C.16 Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 5

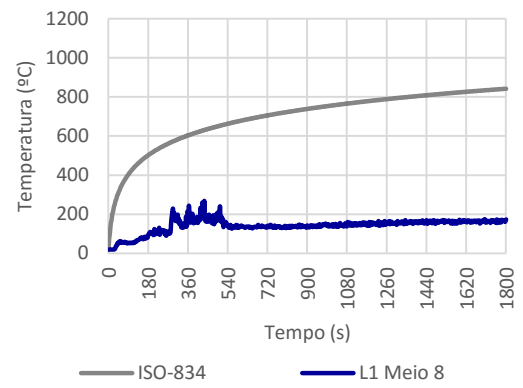


Figura C.19 Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 8

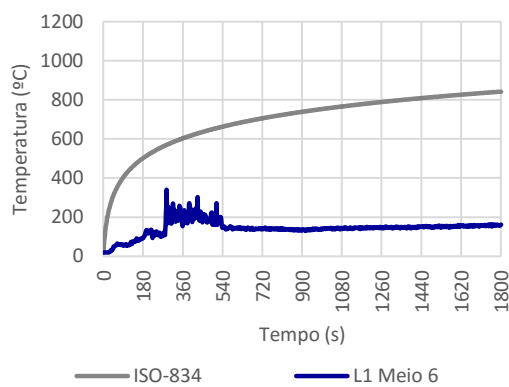


Figura C.17 Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 6

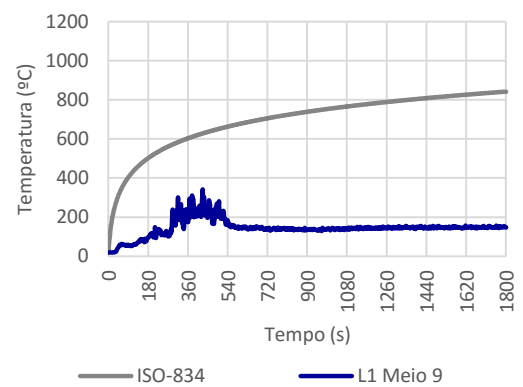


Figura C.20 Evolução da temperatura na superfície L1 Meio 9

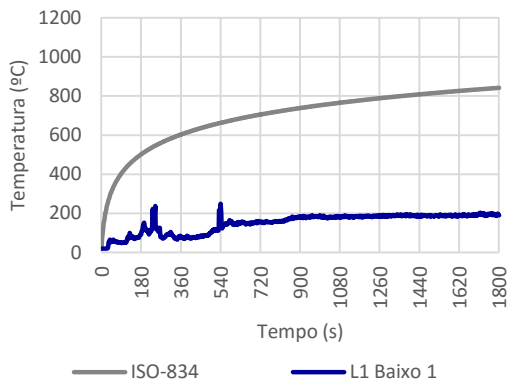


Figura C.21 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 1

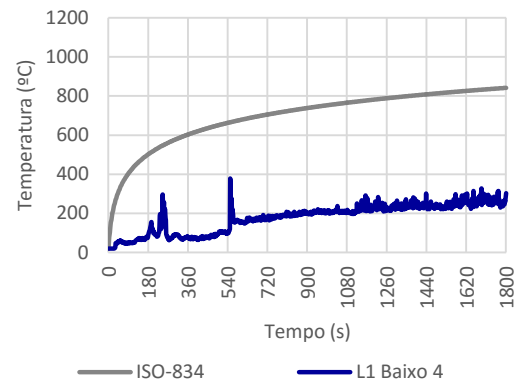


Figura C.24 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 4

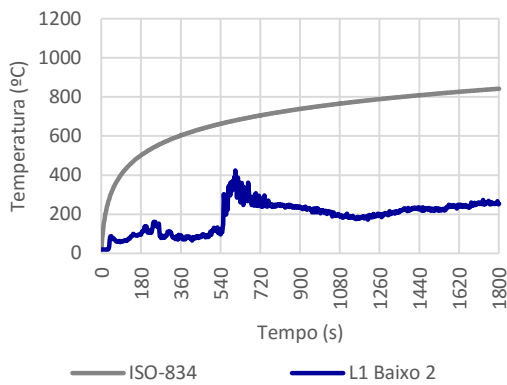


Figura C.22 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 2

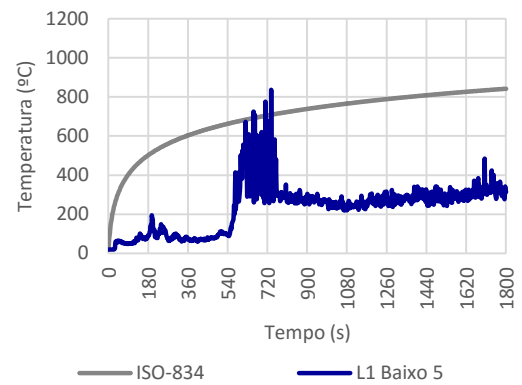


Figura C.25 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 5

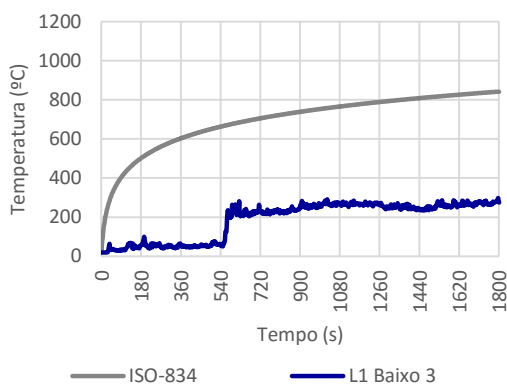


Figura C.23 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 3

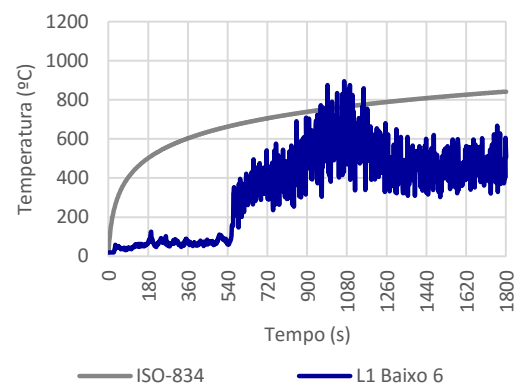


Figura C.26 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 6

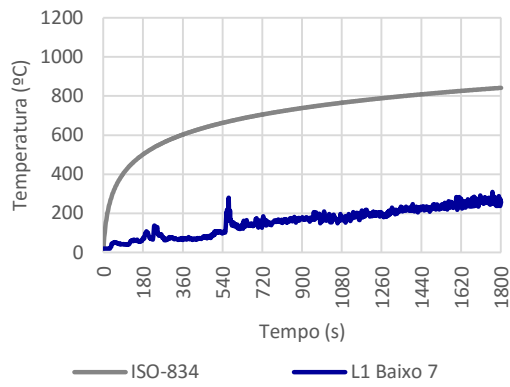


Figura C.27 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 7

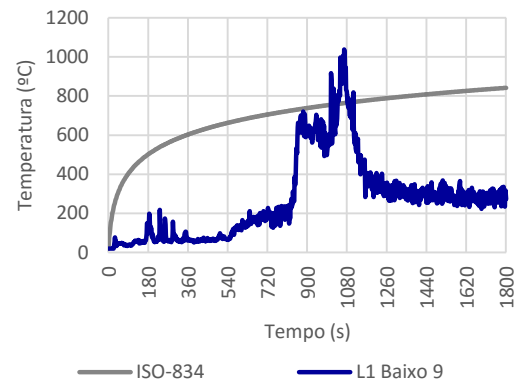


Figura C.29 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 9

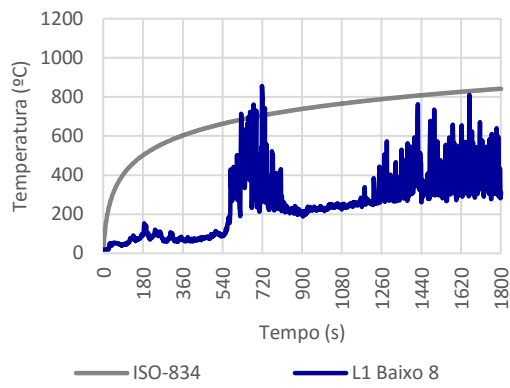


Figura C.28 Evolução da temperatura na superfície L1 Baixo 8

C.2. Laje superior (L2)

