

KARINA VENÂNCIO BONITESE

**SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFÍCIO
HABITACIONAL DE BAIXO CUSTO
ESTRUTURADO 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: Segurança Contra Incêndio

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

SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM
EDIFÍCIO HABITACIONAL DE BAIXO CUSTO
ESTRUTURADO EM AÇO

Karina Venâncio Bonitese

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. Ricardo Hallal Fakury
DEES/UFMG

Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva
DEMC/UFMG

Belo Horizonte, 22 de Agosto de 2007.

Dedico este trabalho à
minha família, à memória
do meu querido avô Helder
e aos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Impossível seguir adiante sem sentir a força daqueles que estão sempre por perto. Por isso, não posso deixar de reconhecê-los como fundamentais nessa minha grande conquista.

À minha família, que em toda a sua diversidade me ensinou a olhar o mundo de frente e a lutar pelos sonhos, e por serem todo o meu orgulho e os mais preciosos na minha vida.

Ao Thiago, por compartilhar cada fase de minha vida como se fosse a primeira, sempre ao meu lado; e à sua família, pelos momentos em que também foram minha.

À Usiminas, pelo voto de confiança, pela bolsa de mestrado concedida e pela doação dos equipamentos para implantação do Núcleo de Estudos Avançados em Engenharia de Segurança Contra Incêndio, do DEES/EE/UFMG, iniciado e efetivado durante meus estudos.

Ao CBCA, por conceder os softwares *Smartfire* e *buildingEXODUS* à UFMG e permitir e apoiar todo o meu trabalho.

Às pessoas raras que conheci nesse período, às quais me orgulho de chamar de amigos, por todos os acréscimos e todas as emoções, André Gerken, Lincoln Rubin, Eliene Carvalho e Gustavo Veríssimo, que não serão esquecidos.

Aos Profs. Drs. Adriano de Paula e Silva, Maria Teresa Paulino Aguiar e Ricardo Hallal Fakury, por toda a compreensão e partilha, fazendo-me sentir honrada em aprender ciência com um olhar mais humano.

E ao amigo e orientador Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues, por toda a sua dignidade e humanidade, sua competência e determinismo, e por todos os momentos em que foi tênue a linha entre lecionar e ensinar a viver, com sua amizade e capacidade de me fazer sentir segura nessa caminhada em busca da ciência e sabedoria.

RESUMO

O processo de evacuação de uma edificação está associado tanto às características arquitetônicas, como aos fatores físicos e psicológicos da população em situação de pânico. Torna-se necessário, dessa forma, um estudo quanto ao comportamento da edificação frente ao fogo, visando assegurar a proteção das vidas dos ocupantes do edifício e dos bombeiros, além do próprio edifício contra danos que possam se deflagrar nele ou em edifícios vizinhos. Assim, a presente pesquisa analisa através de modelos computacionais uma edificação habitacional de baixo custo, estruturada em aço com perfis formados a frio, de cinco pavimentos, localizada em São Paulo e em situação de incêndio. Para tanto, foram utilizados conjuntamente os *softwares Smartfire e buildingEXODUS*. Os dados utilizados foram obtidos através da arquitetura, dos materiais estruturais, da vedação, do mobiliário e dos ocupantes, coletados pelos autores via projeto e visita técnica. O modelamento do incêndio nesse edifício, baseado em CFD, foi desenvolvido no *software SmartFire* para simular a geometria da edificação, as propriedades térmicas dos materiais, bem como a dinâmica e comportamento do incêndio em compartimentos, com subsequente geração de dados numéricos. Estes foram inseridos no *software buildingEXODUS* que, a partir da caracterização prévia dos ocupantes em seus aspectos físicos e psicológicos, gerou um modelo de evacuação dos ocupantes através da correlação de dados dos dois programas. A partir dos resultados apresentados foi possível observar a eficácia dos *softwares* empregados em simulações de incêndio real. Desta forma, averiguou-se a isenção do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) do edifício, analisado a partir de verificações dos parâmetros de projeto e da interpretação dos resultados das simulações. Conclui-se que o edifício apresenta um desempenho positivo quanto ao objetivo de salvaguardar vidas durante o incêndio e de minimizar perdas materiais pelo fogo, resultante do comportamento dos componentes do edifício e do adequado projeto de arquitetura.

ABSTRACT

The evacuation process of a building is associated with its architectural features but also with the physics and psychological factors of the population in a panic situation. Thus, it is necessary to study the consequences of a fire situation for the building, since the lives of the occupants who are in the building must be protected, included the firefighters. Also, the building itself, everything inside of it and the surrounding buildings must be preserved as far as possible. This research analyses, using computer models generated by the softwares Smartfire and buildingEXODUS, a fire situation in a five storeys low-cost buildings. Located in Sao Paulo, the building is a steel cold formed structure. The data used in this work were obtained from architecture, materials and structure, walls and furniture, as well as the occupant data, acquired by the authors from the design and also technical visits. The fire model in this building, based in CFD, was developed in the software SmartFire to simulate the geometry of the edification, the thermal properties of materials, the behavior and fire dynamics compartments fire, with posterior generation of numerical data. These data were inserted in the software buildingEXODUS which, considering the physics and psychological factors of the occupants, and also the data generated in the other software, created a model which simulates the evacuation time of the occupants and their behavior when they face the fire effects. The results obtained in the research attested the efficiency of the softwares, which created the simulation of a real fire situation. It was also proved that the building is exempt of the Required Fire Resistance Time. Consequently, it was possible to conclude that the building is adequate concerning to the objectives of saving lives and minimizing material losses by the fire, as a result of the behavior of the building components and the adequate architectural design.

SUMÁRIO

1 Introdução	1
1.1 Considerações gerais.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Justificativa e relevância do tema.....	4
1.4 Estrutura da dissertação.....	5
2 Segurança contra incêndio	7
2.1 Histórico.....	7
2.2 Definição.....	11
2.3 Requisitos de desempenho e objetivos.....	12
2.3.1 Segurança à vida.....	13
2.3.2 Segurança da propriedade.....	13
2.3.3 Severidade do incêndio e risco de conflagração.....	14
2.4 Medidas de segurança contra incêndio.....	16
2.4.1 Regulamentações prescritivas e <i>Performance-based</i>	19
2.5 Estatísticas do incêndio.....	21
2.5.1 Natureza dos incêndios.....	21
2.5.2 Locais de incêndio em edificações e causas possíveis.....	25
2.5.3 Vítimas de incêndio.....	26
2.5.4 Horário de ocorrência dos incêndios.....	28
2.5.5 Causas de mortes.....	30
3 Incêndio em compartimentos	30
3.1 Definição.....	30
3.2 Modelos de incêndio.....	31
3.3 O processo de combustão.....	33
3.4 Combustíveis.....	37
3.4.1 Combustíveis sólidos.....	37
3.4.2 Combustíveis líquidos.....	38

3.4.3	Combustíveis gasosos	38
3.5	Transferência de calor	39
3.5.1	Condução	40
3.5.2	Convecção	42
3.5.3	Radiação	44
3.6	Dinâmica dos fluidos	47
3.6.1	Conservação de massas	48
3.6.2	Conservação do momento	48
3.6.3	Conservação de energia.....	48
3.7	Taxa de liberação de energia.....	49
3.7.1	Incêndio “t ² ”	51
3.8	Carga de incêndio	53
3.9	Desenvolvimento do fogo	55
3.9.1	Ignição.....	57
3.9.2	Crescimento.....	57
3.9.3	Flashover	59
3.9.4	Queima generalizada.....	60
3.9.5	Diminuição ou decaimento.....	61
3.10	Pluma e <i>Ceiling Jet</i>	61
3.10.1	Pluma.....	61
3.10.2	<i>Ceiling Jet</i>	63
3.10.3	Equações básicas.....	64
3.11	Grau de ventilação	67
4	Propriedade dos materiais de construção	70
4.1	Introdução	70
4.2	Classificação dos materiais	71
4.3	Propriedade dos materiais a temperaturas elevadas.....	74
4.3.1	Propriedades do aço	75
4.3.1.1	Propriedades mecânicas.....	76
4.3.1.2	Propriedades térmicas.....	80
4.3.2	Propriedades da alvenaria.....	84

4.3.3	Propriedade da madeira.....	86
4.4	Ensaio de mobiliário.....	88

5 Edifícios habitacionais estruturados em aço: parâmetros de segurança

5.1	Introdução	94
5.2	Edifício habitacional de cinco pavimentos: caracterização	97
5.2.1	Arquitetura	97
5.2.2	Estrutura: Perfis formados a frio.....	102
5.3	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo e isenções	106
5.3.1	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo.....	106
5.3.2	Isenções de TRRF	109
5.4	Parâmetros e verificação de desempenho	111
5.4.1	Classificação das edificações.....	112
5.4.2	Parâmetros urbanísticos	113
5.4.2.1	Acesso do Corpo de Bombeiros.....	113
5.4.2.2	Separação entre edificações	115
5.4.3	Parâmetros arquitetônicos.....	122
5.4.3.1	Saídas de emergência.....	122
5.4.3.2	Iluminação de emergência, sinalização de saída e extintores portáteis	133
5.4.4	Verificação.....	133

6 Efeitos da fumaça

6.1	Introdução	134
6.2	Efeitos humanos.....	135
6.2.1	Deficiência de oxigênio	137
6.2.2	Temperaturas elevadas.....	138
6.2.3	Fumaça.....	138
6.2.3.1	Gases tóxicos	140
6.3	Comportamento humano em incêndios	144
6.3.1	Percepção do incidente de incêndio.....	144

7 Métodos computacionais	147
7.1 Introdução	147
7.2 Modelo CFD.....	148
7.3 Smartfire.....	150
7.3.1 Aplicação do <i>Smartfire</i> no Edifício Habitacional.....	151
7.3.1.1 Geração do cenário.....	153
7.3.2 Especificação do cenário de incêndio	157
7.3.2.1 Opções do cenário	159
7.3.2.2 Refinamento da geometria.....	165
7.3.2.3 Objeto Simple fire	169
7.3.3 Simulação da geometria	176
7.3.4 Resultados auferidos	181
7.3.4.1 Temperatura	182
7.3.4.2 Fumaça	190
7.4 <i>BuildingEXODUS</i>	193
7.4.1 Ferramentas e conceitos aplicados.....	193
7.4.2 Sub-modelo do ocupante.....	196
7.4.2.1 Atributos físicos	196
7.4.2.2 Atributos psicológicos.....	200
7.4.2.3 Atributos experienciais.....	201
7.4.2.4 Atributos dos efeitos do perigo.....	203
7.4.2.5 Sub-modelo do movimento	206
7.4.2.6 Sub-modelo do perigo	206
7.4.2.7 Sub-modelo da toxicidade	208
7.4.2.8 Sub-modelo do comportamento.....	209
7.4.3 Simulação do modelo.....	209
7.4.3.1 Definição da geometria	209
7.4.3.2 Definição da população	212
7.4.3.3 Definição do cenário	216
7.4.3.4 Definição da Simulação.....	218

7.4.4	Resultados auferidos	221
7.4.4.1	Escape	221
7.4.4.2	Intoxicação	225
8	Considerações finais	227
8.1	Conclusões	227
8.2	Sugestões para continuidade da pesquisa	230
9	Referências Bibliográficas	232
10	Bibliografia recomendada	239

LISTA DE ANEXOS

Anexo A	242
Anexo B	245
Anexo C	251

LISTA DE FIGURAS

2.1	Cidade medieval de Ferrara, Itália. Espaço urbano conturbado e edificações de elevado risco em situações de incêndio.....	8
2.2	Processo de projeto de segurança contra incêndio baseado nas regulamentações de desempenho.....	20
2.3	Natureza dos incêndios nos Estados Unidos, de 2000 a 2005.....	22
2.4	Natureza dos incêndios no Reino Unido, de 2000 a 2005.....	22
2.5	Natureza dos incêndios em São Paulo - geral (2005).....	23
2.6	Natureza dos incêndios em edifícios em São Paulo (2005).....	23
2.7	Natureza dos incêndios por ocupação em São Paulo e Minas Gerais (2005).....	24
2.8	Locais de incêndio em residências em São Paulo, Estados Unidos e Reino Unido (2005).....	25
2.9	Causas possíveis de incêndio em edificação em São Paulo (2005).....	26
2.10	Vítimas fatais de incêndios residenciais em São Paulo (1995 a 1997).....	27
2.11	Vítimas fatais de incêndios residenciais no Reino Unido (2005).....	27
2.12	Vítimas fatais de incêndios residenciais em São Paulo (2005).....	28
2.13	Horário de ocorrência dos incêndios em residência em São Paulo (2005)..	29
2.14	Horário de ocorrência dos incêndios no Reino Unido (2005).....	29
2.15	Causas de morte por incêndio no Reino Unido (2005).....	30
3.1	Curva de incêndio-padrão.....	32
3.2	Curva de incêndio natural.	33
3.3	Triângulo do Fogo.	34
3.4	Quadrilátero do Fogo.....	35
3.5	Ação da transferência de calor por condução e convecção em madeira, para duas posições diferentes.	39
3.6	Transferência de calor entre edifícios por radiação térmica.....	40
3.7	Espectro eletromagnético.....	45
3.8	Taxa de liberação de calor (HRR) para itens de mobiliário.....	51

3.9	Velocidade de liberação de calor (HRR) para itens de mobiliário.....	53
3.10	Fases típicas do desenvolvimento do incêndio.....	56
3.11	Modelo de duas camadas para incêndio.	58
3.12	<i>Flashover</i> em compartimento de incêndio.	59
3.13	Fase da queima generalizada em compartimento de incêndio.....	60
3.14	Desenvolvimento da pluma em um compartimento de incêndio.....	62
3.15	Características da turbulência da pluma de incêndio, incluindo variações axiais na linha de centro para a temperatura, ΔT_0 , e velocidade, u_0	62
3.16	Desenvolvimento da pluma em um compartimento de incêndio.....	63
3.17	Parâmetros para chama abaixo do nível do teto.....	65
3.18	Parâmetros para chama que impacta o teto.....	66
3.19	Altura média das aberturas.	68
4.1	Estruturas cristalinas cúbica de corpo centrado e cúbica de face centrada.....	72
4.2	Influência das temperaturas elevadas versus conteúdo de carbono no aço.	78
4.3	Fatores de redução para o limite de escoamento e o módulo de elasticidade do aço com a temperatura.....	79
4.4	Condutividade térmica do aço em função da temperatura.....	81
4.5	Alongamento do aço em função da temperatura.....	82
4.6	Calor específico do aço em função da temperatura.....	83
4.7	Calor específico da alvenaria em função da temperatura.....	85
4.8	Condutividade térmica da alvenaria em função da temperatura.....	86
4.9	Microestrutura da madeira nos anéis de crescimento.....	87
4.10	Dimensões do sofá testado de três lugares.....	89
4.11	Taxa de liberação de calor para sofá de três lugares.....	90
4.12	Taxa de perda de massa para sofá de três lugares.....	90
4.13	Dimensões de guarda-roupa testado.....	91
4.14	Taxa de liberação de calor para o guarda-roupa testado.....	92
4.15	Taxa de perda de massa para o guarda-roupa testado.....	92
5.1	Conjunto Habitacional de cinco pavimentos na Solução Usiminas para Habitação de Interesse Social.....	98
5.2	Apartamento tipo do edifício de cinco pavimentos com lay-out.....	98

