

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

MATERIAIS DE PROTEÇÃO TÉRMICA PARA
SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE BAIXO CUSTO
ESTRUTURADOS EM AÇO

ANDRÉ LUIZ DOS REIS GERKEN

BELO HORIZONTE

2007

ANDRÉ LUIZ DOS REIS GERKEN

**MATERIAIS DE PROTEÇÃO TÉRMICA PARA
SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE BAIXO CUSTO
ESTRUTURADOS EM AÇO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Área de concentração: Materiais de Construção Civil.

Linha de pesquisa: Materiais de proteção térmica

Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG

2007

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

MATERIAIS DE PROTEÇÃO TÉRMICA PARA
SISTEMAS CONSTRUTIVOS DE BAIXO CUSTO
ESTRUTURADOS EM AÇO

André Luiz dos Reis Gerken

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Comissão Examinadora:

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

Prof. Dr. Ney Amorim Silva
DEES/UFMG

Prof. Dr. Cícero Murta Diniz Starling
DEMC/UFMG

Belo Horizonte, 19 de julho de 2007.

Dedico este trabalho aos meus
filhos Erasmo e Joaquim.

AGRADECIMENTOS

Não poderia considerar este trabalho devidamente concluído sem que nele expressasse o meu mais sincero sentimento de gratidão por aqueles que contribuirão para esta grande conquista: o Título de Mestre

À Deus por guiar meus passos e aos meus pais que deram condições para meu crescimento e formação.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues que não mediu esforços para que eu pudesse concluir com êxito este trabalho, acreditando no meu potencial e dedicação às causas da engenharia e da segurança.

Ao Prof. Dr. Cícero Murta Diniz Starling do Departamento de Engenharia de Materiais de Construção, pelos ensinamentos e dedicação à arte de ensinar.

Aos Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva, pela amizade e conhecimento dispensado aos alunos do Curso de Pós-Graduação em Construção Civil.

À Prof. Dra. Maria Teresa Paulino Aguilár, pelo incentivo e por me despertar para a importância do processo de construção do conhecimento através da Ciência, porém sem deixar de acreditar nas intuições, na imaginação, e principalmente, na capacidade de sonhar.

À Ellen, meu agradecimento pela dedicação, companheirismo e carinho, acreditando no meu trabalho e esforço.

À minha grande amiga Karina, meu sincero agradecimento pelo companheirismo e carinho.

RESUMO

Atualmente, a segurança contra incêndio tem expandido como ciência multidisciplinar, que envolve muitos campos da engenharia, requerendo uma integração importante de diferentes áreas e esforços. O desenvolvimento de projetos inteligentes e a utilização de materiais adequados na construção das edificações são fundamentais para a segurança. No presente trabalho, foi realizada a análise térmica de vigas do tipo caixa, com utilização de perfis formados à frio, com aço *USI SAC 300*, submetidos a altas temperaturas com utilização de curva de incêndio padrão e natural. Foram estabelecidos parâmetros baseados na preservação dos índices de limite de escoamento e do módulo de elasticidade do aço. Assim concluiu-se que aqueles materiais que tinham condições de preservar a resistência do aço por mais tempo apresentaram uma melhor performance sob este aspecto. Utilizou-se dois softwares, o *Smartfire* e o *Thersys*, como ferramentas para simular incêndios em compartimentos, e para a realização de análise das temperaturas atingidas nas vigas, bem como o desempenho dos materiais de proteção térmica incorporados aos elementos estruturais. A partir da análise dos resultados obtidos, verificou-se o desempenho de alguns desses materiais utilizados atualmente como proteção passiva contra incêndio. Primeiramente os testes foram realizados nos perfis sem proteção e posteriormente com proteção por fibra projetada, concreto vermiculítico, lã de rocha, manta cerâmica e placa de gesso. Concluídos os trabalhos verificou-se que as placas de gesso apresentaram um melhor resultado no isolamento, seguida da argamassa de fibra projetada.

ABSTRACT

Nowadays the fire security has been expanding as multidisciplinary science, involving many fields of engineering, demanding an important integration of different areas and efforts, mainly about building materials. The development of low cost constructive system structured by steel, has been becoming a common practice and a necessity in attendance to poorly paid public. Despite the characteristic of these buildings they must obey perfectly the fire security rules. In this work, it was conducted the thermal analysis of beams in box shape, typical of these buildings, with beams made in cold and *USI SAC 300* steel, submitted under high temperature using natural and standard fire curves. Parameters based on the preservations indices of flow limits and elasticity modulus of steel had been established. Thus was concluded that those materials wich kept conditions to preserve the resistance of steel for more time showed a better performance. Two softwares was used, the *Smartfire* and *Thersys*, as tools for simulate fires in compartments, and to do the analysis of temperature in the beams and also the performance of incorporated materials for thermal protection in structural elements. The analysis of results presented the performance of some materials used as passive protection. The first tests had been carried out in beams without protection and later with protection using projected fiber, vermiculite concrete, rockwool, ceramic blanket and gypsum plate. Concluded the experiences we verified that the beams protected with projected fiber and gypsum plates did not presented reduction of the flow limits and modulus of elasticity, for more than a satisfactory time.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
1. INTRODUÇÃO	01
1.1 Considerações iniciais	01
1.2 Objetivos	04
1.3 Justificativa e relevância do tema	05
1.4 Desenvolvimento	07
2. SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS	10
2.1 Introdução	10
2.2 Segurança contra incêndios	11
2.3 Performance-based	12
2.4 A segurança contra incêndio em Minas Gerais.....	14
3. TEORIA DO FOGO E TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	17
3.1 Introdução	17
3.2 Combustível	19
3.3 Calor	22
3.3.1 Efeitos do calor	22
3.3.2 Transmissão de calor	26
3.3.2.1 Condução	27
3.3.2.2 Convecção	29
3.3.2.3 Radiação	30
3.3.3 Pontos de temperatura	31
3.4 Comburente	32
3.5 Reação em cadeia	32

4. CARGA DE INCÊNDIO	34
4.1 Introdução.....	34
4.2 Potencial calorífico específico	36
4.3 Densidade de carga de incêndio ou carga de incêndio específica	37
4.4 Método para levantamento da carga de incêndio específica.....	37
5. DINÂMICA DOS INCÊNDIOS	39
5.1 Introdução	39
5.2 Dinâmica dos incêndios	41
5.2.1 Ignição	42
5.2.2 Crescimento	42
5.2.3 Flashover	43
5.2.4 Queima generalizada	44
5.2.5 Decaimento	44
5.2.6 Fatores intervenientes nos incêndios	45
5.3 Modelamento do incêndio	48
5.3.1 Incêndio natural	48
5.3.2 Incêndio padrão	50
6. ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA NO AÇO	52
6.1 Introdução	52
6.2 Propriedades do aço	53
6.2.1 Propriedades mecânicas do aço carbono	56
6.2.2 Massa específica	59
6.2.3 Propriedades térmicas	59
6.2.3.1 Alongamento	59
6.2.3.2 Calor específico	61
6.2.3.3 Condutividade térmica	62
6.3 Desenvolvimento da temperatura nos perfis estruturais	63
7. SEGURANÇA ESTRUTURAL	71
7.1 Introdução	71

7.2 Determinação do TRRF das estruturas	72
7.2.1 Método de Gretener	72
7.2.2 Método do tempo equivalente	74
8. MATERIAIS DE PROTEÇÃO TÉRMICA	80
8.1 Introdução	80
8.2 Propriedades físicas e térmicas dos materiais	82
8.2.1 Calor específico	84
8.2.2 Condutividade térmica	84
8.2.2.1 Coeficiente de condutividade térmica	85
8.2.3 Massa específica	86
8.3 Classificação dos revestimentos térmicos	86
8.4 Tipos de materiais de proteção térmica	87
8.4.1 Argamassas projetadas	87
8.4.2 Tintas intumescentes	99
8.4.3 Placas de lã mineral	105
8.4.4 Placas de gesso	106
9. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E METODOLOGIA	109
9.1 Introdução	109
9.2 Programa <i>Smartfire</i>	110
9.2.1 Análise computacional no <i>Smartfire</i>	111
9.2.1.1 Especificações da edificação utilizada como modelo	111
9.2.1.2 Modelamento do incêndio	113
9.2.1.3 Resultados	123
9.3 Programa <i>Thersys</i>	125
9.3.1 Análise computacional no <i>Thersys</i>	125
9.3.1.1 Simulações com perfil tipo caixa.....	126
9.3.1.1.1 Resultados obtidos com perfil tipo caixa sem proteção.....	133
9.3.1.1.2 Resultados obtidos com perfil tipo caixa com proteção.....	136
9.4 Análise dos resultados.....	182
9.4.1 Simulação com elemento estrutural sem proteção.....	185
9.4.2 Simulação com elemento estrutural com proteção.....	186

9.4.2.1 Análise dos resultados obtidos com a argamassa de fibra projetada.....	186
9.4.2.2 Análise dos resultados obtidos com concreto vermiculítico.....	188
9.4.2.3 Análise dos resultados obtidos com lã de rocha.....	189
9.4.2.4 Análise dos resultados obtidos com manta cerâmica.....	191
9.4.2.5 Análise dos resultados obtidos com placa de gesso.....	192
10. CONCLUSÕES	198
10.1 Conclusões	198
10.2 Sugestões para trabalhos futuros	200
BIBLIOGRAFIA	201
ANEXOS	204
Anexo A	204
Anexo B	209

LISTA DE FIGURAS

2.1 Relação hierárquica para projeto de performance-based.....	14
3.1 Tetraedro do fogo.....	19
3.2 Diagrama de inflamabilidade da gasolina.....	21
4.1 Taxa de calor liberada por itens de mobília (Buchanan 2006).....	35
5.1 Desenvolvimento de incêndio em compartimento.....	41
5.2 Ventilação de um compartimento.....	46
5.3 Altura média das aberturas.....	46
5.4 Curva do incêndio natural.....	49
5.5 Curva do incêndio padrão.....	50
5.6 Curvas comparativas do aço, concreto e alumínio.....	51
6.1 Diagrama de fase Fe-C.....	53
6.2 Estrutura ortorrômbica da cementita.....	55
6.3 Estruturas cúbica de corpo centrado, cúbica de face centrada e ortorrômbica.....	56
6.4 Diagrama tensão-deformação dos aços a elevadas temperaturas.....	57
6.5 Curvas características dos fatores de redução em função da temperatura.....	59
6.6 Curva característica do alongamento do aço em função da temperatura.....	60
6.7 Calor específico do aço devido à temperatura.....	62
6.8 Variação da condutividade térmica do aço em função da temperatura.....	63
6.9 Elementos estruturais de vedação.....	70
7.1 Tempo equivalente plicado às estruturas de aço.....	75
8.1 Proteção de pilares e vigas com utilização de alvenaria e concreto.....	81
8.2 Quanto à morfologia, tipo vertido (A), tipo contorno (B) e tipo caixa (C).....	87
8.3 Fotografia da aplicação da argamassa projetada.....	87
8.4 Fotografia da argamassa projetada com aumento de 10 vezes.....	93
8.5 Argamassa projetada aplicada sobre a estrutura de aço.....	93
8.6 Argamassa projetada aplicada sobre a estrutura externa de aço.....	94
8.7 Microestrutura da vermiculita.....	97
8.8 Reação ao calor e criação de camada protetora.....	100
8.9 Detalhes da pintura intumescente em estrutura metálica.....	101
8.10 Detalhes da seqüência de eventos para o intumescimento da tinta na estrutura.....	102

8.11 Esquema de preparação pintura e acabamento do elemento estrutural com tinta intumescente.....	102
8.12 Esquema de instalação de placas de gesso com suportes.....	107
8.13 Esquema de enclausuramento de pilar com placa de gesso.....	107
9.1 Layout do apartamento utilizado para as simulações.....	111
9.2 Dimensões da viga mista de aço e concreto analisada.....	112
9.3 Perspectiva isométrica do apartamento para realização da simulação com layout e materiais.....	113
9.4 Esquema do apartamento em 3D.....	114
9.5 Janela para definição das propriedade dos materiais.....	114
9.6 Propriedades dos materiais.....	115
9.7 Malha de elementos finitos.....	116
9.8 Taxa de calor liberada pela queima do sofá.....	117
9.9 Configuração da trigger cell – queima do sofá após 573 °C.....	118
9.10 Configuração da ativação do incêndio no sofá.....	119
9.11 Resultados das taxas de liberação de calor geradas pela queima do sofá.....	119
9.12 Escolha do modelo de radiação mais indicado para a simulação.....	120
9.13 Tela do Problem Type do Smartfire.....	121
9.14 Tela do Smartfire mostrando os cálculos das variáveis que definem o incêndio, bem como os gráficos que mostram sua convergência.....	123
9.15 Curva de incêndio gerada pela simulação.....	124
9.16 Definição da geometria dos elementos a serem utilizadas no Autocad.....	126
9.17 Contornos da superfície interna dos materiais.....	127
9.18 Acionamento da interface do programa GID com o Thersys.....	128
9.19 Definição de padrões de incêndio.....	129
9.20 Definição da condição de incêndio.....	130
9.21 Definição da malha de elementos finitos.....	130
9.22 Desenho da malha de elementos finitos.....	131
9.23 Andamento das análises feitas pelo programa.....	131
9.24 Pontos de verificação de temperatura na viga.....	132
9.25 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos de incêndio, com viga sem proteção e curva de incêndio padrão.....	133

9.26: Gráfico temperatura tempo no elemento estrutural sem proteção com utilização da curva de incêndio padrão.....	134
9.27 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos de incêndio, com viga sem proteção e curva de incêndio natural.....	135
9.28 Gráfico temperatura tempo no elemento estrutural sem proteção com utilização da curva de incêndio natural.....	136
9.29 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos de incêndio, com viga protegida por fibra projetada com 10mm e curva de incêndio padrão.....	137
9.30 Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com argamassa de fibra projetada com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.....	138
9.31 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos de incêndio, com viga protegida por fibra projetada de 10mm e curva de incêndio natural.....	139
9.32 Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com argamassa de fibra projetada com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.....	140
9.33 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos de incêndio, com viga protegida por fibra projetada de 15mm e curva de incêndio padrão.....	141
9.34 Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com argamassa de fibra projetada com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.....	142
9.35 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos de incêndio, com proteção por fibra projetada de 15mm e curva de incêndio natural.....	143
9.36 Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com argamassa de fibra projetada com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.....	144
9.37 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos de incêndio, com viga protegida por concreto vermiculítico submetida à curva de incêndio padrão.....	145
9.38 Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com concreto vermiculítico projetado com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.....	146

9.39 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos de incêndio, com viga protegida por concreto vermiculítico com 10mm submetida à curva de incêndio natural.....	147
9.40 Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com concreto vermiculítico projetado com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.....	148
9.41 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por concreto vermiculítico de 15mm submetida à curva de incêndio padrão.....	149
9.42 Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com concreto vermiculítico projetado com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.....	150
9.43 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por concreto vermiculítico de 15mm submetida à curva de incêndio natural.....	151
9.44 Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com concreto vermiculítico projetado com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.....	152
9.45 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por lã de rocha com 10mm submetida à curva de incêndio padrão.....	153
9.46 Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com lã de rocha com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.....	153
9.47 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por lã de rocha com 10mm submetida à curva de incêndio natural.....	154
9.48 Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com lã de rocha com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.....	155
9.49 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por lã de rocha com 15mm submetida à curva de incêndio padrão.....	156
9.50 Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com lã de rocha com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.....	156
9.51 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por lã de rocha com 15mm submetida a curva de incêndio natural.....	157

9.52 Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com lã de rocha com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.....	158
9.53 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por manta cerâmica com 10mm submetida à curva de incêndio padrão.....	159
9.54 Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com manta cerâmica com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.....	159
9.55 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por manta cerâmica com 10mm submetida à curva de incêndio natural.....	160
9.56 Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com manta cerâmica com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.....	161
9.57 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por manta cerâmica com 15mm submetida a curva de incêndio padrão.....	162
9.58 Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com manta cerâmica com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.....	162
9.59 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por manta cerâmica com 15mm submetida à curva de incêndio natural.....	163
9.60 Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com manta cerâmica com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.....	164
9.61 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por placa de gesso com 10mm submetida à curva de incêndio padrão.....	165
9.62 Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com placa de gesso com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.....	165
9.63 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por placa de gesso com 10mm submetida à curva de incêndio natural.....	166
9.64 Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com placa de gesso com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.....	167

9.65 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por placa de gesso com 15mm submetida a curva de incêndio padrão.....	168
9.66 Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com placa de gesso com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.....	168
9.67 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por placa de gesso com 15mm submetida à curva de incêndio natural.....	169
9.68 Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com placa de gesso com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.....	170
9.69 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por argamassa projetada com 30mm submetida a curva de incêndio padrão.....	171
9.70 Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com fibra projetada com 30mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.....	171
9.71 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por argamassa projetada com 30mm submetida à curva de incêndio natural.....	172
9.72 Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com fibra projetada com 30mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.....	173
9.73 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por concreto vermiculítico com 30mm submetida a curva de incêndio padrão.....	174
9.74 Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com concreto vermiculítico com 30mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.....	174
9.75 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por concreto vermiculítico com 30mm submetida a curva de incêndio natural.....	175
9.76 Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com concreto vermiculítico com 30mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.....	176
9.77 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por lã de rocha com 30mm submetida a curva de incêndio padrão.....	177

9.78 Gráfico temperatura tempo no elemento protegido por lã de rocha com 30mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.....	177
9.79 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por lã de rocha com 30mm submetida a curva de incêndio natural.....	178
9.80 Gráfico temperatura tempo no elemento protegido por lã de rocha com 30mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.....	179
9.81 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por manta cerâmica com 30mm submetida à curva de incêndio padrão.....	180
9.82 Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido por manta cerâmica com 30mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.....	180
9.83 Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por manta cerâmica com 30mm submetida à curva de incêndio natural.....	181
9.84 Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido por manta cerâmica com 30mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.....	182
9.85 Referências para cálculo.....	184
9.86 Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural.....	186
9.87 Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por fibra projetada submetido à curva de incêndio padrão.....	187
9.88 Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por fibra projetada submetido à curva de incêndio natural.....	188
9.89 Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por concreto vermiculítico submetido à curva de incêndio padrão.....	188
9.90 Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por concreto vermiculítico submetido à curva de incêndio natural.....	189
9.91 Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por lã de rocha à curva de incêndio padrão.....	190
9.92 Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por lã de rocha à curva de incêndio natural.....	190
9.93 Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por lã de rocha à curva de incêndio natural.....	191

9.94 Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por lâ de rocha à curva de incêndio natural.....	192
9.95 Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por lâ de rocha à curva de incêndio padrão.....	193
9.96 Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por lâ de rocha à curva de incêndio natural.....	193

LISTA DE TABELAS

3.1 Limites inferiores e superiores de inflamabilidade.....	22
3.2 Coeficientes de dilatação linear de alguns materiais.....	24
3.3 Coeficientes de dilatação volumétrica de alguns materiais.....	25
3.4 Condutividade térmica de materiais usados na construção.....	29
4.1 Classificação das edificações e áreas de risco quanto a carga incêndio.....	37
4.2 Alguns valores de potencial calorífico específico.....	38
5.1 Sumário de períodos em um desenvolvimento típico de incêndio.....	40
6.1 Fatores de redução para o aço.....	58
6.2 Fator de massividade para elementos estruturais sem proteção.....	66
6.3 Fator de massividade para elementos estruturais com proteção.....	68
7.1 Fator K – elementos de vedação.....	76
7.2 fatores de medidas de segurança contra incêndio.....	77
7.3 Características da edificação.....	78
7.4 Risco de ativação.....	78
7.5 Valores do Fator E.....	79
8.1 Propriedades típicas de materiais isolantes condutividade térmica, apresentam em geral, baixa massa específica.....	83
8.2 Exigência de órgãos internacionais de normatização.....	89
8.3 Testes realizados em argamassas de baixa, média e alta densidade.....	90
8.4 Espessura da argamassa MK6 (mm), em função de F e TRRF - $\theta_{cr}=650^{\circ}\text{C}$	91
8.5 Espessura da argamassa MK6 (mm), em função de F e TRRF - $\theta_{cr}=550^{\circ}\text{C}$	92
8.6 Espessura da argamassa composta por fibras projetadas, Blaze Shield II, em mm, em função de F e do TRRF, para $\theta_{cr}=550^{\circ}\text{C}$	95
8.7 Condutividade térmica da argamassa de fibra projetada Blaze Shield II.....	96
8.8 Calor específico da argamassa de fibra projetada Blaze Shield II.....	96
8.9 Concretos vermiculíticos – variação dos traços e características.....	98
8.10 Características dos concretos vermiculíticos Isopiro e Isopiro LV.....	98

8.11 Espessura da argamassa/concreto vermiculítico, em mm, em função de F e do TRRF.....	99
8.12 Espessura da película (mm) de tinta intumescente aplicadas em pilares de seção transversal de forma “I”, com os quatro lados expostos ao fogo, em função de F e do TRRF, para $\theta_{cr}=550^{\circ}\text{C}$	103
8.13 Espessura da película (mm) de tinta intumescente aplicadas em vigas, com seção transversal de forma “I”, com os quatro lados expostos ao fogo, em função de F e do TRRF, para $\theta_{cr}=550^{\circ}\text{C}$	104
8.14 Propriedades da lã de rocha.....	105
8.15 Espessura (mm) do painel Thermax-PEM em função de F e do TRRF, para $\theta_{cr}=550^{\circ}\text{C}$	106
9.1 Propriedades físicas dos materiais padrão apresentados pelo Smartfire.....	115
9.2 Tabela de definição do controle da solução.....	121
9.3 Tabela de definição das propriedades físicas.....	122
9.4 Tabela de uso recomendado para o time step size.....	122

LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta \ell$ - aumento de volume linear;

μ - massa específica;

γ - coeficiente de dilatação volumétrica;

α - coeficiente de dilatação linear;

λ - condutividade térmica do material;

σ - constante de Stephan Boltzmann;

ρ - massa específica do material;

β - coeficiente de dilatação superficial;

ν - grau de ventilação ou fator de abertura;

φ - valor do fluxo de calor por unidade de área;

Δl - expansão térmica da peça de aço devido a temperatura;

$\Delta \theta_{a,t}$ - variação da temperatura no aço;

λ_a - valor da condutividade térmica;

ρ_a - massa específica do aço;

ΔA - variação da área superficial do corpo;

α_c - coeficiente de transferência de calor por convecção;

φ_c - componente do fluxo de calor por convecção;

γ_{fi} - fator global de segurança;

λ_m - condutividade térmica do material de proteção;

ρ_m - massa específica do material de proteção;

γ_n - coeficiente adimensional que leva em conta a presença de medidas de proteção ativa;

φ_r - componente do fluxo de calor por radiação;

ε_{res} - massividade resultante;

γ_s - coeficiente de segurança;

ΔT - variação de temperatura;

Δt - intervalo de tempo

ΔV - aumento de volume do corpo;
 $\Delta\theta_{a,t}$ - variação da temperatura no aço;
 $\Delta\theta_{g,t}$ - variação da temperatura dos gases no ambiente em chamas;
 A - área;
 A_0 - área inicial do corpo;
 A_f - área de piso;
 A_h - área das aberturas horizontais;
 A_i - área do elemento de compartimentação i ;
 A_t - área total do compartimento;
 A_v - área das aberturas verticais;
 b_i - fator b do elemento de compartimentação i ;
 C - calor específico do elemento de vedação do compartimento;
 c - calor específico do material;
 C_a - calor específico do aço;
 c_m - calor específico do material de proteção;
 $K_{E,\theta}$ - coeficientes redutores em decorrência de ação térmica;
 $d\theta/dx$ - gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor;
 dQ - energia exigida para produzir uma variação de temperatura dT ;
 e - emissividade da superfície radiante;
 E - fator de correção;
 E - módulo de elasticidade de todos os aços a 20°C;
 $E_{a,\theta}$ - módulo de elasticidade do aço à uma temperatura θ ;
 E_0 - módulo de elasticidade de todos os tipos de aço a uma temperatura θ_a ;
 $f_{p,\theta}$ - limite de proporcionalidade do aço à uma temperatura θ ;
 f_y - limite de escoamento dos aços laminados a quente a 20°C;
 f_y - limite de escoamento;
 $f_{y,\theta}$ - limite de escoamento do aço à uma temperatura θ ;
 $f_{y,\theta}$ - limite de escoamento dos aços laminados a quente a uma temperatura θ_a ;
 f_{y0} - limite de escoamento dos aços trefilados a 20°C;
 $f_{y0,\theta}$ - limite de escoamento dos aços trefilados a uma temperatura θ_a ;
 H - altura do compartimento;

h é o coeficiente de transferência de calor por convecção;
 h_{eq} - altura média das janelas;
 h_i - altura da abertura i ;
 H_i - potencial calorífico específico de cada componente i do material combustível;
 K - condutividade térmica;
 l_0 - comprimento inicial;
 L - espessura;
 l - comprimento inicial da peça de aço a temperatura ambiente;
 m - massa expressa em kg;
 M_i - massa total de cada componente i do material combustível;
 q - taxa de transferência de calor;
 $Q/\Delta t$ - energia transferida como calor por segundo;
 q_{fi} - valor característico da carga de incêndio específica;
 R - emitância radiante;
 T - temperatura da superfície radiante;
 t_{eq} - tempo equivalente;
 t_m - espessura do material de proteção;
 U - coeficiente de condutividade térmica;
 u - perímetro exposto ao incêndio do elemento estrutural de aço;
 u/A - fator de massividade da seção transversal;
 u_m/A - fator de massividade da seção transversal protegida;
 V - volume expresso em m^3 ;
 V_0 - volume inicial do corpo;
 $\varepsilon_{p,\theta}$ - deformação unitária do aço até o limite de proporcionalidade, à uma temperatura θ ;
 $\varepsilon_{t,\theta}$ - deformação específica do aço ao final do patamar de escoamento, à uma temperatura θ ;
 $\varepsilon_{u,\theta}$ - deformação final do aço à uma temperatura θ ;
 $\varepsilon_{y,\theta}$ - deformação específica do aço no início do patamar de escoamento, à uma temperatura θ ;
 θ_a - temperatura no aço;
 θ_g - temperatura dos gases no ambiente em chamas ($^{\circ}C$);

λ - constante de condutividade térmica (W/m°C);

ρ_a - massa específica do aço;

1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O fogo é, na vida moderna, quase tão importante quanto a água. Durante milhares de anos, o fogo tem fascinado a humanidade, sendo uma das maiores descobertas do homem.

Um dos grandes responsáveis pela sobrevivência e desenvolvimento da humanidade, o fogo foi empregado na preparação de alimentos, como proteção ao ataque de animais e no aquecimento dos abrigos ocupados pelos primeiros hominídeos em épocas gélidas.

A partir de então, o homem aprendeu a utilizar a força do fogo em seu benefício, extraindo a energia dos materiais da natureza ou moldando a natureza em seu favor. Mas foi também utilizado na produção de armas com grande potencial de destruição, causadoras de tragédias memoráveis.

Desde épocas mais remotas, o homem procura estudar o fogo, o fenômeno da combustão e seus efeitos. Nesta tentativa, vários cientistas de renome fizeram inúmeros experimentos em busca de explicações científicas para este fenômeno.

Uma das teorias mais famosas é a do flogisto, que tem sua origem na segunda metade do século dezessete, proposta por Johann Joachim Becher¹ e desenvolvida pelo químico alemão [Georg Ernst Stahl](#)², que afirmava que os corpos combustíveis possuíam uma matéria chamada flogisto que era liberada ao ar durante a queima.

Apesar de alguns químicos da época terem sido fascinados pela teoria, essa exerceu apenas uma influência secundária até o final do século dezoito quando foi fortemente atacada pelo famoso químico francês [Antoine Lavoisier](#)³.

Lavoisier levou muitos anos tentando derrubar definitivamente essa teoria, mas somente com a descoberta acidental do [oxigênio](#), por [Joseph Priestley](#)⁴ no dia 01 de agosto de 1774 e batizado de ar desflogisticado, é que se teve base para enfrentar a teoria do flogisto.

Atualmente, sabe-se que a combustão é a queima de uma substância com produção de energia em forma de calor ou calor e luz. É uma [reação química exotérmica](#) entre uma [substância](#) (o [combustível](#)) e um [gás](#) (o [comburente](#)), usualmente oxigênio, que necessita de uma energia de ativação (calor), para que se inicie o processo. Em uma combustão completa, um combustível reage com um comburente e com o resultado se obtém compostos resultantes da união de ambos, além de energia.

Embora os estudos sobre o fogo e a combustão sejam mais recentes, este sempre foi uma grande preocupação para o homem tanto pelos benefícios quanto pelos danos que pode ocasionar.

1. Johann Joachim Becher: (1635 – 1682), economista e químico alemão nascido em Speyer;

2. Georg Ernest Atahl: (1660 - 1734), químico e médico alemão nascido em Ansbach;

3. Antoine-Laurent Lavoisier: (1743 - 1794), cientista, físico e químico experimental, nascido em Paris;

4. Joseph Priestley: (1733 – 1804), cientista e filósofo inglês, nascido em Fieldhead.

Um dos episódios mais memoráveis de que se tem notícia foi o grande incêndio de Roma que teve início na noite de 18 de julho, no ano 64 d.C., no núcleo comercial da antiga cidade de Roma, em volta do Circo Máximo.

O fogo alastrou-se rapidamente pelas áreas mais densamente povoadas da cidade, com as suas ruelas sinuosas.

O fato de a maioria dos romanos viverem em insulae, edifícios altamente inflamáveis devido à sua estrutura de madeira, de três, quatro ou cinco andares, ajudou à propagação do incêndio.

Hoje, a preocupação com os incêndios ainda é uma realidade. Por não poucas vezes, observa-se a ocorrência de grandes tragédias decorrentes da propagação descontrolada do fogo nas edificações.

Atualmente, o crescimento vertiginoso das cidades e a grande concentração de pessoas nestas áreas, tornam os ambientes mais propícios à ocorrência destes incidentes.

O déficit habitacional nas grandes metrópoles, por sua vez, exige soluções de engenharia que proporcionem condições dignas de habitação, com baixo custo e rapidez.

Os sistemas industrializados de construção estruturados em aço têm sido um grande aliado na solução deste problema, pois expressam vantagens relativas à racionalização dos processos produtivos, custo e tempo de construção.

Desde o século XVIII, quando se iniciou a utilização de estruturas metálicas na construção civil até os dias atuais, o aço tem possibilitado aos arquitetos, engenheiros e construtores, soluções arrojadas, eficientes e de alta qualidade.

A arquitetura em aço sempre esteve associada à idéia de modernidade, inovação e vanguarda, traduzida em obras de grande expressão arquitetônica.

Com o aumento do número das edificações construídas com utilização de estrutura metálica e considerando-se ainda o potencial que este tipo de material possui na construção civil, aliado à preocupação com o bem estar do ser humano e principalmente a sua segurança, é que se faz necessária a realização de estudos mais aprofundados dos meios para retardar a propagação do calor evitando-se o comprometimento estrutural das edificações que pode culminar com o seu colapso parcial ou total.

Vários países utilizam largamente a construção de edificações em estruturas metálicas, sendo que a preocupação com alguns aspectos como a segurança dos ocupantes das edificações, o controle de fumaça e rotas de fuga e a resistência estrutural das edificações são prioridades.

Para tal, faz-se necessária a exploração de materiais de proteção térmica, quando necessário, que permitam que o aço seja utilizado como elemento construtivo sem que as edificações estejam expostas aos riscos de colapso ou qualquer tipo de dano estrutural, com enfoque para a viabilidade técnica da utilização destes materiais.

Além de todos os aspectos ligados às construções estruturadas em aço, citados anteriormente, a preocupação na elaboração de projetos ou montagens destes sistemas está então focada em dois objetivos: preservação da vida humana e do patrimônio.

Sob esta ótica, propõe-se com a elaboração desta pesquisa, o estudo dos materiais de proteção térmica como forma de otimização da proteção passiva nos sistemas construtivos estruturados em aço, que revela uma grande tendência do mercado habitacional mundial. Em especial, será dado enfoque às edificações estruturadas com perfis formados à frio (PFF), com grande disseminação em Minas Gerais e São Paulo.

1.2 Objetivos

O objetivo do tema proposto é o estudo das alternativas na área da construção civil que permitam aumentar a segurança estrutural das edificações estruturadas em aço, com a

utilização de materiais de proteção térmica, que garantam a integridade das propriedades do aço, mesmo submetido a temperaturas elevadas.

Para o êxito da pesquisa proposta e alcance dos resultados almejados, o trabalho terá os seguintes objetivos específicos:

- a) analisar o comportamento do fogo nos incêndios, sua dinâmica e seus efeitos danosos, provocados nas edificações, com enfoque principal para os problemas estruturais;
- b) estudar e analisar as normas e suas exigências no que se referem à proteção das edificações estruturadas em aço;
- c) obter dados de relevância sobre os incêndios com utilização do software *Smart-Fire*, mais especificamente, a curva de incêndio natural e trabalhá-los com utilização do software *Thersys*, em benefício da pesquisa e da proteção passiva contra incêndio nas edificações;
- d) verificar o comportamento frente ao fogo, dos materiais utilizados no revestimento de estruturas, e outros incorporados aos sistemas construtivos utilizados atualmente, com enfoque aos sistemas estruturados em aço;
- e) comparar os materiais utilizados na proteção passiva de estruturas, com base nas suas características e viabilidade técnica, especialmente quando empregados nos sistemas construtivos de baixo custo estruturados em PFF.

1.3 Justificativa e relevância do tema

Desde épocas mais remotas, os incêndios assustam a humanidade e causam perdas irreparáveis, dentre as quais, a perda da vida humana, bem inestimável, que ocorre com certa frequência.

No Brasil, na década de setenta, fatos memoráveis como os incêndios nos edifícios Andraus, em 1972, e o Joelma, em 1974, somaram mais de duzentos mortos e várias pessoas feridas. Tais fatos chocaram a população e despertaram nas autoridades a necessidade de investir na segurança contra incêndios.

Os incêndios são uma realidade nos grandes centros urbanos, pois o aumento da densidade populacional, aliado à falta de informação adequada por parte das pessoas e outros aspectos importantes são catalisadores neste processo.

Atualmente, apesar de vários estudos estarem sendo realizados sobre os incêndios, suas formas de propagação e o mais importante, sobre a prevenção, pouco ainda se sabe sobre o fogo, que quando foge ao controle do homem, causa conseqüências desastrosas.

Para Deggary Priest (2004) “[...] a engenharia de segurança contra incêndio ainda está na sua infância [...] enquanto significativo progresso já foi alcançado nesta área, padrões e técnicas definitivas não estarão completas em menos de sete ou dez anos”.

Com o aumento da utilização do aço na construção civil e o surgimento de processos parcialmente ou totalmente industrializados de construção, fez-se necessário desenvolver conhecimento e técnicas adequadas que permitam a utilização de estruturas metálicas com segurança.

Sob esta ótica, a proteção da estrutura das edificações, quando necessária, passa a ter uma importância fundamental. Considerando a vida humana como o bem mais precioso neste processo, a edificação não pode entrar em colapso até que todos os ocupantes desta estejam em local seguro, ou seja, no exterior da edificação. Isto somente ocorrerá se a estrutura suportar toda a ação do calor sem que se alterem algumas de suas propriedades, garantindo assim sua resistência aos carregamentos e demais esforços, independente dos fatores adversos aos quais esteja sujeita.

Segundo Valdir Pignatta (2001) “[...]Uma estrutura considerada segura, em condições normais de carregamento, é aquela que tem grande probabilidade de resistir aos esforços

normais provenientes das ações externas, por exemplo, do vento e da gravidade [...]. Uma estrutura considerada segura na condição excepcional de um incêndio é aquela que, com ou sem proteção contra incêndio, tem grande probabilidade de resistir aos esforços solicitantes em temperatura elevada, de forma a evitar o seu colapso”.

Com o objetivo de alcançar padrões aceitáveis de resistência, a norma brasileira define parâmetros de dimensionamento e proteção passiva das estruturas, porém, é premente a necessidade de se conhecer mais sobre esse assunto.

Outro fator importante, neste contexto, são as reformulações e mudanças ocorridas na legislação de segurança contra incêndio e pânico em Minas Gerais, de acordo com a Lei 14.130/01, regulamentada pelo Decreto 44.270/06, que estabelecem aspectos importantes a serem observados, seguindo uma tendência mundial.

Toda a legislação anterior que regia a questão da segurança contra incêndio era obsoleta e não estabelecia aspectos técnicos importantes e indispensáveis, porém a nova legislação faz exigências pautadas em normas e fundamentos técnicos importantes, mais realistas e em consonância com as Normas Brasileiras Regulamentadoras.

1.4 Desenvolvimento

A revisão bibliográfica aqui apresentada possibilita entender um pouco melhor os aspectos relacionados à segurança contra incêndios nas edificações, bem como o comportamento do fogo, a dinâmica dos incêndios e todo o arcabouço de informações relacionadas com a prevenção dos incêndios, com foco voltado à proteção estrutural das edificações construídas com utilização do aço.

Desta forma, pretende-se apresentar dados importantes que abordam os aspectos construtivos relevantes na adoção de medidas que aumentem a resistência do aço frente aos incêndios.

O Capítulo 2 trata de assuntos importantes referentes à segurança contra incêndios e os principais aspectos referentes a projetos, o conceito de *Performance-based* e uma breve visão da segurança contra incêndio em Minas Gerais.

No Capítulo 3 são tratados assuntos de grande relevância, referente aos fundamentos e comportamento dos incêndios, como seus aspectos físicos e químicos, que interferem no seu desenvolvimento, formas de transferência de calor e seus efeitos.

O Capítulo 4 aborda aspectos referentes à carga de incêndio, a classificação de risco das edificações e outros fatores relevantes.

No Capítulo 5 são descritos aspectos importantes relativos à dinâmica dos incêndios, suas fases ou estágios e os fatores que influenciam diretamente nesta dinâmica.

O Capítulo 6 contempla aspectos referentes à elevação da temperatura no aço, como este se comporta e a relevância destes fatores, na sua resistência e conseqüentemente, nas estruturas.

Após analisar as informações obtidas nos capítulos anteriores, serão abordados aspectos de grande relevância com referência a segurança estrutural das edificações, no Capítulo 7.

No Capítulo 8 será explorada a questão dos materiais de proteção térmica, suas características, aspectos importantes referentes ao seu comportamento frente ao fogo, sua eficiência e viabilidade técnica.

A utilização das ferramentas computacionais que permitirão a realização de simulações com o objetivo de testar os materiais de proteção será descrita no Capítulo 9. Serão apresentados de forma minuciosa os softwares *Smart-Fire* e *Thersys*. Neste capítulo serão realizadas ainda, as simulações que possibilitarão a obtenção dos resultados fundamentais para análise e conclusão do trabalho.

O Capítulo 11 permitirá descrever de forma conclusiva, todos os aspectos observados durante o trabalho, pelo que se espera contribuir com as pesquisas realizadas sobre os sistemas construtivos estruturados em aço.

2

SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS

2.1 Introdução

Neste capítulo são tratados assuntos importantes referentes à segurança contra incêndios e os principais aspectos referentes a projetos e parâmetros legais estabelecidos pelos códigos.

A segurança dos ocupantes de edificações dependerá de vários aspectos relativos à elaboração de projetos e execução das obras, com preocupação especial voltada para se evitar o seu colapso estrutural e a propagação do fogo.

Deve-se considerar ainda, que as pessoas sempre esperam que seus lares e locais de trabalho estejam seguros. Porém, fortuitamente, os incêndios podem ocorrer em vários tipos de edificações.

O fogo é uma força com grande poder destrutivo que já ocasionou milhares de mortes em todo o mundo, causando perdas econômicas também consideráveis.

Desta forma, somando-se o poder do fogo e a necessidade de proteger as pessoas e as propriedades da destruição, a questão da segurança contra incêndio tem gradativamente ocupado local de destaque em nível mundial, exigindo uma atenção maior das autoridades e profissionais da construção civil em geral.

2.2 Segurança contra incêndios

Atualmente, a segurança contra incêndio tem expandido como ciência multidisciplinar, que envolve muitos campos da engenharia, requerendo uma integração importante de diferentes áreas e esforços.

Muitas vidas e perdas econômicas podem ser poupadas se os incêndios forem controlados na sua fase inicial, sendo fundamental para isto, a utilização de recursos tecnológicos que possibilitem a detecção, a extinção e o controle efetivo da propagação do calor, dos vapores e gases e que permitam garantir além da integridade estrutural da edificação, a saída segura das pessoas para o meio externo ou área de refúgio.

Sob esses aspectos, pode-se afirmar que o desenvolvimento de projetos inteligentes e a utilização de materiais adequados na construção das edificações são fundamentais na segurança contra incêndios.

Para avaliar os requisitos necessários à segurança contra incêndio é extremamente importante se estabelecer as prioridades e estratégias para se prover de segurança uma edificação. Sob este enfoque, a resistência estrutural contra incêndio tem um importante papel.

O objetivo mais comum na segurança contra incêndios é, indiscutivelmente a garantia de rotas de fuga seguras para que os ocupantes das edificações possam deixar o interior do prédio sem que sejam afetados pela fumaça ou calor e, em consequência disto, ter suas vidas preservadas.

Em um segundo momento, a proteção das propriedades e bens, passa a ser também importante. Deve-se considerar a própria estrutura da edificação já sob novo enfoque, desta vez, com o objetivo de se evitar os danos materiais e financeiros.

Neste caso, a previsão de recursos extras de proteção, que permitam a reutilização da edificação após a ocorrência do incêndio é fundamental.

Alguns tipos de edificação têm características vitais para as pessoas. A proteção da vida é extremamente importante, mas o impacto que teria um incêndio que destruísse completamente o mais importante hospital de pronto-socorro de uma grande metrópole, sem dúvida iria causar indiretamente a perda de outras vidas, de pessoas que deixariam de ser socorridas em caso de acidentes, por exemplo.

Também seria catastrófico um incêndio que destruísse os prédios das empresas de saneamento básico, ou de distribuição de energia elétrica e muitos outros de importância vital para a sociedade.

Sendo assim, considerar que é de fundamental importância a proteção do patrimônio é necessário e mostra que, num segundo momento, este seria o aspecto mais importante a ser observado, e ainda, que os projetistas devem se preocupar com a implantação de meios que vão além de salvar vidas, e que contribuam para a minimização dos impactos causados pelos incêndios.

2.3 Performance-based

Até recentemente, a maioria dos projetos era baseada nas prescrições existentes nos códigos dos municípios, códigos estaduais, ou ainda em padrões rígidos adotados por normas nacionais e internacionais, que estabeleciam critérios para a segurança contra incêndio.

Atualmente, muitos países têm adotado o conceito de *performance-based*, que permite que os projetistas adotem diferentes estratégias de segurança, observando-se para tal, aqueles recursos que se adequam melhor a cada caso.

Em termos gerais, *performance-based* é um conceito importante que permite ao projetista ter a liberdade de adequar as exigências rígidas dos códigos às medidas e recursos mais convenientes a cada tipo de edificação, observando-se aspectos tais como tipo de ocupação e outras características construtivas (BUCHANAN, 2002).

O conceito de *performance-based* não é totalmente novo e pode ser compreendido facilmente se for observado o seguinte exemplo: se um código especifica que determinado tipo de edificação deve ter um piso que resista a duas horas de incêndio, o projetista tem a liberdade de selecionar uma grande variedade de sistemas que atendam a este requisito.

Logo, pode-se concluir que esta é uma forma de se desenvolver um projeto dentro do aceitável e ao mesmo tempo, exigido pelos códigos, porém com certa liberdade para projetar um sistema que seja mais adequado a cada caso específico.

Segundo BUCHANAN (2006), no desenvolvimento de novos códigos, muitos países têm adotado níveis diferenciados de requisitos, conforme mostrado na figura 2.1. Estes vão desde os mais altos níveis de exigências, existindo uma legislação que especifica todas as metas de proteção, objetivos funcionais e performance requerida que devem estar incorporadas em todas as edificações, até níveis baixos de proteção, existindo uma seleção de meios alternativos atentando para o atendimento das exigências.

Ainda segundo o autor, existem três opções mais comuns para se cumprir com as prescrições de segurança: solução aceitável, método aprovado de cálculo ou *performance-based*.

Os métodos de cálculo ainda não são tão difundidos, ou largamente adotados, então o conceito de *performance-based* passa a ser usual em muitos países, adotando-se assim,

o simples atendimento aos objetivos requeridos para uma solução julgada aceitável. Ou ainda, o atendimento a princípios de engenharia. Projetos alternativos podem freqüentemente ser usados para justificar variações de soluções aceitáveis.

Apesar do conceito de *performance-based* ser importante, este não é muito fácil de se empregar por muitas razões, pois a proteção contra incêndio é parte de um complexo sistema com interação de muitas variáveis, com muitas possibilidades de estratégias que não são simples de se avaliar em termos quantitativos, considerando-se ainda, o leque de informações sobre o comportamento dos incêndios e outros aspectos relevantes.

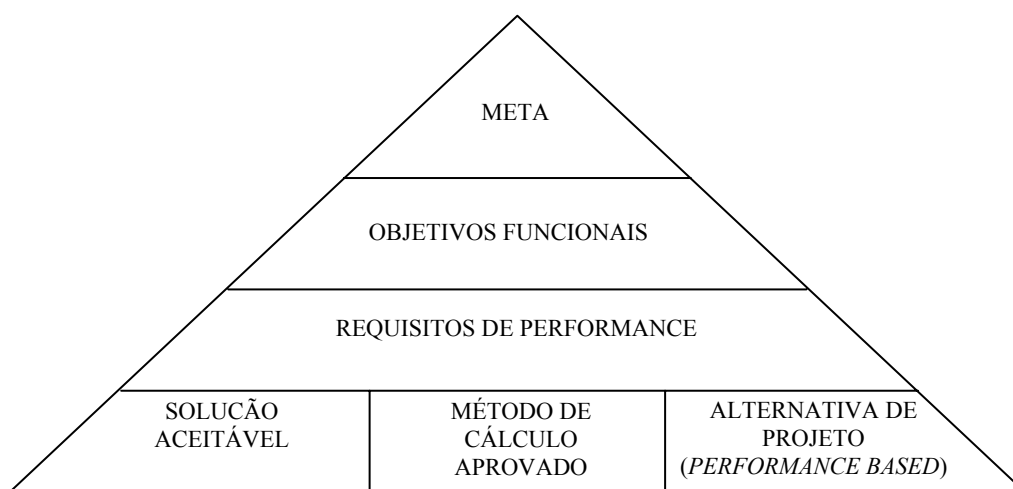


Figura 2.1 – Relação hierárquica para projeto de *performance-based*.

2.4 A segurança contra incêndio em Minas Gerais

A segurança contra incêndio em Minas Gerais teve vários capítulos, iniciando-se no ano de 1972, quando a Lei 2060 foi criada para a cidade de Belo Horizonte, sendo esta regulamentada somente em 1976, pelo Decreto 2912.

Desta época em diante, vários municípios iniciaram o processo de criação e implantação de suas leis de prevenção. Porém observa-se um grande problema, pois havia uma grande variação de parâmetros e exigências que não eram comuns a todos.

As legislações eram bastante engessadas, não permitindo que os projetistas criassem e utilizassem os recursos mais adequados para cada caso específico. As exigências eram únicas e não permitiam a utilização de recursos mais justos, sendo que em muitos casos exigia-se o emprego de um sistema superdimensionado atendendo ao mais alto grau de exigência.

Esta legislação não acompanhou o desenvolvimento da engenharia e por isso tornou-se obsoleta.

Em 19 de dezembro de 2001, a Lei 14.130 foi criada com uma abrangência muito maior para que fosse adotada em todo o Estado de Minas Gerais, tendo sido regulamentada somente em 31 de março de 2006, pelo Decreto 44.270.

Daí em diante, o Estado de Minas Gerais passou a ter uma legislação de segurança contra incêndio e pânico mais moderna e que permite uma versatilidade maior por parte dos projetistas, que podem elaborar projetos “sob medida” para cada caso, porém sem ferir os parâmetros mínimos exigidos pela lei.

A legislação estadual de Minas Gerais passa então a ter um novo formato, criando uma nova perspectiva tanto para a segurança, como para os projetistas que agora têm uma certa liberdade para projetar, fundamentado nas alternativas existentes na Lei e nos parâmetros mínimos de exigência, porém com mais responsabilidade.

Foram ainda, criadas as Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros, que estabelecem procedimentos para casos específicos, permitindo que a lei seja ajustada às necessidades da segurança, sem que haja a burocracia de se aprovar nova legislação, e suprimindo melhor de informações os projetistas, considerando casos muito específicos.

Atualmente são trinta e seis Instruções Técnicas que tratam assuntos que vão desde procedimentos administrativos referentes aos trâmites dos projetos, até a segurança estrutural das edificações. Para o presente trabalho as Instruções Técnicas 06 que trata de segurança estrutural e a 09 que trata de carga de incêndio foram fundamentais.

Desta forma, a legislação atual exige que o projetista tenha um maior conhecimento sobre a prevenção contra incêndio e pânico, sendo necessário para tal, que se conheça desde tecnologias modernas de segurança, até fundamentos importantes relativos ao comportamento do fogo e etc.

Não é suficiente mais que se siga somente o que está escrito na legislação, pois se há a pretensão de elaborar um projeto eficiente, eficaz e econômico, deve-se optar por meios que se adequem a cada edificação, considerando sua ocupação, as atividades que são ali desenvolvidas e o público existente.

Para que o profissional de engenharia possa desenvolver projetos que atendam a todos os requisitos citados anteriormente e seja possível então prever meios que protejam a vida humana e que minimizem os danos causados pelos incêndios, faz-se necessário entender muito mais do que a própria lei. É necessário que este conheça como o fogo se comporta durante os incêndios, suas características físico químicas e outras informações relevantes que serão apresentadas a seguir.

3

TEORIA DO FOGO E TRANSFERÊNCIA DE CALOR

3.1 Introdução

O fogo ainda é um mistério para humanidade e ao mesmo tempo uma ferramenta maravilhosa, porém para que se possa entendê-lo é fundamental que se estude toda a teoria que o envolve, desde épocas mais remotas até os dias atuais, bem como, alguns conceitos básicos da física.

Atualmente sabe-se que o fogo é uma reação química exotérmica entre uma substância (o combustível) e um gás (o comburente), usualmente oxigênio, que necessita de uma energia de ativação (calor), para que se inicie o processo.

Uma vez iniciado este processo, ele se manterá por intermédio de um fenômeno conhecido como reação em cadeia e produzirá outros subprodutos bem diferentes daqueles combinados anteriormente (oxigênio e combustível).

Alguns historiadores afirmam que a teoria do flogisto pode ser considerada como a primeira grande teoria da química moderna.

No início do século XVIII, o médico e químico Georg Ernst Stahl (1660 – 1734), seguindo as idéias de seu mestre Johann Joachim Becher (1635 – 1682), propôs uma explicação conjunta sobre a calcinação dos metais, a combustão e a respiração dos animais, baseada na existência de um “princípio da combustibilidade” a qual denominou “flogisto”⁵.

De acordo com essa teoria, acreditava-se que os corpos combustíveis possuíam uma matéria chamada flogisto que era liberada ao ar durante a queima. Flogisto vem do grego e significa inflamável. A absorção dos flogistos do ar era feita pelas plantas. Stahl também afirmava que, pelo fato da oxidação dos metais ser um processo análogo à combustão, também devia envolver perda de flogisto.

De maneira semelhante, o aquecimento dos óxidos metálicos, também chamados de cal viva, com carvão devolvia-lhes o flogisto. Assim sendo, concluiu que a cal viva deveria ser um elemento enquanto que o metal seria um composto.

Segundo a teoria, os metais deveriam perder flogisto quando fossem expostos ao aquecimento, mas de acordo com os próprios defensores da teoria, esses ganhavam peso, o que levou Lavoisier a refletir sobre o que haveria acontecido com o elusivo flogisto.

Lavoisier inicialmente verificou que o óxido de ferro, quando aquecido, se transformava em ferro, perdendo peso e liberando gás. Chamou esse gás oxigênio (que produz ácido). Então, concluiu que o fenômeno da combustão deveria ser interpretado ao contrário do que ensinava a teoria flogística: ao invés de perder flogisto, elemento imaginário, os corpos quando se queimavam ou se oxidavam, absorviam oxigênio.

5. http://pt.wikipedia.org/wiki/Teoria_do_flogisto

Há algum tempo, a combustão era explicada pela teoria do triângulo, pois acreditava-se que ela somente ocorreria se existissem basicamente três elementos, conhecidos como elementos essenciais do fogo, sendo estes, o combustível, o comburente e o calor.

Porém, nos dias atuais, a teoria do tetraedro ou quadrilátero do fogo passou a ser a mais aceita, acrescentando-se aos três elementos anteriores, um quarto elemento, conhecido como reação em cadeia.

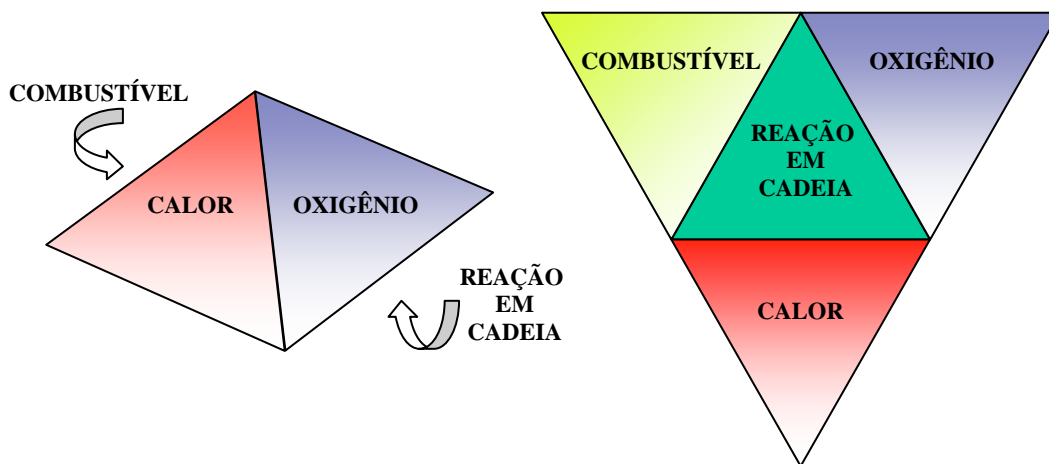


FIGURA 3.1: Tetraedro do fogo

Após entender o que é o fogo e a combustão, conforme descrito anteriormente, verifica-se ainda, a necessidade de se conhecer alguns conceitos sobre o seu comportamento, isto inclui o entendimento da natureza química e física do fogo, formas de transmissão do calor, composição e características dos combustíveis.

3.2 Combustível

Os combustíveis são substâncias capazes de alimentar a combustão, fornecendo o campo para a propagação do fogo.

Podem ser sólidos, líquidos e gasosos, porém, no processo de queima, a maioria dos combustíveis necessita passar para o estado gasoso, para que, em combinação com o comburente (oxigênio), produzam o que é conhecido como “mistura ideal”, ou seja, deve

haver uma proporção exata de combustível no estado gasoso e oxigênio para que seja possível a ocorrência da combustão.

A velocidade da queima de um combustível dependerá da sua capacidade de se combinar com oxigênio sob a ação do calor e da sua fragmentação (área de contato com o oxigênio).

A maioria dos combustíveis sólidos transforma-se em vapores e, então, reagem com o oxigênio. Outros sólidos, tais como o ferro, parafina e outros materiais, primeiro transformam-se em líquidos, e posteriormente em gases, para então se queimarem.

Quanto maior a superfície exposta, mais rápido será o aquecimento do material e, conseqüentemente, o processo de combustão. Como exemplo: uma barra de aço exigirá muito calor para queimar, mas se transformada em palha de aço, queimará com facilidade. Assim sendo, quanto maior a fragmentação do material, maior será a velocidade da combustão.

No caso dos líquidos inflamáveis é importante notar que a maioria é mais leve que água e, portanto, flutuam sobre esta.

Outra propriedade a ser considerada é a solubilidade do líquido, ou seja, sua capacidade de misturar-se à água. Os líquidos derivados do petróleo, hidrocarbonetos, têm pouca solubilidade, ao passo que líquidos como álcool, acetona, solventes polares, têm grande solubilidade, isto é, podem ser diluídos até um ponto em que a mistura deixe de ser inflamável.

A volatilidade dos líquidos é de grande importância, principalmente considerando que quanto mais volátil for o líquido, maior a possibilidade de haver fogo, ou mesmo explosão. Consideram-se voláteis os líquidos que liberam vapores a temperaturas menores que 20° C.

Os gases não têm volume definido, tendendo, rapidamente, a ocupar todo o ambiente em que estão contidos. Para o gás queimar, há necessidade de que esteja em uma mistura ideal com o ar atmosférico e, portanto, se estiver numa concentração fora de determinados limites, não queimará.

Cada gás, ou vapor, tem seus limites próprios. Por exemplo, se num ambiente há menos de 1,4% ou mais de 7,6% de vapor de gasolina, não haverá combustão, pois a concentração de vapor de gasolina nesse local está fora do que se chama de mistura ideal, ou limites de inflamabilidade; isto é, ou a concentração deste vapor é inferior ou é superior aos limites de inflamabilidade.

Isto pode ser verificado na figura 3.2, que representa exatamente os limites inferior e superior de combustibilidade da gasolina.

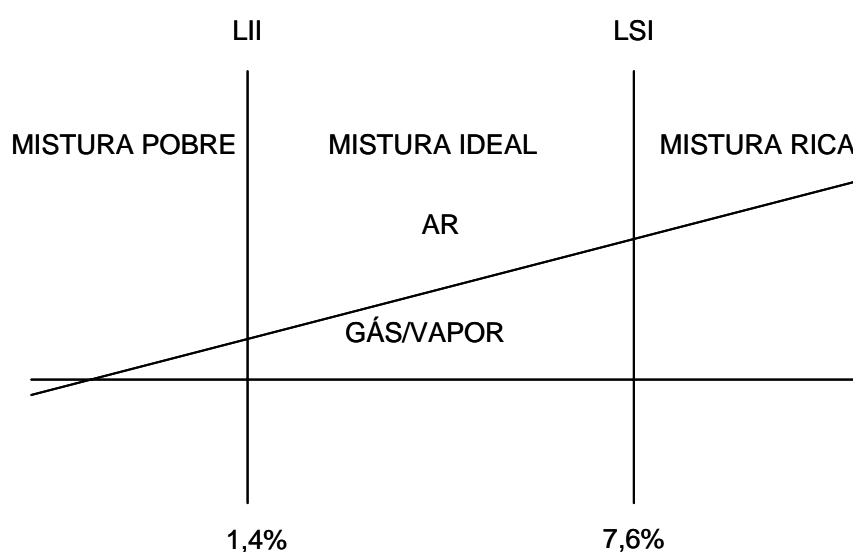


Figura 3.2: Diagrama de inflamabilidade da gasolina (Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo)

Os pontos LII (limite inferior de inflamabilidade) e LSI (limite superior de Inflamabilidade) podem ter outras denominações, tais como, Limite Inferior e Superior de Combustibilidade (LIC e LSC), ou ainda, Limite Inferior e Superior de Explosividade (LIE e LSE).

No caso específico da gasolina, que foi citada como exemplo, concentração abaixo de 1,4% é chamada de mistura pobre, pois neste caso há um percentual de oxigênio muito alto e pouca presença do gás combustível. No caso de se ter uma concentração muito alta de vapor de gasolina e pouco oxigênio, tem-se então, o que se chama de mistura rica. A faixa considerada entre estes dois pontos é conhecida como mistura ideal.

Estes percentuais vão variar de acordo com cada tipo de combustível. Na tabela 3.1, pode-se verificar alguns valores de limites inferior e superior de inflamabilidade, específicos.

TABELA 3.1: Limites inferiores e superiores de inflamabilidade

COMBUSTÍVEIS	CONCENTRAÇÃO	
	<i>Limite inferior de inflamabilidade</i>	<i>Limite superior de inflamabilidade</i>
Metano	1,4%	7,6%
Propano	5,0%	17,0%
Hidrogênio	4,0%	75,0%
Acetileno	2,0%	85,0%

Fonte: Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo

3.3 Calor

É a forma de energia mais comum encontrada na terra. O calor está diretamente relacionado com a elevação de temperatura, gerada da transformação de outra energia, através de processos físicos ou químicos, podendo ser estas: energia química, energia elétrica, energia mecânica e energia nuclear.

3.3.1 Efeitos do calor

O calor produz efeitos físicos e químicos nos corpos, além de efeitos fisiológicos nos seres vivos. Em consequência do aumento de intensidade do calor, os corpos apresentarão sucessivas modificações, inicialmente físicas e depois químicas.

Tomando como exemplo o aço, ao aquecê-lo, este, inicialmente, aumenta sua temperatura e, a seguir, o seu volume. Mantido o processo de aquecimento, o aço muda de cor e perde a forma até atingir o seu ponto de fusão, quando sofre transformação em seu estado físico de sólido para líquido. Se o processo de aquecimento perdurar por mais tempo, este gaseifica-se e queima em contato com o oxigênio.

Dentre os efeitos mais comuns do calor, com relevância para o tema proposto neste trabalho, pode-se citar:

a) Elevação de temperatura

Este fenômeno se desenvolve com maior rapidez nos corpos considerados bons condutores de calor, como os metais e mais vagarosamente nos corpos tidos como maus condutores de calor, como por exemplo, o amianto.

O conhecimento sobre a condutibilidade de calor dos diversos materiais é de grande valia na proteção passiva de elementos estruturais.

b) Dilatação térmica

Todos os corpos sofrem ação de dilatação e contração de acordo com o aumento e diminuição da temperatura à qual se encontram expostos.

Quanto se esquentam um corpo ou uma substância, esta tende a aumentar seu volume (expansão térmica). E ao ser resfriada, esta tende a diminuir seu volume (contração térmica).

Existem algumas substâncias que não estão sujeitas a estes fenômenos, como é o caso da água que submetida à pressão atmosférica e entre 0°C e 4°C, não se comporta desta forma.

Esse fenômeno de expansão e contração está relacionado com o aumento ou redução da energia cinética das moléculas que compõem o material. Ao aquecer um corpo aumenta-se a energia cinética das moléculas e, conseqüentemente, a agitação das moléculas, fazendo com que elas se afastem uma das outras.

Desta forma, o espaço entre as moléculas aumenta e o volume do corpo também aumenta. Portanto, a variação de qualquer dimensão linear de um corpo com a temperatura se chama dilatação térmica.

Pode-se classificar a dilatação térmica como linear, superficial ou volumétrica. Porém, em se tratando de estruturas metálicas em situação de incêndio, é importante dar uma atenção especial para o conceito de dilatação linear que é a quantificação do aumento ou redução do comprimento inicial (ℓ_0) do corpo em função da variação de temperatura.

No caso da dilatação térmica linear, verifica-se experimentalmente que o acréscimo linear é proporcional ao comprimento inicial e à variação de temperatura. A constante de proporcionalidade que transforma essa relação em uma igualdade é chamada de *Coefficiente de Dilatação Linear*, α , (dependente do material). Assim pode-se escrever o acréscimo de comprimento como:

$$\Delta\ell = \ell_0 \alpha \Delta T \quad (3.1)$$

onde:

$\Delta\ell$ é o aumento de volume linear

ℓ_0 é o comprimento inicial

α é o coeficiente de dilatação linear

ΔT é a variação de temperatura ($T_f - T_i$)

A tabela 3.2 apresenta o coeficiente de dilatação linear de alguns materiais.

TABELA 3.2: Coeficientes de dilatação linear de alguns materiais

Substância	Coeficiente de dilatação linear (α) em $^{\circ}\text{C}^{-1}$
Aço	$1,1 \times 10^{-5}$
Alumínio	$2,4 \times 10^{-5}$
Cobre	$1,7 \times 10^{-5}$
Ferro	$1,2 \times 10^{-5}$
Latão	$2,0 \times 10^{-5}$
Ouro	$1,4 \times 10^{-5}$
Prata	$1,9 \times 10^{-5}$
Vidro comum	$0,9 \times 10^{-5}$
Vidro temperado	$0,3 \times 10^{-5}$
Zinco	$6,4 \times 10^{-5}$

Fonte: <http://br.geocities.com/galileon/2/dilatacao/dilat.htm>

A dilatação térmica superficial diz respeito ao aumento da área do corpo submetido ao calor e é obtida por:

$$\Delta A = A_0 \cdot \beta \cdot \Delta T \quad (3.2)$$

onde:

ΔA é a variação da área superficial do corpo

A_0 é a área inicial do corpo

β é o coeficiente de dilatação superficial

ΔT é a variação de temperatura ($T_f - T_i$)

Em se tratando de dilatação térmica volumétrica, o que é avaliado é o quanto o corpo aumentou de volume ao ser submetido ao calor, sendo obtida por:

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T \quad (3.3)$$

onde:

ΔV é o aumento de volume do corpo

V_0 é o volume inicial do corpo

γ é o coeficiente de dilatação volumétrica

ΔT é a variação de temperatura ($T_f - T_i$)

A tabela 3.3 apresenta o coeficiente de dilatação volumétrica de alguns materiais.

TABELA 3.3: Coeficientes de dilatação volumétrica de alguns materiais

Substância	Coeficiente de dilatação linear(γ) em $^{\circ}\text{C}^{-1}$
Álcool	$100,0 \times 10^{-5}$
Gases	$3,66 \times 10^{-3}$
Gasolina	$11,0 \times 10^{-4}$
Mercúrio	$18,2 \times 10^{-5}$

Fonte: <http://br.geocities.com/galileon/2/dilatacao/dilat.htm>

c) Mudança do estado físico

Com o aumento do calor, os corpos tendem a mudar seu estado físico: alguns sólidos transformam-se em líquidos (liquefação), líquidos se transformam em gases (gaseificação) e há sólidos que se transformam diretamente em gases (sublimação).