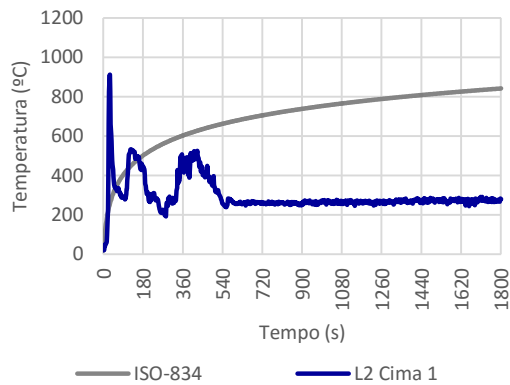


Figura C.30 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 1

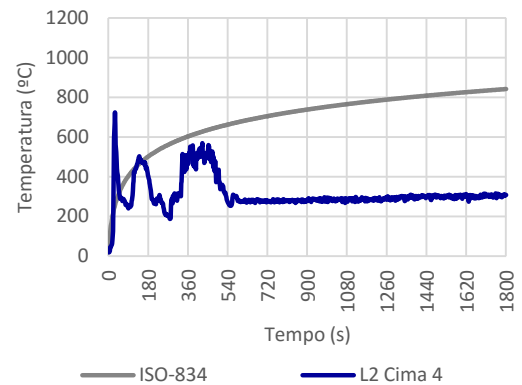


Figura C.33 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 4

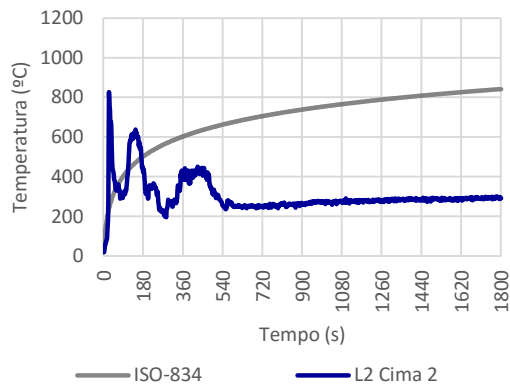


Figura C.31 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 2

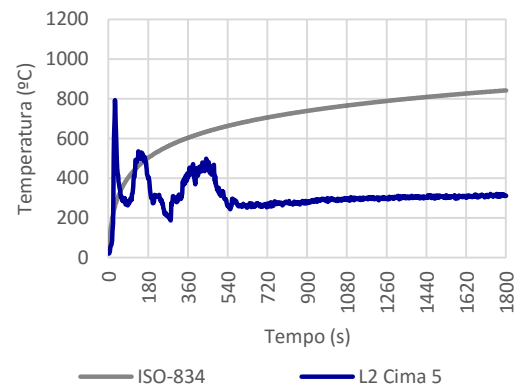


Figura C.34 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 5

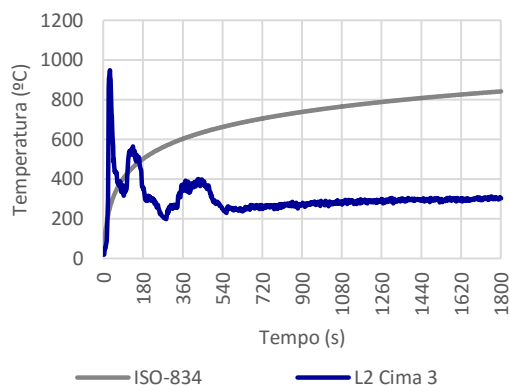


Figura C.32 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 3

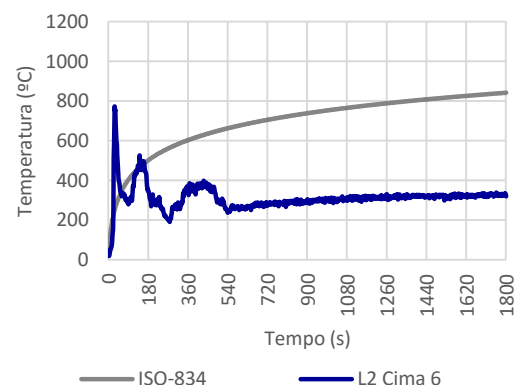


Figura C.35 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 6

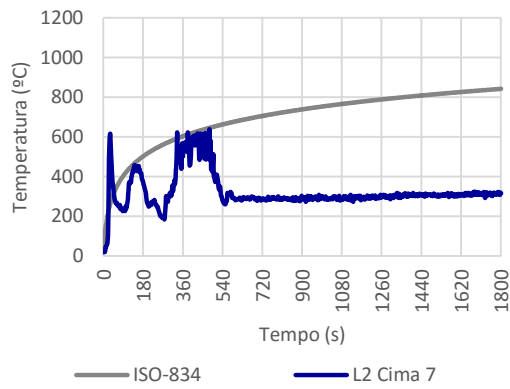


Figura C.36 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 7

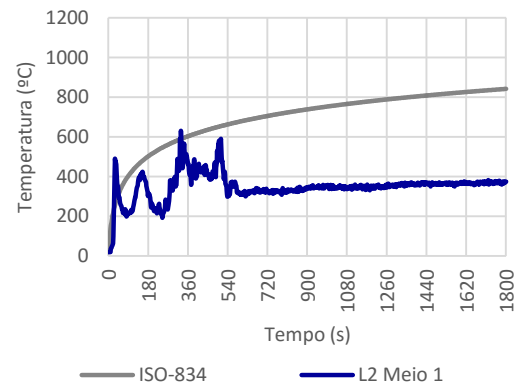


Figura C.39 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 1

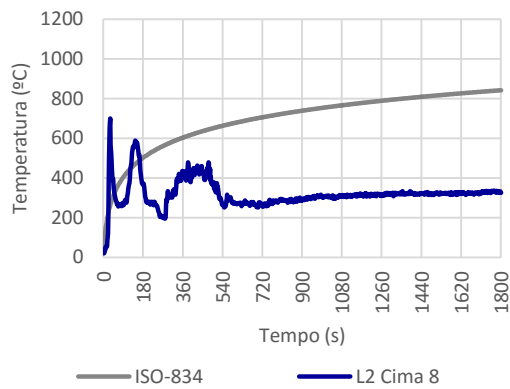