5.3	Planta tipo de edifício habitacional de cinco pavimentos.....	99
5.4	Corte esquemático de edifício habitacional de cinco pavimentos.....	100
5.5	Planta do pavimento tipo e áreas por blocos.....	102
5.6	Perfil duplo cartola isolado e entre paredes.....	103
5.7	Perfil caixa isolado e entre parede e laje.....	104
5.8	Vista de pilares e vigas em edifício concluído.....	104
5.9	Estrutura metálica, vedação e laje, nos edifícios de cinco pavimentos.....	106
5.10	Tempo equivalente aplicado a estruturas de aço.....	109
5.11	Largura das vias e tipos de retorno (circular, “Y” e “T”).....	114
5.12	Implantação e urbanização do Conjunto Habitacional Juscelino Kubitschek de Oliveira, em Limeira, SP.....	115
5.13	Dimensões de fachada frontal e aberturas para o edifício habitacional.	117
5.14	Distância entre blocos do edifício habitacional.....	120
5.15	Seção com dimensões das janelas venezianas da caixa de escada.....	121
5.16	Seção com dimensões das saídas de emergência.....	124
5.17	Medida da largura em corredores e passagens.....	125
5.18	Abertura das portas no sentido de trânsito de saída.....	125
5.19	Seção com medidas do corredor e passagem do pavimento térreo do edifício habitacional estudado.....	126
5.20	Seção do corte BB, com indicativo das distâncias percorridas.....	127
5.21	Segmentação das escadas no piso da descarga.....	129
5.22	Seção do corte BB, com altura e largura do degrau.....	131
5.23	Seção com dimensões de patamares e lanço de escada.....	131
5.24	Seção com dimensões de corrimãos.....	132
6.1	Processo de decisão de um indivíduo em situação de incêndio.....	144
7.1	Dinâmica computacional dos fluidos: compartimento dividido em células.....	149
7.2	Apartamento do incêndio: ponto de ignição e combustíveis adotados.....	153
7.3	Smartfire <i>Scenario Designer</i> : DXF, Storey e grade.....	154
7.4	Inserção de áreas contíguas à edificação.....	156
7.5	Propriedades dos objetos janelas e portas.....	156
7.6	Cenário da edificação já exportado para o <i>Smartfire Case Specification</i>	

<i>Environment</i>	157
7.7 Propriedades físicas do tijolo comum e do aço.....	158
7.8 Janela de opções dos tipos de problemas a serem analisados pela simulação.....	160
7.9 Opções do modelo de combustão para hidrocarbonetos.....	161
7.10 Opções do modelo de combustão para hidrocarbonetos.....	162
7.11 Opções do modelo de radiação <i>Multiple Ray</i> , adotado na simulação.....	163
7.12 Opção para remoção de objetos sólidos.....	166
7.13 Propriedade da face <i>porosity</i>	167
7.14 Geometria do modelo e representações de <i>Block</i> e <i>Outlet</i> (planta) e <i>Portal</i> e <i>Face porosity</i> (elevação).....	168
7.15 Geometria final do cenário do edifício habitacional de cinco pavimentos..	169
7.16 Objetos <i>simple fire</i> : estante (60x60x100) e sofá (60x60x180).....	170
7.17 Curva HRR do objeto <i>simple fire</i> : estante.....	172
7.18 Curva SRR do objeto <i>simple fire</i> : estante.....	173
7.19 Curva HRR do objeto <i>simple fire</i> : sofá.....	174
7.20 Curva SRR do objeto <i>simple fire</i> : sofá.....	174
7.21 Ativação da ignição no objeto <i>simple fire</i> : estante.....	175
7.22 Ativação da ignição no objeto <i>simple fire</i> : sofá.....	176
7.23 Quadro de seleção de geometria para criação da malha.....	177
7.24 Tela de ferramentas de especificações da malha.....	178
7.25 Solicitação de confirmação da remoção de objetos sólidos.....	178
7.26 Interface do CFD <i>Engine</i> e definição da área a ser simulada.....	179
7.27 Configurações de captura de dados.....	180
7.28 Configurações de visualizações.....	180
7.29 Geometria simulada no CFD <i>Engine</i>	181
7.30 Temperaturas de incêndio a 50 cm do <i>simple fire</i> 1 (estante), em função do tempo.	182
7.31 Temperaturas de incêndio no compartimento a 1,75 m do piso, em função do tempo.....	183
7.32 Geometria do edifício antes da ocorrência do incêndio.....	184
7.33 Graduação da temperatura em seção pela estante, em 90 segundos.....	185

7.34	Pico da temperatura no apartamento de incêndio (7,5 minutos) – seção longitudinal.....	185
7.35	Graduação da temperatura em seção pela estante e sofá, em 90 segundos..	186
7.36	Graduação da temperatura em seção pela estante e sofá, aos 272 segundos.....	187
7.37	Pico da temperatura no apartamento de incêndio (7,5 minutos) – seção transversal.....	188
7.38	Velocidade dos vetores de temperatura em 90 segundos.....	189
7.39	Velocidade dos vetores de temperatura em 1802 segundos.....	189
7.40	Temperatura da fumaça produzida pela estante e sofá.....	190
7.41	Propagação da fumaça em 70s, 90, e 102s.....	191
7.42	Primeiro indício de fumaça no Bloco B.....	192
7.43	Indício de fumaça no Bloco B em 30min.....	193
7.44	Interação dos sub-modelos do <i>buildingEXODUS</i>	194
7.45	Geometria dos cinco pavimentos do edifício no <i>buildEXODUS</i>	210
7.46	Interface do software <i>buildingEXODUS</i> no modelo <i>Geometry</i>	211
7.47	Gráfico de percentual de moradores por idade no Brasil.....	212
7.48	Ferramenta de edição da população.....	213
7.49	Edição de atributos físicos e psicológicos.....	214
7.50	Edição de atributos físicos e psicológicos individuais.....	215
7.51	Denominação dos indivíduos.....	215
7.52	Distribuição da população inserida no quinto pavimento e legenda determinada pelo <i>buildingEXODUS</i>	216
7.53	Definição das zonas de perigo-a.....	217
7.54	Definição das zonas de perigo-b.....	218
7.55	Definição dos dados de saída.....	219
7.56	Caixa de controle dos perigos.....	220
7.57	Caixa de controle de comportamento.....	220
7.58	Tempo de fuga para os 83 ocupantes do edifício.....	221
7.59	Representação da geometria da edificação e posicionamento da população pelo <i>vrEXODUS</i> em dois ângulos diferentes.....	223

7.60	Representação tridimensional do instante inicial do incêndio e do deslocamento da população.....	224
7.61	Representação tridimensional do incêndio em 120 segundos.....	224
7.62	Representação tridimensional do incêndio em 193,62 segundos.....	225

LISTA DE TABELAS

2.1	Principais incêndios em edifícios altos na cidade de São Paulo.....	11
2.2	Relação de ocorrências de incêndio em Edifícios habitacionais entre São Paulo e Minas Gerais (2005).....	24
3.1	Propriedades térmicas de alguns materiais.....	42
3.2	Coeficientes de transferência de calor por convecção.....	44
3.3	Cores visíveis de objetos aquecidos.....	45
3.4	Cores visíveis de materiais aquecidos, comuns em residências.....	47
3.5	Taxa de liberação de calor para materiais comuns em residências.....	49
3.6	Parâmetros das taxa de liberação de calor para itens de mobiliário.....	52
3.7	Potencial calorífico para itens de mobiliário.....	54
3.8	Cargas de incêndio para ocupações residenciais.....	55
4.1	Lista das propriedades dos materiais.....	74
4.2	Composição Química Especificada (% em massa).....	76
4.3	Propriedades mecânicas do aço USI SAC 300.....	76
4.4	Resultados de queima do sofá.....	91
4.5	Resultados de queima do guarda-roupas.....	93
5.1	Cômputo das áreas de edifício habitacional de cinco pavimentos.....	101
5.2	Adaptação da tabela de exigências de TRRF.....	107
5.3	Tabela de isenções de verificação de segurança estrutural.....	110
5.4	Exigências para edificações do Grupo A, com área menor ou igual a 750 m ² e altura menor ou igual a 12,00m.....	112
5.5	Determinação da fachada para dimensionamento.....	116
5.6	Severidade da carga de incêndio para o isolamento de risco.....	118
5.7	Dados para o dimensionamento das saídas em edifícios residenciais.....	123
5.8	Distâncias máximas a serem percorridas.....	126
5.9	Dimensionamento de rampas.....	128
6.1	Efeitos da redução do oxigênio.....	137
6.2	Atmosférica tóxica do incêndio.....	143

7.1	Propriedades físicas dos materiais utilizados na simulação.....	159
7.2	Uso recomendado para diferentes <i>Time step size</i>	164
7.3	Informações da estante.....	172
7.4	Informações do sofá.....	173
7.5	Relação entre FIN e a mobilidade do ocupante.....	197
7.6	Relação entre a concentração de fumaça e a mobilidade.....	198
7.7	Número de habitantes e tempo de fuga do último ocupante por pavimento..	222
7.8	Número de habitantes e tempo de fuga do último ocupante por saída.....	222

LISTA DE QUADROS

2.1	Fatores e influências sobre a severidade do incêndio, a segurança da vida e a segurança da propriedade.....	15
2.2	Principais medidas de prevenção e de proteção contra incêndio associados aos elementos do sistema global de segurança contra incêndio.....	18

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - área de superfície através da qual o calor é transferido (m^2);
- A_f - área do piso do compartimento (m^2);
- A_1 - área total incluindo vedações e aberturas (m^2);
- A_q - área da superfície do material combustível;
- A_v - área total das aberturas para o ambiente externo ao edifício;
- A_w - área efetiva de ventilação (m^2);
- C - calor específico do material;
- C_a - calor específico do aço;
- C_{PM} - calor específico da alvenaria;
- D - diâmetro da fonte do fogo (m);
- E - módulo de elasticidade;
- H - distância (m) entre a fonte do fogo e o teto;
- H_i - potencial calorífico específico de cada componente i do material combustível (MJ/kg);
- K - representa o coeficiente de extinção da fumaça (l/m).
- L_c - altura da chama sobre a base do fogo (m);
- L_n - comprimento horizontal da chama (m);
- M_i - massa total de cada componente i do material combustível (kg);
- Q - Taxa de liberação de calor;
- Q_c - Taxa de liberação de calor em um compartimento;
- Q_H^* - taxa de liberação de calor não dimensional;
- $Q/\Delta t$ - energia transferida como calor por segundo;
- T - Temperatura;
- R - emitância radiante;
- Z - eixo da pluma de incêndio;
- H - distância entre a fonte de fogo e o teto (m);

ΔH_c - calor de combustão do material combustível (kJ/g);

$\Delta H_c(ar)$ - calor de combustão do material combustível por unidade de massa de ar consumido (kJ/g);

ΔT - variação de temperatura;

ΔT_0 - variação da temperatura;

h - taxa de liberação de calor (MJ/kg);

h_m - altura média das aberturas (m);

h_1 - altura da abertura i ;

h_v - altura da abertura da ventilação;

\dot{h} - fluxo de calor (W/m²);

h_c - coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m².°C);

k - condutividade térmica do sólido (W/m.k);

k - constante de crescimento do fogo;

k_c - condutividade térmica do sólido (W/m.k) para a condução;

\dot{m} - taxa de perda de massa (kg/s);

\dot{m}_{ar} - fluxo de massa de ar no compartimento (kg/s);

q - taxa de transferência de calor através da área A (W);

q_{fi} - valor da carga de incêndio específica por metragem da área de piso (MJ/m²);

r - distância horizontal (m) entre o eixo vertical do fogo e o ponto ao longo do teto, onde o fluxo térmico é calculado;

t - o tempo (em segundo);

t_{eq} - tempo equivalente;

u_0 - velocidade da pluma de incêndio;

z - altura ao longo do eixo vertical da pluma (m);

z' - posição vertical da fonte virtual de calor;

$\Delta l/l$ - alongamento do aço;

Δt - intervalo de tempo ;

$\frac{dT}{dx}$ - gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor, sendo T expresso em grau

Kelvin (K) e x em metro (m);

α - gradiente térmico (m²/s);

ε - emissividade;

θ_a - temperatura do aço em graus Celsius;

θ_g - temperatura do ambiente antes do início do aquecimento;

$\theta_{(z)}$ - temperatura da pluma;

θ_0 - temperatura dos gases, em graus Celsius, no instante t;

λ_a - condutividade térmica do aço;

ξ - grau de ventilação;

ρ - densidade (kg/m³);

ρ_a - massa específica do aço;

σ - constante de proporcionalidade ou constante de Boltzmann;

v - grau de ventilação ou fator de abertura;

Φ - fator de configuração, sendo função da emissividade e da geometria;

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

1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

No processo contínuo de desenvolvimento tecnológico e urbano, as cidades se tornam campos de experimentações tecnológicas e de apropriação do espaço. No que tange à tecnologia, a utilização de novos materiais e sua crescente aplicação demandam um conhecimento do comportamento destes frente ao fogo, assim como sua relação com a arquitetura a qual estão submetidos. Por outro lado, decorrente de um déficit habitacional próximo de sete milhões de moradias (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2007), vê-se um crescimento no número de habitações e assentamentos urbanos não regulamentados, que engendram um cenário de elevada inflamabilidade. Dessa forma, toda a evolução desse processo é diretamente proporcional à preocupação quanto à segurança da população ocupante desses espaços, particularmente em situações de incêndio.

A partir do contexto brasileiro, torna-se inerente a avaliação entre tecnologia e problemática social através da análise de edifícios habitacionais de baixo custo. Considerando o aço como o elemento exponencial nos programas de habitação estaduais e empregado fortemente pela Companhia de Habitação de Minas Gerais (COHAB-MG) e Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano de São Paulo (CDHU-SP), este trabalho visa apresentar um estudo acerca das atuais edificações habitacionais estruturadas em aço no Brasil, focado no estudo de segurança contra incêndio. Sendo assim, o objeto analisado é uma edificação habitacional de cinco pavimentos e de baixo custo, estruturada em aço com perfis formados a frio (PFF), localizada em São Paulo, pertencente ao Sistema Usiminas para Habitação de Interesse Social, em parceria com a UFMG.

No estudo de segurança contra incêndio, torna-se iminente a necessidade de fusão entre medidas normativas e o processo de concepção do projeto arquitetônico, de maneira a potencializar o fator segurança nas edificações no que tange à proteção estrutural e de bens, assim como na salvaguarda de vidas, aliados aos aspectos de habitabilidade.

Indubitavelmente, pode-se falar que todo o ciclo de desastres que envolveram o incêndio ao longo da história gerou ferramentas para a evolução da segurança contra incêndio, como uma necessidade intrínseca aos espaços construídos. Semelhante ao que ocorria na Europa antiga, nota-se maior preocupação com a segurança contra incêndio nas classes sociais mais abastadas. No entanto, faz-se necessária a observação de que, segundo a norma brasileira ABNT NBR 14432:2001, algumas edificações, em determinadas condições, estão isentas dos Requisitos de Resistência ao Fogo e apresentam baixo risco frente à situação de incêndio. Desse contexto, participam as edificações habitacionais de cunho social, em sua maioria, como é abordado neste trabalho.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo principal verificar a isenção dos Requisitos de Resistência ao Fogo, prescritos na ABNT NBR 14432:2001 e nas Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiro Militar de Minas Gerais (CBMMG) e do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo (CBSP) em edifícios habitacionais de baixo custo, de cinco pavimentos, estruturados em PFF, no que tange à garantia de segurança à vida dos ocupantes, aos bens materiais e à própria edificação.

