

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

**ESTUDO NUMÉRICO DO ISOLAMENTO TÉRMICO DE
PAINÉIS DO SISTEMA *LIGHT STEEL FRAMING* EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Marcos Ferreira de Souza

**Belo Horizonte
2010**

Marcos Ferreira de Souza

**ESTUDO NUMÉRICO DO ISOLAMENTO TÉRMICO DE
PAINÉIS DO SISTEMA *LIGHT STEEL FRAMING* EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Área de concentração: Materiais de Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues

Co-orientador: Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2010

MARCOS FERREIRA DE SOUZA

**ESTUDO NUMÉRICO DO ISOLAMENTO TÉRMICO DE
PAINÉIS DO SISTEMA *LIGHT STEEL FRAMING* EM
SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 26 de agosto de 2010.

Banca Examinadora

Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues (DEES/UFMG)

Co-orientador: Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas (DEES/UFMG)

Examinador: Prof. Dr. Cícero Murta Diniz Starling (DEMC/UFMG)

Examinador: Prof^a. Dr^a. Ana Lydia Castro e Silva (DEES/UFMG)

Examinador: Prof. Dr. Ricardo Hallal Fakury (DEES/UFMG)

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus pela oportunidade que tive para chegar até este ponto e pela força que me dá para sempre continuar.

À minha família que me apoiou nessa jornada com força e paciência, principalmente aos meus pais, Rosário e Marilza, que sempre me incentivaram na busca do sucesso.

À Francielle pelo apoio e entendimento das horas dedicadas nesta dissertação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues pela amizade, ensinamentos, tempo dedicado e por me conceder a oportunidade da realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas pela amizade, apoio e incentivo, indicando os caminhos a serem seguidos.

À Prof^a. Dr^a. Ana Lydia Castro e Silva que dedicou tempo e paciência nos primeiros passos e compreensão da modelagem numérica realizada.

À USIMINAS pela bolsa concedida no início deste trabalho e por valorizar o desenvolvimento de pesquisas nas universidades.

Aos amigos que sempre me apoiaram e me deram forças nos momentos mais difíceis.

Aos professores do DEMC que me ajudaram a construir o conhecimento necessário para concretização deste trabalho e aos meus companheiros de curso pela amizade formada e momentos compartilhados.

Enfim, deixo a minha gratidão a todos que participaram e contribuíram, direta ou indiretamente, na elaboração desta dissertação, pois a concretização da mesma tem as mãos de muitos que buscaram de uma forma ou outra me ajudar.

Dedico este trabalho a Deus e a toda a minha família, em especial, a minha mãe e ao meu pai.

Resumo

O sistema construtivo *Light Steel Framing* vem sendo utilizado em grande escala e sua aplicação é cada vez mais popular no Brasil. Este trabalho apresenta um estudo numérico da transferência de calor em modelos de painéis para este sistema. O estudo analisou a transferência de calor através da espessura da parede quando submetida a elevadas temperaturas, a variação e a distribuição da temperatura e a proteção térmica proporcionada pelos materiais envolvidos. Foram desenvolvidos modelos considerando o perfil metálico e diferentes configurações de placas de fechamento, com suas respectivas condições de contorno e propriedades em situação de incêndio. Alterou-se a configuração dos materiais constituintes de um painel de parede através: do emprego de uma ou duas placas de gesso acartonado em cada lado; do uso ou não de material isolante, lã de rocha, no interior da parede. Diferentes tipos de proteções foram desenvolvidas para o perfil formado a frio utilizando partes de placas de gesso. As análises foram efetuadas a partir do Método dos Elementos Finitos e os modelos foram expostos ao incêndio-padrão e ao incêndio natural. Constatou-se que o acréscimo de uma segunda placa de gesso proporciona uma redução significativa da elevação da temperatura ao longo da espessura da parede, atendendo tempo requerido de resistência ao fogo, TRRF, superior a 120 minutos, com o isolamento térmico. O uso de isolamento no preenchimento da cavidade leva a valores maiores de temperatura no perfil formado a frio, próximo ao lado de exposição ao incêndio, em função da baixa condutividade térmica da lã de rocha. Constatou-se também que as proteções desenvolvidas para o perfil metálico mostraram-se bastantes satisfatórias, proporcionando redução significativa da temperatura.

Palavras-chaves: *Light Steel Framing*, análise numérica, transferência de calor, situação de incêndio

Abstract

The Light Steel Framing building system has been used on a large scale and its application is becoming more popular in Brazil. This work presents a numerical study of heat transfer in models of wall panels for this building system. The study analyzes the heat transfer through different wall thickness when subjected to high temperatures, the variation and distribution of heat, and the thermal insulation afforded by the materials. The models were developed considering the steel profile and different board configurations, with their respective boundary conditions and properties at elevated temperatures. The wall panel's constituting materials were altered by using one or two gypsum boards on each side, and the use, or not, of insulating material, rock wool inside the wall. Different types of protection were developed for cold-formed steel using parts of gypsum board. The samples were analyzed via the finite element method and the models were subjected to standard fire and to natural fire exposure. The study finds that adding a second board makes the temperature increase along the wall section has a significant reduction, making the time required for fire resistance over 120 minutes, with the thermal insulation. The use of insulation to fill the cavity leads to higher values of temperature, in the cold-formed profile on the side exposed to fire, due to the low thermal conductivity of rock wool. The study also finds that the different types of protection developed for the steel profile proved quite satisfactory, leading to a significant temperature reduction.

Keywords: Light Steel Framing, numerical analysis, heat transfer, fire situation

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xvi
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Objetivos	21
1.1.1 Objetivo Geral	21
1.1.2 Objetivos Específicos	21
2 REVISÃO DA LITERATURA	23
2.1 Perfis formados a frio	23
2.1.1 Definição	23
2.2 Sistema <i>Light Steel Framing</i>	25
2.2.1 Características gerais do <i>Light Steel Framing</i>	25
2.2.2 Tipos de perfis utilizados	27
2.2.3 Painéis	27
2.2.4 Pisos	28
2.2.5 Fechamento vertical	30
2.3 Incêndio	31
2.4 Tempo Requerido de Resistência ao fogo (TRRF)	35
2.5 <i>Light Steel Framing</i> em situação de incêndio	36
2.5.1 Considerações gerais do dimensionamento das estruturas em situação de incêndio	36
2.5.2 Síntese de pesquisas e trabalhos já realizados	37
2.5.2.1 ALFAWAKHIRI e SULTAN (2000)	37
2.5.2.2 FENG <i>et al</i> (2002)	41
2.5.2.3 NADER (2002)	44
2.5.2.3.1 Austrália	45
2.5.2.3.2 Canadá	47
2.5.2.3.3 Europa	49
2.5.2.3.4 Estados Unidos da América	50
2.5.2.4 KAITILA (2002)	53
2.5.2.5 BÉNICHOU e SULTAN (2004)	54
2.5.2.6 PATH (2004)	56
2.5.2.7 ALVES (2006)	58
3 ANÁLISE NUMÉRICA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PAREDES DO SISTEMA LSF	60

3.1 Introdução	60
3.2 Modelos Numéricos	61
3.3 Propriedades dos materiais	65
3.4 Validação dos Modelos	67
3.4.1 Modelo sem isolamento na cavidade	67
3.4.2 Modelo com isolamento na cavidade	70
3.5 Observações e conclusões sobre os modelos desenvolvidos	74
4 ESTUDO DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES PARA A PAREDE LSF	75
4.1 Introdução	75
4.2 Modelos Numéricos	75
4.2.1 Modelo 2x2 sem isolamento na cavidade	77
4.2.2 Modelo 2x2 com isolamento na cavidade	80
4.2.3 Modelo 1x1 com proteção 1x no Perfil e sem isolamento na cavidade	82
4.2.4 Modelo 1x1 com proteção 3x no Perfil e sem isolamento na cavidade	84
4.2.5 Modelo 1x1 com proteção 1x no Perfil e com isolamento na cavidade	87
4.2.6 Modelo 1x1 com proteção 3x no Perfil e com isolamento na cavidade	89
4.2.7 Modelo 1x1 com proteção 1x no Perfil, com fechamento lateral e sem isolamento na cavidade	92
4.2.8 Modelo 1x1 com proteção 3x no Perfil, com fechamento lateral e sem isolamento na cavidade	95
4.3 Comparação das diferentes configurações	97
4.3.1 Modelos com placas de gesso acartonado 1x1 e 2x2, sem isolamento na cavidade	97
4.3.2 Modelos com placas de gesso acartonado 1x1 e 2x2, com isolamento na cavidade	99
4.3.3 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 com e sem isolamento na cavidade	101
4.3.4 Modelos com placas de gesso acartonado 2x2 sem isolamento e com isolamento na cavidade	103
4.3.5 Modelos com placas de gesso acartonado 1x1 sem e com proteção no perfil (1x), sem isolamento na cavidade	105
4.3.6 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 sem e com proteção no perfil (3x), sem isolamento na cavidade	108
4.3.7 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 sem e com proteção no perfil (1x), com isolamento na cavidade	110
4.3.8 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 sem e com proteção no perfil (3x), com isolamento na cavidade	113
4.3.9 Modelos com placas de gesso acartonado 2x2 sem proteção no perfil e com placa 1x1 com proteção no perfil (1x), sem isolamento na cavidade	116
4.3.10 Modelos com placas de gesso acartonado 2x2 sem proteção perfil e com placa 1x1 com	118

proteção no perfil (3x), sem isolamento na cavidade	
4.3.11 Modelos com placas de gesso acartonado 2x2 sem proteção perfil e com placa 1x1 com proteção no perfil (1x), com isolamento na cavidade	121
4.3.12 Modelos com placas de gesso acartonado 2x2 sem proteção perfil e com placa 1x1 com proteção no perfil (3x), com isolamento na cavidade	123
4.3.13 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 com proteção no perfil (1x) e com proteção no perfil (3x), sem isolamento na cavidade	125
4.3.14 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 com proteção no perfil (1x) e com proteção no perfil (3x), com isolamento na cavidade	126
4.3.15 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 sem e com proteção no perfil (1x) e proteção lateral, sem isolamento na cavidade	128
4.3.16 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 sem e com proteção no perfil (3x) e proteção lateral, sem isolamento na cavidade	131
4.3.17 Modelos com placas de gesso acartonado 2x2 sem proteção perfil e com placa 1x1 com proteção no perfil (1x) e proteção lateral, sem isolamento na cavidade	133
4.3.18 Modelos com placas de gesso acartonado 2x2 sem proteção perfil e com placa 1x1 com proteção perfil (3x) e proteção lateral, sem isolamento na cavidade	136
4.3.19 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 com proteção perfil (1x + lateral) e com proteção no perfil (3x + lateral), sem isolamento na cavidade	138
4.4 Observações e conclusões sobre os modelos desenvolvidos	141
5 ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA PAREDE LSF EXPOSTA AO INCÊNDIO NATURAL	146
5.1 Introdução	146
5.2 Modelagem do compartimento estudado	147
5.3 Modelos numéricos expostos ao incêndio natural	149
5.3.1 Modelo 1x1 sem isolamento na cavidade	150
5.3.2 Modelo 1x1 com isolamento na cavidade	153
5.3.3 Modelo 2x2 sem isolamento na cavidade	156
5.3.4 Modelo 2x2 com isolamento na cavidade	160
5.4 Observações e conclusões sobre os modelos implementados	164
6 CONCLUSÕES FINAIS	166
6.1 <i>Comentários Gerais e conclusões</i>	166
6.2 <i>Sugestões para trabalhos futuros</i>	170
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	171

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Séries comerciais de perfis estruturais formados a frio.	24
Figura 2.2. Desenho esquemático da estrutura de uma residência em <i>Light Steel Framing</i> .	26
Figura 2.3. P Figura 2.3. Esquema de montagem de painéis.	28
Figura 2.4. Curva de evolução do incêndio.	32
Figura 2.5. Comportamento do incêndio em um compartimento.	33
Figura 2.6. Curva modelo incêndio-padrão.	35
Figura 2.7. Painel estrutural típico dos ensaios.	38
Figura 2.8. Estrutura modelada.	40
Figura 2.9. Modelos ensaiados em um forno a gás.	41
Figura 2.10. Modelo de painel com perfil U (104 x 63 x 1,5 mm) com uma placa de gesso em cada lado, com e sem isolamento na cavidade, após duas horas de teste.	42
Figura 2.11. Variações de configurações de painel.	43
Figura 2.12. Elevação da temperatura na superfície não exposta ao fogo para diferentes configurações com presença de isolamento.	43
Figura 3.1. Detalhes de uma parede LSF sem isolamento na cavidade.	61
Figura 3.2. Parâmetros geométricos do perfil Ue e da placa de gesso acartonado.	61
Figura 3.3. Transferências de calor em uma seção de parede LSF sem e com isolamento na cavidade.	62
Figura 3.4. Malha de elementos finitos adotada.	63
Figura 3.5. Comparativo entre malhas simuladas.	64
Figura 3.6. Pontos de monitoramento no modelo sem isolamento.	67
Figura 3.7. Resultados obtidos por FENG <i>et. al.</i> (2002) e ALVES (2006) para o modelo sem isolamento.	68
Figura 3.8. Temperatura em $^{\circ}C$ no tempo de 7200 segundos para o modelo sem isolamento.	69
Figura 3.9. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.	70
Figura 3.10. Esquema dos pontos de monitoramento para o modelo com isolamento.	70
Figura 3.11. Resultados obtidos por FENG <i>et. al.</i> (2002) e ALVES (2006) para o modelo com isolamento.	71
Figura 3.12. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos para o modelo com isolamento.	73
Figura 3.13. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.	73
Figura 4.1. Modelos desenvolvidos.	77
Figura 4.2. Pontos de monitoramento do modelo sem isolamento com 2 placas de gesso em cada lado da parede.	78
Figura 4.3. Gráfico de elevação da temperatura em pontos do modelo sem isolamento e	78

fechamento com duas placas de gesso.	
Figura 4.4. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos.	79
Figura 4.5. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.	79
Figura 4.6. Pontos de monitoramento do modelo com isolamento e duas placas de gesso em cada lado da parede.	80
Figura 4.7. Gráfico de elevação da temperatura nos pontos monitorados para o modelo com isolamento e fechamento com duas placas de gesso.	80
Figura 4.8. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos.	81
Figura 4.9. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.	81
Figura 4.10. Pontos de monitoramento do modelo sem isolamento, com uma placa de gesso em cada lado da parede e proteção no perfil (1x).	82
Figura 4.11. Gráfico de elevação da temperatura nos pontos monitorados do modelo sem isolamento, fechamento com uma placa de gesso e proteção na mesa do perfil (1x).	82
Figura 4.12. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos.	83
Figura 4.13. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.	84
Figura 4.14. Pontos de monitoramento do modelo sem isolamento, com uma placa de gesso em cada lado da parede e proteção no perfil (3x).	84
Figura 4.15. Gráfico de elevação da temperatura nos pontos monitorados no modelo sem isolamento, fechamento com uma placa de gesso e proteção na mesa do perfil (3x).	85
Figura 4.16. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos.	86
Figura 4.17. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.	86
Figura 4.18. Pontos de monitoramento do modelo sem isolamento, com uma placa de gesso em cada lado da parede e proteção no perfil (1x).	87
Figura 4.19. Gráfico de elevação da temperatura nos pontos monitorados no modelo com isolamento, fechamento com uma placa de gesso e proteção na mesa do perfil (1x).	87
Figura 4.20. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos.	88
Figura 4.21. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.	89
Figura 4.22. Pontos de monitoramento do modelo sem isolamento, com uma placa de gesso em cada lado da parede e proteção no perfil (3x).	89
Figura 4.23. Gráfico de elevação da temperatura nos pontos monitorados do modelo com isolamento, fechamento com uma placa de gesso e proteção na mesa do perfil (3x).	90
Figura 4.24. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos.	91
Figura 4.25. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.	91
Figura 4.26. Pontos de monitoramento do modelo sem isolamento, com uma placa de gesso em cada lado da parede, proteção no perfil (1x) e fechamento lateral.	92
Figura 4.27. Gráfico de elevação da temperatura nos pontos monitorados do modelo sem	93

isolamento, fechamento com uma placa de gesso, proteção na mesa do perfil (1x) e fechamento lateral.	
Figura 4.28. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos.	94
Figura 4.29. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.	94
Figura 4.30. Pontos de monitoramento do modelo sem isolamento, com uma placa de gesso em cada lado da parede, proteção no perfil (3x) e fechamento lateral.	95
Figura 4.31. Gráfico de elevação da temperatura nos pontos monitorados do modelo sem isolamento, fechamento com uma placa de gesso, proteção na mesa do perfil (3x) e fechamento lateral.	95
Figura 4.32. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos.	96
Figura 4.33. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.	96
Figura 4.34. Modelos sem isolamento com fechamento com uma e duas placas de gesso.	97
Figura 4.35. Modelos com isolamento com fechamento com uma e duas placas de gesso.	99
Figura 4.36. Modelos sem e com isolamento, ambos com fechamento com uma placa de gesso.	101
Figura 4.37. Modelos s com duas placas de gesso, sem e com isolamento.	103
Figura 4.38. Modelos sem isolamento com fechamento com uma placa de gesso, com e sem proteção no perfil.	106
Figura 4.39. Modelos sem isolamento com fechamento com uma placa de gesso, com e sem proteção no perfil.	108
Figura 4.40. Modelos com isolamento com fechamento com uma placa de gesso, com e sem proteção no perfil.	111
Figura 4.41. Modelos com isolamento com fechamento com uma placa de gesso, com e sem proteção no perfil.	114
Figura 4.42. Modelos sem isolamento: modelo com fechamento com duas placas de gesso sem proteção no perfil e modelo com fechamento com uma placa de gesso e proteção no perfil (1x).	116
Figura 4.43. Modelos sem isolamento: modelo com fechamento com duas placas de gesso sem proteção no perfil e modelo com fechamento com uma placa de gesso e proteção no perfil (3x).	119
Figura 4.44. Modelos com isolamento: modelo com fechamento com duas placas de gesso sem proteção no perfil e modelo com fechamento com uma placa de gesso e proteção no perfil (1x).	121
Figura 4.45. Modelos com isolamento: modelo com fechamento com duas placas de gesso sem proteção no perfil e modelo com fechamento com uma placa de gesso e proteção no perfil (3x).	123
Figura 4.46. Modelos Sem isolamento com fechamento com uma placa de gesso: modelos com proteção no perfil (1x) e modelo com proteção no perfil (3x).	125
Figura 4.47. Modelos com isolamento: modelo com fechamento com uma placa de gesso e proteção no perfil (1x) e modelo com fechamento com uma placa de gesso e proteção no perfil (3x).	127

Figura 4.48. Modelos sem isolamento com fechamento com uma placa de gesso, com e sem proteção no perfil (1x + lateral).	129
Figura 4.49 Modelos sem isolamento com fechamento com uma placa de gesso, com e sem proteção no perfil (3x + lateral).	131
Figura 4.50. Modelos sem isolamento: modelo com fechamento com duas placas de gesso e modelo com uma placa e com proteção no perfil (1x + lateral).	134
Figura 4.51. Modelos sem isolamento: modelo com fechamento com duas placas de gesso e modelo com uma placa, com proteção no perfil (3x + lateral).	136
Figura 4.52. Modelos Sem isolamento com fechamento com uma placa de gesso: modelo com proteção no perfil (1x + lateral) e modelo com proteção no perfil (3x + lateral).	138
Figura 5.1. <i>Layout</i> de um apartamento padrão popular com dois quartos	147
Figura 5.2. Curvas incêndio: (a) Curva do incêndio natural para a temperatura dos gases em função do tempo, utilizada para o compartimento simulado; (b) comparativo entre as curvas do incêndio natural e padrão.	149
Figura 5.3. Gráfico da variação da temperatura em função do tempo: (a) incêndio natural (b) comparativo entre incêndio padrão e natural.	151
Figura 5.4. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos para o modelo sem isolamento exposto a um incêndio natural.	152
Figura 5.5. Variação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.	153
Figura 5.6. Gráfico da variação da temperatura em função do tempo: (a) incêndio natural (b) comparativo entre incêndio padrão e natural.	154
Figura 5.7. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos para o modelo com isolamento.	155
Figura 5.8. Variação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.	156
Figura 5.9. Gráfico da variação da temperatura em função do tempo: (a) incêndio natural (b) comparativo entre incêndio natural e padrão.	157
Figura 5.10. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos para o modelo sem isolamento.	159
Figura 5.11. Variação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.	159
Figura 5.12. Gráfico da variação da temperatura em função do tempo: (a) incêndio natural (b) comparativo entre incêndio natural e padrão.	160
Figura 5.13. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos para o modelo com isolamento.	162
Figura 5.14. Variação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Resultados obtidos nos ensaios.	40
Tabela 2.2. Exemplos australianos de configurações adotadas com seus respectivos tempos de resistência ao fogo.	46
Tabela 2.3. Tempo de resistência ao fogo para configuração de seção de parede sem função estrutural com uma placa de gesso em cada lado e isolamento na cavidade.	48
Tabela 2.4. Tempo de resistência ao fogo para configuração de seção de parede sem função estrutural com duas placas de gesso em cada lado e isolamento na cavidade.	48
Tabela 2.5. Resistência ao fogo de paredes para diferentes configurações em LSF.	49
Tabela 2.6. Tempo de resistência ao fogo para configuração de seção de parede sem função estrutural.	52
Tabela 2.7. Tempo de resistência ao fogo para configuração de seção de parede com função estrutural.	53
Tabela 2.8. Modelos para configuração de paredes sem funções estruturais (Ensaio realizado pelo <i>Underwriters Laboratories</i>).	57
Tabela 2.9. Modelos para configuração de paredes com funções estruturais.	58
Tabela 3.1. Propriedades Térmicas do gesso.	65
Tabela 3.2. Condutividade Térmica do aço.	66
Tabela 3.3. Calor Específico do aço.	66
Tabela 3.4. Propriedades térmicas da Lã de rocha.	67
Tabela 4.1. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	99
Tabela 4.2. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	101
Tabela 4.3. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	103
Tabela 4.4. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	105
Tabela 4.5. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	107
Tabela 4.6. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	110
Tabela 4.7. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	113
Tabela 4.8. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	115
Tabela 4.9. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	118
Tabela 4.10. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	120
Tabela 4.11. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	123
Tabela 4.12. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	124
Tabela 4.13. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	126
Tabela 4.14. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	128
Tabela 4.15. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	130

Tabela 4.16. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	133
Tabela 4.17. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	135
Tabela 4.18. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	138
Tabela 4.19. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.	140
Tabela 4.20. Resumo dos resultados encontrados nos modelos submetidos ao incêndio padrão.	142
Tabela 5.1. Resumo comparativo dos resultados encontrados nos modelos submetidos ao incêndio natural e ao incêndio-padrão.	165

1

INTRODUÇÃO

Os perfis produzidos pelo processo de conformação a frio (em temperatura ambiente) de chapas finas de aço, com espessura nominal com valores de 0,43 a 6,3 mm, são denominados de Perfis Formados a Frio (PFF) e vêm atualmente apresentando um rápido crescimento do seu uso no setor da construção civil no Brasil. Isso ocorre devido à variedade de aplicações para seu produto final, obtendo-se soluções esbeltas e eficientes, por exemplo, nas estruturas de cobertura de galpões e de edificações residenciais com até 7 pavimentos, além do uso em escoramentos, em revestimento e esquadrias para fachadas, dentre outros (RODRIGUES, 1997).

Essas várias opções de aplicação são possíveis em função das diversas formas das seções transversais que podem ser obtidas, tais como perfis do tipo U, U enrijecido, Z, Z enrijecido, cartola, cantoneiras, tubos, além das seções compostas, formadas pela união dos perfis citados anteriormente e, também, as seções onduladas ou trapezoidais utilizadas em telhas.

O crescimento populacional, os avanços tecnológicos e a busca pela sustentabilidade originaram uma procura por sistemas construtivos que valorizem a produtividade, com pouco desperdício e que atendam a uma demanda crescente. Dentro deste contexto, o sistema construtivo *Light Steel Framing* (LSF) vem ganhando espaço. O LSF é constituído por perfis formados a frio galvanizados, que compõem os reticulados dos painéis estruturais e não-estruturais, bem como, as vigas, tesouras e outros componentes (RODRIGUES, 2006).

Em vários países do mundo, como por exemplo, Estados Unidos, Inglaterra e Austrália, o LSF tem sido utilizado em grande escala há mais de trinta anos. No Brasil, seu emprego ainda é modesto, encontrando-se alguns casos nos Estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro.

Basicamente, a estrutura do LSF é composta de painéis de paredes, pisos e sistema de cobertura, que condicionam integridade estrutural para a edificação, resistindo aos seus esforços atuantes. Os fundamentos deste sistema são: estrutura em painéis, modulação (tanto dos elementos estruturais, como dos componentes utilizados no fechamento e no revestimento) e estrutura alinhada. No LSF a estrutura metálica nunca está aparente, pois os perfis estruturais que constituem as paredes, pisos e tetos se encontram encobertos pelos materiais de fechamento, gerando um produto final visualmente muito próximo ao da construção convencional. O sistema de gesso acartonado (*Drywall*) é construtivamente similar ao sistema LSF, porém, tem apenas função de vedação.

Como o uso de perfis formados a frio nas estruturas de edifícios vem se tornando cada vez mais comum, inclusive nos prédios residenciais em LSF, surge a importância de se analisar o comportamento desse sistema, em situação de incêndio, com o objetivo de se evitar a perda de vidas e de preservar o patrimônio, de forma a atender aos requisitos da norma ABNT NBR 14432:2001, por exemplo.

Desempenhando ou não funções estruturais, os painéis do LSF devem atender a critérios de resistência ao fogo, isolamento térmico e estanqueidade. Para tal demanda, é necessário um estudo dos perfis formados a frio e dos materiais utilizados nesses painéis de vedação, incluindo o material de isolamento acústico e térmico.

Alterando a configuração dos materiais em uma parede do sistema construtivo LSF, por exemplo: através do emprego de uma ou duas placas de gesso acartonado em cada lado; do uso ou não de material isolante no interior do painel; e da utilização de trechos de placas como proteção para o PFF, pode-se constatar variações na proteção térmica proporcionada,

com ganhos para determinadas configurações no tempo de resistência ao fogo, no que se refere ao isolamento térmico e temperatura alcançada nos perfis estruturais.

Dentro dessa ótica, foi elaborado o presente trabalho, visando à análise dos materiais constituintes do sistema construtivo LSF e das diferentes configurações para os mesmos em uma seção de parede exposta a uma situação de incêndio, em um lado, por meio de simulação numérica de transferência de calor utilizando o método dos elementos finitos (MEF), com auxílio do programa computacional ABAQUS (*SIMULIA CORP.*, 2007).

O sistema LSF já constitui uma solução tecnicamente viável, de custo reduzido, funcional e durável. Torna-se ainda melhor com a garantia de segurança contra incêndio. Assim, estudos avançados, especialmente, em elevadas temperaturas poderão agregar valor a essa solução construtiva, contribuindo com sua divulgação e emprego no Brasil, podendo contribuir com a redução do grande déficit habitacional presente no país.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da presente pesquisa é realizar um estudo numérico, com auxílio de programa computacional, sobre diferentes configurações de fechamento e de proteção térmica para o Perfil Formado a Frio de uma seção de painel de parede do sistema construtivo *Light Steel Framing* em situação de incêndio, procurando avaliar a variação e a distribuição da temperatura no decorrer do tempo e a proteção térmica proporcionada pelos materiais envolvidos.

Devido ao grande emprego de placas de gesso acartonado nos painéis de paredes do sistema LSF e, considerando as restrições de dados sobre as propriedades térmicas para as placas *Oriented Strand Board* (OSB) e cimentícias em situação de incêndio, o presente trabalho apresenta estudos apenas com as placas de gesso acartonado e utilização de lã de rocha como material de isolamento.

1.1.2 Objetivos Específicos

Visando à conclusão da pesquisa proposta e à compreensão dos resultados encontrados, o trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Desenvolver modelos numéricos computacionais capazes de simular o comportamento de materiais presentes nos painéis do sistema LSF expostos a elevadas temperaturas;

- ✓ Compreender os processos de transferência de calor ao longo de uma determinada seção de parede do sistema LSF em situação de incêndio, assim como a variação e a distribuição de temperatura que ocorrem;
- ✓ Propor configurações alternativas de fechamento para o painel de parede, verificando seu comportamento frente ao fogo;
- ✓ Comparar os modelos desenvolvidos e analisá-los quanto à proteção térmica, proporcionada ao perfil e ao isolamento térmico da parede.

2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Perfis formados a frio

2.1.1 Definição

O perfil estrutural de aço formado a frio (PFF) pode ser obtido por dobramento, em prensa dobradeira, ou por conformação contínua, através de um conjunto de roletes onde a seção transversal é formada gradualmente, a partir da passagem da tira de aço pelos roletes, devidamente ajustados. Ambos os processos são efetuados em temperatura ambiente.

Os PFF possuem processos de fabricação e comportamento estrutural diferenciados dos perfis soldados ou laminados; por isso, seu projeto deve estar em conformidade com as normas ABNT NBR 14762:2001 e ABNT NBR 6355:2003, sendo a primeira de dimensionamento e a segunda relativa à padronização dos perfis das séries comerciais.

A figura 2.1 apresenta as séries comerciais de perfis estruturais de aço formados a frio especificados pela norma ABNT NBR 6355:2003.

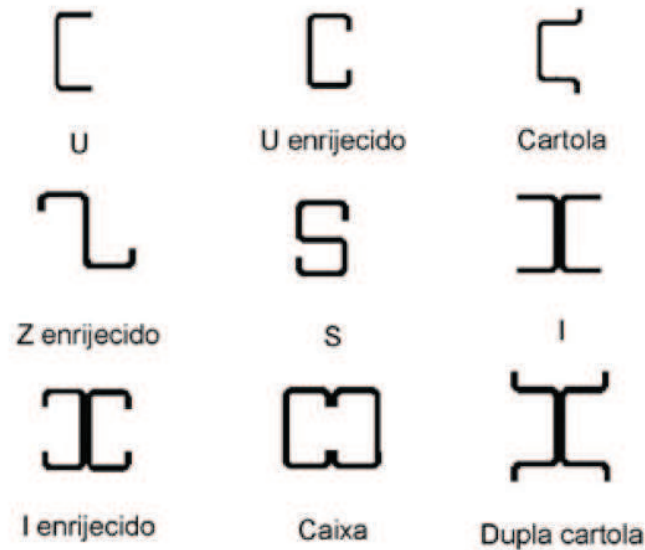


Figura 2.1. Séries comerciais de perfis estruturais formados a frio (RODRIGUES, 2006).

Essas seções podem atuar isoladamente ou de forma composta como, por exemplo, o perfil caixa, o dupla cartola e o I enrijecido, ilustrados na figura 2.1. Esses perfis permitem o encontro e a estabilização de paredes e a redução do fator de massividade de sua seção transversal, que é fundamental para um menor aquecimento do aço em situação de incêndio.

Devido à grande variedade das formas da seção transversal, os PFF estão sendo utilizados, cada vez mais, no Brasil. RODRIGUES (1997) cita algumas de suas aplicações: coberturas de galpões em geral, edificações residenciais, formas para concretagem, andaimes e escoramentos, defensas rodoviárias, elementos de fixação de tapamentos laterais de galpões, estruturas para sistemas construtivos em *Light Steel Framing* e painéis de fechamento em gesso acartonado (tipo sistema *Dry-Wall*), estruturas de produtos para o setor agropecuário (cercas, porteiras, etc); armações para forro, pontilhões metálicos e guarda-corpo.

2.2 Sistema *Light Steel Framing*

2.2.1 Características gerais do *Light Steel Framing*

Existem dois conceitos básicos empregados ao Sistema *Light Steel Framing* (LSF). O primeiro é o *Frame*, no qual se tem o esqueleto estrutural projetado para dar forma e suportar a edificação, sendo composto por elementos leves (perfis formados a frio) e o segundo é o *Framing*, que é o processo de unir esses elementos e montar os painéis feitos com eles. Deste modo, encontra-se na bibliografia internacional os termos *Light Steel Frame Housing* na Europa e *Residential Cold-Formed Steel Framing* nos Estados Unidos, referindo-se às residências construídas com painéis estruturados com perfis de aços revestidos formados a frio (RODRIGUES, 2006).

O *Framing* teve início entre 1810 e 1860, época em que os Estados Unidos começavam a expansão de seu território para o Oeste e quando a migração chegou à costa do Oceano Pacífico. Naquela época, a população americana aumentou muito. Para solucionar a demanda por habitações, foi necessário utilizar materiais disponíveis no local (madeira) juntamente com os conceitos de praticidade, velocidade e produtividade originados na Revolução Industrial (*Wood Framing*).

Com a madeira substituída pelo aço como material principal no *Framing*, a utilização do *Steel Framing* em edifícios residenciais teve início somente após a Segunda Guerra Mundial. A figura 2.2 ilustra o desenho esquemático de uma residência em LSF.

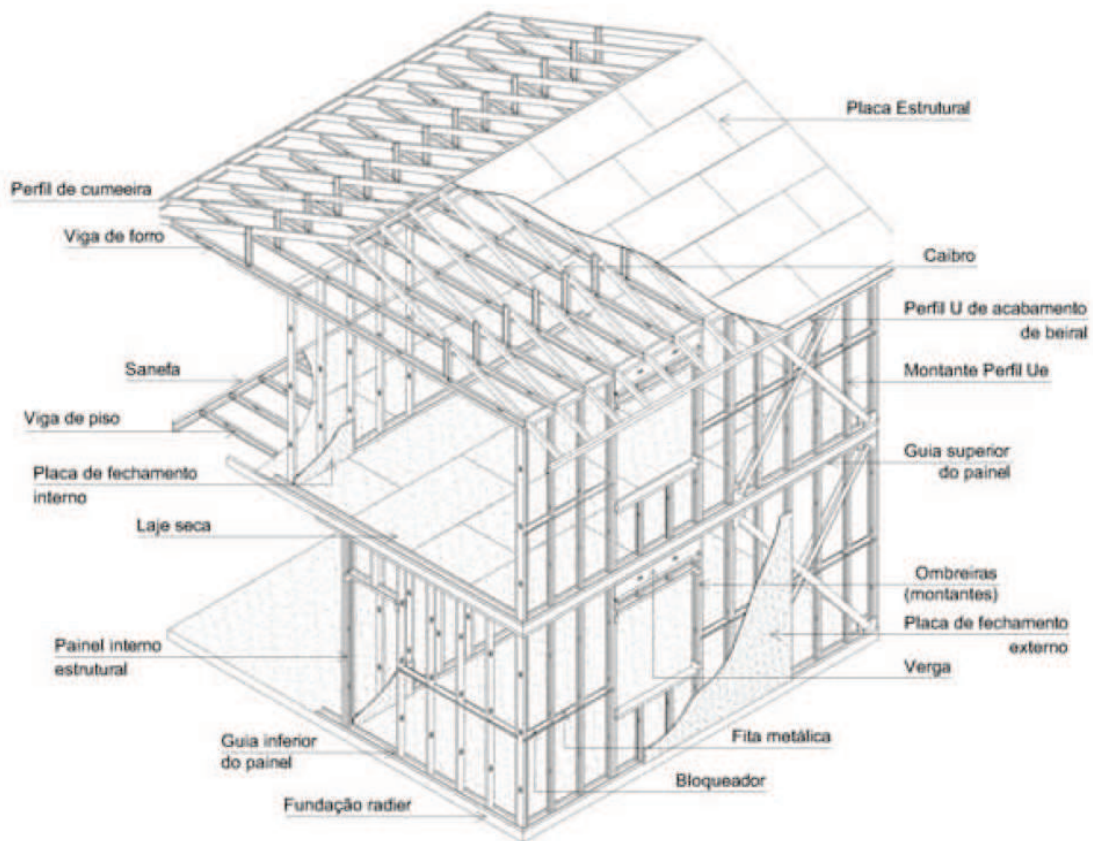


Figura 2.2. Desenho esquemático da estrutura de uma residência em *Light Steel Framing* (FREITAS e CASTRO, 2006).

O que diferencia o *Light Steel Framing* de outros sistemas construtivos tradicionais é sua composição por elementos ou subsistemas (estruturais, de isolamento, de acabamentos exteriores e interiores, etc.), os quais atuam em conjunto. RODRIGUES (2006) menciona que seu emprego apresenta muitas vantagens, tanto em relação à construção convencional quanto em relação à construção com a utilização de madeira, tais como: redução no prazo de execução da obra; componentes estruturais de aço mais leves e com maior resistência à corrosão; durabilidade; maior precisão na montagem de paredes e pisos; desperdício e perda de material reduzidos; custo reduzido; material 100% reciclável e incombustível; qualidade do material garantida pelas siderúrgicas.

O sistema *Light Steel Framing* tem uma concepção racional, para fabricação e montagem industrializada e em grande escala, quase todo a seco, onde os PFF do tipo U enrijecido são utilizados como montantes (equidistantes de 400mm ou 600mm) para a composição dos painéis verticais (paredes estruturais ou não), vigas de entrego e estruturas dos telhados.

2.2.2 Tipos de perfis utilizados

Os perfis utilizados para a composição do sistema LSF são aqueles obtidos por conformação contínua a partir de bobinas de aço, revestidos com zinco ou liga de alumínio e zinco. As seções mais usuais nestas edificações são os perfis U enrijecido (Ue), utilizados para a formação dos montantes e vigas, e o perfil U simples que forma as guias para os painéis. De acordo com a norma ABNT NBR 15253: 2005, a chapa do perfil deve ter espessura mínima de 0,8 mm e máxima de 3,0 mm.

2.2.3 Painéis

Os painéis podem ter ou não função estrutural. Quando funcionam apenas para vedação interna ou externa são chamados de painéis não-estruturais. Paredes estruturais ou autoportantes estão sujeitas a cargas verticais axiais e a cargas horizontais devido ao vento ou a abalos sísmicos. Segundo RODRIGUES (2006), os painéis estruturais transferem as ações horizontais aos pisos e entrepisos, que funcionam como diafragmas horizontais rígidos. Estes transferem tais ações aos painéis estruturais de contraventamento que, por sua vez, descarregam tais ações na fundação.

A formação dos painéis é obtida basicamente por perfis verticais com seção Ue, ou seja, pelos montantes, e por perfis horizontais com seção transversal U denominados de guias.

As guias devem ser usadas na horizontal para formar a base e o topo dos painéis de parede e de entrepiso; são também utilizadas - combinadas ou não com as fitas - para o travamento lateral de vigas e de montantes, e montagem das vergas.

Ainda segundo RODRIGUES (2006) para as guias das paredes internas e externas, o dimensionamento é realizado para solicitação de compressão, enquanto que os montantes podem ser considerados como sendo rotulados em suas extremidades. Os montantes das paredes internas devem ser dimensionados à compressão e à tração atuando isoladamente, já os das paredes externas são dimensionados à flexo-compressão e a flexo-tração.

Os fechamentos dos painéis podem ser realizados com placa de gesso acartonado, com placa cimentícia ou ainda com placa de *Oriented Strand Board* (OSB), estas últimas geralmente para fechamento externo, sendo que a placa de OSB pode conferir à parede resistência às cargas laterais, gerando o efeito diafragma vertical, no contraventamento das estruturas do LSF. A Figura 2.3 ilustra um esquema para montagem de painéis.

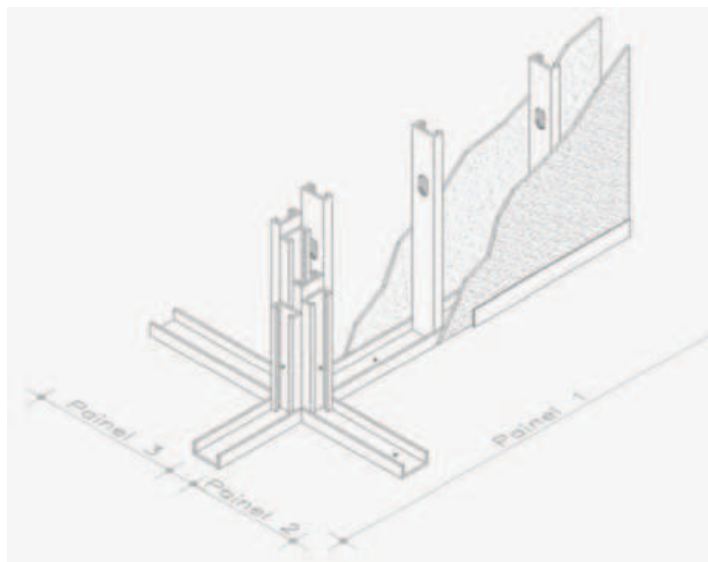


Figura 2.3. Esquema de montagem de painéis (FREITAS e CASTRO, 2006).

2.2.4 Pisos

Os perfis galvanizados que formam as vigas do entrepiso são do tipo Ue, empregados isoladamente ou compondo perfis caixa ou I. São alinhados paralelamente entre si na horizontal, sendo que seus espaçamentos devem ser os mesmos considerados para os montantes, respeitando desta forma o conceito “*in line framing*”, característica básica do sistema *Light Steel Framing*.

As vigas de piso são dimensionadas ao momento fletor, à força cortante e à combinação força cortante-momento fletor. Outros esforços solicitantes poderão ser considerados, tais como: forças normais de compressão ou de tração devidas à ação do vento; forças concentradas nas vigas sem enrijecedores transversais, etc. Para impedir a flambagem lateral com torção, as vigas devem ser travadas lateralmente com bloqueadores feitos de perfis Ue e fitas de aço galvanizado (RODRIGUES, 2006).

O enrijecedor da alma da viga, ou enrijecedor de apoio aumenta a resistência no apoio da viga e evita seu esmagamento, é realizado por meio de um perfil Ue fixado através da alma do montante à alma da viga.

Sobre as vigas do entrepiso é colocada a laje de contrapiso que pode ser do tipo úmida ou seca. A laje úmida é aquela de concreto não armado moldada sobre uma chapa ondulada de aço parafusada às vigas de entrepiso (diferentemente da laje mista *Steel Deck* com fôrma de aço incorporada). Conforme FREITAS e CASTRO (2006), para se obter um conforto acústico adequado, deve-se empregar um material de isolamento entre a fôrma de aço e o concreto. A forma mais comum é a colocação de painéis de lã de vidro compacta sobre a chapa de aço, protegida por um filme de polietileno para evitar a umidificação da lã de vidro durante a concretagem.

A laje seca é formada por placas rígidas parafusadas às vigas de entrepiso. São mais leves e proporcionam maior velocidade de execução da obra, pois dispensam o uso de água e apresentam instalação mais fácil.

Se a laje é do tipo úmida, procede-se à execução da mesma instalando os perfis galvanizados tipo cantoneira na borda da laje e a chapa de aço ondulada que serve de fôrma, preenchendo com concreto magro para formar a superfície de contrapiso. A laje seca, preferencialmente, só deve ser instalada quando a cobertura já tiver sido executada, a fim de evitar que o substrato de placas de OSB fique exposto a intempéries.

RODRIGUES (2006) ressalta que tanto os pisos secos quanto os úmidos podem possuir a capacidade de restringir os deslocamentos relativos na horizontal entre vigas de entrepiso. Para lajes úmidas o conjunto fôrma-concreto forma um diafragma rígido, fazendo com que todo o painel de vigas tenha apenas movimento de corpo rígido no plano horizontal. Já os pisos secos exigem a fixação das placas por parafusos espaçados a cada 300 mm, no máximo, formando dessa maneira um plano rígido que pode ser discretizado na forma de diafragma rígido para a avaliação dos modelos estruturais.

2.2.5 Fechamento vertical

Os componentes de fechamento de uma edificação em LSF devem ser aqueles que propiciam racionalização, industrialização e sejam constituídos por elementos leves para que o fechamento vertical seja compatível com o baixo peso próprio da estrutura. O conceito da modulação estrutural é aplicado para se obter uma melhor otimização da utilização de chapas ou placas. Desta forma na maioria dos casos, as placas são fabricadas com largura de 1200 mm, múltiplo da modulação de 400 ou 600 mm.

Os materiais mais utilizados no mercado nacional para o fechamento vertical de edificações em LSF são: OSB, placa cimentícia e gesso acartonado, sendo que este último só deve ser utilizado em paredes do interior da edificação. As placas de OSB são as mais utilizadas para o fechamento externo e devem ser protegidas da umidade e da água através de uma membrana de polietileno de alta densidade que garante a estanqueidade das paredes. Na base dos painéis, antes de sua montagem, deve ser fixada uma fita seladora para evitar o contato direto com a umidade do piso e minimizar as pontes térmicas e acústicas. Como acabamento final pode ser adotado o “siding” vinílico, de madeira, cimentício e de argamassa.

Segundo FREITAS e CASTRO (2006), as placas cimentícias podem ser utilizadas como fechamento externo e interno dos painéis, principalmente em áreas molháveis, substituindo o gesso acartonado e em áreas expostas a intempéries.

As placas de gesso acartonado são as mais utilizadas para o fechamento vertical da compartimentação e separação dos espaços internos da edificação. A técnica utilizada para o fechamento vertical interno dos painéis com placas de gesso acartonado no sistema LSF é a mesma utilizada no sistema *Dry Wall*. No mercado são oferecidos três tipos de placa: *Standard* (modelo comum, destinada à área seca), Resistente à Umidade e Resistente ao Fogo.

2.3 Incêndio

O fogo é definido como um processo químico de transformação, oxi-redução (oxidação exotérmica), onde ocorre a combustão dos materiais combustíveis e inflamáveis, mediante a presença de um comburente, ativado por uma fonte externa de calor, resultando a liberação de luz e calor. O fogo é assim constituído por quatro elementos que, juntos, formam o tetraedro do fogo: combustível, comburente, calor e reação em cadeia.

Em relação ao incêndio, este é definido como sendo o fogo que ocorre com intensidade, sem controle humano, em material que não estava a ele destinado, destruindo e, em alguns casos, gerando danos e prejuízos. O incêndio pode ocorrer por origem física, como por exemplo, devido a um curto-circuito ou devido ao atrito de peças em movimento, por origem biológica através da ação de certas bactérias (termogênicas), origem físico-química (hidrocarbonetos insaturados e gorduras animais e vegetais em determinadas condições de confinamento), origem acidental (involuntariamente criado pelo homem), ou origem intencional, propositadamente criada por ação humana, conforme menciona CALDAS (2008).

Para o estudo da segurança contra incêndio em edificações, é necessária a compreensão da dinâmica e do comportamento do incêndio em compartimentos. A norma brasileira ABNT NBR 14432:2001 define compartimento como sendo *“edificação, ou parte dela, compreendendo um ou mais cômodos, espaços ou pavimentos, construídos para evitar a propagação do incêndio de dentro para fora de seus limites, incluindo a propagação entre edifícios adjacentes, quando aplicável”*.

Conforme menciona SEITO *et al.* (2008), não ocorrem dois incêndios iguais devido ao grande número de fatores envolvidos que estão presentes, tais como: geometria do compartimento, distribuição e quantidade dos materiais combustíveis, local do princípio do incêndio, condições climáticas, aberturas e ventilações presentes, medidas de prevenção e combate a incêndio implantadas, etc.

A figura 2.4 representa a evolução do incêndio real.

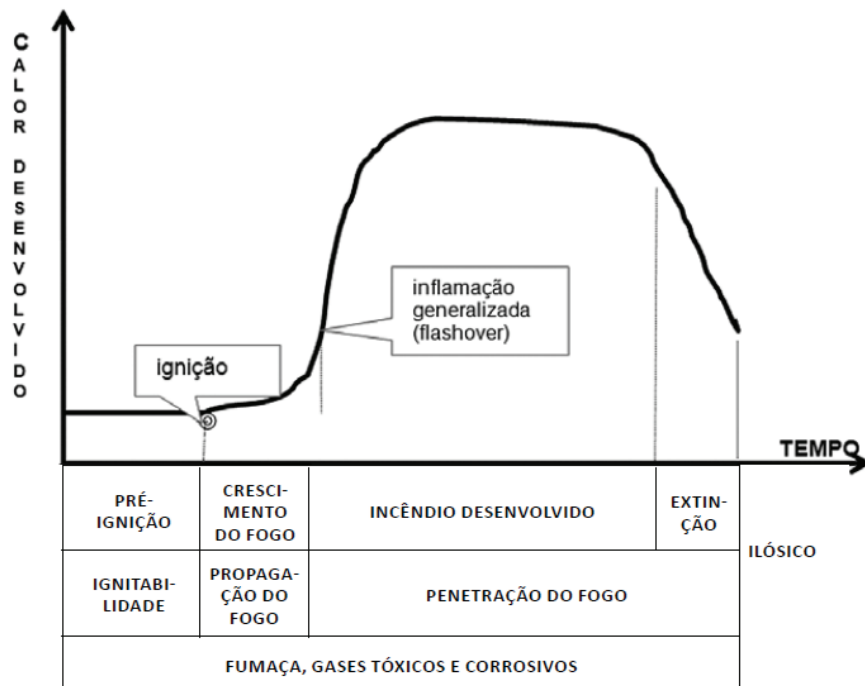


Figura 2.4. Curva de evolução do incêndio, adaptada de SEITO (2008).

A curva ilustrada na figura 2.4 possui três fases distintas. A primeira fase é o incêndio incipiente com um crescimento lento, com duração entre cinco a vinte minutos até a ignição. A partir deste ponto inicia-se a segunda fase na qual as chamas apresentam um crescimento, aumentando a temperatura do ambiente. No momento em que a temperatura do ambiente atinge 600°C aproximadamente, todo o ambiente é envolvido por gases e vapores que contribuirão para o início de uma inflamação generalizada denominada “*flashover*”. Já a terceira fase, pós- *flashover*, é caracterizada pela diminuição da temperatura e das chamas no compartimento incendiado devido à queima de todo, ou quase a totalidade, do material combustível presente. Observa-se, ainda, uma quarta fase, caracterizada pelo decaimento da temperatura até a extinção.