Figura C.37 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 8

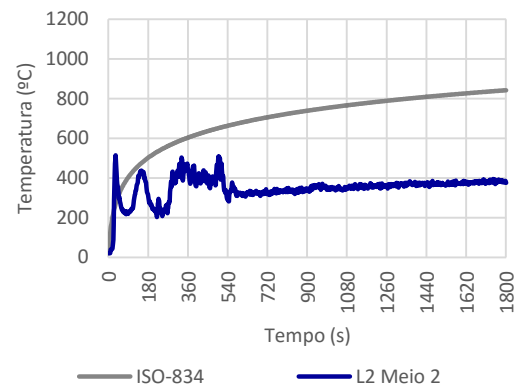


Figura C.40 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 2

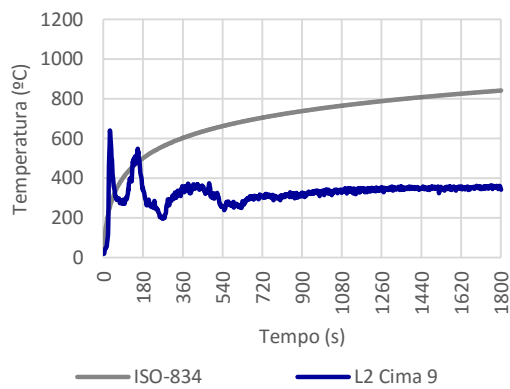


Figura C.38 Evolução da temperatura na superfície L2 Cima 9

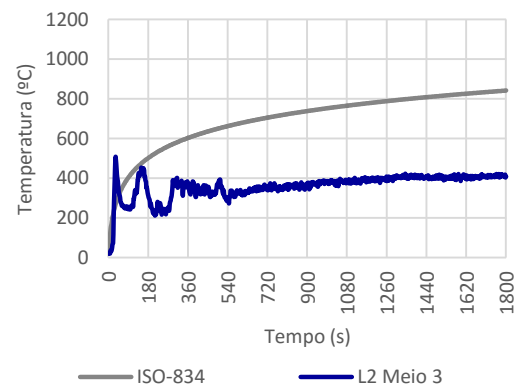


Figura C.41 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 3

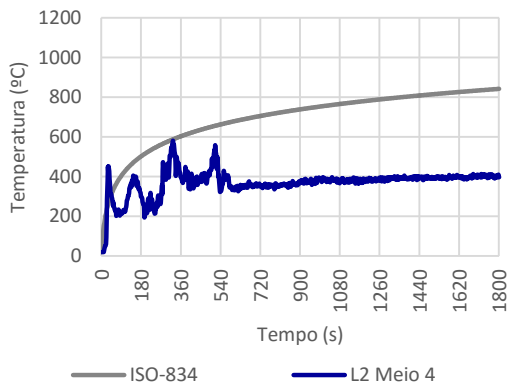


Figura C.42 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 4

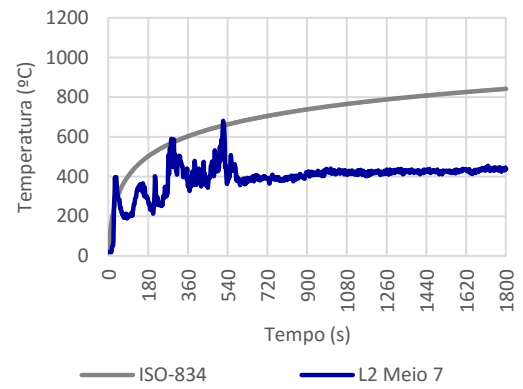


Figura C.45 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 7

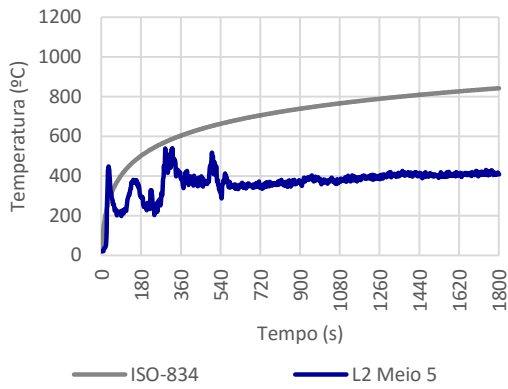


Figura C.43 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 5

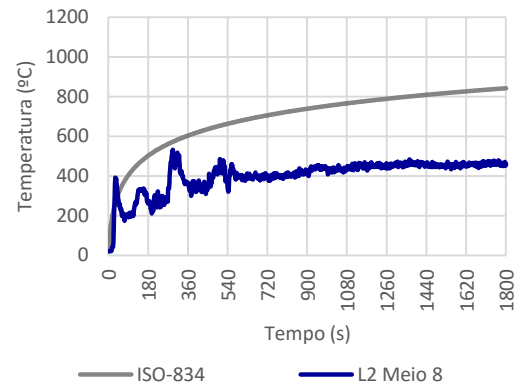


Figura C.46 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 8

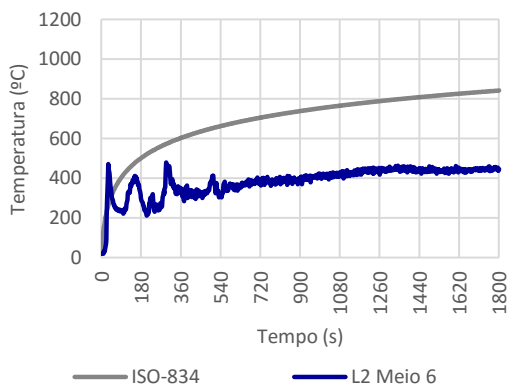


Figura C.44 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 6

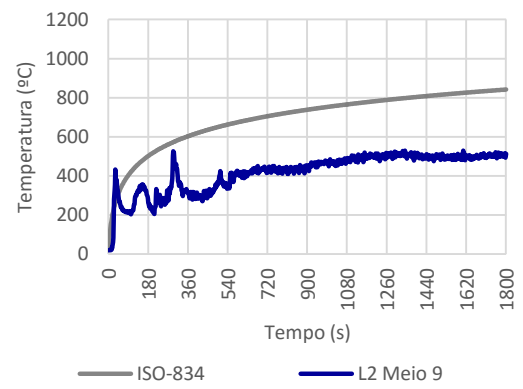