Dessa forma, visa-se realizar este trabalho através do estudo de caso de uma edificação dessa tipologia. A metodologia utilizada para a verificação de desempenho envolve simulações computacionais com os *softwares Smartfire* (EWER, J., et al., 2004) e *buildingEXODUS* (GALEA, E.R., et al., 2004), ambos desenvolvidos pelo *Fire Safety Engineering Group* (FSEG) da Universidade de Greenwich, fundamentadas na dinâmica e comportamento do incêndio em compartimentos, assim como investigação de normas e parâmetros técnicos nacionais e internacionais acerca da segurança contra incêndio.

Para tanto, tem-se como objetivo específico a análise do comportamento da edificação como um todo e das propriedades dos materiais estruturais, de vedação e mobiliário perante o fogo, que exige uma avaliação dos seguintes assuntos:

- Estudo do processo de desenvolvimento do fogo em ambientes fechados e da influência exercida pelas variações das propriedades dos combustíveis em geral, das vedações e dos efeitos da ventilação;
- Verificação da isenção do Tempo Requerido de resistência ao Fogo (TRRF) dos edifícios habitacionais de baixo custo, de cinco pavimentos e estruturados em PFF segundo as normas brasileiras, por verificação dos parâmetros de projeto;
- Análise dos efeitos da fumaça de incêndio no comportamento humano e caracterização dos produtos da combustão.

- Desenvolvimento de métodos computacionais capazes de associar os temas abordados ao longo do trabalho e verificar o comportamento da edificação e da população do edifício habitacional proposto em situação de incêndio.

1.3 Justificativa e relevância do tema

O elevado déficit habitacional gera um cenário urbano composto por espaços não regulamentados e inadequados quanto aos quesitos de habitabilidade e segurança, notadamente por sua elevada carga de incêndio, como verificado em vilas e favelas.

O esforço em aumentar o estoque de habitações resultou no elevado uso do aço junto às políticas habitacionais e seu conseqüente emprego em edifícios populares, como vem sendo apresentado pela COHAB-MG e CDHU-SP, consideravelmente. Nota-se, assim, que o uso dos PFF tem sido amplamente adotado nas construções metálicas brasileiras por possuírem baixo custo de produção, fabricação simples e rapidez na execução.

O uso de softwares que simulam o comportamento do fogo e a evacuação da população ocupante em edifícios garante que os efeitos de um incêndio sejam previstos e estudados, sugerindo reformulações necessárias de projeto, assim como ferramentas norteadoras para a ação do Corpo de Bombeiros.

Nesse contexto, esta pesquisa se torna relevante pelo processo avaliativo das edificações habitacionais de cinco pavimentos estruturadas em PFF, destinadas à habitação popular, no que concerne aos requisitos de segurança contra incêndio e à salvaguarda dos ocupantes no processo de evacuação do edifício. Esse estudo é fundamentado nas normas nacionais, tais como a ABNT NBR 9077:1993, a ABNT NBR 14323:1999 e a ABNT NBR 14432:2001, assim como as Instruções Técnicas do CBMMG e do CBSP.

Busca-se introduzir o conceito da produção de uma edificação contextualizada na segurança e habitabilidade a partir da sua difusão no meio científico e na prática do ofício dos profissionais da engenharia, arquitetura e segurança. Justifica-se, assim, a realização deste estudo como uma contribuição à sociedade e às formas de se morar e habitar em espaços demasiadamente miscigenados e conturbados como a cidade.

1.4 Estrutura da dissertação

O presente trabalho encontra-se dividido em oito capítulos, correspondendo cada um aos diferentes estudos e propostas efetuadas.

O Capítulo 1, *Introdução*, apresenta as considerações gerais, objetivos e relevância do tema do trabalho proposto.

O Capítulo 2, *Segurança contra incêndio*, disserta sobre os princípios básicos desse tema, apresentado a partir de seu histórico, definição, requisitos de desempenho e medidas de segurança, que preconizam o processo investigativo acerca da segurança contra incêndio nos edifícios, fundamentado em referências normativas nacionais e internacionais. Ainda neste capítulo, são apresentadas as estatísticas do incêndio com a finalidade de justificar o cerne deste trabalho.

No Capítulo 3, *Incêndio em compartimentos*, discute-se o fundamento dos incêndios em compartimentos, que se apresentam como conhecimento inerente ao estudo e aplicação da segurança contra incêndio em edifícios. São abordados temas como a dinâmica e comportamento do fogo, os fenômenos e produtos decorrentes dos incêndios dessa natureza. A carga de incêndio e grau de ventilação nas edificações, como fatores importantes na evolução do incêndio, também são abordados.

No Capítulo 4, *Propriedade dos materiais a elevadas temperaturas*, são apresentadas as propriedades físicas, químicas, mecânicas e térmicas dos materiais concernentes à edificação estudada. São abordadas as características, dentro das informações adquiridas, do aço, alvenaria e mobiliário, concernente ao cenário de incêndio estudado. Discorre também sobre a resistência ao fogo das estruturas metálicas em situação de incêndio, com ênfase nos perfis formados a frio, fundamentados em referências normativas nacionais e internacionais.

O objeto de estudo deste trabalho será investigado no Capítulo 5, *Edifícios habitacionais estruturados em aço*, que explana de maneira qualitativa e descritiva os critérios de desempenho da edificação quanto à segurança contra incêndio. Abrange a

apresentação do edifício quanto aos componentes, enfatizando os aspectos da estrutura metálica. Nesse capítulo também são apresentados os parâmetros de projeto, arquitetônicos e estruturais, e sua relação às normas brasileiras para edifícios de até cinco pavimentos.

O Capítulo 6, *Efeitos da fumaça*, apresenta os produtos da combustão e seus efeitos nocivos à vida humana, divididos em gases asfixiantes e irritantes. O comportamento humano frente ao risco e ao processo de fuga é abordado com caráter investigativo.

No Capítulo 7, *Métodos computacionais*, avalia-se o objeto desta dissertação sob os aspectos fundamentados nos capítulos anteriores, simulando-o nos *softwares Smartfire e BuildingEXODUS* através do modelamento e interface computacional entre os dois programas.

Concluindo esta pesquisa, o Capítulo 8, intitulado *Considerações finais*, apresenta o corolário da discussão da segurança contra incêndio aliada à arquitetura e engenharia, sintetizando os pontos mais significativos da investigação nas suas conclusões e sugestões para continuidade da pesquisa.

2

SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO

2.1 Histórico

A história do incêndio data dos primórdios do desenvolvimento das sociedades e de seus espaços construídos. Sua evolução caminha ao lado do crescimento do poder econômico e a cada descoberta tecnológica está vinculado um fato histórico envolvendo o incêndio.

No processo contínuo de desenvolvimento tecnológico e urbano, as cidades se tornam campos de experimentações de novas tecnologias e de formas de apropriação dos espaços. Historicamente, sabe-se que todo desenvolvimento acompanhou mudanças políticas, econômicas, sociais e religiosas, que culminou em diferentes maneiras de interação com esses espaços.

O fogo começa a fazer parte da história mundial, de uma maneira mais significativa, a partir da Idade Média, onde os conceitos de urbanização e habitação se tornam mais

intensos (Figura 2.1). Embora se tenha conhecimento de grandes desastres com o fogo em períodos anteriores, como em Roma, em 64 d.C., atribuída a causa à Nero, os acontecimentos que levaram a fomentar o estudo de segurança contra incêndio podem ser relatados a partir do séc. XVII.

Nesse período, as formas de habitar e apropriar o espaço se apresentavam como um fenômeno em mutação, formando os grandes e adensados centros urbanos, capazes de conter uma organização espacial fundada na vida social, religiosa, política e econômica da época. A arquitetura das edificações refletia a importância da sua função na cidade, onde as residências apresentavam um menor grau nesta hierarquia. Quanto ao sistema construtivo, predominava a madeira e coberturas de palha. A maioria das chaminés era constituída de simples troncos ocos de madeira, localizados no interior das edificações, onde a fumaça e fagulhas liberadas pelas chamas eram carregadas por simples convecção até as aberturas no teto. O afastamento entre as edificações vizinhas ainda não existia e as ruas, muito estreitas e tortuosas, acompanhavam a topografia natural do terreno (Figura 2.1). Todo esse contexto, aliado às formas de apropriação rudimentares do espaço e despreocupação com a segurança, tornou as cidades desse período um meio fácil de produção e propagação de incêndios, que assim permaneceram por muito tempo.

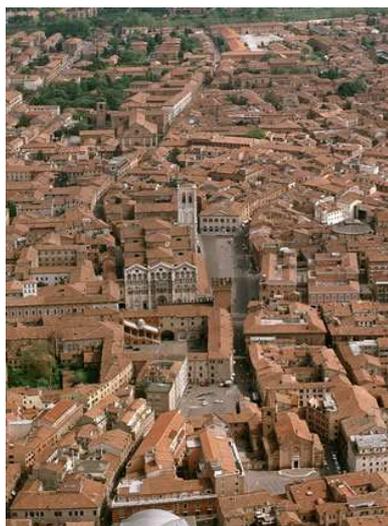


FIGURA 2.1 - Cidade medieval de Ferrara, Itália. Espaço urbano conturbado e edificações de elevado risco em situações de incêndio.

FONTE: UNESCO, 2006

Torna-se compreensível, assim, que a cidade de Londres, no ano de 1666, tenha sucumbido em chamas num período de três dias, destruindo 75% de sua área. Esse foi o incêndio mais significativo da história da Inglaterra, denominado *The Great Fire*, considerado o marco na história da segurança contra incêndio e dos incêndios urbanos. A partir dele, criaram-se medidas de proteção da cidade em relação aos grandes incêndios, tendo como ponto de partida a proibição de construções de madeira, que veio culminar com a formação de inúmeras outras medidas. Tais providências formaram uma regulamentação precursora das regulamentações modernas de segurança contra incêndio (ONO, 1997).

Já no limiar da Revolução Industrial, têm-se relatos de incêndios fulminantes, pelo fato de as cidades se tornarem cada vez mais adensadas e as construções um reflexo da produção de novas tecnologias. Conjuntamente, crescia a utilização de novos materiais decorrentes da industrialização e sua aplicação desenfreada, sem o conhecimento adequado do comportamento de cada material frente ao fogo e sua combinação com a arquitetura a que estava submetido.

Aliado à Europa, os Estados Unidos contribuíram em grande parte para o desenvolvimento da segurança contra incêndio, notadamente a partir do final do século XVIII e início do século XIX, onde o desenvolvimento arquitetônico tornou-se acelerado pelo processo construtivo metálico, já contando com sistemas, técnicas e materiais de proteção contra incêndio. Todo o processo de elaboração de medidas desse âmbito favorecia a proteção passiva e ativa contra incêndio, numa visão notadamente mais preventiva.

Nesse cenário, eclodem os grandes incêndios em Chicago, datados de 1871 e 1874, já numa fase em que a cidade se encontrava num processo de urbanização mais avançado. Embora as edificações já fossem em estrutura metálica e houvesse preocupação com a segurança contra incêndio, pouco se sabia sobre o comportamento desses novos elementos submetidos a altas temperaturas. Além disso, a incorporação de novos materiais de acabamento e subsistemas também favoreceu ao desenvolvimento das chamas e fumaça no incêndio. O resultado desses desastres foi o aumento contínuo da

preocupação com a segurança patrimonial, voltada aos grandes edifícios que representavam o desenvolvimento capitalista e industrial da época, sem o interesse nas edificações residenciais, ainda obsoletas quanto às técnicas construtivas e de proteção. No Brasil, a história dos incêndios é menos densa que na Europa e nos Estados Unidos, em função de possuir uma ocupação e desenvolvimento urbano mais recentes, além de não possuir um registro histórico detalhado. Contudo, a maioria das informações que se possui sobre incêndio no país se deve aos registros do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo (CBPMESP), criado em 1880. Nesse contexto, ONO (2007) expõe a importância da criação de bancos de dados relativos à segurança contra incêndio, assim como sua contribuição para o desenvolvimento de sistemas de avaliação de desempenho das edificações dentro dessa mesma abordagem.

Os mais significativos casos de incêndio, responsáveis por diversas normas técnicas no Brasil, são do edifício Andraus, em 1972, e do edifício Joelma, em 1974, como mostrado na Tabela 2.1. Sob as influências arquitetônicas e construtivas européias e norte americanas, a verticalização intensa ocorreu sem o reconhecimento das medidas de segurança nelas embutidas. Muitas das normas e leis criadas a partir destes incidentes perduram ainda hoje, seguidas de diversas outras que visam evitar a deflagração e o surgimento do incêndio, assim como salvaguardar vidas e bens (ONO, 1997).

Inevitavelmente, pode-se falar que todo o ciclo de desastres que envolveram o incêndio gerou ferramentas para a evolução da segurança contra incêndio como uma necessidade intrínseca aos espaços construídos. Haja vista as normas estabelecidas no Brasil, como as normas brasileiras ABNT NBR 9077:1993, ABNT NBR 14323:1999 e ABNT NBR 14432:2001. Ainda assim, se percebe um maior desenvolvimento nas tecnologias de engenharia que na arquitetura, tornando o projeto arquitetônico uma ferramenta ainda insipiente na produção de espaços que garantam, por si só, a segurança contra o fogo.

Nota-se a necessidade iminente de fazer a fusão entre medidas normativas e a concepção do projeto arquitetônico, de maneira a potencializar o fator segurança nas edificações no que tange à proteção estrutural, de bens e na salvaguarda de vidas, aliados aos aspectos de habitabilidade. Dessa forma, concebe-se a arquitetura de

segurança contra incêndio, atuando como medida passiva de controle deste e garantindo a incolumidade das pessoas, a segurança dos bens e a possibilidade de recuperação da edificação.

TABELA 2.1 - Principais incêndios em edifícios altos na cidade de São Paulo.

Data do incêndio	Edifício	Número de pavimentos	Andares atingidos	Vítimas fatais
13/01/1969	Grande Avenida	23	5° ao 18°	0
24/02/1972	Andraus	31	1° ao 29°	16
01/02/1974	Joelma	25	12° ao 25°	179
04/09/1978	Conjunto Nacional	26	1° ao 9°	0
09/04/1980	Secretaria da Fazenda	22	13° ao 14°	0
14/02/1981	Grande Avenida	23	1° ao 19°	17
03/06/1983	Scarpa	17	12° ao 13°	0
21/05/1987	Torres da CESP	21 e 17	todos	2

FONTE: ONO, 2007

2.2 Definição

Antes de se apresentar os objetivos e mecanismos da segurança contra incêndio em edifícios, é necessário que se apresente sua definição.

Segurança contra incêndio pode ser definida como a aplicação de princípios científicos e de engenharia para os efeitos do fogo, com o intuito de reduzir a perda da vida e danos à propriedade, através da quantificação dos riscos e perigos envolvidos, e prover uma solução ideal para a aplicação de medidas preventivas ou ativas (PURKISS, 1996).

De acordo com a Instrução Técnica IT-02 do Corpo de Bombeiros de Minas Gerais (CBMMG, 2006), o conceito de segurança contra incêndio é definido como o conjunto de ações e recursos internos e externos à edificação ou área de risco, que permitem controlar a situação de incêndio e pânico e remoção das pessoas do local de sinistro em segurança.