Isso se deve ao fato de que o calor faz com que haja maior espaço entre as moléculas e estas, separando-se, mudam o estado físico da matéria.

d) Transformação química

Transformação química é aquela em que uma substância transforma-se em outra. A madeira, quando aquecida, não libera moléculas de madeira em forma de gases, e sim outros gases, diferentes em sua composição, das moléculas originais de madeira. Essas moléculas são menores e mais simples, por isso têm grande capacidade de combinar com outras moléculas, as de oxigênio, por exemplo.

3.3.2 Transmissão de calor

Uma das principais preocupações durante um incêndio é, sem dúvida, a propagação do calor. É desta forma que o incêndio atingirá outras áreas dentro das edificações, causando danos generalizados.

A transferência do calor de um ponto ou de um objeto a outro é um conceito básico no estudo do fogo. A taxa em que o calor é transferido está relacionada com o diferencial da temperatura entre os corpos. Quanto maior a diferença da temperatura, maior será a taxa de transferência.

Ao se propagar, o calor atinge todos os elementos construtivos de um edifício, comprometendo sua estrutura e os demais componentes deste.

O calor pode ser transferido de um corpo a outro através de três mecanismos, ou três formas: condução, radiação e convecção.

Durante um incêndio em uma edificação, estes três mecanismos podem ser observados, de forma isolada ou combinada. Para tal, sistemas ou métodos de proteção ativa e passiva devem ser previstos, como forma de confinar o incêndio no seu ponto de origem e evitar assim, sua propagação dentro da edificação.

3.3.2.1 Condução

Condução é a transmissão de calor de molécula para molécula de um dado material, da região mais quente para a região mais fria.

A transferência de energia ocorre, uma vez que a região de maior temperatura possui moléculas vibrando com intensidade maior (maior energia cinética). Com uma vibração mais acentuada, cada molécula transmite energia para a molécula vizinha que passa a vibrar mais intensamente e esta transmite energia para a seguinte e assim sucessivamente.

Se uma das extremidades de uma barra metálica for colocada numa chama, enquanto segura-se a outra com a mão, sente-se que esta se torna cada vez mais quente, embora não esteja em contato direto com o fogo.

Desta forma, o calor atinge o extremo mais frio da barra por condução através do material. Somente haverá condução de calor num corpo quando suas partes tiverem temperaturas diferentes. O sentido do fluxo de calor é sempre dos pontos de temperatura mais alta para os de mais baixa.

Diz-se que a energia se transfere por condução e que a taxa de transferência de calor por unidade de área é proporcional ao gradiente de temperatura, conforme a equação de Fourier⁶ com a constante de proporcionalidade inserida.

⁶ Jean-Baptiste Joseph Fourier (21 de Março, 1768 - 16 de Maio, 1830). Matemático e físico francês, grande contribuidor no campo da egiptologia celebrado por iniciar a investigação das séries de Fourier e a sua aplicação aos problemas da condução do calor.

Fourier descreveu pela primeira vez o processo de transmissão do calor em 1802, em seu trabalho intitulado *Theorie Analytique de la Chaleur* (Teoria Analítica do Calor) que é considerado uma obra prima da física-matemática.

A equação, porém, descreve o fenômeno de transferência de calor por condução em regime permanente, ou seja, a temperatura não apresenta variação com o tempo.

$$q_x = -\lambda A \frac{d\theta}{dx} \quad (3.4)$$

Onde:

q_x é a taxa de transferência de calor (W);

λ é a constante de condutividade térmica (W/m°C);

A é a área (m²);

$d\theta/dx$ é o gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor, θ expresso em graus celsius (°C) e x em metro (m).

Obs.: O sinal negativo é inserido à formula para satisfazer o segundo princípio da termodinâmica, isto é, o calor deve fluir no sentido da temperatura decrescente.

Para os casos em que o regime não é permanente, isto é, ocorre a variação da temperatura em função do tempo, tem se:

$$\rho c \frac{d\theta}{dt} = \frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{d\theta}{dx} \right) \quad (3.5)$$

Onde:

ρ é a massa específica do material (kg/m³);

c é o calor específico do material (J/kg°C);

λ é a condutividade térmica do material (W/m°C).

A tabela 3.4 apresenta alguns coeficientes de materiais usados na construção civil, para isolamento térmico.

TABELA 3.4: Condutividade térmica de alguns materiais usados no isolamento térmico

Material	Temperatura de serviço θ (°C)	Condutividade Térmica λ (W/m°C)
Lã de vidro	0 a 50	0,033 – 0,042
Lã de rocha (placas)	10 a 700	0,032 – 0,216
Lã de rocha (mantas)	10 a 700	0,030 – 0,286
Lã de rocha (feltros)	10 a 150	0,039 – 0,066
Lã de rocha (coquilhas)	50 a 350	0,036 – 0,106
Borracha expandida	-40 a 40	0,028 – 0,044
Poliestireno extrudado	-40 a 40	0,028 – 0,044
Poliestireno expandido	20	0,033 – 0,047
Silicato de cálcio	150 a 300	0,052 -0,067

Fonte: www.dem.uminho.pt/CUnits/MEC/S-E&E2/ReservadoE&E2/Textos/IsolamentoTérmico.pdf

Os materiais que possuem baixa condutividade de temperatura são usualmente empregados como isolantes térmicos. O isolamento é descrito em termos de resistência térmica (R_t).

$$R_t = \frac{1}{\lambda} \quad (3.6)$$

3.3.2.2 Convecção

O termo convecção aplica-se à transmissão ou transferência de calor por movimento dos fluidos, gases ou líquidos.

Nos incêndios, de uma forma geral, a convecção é responsável pela propagação vertical do calor e conseqüentemente, do próprio incêndio, uma vez que ocorre o transporte ascendente de vapores e fumaça. Neste caso é muito comum observar a presença de uma faixa muito alta de calor junto aos tetos dos compartimentos.

O calor perdido ou ganho por uma superfície a uma certa temperatura, em contato com um fluido a outra temperatura, depende de vários fatores, tais como: se a superfície é plana ou curva; se a superfície é horizontal ou vertical; se o fluido em contato com a superfície é um gás ou um líquido; a densidade, a viscosidade, o calor específico e a condutividade térmica

do fluido; se a velocidade do fluido é suficientemente pequena para que o escoamento seja lamelar, ou grande para que entre em regime turbulento; se ocorre evaporação, condensação ou formação de películas.

Todavia, se o movimento é criado pelo fluxo ascensional de um fluido aquecido próximo a uma superfície quente, a convecção é dita natural.

O procedimento adotado nos cálculos práticos consiste, inicialmente, em definir um coeficiente de convecção, por meio da seguinte equação:

$$q = hA.\Delta T \quad (3.7)$$

Onde:

q é a taxa de transferência de calor (W);

h é o coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m² °C);

A é a área (m²);

ΔT é a variação de temperatura.

3.3.2.3 Radiação

O termo radiação refere-se à emissão contínua de energia da superfície de todos os corpos. É chamada de energia radiante e tem a forma de ondas eletromagnéticas.

Essas ondas propagam-se com a velocidade da luz e são transmitidas através do vácuo ou do ar. Quando atingem um corpo que não lhes é transparente, como por exemplo as paredes de um compartimento, elas são absorvidas.

A energia radiante emitida por uma superfície, por unidade de tempo e de área, depende da natureza e da temperatura do corpo. Medidas experimentais da taxa de emissão de energia radiante da superfície de um corpo foram feitas por John Tyndall (1820-1893) e Josef Stephan (1835-1893), e em 1884, deduções teóricas foram realizadas por L. Boltzmann. Stephan, em 1879, concluiu que a taxa de emissão poderia ser expressa pela relação:

$$R = e.\sigma.T^4 \quad (3.8)$$

Onde:

R é a emitância radiante (W/m^2);

e é a emissividade da superfície radiante;

σ é a constante de Stephan Boltzmann ($5,669 \times 10^{-8} W/m^2 \text{ } ^\circ C^4$);

T é a temperatura da superfície radiante ($^\circ C$).

3.3.3 Pontos de temperatura

Para que ocorra a combustão, os combustíveis são previamente transformados pelo calor, e a partir desta transformação, é que se combinam com o oxigênio, resultando em uma mistura que permite a ocorrência da combustão, conhecida como mistura ideal.

Essa transformação desenvolve-se em diferentes temperaturas, à medida que o material vai sendo aquecido. Após atingir determinada temperatura, este material começa a liberar vapores que irão entrar em combustão se houver uma fonte externa de calor.

Neste ponto, chamado de ponto de fulgor, as chamas não se mantêm, devido à pequena quantidade de vapores.

Prosseguindo com o aquecimento do material, atinge-se uma temperatura em que os vapores desprendidos entram em contato com uma fonte externa de calor, iniciando a combustão, porém, desta vez, esta se mantém mesmo sem a interferência da fonte externa de calor. Esse ponto é chamado de ponto de combustão.

Indo mais adiante e continuando a aquecer o material, atinge-se um ponto no qual o combustível exposto ao ar, entra em combustão sem que haja fonte externa de calor. Esse ponto é chamado de “ponto de ignição”. Neste caso então, ocorre a combustão de forma espontânea, sem que haja necessidade de uma fonte de calor externa.

Esses fenômenos são observados com frequência nos incêndios, quando o calor contido em um determinado ambiente passa a aquecer os materiais existentes naquele local, fazendo com que ocorra desprendimento de vapores que, em contato com o oxigênio formarão uma mistura propícia à ocorrência da combustão (mistura ideal).

3.4 Comburente

O comburente, por sua vez, é o elemento que possibilita vida às chamas e intensifica a combustão. O mais comum é o oxigênio, que compõe o ar atmosférico com 21% de concentração, sendo 78% de nitrogênio e 1% de outros gases.

Quando a porcentagem de oxigênio do ar do ambiente passa de 21% para a faixa compreendida entre 16% e 8%, a queima torna-se mais lenta, notam-se brasas e não mais chamas. Quando o oxigênio contido no ar do ambiente atinge concentração menor que 8%, não há combustão.

Este tipo de informação é de grande relevância para que se compreenda como os incêndios se desenvolvem, sua dinâmica e principalmente como se comportam em ambientes confinados.

3.5 Reação em cadeia

A reação em cadeia torna a queima auto-sustentável. O calor irradiado das chamas atinge o combustível e este é decomposto em partículas menores, que se combinam com o oxigênio e queimam, irradiando outra vez calor para o combustível, formando um ciclo constante.

Para que se possa entender perfeitamente o que é a reação em cadeia, pode-se tomar como exemplo uma vela, observando-se o seguinte: a energia de ativação, na forma de calor, proveniente de um palito de fósforo aceso, começa a derreter a cera no pavio; quando esta esquenta, forma longas cadeias de hidrocarbonetos; as moléculas de carbono e hidrogênio se rompem e são levadas pelo pavio através de ação capilar, passando como vapor para o ar; quando este vapor sobe na chama, fica mais quente e se decompõe novamente, reagindo de forma violenta com o ar atmosférico, produzindo água, óxido de carbono e mais calor;

os átomos de carbono excedentes ou fuligem absorvem parte desta energia e liberam luz amarelada; o calor remanescente é irradiado de volta na vela, fazendo mais cera se derreter.

Não é o pavio ou a cera que se queimam, mas o vapor combustível que a cera quente está liberando; este por sua vez reage com o ar, formando assim o que é conhecido como reação em cadeia.

Este fenômeno cíclico é então parte fundamental no processo de combustão e, portanto, passa a compor os elementos essenciais do fogo.

Em resumo, os quatro elementos essenciais do fogo apresentados anteriormente (o combustível, o calor, o comburente e a reação em cadeia), além de propiciarem o desenvolvimento da combustão, têm uma influência grande no desenvolvimento dos incêndios, visto que suas variações de proporção, forma e quantidade darão aos incêndios características diferentes para cada cenário.

No capítulo seguinte, a questão dos combustíveis será tratada por uma ótica um pouco diferente, visto que especialmente o combustível, possui uma influência preponderante na previsão de meios e classificação de risco das edificações sendo este parte integrante do conceito de carga de incêndio.

4

CARGA DE INCÊNDIO

4.1 Introdução

Os maiores potenciais de combustíveis nas edificações incendiadas são os materiais orgânicos, materiais de origem vegetal e animal, além dos derivados de petróleo.

Estes materiais podem ser considerados como sendo temporários, tais como mobília e equipamentos ou permanentes, quando integram a edificação, podendo fazer parte inclusive da sua estrutura.

Cada um destes materiais possui características específicas que irão interferir diretamente na produção de vapores e gases, na quantidade de calor liberado e, conseqüentemente, no comportamento do incêndio.

A taxa de calor liberada na queima de materiais depende de vários fatores, tais como o calor necessário para decompor os combustíveis em partículas menores e a taxa de oxigênio que irá se combinar com estas partículas, tornando possível a combustão.

Se um objeto como um móvel iniciou um processo de queima livre, a taxa de calor liberada tende a incrementar exponencialmente as chamas, uma vez que este calor liberado irá incidir novamente no combustível, decompondo-o e permitindo que combine com o oxigênio e forme mistura combustível, suscetível à queima.

O pico da taxa de calor no ambiente que está queimando dependerá da geometria, da natureza do objeto e de outros fatores. Um exemplo destes valores pode ser vistos na figura 4.1.

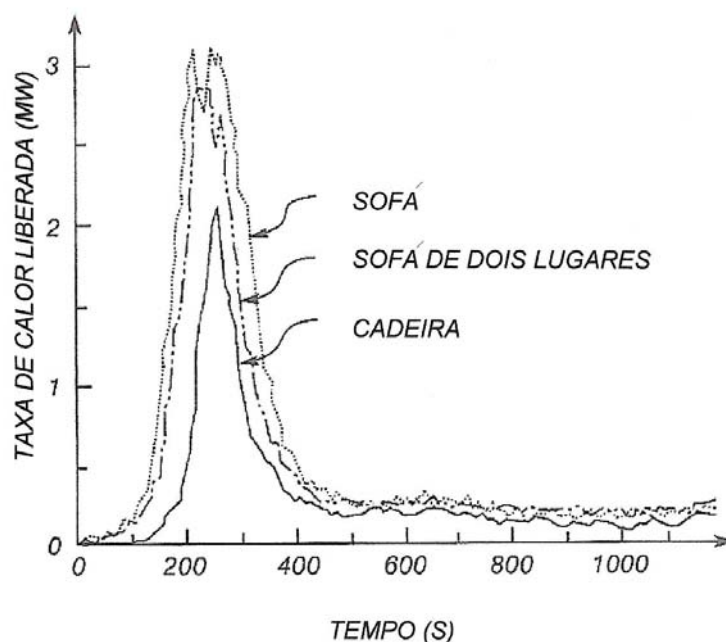


Figura 4.1: Taxa de calor liberada por itens de mobília (Buchanan 2006)

Segundo a Instrução técnica 09 do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG-IT 09, 2006), a soma das energias caloríficas possíveis de serem liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis em um espaço, inclusive os revestimentos de paredes, divisórias, pisos e tetos é denominada carga de incêndio.

De acordo com Secco (1982) a carga incêndio de um prédio é um elemento que permite avaliar teoricamente a intensidade do fogo na eventualidade de ocorrer um incêndio, portanto, faculta estabelecer uma classificação da intensidade provável de incêndios em prédios, segundo sua ocupação. Para a avaliação da carga incêndio, o fator mais importante

de ser levado em conta é o poder calorífico dos diversos combustíveis, isto é, o número de calorias despreendidas por quilo de combustível completamente queimado.

Atualmente, adota-se o conceito de densidade de carga de incêndio ou carga incêndio específica, como forma de mensurar a carga de incêndio existente nas edificações, como será apresentado posteriormente.

Segundo SILVA, (2001), as condições de segurança das estruturas de uma edificação, em situação de incêndio, são verificadas quando, durante um incêndio, a temperatura atingida pelos elementos estruturais (θ_m) for menor do que a temperatura crítica (θ_{cr}) desses elementos, sendo θ_{cr} a temperatura que causa o colapso da estrutura.

A partir da curva temperatura-tempo dos gases que envolvem as chamas, a temperatura no elemento estrutural é determinada, sendo que no caso dos gases isto dependerá de outros aspectos, dentre eles da carga de incêndio no compartimento em chamas.

4.2 Potencial calorífico específico

A taxa de calor liberado pela combustão depende da natureza do material queimado, da localização do fogo e da quantidade de ar disponível.

O potencial calorífico específico ou calor da combustão é a somatória do calor produzido durante a combustão e a unidade de massa do combustível.

Muitos sólidos, líquidos e gases possuem o potencial calorífico específico entre 15 a 50 MJ/kg.

A carga incêndio é na prevenção um fator importante, pois é uma forma de mensurar o potencial de incêndio que uma edificação possui, e está intimamente ligada às atividades desenvolvidas na edificação. É a soma das energias caloríficas possíveis de serem liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis em um espaço, inclusive os revestimentos das paredes, divisórias, pisos e tetos.

4.3 Densidade de carga de incêndio ou carga de incêndio específica

É o valor da carga de incêndio dividido pela área de piso do espaço considerado, expresso em megajoule (MJ) por metro quadrado (m²) ou em quilogramas equivalente de madeira seca.

De acordo com a carga de incêndio específica é possível determinar o risco de incêndio da edificação considerando para tal, os valores apresentados na tabela 4.1.

TABELA 4.1: Classificação das edificações e áreas de risco quanto a carga incêndio

Risco	Carga de incêndio MJ/m ²
Baixo	Até 300 MJ/m ²
Médio	Acima de Até 300 MJ/m ² até 1200 MJ/m ²
Alto	Acima de 1200 MJ/m ²

Fonte: Instrução Técnica 09 do CBMMG

Utilizando-se dos parâmetros apresentados na Tabela 4.1, pode-se então determinar o risco de incêndio da edificação, adotando-se os valores pré-estabelecidos no anexo A, desta dissertação.

4.4 Método para levantamento da carga de incêndio específica

Os valores da carga de incêndio específicas para edificações destinadas a depósitos, explosivos e ocupações especiais podem ser determinados pela seguinte expressão:

$$q_{fi} = \sum M_i \frac{H_i}{A_f} \quad (4.1)$$

Onde:

q_{fi} é o valor da carga de incêndio específica, em (MJ/m²) de área de piso;

M_i é a massa total de cada componente i do material combustível, em kg. Esse valor não poderá ser excedido durante a vida útil da edificação exceto quando houver alteração de ocupação, ocasião em que M_i deverá ser reavaliado;

H_i é o potencial calorífico específico de cada componente i do material combustível, em MJ/kg, conforme tabela 4.2;

A_f é a área de piso do compartimento, em m^2 .

TABELA 4.2: – Alguns valores de potencial calorífico específico

TIPO	H(MJ/Kg)	TIPO	H(MJ/Kg)
Acetona	30	Metano	50
Acrílico	28	Metanol	28
Algodão	18	Monóxido carbono	19
Benzeno	40	N-Butano	45
Borracha	Espuma – 37 Tiras – 32	N-Octano	44
Celulose	16	N-Pentano	45
C-Hexano	43	Palha	16
Couro	19	Papel	17
D-Glucose	15	Petróleo	41
Epóxi	34	Poliacrilonítrico	30
Etano	47	Policarbonato	29
Etanol	26	Poliéster	31
Eteno	50	Poliestireno	39
Etino	48	Polietileno	44
Fibra sintética 6,6	29	Polimetilmetacrílico	24
Grãos	17	Polioximetileno	15
Graxa lubrificante	41	Poliuretano	23
Lã	23	Polipropileno	43
Lixo de cozinha	18	Polivinilclorido	17
Madeira	19	Propano	46

Fonte: Instrução Técnica 09 do CBMMG

5

DINÂMICA DOS INCÊNDIOS

5.1 Introdução

O desenvolvimento dos incêndios nos edifícios é um assunto extremamente importante no estudo do fogo e na proteção contra os sinistros.

O estudo da temperatura dos incêndios e a produção de vapores e fumaça, gases tóxicos e o tempo de fuga dos ocupantes da edificação para local seguro, são aspectos fundamentais a serem considerados.

A dinâmica do fogo é o termo adequado para descrever o comportamento deste nas edificações durante os incêndios.

Além destes aspectos, toda a parte de caracterização dos combustíveis, de transmissão de calor, propagação dos incêndios e alguns fenômenos tais como o *Flashover*, descritos em 5.2.3, são também relevantes. Estes fenômenos serão descritos adiante.

Todos estes aspectos e fenômenos serão importantes durante o modelamento dos incêndios para a utilização do software *Smartfire* e dos cenários a serem explorados para a obtenção dos resultados pretendidos (EWER et al.,2004).

Além dos aspectos físicos e químicos citados anteriormente, é importante se chamar a atenção para outros fatores que, indiscutivelmente, possuem uma interface com os incêndios e principalmente com a prevenção.

Estes fatores vão desde o comportamento humano às medidas de controle ativo e passivo, que permitem entender a importância de cada aspecto dentro do contexto geral de um incêndio.

No quadro 5.1, pode-se verificar um processo comparativo de todos estes fatores e assim entender o contexto do que está sendo tratado.

QUADRO 5.1: Sumário de períodos em um desenvolvimento típico de incêndio

	ignição	crescimento	queima generalizada	decaimento
comportamento do fogo	queima do combustível	queima controlada de combustível	ventilação controlada na queima	queima controlada de combustível
comportamento humano	prevenção da ignição	extinção e fuga	morte	-
deteção	deteção de fumaça	deteção de fumaça e de temperatura	fumaça externa e chamas	
controle ativo	prevenção da ignição	extinção por sprinklers ou pela brigada; controle da fumaça	extinção pela brigada ou corpo de bombeiros	
controle passivo	-	seleção de materiais resistentes	provisão de resistência ao fogo e a colapsos	

Fonte: BUCHANAN – 2006

Analisando-se o quadro 5.1 verifica-se a seqüência de eventos relacionada com incêndio, com o comportamento humano e o controle ativo e passivo do fogo. Deve-se cruzar as informações da linha de título horizontal, com a linha de título vertical e assim, estabelecer uma correlação entre eles.

5.2 Dinâmica dos incêndios

Quando os quatro componentes do tetraedro do fogo se juntam, a ignição ocorre, conforme foi apresentado no capítulo 3. Para que o fogo se propague e tome dimensões maiores, o calor deve ser transmitido além do ponto inicial da combustão.

Recentemente, os estudiosos do assunto tentaram descrever o desenvolvimento de incêndios em compartimentos em estágios ou fases distintas. Estas fases são: a ignição, o crescimento, o flashover, a queima generalizada e o decaimento.

A ignição e o desenvolvimento de um incêndio são muito complexos e influenciados por muitas variáveis. Desta forma, o fogo em um compartimento é um evento dinâmico que depende de muitos fatores.

As fases do incêndio podem ser visualizadas e compreendidas melhor ao se observar a figura 5.1.

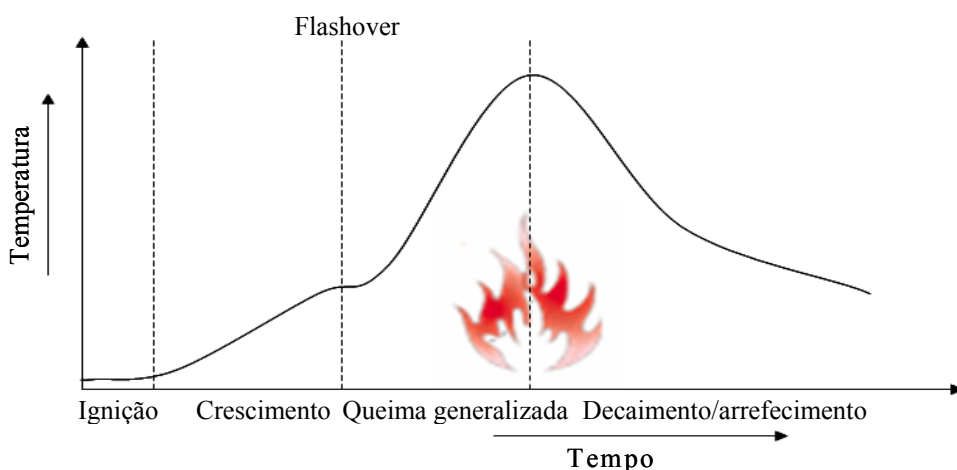


FIGURA 5.1: Desenvolvimento de incêndio em compartimento (Structural Design for Fire Safety – 2006)

5.2.1 Ignição

A fase da ignição é descrita como sendo o momento em que os quatro elementos essenciais do tetraedro do fogo se unem e iniciam a combustão. O ato físico da ignição pode ser iniciado por uma centelha ou chama, ou então, quando um material alcança seu ponto de ignição, inflamando-se espontaneamente.

Neste ponto, geralmente o foco de incêndio é pequeno e confinado ao material combustível inflamado inicialmente.

Nesta primeira fase, o oxigênio contido no ar não está significativamente reduzido e o fogo está produzindo vapor d'água (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) e outros gases.

Grande parte do calor está sendo consumido no aquecimento dos combustíveis, estando a temperatura do ambiente, neste estágio, ainda pouco acima do normal. O calor está sendo gerado e evoluirá com o aumento do fogo.

5.2.2 Crescimento

Logo após a ignição, uma fumaça começa a se formar acima do combustível em chamas. Enquanto esta fumaça se forma, ela começa a atrair o ar do espaço circundante para a coluna ascendente de vapores, ou seja, o ar, rico em oxigênio é arrastado para dentro do ambiente pelo efeito da convecção, isto é, o ar quente sobe, forçando a entrada de ar fresco pelas aberturas, principalmente nos pontos mais baixos do ambiente.

Na medida em que a fumaça fica mais quente, os elementos essenciais do fogo se juntam, alcançando o seu ponto de ignição e a parte superior do compartimento entra em combustão. Neste momento, a temperatura nas regiões superiores (nível do teto) normalmente pode exceder 700 °C.

Quando o fogo percorre o teto, ele irradia calor para baixo, e por sua vez, decompõe tudo que é combustível, atingido uma condição de *pré-flashover*. Caso haja uma fonte de oxigênio, por exemplo, de uma janela quebrada, o ambiente irá se incendiar. Porém se não houver o oxigênio, a falta de um dos elementos essenciais do fogo fará com que este seja extinto.

5.2.3 Flashover

Somente ao se entender o *flashover* é que se pode acreditar na velocidade com a qual um incêndio pode se espalhar em um ambiente ou em vários ambientes de uma edificação.

Durante a fase de crescimento do incêndio, os materiais, de uma forma geral, começam a se aquecer (cadeiras, carpetes, móveis em geral e etc), liberando vapores combustíveis. Na medida em que isto ocorre, estes vapores se acumulam próximo ao teto de forma bastante densa. Quanto mais energia se libera, mais quente fica esta camada de vapores (fumaça).

Esta camada de vapores chega então a uma temperatura tão alta que emite uma quantidade muito grande de calor irradiada por todo o ambiente, de forma que todos os materiais se incendiam de forma generalizada, caracterizando então o fenômeno conhecido como *flashover*, que sem dúvidas é um dos momentos mais críticos do incêndio.

Segundo Pannoni (2004), após a ocorrência do *flashover*, a temperatura em um compartimento pode chegar aos 1000°C. Passada esta etapa, as estruturas da edificação podem iniciar um processo de deformação.

5.2.4 Queima generalizada

A queima generalizada ocorre quando todo o material combustível no ambiente está envolvido no fogo. Durante esta fase, o combustível que está queimando gera a maior temperatura possível e produz grandes volumes de gases quentes.

O calor gerado e o volume de gases ou vapores quentes produzidos dependem do número de aberturas de ventilação no compartimento.

Durante esse estágio, os gases aquecidos que não foram queimados começarão a se movimentar para outros compartimentos adjacentes. Então, estes gases entrarão em ignição nos compartimentos onde o oxigênio é mais abundante.

5.2.5 Decaimento

Quando o fogo consumir o combustível disponível dentro do ambiente em cerca de 70%, a temperatura dos gases decresce e então a taxa de calor gerada começará a decair (Pannoni, 2004).

Outro fator que poderá contribuir para o decaimento do incêndio é o consumo do oxigênio, considerando que como nas fases anteriores, o fogo continua a consumi-lo, até atingir um ponto onde o comburente é insuficiente para sustentar a combustão. Nesta fase, as chamas podem deixar de existir se não houver ar suficiente para mantê-las (na faixa de 8% a 0% de oxigênio).

O fogo é normalmente reduzido a pequenos focos e brasas, o ambiente torna-se completamente ocupado por fumaça densa e os gases se expandem.

Após o resfriamento, o aço das estruturas pode recuperar grande parte das suas propriedades mecânicas e sua capacidade de carregamento, desde que não tenha sofrido muitas deformações, dependendo ainda de fatores tais como temperatura atingida e tempo de aquecimento.

5.2.6 Fatores intervenientes nos incêndios

É ainda necessário considerar que quando o incêndio ocorre da ignição para o decaimento, vários fatores importantes influenciam no seu comportamento e desenvolvimento.

Estes fatores são extremamente importantes para o modelamento do incêndio e serão considerados para utilização do software *Smartfire* (EWER et al.,2004), já que determinarão todas as características e definirão os resultados obtidos nas simulações, conforme apresentados a seguir:

a) Localização, forma e número de aberturas de ventilação

Este é um aspecto extremamente importante, pois permitirá a remoção dos vapores aquecidos e a entrada de ar fresco no compartimento, possibilitando a troca de temperatura entre o compartimento e o meio externo. Isto poderá ainda evitar a formação de mistura ideal, dependendo do tipo de combustível queimando e dos vapores que estarão sendo formados.

Como elemento essencial do fogo, o oxigênio alimentará as chamas, porém em estudos recentes concluiu-se que a ventilação é tão importante no combate aos incêndios quanto a água, permitindo a troca de calor, tornando o ambiente mais frio e, portanto, reduzindo os riscos associados à elevação extrema da temperatura.

O parâmetro que permite avaliar o grau de ventilação de um compartimento é representado pelo fator de abertura ν (equação 5.1), que considera a quantidade de oxigênio no ambiente e que pode ser utilizado tanto em análises experimentais quanto para modelação numérica de ambientes incendiados.

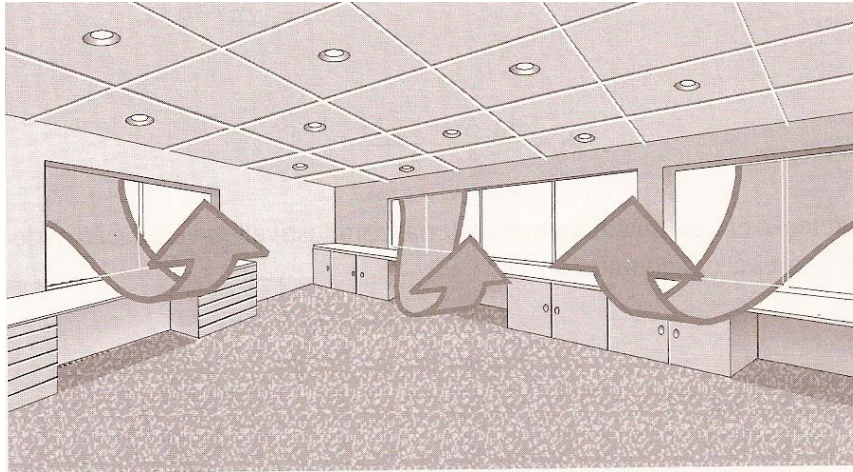


Figura 5.2 – Ventilação de um compartimento

$$v = \frac{A_v \sqrt{h}}{A_t} \tag{5.1}$$

Onde:

v é o grau de ventilação ou fator de abertura em $m^{1/2}$;

A_v é a área total das aberturas para o ambiente externas ao edifício incluindo janelas que se supõe quebradas durante um incêndio (m^2);

A_t é a área total, incluindo-se vedação (paredes, piso e teto) e aberturas;

h é a altura média das aberturas = $\sum (h_i A_i) / A_v$ (ver figura 5.3);

h_i é a altura da abertura i , sendo $\sum A_i = A_v$;

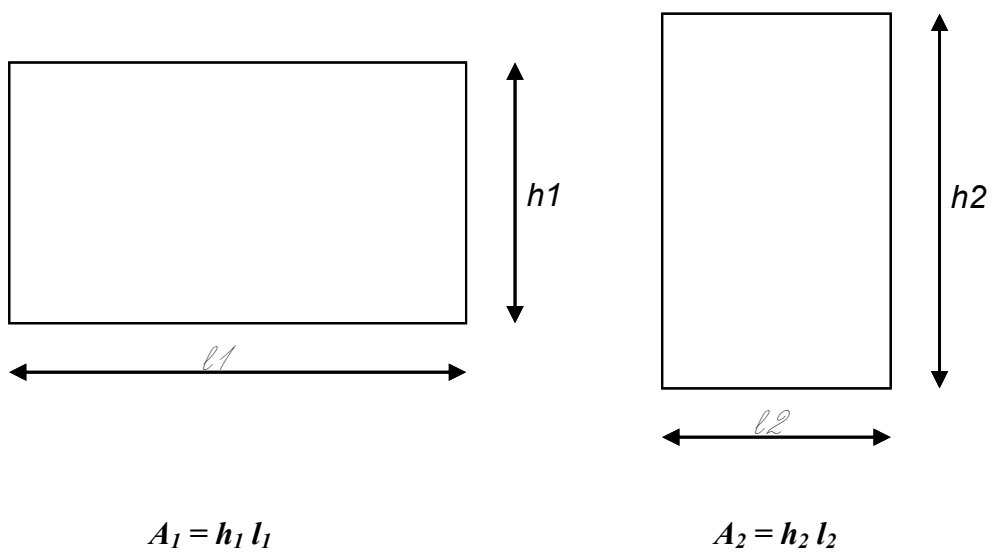


FIGURA 5.3: Altura média das aberturas

$$h = \frac{h_1 A_1 + h_2 A_2}{A_1 + A_2} \quad (5.2)$$

b) Volume e forma do ambiente

O volume do ambiente definirá a forma de propagação dos gases e dos vapores aquecidos, de acordo com a compartimentação e outros aspectos importantes, tais como área de piso e altura do pé-direito.

c) Propriedades térmicas dos materiais utilizados no fechamento do compartimento

As propriedades térmicas dos materiais tais como teto, utilização de forros, material que constitui as paredes, revestimentos e etc, influenciarão diretamente na propagação do calor, na formação de vapores e conseqüentemente na propagação do fogo.

d) Tamanho, composição e posição do material que será inflamado inicialmente

O material que será inicialmente incendiado tem função importante neste contexto, pois de acordo com suas características químicas e físicas pode-se avaliar a emissão de calor realizada por este, além dos tipos de gases e vapores liberados. Um objeto pequeno, constituído de material que não tenha um grande potencial calorífico, com certeza terá mais dificuldade de emitir calor e vapores suficientes para incendiar o restante do ambiente no qual se encontra.

e) Disponibilidade e posição do material combustível adicional no ambiente

Tecnicamente este tópico diz respeito aos aspectos relacionados com a carga incêndio, apresentado no capítulo 4, que deve ser considerado como um dos fatores mais importantes na severidade de um incêndio. Um incêndio em um depósito de líquidos inflamáveis certamente terá uma severidade maior que um incêndio em um depósito de ferragens, por exemplo:

Não obstante seja possível reconhecer que todos os fatores citados anteriormente exercem importante influência nos incêndios reais, para efeito dos estudos e modelamentos de incêndios, usa-se o chamado incêndio padrão, que na verdade pode ser considerado mais severo que um incêndio real, porém permite que se obtenham resultados de maneira mais fácil, uma vez que nos incêndios reais, torna-se difícil mensurar e avaliar a influência de todos os fatores sobre os resultados pretendidos.

5.3 Modelamento do incêndio

Após tomar conhecimentos das informações apresentadas nos itens anteriores é importante verificar e conhecer como todos estes aspectos se adaptam a uma condição próxima da realidade onde todos os fatores se interagem e apresentam resultados importantes.

Neste caso, serão analisados os fatores intervenientes nos incêndios em compartimentos, tais como ventilação, combustíveis, carga incêndio e outros aspectos preponderantes no resultado final destes.

Basicamente, dois modelos de incêndio são conhecidos como forma de possibilitar o estudo dos fenômenos decorrentes deste. São eles: incêndio natural e incêndio padrão.

5.3.1 Incêndio natural

Incêndio natural é a denominação atribuída ao incêndio para o qual se considera que as temperaturas dos gases respeitem as curvas temperatura-tempo naturais, obtidas através de ensaios que simulam a situação real de um compartimento em chamas.

Os ensaios são realizados em ambientes compartimentados, considerando-se a presença de aberturas (janelas), simulando-se um ambiente comum, porém com características importantes e criação de um cenário próximo da realidade.

Não é muito utilizado em testes, em virtude da dificuldade com relação ao grande número de variáveis que devem ser consideradas neste caso, porém, com ajuda de alguns softwares é possível se obter resultados próximos da realidade para incêndios naturais.

O comportamento da curva temperatura-tempo dos gases em um incêndio real é mostrado na figura 5.4.

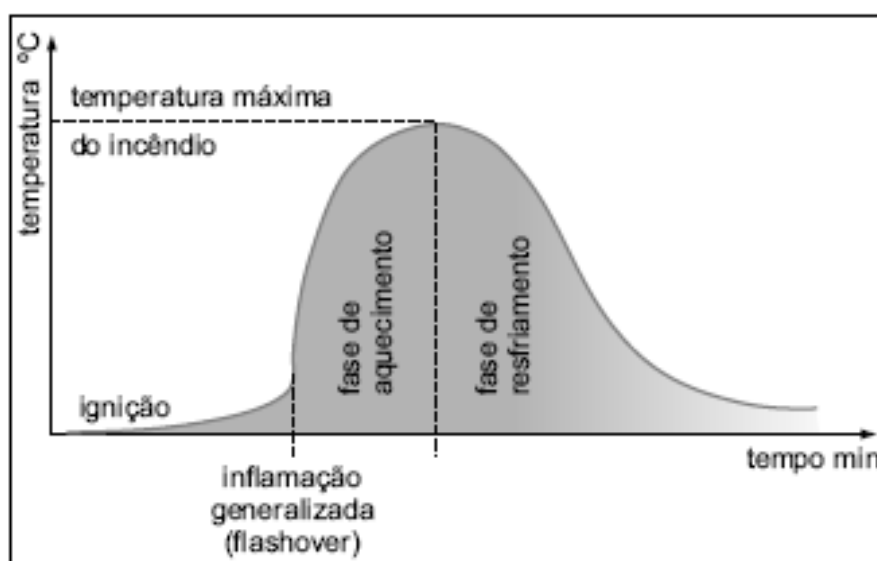


FIGURA 5.4: Curva do incêndio natural

Analisando a curva apresentada na figura 5.4, identifica-se as fases distintas do incêndio, conforme descrito anteriormente. A ignição acontece, seguida da fase de crescimento. Em determinado momento ocorre o flashover, provocando um aumento brusco na temperatura, após este momento, entra-se na fase da queima generalizada e em seguida, o incêndio começa a decair até atingir sua extinção.

Conforme dito anteriormente, vários fatores irão interferir na curva de incêndio natural, os quais estão descritos no item 5.2.6

5.3.2 Incêndio padrão

Este modelo é empregado para análises experimentais de estruturas e equipamentos ou materiais anti-chama, em fornos instalados em laboratórios de pesquisa.

O incêndio padrão é um modelo para o qual se admite que a temperatura dos gases do ambiente respeite as curvas padronizadas para ensaio.

A International Organization for Standardization, por meio da norma ISO 834(1999) “Fire-resistance tests – Elements of building construction”, recomenda a curva temperatura-tempo mostrada na figura 5.5.

A característica principal desta curva é a de possuir apenas um ramo ascendente, considerando assim que a temperatura dos gases é sempre crescente com o tempo, sem que haja fatores intervenientes estabelecidos pelas características do ambiente, bem como dos materiais combustíveis.

Adotando-se este modelo, verifica-se a necessidade de se ter bastante cautela, pois ele não retrata uma situação real. Com base nisto, todos os resultados obtidos em pesquisas e qualquer outro tipo de trabalho, devem ser analisados criteriosamente.

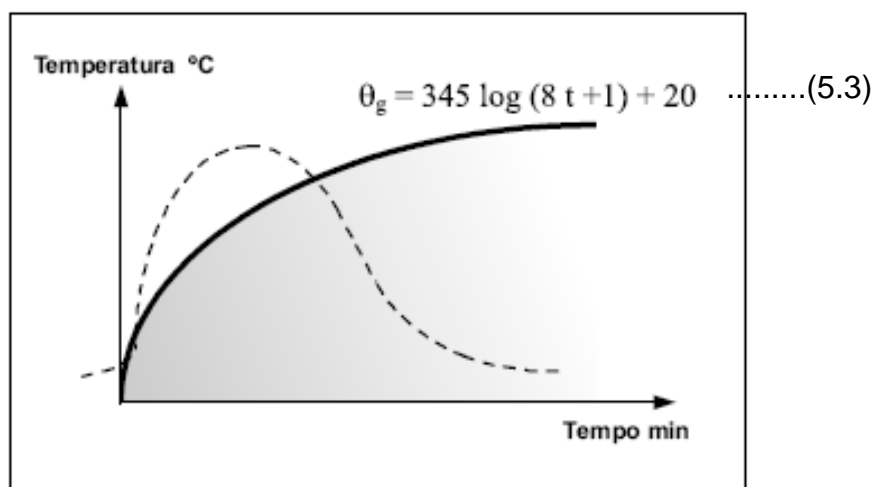


FIGURA 5.5: Curva do incêndio padrão

A submissão de elementos estruturais a altas temperaturas em incêndios, faz com que estes percam gradualmente sua resistência e rigidez, como será visto com mais detalhes no capítulo 6.

A figura 5.6 mostra o comportamento de alguns materiais de construção, submetidos à temperaturas elevadas causadas pelo fogo.

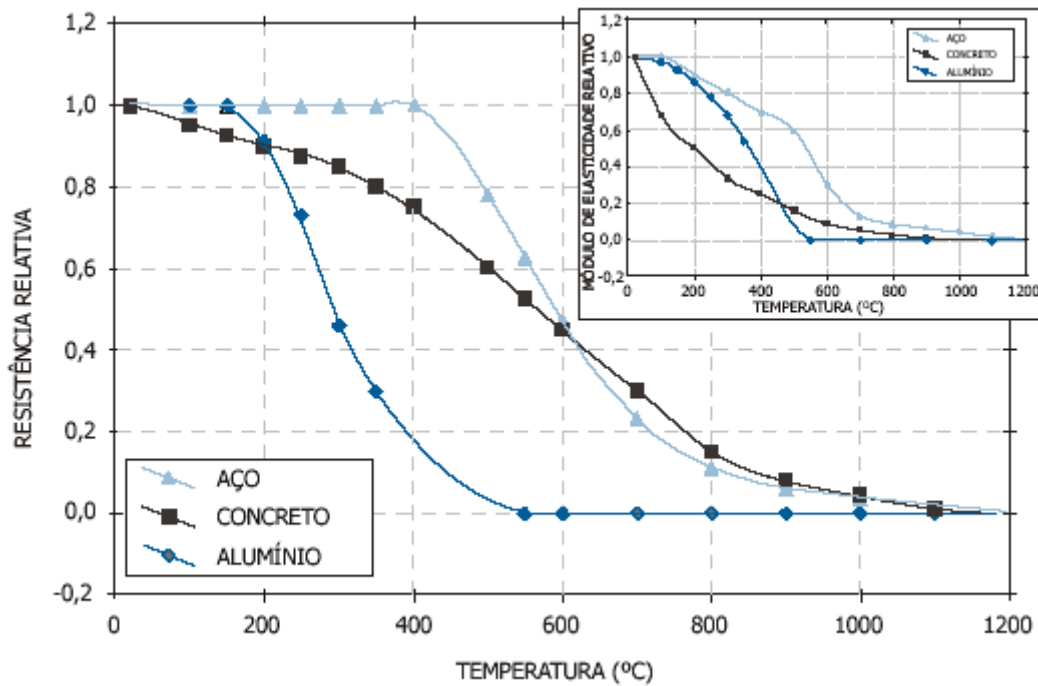


FIGURA 5.6: Curvas comparativas do aço, concreto e alumínio.

Para colunas, vigas e estruturas em geral, o colapso acontece quando uma temperatura limite é atingida, sob a ação de um ensaio normatizado. Esta temperatura limite é conhecida como temperatura crítica. (Pannoni, 2004)

Os valores das temperaturas críticas para elementos estruturais dependerão de vários fatores, tais como as cargas efetivamente aplicadas nas estruturas e das condições de contorno destes elementos.

6

ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA DO AÇO

6.1 Introdução

Segundo números do Instituto Internacional do Ferro e do Aço (IISI), a produção mundial de aço bruto, em janeiro deste ano, atingiu 107,9 milhões de toneladas, 13,5% a mais que o mesmo mês de 2006.

Mais uma vez, a China puxou o crescimento, com produção de 38,4 milhões de toneladas, aumento de 27,3% sobre janeiro do exercício anterior. O Japão somou 10,1 milhões de toneladas métricas, alta de 10,1%.

Turquia, Rússia e Ucrânia também tiveram expansão de dois dígitos em suas produções: 13,7%, 11,5% e 11,1%.

Na Europa, a Alemanha produziu 4,3 milhões de toneladas de aço, incremento de 25,5% no período. França e o Reino Unido produziram 1,7 milhão de toneladas e 1,1 milhão de toneladas de aço no mês. As quedas foram de 1,2% e 0,8%, respectivamente.

6.2 Propriedades do aço

Quando o aço atinge temperaturas próximas a 740°C, há uma mudança de fase de equilíbrio entre as ligas metálicas que compõem o material; o aço comum é uma liga de Fe-C, contendo no máximo 2% de Carbono em peso, além de elementos de liga presentes na forma de óxidos, sulfetos, fosfetos, etc.

O estudo do diagrama de fase Fe-C é extremamente interessante para que se possa entender a constituição e estrutura de qualquer aço ou ferro. Muitas das características principais do sistema ferro-carbono influenciam diretamente no seu comportamento.

As fases presentes no sistema binário Fe-C persistem em aços complexos, no entanto, é necessário examinar o efeito dos elementos de liga no modo de formação e nas propriedades dessas fases.

O diagrama de fase Fe-C apresentado na figura 6.1, constitui uma sólida base sobre a qual se desenvolve o conhecimento dos aços-carbono.

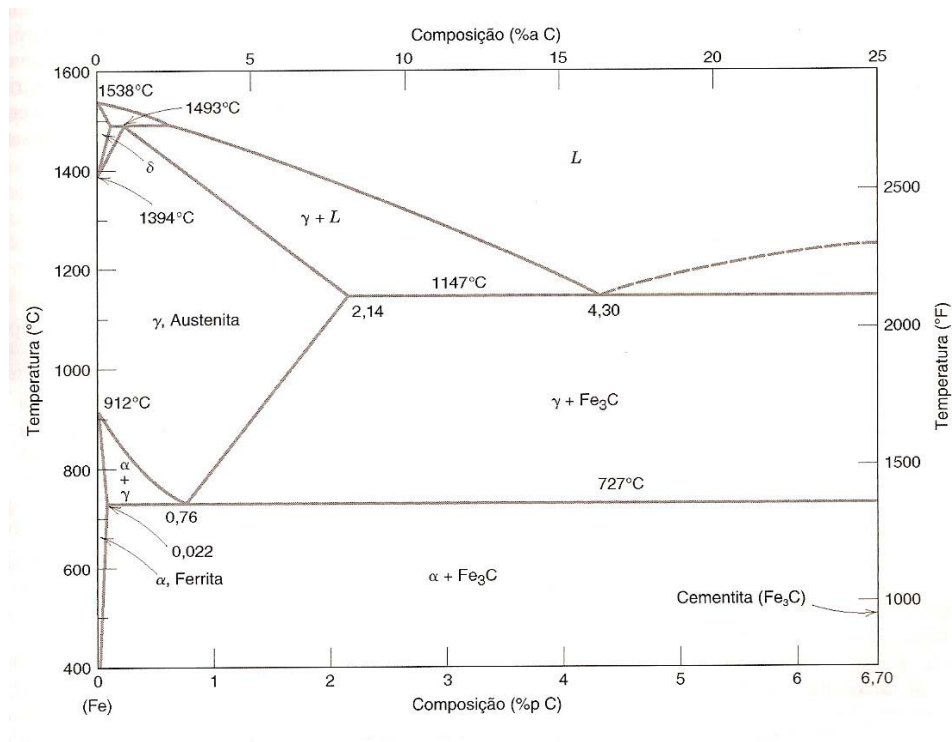


FIGURA 6.1: Diagrama de fase Fe-C (Callister, 2000)

O diagrama representa, na realidade, o equilíbrio metaestável entre o ferro e o carboneto de ferro (cementita).

Segundo Pukasiewicz (2003), a cementita é metaestável, e o verdadeiro equilíbrio estabelece-se entre o ferro e a grafite. Embora a grafite ocorra freqüentemente nos ferros fundidos (2-4% em peso C). Em geral, é difícil de se obter esta fase em equilíbrio nos aços (0,03- 1,5% em peso C).

Assim deve-se considerar apenas o equilíbrio metaestável entre o ferro e o carboneto de ferro, porque, na prática, é este que é realmente relevante para o comportamento da maioria dos aços.

Ferro puro apresenta duas transformações alotrópicas antes do ponto de fusão. À temperatura ambiente a fase estável é a ferrita α , que apresenta uma estrutura cristalina CCC (cúbica de corpo centrado).

A ferrita apresenta uma transformação polimórfica para CFC (cúbica de face centrada) a 912°C, sendo esta nova fase chamada austenita γ . Esta fase é estável até 1394°C, onde apresenta uma reversão para CCC, passando a se chamar ferrita δ , que finalmente funde a 1538°C.

Estas transformações são visíveis no lado esquerdo do diagrama de fase Fe-C. A transformação de fase γ - α é acompanhada por um aumento de volume atômico em 1%, originando tensões internas durante a transformação.

A mudança de fase γ - α é particularmente interessante no que diz respeito à solubilidade de elementos não metálicos como o carbono e o nitrogênio nas duas fases, à difusividade de elementos de liga a altas temperaturas e ao comportamento geral em deformação plástica.

A estrutura CCC é menos compacta que a estrutura CFC, evidenciada pelo fator de empacotamento 0,68 e 0,74, respectivamente. As maiores cavidades na estrutura CCC são os interstícios tetraédricos, enquanto que os interstícios octaédricos são menores.

Na estrutura CFC os interstícios octaédricos são os maiores, enquanto que os tetraédricos são os menores. Verifica-se que os interstícios octaédricos na CFC são maiores que os tetraédricos na CCC, determinando assim uma maior solubilidade de átomos que formam solução sólida intersticial.

Na ferrita a solubilidade máxima de carbono é 0,022% em peso a 727°C e $2,3 \times 10^{-6}$ em peso a 400°C e 1×10^{-12} à temperatura ambiente. Na austenita a solubilidade máxima é de 2,14% em peso.

O eixo da composição estende até a faixa de 6,70% de C, onde nesta concentração forma-se o composto intermediário carboneto de ferro, CFe_3 , ou cementita, representada por uma linha vertical no lado direito do diagrama de fase, sendo que esta apresenta uma estrutura ortorrômbica, observada na Figura 6.2.

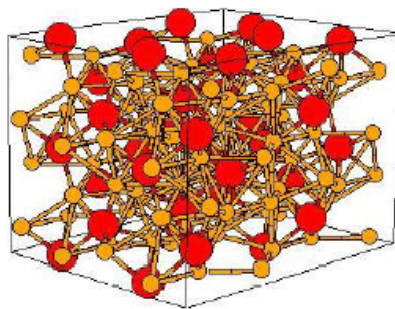


Figura 6.2: Estrutura ortorrômbica da cementita. As esferas vermelhas são átomos de ferro e as amarelas de carbono.

A formação da cementita ocorre pela saturação do carbono na ferrita ou na austenita. Esta fase supersaturada tende a precipitar uma fase metaestável, cementita, devido à elevada difusividade do carbono na ferrita e na austenita.

Ao contrário das fases ferrita e austenita a cementita é dura e frágil e determina um elevado aumento na resistência mecânica nos aços.

Os aços com teores de carbono inferiores a 0,8% são ligas hipoeutetóides que têm como constituintes principais a ferrita e a perlita.

Para teores superiores a 0,76% de C a estrutura é chamada hipereutetóide com cementita nos contornos de grão da perlita.

As três fases ferrita, cementita e perlita são, portanto os principais constituintes da microestrutura dos aços carbonos, sempre que as velocidades de resfriamento a que elas são submetidas sejam relativamente lentas e impeçam a formação de fases metaestáveis.

Com o aumento de temperatura do aço ocorre o desequilíbrio entre suas ligas metálicas, podendo suas propriedades térmicas sofrer variações consideráveis.

Os aços, dependendo da temperatura e de tais elementos de liga, apresentam as seguintes estruturas cristalinas: C.C.C (cúbica de corpo centrado), C.F.C (cúbica de faces centradas) e Ortorrômbica, conforme apresentado na figura 6.3.

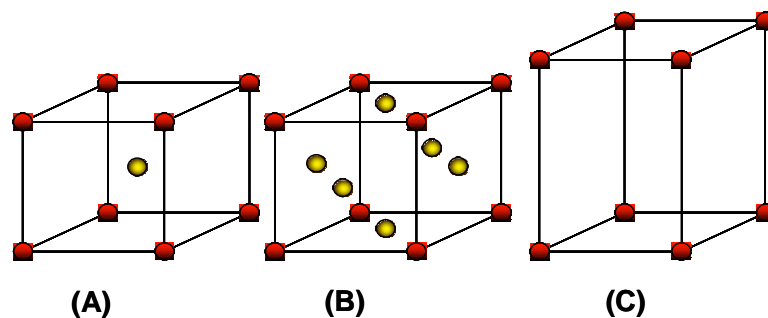


FIGURA 6.3: Estruturas (A) cúbica de corpo centrado, (B) cúbica de face centrada e (C) ortorrômbica.

Nestas condições, as fases presentes nos aços são soluções sólidas intersticiais do Carbono na estrutura cristalina do Ferro, ou soluções sólidas substitucionais do elemento de liga na estrutura cristalina do Ferro. Além disso, existe a fase FeC que é Ortorrômbica.

6.2.1 Propriedades mecânicas do aço carbono

As estruturas de aço, quando submetidas a situações de incêndio, sofrem perda de resistência e rigidez, devendo tais considerações serem levadas em conta em procedimentos de projeto e análise.

Para variações de temperatura no aço entre 2 e 50°C/min, de acordo com Eurocode 3/Parte 2 (ECS, 2005), as propriedades mecânicas do material deverão ser obtidas pela relação tensão-deformação mostrada a seguir, no diagrama respectivo (figura 6.4).

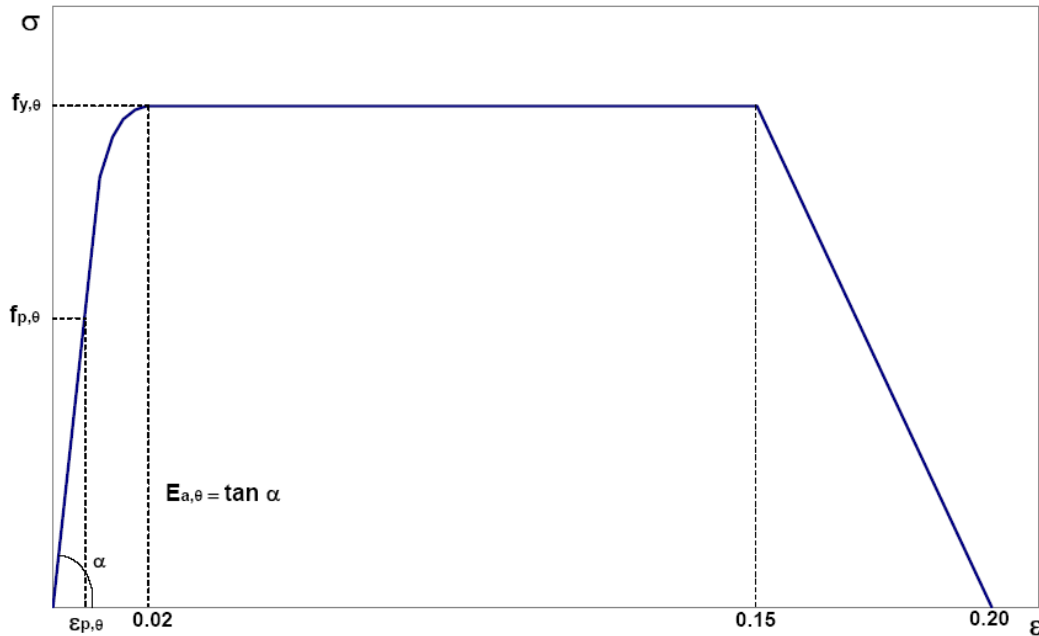


FIGURA 6.4: Diagrama tensão-deformação dos aços a elevadas temperaturas.

onde:

$f_{y,\theta}$ é o limite de escoamento do aço à uma temperatura θ ,

$f_{p,\theta}$ é o limite de proporcionalidade do aço à uma temperatura θ ,

$E_{a,\theta}$ é o módulo de elasticidade do aço à uma temperatura θ ,

$\varepsilon_{p,\theta}$ é a deformação unitária do aço até o limite de proporcionalidade, à uma temperatura θ ,

$\varepsilon_{y,\theta}$ é a deformação específica do aço no início do patamar de escoamento, à uma temperatura θ ($E_{y,\theta} = 0,02$);

$\varepsilon_{b,\theta}$ é a deformação específica do aço ao final do patamar de escoamento, à uma temperatura θ ($E_{b,\theta} = 0,15$);

$\varepsilon_{u,\theta}$ é a deformação final do aço à uma temperatura θ ($\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$).

Para taxas de aquecimento entre 2°C/min e 50°C/min, a tabela 6.1 fornece fatores de redução, relativos aos valores a 20°C, para o limite de escoamento dos aços laminados a

quente, limite de escoamento dos aços treilados e módulo de elasticidade de todos os tipos de aço, em temperatura elevada, respectivamente, $k_{y,\theta}$, $k_{y0,\theta}$ e $k_{E,\theta}$, de modo que:

$$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y \quad (6.1)$$

$$k_{y0,\theta} = f_{y0,\theta} / f_{y0} \quad (6.2)$$

$$k_{E,\theta} = E_\theta / E \quad (6.3)$$

Onde:

$f_{y,\theta}$ é o limite de escoamento dos aços laminados a quente a uma temperatura θ_a ;

f_y é o limite de escoamento dos aços laminados a quente a 20°C;

$f_{y0,\theta}$ é o limite de escoamento dos aços treilados a uma temperatura θ_a ;

f_{y0} é o limite de escoamento dos aços treilados a 20°C;

E_θ é o módulo de elasticidade de todos os tipos de aço a uma temperatura θ_a ;

E é o módulo de elasticidade de todos os aços a 20°C.

TABELA 6.1: Fatores de redução para o aço

Temperatura do aço θ_a (°C)	Fator de redução para o limite de escoamento dos aços laminados a quente $k_{y,\theta}$	Fator de redução para o limite de escoamento dos aços treilados $k_{y0,\theta}$	Fator de redução para o módulo de elasticidade dos aços laminados $k_{E,\theta}$	Fator de redução para o módulo de elasticidade dos aços treilados $k_{E0,\theta}$
20	1,000	1,000	1,0000	1,000
100	1,000	1,000	1,0000	1,000
200	1,000	1,000	0,9000	0,870
300	1,000	1,000	0,8000	0,720
400	1,000	0,940	0,7000	0,560
500	0,780	0,670	0,6000	0,400
600	0,470	0,400	0,3100	0,240
700	0,230	0,120	0,1300	0,080
800	0,110	0,110	0,0900	0,060
900	0,060	0,080	0,0675	0,050
1000	0,040	0,050	0,0450	0,030
1100	0,020	0,030	0,0225	0,020
1200	0,000	0,000	0,0000	0,000

Nota: Para valores intermediários da temperatura do aço pode ser feita interpolação linear

Fonte: NBR 14.323/99

Os fatores de redução tensão-deformação do aço carbono são demonstrados conforme diagrama representado na figura 6.5.

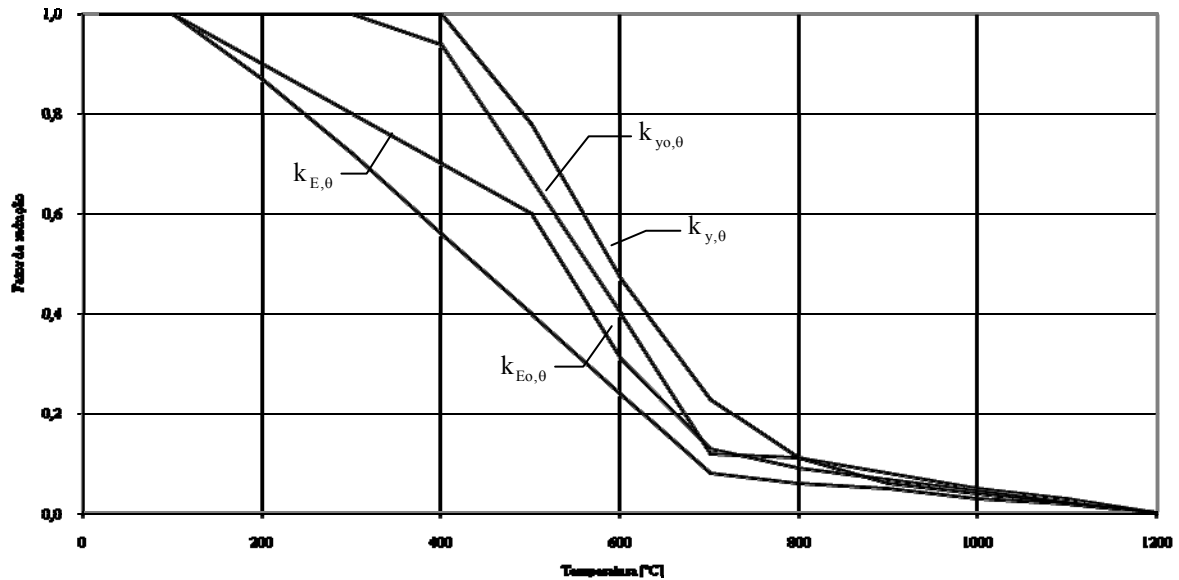


FIGURA 6.5: Curvas características dos fatores de redução em função da temperatura.

6.2.2 Massa específica

A massa específica do aço pode ser considerada independente da temperatura e igual a:

$$\rho_a = 7.850 \text{ Kg/m}^3 \quad (6.4)$$

6.2.3 Propriedades térmicas

6.2.3.1 Alongamento

O alongamento do aço em função da temperatura pode ser observado na figura 6.6, e compreendido de acordo com a equação (6.5).

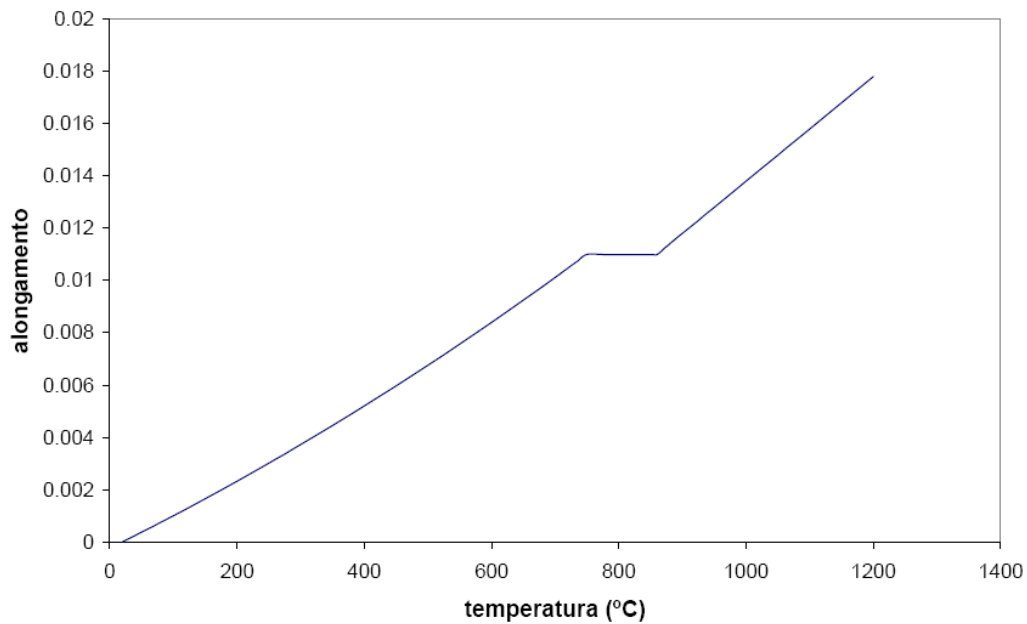


FIGURA 6.6: Curva característica do alongamento do aço em função da temperatura

Para $20^{\circ} C \leq \theta_a < 750^{\circ} C$: (6.5)

$$\Delta l/l = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4}$$

Para $750^{\circ} C \leq \theta_a \leq 860^{\circ} C$:

$$\Delta l/l = 1,2 \times 10^{-2}$$

Para $860^{\circ} C < \theta_a \leq 1200^{\circ} C$:

$$\Delta l/l = 10,0 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3}$$

Onde:

l é o comprimento inicial da peça de aço a temperatura ambiente (m);

Δl é a expansão térmica da peça de aço devido a temperatura (m);

θ_a é a temperatura no aço (°C).