A figura 2.5 ilustra as diferentes fases de um incêndio em um compartimento.

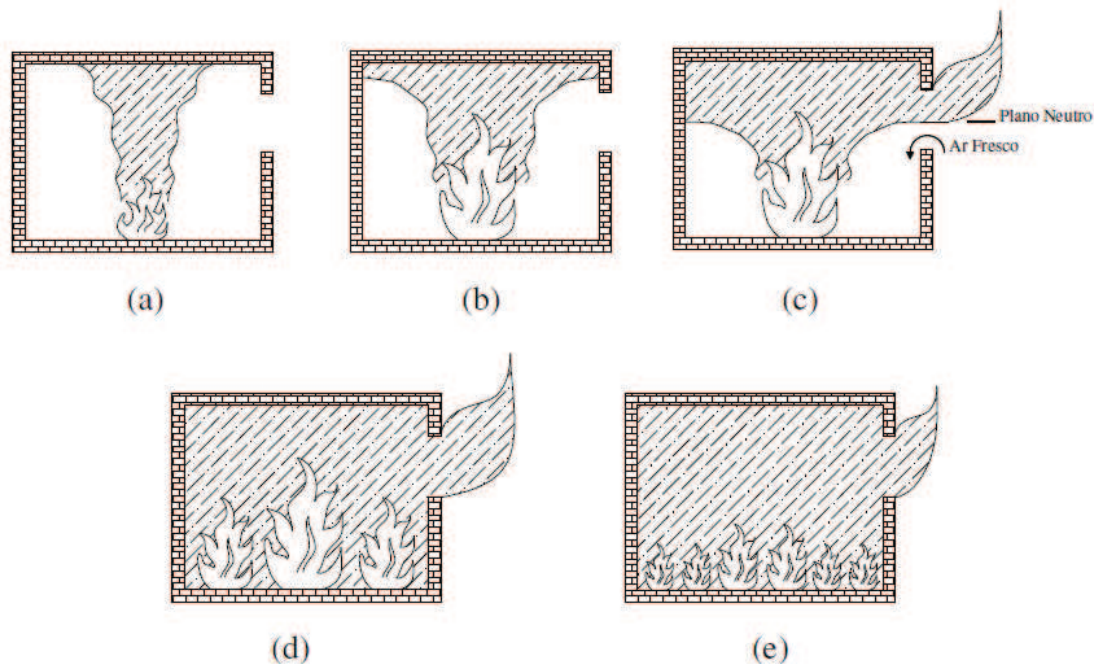


Figura 2.5. Comportamento do incêndio em um compartimento: (a), (b) e (c) são os diferentes estágios da fase pré-*flashover*; (d) e (e) são as fase pós-*flashover*, adaptada de CALDAS, 2008.

Segundo CALDAS (2008), a intensidade e a duração dos incêndios em edificações podem variar consideravelmente. Conhecendo os parâmetros envolvidos, é possível estimar o desenvolvimento da temperatura de um incêndio em um compartimento sob várias condições. Vários desses fatores, como a quantidade e a área superficial (campo de propagação) dos materiais combustíveis, não são possíveis de serem previstos, pois, em função do tempo, podem se modificar de um compartimento para o outro. Assim, torna-se impossível se conhecer a relação temperatura-tempo a que um edifício será exposto durante a sua vida útil. Mas, é possível, com razoável confiabilidade, determinar para qualquer compartimento, uma relação temperatura tempo que não será extrapolada no decorrer do tempo de utilização da edificação.

As temperaturas em um compartimento incendiado podem ser obtidas por modelos analíticos, modelos de zonas ou modelos computacionais com base na dinâmica de fluídos (CFD). A modelagem por zonas proporciona uma aproximação intermediária entre os modelos analíticos e a modelagem utilizando a dinâmica dos fluídos (CFD), conforme menciona CALDAS (2008). Ocorre a divisão do incêndio em poucas e grandes zonas com diferentes características. Esse autor exemplifica a fase pré-

flashover, na qual o compartimento incendiado pode ser dividido em duas zonas: uma zona superior de gases quentes e uma zona inferior de ar fresco (ver figura 2.5 c).

Assim, cada zona possui propriedades uniformes como temperatura e concentração de gases, gerando resultados menos detalhados do que os da modelagem CFD. CALDAS (2008) frisa que, para compartimentos de geometria regular, a modelagem por zonas é capaz de fornecer um bom entendimento do comportamento do incêndio.

O programa computacional OZONE (CADORIN, 2003) realiza simulações com modelagem por zonas e modelos analíticos para obtenção da relação temperatura-tempo dos gases no incêndio e é utilizado neste trabalho para obtenção da relação temperatura-tempo dos gases.

Ressalta-se que, em função da variação da carga de incêndio, seu valor é determinado a partir de valores que podem ser tabelados ou medidos e submetidos a coeficientes de ponderação, resultando nos denominados valores de cálculo de carga de incêndio, que são função do tipo de ocupação da edificação e podem ser calculados para cada caso ou estabelecidos em normas. Os coeficientes de ponderação podem ser majorativos em função das dimensões da edificação e minorativos em função das medidas de proteção ativa presentes.

Considerando que a curva temperatura-tempo do incêndio se altera para cada situação, em função das especificidades de cada caso, foi convencionado a adoção de uma curva padrão.

Essa curva padronizada para ensaios é adotada como curva temperatura-tempo dos gases, modelo conhecido como incêndio-padrão. De acordo com SILVA *et al.* (2008) a curva padronizada mais difundida internacionalmente é a recomendada pela *International Organization for Standardization - ISO 834: "Fire resistance tests – Elements of building construction"*, que descreve a elevação da temperatura em função do tempo para a combustão de materiais celulósicos.

A norma ABNT NBR 14432:2001 descreve a elevação padronizada de temperatura em função do tempo através da equação 2.1, representada na figura 2.6.

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log(8t + 1), \quad (2.1)$$

onde,

θ_g : temperatura dos gases em graus Celsius no tempo t .

θ_0 : a temperatura do ambiente antes do início do aquecimento em graus Celsius, comumente adotada como sendo 20°C.

t : tempo em minutos.

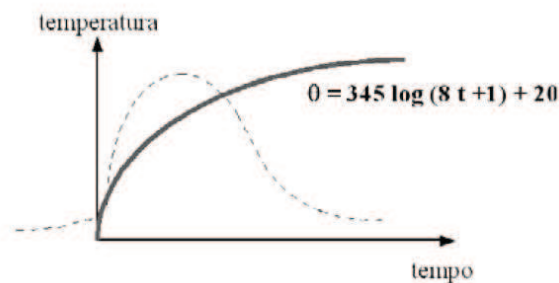


Figura 2.6. Curva modelo incêndio-padrão

A curva do incêndio-padrão não apresenta os dois ramos de comportamentos presentes em um incêndio natural: ascendente e descendente, que são equivalentes às fases de aquecimento e resfriamento, respectivamente.

2.4 Tempo Requerido de Resistência ao fogo (TRRF)

CALDAS (2008) menciona que o TRRF é um tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo, quando submetido ao incêndio-padrão. A resistência ao fogo é a propriedade de um elemento resistir à ação do fogo por determinado período, mantendo sua segurança estrutural, estanqueidade e isolamento, onde aplicável.

Segundo CALDAS (2008), o TRRF pode variar de uma especificação (norma, lei ou regulamentação) para outra, pois o mesmo é resultado do consenso da sociedade, não significando a duração do incêndio ou o tempo de evacuação dos ocupantes do edifício

ou o tempo de chegada do corpo de bombeiros. Em procedimentos prescritivos de projeto, a utilização do TRRF se baseia em critérios gerais como o tipo de edifício e sua altura, associados à carga de incêndio e às conseqüências da exposição a altas temperaturas. Assim, mesmo considerando esses critérios gerais, também deveriam ser levados em conta outros fatores importantes, como a ventilação, aberturas e as propriedades dos materiais de revestimento do compartimento.

O autor menciona que mesmo com as limitações, a utilização do incêndio-padrão tem muitas vantagens em relação às condições reais de exposição ao incêndio:

- o conceito de TRRF é antigo e está bem relacionado com a segurança em incêndio, com resultados seguros para serem utilizados no dimensionamento de edificações;
- hoje já se tem um grande conhecimento obtido a partir de ensaios com a relação temperatura-tempo do incêndio-padrão. Já sobre outras relações temperatura-tempo, pouco se sabe (como por exemplo, a do incêndio natural);
- a curva do incêndio-padrão possui apenas uma relação temperatura-tempo, sendo de fácil compreensão e utilização em projetos.

2.5 *Light Steel Framing* em situação de incêndio

2.5.1 Considerações gerais do dimensionamento das estruturas em situação de incêndio

A norma ABNT NBR 14323:1999 define dimensionamento em situação de incêndio, *como a verificação dos elementos estruturais e suas ligações, com ou sem proteção contra incêndio, no que se refere à estabilidade e à resistência aos esforços solicitantes em temperatura elevada, a fim de evitar o colapso da estrutura em um tempo inferior àquele necessário para possibilitar a fuga dos usuários da edificação e, quando necessário, a aproximação e o ingresso de pessoas e equipamentos para as ações de combate ao fogo.*

Atualmente a norma ABNT NBR 14323:1999 encontra-se sob revisão e passará a apresentar especificações em relação aos perfis formados a frio em situação de incêndio.

O problema básico que se tem numa estrutura em situação de incêndio é que, com o aumento da temperatura, os valores da resistência ao escoamento (f_y) e do módulo de elasticidade (E) do aço se reduzem. Por este motivo é fundamental o estudo visando monitorar a variação e distribuição das temperaturas no PFF da estrutura do LSF, tal como se propõe no presente trabalho.

O aquecimento do aço depende da temperatura dos gases, das propriedades físicas e térmicas do perfil, do material de proteção, se for o caso, e do fator de massividade que é a relação entre o perímetro exposto ao fogo e a área da seção transversal.

Conforme já mencionado em 2.2.3 e 2.2.4, no sistema LSF, a estrutura de aço fica encapsulada e protegida dentro das paredes e entrepisos. Nas vedações e no acabamento utilizam-se um método que combina uma alta capacidade isolante com uma aparência atraente, com o emprego de variadas soluções construtivas, entre elas: sistema em gesso acartonado (“*Dry Wall*”) para paredes internas; placa de OSB com barreira de vapor aplicada sobre a mesma ou placa cimentícia, para paredes internas e externas. Esses tipos de fechamento vertical minimizam a transferência de calor entre compartimentos. Desta forma, a resistência estrutural do reticulado metálico dos painéis estruturais do sistema LSF em situação de incêndio irá depender do material que o envolve, assim como o tipo de acabamento (revestimento) e de cobertura.

2.5.2 Síntese de pesquisas e trabalhos já realizados

2.5.2.1 ALFAWAKHIRI e SULTAN (2000)

ALFAWAKHIRI e SULTAN (2000) apresentam ensaios de painéis estruturais de um sistema LSF exposto ao fogo em um de seus lados. Também foi desenvolvido um modelo numérico para a elevação de temperatura e para o comportamento estrutural

baseado em seis experimentos realizados pela NRC juntamente com a *North American Steel Industry*.

Nas pesquisas, ALFAWAKHIRI e SULTAN (2000) simulam numericamente a elevação de temperatura dos painéis estruturais considerando as propriedades térmicas obtidas por meio dos ensaios de painéis com fechamento de gesso acartonado e três tipos de isolantes. Procedimentos analíticos para obtenção dos deslocamentos laterais e do tempo de resistência ao fogo são apresentados.

Todos os painéis ensaiados foram submetidos a um carregamento vertical e tiveram um de seus lados exposto ao forno quente. Estes painéis possuíam uma linha simples de montantes constituídos de perfis formados a frio protegidos por duas camadas de placas de gesso acartonado nos dois lados com espessura de 12,7 mm. Os montantes são formados por perfis Ue (92,1 x 41,3 x 12,5 mm) com 0,912 mm de espessura e espaçados de 610 mm, com limite de escoamento mínimo de 228 MPa. A figura 2.7 apresenta um painel típico dos ensaios.

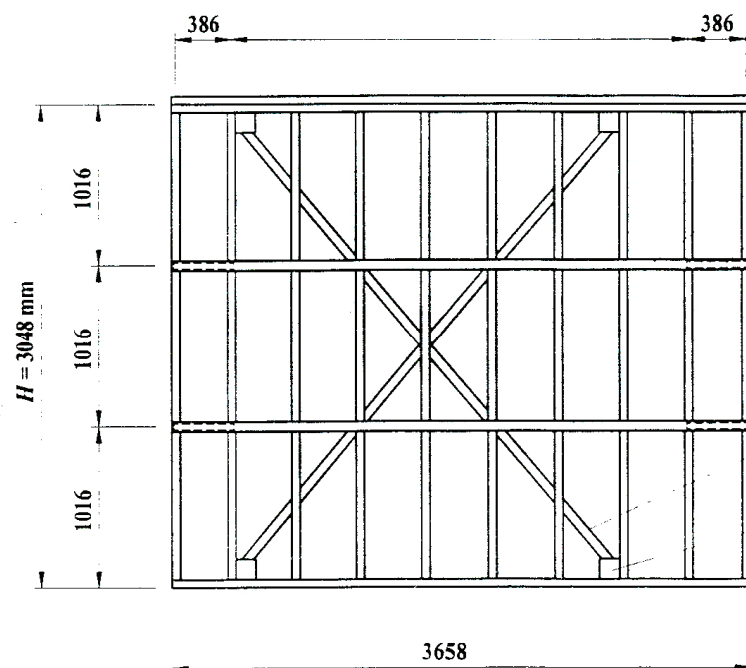


Figura 2.7. Painel estrutural típico dos ensaios, adaptado de ALFAWAKHIRI e SULTAN (2000).

Todos os ensaios apresentaram falha devido ao carregamento presente. Não foi detectado em nenhum caso a falha do isolamento térmico. A temperatura média no lado não exposto no final dos ensaios foi menor que 70°C. Os autores concluíram que o carregamento reduz de forma significativa o tempo de resistência ao fogo dos painéis estruturais.

Foram instalados em cada painel estrutural ensaiado 50 termopares para a obtenção de dados experimentais visando ao estudo da transferência de calor. Foram também instalados 9 termopares para detectar a penetração de calor e, conseqüentemente, o colapso estrutural dos painéis.

Os modelos numéricos para distribuição de temperaturas foram implementados no programa TRACE (*Temperature Rise Across Construction Elements*). Expressões analíticas para os deslocamentos laterais, módulo de elasticidade, expansão térmica e resistência ao escoamento do aço, foram incorporadas no programa computacional STUD, desenvolvido para modelar o comportamento estrutural de painéis estruturais expostos ao fogo.

O comportamento estrutural de um painel de LSF, exposto ao fogo em um de seus lados, foi modelado por um montante com uma carga excêntrica P, como pode ser observado na figura 2.8. Os seguintes itens foram assumidos pelos autores:

- A relação entre tensão e deformação em temperaturas elevadas é linear;
- A flexo-torção está impedida pelas restrições laterais;
- O montante está rotulado em suas extremidades;
- Não existe variação de temperatura na direção vertical, apenas através da seção do perfil (variação transversal).

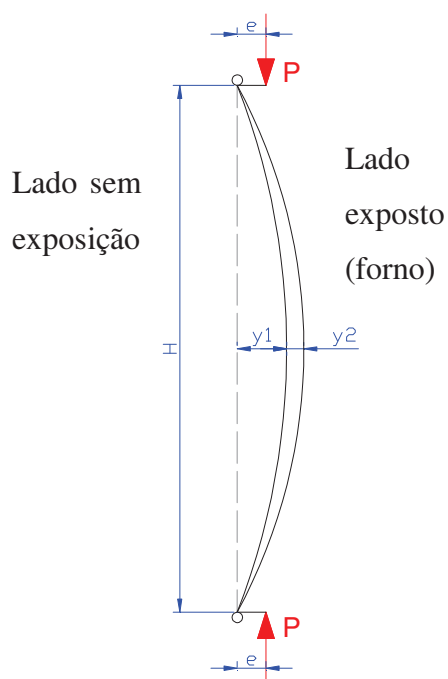


Figura 2.8. Estrutura modelada, ALFAWAKHIRI e SULTAN (2000).

A tabela 2.1 apresenta os tempos de resistência ao fogo obtidos nos testes realizados.

Tabela 2.1. Resultados obtidos nos ensaios. Fonte: ALFAWAKHIRI e SULTAN (2000).

Elemento (No)	Tipo de isolamento (fibra)	Tempo de resistência estrutural (minutos)
W1	Vidro	55
W2	Rocha	73
W3	Celulose	70
W4	-	76
W5	Rocha	59
W6	-	83

2.5.2.2 FENG *et al* (2002)

FENG *et al.* (2002) elaboraram um estudo com testes de oito painéis em escala reduzida (300x300mm) em situação de incêndio de uma parede composta de perfil formado a frio com fechamento em placa de gesso acartonado. Os resultados dos testes foram usados para validar a capacidade de análise de transferência de calor para os modelos numéricos desenvolvidos no programa computacional ABAQUS. Após validação, os autores também elaboraram outros modelos numéricos com diferentes configurações para examinar o isolamento térmico proporcionado.

Os parâmetros do estudo experimental incluíram as variações no tipo de seção do perfil, com e sem enrijecedor (perfil U 104 x 63 x 1,5 mm e perfil Ue 100 x 54 x 15 x 1,2 mm), arranjos com uma ou duas placas de gesso em ambos os lados da seção de parede estudada, e a presença ou não de material isolante na cavidade. A placa de gesso utilizada foi a *Fireline Gyproc* (resistente ao fogo) com espessura de 12,5mm fabricada pela *British Gypsum Ltd.* O material isolante térmico foi a lã de rocha *Isowool 1000* de 100mm, também fabricada pela *British Gypsum Ltd.* A figura 2.9 ilustra as configurações dos modelos.

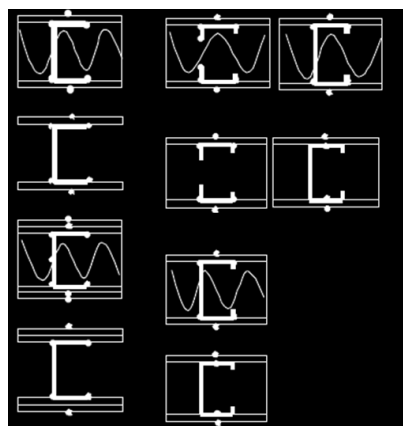


Figura 2.9. Modelos ensaiados em um forno a gás, adaptado de FENG *et al.*, 2002.

Os testes de avaliação experimental da temperatura foram conduzidos no laboratório de simulação de incêndio do *Manchester Centre for Civil and Construction Engineering*. Oito corpos de prova foram testados em elevadas temperaturas dentro de um pequeno

forno a gás com volume de 1,5 x 1,5 x 1,5 m. Vários termopares foram colocados nos modelos para controle da variação da temperatura com o transcorrer do experimento.

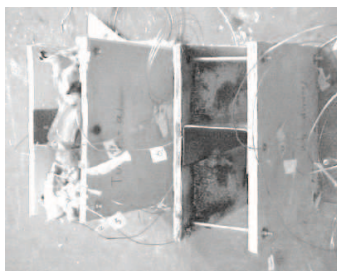


Figura 2.10. Modelo de painel com perfil U (104 x 63 x 1,5 mm) com uma placa de gesso em cada lado, com e sem isolamento na cavidade, após duas horas de teste, adaptada de FENG *et al.*, 2002.

Comparando os resultados obtidos experimentalmente com os observados numericamente, FENG *et al.* (2002) concluíram que as modelagens numéricas realizadas foram capaz de simular com grande eficiência, todos os modelos, exceto o modelo com perfil Ue 100 x 54 x 15 x 1,2 mm e isolamento na cavidade. Apesar dos valores simulados não serem exatos com os encontrados nos testes no forno, FENG *et al.* (2002) consideraram bons, tendo em vista as limitações e incertezas das propriedades térmicas para o isolamento. Sobre a radiação na cavidade, foi observado que a mesma é precisamente simulada em relação ao isolamento. Para os resultados diferentes encontrados para o perfil Ue (100 x 54 x 15 x 1,2 mm) com material isolante na cavidade, foi constatado que um contato imperfeito entre o isolamento e as superfícies internas das placas e do perfil pode ter criado espaços vazios nos corpos de prova, devido ao fato de que a transferência de calor por radiação na cavidade (nos vazios existentes no isolamento) ser maior do que através da condução térmica no isolamento.

Em relação ao estudo de diferentes configurações, para o propósito de proteção contra incêndios, FENG *et at.* (2002) relatam que é importante que nas placas de gesso sejam colocados no lado exposto ao fogo (interno ao compartimento), do que no lado não exposto, indo ao contrário da prática de aquecimento de ambientes, onde o isolamento é colocado no lado externo ao compartimento para diminuir a perda de calor (principalmente em países com invernos rigorosos, o que não ocorre no Brasil). Em relação ao monitoramento das temperaturas na superfície não exposta ao fogo, devido à presença de isolamento interior, as temperaturas

não atingiram o ponto considerado como falha do isolamento térmico, 140°C , em 2 horas de exposição ao fogo. Também foi observado que a decisão de colocar uma ou duas camadas de gesso acartonado no lado não exposto depende do tempo de resistência ao fogo que se almeja. A figura 2.11 representa as configurações estudadas e a figura 2.12 ilustra o comparativo do monitoramento da temperatura no lado não exposto para os modelos.

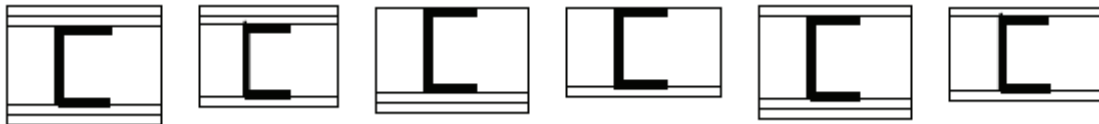


Figura 2.11. Variações de configurações de painel, adaptado de FENG *et al.*, 2002.

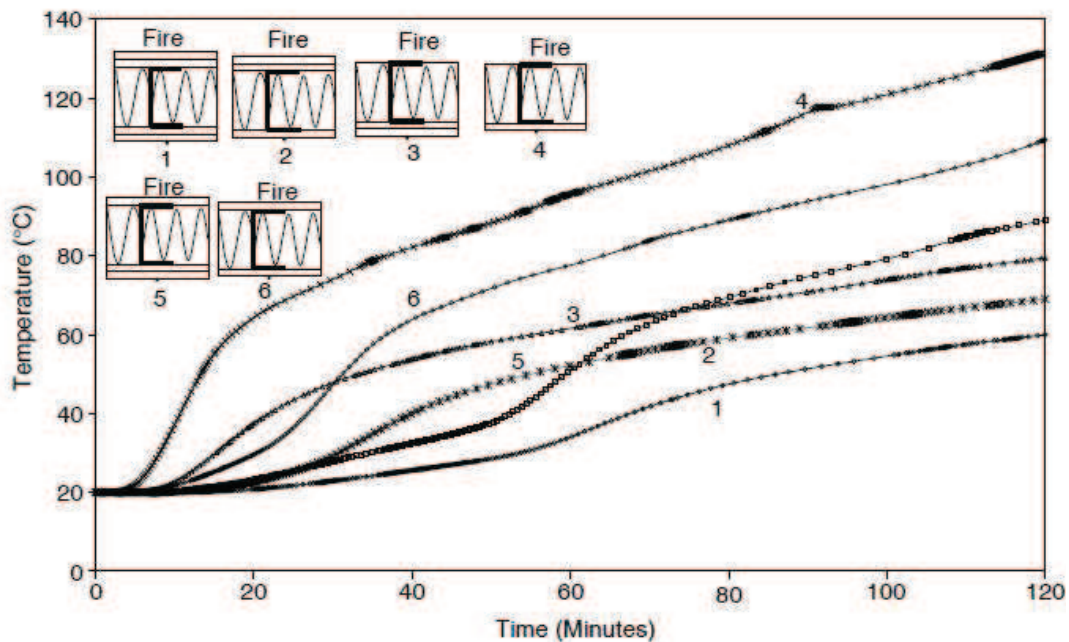


Figura 2.12. Elevação da temperatura na superfície não exposta ao fogo para diferentes configurações com presença de isolamento, adaptado de FENG *et al.*, 2002.

Os autores concluíram que as temperaturas no perfil dependem primeiramente do isolamento térmico no lado exposto ao incêndio. Eles salientam a importância de se avaliar se as placas vão perder a sua integridade sob a combinação de carga e exposição ao fogo.

Considerando que haja isolamento na cavidade da parede e o mesmo apresente baixa condutividade térmica, o desempenho térmico dos painéis não é significativamente afetado pelo tipo de material utilizado na cavidade. No entanto, não ter isolamento interno acarretará em menor capacidade de isolamento térmico. Assim, é importante decidir se haverá ou não isolamento na cavidade, ao invés da opção do tipo de isolamento. Sobre as configurações estudadas para os painéis conclui-se que o isolamento térmico é principalmente afetado pela configuração adotada.

2.5.2.3 NADER (2002)

NADER (2002) elaborou o trabalho denominado *Light Steel Frame Housing – Review of Fire and Acoustic Performance* que apresenta informações sobre o que está regulamentado em diversos países em relação à resistência ao fogo e acústica para o sistema construtivo *Light Steel Framing*. O texto apresenta as exigências dos códigos internacionais de países como Austrália, Canadá e Estados Unidos e da Europa, dentre outros, com indicação de configurações adotadas comumente em edificações construídas em LSF e seu tempo de resistência ao fogo, com base em experimentos realizados por entidades governamentais e grandes fabricantes.

A seguir, estão resumidas as exigências em relação ao tempo requerido de resistência ao fogo, mais especificamente para edificações residenciais, para os países mencionados anteriormente, focando no tempo mínimo de resistência para paredes internas e externas das edificações, com e sem função estrutural.

2.5.2.3.1 Austrália

De acordo com NADER (2002), o código que regulamenta a resistência ao fogo para as edificações e suas estruturas, é o *Building Code of Austrália* (BCA).

O BCA especifica que o tempo mínimo de resistência ao fogo para uma edificação dependerá do tipo de uso da mesma (ocupação), das estruturas utilizadas, do número de pavimentos e afastamento de outras fontes de fogo.

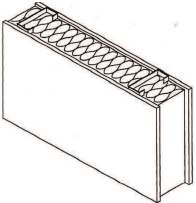
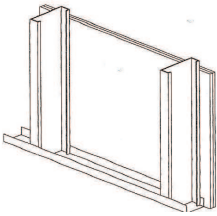
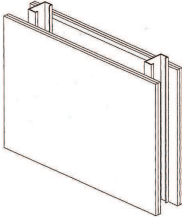
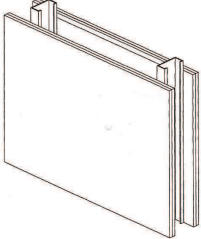
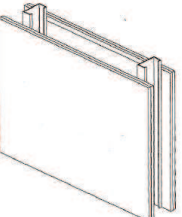
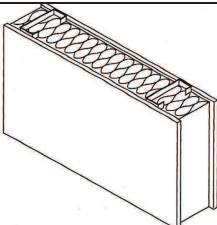
Para uma casa, unidade unifamiliar, isolada de outras, suas paredes externas da mesma devem apresentar um tempo de resistência de 60 minutos quando a edificação estiver a menos de 1,8 metros de uma fonte de calor (edificação vizinha, por exemplo). Casas geminadas, sobrados, casas em vilas, também devem possuir um tempo mínimo de 60 minutos.

Para as unidades habitacionais em uma mesma edificação, multifamiliar, com até dois pavimentos, as paredes internas devem possuir um tempo de 60 minutos. Já para três pavimentos ou mais, o tempo mínimo deverá ser de 90 min.

No maior país da Oceania, os grandes fornecedores de placas de gesso acartonado e cimentícia elaboraram manuais técnicos para projeto e execução de paredes e pisos com indicação dos tempos requeridos de resistência ao fogo conforme o código australiano. Essas empresas são a CSR, Boral e James Hardie.

A tabela 2.2 apresenta os exemplos fornecidos pelos fabricantes com as configurações e seus tempos de resistência ao fogo.

Tabela 2.2. Exemplos australianos de configurações adotadas com seus respectivos tempos de resistência ao fogo. Fonte: NADER (2002).

Modelo	Especificação	Tempo de resistência ao fogo* (minutos)	Detalhe construtivo
CSR-055	-espaçamento entre perfis de 600mm; -uma placa em cada lado com 16mm (<i>Gyprock Fyrchek TM</i>); -Lã de vidro na cavidade com 50mm de espessura.	60	
CSR-090	-espaçamento entre perfis de 600mm; -Duas placas em apenas um lado com 16mm (<i>Gyprock Fyrchek TM</i>).	30	
JH 416	-espaçamento entre perfis de 600mm; -uma placa em cada lado com 9mm (<i>Villaboard TM</i>); -uma placa resistente ao fogo em cada lado com 16mm.	120	
JH 414	-espaçamento entre perfis de 600mm; -uma placa em cada lado com 6mm (<i>Villaboard TM</i>); -uma placa resistente ao fogo em cada lado com 13mm.	60	
JH 415	-espaçamento entre perfis de 600mm; -uma placa em cada lado com 6mm (<i>Villaboard TM</i>); -uma placa resistente ao fogo em cada lado com 16mm.	90	
BORAL SS5 (sem função estrutural)	-espaçamento entre perfis de 600mm; - uma placa resistente ao fogo em cada lado com 16mm (<i>Firestop TM</i>); -Lã de vidro na cavidade com 50mm de espessura.	60	

Nota: * Tempo mínimo que deve satisfazer aos critérios de resistência, isolamento e estanqueidade quando exposto ao incêndio-padrão.

2.5.2.3.2 Canadá

No Canadá, as exigências em relação à resistência ao fogo estão presentes no *National Building Code of Canada* (NBCC). Para enquadramento e uso do código deve-se seguir cinco critérios referentes às edificações, listados a seguir, conforme mencionado por NADER, 2002:

- Determinar a classificação da edificação quanto ao seu uso (ocupação);
- Classificar a edificação em função da sua área e altura;
- Determinar o tempo requerido de resistência ao fogo;
- Verificar e determinar exigências adicionais para a edificação em função da área e ocupação;
- Determinar os sistemas de combate a incêndios a serem projetados.

O requerimento de resistência ao fogo presente no código canadense é baseado na norma do *Underwriters' Laboratories of Canada* CAN/ULC-S101-M, "*Standard Method of Fire Endurance Tests of Building Construction Materials*".

As edificações são classificadas inicialmente em função do seu uso, metodologia também seguida no Brasil, subdividindo a ocupação em grupos de acordo com a especificidade presente.

Sobre o requerimento de resistência ao fogo para edificações residenciais unifamiliares, este só ocorre quando a parede externa estiver a menos de 1,2m de uma edificação vizinha/área de risco/fonte de fogo, devendo ser de 45 minutos.

Em relação às edificações multifamiliares com unidades para até três pavimentos é necessário um tempo requerido de resistência ao fogo de 45 minutos para as paredes com funções estruturais e divisórias de unidades habitacionais.

Na tabela 2.3 são apresentados os valores dos parâmetros geométricos e o tempo requerido de resistência ao fogo para a configuração de uma seção de parede sem função estrutural com uma placa de gesso em cada lado e isolamento na cavidade.

Tabela 2.3. Tempo de resistência ao fogo para configuração de seção de parede sem função estrutural com uma placa de gesso em cada lado e isolamento na cavidade. Fonte: Adaptado de NADER (2002).

No Teste	Seção perfil (mm)	Espaçamento entre montantes (mm)	Isolamento		Placa de Gesso		Tempo de Resistência ao Fogo (min)
			Tipo	Espessura (mm)	Tipo	Espessura (mm)	
057	31 x 64	406	-	-	TIPO X	15,9	35
032	31 x 64	610	-	-	TIPO X	15,9	35
064	31 x 64	406	Fibra mineral	64	TIPO X	12,7	36
038	31 x 64	610	Fibra de vidro	64	TIPO X	12,7	45
041	31 x 64	610	Fibra de vidro	64	Regular	12,7	42

Na tabela 2.4 estão os valores dos parâmetros geométricos e o tempo de resistência ao fogo para a configuração de uma seção de parede sem função estrutural com duas placas de gesso em cada lado e isolamento na cavidade.

Tabela 2.4. Tempo de resistência ao fogo para configuração de seção de parede sem função estrutural com duas placas de gesso em cada lado e isolamento na cavidade. Fonte: Adaptado de NADER (2002).

No Teste	Seção perfil (mm)	Espaçamento entre montantes (mm)	Isolamento		Placa de Gesso		Tempo de Resistência ao Fogo (min)
			Tipo	Espessura (mm)	Tipo	Espessura (mm)	
040	31 x 64	610	Fibra de vidro	64	TIPO X	12,7	55
046	31 x 64	610	Fibra de vidro	64	Regular	12,7	52
412	31 x 92	610	Fibra de vidro	92	TIPO X	12,7	55
416	31 x 92	610	Fibra de vidro	92	Regular	12,7	53
398	31 x 92	610	Fibra mineral	40	TIPO X	15,9	55

2.5.2.3.3 Europa

Os regulamentos para construção nos países europeus para resistência ao fogo para edifícios em *Light Steel Framing* tem por base a altura e uso da edificação. Para edificações residenciais, também há a exigência de proteção entre as unidades habitacionais, compartimentando as mesmas (NADER, 2002).

As edificações residenciais com até dois pavimentos devem possuir uma resistência ao fogo de no mínimo 60 minutos para todas as paredes e pisos que separam as unidades habitacionais (apartamentos) e 30 minutos para os demais elementos da estrutura.

De forma geral, casas ou apartamentos construídos com três ou mais pavimentos devem possuir resistência ao fogo de 60 minutos para a estrutura e paredes de separação. Este tempo de resistência é maior, podendo ser de 90 ou 120 minutos, quando se tratar de edificações altas.

A seguir está a tabela 2.5 a qual indica as típicas configurações utilizadas na Europa com base nos requerimentos de resistência ao fogo para o LSF.

Tabela 2.5. Resistência ao fogo de paredes para diferentes configurações em LSF. Fonte: NADER (2002).

Resistência ao Fogo	Configuração Construtiva
30 minutos	Uma placa de gesso do tipo <i>Standard</i> de 15mm em cada face da parede.
	Uma placa de gesso do tipo Resistente ao Fogo de 12.5mm em cada face da parede.
60 minutos	Uma placa de gesso do tipo Resistente ao Fogo de 12.5mm juntamente com outra do tipo <i>Standard</i> de 12.5mm em cada lado da parede.
	Uma placa de gesso do tipo Resistente ao Fogo de 12.5mm juntamente com outra do tipo <i>Standard</i> de 19mm em cada lado da parede.
90 minutos	Duas placas de gesso do tipo Resistente ao Fogo de 12.5mm em cada face da parede.
	Duas placas de gesso do tipo Resistente ao Som de 12.5mm em cada face da parede.

2.5.2.3.4 Estados Unidos da América

NADER (2002) explica que as exigências para resistência ao fogo para edificações nos Estados Unidos seguem códigos baseados no grupo de ocupação da edificação (residencial, comercial, etc) e no tipo de construção. Os códigos são os seguintes: *International Building Code (IBC)*, *Uniform Building Code (ICBO UBC)*, *Southern Building Code (SBCCI SBC)* e o *National Building Code (BOCA NBC)*. Há também normatização específica para edificações residenciais unifamiliares e para duas famílias que são o *International Residential Code (IRC)*, o *ICC International One and Two Family Dwelling Code (IOTDC)* e o *CABO One and two Family Dwelling Code*.

De acordo com NADER (2002), para paredes externas as quais não possuem afastamento da divisa ou propriedade vizinha, todos os códigos requerem que as mesmas apresentem no mínimo 1 hora de resistência ao fogo. Os códigos exigem que seja considerada a exposição a um incêndio em ambos os lados.

Em relação às paredes que separam as unidades habitacionais nas edificações com duas famílias, em geral, os códigos requerem que as unidades estejam isoladas por uma parede resistente ao fogo por uma hora, devendo ser contínua da fundação ao telhado.

Entre as edificações residenciais do estilo “*Townhouse*”, com unidades habitacionais sobrepostas, os códigos norte americanos exigem duas horas de tempo para resistência ao fogo para as paredes divisórias entre as unidades habitacionais e edificações vizinhas. A parede para ser considerada com resistência de duas horas não poderá possuir aberturas para canalizações, equipamentos mecânicos, dutos ou aberturas na parede (fiação elétrica e caixas metálicas, tomada elétrica são permitidas).

Sobre as edificações multifamiliares, é exigido a compartimentação de áreas para um mesmo piso de pavimento, com as paredes apresentando um tempo de resistência ao fogo de duas horas. Os códigos citam os valores de áreas máximas a serem compartimentadas. Para a separação de unidades habitacionais em edificações residenciais multifamiliares, a maioria dos códigos exige, no mínimo uma hora, de tempo de resistência ao fogo para a parede divisória entre as unidades (apartamentos) e outros mencionam apenas 30 minutos.

Nas tabelas 2.6 e 2.7 estão representados os valores dos parâmetros geométricos e o tempo requerido de resistência ao fogo para a configuração de uma seção de parede.

Tabela 2.6. Tempo de resistência ao fogo para configuração de seção de parede sem função estrutural. Fonte: Adaptado de NADER (2002).

Modelo	Espaçamento entre montantes (mm)	Isolamento térmico	Placa de Gesso		Tempo de Resistência ao Fogo (min)
			Tipo	Espessura (mm)	
U405	600	-	Uma comum	16	60
U406	600	50mm lâ mineral	Uma comum	12,5	60
U419	600	-	Uma comum	16	60
U468	600	62,5mm Fibra de Vidro	Uma comum	12,5	60
U491	600	75mm – Lã mineral	Uma comum	18,75	120
U411	600	-	Duas comuns	16	120
WP1052	600	-	Duas resistentes ao fogo	16	60
WP1070	600	37,5mm – Lã mineral	Uma resistente ao fogo	12,5	60
WP1072	600	-	Uma resistente ao fogo	16	60
WP1521	600	-	Duas resistentes ao fogo	12,5	120
WP1548	600	-	Duas resistentes ao fogo	16	120
WP2930	600	-	Duas resistentes ao fogo	18,75	180
WP2964	600	50mm – Lã mineral	Duas resistentes ao fogo	18,75	240
WALL2	600	50mm – Lã mineral	Uma comum	12,5	60
WALL14	600	-	Duas comuns	12,5	120

Tabela 2.8. Tempo de resistência ao fogo para configuração de seção de parede com função estrutural. Fonte: Adaptado de NADER (2002).

Modelo	Espaçamento entre montantes (mm)	Isolamento térmico	Placa de Gesso		Tempo de Resistência ao Fogo (min)
			Tipo	Espessura (mm)	
U440	600	opcional	Duas comuns	12,5	60
U423	600	-	Uma comum	12,5	45
U423	600	-	Uma comum	16	60
U423	600	-	Duas comuns	12,5	90
U423	600	50mm – Lã mineral	Duas comuns	16	120
U425	600	Lã mineral ou Fibra de vidro em toda cavidade	Uma comum	12,5	45
U425	600	Lã mineral ou Fibra de vidro em toda cavidade	Uma comum	16	60
U425	600	Lã mineral ou Fibra de vidro em toda cavidade	Duas comuns	12,5	90
WP1716	600	-	Duas resistentes ao fogo	12,5	120

2.5.2.4 KAITILA (2002)

Os painéis estruturais e não estruturais têm também a função de isolar os compartimentos de um sistema LSF em situação de incêndio formando, desta maneira, paredes com seus dois lados caracterizados por diferentes temperaturas. Por um lado, isso significa que o material de proteção dos montantes se deteriora muito mais rápido no lado exposto. Por outro lado, segundo KAITILA (2002), os lados dos montantes expostos se aquecem e o efeito da dilatação térmica é muito maior nesse lado, causando deslocamentos laterais da parte quente do perfil. O resultado é a ação de forças

compressivas nos montantes, introduzindo mais efeitos de segunda ordem e momentos fletores que propiciam a flambagem por flexão em torno do eixo de maior inércia.

Ainda conforme KAITILA (2002), o comportamento estrutural dos montantes muda com o desempenho da placa de fechamento dos painéis devido às condições de contorno. Em temperatura ambiente e também no início do acréscimo de temperatura em situação de incêndio, os efeitos de restrição causada pela presença dessas placas são eficientes no dimensionamento dos montantes.

A temperatura crítica para o término da eficiência da placa de gesso acartonado é aproximadamente 550°C, depois de atingida essa temperatura, tem-se o início da calcinação dessas placas, conforme menciona RANBY (1999) *apud* KAITILA (2002).

De qualquer modo, as placas de vedação fixadas no lado não exposto ao fogo continuam exercendo sua função depois que as placas do lado exposto foram deterioradas, a não ser que os deslocamentos causados pelo gradiente de temperatura e os efeitos de segunda ordem sejam suficientes para colapsar as placas comprimidas do lado não exposto. A destruição das placas no lado exposto ao fogo de um painel de LSF expõe os montantes diretamente ao calor do fogo. Isto resulta numa rápida redução do gradiente de temperatura desses montantes, enquanto que aqueles que ainda estão protegidos pelas placas continuam a ter um alto valor de gradiente de temperatura. Montantes vizinhos podem desta forma, ser expostos a diferentes condições num compartimento em situação de incêndio.

2.5.2.5 BÉNICHOU e SULTAN (2004)

BÉNICHOU E SULTAN (2004) apresentam resultados de ensaios de resistência ao fogo de painéis e pisos do sistema LSF, realizados pela *Nacional Research Council of Canadá* (NRC) com o auxílio de empresas governamentais. Estes ensaios foram efetuados em escala real com a meta de avaliar a resistência ao fogo de um sistema LSF com materiais de isolamento acústico. Os estudos experimentais incluíram painéis e pisos desse sistema, sendo que o objetivo era verificar o efeito dos seguintes parâmetros no dimensionamento de uma estrutura em LSF em situação de incêndio: fixação dos painéis de gesso acartonado nos montantes, utilização (ou não) e localização de canais

resilientes, tipos de isolantes acústicos, espessura das placas de gesso e número de camadas dessas placas, distribuição dos montantes, tipo de piso, carregamento da estrutura e também o tipo da estrutura (*Wood* ou *Steel Framing*).

O estudo experimental avaliou 17 painéis e 23 pisos com os seguintes detalhes:

- Montantes espaçados de 400 ou 600 mm;
- Espessura das placas de gesso acartonado: 12,7 mm ou 15,9 mm, fixadas com canais resilientes ou pinos ou parafusos autobrocantes;
- Tipo de isolante: fibra de vidro, lã de rocha ou celulose;
- Sub-piso fixado com parafusos autobrocantes ou pregos.

O tempo de resistência ao fogo foi estabelecido com base:

- Isolamento térmico: elevação da temperatura média em 140°C ou máxima de 180°C no ambiente da face não exposta;
- Estanqueidade: penetração da chama ou de gases com temperaturas capazes de iniciar uma ignição;
- Resistência: perda da capacidade portante ou deslocamentos excessivos dos elementos estruturais.

De acordo com BÉNICHOU e SULTAN (2004), os painéis em LSF que continham lã de vidro como isolante proporcionaram o mesmo tempo de resistência ao fogo quando comparados com painéis sem isolantes, por cerca de 65 min. A lã de rocha apresentou um aumento de resistência de 54% (100 min), enquanto que a de celulose mostrou uma redução de 4% no tempo de resistência ao fogo, ou seja 62 min. Conclui-se que o painel estrutural que continha lã de rocha como material isolante proporcionou uma maior resistência ao fogo, quando comparado com as fibras de celulose e vidro ou com painéis sem isolamento acústico. A lã de rocha protegeu os montantes e as placas de gesso do lado não exposto ao fogo, quando as placas do lado exposto já tinham se desintegrado.

BÉNICHOU E SULTAN (2004) concluem que dentre os diversos parâmetros, aqueles que influenciaram no desempenho do sistema LSF em situação de incêndio foram: a

fixação das placas de gesso acartonado, o tipo de isolante e o número de camadas de placas de gesso na composição da estrutura.

2.5.2.6 PATH (2004)

Partnership for Advancing Technology in Housing (PATH) é uma associação que visa à promoção de tecnologia em habitações norte americanas, a qual é gerida e apoiada pelo Departamento de Habitação e Desenvolvimento Urbano dos Estados Unidos. Essa associação desenvolveu um guia com informações sobre o sistema construtivo *Light Steel Framing* em aplicações residenciais com dados e detalhes sobre o comportamento ao fogo e o conforto acústico denominado: *Residential Steel Framing – Builder’s Guide to Fire and Acoustic Details* (2004). Neste trabalho, apresenta-se um resumo da parte referente à proteção contra incêndio.

Conforme menciona o guia da PATH (2004), sistemas construtivos, como o do *Light Steel Framing*, contendo perfil de aço formado a frio, geralmente alcançam uma resistência de fogo desejada através do uso de placas de gesso cartonado. Quando exposta ao fogo, a água livre e a água quimicamente combinada no gesso é gradualmente liberada em temperaturas acima de 100 °C. Isso faz com que ocorra uma manutenção da temperatura na face não exposta do revestimento. Esse processo de remoção de água quimicamente combinada é chamado de calcinação, resultando em uma perda de resistência ao fogo e diminuição da espessura da placa.

PATH (2004) apresenta a classificação em relação ao tipo e uso das habitações conforme apresentado pelo *International Building Code* (IBC) e pela norma do *National Fire Protection Association, Building Construction and Safety Code* (NFPA 5000:2003). Em relação à compartimentação e separação entre edificações, o IBC (2003) refere-se ao *International Residential Code* (IRC) do *International Code Council*. Os testes sob incêndio-padrão tem por base a norma ASTM E119:1995 “*Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials*,” da *American Society of Testing and Material*.

A seguir são apresentadas nas tabelas 2.8 e 2.9 algumas configurações para paredes do sistema construtivo *Light Steel Framing* considerando o fechamento por placa de gesso acartonado e proteção térmica na cavidade por material isolante, com o respectivo TRRF do painel. O TRRF foi determinado através de ensaios laboratoriais realizados pelas seguintes entidades: *Underwriters Laboratories* e *Gypsum Association*. São representados apenas modelos para as paredes sem e com função estrutural, visando atender os objetivos estabelecidos nesta pesquisa desenvolvida, que se restringiu ao estudo de uma seção de parede, servindo de exemplo comparativo para os modelos simulados no decorrer do trabalho.

Tabela 2.8. Modelos para configuração de paredes sem funções estruturais (Ensaio realizado pelo *Underwriters Laboratories*). Fonte: PATH (2004).

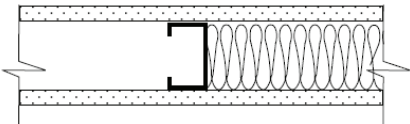
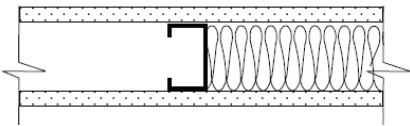
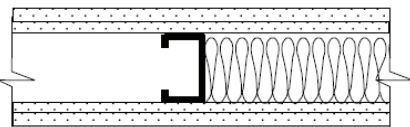
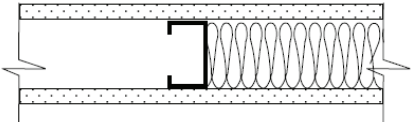
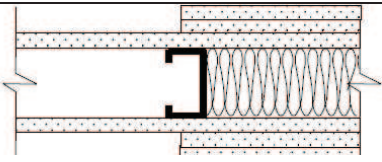
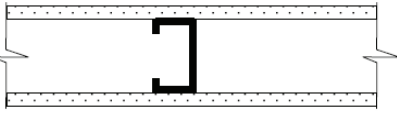
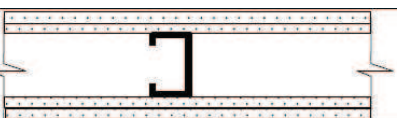
Modelo	Descrição	TRRF (minutos)	Ilustração
UL 448	-Perfis espaçados a cada 600mm; -com espessura de 37,5mm de lã de rocha na cavidade; -uma placa de gesso em cada lado com 12,5mm de espessura.	60	
UL 432	-Perfis espaçados a cada 600mm; - material de isolamento térmico opcional (lã de rocha na cavidade); -uma placa de gesso em cada lado com 15mm de espessura.	60	
UL 411	-Perfis espaçados a cada 600mm; -material de isolamento térmico opcional (lã de rocha na cavidade); -duas placas de gesso em cada lado com 15mm de espessura cada placa.	120	

Tabela 2.9. Modelos para configuração de paredes com funções estruturais. Fonte: PATH (2004).