2.3 Requisitos de desempenho e objetivos

No Brasil, os requisitos de desempenho de segurança contra incêndio são estabelecidos por decretos estaduais, que devem ser integralmente atendidos e consideram a seguinte seqüência de etapas possíveis no desenvolvimento do incêndio, no caso de um edifício habitacional (ABNT - Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho, 2005):

- Início;
- Crescimento do incêndio no ambiente de origem;
- Propagação para outros ambientes (conflagração) da unidade habitacional de origem;
- Combate ao fogo;
- Evacuação do edifício;
- Propagação para outras unidades habitacionais ou outros edifícios;
- Risco de ruína parcial ou total do edifício.

Dessa forma, a segurança contra incêndio é pautada por alguns objetivos que, de acordo com a bibliografia utilizada, podem ser divididos em três principais:

- Garantir a incolumidade dos ocupantes;
- Assegurar e salvaguardar a estrutura e os bens materiais;
- Prevenir a conflagração do fogo para edificações adjacentes.

ROSSO (1975), além de considerar os três objetivos anteriores, acrescenta que a ação contra o fogo também deve permitir a recuperação da edificação. Para BUCHANAN (2001), a principal regra de proteção contra incêndio é limitar, em níveis aceitáveis, a probabilidade de mortes, ferimentos, e danos à propriedade em um incêndio inesperado.

Segundo ROSSO (1975), os riscos decorrentes do fogo não são somente queimaduras, mas também asfixia, envenenamento, contusões, colapsos, etc., decorrentes dos efeitos secundários do fogo, tais como radiação, falta de oxigênio, gases nocivos, fumaças,

dentre outros. Portanto, incolumidade significa a salvaguarda das vidas humanas contra o efeito fatal e nocivo de todos os riscos citados.

Dessa forma, esses objetivos são detalhados abaixo e seus fatores e influências encontrados no Quadro 2.1.

2.3.1 Segurança à vida

Todos os edifícios devem ser projetados de forma que, na ocorrência de um incêndio, os ocupantes possam permanecer no local onde estejam, evacuar para outra parte do edifício (lugar de segurança relativa), ou evacuar totalmente do edifício sem estarem sujeitos a condições insalubres, perigosas ou insustentáveis. A exigência de segurança à vida se aplica para dentro e fora do edifício (CIB W014, 2001).

No caso do incêndio, as causas principais de danos à vida são derivadas da fumaça e do calor gerados pelo fogo. Dessa forma, o risco de danos à vida ou a incidência de vítimas fatais ocorre nos compartimentos de incêndio ou em espaços em que já houve deflagração do fogo. Estes riscos podem ser expressos em termos do tempo requerido para atingir níveis perigosos de fumaça, temperatura e ou gases tóxicos, comparado ao tempo de escape dos ocupantes da área perigosa (SCHLEICH, et al, 1993). Dessa forma, é necessário alertar a população para o incêndio, prover saídas com escape suficiente e permitir que os ocupantes não sejam afetados pelo fogo ou fumaça enquanto efetuam a evacuação para um lugar seguro (PURKISS, 1996).

2.3.2 Segurança da propriedade

Por segurança da propriedade entende-se a proteção da estrutura do edifício e de todo seu conteúdo. Essa proteção deve ser também aplicada aos edifícios vizinhos (PURKISS, 1996). Normalmente não há riscos para o patrimônio no período anterior ao

*flashover*¹. O risco de danos estruturais pode, portanto, ser expresso em termos do tempo para ocorrer o *flashover* no ambiente do incêndio, em relação ao tempo requerido para iniciar a ação do seu processo de extinção (SCHLEICH, et al, 1993). Se o *flashover* ocorrer, todo o material combustível entrará em ignição e o controle do fogo se torna mais difícil. Dessa forma, prevenir a ocorrência do *flashover* se torna uma maneira de garantir a segurança patrimonial.

A segurança da edificação está também intimamente ligada às propriedades dos materiais empregados. Dessa forma, o comportamento ao fogo dos materiais de construção empregados, depende não somente de sua natureza, como de sua aplicação.

2.3.3 Severidade do incêndio e risco de conflagração

Segundo SILVA (2001) e SCHLEICH, et al (1993), a probabilidade de maior ocorrência de um incêndio, assim como sua intensidade, duração e risco de conflagração estão associados a:

- Atividade desenvolvida no edifício, propriedades térmicas dos materiais e quantidade de material combustível – tecnicamente denominada carga de incêndio;
- Tipologia do edifício – número de pavimentos, área e compartimentação e condições de ventilação;
- Sistemas de segurança contra incêndio, denominados de proteção ativa.

¹ A definição e aspectos do *flashover* são apresentados no Capítulo 3.

QUADRO 2.1 - Fatores e influências sobre a severidade do incêndio, a segurança da vida e a segurança da propriedade.

Fatores	Influência na:		
	Severidade do incêndio	Segurança da vida	Segurança do patrimônio
Tipo, qualidade e distribuição da carga de incêndio.	A temperatura máxima de um incêndio depende da quantidade, tipo e distribuição do material combustível no edifício.	O nível de esfumaçamento, toxicidade e calor dependem da quantidade, tipo e distribuição do material combustível no edifício.	O conteúdo do edifício é consideravelmente afetado por incêndios de grandes proporções.
Características da ventilação do compartimento	Em geral, o aumento da oxigenação faz aumentar a temperatura do incêndio e diminuir sua duração.	A ventilação mantém as rotas de fuga livres de níveis perigosos de esfumaçamento e toxicidade.	A ventilação facilita a atividade de combate ao incêndio por evacuação da fumaça e dissipação dos gases quentes.
Compartimentação	Quanto mais isolantes forem os elementos de compartimentação (pisos e paredes), menor será a propagação do fogo para outros ambientes, mas o incêndio será severo no compartimento.	A compartimentação limita a propagação do fogo, facilitando a desocupação da área em chamas para áreas adjacentes.	A compartimentação limita a propagação do fogo, restringindo as perdas.
Resistência ao fogo das estruturas	A resistência ao fogo das estruturas de aço, por serem incombustíveis, não afeta a severidade do incêndio. Às vezes o desmoronamento de parte da edificação (coberturas, por exemplo) aumenta a oxigenação e reduz a duração do incêndio.	A resistência ao fogo das estruturas tem pequeno efeito na segurança à vida em edifícios de pequena altura ou área, por serem de fácil desocupação. No caso de edifícios altos é essencial prever a resistência ao fogo, indicada na legislação ou em normas, para garantir a segurança ao escape dos ocupantes, às operações de combate e à vizinhança.	A resistência ao fogo dos elementos estruturais é fundamental para garantir sua estabilidade. Geralmente, o custo do conteúdo supera o custo da estrutura, mas o colapso estrutural pode trazer consequências danosas às operações de combate ou à vizinhança. Nesse caso há imposições legais ou normativas de resistência. Se o risco for mínimo, a verificação de resistência pode ser dispensada.
Rotas de fuga seguras		Rotas de fuga bem sinalizadas, desobstruídas e seguras estruturalmente são essenciais para garantir a evacuação e dependem do tipo de edificação. Em um edifício industrial, térreo, aberto lateralmente, a rota de fuga é natural. Em um edifício de múltiplos andares, podem ser necessários escadas enclausuradas, elevadores de emergência, etc.	
Reserva de água	Água e disponibilidade de pontos de suprimento são necessárias para extinção do incêndio, diminuindo os riscos de propagação e seus efeitos à vida e ao patrimônio.		

(continua)

QUADRO 2.1 - Fatores e influências sobre a severidade do incêndio, a segurança da vida e a segurança da propriedade (conclusão).

Fatores	Influência na:		
	Severidade do incêndio	Segurança da vida	Segurança do patrimônio
Detecção de calor ou fumaça	A rápida detecção do incêndio, apoiada na eficiência da brigada contra incêndio e o corpo de bombeiros, reduzem o risco da propagação do incêndio.	A rápida detecção do início do incêndio, por meio de alarme, dá aos ocupantes rápido aviso da ameaça, antecipando a desocupação.	A rápida detecção do início do incêndio minimiza o risco de propagação, reduzindo a região afetada pelo incêndio.
Chuveiros automáticos	Projeto adequado e manutenção de sistema de chuveiros automáticos são internacionalmente reconhecidos como um dos principais fatores de redução do risco de incêndio, pois contribuem, ao mesmo tempo, para a compartimentação, a detecção e a extinção.		
Hidrantes e extintores	Hidrantes, extintores e treinamento dos usuários da edificação, para rápido combate, reduzem o risco de propagação do incêndio e seu efeito ao patrimônio e à vida humana.		
Corpo de Bombeiros	A presença de pessoas treinadas para prevenção e combate reduz o risco de início e propagação de um incêndio.	Além de reduzir o risco de incêndio, a brigada coordena e agiliza a desocupação da edificação.	A presença de brigada contra incêndio reduz o risco e as conseqüentes perdas patrimoniais decorrentes de um incêndio.
Projeto de engenharia de incêndio	Um projeto de engenharia de segurança contra incêndio deve prever um sistema de segurança adequado ao porte e à ocupação da edificação, de forma a reduzir o risco de início e propagação de um incêndio, a facilitar a desocupação e as operações de combate. Dessa forma, reduz a severidade do incêndio, as perdas de vidas e patrimoniais.		

FONTE: SILVA, 2001.

2.4 Medidas de segurança contra incêndio

Uma abordagem unitária para a eliminação dos riscos à vida humana e aos bens deveria ser conduzida em três frentes, a considerar de prevenção, de proteção e educativa (ROSSO, 1975). Atualmente, os recursos mais indicados para assegurar certo grau de segurança no Brasil são representados pelas normas brasileiras e instruções técnicas dos corpos de bombeiros estaduais, que atuam de maneira preventiva, inicialmente, desde a concepção projetual da edificação.

Quanto às medidas de prevenção e proteção, pode-se dividir em duas categorias: as medidas de proteção ativa e as de proteção passiva.

A proteção ativa contra incêndio é constituída por meios (equipamentos e sistemas) que precisam ser acionados, quer manual ou automaticamente, para funcionar em situação

de incêndio. Ela visa a rápida detecção do incêndio, o alerta dos usuários do edifício para a desocupação e as ações de combate com segurança. São exemplos de meios de proteção ativa: sistema de alarme manual de incêndio (botoeiras); meios de detecção e alarme automáticos de incêndio (detectores de fumaça, temperatura, raios infravermelhos, etc., ligados a alarmes automáticos); extintores, hidrantes, chuveiros automáticos (*sprinklers*), sistema de iluminação de emergência, sistemas de controle e exaustão da fumaça, etc. Por sua vez, a proteção passiva contra incêndio é constituída por meios de proteção incorporados à construção da edificação, os quais não requerem nenhum tipo de acionamento para o seu funcionamento em situação de incêndio (ONO, 2007). As medidas passivas, envolvendo o processo de prevenção do incêndio, incluem projetos elaborados corretamente e com utilização de materiais cujas características de ignição sejam perfeitamente conhecidas. A arquitetura de segurança contra incêndio se enquadra nesse tipo de proteção.

Essas medidas se configuram em quatro fases: prevenção, confinamento, combate e rescaldo. Na primeira fase, são tomadas as medidas que visam controlar a ocorrência do fogo. Na segunda, ocorrem medidas que permitem extinguir o fogo na própria fonte, ou confiná-lo em condição que assegure a incolumidade e o salvamento das pessoas, num tempo determinado. Em relação ao combate, citado como a terceira fase, é dado o processo de extinção, facilmente confundido com o fim da segunda fase. Por fim, a quarta destina-se a eliminar os possíveis focos de reavivamento do fogo, que se encontram nas cinzas, entulho e escombros (ROSSO, 1975).

Em conjunto, todas essas medidas visam manter o risco de incêndio em níveis aceitáveis (ONO, 2007). BERTO (1991) estabelece oito elementos que compõem as medidas de prevenção e proteção contra incêndio, relacionando-os às etapas de crescimento do fogo. Estas medidas podem ser observadas no Quadro 2.2.

QUADRO 2.2 – Principais medidas de prevenção e de proteção contra incêndio associados aos elementos do sistema global de segurança contra incêndio.

Elementos do sistema	Objetivos dos elementos	Requisitos funcionais que visam garantir	Principais medidas de prevenção e de proteção contra incêndio	
			Passivas	Ativas
Precauções contra o início do incêndio	Evitar danos à vida humana e reduzir danos à propriedade atingida	Não ocorrer o princípio de incêndio	<ul style="list-style-type: none"> • Determinações de projeto 	<ul style="list-style-type: none"> • Corretos dimensionamento e execução das instalações elétricas
Limitações do crescimento do incêndio		Não atingir a fase de inflamação generalizada	<ul style="list-style-type: none"> • Controle da quantidade de materiais combustíveis incorporados aos elementos construtivos. • Controle das características de reação ao fogo dos materiais e produtos incorporados aos elementos construtivos 	<ul style="list-style-type: none"> • Provisão de sistema de alarme manual • Provisão de sistema de detecção e alarme automáticos
Extinção inicial do incêndio		Extinção do incêndio antes da ocorrência da inflamação generalizada no ambiente de origem	_____	<ul style="list-style-type: none"> • Provisão de equipamentos portáteis (extintores de incêndio)
Limitação da propagação do incêndio		Não ocorrer a propagação do incêndio para outros ambientes	<ul style="list-style-type: none"> • Compartimentação vertical • Compartimentação horizontal 	<ul style="list-style-type: none"> • Provisão de sistema de extinção manual (hidrantes e mangotinhos) • Provisão de sistema de extinção automática de incêndio
Evacuação segura do edifício	Evitar danos à vida humana	Facilidade e rapidez de fuga dos ocupantes	<ul style="list-style-type: none"> • Provisão de rotas de fuga seguras e sinalização adequada 	<ul style="list-style-type: none"> • Provisão de sinalização de emergência • Provisão do sistema de iluminação de emergência • Provisão do sistema do controle do movimento de fumaça • Provisão do sistema de comunicação de emergência
Precauções contra o colapso estrutural	Evitar danos à vida humana e reduzir danos à propriedade atingida e às propriedades adjacentes	Não ocorrer a ruína parcial ou total do edifício	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência ao fogo da envoltória do edifício, bem como de seus elementos estruturais 	_____

(continua)

QUADRO 2.2 – Principais medidas de prevenção e de proteção contra incêndio associados aos elementos do sistema global de segurança contra incêndio (conclusão).

Elementos do sistema	Objetivos dos elementos	Requisitos funcionais que visam garantir	Principais medidas de prevenção e de proteção contra incêndio	
			Passivas	Ativas
Precaução contra a propagação do incêndio entre edifícios	Evitar danos às propriedades adjacentes	Não ocorrer a propagação do incêndio entre edifícios	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência ao fogo da envoltória do edifício, bem como de seus elementos estruturais • Distanciamento seguro entre edifícios 	—
Rapidez, eficiência e segurança das operações de combate e resgate	Evitar danos à vida humana e reduzir danos à propriedade atingida e às propriedades adjacentes	Rapidez, eficiência e segurança no combate ao incêndio e no resgate das vítimas	<ul style="list-style-type: none"> • Provisão de meios de acesso dos equipamentos de combate a incêndio e sinalização adequada 	<ul style="list-style-type: none"> • Provisão de sinalização de emergência • Provisão do sistema de iluminação de emergência • Provisão do sistema do controle do movimento de fumaça

FONTE: BERTO, 1991.