Figura C.47 Evolução da temperatura na superfície L2 Meio 9

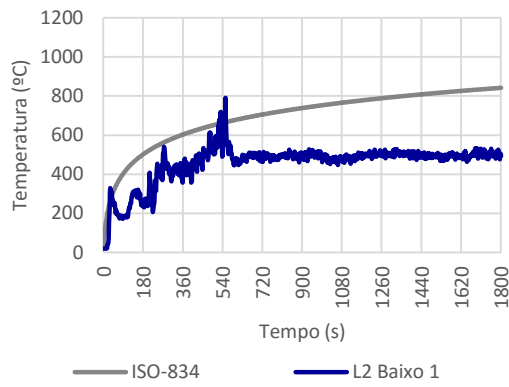


Figura C.48 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 1

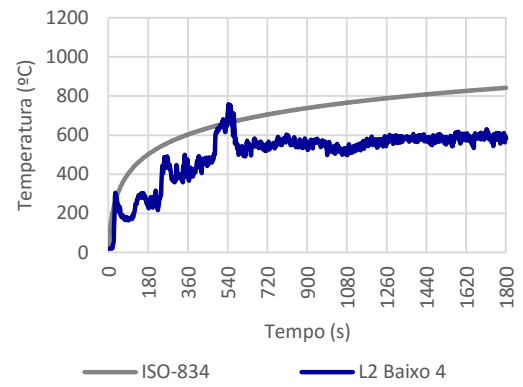


Figura C.51 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 4

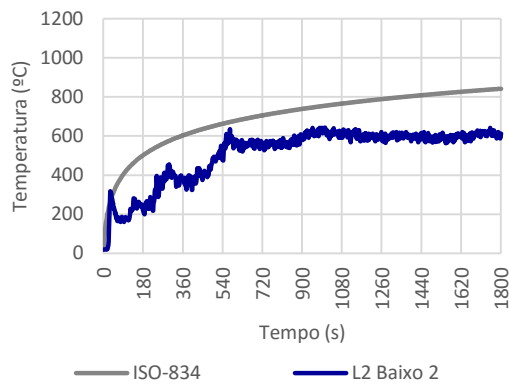


Figura C.49 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 2

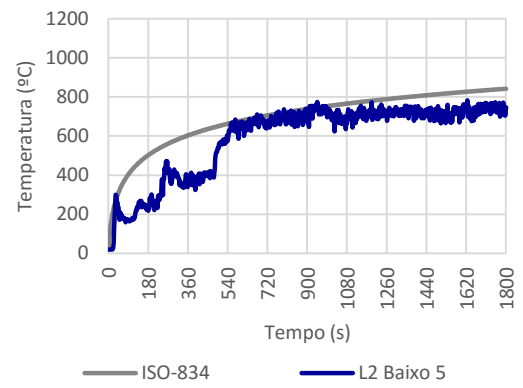


Figura C.52 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 5

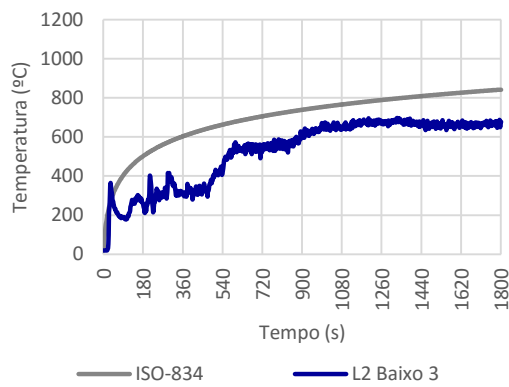


Figura C.50 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 3

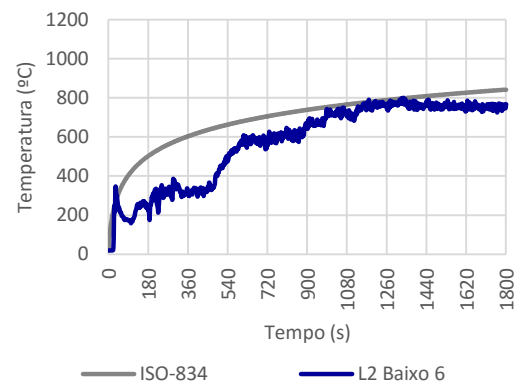


Figura C.53 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 6

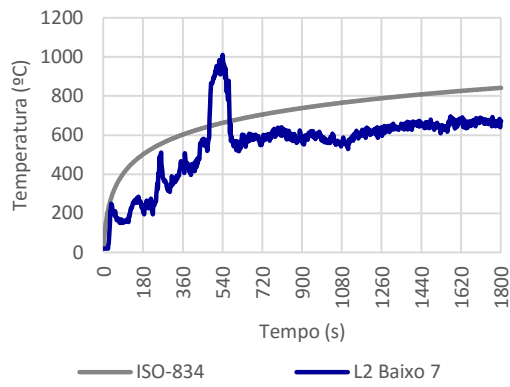


Figura C.54 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 7

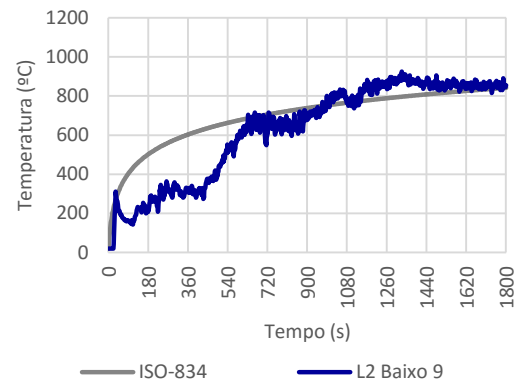


Figura C.56 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 9