Modelo	Descrição	TRRF (minutos)	Ilustração																								
UL 432 (Underwriters Laboratories)	-Perfis espaçados a cada 600mm; - material de isolamento térmico opcional (lã de rocha na cavidade); - uma placa de gesso em cada lado com 15mm de espessura.	60																									
UL 425 (Underwriters Laboratories) (somente para paredes internas)	-Perfis espaçados a cada 400mm; - material de isolamento térmico opcional (lã de rocha na cavidade); -placas de gesso em cada lado conforme indicado.	Ver quadro ao lado	 <table border="1" data-bbox="925 884 1380 1153"> <thead> <tr> <th>No de placas</th> <th>Espessura (mm)</th> <th>TRRF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>12,5</td> <td>45min</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>15</td> <td>60min</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>12,5</td> <td>90min</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>15</td> <td>120min</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>12,5</td> <td>120min</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>18</td> <td>120min</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	No de placas	Espessura (mm)	TRRF	1	12,5	45min	1	15	60min	1	12,5	90min	2	15	120min	2	12,5	120min	3	18	120min	2		
No de placas	Espessura (mm)	TRRF																									
1	12,5	45min																									
1	15	60min																									
1	12,5	90min																									
2	15	120min																									
2	12,5	120min																									
3	18	120min																									
2																											
GA WP1206 (Gypsum Association)	-Perfis espaçados a cada 400mm; -uma placa de gesso em cada lado com 15mm de espessura.	60																									
GA WP1714 (Gypsum Association)	-Perfis espaçados a cada 400mm; -duas placas de gesso em cada lado com 15mm de espessura.	120																									

2.5.2.7 ALVES (2006)

ALVES (2006) apresenta os resultados numéricos da resistência última de colunas, vigas e vigas-coluna constituídas por perfis formados a frio com seção U enrijecida em temperaturas elevadas com distribuição uniforme ou não uniforme nas seções

transversais (casos de colunas e vigas-colunas). De suas análises, concluiu-se que os perfis formados a frio são capazes de suportar temperaturas superiores à 350°C.

O EN 1993-1-2:2005 apresenta o valor de temperatura igual a 350 °C como um limite para situações mais propícias à flambagem local, até o qual pode-se dispensar as verificações da capacidade resistente em situação de incêndio.

Com relação às vigas, ALVES (2006) investigou a estabilidade, o comportamento de pós-flambagem e a resistência última de elementos simplesmente apoiados, que bifurcam em modos de instabilidade distorcionais e globais por flexo-torção. Concluiu-se que: o decréscimo do momento último provocado pelo aumento de temperatura é independente da amplitude das imperfeições geométricas iniciais; em virtude de os perfis de aço formados a frio estarem geralmente protegidos termicamente por placas de gesso ou cimento. O autor ressalta que é importante estudar também a influência da presença de gradientes de temperaturas transversais, assim como outras condições de apoio e carregamento.

ALVES (2006) também obteve análises numéricas referentes à simulação de transferência de calor em paredes *Stud Wall* (painéis com fechamento de placas de gesso acartonado) expostas ao incêndio em uma das faces, com auxílio do programa computacional ABAQUS. Nas avaliações do modelo em comparação a dados experimentais, o autor concluiu que *“as simulações relativas a paredes Stud Wall sem isolamento interno mostram-se bastante satisfatórias, visto que foi possível reproduzir o fenômeno de transferência de calor em um sistema complexo, tanto geometricamente quanto em termos de propriedades térmicas”*. Já em relação aos modelos propostos para o caso de haver isolamento interno, os resultados mostraram alguns desvios nas previsões de temperatura, os quais apresentam valores experimentais de temperaturas superiores (conforme pesquisa realizada por FENG *et al.*, 2002). Foi suposto pelo autor que possíveis elevações da temperatura nos sistemas possam ter ocorrido devido à acomodação do material isolante no interior da cavidade, o que muito provavelmente pode ter gerado vazios. Sendo o material isolante de baixa condutividade térmica, os vazios provocariam a transferência de calor de forma mais eficiente por radiação. Essas falhas de conformação não foram consideradas no modelo numérico.

ALVES (2006) observou que as placas de gesso são excelentes para minimizar a transferência de calor entre compartimentos.

3

ANÁLISE NUMÉRICA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PAREDES DO SISTEMA LSF

3.1 Introdução

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia utilizada no desenvolvimento dos modelos numéricos utilizando o programa computacional ABAQUS (*SIMULIA CORP.*, 2007) que efetua cálculos por meio do método dos elementos finitos, MEF.

Visando à modelagem de uma parede do sistema construtivo *Light Steel Framing* foi considerado um de seus lados exposto a elevadas temperaturas, situação similar a de um incêndio em um compartimento. Desse modo, é possível monitorar a variação da temperatura em função do tempo ao longo da seção da parede.

Para validação, as simulações tiveram como referência os trabalhos desenvolvidos por FENG *et al.* (2003) e ALVES (2006).

3.2 Modelos Numéricos

A geometria da parede é a mesma utilizada por FENG *et al.* (2003) e ALVES (2006). O esquema representativo da parede está ilustrado na figura 3.1.

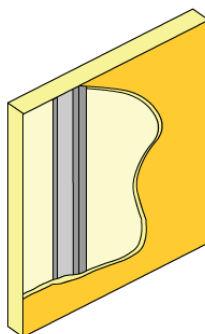


Figura 3.1. Detalhes de uma parede LSF sem isolamento na cavidade.

As dimensões utilizadas estão apresentadas na figura 3.2.

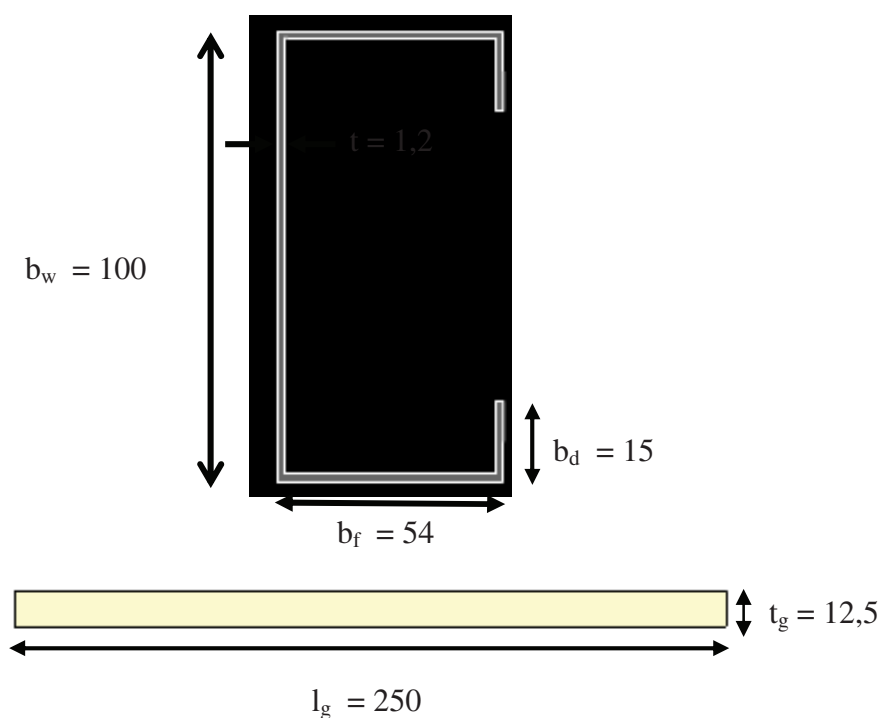


Figura 3.2. Parâmetros geométricos do perfil Ue e da placa de gesso acartonado (FENG *et al.*,2003). Dimensões em milímetros.

Na figura 3.3 tem-se uma seção da parede, com indicação dos processos de transferência de calor que ocorrem.

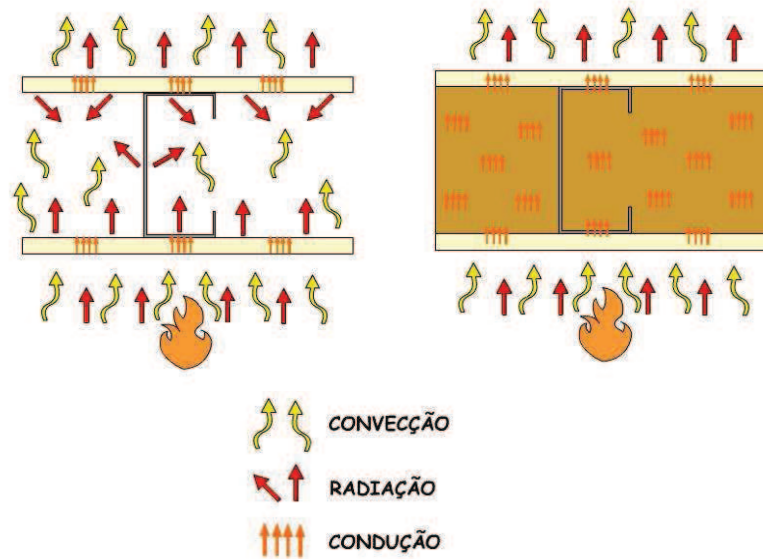


Figura 3.3. Transferências de calor em uma seção de parede LSF sem e com isolamento na cavidade.

Conforme pode ser observado na figura 3.3, tem-se transferência de calor por condução ao longo das placas de gesso, do perfil e ao longo da lã de rocha nas paredes com isolamento. As transferências de calor por convecção e por radiação ocorrem do incêndio para as placas de gesso, no interior da cavidade (modelo sem isolamento) e das placas para o ambiente no lado não exposto ao incêndio-padrão.

As superfícies externas estão sujeitas aos fluxos de calor por unidade de área, W/m^2 , devidos à radiação e convecção. A equação 3.1 representa este fluxo:

$$q = \xi \sigma \left[(\theta - \theta^z)^4 - (\theta^0 - \theta^z)^4 \right] + h(\theta - \theta^0), \quad (3.1)$$

onde ξ é a emissividade resultante da superfície na qual tomou-se o valor de 0,8 para o lado exposto ao fogo e 1,0 para o lado sem exposição, conforme utilizado por FENG *et al* (2002) em sua pesquisa; σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,68 \times 10^{-8} W/m^2 \text{ } ^\circ C^4$); θ é a temperatura na superfície; θ^0 é a temperatura do gás tomada segundo a curva de incêndio padrão (ABNT NBR 14.432:2001) e θ^z é temperatura de zero absoluto na escala adotada. Já para a superfície não exposta ao incêndio, em temperatura ambiente, considerou-se θ^0 igual a $20 \text{ } ^\circ C$. Para os coeficientes de convecção térmica (h), os seguintes valores foram considerados, $h = 25 W/m^2 \text{ } ^\circ C$, para o lado exposto ao incêndio e $h = 10 W/m^2 \text{ } ^\circ C$ para a superfície não exposta.

Em relação à radiação na cavidade, o programa computacional ABAQUS (*SIMULIA CORP.*, 2007) considera a mesma como sendo um conjunto de superfícies compostas por faces de elementos finitos, não levando em conta a atenuação da radiação na cavidade, assumindo que as faces são isotérmicas e com emissividades uniformes. Os valores adotados para a emissividade ξ e para o coeficiente de convecção térmica h foram de 0,8 e 10 W/m² °C, respectivamente, conforme FENG *et. al* (2002). O fluxo de radiação na cavidade é dado por:

$$q = \frac{\sigma \varepsilon_i}{A_i} \sum_j \varepsilon_j \sum_k F_{ik} C_{kj}^{-1} \left[(\theta_j - \theta^Z)^4 - (\theta_i - \theta^Z)^4 \right], \quad (3.2)$$

onde A_i é a área da face i que está sendo “vista” pelas demais faces dos elementos que definem a cavidade $j = 1, 2, \dots, n$; $\varepsilon_i, \varepsilon_j$ são as emissividades das faces i e j ; σ é a constante de Stefan-Boltzmann; F_{ij} é a matriz de fatores geométricos (fator de vista); θ_i, θ_j são as temperaturas nas faces i e j ; θ^Z é a temperatura de zero absoluto na escala adotada.

O elemento finito utilizado foi o quadrilateral, linear e de quatro nós, DC2D4, da biblioteca do programa ABAQUS (*SIMULIA CORP.*, 2007).

Para o entendimento do comportamento do programa computacional ABAQUS (*SIMULIA CORP.* 2007), ALVES (2006) estudou em seu trabalho o refinamento da malha de elementos finitos adotada na simulação e concluiu que essas malhas não precisam ter um elevado grau de refinamento.

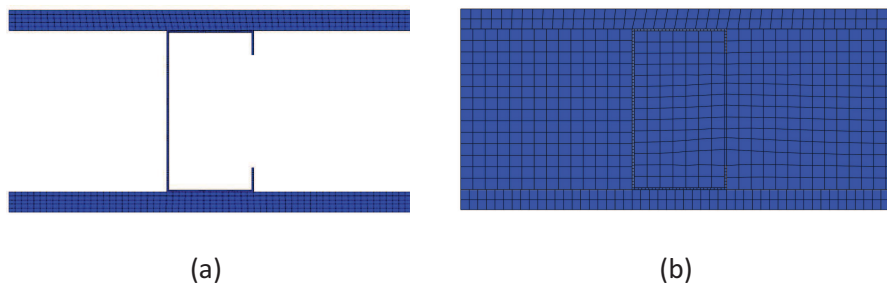
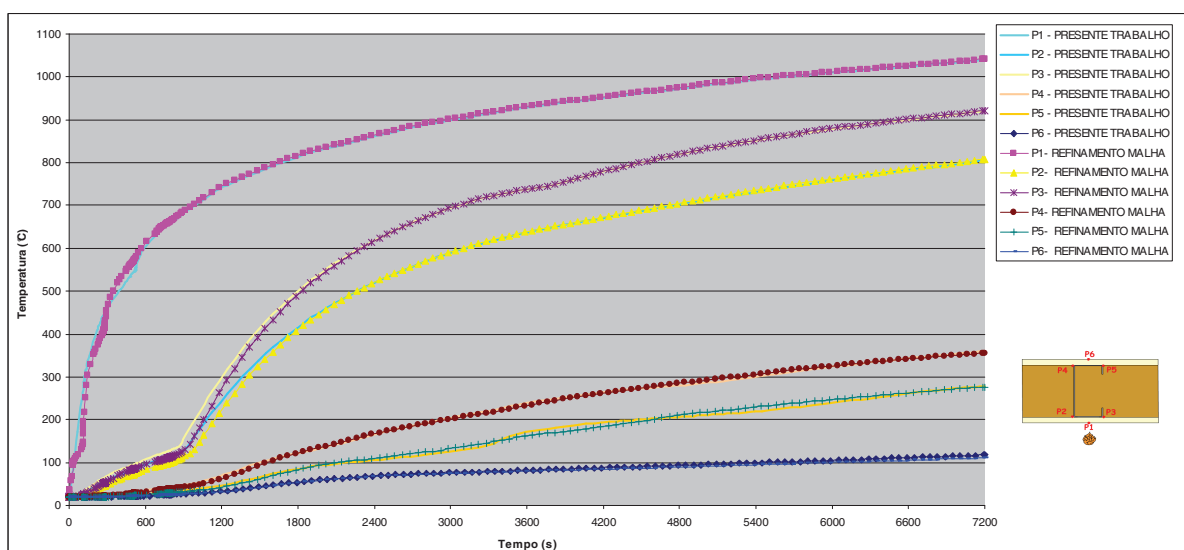
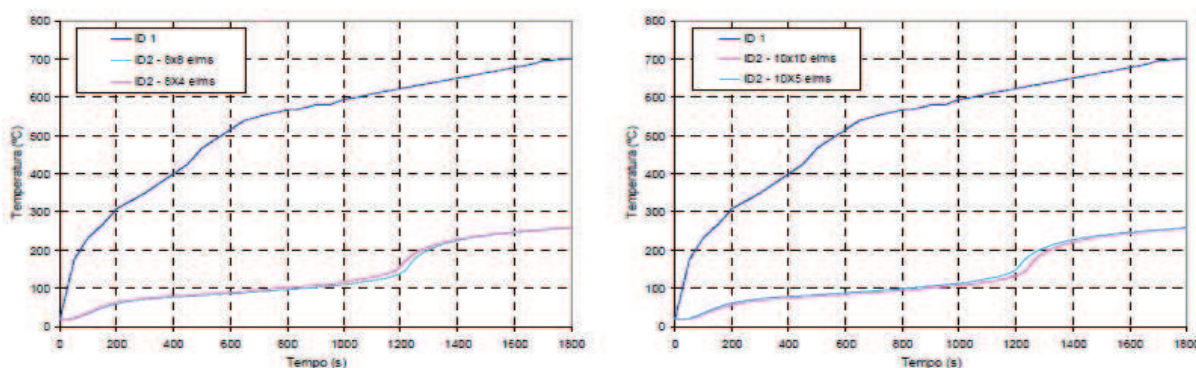


Figura 3.4. Malha de elementos finitos adotada: (a) modelo sem material térmico na cavidade e (b) modelo com isolamento térmico por lã de rocha

Nos modelos que serão estudados a seguir, pode-se observar uma variação no número de divisões presentes nos elementos das placas de gesso acartonado entre os modelos sem isolamento (5 divisões) e com isolamento (2 divisões) – Figura 3.4. Para este último caso foram adotadas apenas duas divisões em função do mencionado por ALVES (2006), em relação a não necessidade de refinamento e a realização de um estudo comparativo para o modelo com isolamento na cavidade, visando observar a influência do refinamento da malha nos resultados gerados. Na figura 3.5 (A) verifica-se que as variações foram mínimas entre a malha com 1307 elementos onde as placas de gesso possuem 5 elementos ao longo da espessura (REFINAMENTO MALHA) e a outra com 805 onde apenas 2 elementos são utilizados ao longo da espessura da placa de gesso (PRESENTE TRABALHO). Será então utilizada a malha com menos elementos, tendo em vista que não há alterações significativas nos resultados e o tempo gasto na simulação é o dobro com o maior refinamento da malha.



(A)



(B)

Figura 3.5. (A) Comparativo entre malhas simuladas no presente trabalho(B) Comparativo do refinamento da malha, adaptado de ALVES (2006)

A Figura 3.5 (B) ilustra algumas simulações efetuadas por Alves (2006) visando estudar a influência do refinamento da malha. O autor menciona que para as placas de gesso uma configuração pobre é capaz de conduzir a bons resultados e que refinamentos excessivos podem conduzir a esforços computacionais desnecessários. Constatou-se que para o ponto ID-2 (lado não exposto ao incêndio) a alteração no número de elementos não ocasionou variações significativas. Para as simulações desenvolvidas foi considerada uma discretização superior que a utilizada por ALVES (2006). No modelo sem isolamento há aproximadamente 871 elementos e no modelo com preenchimento da cavidade 805, conforme informado anteriormente.

3.3 Propriedades dos materiais

Devido a falta de informações de fabricantes e fornecedores e a escassez de pesquisas publicadas sobre materiais de vedação constituintes do sistema LSF em situação de incêndio, com informes técnicos de produtos disponibilizando apenas as propriedades dos materiais em relação ao conforto térmico, foram tomadas as propriedades térmicas somente para as placas de gesso acartonado e para a lã de rocha, conforme apresentadas por FENG *et al.* (2002) e relacionadas na tabela 3.1.

A placa de gesso acartonado utilizada por FENG *et al.* (2002) é a *Fireline Gyproc* do tipo resistente ao fogo produzida pela *British Gypsum Ltd.*

Tabela 3.1. Propriedades Térmicas do gesso. Fonte: FENG *et al.* (2002).

Propriedade	Valor
Densidade (kg/m ³)	727,1
Condutividade Térmica (W/m °C)	0,2 a 10 °C 0,218 a 150 °C 0,103 a 155 °C 0,3195 a 1200 °C
Calor Específico (J/kg °C)	925,04 a 10 °C 941,5 a 95 °C 24572,32 a 125 °C 953,14 a 155 °C 1097,5 a 1200 °C

Observa-se na tabela 3.1 que o valor do calor específico tem uma elevação acentuada por volta dos $125^{\circ}C$ em função da umidade presente na placa de gesso. Após a evaporação da água, responsável pelo pico de elevação, há uma grande diminuição do valor seguindo uma variação mais branda em seu aumento até os $1200^{\circ}C$.

Os valores da condutividade térmica e o calor específico do aço foram tomados segundo a norma europeia EN 1993-1-2:2005, sendo apresentados nas tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2. Condutividade Térmica do aço. Fonte: EN 1993-1-2:2005.

Condutividade Térmica ($W/m^{\circ}C$)	Temperatura
$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \times \theta$	$20^{\circ}C \leq \theta < 800^{\circ}C$
$\lambda_a = 27,3$	$800^{\circ}C \leq \theta \leq 1200^{\circ}C$

Tabela 3.3. Calor Específico do aço. Fonte: EN 1993-1-2:2005.

Calor Específico ($J/Kg^{\circ}C$)	Temperatura
$C_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta - 1,69 \times 10^{-3} \theta^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta^3$	$20^{\circ}C \leq \theta \leq 600^{\circ}C$
$C_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta}$	$600^{\circ}C < \theta \leq 735^{\circ}C$
$C_a = 545 + \frac{17820}{\theta - 731}$	$735^{\circ}C < \theta \leq 900^{\circ}C$
$C_a = 650$	$900^{\circ}C < \theta \leq 1200^{\circ}C$

A densidade do aço adotada foi igual a 7850 kg/m^3 .

Com relação às propriedades térmicas da lã de rocha, conforme mencionado anteriormente, em função da falta de dados sobre as propriedades térmicas em temperaturas elevadas para os produtos comercializados no Brasil, foram utilizados valores de entrada para simulação numérica estabelecido por FENG *et al.* (2002), listados na tabela 3.4. Foi utilizada a lã de rocha *Isowool 1000* industrializada pela *British Gypsum Ltd.*

Tabela 3.4. Propriedades térmicas da lã de rocha. Fonte: FENG *et al.* (2002).

Propriedade	Valor
Densidade (kg/m ³)	25
Condutividade Térmica (W/m °C)	0,036
Calor Específico (J/kg °C)	840

3.4 Validação dos Modelos

Visando a validação dos modelos e a verificação da capacidade do programa computacional ABAQUS (*SIMULIA CORP.*, 2007) foram simuladas duas situações já estudadas numericamente e experimentalmente por FENG *et al.* (2002) e numericamente por ALVES (2006): um modelo sem isolamento na cavidade e outro com isolamento na cavidade, ambos considerando apenas uma placa de gesso acartonado em cada face da parede.

3.4.1 Modelo sem isolamento na cavidade

Para o modelo sem isolamento na cavidade, foram utilizados 3 pontos de monitoramento da temperatura, conforme ilustra a figura 3.6. O ponto P1 está na face da placa de gesso exposta ao incêndio padrão, o ponto P2 está localizado na face do perfil voltada para a cavidade e o ponto P3 está na face externa da outra placa de gesso localizada no lado da parede sem exposição ao incêndio (temperatura ambiente).

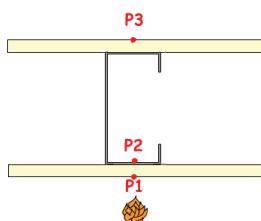
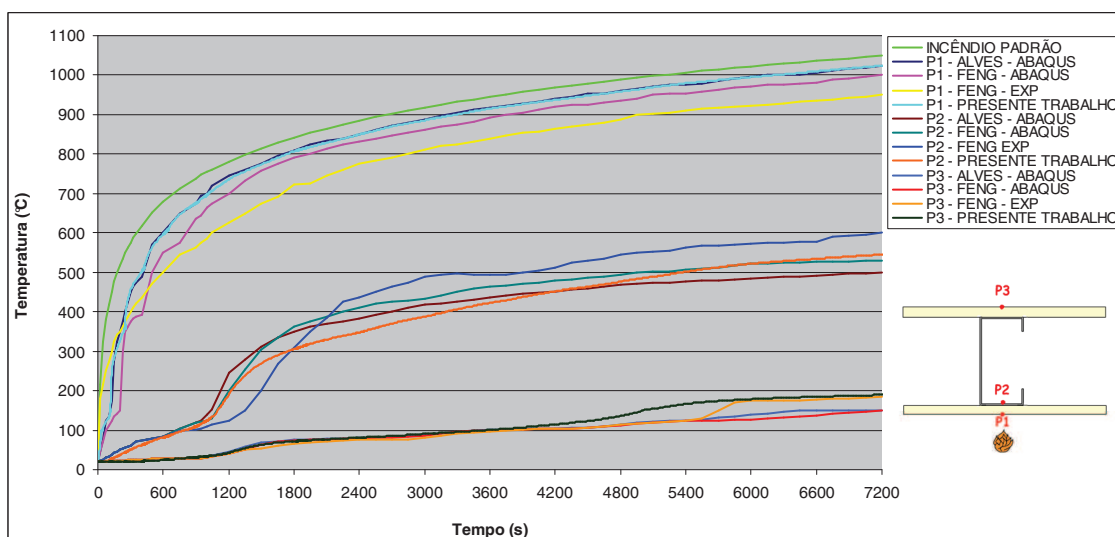
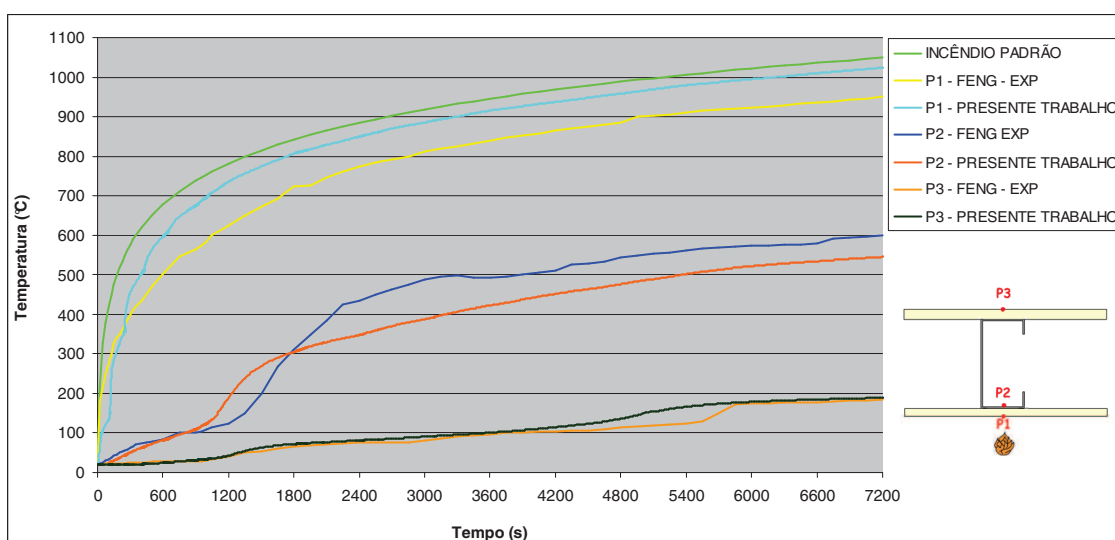


Figura 3.6. Pontos de monitoramento no modelo sem isolamento.

A figura 3.7 apresenta os resultados simulados no presente trabalho e os obtidos por FENG *et al.* (2002) e por ALVES (2006).



(a)



(b)

Figura 3.7. Resultados obtidos por FENG *et. al.* (2002) e ALVES (2006) para o modelo sem isolamento: (a) comparativo entre os resultados experimentais e numéricos (obtidos por FENG *et. al.*;2002 e ALVES;2006) e (b) comparativo apenas entre os resultados experimentais e os do presente trabalho.

Da ilustração comparativa para o modelo sem isolamento observa-se que:

- para o ponto P1, localizado na face da placa de gesso exposta ao incêndio, os valores encontrados são idênticos aos de ALVES (2006), próximos aos obtidos numericamente por FENG *et al.* (2002), com variação superior média de 30 °C, porém, superiores aos obtidos experimentalmente;

- em relação ao ponto P2, localizado na face do perfil, os valores encontrados são próximos aos de ALVES (2006), com variação máxima de $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ por volta de 1800s. Já sobre os valores obtidos numericamente por FENG *et al.* (2002), constata-se uma variação máxima de $62\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o tempo de 2250s, mas com valores bem próximos a partir dos 5400s. Em relação ao trabalho experimental, todos os modelos numéricos apresentam variações, sendo que o modelo proposto no presente trabalho atinge variação máxima de $98\text{ }^{\circ}\text{C}$ por volta dos 3100s. Até por volta dos 900s as temperaturas encontradas em todos os modelos são semelhantes, porém com variações a partir deste instante. Observa-se ainda que as curvas apresentam os mesmos comportamentos de ascensão;

- para o ponto P3, localizado na face da parede não exposta ao incêndio, os valores encontrados são semelhantes em todos os modelos até por volta dos 4100s. No tempo de 5400s, a diferença em relação ao experimental é de $43\text{ }^{\circ}\text{C}$. Observa-se ainda que a curva do modelo proposto apresenta o mesmo comportamento de ascensão que a curva experimental, mas com elevação antecipada no patamar final de temperatura, por volta dos 4200s, contra os 5600s do modelo experimental. Por volta dos 5800s os valores obtidos no modelo são semelhantes aos experimentais de FENG *et al.* (2002);

A figura 3.8 ilustra a distribuição de temperatura no instante final da simulação para o modelo em validação.

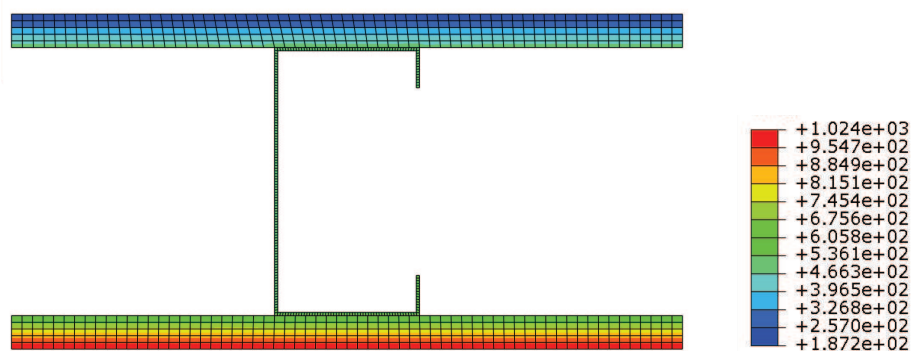


Figura 3.8. Temperatura em $^{\circ}\text{C}$ no tempo de 7200 segundos para o modelo sem isolamento.

A figura 3.9 exibe a evolução da temperatura ao longo da seção da parede no decorrer da simulação, do instante 0 até 7200 segundos. Observa-se que o aumento da temperatura na face interna da placa de gesso ocorre, principalmente, pela radiação que ocorre na cavidade.

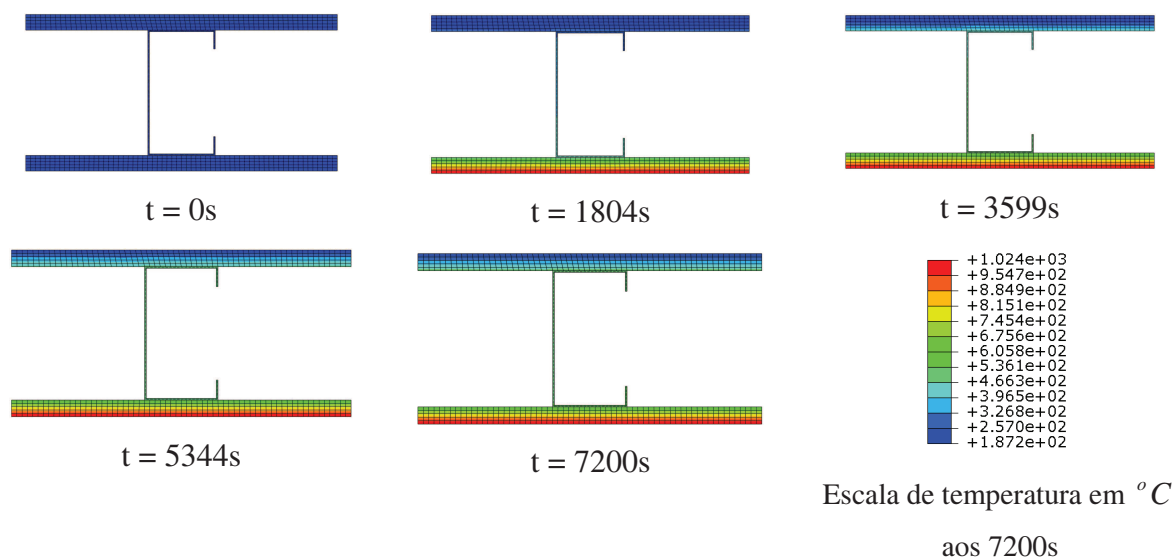


Figura 3.9. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.

3.4.2 Modelo com isolamento na cavidade

No modelo com isolamento na cavidade, foram utilizados seis pontos de monitoramento da temperatura.

A figura 3.10 apresenta a distribuição dos pontos, onde o ponto P1 está na face da placa de gesso exposta ao incêndio padrão, os pontos P2, P3, P4 e P5 estão localizados nas extremidades do perfil e o ponto P6 está na face externa da outra placa de gesso sem exposição ao incêndio.

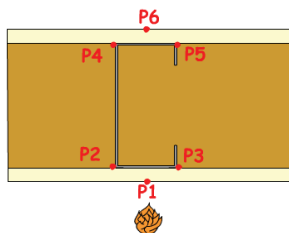
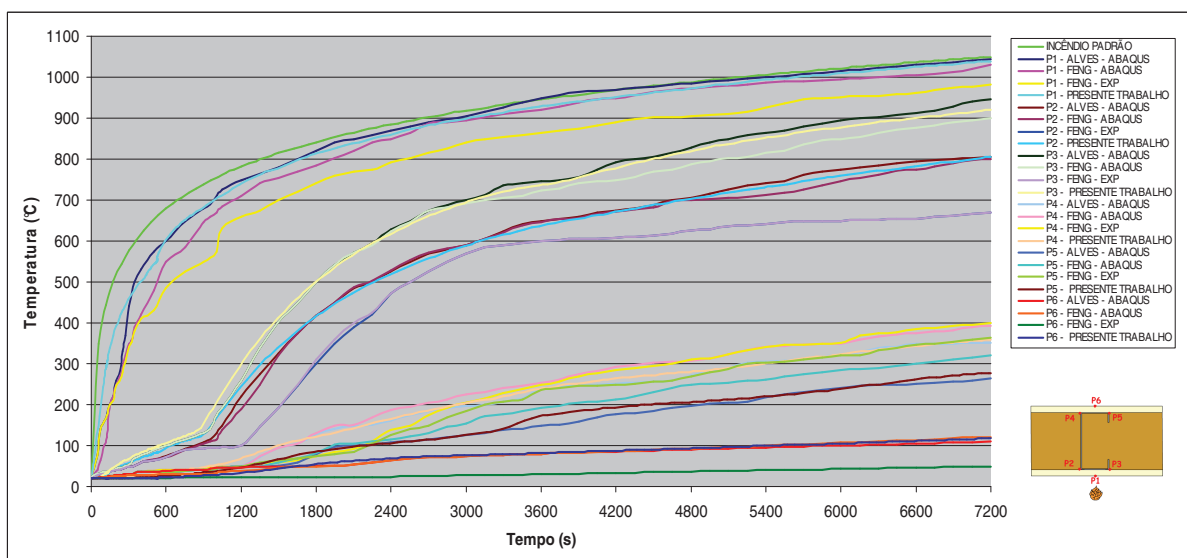
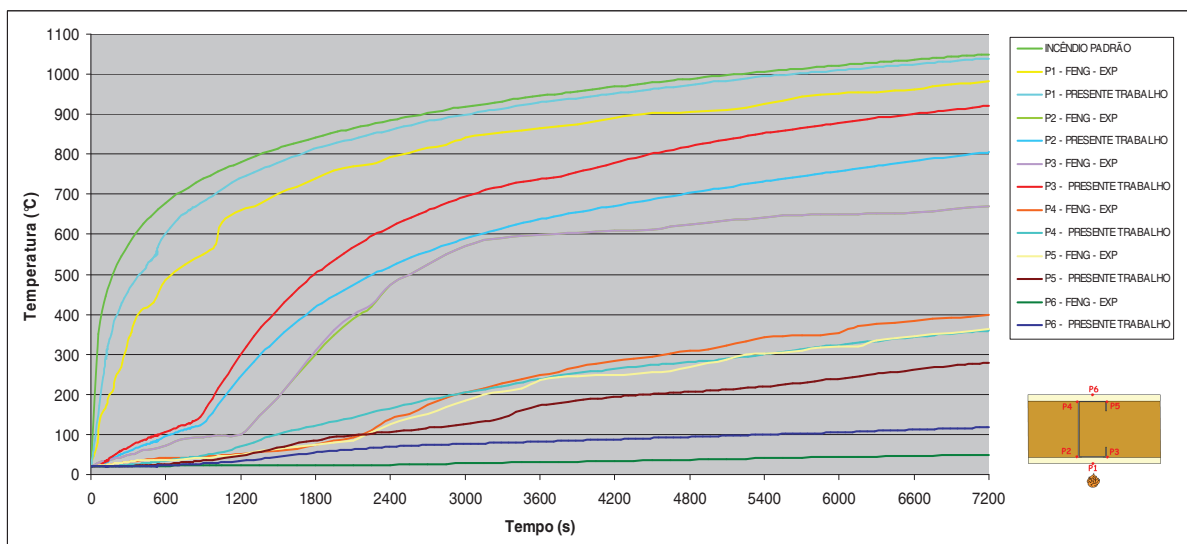


Figura 3.10. Esquema dos pontos de monitoramento para o modelo com isolamento.

A figura 3.11 exibe as curvas com a variação da temperatura, em função do tempo de exposição ao incêndio para os pontos de monitoramento determinados anteriormente, para os modelos simulados no presente trabalho e nos modelos desenvolvidos numericamente e experimentalmente por FENG *et al.* (2002) e por ALVES (2006) apenas numericamente.



(a)



(b)

Figura 3.11. Resultados obtidos por FENG *et al.* (2002) e ALVES (2006) para o modelo com isolamento: (a) comparativo entre os resultados experimentais e numéricos (obtidos por FENG *et al.*;2002 e ALVES;2006) e (b) comparativo apenas entre os resultados experimentais e os do presente trabalho.

Após análise da figura 3.11 observa-se que:

- para o ponto P1, localizado na face exposta ao incêndio, os valores encontrados são próximos aos de ALVES (2006) e dos numericamente observados por FENG *et al.* (2002), com variação máxima do primeiro de $25^{\circ}C$ por volta dos 3500 segundos e máxima de $70^{\circ}C$ no instante 750s, porém, superiores aos constatados no trabalho experimental, mas com evolução da temperatura similar aos demais resultados numéricos;

- em relação aos pontos P2 e P3, localizado na face interna do perfil, os valores encontrados foram próximos aos de ALVES (2006) e os obtidos numericamente por FENG *et al.* (2002). Constata-se que para o tempo de 950s, instante onde os modelos numéricos dos demais autores começam a divergir, o modelo desenvolvido no presente estudo está com temperatura acima da temperatura dos demais, com diferença em torno de $55^{\circ}C$. Em relação ao trabalho experimental, todos os modelos numéricos apresentam variações, onde o modelo proposto no presente trabalho, atinge variação máxima de $140^{\circ}C$ por volta dos 1200s, para o ponto P2 e de $240^{\circ}C$ por volta dos 6450 segundos em P3. Constata-se que as curvas apresentam os mesmos comportamentos de ascensão, com patamares definidos;

- para os pontos P4 e P5, localizados no perfil, nas extremidades superiores do mesmo, os valores encontrados são semelhantes em todos os modelos até por volta dos 1020s para o ponto P4 e 1200s para o P5. As variações máximas encontradas em relação aos demais modelos para o ponto P4 foram de $25^{\circ}C$ (3750s) e $45^{\circ}C$ (5250s) para os numéricos de ALVES (2006) e FENG *et al.* (2002), respectivamente, e de $85^{\circ}C$ sobre o modelo experimental, por volta dos 7200s. Já para o ponto P5 as variações observadas são menores, de $17^{\circ}C$ (4500s) e $33^{\circ}C$ (7200s) para os numéricos de ALVES (2006) e FENG *et al.* (2002) respectivamente, e de $50^{\circ}C$ em relação ao modelo experimental por volta dos 1950s;

- sobre o ponto P6, localizado na face não exposta, observa-se que os valores encontrados nos modelos numéricos são semelhantes, com variações mínimas. Porém,

ambos não apresentaram a mesma evolução de temperatura na seção da parede conforme obtido pelo modelo experimental de FENG *et al.* (2002).

A figura 3.12 ilustra a distribuição de temperaturas no instante final da simulação para o modelo em validação.

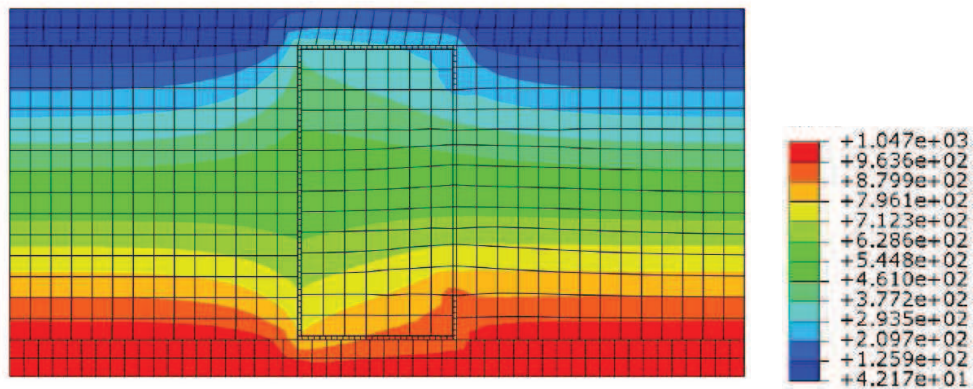


Figura 3.12. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos para o modelo com isolamento.

Na figura 3.13 apresenta-se a evolução da temperatura ao longo da seção da parede no decorrer da simulação, para o tempo total de 7200 segundos. Observa-se que a presença do isolamento na cavidade diminui os valores de temperaturas nas áreas comunicantes da placa de gesso do lado da parede não exposta a elevadas temperaturas.

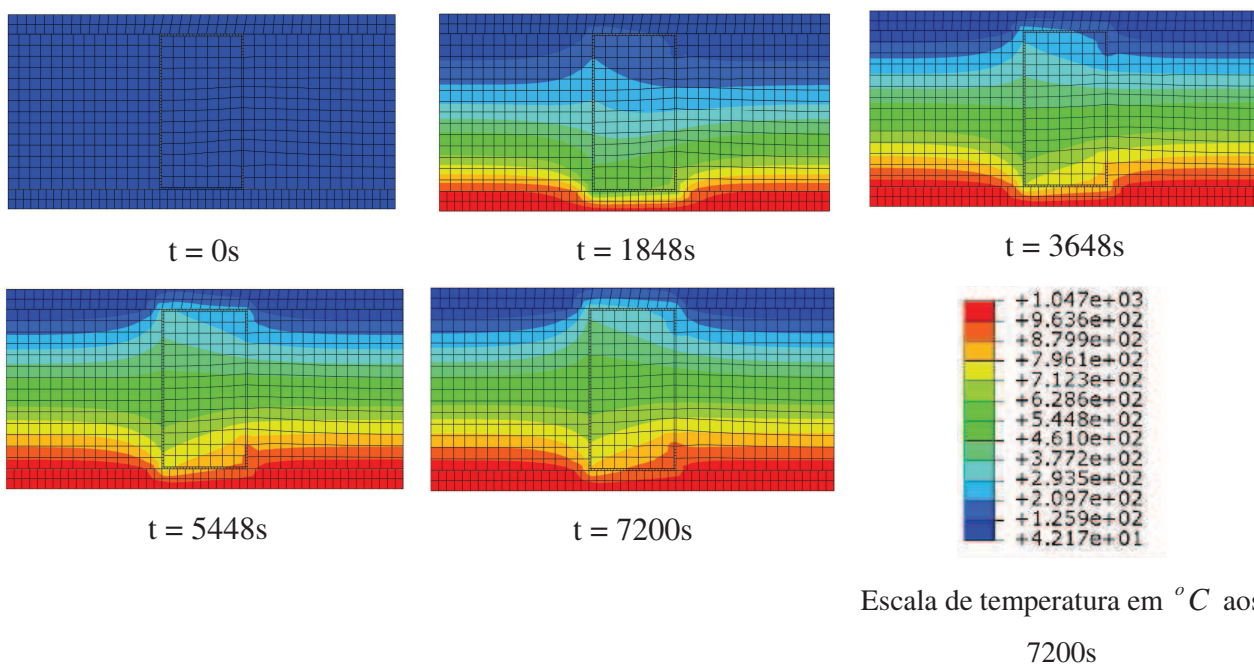


Figura 3.13. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.

3.5 Observações e conclusões sobre os modelos desenvolvidos

Após simulação dos modelos pode-se concluir que:

- os valores obtidos nos modelos experimentais em determinados instantes são inferiores aos numéricos, porém, com comportamentos similares das curvas de variação de temperatura. No modelo experimental, com isolamento na cavidade, conforme os autores FENG *et. al* (2002) e ALVES (2006), pode ter ocorrido uma má acomodação do lã de rocha no interior da cavidade, gerando espaços vazios, não vislumbrados no modelo numérico. Deste modo, consideram-se aceitáveis e conservadores os resultados encontrados, validando os modelos numéricos. No próximo capítulo, serão elaborados modelos com diferentes configurações com base na validação efetuada;
- a umidade da placa de gesso proporciona um retardo do aquecimento da parede. A elevação brusca da temperatura após a evaporação da umidade é evidenciada nos gráficos apresentados;
- o uso de isolamento no preenchimento da cavidade leva a valores maiores de temperatura nos pontos P2 e P3 (figura 3.11) em comparação com o ponto P2 do outro modelo sem isolamento (figura 3.7).

4

ESTUDO DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES PARA A PAREDE LSF

4.1 Introdução

Após validação e análise do comportamento dos modelos elaborados no capítulo 3, foram desenvolvidos outros modelos com diferentes configurações para a parede. O objetivo é estudar a distribuição da temperatura na face não exposta ao incêndio, ou seja, o isolamento proporcionado, através do acréscimo de placas ou trechos de placas aos modelos. Os resultados encontrados estão ilustrados nas figuras com gráficos comparativos ao longo deste capítulo.

4.2 Modelos Numéricos

No desenvolvimento dos modelos apresentados neste capítulo foram consideradas as geometrias utilizadas no capítulo anterior. Vale ressaltar que os materiais utilizados e suas propriedades térmicas são as mesmas. As variações ocorreram em função do acréscimo de uma segunda placa de gesso em alguns casos, mas, com espessura e comprimento iguais aos outros modelos do capítulo 3, além da criação de formas alternativas de proteção para o perfil, com a utilização de segmentos de placa de gesso acartonado para proteção da alma e das mesas ou emprego de lã de rocha.

Foram desenvolvidos os seguintes modelos ilustrados na figura 4.1:

- **Modelo 2x2 sem isolamento na cavidade:** duas placas de gesso em cada lado sem isolamento no interior da parede (figura 4.1a);
- **Modelo 2x2 com isolamento na cavidade:** duas placas de gesso em cada lado com lã de rocha no interior da parede (figura 4.1b);
- **Modelo 1x1 com proteção 1x no Perfil e sem isolamento na cavidade:** uma placa de gesso em cada lado sem isolamento térmico no interior da parede, porém, com acréscimo de placa de gesso apenas na largura das mesas do perfil (figura 4.1c);
- **Modelo 1x1 com proteção 3x no Perfil e sem isolamento na cavidade:** uma placa de gesso em cada lado sem isolamento térmico no interior da parede, porém, com acréscimo de placa de gesso correspondente a três vezes a largura das mesas do perfil (figura 4.1d);
- **Modelo 1x1 com proteção 1x no Perfil e com isolamento na cavidade:** uma placa de gesso em cada lado com lã de rocha no interior da parede, porém, com acréscimo de placa de gesso apenas na largura das mesas do perfil (figura 4.1e);
- **Modelo 1x1 com proteção 3x no Perfil e com isolamento na cavidade:** uma placa de gesso em cada lado com isolamento térmico no interior da parede por lã de rocha, porém, com acréscimo de placa de gesso correspondente a três vezes a largura das mesas do perfil (figura 4.1f);
- **Modelo 1x1 com proteção 1x no Perfil, com fechamento lateral e sem isolamento na cavidade:** uma placa de gesso em cada lado sem isolamento térmico no interior da parede, porém, com acréscimo de placa de gesso apenas na largura das mesas do perfil e com fechamento lateral por placa de gesso na altura da alma (figura 4.1g);
- **Modelo 1x1 com proteção 3x no Perfil, com fechamento lateral e sem isolamento na cavidade:** uma placa de gesso em cada lado sem proteção térmica no interior da parede, porém, com acréscimo de placa de gesso correspondente a três vezes a largura da mesa do perfil e com fechamento lateral por placa de gesso na altura da alma (figura 4.1h).