2.4.1 Regulamentações prescritivas e *performance-based* (baseadas em desempenho)

A segurança contra incêndio se fundamenta em regulamentações que garantem que o nível mínimo de segurança seja exigido e atendido. Historicamente, essas regulamentações são de caráter prescritivo, definidas por parâmetros rígidos e requisitos específicos, que acabam por não permitir soluções alternativas (ONO, 2007). Dessa forma, oferecem pequena ou nenhuma oportunidade aos projetistas de gerarem uma engenharia racional em favor da segurança contra o fogo (BUCHANAN, 2001). O desenvolvimento tecnológico permite hoje a adoção de novos materiais e sistemas construtivos, novas alternativas e soluções técnicas, que não estão contempladas nos tradicionais códigos prescritivos.

Atualmente, a questão das regulamentações baseadas em desempenho (*performance-based codes*) vem sendo discutida entre os profissionais da segurança contra incêndio de todo o mundo. Essas regulamentações permitem ao projetista usar qualquer estratégia de segurança contra incêndio que pretender, de maneira a racionalizar seu projeto às

reais necessidades e imposições encontradas na edificação. Segundo BUCHANAN (2001), 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 da edificação.

Na Figura 2.2 é apresentado o quadro de processo de projeto de segurança contra incêndio em edificações, baseado nas regulamentações de desempenho, que permite realizar um projeto específico para a edificação a ser analisada.

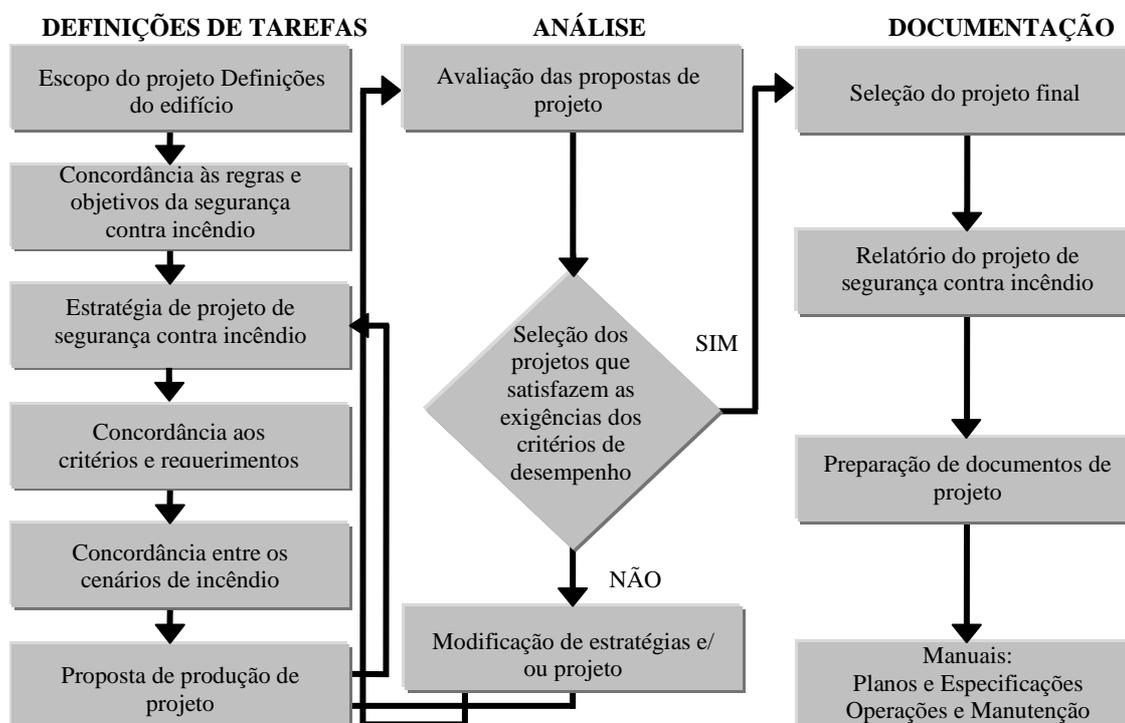


FIGURA 2.2 - Processo de projeto de segurança contra incêndio baseado nas regulamentações de desempenho.

FONTE: CIB W014, apud SFPE *Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection Analysis and Design*.

2.5 Estatísticas do incêndio

Este item apresenta alguns dados estatísticos de incêndios em edificações residenciais com o propósito de situar e justificar o tema deste trabalho, assim como reforçar a necessidade de um banco de dados preciso, principalmente em Minas Gerais.

Os dados utilizados foram obtidos em pesquisas realizadas em bibliografia internacional, apontando informações do Reino Unido e Estados Unidos, e nacional, dos estados de São Paulo e Minas Gerais. Desses últimos, São Paulo apresenta-se como precursor no estudo de segurança contra incêndio no país e palco do objeto de estudo deste trabalho; e Minas Gerais como um estado em propulsão nesses estudos, e com o qual este trabalho pretende contribuir mais precisamente.

2.5.1 Natureza dos incêndios

Nota-se que a aplicação dos conceitos de segurança contra incêndio e o material constituinte da edificação são fatores preponderantes para a incidência de incêndio e a determinação de sua natureza.

Como pode ser verificado na Figura 2.3, nos Estados Unidos a maior incidência de incêndio ocorre em edificações. Isso decorre, na sua maioria, da elevada flamabilidade da madeira, que é usada frequentemente como material construtivo e mais notadamente no interior dos estados (NFPA, 2007).

No Reino Unido verifica-se um quadro inverso (Figura 2.4). Pode-se inferir que a justificativa se apresenta na elevada aplicação dos requisitos de segurança contra incêndio, assim como uma maior rigorosidade na aplicação dos códigos normativos.

No Brasil, a exemplo de São Paulo, os incêndios em edificações se encontram em terceiro lugar no quadro da natureza dos incêndios (Figura 2.5). A justificativa para o

percentual apresentado se deve à recente preocupação com a segurança contra incêndio em edifícios, assim como uma cultura de prevenção e de projeto pouco estabelecidas.

No contexto das edificações, é possível apresentar a ocorrência dos incêndios de acordo com sua classificação. A Figura 2.6 permite inferir sobre a importância a ser atribuída às edificações residenciais, em função de seu elevado valor percentual na ocorrência de incêndios, comparativamente às demais edificações.

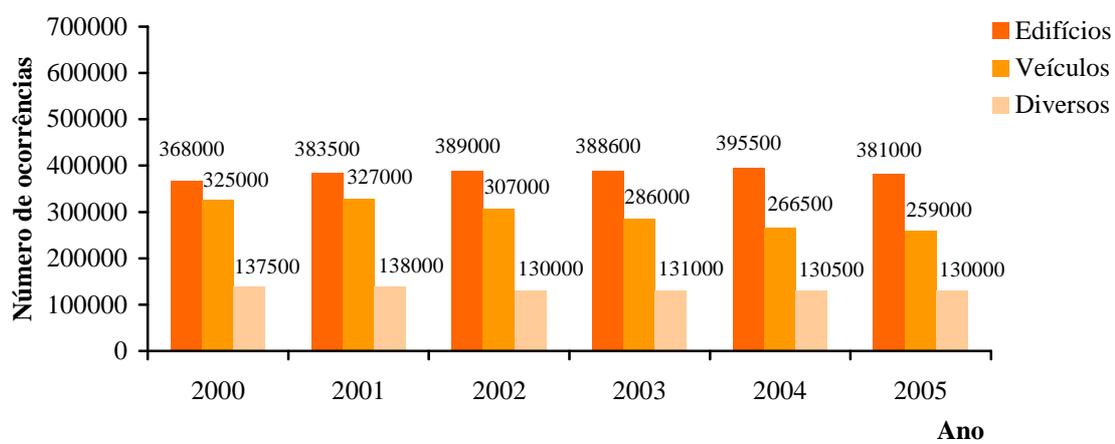


FIGURA 2.3 - Natureza dos incêndios nos Estados Unidos, de 2000 a 2005.

FONTE: NFPA, 2007

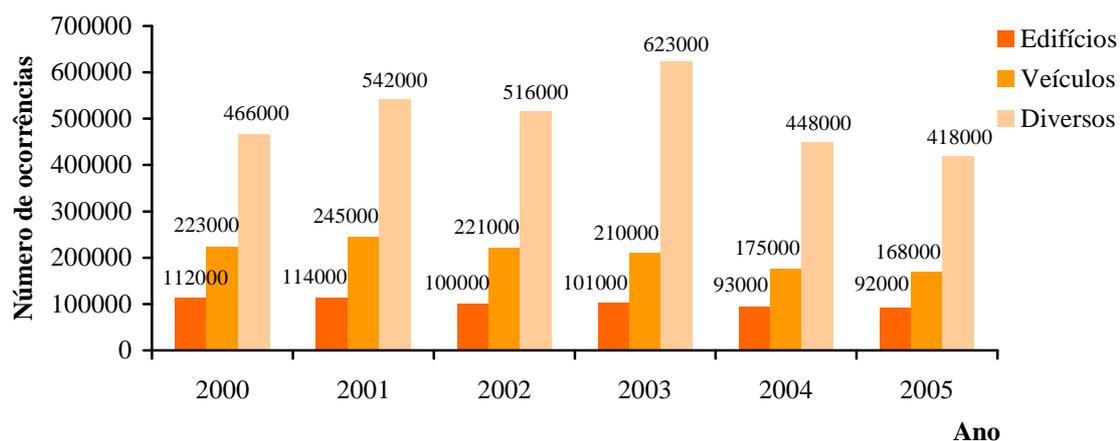


FIGURA 2.4 - Natureza dos incêndios no Reino Unido (2000 a 2005).

FONTE: *Fire Statistics, United Kingdom*, 2005.

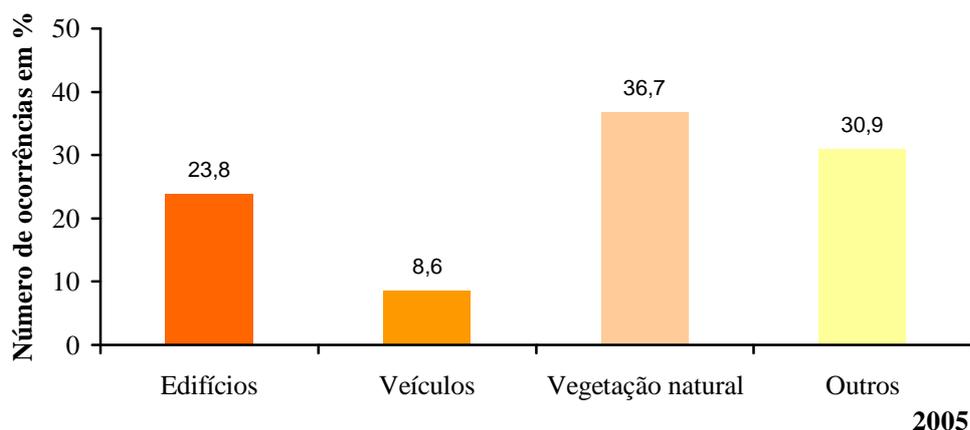


FIGURA 2.5 - Natureza dos incêndios em São Paulo - geral (2005).

FONTE: Adaptado de Anuários Estatísticos de São Paulo, 2005.

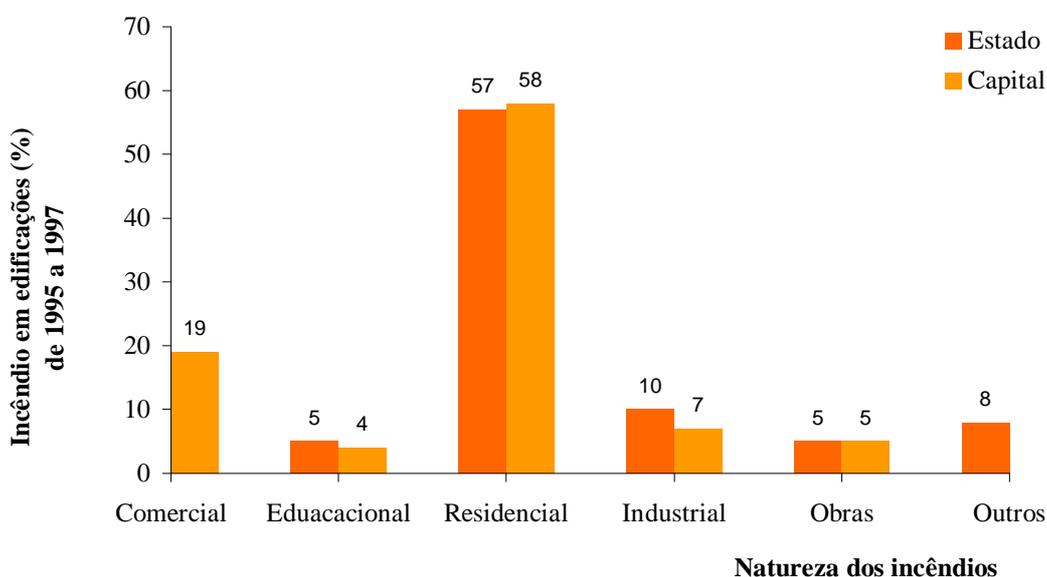


FIGURA 2.6 - Natureza dos incêndios em edifícios em São Paulo (2005).

FONTE: Adaptado de Anuários Estatísticos de São Paulo, 2005.

A Figura 2.7 indica, de maneira mais detalhada, a natureza dos incêndios em edifícios residenciais por tipo de ocupação em São Paulo e Minas Gerais. Vale ressaltar que, pela não padronização dos documentos entre os estados, em que as ocupações são classificadas diferentemente em cada um, fez-se uma correlação entre as tipologias apresentadas para tornar possível a análise comparativa. Ressalta-se também, que estes dados se constituem a única informação estatística do banco de dados do estado mineiro.

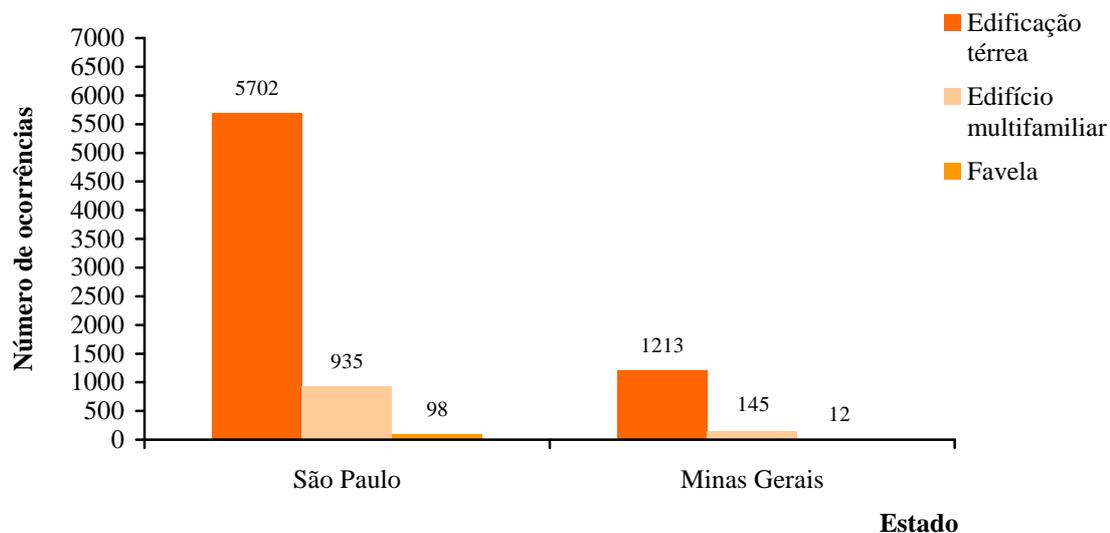


FIGURA 2.7 - Natureza dos incêndios por ocupação em São Paulo e Minas Gerais (2005).