Caso se empregue o método simplificado de cálculo, conforme descrito na seção 8 da NBR 14.323/99, a relação entre o alongamento do aço e a temperatura pode ser considerada constante. Neste caso, pode ser adotado o seguinte valor para o alongamento:

$$\Delta l/l = 14,0 \times 10^{-6} (T_a - 20) \quad (6.6)$$

6.2.3.2 Calor específico

O calor específico é definido como sendo a relação entre a capacidade térmica de um corpo e sua respectiva massa. É dado em Joule por quilograma e por grau Celsius (J/kg °C) e pode ser determinado da seguinte forma:

Para $20^\circ C \leq \theta_a < 600^\circ C$: (6.7)

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a + 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3$$

Para $600^\circ C \leq \theta_a < 735^\circ C$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}$$

Para $735^\circ C \leq \theta_a < 900^\circ C$:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}$$

Para $900^\circ C \leq \theta_a \leq 1000^\circ C$:

$$c_a = 650$$

Sendo:

θ_a = Temperatura do aço em °C

Caso se empregue o método simplificado de cálculo, conforme descrito na seção 8 da NBR 14.323/99, o valor do calor específico pode ser considerado independente da temperatura do aço. Neste caso, pode ser adotado o seguinte valor para o alongamento:

$$C_a = 600 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C}$$

A variação do calor específico do aço em função da temperatura pode ser observada na figura 6.7.

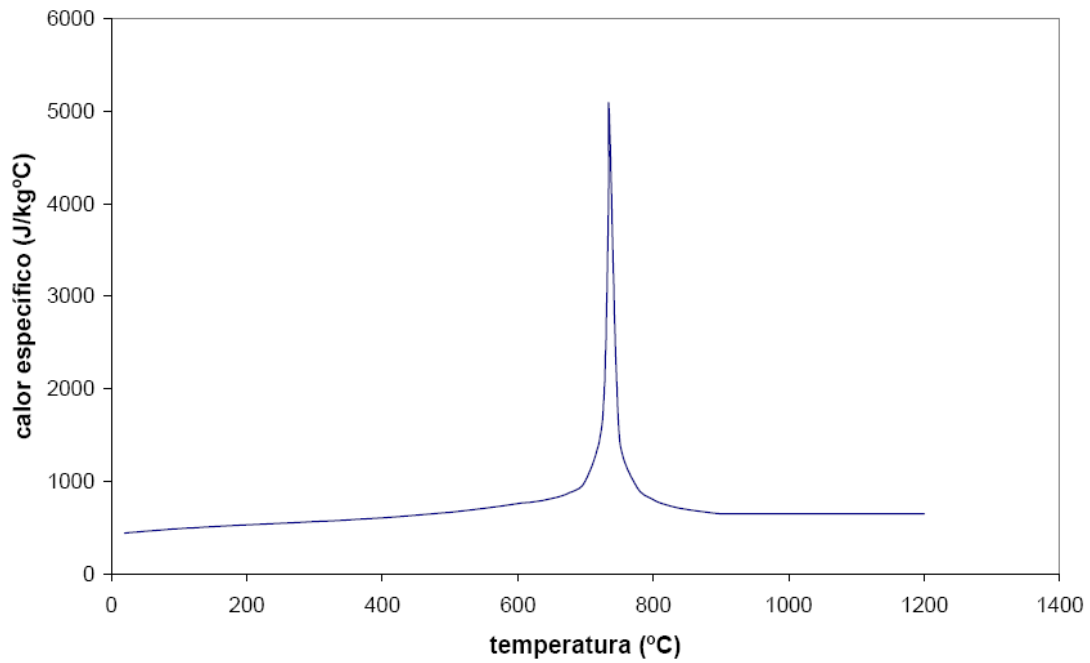


FIGURA 6.7: Calor específico do aço devido à temperatura.

6.2.3.3 Condutividade térmica

Condutividade térmica é definida como a corrente térmica por unidade de área perpendicular ao fluxo de calor e por unidade de gradiente de temperatura. É dada em Watt por metro e por grau Celsius ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$), e é determinada da seguinte forma:

Para $20^\circ \text{C} \leq \theta_a < 800^\circ \text{C}$: (6.8)

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Para $800^\circ \text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ \text{C}$:

$$\lambda_a = 27,3$$

onde:

θ_a é a temperatura do aço em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$)

Caso se empregue o método simplificado de cálculo, conforme descrito na seção 8 da NBR 14.323/99, o valor da condutividade térmica pode ser considerado independente da temperatura do aço. Neste caso, o seguinte valor pode ser adotado:

$$\lambda_a = 45 \text{ W/m } ^{\circ}\text{C} \quad (6.9)$$

De acordo com a figura 6.8, verifica-se a variação da condutividade térmica do aço devido ao aumento da temperatura.

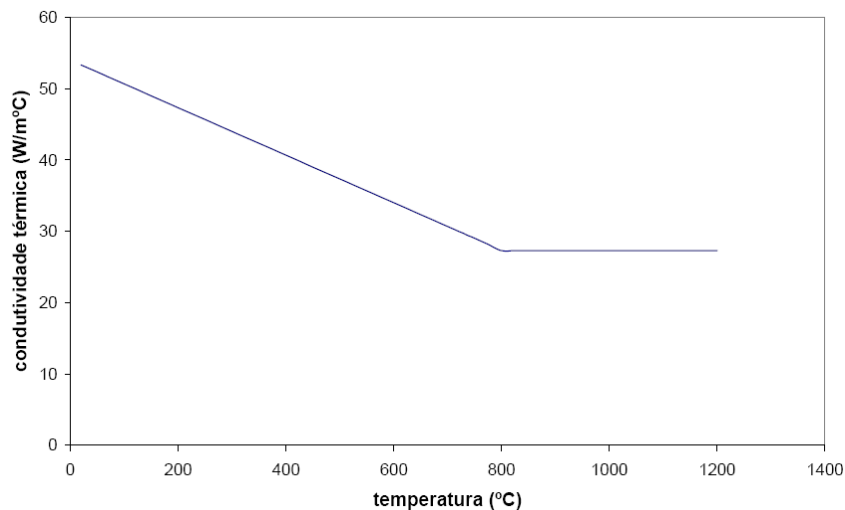


FIGURA 6.8: Variação da condutividade térmica do aço em função da temperatura

6.3 Desenvolvimento da temperatura nos perfis estruturais

Alguns modelos teóricos permitem que se determine a temperatura nos elementos estruturais de aço. Isto pode também ser feito por intermédio de ensaios.

Estes modelos se baseiam em formulações matemáticas e físicas considerando-se a transferência de calor. Tomando-se como base o calor inicial da peça estrutural e a temperatura final deste elemento, ou seja, o calor absorvido, é possível determinar o acréscimo de temperatura.

A NBR 14323/99 apresenta em seu texto, alguns modelos simplificados de análise de temperatura nos perfis de aço. Estes modelos consideram como se o elemento estrutural estivesse totalmente imerso no ambiente em chamas, sendo a distribuição da temperatura na seção do perfil uniforme e o fluxo de calor unidimensional nos componentes.

O fluxo calorífico é determinado com base na transmissão de calor apenas por radiação e convecção. Despreza-se o calor transmitido por condução.

Desta forma, a NBR 14.323/99 propõe as seguintes equações para realização da análise de temperatura nos perfis:

a) Elementos estruturais de aço não protegidos

De acordo com a norma já citada, pode-se considerar a equação a seguir, como forma de obtenção da curva de temperatura-tempo no elemento estrutural de aço.

$$\Delta \theta_{a,t} = \frac{(u / A) \varphi \Delta t}{C_a \rho_a} \quad (6.10)$$

Onde:

$\Delta \theta_{a,t}$ é a variação da temperatura no aço ($^{\circ}\text{C}$);

u/A é a fator de massividade da seção transversal (m^{-1});

u é o perímetro exposto ao incêndio do elemento estrutural de aço (m);

A é o área da seção transversal do elemento estrutural (m^2);

C_a é o calor específico do aço ($\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$);

φ é o valor do fluxo de calor por unidade de área (W/m^2);

Δt é o incremento de tempo ($\Delta t \leq 5\text{s}$);

ρ_a é o massa específica do aço (kg/m^3).

O valor de φ , em watt por metro quadrado é dado por:

$$\varphi = \varphi_c + \varphi_r \quad (6.11)$$

Sendo que:

$$\varphi_c = \alpha_c (\theta_g - \theta_a) \quad (6.12)$$

e

$$\varphi_r = 5,67 \times 10^{-8} \varepsilon_{res} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad (6.13)$$

Onde:

φ_c é o componente do fluxo de calor por convecção (W/m²);

φ_r é o componente do fluxo de calor por radiação (W/m²);

α_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção, igual a 25 W/m²°C;

θ_g é a temperatura dos gases no ambiente em chamas (°C);

θ_a é a temperatura na superfície do membro de aço (°C);

ε_{res} é a massividade resultante, podendo ser tomada igual a 0,5.

O valor de Δt não pode ser tomado maior que 25.000 $(u/A)^{-1}$. No entanto, recomenda-se não tomar Δt superior a 5 segundos.

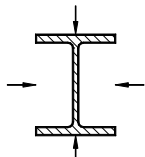
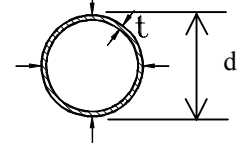
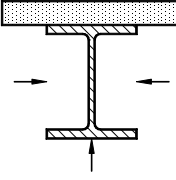
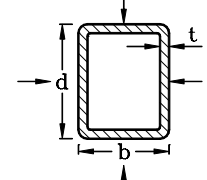
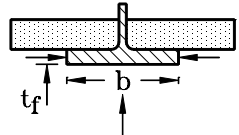
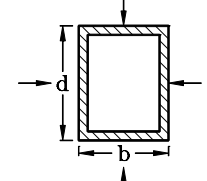
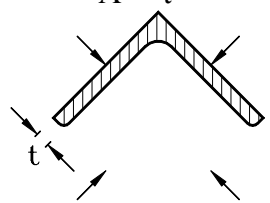
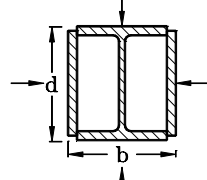
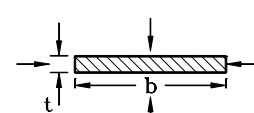
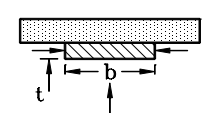
Um dos fatores que contribuem para a resistência ao fogo é a velocidade de aquecimento do componente, que governa o tempo transcorrido para atingir a temperatura de colapso (ou temperatura crítica).

Uma seção de baixa esbelteza, de grande massa, se aquecerá mais lentamente do que uma seção esbelta. Assim, uma seção massiva terá uma resistência maior ao fogo.

Este efeito de massividade é quantificado pelo chamado “Fator de Forma”, que corresponde à razão do perímetro aquecido sobre a área da seção transversal. É representado pela relação entre a área exposta ao fogo e o volume aquecido do corpo.

A NBR 14.323/99, bem como o Eurocode, apresentam algumas seções de perfis estruturais empregados na construção civil, conforme verifica-se na tabela 6.2, para peças de aço sem proteção. Para efeito de cálculo, o fator de massividade u/A não pode ser tomado menor que 10m⁻¹.

TABELA 6.2: Fator de massividade para elementos estruturais sem proteção

<p>Seção aberta exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{\text{perímetro}}{\text{área da seção transversal}}$ 	<p>Seção tubular de forma circular exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{d}{t(d-t)}$ 
<p>Seção aberta exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{\text{perímetro exposto ao incêndio}}{\text{área da seção transversal}}$ 	<p>Seção tubular de forma retangular (ou seção caixão soldada de espessura uniforme) exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{b+d}{t(b+d-2t)}$ 
<p>Mesa de seção I exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{b+2t_f}{bt_f}$ 	<p>Seção caixão soldada exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{2(b+d)}{\text{área da seção transversal}}$ 
<p>Cantoneira (ou qualquer seção aberta de espessura uniforme) exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{2}{t}$ 	<p>Seção I com reforço em caixão exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{2(b+d)}{\text{área da seção transversal}}$ 
<p>Chapa exposta ao incêndio por todos os lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{2(b+t)}{bt}$ 	<p>Chapa exposta ao incêndio por três lados:</p> $\frac{u}{A} = \frac{b+2t}{bt}$ 

Fonte: NBR 14.323/99

b) Elementos estruturais de aço protegidos

A proteção de elementos estruturais de aço ocorre quando se aplica em sua superfície algum tipo de material, que por suas características é considerado como isolante térmico.

Para estas situações, utiliza-se a equação 6.14, como forma de se obter a variação da temperatura em função do tempo.

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_m \times (u_m/A)}{t_m \ c_a \ \rho_a} \times \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{1 + \frac{\xi}{3}} \Delta t - (e^{\xi/10} - 1) \times \Delta\theta_{g,t}, \text{ mas } \Delta\theta_{a,t} \geq 0 \quad (6.14)$$

Com

$$\xi = \frac{c_m \ \rho_m}{c_a \ \rho_a} t_m (U_m/A) \quad (6.15)$$

Onde:

$\Delta\theta_{a,t}$ é a variação da temperatura no aço (°C);

u_m/A é o fator de massividade da seção transversal protegida (m⁻¹);

c_a é o calor específico do aço (J/kg°C);

c_m é o calor específico do material de proteção (J/kg°C);

t_m é a espessura do material de proteção (m);

Δt é o intervalo de tempo ($\Delta t \leq 30s$ e $\Delta t > 25000 \times (u_m / A)^{-1}$);

$\theta_{a,t}$ é a temperatura no aço (°C);

$\theta_{g,t}$ é a temperatura dos gases no ambiente em chamas (°C);

$\Delta\theta_{g,t}$ é a variação da temperatura dos gases no ambiente em chamas (°C);

λ_m é a condutividade térmica do material de proteção (W/m°C);

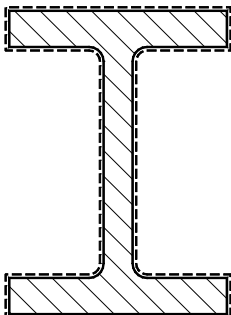
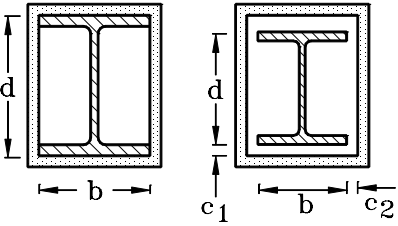
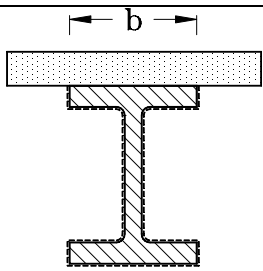
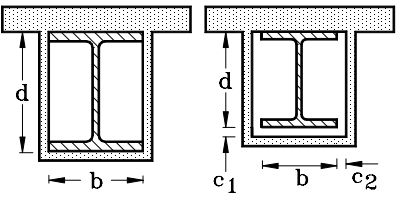
ρ_a é a massa específica do aço (kg/m³);

ρ_m é a massa específica do material de proteção (kg/m³).

O fator ξ representa a absorção de calor pelo material de proteção. Em ocasiões onde o valor do fator seja pequeno, este poderá ser desprezado.

Assim como os perfis de aço não protegidos, na NBR 14323/99 e no Eurocode (ECS, 2005) encontram-se detalhados os fatores de massividade de alguns perfis estruturais protegidos, conforme pode ser verificado na tabela 6.3.

TABELA 6.3: Fator de massividade para elementos estruturais com proteção

Situação	Descrição	Fator de massividade (u_m/A)
	Proteção tipo contorno de espessura uniforme exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{\text{perímetro da seção da peça de aço}}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Proteção tipo caixa ¹ , de espessura uniforme exposta ao incêndio por todos os lados	$\frac{2(b+d)}{\text{área da seção da peça de aço}}$
	Proteção tipo contorno, de espessura uniforme exposta ao incêndio por três lados	$\frac{\text{Perímetro da seção da peça de aço}}{\text{Área da seção da peça de aço}}$
	Proteção tipo caixa ¹ , de espessura uniforme exposta ao incêndio por três lados	$\frac{2d+b}{\text{área da seção da peça de aço}}$

¹ Para c_1 e c_2 superior a $d/4$, deve-se utilizar bibliografia especializada

Fonte: NBR 14.323/99

c) Elementos estruturais pertencentes a estruturas externas

Segundo a NBR 14323/99, para se determinar a elevação da temperatura em estruturas de aço externas devem ser considerados os seguintes aspectos:

- o fluxo de calor por radiação proveniente do incêndio no interior do edifício;
- os fluxos de calor por radiação e por convecção provenientes das chamas geradas no interior do edifício e que emanam das aberturas existentes;
- as perdas de calor por convecção e por radiação da estrutura de aço para o ambiente;
- os tamanhos e as posições dos elementos componentes da estrutura.

Podem ser adotados anteparos colocados em um ou mais lados de uma peça externa para protegê-la da transferência de calor por radiação, contudo, estes devem ser incombustíveis e possuir uma resistência a incêndio de pelo menos 30 minutos. Devem também ser presos diretamente nos lados da peça de aço a ser protegida, ou suficientemente largos para proteger estes lados do fluxo de calor por radiação previsto.

Para efeito de determinação de temperatura nas estruturas externas deve-se considerar que não há transferência de calor por radiação para os lados protegidos por anteparos.

A elevação da temperatura na estrutura externa pode ser determinada utilizando-se os métodos fornecidos pelo anexo C da NBR 14323:1999, porém pode-se determiná-la ainda, de maneira favorável à segurança, através do procedimento indicado no item 8.5.1 da norma, que trata de elementos estruturais sem proteção contra incêndio.

d) Elementos estruturais pertencentes à vedação

Para a elevação da temperatura nos elementos estruturais pertencentes à vedação do edifício (figura 6.9) deve-se admitir que os lados que não estão diretamente expostos ao incêndio, não sofrerão ação do fluxo de calor por radiação e o coeficiente de transferência de calor por convecção, α_c será igual a $9\text{W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

A elevação da temperatura nos elementos estruturais pertencentes à vedação do edifício pode também ser determinada de maneira favorável à segurança, através do procedimento indicado no item 8.5.1 da NBR 14323:1999, calculando-se o fator de massividade, considerando-se o perímetro e área apenas da parte da seção transversal que estará exposta ao fogo.

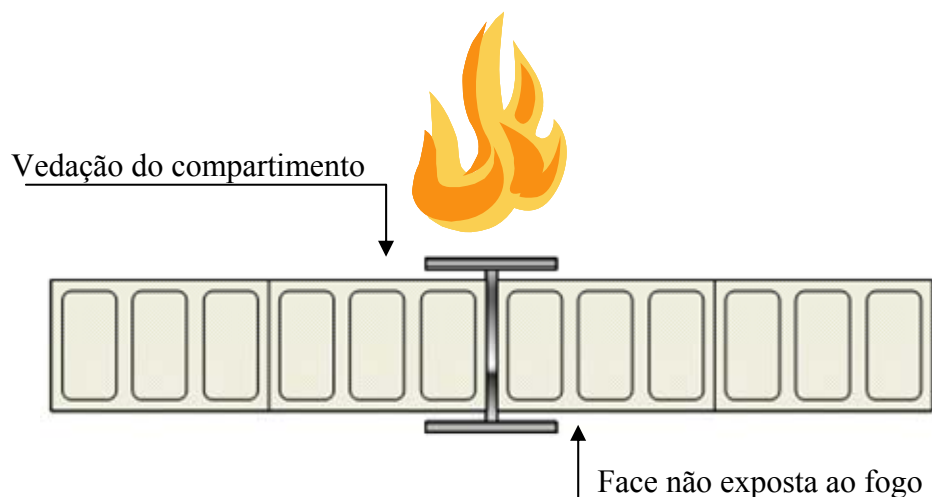


FIGURA 6.9: Elementos estruturais de vedação

Em função do comportamento do aço verificado neste capítulo e das exigências de segurança estrutural a serem apresentadas no capítulo seguinte, os elementos estruturais deverão, quando necessário, receber a cobertura por materiais de proteção térmica para conferir-lhes a resistência desejada.

7

SEGURANÇA ESTRUTURAL

7.1 Introdução

Uma estrutura pode ser considerada segura quando é capaz de suportar as ações de esforços e solicitações, em condições normais, ou mesmo em condições excepcionais, como, por exemplo, em caso de incêndios.

Como já foi abordado anteriormente, a função precípua da segurança estrutural é sem dúvida, resistir às condições adversas, num intervalo de tempo suficiente para que os ocupantes da edificação possam sair e alcançar um local seguro, tendo preservada a sua integridade física. Este é o principal fator que estabelece importantes critérios para o dimensionamento estrutural de uma edificação é a segurança.

Na prática, os engenheiros procuram limitar a probabilidade de colapso da estrutura a níveis que são aceitos como razoáveis baseados na experiência adquirida com muitos casos de sucessos e insucessos.

Os métodos sugeridos pelas normas brasileiras para cumprir os requisitos de segurança estrutural das edificações baseiam-se no Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), assegurando aos elementos construtivos a resistência necessária e aceitável.

Segundo Silva (2001), este tempo não é o tempo real de desocupação ou duração do incêndio. Trata-se do tempo que os elementos estruturais deveriam resistir em um forno de ensaio de resistência ao fogo, padronizado internacionalmente.

Os Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo podem variar em função da quantificação do risco e da adoção de medidas complementares de proteção ativa e de proteção passiva, considerando ainda, a altura, a área e ocupação das edificações.

As normas brasileiras admitem ainda, a utilização de normas estrangeiras desde que tenham aceitação da comunidade tecnocientífica internacional, com as devidas ressalvas no sentido de adequá-las à realidade nacional. Podem ainda ser empregados outros métodos, desde que comprovados cientificamente.

7.2 Determinação do TRRF das estruturas

Conforme dito anteriormente vários métodos de cálculo do TRRF são conhecidos e adotados por normas nacionais e internacionais, porém considerando o objetivo do presente trabalho, serão apresentados a seguir os métodos de Gretener e do Tempo Equivalente.

7.2.1 Método de Gretener

O engenheiro suíço Max Gretener idealizou um método para cálculo de risco de incêndios em indústrias e grandes edifícios. Este método levou o seu nome e foi utilizado inicialmente para atender às necessidades das companhias seguradoras.

Desde então, este método vem sendo utilizado para a formulação de normas. Em 1984, a Sociedade Suíça dos Engenheiros e Arquitetos (SAI), publicou o documento SAI-81,

“Método de avaliação de risco de incêndio”, tendo por base os trabalhos de Gretener revisado por um grupo de especialistas das companhias de seguro privadas e estatais e da SIA. Em dezembro de 1996 o SIA-81 foi revisado e atualizado.

A Comissão de Estudos da ABNT CE-24:201-03 optou por esse método para ser base da Norma sobre o potencial de risco de incêndio nas edificações. Para a realização deste projeto, foi utilizado um resumo do procedimento de cálculo tendo por base a SIA-81 (1996), que apresenta seus fatores de modo tabular.

Efetivamente, o Método de Gretener não calcula o TRRF das estruturas e sim um coeficiente global de segurança contra incêndio da edificação γ_{fi} , este é um coeficiente determinado de forma mais ampla que o TRRF.

Para tal, são atribuídos valores (pesos) às características das edificações, relevantes à situação de incêndios que são agrupados em classes (N, S, E, R, A e M). Cada uma das classes é associada a fatores que são multiplicadores ou divisores, na expressão de cálculo (7.1).

A segurança da edificação estará diretamente relacionada com o fator global de segurança γ_{fi} , que deverá ser maior ou igual a um. O fator γ_{fi} deverá ser determinado considerando-se cada compartimento da edificação, devendo ser verificado em todos eles.

$$\gamma = 1,3 \frac{N.S.E}{R.A.M} \quad (7.1)$$

As classes de citadas anteriormente possuem as seguintes características:

a) Classe N: diz respeito aos pesos das medidas globais de proteção tais como presença de extintores portáteis, rede de hidrantes e de pessoal treinado para atuar nos casos de emergências, bem como no grau de confiabilidade da adução de água nos casos de incêndios;

b) Classe S: trata do peso das medidas especiais de proteção como sistema de detecção e alarme de incêndio, qualidade do Corpo de Bombeiros local, tempo de resposta, tipo de equipamento de extinção e exaustão de fumaça;

c) Classe E: faz alusão às medidas construtivas de proteção da edificação – resistência das estruturas ao fogo, compartimentação vertical e horizontal e dimensões das células corta-fogo;

d) Classe R: diz respeito ao risco de incêndio, tais como carga de incêndio, combustibilidade da carga de incêndio, enfumaçamento causado pela carga de incêndio, toxicidade dos gases, cota do andar considerado e área do compartimento;

e) Classe A: diz respeito ao risco de ativação do incêndio em função do tipo e uso do compartimento; e

f) Classe M: trata da mobilidade das pessoas.

As classes N, S e E, são classes de medidas favoráveis à proteção da estrutura e, por isso, são fatores de multiplicação do coeficiente e deve-se procurar, sempre que possível, aumentar seus pesos.

Já em se tratando das classes R, A e M, são verificados aspectos referentes aos riscos à edificação e, portanto entram como divisores do coeficiente de segurança, devendo-se, sempre que possível minorar seus pesos.

7.2.2 Método do tempo equivalente

Segundo Silva (2001), o Método do Tempo Equivalente é uma simplificação do Método de Gretnener, associado ao TRRF, ou seja, fornece um valor de tempo de resistência requerida ao fogo da estrutura, em função de aspectos favoráveis ou desfavoráveis à segurança da edificação. É o método mais difundido na comunidade científica mundial para o cálculo efetivo do TRRF.

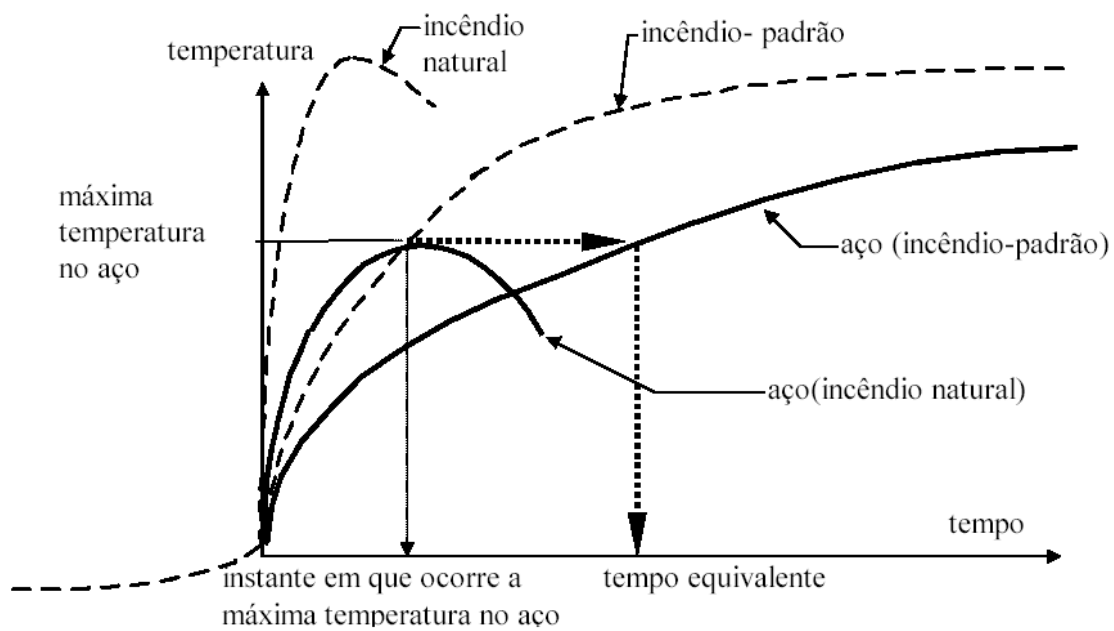


FIGURA 7.1: Tempo equivalente aplicado às estruturas de aço

O tempo equivalente possibilita a determinação da temperatura do elemento estrutural de aço a partir de uma curva de incêndio padrão (temperatura tempo), de modo que haja uma correspondência à máxima temperatura obtida conforme a curva de incêndio natural, conforme representado na figura 7.1.

Vários modelos foram propostos para associar a curva de incêndio padrão que é um modelo mais simples e prático, às curvas mais reais. Estabeleceu-se então uma relação entre esta curva e a carga de incêndio específica (carga de incêndio por unidade de área $q_{fi,k}$), posteriormente incorporou-se o efeito da ventilação da edificação (W), depois a influência das características térmicas dos elementos de vedação (K) e por último foram incorporados os efeitos positivos dos sistemas de proteção ativa, tais como chuveiros automáticos, detecção, etc. e ainda, riscos devido ao porte da edificação (γ_n, γ_s), obtendo-se a expressão 7.2, apresentada pelo Eurocode 1 (norma europeia de prevenção), na década de 90, adotada também por outras instituições, inclusive pelo Corpo de Bombeiros de Minas Gerais.

$$t_{eq} = \gamma_n \cdot \gamma_s \cdot q_{fi} \cdot KWE \quad (7.2)$$

Onde:

$$W = \left(\frac{6}{H}\right)^{0,3} \left\{ 0,62 + \frac{90 \left(0,4 - \frac{A_v}{A_f}\right)^4}{1 + 12,5 \left[1 + 10 \frac{A_v}{A_f} - \left(\frac{A_v}{A_f}\right)^2 \right] \cdot \frac{A_h}{A_f}} \right\} \geq 0,5 \quad (7.3)$$

t_{eq} é o tempo equivalente (minuto)

q_{fi} é o valor característico da carga de incêndio específica (MJ/m²)

γ_n é o coeficiente adimensional que leva em conta a presença de medidas de proteção ativa, determinado conforme tabela 7.2.

γ_s é o coeficiente de segurança que depende do risco de incêndio e das conseqüências do colapso da edificação, determinado conforme tabelas 7.3 e 7.4.

H é a altura do compartimento (m)

A_v é a área das aberturas verticais (m²)

A_h é a área das aberturas horizontais (m²)

A_f é a área de piso (m²)

K é a fator que depende das características dos elementos de vedação, conforme tabela 7.1.

E é o fator de correção que depende do material da estrutura, determinado conforme tabela 7.5.

TABELA 7.1: Fator K – elementos de vedação

$b = \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda} (J / m^2 \cdot s^{1/2} \cdot ^\circ C)$	K (min.m ² /MJ)
$\sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda} \geq 2500$	0,040
$720 \leq \sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda} \leq 2500$	0,055
$\sqrt{\rho \cdot c \cdot \lambda} \leq 720$	0,070

Fonte: IT 06 do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais.

Onde:

ρ é a massa específica do elemento estrutural de vedação do compartimento (kg/m³)

C é o calor específico do elemento de vedação do compartimento (MJ/kg°C)

λ é a condutividade térmica do elemento de vedação (W/m°C)

Quando houver elementos de compartimentação com diferentes camadas de material, pode ser utilizado o menor valor de b ($\sqrt{\rho c \lambda}$), a favor da segurança.

Caso haja diferentes valores de b em paredes, pisos e tetos, este valor é determinado conforme a expressão 7.4.

$$b = \frac{\sum b_i A_i}{A_t - A_v} \quad (7.4)$$

Onde:

b_i é o fator b do elemento de compartimentação i

A_i é a área do elemento de compartimentação i (m²)

A_t é a área total do elemento de compartimentação (piso, teto e paredes) (m²)

A_v é a área de ventilação vertical (janelas, portas e similares) (m²)

TABELA 7.2: fatores de medidas de segurança contra incêndio

Valores de γ_{n1} γ_{n2} γ_{n3}			
Existência de chuveiros automáticos (γ_{n1})	Brigada contra incêndio (γ_{n2})		Existência de detecção automática (γ_{n3})
	Não profissional	Profissional	
0,60	0,9	0,6	0,9

Fonte: IT 06 do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais

Na ausência de algum meio de proteção indicado pela tabela 7.2, deve-se adotar o respectivo valor de γ_n igual a 1.

TABELA 7.3: Características da edificação

Área do compartimento (m) ²	Altura da edificação (m) - γ_{s1}						
	Térrea	$h \leq 6$	$6 < h \leq 12$	$12 < h \leq 23$	$23 < h \leq 30$	$30 < h \leq 80$	$h > 80$
≤ 750	1.00	1.00	1.10	1.20	1.25	1.45	1.60
≤ 1000	1.05	1.10	1.15	1.25	1.35	1.65	1.85
≤ 2500	1.10	1.25	1.40	1.70	1.85	2.60	3.00
≤ 5000	1.15	1.45	1.75	2.35	2.65	3.00	3.00
≤ 7500	1.25	1.70	2.15	3.00	3.00	3.00	3.00
≤ 10000	1.30	1.90	2.50	3.00	3.00	3.00	3.00
≤ 20000	1.60	2.80	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
≥ 65000	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00

Fonte: IT 06 do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais

O risco de ativação do incêndio, conforme tabela 7.4, diz respeito à probabilidade de que haja um início de incêndio na edificação. Este potencial de risco irá variar de acordo com o tipo de atividade que é desenvolvida em cada edificação.

TABELA 7.4: Risco de ativação

Valores γ_{s2}	Risco de ativação do incêndio	Exemplos de ocupação
0,85	Pequeno	biblioteca, correio, escola, galeria de arte, igreja, museu, livraria, frigorífico, escritório, venda de acessórios de automóveis, depósitos em geral.
1,0	Normal	Cinema, consultório médico, farmácia, hotel, hospital, laboratório fotográfico, indústria de papel, oficina elétrica ou mecânica, residência, restaurante, teatro, depósitos de: produtos farmacêuticos, bebidas alcoólicas.
1,2	Médio	Montagem de automóveis, hangar, indústria mecânica.
1,45	alto	Laboratório químico, oficina de pintura de automóveis.

Fonte: IT 06 do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais

TABELA 7.5: Valores do Fator E

Material da estrutura	Fator E
Concreto armado	1,0
Aço revestido termicamente	1,0
Aço sem revestimento térmico	13,7

Fonte: IT 06 do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais

No caso de estruturas mistas de aço e concreto, deve-se optar pela utilização do Fator E mais desfavorável, onde for aplicável.

Para cálculo do grau de ventilação do compartimento a ser calculado, deve-se utilizar a expressão abaixo:

$$V = \frac{A_v \sqrt{h_{eq}}}{A_t} \quad (7.5)$$

Onde:

V é o grau de ventilação do compartimento

A_v é a área total da aberturas verticais (m²)

h_{eq} é a altura média das janelas, em metro (m)

A_t é a área total do compartimento (paredes, teto e piso, incluindo aberturas).

Outros fatores e considerações a respeito das exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações deverão ser verificados, conforme tabelas constantes no anexo B deste trabalho.

8

MATERIAIS DE PROTEÇÃO TÉRMICA

8.1 Introdução

Os materiais de proteção destinam-se a retardar o aumento de temperatura na superfície dos elementos estruturais, permitindo que eles desempenhem suas funções sem que haja perdas, considerando suas condições de carregamento e esforços solicitados.

Os primeiros materiais de proteção usados no início do século XX, foram a alvenaria e o concreto. Isto exigia um trabalho árduo com revestimentos de alta densidade e grandes espessuras.

Segundo Fakury (1999), inicialmente eram empregados materiais comumente utilizados na construção civil, tais como execução de alvenarias no contorno de pilares e o enclausuramento de vigas de aço pelo concreto, por meio de técnicas simples, como mostra a figura 8.1.

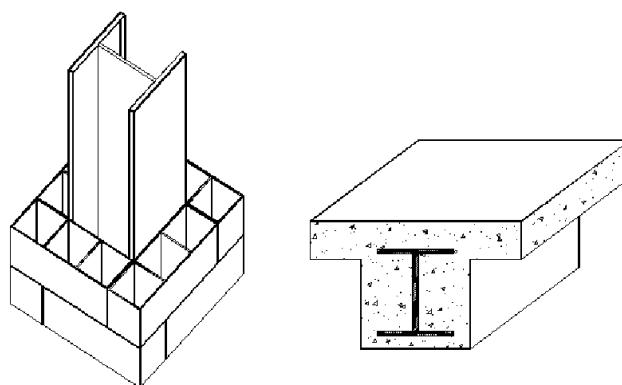


FIGURA 8.1: Proteção de pilares e vigas com utilização de alvenaria e concreto

Em meados do século XX, o gesso começou a ser utilizado, porém ainda era necessário um trabalho substancial, os revestimentos não eram muito leves, porém apresentava uma boa performance contra o fogo.

No final do século XX, iniciou-se a utilização dos materiais projetados, com a utilização de materiais cimentícios e gesso hidratado, combinado com fibras.

Atualmente um grande número de materiais de proteção térmica é encontrado no mercado, com características físicas e químicas variadas, com aspectos diferentes, que interferem também na questão da estética das edificações.

Estas proteções são denominadas de proteções passivas e devem apresentar baixa massa específica, baixa condutividade térmica e alto calor específico.

Os materiais para revestimento térmico devem apresentar capacidade de proteção térmica para altas temperaturas, mantendo sua integridade durante o incêndio, sem causar aumento considerável no peso próprio na estrutura.

Há ainda de se considerar, a importância de que os materiais utilizados trabalhem acompanhando os deslocamentos da estrutura, sem apresentar fissuras ou desprendimento, cobrindo a estrutura de forma homogênea e completa.

Não é permitida a presença de materiais agressivos à saúde, como os asbestos, em função da presença do amianto na sua composição química.

A durabilidade do material deve ser compatível com a vida útil da estrutura, sem que haja necessidade de manutenção, porém deve possibilitar pequenos reparos manuais, garantindo adequada aderência.

Não deve ser higroscópico, de modo a garantir que o aço não receba umidade, porém é necessário o uso de “primers” ou de outros produtos anticorrosivos nas estruturas internas para não agravar a corrosão.

Para que seja possível entender como os materiais se comportam termicamente, faz-se necessário conhecer aspectos relacionados às suas propriedades térmicas, como será apresentado a seguir.

8.2 Propriedades físicas e térmicas dos materiais

Entende-se por propriedade térmica de um material, como sendo as características e comportamento deste quando submetido ao calor.

À medida que um material absorve energia, na forma de calor, vários fenômenos podem ocorrer, tais como o aumento de seu volume, aumento de sua temperatura e outros.

Para efeito da escolha e dimensionamento das espessuras dos elementos de proteção térmica para estruturas de aço, bem como para a verificação da evolução da temperatura e transposição do calor, as principais propriedades térmicas a serem consideradas são: o calor específico, a condutividade térmica e massa específica de cada material. (tabela 8.1), aliados a outros aspectos técnicos a serem apresentados posteriormente.

A tabela 8.1 apresenta os valores médios para as propriedades típicas de materiais isolantes.

TABELA 8.1: Propriedades típicas de materiais isolantes

Material	Massa Específica (kg/m³)	Condutividade Térmica (W/m°C)	Calor Específico (J/kg °C)
Fibra mineral projetada	250 - 300	0,1	1100
Placas de perlita ou vermiculita	300 - 800	0,15	1100
Folhas de silicato de amianto	800	0,15	1100
Folhas de silicato fibroso	450 - 900	0,15	1100
Placas de gesso	800	0,2	1700
Placas de lã mineral	120 - 150	0,25	1100
Concreto celular	600	0,3	1200
Concreto celular	1000	0,45	1200
Concreto celular	1300	0,65	1200
Concreto leve	1600	0,8	1200
Tijolo cerâmico	2000	1,2	1200
Concreto de densidade normal (de agregado predominantemente amorfo)	2200 - 2400	1,3	1200
Concreto de densidade normal (de agregado predominantemente amorfo)	2200 - 2400	1,7	1200
Mantas de fibras minerais	100 - 500	0,23 - 0,25	1500
Mantas cerâmicas	61 - 92	0,10 - 0,25	1067
Argamassa de fibras minerais	200 - 350	0,08 - 0,10	1050
Argamassa de gesso	500 - 800	0,20 - 0,23	1700

Fonte: Soares (2002).

Analisando os dados da tabela 8.1, verifica-se a apresentação de concretos celulares com diferentes massas específicas, sendo que isto implica diretamente no aumento da condutividade térmica dos materiais.

Pode-se verificar ainda, que os isolantes térmicos que possuem baixa condutividade térmica, apresentam em geral, baixa massa específica.

8.2.1 Calor específico

Calor específico é uma grandeza física que define a variação térmica de determinada substância ao receber determinada quantidade de calor. Também é chamado de capacidade térmica específica. É constante para cada substância em cada estado físico.

Pode-se também defini-lo como a propriedade que um material apresenta que indica a habilidade que este possui para absorver calor de fontes externas. Representa a quantidade de energia exigida para produzir um aumento unitário de temperatura, sendo expressa da seguinte forma:

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (8.1)$$

Onde:

dQ = energia exigida para produzir uma variação de temperatura dT .

8.2.2 Condutividade térmica

Condutividade térmica é uma propriedade física dos materiais que descreve a habilidade de conduzir calor, equivale a quantidade de calor Q transmitida através de uma espessura L , numa direção normal à superfície de área A , devido ao gradiente de temperatura ΔT , sob condições de estado fixo e quando a transferência de calor é dependente apenas do gradiente de temperatura.

Pode ser obtido por intermédio da seguinte expressão:

$$\frac{Q}{\Delta t} = KA\left(\frac{\Delta T}{L}\right) \quad (8.2)$$

Onde:

$Q/\Delta t$ é a energia transferida como calor por segundo (J/s);

K é a condutividade térmica (W/m.K);

A é a área (m²);

ΔT é a diferença de temperaturas (K);

L é a espessura (m).

8.2.2.1 Coeficiente de condutividade térmica

O coeficiente de condutividade térmica é uma característica da natureza do material, que corresponde à quantidade de energia, sob a forma de calor, que passa num segundo através de 1m² de superfície quando a diferença de temperatura entre o interior e o exterior é de 1°C.

$$\frac{Q}{\Delta t} = UA\Delta T \quad (8.3)$$

Onde:

$Q/\Delta t$ é a energia transferida como calor, por segundo (J/s);

U é o coeficiente de condutividade térmica;

A é a área (m²);

ΔT é a diferença de temperaturas (K).

A condutividade térmica e o coeficiente de condutividade térmica relacionam-se através da seguinte expressão:

$$U = \frac{K}{L} \quad (8.4)$$

Onde:

A unidade U pode estar expressa em watt por metro quadrado vezes graus Celsius (símbolo: W/m².°C)

8.2.3 Massa específica

A massa específica (μ) de uma substância é a razão entre a massa (m) de uma quantidade da substância e o volume (V) correspondente:

$$\mu = \frac{m}{V} \quad (8.5)$$

Onde:

μ é a massa específica em kg/m³;

m é a massa expressa em kg;

V é o volume expresso em m³.

8.3 Classificação dos revestimentos térmicos

Os materiais para revestimentos térmicos utilizados atualmente podem ser classificados segundo três fatores:

a) Quanto ao material constituinte

Alvenaria, concreto de cimento portland, concreto leve, argamassas à base de cimento, de fibras minerais, de vermiculita ou de gesso, mantas de fibras cerâmicas, de fibras minerais ou de lã de rocha, tintas intumescentes, entre outros.

b) Quanto à morfologia

A morfologia diz respeito à forma adquirida pelo produto aplicado, sendo tipo vertido, tipo contorno e caixa, indicados na figura 8.2.

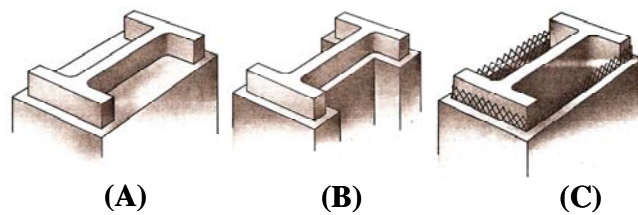


FIGURA 8.2: Quanto à morfologia, tipo vertido (A), tipo contorno (B) e tipo caixa (C).

c) Quanto à técnica de colocação

Quanto à colocação, são moldados com o uso de formas, aplicados manualmente, aplicados por jateamento, fixados por dispositivos específicos ou montados.

8.4 Tipos de materiais de proteção térmica

8.4.1 Argamassas projetadas

O nome argamassa projetada deve-se justamente à forma de aplicação do material, que é aplicado por jateamento conforme figura 8.3. São geralmente de baixo custo e de bom desempenho, porém não apresentam um bom acabamento estético, pois têm aspecto de chapisco.



FIGURA 8.3: Fotografia da aplicação da argamassa projetada.

Segundo a Cafco (2006), estes materiais são os mais utilizados para a proteção de estruturas metálicas em todo o mundo, tendo sido utilizados inclusive na proteção passiva estrutural do *World Trade Center*.

Segundo Mendes (2004), estes materiais devem seguir algumas exigências estabelecidas por alguns órgãos internacionais de normatização, conforme tabela 8.2, onde se verificam propriedades físicas e recomendações importantes.

No Brasil, as argamassas projetadas são utilizadas com as seguintes composições:

a) Argamassas cimentícias

As argamassas projetadas cimentícias são compostas por materiais aglomerantes, como gesso e cimento, em grandes quantidades, e resinas acrílicas. As composições dos aglomerantes variam de acordo com o fabricante e a sua utilização, sendo que de acordo com sua composição e percentuais de materiais utilizados, irão variar suas características físicas e comportamento.

As argamassas de baixa densidade são indicadas para o interior de edificações e possuem peso específico de 240 kg/m^3 , podendo permanecer expostas ou sob forro.

Sua composição em geral, possui 80% de gesso e 2% de cimento Portland. As argamassas de média e alta densidades têm como aglomerante básico o cimento Portland e apresentam densidades de 350 kg/m^3 e 640 kg/m^3 , respectivamente.

Estas são indicadas para usos externos e locais que necessitem de materiais com alta resistência contra impactos e umidade.

As argamassas podem ser aplicadas diretamente sobre o aço, não necessitando de pinos e ou telas, pois possuem uma boa aderência. Podem ser coloridas de fábrica ou pintadas na obra.

As argamassas de média e alta densidade apresentam outras vantagens comparando-se às de baixa densidade. Possuem maior resistência a impactos e à umidade, podendo sofrer ações de intempéries sem apresentar maiores problemas.

TABELA 8.2:Exigência de órgãos internacionais de normatização

Propriedades Físicas	Mínimos Recomendados Baixa densidade	Mínimos Recomendados Média e alta densidade	Método de Ensaio
Densidade seca (média mínima)	240 Kg/m ³	Não apresenta	ASTM E 605 e UBC STD7-6
Aderência ao aço	9,6 KPa	56 Kpa	ASTM E 736
Compressão (10% de deformação máxima)	57 KPa	57 KPa	ASTM E 761
Erosão ao ar a 24 Km/h	Máximo 0,05 g/ft ²	Máximo 0,05 g/ft ²	ASTM E 859
Erosão ao ar em alta velocidade a 46,4 Km/h	Não deve apresentar após 4 horas	Não deve apresentar após 4 horas	ASTM E 859 UMC STD 6-1
Corrosão	Não contribuir	Não contribuir	ASTM E 937
Impacto - aderência	Não delaminar ou desprender	Não delaminar ou desprender	ASTM 759
Resistência à penetração	Máximo de 6 cm ³	-	Dir. de obras de San Francisco
Resistência à abrasão	Máximo volume removido 15 cm ³	-	Dir. de obras de San Francisco
Resistência a fungos	28 dias em usos gerais ou 60 dias em plenums	28 dias em usos gerais ou 60 dias em plenums	ASTM G21

Fonte: Catálogo Grace 2006.

Outra vantagem é que podem receber acabamento para ficar com a superfície lisa e assim, apresentar um aspecto estético melhor.

A tabela 8.3 apresenta resultados de testes feitos com argamassas de baixa, média e alta densidade.

TABELA 8.3: Testes realizados em argamassas de baixa, média e alta densidade.

Propriedades físicas	Argamassa projetada		
	Baixa densidade	Média densidade	Alta densidade
Densidade seca (média mínima)	240 Kg/m ³	350 Kg/m ³	640 Kg/m ³
Aderência ao aço	16,2 KPa (339 psf)	94,5 KN/m ² (2000 psf)	472 KN/m ² (10000 psf)
Compressão (10% deformação máxima)	68,9 KPa (1440 psf)	476 KPa (70 psi)	3,79 MPa (550 psi)
Erosão ao ar 24 Km/h	Não apresentou erosão	Não apresentou erosão	Não apresentou erosão
Erosão ao ar em alta velocidade 46 Km/h	Não apresentou erosão após 4 horas	Não apresentou erosão	Não apresentou erosão
Corrosão	Não contribuiu	Não contribuiu	Não contribuiu
Impacto-aderência	Não apresentou	Não apresentou	Não apresentou
Deformação	Não apresentou	Não apresentou	Não apresentou
Resistência à penetração	3,3 cm ³	-	-
Resistência à abrasão	8,3 cm ³	-	-
Resistência a fungos	Não apresentou fungos	Não apresentou fungos	Não apresentou fungos

Fonte: Catálogo Grace 2006.

Os resultados apresentados na tabela 8.3 são relativos a testes realizados com os produtos MONOKOTE.

Os fabricantes de materiais para proteção passiva apresentam em seus catálogos técnicos, as cartas de cobertura para cada tipo de aplicação de acordo com o resultado que se pretende alcançar.

TABELA 8.4: Espessura da argamassa MK6 (mm), em função de F e TRRF - $\theta_{cr}=650^{\circ}\text{C}$.

F (m ⁻¹)	TRRF (min)			
	30	60	90	120
30	10	10	10	10
60	10	10	10	10
70	10	10	10	12
80	10	10	10	13
90	10	10	11	15
100	10	10	12	17
110	10	10	14	18
120	10	10	15	20
130	10	11	16	22
140	10	11	17	23
150	10	12	19	25
160	10	13	20	27
170	10	14	21	28
180	10	15	22	30
190	10	15	24	32
200	10	16	25	34
210	10	17	26	35
220	10	18	27	37
230	10	19	29	39
240	10	20	30	40
250	10	20	30	40
260	10	20	31	42
270	10	21	32	44
280	11	22	34	45
290	11	24	36	48
300	12	24	37	49
310	12	24	37	50
320	12	25	37	50

Fonte: Silva (2001)

TABELA 8.5: Espessura da argamassa MK6 (mm), em função de F e TRRF - $\theta_{cr}=550^{\circ}C$.

F (m ⁻¹)	TRRF (min)				
	30	60	90	120	190
30	10	10	10	10	15
40	10	10	10	13	20
50	10	10	12	16	24
60	10	10	14	18	27
70	10	10	15	21	31
80	10	11	17	23	34
90	10	12	18	25	37
100	10	13	20	26	40
110	10	14	21	28	42
120	10	15	22	30	45
130	10	16	23	31	47
140	10	16	25	33	49
150	10	17	26	34	52
160	10	18	27	36	53
170	10	18	28	37	55
180	10	19	28	38	57
190	10	19	29	39	59
200	10	20	30	40	61
210	10	20	31	41	62
220	10	21	32	42	64
230	10	21	32	43	65
240	11	22	33	44	66
250	11	22	34	45	-
260	11	23	34	46	-
270	11	23	35	47	-
280	11	23	35	47	-
290	12	24	36	48	-
300	12	24	36	49	-
310	12	24	37	49	-
320	12	25	37	50	-

Fonte: Silva (2001)

Nas tabelas 8.4 e 8.5, verifica-se a espessura necessária para carta de cobertura do material, neste caso, argamassa projetada, através de resultados obtidos por ensaios experimentais, em função do fator de massividade (F) e o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), para uma temperatura crítica determinada (θ_{cr}).

As figuras 8.4 e 8.5 apresentam, respectivamente a fotografia da argamassa projetada com aumento de 10 vezes e o aspecto da argamassa depois de aplicada na estrutura.



FIGURA 8.4: Fotografia da argamassa projetada com aumento de 10 vezes.



FIGURA 8.5: Argamassa projetada aplicada sobre a estrutura de aço.

b) Fibras projetadas

São produtos de baixa e média densidades, contendo basicamente fibras obtidas a partir de rocha basáltica ou escória de alto-forno como principal ingrediente. Estas fibras são misturadas com escória de alto-forno (20 a 30% do peso seco total) para criar uma mistura de baixa densidade.

São de baixa densidade, 240 kg/m^3 , e indicadas para usos interiores e exteriores, podendo permanecer expostas ou não.

A tabela 8.6 indica espessuras para a argamassa do tipo fibra projetada *Blaze- Shield II* para a temperatura de $550 \text{ }^\circ\text{C}$.

Este material apresenta uma condutividade térmica de $0,061 \text{ W/m }^\circ\text{C}$ para $100 \text{ }^\circ\text{C}$ e calor específico de $2093 \text{ J/kg }^\circ\text{C}$ para $96 \text{ }^\circ\text{C}$, segundo a Cafco (2006).

Sua aplicação segue os mesmos princípios da argamassa cimentícia, podendo ser aplicada diretamente sobre o aço. Não é necessária a utilização de revestimentos, permitindo uma aplicação rápida, devendo esta ser realizada, preferencialmente, durante a fase de construção, porém podendo também ser aplicada durante períodos de reformas.



FIGURA 8.6: Argamassa projetada aplicada sobre a estrutura externa de aço.

TABELA 8.6: Espessura da argamassa composta por fibras projetadas, *Blaze Shield II*, em mm, em função de F e do TRRF, para $\theta_{cr}=550^{\circ}C$.

F (m ⁻¹)	TRRF (min)			
	30	60	90	120
30	10	10	10	10
40	10	10	10	12
50	10	10	11	14
60	10	10	12	16
70	10	10	14	18
80	10	10	15	20
90	10	11	16	22
100	10	12	18	24
110	10	13	19	25
120	10	13	20	27
130	10	14	21	28
140	10	15	22	30
150	10	15	23	31
160	10	16	24	32
170	10	16	25	33
180	10	17	26	34
190	10	17	26	35
200	10	18	27	36
210	10	18	28	37
220	10	19	29	38
230	10	19	29	39
240	10	20	30	40
250	10	20	30	41
260	10	20	31	41
270	10	21	31	42
280	10	21	32	43
290	10	21	32	43
300	11	22	33	44
310	11	22	33	44
320	11	22	34	45

Fonte: Mendes (2004)

A tabela 8.7 apresenta a condutividade térmica para a argamassa de fibra projetada *Blaze Shield II*, com densidade de 240 Kg/m³.

TABELA 8.7: Condutividade térmica da argamassa de fibra projetada *Blaze Shield II*.

Temperatura (°C)	Condutividade Térmica (W/m °C)
100	0,061
200	0,080
400	0,112
482	0,147
600	0,173
1093	0,208

Fonte: Silva (2001)

A tabela 8.8 apresenta a variação do calor específico da argamassa de fibra projetada *Blaze Shield II*, em função da elevação da temperatura.

TABELA 8.8: Calor específico da argamassa de fibra projetada *Blaze Shield II*.

Temperatura (°C)	Calor específico (J/Kg °C)
96	2093
104	837
150	1675
482	2303
1093	2512

Fonte: Silva (2001)

c) Argamassas e concretos vermiculíticos

A vermiculita é um minério lamelar cuja constituição química básica é de silicatos hidratados de alumínio e magnésio, originário da alteração de algumas micas. O minério submetido a um choque térmico, perde água contida em suas lamelas, provocando um processo de esfoliação, expandindo-se e preenchendo com ar os espaços vazios tornando-se um excelente isolante térmico e refratário.

Este tipo de material de proteção é ideal para áreas industriais, sua aplicação é lenta, requerendo elementos de ancoragem e limpeza posterior à aplicação.

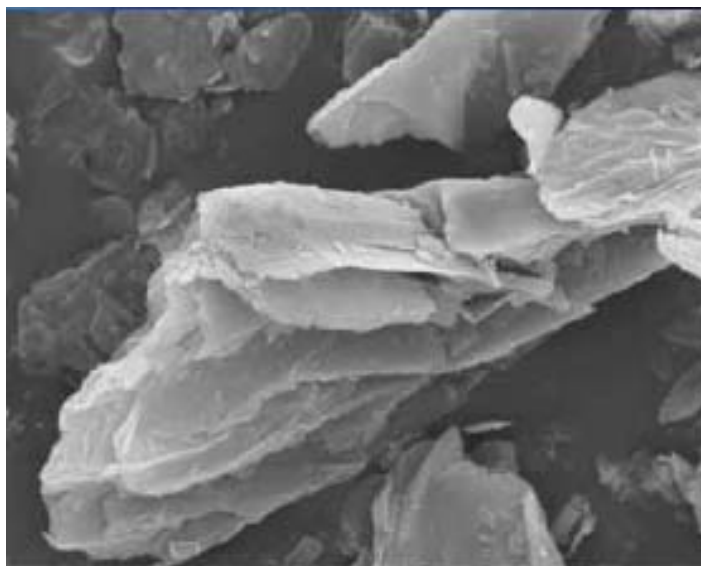


FIGURA 8.7: Microestrutura da vermiculita.

Os concretos vermiculíticos são produtos de baixa densidade, composto basicamente de vermiculita expandida, cimento Portland e aglomerados minerais, com densidades nominais aparentes a partir de 600 kg/m^3 , podendo chegar a mais de 900 kg/m^3 dependendo da formulação e respectiva finalidade e utilização.

Porém, alguns tipos de argamassas com utilização de vermiculita super fina (granulometria entre $0,3 \text{ mm}$ a $1,0 \text{ mm}$), podem ter densidades variando de 100 kg/m^3 a 130 kg/m^3 .

É um sistema comparativamente mais caro quando se trata de construção civil, porém possui as vantagens de ter grande resistência mecânica, suportar intemperismos e atmosferas quimicamente agressivas.

São aplicados por jateamento em camadas sucessivas, sendo que a primeira camada (sustentação) deve conter um aditivo para perfeita aderência à superfície metálica, porém, se necessário para melhorar sua aderência ao aço, costuma-se utilizar telas.

É muito utilizado em indústrias petroquímicas, plataformas de petróleo ou em estruturas sujeitas a abusos mecânicos elevados e atende a exigências de proteção contra incêndios de hidrocarbonetos (combustíveis fósseis e petroquímicos).

Este tipo de material pode ser alisado, pintado e receber acabamentos para a melhoria de seu aspecto estético.

Vários traços de concretos vermiculíticos podem ser utilizados, com variação das suas características físicas e químicas, como mostra a tabela 8.9, na ordem cimento - vermiculita.

TABELA 8.9: Concretos vermiculíticos – variação dos traços e características.

Traço	Densidade (kg/m³)	Resistência à Compressão após 28 dias (kgf/cm²)
1 – 10	380	2,4
1 – 8	450	3,5
1 – 6	680	13,0
1 – 4	770	20,0
1 – 2	950	42,0

Fonte: www.isocel.kit.net/isocel.

Com relação à condutividade térmica, as fontes de consulta pesquisadas apresentam como sendo de 0,070 W/mK, porém o laudo do IPT – 69587 e 908636, apresenta dados diferentes para testes feitos com os produtos *Isopiro* e *Isopiro LV*, da EUCATEX, conforme tabela 8.10.

TABELA 8.10: Características dos concretos vermiculíticos Isopiro e Isopiro LV.

Propriedades	Isopiro	Isopiro LV
Condutibilidade térmica (W/mK)	0,27	0,14
Calor específico (J/kg °C)	0,22	0,15
Densidade (kg/m ³)	898,00	600,00

Fonte: Catálogo Eucatex (2007)

De acordo com a tabela 8.11, pode-se verificar a carta de cobertura dos perfis em função de F e TRRF.

TABELA 8.11: Espessura da argamassa/concreto vermiculítico, em mm, em função de F e do TRRF.

F (m ⁻¹)	TRRF (min)					
	30	60	90	120	180	200
10	10	10	10	10	10	10
30	10	10	10	10	20	25
50	10	10	15	20	30	35
70	10	10	20	25	35	45
90	10	15	20	30	40	55
110	10	15	25	30	45	60
130	10	20	25	35	50	60
150	10	20	30	35	50	65
170	10	20	30	40	55	65
190	10	25	30	40	55	70
210	15	25	30	40	60	70
230	15	25	35	45	60	75
250	15	25	35	45	60	75
270	15	25	35	45	60	75
290	15	25	35	45	60	75
310	15	25	35	45	60	75
330	15	25	35	45	60	75
350	15	25	35	45	60	75
370	15	25	35	45	60	75
390	15	25	35	45	60	75

Fonte: Catálogo Eucatex (2007)

8.4.2 Tintas intumescentes

As tintas intumescentes foram criadas para reagir ao calor gerado durante o incêndio, intumescendo-se e criando uma barreira capaz de proteger o aço da ação do calor dos gases quentes conforme mostra a figura 8.8.

As tintas intumescem a partir de 200°C, ou seja, expandem gerando uma camada de espessura rígida que protege a estrutura de aço dos gases quentes.

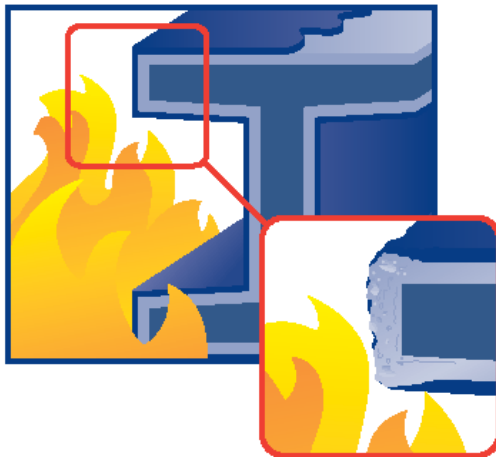


FIGURA 8.8: Reação ao calor e criação de camada protetora.

São compostas, de modo geral, de sais de fósforo, de amidos, de melanina e resinas orgânicas.

Devido à boa aparência destas tintas, as mesmas podem ser incorporadas a projetos arquitetônicos. Porém, apresentam custo elevado.

As formulações referentes ao desenvolvimento da temperatura no aço protegido, apresentadas anteriormente, não se aplicam às tintas intumescentes, devendo ser realizados estudos empíricos e/ou seguir recomendações prescritas pelos fabricantes, em função da não disponibilização de informações pelos mesmos.

Os revestimentos de proteção contra incêndio podem ser aplicados quer em obra ou fora desta (numa oficina de fabricação ou de pintura), porém recomenda-se que sempre que possível a aplicação seja feita em oficinas especializadas, pelas seguintes razões:

a) As oficinas de fabricação e pintura são ambientes controlados com processos de qualidade definidos e documentados aliados a operadores experientes e qualificados, uma

vez que os revestimentos concebidos para proporcionar a segurança deverão ser aplicados de forma cuidadosa.

b) A aplicação de materiais em obra é dispendiosa, devido à necessidade de montagem de andaimes e selagem das áreas durante a aplicação. Durante a aplicação em obra é também mais difícil controlar a espessura aplicada, o que pode levar ao problema de aplicação excessiva ou insuficiente.

c) A aplicação em obra poderá interromper outros trabalhos, levando a atrasos do projeto, o que pode, por sua vez, ter um impacto no rendimento do investimento. A ausência de aplicação de tintas em obra reduz também as implicações de saúde e segurança.

d) A aplicação em oficina permite que o esquema de pintura esteja completo antes da entrega em obra.

Geralmente os revestimentos são aplicados com uma espessura entre 1-8 mm e não colidem com a forma geral do aço, permitindo designs complexos e arquiteturalmente inovadores, conforme pode ser visualizado na figura 8.9.

Porém é importante ressaltar que os perfis maciços levam mais tempo para se aquecer que os perfis mais esbeltos, o que resulta na necessidade de um revestimento mais espesso para os perfis esbeltos.



FIGURA 8.9: Detalhes da pintura intumescente em estrutura metálica.

A figura 8.10 mostra de forma detalhada a seqüência de eventos para o intumescimento da tinta na estrutura.

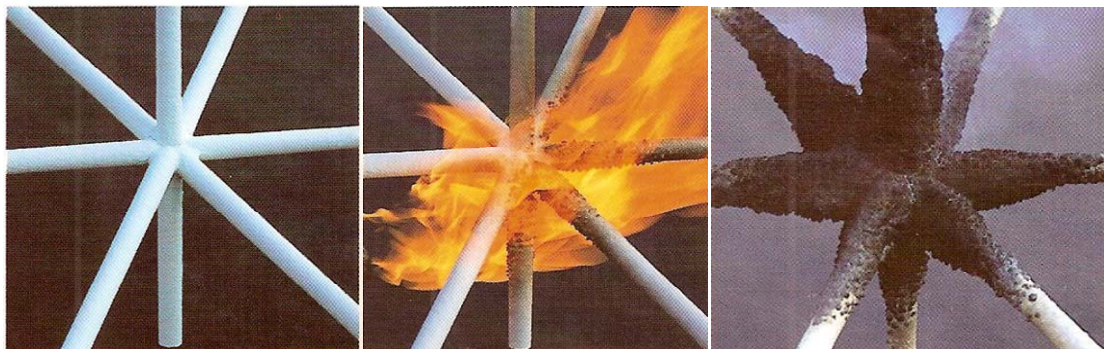


FIGURA 8.10: Detalhes da seqüência de eventos para o intumescimento da tinta na estrutura.