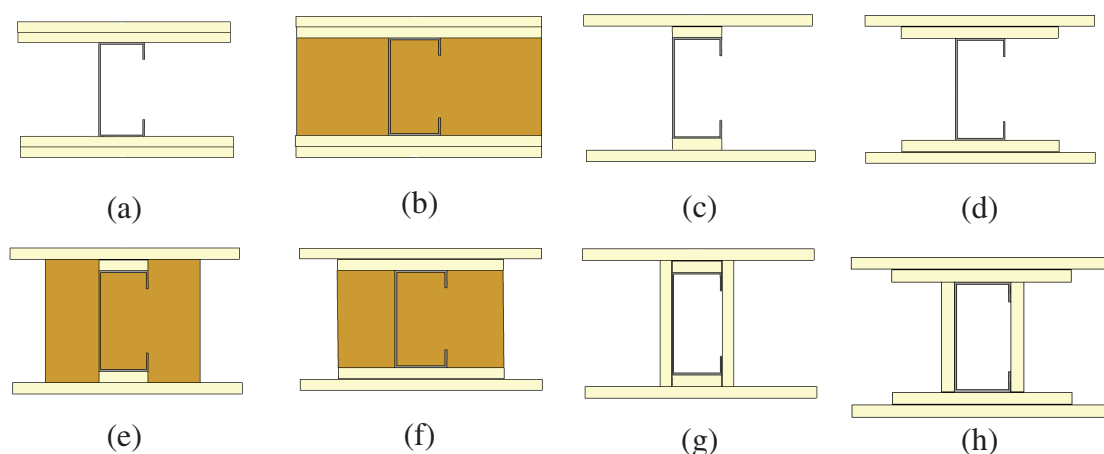


Figura 4.1. Modelos desenvolvidos: (a) Modelo 2x2 sem isolamento na cavidade; (b) Modelo 2x2 com isolamento na cavidade; (c) Modelo 1x1 com proteção 1x no Perfil e sem isolamento na cavidade; (d) Modelo 1x1 com proteção 3x no Perfil e sem isolamento na cavidade; (e) Modelo 1x1 com proteção 1x no Perfil e com isolamento na cavidade; (f) Modelo 1x1 com proteção 3x no Perfil e com isolamento na cavidade; (g) Modelo 1x1 com proteção 1x no Perfil, com fechamento lateral e sem isolamento na cavidade; (h) Modelo 1x1 com proteção 3x no Perfil, com fechamento lateral e sem isolamento na cavidade.

Os modelos foram idealizados com o objetivo de verificar a viabilidade de proteções proporcionadas por acréscimo de partes de placas de gesso acartonado de diferentes tamanhos no entorno da estrutura metálica. Buscou-se adotar geometrias fáceis de serem desenvolvidas na prática, considerando as limitações executivas do sistema construtivo LSF.

4.2.1 Modelo 2x2 sem isolamento na cavidade

A geometria do modelo consiste no acréscimo de uma segunda placa de gesso acartonado em cada lado da parede ao modelo já elaborado com apenas uma placa e validado anteriormente. Na figura 4.2 estão representados os pontos de monitoramento utilizados durante a simulação.

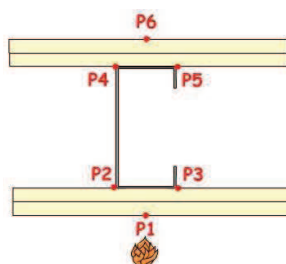


Figura 4.2. Pontos de monitoramento do modelo sem isolamento com 2 placas de gesso em cada lado da parede.

Na figura 4.3 tem-se o gráfico com as curvas de elevação da temperatura em função do tempo.

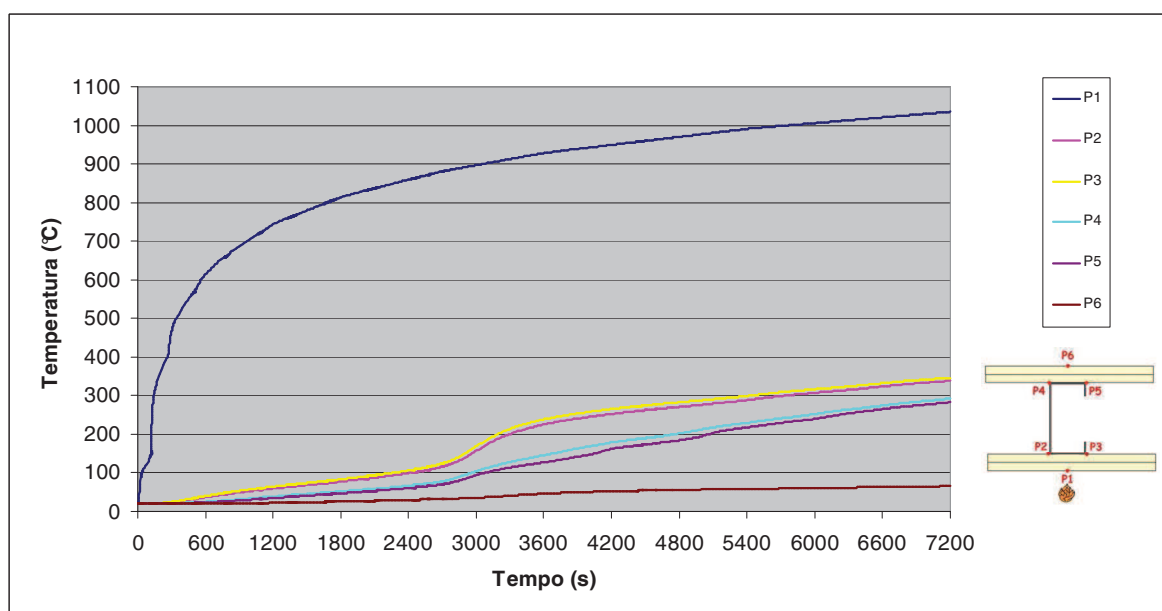


Figura 4.3. Gráfico de elevação da temperatura em pontos do modelo sem isolamento e fechamento com duas placas de gesso.

Em relação à figura 4.3, observa-se que os valores obtidos nos pontos P2 e P3 foram praticamente os mesmos durante todo o tempo de simulação. O mesmo ocorre para os pontos P4 e P5, com temperaturas finais idênticas. Constata-se então que para os pontos localizados em uma mesma profundidade de parede, os valores de temperatura são iguais ou muito próximos.

Os valores finais de temperatura distribuídos ao longo da seção da parede estão apresentados na figura 4.4.

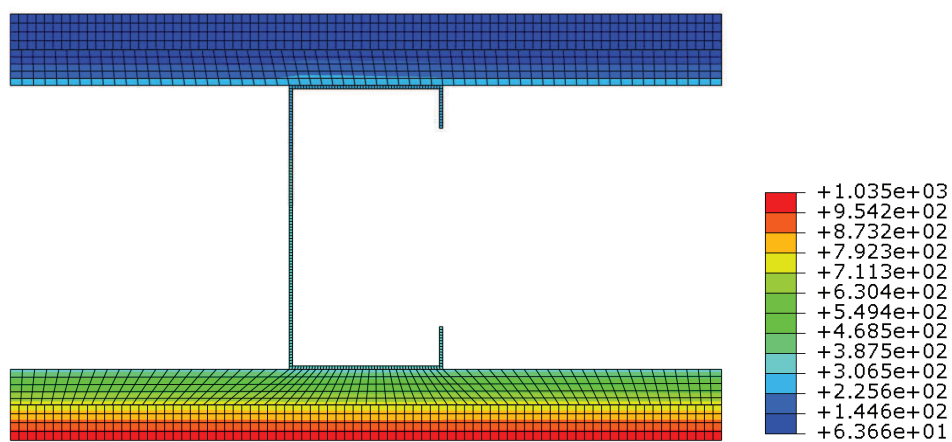


Figura 4.4. Temperatura em $^{\circ}\text{C}$ no instante 7200 segundos.

A figura 4.5 exibe a elevação da temperatura para os instantes: 0s, 1805s, 3607s, 5404s e 7200s.

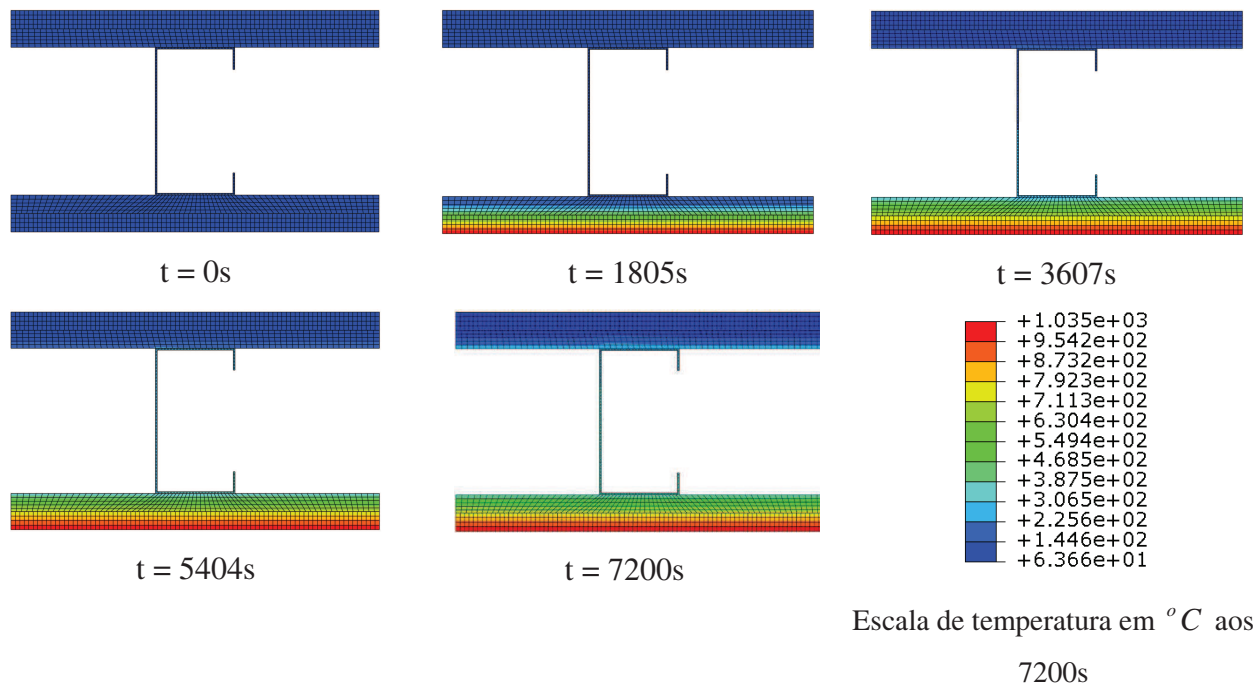


Figura 4.5. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.

4.2.2 Modelo 2x2 com isolamento na cavidade

Tomou-se como base o modelo validado no capítulo anterior, para o qual, acrescentou-se uma placa de gesso acartonado em cada lado da parede. Observam-se na figura 4.6 os pontos de monitoramento utilizados na simulação.

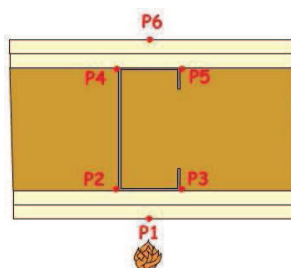


Figura 4.6. Pontos de monitoramento do modelo com isolamento e duas placas de gesso em cada lado da parede.

O gráfico com as curvas de elevação de temperatura em função do tempo está ilustrado na figura 4.7. Na figura 4.8 está representada a distribuição da temperatura em $^{\circ}\text{C}$ no instante 7200 segundos.

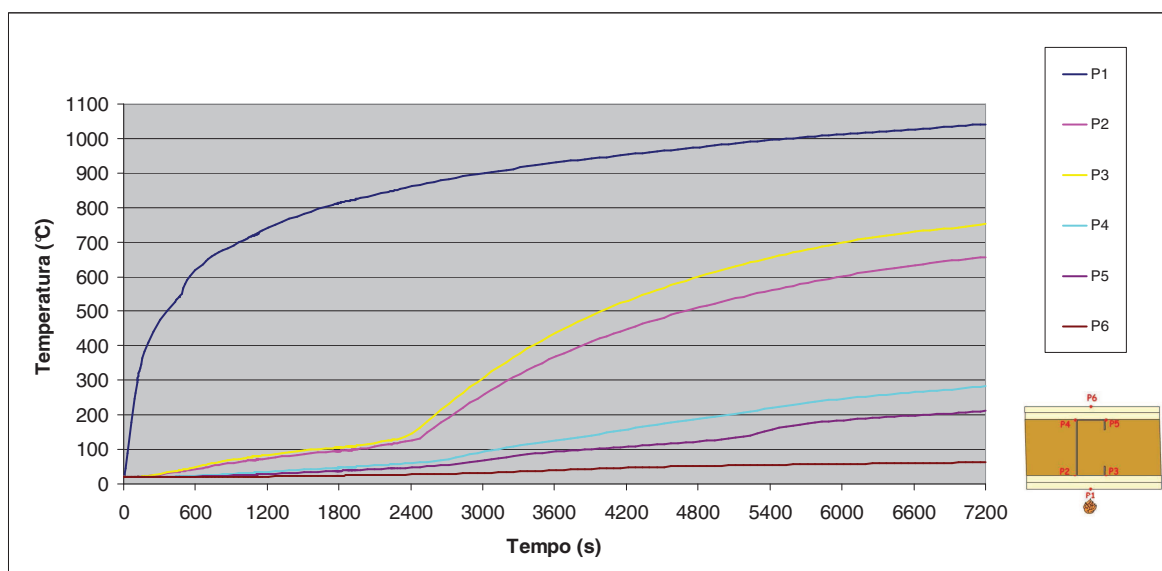


Figura 4.7. Gráfico de elevação da temperatura nos pontos monitorados para o modelo com isolamento e fechamento com duas placas de gesso.

Observa-se que os valores de temperatura obtidos para o ponto P3 são superiores aos do P2 e este apresenta resultados maiores que P4. Consta-se também que o ponto P4, na

mesma profundidade de parede que P5, apresenta aquecimento maior. Concluí-se que a presença do isolamento na cavidade, material com baixa condutividade térmica, faz com que a transferência de calor por condução ao longo do perfil siga um caminhamento, aquecendo seqüencialmente os pontos P3, P2, P4, P5. O mesmo não ocorre no modelo sem isolamento, onde para os pontos em uma mesma profundidade, observam-se valores similares.

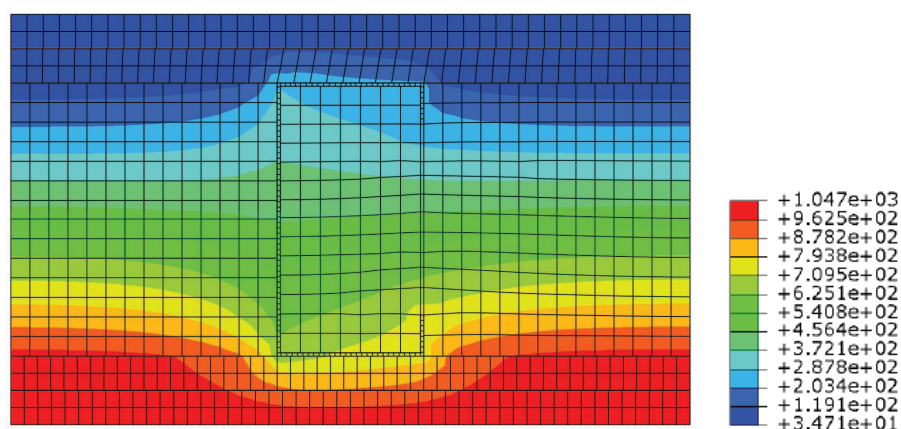


Figura 4.8. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos.

A figura 4.9 ilustra a elevação da temperatura para os instantes: 0s, 1805s, 3607s, 5404s e 7200s.

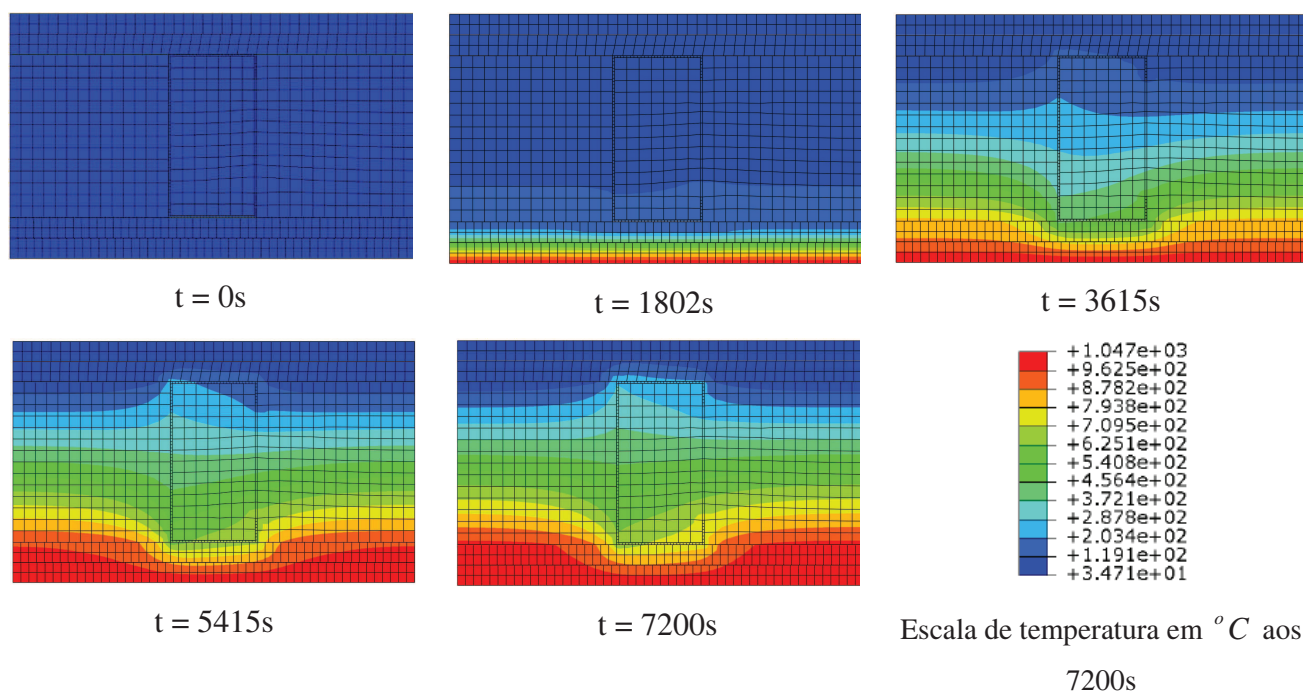


Figura 4.9. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.

4.2.3 Modelo 1x1 com proteção 1x no Perfil e sem isolamento na cavidade

Na figura 4.10 a seguir são apresentados os pontos de monitoramento utilizados para este modelo.

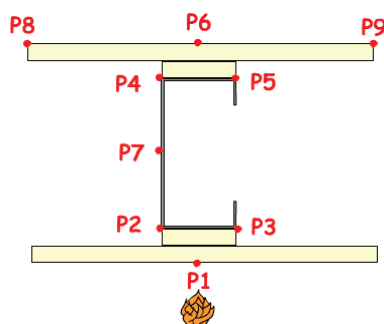


Figura 4.10. Pontos de monitoramento do modelo sem isolamento, com uma placa de gesso em cada lado da parede e proteção no perfil (1x).

Para os modelos criados com foco na proteção do perfil com uso de partes menores de placas de gesso, adotou-se mais pontos de monitoramento com objetivo de verificar a distribuição e elevação da temperatura com um maior número de pontos na parede externa, não exposta ao incêndio, além de diferentes pontos na alma do perfil.

Na figura 4.11 está representado o gráfico com as curvas de elevação de temperatura em função do tempo.

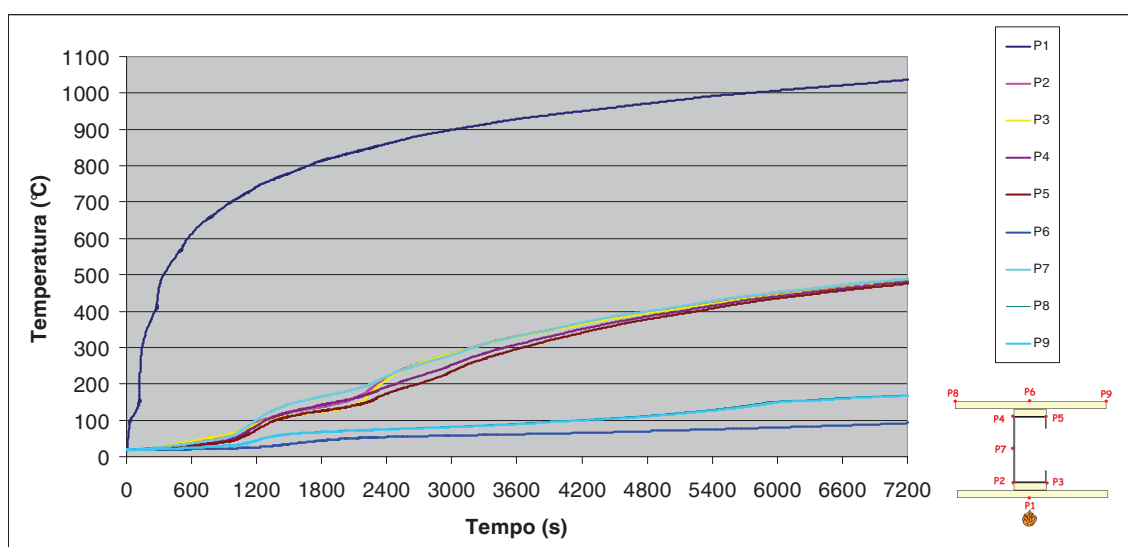


Figura 4.11. Gráfico de elevação da temperatura nos pontos monitorados do modelo sem isolamento, fechamento com uma placa de gesso e proteção na mesa do perfil (1x).

Observa-se na figura 4.11 que os valores de temperatura encontrados para os pontos P2, P3, P4 e P5 estão praticamente juntos ao longo de todo o decorrer da simulação. Constata-se também que os pontos P8 e P9 possuem as mesmas temperaturas em todos os instantes.

Os valores finais de temperatura distribuídos ao longo da seção da parede estão representados na ilustração 4.12.

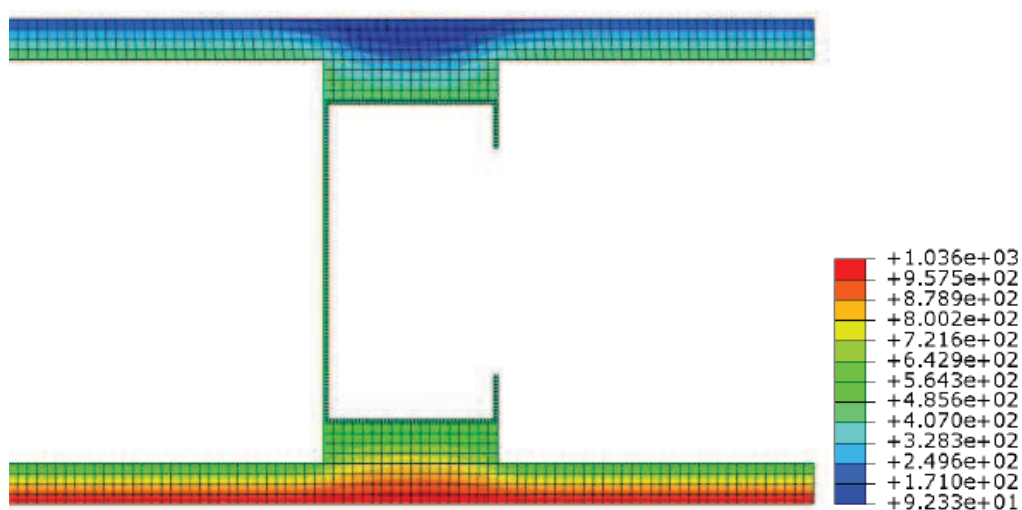


Figura 4.12. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos.

A imagem 4.13 exibe a elevação da temperatura para os instantes: 0s, 1805s, 3607s, 5404s e 7200s.

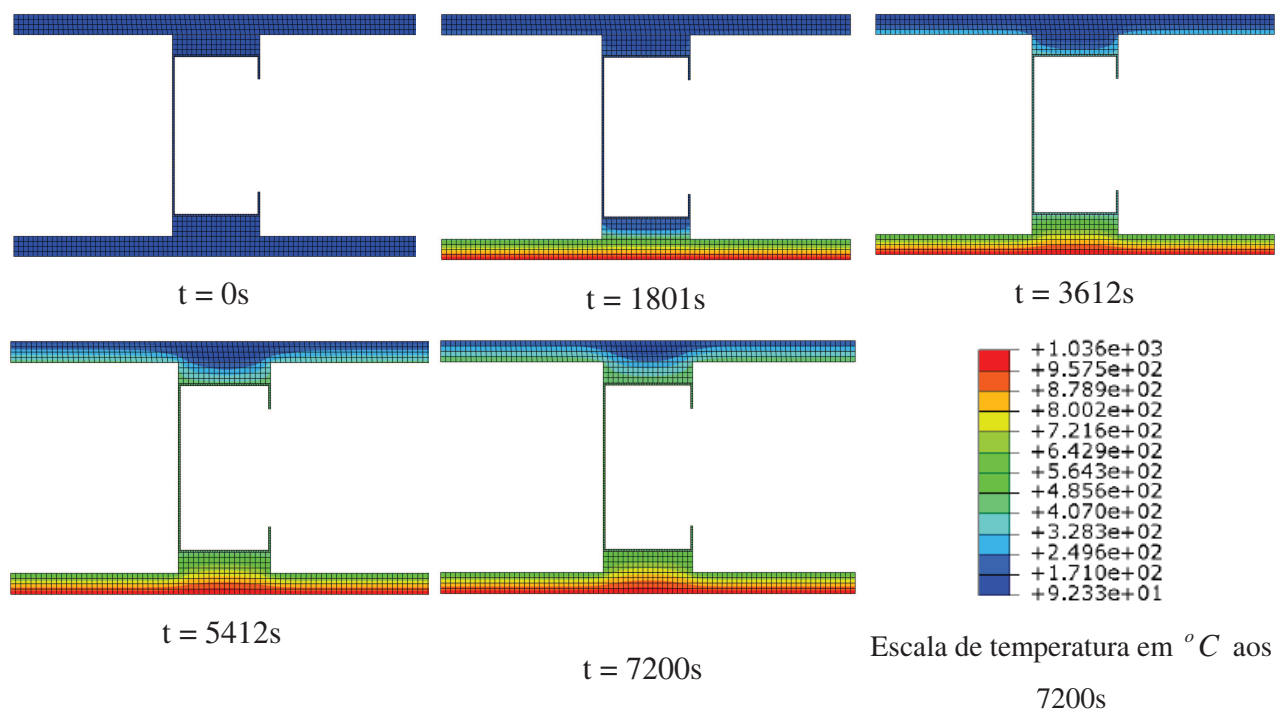


Figura 4.13. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.

4.2.4 Modelo 1x1 com proteção 3x no Perfil e sem isolamento na cavidade

Estão ilustrados na figura 4.14 os nove pontos monitorados para esta configuração de parede.

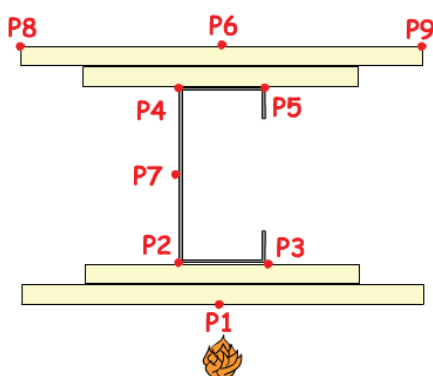


Figura 4.14. Pontos de monitoramento do modelo sem isolamento, com uma placa de gesso em cada lado da parede e proteção no perfil (3x).

A representação do gráfico com as curvas de elevação de temperatura em função do tempo está na ilustração 4.15 a seguir.

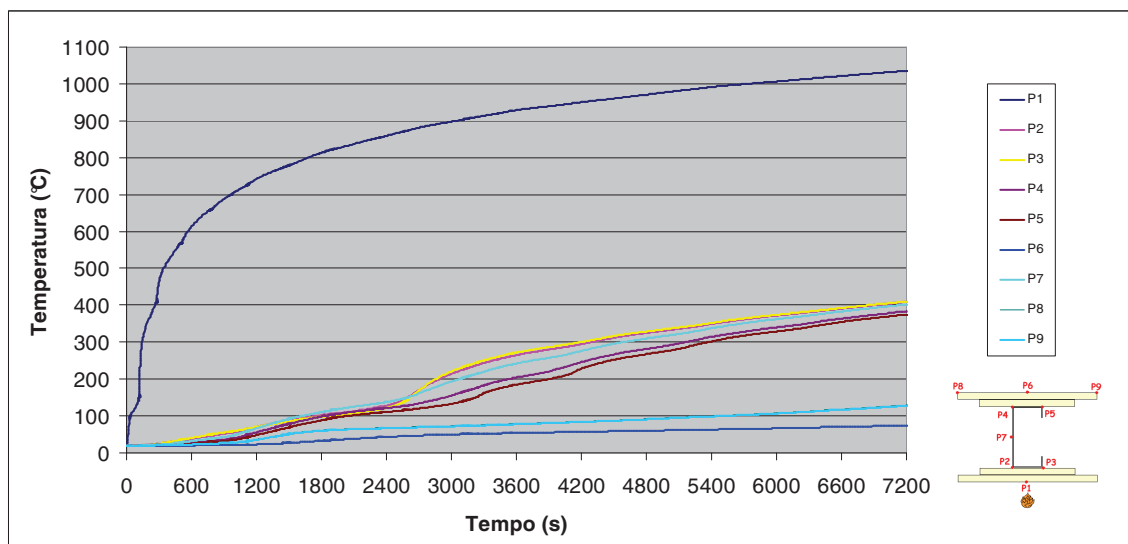


Figura 4.15. Gráfico de elevação da temperatura nos pontos monitorados no modelo sem isolamento, fechamento com uma placa de gesso e proteção na mesa do perfil (3x).

Observa-se na figura 4.15 que as curvas dos pontos P2, P3, P4 e P5 apresentaram um distanciamento em relação ao modelo anterior, principalmente após os 2400s. Verifica-se também que os pontos P8 e P9 possuem as mesmas temperaturas em todos os instantes. Os valores máximos de temperaturas atingidos no instante final, $t=7200s$, foram próximos de $400^{\circ}C$.

Os valores finais de temperatura distribuídos ao longo da seção da parede estão representados na figura 4.16.

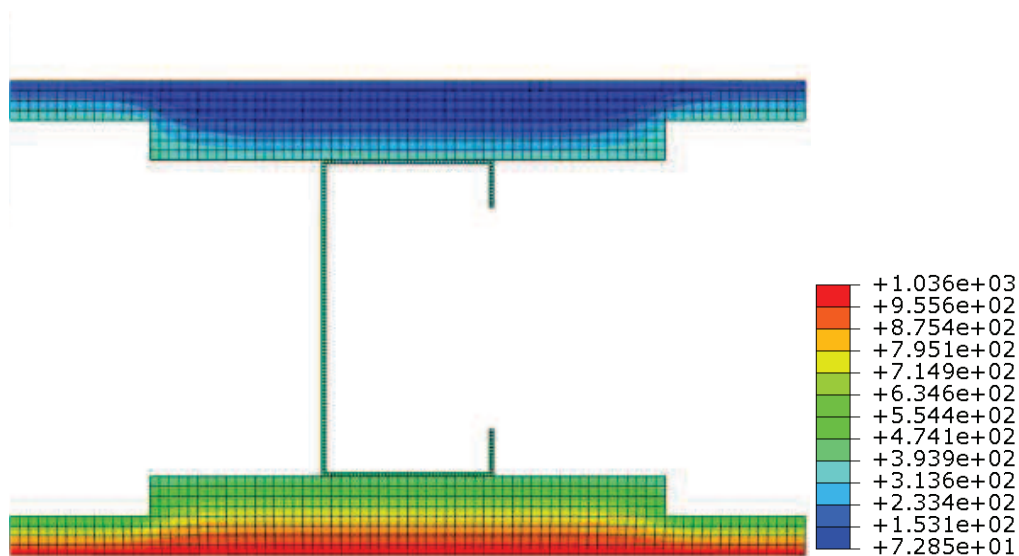


Figura 4.16. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos.

A figura 4.17 exibe a elevação da temperatura para os instantes: 0s, 1805s, 3607s, 5404s e 7200s.

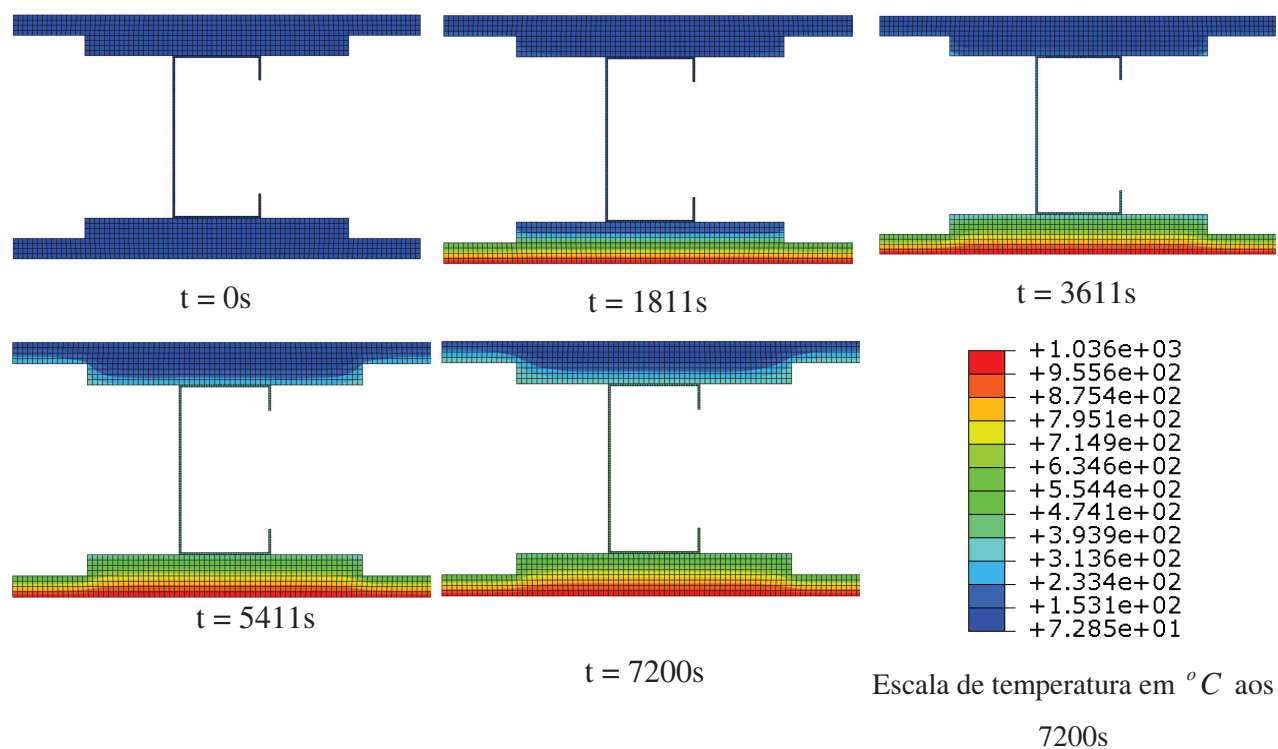


Figura 4.17. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.

4.2.5 Modelo 1x1 com proteção 1x no Perfil e com isolamento na cavidade

A proteção do perfil por acréscimo de um trecho de placa de gesso acartonado neste modelo foi envolvida por material de proteção térmica. A lã de rocha foi inserida com extensão de três vezes a largura das mesas do perfil. Na figura 4.18 estão representados os pontos de monitoramento utilizados.

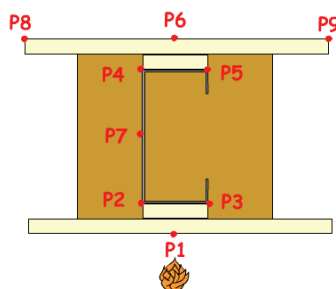


Figura 4.18. Pontos de monitoramento do modelo sem isolamento, com uma placa de gesso em cada lado da parede e proteção no perfil (1x).

Na ilustração 4.19 está representado o gráfico com as curvas de elevação de temperatura em função do tempo.

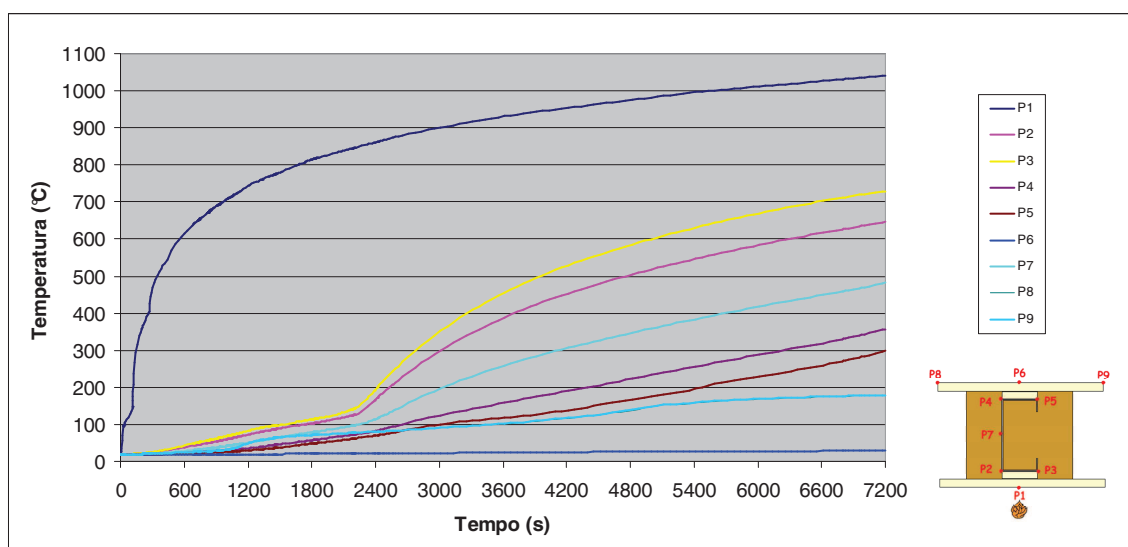


Figura 4.19. Gráfico de elevação da temperatura nos pontos monitorados no modelo com isolamento, fechamento com uma placa de gesso e proteção na mesa do perfil (1x).

Constata-se da figura 4.19 que os pontos localizados em uma mesma profundidade de parede apresentam traçados de curvas diferentes, caminhando individualmente, com

valores de temperatura próprios. Observa-se novamente que há uma seqüência de aquecimento no perfil, com caminhamento: P3, P2, P7, P4 e P5. Os pontos nos extremos da placa de gesso não exposta ao incêndio, P8 e P9 também apresentaram os mesmos valores de temperatura.

Os valores finais de temperatura distribuídos ao longo da seção da parede estão representados na imagem 4.20.

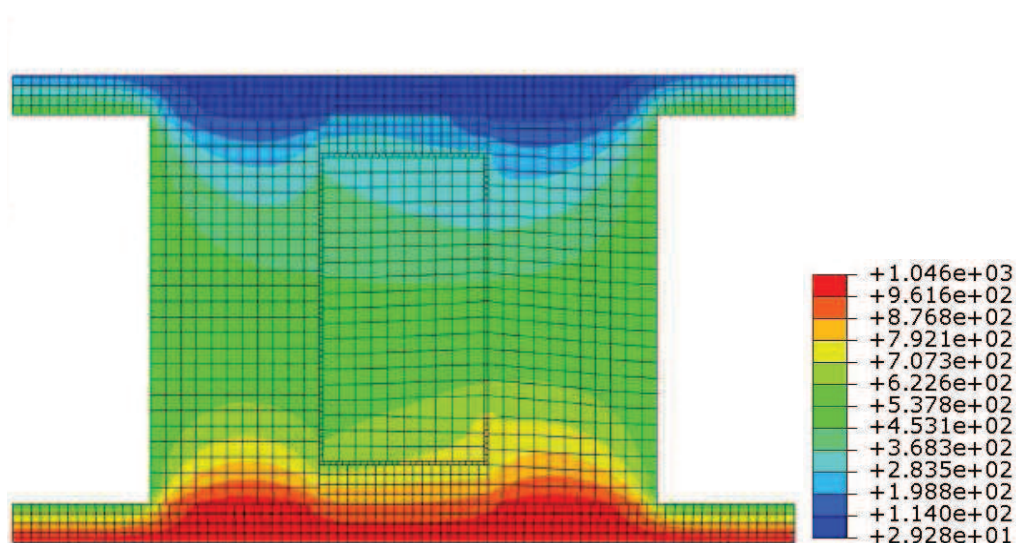


Figura 4.20. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos.

A figura 4.21 exibe a elevação da temperatura para os instantes: 0s, 1805s, 3607s, 5404s e 7200s.

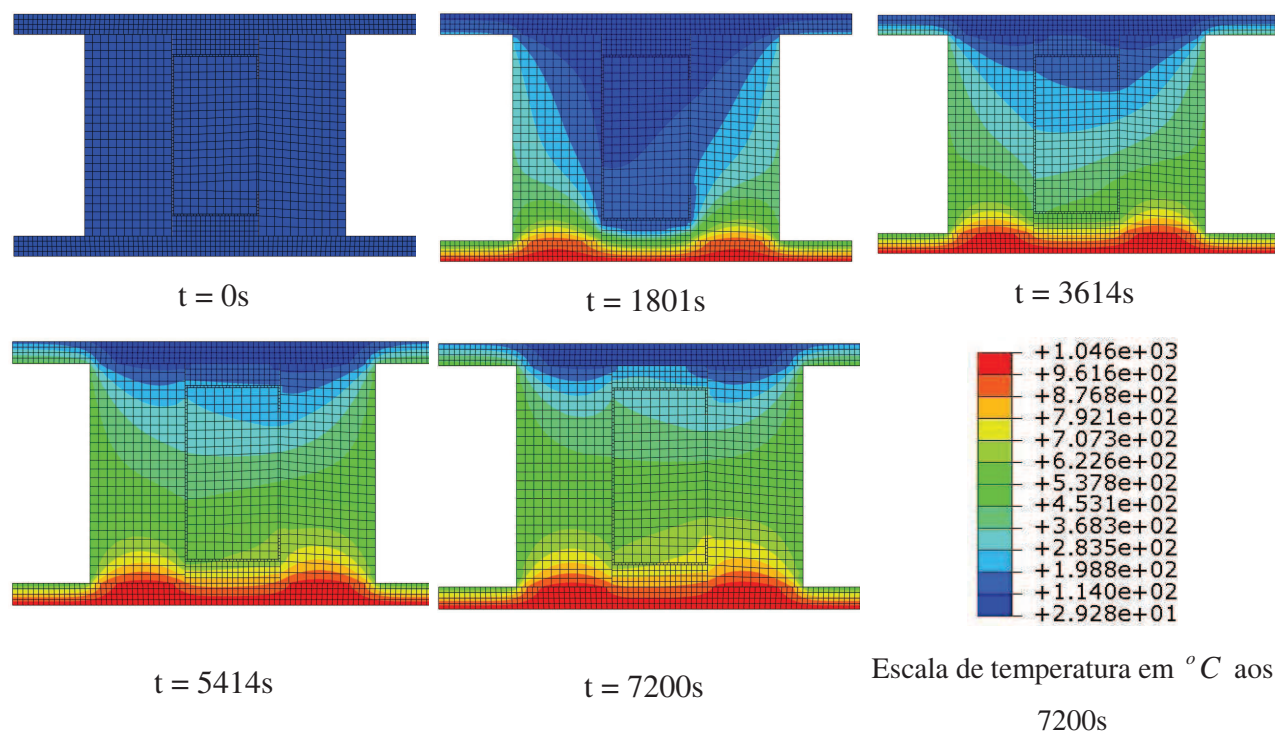


Figura 4.21. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.

4.2.6 Modelo 1x1 com proteção 3x no Perfil e com isolamento na cavidade

Trata-se de um modelo elaborado utilizando-se como base o desenvolvido no item 3.2.4. A proteção do perfil foi idealizada com acréscimo de um trecho de placa de gesso acartonado e de material de proteção térmica (lã de rocha com largura igual ao do trecho de placa de gesso acartonado acrescentada). Observam-se na figura 4.22 os nove pontos de monitoramento utilizados durante a simulação.

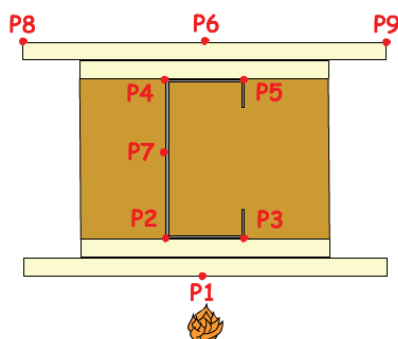


Figura 4.22. Pontos de monitoramento do modelo sem isolamento, com uma placa de gesso em cada lado da parede e proteção no perfil (3x).

A representação do gráfico com as curvas de elevação de temperatura em função do tempo está na figura 4.23 a seguir.

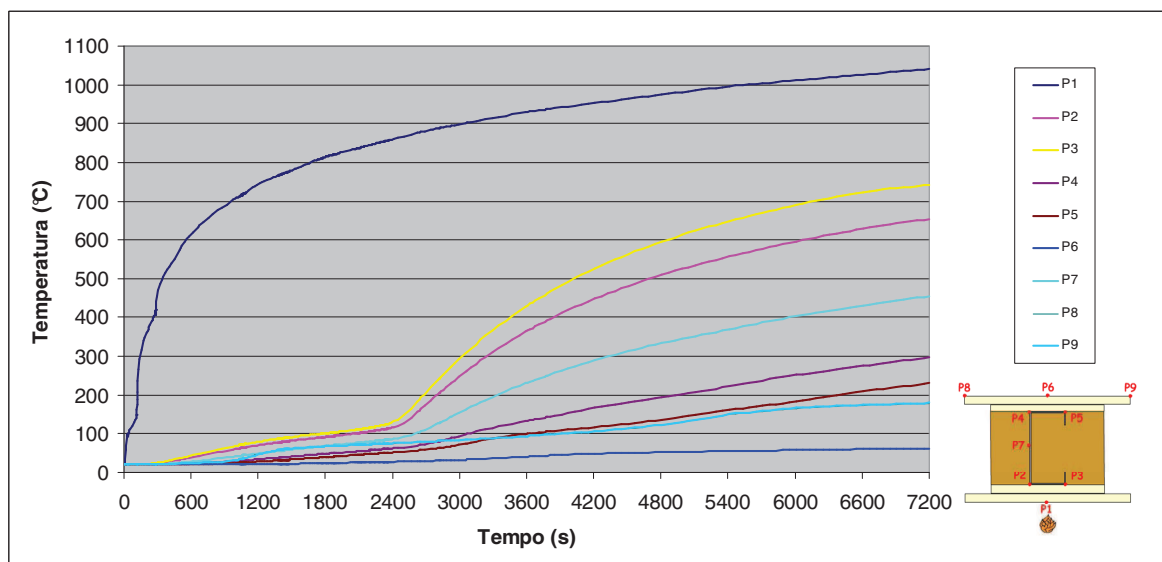


Figura 4.23. Gráfico de elevação da temperatura nos pontos monitorados do modelo com isolamento, fechamento com uma placa de gesso e proteção na mesa do perfil (3x).

Observa-se na figura 4.23 o mesmo comportamento do modelo anterior: os pontos localizados em uma mesma profundidade de parede apresentam traçados de curvas diferentes (estão afastados); há a repetição da seqüência de aquecimento no perfil (P3, P2, P7, P4 e P5); os pontos na face não exposta ao incêndio, P8 e P9 apresentaram os mesmos valores de temperatura.

Os valores finais de temperatura distribuídos, ao longo da seção da parede, estão representados na ilustração 4.24.

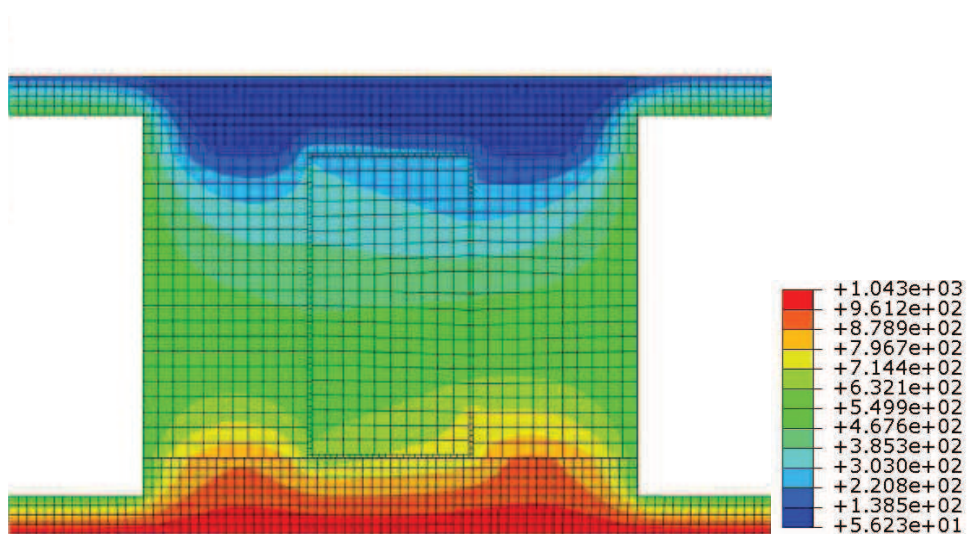


Figura 4.24. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos.

A figura 4.25 exibe a elevação da temperatura para os instantes: 0s, 1805s, 3607s, 5404s e 7200s.