FONTE: Adaptado de Anuários Estatísticos de São Paulo (2005) e CBMMG (2005).

Conforme a Tabela 2.2, a relação percentual de ocorrências de incêndios em São Paulo e Minas Gerais possui valores próximos entre si, embora a ocorrência no primeiro estado seja quantitativamente maior.

TABELA 2.2 - Relação de ocorrências de incêndio em Edifícios habitacionais entre São Paulo e Minas Gerais (2005).

Ocupação	Ocorrência de incêndios (%)	
	São Paulo	Minas Gerais
Edificação térrea	93,7	88,6
Edificação multifamiliar	4,7	10,6
favela	1,6	0,8

FONTE: CBMMG e CBPMESP, 2005.

2.5.2 Locais de incêndio em edificações e causas possíveis

A Figura 2.8 apresenta, em percentuais, as ocorrências dos locais de incêndios em residências em São Paulo, Estados Unidos e Reino Unido no ano de 2005. Na Figura 2.9, são apontadas as principais causas de incêndio em residência.

Como se pode perceber, a cozinha se mantém como o local mais crítico em uma residência, associado principalmente à displicência ao cozinhar. Em seguida estão os quartos e sala de estar, onde o descuido com velas e cigarros, assim como o superaquecimento de eletrodomésticos e instalação elétrica inadequada, formam um quadro típico de causas de incêndios. Fogos em lugares como quintais e pátios, pela ignição de lixo combustível ou outros materiais armazenados em espaço aberto, são o resultado normalmente de brincadeiras de crianças, vandalismo ou outra causa. Fatores como imprudência e desconhecimento acerca de métodos preventivos e de segurança podem se apresentar como justificativa a esse cenário.

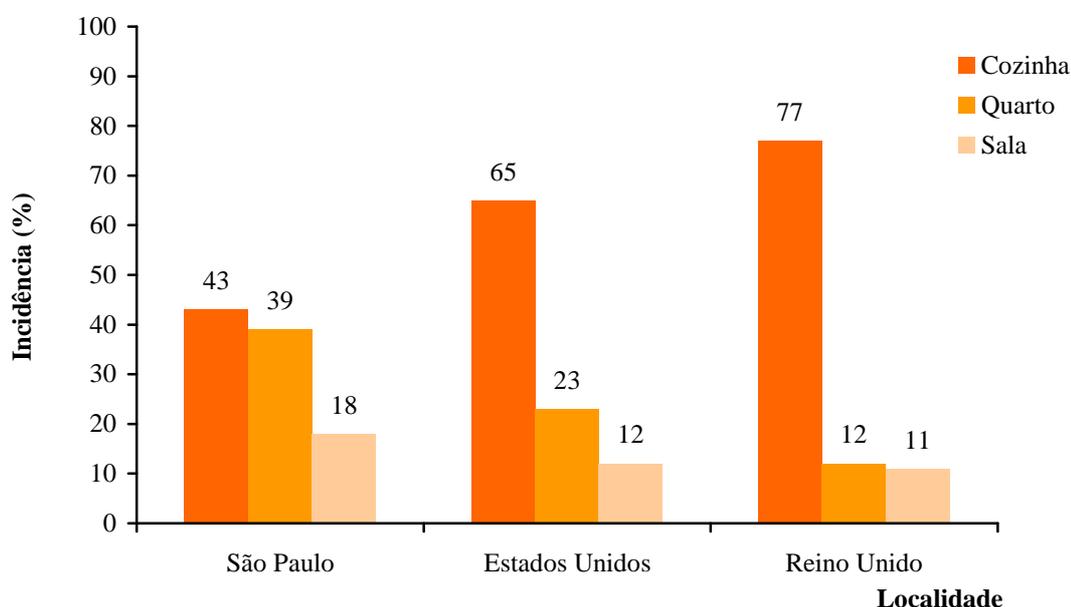


FIGURA 2.8 – Locais de incêndio em residências em São Paulo, Estados Unidos e Reino Unido (2005).

FONTE: Adaptado de Anuários Estatísticos de São Paulo (2005), *Fire Statistics, United Kingdom*, (2005) e NFPA (2007).

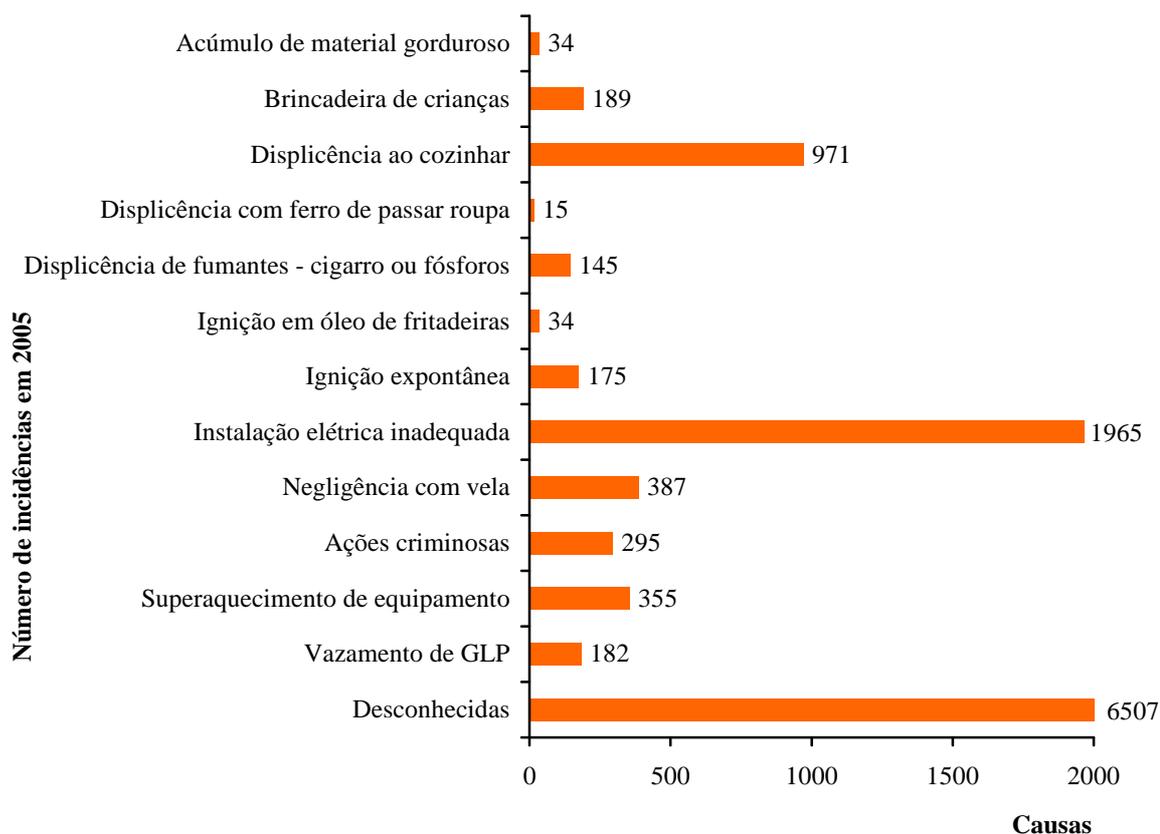


FIGURA 2.9 – Causas possíveis de incêndio em edificação em São Paulo (2005).

FONTE: Anuários Estatísticos de São Paulo (2005).

2.5.3 Vítimas de incêndio

A Figura 2.10 retrata o número de vítimas de incêndio por ocupação em São Paulo. As Figuras 2.11 e 2.12, respectivamente, apresentam o número de vítimas em função da idade e sexo, para ocorrências em São Paulo e no Reino Unido.

Os dados contidos nos Anuários Estatísticos de São Paulo, fornecidos pelo Corpo de Bombeiros, contemplam registros somente de vítimas durante o incêndio. Dos dados disponíveis, é possível concluir que a maioria das vítimas ocorreu durante a noite, entre homens adultos e crianças desacompanhadas, com idade inferior a 12 anos. Em favelas, em decorrência da ausência dos pais durante o trabalho, as crianças são as principais vítimas do fogo, por estarem normalmente trancadas em casa durante o dia (ONO, 2005).

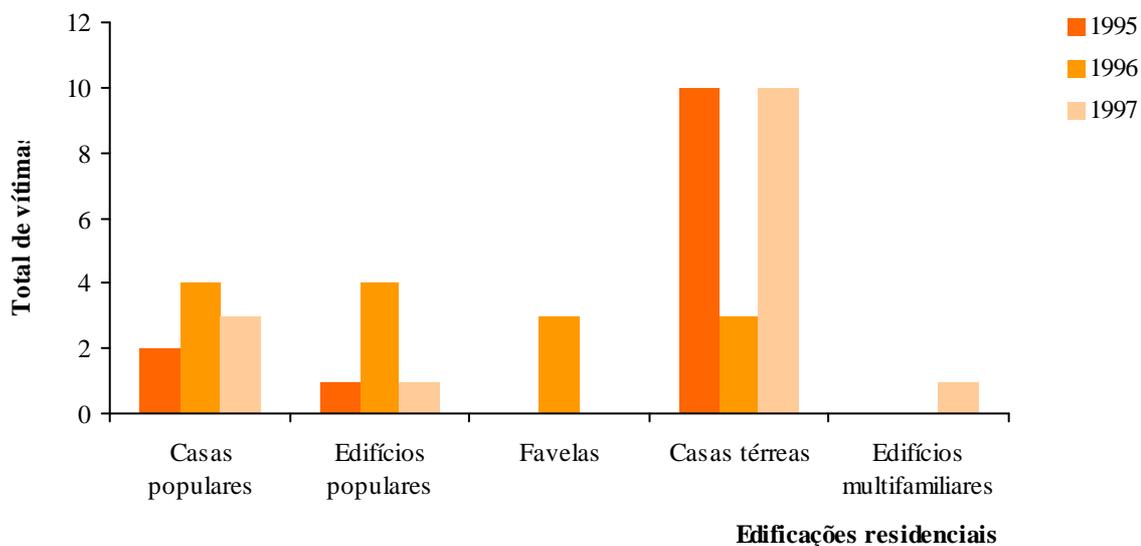


FIGURA 2.10 – Vítimas fatais de incêndios residenciais em São Paulo (1995 a 1997).

FONTE: ONO (2005).

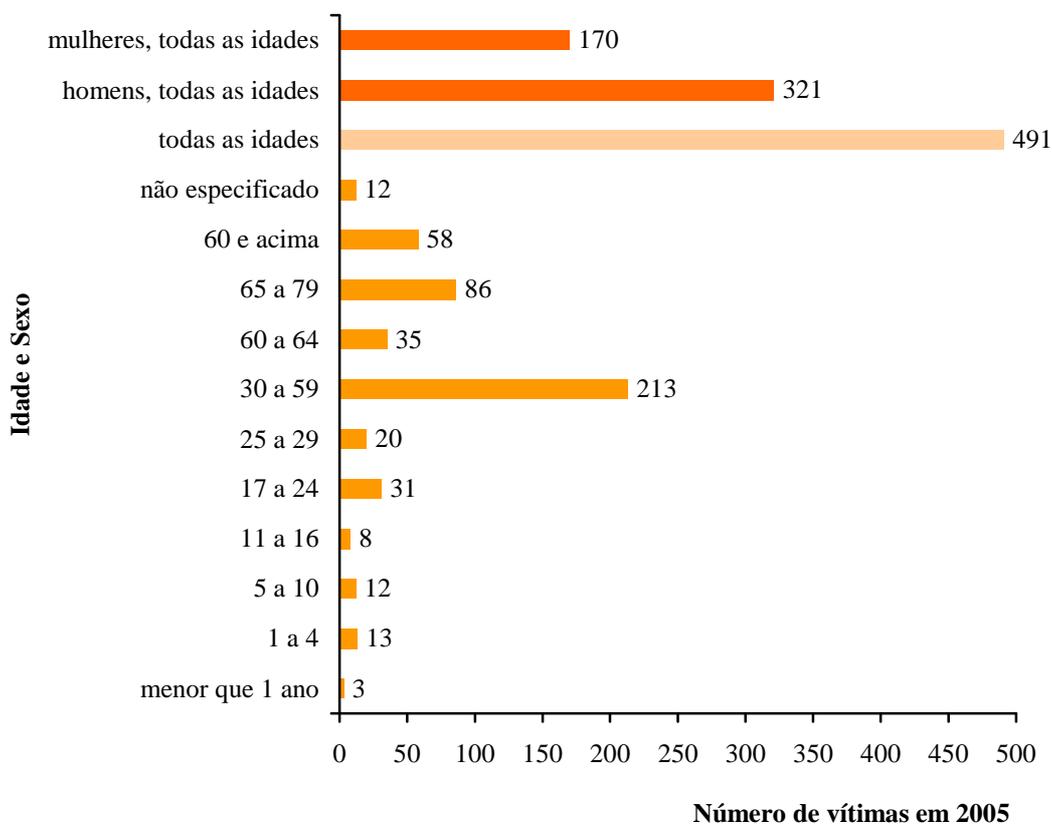


FIGURA 2.11 – Vítimas fatais de incêndios residenciais no Reino Unido (2005).

FONTE: *Fire Statistics, United Kingdom* (2005)

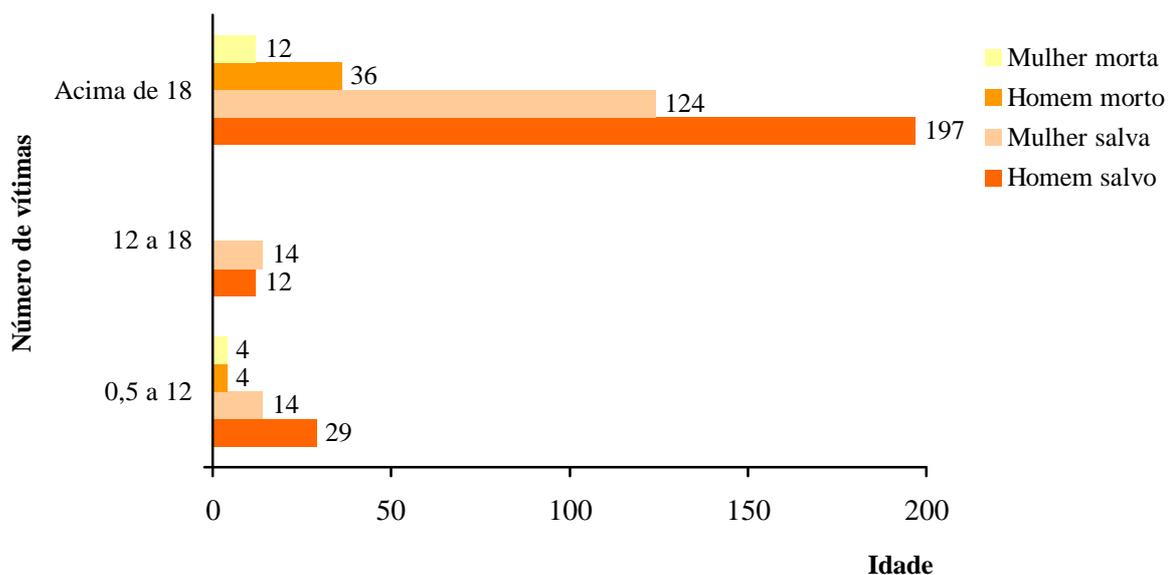


FIGURA 2.12 – Vítimas fatais de incêndios residenciais em São Paulo (2005).