A aplicação da tinta intumescente requer alguns cuidados: a base da estrutura de aço deve ser devidamente limpa e aplicado sobre ela um primer compatível com a pintura.

Após a realização da pintura, a mesma poderá ser recoberta por uma película acrílica ou poliuretânica, aumentando suas resistências química e física e melhorando seu acabamento final.

Outro fator relevante é o ambiente no local da aplicação, pois a temperatura do aço e do ambiente não podem estar abaixo de 5,0 °C e a umidade relativa do ar deve obrigatoriamente, estar abaixo de 80%.

A figura 8.11 apresenta o esquema de preparação para pintura e acabamento do elemento estrutural.

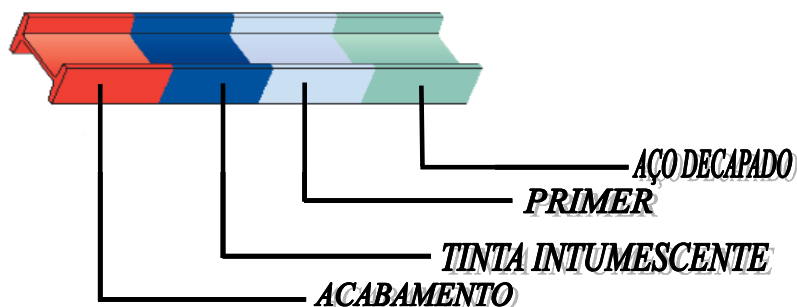


FIGURA 8.11: Esquema de preparação, pintura e acabamento do elemento estrutural com tinta intumescente.

TABELA 8.12: Espessura da película (mm) de tinta intumescente aplicadas em pilares de seção transversal de forma “I”, com os quatro lados expostos ao fogo, em função de F e do TRRF, para $\theta_{cr}=550^{\circ}\text{C}$.

F (m ⁻¹)	TRRF (min)				TRRF (min)	
	Aplicado em ambiente externo				Aplicado em ambiente interno	
	30	60	90	120	30	60
30	0,25	0,74	1,48	2,47	0,20	0,44
100	0,25	0,74	1,48	2,47	0,20	0,44
105	0,25	0,74	1,48	2,47	0,20	0,64
110	0,32	0,74	1,48	2,47	0,20	0,64
120	0,32	0,74	1,48	2,47	0,20	0,64
125	0,32	0,74	1,48	3,22	0,20	0,64
130	0,32	0,74	1,48	3,22	0,20	0,64
135	0,32	0,85	1,48	3,22	0,20	0,64
140	0,32	0,85	1,48	3,22	0,20	0,64
145	0,32	0,85	1,48	3,96	0,20	0,64
150	0,49	1,27	1,73	3,96	0,20	0,88
160	0,49	1,27	1,73	3,96	0,20	0,88
165	0,49	1,27	1,73	4,7	0,20	0,88
170	0,49	1,27	2,31	4,7	0,20	0,88
175	0,49	1,27	2,31	4,7	0,32	0,88
180	0,49	1,27	2,31	4,7	0,32	0,88
185	0,49	1,27	2,31	5,19	0,32	0,88
195	0,49	1,27	2,31	5,19	0,32	0,88
200	0,49	1,27	2,31	5,94	0,32	0,88
205	0,49	1,27	2,31	5,94	0,32	0,88
210	0,55	1,45	2,97	5,94	0,38	0,98
215	0,55	1,45	2,97	-	0,38	0,98
225	0,55	1,45	2,97	-	0,38	0,98
230	0,55	1,45	3,71	-	0,38	0,98
235	0,63	1,69	3,71	-	0,46	1,12
240	0,63	1,69	3,71	-	0,46	1,12
245	0,63	1,69	4,45	-	0,46	1,12
255	0,63	1,69	4,45	-	0,46	1,12
260	0,63	1,69	5,19	-	0,46	1,12
265	0,63	1,69	5,19	-	0,46	1,12
270	0,99	2,23	5,19	-	0,60	1,25
275	0,99	2,23	5,94	-	0,60	1,25
285	0,99	2,23	5,94	-	0,60	1,25
290	0,99	2,23	-	-	0,60	1,25
320	0,99	2,23	-	-	0,60	1,25

Fonte: Silva (2001)

TABELA 8.13: Espessura da película (mm) de tinta intumescente aplicadas em vigas, com seção transversal de forma “I”, com os quatro lados expostos ao fogo, em função de F e do TRRF, para $\theta_{cr}=550^{\circ}\text{C}$.

F (m ⁻¹)	TRRF (min)				TRRF (min)	
	Aplicado em ambiente externo				Aplicado em ambiente interno	
	30	60	90	120	30	60
30	0,25	0,74	1,48	2,47	0,20	0,44
100	0,25	0,74	1,48	2,47	0,20	0,44
105	0,35	0,85	1,48	2,47	0,20	0,64
120	0,35	0,85	1,48	2,47	0,20	0,64
125	0,35	0,85	1,48	3,22	0,20	0,64
140	0,35	0,85	1,48	3,22	0,20	0,64
145	0,35	0,85	1,48	3,96	0,20	0,64
150	0,50	1,27	2,02	3,96	0,32	0,88
160	0,50	1,27	2,02	3,96	0,32	0,88
165	0,50	1,27	2,02	4,70	0,32	0,88
175	0,50	1,27	2,02	4,70	0,32	0,88
180	0,50	1,27	2,31	4,70	0,32	0,88
185	0,50	1,27	2,31	5,19	0,32	0,88
195	0,50	1,27	2,31	5,19	0,32	0,88
200	0,50	1,27	2,31	5,94	0,32	0,88
205	0,50	1,27	2,31	5,94	0,32	0,88
210	0,55	1,45	2,97	5,94	0,38	0,98
215	0,55	1,45	2,97	-	0,38	0,98
225	0,55	1,45	2,97	-	0,38	0,98
230	0,55	1,45	4,20	-	0,38	0,98
235	0,64	1,69	4,20	-	0,46	1,12
250	0,64	1,69	4,20	-	0,46	1,12
255	0,64	1,69	4,95	-	0,46	1,12
265	0,64	1,69	4,95	-	0,46	1,12
270	0,72	1,98	5,94	-	0,60	1,25
285	0,72	1,98	5,94	-	0,60	1,25
290	0,72	1,98	-	-	0,60	1,25
300	0,72	1,98	-	-	0,60	1,25
305	0,99	2,23	-	-	0,60	-
320	0,99	2,23	-	-	0,60	-

Fonte: Silva (2001)

8.4.3 Placas de lã mineral

A lã de rocha ou lã mineral já era conhecida há muito pelos nativos do Hawaí, proveniente de erupções vulcânicas. A observação desta ocorrência natural aliada ao conhecimento de que os materiais fibrosos são bons isolantes térmicos, motivou o início das pesquisas na Europa, por volta de 1840.

Em 1897, nos Estados Unidos, foi iniciada a produção comercial em pequena escala e somente após o término da 1.^a Guerra Mundial, essas fibras começaram a ganhar mercado nas aplicações industriais.

A composição das rochas de origem basáltica para fabricação de lã de rocha é basicamente de $SiO_2 - 53\%$, $Al_2O_3 - 123\%$, $CaO - 15\%$, $MgO - 11\%$ e outras substâncias com percentual de 9%, aproximadamente. A fusão da matéria prima ocorre em torno de 1500 °C, dando origem ao produto.

A massa vítrea fundida escoava da base do forno para um conjunto de discos de aço, girando em alta rotação, que pela força centrífuga transforma o material fundido, em fibras muito finas, com diâmetro 15 vezes menor que um fio de cabelo. O entrelaçamento destas fibras é grande, de forma a aprisionar em seu volume cerca de 99% de ar e apenas 1% de fibras.

Logo após a fibragem é aplicada uma resina termo-endurecível, que permite melhor sustentação nos pontos de contato das fibras.

A lã de rocha possui as seguintes propriedades físicas e térmicas:

TABELA 8.14: Propriedades da lã de rocha.

Propriedades	Valores
Condutibilidade térmica (W/mK)	0,25
Calor específico (J/kg °C)	0,20
Densidade (kg/m ³)	32,00

Fonte: Ficha técnica Rock Fibras.

A fixação dos painéis de lã de rocha é feita através de soldagem de pinos de aço à estrutura metálica, os quais garantem a ligação entre as partes. Este tipo de proteção não necessita de preparo da superfície da estrutura de aço e, no entanto, sua fixação é lenta, principalmente ao redor de detalhes complexos e pode ter o custo elevado.

TABELA 8.15: Espessura (mm) do painel Thermax-PEM em função de F e do TRRF, para $\theta_{cr}=550^{\circ}\text{C}$.

F (m ⁻¹)	TRRF (min)			
	30	60	90	120
30	25	25	25	25
60	25	25	25	25
65	25	25	25	38
95	25	25	25	38
100	25	25	38	38
105	25	25	38	50
140	25	25	38	50
145	25	25	38	63
160	25	25	38	63
165	25	25	50	63
185	25	25	50	63
190	25	25	50	75
230	25	25	50	75
235	25	38	50	75
240	25	38	63	88
300	25	38	63	88
305	25	38	63	100
320	25	38	63	100

Fonte: Catálogo Rock Fibras (2004)

8.4.4 Placa de gesso

Outros materiais são utilizados na proteção de estruturas metálicas, um dos mais comuns são as placas de gesso contendo fibra de vidro, e até mesmo com vermiculita incorporada.

Essas placas possuem características específicas para proteção contra o fogo, o que as torna diferentes de placas dry-wall, utilizadas para vedação.

Apresentam boa aparência, sendo empregadas muitas vezes na composição de projetos arquitetônicos.

As técnicas de instalação são demonstradas nas figuras 8.12 e 8.13, podendo sofrer adaptações, de acordo com a necessidade.

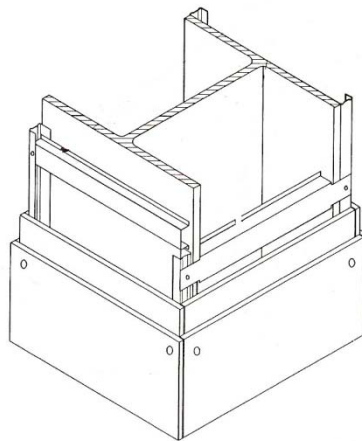


FIGURA 8.12: Esquema de instalação de placas de gesso com suportes.

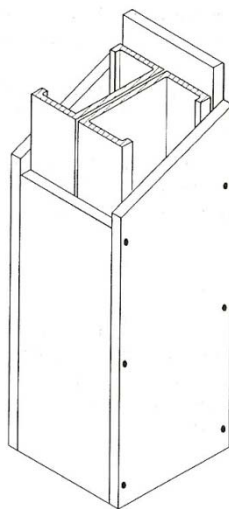


FIGURA 8.13: Esquema de enclausuramento de pilar com placa de gesso.

Vários outros materiais são encontrados no mercado, porém é de extrema importância que estes tenham comprovação técnica da sua eficiência, sendo necessário que sigam padrões nacionais e internacionais de qualidade, inclusive com certificação de órgãos reconhecidos.

No capítulo 9, alguns destes materiais serão testados para que se tenha condições de se avaliar sua eficiência com relação ao isolamento.

9

IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL E METODOLOGIA

9.1 Introdução

Para obtenção dos resultados almejados, através das análises propostas para o presente trabalho, foram utilizados dois softwares: o *Smartfire* e o *Thersys*. O primeiro fornece dados referentes à geração de uma curva de incêndio real (natural) e o segundo proporcionou condições de analisar termicamente a viga de aço USI SAC 300, conforme será descrito adiante.

A utilização dos softwares, aliadas às informações obtidas durante a pesquisa bibliográfica realizada, permitiu que se modelasse um incêndio em um apartamento, com variáveis mais próximas possíveis da realidade.

Posteriormente, a viga utilizada na análise foi submetida a condições de temperaturas elevadas sem proteção térmica e com proteção térmica, obtendo-se então os resultados pretendidos.

9.2 Programa *Smartfire*

O programa foi desenvolvido pelo Grupo de Engenharia de Segurança Contra Incêndio (*Fire Safety Engineering Group* - FSEG) da Universidade de Greenwich, na Inglaterra, e tem como objetivo a modelação de incêndios dentro de ambientes determinados pelos usuários, normalmente, profissionais da área de engenharia e arquitetura ligados aos estudos de incêndios.

Esse software provê a interação dinâmica do usuário e um sofisticado arranjo das ferramentas que facilita a simulação e ajuda a garantir soluções mais precisas. O software utiliza opções de configuração física, numérica e intuitiva para criar modelos de simulação o mais real possível (EWER et al.,2004).

O *SmartFire* é capaz de simular temperatura, turbulência e fluxo de calor modelados com base na dinâmica computacional de fluidos (*Computational Fluid Dynamics – CFD*), permitindo a criação detalhada da geometria do compartimento, da simulação do cenário do incêndio, de uma malha de elementos finitos, e desta forma, simular os efeitos do incêndio ao longo do tempo.

A metodologia do CFD vem sendo usada cada vez com maior frequência, para uma série de aplicações, das quais se destacam as simulações de incêndios no interior de edifícios.

O CFD consegue trabalhar um número enorme de variáveis em problemas extremamente complexos que somente poderiam ser parcialmente avaliados através de modelagens físicas em escala reduzida.

O uso deste software na presente pesquisa, tem como intuito a obtenção da curva natural de incêndio para prédios de habitação popular, de até sete pavimentos, desenvolvidos pela USIMINAS, através do programa USITETO, em parceria com a UFMG.

9.2.1 Análise computacional no *Smartfire*

9.2.1.1 Especificações da edificação utilizada como modelo

O bloco de apartamentos utilizado é edificado em sete pavimentos, com quatro apartamentos por pavimento, com área de 46,3 m² por apartamento, sendo que cada um possui dois quartos, sala, banheiro, cozinha e área de serviço, conforme figura 9.1.

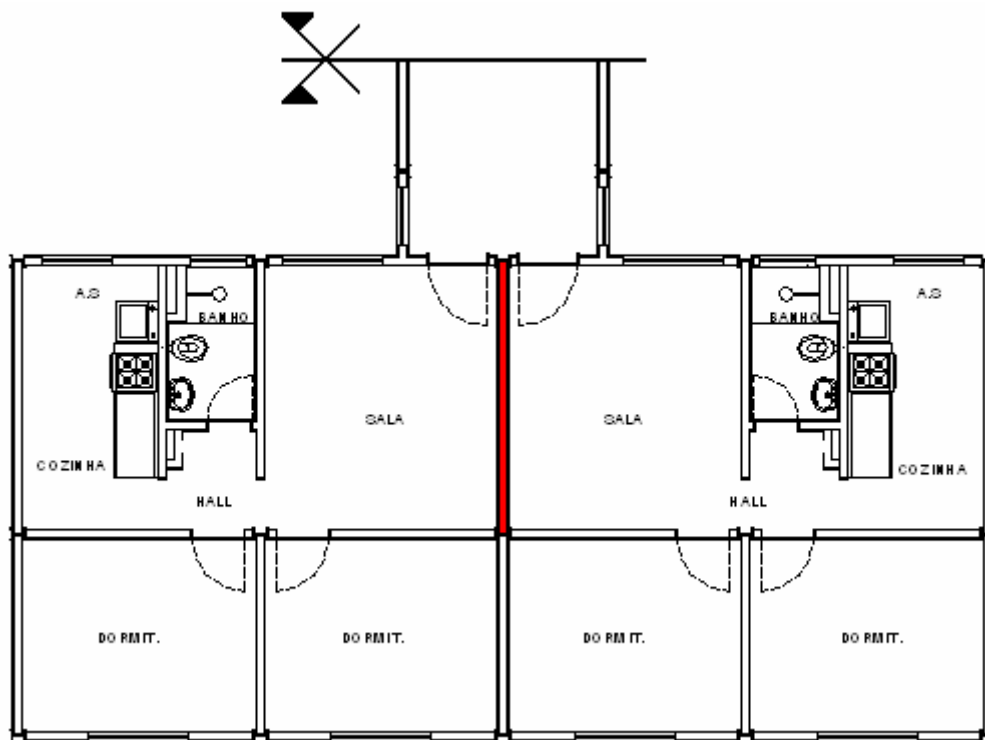


FIGURA 9.1: Layout do apartamento utilizado para as simulações

A edificação é estruturada em perfis formados à frio fabricados em aço *USI SAC 300*, sendo os pilares formados por perfis duplo cartola, unidos por cordões intermitentes de solda, executada em processo industrializado ou não.

As dimensões e o formato do pilar permitem o encaixe da alvenaria das paredes em todas as direções e sentidos, facilitando a solução da interface alvenaria / estrutura.

São utilizadas vigas em perfil caixa, obtidas a partir da união de perfis “U” enrijecidos também formados à frio, soldados intermitentemente. A laje é de concreto armado convencional na espessura de 7,0 cm, estando conectada às vigas de aço por meio de perfis U formados a frio soldados na mesa superior do perfil da viga, formando um sistema misto de aço e concreto, conforme figura 9.2.

Os pilares externos, juntamente com os contraventamentos que integram os pórticos principais do edifício, estão protegidos da ação de um eventual incêndio por paredes de alvenaria cerâmica ou de blocos de concreto (resistentes ao fogo), sem aberturas.

Os demais pilares externos e os pilares internos estão posicionados entre as alvenarias de blocos cerâmicos ou de concreto, com as faces protegidas da ação do calor.

Todas as ligações entre pilares e vigas podem ser classificadas como rígidas ou semi-rígidas, uma vez que a união entre esses elementos é executada por meio de solda de filete em toda a volta do perfil da viga e há nervuras horizontais, internas aos pilares, no nível de cada mesa das vigas.

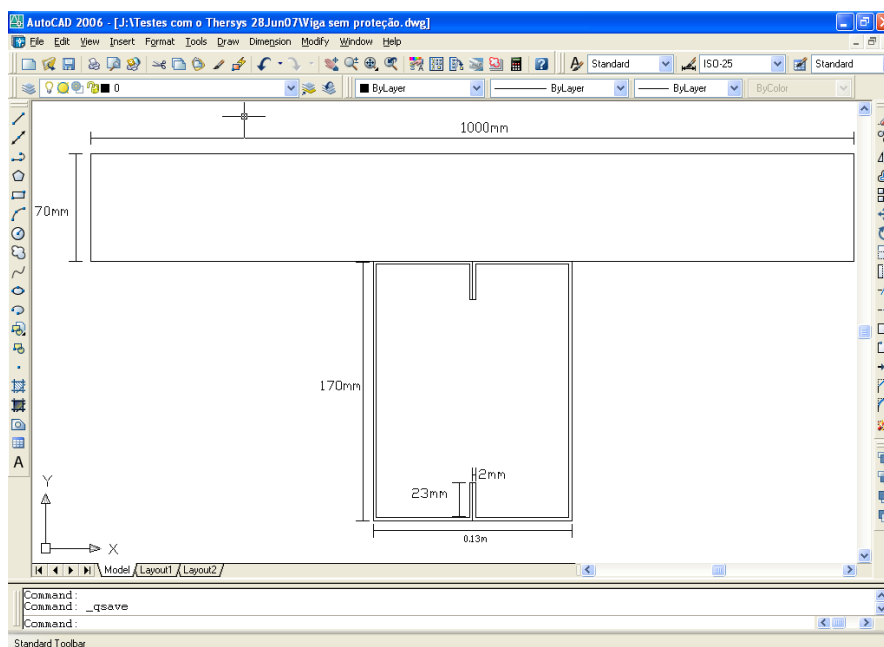


FIGURA 9.2: Dimensões da viga mista de aço e concreto analisada

Para as simulações foi adotada a viga indicada de forma destacada em vermelho na figura 9.1.

9.2.1.2 Modelamento do incêndio

O primeiro passo na simulação do incêndio é a criação da geometria da edificação. Para balizar a montagem de um volume 3D, uma planta de CAD pode ser importada do *Smartfire Scenario Designer* – facilitando a construção da volumetria –, e depois, exportada para o *Smartfire Case Specification Environment* conforme as Figuras 9.3 e 9.4.

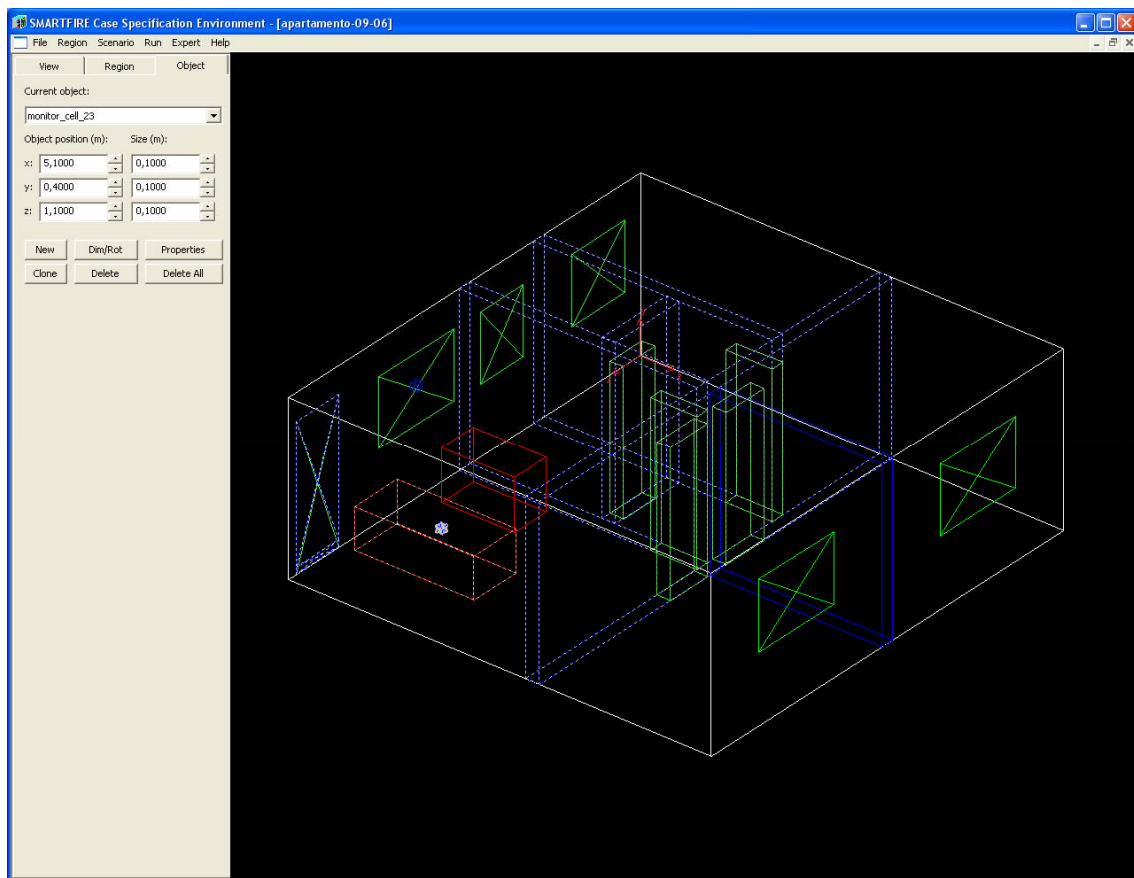


FIGURA 9.3: Perspectiva isométrica do apartamento para realização da simulação com layout e materiais

O *Smartfire Case Specification Environment* permite ao usuário especificar a geometria, criar vários tipos de incêndio, criar aberturas, ventilações/exaustões, chapas finas e obstáculos. O usuário pode também especificar as propriedades físicas de todos os objetos, conforme demonstrado na figura 9.5, especificar também a malha da geometria utilizando uma quantidade de células especificadas e dar início ao CFD (EWER, 2004).

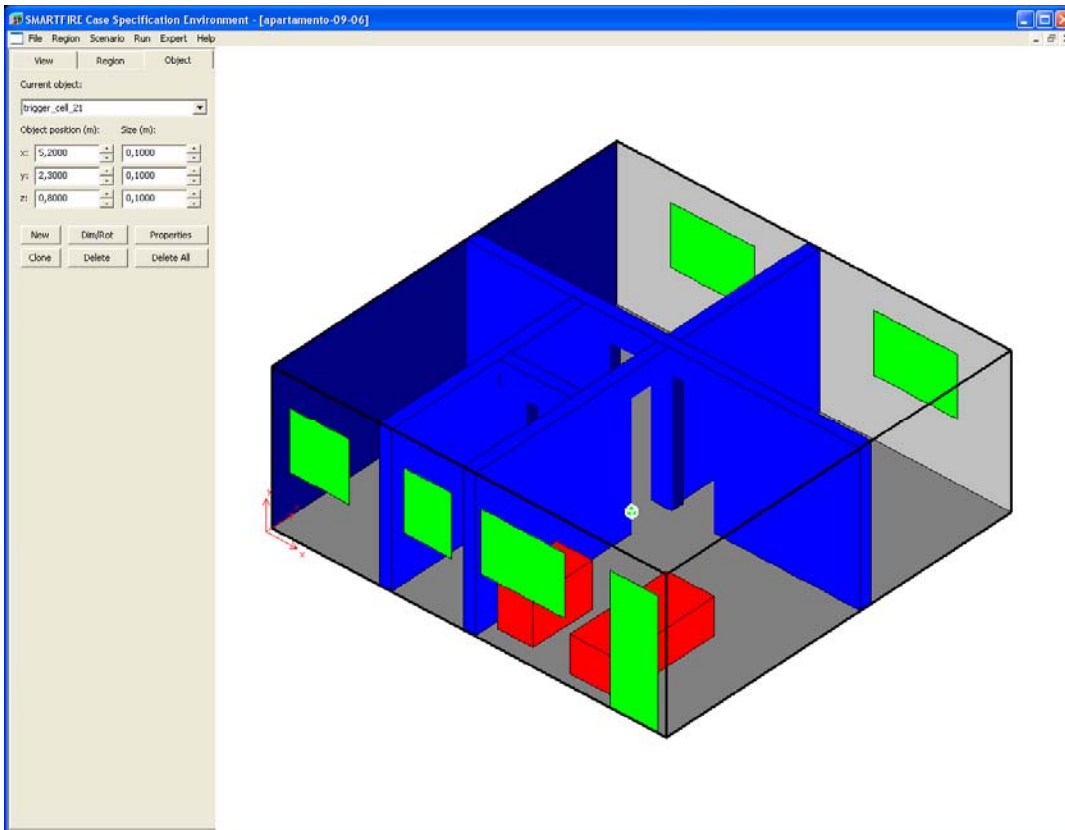


FIGURA 9.4: Esquema do apartamento em 3D.

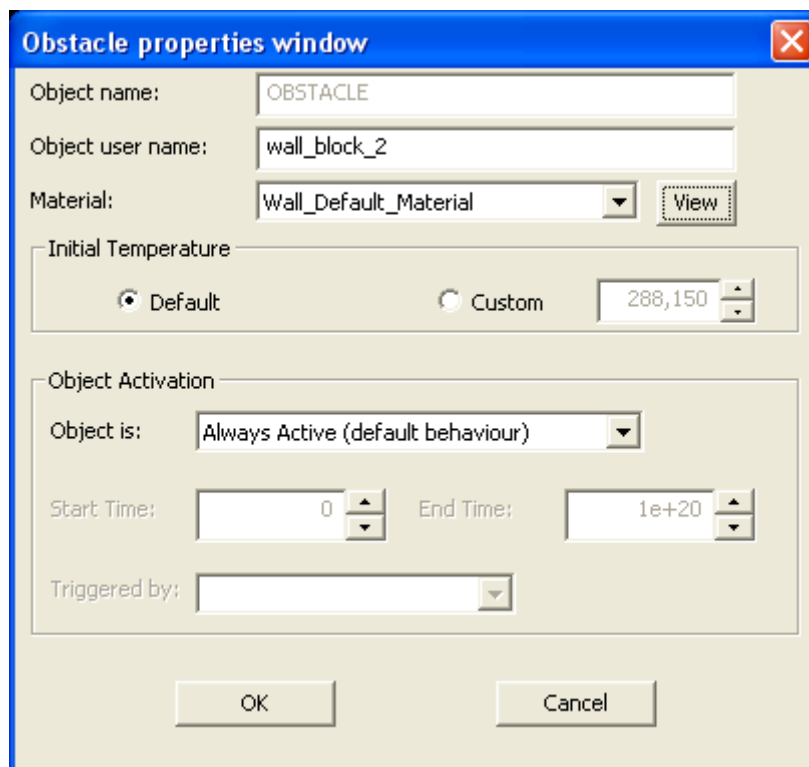


FIGURA 9.5: Janela para definição das propriedade dos materiais.

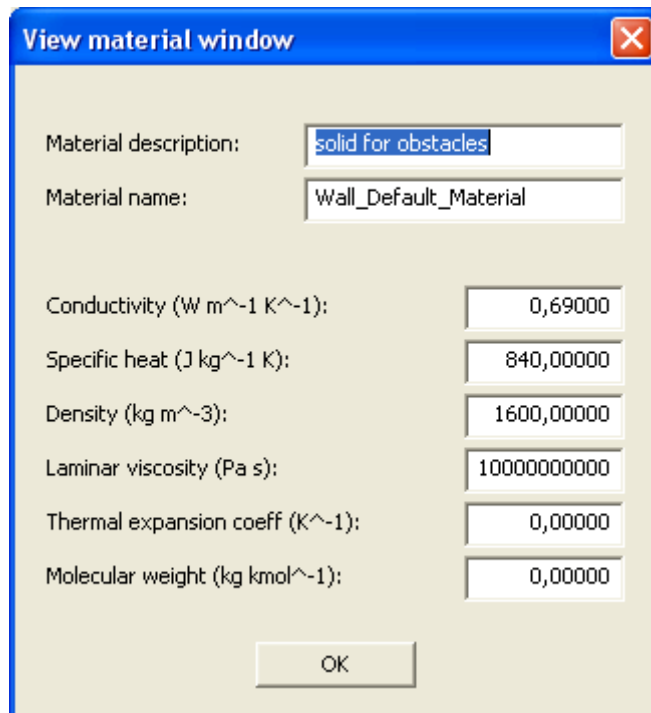


FIGURA 9.6: Propriedades dos materiais.

A Tabela 9.1 apresenta as propriedades físicas dos materiais utilizados em diferentes objetos do estudo de caso em questão. Todos os materiais fazem parte da biblioteca do *Smartfire Case Specification Environment*, sendo possível também a inserção de outros dados relativos a materiais novos adicionados à biblioteca do programa, mostrado na figura 9.6.

TABELA 9.1: Propriedades físicas dos materiais padrão apresentados pelo *Smartfire*.

Materiais	Propriedades			
	Condutividade (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Calor Específico (J kg ⁻¹ K)	Densidade (kg m ⁻³)	Viscosidade Laminar (Pa s)
Aço	45,80000	460,00000	7850,00000	10000000000
Concreto	1,40000	880,00000	2300,00000	10000000000
Tijolo comum	0,69000	840,00000	1600,00000	10000000000
Vidro	0,76000	840,00000	2700,00000	10000000000
Madeira mole	0,14000	2850,00000	640,00000	10000000000
Madeira dura	0,17000	2380,00000	800,00000	10000000000
Ar	0,02622	1045,78000	1,17736	0,00002

Fonte: *Smartfire* V4.0, 2004.

O *Smartfire* possui um sistema de interação que é uma ferramenta de especificação automática de malhas com um manual de edição embutido. As rotinas de malhas automatizadas são capazes de criar soluções para uma grande variedade de cenários.

A ferramenta está embutida dentro do *Smartfire Case Specification Environment* e é acessada pela barra do menu principal. As rotinas de malhas automatizadas usam combinações apropriadas para simulações de incêndios e parâmetros, através de uma biblioteca, para determinar o tipo para cada cenário de incêndio.

Uma vez que o usuário tenha especificado a geometria e as propriedades dos materiais, a ferramenta de malhas automáticas pode ser lançada conforme pode-se observar na Figura 9.7.



FIGURA 9.7: Malha de elementos finitos

Depois de configurada a malha de elementos finitos, configura-se o tipo de incêndio a ser utilizado na simulação. Caso o usuário opte por um incêndio *Standard fires (simple)*, o próprio programa fornecerá uma curva de incêndio padrão.

No caso específico do presente estudo, foram utilizados dados diferentes, referentes às taxas de calor liberadas na queima dos materiais existentes no apartamento. Para tal, opta-se pelo *table defined* e edita-se uma tabela com os dados relativos a cada material e suas propriedades durante a queima.

A figura 9.8 demonstra uma curva referente à taxa de calor liberada durante a queima do sofá em kW/s. Isto é especificado para cada material existente dentro do compartimento analisado.

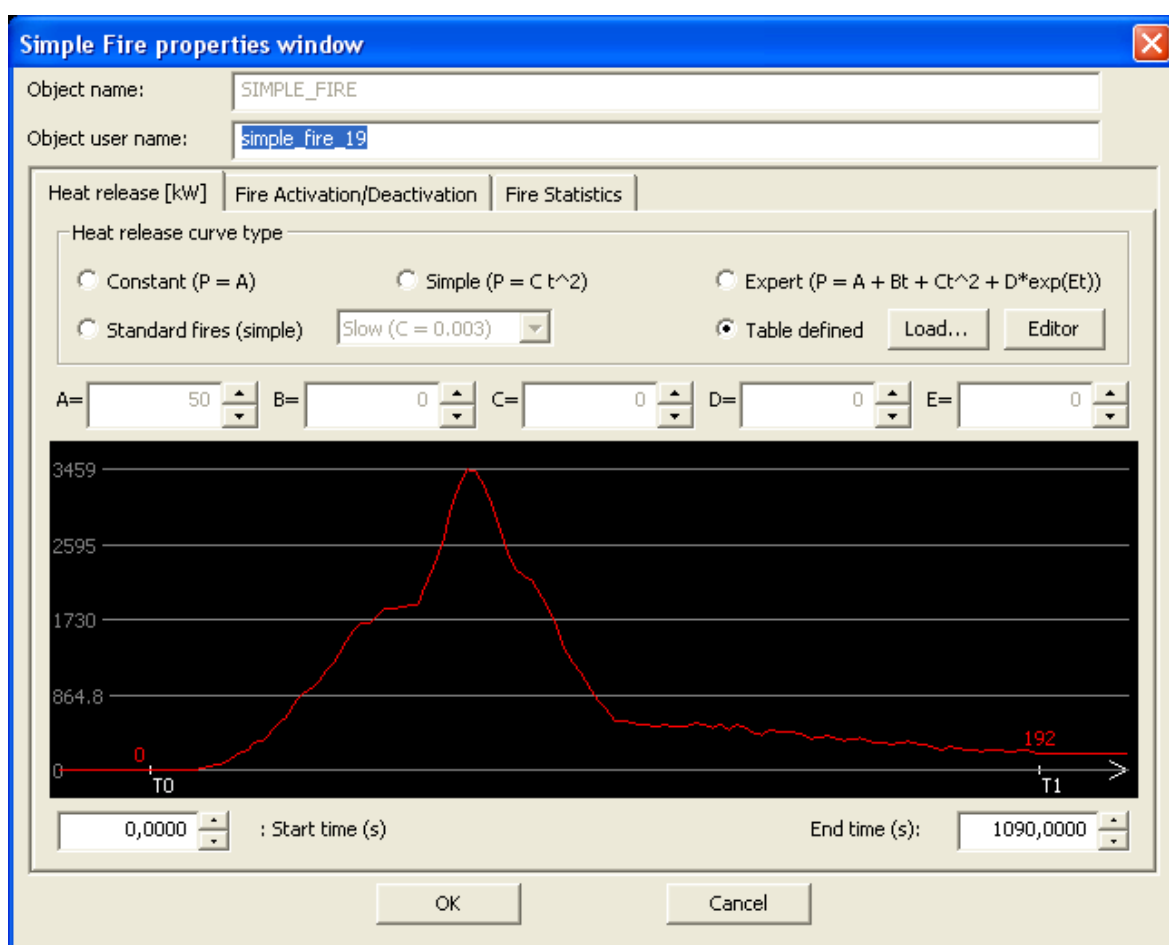


FIGURA 9.8: Taxa de calor liberada pela queima do sofá.

Os coeficientes lançados no *simple fire properties window*, foram obtidos através de dados fornecidos pelo *National Institute of Standards and Technology* – NIST. Após lançar os dados no programa *Microsoft Excel*, salva-se o arquivo no modo TXT e então é possível importar a tabela de dados para o *Smartfire*.

Outro fator importante é a inserção de dados que permitem que se programe o início da queima de outro material (EWER et al., 2004). Neste caso, por exemplo, programou-se a queima do sofá para ter início quando a temperatura ambiente chegasse a 573 °C (SIF 2006), conforme mostra a figura 9.9, através da utilização da *trigger cell*, tendo os dados sido inseridos posteriormente na configuração de propriedades de queima do sofá, verificado na figura 9.10.

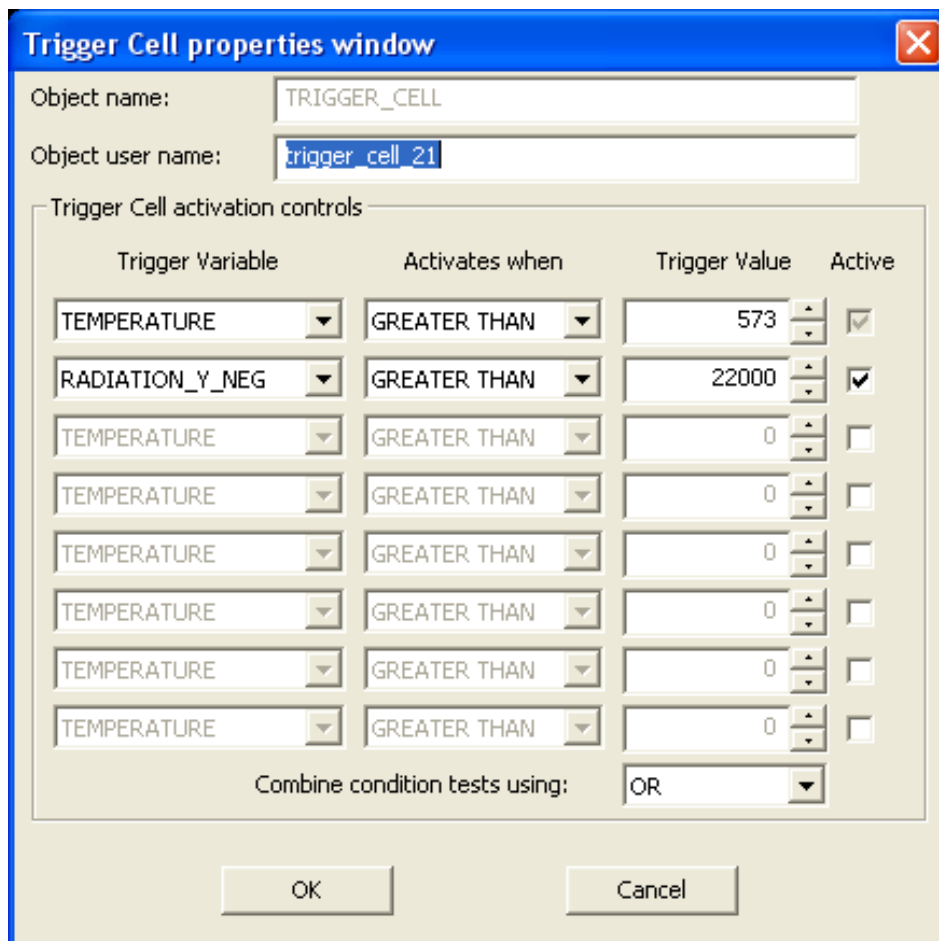


FIGURA 9.9: Configuração da *trigger cell* – queima do sofá após 573 °C.

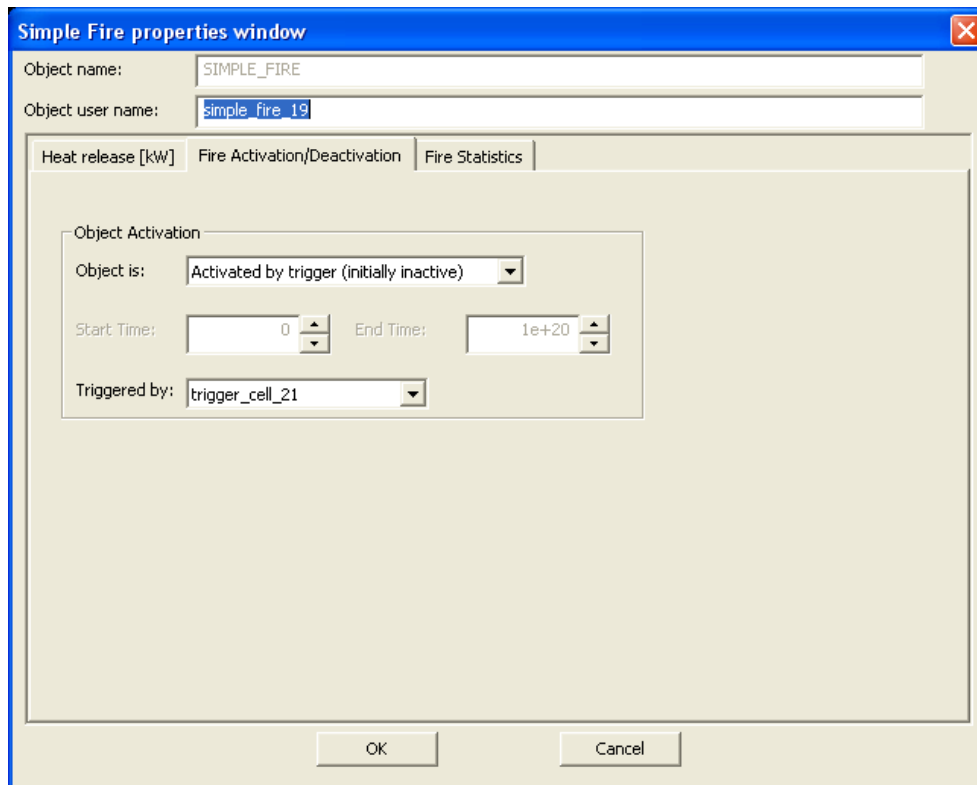


FIGURA 9.10: Configuração da ativação do incêndio no sofá.

Após o lançamento de todos os dados, as taxas referentes a cada material são apresentadas no modo *Estatística*, conforme figura 9.11.

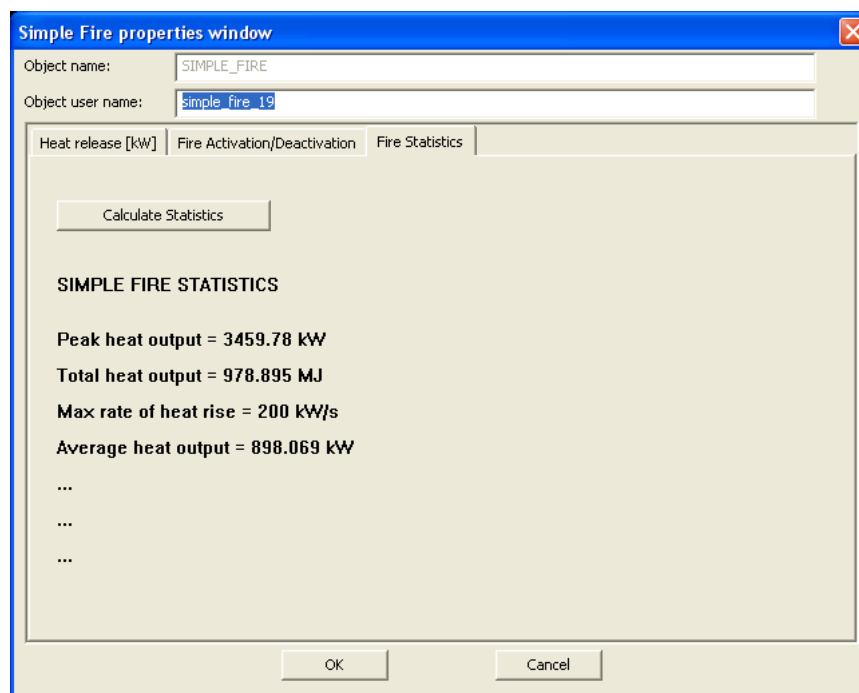


FIGURA 9.11: Resultados das taxas de liberação de calor geradas pela queima do sofá.

O passo posterior é a configuração do modelo de radiação de calor que será utilizado na simulação, utilizando-se para tal a janela *radiation model options*, conforme figura 9.12.

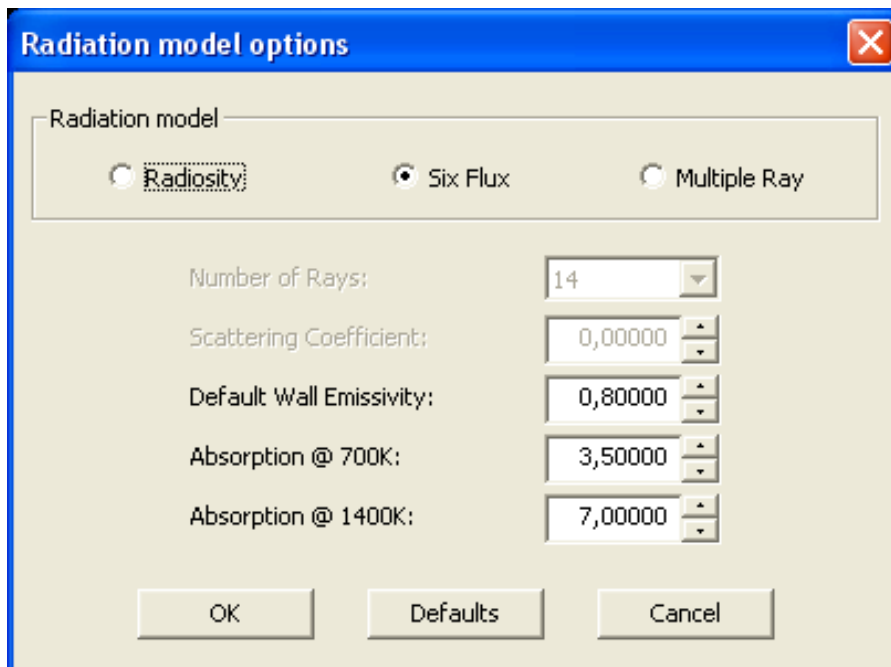


FIGURA 9.12: Escolha do modelo de radiação mais indicado para a simulação.

Após a definição da geometria do modelo e demais especificações, tais como propriedades dos materiais, criada uma malha adequada ao volume e definido o material combustível a ser consumido durante o incêndio, deve-se definir a natureza da simulação.

A figura 9.13 apresenta a janela *problem type options* onde o usuário pode definir as propriedades da simulação.

No presente estudo, as opções *Flow model*, *Radiation model* e *Heat transfer* do módulo de ativação, foram mantidas ligadas. As demais opções foram mantidas desligadas por não interessar à presente análise.

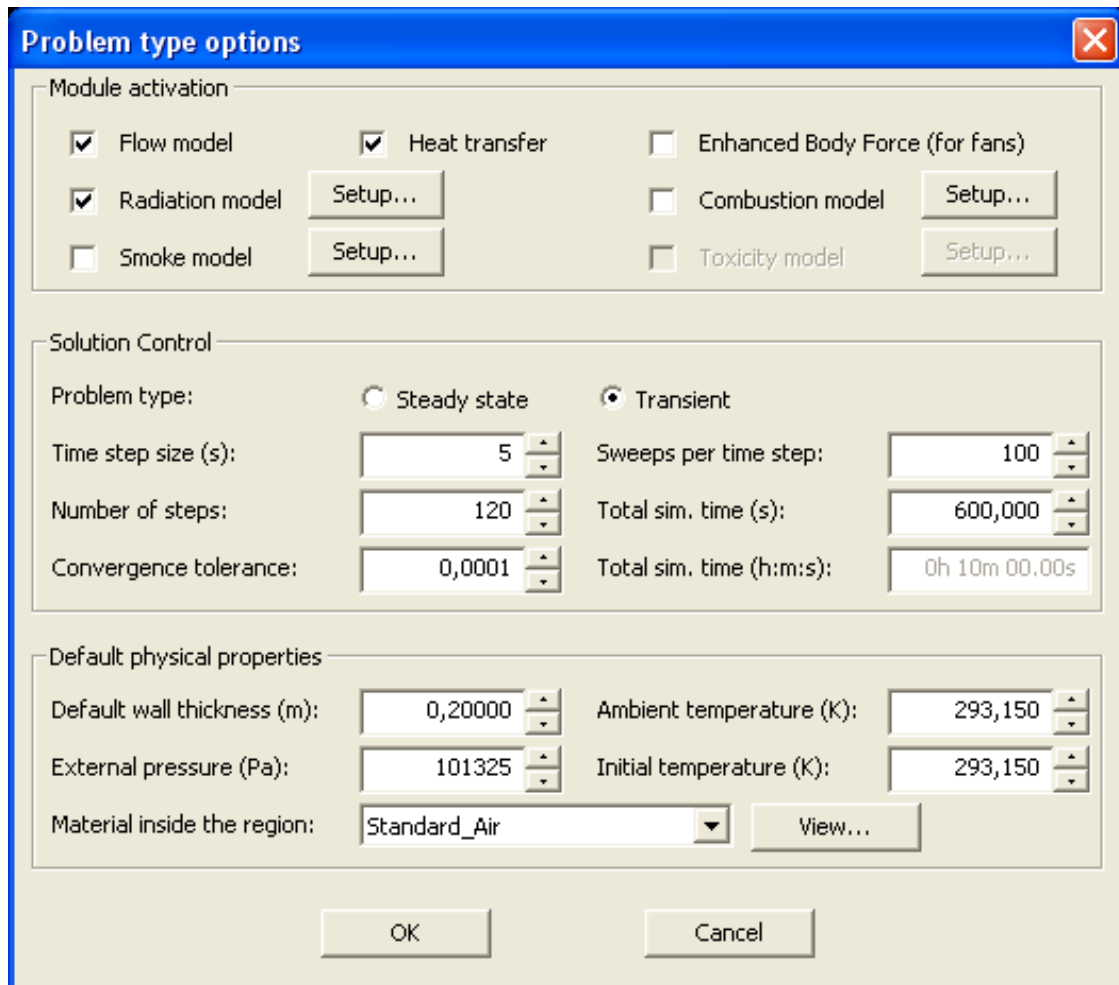


FIGURA 9.13: Tela do *Problem Type* do *Smartfire*.

Nas soluções de controle, a opção transitório (*transient*) foi selecionada, uma vez que nesta simulação o tempo é a variável. Nas demais opções das soluções de controle foram definidos os valores conforme a tabela 9.2, conforme orientação dos autores do software (EWER et al., 2004).

TABELA 9.2: Tabela de definição do controle da solução

<i>Time step size (s):</i>	5
<i>Number of steps:</i>	120
<i>Convergence tolerance:</i>	0,0001
<i>Sweeps per time step</i>	100
<i>Total sim. Time (s):</i>	600

Para as propriedades físicas foram assumidos as constantes na tabela 9.3.

TABELA 9.3: Tabela de definição das propriedades físicas

<i>Default wall thickness (m):</i>	0,20
<i>External pressure (Pa):</i>	101325
<i>Material inside the region:</i>	Standard_Air
<i>Ambient temperatura (K):</i>	293,15
<i>Initial temperature (K):</i>	293,15

O *Time step size* é uma ferramenta utilizada para simulações transientes e é uma maneira de se saber quanto tempo de simulação passará cada vez que o *CFD engine* calcula a convergência da solução. A tabela 9.4 mostra os diferentes valores para o *Time step size*.

TABELA 9.4: Tabela de uso recomendado para o *time step size* (EWER, 2004).

<i>Time step size (s)</i>	Uso
Maior do que 5,0	Casos muito estáveis
1,0 – 5,0	Casos estáveis com moderadas cargas de incêndio
0,1 – 1,0	Altas cargas de incêndio / ou geometrias complexas
0,01 – 0,1	Produção de incêndio muito alta, diversos focos de incêndio, geometrias complexas
Menor do que 0,01	Apenas necessário para condições de fluxo extremo – ex. janelas quebradas

O *Number of steps* permite ao usuário configurar o número de passos que serão simulados no *CFD engine*. O *Sweeps per time step* permite ao usuário pré-configurar o número de varreduras de soluções algorítmicas a serem executadas em cada passo ou no total. Este número determina o limite mais baixo do processo em um passo e o *CFD engine* não irá fazer qualquer varredura a mais além da que foi programada. O campo *Convergence tolerance* contém o valor de teste que é usado globalmente para o final de cada varredura, a fim de determinar se todas as variáveis têm convergido. Caso as variáveis tenham convergido, então o *CFD engine* irá iniciar um novo passo ou interromperá o processo.

Após a definição de todos os parâmetros da análise, o passo seguinte é ativação do *Smartfire CFD Engine*.

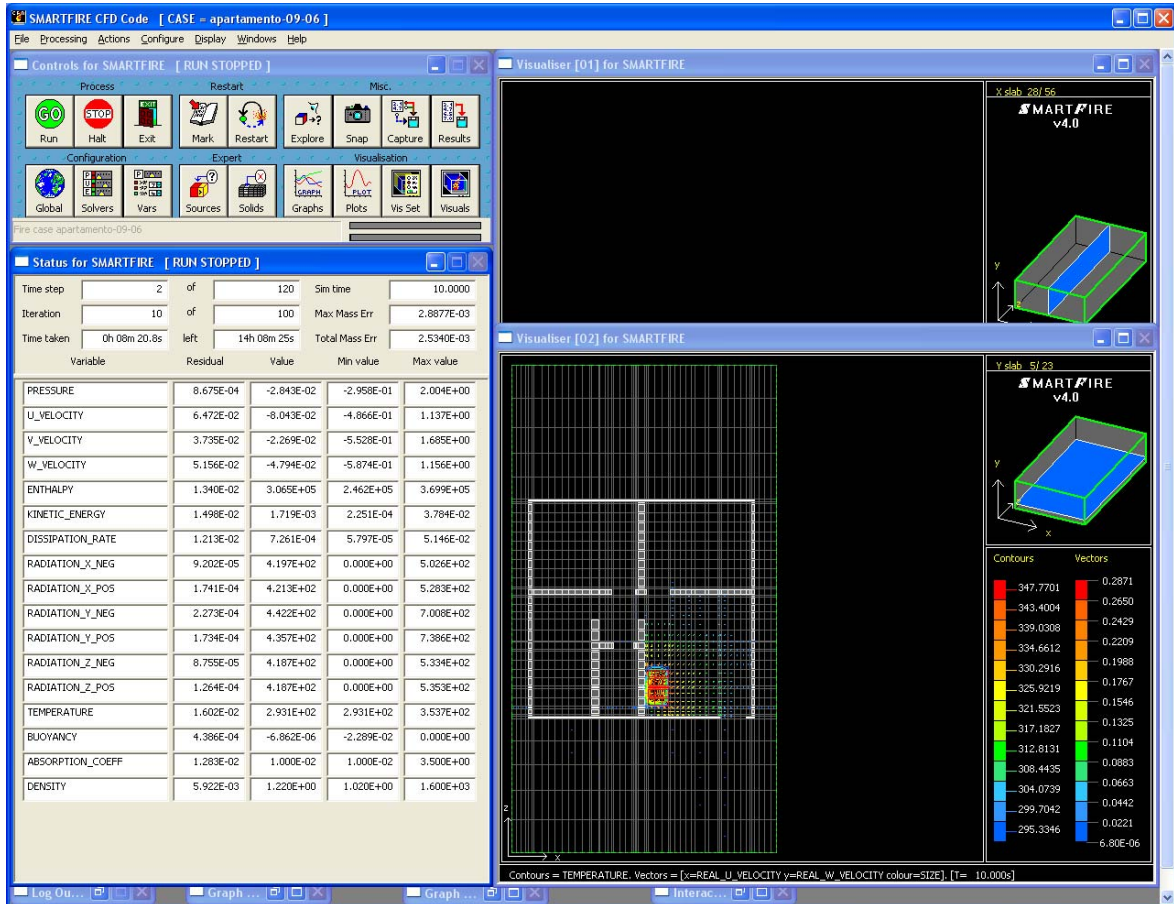


FIGURA 9.14: Tela do *Smartfire* mostrando os cálculos das variáveis que definem o incêndio, bem como os gráficos que mostram sua convergência.

9.2.1.3 Resultados

O objetivo principal da simulação realizada foi a obtenção da curva de incêndio natural, embora outras informações de grande relevância tenham sido extraídas, tais como medições de temperaturas em pontos específicos e até mesmo nos materiais que constituem a edificação e aqueles que encontram-se dentro dela.

Desta forma, obteve-se então a curva de incêndio representada na figura 9.15.

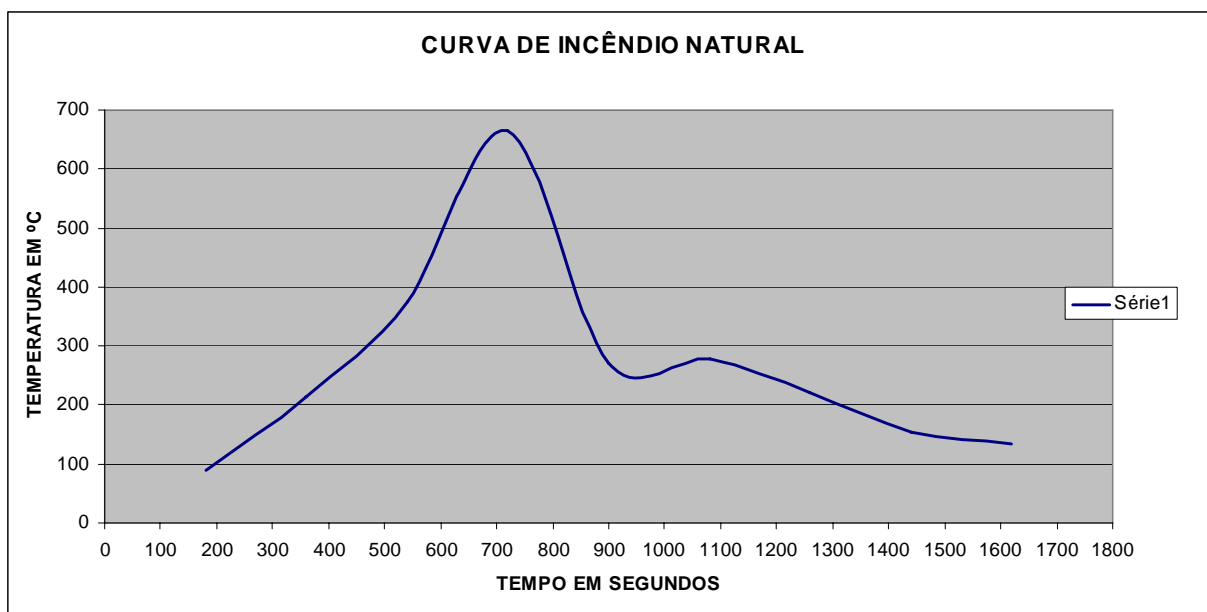


FIGURA 9.15: Curva de incêndio gerada pela simulação.

Analisando a curva de incêndio natural gerada pelo programa *Smartfire*, verifica-se que há uma ascensão considerável da temperatura nos primeiros minutos, com uma inclinação maior após 9 minutos de incêndio. Ao chegar em 12 minutos, a temperatura inicia o processo de decaimento com uma curva bastante acentuada até 15 minutos, tendo nova ascensão até 18 minutos, chegando a uma temperatura de 276,85 °C. Logo após, cai novamente a um nível bem baixo de 134,8 °C, iniciando novo processo de aumento.

É importante salientar que a temperatura mais alta, em torno de 670 °C, ocorre em um curto espaço de tempo, o que é de certa forma menos prejudicial à integridade estrutural da edificação analisada.

A *trigger cell* colocada junto ao teto permitiu a obtenção das temperaturas neste ponto por ter sido considerado um dos pontos de mais alta temperatura no incêndio, em virtude das massas ascendentes de gases e vapores aquecidos.

Por fim, a curva de incêndio gerada passará a ser utilizada no programa *Thersys* para que se possa testar a eficiência dos materiais de isolamento térmico, como será apresentado a seguir.

9.3 Programa *Thersys*

O programa *Thersys* (Sistema para simulação via MEF da distribuição 3D de temperatura em estruturas em situação de incêndio), foi desenvolvido para determinação numérica desta distribuição em elementos estruturais.

O software foi criado com base no Método dos Elementos Finitos e realiza análise térmica transiente e não-linear, para elementos bidimensionais e tridimensionais de qualquer geometria.

Segundo Ribeiro (2004), o *Thersys* foi desenvolvido na linguagem *Delphi 5*, tendo como base o programa elaborado por Figueiredo Jr, na Universidade Federal de Minas Gerais, denominado *Caltemi* e o programa desenvolvido por Zárate e Oñate em 1993, no Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia (CIMNE), da Universidade da Catalunha, na Espanha, denominado *Caltep*.

A linguagem *Delphi* foi escolhida devido ao seu alto nível de facilidades para desenvolvimento de interfaces e permitir a programação orientada a objeto. Esta forma de programar possui total flexibilidade para a manutenção do programa e para desenvolvimentos posteriores.

Visando facilitar a entrada de dados e saída de resultados do programa, foi desenvolvido um *problem type*, e linguagem própria para o *GID*, um pré e pós-processador gráfico elaborado também pelo CIMNE (2000). A interação entre o *Thersys* e o *GID* é total.

9.3.1 Análise computacional no *Thersys*

O primeiro passo para a utilização do programa é a definição do elemento estrutural que se pretende utilizar na simulação. Para tal, foi considerado, conforme dito anteriormente, os perfis tipo caixa, com utilização do aço *USI SAC 300*.

No decorrer das simulações da presente pesquisa são apresentadas, passo a passo, cada etapa de utilização do programa, sendo que no primeiro caso os testes são feitos com perfil tipo caixa com e sem proteção e logo após os resultados são analisados.

9.3.1.1 Simulações com perfil tipo caixa

Após a especificação do elemento estrutural analisado, deve-se definir a geometria do elemento, podendo esta ser feita no próprio programa *GID* ou importado do programa *AutoCAD*, que é mais prático, devido às limitações para se desenhar no *GID*.

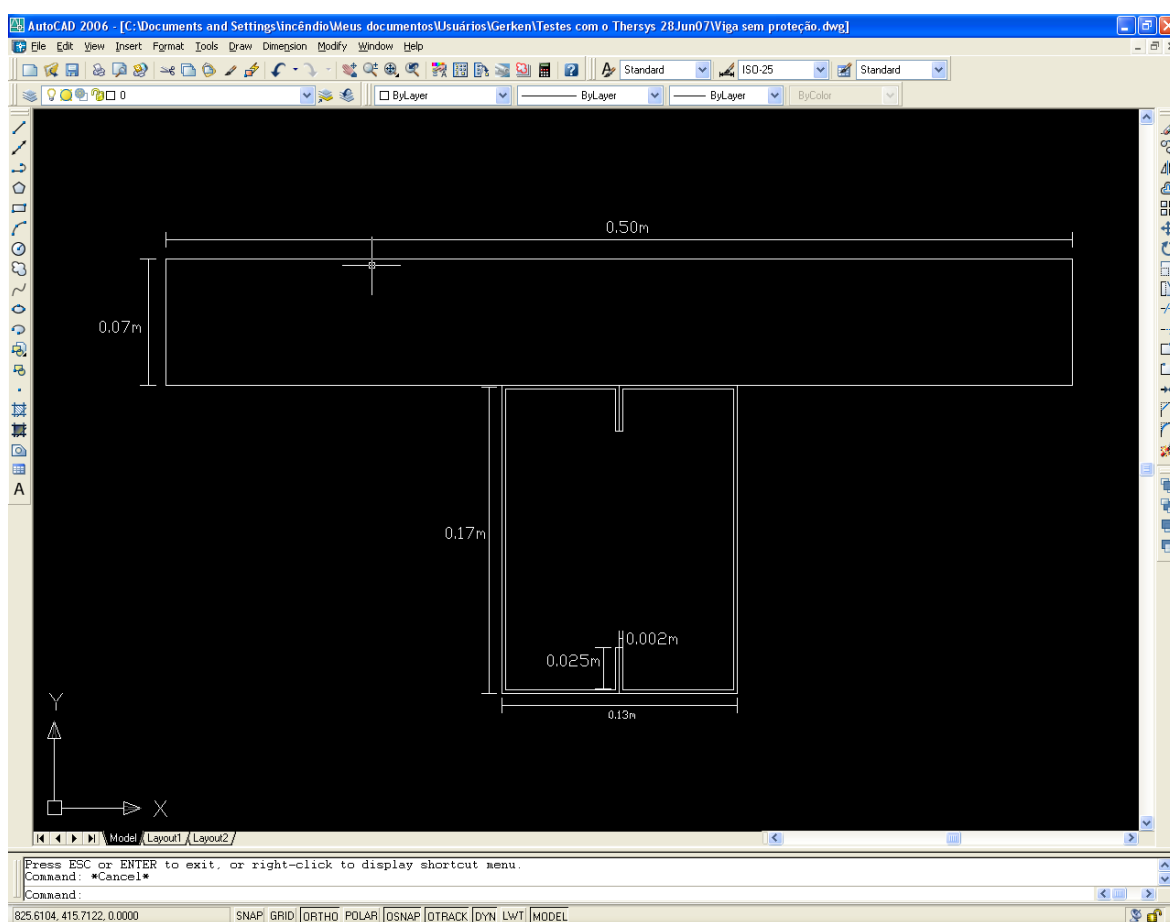


FIGURA 9.16: Definição da geometria dos elementos a serem utilizadas no *Autocad*.