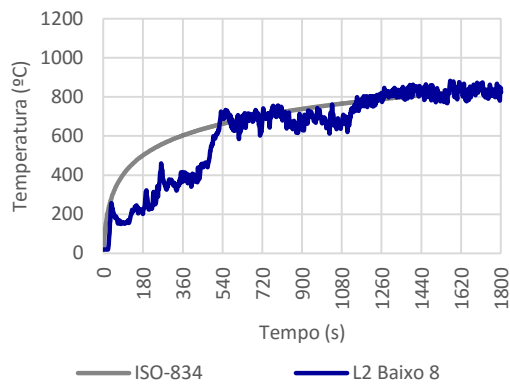


Figura C.55 Evolução da temperatura na superfície L2 Baixo 8

ANEXO D. COMPORTAMENTO TÉRMICO

D.1. Pilares

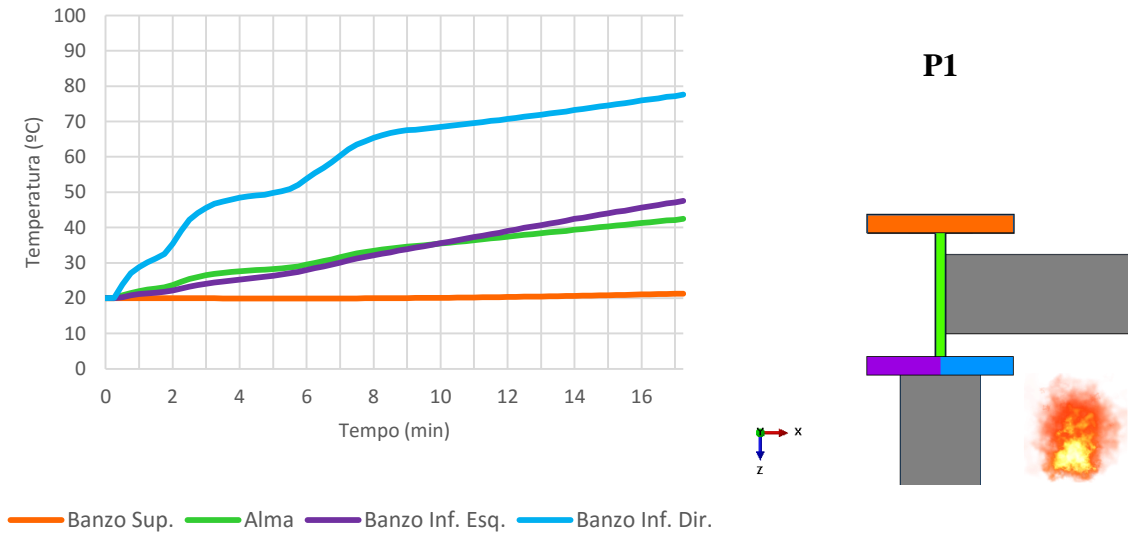


Figura D.1 Temperaturas médias observadas no pilar P1

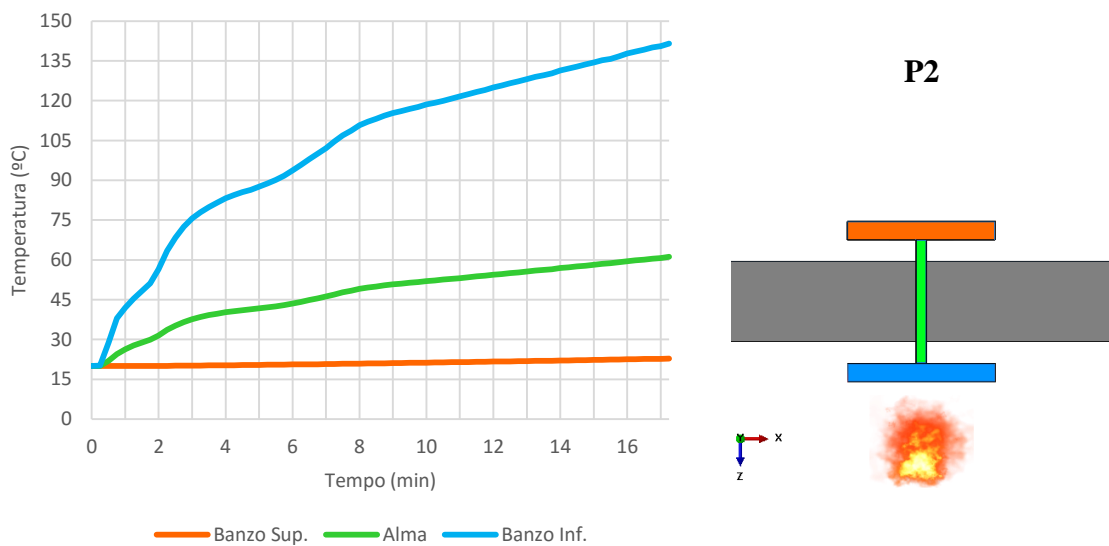


Figura D.2 Temperaturas médias observadas no pilar P2

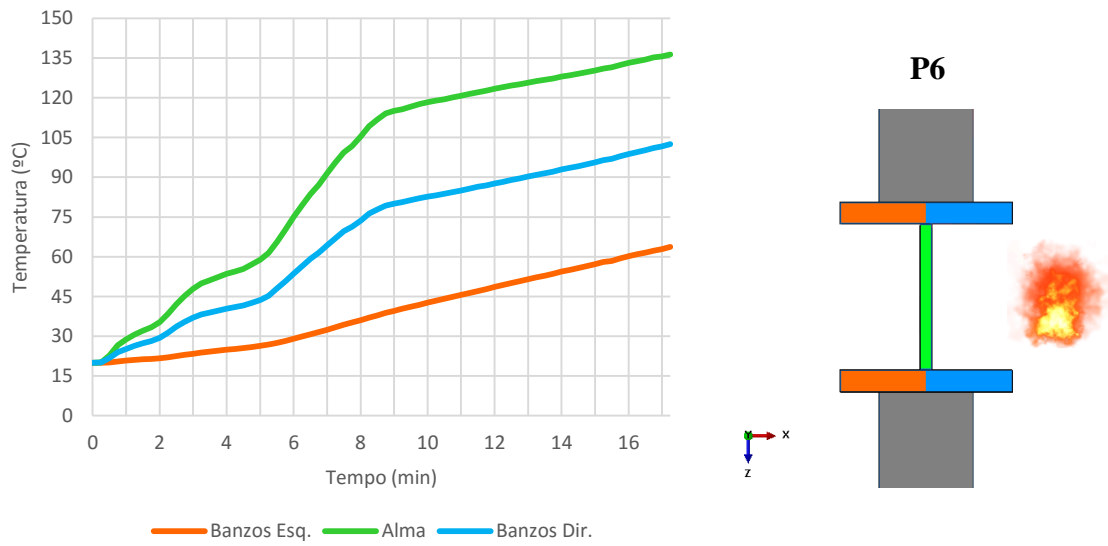


Figura D.3 Temperaturas médias observadas no pilar P6

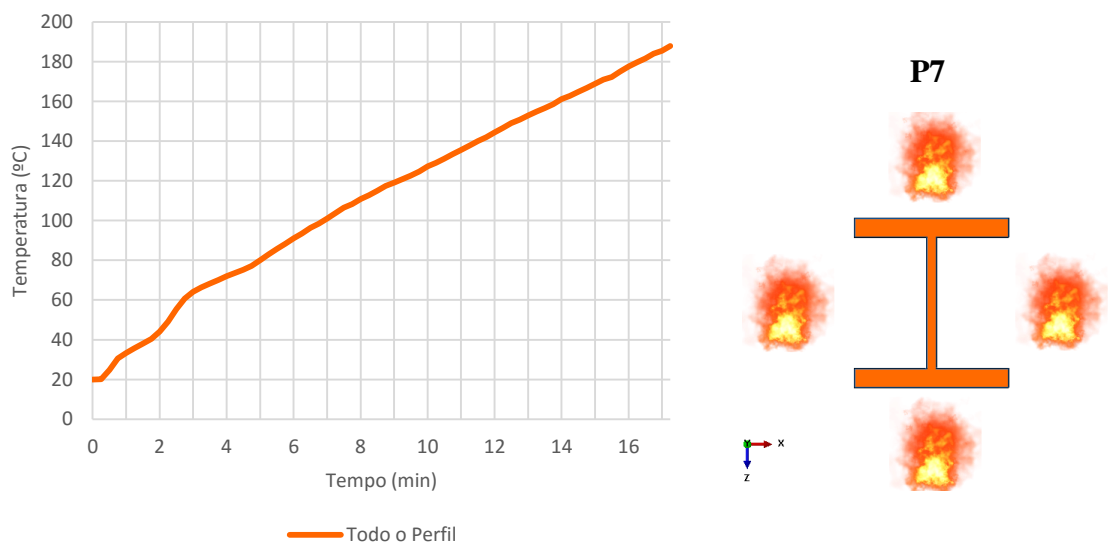


Figura D.4 Temperaturas médias observadas no pilar P7

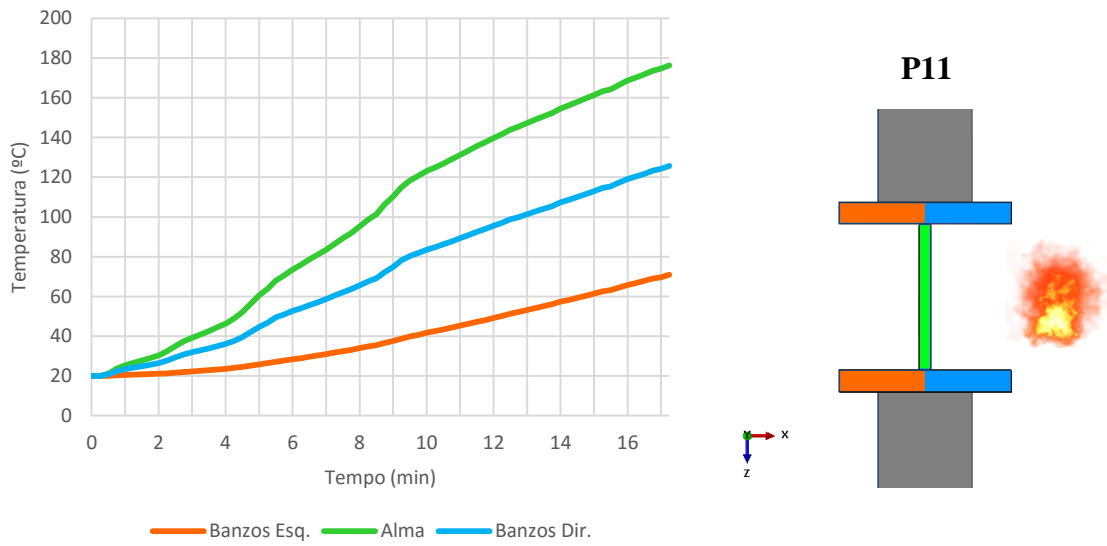


Figura D.5 Temperaturas médias observadas no pilar P11

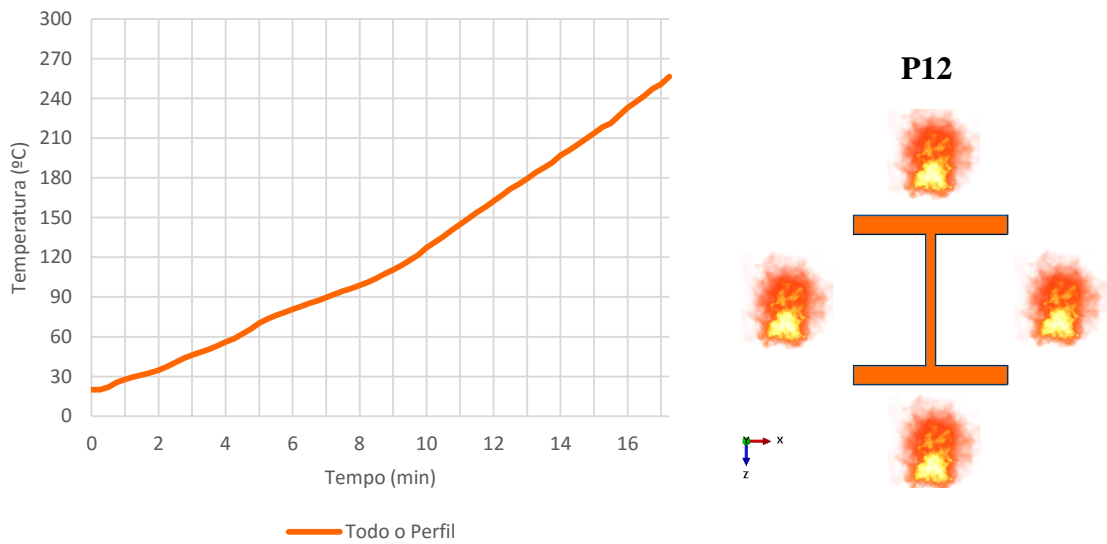


Figura D.6 Temperaturas médias observadas no pilar P12

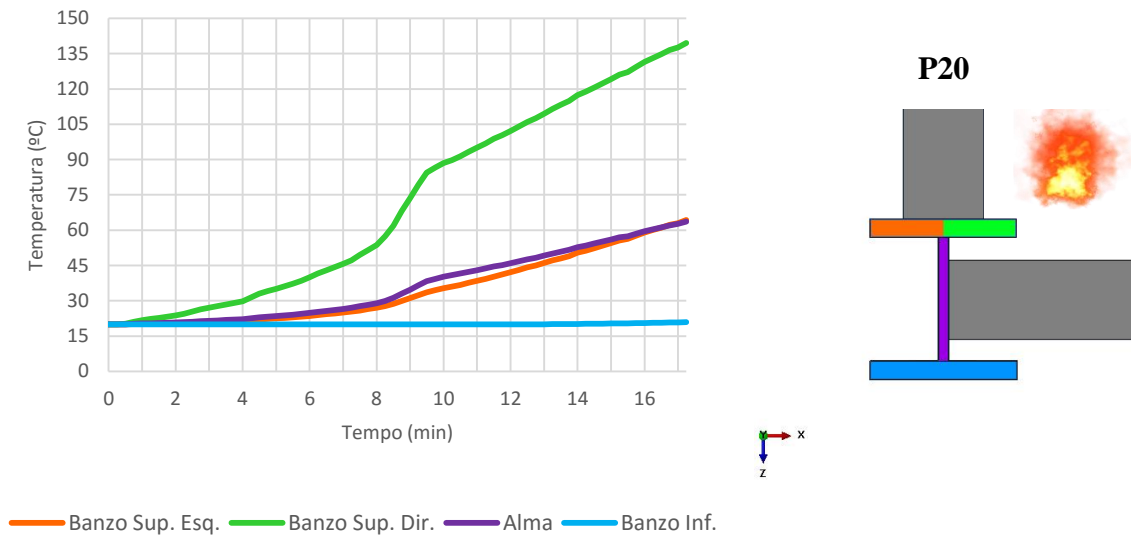


Figura D.7 Temperaturas médias observadas no pilar P20

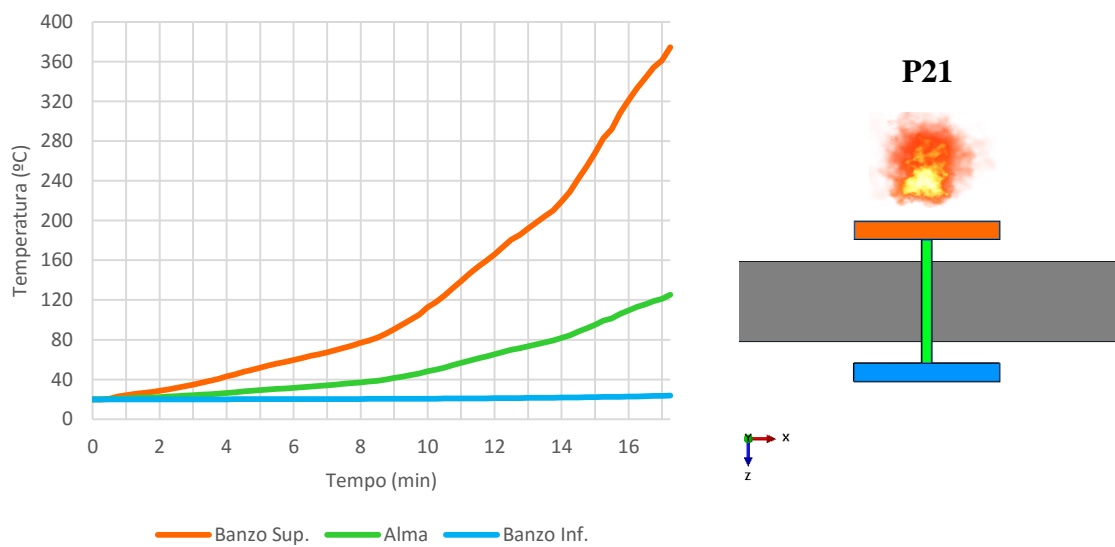


Figura D.8 Temperaturas médias observadas no pilar P21

D.2. Vigas

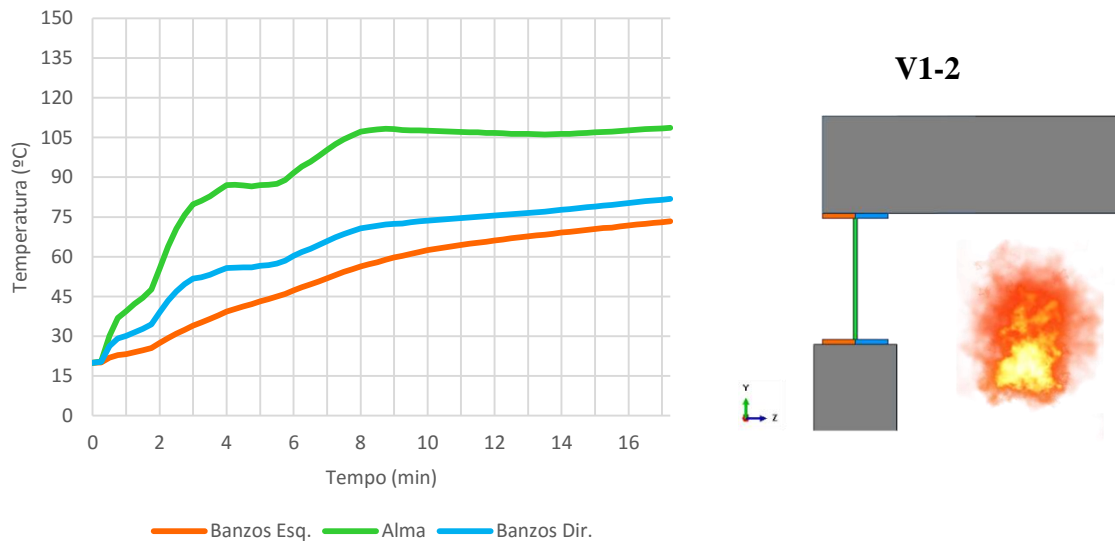