FONTE: Anuários Estatísticos de São Paulo (2005).

2.5.4 Horário de ocorrência dos incêndios

A análise da ocorrência de incêndios ao longo dos meses ou dias das semanas apresenta uma variação muito pequena, segundo estudo de ONO (2005). Por outro lado, o perfil de ocorrências de incêndio durante as horas do dia apresenta uma variação considerável, de acordo com as atividades desenvolvidas dentro das casas. A Figura 2.11 apresenta o quadro dos horários das ocorrências na cidade de São Paulo em 2005.

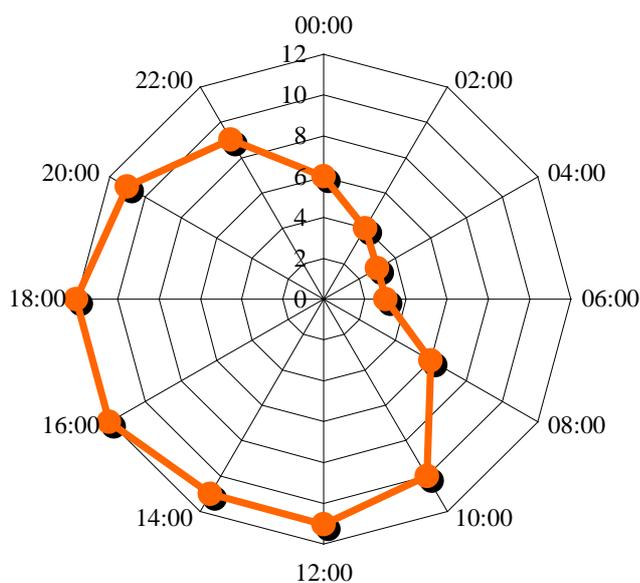


FIGURA 2.13 – Horário de ocorrência dos incêndios em residência em São Paulo (2005).

FONTE: ONO (2005).

Segundo as estatísticas de incêndio realizadas no Reino Unido em 2005, a maior incidência de incêndios em habitação ocorreu entre 12h e 17h59min (37%), causados por negligência, como cigarros e atividades de cozinha. No entanto, a maioria das vítimas de incêndio acidental ocorreu entre 18h e 23h59min (32%). Os incêndios de causas suspeitas, como atos criminosos e incendiários, se realizaram principalmente entre 18h e 23h59min (41%), mas a maioria das vítimas ocorreu entre 0h e 5h59min (37%). Entre as 6h e 11h59min, notou-se o menor número de vítimas por negligência ou ignição acidental. A Figura 2.14 demonstra os dados supracitados.

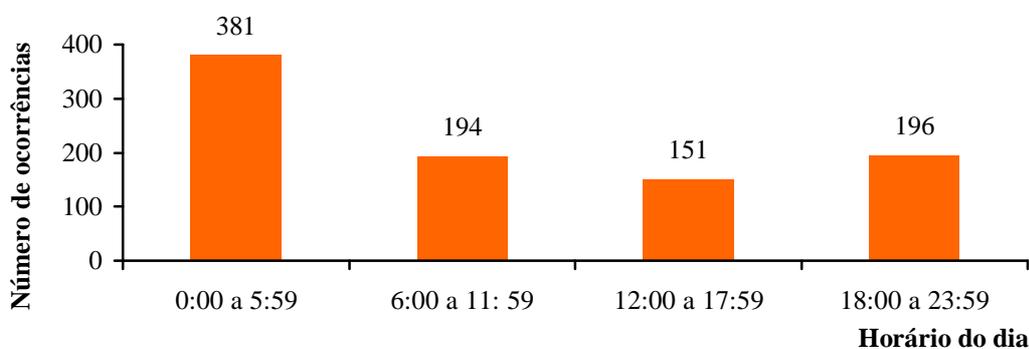


FIGURA 2.14 – Horário de ocorrência dos incêndios no Reino Unido (2005).

FONTE: *Fire Statistics, United Kingdom*, (2005)

2.5.5 Causas de mortes

A causa mais comum de morte em um incidente de incêndio é a intoxicação por gás ou fumaça. Segundo as estatísticas de incêndio realizadas em 2005 no Reino Unido, 216 pessoas morreram desta causa, correspondendo a 44% do total. As mortes por ação conjunta de intoxicação e queimaduras corresponderam a 95 (19%), e 110 (22%) somente devido a queimaduras. Estes dados podem ser verificados na Figura 2.15.

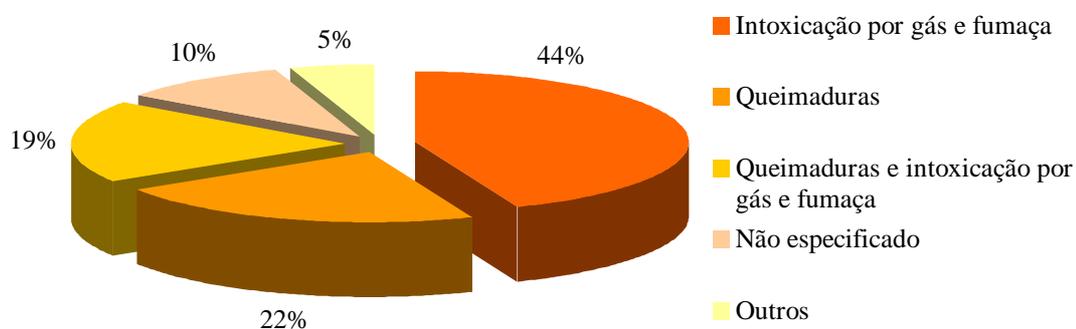


FIGURA 2.15 – Causas de morte por incêndio no Reino Unido (2005).

FONTE: *Fire Statistics, United Kingdom, (2005)*

3

INCÊNDIO EM COMPARTIMENTOS

3.1 Definição

Para o estudo da segurança contra incêndio em edifícios, torna-se imprescindível a compreensão da dinâmica e comportamento do incêndio em compartimentos. Para tanto, aborda-se os principais assuntos relacionados a este tema.

De acordo com a *Society of Fire Protection Engineers, SFPE (2002)*, incêndio em compartimento é definido como o incêndio em ambientes fechados, comumente definidos como cômodos nos edifícios.

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 14432:2001, compartimento se define como “edificação, ou parte dela, compreendendo um ou mais cômodos, espaços ou pavimentos, construídos para evitar a propagação do incêndio de dentro para fora de seus limites, incluindo a propagação entre edifícios adjacentes, quando aplicável”.

No que tange ao EUROCODE 1, PARTE 1-2 (2002), compartimento de incêndio define-se como um espaço dentro de um edifício, estendendo para um ou mais

pavimentos, delimitado por elementos de separação, de forma a evitar a deflagração do fogo para além do compartimento durante a ocorrência do incêndio.

Para a verificação da isenção do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) na edificação analisada nesta pesquisa, esse entendimento será de grande importância, principalmente no que se refere às análises computacionais, fundamentadas nessa temática do incêndio.

3.2 Modelos de incêndio

Segundo SILVA (2001), a principal característica de um incêndio é a curva que fornece a temperatura dos gases em função do tempo de incêndio. Para tanto, são apresentados dois modelos de incêndio: o incêndio-padrão e o incêndio natural.

No modelo de incêndio-padrão, ou curvas nominais, segundo o EUROCODE 1 PARTE 1-2 (2002), é admitido que a temperatura dos gases produzidos seja sempre ascendente com o tempo, independente das características do ambiente e da carga de incêndio (Figura 3.1). O caráter simplificado desse modelo se expressa pela utilização de tempos padronizados, com a finalidade de fornecer parâmetros de projeto.

Segundo a norma ABNT NBR 14432:2001, incêndio-padrão é a elevação padronizada de temperatura em função do tempo, dada pela Equação 3.1:

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \log(8t + 1) \quad 3.1$$

Onde:

t - tempo, em minuto;

θ_g - temperatura do ambiente antes do início do aquecimento, em graus Celsius, geralmente tomada igual a 20°C;

θ_0 - temperatura dos gases, em graus Celsius, no instante t.

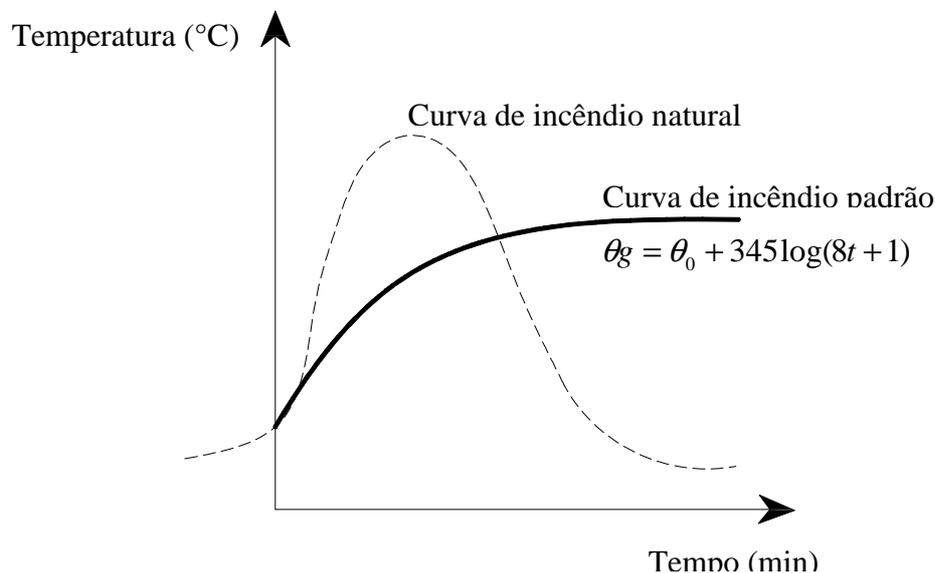


FIGURA 3.1 - Curva de incêndio-padrão.

FONTE: SILVA (2001).

O modelo de incêndio natural, ou modelo paramétrico, segundo o EUROCODE 1 PARTE 1-2 (2002), é concebido em função da parametrização dos fatores que influenciam diretamente o aumento de temperatura dos gases. Admite-se que a temperatura dos gases respeite as curvas temperatura-tempo naturais, construídas a partir de ensaios de incêndios que simulam a real situação de um compartimento em chamas (SILVA, 2001). Diferente do modelo anterior, essas curvas apresentam um ramo ascendente, relativo à fase de aquecimento, e um ramo descendente, relativo à fase do resfriamento (Figura 3.2). Dessa forma, demonstram que a temperatura dos gases que envolvem o fogo não é sempre crescente ao longo do tempo. Esse modelo de incêndio também é conhecido como modelo de incêndio compartimentado (SILVA, 2001).

Para a norma ABNT NBR 14432:2001, incêndio natural é a variação de temperatura que simula o incêndio real, função da geometria, ventilação, características térmicas dos elementos de vedação e da carga de incêndio² específica.

Os modelos computacionais de incêndio em edificações se baseiam no modelo de incêndio natural, com parâmetros de estudo baseados nos incêndios em compartimentos.

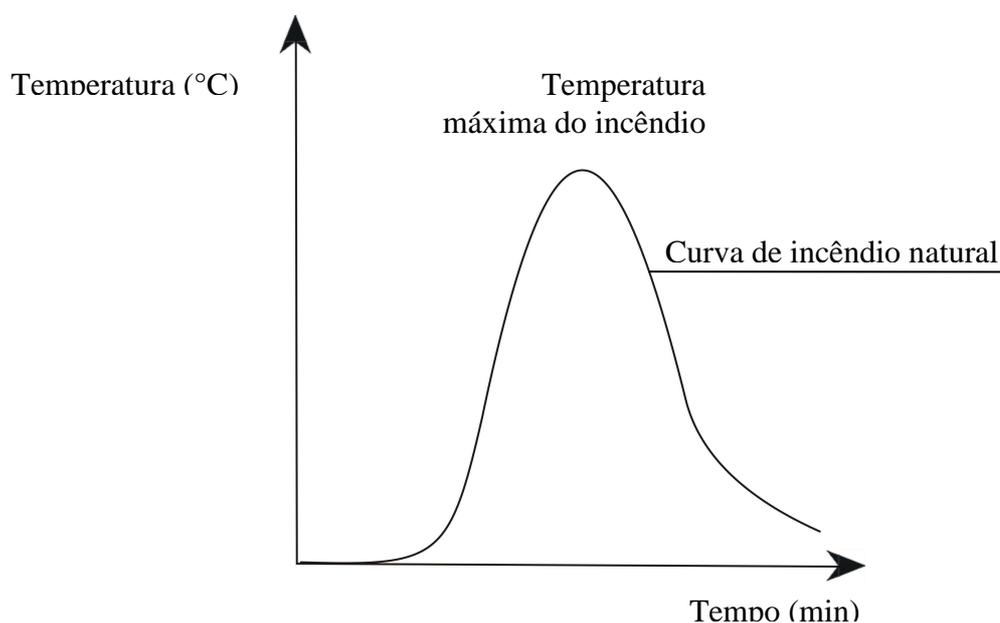


FIGURA 3.2 - Curva de incêndio natural.

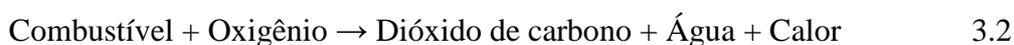
FONTE: Adaptado de SILVA (2001).

3.3 O processo de combustão

Do ponto de vista físico-químico, o incêndio é apresentado como uma reação de combustão que ocorre em cadeia. A combustão, ou fogo, é definida como sendo uma reação química exotérmica de oxidação, em que participam como reagentes os materiais combustíveis e o oxigênio, acompanhada de chamas e ou incandescência. De maneira

² Carga de incêndio será discutida no item 3.7 deste capítulo.

geral, o processo de combustão para um hidrocarboneto³ é sempre a seguinte (Equação 3.2):



A Equação 3.3 demonstra a combustão do propano.



O triângulo do fogo, como mostrado na Figura 3.3, é o conceito usado para descrever o processo do incêndio. O triângulo consiste na existência de um combustível combinando com oxigênio na reação química, para liberar energia e outros produtos químicos (QUINTIERE, 1998). Para que o fogo possa ocorrer, são necessários que seus três elementos, combustível, calor e oxigênio, estejam em presença contínua. Se não houver combustível ou oxigênio suficiente, ou houver redução de energia por extinção ou agentes retardantes, o fogo não se mantém.

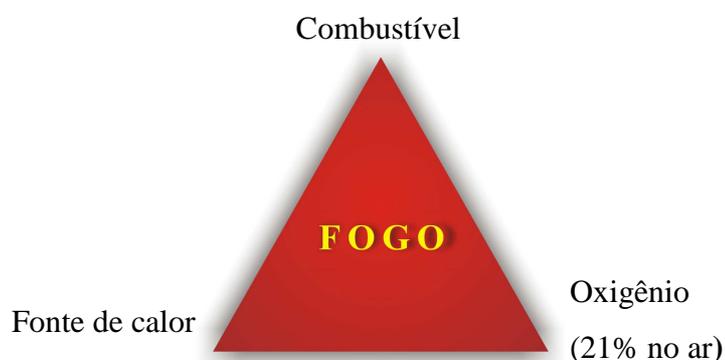


FIGURA 3.3 – Triângulo do Fogo.