O arquivo deve ser salvo no formato DXF, ainda no *Autocad* e posteriormente importado pelo *Thersys*.

Na próxima etapa, o usuário do programa deve definir a geometria dos contornos do elemento, sendo necessária a definição de todos os contornos do aço e das caixas de ar, no caso do perfil tipo caixa e proteção tipo caixa.

Desta forma, as geometrias dos contornos dos perfis foram definidas conforme a figura 9.17.

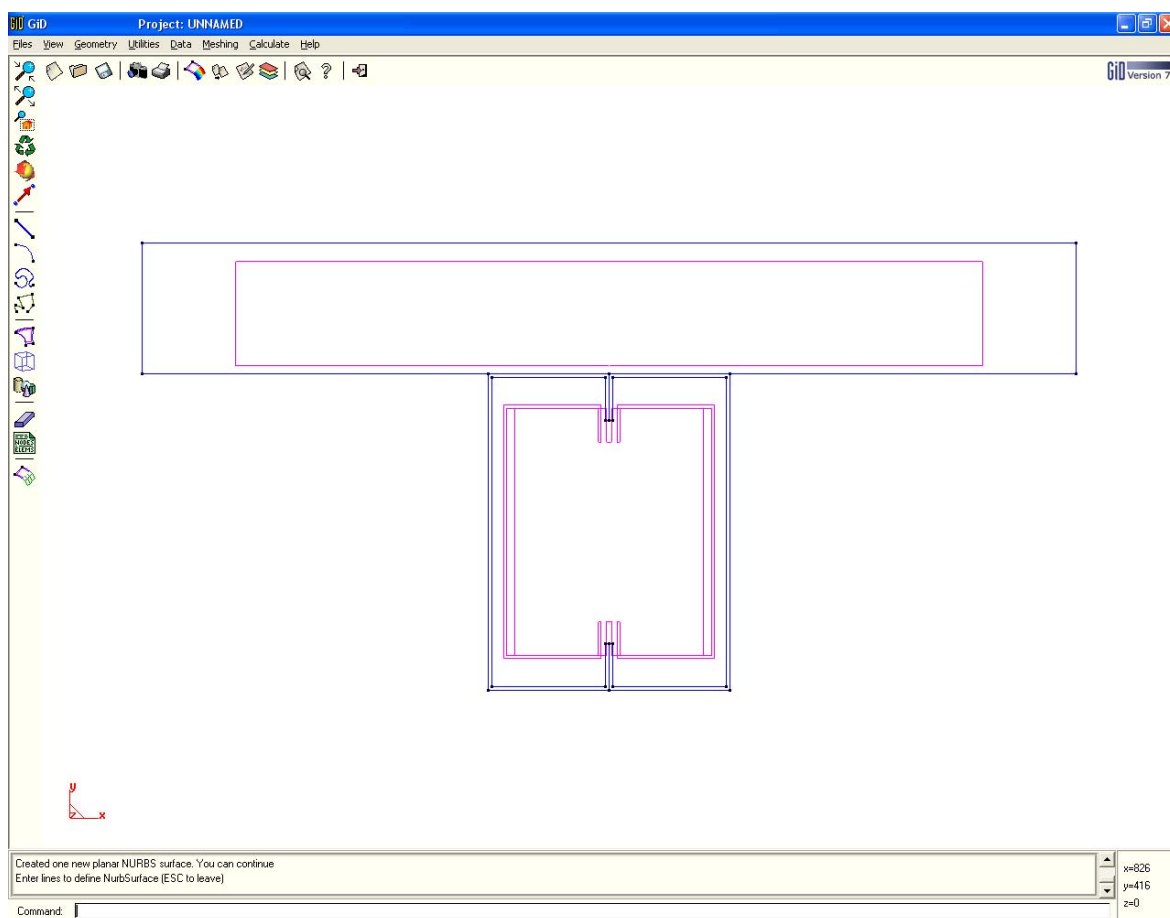


FIGURA 9.17: Contornos da superfície interna dos materiais.

As linhas internas representadas na figura 9.17 indicam a definição da superfície interna dos materiais, com um comprimento de um metro. Foram considerados neste caso, a superfície do aço e também o contorno do elemento que forma uma caixa de ar, de maneira que se possa analisar também o aquecimento do ar contido no interior da estrutura.

Posteriormente, na opção *problem type*, conforme figura 9.18, deve-se acionar a interface do programa *GID* com o programa *Thersys*, permitindo-se então que a partir deste

momento, sejam inseridos todos os dados que possibilitarão a realização dos testes e simulações, bem como a análise térmica da estrutura.

Na opção *problem data*, são inseridos os dados referentes ao modelamento do incêndio, com a escolha das equações adequadas à análise térmica. No presente caso, são utilizadas equações de Cholesky e Galerkin e padrões de incêndio estabelecidos pela ABNT NBR 14.432:2000, conforme figura 9.19.

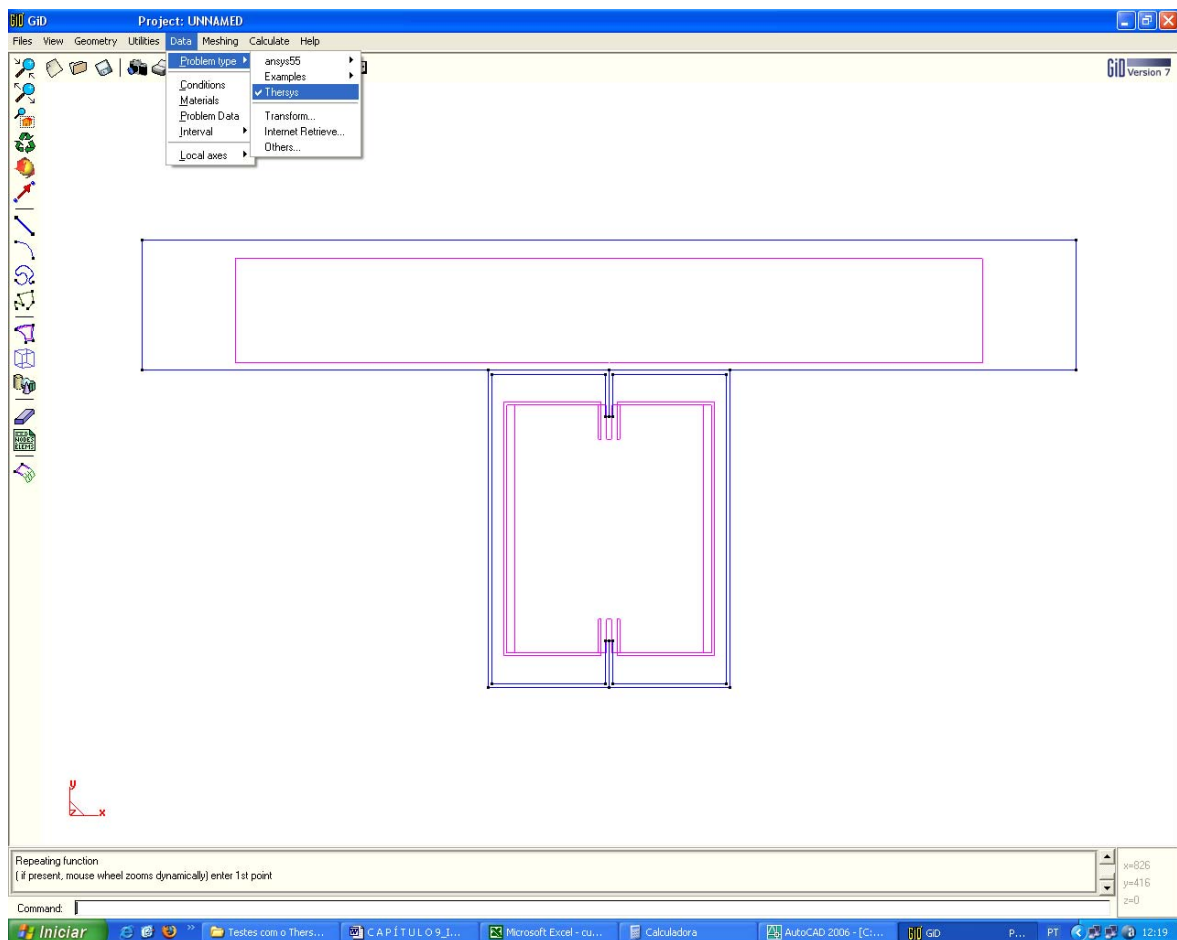


FIGURA 9.18: Acionamento da interface do programa *GiD* com o *Thersys*.

Ainda no *problem data* pode-se optar pela inserção de outras curvas de incêndio, inclusive as obtidas por intermédio de simulações com dados gerados por outros softwares.

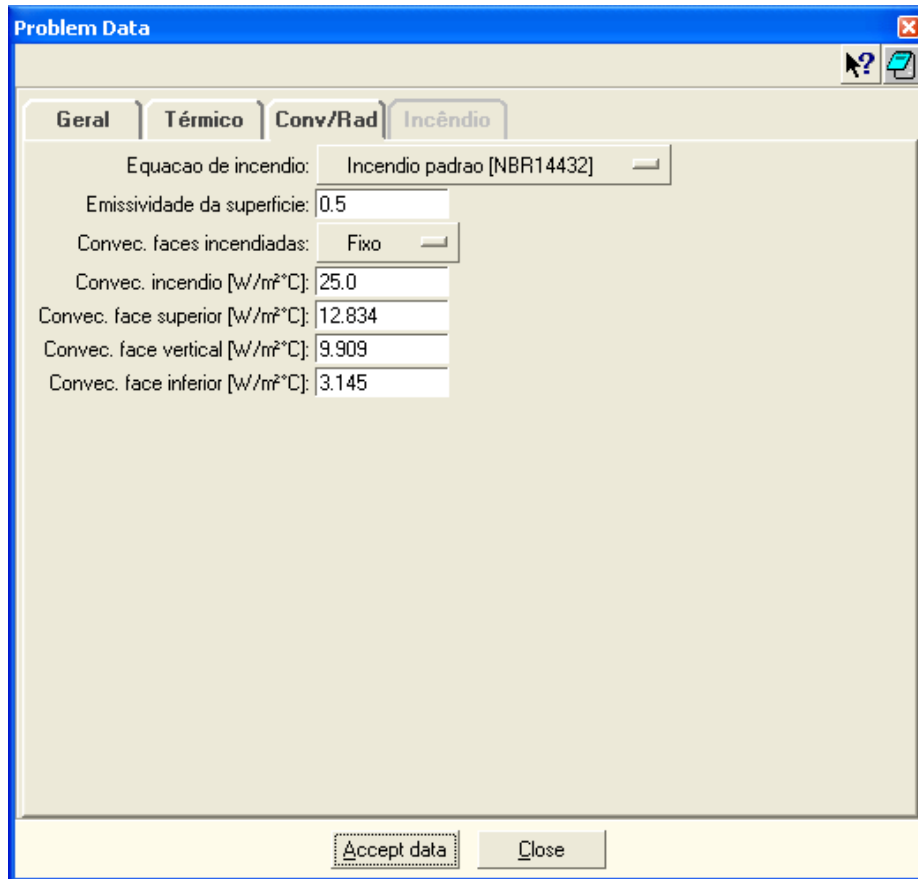


FIGURA 9.19: Definição de padrões de incêndio.

O passo seguinte é a definição das propriedades dos materiais, que no caso desta simulação inicial com perfil tipo caixa é feita de duas formas, sendo a primeira do perfil sem proteção, considerando-se apenas as propriedades do aço e do ar.

Para o segundo caso, são consideradas além do aço e do ar, as propriedades de todos os materiais utilizados como proteção, sendo estas a massa específica, a condutividade térmica e o calor específico, que podem ser inseridas pelo usuário ou adotadas as propriedades da biblioteca de dados do software.

Logo após a definição das características dos materiais, opta-se pela condição de incêndio e define-se a área de incidência do calor no elemento estrutural, conforme janela apresentada na figura 9.20.

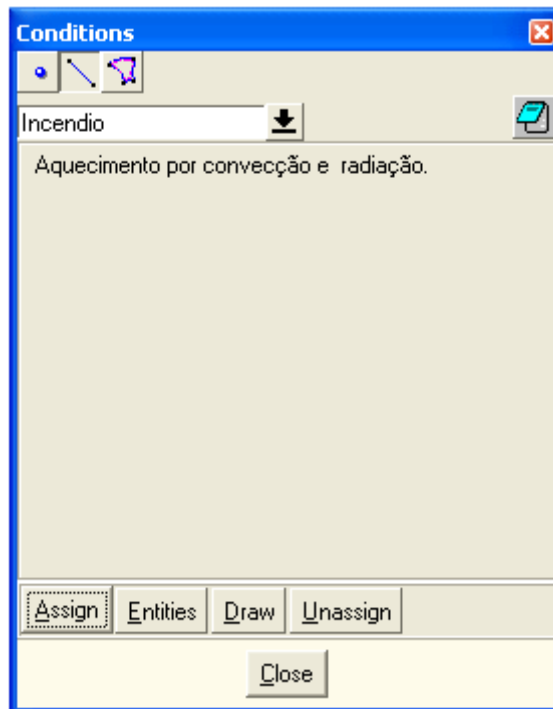


FIGURA 9.20: Definição da condição de incêndio.

Após as ações citadas anteriormente, deve-se definir a malha de elementos finitos utilizados para a realização das análises, conforme figura 9.21.

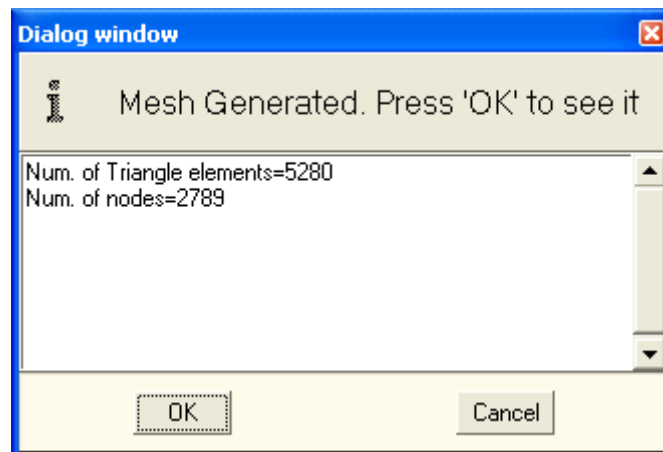


FIGURA 9.21: Definição da malha de elementos finitos.

Desta forma, a malha definida fica com a configuração apresentada na figura 9.22, sendo esta arbitrada pelo usuário do programa.

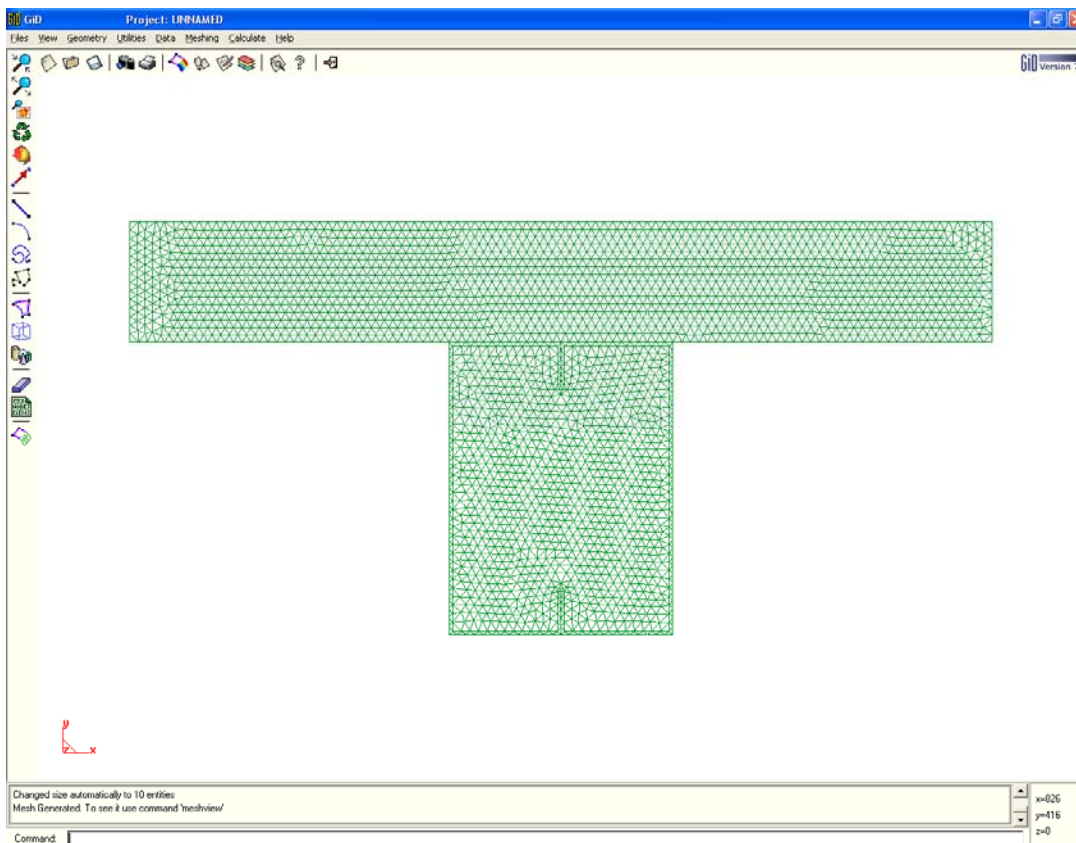


FIGURA 9.22: Desenho da malha de elementos finitos.

O próximo passo é executar o programa, permitindo que este faça as análises necessárias, conforme figura 9.23.

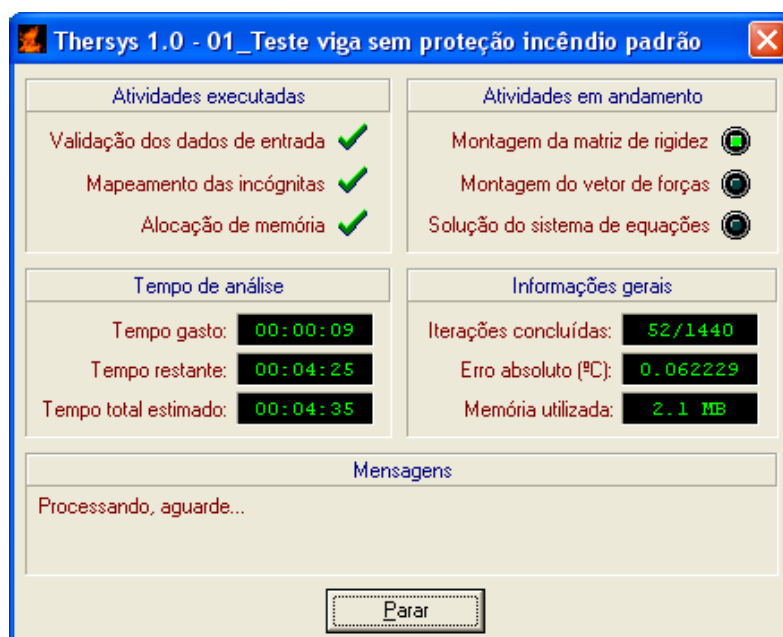


FIGURA 9.23: Andamento das análises feitas pelo programa.

Para efeito da análise, alguns critérios foram estabelecidos permitindo que houvesse uma compatibilidade entre os dois programas utilizados. Uma vez que com a curva de incêndio apresentada pelo *Smartfire* foi realizada análise de temperatura em tempos múltiplos de 3, optou-se por analisar a temperatura com utilização do *Thersys* aos 3, 9, 15 e 30 minutos.

Posteriormente à análise de temperatura através das imagens geradas pelo *Thersys*, três pontos foram escolhidos no elemento estrutural para que se pudesse fazer uma análise gráfica das temperaturas ao longo da altura da viga. Desta forma o ponto A foi estabelecido na parte inferior da viga, o ponto B na parte média, justamente onde há a presença de ar aquecido e o ponto C na parte superior da viga, próximo à interface do elemento estrutural de aço com a laje de concreto, conforme figura 9.24. No gráfico os pontos são representados por linhas vermelha para o ponto A, verde para o ponto B e amarela para o ponto C.

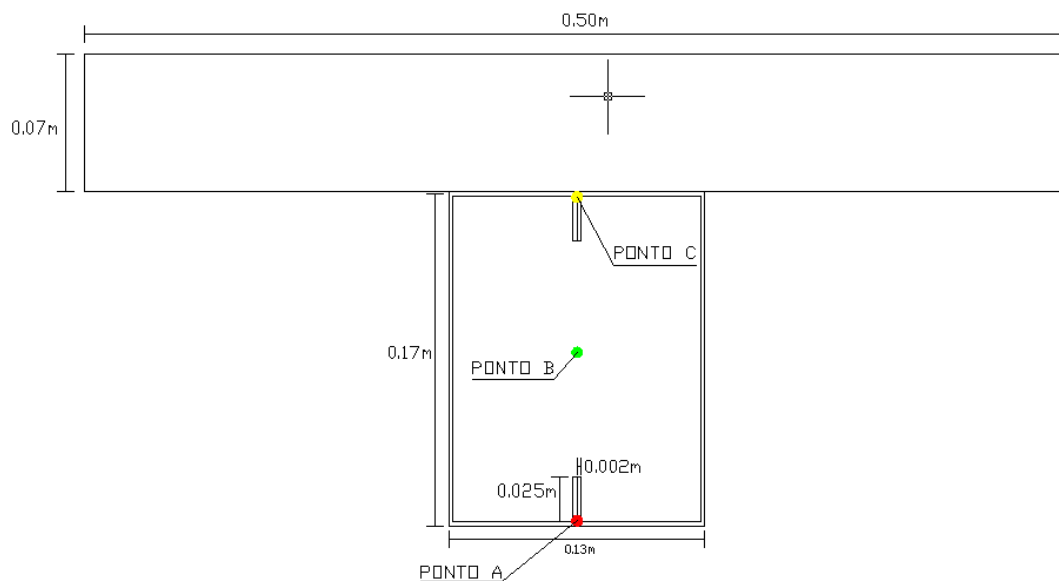


FIGURA 9.24: Pontos de verificação de temperatura na viga.

Os testes foram realizados seguindo uma seqüência de forma que foi utilizada a curva de incêndio padrão estabelecida pela ABNT NBR 14.432:2000 e posteriormente a curva de incêndio natural obtida pelo *Smartfire*, seguindo-se também este princípio, para cada variação de material de proteção utilizado.

9.3.1.1.1 Resultados obtidos com perfil tipo caixa sem proteção

Ao realizar os testes na viga especificada, sem a proteção térmica, foram obtidos os seguintes resultados:

a) Simulação com utilização da curva de incêndio padrão (NBR 14.432:2000)

Foi verificado que aos 3,0 minutos a viga já apresentava uma elevação de temperatura considerável, conforme pode ser verificado na figura 9.25 (A), tendo chegado a 266,59 °C em sua superfície.

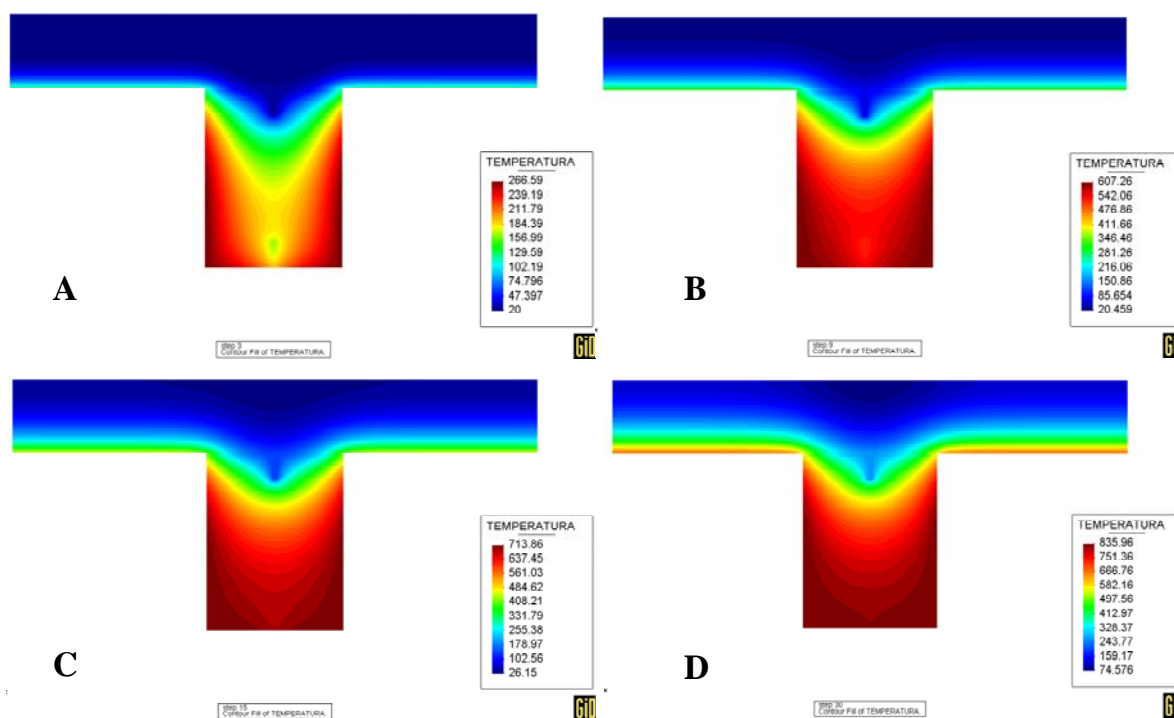


FIGURA 9.25: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos de incêndio, com viga sem proteção e curva de incêndio padrão.

Outros valores foram registrados conforme figuras 9.25 (B), 9.25 (C) e 9.25 (D), com temperaturas da ordem de 607,26 °C em 9,0 minutos, 713,82 °C em 15,0 minutos e 835,96°C em 30,0 minutos.

Analisando-se o gráfico gerado pelo programa nos três pontos de análise estabelecidos arbitrariamente, conforme figura 9.25, pode-se verificar claramente que a elevação de temperatura na parte inferior da viga, bem como no centro, ocorreu de forma bastante acentuada logo no início do incêndio. Já no ponto mais próximo à laje, denominado ponto C, a temperatura aumentou de forma mais suave apresentando uma curva com ascendência quase constante.

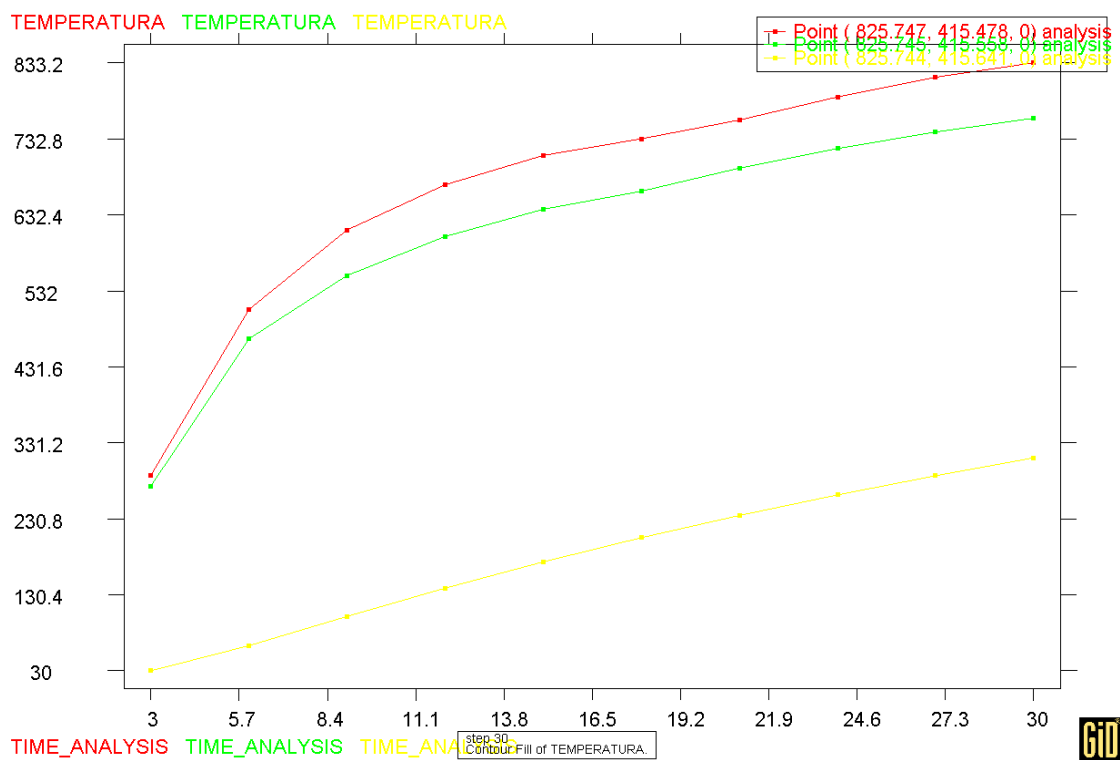


FIGURA 9.26: Gráfico temperatura tempo no elemento estrutural sem proteção com utilização da curva de incêndio padrão.

Após analisar todos os aspectos apresentados anteriormente, deve-se concluir que a viga sem proteção submetida à curva de incêndio padrão, absorve rapidamente a temperatura ambiente, o que sugere a necessidade de proteção, quando exigido e dependendo da sua função estrutural, resistência e solicitação em temperatura elevada.

b) Simulação com utilização da curva de incêndio natural

Ao se submeter a viga à curva de incêndio natural, também conhecida como curva de incêndio real, verifica-se que as temperaturas no perfil são bem menores, como já se esperava, considerando que esta curva de incêndio é menos severa que a do incêndio padrão.

Aos 3 minutos, a viga tem sua maior temperatura em torno de 53,1 °C, conforme figura 9.27 (A). Posteriormente a temperatura eleva-se para 289,93 °C aos 9 minutos e 431,3 °C aos 15 minutos, conforme figuras 9.27 (B) e 9.27 (C) respectivamente.

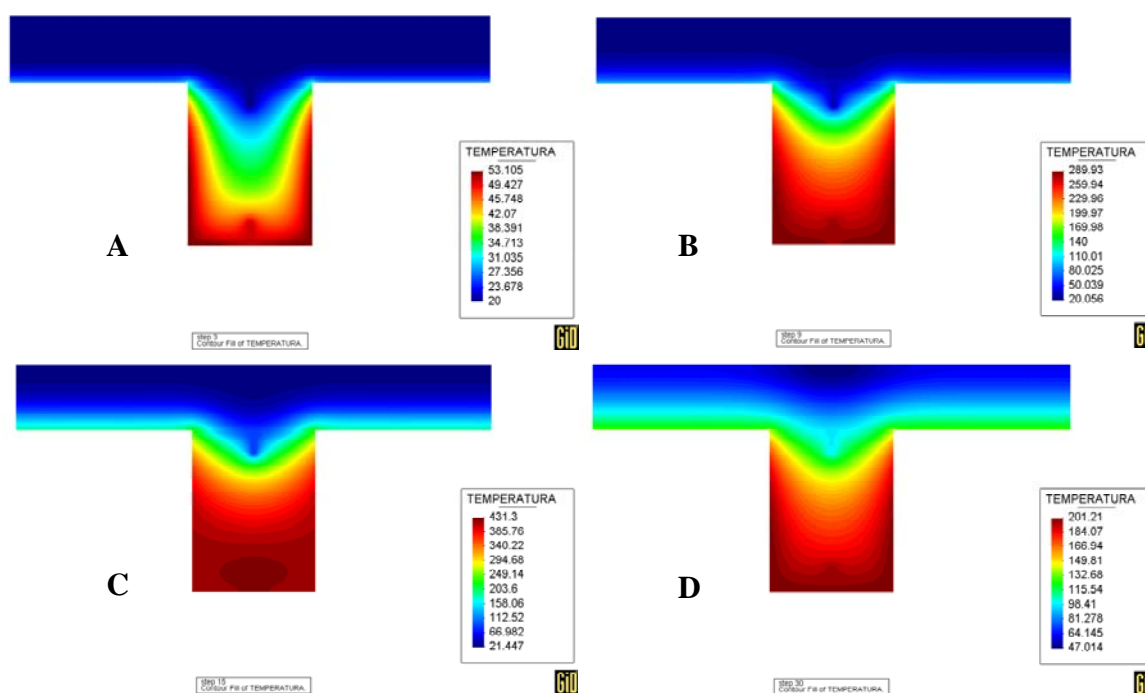


FIGURA 9.27: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos de incêndio, com viga sem proteção e curva de incêndio natural.

Após iniciar o processo de arrefecimento, a temperatura máxima é de 201,21°C no elemento estrutural, obtida aos 30 minutos, conforme apresentado na figura 9.27 (D).

O gráfico da figura 9.28 mostra claramente a variação de temperatura no elemento submetido à curva de incêndio natural, que neste caso, apresenta um pico de temperatura que ocorre em uma estreita faixa de tempo.

Verifica-se que os pontos A e B, tiveram uma temperatura maior, com uma curva ascendente rápida, porém com uma considerável queda de temperatura, mostrada pelo declive das linhas, após os 14,7 minutos.

Já no caso do ponto C, a maior temperatura atingida foi de 98,41 °C, no período avaliado de 30 minutos de incêndio.

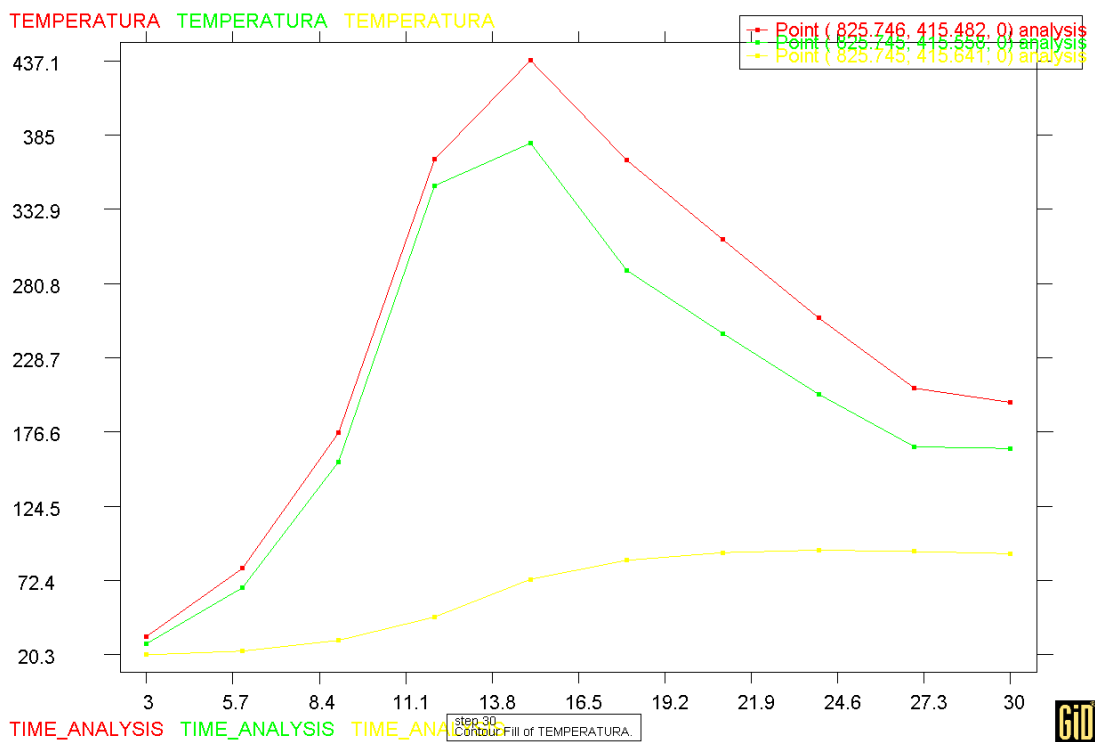


FIGURA 9.28: Gráfico temperatura tempo no elemento estrutural sem proteção com utilização da curva de incêndio natural.

As observações são conclusivas sobre as vantagens ao se considerar o incêndio natural para avaliação do risco, visto que a curva de incêndio padrão atribui altos valores às temperaturas obtidas, com uma ascendência constante.

9.3.1.1.2 Resultados obtidos com perfil tipo caixa com proteção

Para a presente simulação, como no caso anterior, foram utilizadas curvas de incêndio padrão e curva de incêndio natural, obtida através da utilização do software *Smartfire*.

Os elementos estruturais utilizados nos testes foram protegidos com vários materiais utilizados atualmente na construção civil.

Após realização das simulações, os resultados obtidos foram bastante diferentes daqueles apresentados pela viga sem proteção, podendo-se observar o seguinte:

a) Viga com proteção de fibra projetada com 10mm de espessura e curva de incêndio padrão

O primeiro teste foi realizado com argamassa do tipo fibra projetada, com características e propriedades especificadas no capítulo 8.

Após 3 minutos de incêndio, a maior temperatura detectada na viga foi de 128,2 °C, porém pode-se observar que o material de proteção está a uma temperatura de 506,91 °C na sua face externa, conforme a figura 9.29 (A).

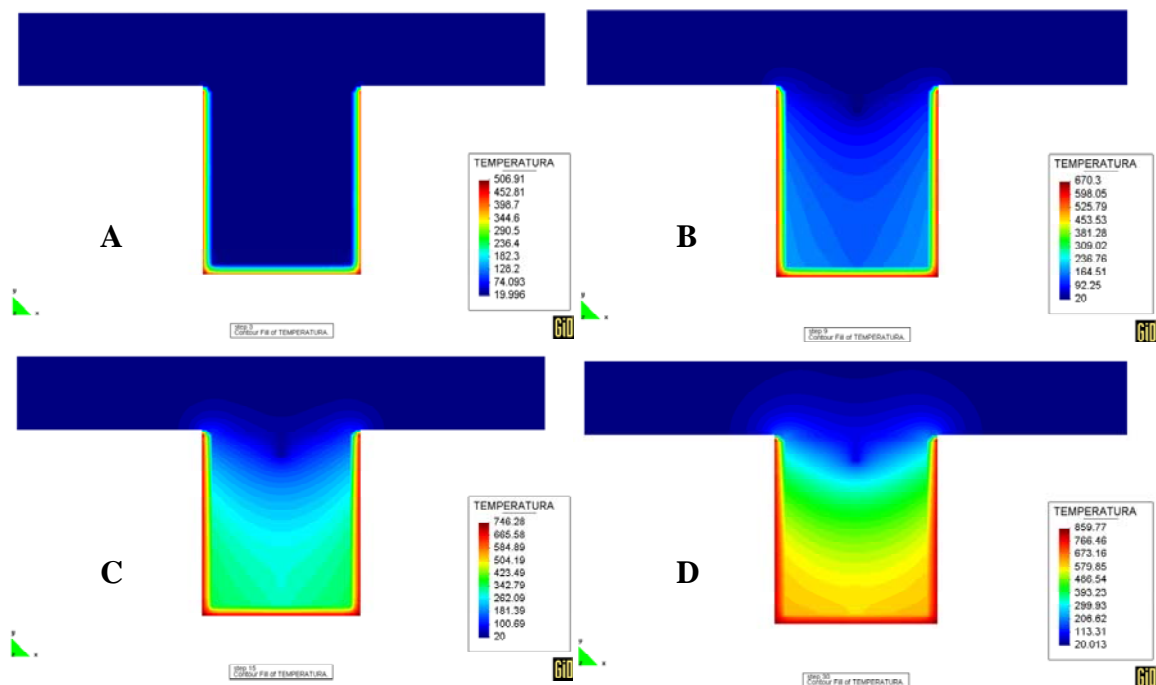


FIGURA 9.29: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos de incêndio, com viga protegida por fibra projetada com 10mm e curva de incêndio padrão.

Aos 9 minutos, a temperatura do aço encontra-se em 236,76 °C nos três lados expostos da viga, conforme verificado na figura 9.29 (B).

Quando chega-se aos 15 minutos de incêndio, as temperaturas na viga estão em torno de 342,79 °C e 423,49 °C, sendo que o material de proteção possui na sua face exposta uma temperatura da ordem de 746,28 °C, verificado na figura 9.27 (C).

Após 30 minutos de incêndio, a viga atingiu altas temperaturas, da ordem de 579,85 °C, verificando-se que a parte externa do material de proteção estava com 859,77 °C, conforme figura 9.29 (D), mostrando que o material de proteção tem quase esgotada a sua capacidade isolante.

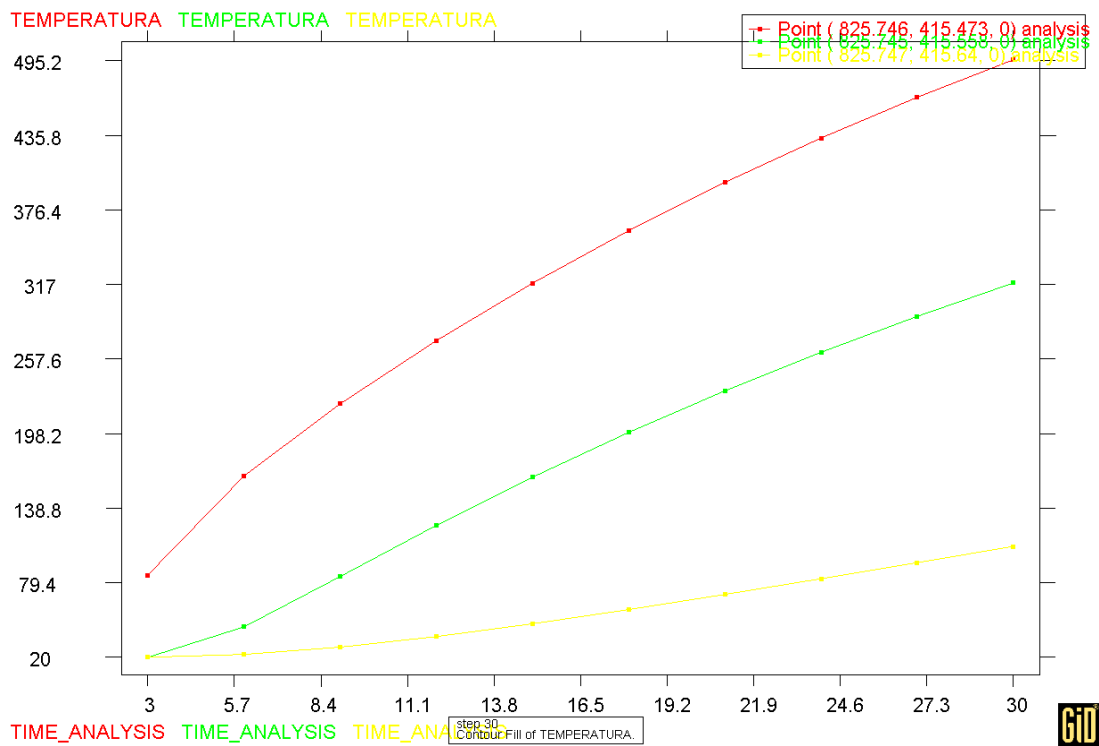


FIGURA 9.30: Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com argamassa de fibra projetada com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.

Analisando-se o gráfico da figura 9.30, verifica-se que as temperaturas detectadas no elemento estrutural subiram consideravelmente nos trinta minutos de testes, tendo o ponto

A de medição apresentado uma variação muito grande de temperatura em um curto espaço de tempo.

O ponto B apresenta um desenho de curva bastante parecido com o ponto A, porém com temperaturas um pouco mais baixas. O ponto C, como nos outros casos, é sempre o que apresenta menor variação de temperatura, em função da sua interface com o concreto que demonstra atuar como isolante térmico.

b) Viga com proteção de fibra projetada com 10mm de espessura e curva de incêndio natural

Neste caso, a viga foi testada com uma cobertura de proteção de espessura de 10 mm e curva de incêndio natural.

Após 3 minutos de incêndio, a temperatura detectada na viga foi de 27,41 °C, porém o material de proteção já encontrava-se com 87,17 °C, conforme figura 9.31 (A).

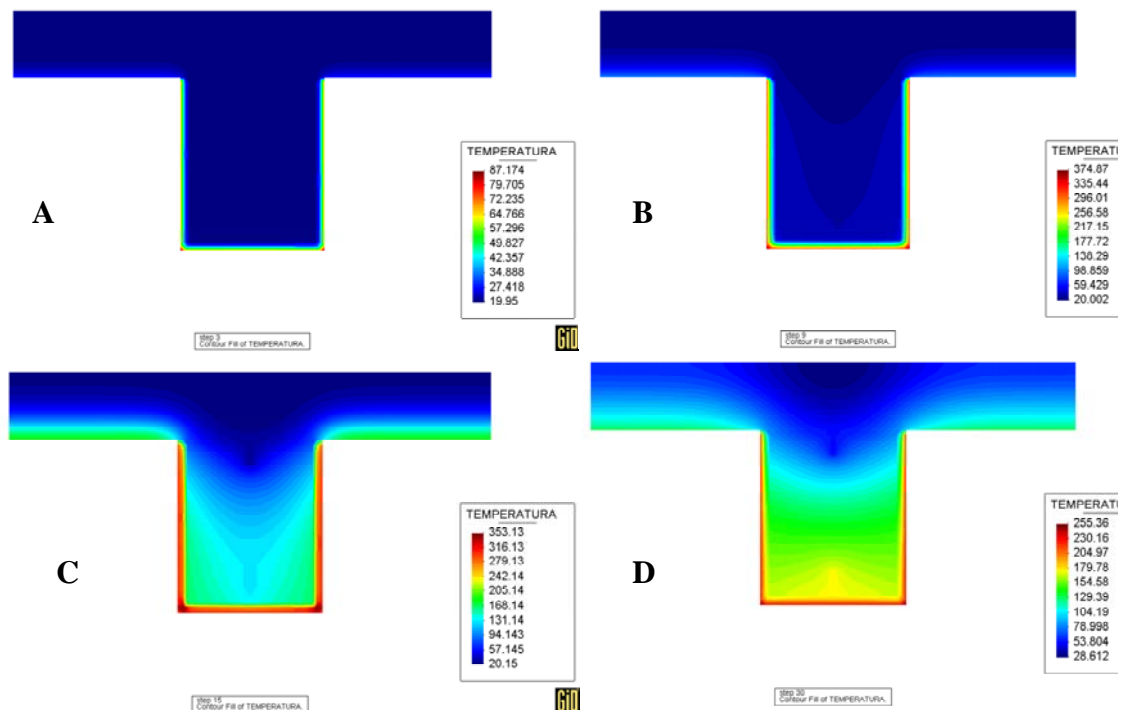


FIGURA 9.31: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos de incêndio, com viga protegida por fibra projetada de 10mm e curva de incêndio natural.

Aos 9 minutos, conforme figura 9.31 (B), uma temperatura de 98,86 °C foi detectada no perfil, porém observa-se que o material de proteção térmica começa a reter um alto índice de calor, visto que a diferença entre a parte externa do material de proteção e o perfil da viga chega a ser da ordem de 236,0 °C, aproximadamente.

Em 15 minutos de incêndio, o calor no elemento estrutural é de 168,14 °C e começa a se dissipar, em decorrência da fase de arrefecimento, característica marcante dos incêndios naturais. Nesta fase, o pico de temperatura na viga já foi atingido e então um processo de resfriamento se inicia, conforme análise da figura 9.31(C).

Pode-se verificar que a temperatura diminui ainda mais, aos 30 minutos de incêndio, sendo de 179,78 °C na viga, conforme figura 9.31 (D).

O gráfico da figura 9.32 permite observar que aos 15 minutos, aproximadamente, a temperatura no aço atingiu seu mais alto índice, no ponto A de análise. Nos pontos B e C estas temperaturas foram relativamente baixas.

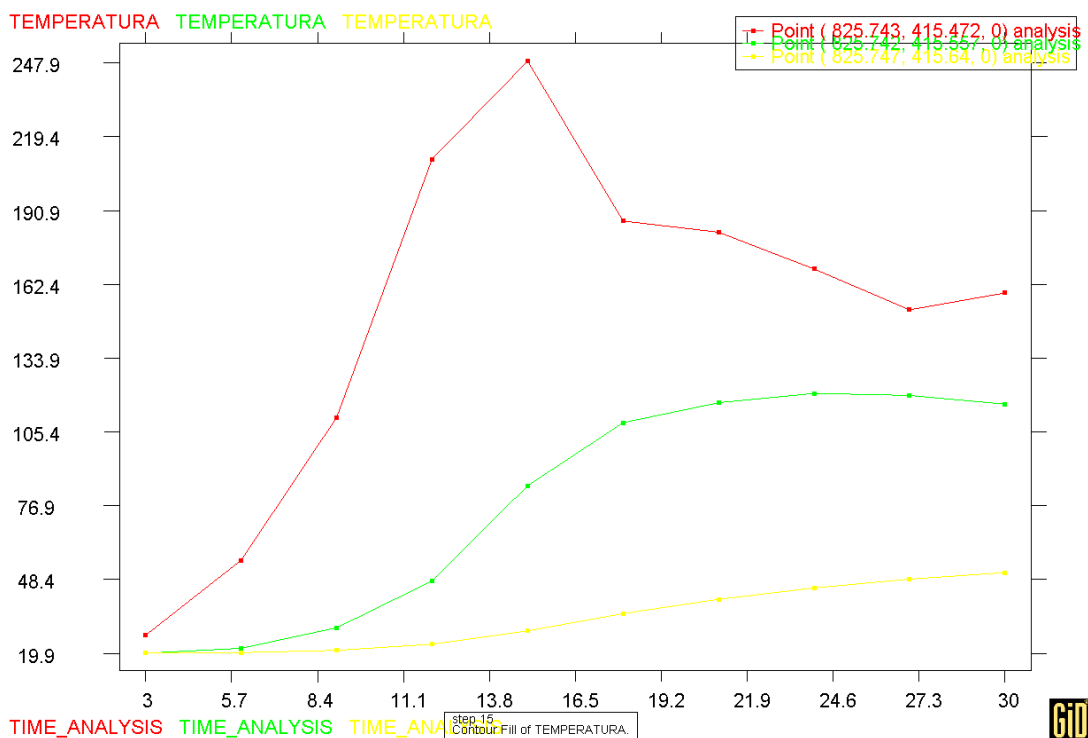


FIGURA 9.32: Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com argamassa de fibra projetada com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.

Verifica-se que nestes pontos B e C, a temperatura não atingiu um pico, como em A. Isto ocorre em virtude da temperatura do ambiente iniciar um processo de resfriamento antes que a temperatura nestes pontos possa atingir níveis muito altos.

c) Viga com proteção de fibra projetada com 15mm de espessura e curva de incêndio padrão

Após criar uma proteção de 15mm na viga, verifica-se que há um maior isolamento em relação aos testes anteriores. Porém, a temperatura ainda é bastante alta, em virtude do rigor da curva de incêndio segundo a NBR 14.432:2000.

Com 3 minutos de incêndio, foram atingidas as temperaturas demonstradas na figura 9.33 (A). Pode-se observar que a temperatura na face externa do material de proteção já é bastante alta, da ordem de 535,04 °C. No aço a temperatura fica em torno de 76,33 °C.

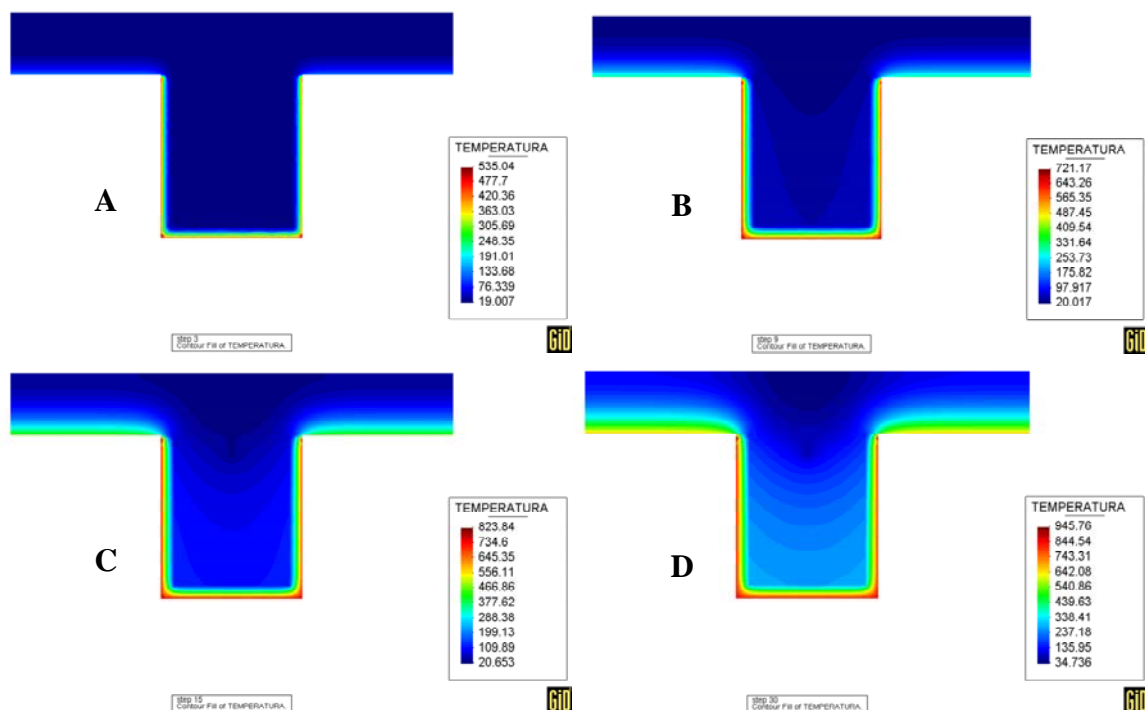


FIGURA 9.33: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos de incêndio, com viga protegida por fibra projetada de 15mm e curva de incêndio padrão.

Aos 9 minutos o aumento de temperatura é considerável passando a 721,17 °C na face externa da proteção e em torno de 253,73 °C no aço, conforme indicado na figura 9.33 (B).

Tomadas as temperaturas aos 15 e aos 30 minutos, verifica-se que os índices no elemento estrutural estão em 288,38 °C e 338,41 °C respectivamente, conforme pode ser observado nas figuras 9.33 (C) e (D).

Analisando o gráfico da figura 9.33, verifica-se o considerável aumento de temperatura ocorrido no ponto A de análise, na parte inferior da viga. Porém no ponto B, na parte central o aumento atingiu em torno da metade da temperatura do ponto A.

No ponto C de análise, o valor da temperatura atingido foi insignificante, o que não dispensa atenção especial.

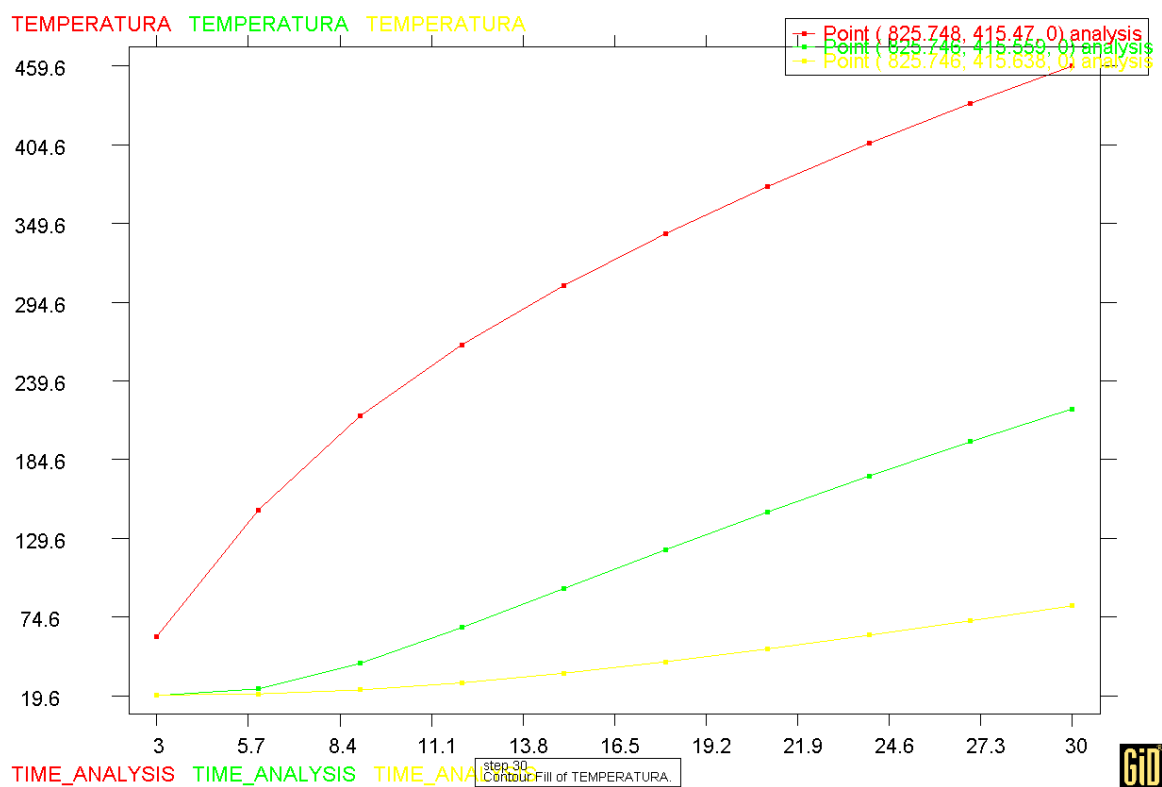


FIGURA 9.34: Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com argamassa de fibra projetada com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.

d) Viga com proteção por fibra projetada com 15mm de espessura e curva de incêndio natural

Com 15mm de espessura de material de proteção na viga, verifica-se que há um maior isolamento em relação aos testes anteriores, sendo estes favorecidos pela curva de incêndio natural.

Após 3 minutos de incêndio, os valores considerados são baixos, estando o aço com uma temperatura de aproximadamente 27,38 °C, de acordo com a figura 9.35 (A) e aos 9 minutos aproximadamente 102,21 °C, conforme figura 9.35 (B).

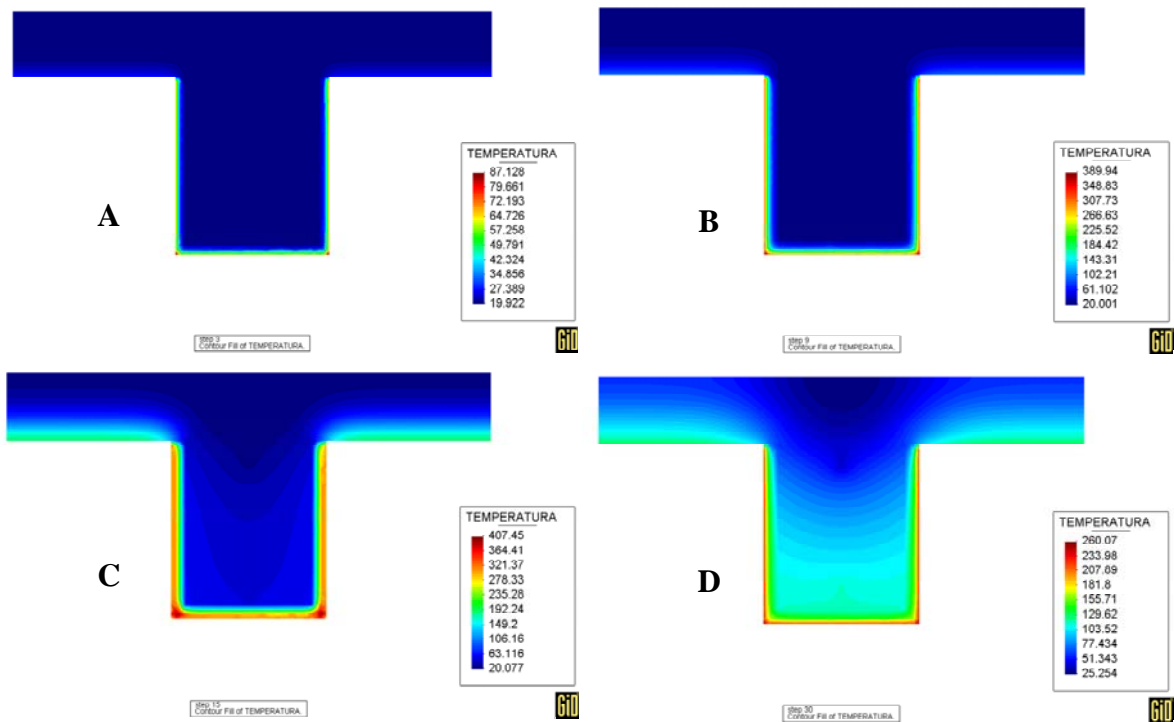


FIGURA 9.35: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos de incêndio, com proteção por fibra projetada de 15mm e curva de incêndio natural.

De 9 para 15 minutos, a variação da temperatura na viga é muito pequena, pois verifica-se que há uma diferença de apenas 3,95 °C do caso anterior para o atual (15 minutos), comparando-se as figuras 9.35 (B) e (C).

Observado os índices obtidos aos 30 minutos, verifica-se que há uma queda considerável, em decorrência do decaimento da temperatura dos gases no compartimento incendiado, conforme figura 9.35 (D).

Neste caso, a temperatura do aço está a 129,62 °C, aproximadamente. Já na face externa do material de proteção, verifica-se que o índice está em torno de 260,07 °C.

Ao analisar o gráfico da figura 9.36, verifica-se que o ápice da temperatura na viga ocorreu próximo aos 14 minutos de incêndio, quando foi atingida uma temperatura de 272,7 °C, no ponto A de análise. Nos pontos B e C, as temperaturas foram muito baixas.

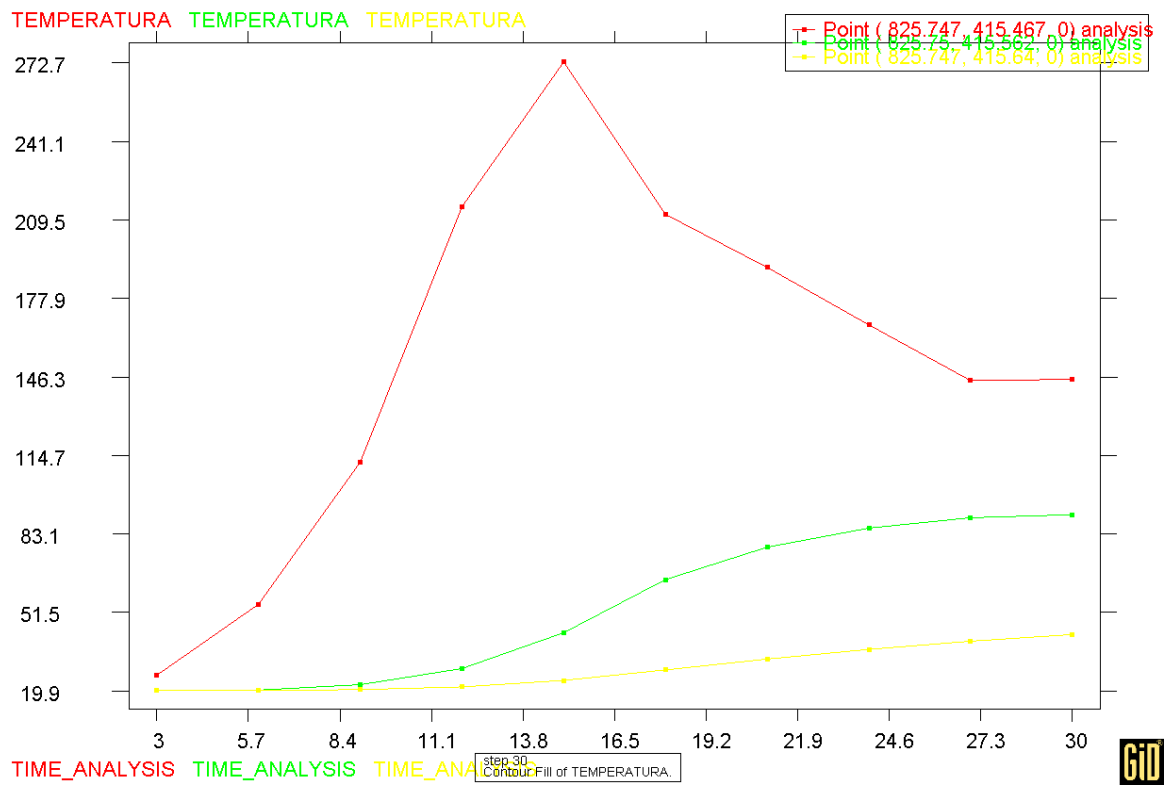


FIGURA 9.36: Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com argamassa de fibra projetada com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.

e) Viga com proteção por concreto vermiculítico com 10mm de espessura e curva de incêndio padrão

Inicialmente optou-se por fazer a cobertura da viga com uma camada de 10mm de concreto vermiculítico. Ao analisar as temperaturas verificou-se que aos 3 minutos a temperatura era de 129,23 °C, aproximadamente, conforme figura 9.37 (A).