Figura D.9 Temperaturas médias observadas na viga V1-2

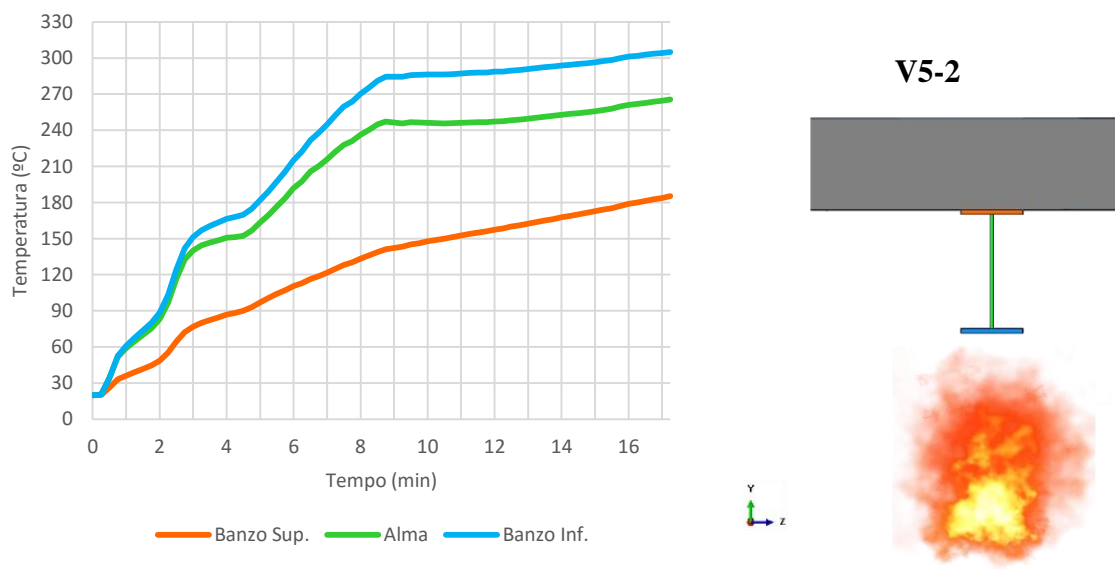


Figura D.10 Temperaturas médias observadas na viga V5-2

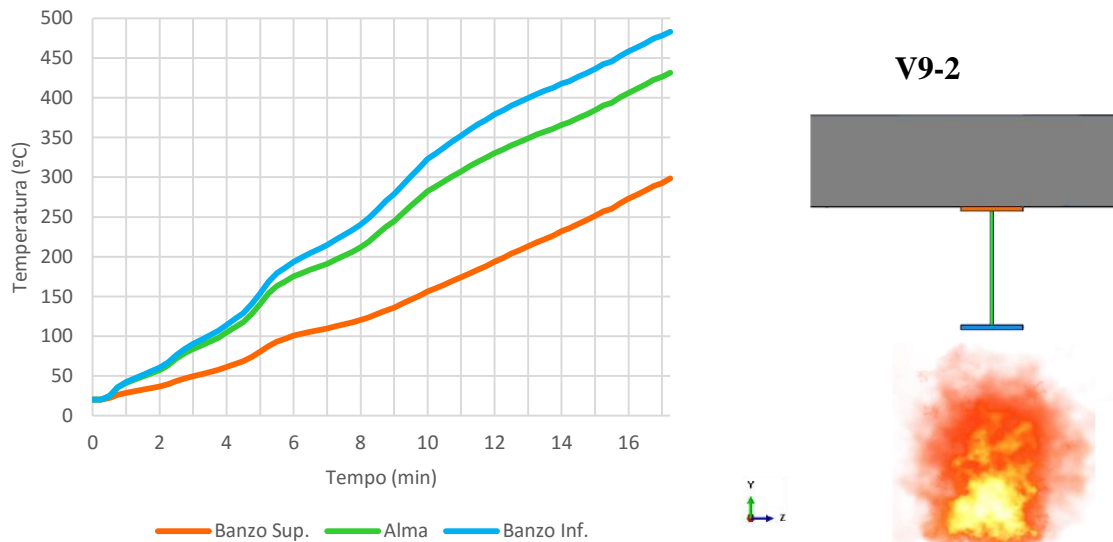


Figura D.11 Temperaturas médias observadas na viga V9-2

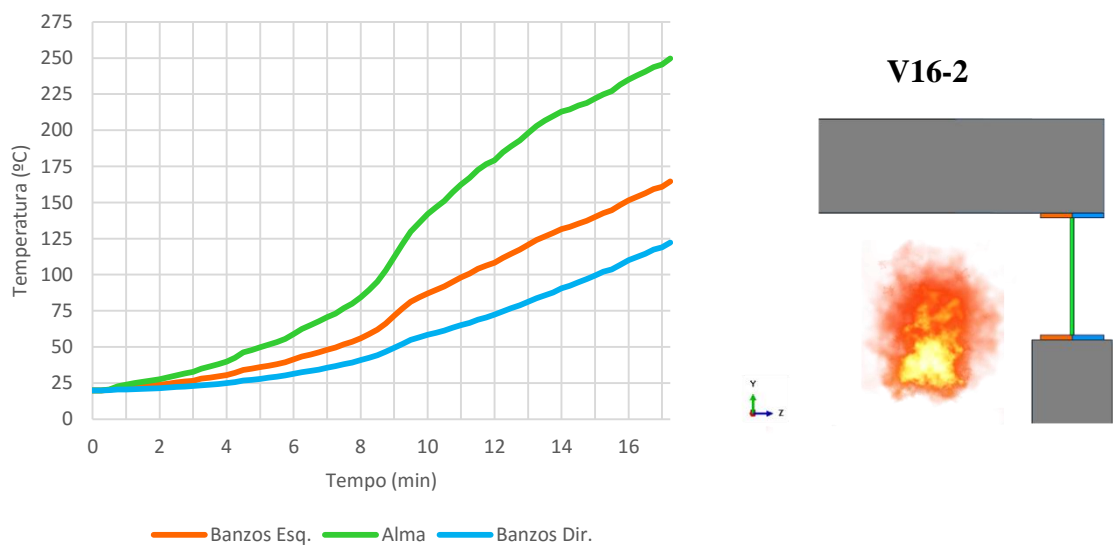


Figura D.12 Temperaturas médias observadas na viga V16-2

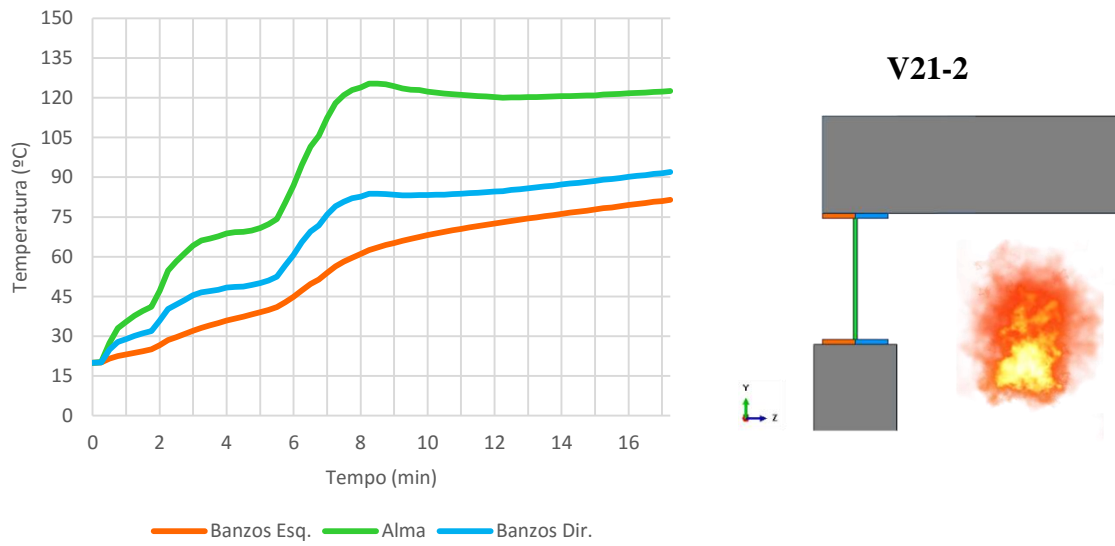


Figura D.13 Temperaturas médias observadas na viga V21-2

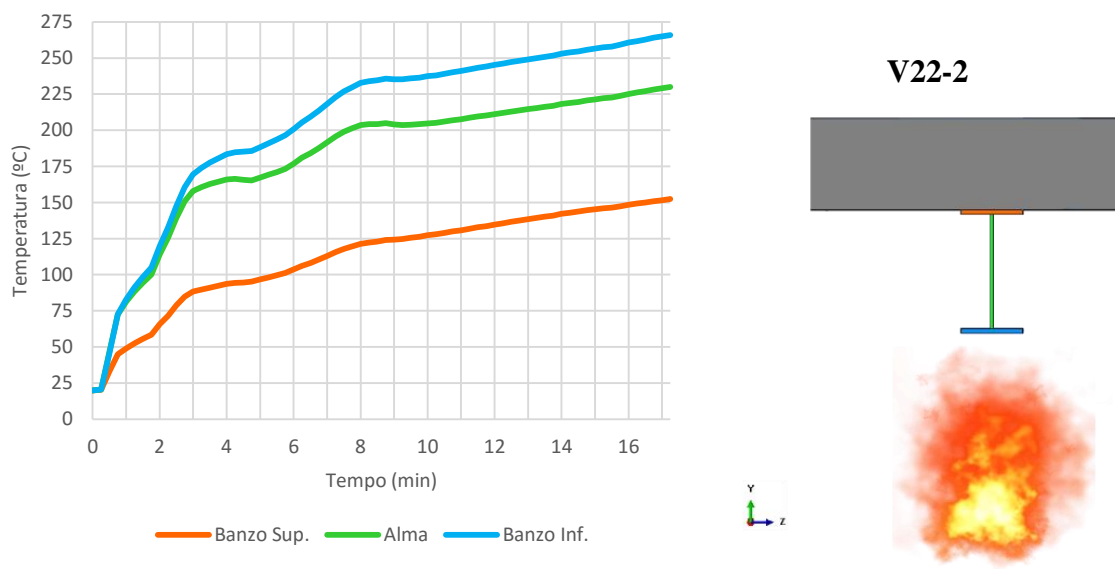


Figura D.14 Temperaturas médias observadas na viga V22-2

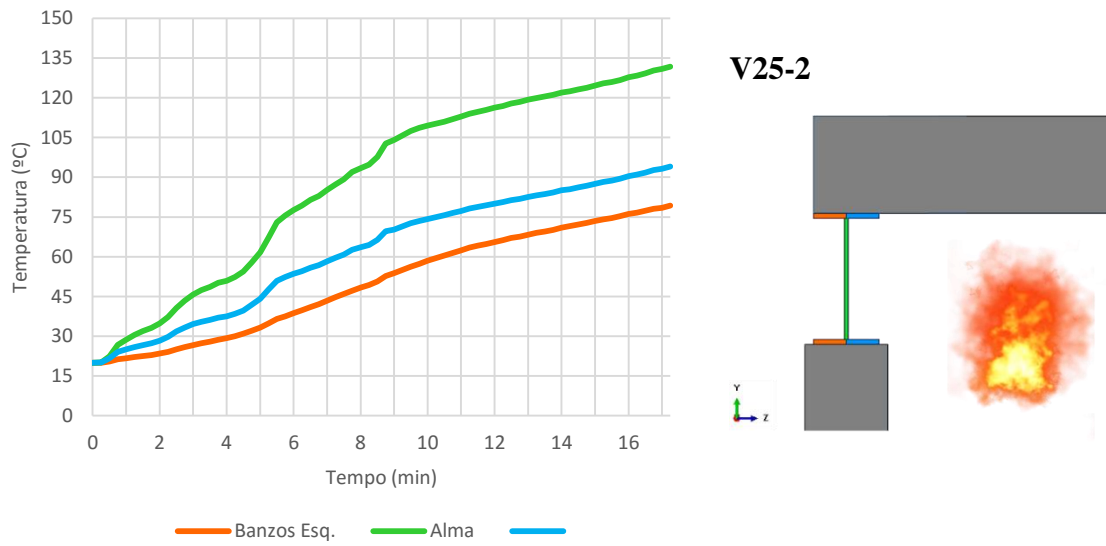


Figura D.15 Temperaturas médias observadas na viga V25-2

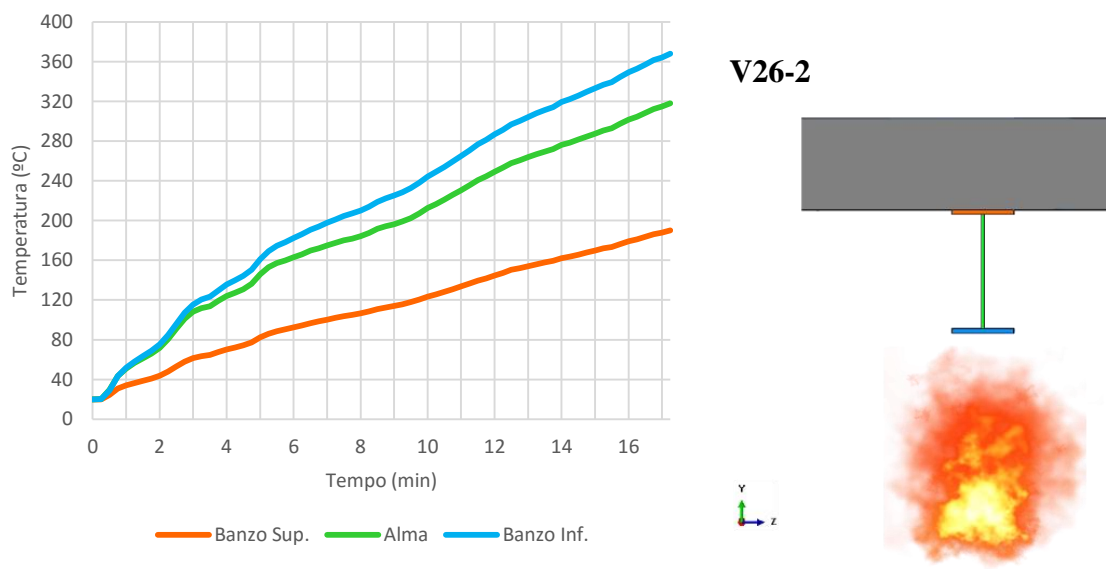


Figura D.16 Temperaturas médias observadas na viga V26-2

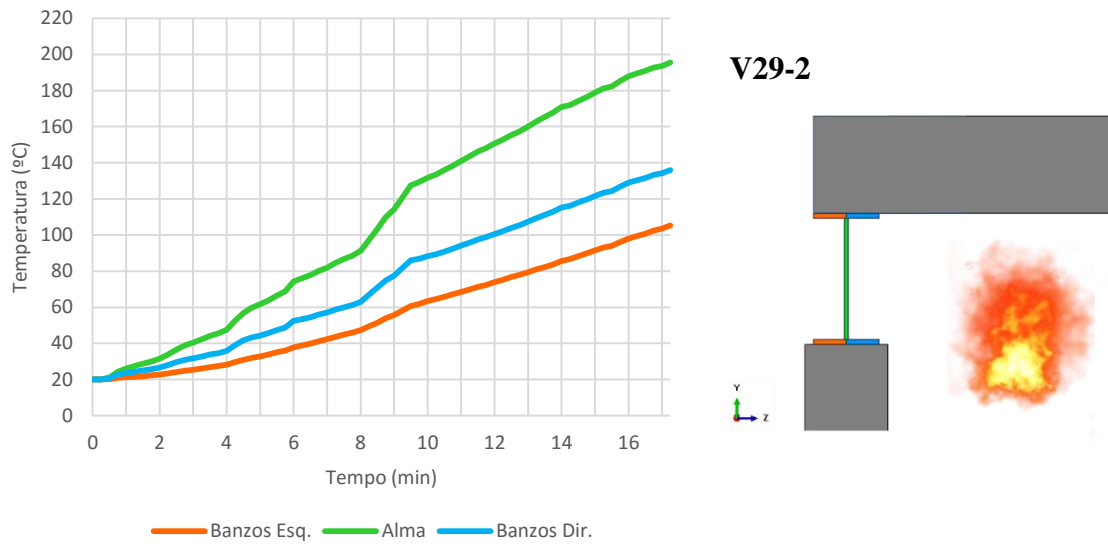


Figura D.17 Temperaturas médias observadas na viga V29-2

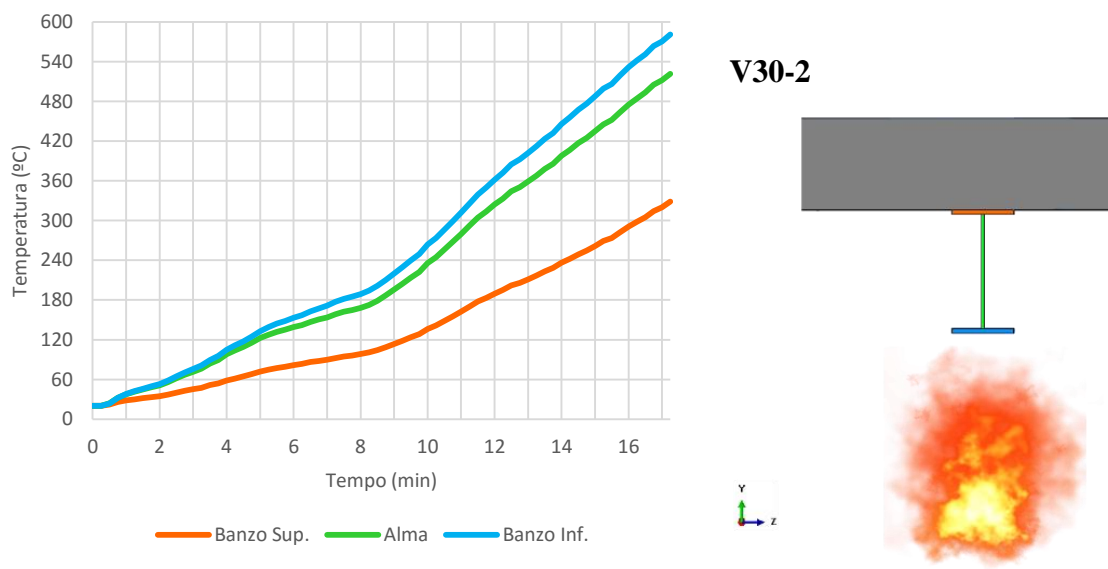


Figura D.18 Temperaturas médias observadas na viga V30-2