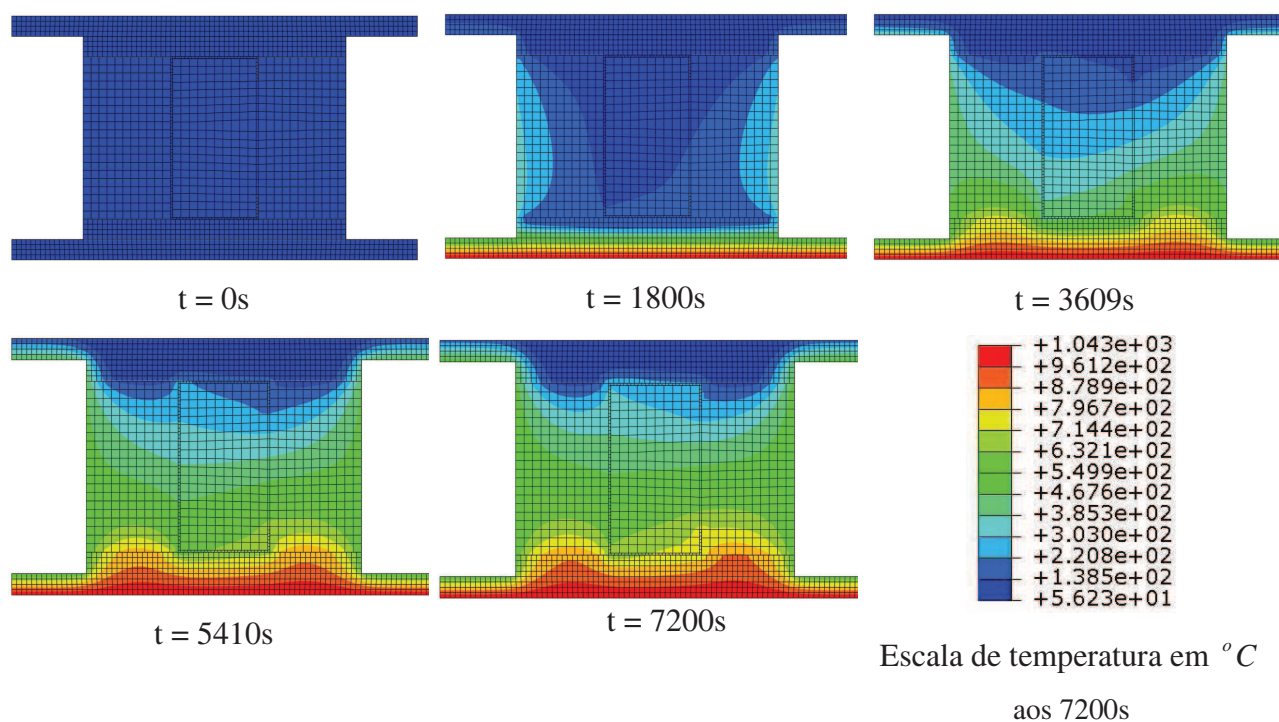


Figura 4.25. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.

4.2.7 Modelo 1x1 com proteção 1x no Perfil, com fechamento lateral e sem isolamento na cavidade

Para este modelo a seguinte configuração com objetivo de proteção ao perfil estrutural foi elaborada: além do acréscimo de uma faixa de placa de gesso acartonado entre o perfil e as placas de fechamento externo, foi proposto o fechamento lateral ao longo da altura do perfil, formando uma proteção do tipo caixa. Na figura 4.26 estão representados os nove pontos de monitoramento.

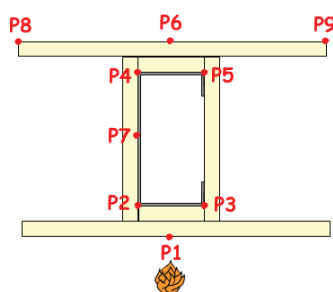


Figura 4.26. Pontos de monitoramento do modelo sem isolamento, com uma placa de gesso em cada lado da parede, proteção no perfil (1x) e fechamento lateral.

Vale ressaltar que, para este modelo, não foi considerada transferência de calor por convecção na cavidade central, no interior da proteção do tipo caixa, adotando-se uma postura mais conservadora por não existir experimento realizado com configuração similar à idealizada.

O gráfico com as curvas de elevação de temperatura em função do tempo está ilustrado na figura 4.27.

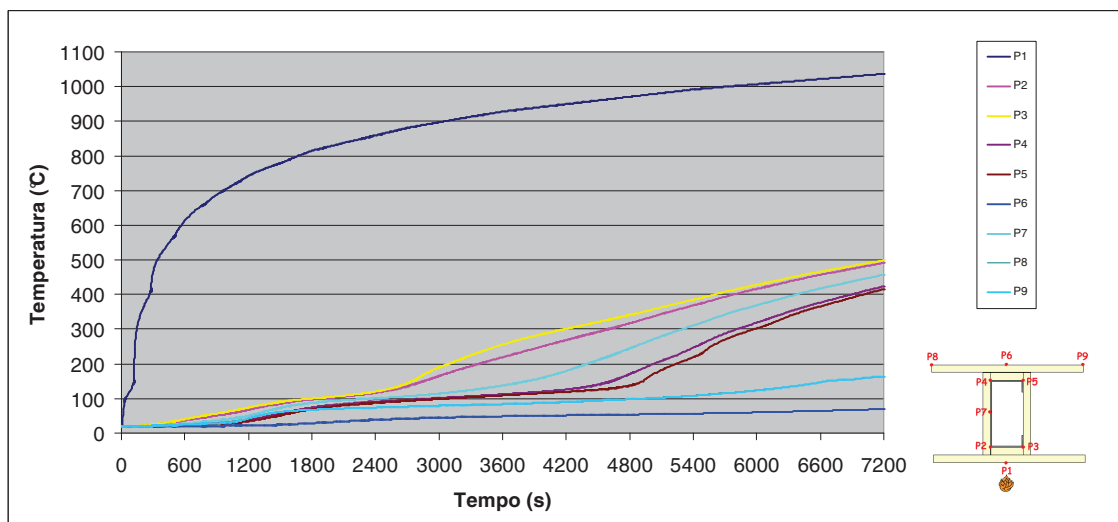


Figura 4.27. Gráfico de elevação da temperatura nos pontos monitorados do modelo sem isolamento, fechamento com uma placa de gesso, proteção na mesa do perfil (1x) e fechamento lateral.

Observa-se na figura 4.27 o comportamento semelhante para as curvas dos pontos localizados em uma mesma profundidade, repetindo-se em todos os modelos que não possuem preenchimento com material isolante na cavidade. Os pontos P8 e P9 novamente apresentaram os mesmos valores de temperatura no decorrer da simulação. Todas as curvas tiveram traçados idênticos aos apresentados na figura 4.3 para o modelo com duas placas de gesso em cada lado e sem isolamento na cavidade.

Os valores finais de temperatura distribuídos ao longo da seção da parede estão representados na figura 4.28.

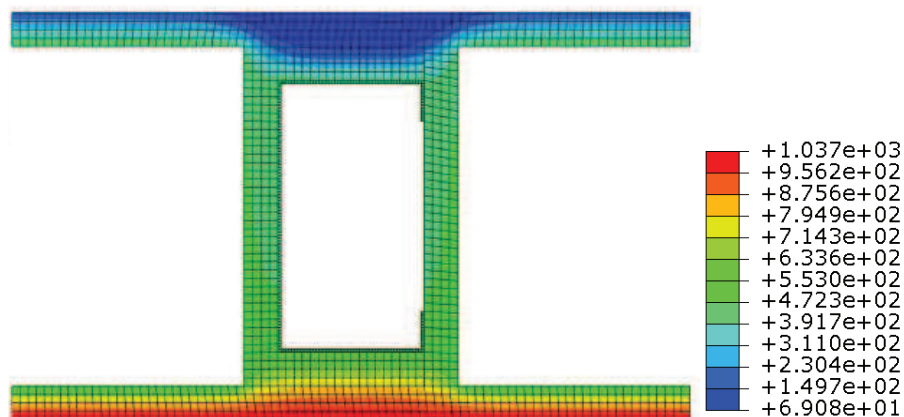


Figura 4.28. Temperatura em $^{\circ}\text{C}$ no instante 7200 segundos.

A figura 4.29 exibe a elevação da temperatura para os instantes: 0s, 1805s, 3607s, 5404s e 7200s.

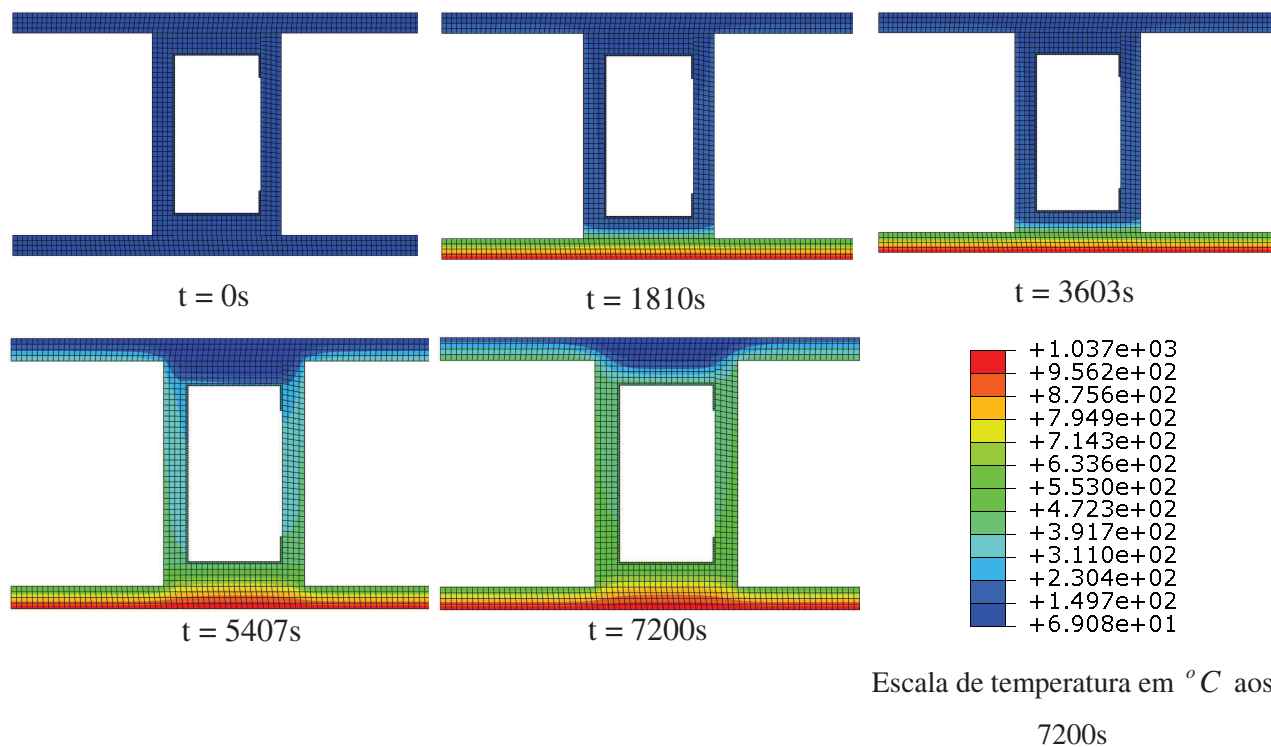


Figura 4.29. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.

4.2.8 Modelo 1x1 com proteção 3x no Perfil, com fechamento lateral e sem isolamento na cavidade

Neste modelo, a extensão de placa de gesso utilizada para proteção do perfil é de três vezes a largura das mesas do mesmo, além do fechamento lateral por outro trecho de placa ao longo perfil. Na figura 4.30 a seguir estão representados os nove pontos de monitoramento.

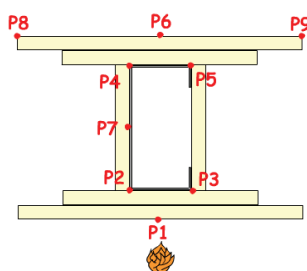


Figura 4.30. Pontos de monitoramento do modelo sem isolamento, com uma placa de gesso em cada lado da parede, proteção no perfil (3x) e fechamento lateral.

Neste modelo, também, não foi considerada transferência de calor por convecção na cavidade central, conforme argumentado no item anterior.

Na figura 4.31 estão representadas as curvas de elevação de temperatura para o modelo elaborado.

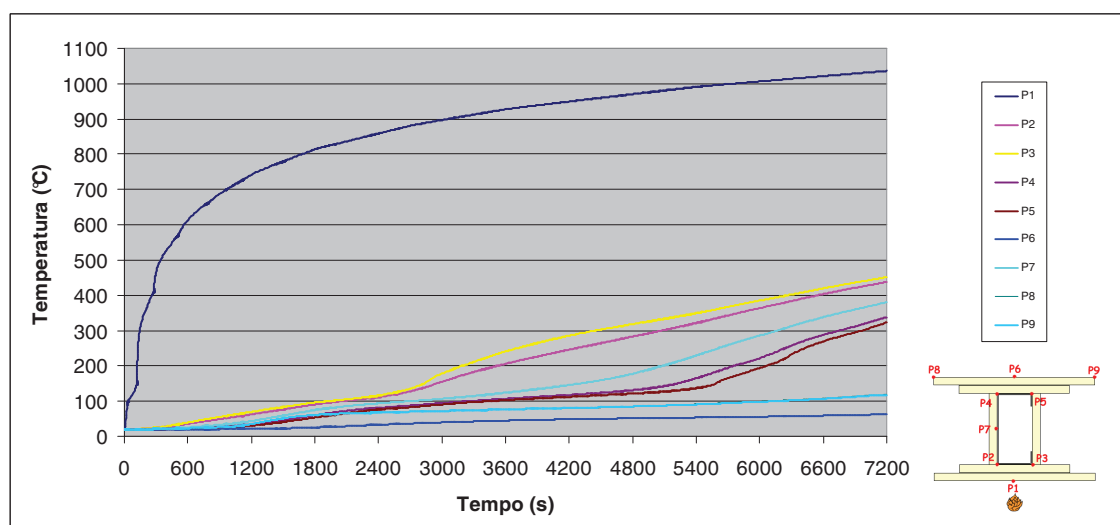


Figura 4.31. Gráfico de elevação da temperatura nos pontos monitorados do modelo sem isolamento, fechamento com uma placa de gesso, proteção na mesa do perfil (3x) e fechamento lateral.

Após análise da figura 4.31, constata-se os mesmos comportamentos identificados na figura 4.27.

Os valores finais de temperatura distribuídos ao longo da seção da parede estão representados na figura 4.32

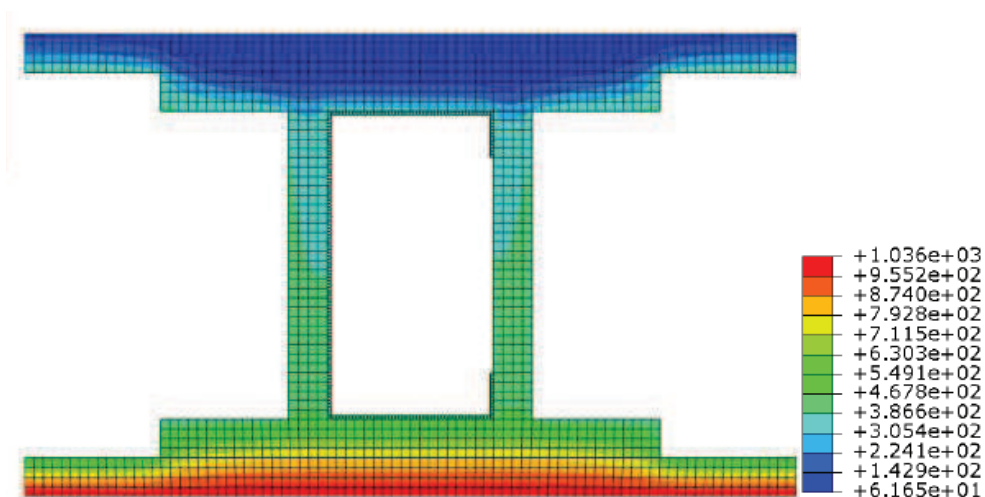


Figura 4.32. Temperatura em $^{\circ}\text{C}$ no instante 7200 segundos.

A figura 4.33 exibe a elevação da temperatura para os instantes: 0s, 1805s, 3607s, 5404s e 7200s.

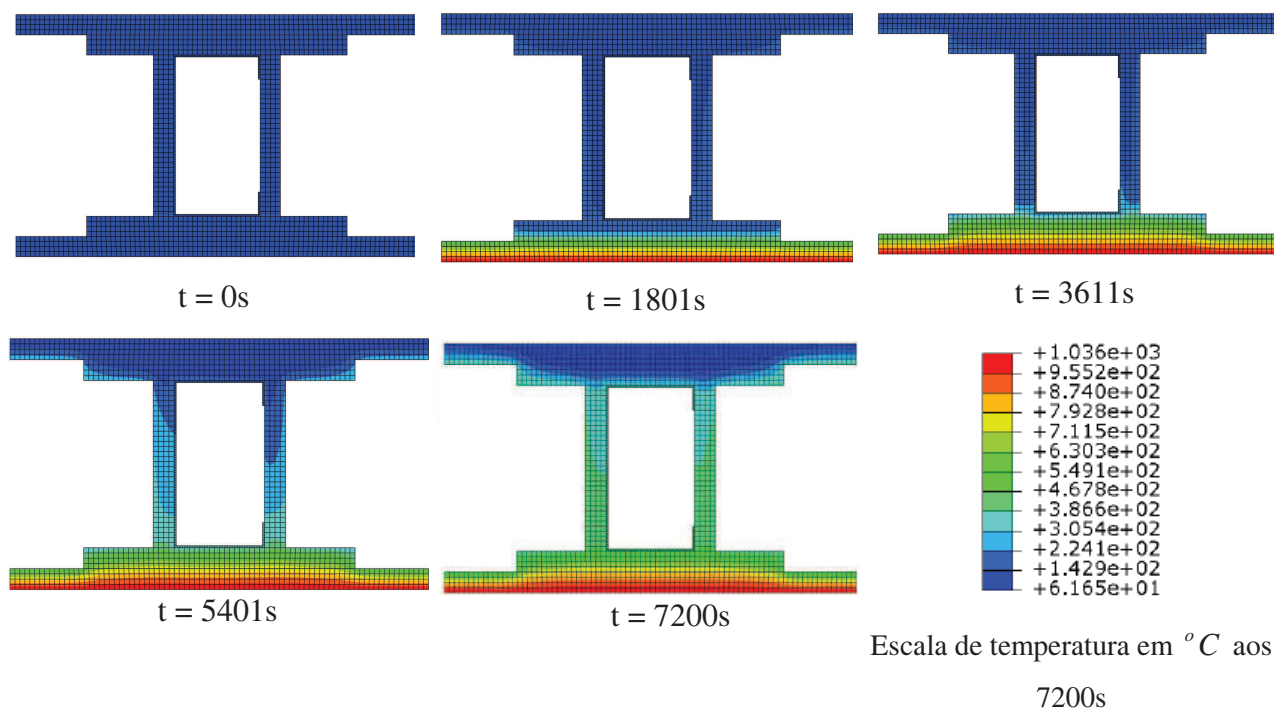


Figura 4.33. Elevação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.

4.3 Comparação das diferentes configurações

Nos próximos subitens estão representadas as figuras com os gráficos comparativos entre os modelos desenvolvidos.

4.3.1 Modelos com placas de gesso acartonado 1x1 e 2x2, sem isolamento na cavidade

O primeiro comparativo é referente aos modelos sem presença de isolamento na cavidade, mas com variação no número de placas de gesso acartonado no fechamento em ambos os lados da parede estudada, uma e duas, analisados nos itens 3.4.1 e 4.2.1.

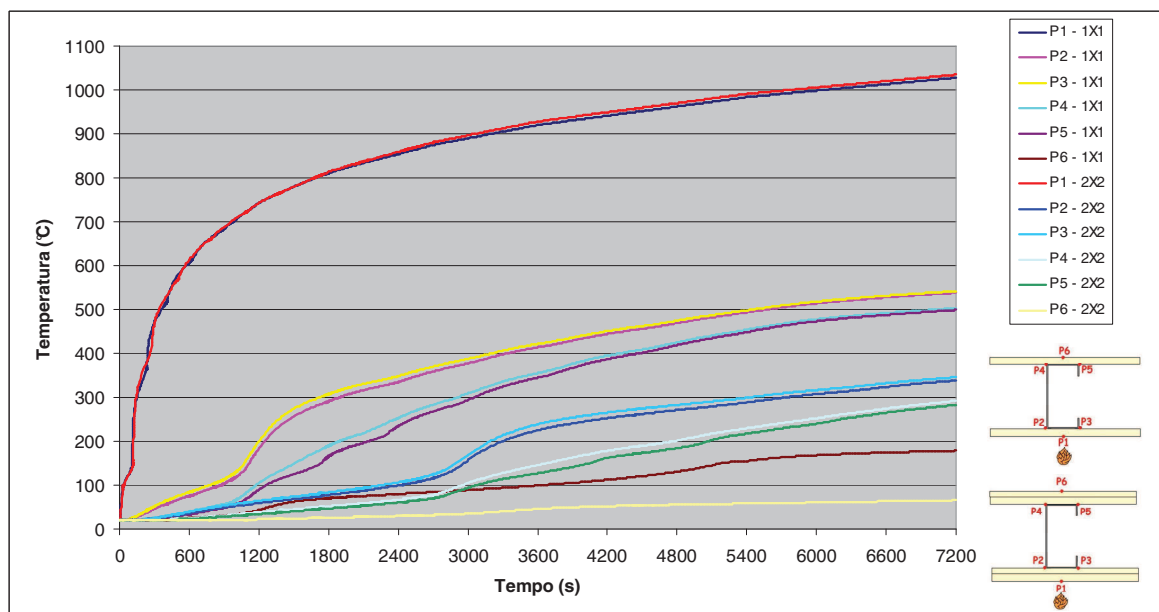


Figura 4.34. Modelos sem isolamento com fechamento com uma e duas placas de gesso.

Sobre a figura 4.34, em relação ao estudo comparativo entre os modelos, com uma e duas placas de fechamento, constata-se que:

- no ponto P1 a elevação da temperatura é a mesma, uma vez que o local está sob os mesmos fluxos de calor em ambos os modelos;

- os pontos P2 e P3 para ambos os modelos apresentam curvas bem próximas. Para cada modelo, os valores finais ($t = 7200s$) de temperatura nesses pontos são praticamente os mesmos.
- o mesmo sobre P2 e P3 é constatado para os pontos P4 e P5, onde para cada modelo, os valores para o instante final da simulação são bem próximos.
- observa-se que ocorre um deslocamento do trecho de aumento brusco de temperatura quando se comparada a mesma curva de um ponto, para modelos diferentes. Para o ponto P2, no modelo com apenas uma placa de gesso, observa-se que ocorre um grande aumento de temperatura a partir dos 900s, enquanto o mesmo somente acontece por volta de 2850s no modelo com duas placas. Ocorre um atraso no aumento de temperatura em função do acréscimo da segunda placa de gesso;
- a diferença no instante final da simulação, entre os pontos P2 dos modelos analisados é de $203^{\circ}C$, com valor de $338^{\circ}C$ para o modelo com duas placas e de $541^{\circ}C$ para o com uma placa. Em relação aos pontos P4, a diferença é de $206^{\circ}C$, com temperaturas máximas de $292^{\circ}C$ para o modelo com fechamento em duas placas e de $498^{\circ}C$ para o modelo com uma placa. Já para o ponto P6 a diferença é de $114^{\circ}C$ entre modelos, onde para o com uma placa o valor final simulado em 7200 segundos é de $179^{\circ}C$ e de $65^{\circ}C$ para o modelo com duas placas.
- considerando uma temperatura ambiente inicial de $20^{\circ}C$ e que o incremento de temperatura para fins de isolamento térmico deve ser inferior a $140^{\circ}C$, totalizando $160^{\circ}C$, na média dos pontos da medida conforme ABNT NBR 14323:1999, observa-se que com uma placa o tempo para atingir $160^{\circ}C$ no lado da parede não exposto ao incêndio é de aproximadamente 5550s, isso indica que o modelo com uma placa satisfaz a um Tempo Requerido de Resistência ao Fogo, TRRF, de 90 minutos, enquanto que o modelo com duas placas satisfaz a um TRRF superior a 120min.

- considerando os pontos nas extremidades do perfil Ue (P2, P3, P4 e P5), a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. Os resultados estão apresentados na tabela 4.1, juntamente com os valores máximos de temperatura.

Tabela 4.1. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.

Tempo (minutos)	Temperatura (° C)			
	Modelo (1x1)		Modelo (2x2)	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	80	113 (P3)	41	54 (P3)
30	238	307 (P3)	65	84 (P3)
60	384	422 (P3)	184	239 (P3)
90	474	498 (P3)	259	299 (P3)
120	516	541 (P3)	312	338 (P3)

4.3.2 Modelos com placas de gesso acartonado 1x1 e 2x2, com isolamento na cavidade

A partir dos resultados obtidos nas simulações gerou-se um gráfico comparativo exibido na figura 4.35, em relação aos modelos com uma e duas placas em cada extremidade, considerando a presença de isolamento térmico por lã de rocha, analisados nos itens 3.4.2 e 4.2.2, respectivamente.

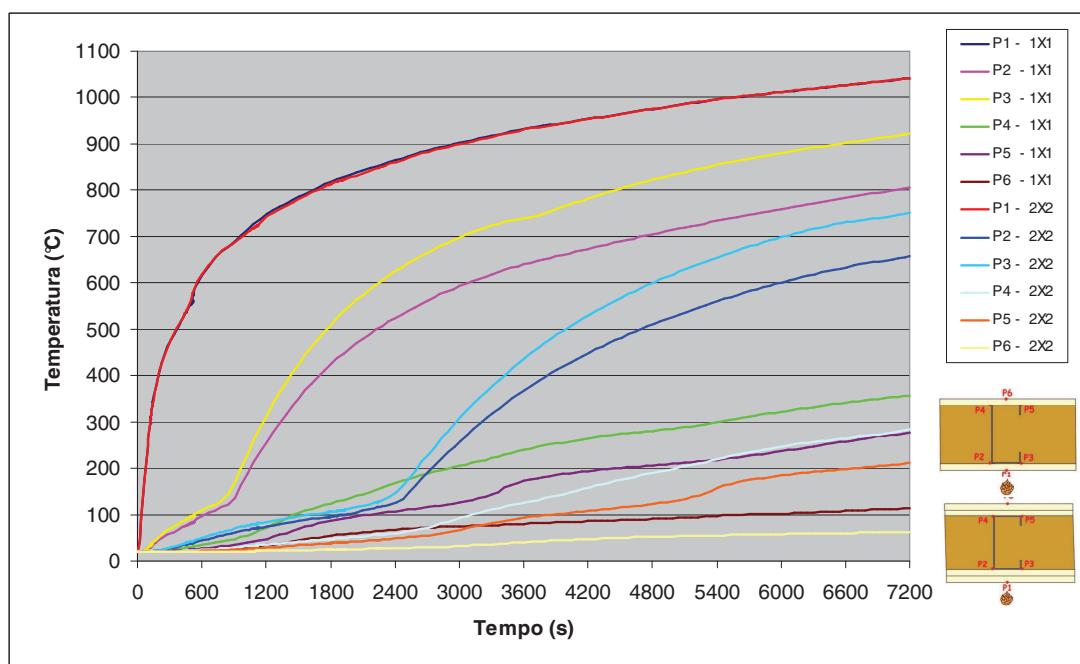


Figura 4.35. Modelos com isolamento com fechamento com uma e duas placas de gesso. Da figura 4.35 observa-se que:

- para o ponto P1, os valores foram similares conforme já se esperava;
- os pontos P2 e P3, em cada modelo, não apresentaram curvas com valores de temperatura próximos, conforme verificado na figura comparativa para os modelos sem isolamento. O mesmo foi observado para os pontos P4 e P5. Essa diferença de temperatura entre pontos na mesma profundidade da parede foi no máximo de $116^{\circ}C$ entre P2 e P3 para o modelo com uma placa e de $96^{\circ}C$ para o modelo com duas placas de gesso, ambas no tempo de 7200 segundos. Já para os pontos P4 e P5, os valores foram de $81^{\circ}C$ e $72^{\circ}C$, com o primeiro valor para o modelo com uma placa e o outro para duas, também no instante final de simulação. Essa diferença é explicada pela alta condutividade térmica do aço que leva o ponto P2 a perder calor para o ponto P4 pela alma do perfil. Dessa forma, surge um fluxo de P3 para P2, de P2 para P4, de P4 para P5, o que justifica as temperaturas decrescentes nesta ordem: $T_{P3} > T_{P2} > T_{P4} > T_{P5}$.
- observa-se também que ocorre um deslocamento do início da elevação brusca de temperatura quando comparado o mesmo ponto em modelos diferentes. Para o ponto P3, no modelo com apenas uma placa de gesso, observa-se que ocorre um grande

aumento de temperatura a partir dos 850s, enquanto o mesmo somente acontece por volta de 2400s no modelo com duas placas. Ocorre um retardo no aumento de temperatura em função do acréscimo da segunda placa de gesso conforme já observado no gráfico comparativo para os modelos sem isolamento.

- as temperaturas finais, nos pontos P6, em ambos os modelos foram de $113^{\circ}C$ para o modelo com uma placa e de $62^{\circ}C$ para o com duas placas. O que indica que ambos satisfazem a um TRRF superior a 120min (7200s), considerando o limite de $160^{\circ}C$ ($140^{\circ}C + 20^{\circ}C$) em relação ao isolamento térmico;

- considerando os pontos nas extremidades do perfil Ue (P2, P3, P4 e P5), a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. Os resultados estão apresentados na tabela 4.2, juntamente com os valores máximos de temperatura.

Tabela 4.2. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5

Tempo (minutos)	Temperatura ($^{\circ}C$)			
	Modelo (1x1)		Modelo (2x2)	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	97	171 (P3)	46	70 (P3)
30	286	509 (P3)	71	105 (P3)
60	447	738 (P3)	256	437 (P3)
90	526	854 (P3)	398	655 (P3)
120	583	920 (P3)	472	752 (P3)

4.3.3 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 com e sem isolamento na cavidade

Visando a compreensão e o estudo do aumento do isolamento térmico, a partir do acréscimo de lã de rocha na cavidade da parede, foi elaborado o próximo gráfico comparativo representado pela figura 4.36, considerando os modelos com apenas uma placa de gesso em cada lado da parede, analisados nos itens 3.4.1 e 3.4.2.

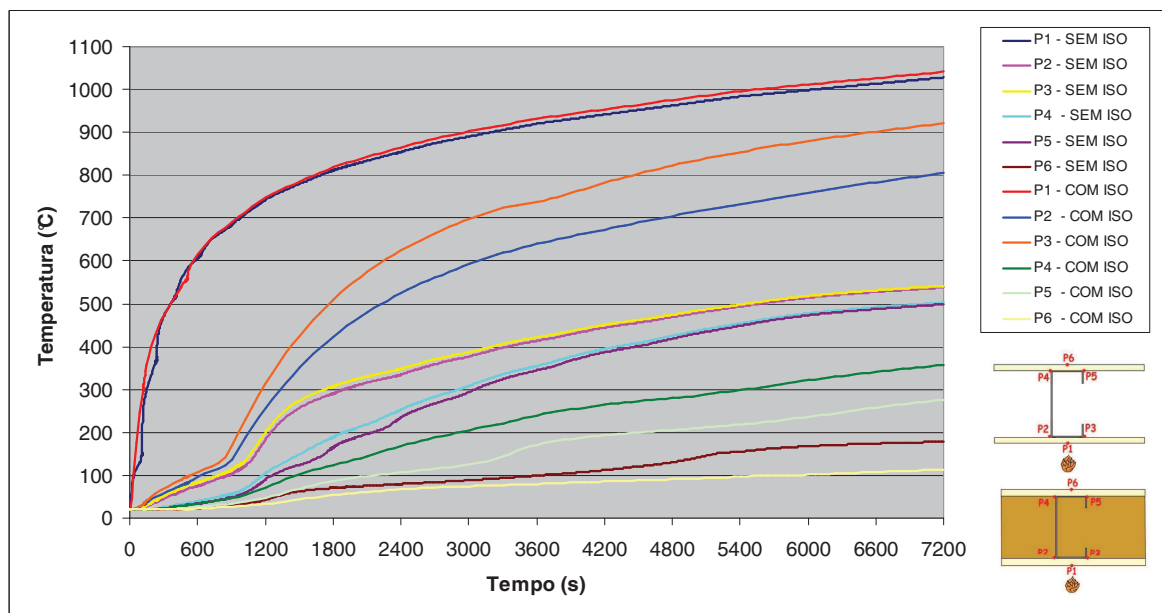


Figura 4.36. Modelos sem e com isolamento, ambos com fechamento com uma placa de gesso.

Após observar a figura 4.36 conclui-se que:

- para o ponto P1, os valores foram semelhantes conforme indicam as curvas ilustradas;
- o acréscimo do isolamento na cavidade da parede faz com que os pontos presentes na mesma profundidade da parede apresentem valores de temperatura distintos. No modelo sem isolamento, os valores de temperatura apresentam pequenas variações no decorrer do tempo, chegando a temperaturas similares aos 7200s. Já para o outro modelo, com isolamento em lã de rocha, há uma variação acentuada para os pontos em uma mesma profundidade. A diferença constatada entre P2 e P3 no instante 7200s é de $116^{\circ}C$ e para os pontos P4 e P5 a variação máxima é de $82^{\circ}C$, também aos 120min;
- observa-se que a presença do isolamento por lã de rocha faz com que os valores de temperaturas nos pontos P2 e P3 sejam muito superiores aos constatados para o modelo sem a presença do material isolante térmico. A variação máxima entre os pontos P2 para os diferentes modelos é de $263^{\circ}C$ e entre os pontos P3 de $379^{\circ}C$. As temperaturas nos pontos P2 e P3 são superiores pois, a lã de rocha possui baixa condutividade térmica,

fazendo com que as temperaturas sejam altas próximas à face exposta ao incêndio, devido a baixa transferência por condução;

- já em relação aos pontos P4 e P5, observa-se que os valores para o modelo com isolamento na cavidade são inferiores aos do modelo sem proteção térmica por lã de rocha. Entre os pontos P4, no instante final de simulação a diferença é de $141^{\circ}C$ e para os pontos P5, neste instante, a variação é de $225^{\circ}C$;

- as temperaturas finais, no ponto P6, em ambos os modelos foram de $178^{\circ}C$ para o modelo sem isolamento e de $113^{\circ}C$ para o modelo com isolamento, diferença de $65^{\circ}C$ entre eles. Indicando que o modelo sem isolamento proporciona um TRRF de 90min, atingindo $160^{\circ}C$ aos 5560s. Já a parede simulada com isolamento na cavidade satisfaz a um TRRF superior a 120min;

- considerando os pontos nas extremidades do perfil P2, P3, P4 e P5, a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. Os resultados estão apresentados na tabela 4.3, juntamente com os valores máximos de temperatura.

Tabela 4.3. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5

Tempo (minutos)	Temperatura ($^{\circ}C$)			
	Modelo (1x1) sem isolamento		Modelo (1x1) com isolamento	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	80	113 (P3)	97	171 (P3)
30	238	307 (P3)	286	509 (P3)
60	384	422(P3)	447	738 (P3)
90	474	498 (P3)	526	854 (P3)
120	516	541 (P3)	583	920 (P3)

4.3.4 Modelos com placas de gesso acartonado 2x2 sem isolamento e com isolamento na cavidade

Será apresentado o comparativo dos resultados da figura 4.37 para os modelos com duas placas de gesso em cada extremidade da parede simulada, porém um com isolamento na cavidade e o outro sem, analisados nos itens 4.2.2 e 4.2.1, respectivamente.

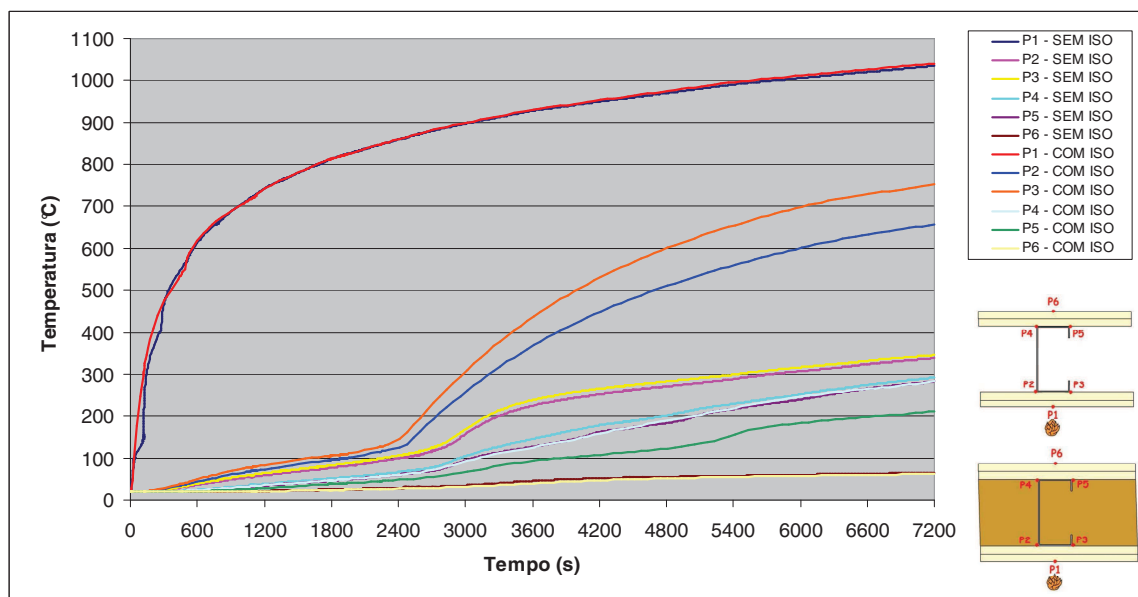


Figura 4.37. Modelos com duas placas de gesso, sem e com isolamento.

Da figura 4.37 pode-se observar que:

- para o ponto P1, os valores foram similares entre ambos os modelos, conforme já se esperava, em função da mesma exposição a qual os modelos foram submetidos (incêndio padrão);
- a mesma observação da figura comparativa 4.36 foi constatada na figura 4.37: o acréscimo do isolamento na cavidade da parede faz com que os pontos presentes na mesma profundidade da parede apresentem valores de temperatura distintos. No modelo sem isolamento, os valores de temperatura apresentaram pequenas variações em função do tempo, chegando a temperaturas bem próximas aos 7200s. Já para o modelo com isolamento em lã de rocha, há variação para os pontos em uma mesma profundidade, mas as diferenças são menores do que as encontradas nos modelos com apenas uma

placa. A diferença constatada entre P2 e P3 no instante 7200s é de $106^{\circ}C$ e para os pontos P4 e P5 a variação máxima é de $72^{\circ}C$, também, no instante final da simulação;

- observa-se também outra semelhança em relação ao comparativo anterior, a presença do isolamento proporciona valores de temperaturas nos pontos P2 e P3 superiores aos do modelo sem isolamento. A variação máxima entre os pontos P2 entre os modelos é de $318^{\circ}C$ e entre os pontos P3 de $407^{\circ}C$. Diferenças superiores às encontradas no comparativo da figura 4.36, 263 e $379^{\circ}C$;

- em relação aos pontos P4, observa-se que a variação dos valores para ambos os modelos é pequena, com máxima de $24^{\circ}C$ aos 4011s. Para os pontos P5, no instante final de simulação a diferença é de $72^{\circ}C$;

- nos pontos P6 registraram-se os seguintes valores de temperatura: $65^{\circ}C$ para o modelo sem isolamento e $62^{\circ}C$ para o com isolamento, diferença de apenas $3^{\circ}C$. Ambos os modelos satisfazem a um TRRF superior a 120min em relação ao isolamento térmico;

- considerando os pontos nas extremidades do perfil Ue (P2, P3, P4 e P5), a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. Os resultados estão apresentados na tabela 4.4, juntamente com os valores máximos de temperatura.

Tabela 4.4. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5

Tempo (minutos)	Temperatura ($^{\circ}C$)			
	Modelo (2x2) Sem Isolamento		Modelo (2x2) Com Isolamento	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	41	54 (P3)	46	70 (P3)
30	65	84 (P3)	71	105 (P3)
60	184	239 (P3)	256	437 (P3)
90	259	299 (P3)	398	655 (P3)
120	312	338 (P3)	472	752 (P3)

4.3.5 Modelos com placas de gesso acartonado 1x1 sem e com proteção no perfil (1x), sem isolamento na cavidade

A figura 4.38 ilustra o próximo gráfico comparativo referente à criação de uma proteção, através do acréscimo de um trecho de placa de gesso acartonado na largura das mesas perfil, em relação ao modelo com apenas uma placa de gesso, em cada lado da parede. Pretende-se observar a distribuição da temperatura ao longo da seção da parede, após o acréscimo discreto de apenas um segmento de placa, em ambos os lados do perfil. Os modelos são os analisados nos itens 3.4.1 e 4.2.3.

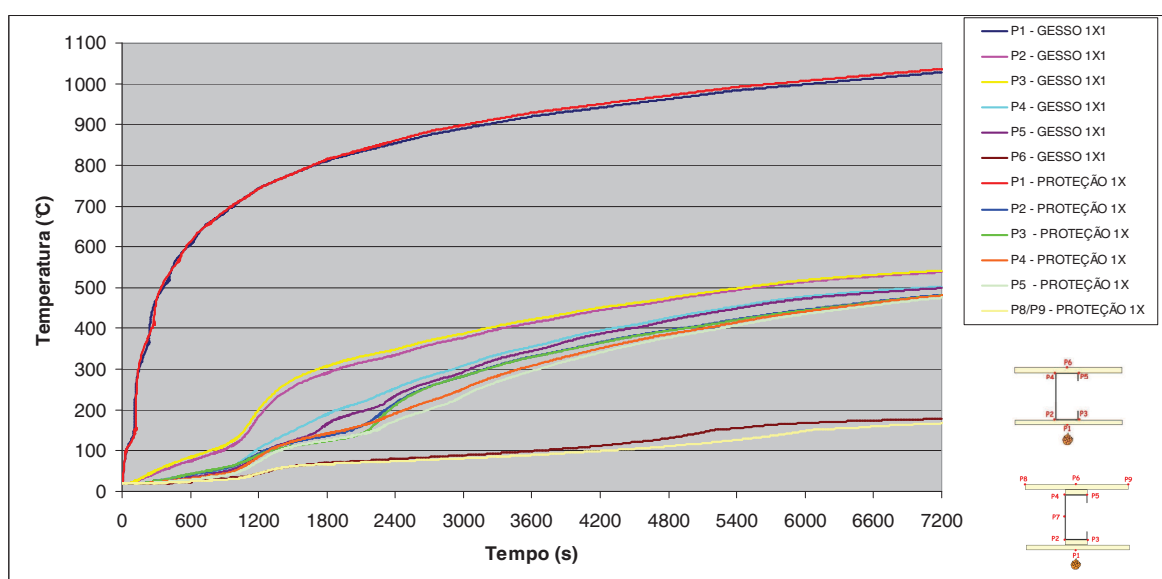


Figura 4.38. Modelos sem isolamento com fechamento com uma placa de gesso, com e sem proteção no perfil.

Constata-se após análise da figura 4.38 que:

- para o ponto P1 os valores de temperatura foram similares entre os modelos conforme já se esperava;
- por serem modelos sem presença de isolamento por lâ de rocha na cavidade, os valores de temperatura para os pontos em uma mesma profundidade de parede apresentaram pequenas variações no decorrer do tempo, chegando a resultados similares aos 7200s;

- os pontos P8 e P9 apresentam os mesmos valores de temperatura, superiores aos contatados para P6 (ver figuras do item 4.2.7);
- o modelo com proteção no perfil apresenta três grupos distintos de pontos, com traçado de curvas específico: um para o ponto P1 (face exposta ao incêndio padrão); outro para o ponto P8/P9 (face não exposta ao incêndio) e um grupo para os pontos presentes nas extremidades do perfil: P2, P3, P4 e P5. Os pontos existentes no perfil possuem variação máxima de temperatura entre as curvas para os pontos P3 e P8/P9 no instante 2630s, de $57^{\circ}C$ e convergem para o mesmo valor ao término da simulação, $475^{\circ}C$, temperatura esta inferior às atingidas pelo modelo sem proteção para os pontos correspondentes, P2 a P5. A diferença entre a temperatura final do grupo dos pontos P2, P3, P4 e P5 do modelo com proteção para os pontos P4 e P5 do modelo sem acréscimo de trecho de placa nas mesas do perfil é de $23^{\circ}C$;
- as temperaturas finais, no ponto P6 e P8/P9, foram de $178^{\circ}C$ e $166^{\circ}C$ respectivamente. Isto indica que o modelo sem proteção proporciona um TRRF de 90min, atingindo $160^{\circ}C$ aos 5560s. Já a parede simulada com proteção no perfil satisfaz a um TRRF de 110min, com alcance de $160^{\circ}C$ aos 6652s;
- considerando os pontos nas extremidades do perfil Ue (P2, P3, P4 e P5), a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. Os resultados estão apresentados na tabela 4.5. Nota-se que as diferenças apresentam valores baixos, de apenas $43^{\circ}C$, aos 7200s, o que indica que a transferência de calor por radiação na cavidade é mais pronunciada do que a condução de calor da face exposta do perfil.

Tabela 4.5. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5

Tempo (minutos)	Temperatura ($^{\circ}C$)			
	Modelo (1x1) Sem Isolamento		Modelo (1x1) Sem Isolamento Proteção 1X	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	80	113 (P3)	50	59 (P3)
30	238	307 (P3)	132	142 (P4)
60	384	422(P3)	317	331 (P2)
90	474	498 (P3)	416	422 (P2)
120	516	541 (P3)	473	482 (P2)

4.3.6 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 sem e com proteção no perfil (3x), sem isolamento na cavidade

A seguir na figura 4.39 está representado o gráfico comparativo sobre outro modelo visando à criação de proteção no perfil através do acréscimo de um trecho de placa de gesso acartonado com largura das mesas do perfil ao modelo com apenas uma placa de gesso em cada lado da parede. O segmento de placa de gesso acartonado acrescentado corresponde a três vezes a largura das mesas do perfil, com a mesma espessura das placas empregadas nos demais modelos. Os itens correspondentes a estes modelos são os 3.4.1 e 4.2.4.

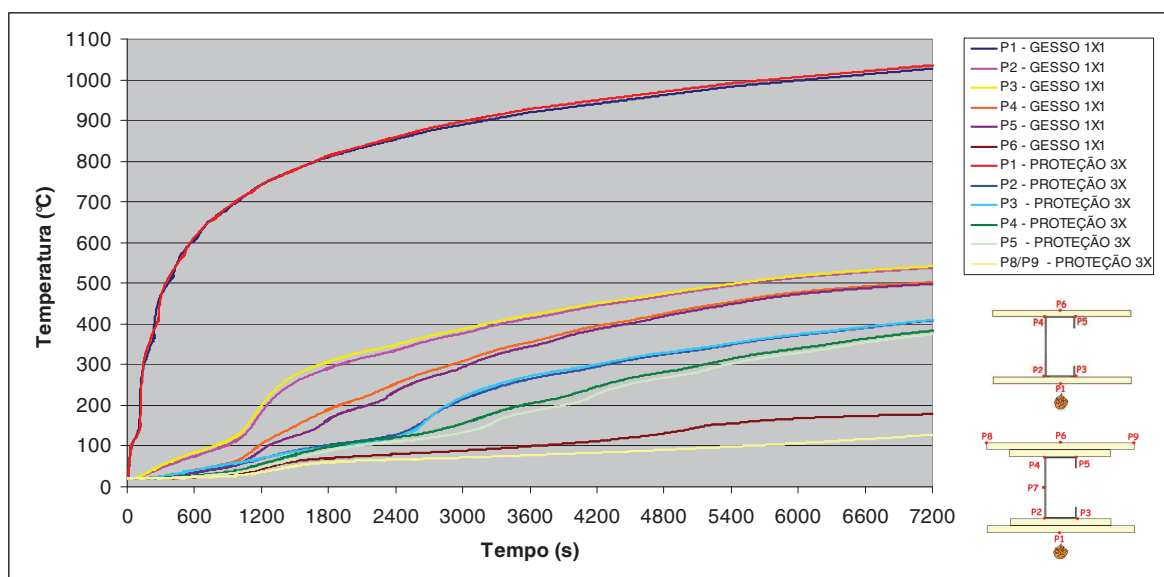


Figura 4.39. Modelos sem isolamento com fechamento com uma placa de gesso, com e sem proteção no perfil.

Da figura 4.39 observa-se que:

- para o ponto P1, mais uma vez, os valores encontrados foram similares entre os modelos;
- observa-se que, também, ocorre um deslocamento do aumento brusco de temperatura quando comparada a mesma curva de um ponto, porém para modelos diferentes (similar ao comparativo entre os modelos com uma e duas placas de gesso sem isolamento). Para a curva do ponto P2, no modelo com apenas uma placa de gesso, observa-se que ocorre um grande incremento de temperatura a partir dos 900s, enquanto o mesmo somente acontece por volta dos 2400s no modelo com proteção. O acréscimo da proteção com largura maior (de três vezes a largura das mesas do perfil) também proporciona um retardo no acréscimo de temperatura ao longo do tempo, idêntico ao acréscimo da segunda placa de gesso em outros modelos;
- a mesma observação válida para os modelos sem isolamento se aplica neste caso, os valores de temperatura para os pontos em uma mesma profundidade de parede apresentam pequenas variações no decorrer do tempo, chegando a valores de temperaturas similares aos 7200s;

- ao contrário do modelo com proteção no perfil de apenas uma vez a largura das mesas, as temperaturas dos pontos P2, P3, P4 e P5 para o modelo com proteção por trecho de placa de gesso de três vezes a largura das mesas do perfil, não convergem para o mesmo valor. O comportamento é mais próximo do modelo com duas placas de gesso conforme comenta-se no item 4.3.10;

- as temperaturas finais no ponto P6 para o modelo sem proteção e nos pontos P8 e P9 para o modelo com 3x no perfil foram de $178^{\circ}C$ e de $127^{\circ}C$, respectivamente;

- o modelo sem proteção proporciona um TRRF de 90min, atingindo $160^{\circ}C$ aos 5560s, conforme mencionado em outros comparativos. Em relação à parede simulada com proteção no perfil, a mesma satisfaz a um TRRF superior a 120min;

- considerando os pontos nas extremidades do perfil Ue (P2, P3, P4 e P5), a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação, em função da área de localização e contribuição de cada ponto. A tabela 4.6 apresenta os resultados encontrados, juntamente com os valores máximos de temperatura.