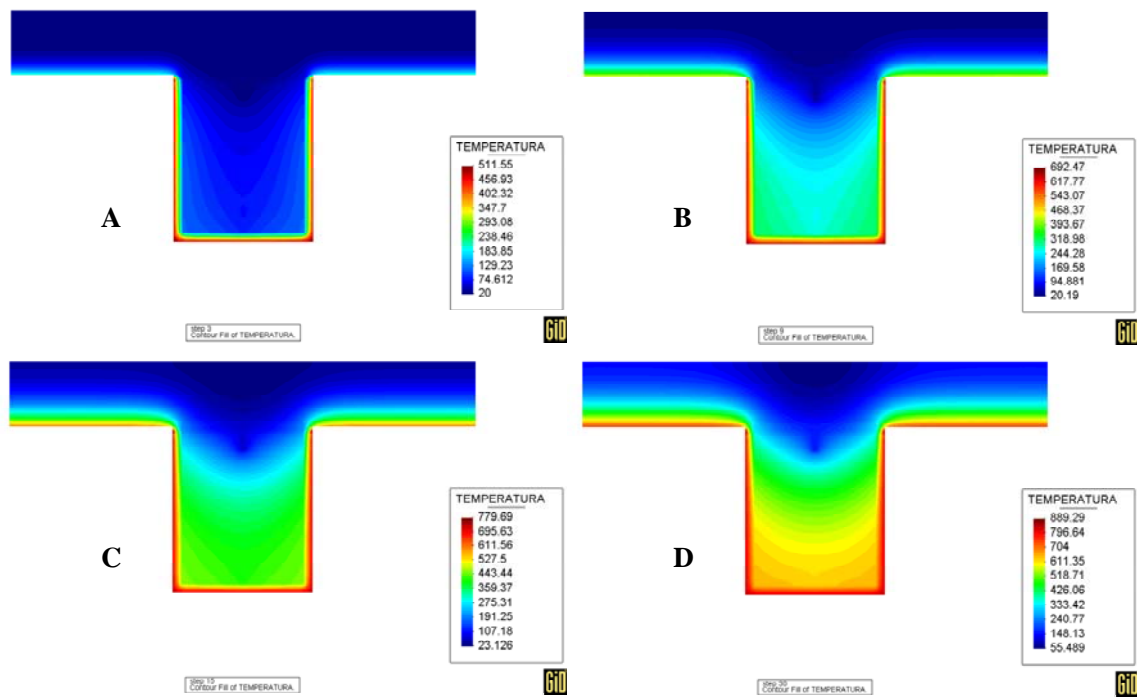


FIGURA 9.37: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos de incêndio, com viga protegida por concreto vermiculítico submetida à curva de incêndio padrão.

Aos 9 minutos, a temperatura no aço atingiu 318,98 °C, com uma temperatura na face externa da proteção em torno de 692,47 °C, conforme apresentado na figura 9.37 (B).

Aos 15 e 30 minutos a temperatura atingiu seus maiores índices chegando no aço em torno de 443,44 °C e 611,35 °C, respectivamente, conforme figuras 9.37 (C) e (D). Estas temperaturas são consideravelmente altas para a viga.

No gráfico da figura 9.38, verifica-se que o elemento estrutural atingiu altas temperaturas nos pontos A e B da referência de análise em um pequeno intervalo de tempo, mesmo com a proteção por concreto vermiculítico de 10mm. No ponto C de análise, a temperatura não teve um aumento significativo para 30 minutos.

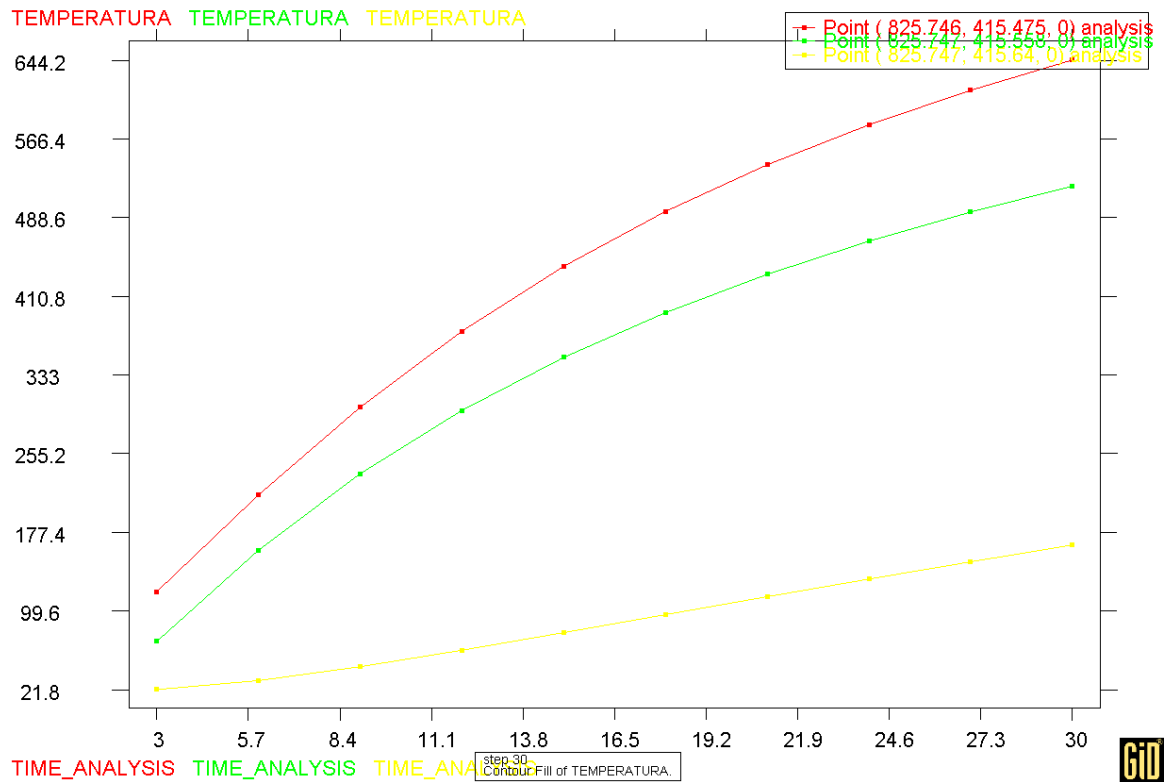


FIGURA 9.38: Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com concreto vermiculítico projetado com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.

f) Viga com proteção por concreto vermiculítico com 10mm de espessura e curva de incêndio natural

Utilizando-se a curva de incêndio natural, verificou-se que aos 3 minutos a temperatura na viga chegou aos 34,79 °C aproximadamente, conforme figura 9.39 (A). Aos 9 minutos as temperaturas atingiram um índice de 138,53 °C, aproximadamente, como pode ser observado na figura 9.39 (B).

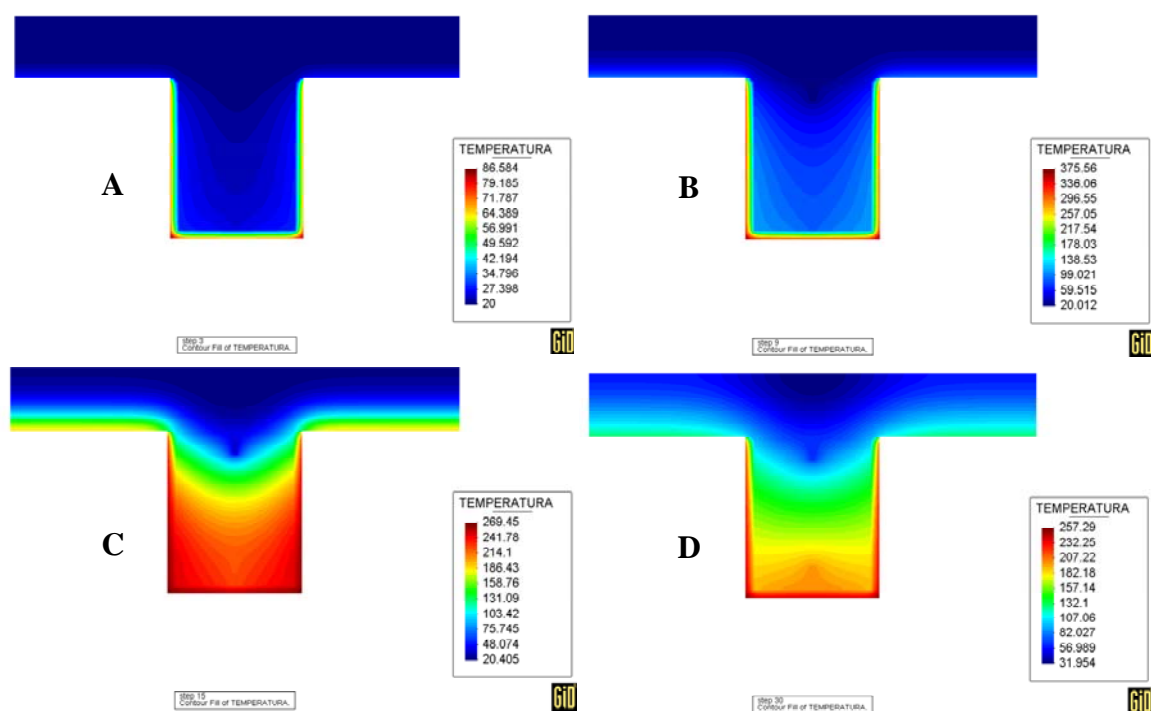


FIGURA 9.39: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos de incêndio, com viga protegida por concreto vermiculítico com 10mm submetida à curva de incêndio natural.

Aos 15 minutos as temperaturas atingiram o mais alto nível, iniciando um processo de arrefecimento, conforme pode ser verificado comparando-se os resultados das figuras 9.39 (C) e (D).

Ao analisar o gráfico da figura 9.40, verifica-se que as temperaturas apresentadas na viga atingem seu pico no ponto A próximo aos 11 minutos. No ponto B, a temperatura máxima é atingida próximo aos 13,8 minutos, porém, no ponto C a temperatura máxima é atingida próximo aos 30 minutos. É interessante observar que, considerando o sentido do fluxo de calor, o ponto A começa um processo de perda de temperatura após aquecido, antes do ponto C, por isso o último ponto de análise continua com uma curva ascendente aos 30 minutos.

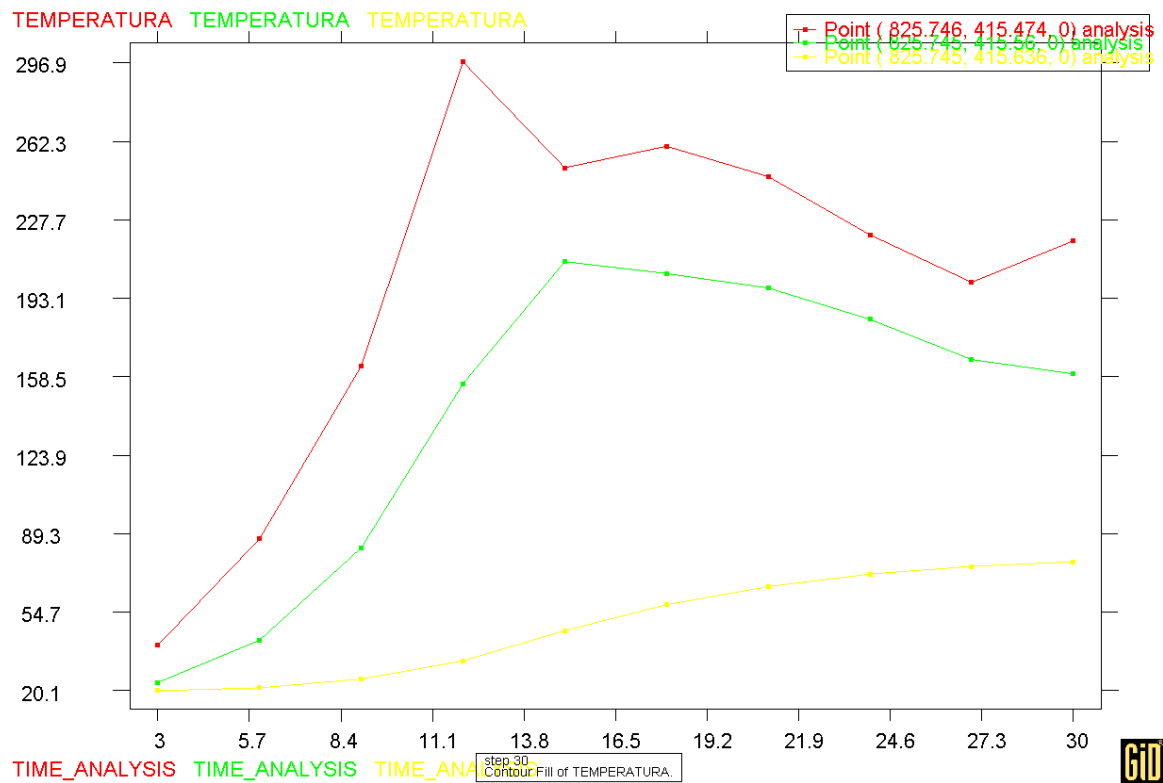


FIGURA 9.40: Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com concreto vermiculítico projetado com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.

g) Viga com proteção por concreto vermiculítico com 15mm de espessura e curva de incêndio padrão

Como nos outros casos, a curva de incêndio padrão demonstrou um aumento intenso na temperatura da viga, já que nos primeiros 3 minutos foram atingidas temperaturas acima que 181,66 °C, nos perfis, conforme figura 9.41 (A).

A temperatura continuou aumentando atingindo níveis altos nos tempos medidos posteriormente, podendo-se observar isto nas figuras 9.39 (B), (C) e (D). Aos 30 minutos a temperatura na face externa do material de proteção é da ordem de 849,54 °C.

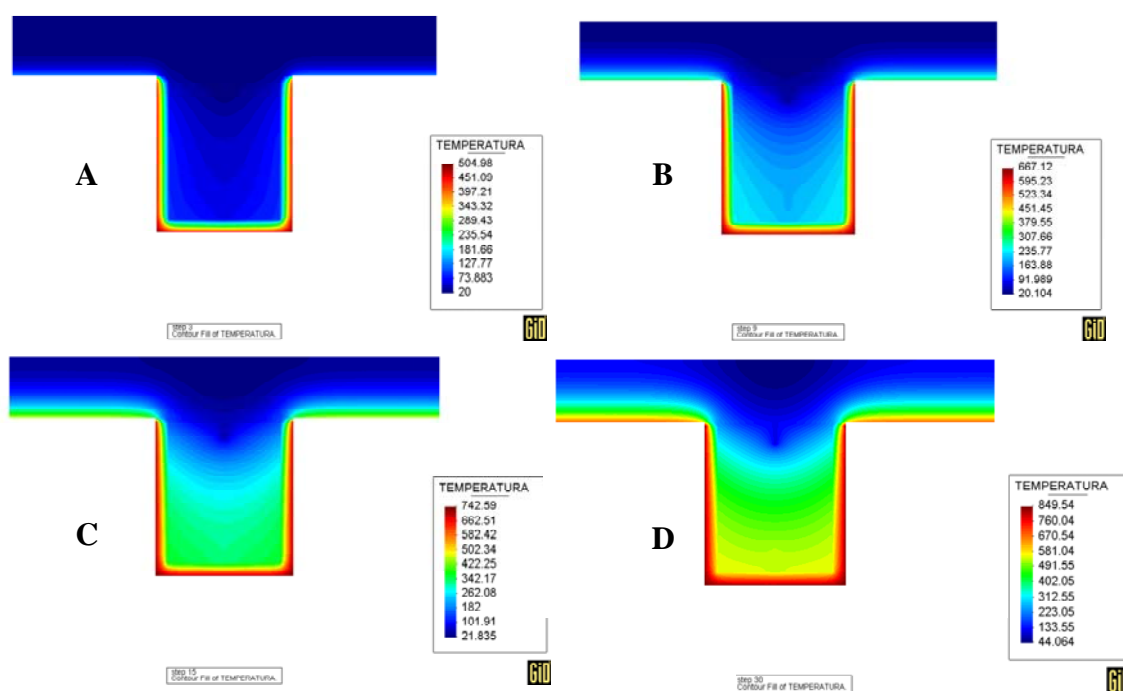


FIGURA 9.41: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por concreto vermiculítico de 15mm submetida à curva de incêndio padrão.

Analisando o gráfico da figura 9.42, observa-se que o aumento de temperatura no elemento estrutural foi bastante brusco, nos pontos de análise A e B. Já no ponto C, a temperatura não atingiu um valor muito alto para os perfis.

Nos primeiros 3 minutos de análise, a temperatura era consideravelmente alta nos perfis no ponto A de tomada de temperatura. É interessante observar que a diferença de temperatura entre 3 e 30 minutos é de mais de 435 °C graus, o que é bastante considerável em um intervalo de tempo de 27 minutos.

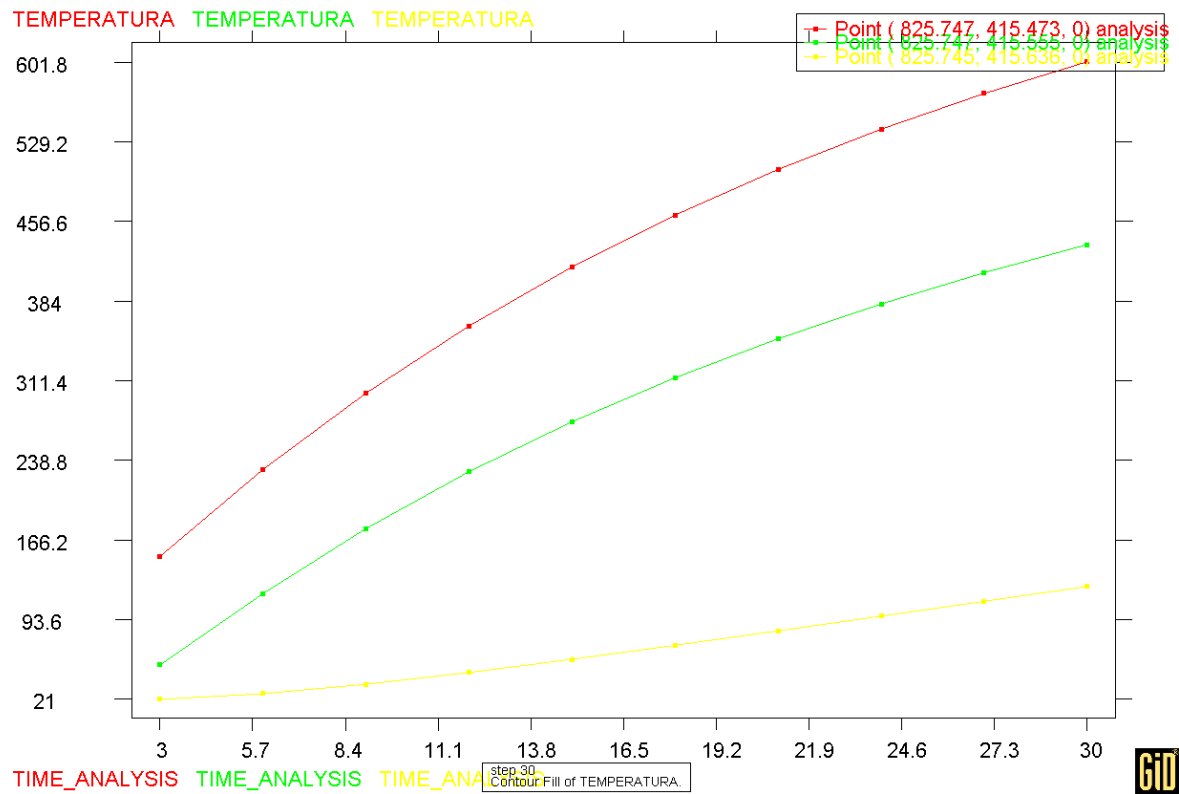


FIGURA 9.42: Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com concreto vermiculítico projetado com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.

h) Viga com proteção por concreto vermiculítico com 15mm de espessura e curva de incêndio natural

Inicialmente, aos 3 minutos a temperatura do elemento estrutural está em torno de 35,12 °C, conforme figura 9.43 (A). Posteriormente, a temperatura aos 9 minutos apresenta um índice de 138,59 °C, aos 15 minutos 213,93 °C e 181,71 °C aos 30 minutos, conforme pode ser observado nas figuras 9.43 (B), (C) e (D), respectivamente.

É interessante observar que a proteção por concreto vermiculítico de 10mm e de 15mm, na simulação com curva de incêndio natural, resultou em uma pequena diferença de temperaturas observadas nos vários pontos, como pode ser verificado através da comparação das figuras 9.39 e 9.43.

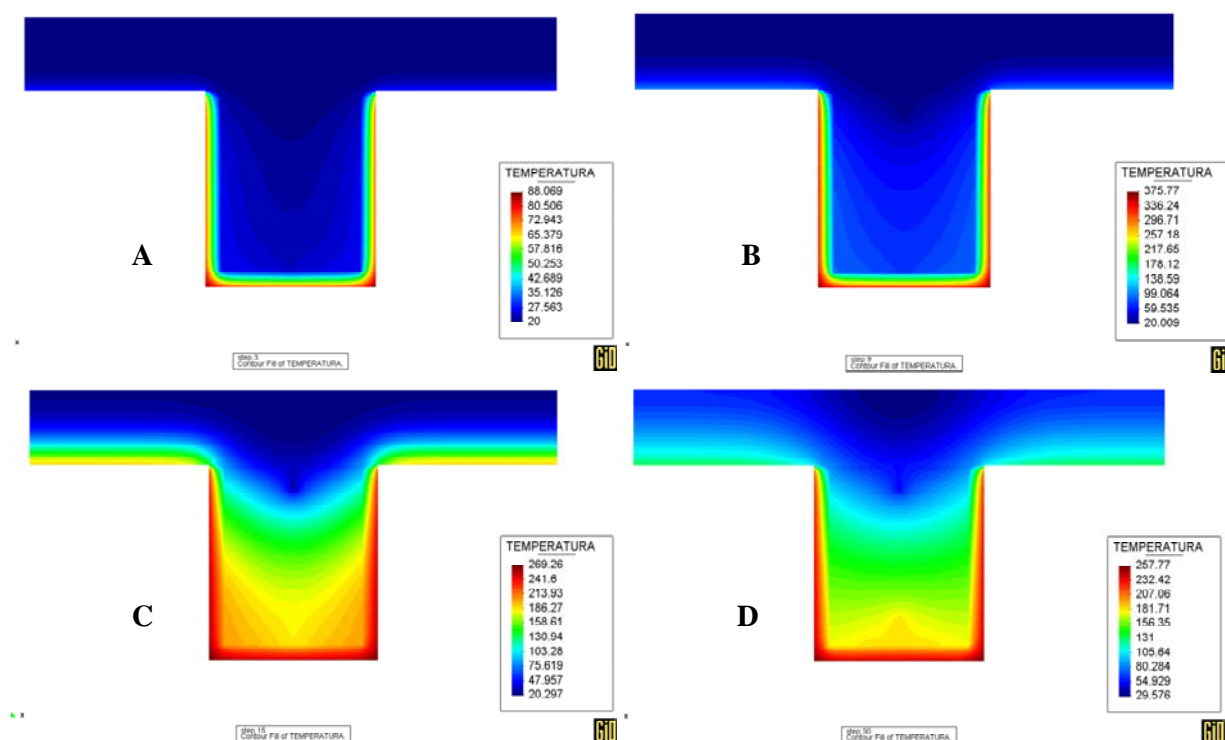


FIGURA 9.43: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por concreto vermiculítico de 15mm submetida à curva de incêndio natural.

Na análise do gráfico da figura 9.44 comparada com a figura 9.40, pode-se verificar que a diferença de temperatura nos pontos de análise entre os elementos protegidos com concreto vermiculítico de 10mm e 15mm, submetidos à curva de incêndio natural, é considerável, a despeito de apresentarem respostas ao longo do tempo com a mesma configuração.

As linhas formadas são parecidas, porém as temperaturas se diferem, sendo que no segundo caso, com o elemento protegido com uma camada de 15mm de espessura, esta diferença chega a ser de 69,18 °C no ponto A de análise.

Também nos pontos B e C, observa-se uma diferença, porém esta é bem menos marcante no ponto C de análise.

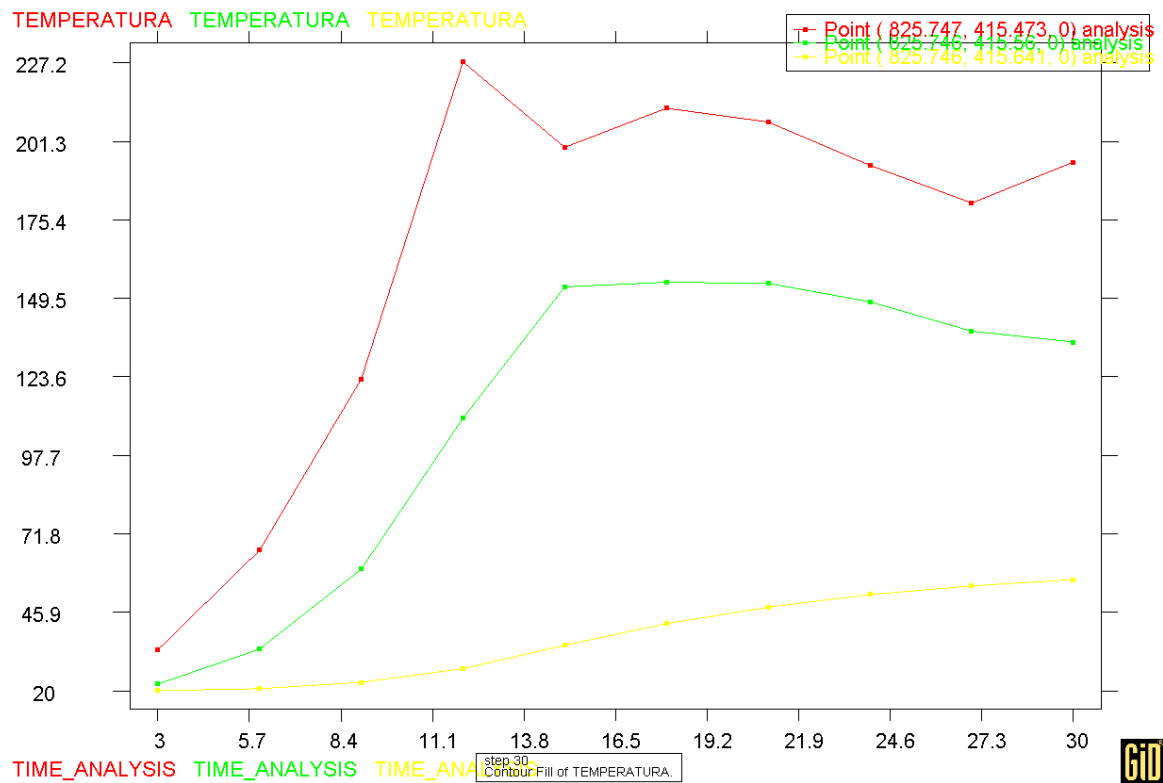


FIGURA 9.44: Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com concreto vermiculítico projetado com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.

9) Viga com proteção por lã de rocha com 10mm de espessura e curva de incêndio padrão

Ao se testar a lã de rocha utilizando uma cobertura de 10mm e submetendo o elemento estrutural protegido à curva de incêndio padrão, obteve-se os resultados apresentados pela figura 9.45.

As temperaturas obtidas foram de 178,42 °C aos 3 minutos, 378,34 °C aos 9 minutos, 501,94 °C aos 15 minutos e 755,75 °C, aproximadamente, aos 30 minutos. São temperaturas muito altas para o elemento estrutural.

Embora a temperatura na face externa do material de proteção fosse muito mais alta, a taxa de calor transferido para a viga foi consideravelmente grande, mostrando menor eficiência de proteção.

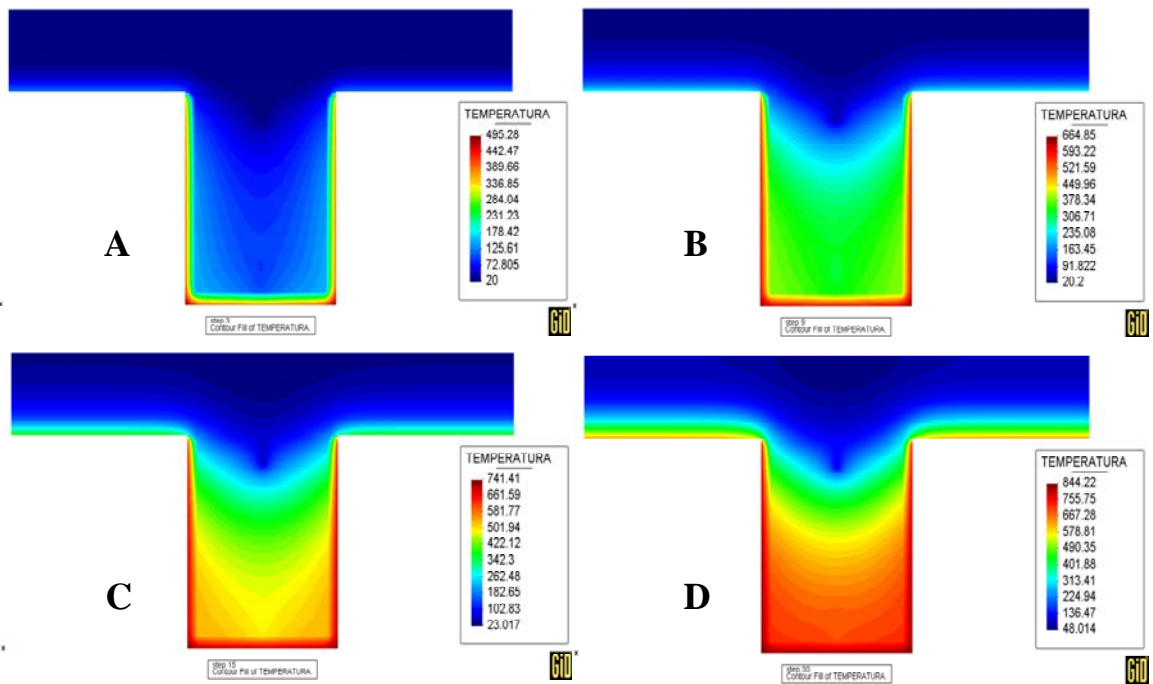


FIGURA 9.45: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por lã de rocha com 10mm submetida à curva de incêndio padrão.

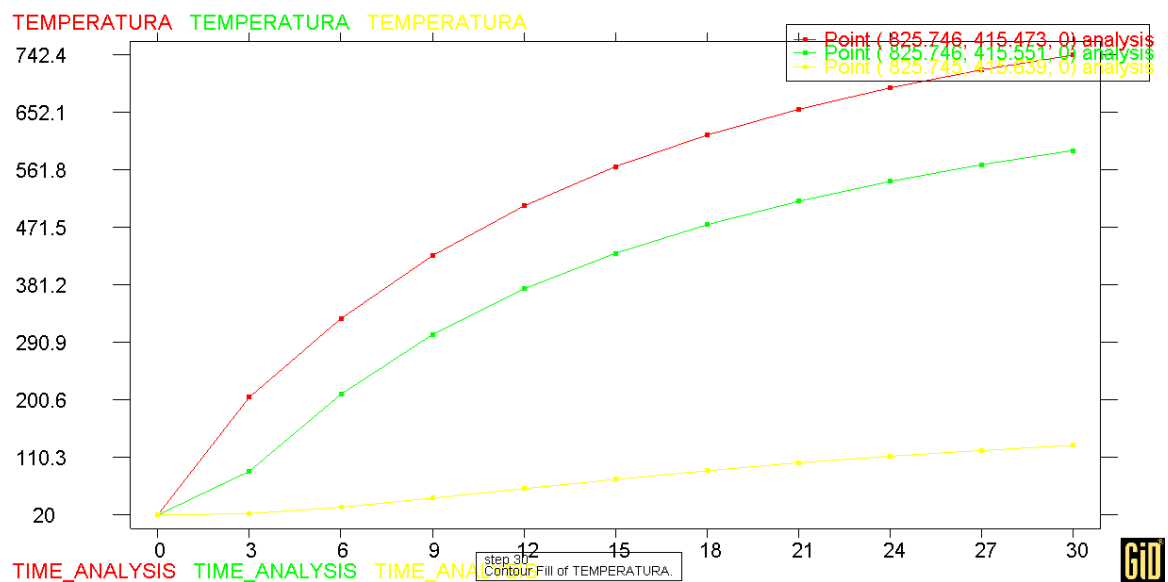


FIGURA 9.46: Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com lã de rocha com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.

Ao analisar o gráfico da figura 9.46, verifica-se que como nos casos anteriores, as curvas de elevação de temperatura nos pontos A e B da seção transversal têm uma ascendência bastante acentuada, em decorrência do rigor da curva de incêndio padrão à qual o elemento estrutural foi submetido.

j) Viga com proteção por lã de rocha com 10mm de espessura e curva de incêndio natural

Ao testar a viga nas mesmas condições da análise anterior, porém desta vez com utilização da curva de incêndio natural, verifica-se que os resultados não foram tão rigorosos, mas a temperatura atingida foi consideravelmente alta aos 15 minutos, com 314,00 °C, aproximadamente. Nos outros momentos foram detectadas temperaturas de 33,57 °C aos 3 minutos, aproximadamente, 134,38 °C aos 9 minutos e 204,79 °C aos 30 minutos, conforme pode ser verificado na figura 9.47.

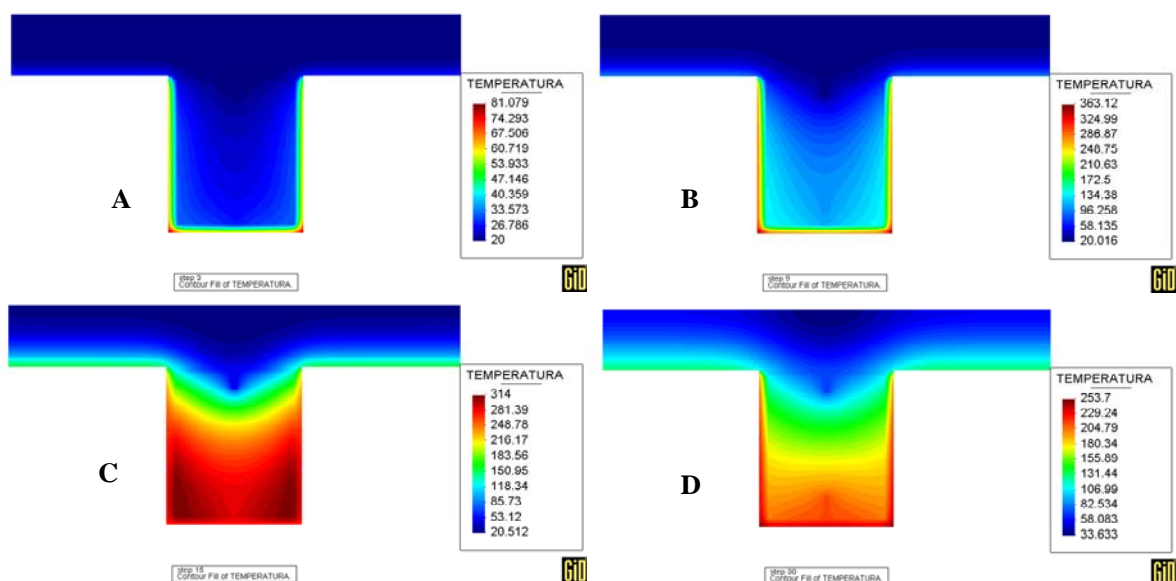


FIGURA 9.47: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por lã de rocha com 10mm submetida à curva de incêndio natural.

O gráfico da figura 9.48 apresenta uma temperatura de 292,00 °C no ponto A de análise e 258,00 °C no ponto B. Já o ponto C, não apresentou um aumento significativo na sua temperatura.

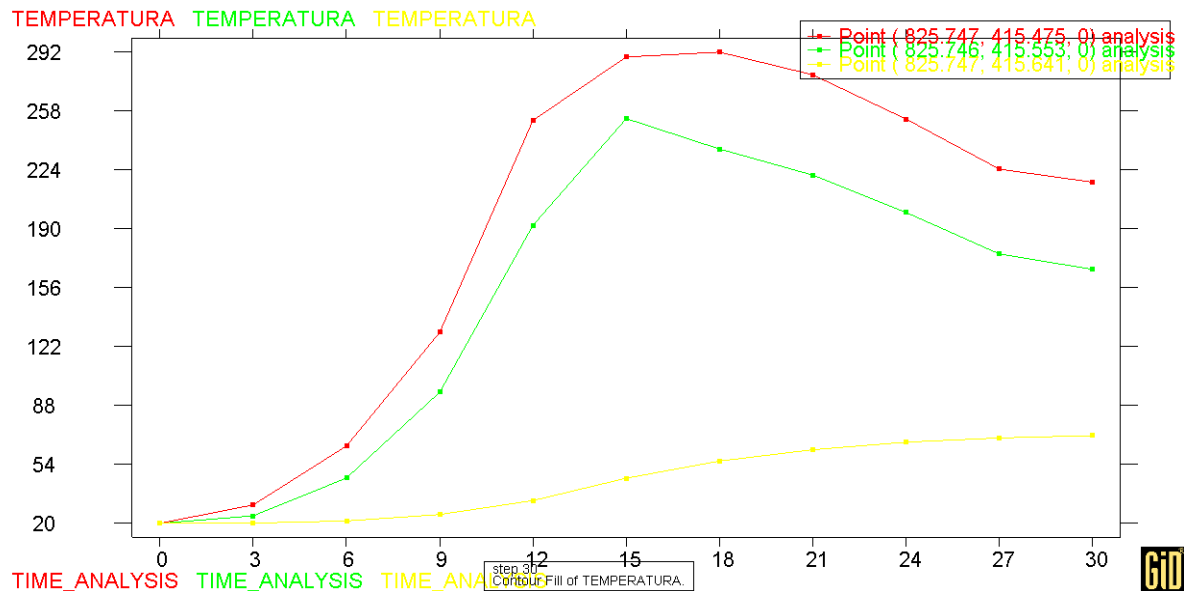


FIGURA 9.48: Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com lã de rocha com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.

k) Viga com proteção por lã de rocha com 15mm de espessura e curva de incêndio padrão

Aumentando a proteção na viga para 15mm de espessura da cobertura por lã de rocha, verifica-se que aos 3 minutos de incêndio a temperatura é de aproximadamente 126,40 °C, conforme figura 9.49 (A).

Nos tempos seguintes de análise, verificou-se 377,88 °C aos 9 minutos, 501,03 °C aos 15 minutos e 665,81 °C aos 30 minutos, conforme figuras 9.49 (B), (C) e (D), respectivamente.

Analisando-se ainda, os resultados obtidos no gráfico apresentado na figura 9.50, verifica-se que o pico de temperatura no ponto A de análise ocorreu aos 30 minutos com 702,04 °C e 531,80 °C no ponto B. No ponto C a temperatura não teve variação significativa.

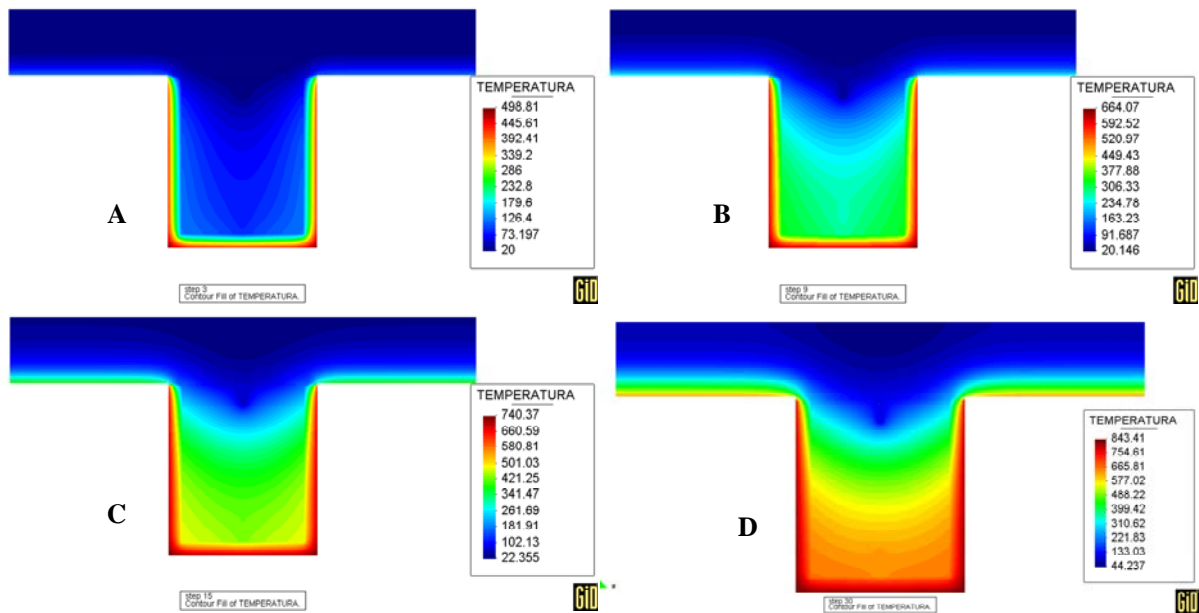


FIGURA 9.49: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por lã de rocha com 15mm submetida à curva de incêndio padrão.

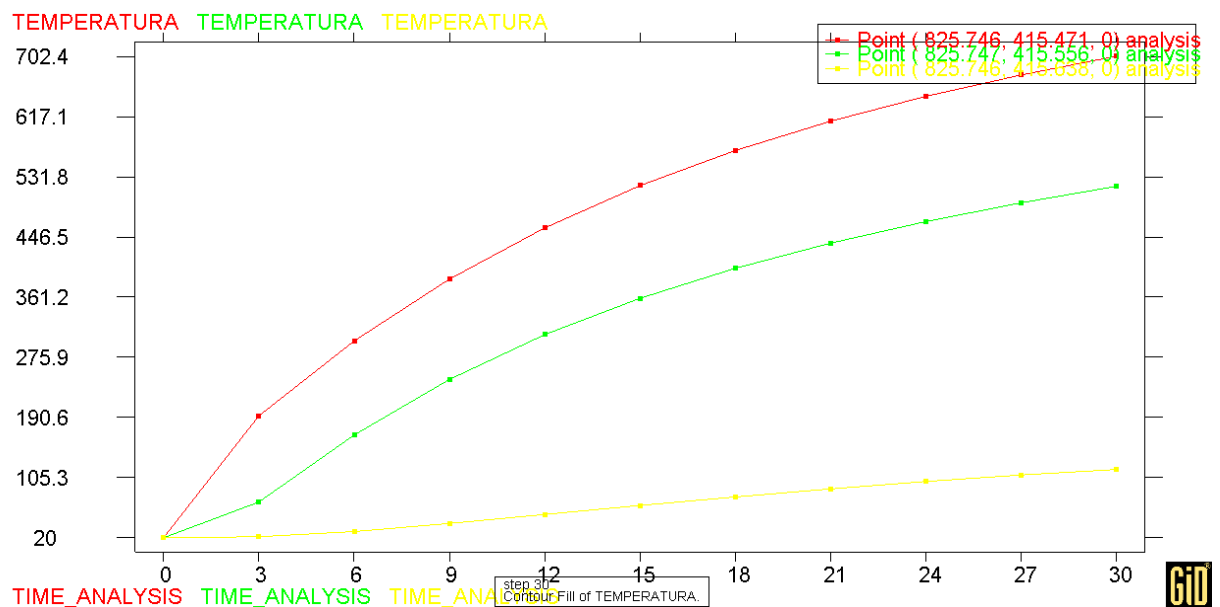


FIGURA 9.50: Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com lã de rocha com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.

l) Viga com proteção por lã de rocha com 15mm de espessura e curva de incêndio natural

Com a proteção por lã de rocha de cobertura de 15mm, tendo a viga sido submetida à curva de incêndio natural, verificou-se que aos 3 minutos, foi atingida uma temperatura aproximada de 34,33 °C e 136,29 °C aos 9 minutos, segundo figura 9.51 (A) e (B).

Há um aumento considerável de temperatura aos 15 minutos, quando os índices atingem 270,48 °C, porém ocorre o decaimento da temperatura no intervalo de 15 para 30 minutos chegando esta a 205,70 °C, conforme figuras 9.51 (C) e (D).

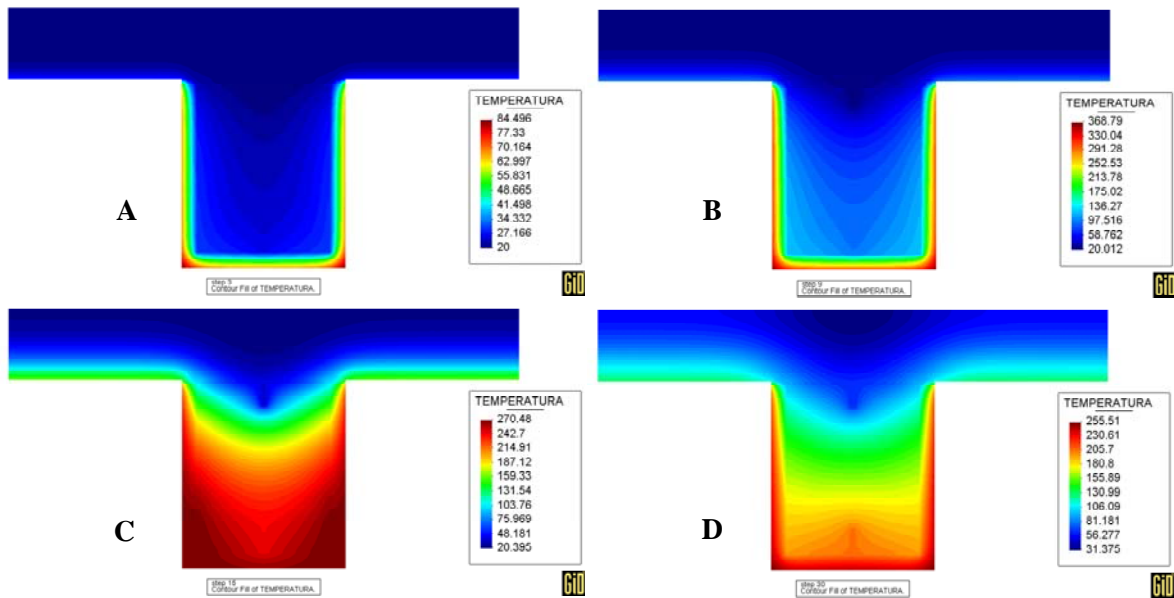


FIGURA 9.51: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por lã de rocha com 15mm submetida a curva de incêndio natural.

Analisando o gráfico da figura 9.52, verifica-se que a temperatura atingiu seu pico aos 12 minutos, entrando em queda logo em seguida. Nos pontos B e C, as temperaturas foram consideravelmente menores.

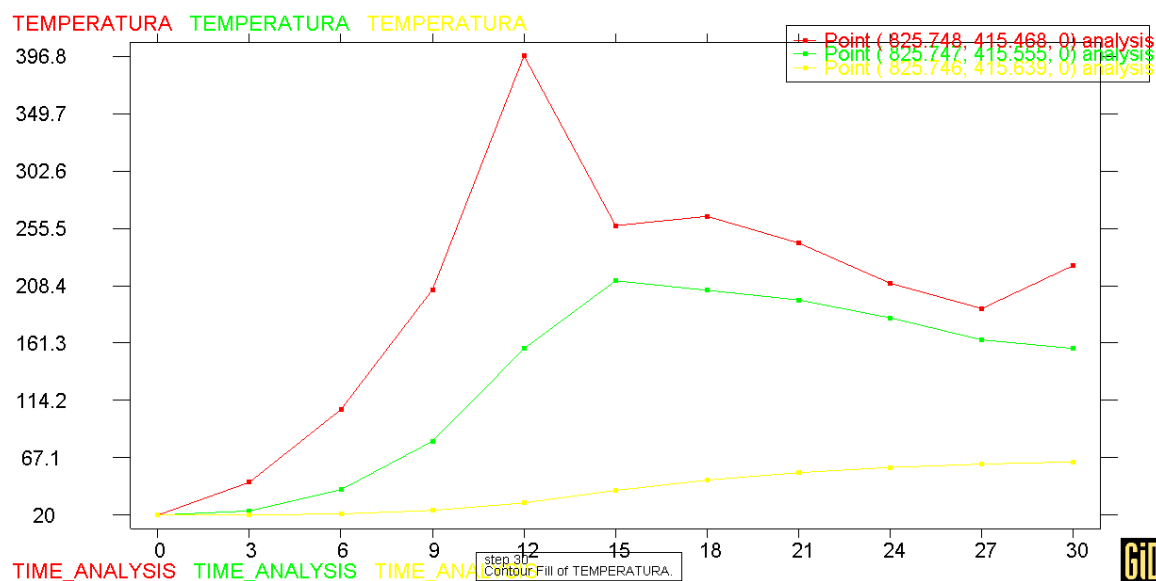


FIGURA 9.52: Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com lã de rocha com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.

m) Viga com proteção por manta cerâmica com 10mm de espessura e curva de incêndio padrão

Ao analisar os resultados apresentados pela viga com manta cerâmica com 10mm de espessura, submetido à curva de incêndio padrão, verifica-se que aos 3 minutos a viga apresentava uma temperatura de 125,14 °C, conforme figura 9.53 (A). Nos demais períodos, foram observadas as temperaturas de 306,68 °C aos 9 minutos, 501,99 °C aos 15 minutos e 667,26 °C aos 30 minutos, conforme a figura 9.53 (B), (C) e (D), respectivamente.

Analisando o gráfico da figura 9.54, observa-se que nos pontos A e B de análise, a curva de aumento de temperatura foi bastante acentuada, tendo a viga chegado a temperaturas bem altas aos 30 minutos de incêndio.

No ponto C de análise, as temperaturas não foram consideravelmente altas, atingindo-se uma máxima de aproximadamente 107,30 °C aos 30 minutos.

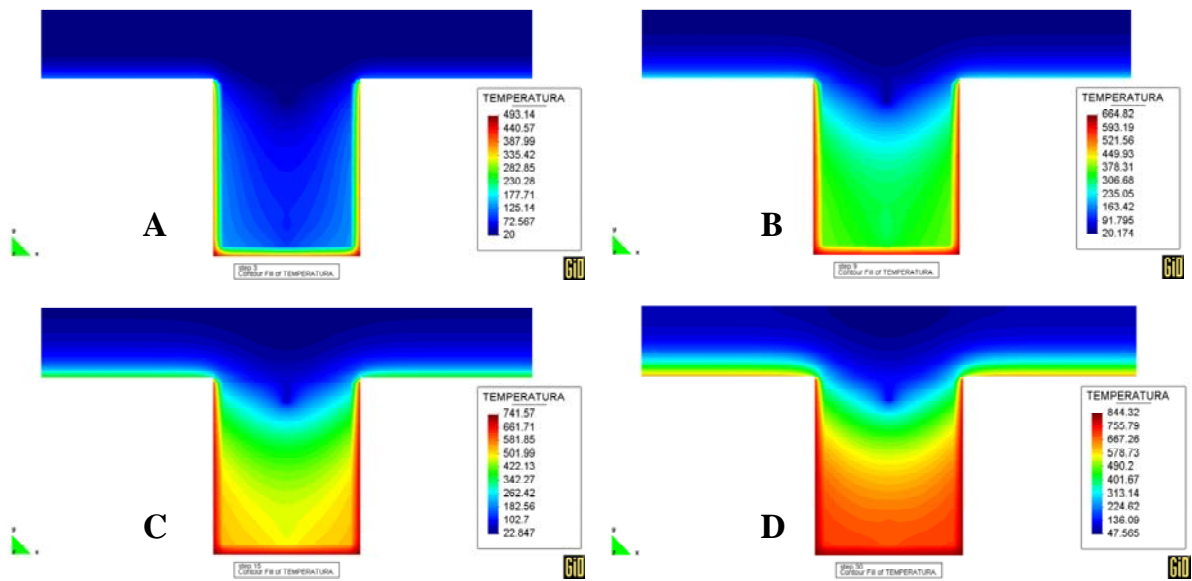


FIGURA 9.53: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por manta cerâmica com 10mm submetida à curva de incêndio padrão.

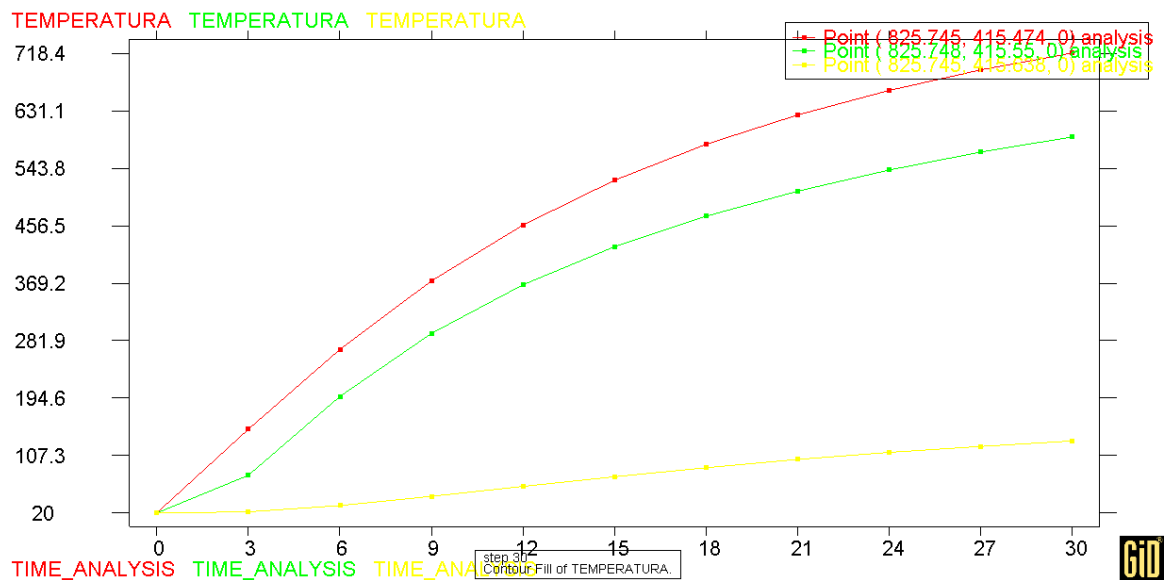


FIGURA 9.54: Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com manta cerâmica com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.

n) Viga com proteção por manta cerâmica 10mm de espessura e curva de incêndio natural

Submetendo a viga às mesmas condições do item anterior, porém com uma curva de incêndio natural, verifica-se que foram atingidas as seguintes temperaturas: 33,07 °C aos 3 minutos, 133,18 °C aos 9 minutos, 309,25 °C aos 15 minutos e 227,15 °C aos 30 minutos, conforme apresentado na figura 9.54 (A), (B), (C) e (D).

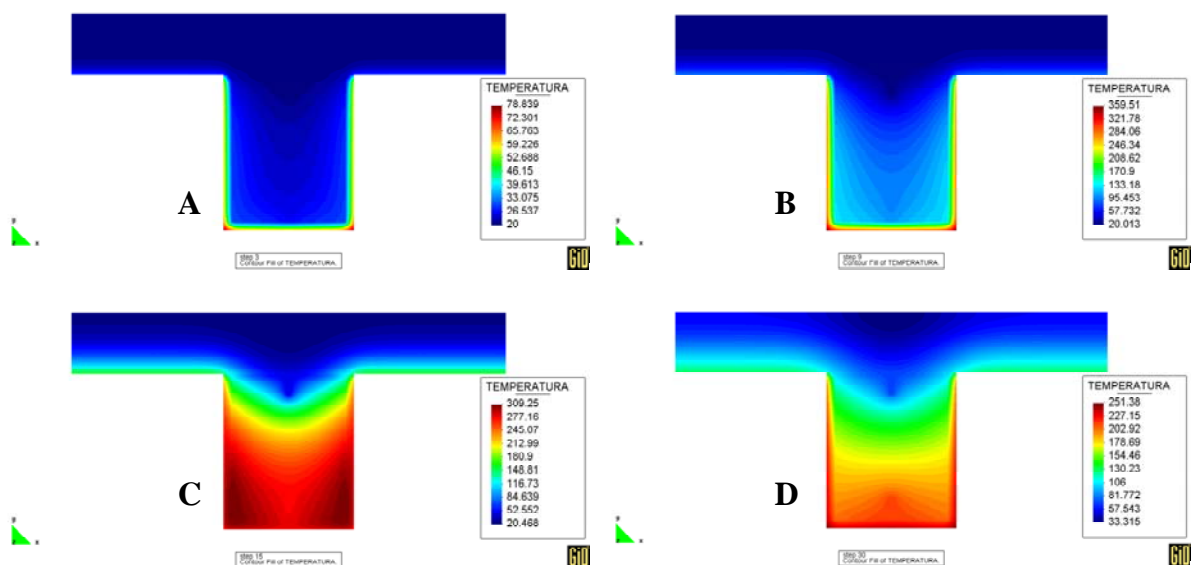


FIGURA 9.54: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por manta cerâmica com 10mm submetida à curva de incêndio natural.

Observando-se o gráfico representado na figura 9.55, verifica-se que a maior temperatura atingida no ponto A de análise foi de 287,2 °C aos 18 minutos, entrando em queda logo após este momento.

As temperaturas em B também foram consideravelmente menor que em A, porém com temperaturas maiores que 220,00 °C em determinado período.

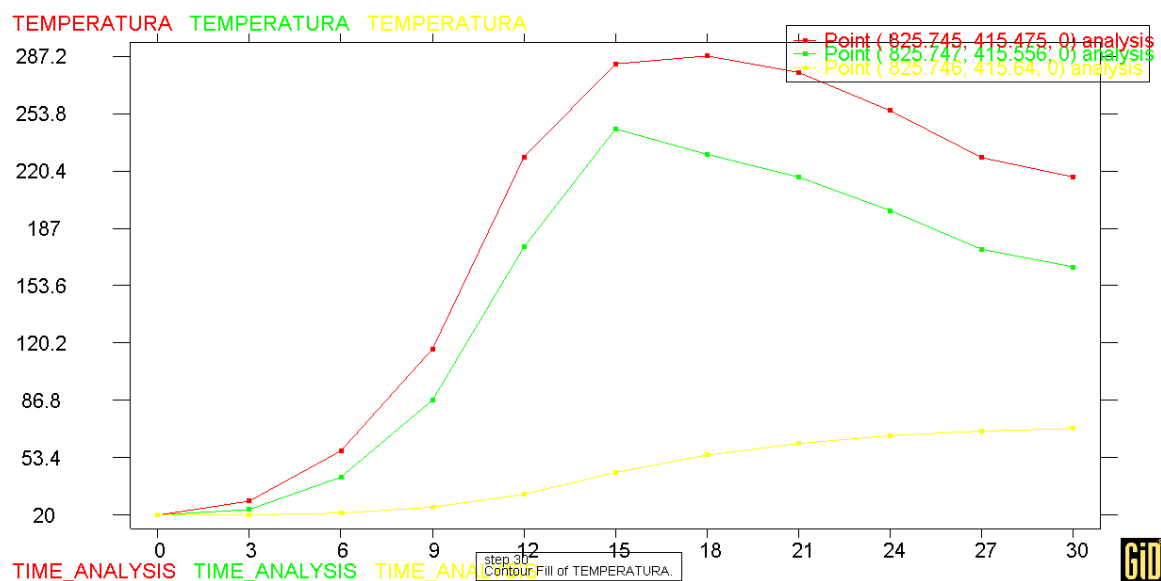


FIGURA 9.55: Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com manta cerâmica com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.

o) Viga com proteção por manta cerâmica 15mm de espessura e curva de incêndio padrão

Ao aumentar a espessura da camada de manta cerâmica para proteção do elemento estrutural e submetê-la às variações de temperatura segundo a curva de incêndio padrão, verificou-se que aos 3 minutos, a temperatura da viga era de 125,93 °C, conforme figura 9.56 (A). Nos demais períodos, as temperaturas foram de 306,31 °C aos 9 minutos, 501,07 °C aos 15 minutos e 665,77 °C aos 30 minutos, conforme figura 9.56 (B), (C) e (D).

Analisando-se ainda o gráfico da figura 9.57 pode-se verificar que, como nos casos anteriores com utilização de curva de incêndio padrão, as temperaturas aumentaram consideravelmente na viga, atingindo um índice da ordem de 672,00 °C no ponto A de análise.

No ponto B as temperaturas foram menores, atingindo aproximadamente 500 °C ao final do tempo de análise. Em C, as temperaturas foram consideravelmente baixas.

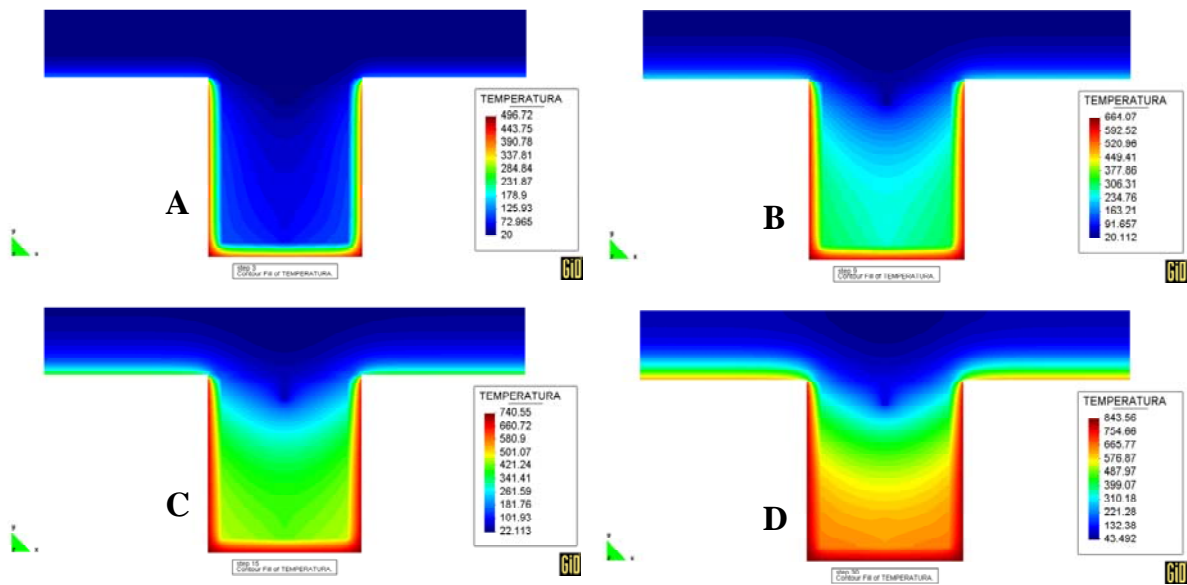


FIGURA 9.56: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por manta cerâmica com 15mm submetida a curva de incêndio padrão.

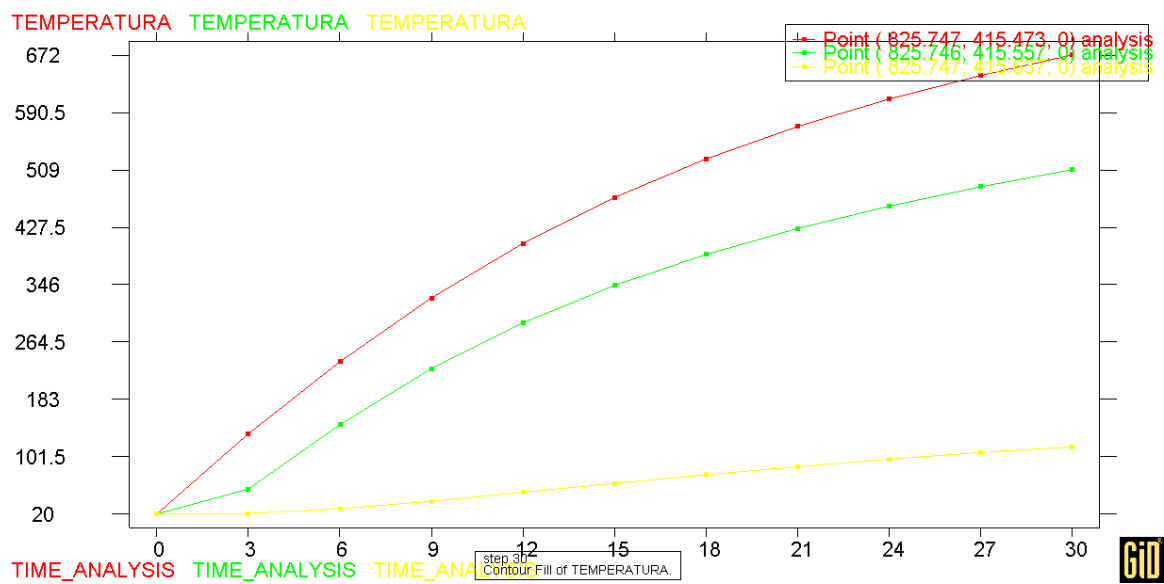


FIGURA 9.57: Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com manta cerâmica com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.

p) Viga com proteção por manta cerâmica 15mm de espessura e curva de incêndio natural

No caso do elemento estrutural protegido com manta cerâmica de 15mm e submetido à curva de incêndio natural, foram verificadas temperaturas de 34,99 °C aos 3 minutos, 99,12 °C aos 9 minutos, 266,54 °C aos 15 minutos e finalmente 207,48 °C aos 30 minutos, conforme apresentado na figura 9.58 (A), (B), (C) e (D), respectivamente.

O gráfico referente a tais simulações, representado na figura 9.59, demonstra que a temperatura chegou aos 266,40 °C no ponto A de análise, vindo a diminuir logo em seguida.

No ponto B a mais alta temperatura detectada foi da ordem de 204,80 °C, sendo que em C os índices não foram expressivos.