ANEXO E. DEFORMAÇÕES

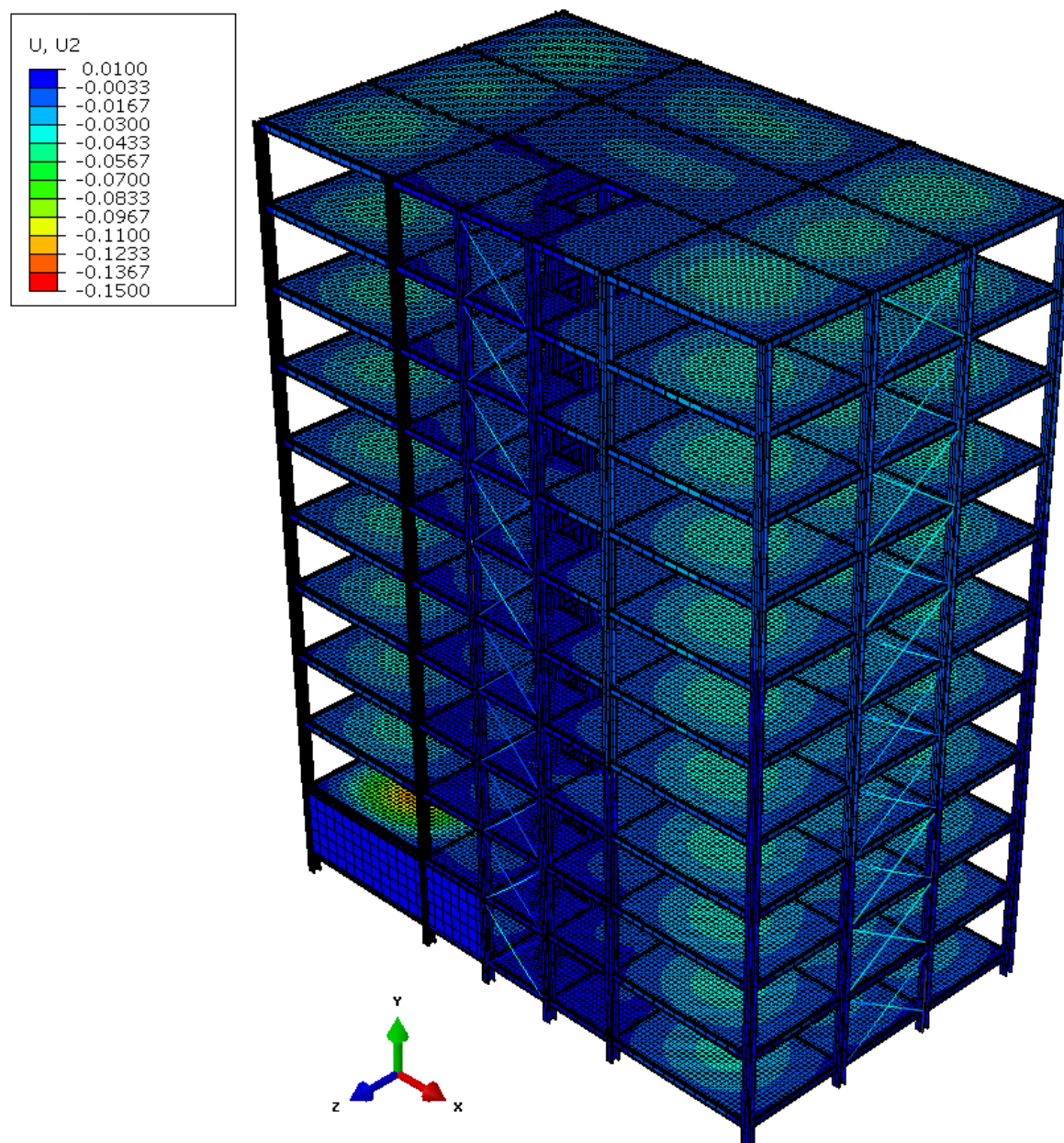


Figura E.1 Deslocamentos verticais (m) em toda a estrutura

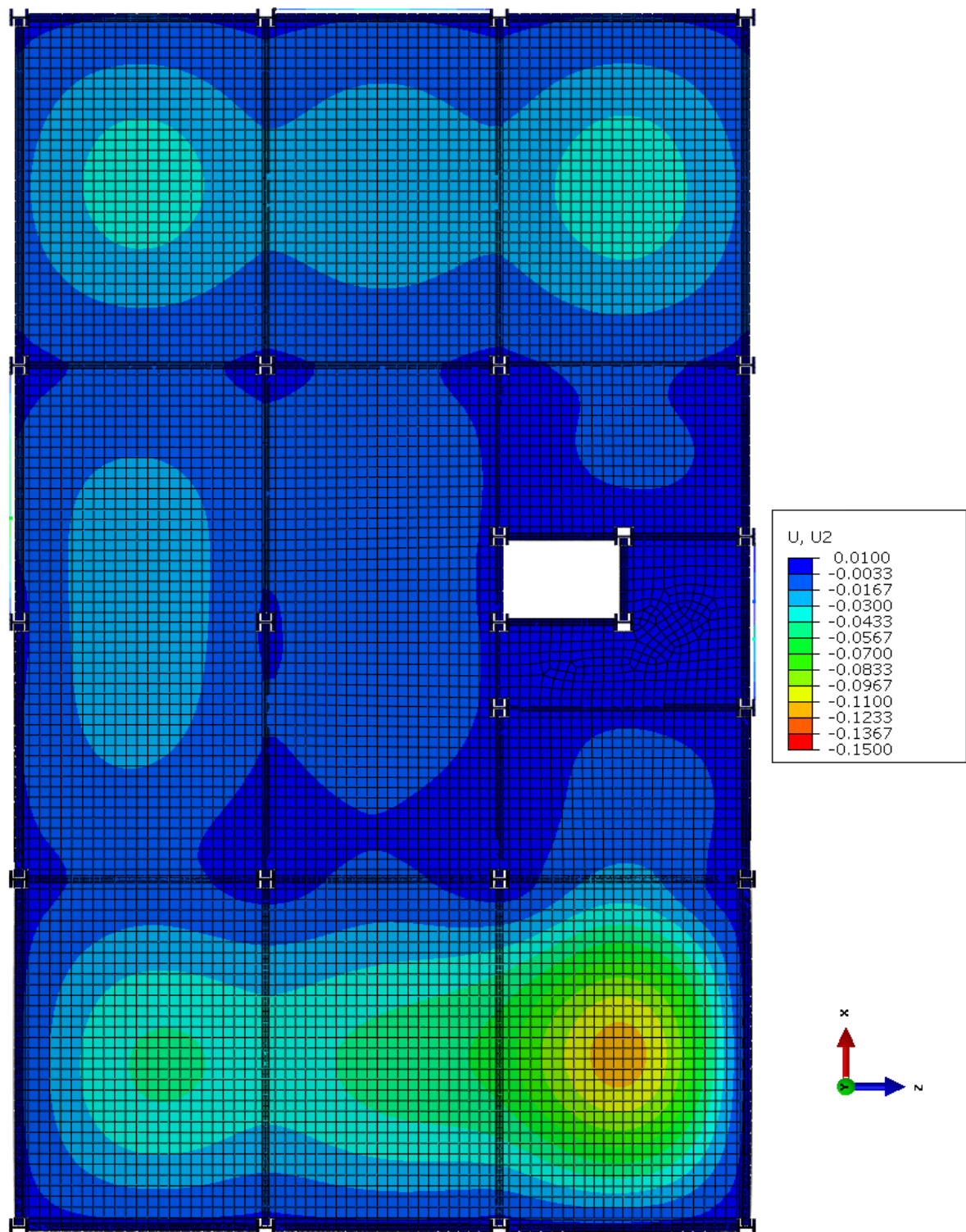


Figura E.2 Flechas (m) na laje L2

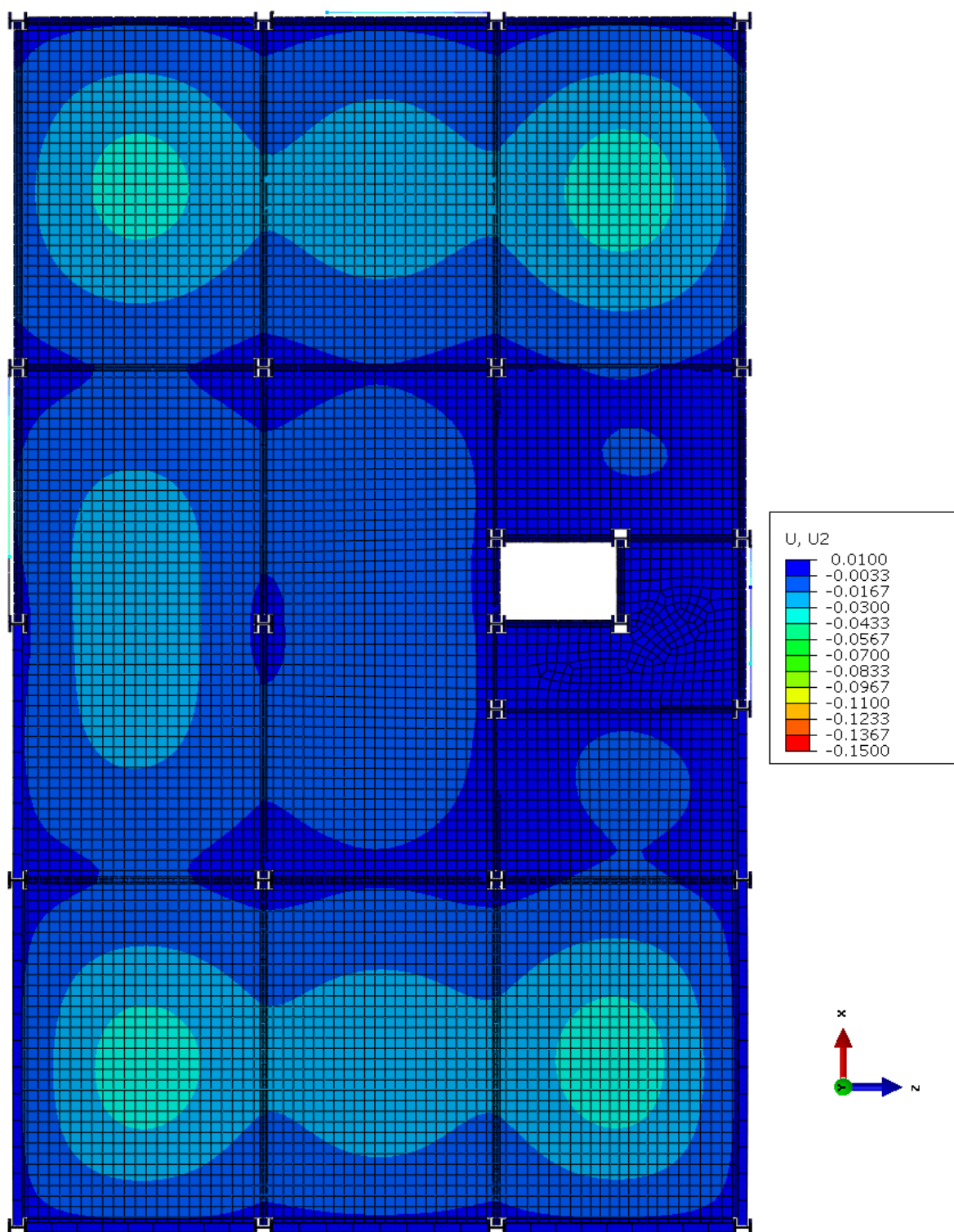


Figura E.3 Flechas (m) na laje L1

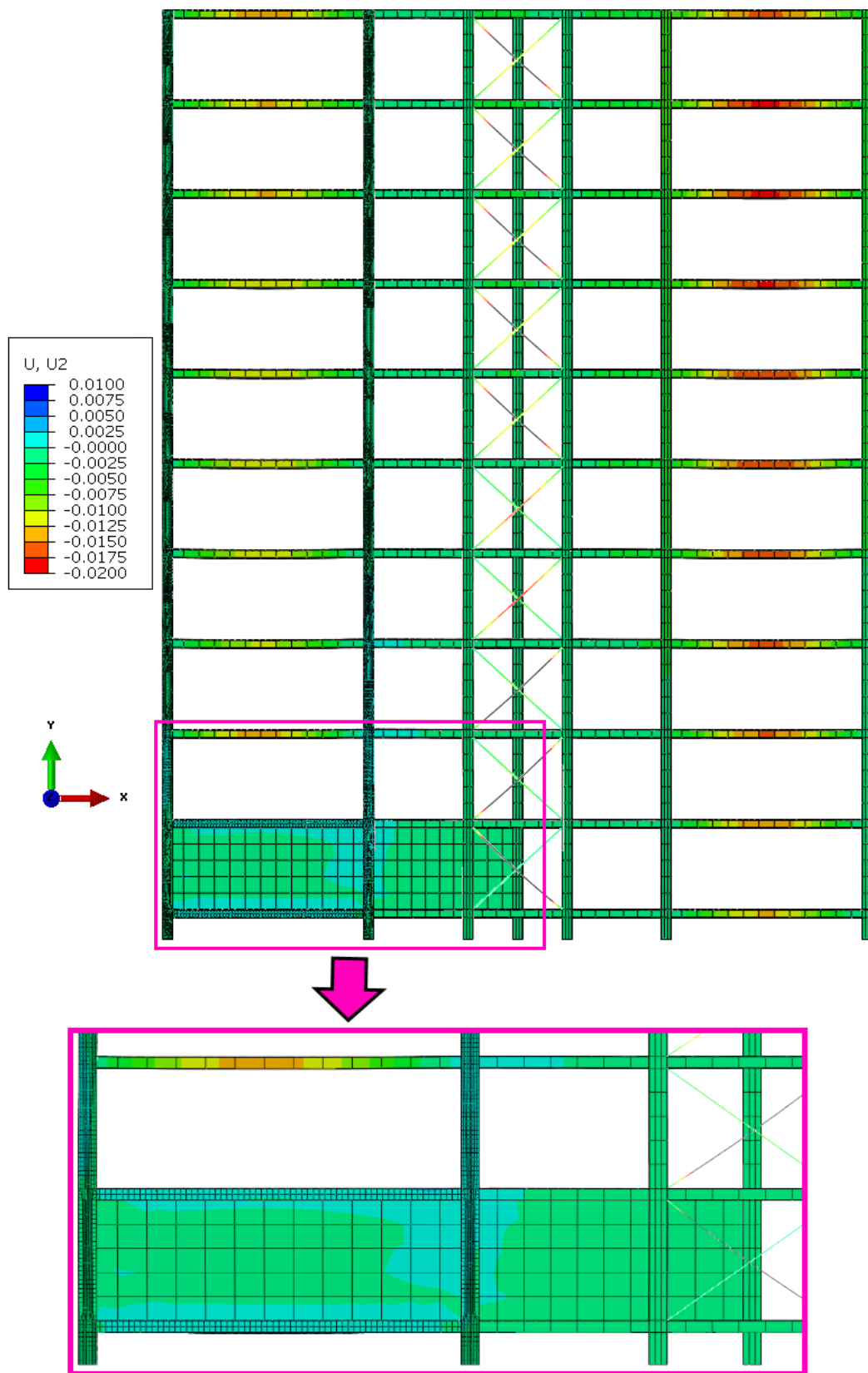


Figura E.4 Deformação vertical (m) nas vigas segundo x

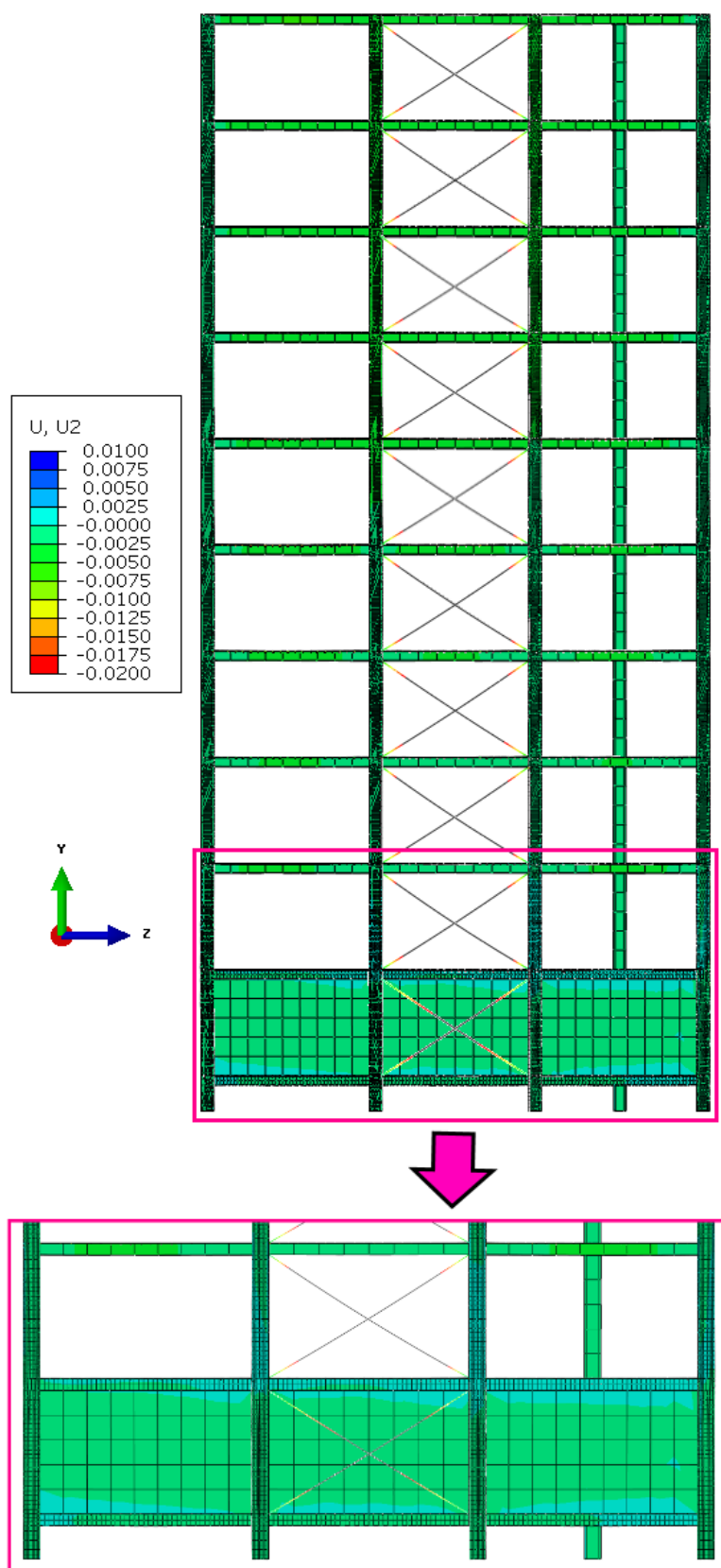


Figura E.5 Deformação vertical (m) nas vigas segundo z

ANEXO F. TENSÕES DE VON MISES

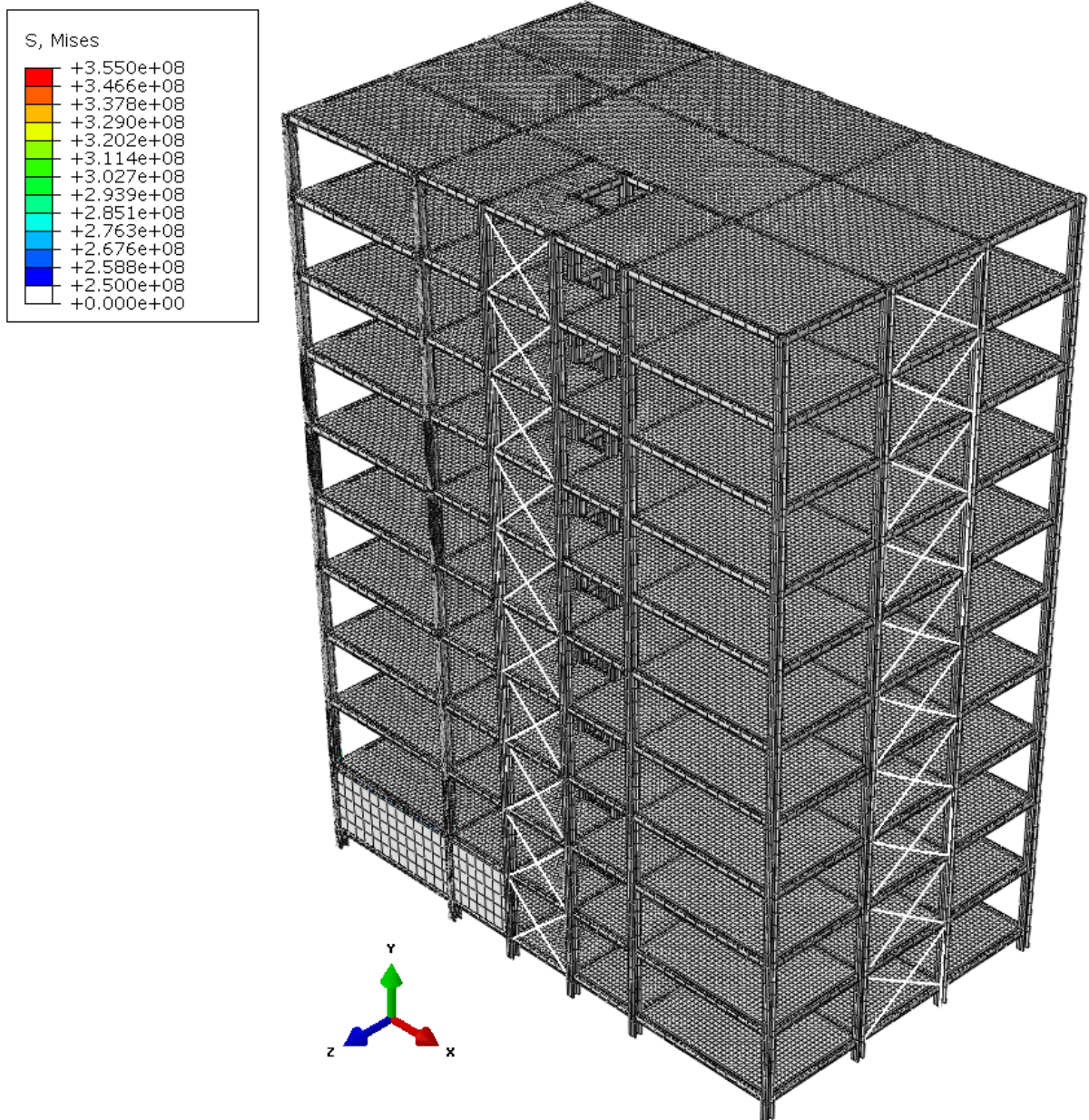


Figura F.1 Tensões de Von Mises (Pa) em toda a estrutura

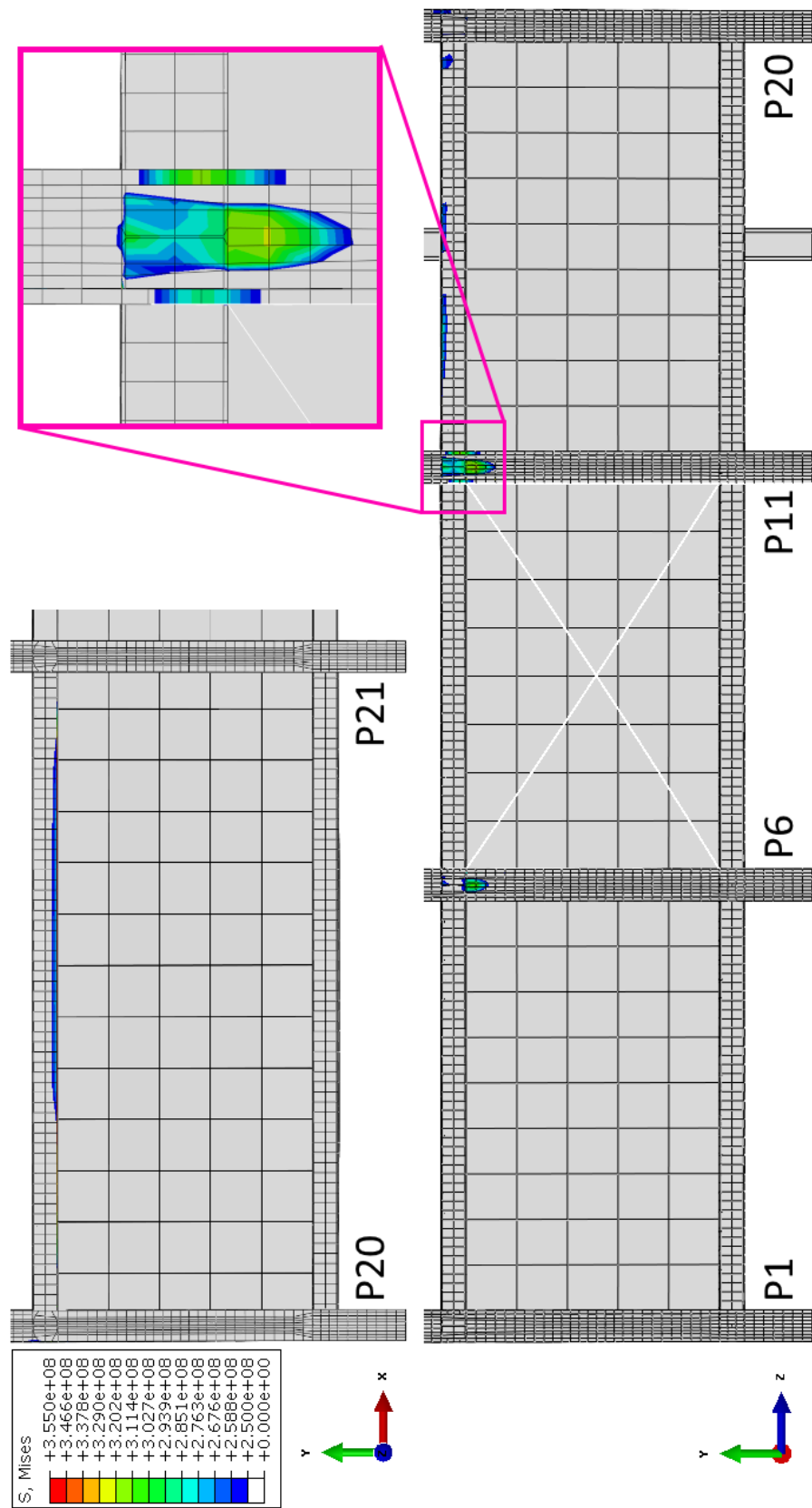


Figura F.2 Tensões de Von Mises (Pa) no exterior do compartimento

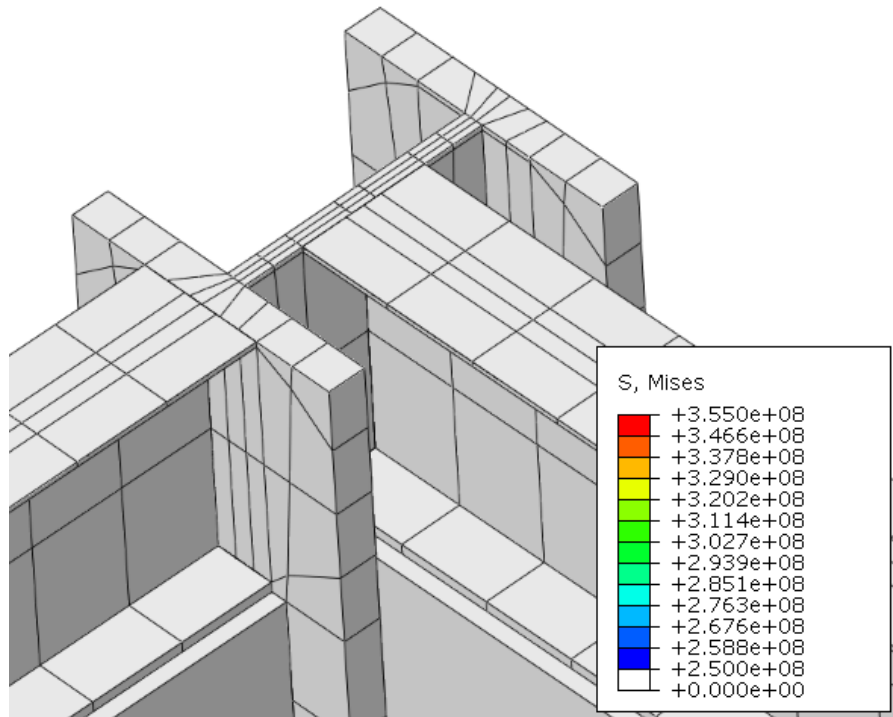


Figura F.3 Tensões de Von Mises (Pa) no interior do compartimento - zona do pilar P1

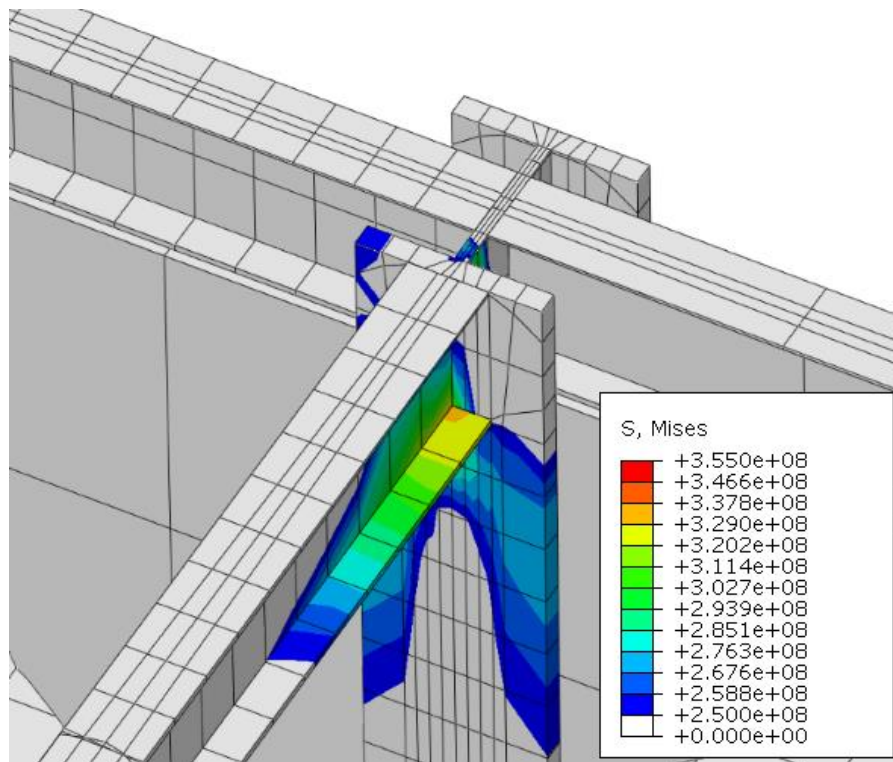


Figura F.4 Tensões de Von Mises (Pa) no interior do compartimento - zona do pilar P2