Tabela 4.6. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5

Tempo (minutos)	Temperatura ($^{\circ}C$)			
	Modelo (1x1) Sem Isolamento		Modelo (1x1) Sem Isolamento Proteção 3X	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	80	113 (P3)	43	55 (P3)
30	238	307 (P3)	97	102 (P2)
60	384	422 (P3)	232	272 (P3)
90	474	498 (P3)	329	352 (P3)
120	516	541 (P3)	391	410 (P3)

4.3.7 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 sem e com proteção no perfil (1x), com isolamento na cavidade

O gráfico comparativo abordado é referente à aplicação de uma proteção no perfil, através do acréscimo de um trecho de placa de gesso acartonado, com largura equivalente a das mesas do mesmo, ao modelo com apenas uma placa de gesso em cada lado da parede modelada, juntamente com a presença de isolamento térmico na cavidade da parede por lã de rocha. O isolante térmico foi considerado apenas na extensão de referência de três vezes largura da mesa do perfil, visando economia no emprego do material. Os itens correspondentes a estes modelos são os 3.4.1 e 4.2.5.

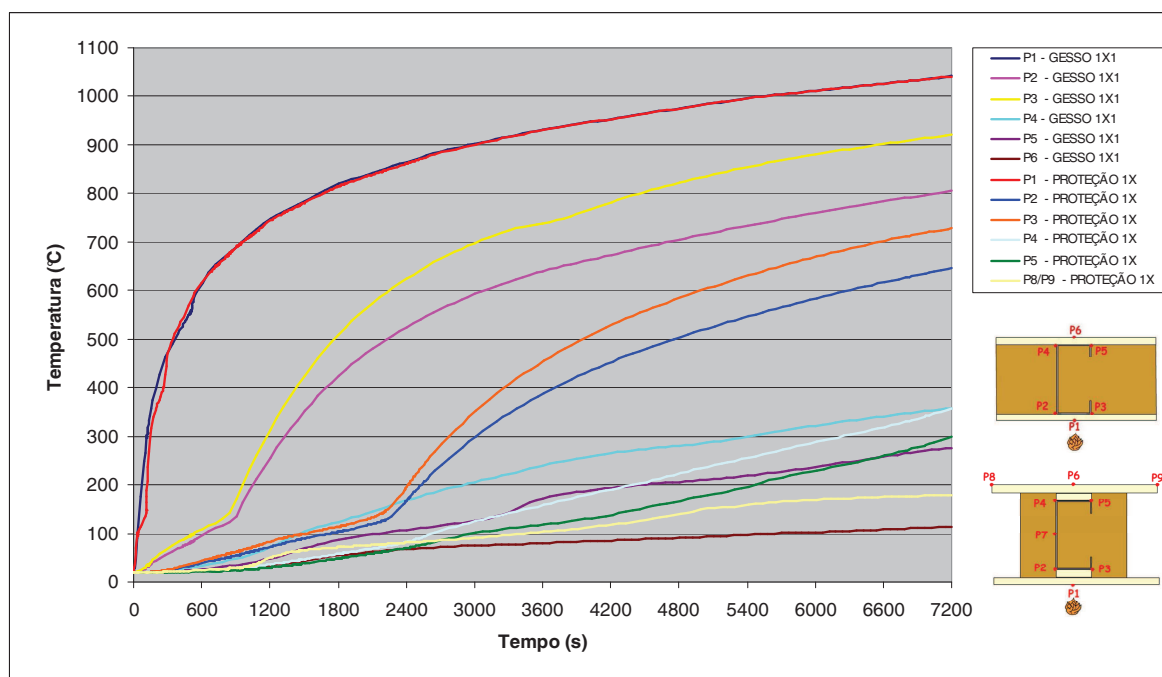


Figura 4.40. Modelos com isolamento com fechamento com uma placa de gesso, com e sem proteção no perfil.

Sobre a figura 4.40 pode-se concluir que:

- para o ponto P1, os valores foram similares conforme já se esperava;

- o mesmo observado nos modelos com isolamento na cavidade da parede ocorre neste comparativo: os pontos presentes em uma mesma profundidade de parede apresentam valores de temperatura distintos, com curvas sem uma convergência para uma mesma temperatura final;
- nota-se que, também, ocorre um deslocamento do trecho de aumento brusco de temperatura quando comparada a mesma curva dos pontos P2 e P3, porém para modelos diferentes (similar ao comparativo da figura 4.39). Para a curva do ponto P3, no modelo com apenas uma placa de gesso, observa-se que ocorre um grande aumento de temperatura a partir dos 845s, enquanto o mesmo comportamento somente acontece por volta dos 2250s no modelo com a proteção. O acréscimo da proteção proporciona um retardo no aumento de temperatura, idêntico ao acréscimo da segunda placa de gesso em outros modelos. O mesmo não é observado para os pontos na outra extremidade do perfil, P4 e P5 em ambos os modelos;
- a diferença de temperatura entre os pontos localizados em uma mesma profundidade de parede foi máxima de $116^{\circ}C$ entre P2 e P3 para o modelo com uma placa e de $82^{\circ}C$ para o modelo com proteção, ambas no tempo de 7200 segundos. Já para os pontos P4 e P5, os valores foram de $81^{\circ}C$ e $58^{\circ}C$, onde o primeiro valor é para o modelo com uma placa e o outro para com proteção, também no tempo final da simulação;
- para o tempo de 30 min, a proteção é bem eficiente em relação às temperaturas no perfil. Há uma grande redução dos valores quando comparados pontos P2 e P3 dos modelos para o instante 1800s;
- as temperaturas finais, no ponto P6 para o modelo com uma placa e nos pontos P8 e P9 para o com proteção foram às seguintes: $113^{\circ}C$ e $179^{\circ}C$. O que indicam que o modelo sem proteção satisfaz a um TRRF superior a 120min e o com proteção, apenas de 90min, pois atinge $160^{\circ}C$ aos 5474s. Constata-se que o modelo com proteção apresenta menor tempo de resistência ao fogo, devido a uma maior eficiência de transferência de calor por radiação na cavidade presente e pequena trecho de placa de gesso acrescentado;

- considerando os pontos nas extremidades do perfil Ue (P2, P3, P4 e P5), a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. Os resultados estão apresentados na tabela 4.7, juntamente com os valores máximos de temperatura.

Tabela 4.7. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5

Tempo (minutos)	Temperatura (° C)			
	Modelo (1x1) Com Isolamento		Modelo (1x1) Com Isolamento Proteção 1X	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	97	171 (P3)	42	62 (P3)
30	286	509 (P3)	80	113 (P3)
60	447	738 (P3)	280	455 (P3)
90	526	854 (P3)	407	630 (P3)
120	583	920 (P3)	503	728 (P3)

4.3.8 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 sem e com proteção no perfil (3x), com isolamento na cavidade

A figura 4.41 apresenta o gráfico comparativo referente à proteção no perfil através do acréscimo de um trecho de placa de gesso acartonado na extensão de três vezes a largura das mesas do mesmo ao modelo com apenas uma placa de gesso em cada lado, juntamente com a presença de isolamento na cavidade da parede por lã de rocha. Conforme mencionado no comparativo anterior, para o isolamento térmico foi considerado a utilização apenas na extensão de três vezes a largura das mesas do perfil. Os modelos foram analisados nos itens 3.4.2 e 4.2.6.

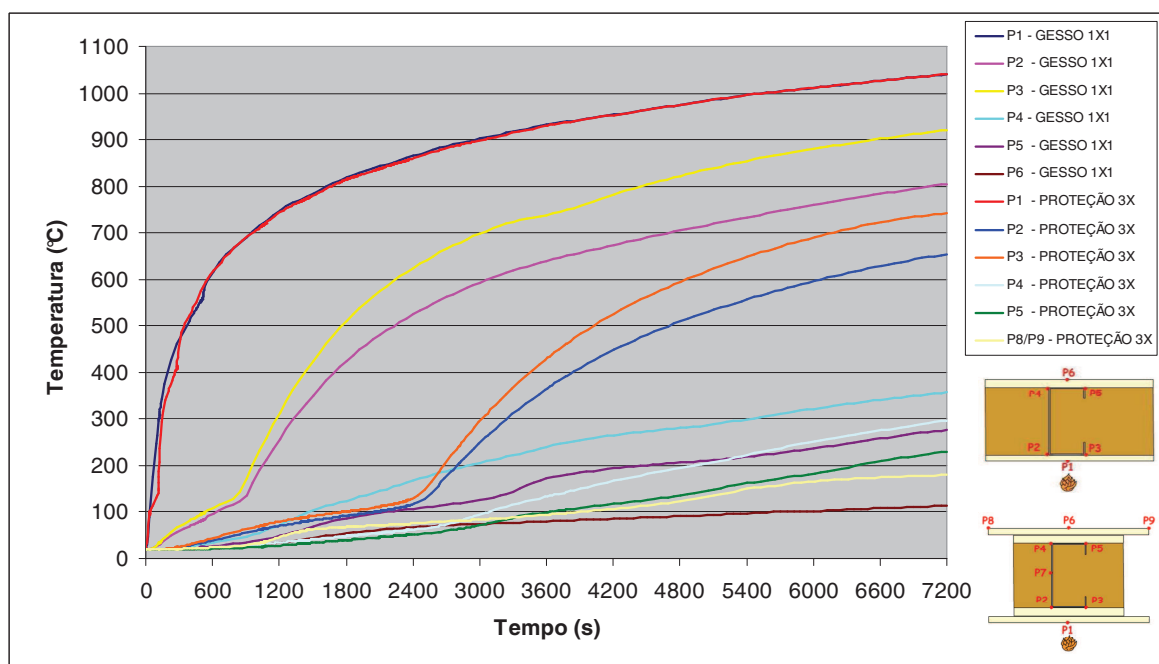


Figura 4.41. Modelos com isolamento com fechamento com uma placa de gesso, com e sem proteção no perfil.

Pode-se observar em relação à ilustração 4.41 que:

- para o ponto P1, os valores também foram similares aos dos outros modelos;
- o mesmo comportamento observado nos modelos com isolamento na cavidade da parede é também presente: os pontos localizados na mesma profundidade da parede apresentam valores de temperatura distintos, com curvas sem convergência para a mesma temperatura final;
- há também um deslocamento do trecho de aumento brusco de temperatura quando comparada a mesma curva dos pontos P2 e P3, porém, para modelos diferentes (similar ao comparativo da figura 4.40). Para a curva do ponto P3, no modelo com apenas uma placa de gesso, observa-se que ocorre um grande aumento de temperatura a partir dos 845s, enquanto o mesmo somente acontece por volta dos 2450s no modelo com a proteção (3x). O acréscimo de uma proteção com extensão maior proporciona um retardo do aumento de temperatura. O mesmo não é observado para os pontos na outra extremidade do perfil, P4 e P5;

- a diferença de temperatura entre pontos em uma mesma profundidade da parede foi máxima de $116^{\circ}C$ entre P2 e P3 no modelo com uma placa e de $90^{\circ}C$ no modelo com proteção (3x), ambas no tempo de 7200 segundos. Já para os pontos P4 e P5, os valores foram de $81^{\circ}C$ e $68^{\circ}C$, onde o primeiro valor é para o modelo com uma placa e o outro para com proteção, também no tempo final de simulação;

- as temperaturas finais, no ponto P6 para o modelo sem proteção foi de $113^{\circ}C$ e de $179^{\circ}C$ para o outro com proteção 3x nos pontos P8 e P9. O que indica que o modelo sem proteção satisfaz a um TRRF superior a 120min, em relação ao isolamento térmico. O modelo com proteção satisfaz a um TRRF de 90min, para fins de isolamento térmico, pois atinge $160^{\circ}C$ aos 5769s;

- considerando os pontos nas extremidades do perfil Ue (P2, P3, P4 e P5), a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. A tabela 4.8 apresenta os resultados encontrados, juntamente com os valores máximos de temperatura.

Tabela 4.8. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5

Tempo (minutos)	Temperatura ($^{\circ}C$)			
	Modelo (1x1) Com Isolamento		Modelo (1x1) Com Isolamento Proteção 3X	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	97	171 (P3)	43	64 (P3)
30	286	509 (P3)	70	101 (P3)
60	447	738 (P3)	257	430 (P3)
90	526	854 (P3)	397	648 (P3)
120	583	920 (P3)	478	742 (P3)

4.3.9 Modelos com placas de gesso acartonado 2x2 sem proteção no perfil e com placa 1x1 com proteção no perfil (1x), sem isolamento na cavidade

A figura 4.42 ilustra o gráfico comparativo entre o modelo com proteção no perfil através do acréscimo de um trecho de placa de gesso acartonado correspondente a largura das mesas do perfil e o modelo com duas placas de gesso acartonado em cada lado da parede. Os itens correspondentes a estes modelos são os 4.2.1 e 4.2.3.

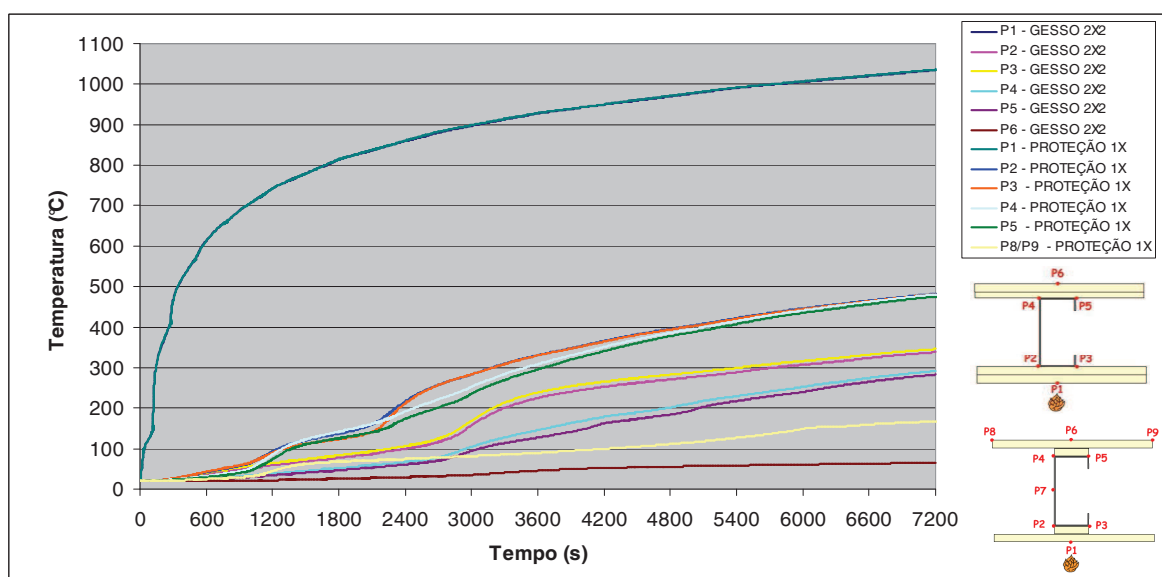


Figura 4.42. Modelos sem isolamento: modelo com fechamento com duas placas de gesso sem proteção no perfil e modelo com fechamento com uma placa de gesso e proteção no perfil (1x).

Após análise da figura 4.42 constata-se que:

- para o ponto P1, os valores foram similares conforme já se esperava;
- por serem modelos sem isolamento, os valores de temperatura para os pontos localizados em uma mesma profundidade de parede apresentaram pequenas diferenças no decorrer do tempo, chegando a temperaturas similares aos 7200s;
- os pontos P2, P3, P4 e P5 para o modelo com proteção no perfil (1X) apresentam convergência para os mesmos valores de temperatura no decorrer da simulação, com temperatura final praticamente igual;

- as curvas de temperatura apresentam traçados similares em relação aos pontos presentes em uma mesma profundidade (P2/P3 e P4/P5) no modelo com fechamento por duas placas de gesso, conforme já mencionado anteriormente;

- observa-se que também ocorre um deslocamento do trecho de aumento brusco de temperatura quando comparada a mesma curva de um ponto, nos dois modelos. Para o ponto P3, no modelo com duas placas de gesso, observa-se que ocorre um grande aumento de temperatura a partir dos 2850s, enquanto o mesmo acontece por volta dos 2100s no modelo com proteção do perfil (1x). O modelo com proteção apresenta um retardo no instante em que se inicia a fase de aquecimento brusco, devido à presença de umidade presente na constituição da placa de gesso e a mesma se evaporar para temperaturas próximas aos $120^{\circ}C$;

- a diferença no instante final da simulação, entre os pontos P2 dos modelos analisados é de $130^{\circ}C$, com valor máximo observado para o modelo com proteção de $475^{\circ}C$. Em relação aos pontos P4, a diferença é de $193^{\circ}C$, com valor final para o modelo com fechamento em duas placas de $282^{\circ}C$;

- para o ponto P6 a temperatura no instante 7200s é de $63^{\circ}C$ para o modelo com duas placas e de $166^{\circ}C$ para o com proteção, no mesmo momento nos pontos P8 e P9. Conforme mencionado anteriormente, considerando uma temperatura ambiente inicial de $20^{\circ}C$ e que o incremento de temperatura para fins de isolamento térmico deve ser inferior a $140^{\circ}C$, totalizando $160^{\circ}C$, observa-se que na face da parede do lado não exposto ao incêndio, a temperatura não ultrapassa os $63^{\circ}C$ para o modelo com duas placas e atinge $160^{\circ}C$ aos 6620s. Isso indica que o modelo com duas placas sem proteção no perfil satisfaz a um TRRF superior a 120min e o outro modelo com proteção e apenas uma placa satisfaz a um TRRF de 110min em relação aos critérios de isolamento térmico;

- considerando os pontos nas extremidades do perfil Ue (P2, P3, P4 e P5), a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. Os resultados estão apresentados na tabela 4.9, juntamente com os valores máximos de temperatura.

Tabela 4.9. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5

Tempo (minutos)	Temperatura (°C)			
	Modelo (2x2) Sem Isolamento		Modelo (1x1) Sem Isolamento Proteção 1X	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	41	54 (P3)	50	59 (P3)
30	65	84 (P3)	132	123 (P4)
60	184	239 (P3)	317	331 (P2)
90	259	299 (P3)	416	422 (P2)
120	312	338 (P3)	473	482 (P2)

4.3.10 Modelos com placas de gesso acartonado 2x2 sem proteção perfil e com placa 1x1 com proteção no perfil (3x), sem isolamento na cavidade

A seguir na figura 4.43 está ilustrado o gráfico comparativo entre o modelo com proteção no perfil através do acréscimo de um trecho de placa de gesso acartonado com comprimento de três vezes a extensão da mesa do perfil e o modelo com duas placas de gesso em cada lado da parede. Os itens correspondentes a estes modelos são os 4.2.1 e 4.2.4.

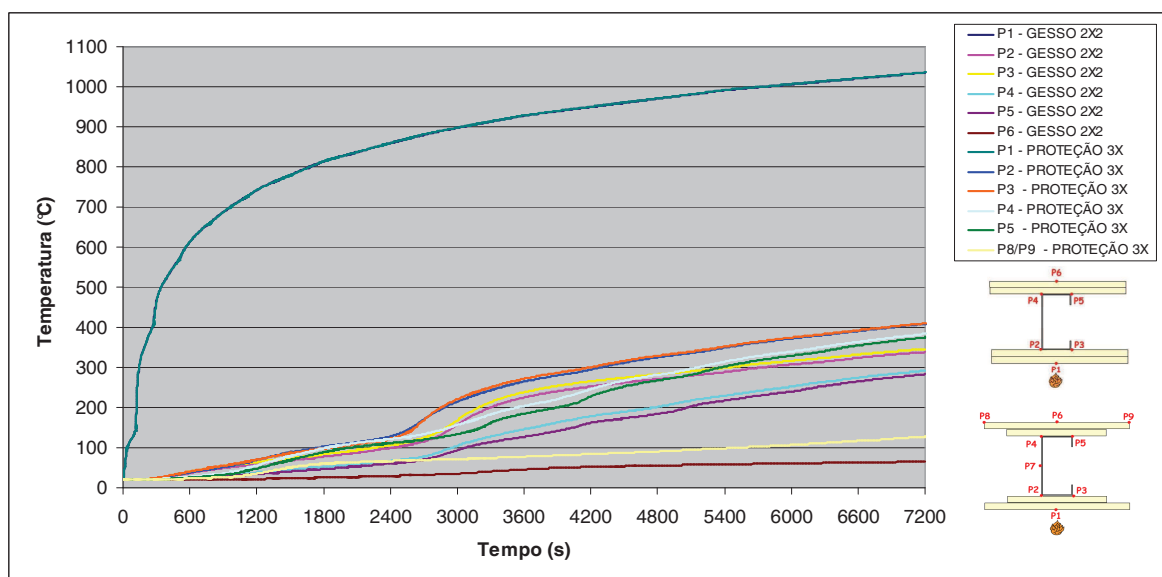


Figura 4.43. Modelos sem isolamento: modelo com fechamento com duas placas de gesso sem proteção no perfil e modelo com fechamento com uma placa de gesso e proteção no perfil (3x).

Da figura 4.43 pode-se observar que:

- para o ponto P1, os valores também foram similares conforme já se esperava;
- por serem modelos sem isolamento, os valores de temperatura para os pontos localizados na mesma profundidade de parede apresentaram pequenas diferenças no decorrer do tempo, chegando a temperaturas similares aos 7200s;
- os pontos em mesma profundidade P2/P3 e P5/P6 do modelo com proteção não apresentaram convergência para uma mesma temperatura final no decorrer da simulação, comportamento observado para o modelo com proteção por acréscimo de placa de gesso com largura de uma vez as mesas do perfil (ver figura 4.42);
- observa-se que ocorre um deslocamento do trecho de aumento brusco de temperatura quando se compara a mesma curva de um ponto, nos dois modelos. Para a curva do ponto P3, no modelo com duas placas de gesso, observa-se que há um grande incremento de temperatura a partir dos 2850s, enquanto o mesmo acontece por volta de 2400s no modelo com proteção (3x). O modelo com proteção também apresenta um retardo no instante em que se inicia a fase de aquecimento brusco, este retardo

observado está em um instante intermediário aos constatados nos modelos com uma e duas placas de gesso no fechamento da parede, porém, em um instante posterior ao encontrado para o modelo com proteção (1x) abordado na figura 4.42;

- a diferença no instante final da simulação, entre os pontos P2 dos modelos analisados é de $65^{\circ}C$, com valor máximo observado para o modelo com proteção de $410^{\circ}C$. Em relação aos pontos P4, a diferença é de $91^{\circ}C$, com valor final para o modelo com proteção de $373^{\circ}C$.

- para o ponto P6 a temperatura no instante $t = 7200s$ é de $63^{\circ}C$ para o modelo com duas placas e de $127^{\circ}C$ para o modelo com proteção no perfil (3X) nos pontos P8 e P9. Observa-se que na face da parede do lado oposto ao em situação de incêndio, a temperatura não ultrapassa os $127^{\circ}C$. Isso indica que ambos os modelos satisfazem um TRRF superior a 120min;

- para os pontos nas extremidades do perfil P2, P3, P4 e P5, a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. Os resultados estão apresentados na tabela 4.10. Constata-se que a diferença de temperatura aos 120min é de apenas $79^{\circ}C$, indicando que o modelo com proteção no perfil (3X) apresenta comportamento bem próximo ao modelo com duas placas.

Tabela 4.10. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5

Tempo (minutos)	Temperatura ($^{\circ}C$)			
	Modelo (2x2) Sem Isolamento		Modelo (1x1) Sem Isolamento Proteção 3X	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	41	54 (P3)	43	55 (P3)
30	65	84 (P3)	97	102 (P2)
60	184	239 (P3)	232	272 (P3)
90	259	299 (P3)	329	352 (P3)
120	312	338 (P3)	391	410 (P3)

4.3.11 Modelos com placas de gesso acartonado 2x2 sem proteção perfil e com placa 1x1 com proteção no perfil (1x), com isolamento na cavidade

O gráfico comparativo abordado é entre o modelo com proteção no perfil através do acréscimo de um trecho de placa de gesso acartonado equivalente a largura das mesas do perfil juntamente com a presença de isolamento na cavidade da parede por lã de rocha e o modelo com duas placas de gesso em cada lado da parede também com isolamento na cavidade pelo mesmo material. Os itens correspondentes a estes modelos são os 4.2.2 e 4.2.5.

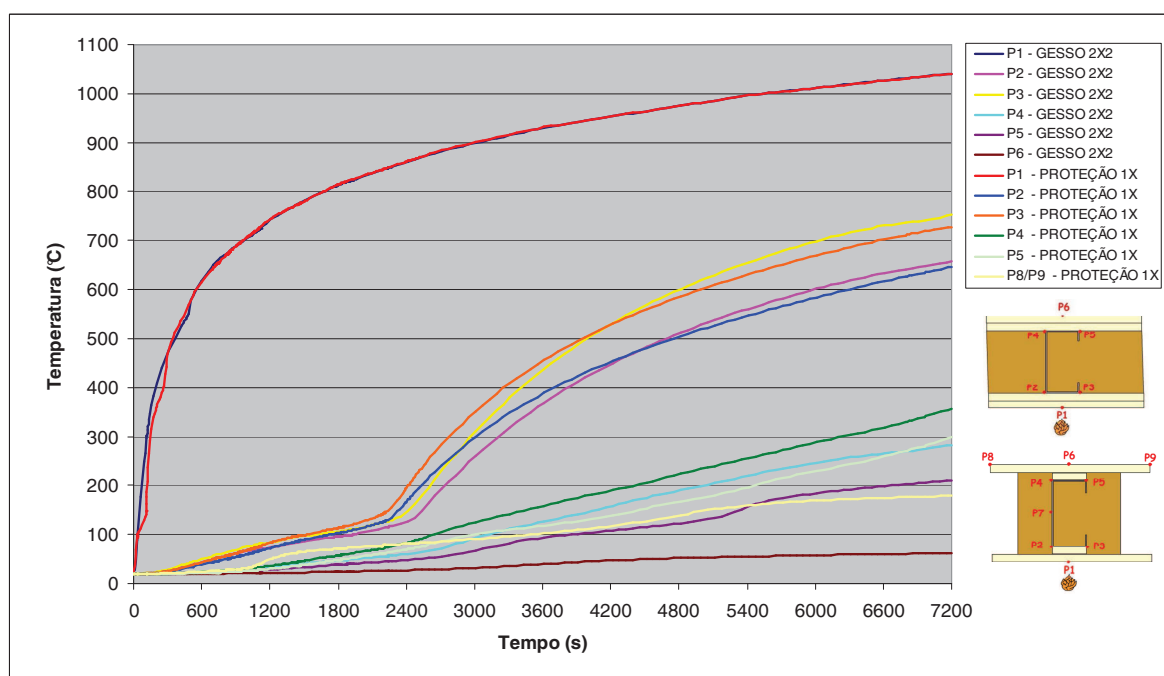


Figura 4.44. Modelos com isolamento: modelo com fechamento com duas placas de gesso sem proteção no perfil e modelo com fechamento com uma placa de gesso e proteção no perfil (1x).

Com base na ilustração apresentada na figura 4.44 pode-se constatar que:

- para o ponto P1, os valores foram similares;
- a mesma observação constatada nos modelos com isolamento na cavidade da parede é presente: os pontos na mesma profundidade apresentaram valores de temperatura distintos, com curvas sem convergência para uma mesma temperatura final;

- nota-se também que ocorre um deslocamento do trecho de aumento brusco de temperatura quando se compara a mesma curva dos pontos P2 e P3, em ambos os modelos. Para a curva do ponto P3, no modelo com proteção, observa-se que ocorre um grande incremento de temperatura a partir dos 2250s, enquanto o mesmo somente acontece por volta de 2370s no modelo com duas placas de gesso, muito próximo. O acréscimo da proteção proporciona um retardo no aumento de temperatura, situação idêntica ao acréscimo da segunda placa de gesso, o que torna os resultados semelhantes;

- a diferença de temperatura entre pontos localizados em uma mesma profundidade da parede, foi máxima de $106^{\circ}C$ entre P2 e P3 do modelo com duas placas e de $84^{\circ}C$ para o modelo com proteção, ambas no tempo de 7200 segundos. Já para os pontos P4 e P5, os valores foram de $72^{\circ}C$ e $58^{\circ}C$, onde o primeiro valor é para o modelo com duas placas e o outro para com proteção, também no tempo final de simulação, evidenciando a similaridade do comportamento dos modelos;

- as temperaturas finais, no ponto P6 para o modelo com duas placas e para os pontos P8 e P9 do outro com proteção no perfil (1X) foram as seguintes, $63^{\circ}C$ e $179^{\circ}C$ respectivamente, indicando que apenas o primeiro modelo satisfaz a um TRRF superior a 120min. O modelo com proteção satisfaz a um TRRF de 90min, pois aos 5474s a temperatura nos pontos citados é de $160^{\circ}C$ conforme estabelecem os critérios de isolamento térmico;

- considerando os pontos nas extremidades do perfil Ue (P2, P3, P4 e P5), a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. Os resultados estão apresentados na tabela 4.11, juntamente com os valores máximos de temperatura.

Tabela 4.11. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5

Tempo (minutos)	Temperatura ($^{\circ}C$)			
	Modelo (2x2) Com Isolamento		Modelo (1x1) Com Isolamento Proteção 1X	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	46	70 (P3)	42	62 (P3)
30	71	105 (P3)	80	113 (P3)
60	256	437 (P3)	280	455 (P3)
90	398	655 (P3)	407	630 (P3)
120	472	752 (P3)	503	728 (P3)

4.3.12 Modelos com placas de gesso acartonado 2x2 sem proteção perfil e com placa 1x1 com proteção no perfil (3x), com isolamento na cavidade

Na figura 4.45 está representado o gráfico comparativo entre o modelo com proteção no perfil através do acréscimo de um trecho de placa de gesso acartonado referente a três vezes a largura das mesas do perfil juntamente com a presença de isolamento na cavidade da parede por lã de rocha e o modelo com duas placas de gesso em cada lado da parede, também com isolamento na cavidade pelo mesmo material. Os itens correspondentes a estes modelos são os 4.2.2 e 4.2.6.

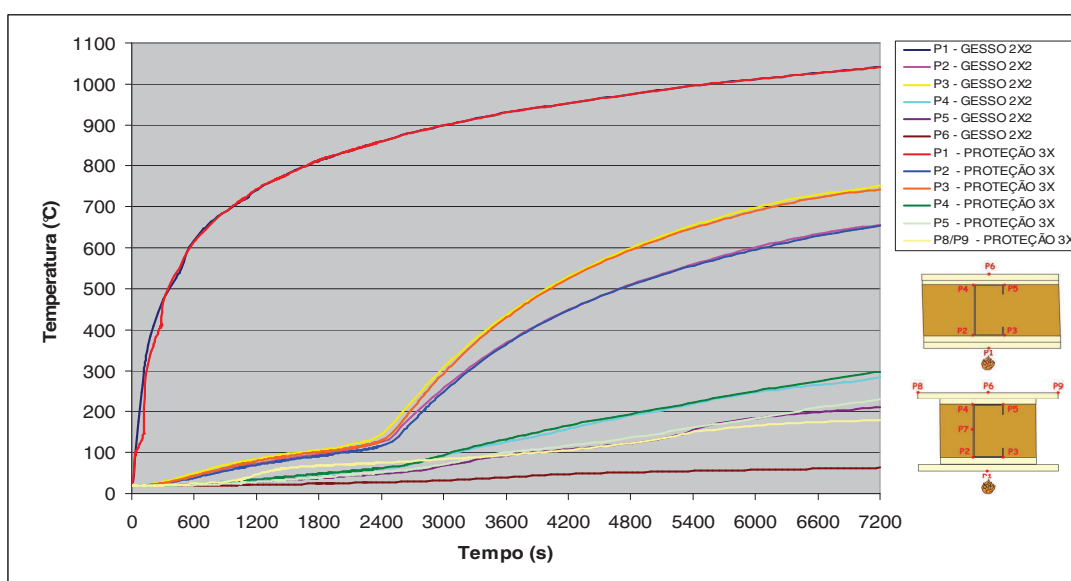


Figura 4.45. Modelos com isolamento: modelo com fechamento com duas placas de gesso sem proteção no perfil e modelo com fechamento com uma placa de gesso e proteção no perfil (3x).

Da figura 4.45 observa-se que:

- para o ponto P1, os valores foram similares conforme esperado;
- observam-se novamente nos modelos com isolamento na cavidade da parede que os pontos em uma mesma profundidade apresentaram valores de temperatura distintos, com curvas sem convergência para a mesma temperatura final;
- nota-se que as curvas de temperatura em função do tempo do modelo com proteção (3x) se aproximam muito das curvas do modelo com fechamento por duas placas de gesso, em alguns pontos é possível se notar a sobreposição das mesmas;
- as temperaturas finais, no ponto P6, no modelo com duas placas de gesso e nos pontos P8 e P9 no modelo com proteção no perfil (3X) foram de $63\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o primeiro e de $179\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o segundo. Isto indica que o modelo com duas placas satisfaz a um TRRF superior a 120min e o com proteção a um TRRF de 90min, por atingir $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ aos 5769s, conforme critérios de isolamento térmico;
- para os pontos nas extremidades do perfil P2, P3, P4 e P5, a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. Os resultados estão apresentados na tabela 4.12, juntamente com os valores máximos de temperatura.

Tabela 4.12. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5

Tempo (minutos)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)			
	Modelo (2x2) Com Isolamento		Modelo (1x1) Com Isolamento Proteção 3X	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	46	70 (P3)	43	64 (P3)
30	71	105 (P3)	70	101 (P3)
60	256	437 (P3)	257	430 (P3)
90	398	655 (P3)	397	648 (P3)
120	472	752 (P3)	478	742 (P3)

4.3.13 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 com proteção no perfil (1x) e com proteção no perfil (3x), sem isolamento na cavidade

A seguir na figura 4.46 está ilustrado o gráfico comparativo entre os modelos com proteção no perfil, o primeiro com acréscimo de um trecho de placa de gesso acartonado equivalente a uma vez a largura das mesas do perfil e o outro modelo com proteção com acréscimo de trecho de placa de gesso de três vezes a largura mencionada. Ambos os modelos não apresentam proteção térmica na cavidade por preenchimento com material isolante. Os itens correspondentes a estes modelos são os 4.2.3 e 4.2.4.

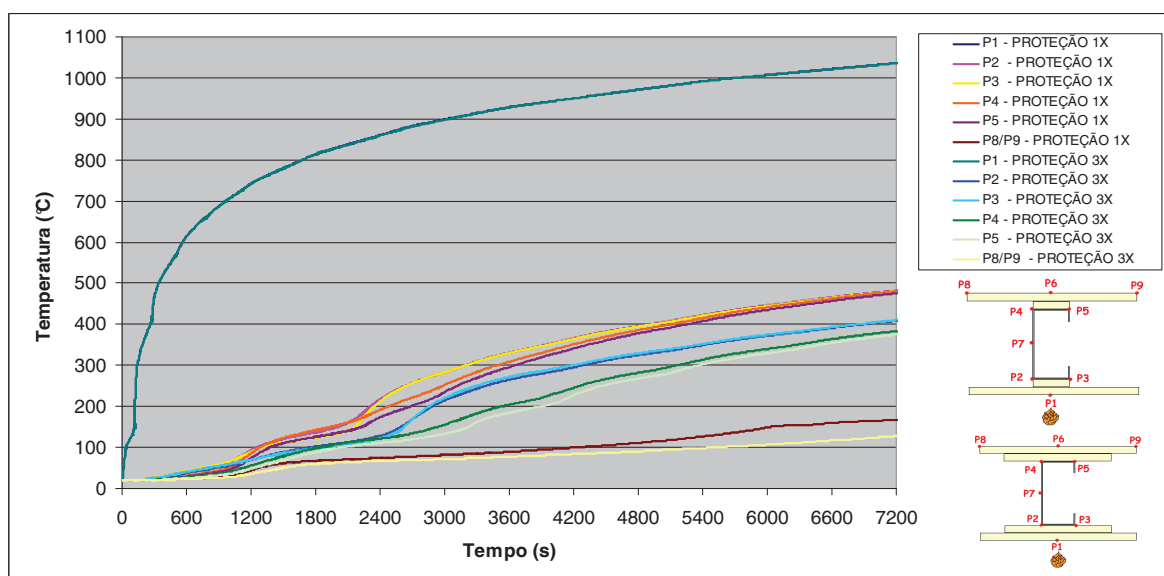


Figura 4.46. Modelos Sem isolamento com fechamento com uma placa de gesso: modelos com proteção no perfil (1x) e modelo com proteção no perfil (3x).

Observa-se da figura 4.46 que:

- para o ponto P1, os valores foram similares conforme já se esperava;
- os pontos P2, P3, P4 e P5 do modelo com proteção 1x apresentam convergência de suas curvas para o mesmo valor final de temperatura. No modelo com proteção 3x, a convergência para valores próximos ocorrem em pontos localizados em uma mesma profundidade, P2/P3 e P4/P5. A diferença da temperatura final dos pontos P2/P3/P4/P5 do modelo com proteção 1x para os pontos P2/P3 do modelo com proteção 3x é de

75 °C, enquanto a diferença entre a temperatura final dos pontos P2/P3/P4/P5 do modelo com proteção 1x e a temperatura dos pontos P4/P5 do modelo com proteção 3x é de 100 °C;

- as temperaturas finais, nos pontos P8 e P9, no modelo com proteção no perfil 1X e no modelo com proteção no perfil (3X) foram de 166 °C para o primeiro e de 127 °C para o segundo. Isto indica que ambos os modelos satisfazem a um TRRF superior a 120min, conforme critérios de isolamento térmico;

- para os pontos nas extremidades do perfil P2, P3, P4 e P5, a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. Os resultados estão apresentados na tabela 4.13, juntamente com os valores máximos de temperatura.

Tabela 4.13. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5

Tempo (minutos)	Temperatura (°C)			
	Modelo (1x1) Sem Isolamento Proteção1X		Modelo (1x1) Sem Isolamento Proteção 3X	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	50	59 (P3)	43	55 (P3)
30	132	123 (P4)	97	102 (P2)
60	317	331 (P2)	232	272 (P3)
90	416	422 (P2)	329	352 (P3)
120	473	482 (P2)	391	410 (P3)

4.3.14 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 com proteção no perfil (1x) e com proteção no perfil (3x), com isolamento na cavidade

Na figura 4.47 está representado o gráfico comparativo entre os modelos com proteção no perfil, o primeiro com acréscimo de um trecho de placa de gesso acartonado com dimensão de uma vez a largura das mesas do perfil e o outro modelo com proteção com acréscimo de trecho de placa de gesso de três vezes a largura mencionada. Ambos os

modelos apresentam proteção térmica na cavidade por preenchimento com material isolante, lã de rocha. Os itens correspondentes a estes modelos são os 4.2.5 e 4.2.6.

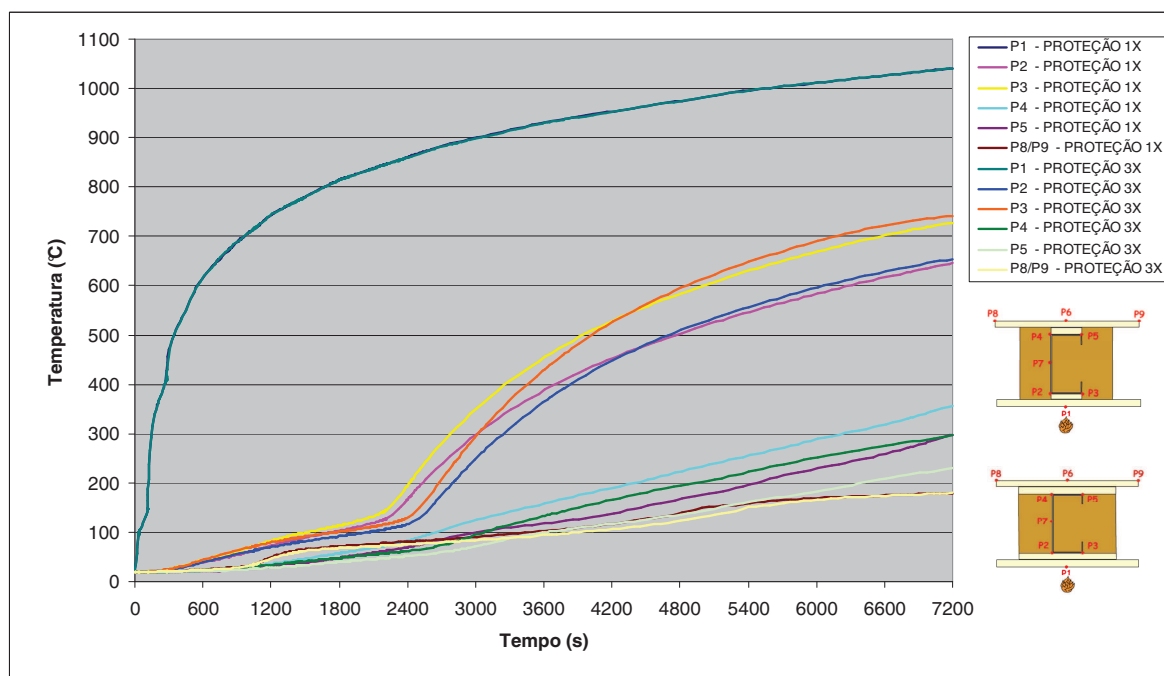


Figura 4.47. Modelos com isolamento: modelo com fechamento com uma placa de gesso e proteção no perfil (1x) e modelo com fechamento com uma placa de gesso e proteção no perfil (3x).

Da figura 4.47 observa-se que:

- para o ponto P1, os valores foram similares conforme já se esperava para ambas as curvas;
- até por volta de 1400s as diferenças de temperatura entre as curvas para os mesmos pontos dos modelos são mínimas, com variação máxima de $8^{\circ}C$;
- as curvas dos pontos P2 e P3, em cada modelo, apresentam traçados similares, com valores de temperatura bem próximos umas das outras a partir do instante 4150s. Com variação máxima para entre as curvas P3 de $19^{\circ}C$;

- em virtude dos modelos apresentarem configurações bem próximas, as curvas apresentam traçados similares, com diferenças entre as temperaturas finais atingidas de $14^{\circ}C$ para o ponto P3 e de $59^{\circ}C$ para P5. Para o ponto P2 observa-se uma diferença mínima de temperatura de $7^{\circ}C$;
- as temperaturas finais, nos pontos P8 e P9, em ambos os modelos foram de $179^{\circ}C$. Aos 5474s o primeiro atingiu nestes pontos $160^{\circ}C$ e o segundo, a mesma temperatura, no instante $t = 5769s$, deste modo, ambos os modelos satisfazem a um TRRF de 90min;
- para os pontos nas extremidades do perfil P2, P3, P4 e P5, a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. Os resultados estão apresentados na tabela 4.14, juntamente com os valores máximos de temperatura.

Tabela 4.14. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5

Tempo (minutos)	Temperatura ($^{\circ}C$)			
	Modelo (1x1) Com Isolamento Proteção 1X		Modelo (1x1) Com Isolamento Proteção 3X	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	42	62 (P3)	43	64 (P3)
30	80	113 (P3)	70	101 (P3)
60	280	455 (P3)	257	430 (P3)
90	407	630 (P3)	397	648 (P3)
120	503	728 (P3)	478	742 (P3)

4.3.15 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 sem e com proteção no perfil (1x) e proteção lateral, sem isolamento na cavidade

O gráfico comparativo ilustrado na figura 4.48 retrata a distribuição de temperatura ao longo da parede considerando outra forma de proteção para o perfil, com acréscimo de um fechamento lateral, equivalente a altura da alma do PFF, formando um proteção tipo

caixa. Primeiramente, será comparado com o modelo com apenas uma placa de fechamento em cada lado da parede. A proteção lateral é somada à proteção anterior já comparada com acréscimo de um trecho de placa ao longo das mesas do perfil. Ambos os modelos não apresentam preenchimento da cavidade com material isolante térmico. Os itens correspondentes a estes modelos são os 3.4.1 e 4.2.7.

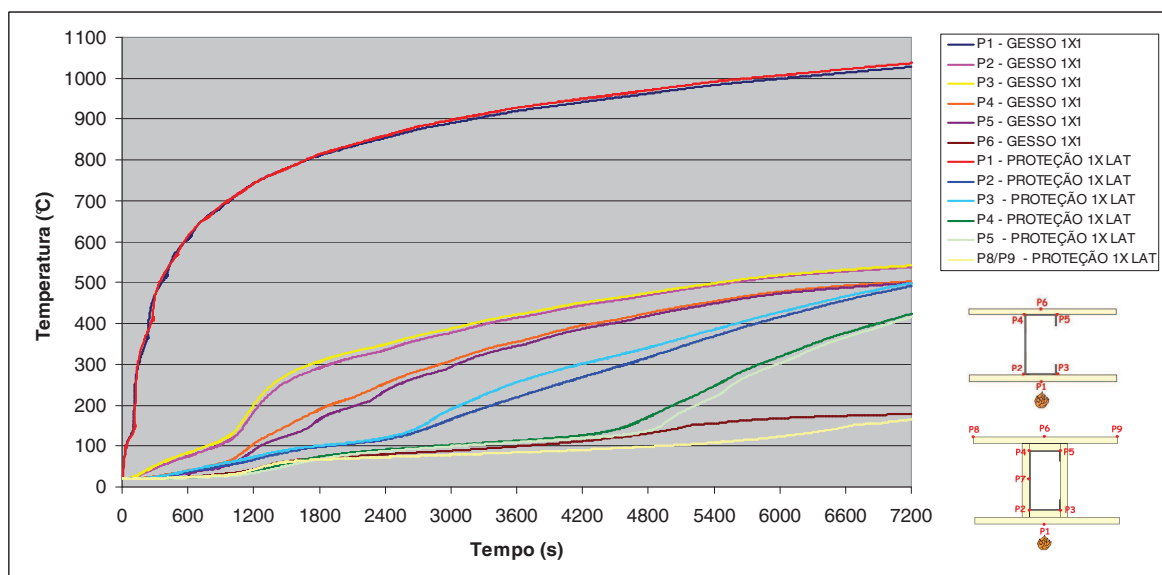


Figura 4.48. Modelos sem isolamento com fechamento com uma placa de gesso, com e sem proteção no perfil (1x + lateral).

Pode-se concluir da figura 4.48 que:

- para o ponto P1, os valores foram similares em ambos os modelos;
- para os pontos presentes em uma mesma profundidade de parede, observam-se uma convergência para uma mesma temperatura final (instante 7200s);
- as curvas de temperatura apresentam traçados similares em relação aos pontos localizados em uma mesma profundidade (P2 /P3 e P4/P5) em ambos os modelos;
- observa-se que ocorre um deslocamento do trecho de aumento brusco de temperatura quando comparada a mesma curva de um ponto em ambos os modelos. Para a curva do ponto P2, no modelo com apenas uma placa de gesso, observa-se que ocorre um grande aumento de temperatura a partir dos 900s, enquanto um incremento similar de

temperatura somente acontece por volta de 2400s no modelo com proteção lateral. Ocorre um retardo no aumento de temperatura em função do acréscimo da placa lateral formando uma proteção tipo caixa. O deslocamento mencionado anteriormente é maior quando se observa as curvas dos pontos P4/P5;

- a diferença no instante final da simulação, entre os pontos P2 dos modelos analisados é de $50^{\circ}C$, com valor máximo observado para o modelo com apenas uma placa de $541^{\circ}C$. Em relação aos pontos P4, a diferença é de $77^{\circ}C$, com valor final para o modelo com fechamento com apenas uma placa de $500^{\circ}C$;

- observa-se que com uma placa o tempo para atingir $160^{\circ}C$, no ponto P6, é de aproximadamente 5400s. Isso indica que o modelo com uma placa satisfaz a um Tempo Requerido de Resistência ao Fogo, TRRF, de 90 minutos, enquanto que o modelo com proteção lateral atingiu $160^{\circ}C$ nos pontos P8 e P9 aos 7031s, podendo satisfazer a um TRRF de a 110min, conforme critérios de isolamento térmico;

- considerando os pontos nas extremidades do perfil, P2, P3, P4 e P5, a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. A tabela 4.15 apresenta os resultados encontrados, juntamente com os valores máximos de temperatura.

Tabela 4.15. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5

Tempo (minutos)	Temperatura ($^{\circ}C$)			
	Modelo (1x1) Sem Isolamento		Modelo (1x1) Sem Isolamento Proteção 1X - lateral	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	80	113 (P3)	40	56 (P3)
30	238	307 (P3)	85	100 (P3)
60	384	422(P3)	174	255 (P3)
90	474	498 (P3)	305	385 (P3)
120	516	541 (P3)	448	499 (P3)

4.3.16 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 sem e com proteção no perfil (3x) e proteção lateral, sem isolamento na cavidade

O gráfico representado na figura 4.49 compara um modelo com proteção para o perfil, com acréscimo de um fechamento lateral, com dimensão equivalente à altura da alma do perfil, além de uma proteção das mesas com segmento de placa de gesso acartonado com extensão de três vezes a largura das mesas mencionadas, com o outro modelo que possui apenas uma placa de fechamento em cada lado da parede. Ambos os modelos não apresentam preenchimento da cavidade com material isolante térmico. Os itens correspondentes a estes modelos são os 3.4.1 e 4.2.8.