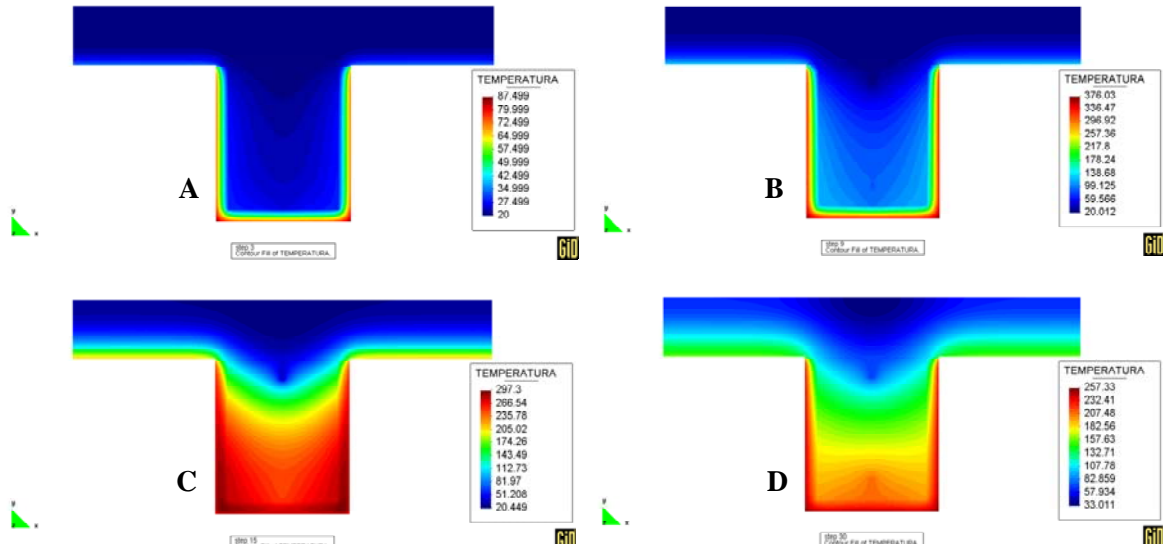


FIGURA 9.58: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por manta cerâmica com 15mm submetida à curva de incêndio natural.

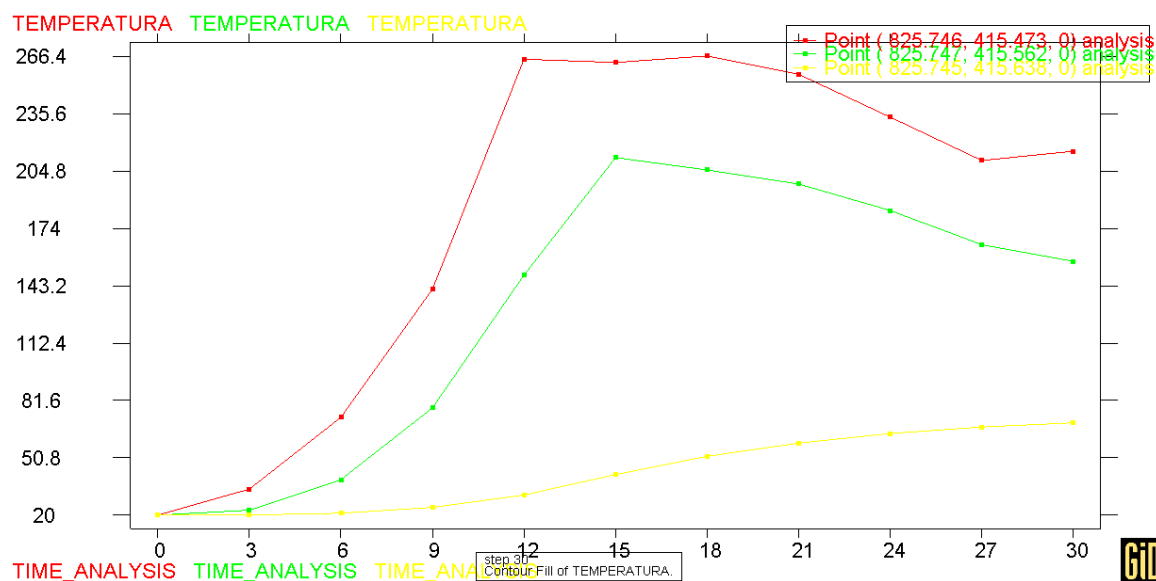


FIGURA 9.59: Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com manta cerâmica com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.

q) Viga com proteção por placa de gesso com 10mm de espessura e curva de incêndio padrão

Ao submeter a viga protegida com placa de gesso de 10mm de espessura à curva de incêndio padrão, foram detectadas as seguintes temperaturas na mesma: 69,84 °C aos 3 minutos, 164,63 °C aos 9 minutos, 344,35 °C aos 15 minutos e 579,42 °C aos 30 minutos, conforme figura 9.60.

Analisando o gráfico da figura 9.61, verifica-se que no ponto A da seção transversal a temperatura chegou a 611,20 °C aos 30 minutos.

No ponto B, as temperaturas atingiram índices mais baixos, porém atingindo 460,00 °C ao final dos testes.

Em C, as temperaturas não foram expressivas, atingindo em torno de 100,00 °C aos 30 minutos.

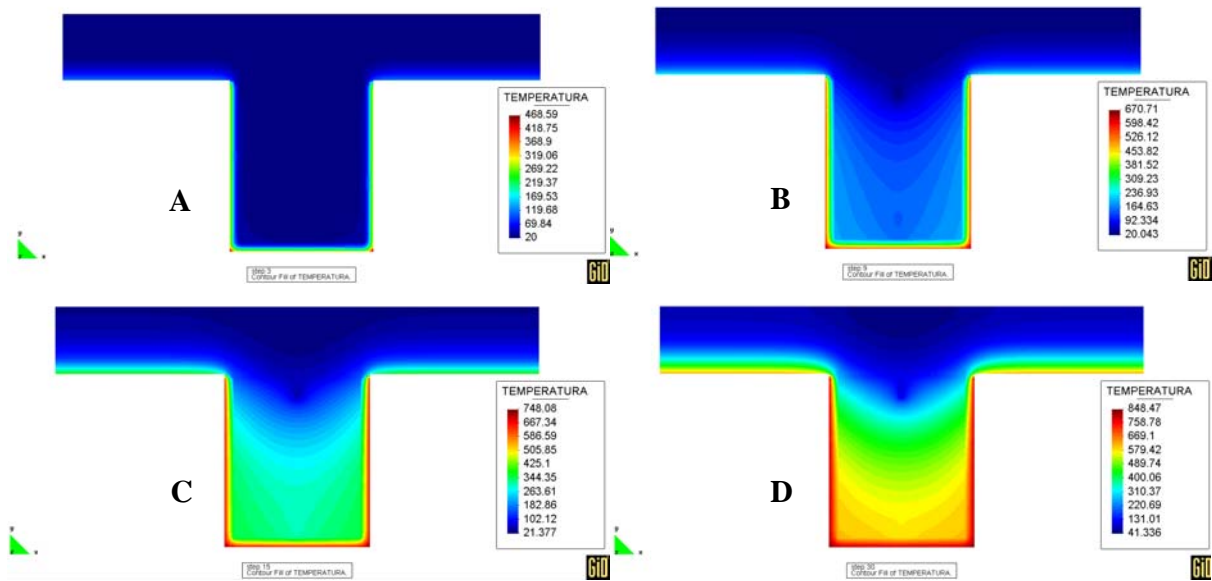


FIGURA 9.60: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por placa de gesso com 10mm submetida à curva de incêndio padrão.

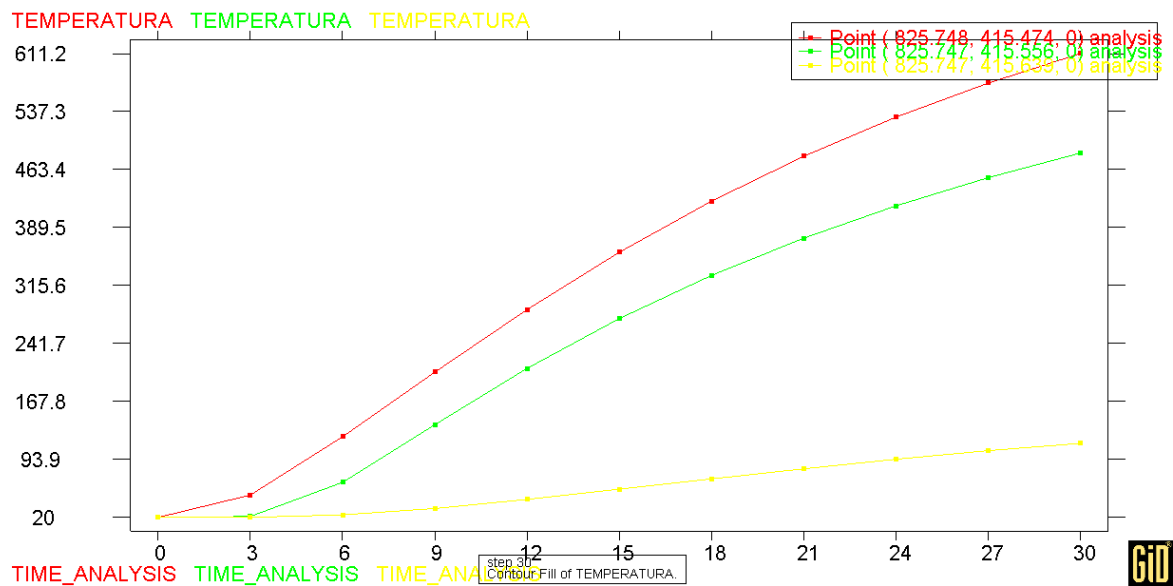


FIGURA 9.61: Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com placa de gesso com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.

r) Viga com proteção por placa de gesso com 10mm de espessura e curva de incêndio natural

Analisando os resultados apresentados na figura 9.62 (A), (B), (C) e (D), verifica-se que foram detectadas temperaturas de 26,64 °C aos 3 minutos, 98,97 °C aos 9 minutos, 216,63 °C aos 15 minutos e 201,72 °C aos 30 minutos.

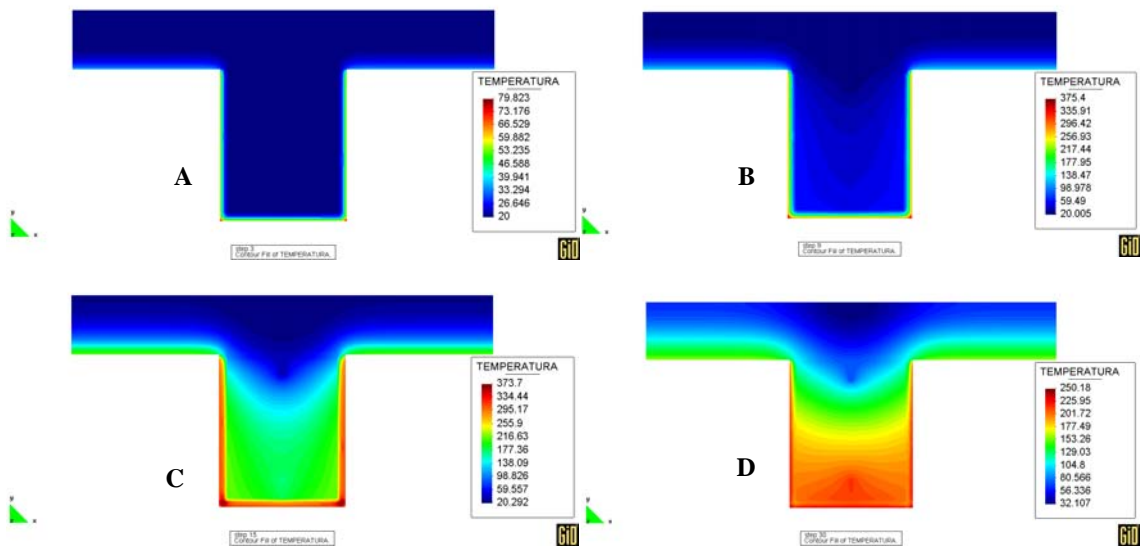


FIGURA 9.62: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por placa de gesso com 10mm submetida à curva de incêndio natural.

Analisando o gráfico de temperaturas na viga representado na figura 9.63, foi observado que a temperatura máxima alcançada na viga protegida foi de 235,20 °C no ponto A de análise, iniciando um processo de arrefecimento logo em seguida.

No ponto B, a temperatura máxima foi em torno de 181,40 °C, sendo que a curva de temperatura também iniciou um processo descendente logo após o valor máximo atingido.

Os valores referentes a C foram consideravelmente baixos, atingindo a temperatura máxima de 73,80 °C aos 30 minutos de incêndio.

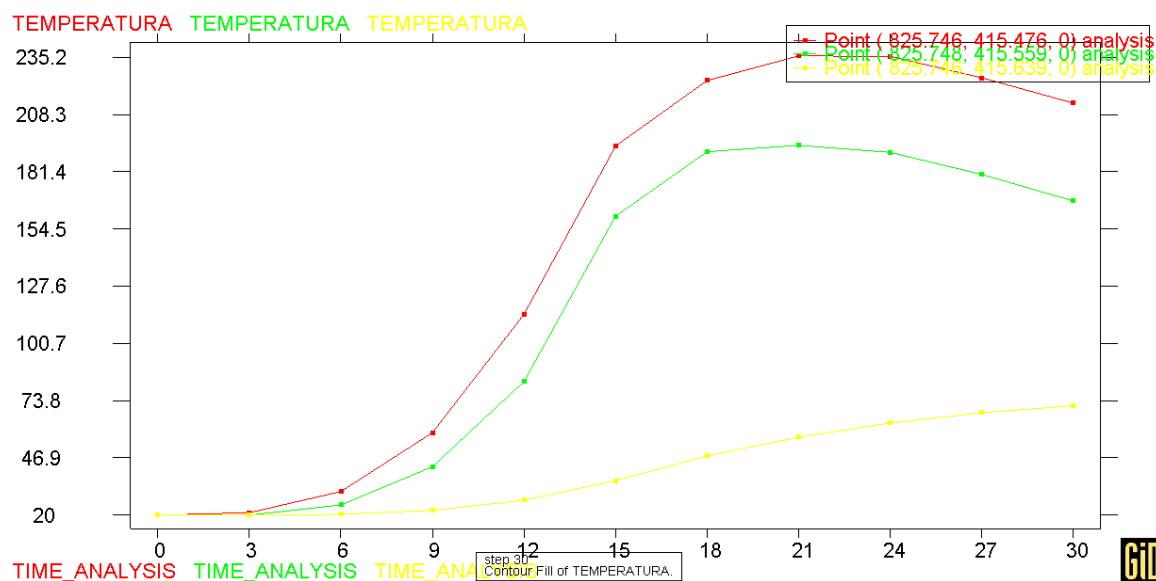


FIGURA 9.63: Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com placa de gesso com 10mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.

s) Viga com proteção por placa de gesso com 15mm de espessura e curva de incêndio padrão

Quando submetida à curva de incêndio padrão, verificou-se que as temperaturas na viga foram de 69,43 °C aos 3 minutos, 164,42 °C aos 9 minutos, 262,69 °C aos 15 minutos e 396,37 °C aos 30 minutos, conforme figura 9.64.

Ao final de 30 minutos, a temperatura na face externa do material era de 847,88 °C, ou seja, uma diferença de 451,51 °C, o que indica que houve uma grande retenção de calor do material, porém não o suficiente para manter as temperaturas baixas na viga.

O gráfico da figura 9.65 mostra as temperaturas nos pontos de análise A, B e C, onde foram detectados índices em torno de 512,40 °C, 358,40 °C e 82,00 °C, respectivamente.

No ponto C, como tem ocorrido em todas as outras análises, foram verificadas temperaturas baixas.

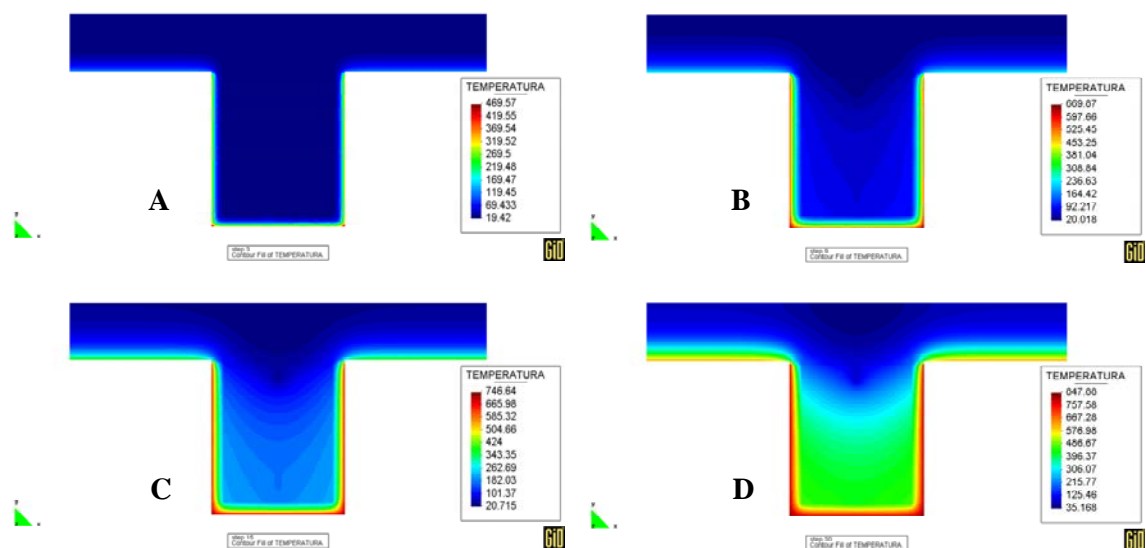


FIGURA 9.64: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por placa de gesso com 15mm submetida a curva de incêndio padrão.

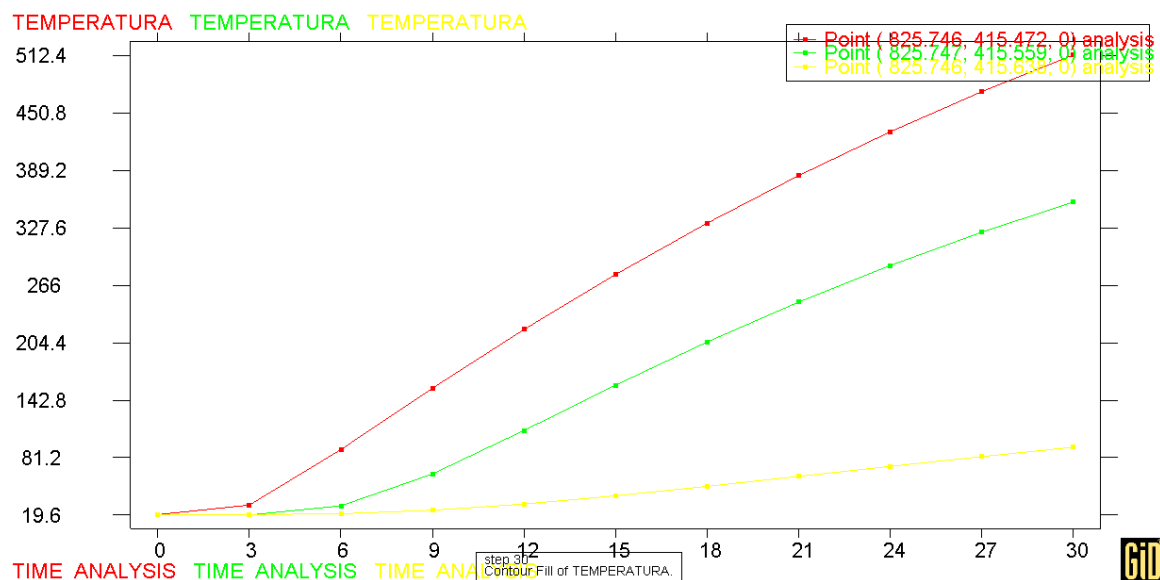


FIGURA 9.65: Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com placa de gesso com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.

s) Viga com proteção por placa de gesso com 15mm de espessura e curva de incêndio natural

As temperaturas atingidas na viga protegida com placa de gesso de 15mm, foram de 26,57 °C aos 3 minutos, 59,47 °C aos 9 minutos, 105,13 °C aos 15 minutos e 176,20 °C aos 30 minutos, conforme a figura 9.66 (A), (B), (C) e (D).

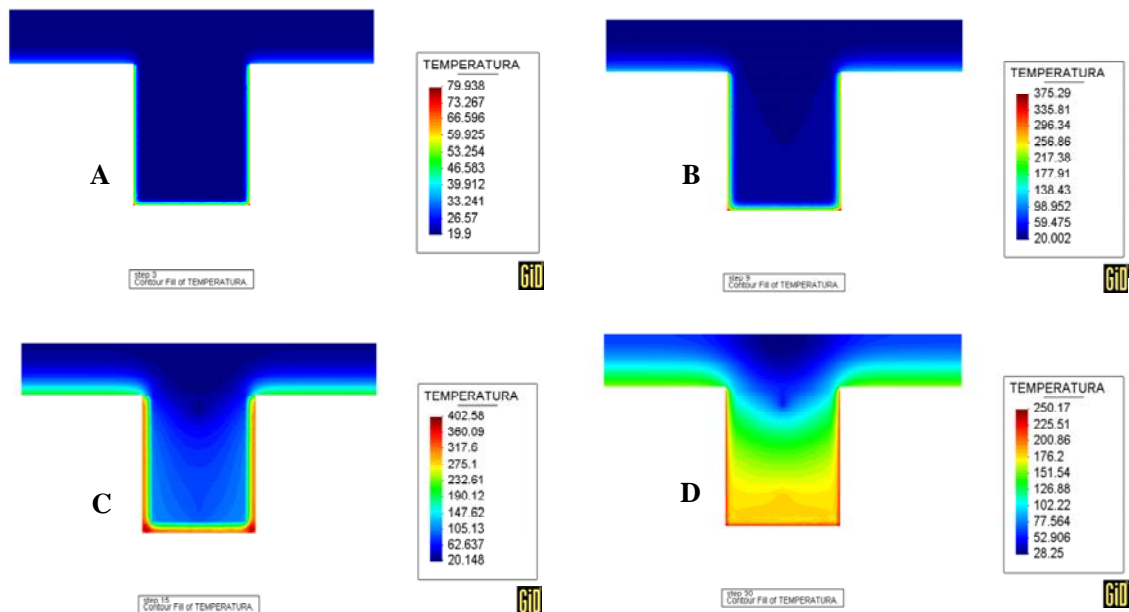


FIGURA 9.66: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por placa de gesso com 15mm submetida à curva de incêndio natural.

No gráfico da figura 9.67, verifica-se que as temperaturas nos pontos de análise foram de 182,30 °C no ponto A, 141,7 °C no ponto B e 60,5 no ponto C. Considerando estas as máximas temperaturas atingidas na viga, verifica-se que as mesmas não foram tão altas.

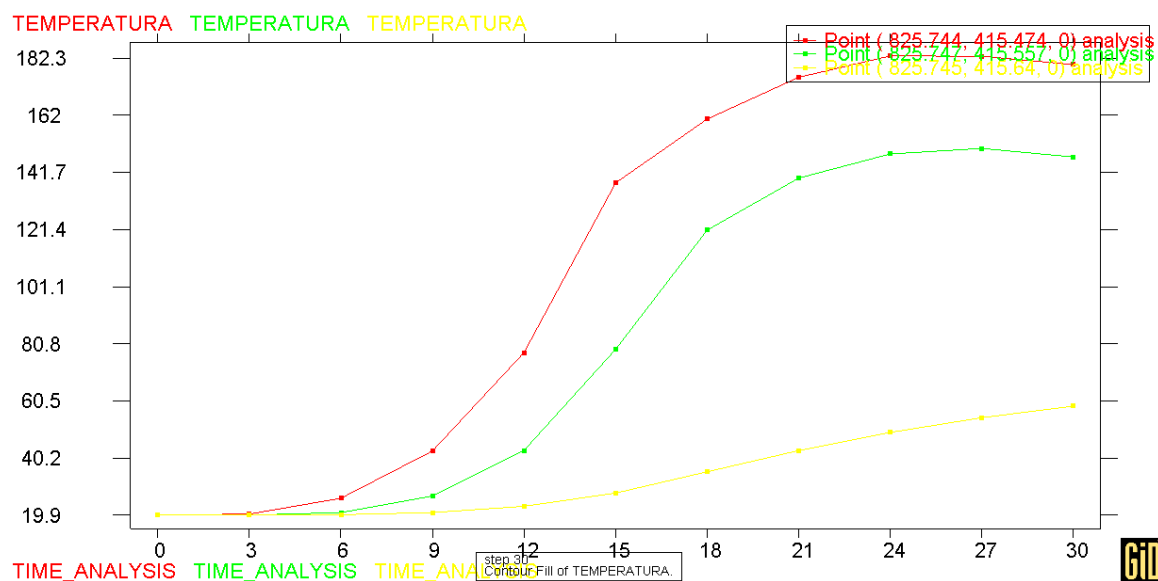


FIGURA 9.67: Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com placa de gesso com 15mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.

t) Viga com proteção por fibra projetada com 30mm de espessura e curva de incêndio padrão

Aos 3 minutos observa-se que não há aumento da temperatura na viga, embora a temperatura na face externa do elemento de proteção esteja em torno de 535,03 °C, conforme pode ser verificado na figura 9.68 (A). Posteriormente a temperatura é de 99,82 °C aos 9 minutos, 203,02 °C aos 15 minutos e finalmente 233,96 °C aos 30 minutos, apresentado na figura 9.68 (B), (C) e (D), respectivamente.

Ao analisar o gráfico da figura 9.69, verifica-se que a temperatura no ponto A de análise somente teve aumento a partir dos 6 minutos de incêndio, quando começa a traçar uma curva ascendente bastante acentuada. Os pontos B e C mantêm praticamente a mesma temperatura até os 12 minutos de incêndio e a partir daí, o ponto B apresenta uma ascensão, porém de forma não muito acentuada.

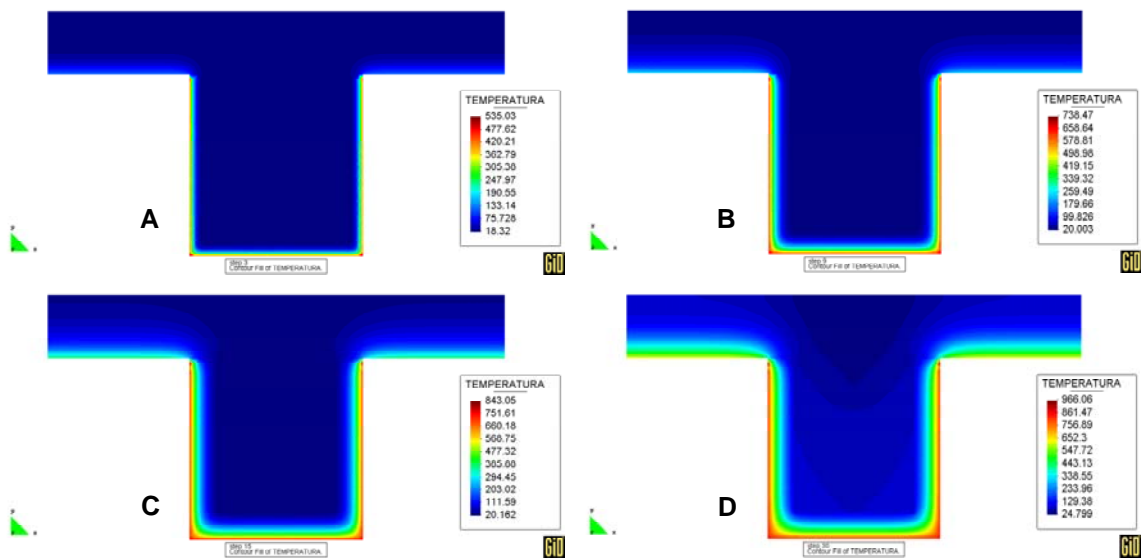


FIGURA 9.68: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por argamassa projetada com 30mm submetida a curva de incêndio padrão.

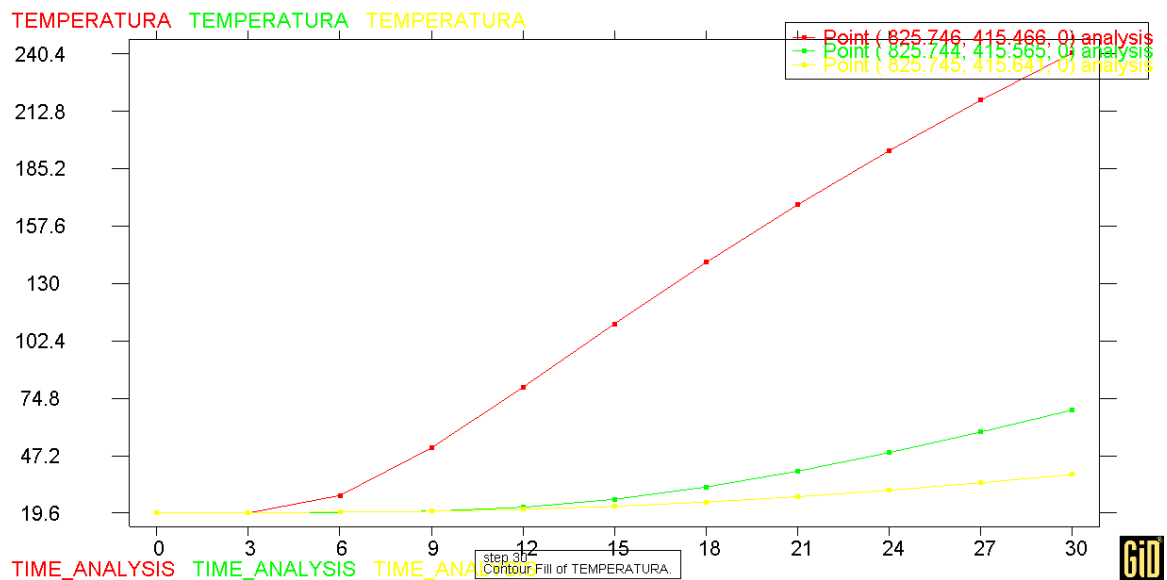


FIGURA 9.69: Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido com fibra projetada com 30mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.

u) Viga com proteção por fibra projetada com 30mm de espessura e curva de incêndio natural

Analisando a figura 9.70 verifica-se que com a curva de incêndio natural, os índices de temperatura no elemento estrutural são consideravelmente baixos. Aos 3 minutos a temperatura da viga estava em torno de 19,75 °C, aos 9 minutos 61,10 °C, aos 15 minutos 97,72 °C e aos 30 minutos 101,02 °C.

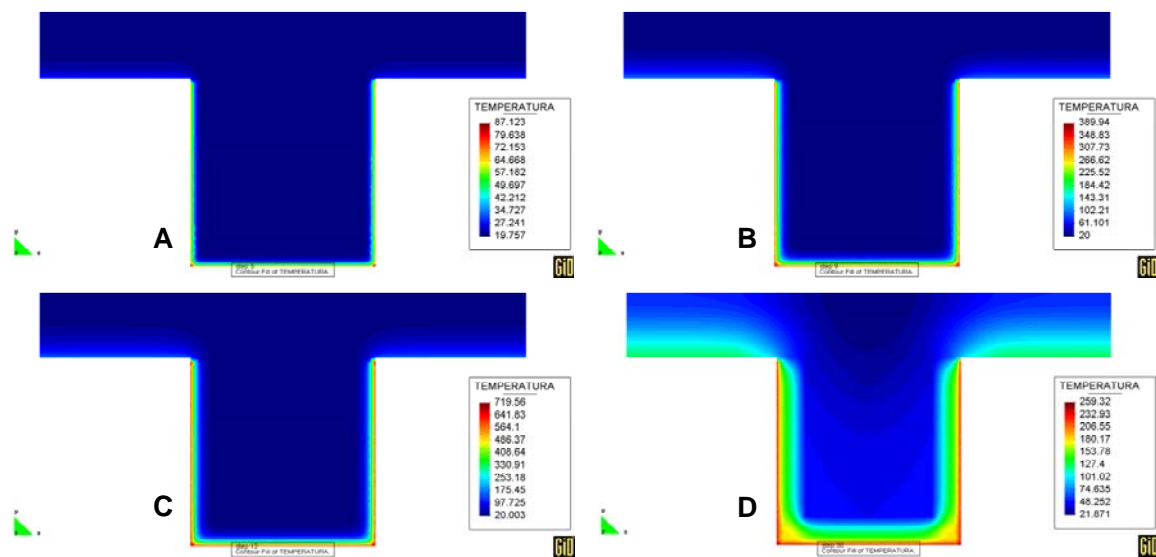


FIGURA 9.70: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por argamassa projetada com 30mm submetida à curva de incêndio natural.

É interessante se observar que diferentemente dos outros casos, com uma proteção térmica maior, ocorre a retenção da temperatura por mais tempo no elemento estrutural. Nos casos anteriores era sempre observado que a temperatura diminuía acompanhando a fase de decaimento da temperatura no ambiente, porém com a proteção térmica maior, verifica-se que embora a temperatura na face externa do material de proteção seja menor aos 30 minutos, a temperatura interna não acompanhou a queda da temperatura do compartimento.

O gráfico da figura 9.71, apresenta as temperaturas nos pontos de análise A, B e C, de onde pode-se verificar que a maior temperatura no elemento estrutural ocorreu em A, aos 27

minutos. Nos demais casos, as temperaturas foram muito baixas, sendo que a diferença de temperatura de B e C ocorreu a partir de 12 minutos de incêndio.

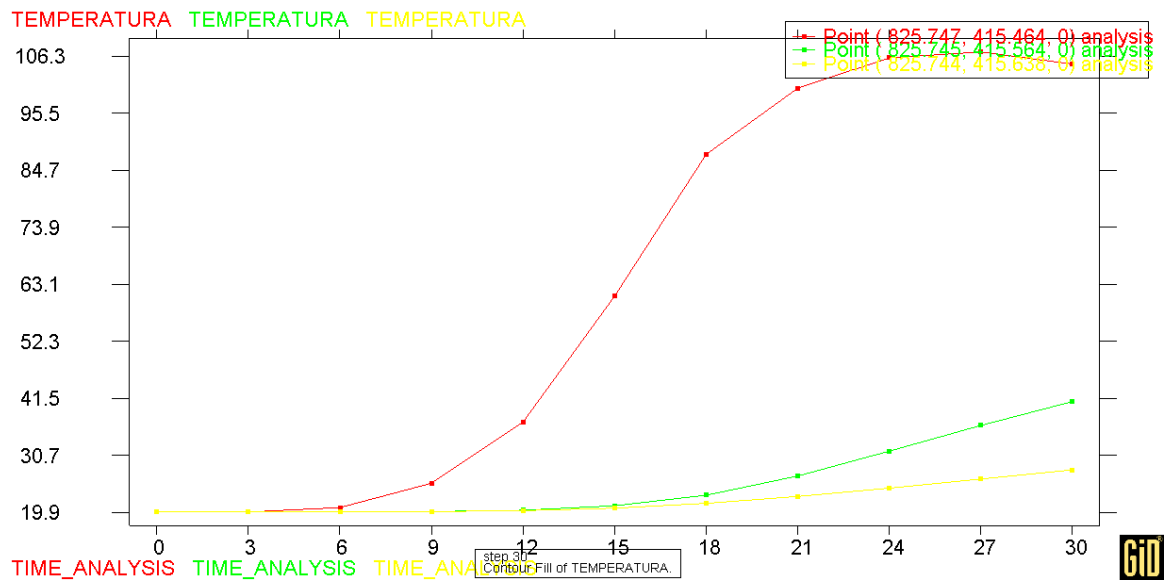


FIGURA 9.71: Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com fibra projetada com 30mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.

v) Viga com proteção por concreto vermiculítico com 30mm de espessura e curva de incêndio padrão

Utilizando a curva de incêndio padrão para análise térmica do elemento estrutural protegido por concreto vermiculítico com 30mm de espessura, foi verificado que aos 3 minutos de incêndio a temperatura já era bastante considerável na viga, por volta de 181,03 °C. Aos 9 minutos o índice atingido era de 234,76 °C, aos 15 minutos era de 260,56 °C e aos 30 minutos era de 493,03 °C, conforme figura 9.72 (A), (B), (C) e (D).

O gráfico da figura 9.73 verifica-se que as temperaturas medidas nos pontos A e B de análise térmica são altas e traçam uma curva ascendente contínua, que acompanha o desenho da curva de incêndio padrão. No ponto C de análise a temperatura não teve aumento significativo, atingindo uma temperatura de 72,40 °C aos 30 minutos de incêndio.

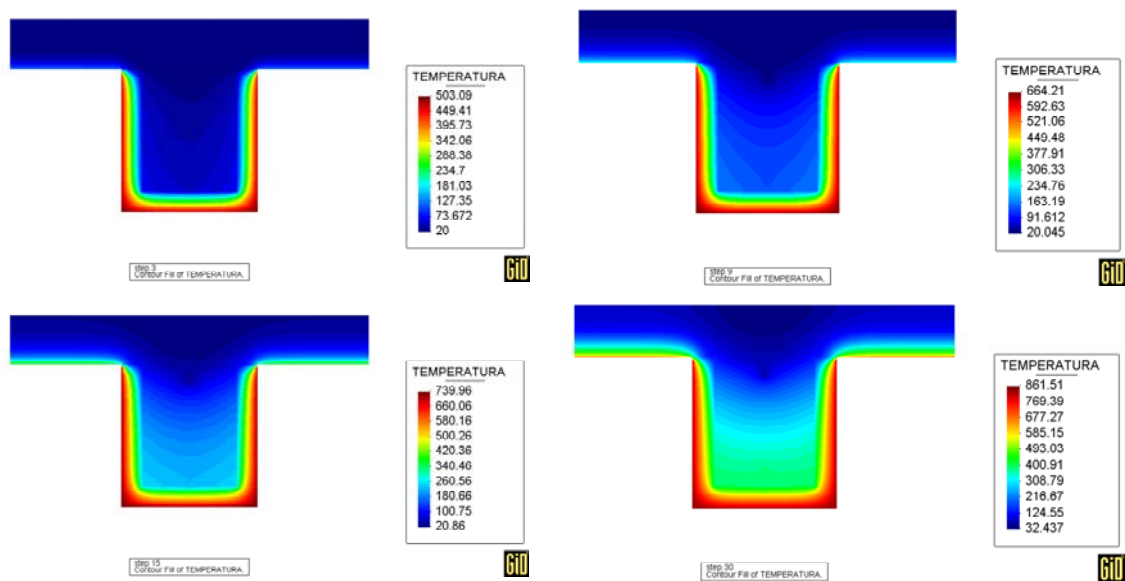


FIGURA 9.72: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por concreto vermiculítico com 30mm submetida a curva de incêndio padrão.

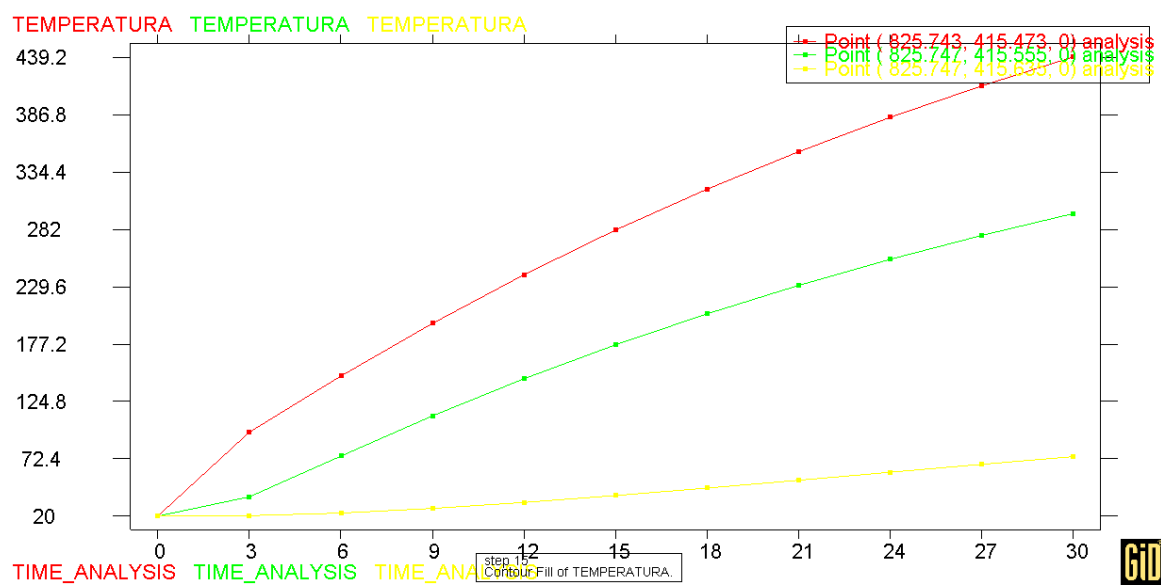


FIGURA 9.73: Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com concreto vermiculítico com 30mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.

x) Viga com proteção por concreto vermiculítico com 30mm de espessura e curva de incêndio natural

Neste caso, ao se aplicar a curva de incêndio natural para os testes, verificou-se que as temperaturas alcançadas foram mais baixas que no caso anterior, tendo-se observado 35,39 °C aos 3 minutos, 99,07 °C aos 9 minutos, 130,97 °C aos 15 minutos e 128,81 °C aos 30 minutos, conforme figura 9.74 (A), (B), (C) e (D), respectivamente.

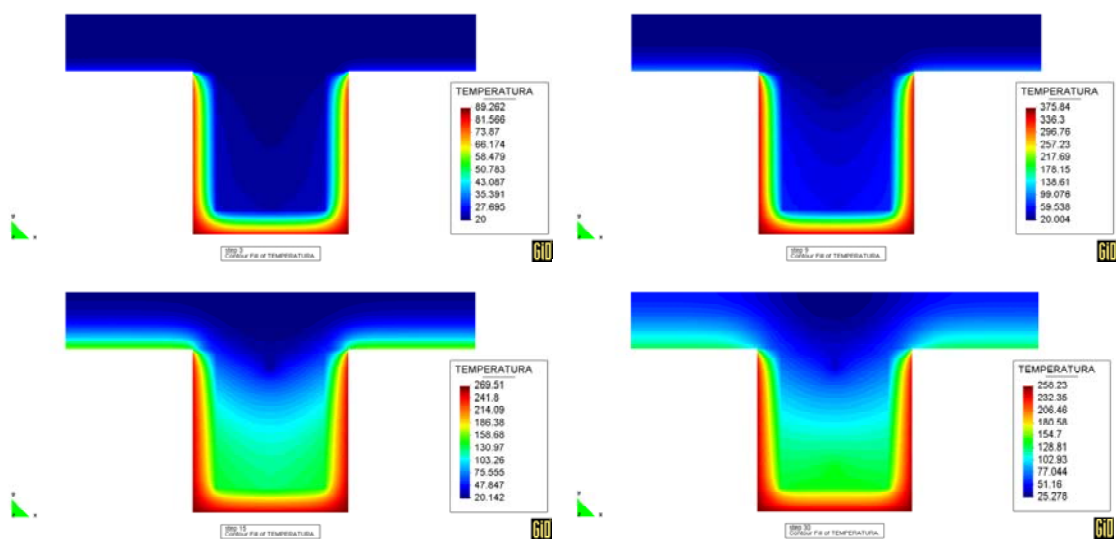


FIGURA 9.74: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por concreto vermiculítico com 30mm submetida a curva de incêndio natural.

Analisando-se o gráfico da figura 9.75, verifica-se que o pico de temperatura no elemento estrutural no ponto A de análise foi atingido aos 12 minutos com um índice de 239,20 °C, porém esta taxa é pontual e ocorre em um curto espaço de tempo.

No ponto B, a máxima atingida ocorreu aos 21 minutos e em C aos 30 minutos de incêndio, porém não foram tão altas.

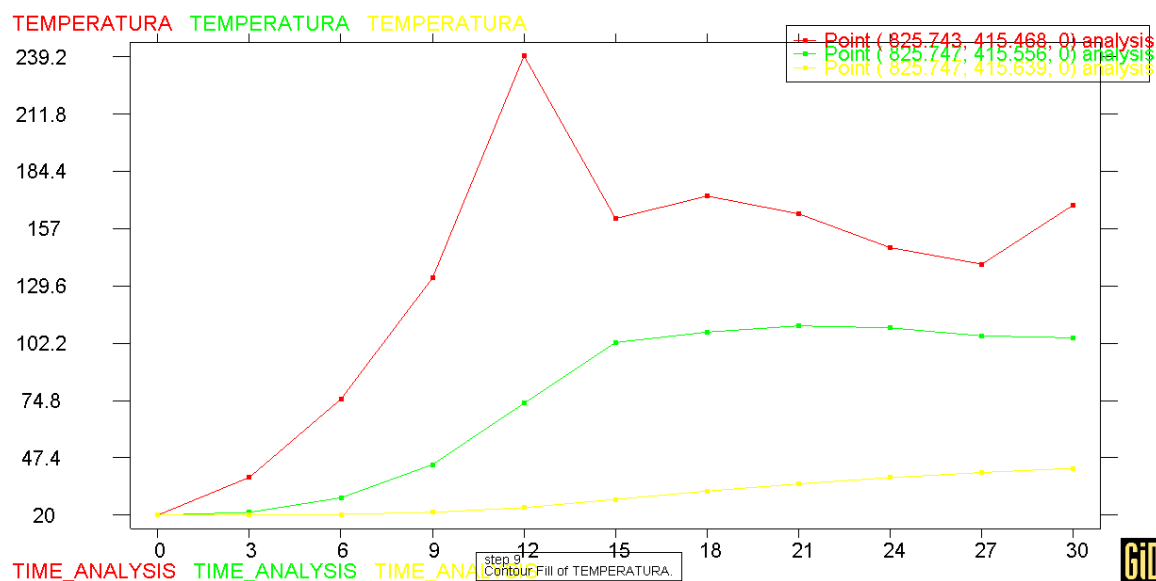


FIGURA 9.75: Gráfico temperatura tempo no elemento protegido com concreto vermiculítico com 30mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.

y) Viga com proteção por lã de rocha com 30mm de espessura e curva de incêndio padrão

Assim como nos demais casos, a viga protegida com a lã de rocha submetida à curva de incêndio padrão, apresentou uma alta temperatura logo no início dos testes, com 126,94 °C, conforme figura 9.76 (A).

Como a temperatura ambiente continuou subindo, a elevação de temperatura na viga seguiu na mesma condição, apresentando índices ainda maiores, sendo 234,48 °C aos 9 minutos, 420,17 °C aos 15 minutos e 573,81 °C aos 30 minutos, conforme demonstrado nas figuras 9.76 (B), (C) e (D).

O gráfico da figura 9.77 mostra temperaturas máximas de 617,6 °C no ponto A de análise, 393,5 °C no ponto B e 94,7 °C no ponto C.

As temperaturas em A e B são consideravelmente altas para a viga, sendo que no ponto C, não é muito significativa.

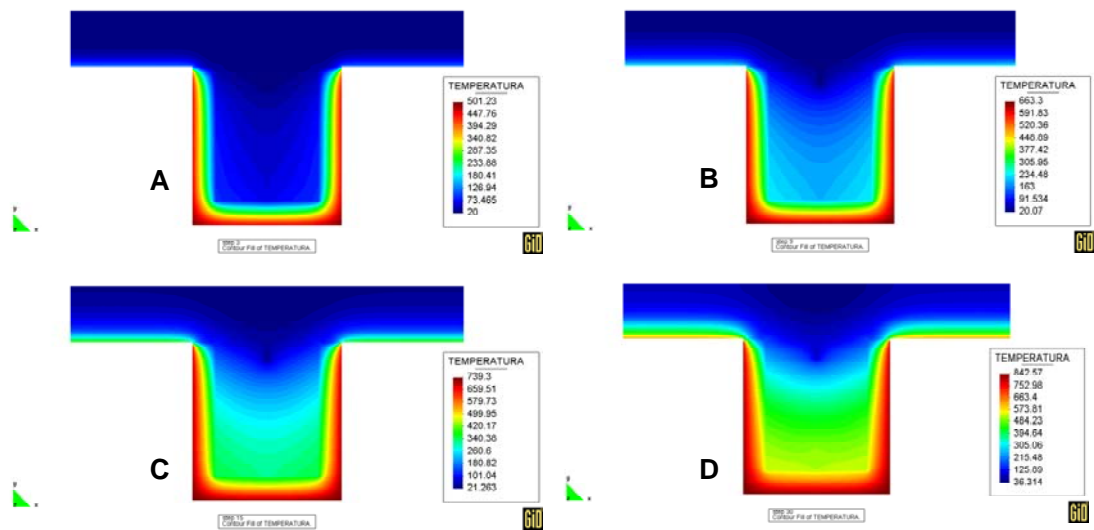


FIGURA 9.76: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por lã de rocha com 30mm submetida a curva de incêndio padrão.

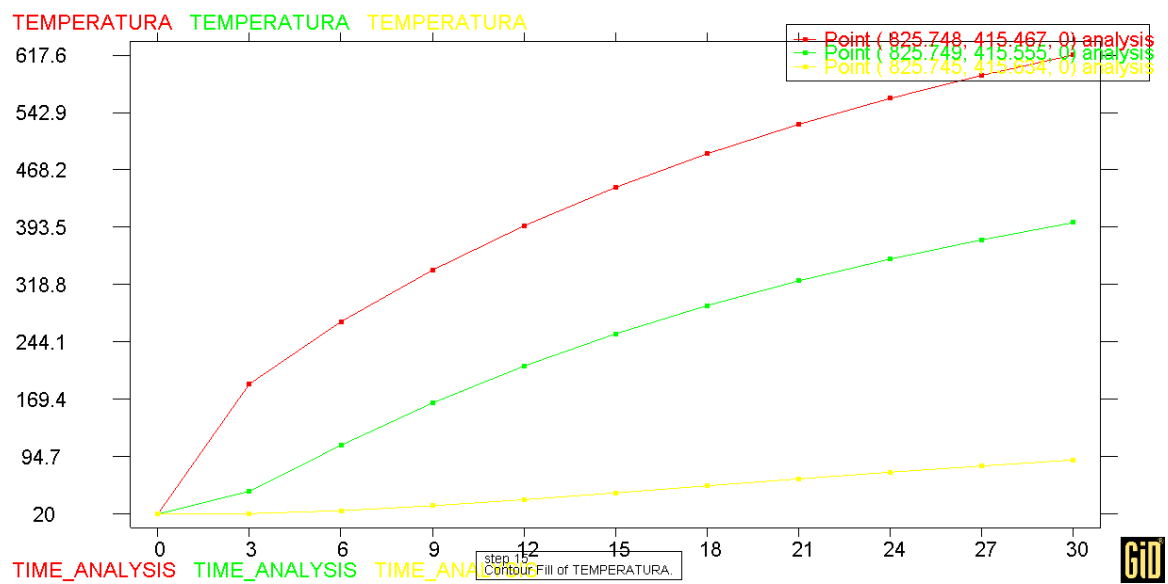


FIGURA 9.77: Gráfico temperatura tempo no elemento protegido por lã de rocha com 30mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.

w) Viga com proteção por lã de rocha com 30mm de espessura e curva de incêndio natural

Realizados os testes com a viga protegida por lã de rocha com 30mm de espessura e submetida à curva de incêndio natural, verificou-se aos 3 minutos uma temperatura de 35,07 °C, conforme apresentado na figura 9.78 (A).

Aos 9 minutos a temperatura na face da viga atingiu 137,81 °C, aos 15 minutos 213,46 °C e aos 30 minutos 180,43 °C, conforme figuras 9.78 (B), (C) e (D). Observa-se que no tempo decorrido entre 15 e 30 minutos, não houve uma perda considerável de calor por parte da viga, mesmo considerando o decaimento da temperatura externa.

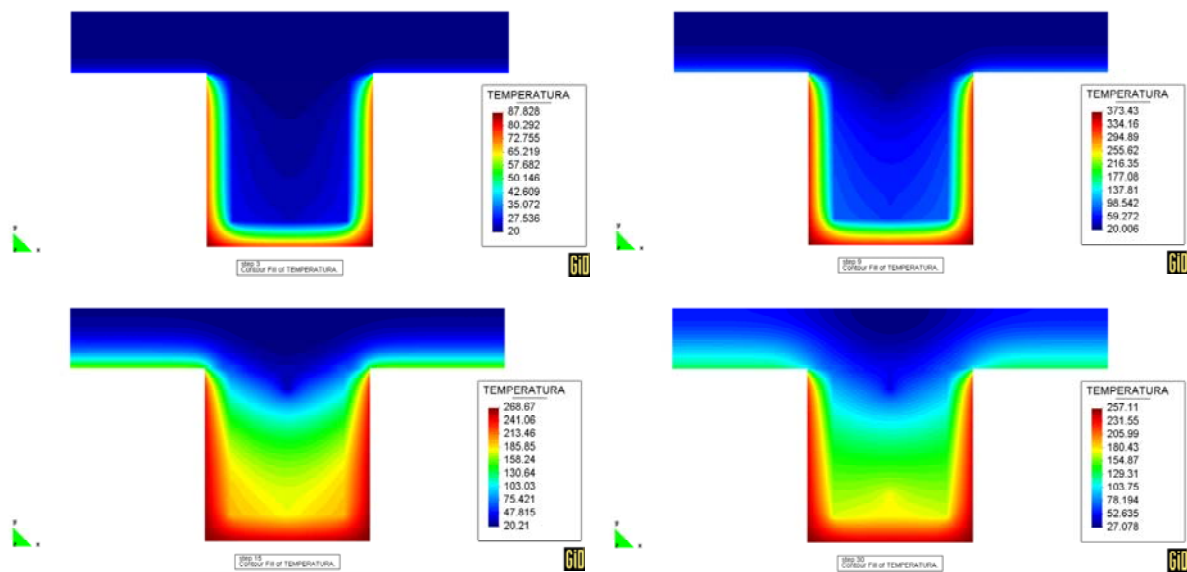


FIGURA 9.78: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por lã de rocha com 30mm submetida a curva de incêndio natural.

Analisando-se os resultados obtidos no gráfico da figura 9.79, verifica-se que a temperatura máxima atingida no ponto A de análise foi de 228,00 °C, próximo aos 12 minutos de incêndio. Nos pontos B e C as temperaturas estiveram consideravelmente mais baixas que em A, sendo que em C os valores são muito baixos.

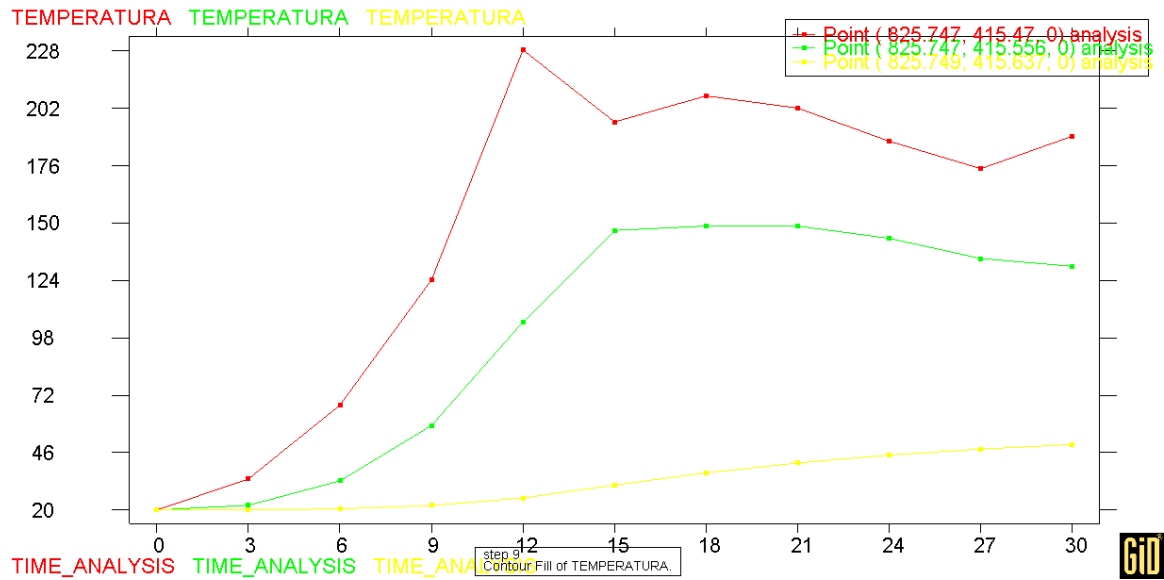


FIGURA 9.79: Gráfico temperatura tempo no elemento protegido por lã de rocha com 30mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.

z) Viga com proteção por manta cerâmica com 30mm de espessura e curva de incêndio padrão

Utilizando-se a manta cerâmica como proteção, com 30mm de cobertura, verificou-se que, aos 3 minutos, a temperatura já era consideravelmente alta na viga, em torno de 179,53 °C, atingindo 240,45 °C aos 9 minutos, 293,34 °C aos 15 minutos e 511,64 °C aos 30 minutos, conforme figura 9.80 (A), (B), (C) e (D), respectivamente.

O gráfico da figura 9.81, permite analisar ainda que aos 30 minutos o ponto A de análise apresentava uma temperatura de 573,5 °C, sendo que no mesmo período, os pontos B e C apresentaram índices de 435,1 °C e 296,7 °C, respectivamente.

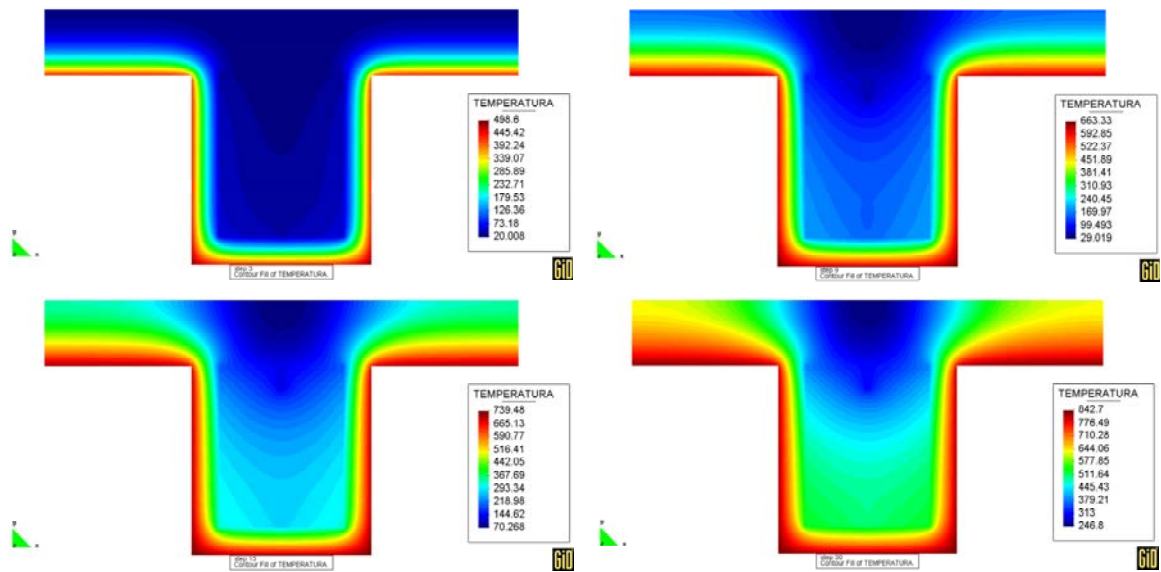


FIGURA 9.80: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por manta cerâmica com 30mm submetida à curva de incêndio padrão.

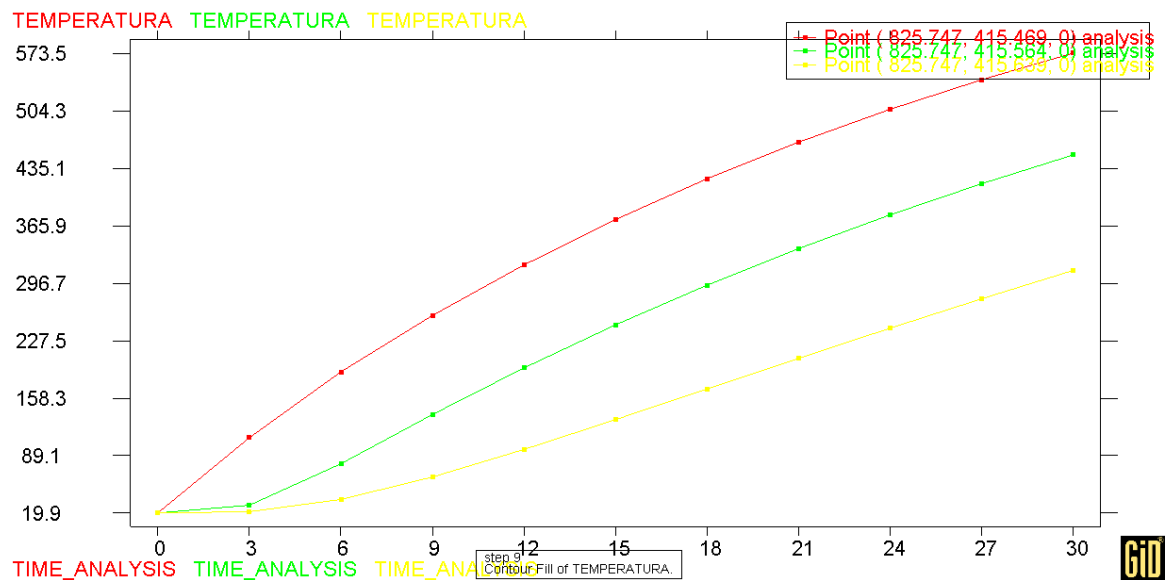


FIGURA 9.81: Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido por manta cerâmica com 30mm de espessura e submetido à curva de incêndio padrão.

a.1) Viga com proteção por manta cerâmica com 30mm de espessura e curva de incêndio Natural

Utilizando a manta cerâmica com 30mm de espessura como proteção da viga e submetendo-a à curva de incêndio natural, verificou-se que aos 3 minutos a temperatura da viga era de 26,95 °C, aos 9 minutos 59,52 °C, aos 15 minutos 167,29 °C, e finalmente aos 30 minutos 175,27 °C, conforme figura 9.82 (A), (B), (C) e (D).

O gráfico da figura 9.83 retrata a temperatura máxima no ponto A de análise sendo de 244,80 °C aos 12 minutos, posteriormente a temperatura começa a cair, tendo nova ascensão aos 27 minutos, ultrapassando novamente 188,60 °C.

Nos pontos de análise B e C, as temperaturas máximas foram registradas em 160,50 °C e pouco acima de 132,40 °C, respectivamente.

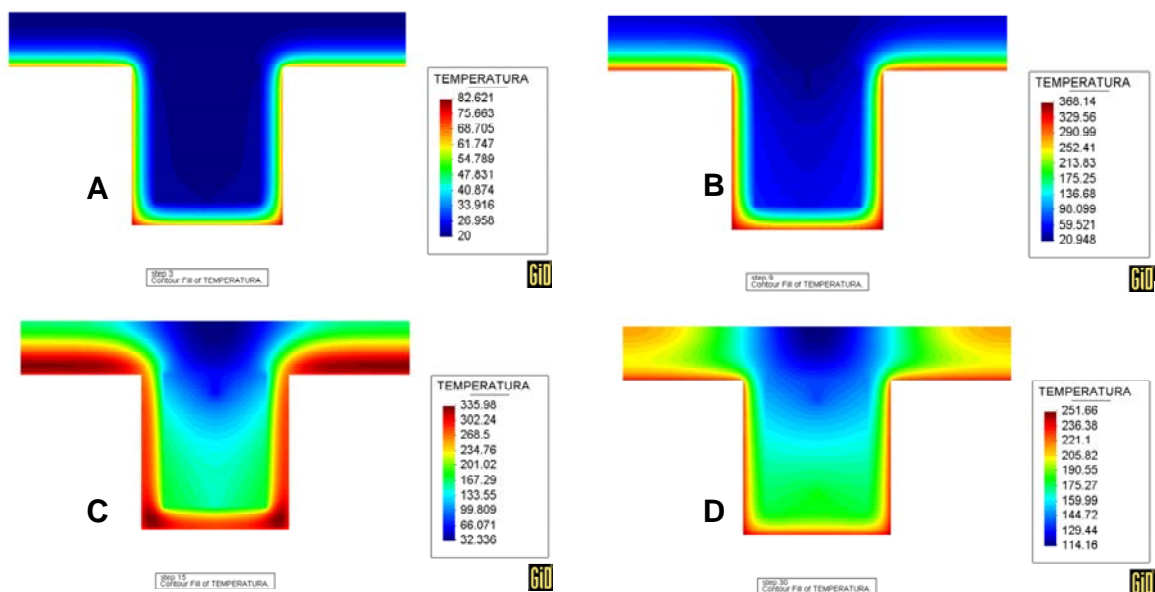


FIGURA 9.82: Resultados obtidos com (A) 3,0 minutos, (B) 9,0 minutos, (C) 15 minutos e (D) 30,0 minutos, com viga protegida por manta cerâmica com 30mm submetida à curva de incêndio natural.