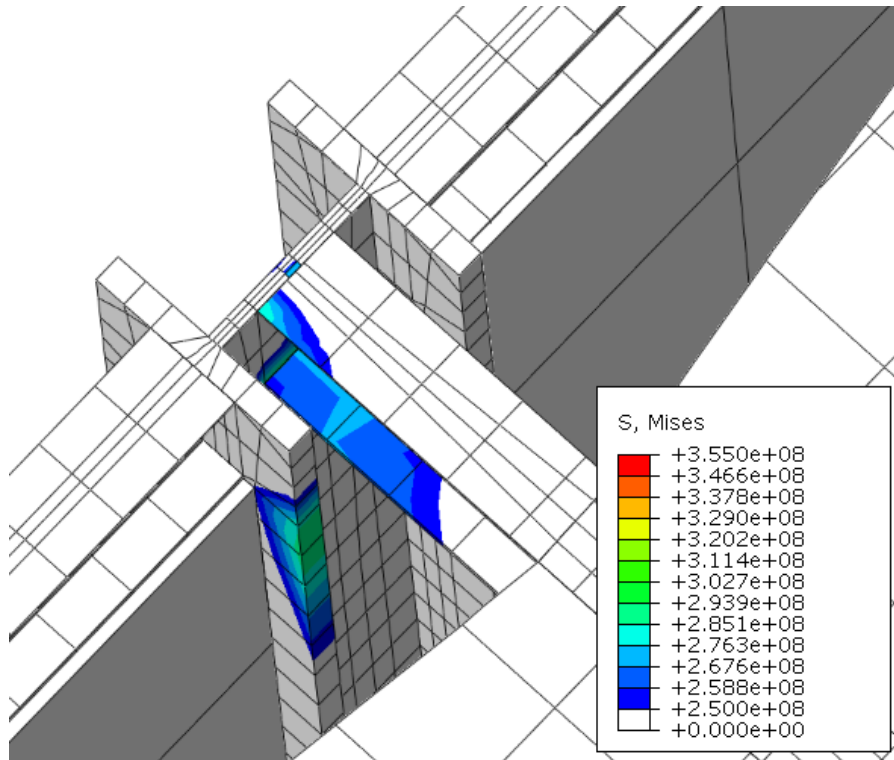


Figura F.5 Tensões de Von Mises (Pa) no interior do compartimento - zona do pilar P6

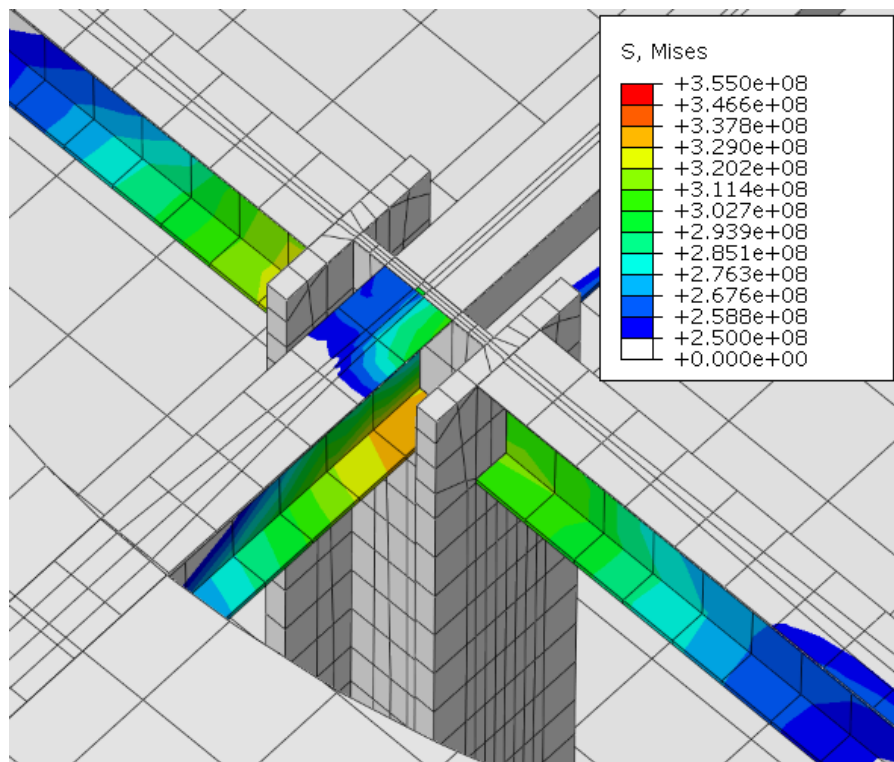


Figura F.6 Tensões de Von Mises (Pa) no interior do compartimento - zona do pilar P7

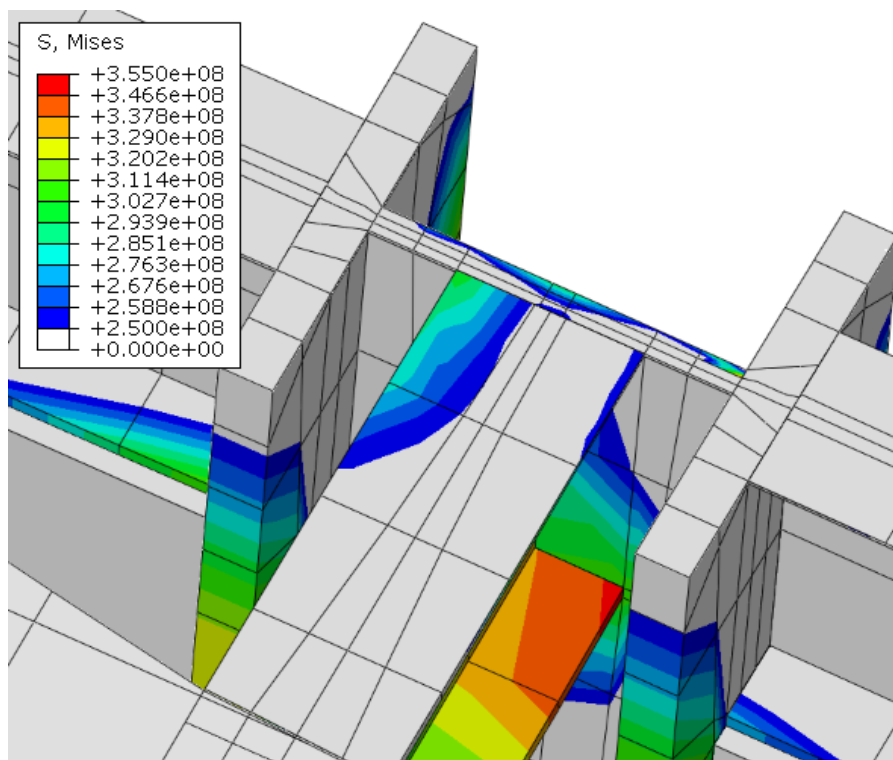


Figura F.7 Tensões de Von Mises (Pa) no interior do compartimento - zona do pilar P11

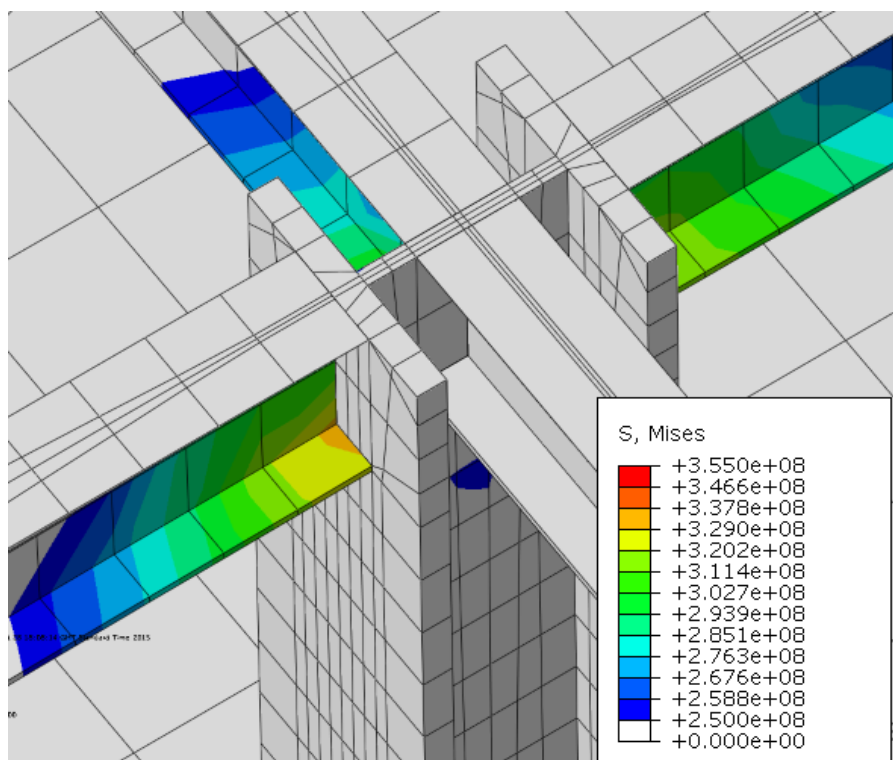


Figura F.8 Tensões de Von Mises (Pa) no interior do compartimento - zona do pilar P12

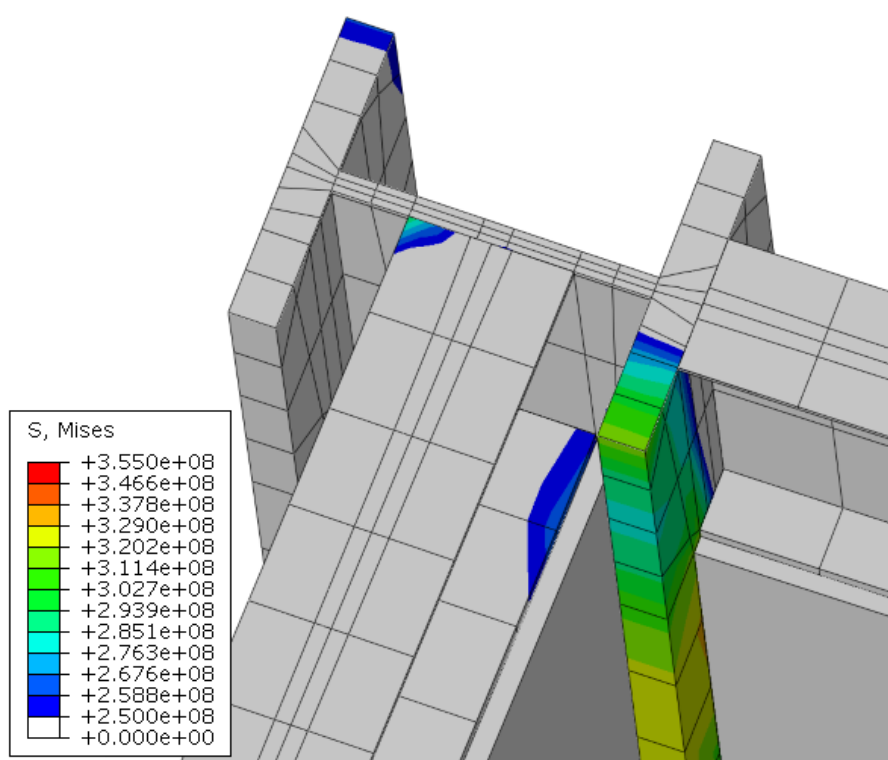


Figura F.9 Tensões de Von Mises (Pa) no interior do compartimento - zona do pilar P20

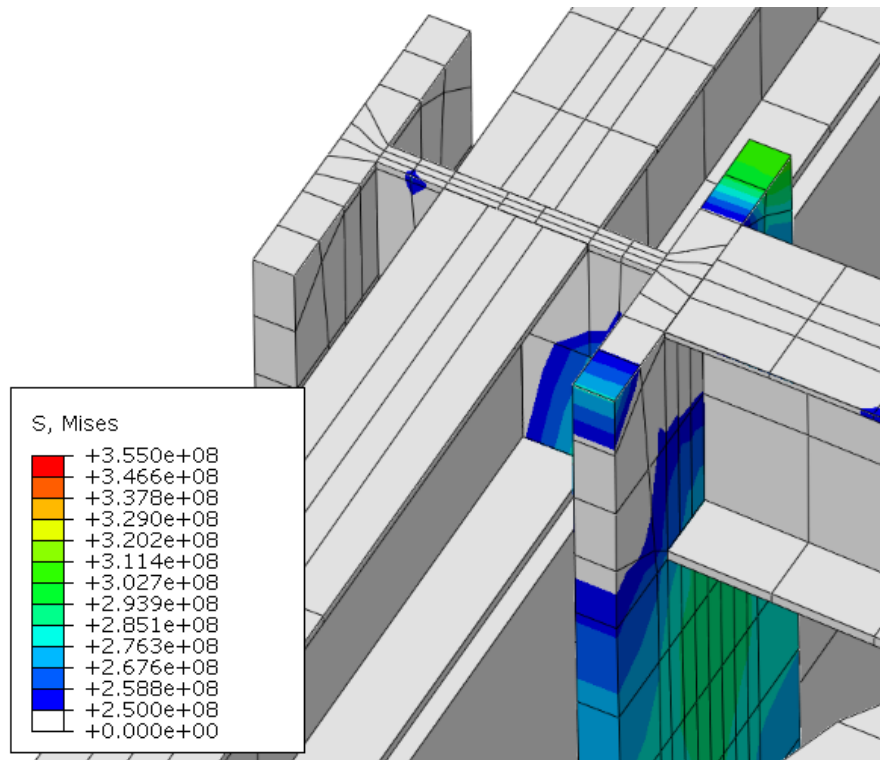


Figura F.10 Tensões de Von Mises (Pa) no interior do compartimento - zona do pilar P21