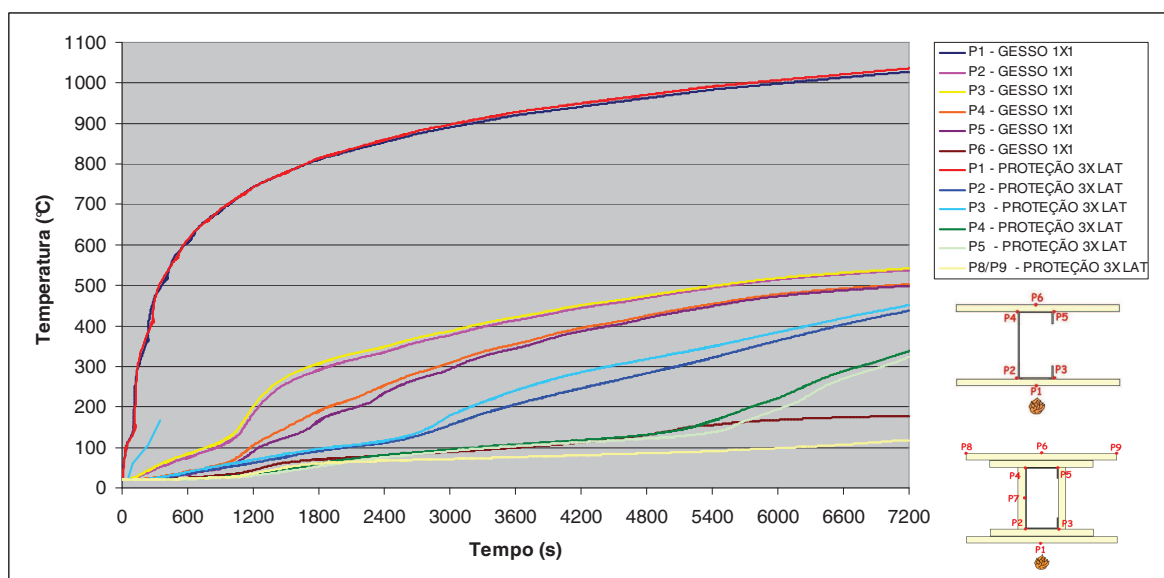


Figura 4.49 Modelos sem isolamento com fechamento com uma placa de gesso, com e sem proteção no perfil (3x + lateral).

Da figura 4.49 observa-se que:

- para o ponto P1, os valores foram similares conforme já se esperava;
- para os pontos localizados em uma mesma profundidade de parede, observa-se também uma convergência para uma temperatura final (instante 7200s);

- as curvas de temperatura apresentam traçados similares em relação aos pontos em uma mesma profundidade (P2 /P3 e P4/P5) em ambos os modelos;
- observa-se que ocorre um deslocamento do patamar final de ascensão de temperatura quando comparada a mesma curva de um ponto em ambos os modelos. Para o ponto P2, no modelo com apenas uma placa de gesso, observa-se que ocorre um grande incremento de temperatura a partir dos 900s, enquanto o mesmo somente acontece por volta de 2700s no modelo com proteção lateral. Há um retardo no aumento de temperatura em função do acréscimo da proteção lateral com segmento de placa de gesso;
- o deslocamento mencionado anteriormente é maior quando se observam as curvas dos pontos P4/P5;
- a diferença no instante final da simulação, entre os pontos P2 dos modelos analisados é de $104^{\circ}C$, com valor máximo observado para o modelo com apenas uma placa de $541^{\circ}C$. Em relação aos pontos P4, a diferença é de $160^{\circ}C$, com valor final para o modelo com fechamento com apenas uma placa de $500^{\circ}C$;
- observa-se que com uma placa o tempo para atingir $160^{\circ}C$ é de aproximadamente 5400s no ponto P6. Isso indica que o modelo com uma placa satisfaz a um Tempo Requerido de Resistência ao Fogo de 90 minutos, enquanto que o modelo com proteção lateral pode-se satisfazer a um TRRF superior a 120min, considerando os pontos P8 e P9 atendendo aos critérios de isolamento térmico;
- considerando os pontos nas extremidades do perfil, P2, P3, P4 e P5, a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. A tabela 4.16 apresenta os resultados encontrados, juntamente com os valores máximos de temperatura.

Tabela 4.16. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5

Tempo (minutos)	Temperatura (°C)			
	Modelo (1x1) Sem Isolamento		Modelo (1x1) Sem Isolamento Proteção 3X - lateral	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	80	113 (P3)	39	55 (P3)
30	238	307 (P3)	74	96 (P3)
60	384	422(P3)	164	241 (P3)
90	474	498 (P3)	243	349 (P3)
120	516	541 (P3)	381	450 (P3)

4.3.17 Modelos com placas de gesso acartonado 2x2 sem proteção perfil e com placa 1x1 com proteção no perfil (1x) e proteção lateral, sem isolamento na cavidade

O gráfico comparativo representado na figura 4.50 ilustra o comportamento da distribuição de temperatura ao longo da parede estudada considerando a seguinte configuração de proteção para o perfil: acréscimo de um fechamento lateral, equivalente a altura da alma do perfil, além de outro acréscimo de um trecho de placa de gesso ao longo das larguras das mesas do perfil. A comparação idealizada é com o modelo com duas placas de fechamento em cada lado da parede. Ambos os modelos não apresentam preenchimento da cavidade com material isolante térmico. Os itens correspondentes a estes modelos são os 4.2.1 e 4.2.7.

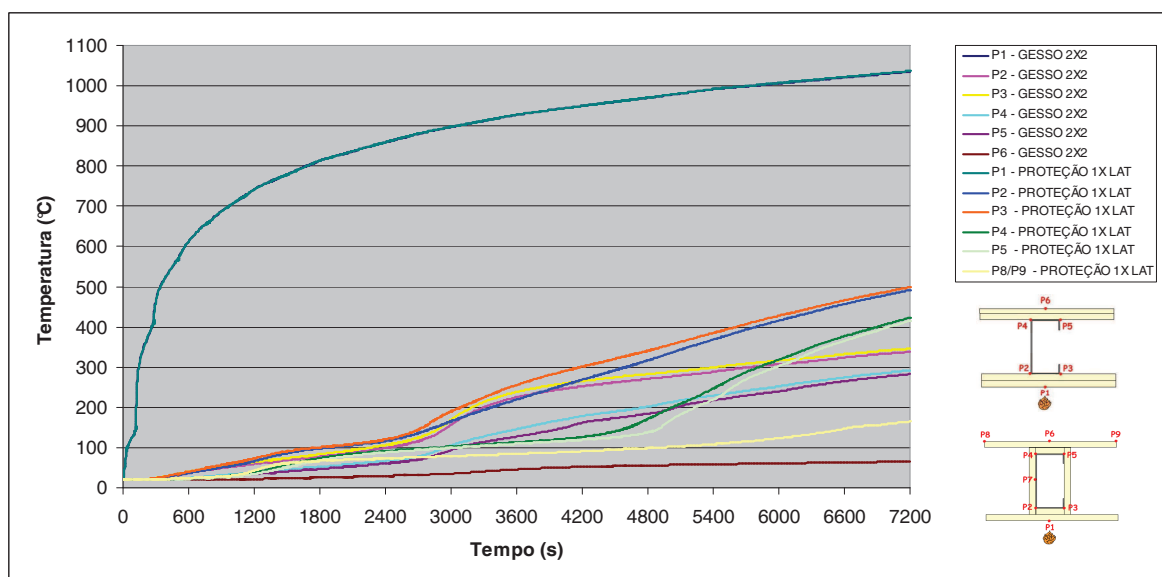


Figura 4.50. Modelos sem isolamento: modelo com fechamento com duas placas de gesso e modelo com uma placa e com proteção no perfil (1x + lateral).

A figura 4.50 permite concluir que:

- para o ponto P1, os valores foram similares em ambos os modelos;
- conforme observado anteriormente, para os pontos localizados em uma mesma profundidade, observa-se uma convergência para uma temperatura final (instante 7200s). As curvas de temperatura apresentam comportamentos similares de ascensão em relação aos pontos presentes em uma mesma profundidade (P2 /P3 e P4/P5) em ambos os modelos;
- observa-se que ocorre um deslocamento do patamar final de ascensão de temperatura quando comparada a mesma curva de um ponto em ambos os modelos. Aproximando-se muito o patamar do modelo com proteção ao do modelo com duas placas de gesso;
- o deslocamento mencionado anteriormente é maior quando se observa as curvas dos pontos P4/P5. No modelo com proteção lateral, este deslocamento é ainda maior do que o presente com duas placas;

- as curvas P2 e P3 apresentam uma suavização no incremento de temperatura, com a sua ascensão assemelhando-se mais para traçado de uma reta, em se tratando do modelo com proteção;

- a diferença no instante final da simulação, entre os pontos P2 dos modelos analisados é de $162^{\circ}C$, com valor máximo observado para o modelo com duas placas de $338^{\circ}C$. Em relação aos pontos P4, a diferença é de $131^{\circ}C$, com valor final para o modelo com fechamento com duas placas de $292^{\circ}C$;

- observa-se que o modelo com duas placas de gesso acartonado atingi $65^{\circ}C$ aos 7200s no ponto P6. Isso indica que o modelo com as duas placas satisfaz a um Tempo Requerido de Resistência ao Fogo superior a 120 minutos, enquanto que o modelo com proteção lateral pode-se satisfazer a um TRRF de 110min, considerando os pontos P8 e P9 atingem $169^{\circ}C$ no momento final da simulação e $160^{\circ}C$ aos 7051s, atendendo aos critérios de isolamento térmico;

- considerando os pontos nas extremidades do perfil, P2, P3, P4 e P5, a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. A tabela 4.17 apresenta os resultados encontrados, juntamente com os valores máximos de temperatura.

Tabela 4.17. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5

Tempo (minutos)	Temperatura ($^{\circ}C$)			
	Modelo (2x2) Sem Isolamento		Modelo (1x1) Sem Isolamento Proteção 1X - lateral	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	41	54 (P3)	40	56 (P3)
30	65	84 (P3)	85	100 (P3)
60	184	239 (P3)	174	255 (P3)
90	259	299 (P3)	305	385 (P3)
120	312	338 (P3)	448	499 (P3)

4.3.18 Modelos com placas de gesso acartonado 2x2 sem proteção perfil e com placa 1x1 com proteção perfil (3x) e proteção lateral, sem isolamento na cavidade

A figura 4.51 apresenta um gráfico que compara um modelo com proteção para o perfil, com acréscimo de um fechamento lateral da alma do mesmo, além de uma proteção das mesas com segmento de placa de gesso acartonado com extensão de três vezes a largura da mesa mencionada e outro modelo que possui duas placas de fechamento em cada lado da parede. Ambos os modelos não apresentam preenchimento da cavidade com material isolante térmico. Os itens correspondentes a estes modelos são os 4.2.1 e 4.2.8.

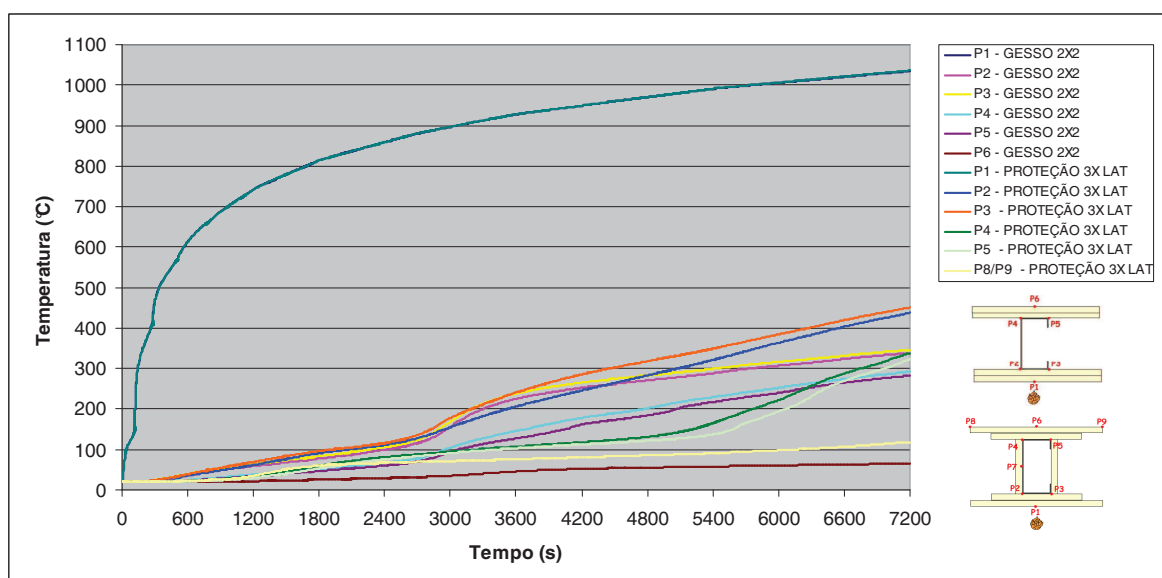


Figura 4.51. Modelos sem isolamento: modelo com fechamento com duas placas de gesso e modelo com uma placa, com proteção no perfil (3x + lateral).

Sobre a figura 4.51 pode-se observar que:

- para o ponto P1, os valores foram similares de acordo com que se esperava;
- conforme também observado anteriormente nos outros comparativos, para os pontos presentes em uma mesma profundidade, observa-se uma convergência para uma temperatura final (instante 7200s);

- observa-se que ocorre um deslocamento do patamar final de ascensão de temperatura quando comparada a mesma curva de um ponto em ambos os modelos. Aproximando-se muito o patamar do modelo com proteção ao do modelo com duas placas de gesso, principalmente quando comparado ao modelo proposto com proteção lateral e proteção de uma vez a largura da mesa do perfil;
- o deslocamento mencionado anteriormente é maior quando se observa as curvas dos pontos P4/P5. No modelo com proteção lateral, este deslocamento é ainda maior do que o presente com duas placas;
- a diferença no instante final da simulação, entre os pontos P2 dos modelos analisados é de $99^{\circ}C$, com valor máximo observado para o modelo com duas placas de $338^{\circ}C$. Em relação aos pontos P4, a diferença é de $46^{\circ}C$, com valor final para o modelo com fechamento com duas placas de $292^{\circ}C$;
- observa-se que o modelo com duas placas de gesso acartonado atingi $65^{\circ}C$ aos 7200s no ponto P6. Isso indica que o modelo com as duas placas satisfaz a um Tempo Requerido de Resistência ao Fogo superior a 120 minutos igual ao modelo com proteção no perfil (3x) do tipo caixa, em que os pontos P8 e P9 atingem $118^{\circ}C$ no momento final da simulação, atendendo aos critérios de isolamento térmico;
- considerando os pontos nas extremidades do perfil, P2, P3, P4 e P5, a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. A tabela 4.18 apresenta os resultados encontrados, juntamente com os valores máximos de temperatura.

Tabela 4.18. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.

Tempo (minutos)	Temperatura ($^{\circ}C$)			
	Modelo (2x2) Sem Isolamento		Modelo (1x1) Sem Isolamento Proteção 3X - lateral	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	41	54 (P3)	39	55 (P3)
30	65	84 (P3)	74	96 (P3)
60	184	239 (P3)	164	241 (P3)
90	259	299 (P3)	243	349 (P3)
120	312	338 (P3)	381	450 (P3)

4.3.19 Modelos com placa de gesso acartonado 1x1 com proteção perfil (1x + lateral) e com proteção no perfil (3x + lateral), sem isolamento na cavidade

A figura 4.52 representa o gráfico comparativo sobre ambas os modelos com proteção lateral, sem preenchimento da cavidade com material isolante térmico. Os itens correspondentes a estes modelos são os 4.2.7 e 4.2.8.

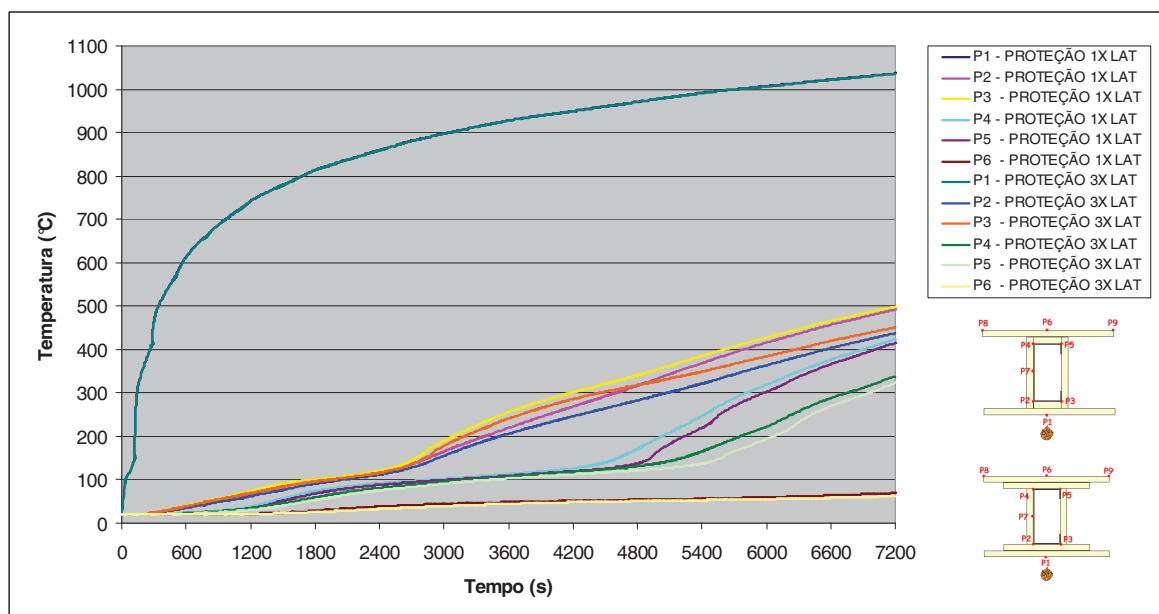


Figura 4.52. Modelos Sem isolamento com fechamento com uma placa de gesso: modelo com proteção no perfil (1x + lateral) e modelo com proteção no perfil (3x + lateral).

Assim, após analisar a figura 4.52, constata-se que:

- para o ponto P1, os valores foram similares para ambos os modelos;
- conforme também observado anteriormente nos outros comparativos, para os pontos presentes em uma mesma profundidade de parede, observa-se uma convergência para uma temperatura final (instante 7200s). As curvas de elevação de temperatura apresentam traçados similares em relação aos pontos localizados em uma mesma profundidade (P2 /P3 e P4/P5) em ambos os modelos. Há uma aproximação das curvas para os mesmos pontos entre os modelos, principalmente para os pontos P2 e P3;
- a diferença no instante final da simulação, entre os pontos P2 dos modelos analisados é de $63^{\circ}C$, com valor máximo observado para o modelo com proteção 1x de $500^{\circ}C$. Em relação aos pontos P4, a diferença é de $77^{\circ}C$, com valor final para o modelo com proteção 3x de $338^{\circ}C$;
- observa-se que o modelo com proteção no perfil (3x) aos 7200s, nos pontos P8 e P9, está com $118^{\circ}C$. Isso indica que este modelo satisfaz a um Tempo Requerido de Resistência ao Fogo superior a 120 minutos, enquanto que o modelo com proteção no perfil (1X) pode-se satisfazer a um TRRF de 110min, considerando os pontos P8 e P9 em $169^{\circ}C$ no momento final da simulação e $160^{\circ}C$ aos 7051s, atendendo aos critérios de isolamento térmico;
- considerando os pontos nas extremidades do perfil, P2, P3, P4 e P5, a temperatura média no retículo metálico foi calculada considerando uma ponderação em função da área de localização e contribuição de cada ponto. A tabela 4.19 apresenta os resultados encontrados, juntamente com os valores máximos de temperatura.

Tabela 4.19. Temperaturas no Perfil considerando os pontos P2, P3, P4 e P5.

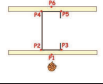
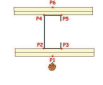
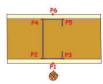
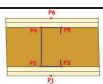
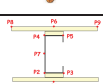

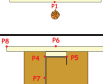
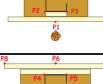
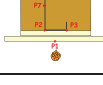
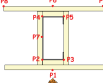
Tempo (minutos)	Temperatura ($^{\circ}C$)			
	Modelo (1x1) Sem Isolamento Proteção 1X - lateral		Modelo (1x1) Sem Isolamento Proteção 3X - lateral	
	Média	Máxima	Média	Máxima
15	40	56 (P3)	39	55 (P3)
30	85	100 (P3)	74	96 (P3)
60	174	255 (P3)	164	241 (P3)
90	305	385 (P3)	243	349 (P3)
120	448	499 (P3)	381	450 (P3)

4.4 Observações e conclusões sobre os modelos desenvolvidos

Com base nos modelos numéricos estudados concluí-se que:

- os valores obtidos dos modelos desenvolvidos foram satisfatórios com base nos modelos já validados no capítulo anterior, pois, apresentaram comportamentos idênticos aos registrados nos modelos anteriores;
- as placas de gesso condicionam ótima proteção ou isolamento térmico, uma vez que quando houve o acréscimo de mais uma placa no modelo, a elevação de temperatura ao longo da seção da parede teve uma redução significativa, satisfazendo tempos requeridos de resistência ao fogo, TRRF, superiores a 120 minutos;
- a adoção de diferentes configurações de proteção para o perfil também proporcionam uma redução da temperatura ao longo da parede estudada, contribuindo para que o TRRF possa ser superior a 120 minutos;
- é evidenciado novamente que a umidade da placa de gesso proporciona um retardo do aquecimento da parede. A elevação brusca da temperatura após a evaporação da umidade pode ser constatada nos gráficos apresentados;
- a tabela 4.20 apresenta o resumo de alguns resultados encontrados para os modelos simulados neste capítulo.

Tabela 4.20. Resumo dos resultados encontrados nos modelos submetidos ao incêndio padrão.

Modelo	Item	Tempo de isolamento térmico (min)	Temperatura média no perfil (P2, P3, P4 e P5) em °C										Tempo de resistência* (min)		
			15 min		30 min		60 min		90 min		120 min				
			Méd	Máx	Méd	Máx	Méd	Máx	Méd	Máx	Méd	Máx	Méd	Máx	
	1x1 (sem isolamento)	3.4.1	90	80	113	238	307	384	422	474	498	516	541	30	30
	2x2 (sem isolamento)	4.2.1	120	41	54	65	84	184	239	259	299	312	338	120	120
	1x1 (com isolamento)	3.4.2	120	97	171	286	509	447	738	526	854	583	920	30	15
	2x2 (com isolamento)	4.2.2	120	46	70	71	105	256	437	398	655	472	752	60	30
	1x1 (sem isolamento) – proteção 1X	4.2.3	110	50	59	132	143	317	331	416	422	473	482	60	60
	1x1 (sem isolamento) – proteção 3X	4.2.4	120	34	55	97	102	232	272	329	350	391	410	90	90
	1x1 (com isolamento) – proteção 1X	4.2.5	90	42	62	80	113	280	455	407	630	503	728	60	30
	1x1 (com isolamento) – proteção 3X	4.2.6	90	43	64	70	101	257	430	397	648	478	742	60	30
	1x1 (sem isolamento) – proteção 1X – Lateral (tipo caixa)	4.2.7	110	40	56	85	100	174	255	305	385	448	499	90	60
	1x1 (sem isolamento) – proteção 3X – Lateral (tipo caixa)	4.2.8	120	39	55	74	96	164	241	243	349	381	450	90	90

Nota: *Tempo de resistência estrutural do perfil considerando uma temperatura crítica de 350 °C, EN 1993-1-2:2005. OBS: simulações efetuadas até 7200 segundos (120 minutos).

Sobre a tabela 4.20 pode-se concluir que:

- todos os modelos desenvolvidos satisfazem a um TRRF de no mínimo de 90 minutos em relação ao isolamento térmico. Em relação à resistência estrutural do perfil, todos os modelos satisfazem a um TRRF de no mínimo 30 minutos, considerando a temperatura média e 15 minutos para a máxima temperatura;

- a maior temperatura média encontrada no perfil foi para o modelo com apenas uma placa em cada lado e preenchimento da cavidade com lã de rocha, com valor de $583^{\circ}C$. A maior temperatura máxima foi de $920^{\circ}C$ e ocorre para o mesmo modelo;

- comparando os modelos com uma e duas placas de gesso, sem isolamento interno, o acréscimo da segunda placa faz com que as temperaturas médias no perfil decresçam no mínimo 40%;

- a presença do isolamento interno proporciona maiores valores médios e máximos de temperatura no perfil. Observa-se que o isolamento na cavidade melhora o isolamento térmico da parede, porém, aumenta as temperaturas no perfil, em comparação com os modelos sem isolamento e mesma configuração de fechamento (mesmo número de placas de gesso);

- nos modelos com proteção no perfil (1x e 3x, sem proteção lateral), os valores de temperatura na face não exposta ao incêndio, no tempo de 7200s, são superiores nos modelos com isolamento, quando comparados com os modelos sem isolamento. Deduz-se que a presença de um espaço vazio na cavidade nos modelos com isolamento em função da existência de apenas um trecho de lã de rocha (por não possuir um preenchimento completo da cavidade – ver modelos 4.2.5 e 4.2.6), proporciona transferência de calor por radiação, processo mais eficiente do que a condução no material isolante;

- em relação aos modelos de configuração de paredes com função estrutural apresentados por PATH (2004), ver tabela 2.9, por utilizar placas de gesso tipo *standard* (sem resistência ao fogo), o valor recomendado para o TRRF para o modelo com uma placa de gesso, sem presença de isolamento na cavidade, GA WP1206, é de 60min, enquanto que o constatado numericamente, para o modelo similar (item 3.4.1), porém, com propriedades térmicas para placa resistente ao fogo foi de 90 min (para isolamento térmico). Considerando para este modelo o tempo de resistência estrutural do perfil, o valor seria de 30 min, inferior aos 60 min do modelo GA WP1206. O modelo com duas

placas de gesso sem isolamento, GA WP1714, possui um TRRF de 120min, igual ao modelo estudado no item 4.2.1. (atendendo critérios de tempo mínimo de isolamento térmico e de resistência estrutural do perfil). Observa-se também que o modelo com duas placas e isolamento na cavidade, UL425 apresenta TRRF de 120 min igual ao tempo de isolamento térmico do modelo analisado no item 4.2.2., porém, com tempo de resistência estrutural do perfil de apenas 30min. Conclui-se que os modelos numéricos, mesmo com propriedades térmicas de placas com resistência ao fogo, estão dentro do recomendado pela associação norte americana (citada no item 2.5.2.6), em relação ao isolamento térmico. Sobre o tempo de resistência estrutural do perfil, os valores simulados estão abaixo do recomendado, exceção do modelo com duas placas de gesso sem isolamento na cavidade (item 4.2.1);

- em relação ao trabalho de NADER (2002), ver item 2.5.2.3, usando como base o quadro da tabela 2.5, com recomendações européias para paredes, duas placas de gesso resistentes ao fogo, com 12,5 mm de espessura proporcionam um TRRF de 90 min, valor inferior, porém, próximo do encontrado no modelo analisado no item 4.2.1. (120min para isolamento térmico e para resistência estrutural do perfil, valores superiores ao recomendado pela norma européia). Já em relação ao tempo de resistência ao fogo indicado para as configurações da tabela 2.8, referente a exigências dos Estados Unidos, uma configuração com duas placas resistentes ao fogo (WP1716), sem isolamento, satisfazem a um TRRF de 120 min, igual ao modelo proposto neste trabalho. Para a configuração U423, com duas placas comuns e isolamento na cavidade, porém com espessura de 16 mm, também se verifica o mesmo TRRF (atendo condições de isolamento térmico do painel e resistência estrutural do perfil) encontrado para o modelo analisado no item 4.2.2, de 120 min. De forma geral, os comportamentos foram similares aos resultados, em função das configurações semelhantes. Algumas configurações sugeridas na Austrália e no Canadá apresentam TRRF menores, porém, sabe-se que em função do tipo de material empregado, do tipo de gesso adotado, podem alterar os valores finais para proteção e resistência térmica da placa;

- para a temperatura máxima no perfil, com base no estabelecido no EN 1993-1-2:2005 (ver nota da tabela 4.20), os modelos propostos com proteção no perfil com extensão de

três vezes a largura de suas mesas, com e sem fechamento lateral (proteção caixa) e sem isolamento na cavidade, proporcionam temperaturas inferiores aos $350^{\circ}C$, aos 90 minutos de simulação. O modelo com apenas uma placa sem proteção e sem isolamento térmico na cavidade, só atende ao recomendado pela norma européia para um tempo inferior a 30 minutos, conforme pode ser verificado na tabela 4.20.

5

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA PAREDE LSF EXPOSTA AO INCÊNDIO NATURAL

5.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo o estudo da elevação da temperatura em quatro modelos apresentados anteriormente quando expostos a um incêndio natural, o qual se diferencia do incêndio padrão por apresentar uma fase ascendente para a etapa de aquecimento e outra descendente para a etapa de resfriamento.

Os modelos adotados são os com uma e duas placas em cada lado, variações com e sem isolamento, todos sem proteção para o perfil. Os mesmos foram escolhidos para fins de simulação em situação de incêndio natural por serem usualmente utilizados nas edificações residenciais.

A geometria do compartimento, grau de ventilação, as propriedades térmicas dos materiais de fechamento e a carga incêndio existente influenciam nas temperaturas dos gases no incêndio. O programa computacional OZONE (CADORIN, 2003) foi utilizado para modelar parte de um compartimento padrão de uma unidade habitacional popular: um quarto com uma janela e uma porta abertas. Assim, os modelos numéricos desenvolvidos no programa computacional ABAQUS (SIMULIA CORP., 2007) foram expostos a variação de temperatura dos gases obtida no *software* OZONE.

5.2 Modelagem do compartimento estudado

Visando representar um cômodo padrão de uma unidade habitacional popular (figura 5.1), foi adotada a geometria de um dormitório, extraída e adaptada do trabalho desenvolvido por BONITESE (2007), no qual a autora realizou a simulação numérica de um edifício residencial popular em situação de incêndio.



Figura 5.1. *Layout* de um apartamento padrão popular com dois quartos, adaptado de BONITESE (2007).

Para modelagem de parte de um compartimento e realização da simulação do mesmo visando obter a curva de temperatura em função do tempo dos gases para o incêndio natural, utilizou-se o programa computacional OZONE (CADORIN, 2003).

O quarto modelado apresenta as seguintes dimensões: pé direito com 2,80m, comprimento de 3,65m e largura de 3,25m. Para o acesso e a ventilação do compartimento, considerou-se uma porta com 2,10m de altura e 0,80m de largura e uma janela com 1,00m de altura e 1,40m de largura, com sua base localizada a 1,50m de altura em relação ao piso.

Os materiais definidos para fechamento do compartimento foram os seguintes:

- concreto normal (EN 1994-1-2:2004) com espessura de 10 cm para laje e piso, com densidade de 2300 Kg/m³, condutividade térmica de 1,6 W/m°C, calor específico de 1000 J/Kg°C e valores de emissividade de 0,8 para as superfícies;

- tijolo normal com espessura de 15 cm para as paredes de fechamento lateral do cômodo, densidade de 1600 Kg/m³, condutividade térmica de 0,7 W/m°C, calor específico de 840 J/Kg°C e valores de emissividade de 0,8 para as superfícies.

As propriedades do incêndio, em relação à carga incêndio, à existência ou não de sistemas automáticos de combate ao fogo, ao comportamento do material combustível, à área do compartimento, ao risco de se iniciar um incêndio, dentre outras, foram adotadas conforme consta no EN 1994-1-2:2004 em seu anexo E.

O programa computacional OZONE (CADORIN, 2003) permite que sejam configuradas as propriedades do incêndio pelo usuário ou em função do tipo de ocupação, seguindo o previsto na norma européia citada anteriormente.

Foram então adotadas as seguintes propriedades conforme EN 1991-1-2:2002: ocupação residencial, com taxa de liberação de calor de 250 KW/m², carga incêndio de 948 MJ/m² e fator de ativação do incêndio igual a 1.

O valor de cálculo da carga de incêndio considera a existência na edificação de rotas de fuga seguras, presença de Corpo de Bombeiros e dispositivos de combate a incêndio, no caso extintores.

A curva para o incêndio natural gerada é a representada na figura 5.2.

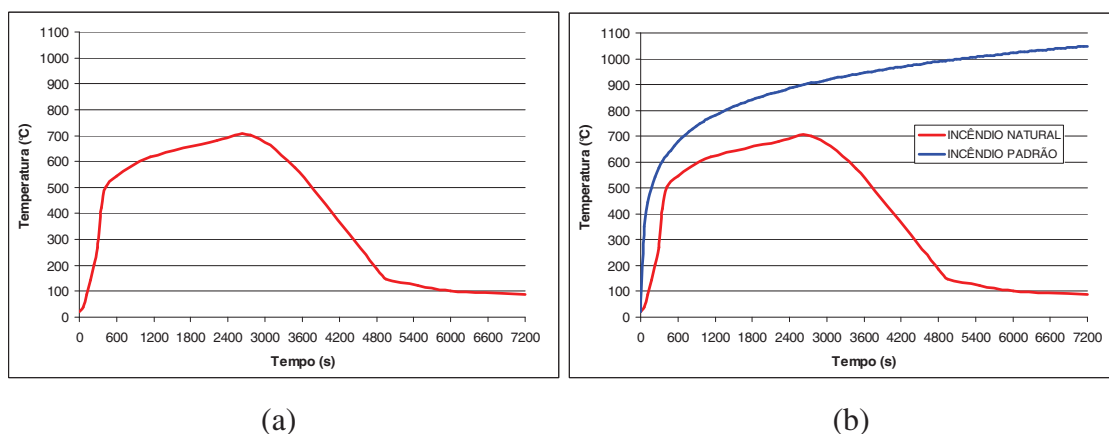


Figura 5.2. Curvas incêndio: (a) Curva do incêndio natural para a temperatura dos gases em função do tempo, utilizada para o compartimento simulado; (b) comparativo entre as curvas do incêndio natural e padrão.

Na curva da figura 5.2a pode-se constatar as fases de aquecimento e de resfriamento presentes no incêndio natural. Observa-se que a temperatura máxima atingida foi de 701°C no instante 2760s. Na figura 5.2b está o gráfico comparativo da curva do incêndio natural adotada com a curva do incêndio padrão utilizada nos modelos do capítulo anterior.

5.3 Modelos numéricos expostos ao incêndio natural

Os modelos utilizados nas simulações para o incêndio natural foram os seguintes:

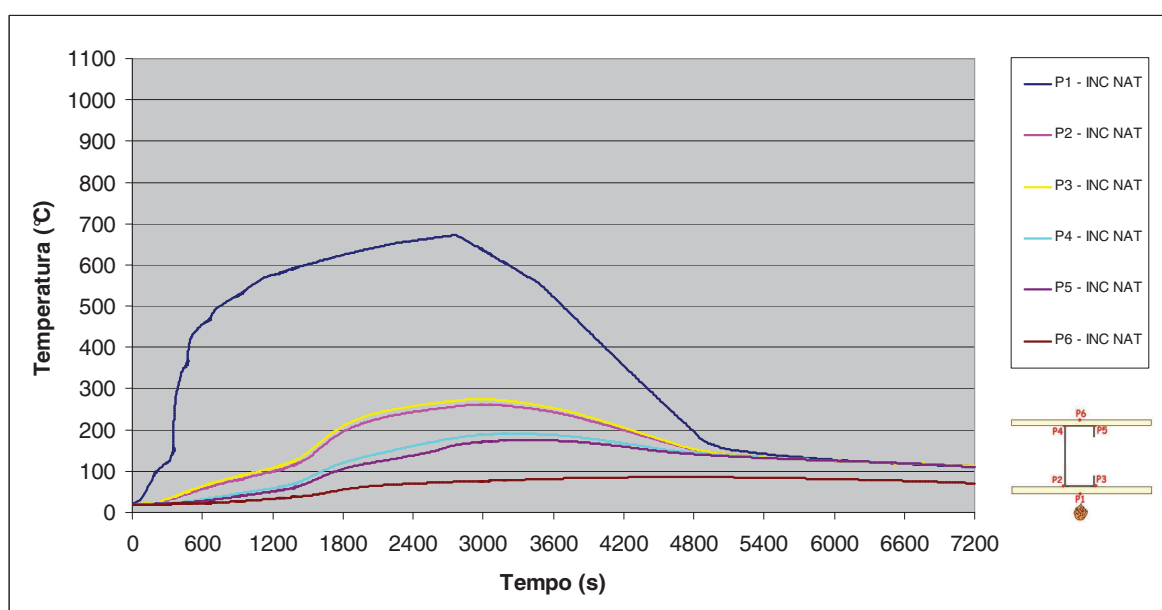
- **Modelo 1x1 sem isolamento na cavidade:** uma placa de gesso em cada lado sem proteção térmica no interior da parede;
- **Modelo 1x1 com isolamento na cavidade:** uma placa de gesso em cada lado com proteção térmica no interior da parede por lã de rocha;
- **Modelo 2x2 sem isolamento na cavidade:** duas placas de gesso em cada lado sem proteção térmica no interior da parede;
- **Modelo 2x2 com isolamento na cavidade:** duas placas de gesso em cada lado com proteção térmica no interior da parede por lã de rocha;

Os materiais utilizados e suas propriedades térmicas são as mesmas dos modelos analisados nos capítulos 03 e 04. A diferença ocorre nos fluxos devido à convecção e

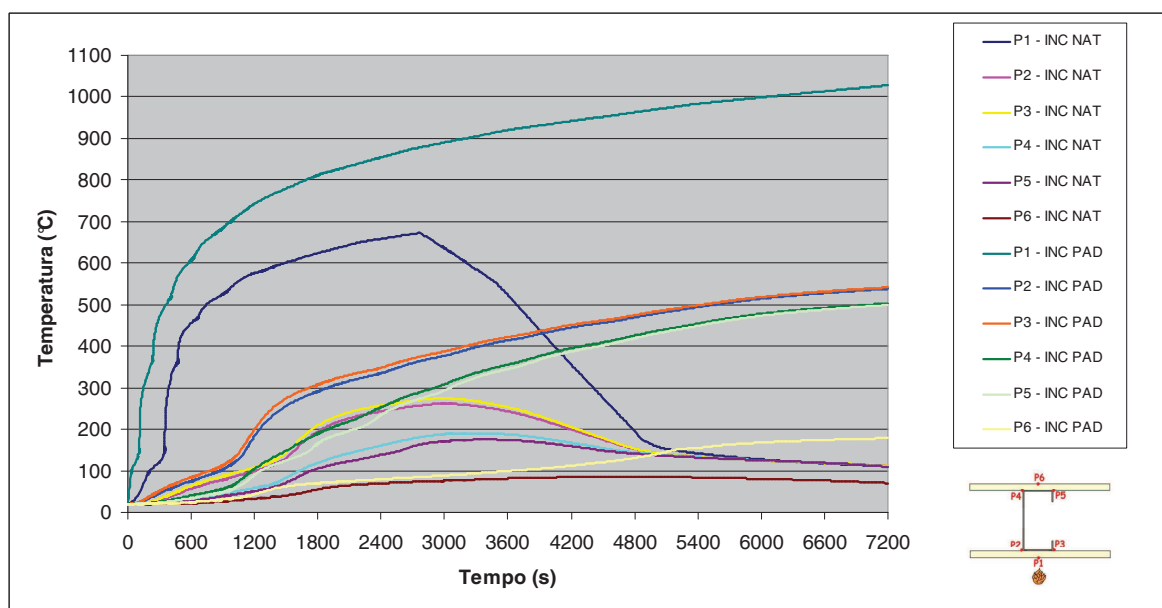
radiação na face exposta ao incêndio natural. A relação temperatura dos gases em função do tempo, figura 5.2a é utilizada como dado de entrada no programa ABAQUS (SIMULIA CORP., 2007).

5.3.1 Modelo 1x1 sem isolamento na cavidade

A figura 5.3 apresenta os resultados obtidos na simulação do modelo. Na figura 5.3a têm-se os resultados do modelo imposto ao incêndio natural. Na figura 5.3b os resultados da exposição ao incêndio natural e padrão são confrontados.



(a)



(b)

Figura 5.3. Gráfico da variação da temperatura em função do tempo: (a) incêndio natural (b) comparativo entre incêndio padrão e natural.

Da ilustração 5.3 para o modelo sem isolamento observa-se que:

- notam-se as fases de aquecimento e resfriamento presentes, conforme já era esperado;
- para o ponto P1, localizado na face da placa de gesso exposta ao incêndio, os valores encontrados foram inferiores aos do modelo exposto ao incêndio padrão. A temperatura máxima foi de $672^{\circ}C$ aos 2750s;
- os pontos P2/P3 e P4/P5 apresentaram resultados próximos, o que é similar a que foi constatado nos modelos desenvolvidos anteriormente para placa de gesso sem isolamento no caso para o incêndio padrão, com convergência de temperatura final para os pontos localizados em uma mesma profundidade de parede;
- os valores de temperatura para os pontos P1, P2, P3, P4 e P5 ficaram bem próximos a partir do instante 5200s, com variações máximas de $12^{\circ}C$ entre P1 e os demais pontos, porém, no término da simulação, aos 7200s, a temperatura final foi praticamente a mesma, de $110^{\circ}C$, com variação de $2^{\circ}C$ para mais em P1 ($112^{\circ}C$), que está próximo da temperatura dos gases no compartimento conforme pode ser observado na figura 5.2;

- o ponto P6 teve valor máximo de apenas 87°C próximo do instante 4700s, chegando ao momento final da simulação com 70°C . Considerando uma temperatura ambiente inicial de 20°C e que o incremento de temperatura para fins de isolamento térmico deve ser inferior a 140°C , totalizando 160°C , na média dos pontos da medida, conforme ABNT NBR 14.323:1999, a configuração utilizada nos modelos está satisfazendo o critério de isolamento térmico. Em relação à exposição ao incêndio padrão, o TRRF seria de 90min;

- para os pontos nas extremidades do perfil Ue (P2, P3, P4 e P5), aos 7200s, a temperatura média alcançada é de 108°C . A média das temperaturas máximas alcançadas nos pontos citados do perfil é de 225°C , no modelo exposto ao incêndio padrão à maior média encontrada foi de 516°C no final da simulação.

A figura 5.4 apresenta a distribuição de temperatura no instante final da simulação.

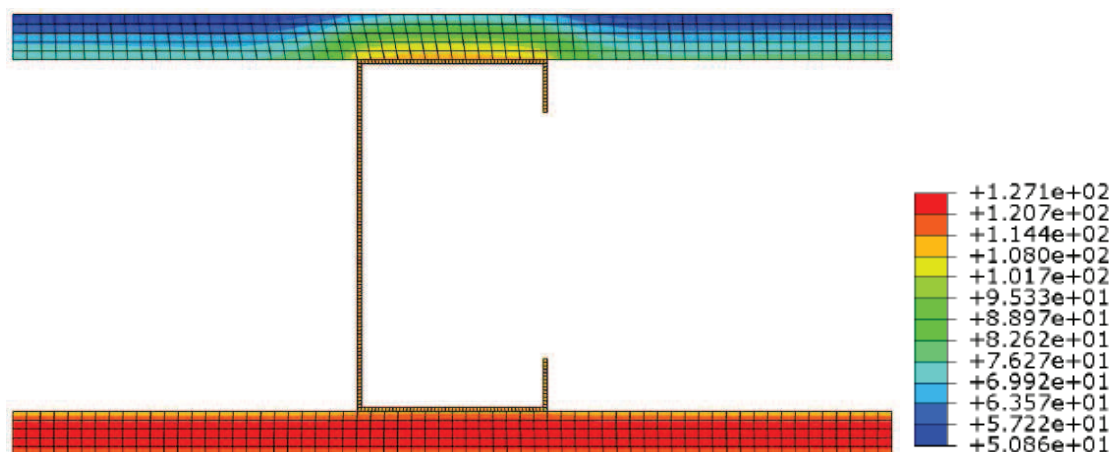


Figura 5.4. Temperatura em $^{\circ}\text{C}$ no instante 7200 segundos para o modelo sem isolamento exposto a um incêndio natural.

Na próxima ilustração, figura 5.5, há a exibição da variação da temperatura ao longo da seção da parede no decorrer da simulação, do instante 0 até 7200 segundos.

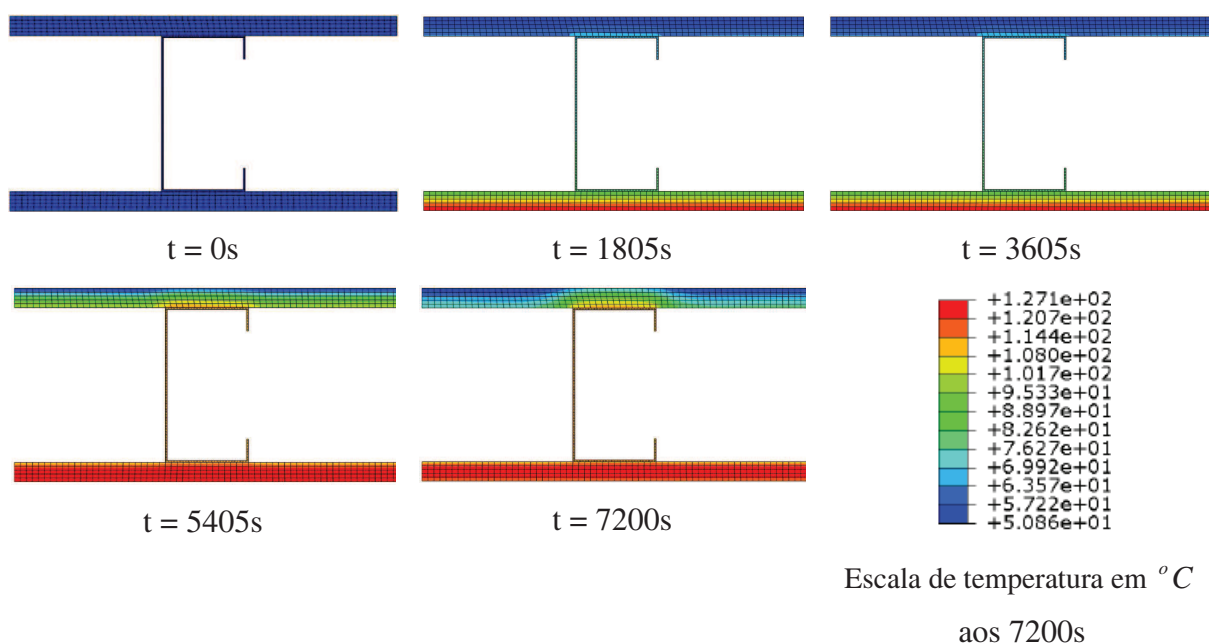
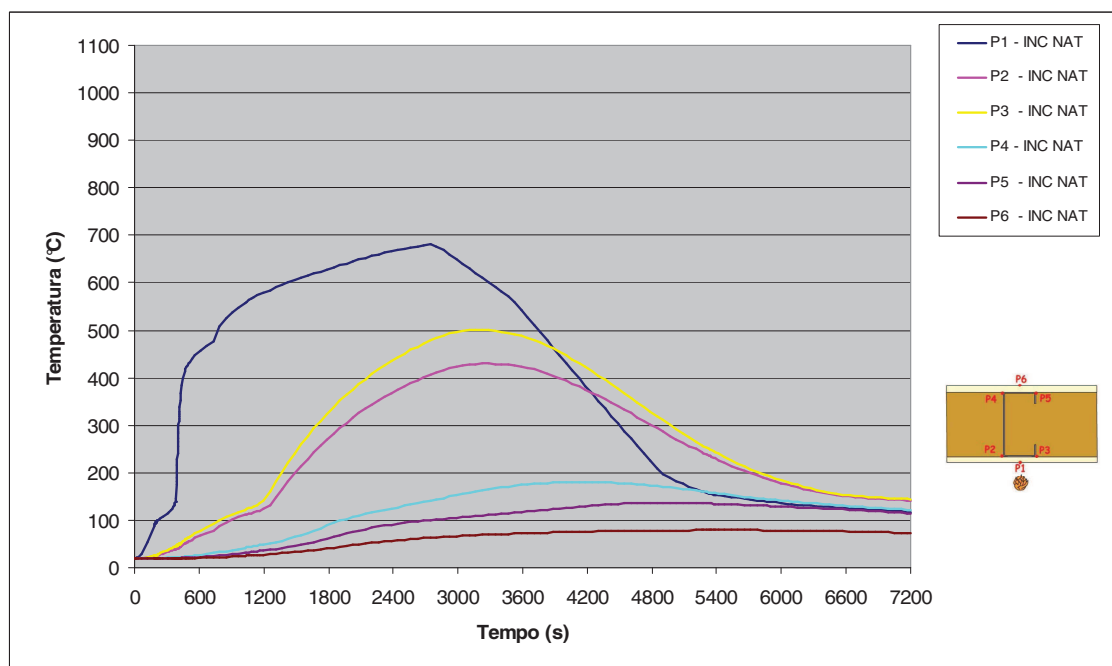


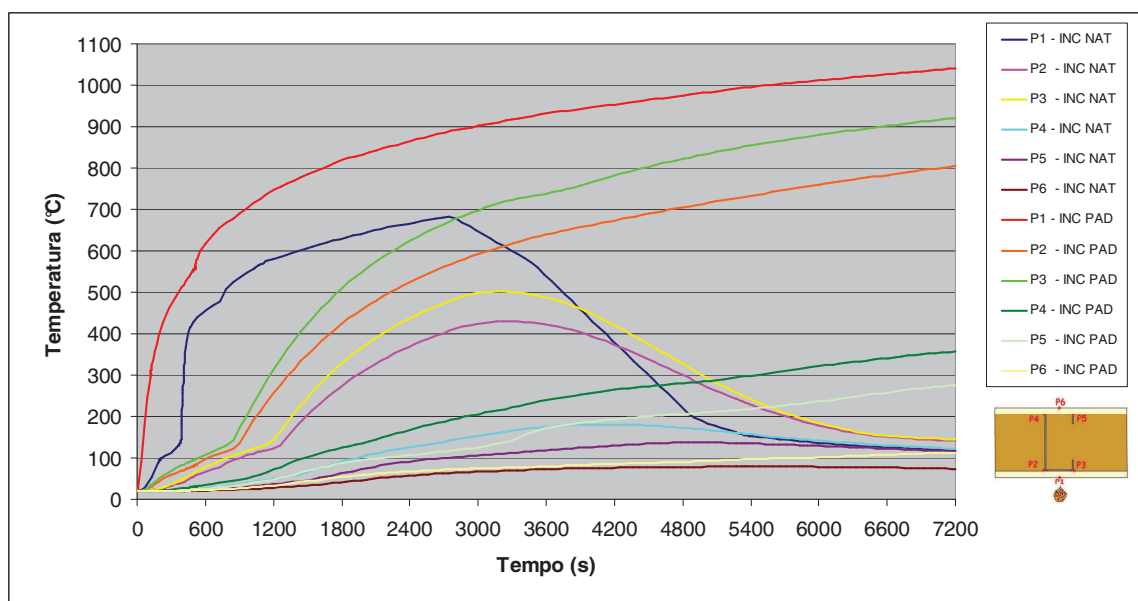
Figura 5.5. Variação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.