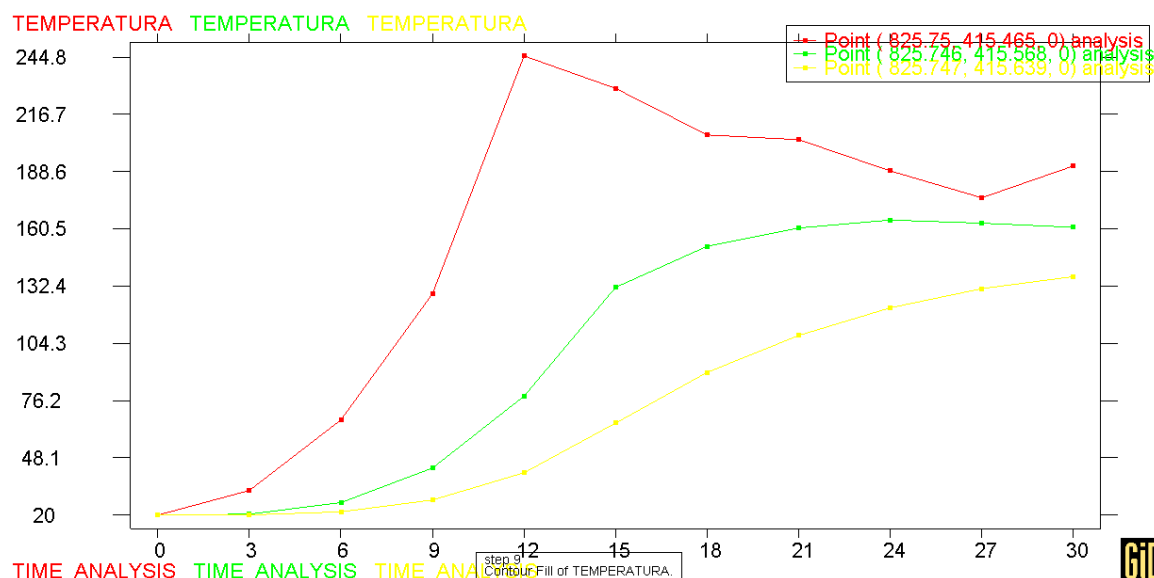


FIGURA 9.83: Gráfico temperatura-tempo no elemento protegido por manta cerâmica com 30mm de espessura e submetido à curva de incêndio natural.

9.4 Análise dos resultados

Após a realização das análises térmicas, dois parâmetros foram estabelecidos para se avaliar a performance do material de proteção utilizado no isolamento térmico da viga de aço: prováveis efeitos do calor e taxa de calor transferida para os perfis.

No primeiro caso, são consideradas as propriedades mecânicas do aço – tais como limite de escoamento (f_y) e módulo de elasticidade (E) variando em função do aumento de temperatura, fenômeno que é levado em conta através dos coeficientes redutores em decorrência de ação térmica $K_{E,\theta}$ e $K_{y,\theta}$, respectivamente, relativos aos valores a 20 °C.

Os fatores de redução $K_{E,\theta}$ e $K_{y,\theta}$ podem ser obtidos por meio da norma brasileira ABNT 14.323:1999, do Eurocode 3 parte 1-2 (ECS, 2005) e da European Convention for Constructional Steelwork (ECCS, 2001). Em todas as referências, $K_{E,\theta}$ é menor que 1,0 quando a temperatura do aço é maior do que 100 °C. Para o aço dos perfis soldados, laminados ou formados à frio, desde que a seções transversais sejam das classes 1 a 3, o fator de redução $K_{y,\theta}$ é menor do que 1,0 quando a temperatura do aço é maior do 100 °C. Quando as seções são da classe 4, o Eurocode 3 (ECS, 2004) especifica valores de $K_{y,\theta}$ menores do que 1,0 para temperaturas maiores do que 100 °C. Já o ECCS (2001) apresenta

valores de $K_{y,\theta}$ menores do que 1,0 a partir de 300 °C, quando se trata de aço dos perfis formados à frio.

Os fatores de redução $K_{y,\theta}$ e $K_{E,\theta}$ são utilizados para estabelecimento do método simplificado de dimensionamento das estruturas de aço e mistas aço e concreto.

Na presente pesquisa, foi realizada uma comparação entre os valores desses índices segundo as diferentes normas citadas anteriormente.

É importante salientar, que o Eurocode EC3-1.2 (2005) prevê na tabela E.1, que os valores prescritos devem ser adotados como fatores de redução para o aço carbono de classe 4 submetido a temperaturas elevadas.

Enquadram-se na classe 4 as seções transversais em que é necessário considerar explicitamente, os efeitos de flambagem local na determinação de sua resistência à flexão e compressão. O Eurocode faz referência tanto aos perfis formado à frio, quanto aos perfis de aço laminados à quente que apresentam estas características.

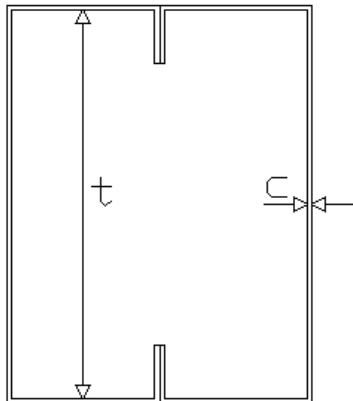
Os perfis de classe 3 são aqueles que apresentam segundo a tabela 5.2 do Eurocode EC3-1.1 (2005), a condição prevista na equação 9.1.

$$\frac{c}{t} \leq 124\varepsilon \quad (9.1)$$

Para cálculo de ε , adota-se a equação 9.2.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (9.2)$$

Para o perfil da viga analisada, figura 9.84, tem-se:



$$C = 170 - 4t = 166\text{mm}$$

$$\frac{166}{2} \leq 124\varepsilon \therefore \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{300}} = 0,86$$

$$\frac{166}{2} \leq 124 \times 0,86 \therefore 83 \leq 106,64$$

FIGURA 9.84: Referências para cálculo

Portanto, o perfil testado atende ao requisito previsto no Eurocode (2005), podendo-se considerar os valores previstos nas normas de referência (EC3-1.1 e NBR 14323:1999).

Desta forma, optou-se por estabelecer como referência para análise, os índices contidos nas Normas Brasileiras e no Eurocode para perfis classe 3.

O outro parâmetro estabelecido refere-se ao isolamento térmico, que segundo o *Building Design using Cold Formed Steel Sections: Fire Protection (The Steel Construction Institute, 1993)*, estabelecida uma temperatura média de 140,00 °C de taxa de calor transferida para a viga ou ainda temperatura de pico de 180,00 °C, como sendo as máximas temperaturas admitidas para que se considere que o isolamento tenha sido realizado com êxito.

Desta forma, com base nestes dois parâmetros, foi realizada uma análise criteriosa nos resultados apresentados para cada teste realizado.

Assim, na primeira parte das simulações realizadas foi utilizada a viga sem proteção submetida a análise térmica utilizando as curvas de incêndio padrão e natural.

Posteriormente, os testes foram feitos no elemento estrutural, porém com proteção térmica, tendo sido utilizados argamassa de fibra projetada, concreto vermiculítico, lã de rocha e fibra cerâmica.

É apresentada então, a análise global dos resultados obtidos pelos testes de forma a propiciar um melhor entendimento dos fenômenos observados no decorrer das simulações de incêndios propostas.

Apesar de terem sido definidos três pontos distintos de análise de temperatura, optou-se pelos resultados apresentados no ponto A, pois este se encontra na parte mais exposta da viga ao calor. Os outros pontos B e C se encontram respectivamente no centro da viga onde há ar acumulado e na interface da viga com a laje, que por si só já constitui um isolamento considerável.

9.4.1 Simulação com elemento estrutural sem proteção

Os resultados obtidos na simulação com a viga sem proteção submetida à curva de incêndio padrão e posteriormente à curva de incêndio natural demonstram que no primeiro caso, em virtude do rigor da curva de incêndio padrão, as temperaturas atingidas logo no início são muito elevadas.

Logo após os 3 minutos de incêndio, o limite de escoamento do aço da viga sofreu redução, bem como o seu módulo de elasticidade.

No caso do incêndio natural, observou-se que aos 7 minutos aproximadamente, o aço do elemento estrutural ainda não havia sofrido redução do seu módulo de elasticidade. O limite de escoamento permaneceu inalterado por mais tempo, até próximo aos 10 minutos.

Através do gráfico da figura 9.69 pode-se fazer uma comparação entre as temperaturas no elemento estrutural submetido à curva de incêndio padrão e natural.

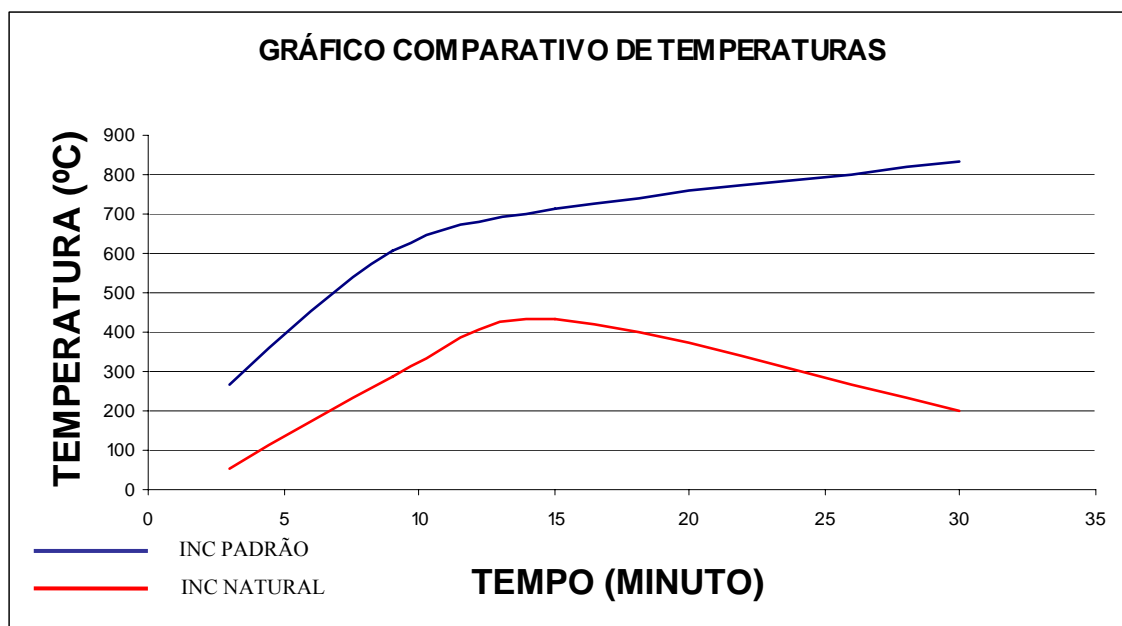


FIGURA 9.85: Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural.

9.4.2 Simulação com elemento estrutural com proteção

As simulações com os elementos protegidos foram realizadas com proteções nas espessuras de 10mm, 15mm e 30mm, sendo estas submetidas às curvas de incêndio padrão e incêndio natural.

Foram testadas as proteções por argamassa de fibra projetada, concreto vermiculítico, lã de rocha e manta cerâmica.

9.4.2.1 Análise dos resultados obtidos com a argamassa de fibra projetada

Analisando o gráfico da figura 9.70, verifica-se nitidamente que a fibra projetada com espessura de 30mm teve uma performance bem melhor que com 10mm ou 15mm, tendo inclusive preservado o módulo de elasticidade da viga até os 9 minutos. Já o limite de escoamento da viga foi preservado por mais tempo, inclusive no caso das espessuras de 10mm e 15mm.

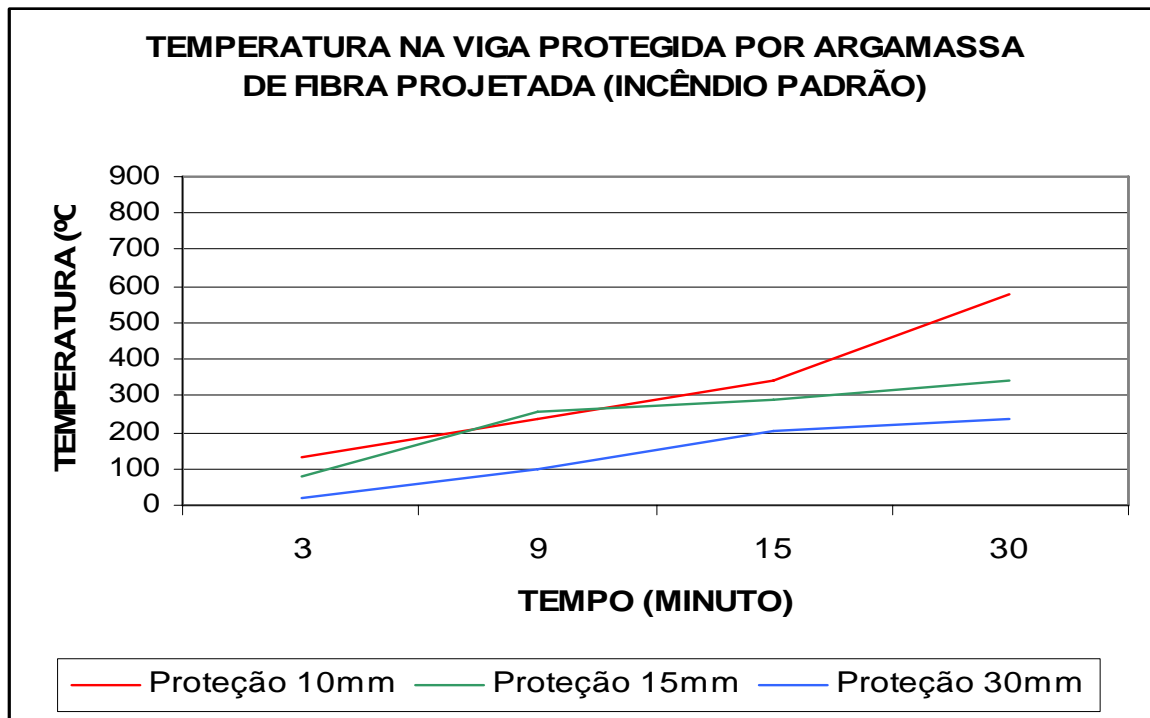


FIGURA 9.86: Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por fibra projetada submetido à curva de incêndio padrão.

Com a curva de incêndio natural, verifica-se que os valores de temperatura obtidos são bem menores, conforme gráfico da figura 9.71. Em nenhum dos casos, o limite de escoamento foi alterado, porém em relação do módulo de elasticidade, somente a fibra com 30mm de espessura manteve preservado até o final. Nos casos da argamassa de fibras com espessuras de 10mm e 15mm, até os 9 minutos o módulo de elasticidade não sofreu redução.

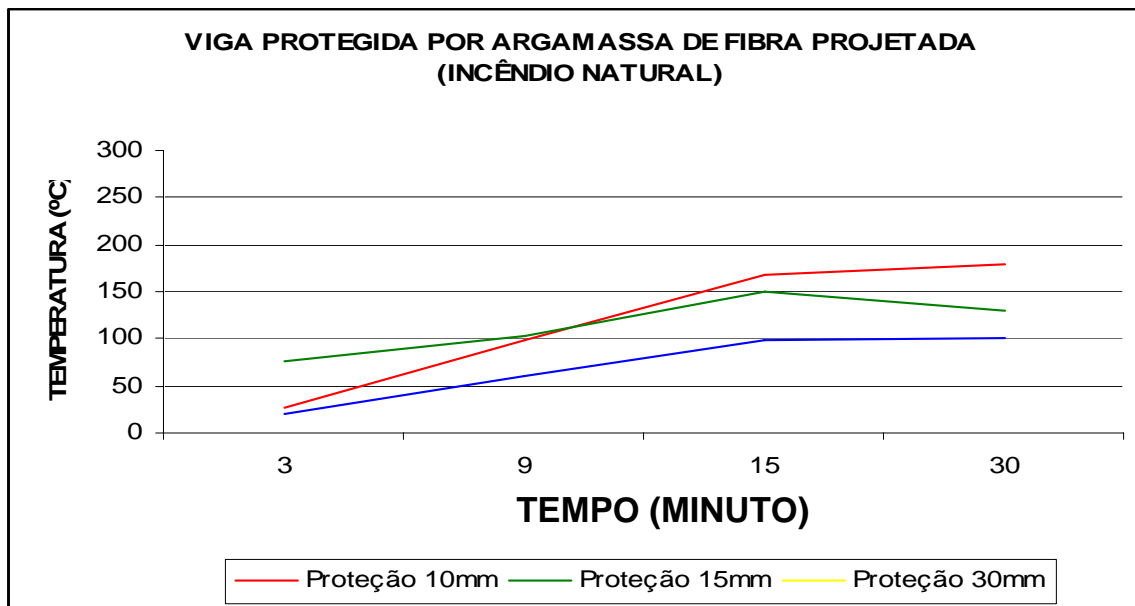


FIGURA 9.87: Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por fibra projetada submetido à curva de incêndio natural.

9.4.2.2 Análise dos resultados obtidos com concreto vermiculítico

Os dados referentes à viga protegida por concreto vermiculítico submetida à curva de incêndio padrão foram analisados, obtendo-se os índices do gráfico da figura 9.88.

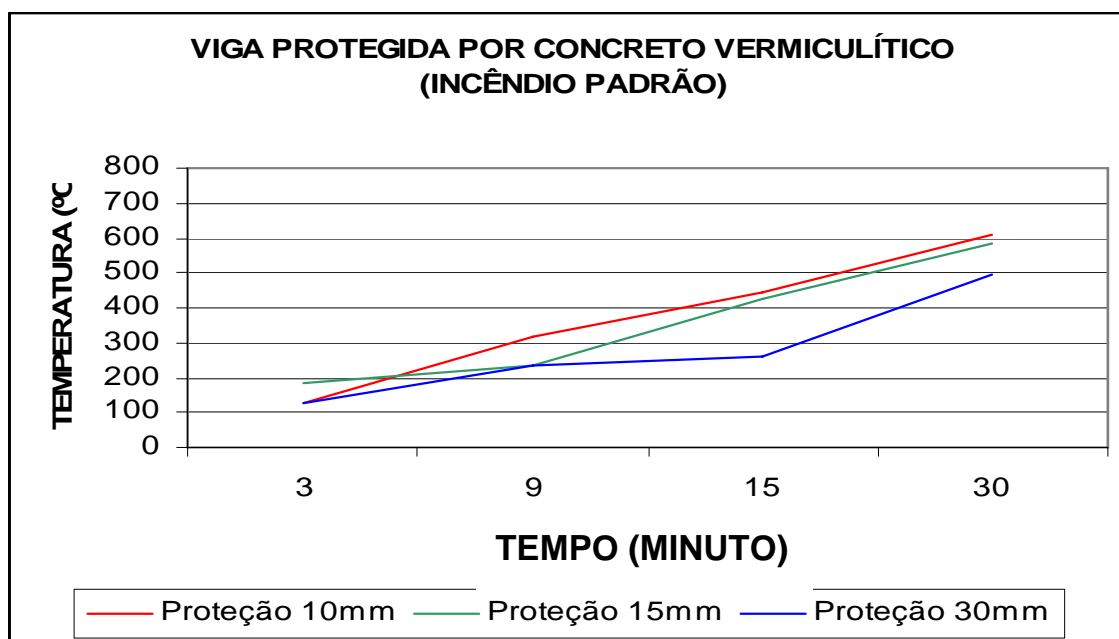


FIGURA 9.88: Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por concreto vermiculítico submetido à curva de incêndio padrão.

Observa-se que neste caso nenhum produto conseguiu manter preservado o módulo de elasticidade do aço, porém o limite de escoamento foi mantido por todos até próximo aos 9 minutos, sendo que no caso da proteção com 15mm e 30mm, prosseguiu sem sofrer redução por mais tempo.

Verificando-se os testes feitos com utilização da curva de incêndio natural, pode-se observar que em nenhum momento o limite de escoamento sofreu redução, porém o módulo de elasticidade foi mais preservado no caso da cobertura por concreto vermiculítico com 30mm, suportando até próximo aos 9 minutos de incêndio.

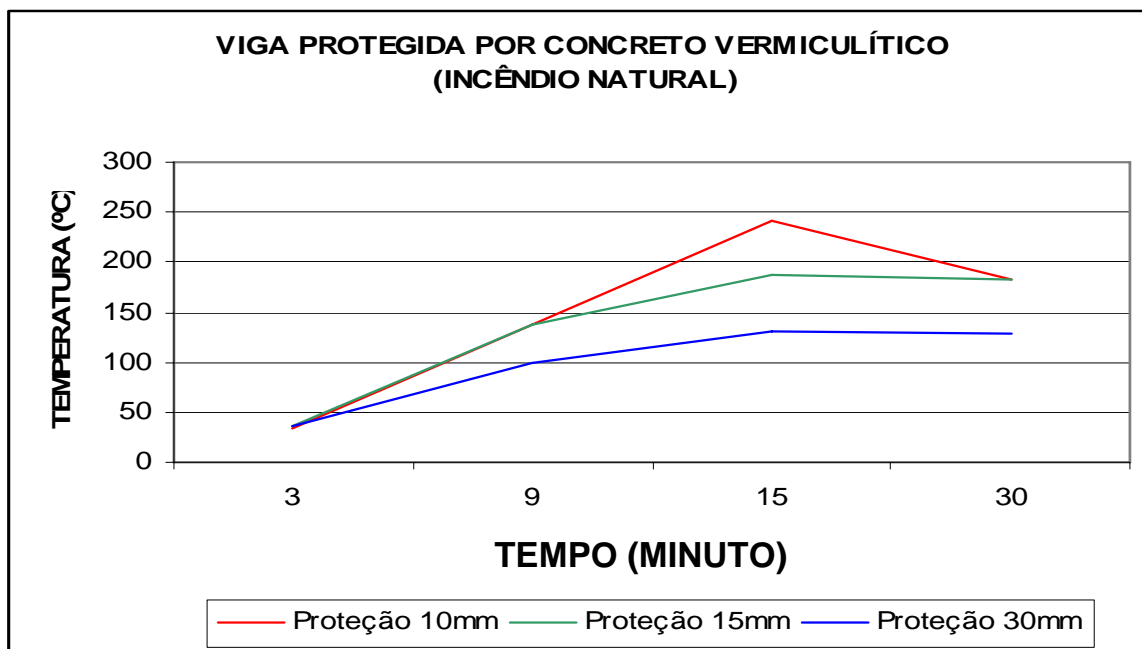


FIGURA 9.89: Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por concreto vermiculítico submetido à curva de incêndio natural.

9.4.2.3 Análise dos resultados obtidos com lã de rocha

Os dados referentes à viga protegida por lã de rocha, submetida à curva de incêndio padrão, representados no gráfico da figura 9.90, demonstram que o módulo de elasticidade da viga, desde o início sofreu redução.

O limite de escoamento sofreu redução com pouco tempo de incêndio, mantendo-se íntegro até próximo dos 6 minutos nos casos da proteção com 10mm e 15mm e próximo aos 11 minutos.

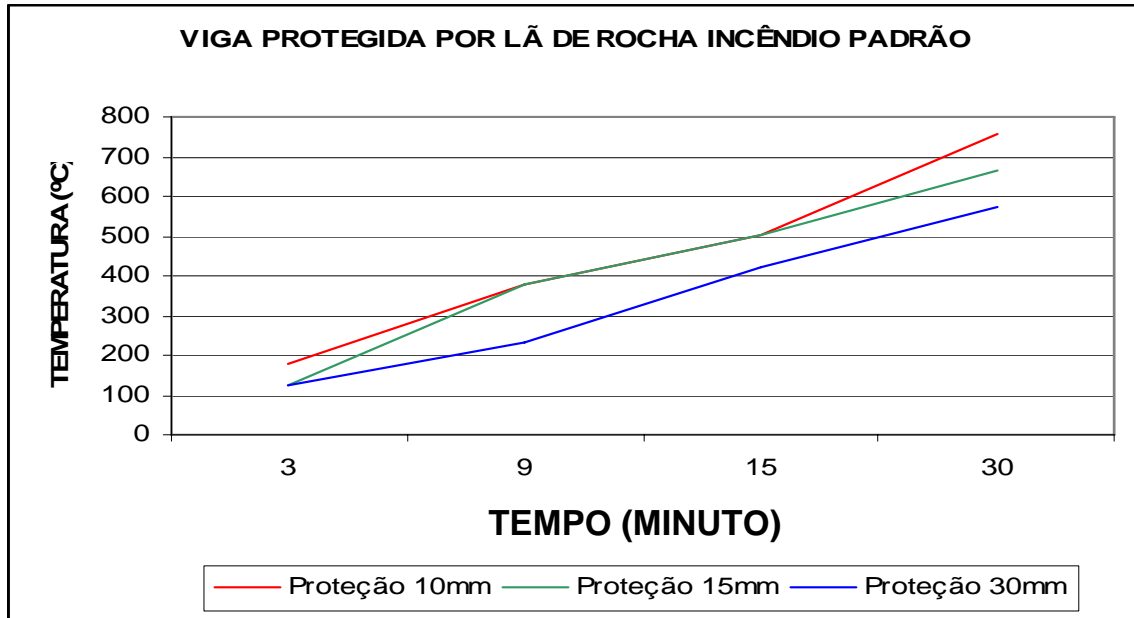


FIGURA 9.90: Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por lâ de rocha à curva de incêndio padrão.

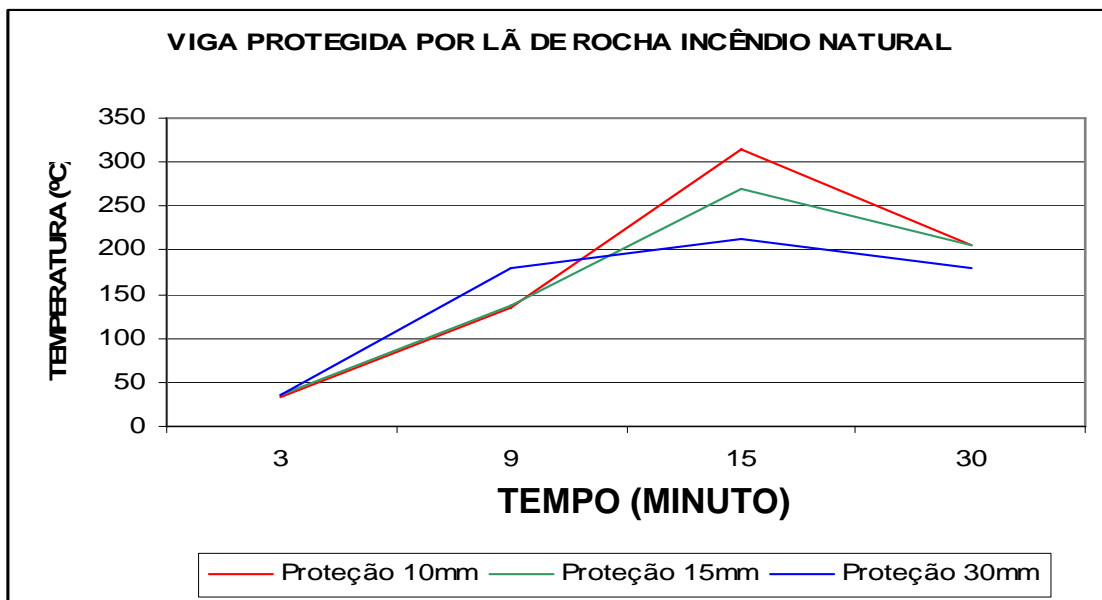


FIGURA 9.91: Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por lâ de rocha à curva de incêndio natural.

Ao analisar os dados apresentados pelo gráfico da figura 9.91, verifica-se que submetida à curva de incêndio natural, a viga teve o seu módulo de elasticidade reduzido próximo aos 6 minutos.

O limite de escoamento somente sofreu redução após 15 minutos de incêndio, especificamente para a proteção com espessura de 10mm. Nos demais casos o limite de escoamento não sofreu nenhum tipo de redução.

9.4.2.4 Análise dos resultados obtidos com manta cerâmica

Os dados referentes à viga protegida por manta cerâmica, submetida à curva de incêndio padrão, representados no gráfico da figura 9.92, demonstram uma peculiaridade, pois a proteção com espessura de 10mm e 15mm, apresentam o mesmo desempenho.

Foi observado ainda que o aço, desde os primeiros minutos da simulação realizada, já havia sofrido redução no seu módulo de elasticidade, tendo sofrido ainda, a redução no seu limite de escoamento a partir de 9 minutos para as proteções de 10mm e 15mm.

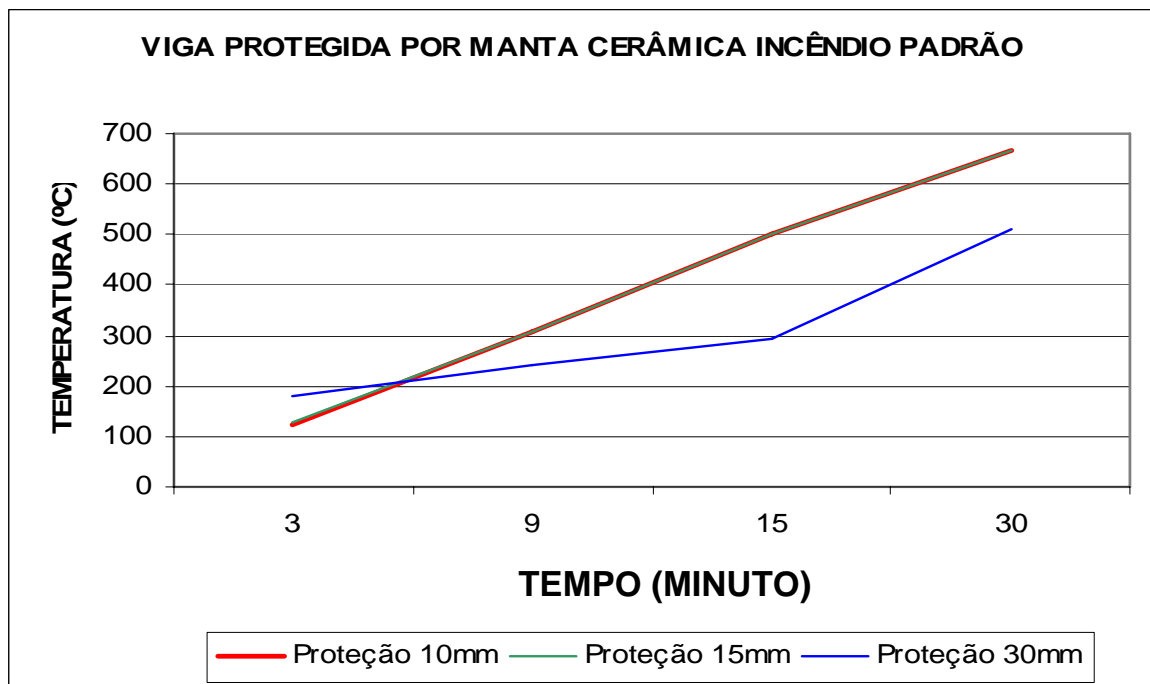


FIGURA 9.92: Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por lã de rocha à curva de incêndio natural.

Com referência à proteção com espessura de 30mm, o limite de escoamento somente sofreu redução após 15 minutos de Incêndio.

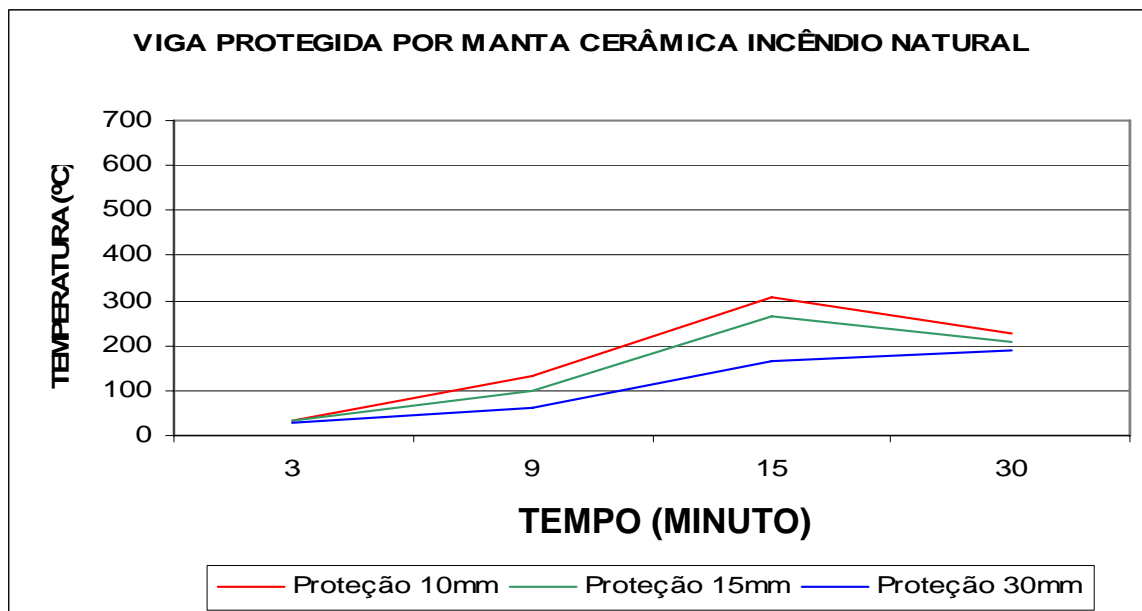


FIGURA 9.93: Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por lã de rocha à curva de incêndio natural.

9.4.2.4 Análise dos resultados obtidos com placa de gesso

Os testes realizados com placas de gesso foram feitos apenas nas espessuras de 10mm e 15mm, em virtude de serem mais usuais.

As vigas protegidas por placas de gesso, como nos outros casos, foram submetidas às curvas de incêndio padrão e natural, apresentando os resultados demonstrados nas figuras 9.94 e 9.95.

Observa-se que no caso da simulação realizada com a curva de incêndio padrão, o módulo de elasticidade sofre redução rapidamente, nos dois casos, ou seja, com proteção de 10mm e 15mm. Porém, o limite de escoamento foi preservado por alguns minutos, conforme gráfico da figura 9.94

Submetendo a mesma viga, com o mesmo tipo de proteção, desta vez à curva de incêndio natural, verificou-se que o módulo de elasticidade foi preservado até os 9 minutos, no caso da proteção de 10mm e próximo aos 15 minutos com a proteção de 15mm.

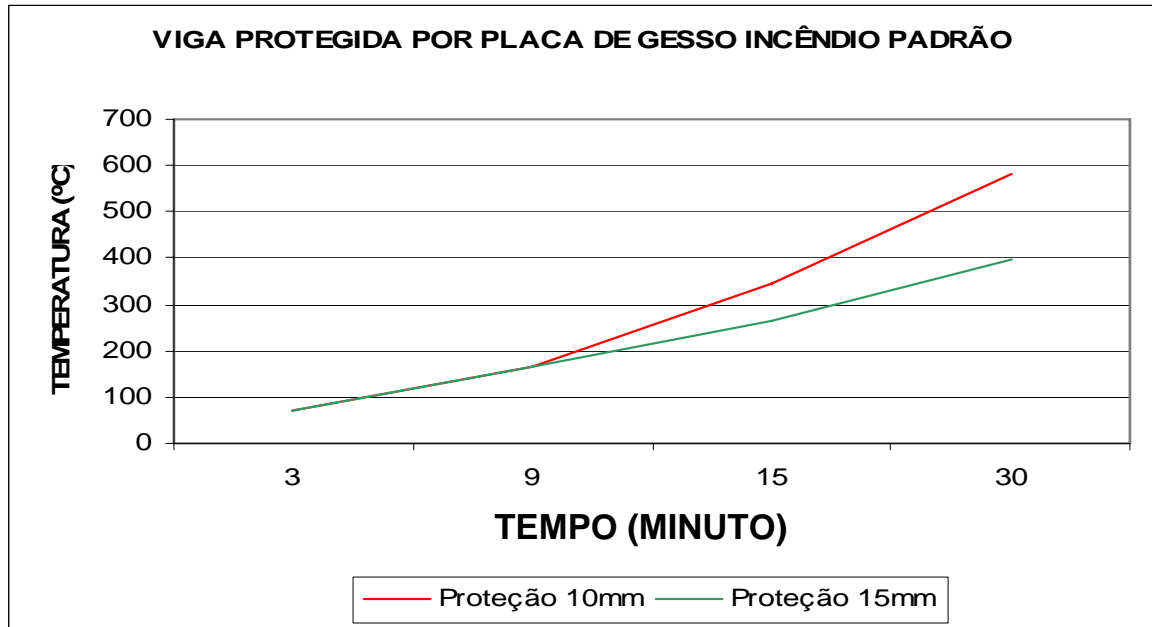


FIGURA 9.94: Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por lâ de rocha à curva de incêndio padrão.

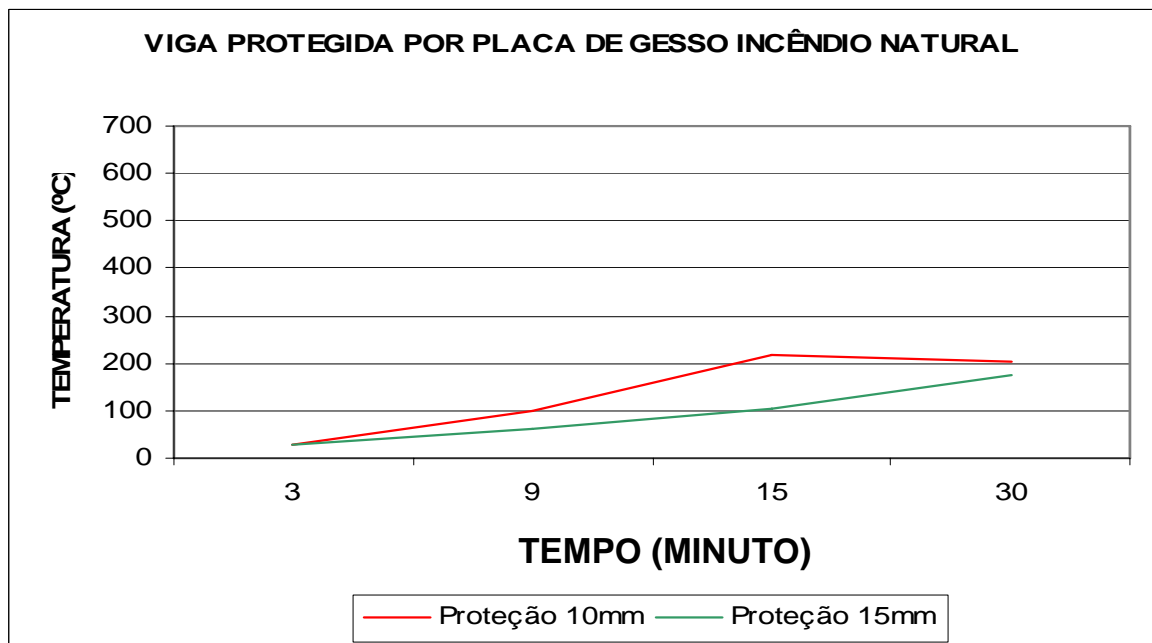


FIGURA 9.95: Gráfico temperatura-tempo no elemento estrutural protegido por lâ de rocha à curva de incêndio natural.

O limite de escoamento não sofreu nenhum tipo de redução durante os 30 minutos de simulação, permanecendo íntegro para ambos os casos de proteção.

Com relação ao isolamento térmico, que é o segundo parâmetro para análise dos resultados, foram verificados os seguintes aspectos:

a) A argamassa de fibra projetada com 10mm de espessura isolou a viga em torno de 5 minutos submetida à curva de incêndio padrão e 09 minutos com utilização da curva de incêndio natural;

b) Com 15 mm de espessura, o isolamento suportou aproximadamente 5,7 minutos para incêndio padrão e 10 minutos para incêndio natural;

c) O concreto vermiculítico com 10mm de espessura isolou em torno de 5 minutos para incêndio padrão e 8 minutos para incêndio natural;

d) Na espessura de 15mm os isolamentos feito com concreto vermiculítico suportaram por 5 minutos aproximadamente, para incêndio padrão e 10 minutos para incêndio natural;

e) A lã de rocha com 10mm isolou por menos de 3 minutos para incêndio padrão e em torno de 7 minutos para incêndio natural;

f) Com a espessura de 15mm, a lã de rocha isolou por menos de 3 minutos para incêndio padrão e por volta de 7 minutos para incêndio natural;

g) A manta cerâmica utilizada com 10mm de espessura, conseguiu isolar por aproximadamente 3 minutos para incêndio padrão e 9 minutos para incêndio natural;

h) Com 15mm de espessura, o isolamento suportou 3 minutos, aproximadamente, para incêndio padrão e 9 minutos para incêndio natural;

i) Utilizando-se a placa de gesso, foi verificado que o isolamento suportou por volta de 6 minutos para incêndio padrão e 14 minutos para incêndio natural, com 09mm de espessura;

j) Na espessura de 15mm, o isolamento foi eficiente até 7 minutos para incêndio padrão e 14 minutos para incêndio natural

Apesar de não ser uma espessura usual para proteção de componentes estruturais, nos testes realizados com espessura de 30mm, foi observado o seguinte:

a) Com argamassa de fibra projetada os resultados de isolamento foram de 18 minutos para incêndio padrão e mais de 30 minutos para incêndio natural;

b) O concreto vermiculítico isolou por volta de 6 minutos para incêndio padrão e 10 minutos para incêndio natural;

c) A lã de rocha conseguiu isolar a temperatura por menos de 3 minutos para incêndio padrão e em torno de 10 minutos para incêndio natural;

d) A manta cerâmica isolou por menos de 3 minutos para incêndio padrão e menos de 10 minutos para incêndio natural.

Diante das observações acima, verifica-se que os materiais com maior eficiência no isolamento são a argamassa de fibra projetada e a placa de gesso, nas espessuras de 10mm e 15mm. Os menos eficientes são a lã de rocha e a manta cerâmica.

Observando-se os gráficos das figuras 9.96 e 9.97 verifica-se o desempenho dos materiais, comparados entre si, com espessura de 10 mm e 15 mm respectivamente, submetidos às temperaturas de incêndio natural.

Para o isolamento feito com 10 mm de espessura, a argamassa de fibra projetada apresenta um melhor resultado, comparado com a placa de gesso. Porém, com a espessura de 15 mm, a placa de gesso propicia o isolamento por mais tempo que a argamassa de fibra projetada, porém com uma elevação de temperatura no elemento estrutural maior aos 30 minutos.

Aspectos relacionados aos custos e viabilidade econômica dos produtos não foram avaliados, em virtude da pesquisa não ter este objetivo. Optou-se aqui por avaliar apenas os aspectos técnicos e de desempenho dos produtos e mesmo assim, de forma generalista, apenas sob a ótica da eficiência de cada um.

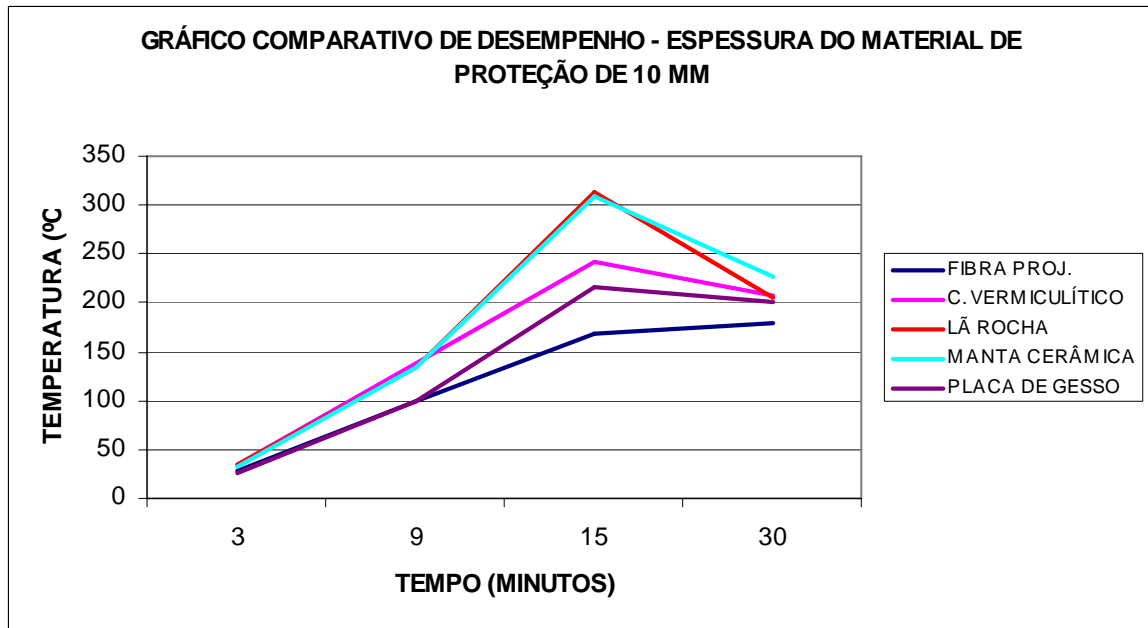


FIGURA 9.96: Gráfico comparativo entre os materiais com espessura de 10 mm.

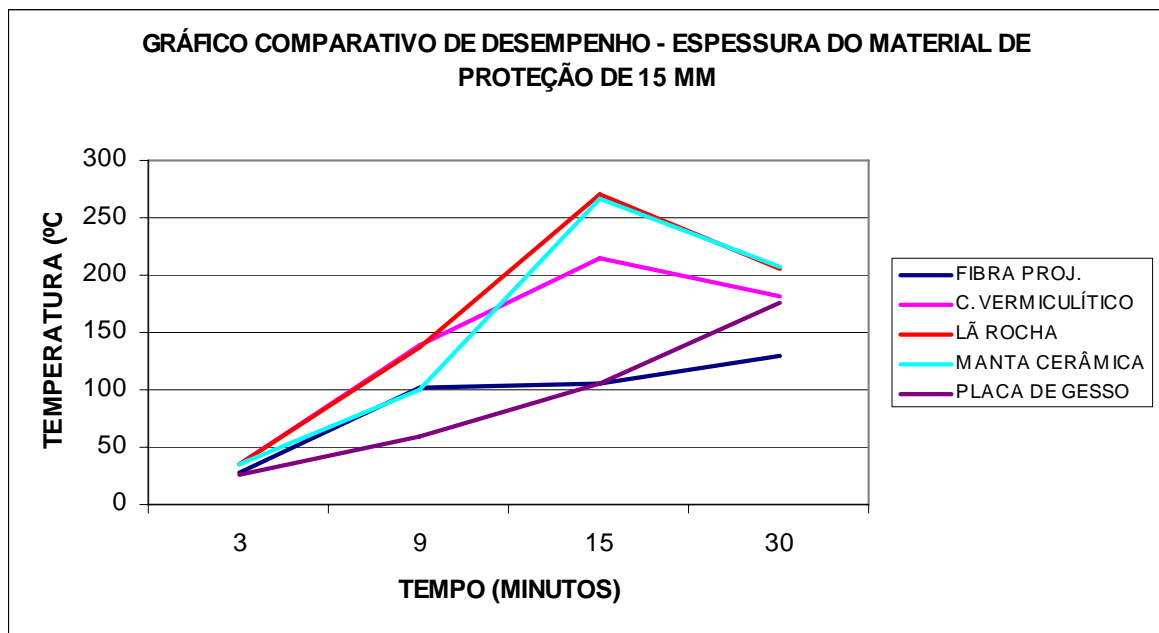


FIGURA 9.97: Gráfico comparativo entre os materiais com espessura de 15 mm.

Como a argamassa de fibra projetada possui na sua composição o gesso, pode-se concluir que este é um bom isolante, e que aliado às fibras, produz um efeito bastante eficiente.

10

CONCLUSÕES

10.1 Conclusões

No presente trabalho foram estudados vários aspectos relativos aos incêndios, que de uma forma ou de outra, interferem no comportamento dos materiais, quer seja no aço ou no material de proteção utilizado para preservar sua integridade.

Após estudar os fenômenos físicos e químicos típicos de incêndios em compartimentos, tais como a forma de transmissão de calor, a interferência da ventilação no comportamento do incêndio e outros aspectos relevantes, a modelagem do ambiente de incêndio foi realizada para a utilização dos softwares que auxiliaram na realização dos testes.

O *Smartfire* possibilitou a elaboração de um cenário que retrata a realidade dos edifícios de habitação popular, estruturados em aço com utilização de perfis formados à frio (PFF), o que permitiu analisar as condições de um incêndio neste contexto e suas especificidades.

Posteriormente, com o uso de outra ferramenta computacional, o *Thersys*, foi possível utilizar os dados referentes às curvas de incêndio padrão e natural, obtidas com o *Smartfire* para testar a performance de uma viga do tipo caixa, com aço *USI SAC 300*, verificando os resultados nos perfis com proteção e sem a proteção térmica.

Os perfis foram analisados com vários materiais de proteção e submetidos aos rigores da curva de incêndio padrão e curva de incêndio natural, o que permitiu analisar aspectos referentes à resistência do aço e a capacidade de isolamento dos materiais.

Foram estabelecidos parâmetros baseados na preservação dos índices de limite de escoamento e no módulo de elasticidade do aço. Assim, concluiu-se que aqueles materiais que tinham condições de preservar a resistência do aço por mais tempo tinham uma melhor performance sobre este aspecto. Para tal, foi utilizada uma temperatura limite média de 140 °C ou temperatura de pico de 180 °C.

Após as análises, concluiu-se que os materiais tiveram uma performance melhor quando submetidos à curva de incêndio natural. A maior parte deles se aquece e posteriormente resfria acompanhando a fase de arrefecimento do ambiente. Em alguns casos, mesmo que a temperatura tenha sido alta em determinado ponto, verifica-se que esta não permaneceu elevada por muito tempo.

Assim, verificou-se que a proteção feita por argamassa de fibra projetada ou por placas de gesso apresentaram melhor resultado no isolamento. Um fator importante a se considerar, como foi apresentado no capítulo 8, é que as argamassas de fibras projetadas, em geral possuem 80% de gesso na sua composição, o que reafirma o potencial do gesso como isolante térmico.

As simulações feitas com argamassa de fibra projetada e com placas de gesso, com camadas de 10 mm de espessura, mostraram que o módulo de elasticidade do aço no elemento estrutural foi preservado durante todo o período analisado, com a proteção por argamassa de fibras projetadas e até 14 minutos, aproximadamente, com utilização das placas de gesso.

Já para o limite de escoamento, ambas as proteções mantiveram as temperaturas em índices aceitáveis e que não causaram nenhum tipo de redução.

Para a proteção feita com espessura de 15 mm, os resultados foram ainda melhores, sendo que não houve redução dos limites de escoamento e módulo de elasticidade do aço até a totalização do tempo utilizado para as simulações, ou seja, ambos foram preservados durante os 30 minutos.

Enfim, pode-se concluir que há um grande número de materiais de proteção no mercado e que a escolha por um ou outro material não pode se basear apenas no seu desempenho. Outros fatores tais como custo, estética, facilidade de manuseio e instalação irão interferir diretamente na escolha do material.

10.2 Sugestões para trabalhos futuros

Considerando que há ainda um campo muito amplo sobre as questões referentes aos incêndios e a segurança estrutural das edificações, pode-se sugerir:

- a) A realização de novos estudos sobre a performance dos materiais de proteção térmica para outros tipos de elementos estruturais fabricados por laminação a quente, soldagem e etc.;
- b) Avaliação do desempenho das tintas intumescentes como isolante térmico, principalmente com relação a sua utilização em treliças compostas por perfis formados à frio;
- c) A realização de estudos mais aprofundados sobre a utilização do gesso como material de proteção térmica, considerando o seu potencial como isolante, visto que não há muitas fontes bibliográficas específicas a respeito;
- d) Estudo do efeito das temperaturas elevadas nas ligações das estruturas metálicas soldadas e parafusadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (AISI). Cold-formed steel design manual. Washington, 1997
2. AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Structural fire protection. New York. 1992.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 14323: Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio – Procedimento. Rio de Janeiro, 1999.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 14423: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento. Rio de Janeiro, 2000.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 8800: Projetos e Execução de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2003.

6. BUCHANAN, Andrew H. Structural design for fire safety. University of Canterbury. New Zeland. 2002.
7. CAFCO (2006). Blaze-Shield II. Spray-Applied Fire Resistive Material. Isolatak International. /folder/;
8. CAMARGO, J.C.A. (2000). Proteção Passiva contra Fogo em Estruturas Metálicas. Disponível em: <<http://www.catep.com.br/dicas>>. Acesso em: 15 Set, 2006;
9. CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE MINAS GERAIS. Instrução técnica 06 – Segurança estrutural das edificações. Belo Horizonte. 2006.
10. CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE MINAS GERAIS. Instrução técnica 09 – Segurança estrutural das edificações. Belo Horizonte. 2006.
11. DEGGARY, Priest. Construction materials under fire: new information for the fire safety engineering industry. 2004. Disponível em <<http://www.iso.ch/iso/en/commcentre/news/archives/2003/firesafety.html>>. Acesso em 10Jun, 2005
12. EUCATEX (2007). Isopiro e Isopiro LV. Disponível em <<http://www.eucatex.com.br/eucatex/prescricao>>. Acesso em 12 Mai, 2007.
13. EUCATEX (2007). Isopiro e Isopiro LV. Disponível em <http://www.eucatex.com.br/eucatex/descricao.asp?b2=&a1=15&a2=106>. Acesso em 12Mai, 2007.
14. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Design of steel structures – General rules - structural fire design (Part 1.1). Eurocode 3 – BSEN1993-1-1. United Kingdom. 2005.

15. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Design of steel structures – General rules - structural fire design (Part 1.2). Eurocode 3 – BSEN1993-1-2. United Kingdom. 2005.
16. EUROPEAN CONVENTION FOR CONSTRUCTIONAL STEELWORK. Model code of fire engineering. Brussels. 2001.
17. EWER, J., et al. Overview of the smartfire software. In: *Smartfire v4.0*. London: University of Greenwich, aug./2004.
18. EWER, J., et al. User Guide for the Smartfire Environment. In: *Smartfire v4.0*. London: University of Greenwich, sep./2004.
19. FAKURY, R. H. (1999). Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL “O USO DE ESTRUTURAS METÁLICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL”, 2., Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: SME. 1 CD-ROM;
20. GRACE CONSTRUCTION PRODUCTS (2000). Disponível em: <<http://www.graceconstruction.com/prodline.cfm?did=3>> Acesso em: 27 ago, 2001;
21. GRACE CONSTRUCTION PRODUCTS (----). Flamesafe. Firestop Products and Systems. International Protective Coatings Corporation. /folder/;
22. GRACE CONSTRUCTION PRODUCTS (----). Monokote Industrial and Petrochemical Fireproofing. /folder/;
23. GRACE CONSTRUCTION PRODUCTS (----). Proteção Passiva de Estruturas. Firestop e Sistemas de Selagem. Monokote e Flamesafe. /folder/;
24. GUARUTHERM. (2004). Painéis rígido de lã de rocha Thermax PEM. Disponível em <<http://guarutherm.com.br>>. Acessado em: 15 Jun, 2004;

25. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Relatório técnico 34.512 – Caracterização de produto de proteção de estruturas de aço contra ação do incêndio. São Paulo. 1996.
26. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Relatório técnico 34.603 – Caracterização de produto de proteção de estruturas de aço contra ação do incêndio. São Paulo. 1996.
27. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Relatório técnico 35.687 – Caracterização de produto de proteção de estruturas de aço contra ação do incêndio. São Paulo. 1997.
28. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 834: Fire resistance tests – elements of building construction – Part 1: General requirements. Geneva. 1999.
29. MALHOTRA, H.L. Design of fire-resisting structures. New York: Surrey University Press, 1982.
30. MENDES, Cristiane Lopes. Estudo teórico sobre perfis formados à frio em situação de incêndio. USP. São Carlos. 2004.
31. NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. SFPE handbook of fire protection engineering. 3 ed. Massachusetts. 2002.
32. PANNONI, Fábio Domingos. Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio. 2 ed. São Paulo, 2004.
33. PUKASIEWICZ, Anderson G.M. (2003). Aços – Tratamentos térmicos. Disponível em <http://www.pg.cefetpr.br/comec/matdidatico/curso_tecnologia/3_fundicao>. Acesso em: 10 Out, 2006;

34. RIBEIRO, José Carlos Lopes. Simulação visa método dos elementos finitos da distribuição tridimensional de temperatura em estruturas em situação de incêndio. UFMG. Belo Horizonte. 2004
35. ROCK FIBRAS ISOLANTES TÉRMICOS (...). Catálogo. Mantas cerâmicas, feltros. São Paulo. 2004.
36. SECCO, Orlando. Manual de prevenção e combate de incêndio. 3 ed. São Paulo, 1982.
37. SILVA, Valdir Pignatta. Estruturas de aço em situação de incêndio. Zigurate Editora. São Paulo. 2001.
38. SOARES, Cláudio Henrique. Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados à frio em situação de incêndio. UFMG. Belo Horizonte. 2002.
39. THE STEEL CONSTRUCTION INSTITUTE. Building design using cold formed steel sections: fire protection. Berkshire. 1993.
40. UNIVERSIDADE DO MINHO. Isolamentos térmicos. Disponível em <www.dem.uminho.pt/CUnits/MEC/S-E&E2/ReservadoE&E2/Textos/IsolamentoTérmi co.pdf> Acesso em 12Mai, 2007.
41. VARGAS, Mauri Resende; SILVA, Valdir Pignatta. Resistência ao fogo das estruturas de aço. Manual de Construção em Aço. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS / Centro Brasileiro de Construção em Aço – CBCA, 2003.

ANEXO A
(normativo)
Cargas de incêndio específicas por ocupação – Instrução Técnica 09 do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais

Para a classificação detalhada das ocupações (divisão) consultar a tabela 1 do Regulamento de Segurança Contra Incêndio e Pânico nas edificações e áreas de risco no Estado de Minas Gerais.

Ocupação / Uso	Descrição	Carga de incêndio (q_{fi}) em MJ/m²
Residencial	Alojamentos estudantis	300
	Apartamentos	300
	Casas térreas ou sobrados	300
	Pensionatos	300
Serviço de hospedagem	Hotéis	500
	Motéis	500
	Apart-hotéis	300
Comercial varejista, Loja	Açougue	40
	Antiguidades	700
	Aparelhos domésticos	300
	Armarinhos	300
	Armas	300
	Artigos de bijuterias, metal ou vidro	300
	Artigos de cera	2100
	Artigos de couro, borracha, esportivos	800
	Automóveis	200
	Bebidas destiladas	700
	Brinquedos	500
	Calçados	500
	Drogarias (incluindo depósitos)	1000
	Ferragens	300
	Floricultura	80
	Galeria de quadros	200
	Livrarias	1000
	Lojas de departamento ou centro de compras (shoppings)	800
	Máquinas de costura ou de escritório	300
	Materiais fotográficos	300
	Móveis	400
	Papelarias	700
	Perfumarias	400
	Produtos têxteis	600
	Relojoarias	600
	Supermercados	400
	Tapetes	800
	Tintas e vernizes	1000
	Verduras frescas	200
	Vinhos	200
	Vulcanização	1000

Serviços Profissionais, pessoais e técnicos	Agências bancárias	300
	Agências de correios	400
	Centrais telefônicas	100
	Cabeleireiros	200
	Copiadora	400
	Encadernadoras	1000
	Escritórios	700
	Estúdio de rádio ou de televisão ou de fotografia	300
	Laboratórios químicos	500
	Laboratórios (outros)	300
	Lavanderias	300
	Oficinas elétricas	600
	Oficinas hidráulicas ou mecânicas	200
	Pinturas	500
	Processamentos de dados	400
Educacional e Cultura física	Academias de ginástica e similares	300
	Pré-escolas e similares	300
	Creches e similares	300
	Escolas em geral	300
Locais de reunião de público	Bibliotecas	2000
	Cinemas, teatros e similares	600
	Circos e assemelhados	500
	Centros esportivos e de exibição	150
	Clubes sociais, boates e similares	600
	Estações e terminais de passageiros	200
	Exposições	Adotar Anexo B desta IT
	Igrejas e templos	200
	Museus	300
	Restaurantes	300
Serviços Automotivos e assemelhados	Estacionamentos	200
	Oficinas de conserto de veículos e manutenção	300
	Postos de abastecimento (tanques enterrados)	300
	Hangares	200
Serviços de saúde e Institucionais	Asilos	350
	Clinicas e consultorios médicos ou odontologicos	200
	Hospitais em geral	300
	Presídios e similares	100
	Quartéis e similares	450
	Aparelhos eletroeletrônicos,	400

Industrial	fotográficos, ópticos	
	Acessórios para automóveis	300
	Acetileno	700
	Alimentação	800
	Artigos de borracha, cortiça, couro, feltro, espuma	600
	Artigos de argila, cerâmica ou porcelanas	200
	Artigos de bijuterias	200
	Artigos de cera	1000
	Artigos de gesso	80
	Artigos de mármore	40
	Artigos de peles	500
	Artigos de plásticos em geral	1000
	Artigos de tabaco	200
	Artigos de vidro	80
	Automotivos e autopeças (exceto pintura)	300
	Automotiva e autopeças (pintura)	500
	Aviões	600
	Balanças	300
	Baterias	800
	Bebidas destiladas	500
	Bebidas não-alcoólicas	80
	Bicicleta	200
	Brinquedos	500
	Cafê (inclusive torrefação)	400
	Caixotes, baris ou pallets de madeira	1000
	Calçados	600
	Carpintarias e marcenarias	800
	Cera de polimento	2000
	Cerâmicas	200
	Cereais	1700
	Cervejarias	80
	Chapas de aglomerados ou compensado	300
	Chocolate	400
	Cimento	40
	Cobertores, tapetes	600
	Colas	800
	Colchões (exceto espuma)	500
	Condimentos, conservas	40
	Confeitarias	400
	Congelados	800
Couro sintético	1000	

Industrial	Defumados	200
	Discos de música	600
	Doces	800
	Espumas	3000
	Farinhas	2000
	Feltros	600
	Fermentos	800
	Fiações	600
	Fibras sintéticas	300
	Fios elétricos	300
	Flores artificiais	300
	Fornos de secagem com grade de madeira	1000
	Forragem	2000
	Fundições de metal	40
	Galpões de secagem com grade de madeira	400
	Geladeiras	1000
	Gelatinas	800
	Gesso	80
	Gorduras comestíveis	1000
	Gráficas (empacotamento)	2000
	Gráficas (produção)	400
	Guarda-chuvas	300
	Instrumentos musicais	600
	Janelas e portas de madeira	800
	Jóias	200
	Laboratórios farmacêuticos	300
	Laboratórios químicos	500
	Lápis	600
	Lâmpadas	40
	Laticínios	200
	Malharias	300
	Máquinas de lavar, de costura ou de escritório	300
	Massas alimentícias	1000
	Mastiques	1000
	Materiais sintéticos ou plásticos	2000
	Metalúrgica	200
	Montagem de automóveis	300
	Motocicletas	300
	Motores elétricos	300
	Moveis	600
Óleos comestíveis	1000	
Padarias	1000	
Papéis (acabamento)	500	
Papéis (preparo de celulose)	80	

	Papéis (procedimento)	800
Industrial	Papelões betuminados	2000
	Papelões ondulados	800
	Pedras	40
	Perfumes	300
	Pneus	700
	Produtos adesivos	1000
	Produtos de adubo químico	200
	Produtos alimentícios (expedição)	1000
	Produtos com ácido acético	200
	Produtos com ácido carbônico	40
	Produtos com ácido inorgânico	80
	Produtos com albumina	2000
	Produtos com alcatrão	800
	Produtos com amido	2000
	Produtos com soda	40
	Produtos de limpeza	2000
	Produtos graxos	1000
	Produtos refratários	200
	Rações	2000
	Relógios	300
	Resinas	3000
	Roupas	500
	Sabões	300
	Sacos de papel	800
	Sacos de juta	500
	Sorvetes	80
	Sucos de fruta	200
	Tapetes	600
	Têxteis em geral	700
	Tintas e solventes	4000
	Tintas látex	800
	Tintas não-inflamáveis	200
	Transformadores	200
Tratamento de madeira	3000	
Tratores	300	
Vagões	200	
Vassouras ou escovas	700	
Velas de cera	1300	
Vidros ou espelhos	200	
Vinagres	80	
Demais usos	Demais atividades não enquadradas acima	Levantamento da carga de incêndio conforme Anexo B

Anexo B - Tabela A.1 – Tempos requeridos de resistência ao fogo (IRRF), em minuto – NBR 14.432:2001

Grupo	Ocupação/Uso	Divisão	Profundidade do subsolo		Altura da edificação				
			Classe S ₂ h _s > 10m	Classe S ₁ h _s ≤ 10m	Classe P ₁ h ≤ 6m	Classe P ₂ 6m < h ≤ 12m	Classe P ₃ 12m < h ≤ 23m	Classe P ₄ 23m < h ≤ 30m	Classe P ₅ h > 30m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60 (30)	30	30	60	90	120
B	Serviços de Hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60 (30)	60	90	120
C	Comercial Varejista	C-1 a C-3	90	60	60 (30)	60 (30)	60	90	120
D	Serviços Profissionais, Pessoais e Técnicos	D-1 a D-3	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
E	Educacional e Cultura Física	E-1 a E-6	90	60 (30)	30	30	60	90	120
F	Locais de Reunião de Público	F-1, F-2, F-5, F-6 e F-8	90	60	60 (30)	60	60	90	120
G	Serviços Automotivos	G-1 e G-2 não-abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
		G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60 (30)	30	30	30	30	60
H	Serviços de Saúde e Institucionais	H-1 a H-5	90	60	30	60	60	90	120
I	Industrial	I-1	90	60 (30)	30	30	60	90	120
		I-2	120	90	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120
J	Depósitos	J-1	90	60 (30)	30	30	30	30	60
		J-2	120	90	60	60	90 (60)	120 (90)	120