5.3.2 Modelo 1x1 com isolamento na cavidade

Na figura 5.6 estão representadas as curvas com a variação da temperatura em função do tempo para os pontos de monitoramento determinados anteriormente para o modelo exposto ao incêndio natural.



(a)



(b)

Figura 5.6. Gráfico da variação da temperatura em função do tempo: (a) incêndio natural (b) comparativo entre incêndio padrão e natural.

Após análise da figura 5.6 para o modelo com isolamento constata-se que:

- observam-se as fases de aquecimento e resfriamento presentes nas curvas dos pontos P1 a P5. Enquanto que no modelo que considera o incêndio padrão apenas a fase de aquecimento é visualizada, com elevação constante da temperatura;

- para o ponto P1, a temperatura máxima no presente modelo foi de 681°C aos 2744s;

- os pontos P2, P3, P4 e P5 apresentaram comportamentos finais de curva diferentes aos constatados nos modelos desenvolvidos anteriormente para placa de gesso com isolamento (exposto ao incêndio padrão), com convergência de temperatura final igual para os pontos localizados em uma mesma profundidade, porém, entre os tempos de 1200s a 6000s, elas apresentam diferenças como observado nos modelos anteriores analisados nos itens 3.4.2 e 4.2.2;

- as temperaturas finais dos pontos P2 e P3 chegam ao término da simulação com valores superiores aos do ponto P1. Valores de 141°C e 144°C para P2 e P3 respectivamente, enquanto P1 atinge 117°C . Isto ilustra a ação do isolante térmico

como mal condutor de calor, apresentando valores de temperatura no interior da cavidade superiores ao ponto externo da placa de gesso exposta inicialmente ao fogo e no final a uma temperatura inferior, retirando calor da parede;

- a variação máxima de temperatura entre os pontos em uma mesma profundidade, P2/P3 e P4/P5 é inferior a 35°C ao término da simulação, mas ao longo da simulação, próximo dos 3000s, a diferença entre P2 e P3 chegou a 73°C e a 56°C entre P4 e P5;

- o ponto P6 teve valor máximo de 79°C próximo do instante 5470s, chegando ao momento final da simulação com 73°C , satisfazendo ao critério de isolamento térmico conforme preconiza a norma ABNT NBR 14.323:1999;

- para os pontos P2, P3, P4 e P5 situados nas extremidades do perfil no instante final, aos 7200s, apresentam temperatura média de 130°C . A média das temperaturas máximas alcançadas nos pontos citados no perfil foi de 312°C . No modelo exposto ao incêndio padrão a máxima atingida foi de 583°C aos 7200s;

A figura 5.7 representa a distribuição de temperatura no instante final da simulação, onde nela observam-se maiores valores de temperatura na cavidade do perfil. Constatase que o perfil metálico, por apresentar maior condutividade térmica do que o isolamento favorece a condução do calor no interior da cavidade preenchida com lã de rocha.

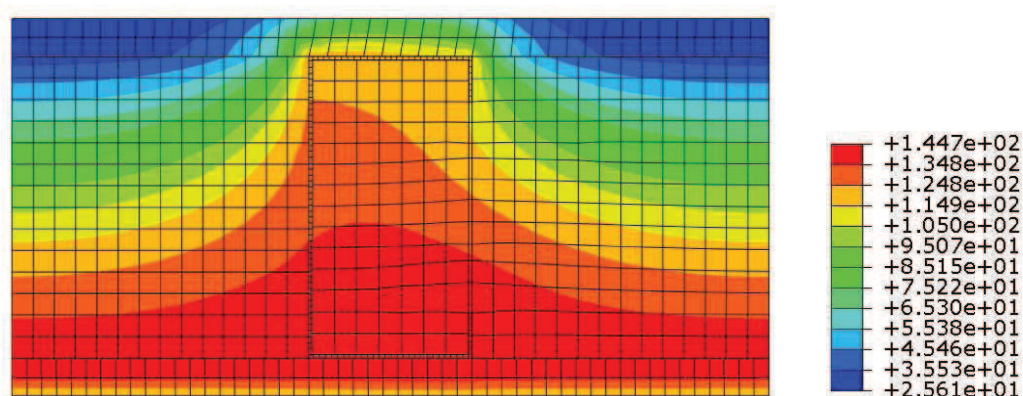


Figura 5.7. Temperatura em $^{\circ}\text{C}$ no instante 7200 segundos para o modelo com isolamento.

Na figura 5.8 apresenta-se a variação da temperatura ao longo da seção da parede no decorrer da simulação, para o tempo total de 7200 segundos. Observa-se que com a presença do isolamento na cavidade, os valores de temperatura neste local no final do experimento são superiores a da placa de gesso do lado da parede exposta ao incêndio. Por apresentar baixa condutividade térmica, a lã de rocha necessita de um maior período de tempo para perder calor e resfriar.

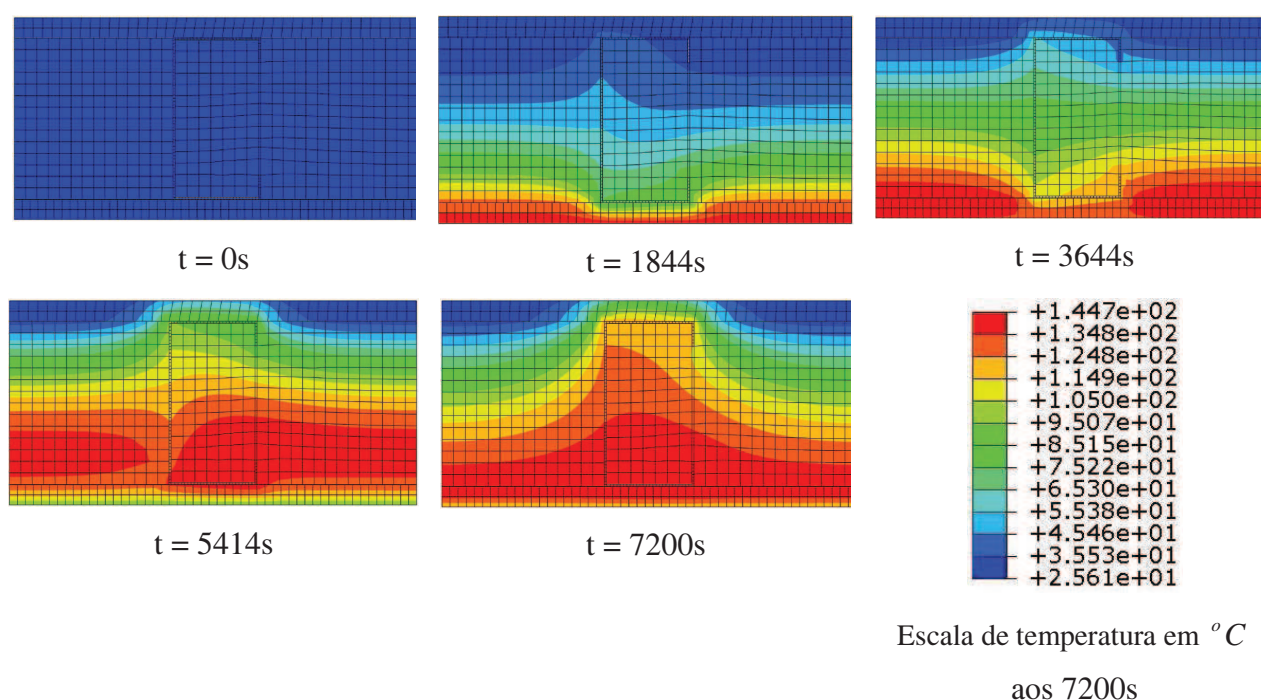
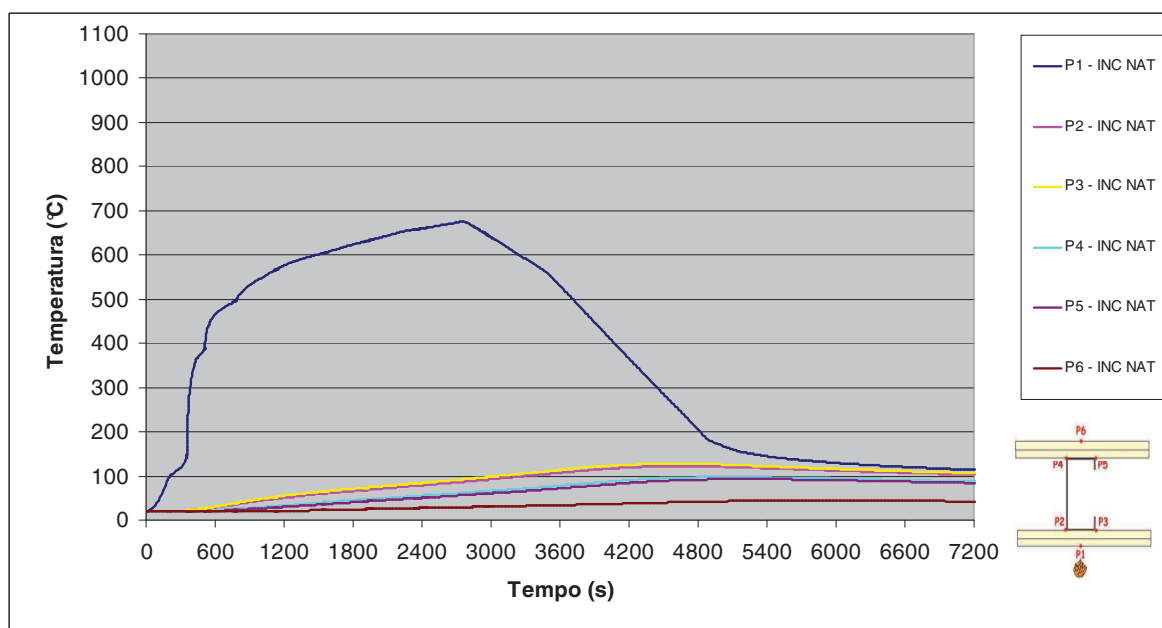


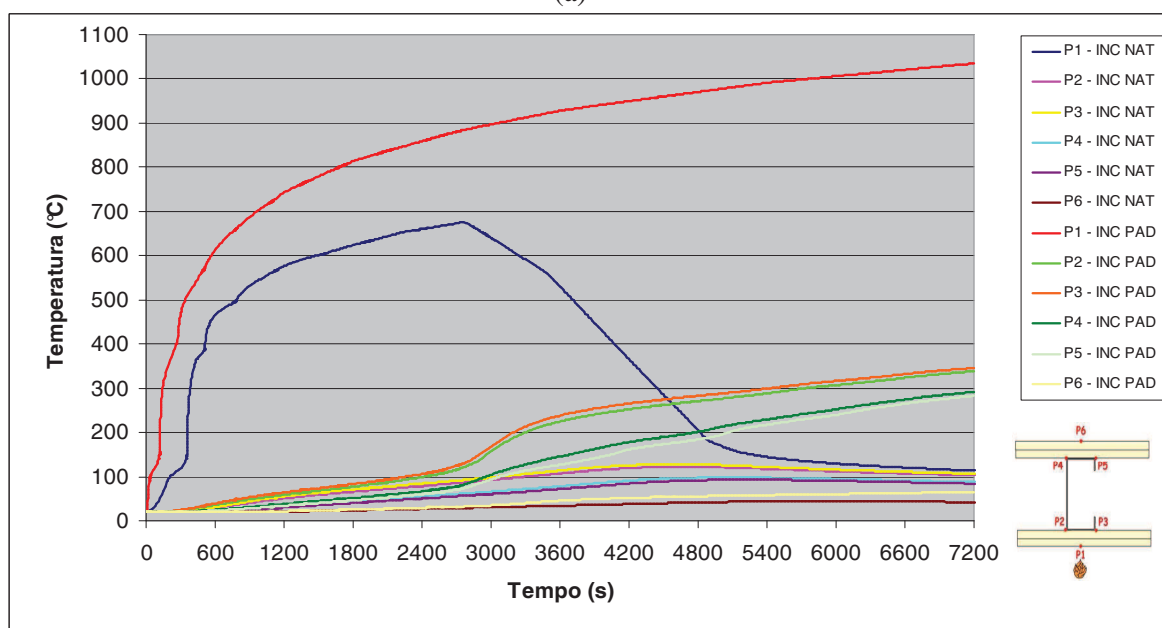
Figura 5.8. Variação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.

5.3.3 Modelo 2x2 sem isolamento na cavidade

Na figura 5.9 estão ilustrados os resultados encontrados da simulação para a modelo exposto ao incêndio natural.



(a)



(b)

Figura 5.9. Gráfico da variação da temperatura em função do tempo: (a) incêndio natural (b) comparativo entre incêndio natural e padrão.

Da figura 5.9 para o modelo sem isolamento e duas placas de gesso constata-se que:

- conforme já esperado, notam-se as fases de aquecimento e resfriamento presentes;

- para o ponto P1 os valores encontrados foram inferiores aos encontrados nos modelos expostos ao incêndio padrão. A temperatura máxima no presente modelo foi de $675^{\circ}C$ por volta dos 2746s;

- também foi observado, repetindo o relatado no item 5.3.1, que os pontos P2, P3, P4 e P5 apresentaram comportamentos de curva similares aos constatados nos modelos desenvolvidos para placa de gesso sem isolamento anteriormente (exposto ao incêndio padrão), com convergência de valor de temperatura final para os pontos localizados em uma mesma profundidade de parede. Ao longo da simulação, a variação máxima entre P2 e P3 foi de $6^{\circ}C$, mesmo valor encontrado para a diferença máxima de P4 e P5;

- observa-se que as curvas dos pontos P2/P3 e P4/P5 não apresentaram uma ascensão similar a constatada nas figuras para os modelos sem isolamento. Concluí-se que a mesma não ocorreu, pois a temperatura não ultrapassou os $125^{\circ}C$ e conseqüentemente a umidade presente nas placas de gesso não foi totalmente transformada em vapor. Quando a temperatura atingiu valores superiores aos $100^{\circ}C$ nesses pontos, o incêndio já estava em fase de resfriamento (curva P1) contribuindo para que o fenômeno observado nos modelos com curva de incêndio padrão não acontecesse;

- o ponto P6 teve valor máximo de $44^{\circ}C$ permanecendo abaixo dos $50^{\circ}C$ no decorrer de toda a simulação, satisfazendo ao critério de isolamento térmico conforme preconiza a norma ABNT NBR 14.323:1999;

- os pontos situados nas extremidades do perfil no instante final, aos 7200s, apresentam temperatura média de $95^{\circ}C$. Em relação à média das máximas temperaturas alcançadas nos pontos P2, P3, P4 e P5, localizados no perfil, o valor encontrado foi de $110^{\circ}C$. Para este mesmo modelo exposto ao incêndio padrão a média da temperatura alcançada para o perfil foi de 312 aos 7200s.

A figura 5.10 apresenta a distribuição de temperatura no instante final da simulação.

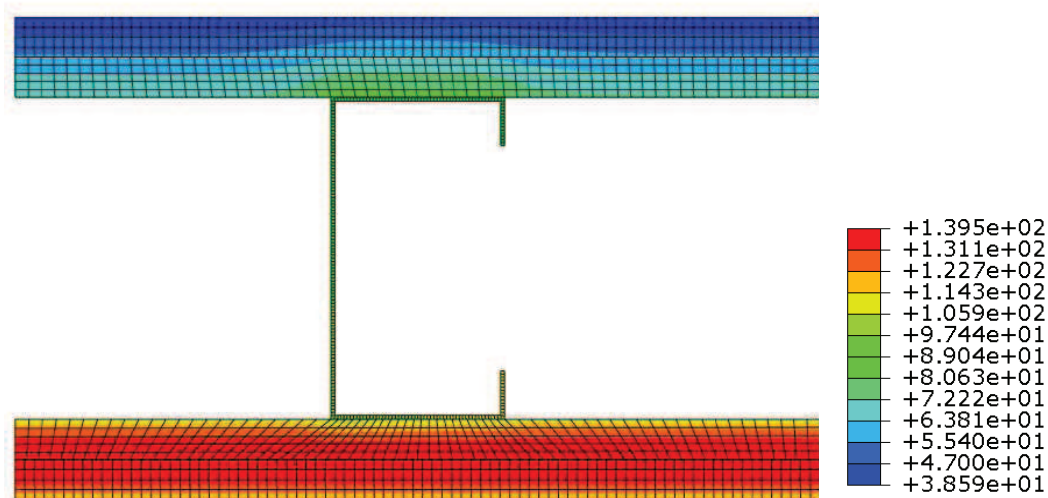


Figura 5.10. Temperatura em °C no instante 7200 segundos para o modelo sem isolamento.

A seguir, na figura 5.11 está a ilustração da variação da temperatura ao longo da seção da parede no decorrer da simulação, do instante 0 até 7200 segundos.

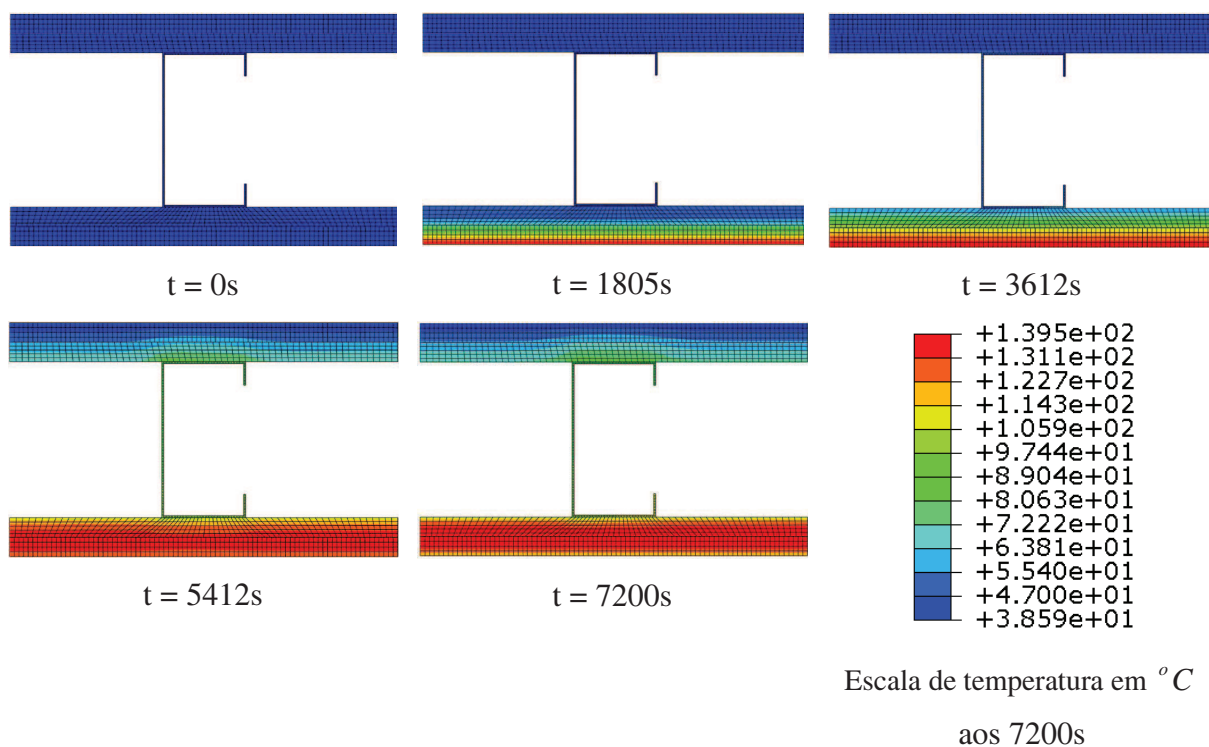
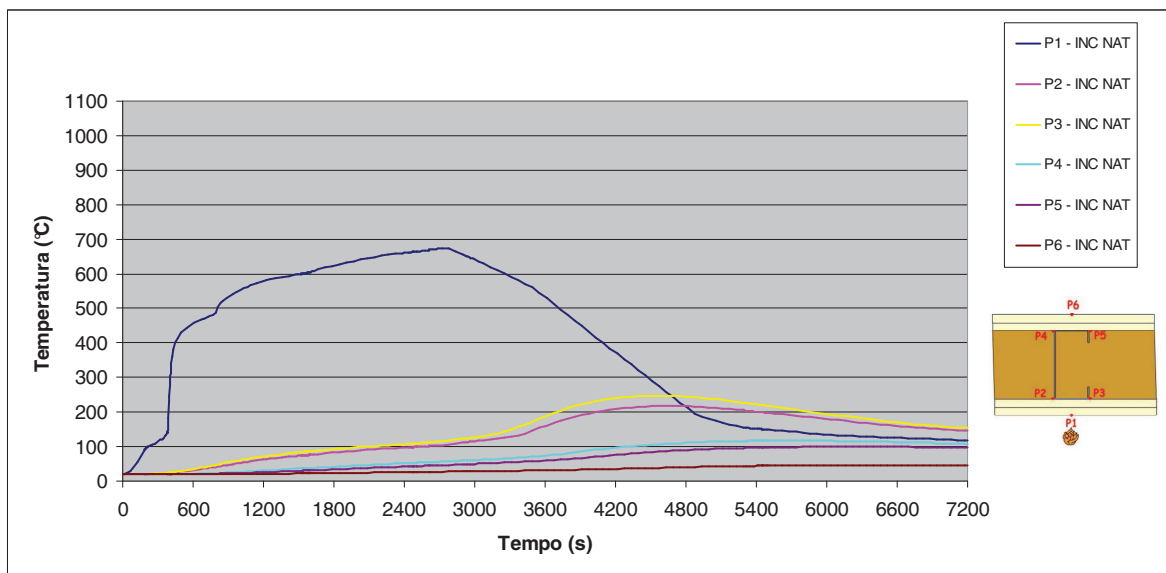


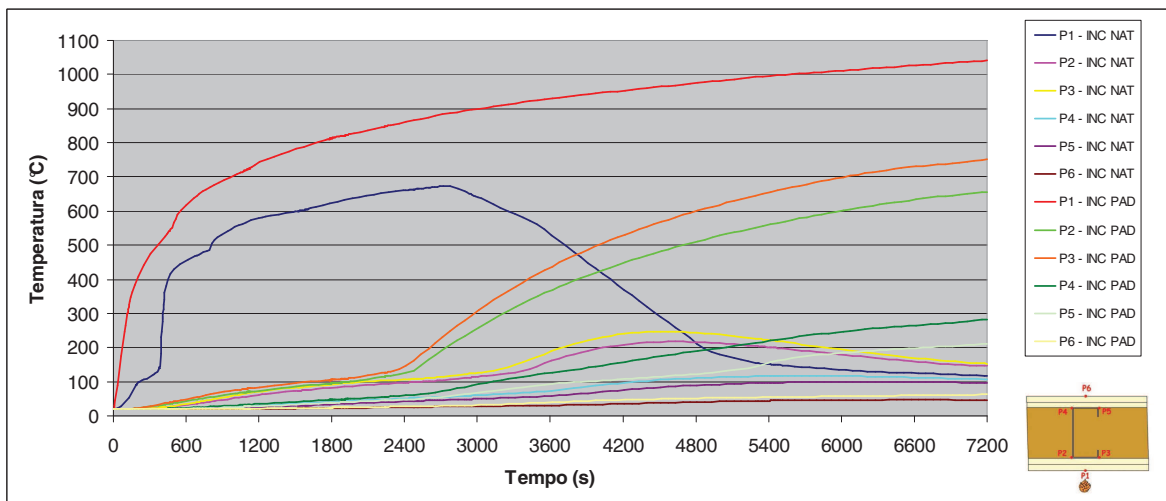
Figura 5.11. Variação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.

5.3.4 Modelo 2x2 com isolamento na cavidade

A figura 5.12 representada às curvas com a variação da temperatura em função do tempo para os pontos de monitorados.



(a)



(b)

Figura 5.12. Gráfico da variação da temperatura em função do tempo: (a) incêndio natural (b) comparativo entre incêndio natural e padrão.

Da figura 5.12 observa-se que:

- conforme esperado, percebe-se que as fases de aquecimento e resfriamento estão presentes nas curvas dos pontos P1 a P5;

- para o ponto P1, a temperatura máxima no presente modelo foi de $673^{\circ}C$ aos 2778s;

- repetindo o observado na figura 5.8, os pontos P2, P3, P4 e P5 apresentaram traçados finais de curva diferentes aos constatados nos modelos desenvolvidos anteriormente para placa de gesso com isolamento exposta ao incêndio padrão, com convergência de temperatura final igual para os pontos situados em uma mesma profundidade;

- novamente se constata que as temperaturas finais dos pontos P2 e P3 chegam ao término da simulação com valores superiores ao do ponto P1. Valores de 146 e $153^{\circ}C$ para P2 e P3 respectivamente, enquanto P1 atinge $117^{\circ}C$. Ao longo da simulação, próximo dos 2700s, as diferenças entre os pontos P1 e P2; P1 e P3 chegam a valores de $560^{\circ}C$. P2 e P3 possuem maiores valores de temperatura após os 4750s, indicando que a face externa exposta ao incêndio está se resfriando;

- a variação máxima de temperatura entre os pontos localizados em uma mesma profundidade de parede (P2/P3 e P4/P5) é inferior a $50^{\circ}C$ no instante 7200s;

- o ponto P6 teve valor máximo de apenas $47^{\circ}C$ próximo do instante 6396s, chegando ao final da simulação com $46^{\circ}C$, satisfazendo ao critério de isolamento térmico, conforme ABNT NBR 14.323:1999;

- para os pontos nas extremidades do perfil Ue (P2, P3, P4 e P5), aos 7200s, a temperatura média alcançada é de $125^{\circ}C$. A média atingida ao longo da simulação, considerando os máximos valores de temperatura de cada ponto do perfil foi de $170^{\circ}C$. Já a temperatura máxima entre eles foi de $246^{\circ}C$ aos 4600s no ponto P3;

A seguir na ilustração 5.13 está a representação da distribuição de temperatura no instante final da simulação.

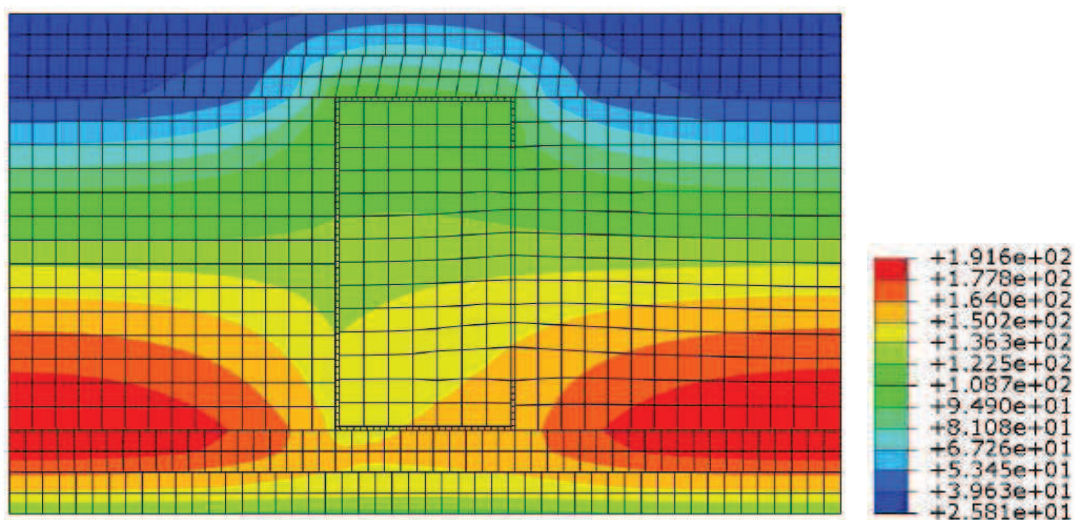


Figura 5.13. Temperatura em $^{\circ}C$ no instante 7200 segundos para o modelo com isolamento.

Na figura 5.14 está apresentada a variação da temperatura ao longo da seção da parede no decorrer da simulação, para o tempo total de 7200 segundos. Observa-se que para este modelo está mais evidenciado que com a presença do isolamento na cavidade os valores de temperatura no interior da parede, no isolamento em sua cavidade, ao final do experimento são superiores a da placa de gesso do lado da parede exposta inicialmente ao incêndio. Há a formação de duas regiões no isolamento com maiores temperaturas que o restante da estrutura devido à baixa condutividade térmica da lã de rocha (instante 7200s).

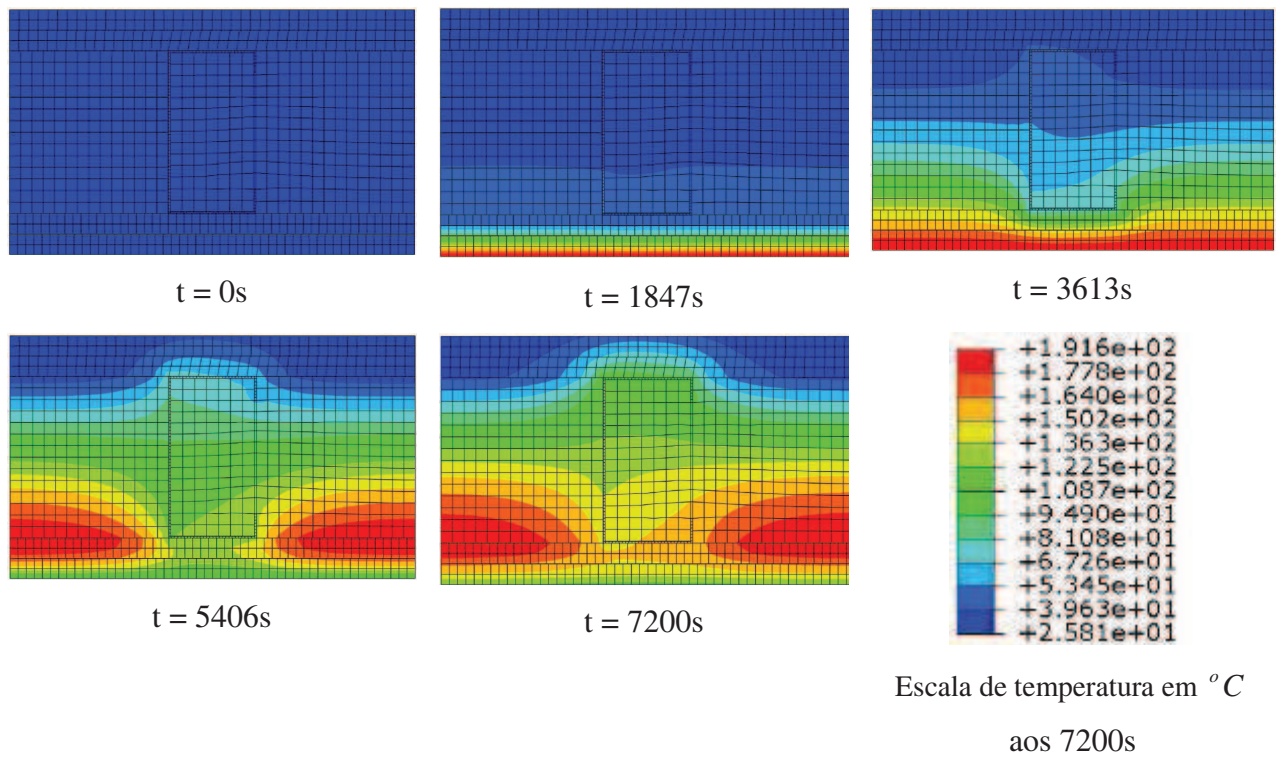


Figura 5.14. Variação da temperatura ao longo da seção da parede de 0 até 7200 segundos.

5.4 Observações e conclusões sobre os modelos implementados

Após simulação dos modelos expostos ao incêndio natural constata-se que:

- conforme relatado nas conclusões parciais do capítulo 3, a umidade da placa de gesso proporciona um retardo do aquecimento da parede. No modelo sem isolamento e com duas placas de gesso no fechamento em ambos os lados da parede não foi constatada a elevação brusca da temperatura devido à mesma não ter ultrapassado os $125^{\circ}C$, evitando que a evaporação total da umidade presente nas placas de gesso ocorresse;

- para tempos maiores de exposição ao incêndio natural, o uso de isolamento no preenchimento da cavidade leva a valores maiores de temperatura nos pontos P2 e P3 em comparação com o ponto P1 exposto inicialmente ao incêndio em função da baixa condutividade térmica da lã de rocha;

- em todos os modelos com exposição ao incêndio natural é observada a distribuição da temperatura em suas fases de aquecimento e resfriamento;

- em todas as figuras representativas do instante 7200s pode-se observar que o perfil metálico proporciona maior propagação da temperatura ao longo da seção da parede. Nos casos com isolamento, por apresentar maior condutividade térmica, nota-se que no entorno do perfil encontram-se os maiores valores de temperatura no instante final da simulação;

- considerando um incêndio natural, todos os modelos desenvolvidos conseguiram satisfazer ao critério de isolamento térmico conforme exige a norma ABNT NBR 14.323:1999;





- a temperatura na face da placa do lado não exposto ao incêndio não atingiu valor superior a $87^{\circ}C$ no decorrer dos 7200s de simulação. Esse valor máximo foi encontrado para o ponto P6 no instante $t=4700s$ para a configuração que condiciona o menor isolamento térmico (modelo 1x1 sem isolamento na cavidade);

- a média das temperaturas máximas alcançadas nos pontos monitorados localizados nas extremidades do perfil foi de $312^{\circ}C$ para o modelo 1x1 com isolamento na cavidade. A presença da lã de rocha, material com baixa condutividade térmica, proporciona a manutenção da temperatura por um período de tempo maior no entorno do perfil em relação aos modelos sem isolamento. A temperatura máxima alcançada no perfil foi no ponto P3, $501^{\circ}C$ por volta dos 3100s;

- em todos os modelos expostos ao incêndio natural, a temperatura monitorada na face da parede exposta ao fogo é inferior a $120^{\circ}C$, proporcionando tempo de isolamento térmico superior aos 120 minutos;

- a tabela 5.1 apresenta o resumo de alguns resultados encontrados para os modelos simulados neste capítulo em exposição ao incêndio natural e padrão.

Tabela 5.1. Resumo comparativo dos resultados encontrados nos modelos submetidos ao incêndio natural e ao incêndio-padrão.

Modelo		Incêndio Natural				Incêndio-padrão			
		Temperatura máxima em P6 ($^{\circ}C$)	Isolamento térmico	Temperatura máxima no Perfil ($^{\circ}C$)	Resistência estrutural do perfil*	Temperatura máxima em P6 ($^{\circ}C$)	Tempo de isolamento térmico (min)	Temperatura máxima no Perfil ($^{\circ}C$)	Tempo de resistência estrutural do perfil* (min)
	1x1 (sem isolamento)	87 aos 4700s	ATENDE	274 (P3) aos 3000s	ATENDE	178 aos 7200s	90	541 aos 7200s	30
	2x2 (sem isolamento)	79 aos 5470s	ATENDE	128 (P3) aos 4600s	ATENDE	65 aos 7200s	120	338 aos 7200s	120
	1x1 (com isolamento)	44 aos 5500s	ATENDE	501 (P3) aos 3100s	NÃO ATENDE	113 aos 7200s	120	920 aos 7200s	15
	2x2 (com isolamento)	47 aos 6396s	ATENDE	246 (P3) aos 4400s	ATENDE	63 aos 7200s	120	752 aos 7200s	30

Nota: * Considerando a temperatura máxima crítica de $350^{\circ}C$ conforme EN 1993-1-2:2005.

OBS: simulações realizadas, com incêndio padrão, até os 7200 segundos (120 minutos).

6

CONCLUSÕES FINAIS

6.1 Comentários Gerais e Conclusões

Após o desenvolvimento dos modelos no programa computacional ABAQUS (*SIMULIA CORP.*, 2007) conclui-se que as simulações numéricas relativas a paredes do sistema construtivo LSF foram bastante satisfatórias, uma vez que foi possível reproduzir os processos de transferência de calor em um sistema complexo, tanto geometricamente quanto em termos de propriedades térmicas, principalmente pela existência de uma cavidade no interior da parede. O modelo pôde ser aplicado a outras configurações proporcionando análises satisfatórias de alternativas de fechamento para a seção de parede estudada.

Mesmo com os resultados encontrados nos modelos numéricos desenvolvidos no capítulo 3 para validação sendo inferiores aos do modelo experimental ensaiado por FENG *et. al.* (2003), porém, com comportamentos de curvas de elevação de temperatura similares nos pontos monitorados, consideram-se aceitáveis e conservadores os dados gerados.

Sobre o modelo proposto com uma placa de gesso em cada lado e preenchimento da cavidade com lã de rocha, analisado no item 3.4.3, os resultados encontrados mostraram desvios nas previsões de temperatura em alguns pontos em relação ao modelo experimental de FENG *et. al.* (2003). Porém, deduz-se juntamente com ALVES (2006) e FENG *et. al.* (2003) que no experimento pode ter ocorrido uma acomodação da lã de rocha no interior da cavidade, originando espaços vazios, nos quais estão presentes

transferência de calor por radiação, muito mais eficiente que a condução térmica. Os modelos numéricos não consideraram essa situação.

Concordando com o observado por ALVES (2006), as malhas de elementos finitos não necessitam ser muito refinadas. Com uma discretização razoável foram obtidos resultados e estimativas da evolução da temperatura em função do tempo, muito próximos daqueles obtidos com uma malha muito refinada, conforme pode ser observado na figura 3.5.

Através dos modelos desenvolvidos constatou-se que emprego das placas de gesso acartonado como material de fechamento nos painéis das paredes do sistema construtivo LSF foi bastante satisfatório, proporcionando condições de isolamento térmico e proteção térmica para o perfil formado a frio, sendo ótimas para reduzir a transferência de calor. Observa-se que a grande responsável por este desempenho das placas de gesso como isolante térmico é a presença da água em sua composição. Pode-se observar nas figuras comparativas 4.34, 4.35 e 4.36 dentre outras, que essa característica é bastante evidenciada pela formação de patamares nas curvas de temperatura em função do tempo. A umidade da placa de gesso proporciona um retardo do aquecimento da parede, até por volta dos $125^{\circ}C$, temperatura na qual a água está em evaporação, com ascensão mais suave. Após este valor constata-se uma elevação brusca da temperatura, conforme pode ser observado nos gráficos apresentados nos capítulos 3 e 4.

Em função do acréscimo de uma segunda placa de gesso ou de trecho da mesma como proteção no perfil, nota-se que ocorre um deslocamento do trecho de aumento brusco da curva de temperatura quando se comparada à mesma curva de um ponto, quando observado os gráficos comparativos para modelos com diferentes números de placas de gesso. Por exemplo, na figura 4.34 (comparativo entre os modelos com uma e duas placas sem isolamento na cavidade) para o ponto P2, no modelo com apenas uma placa de gesso, observa-se que ocorre um grande aumento de temperatura a partir dos 900s, enquanto o mesmo ocorre por volta de 2850s no modelo com duas placas.

É importante frisar que o acréscimo de mais uma placa nos modelos faz com que a elevação de temperatura ao longo da seção da parede tenha uma redução significativa, satisfazendo tempos requeridos de resistência ao fogo, TRRF, superiores a 120 minutos,

para situações de exposição do incêndio padrão em relação ao isolamento térmico. A adoção de diferentes configurações de proteção para o perfil também proporciona uma redução da temperatura ao longo da parede estudada, contribuindo para que o tempo de isolamento térmico possa ser superior a 120 minutos.

Observa-se que nos modelos com isolamento na cavidade, os valores de temperatura obtidos para o ponto P3 são superiores aos do P2, e este apresenta resultados maiores do que P4. Constata-se também que o ponto P4, na mesma profundidade de parede que P5, apresenta aquecimento maior. Conclui-se que a presença do isolamento na cavidade, material com baixa condutividade térmica, faz com que a transferência de calor por condução ao longo do perfil siga um caminhar, aquecendo sequencialmente os pontos P3, P2, P4, P5. O mesmo não ocorre no modelo sem isolamento, onde para os pontos em uma mesma profundidade, observam-se valores bem próximos.

A presença do isolamento na cavidade da parede, com base nos modelos desenvolvidos, proporciona maiores valores médios e máximos de temperatura no perfil. Observa-se que o isolamento na cavidade melhora o isolamento térmico da parede, porém, aumenta as temperaturas no perfil, em comparação com os modelos sem isolamento e mesma configuração de fechamento (mesmo número de placas de gesso).

Já para os modelos submetidos ao incêndio natural, o uso de isolamento no preenchimento da cavidade leva a valores maiores de temperatura nos pontos P2 e P3 em comparação com o ponto P1 exposto inicialmente ao incêndio em função da baixa condutividade térmica da lã de rocha.

Ainda sobre os modelos expostos ao incêndio natural do capítulo 5, em todas as figuras representativas do instante 7200s pode-se observar que o perfil metálico proporciona maior propagação da temperatura ao longo da seção da parede. Nos casos com isolamento, por apresentar maior condutividade térmica, nota-se que no entorno do perfil encontram-se os maiores valores de temperatura no instante final da simulação. A média das temperaturas máximas alcançadas nos pontos monitorados localizados nas extremidades do perfil foi de $312^{\circ}C$ para o modelo 1x1 com isolamento na cavidade. A presença da lã de rocha, material com baixa condutividade térmica, proporciona a

manutenção da temperatura por um período de tempo maior no entorno do perfil em relação aos modelos sem isolamento.

Considerando um incêndio natural, todos os modelos desenvolvidos conseguiram satisfazer ao critério de isolamento térmico conforme exige a norma ABNT NBR 14323:1999. A temperatura na face da placa do lado não exposto ao incêndio não atingiu valor superior a $87^{\circ}C$ na simulação. Esse valor máximo foi encontrado para o ponto P6 no instante 4700s para a configuração que condiciona o menor isolamento térmico (modelo 1x1 sem isolamento na cavidade – analisado no item 5.3.1).

As proteções desenvolvidas para o perfil metálico mostraram-se bastantes satisfatórias, proporcionando redução significativa da temperatura alcançada quando comparado ao mesmo modelo sem proteção. Com base no estabelecido no EN 1993-1-2:2005 em relação à resistência, os modelos propostos com proteção no perfil com extensão de três vezes a largura de suas mesas, com e sem fechamento lateral (proteção caixa), sem isolamento na cavidade, proporcionam temperaturas inferiores aos $350^{\circ}C$, aos 90 minutos de simulação. Já o modelo com proteção no perfil com extensão de uma vez a largura de suas mesas, com fechamento lateral, sem isolamento na cavidade, proporciona temperatura inferior aos $350^{\circ}C$, aos 60 minutos de simulação.

O modelo com apenas uma placa sem proteção e sem isolamento térmico na cavidade, só atende ao recomendado pela norma europeia para um tempo inferior a 30 minutos, conforme pode ser verificado na tabela 4.20.

As tabelas 4.20 e 5.1 apresentam uma síntese deste trabalho e servem de consulta na definição do isolamento térmico e resistência estrutural de painéis com placas de gesso acartonado em situação de incêndio.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros sugere-se:

- realizar estudo experimental e numérico sobre as propriedades térmicas das placas de gesso nacionais, uma vez que os dados publicados e disponibilizados pelos fabricantes são restritos aos produtos estrangeiros, visando conhecer o comportamento das placas utilizadas dentro da construção civil brasileira;
- realizar simulações experimentais com outros tipos de materiais nas paredes atuando como vedação, tais como as placas OSB e as cimentícias, principalmente para os produtos nacionais, visando o conhecimento das propriedades térmicas dos mesmos;
- realizar novas simulações com diferentes materiais para preenchimento da cavidade, uma vez que o presente trabalho limitou-se apenas a lã de rocha;
- realizar estudo sobre a resistência estrutural do perfil em função da existência de uma variação de temperatura entre as mesas, para modelos com isolamento térmico na cavidade;
- estudar o incêndio natural em edificações residenciais efetuando comparação com o incêndio padrão, com o objetivo de desenvolver prescrições normativas menos severas.

7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M.C. **Análise Avançada de Perfis Formados a Frio sob a ação de incêndio.** Tese do Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 2006.

ALFAWAKHIRI, F., SULTAN, M.A. *Fire Resistance of Loadbearing LSF Assemblies.* Artigo publicado na 15^a Conferência Internacional de Estruturas em Perfil Formado a Frio. St. Louis, MO, U.S.A, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6355 – Perfis estruturais, de aço, formados a frio – Padronização.** ABNT, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323 – Dimensionamento de estruturas de aço em edifícios em situação de incêndio – Procedimento.** ABNT, Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificação – Procedimento.** ABNT, Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14762 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas de perfis formados a frio – Procedimento.** ABNT, Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15253 – Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis reticulados em edificações – Requisitos Gerais.** ABNT, Rio de Janeiro, 2005.

ASTM E119. *Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials*. American Society of Testing and Materials, 1995.

BÉNICHOU, N., SULTAN, M.A. *Fire Resistance Behaviour of Lightweight-Framed Construction*. Artigo publicado no 3^o Workshop Internacional de Estruturas em Incêndio. Ottawa, Ontário, Canadá, 2004.

BONITESE, K. V. **Segurança contra incêndio em edifício Habitacional de baixo custo Estruturado em aço**. Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte, 2007.

BORAL LIMITED . Disponível em <http://www.boral.com.au/>. Acessado em 13 de junho de 2010.

BRITISH GYPSUM LIMITED. Site fabricante placa de gesso acartonado. Disponível em: <http://www.british-gypsum.com>. Acessado em 10/04/2010.

CALDAS, R. B. **Análise numérica de estruturas de aço, concreto e mistas em situação de incêndio**. Tese do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte, 2008.

Cadorin, J.F. *Compartment Fire Models for Structural Engineering*. Tese de doutorado da Universidade de Liege, Bélgica, 2003.

CSR Limited (CSR). Disponível em <http://www.csr.com.au/Pages/default.aspx>. Acessado em 13 de junho de 2010.

EN 1991-1-2:2002. *Eurocode 1: Actions on structures, Part 1.2: General actions*. European Committee for Standardization.

EN 1993-1-2:2005. **Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.2: General Rules, Structural Fire Design.** European Committee for Standardization.

FENG, M., WANG Y. C. e DAVIES J. M. **Thermal performance of cold-formed thin-walled steel panel systems in fire.** Artigo publicado no Fire Safety Journal. V38-4, 2003. P.365-394

FREITAS, A. M. S.; CASTRO, R. C. M. **Steel Framing: Arquitetura.** Manual de Construção em Aço. Centro Brasileiro da Construção em Aço - CBCA. Rio de Janeiro, 2006.

JAMES HARDIE BUILDING PRODUCTS, INC. Disponível em <http://www.jameshardie.com/>. Acessado em 13 de junho de 2010.

KAITILA, O. **Finite element modelling of cold-formed steel members at high temperatures.** Tese da Universidade de Tecnologia de Helsinki, Finlândia, 2002.

NADER, E., P.E. **Light Steel Frame Housing – Review of Fire and Acoustic Performance.** NAHB Research Center, Upper Marlboro, MD, EUA, 2002.

PATH (Partnership for Advancing Technology in Housing). **Residential Steel Framing – Builder’s Guide to Fire and Acoustic Details.** Washington, DC, EUA, 2004.

RODRIGUES, F. C. **Steel Framing: Engenharia.** Manual de Construção em Aço. Centro Brasileiro da Construção em Aço - CBCA. Rio de Janeiro, 2006.

RODRIGUES, F. C. **Perfis Estruturais Formados a Frio: Comportamento e Dimensionamento – Notas de Aula.** Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte, 1997.

SEITO, A. I *et al.* **A segurança contra incêndio no Brasil.** Projeto Editora, São Paulo, 2008.

SILVA, V. P. *et al.* **A segurança contra incêndio no Brasil**. Projeto Editora, São Paulo, 2008.

SIMULA CORP. (2007). *Software ABAQUS/CAE, versão 6.7*. Dessault Systemes Simulia Corp., USA.