Contudo, o fenômeno da combustão, como mencionado anteriormente, é uma reação que se processa em cadeia e que após a partida inicial é mantida pelo calor produzido. Essa cadeia de reações propicia a formação de elementos intermediários instáveis, que tendem a se combinar com outros elementos e a formar novas reações. Dessa forma,

³ Hidrocarbonetos são compostos orgânicos formados por átomos de carbono e hidrogênio (CALISTER, 2000).

verifica-se que a existência de um incêndio depende de quatro condições, como mostrado no *quadrilátero do fogo*, segundo GOMES (1998), na figura 3.4.



FIGURA 3.4 – Quadrilátero do Fogo.

Em função das quantidades proporcionais de combustível e de oxigênio, a reação de oxidação da combustão pode ocorrer de três maneiras distintas: combustão incompleta, combustão teoricamente completa e combustão praticamente completa. Para o objetivo deste trabalho, elas são apresentadas de maneira simplificada, como recorrente na revisão bibliográfica.

Combustão incompleta - É aquela que se realiza com insuficiência de oxigênio, ou seja, com uma quantidade de oxigênio inferior à quantidade estequiométrica para oxidar completamente a matéria combustível. O reagente irá queimar em oxigênio, mas poderá produzir inúmeros produtos. Quando um hidrocarboneto queima em oxigênio, a reação gerará dióxido de carbono, monóxido de carbono, água e vários outros compostos como óxidos de nitrogênio. A combustão incompleta é muito mais comum que a completa e produz um grande número de subprodutos.

Combustão completa - O reagente irá queimar no oxigênio, produzindo um número limitado de produtos. Quando um hidrocarboneto queima no oxigênio, a reação gerará apenas dióxido de carbono e água. Quando elementos como carbono, nitrogênio, enxofre e ferro são queimados, o resultado será os óxidos mais comuns.

Outra maneira de classificar a combustão é quanto à presença ou não de chamas:

Combustão com chama - Ocorre a queima dos gases produzidos por pirólise⁴ ou vaporização de substâncias sólidas ou líquidas, através do efeito do calor. As chamas visíveis, assim como a fumaça, evidenciam uma combustão incompleta (ROSSO, 1975). Para iniciar uma combustão por chama de líquidos e sólidos, é necessário que haja uma fonte externa de calor para aquecer o combustível, exceto no caso de líquidos inflamáveis, que apresentam o ponto de ignição abaixo da temperatura ambiente.

Combustão sem chama ou por incandescência - Corrente em combustíveis sólidos, esta combustão passa a realizar-se sem chamas. Uma vez consumidos todos os gases, por combinação direta do oxigênio com o material sólido, revela-se a incandescência (ROSSO, 1975). Essa forma de combustão constitui-se como um sério risco por dois motivos. Primeiro, em função da conversão do combustível em grandes porções de componentes tóxicos, encontrados em sua fumaça. Segundo, por esse processo de combustão não necessitar de fontes de calor muito altas para ocorrer.

Segundo o SFPE (2002), o termo combustão sem chama é descrito de maneira inapropriada ao processo de condensação de materiais orgânicos sujeitos a um fluxo externo de calor. Qualquer material orgânico, quando sujeito a um fluxo de calor suficiente, irá se degradar, se tornará gás e emitirá fumaça. Normalmente, não há nenhuma ou muito pouca oxidação nesse processo de gaseificação, tornando-o endotérmico. A esse processo, ainda segundo o SFPE, seria mais adequado denominá-lo de pirólise forçada e não combustão sem chamas.

⁴ Pirólise é a transformação de compostos ou materiais orgânicos em compostos mais simples, por efeito da temperatura (ROSSO, 1975).

3.4 Combustíveis

Combustível pode ser definido como qualquer substância capaz de produzir calor por meio da reação química da combustão, seja sólido, líquido ou gasoso. A combustibilidade de um corpo depende de sua maior ou menor possibilidade de combinar com o oxigênio, sob a ação do calor.

Todos os materiais orgânicos são combustíveis, tal como madeira, papel, tecido, óleo, solvente, plásticos, carvão, dentre outros. Os materiais inorgânicos, nas condições ambientes, não são combustíveis. Os incombustíveis se classificam como os que não entram em combustão e que não liberam gases, ou vapores inflamáveis, quando aquecidos a 750°C por 5 minutos.

3.4.1 Combustíveis sólidos

A maioria dos sólidos (naturais, orgânicos ou sintéticos) entra em ignição em resposta a uma fonte externa de calor. A queima de um combustível sólido pode ser facilitada quando ele está mais dividido e a umidade relativa do ar for muito baixa. Os corpos sólidos no processo de queima passam por três estágios: destilação, inflamação e incandescência.

A destilação é o estágio no qual ocorre o desprendimento dos gases ignicíveis, uma vez que o corpo atingiu o seu ponto de fulgor⁵. O estágio de inflamação é aquele em que surge a chama, momento em que o corpo já alcançou sua temperatura de ignição (correspondente à temperatura de inflamação) e, conseqüentemente, os gases se inflamam.

⁵ Ponto de fulgor é a menor temperatura na qual um líquido ou sólido libera vapor em quantidade suficiente para formar uma mistura inflamável. A presença de uma fonte de ignição resulta em um *flash*, que representa o início da combustão. Nessa temperatura, a quantidade de vapor não é suficiente para dar continuidade à combustão.

A incandescência é o estágio no qual ocorre o desprendimento de calor provocado pelas chamas, fazendo com que a temperatura do corpo se eleve, dando condições para a realização da combustão. Nesse estágio, caracteriza-se o poder calorífico do corpo.

Os combustíveis sólidos mais encontrados na maior parte das edificações residenciais, comerciais e industriais são compostos de madeira, papel, algodão, seda, lã e borracha.

3.4.2 Combustíveis líquidos

Segundo a norma ABNT NBR 7505:2000, os combustíveis líquidos se dividem em líquidos inflamáveis, combustíveis e instáveis ou reativos. Os inflamáveis são os líquidos que possuem ponto de fulgor inferior a 37,8°C e os combustíveis igual ou superior a 37,8°C. Os instáveis ou reativos são os líquidos que se tornam auto-reativos por efeito de variação de temperatura e pressão, ou de choque mecânico, na estocagem ou no transporte e, em consequência, se decompõem, polimerizam ou vêm a explodir.

Esta distinção está relacionada à facilidade com que estes têm de liberar vapor, sendo que os líquidos inflamáveis têm a capacidade elevada. Todavia, qualquer líquido combustível suficientemente aquecido torna-se inflamável.

3.4.3 Combustíveis gasosos

Os corpos gasosos entram em processo de queima mais facilmente, já que não passam pelo processo de transformação aos quais líquidos e sólidos estão sujeitos. A combustão dos gases é direta, dependendo fundamentalmente da concentração com que se mistura com o ar. Para que ocorra a combustão, é necessário que o combustível e o oxigênio se misturem em um percentual volumétrico ideal na presença de uma fonte de ignição.

Para os gases, por apresentarem grande mobilidade no ar, a ventilação no ambiente torna-se uma variável importante, já que determina a maior ou menor mobilidade dos

corpos gasosos. A temperatura do ambiente também influencia a mobilidade, pois altera a densidade dos gases e vapores. O aumento significativo da temperatura, que ocorre em situações de incêndios, forma importante corrente de convecção.

3.5 Transferência de calor

Para o entendimento do comportamento do incêndio, é necessário que as três formas de transferência de calor sejam apresentadas: condução, convecção e radiação (ver Figuras 3.5 e 3.6).

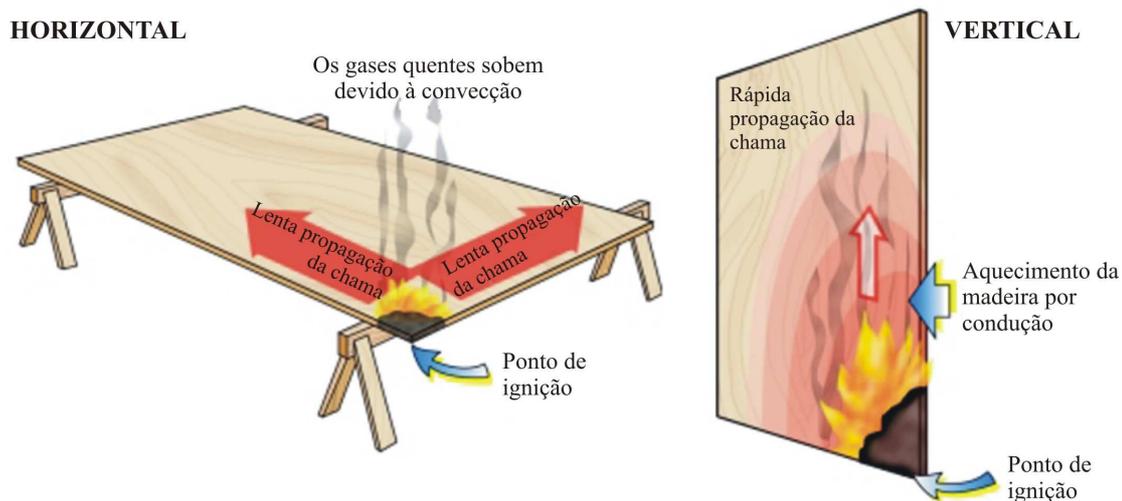


FIGURA 3.5 – Ação da transferência de calor por condução e convecção em madeira, para duas posições diferentes.

FONTE: *Essential of Fire Fighting* (2001).

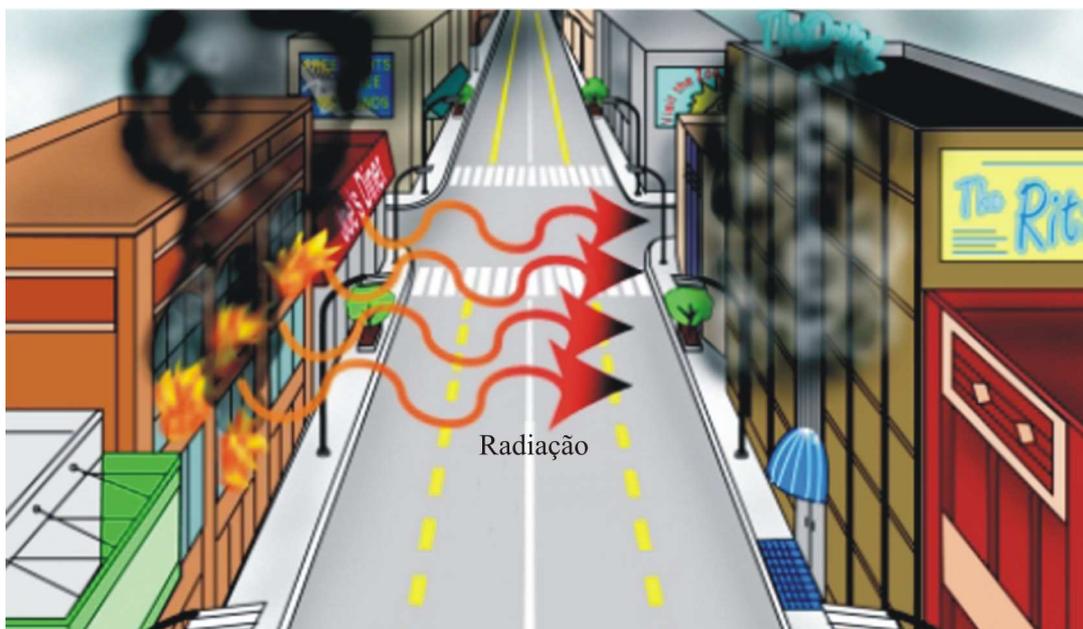


FIGURA 3.6 – Transferência de calor entre edifícios por radiação térmica.

FONTE: *Essential of Fire Fighting* (2001).

3.5.1 Condução

A transferência de calor por condução determina a taxa de fluxo de calor através dos materiais sólidos. Dessa forma, é importante mencionar sobre a quantidade de calor existente em um material, que é caracterizada pela capacidade deste trocar calor por condução.

O calor, Q , de um material e sua temperatura estão diretamente ligados. Quando o calor contido em um grama de água a 0°C é aumentado para uma caloria, sua temperatura aumenta um grau Celsius. O calor contido em um material é associado à Energia Cinética causada pela vibração das partículas atômicas do material. Nos metais, onde existem elétrons livres (estes elétrons não são localizados sobre um átomo particular, mas livres para mover através da rede cristalina), parte do calor contido no interior do material sólido é associada a esses elétrons.

Como uma regra geral, materiais que são bons condutores térmicos são também bons condutores elétricos. Isso acontece já que a transmissão de calor pode ocorrer como um resultado das interações envolvendo elétrons livres, cujo movimento constitui uma corrente elétrica quando uma voltagem é aplicada. Em materiais isolantes, ou de pior condutividade, o calor é conduzido pelas vibrações mecânicas de suas moléculas, o que é um processo muito menos eficiente (BUCHANAN, 2001). Dessa maneira, a transferência de calor por condução se apresenta como um importante fator no processo de combustão, assim como na resistência ao fogo de elementos estruturais e de vedação.

O gradiente de temperatura entre dois corpos que apresentam contato físico, ou em um mesmo objeto, leva à transferência de calor do ponto de maior para o de menor temperatura. Dessa forma, diz-se que a energia transfere-se por condução e que a taxa de transferência de calor por unidade de área é proporcional ao gradiente de temperatura, conforme a equação de Fourier, datada de 1812 (Equação 3.4).

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad 3.4$$

Onde:

q - taxa de transferência de calor através da área A (W);

A - área de superfície através da qual o calor é transferido (m²);

k_c - condutividade térmica do sólido (W/m.k);

$\frac{dT}{dx}$ - gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor, sendo T expresso em grau

Kelvin (K) e x em metro (m).

A Tabela 3.1 apresenta os valores típicos de propriedades térmicas de alguns materiais.

TABELA 3.1 - Propriedades térmicas de alguns materiais.

Material	Condutividade Térmica (k) (W/m.K)	Calor Específico (c) (kJ/kg.K)	Densidade (ρ) (kg/m ³)	Gradiente Térmico (α) (m ² /s)
Cobre	387	0,380	8940	$1,14 \times 10^{-4}$
Aço - temperado	45,8	0,460	7850	$1,26 \times 10^{-5}$
Tijolo comum	0,69	0,840	1600	$5,20 \times 10^{-7}$
Concreto	0,8 a 1,4	0,880	1900-2300	$5,70 \times 10^{-7}$
Vidro	0,76	0,840	2700	$3,30 \times 10^{-7}$
Placa de gesso	0,48	0,840	1440	$4,10 \times 10^{-7}$
Madeira - Carvalho	0,17	2,380	800	$8,90 \times 10^{-8}$
Madeira - Pinho	0,14	2,850	640	$8,30 \times 10^{-8}$
Amianto	0,15	1,050	577	$2,50 \times 10^{-7}$
Espuma de Poliuretano	0,034	1,400	20	$1,20 \times 10^{-6}$

Fonte: Adaptado de QUINTIERE (1998).

3.5.2 Convecção

Convecção é a transferência de calor de uma superfície sólida para e um fluido que a envolve, sejam líquidos ou gases. Apresenta-se como um fator importante na propagação da chama e no transporte de fumaça e gases quentes para o teto ou fora da janela do compartimento de incêndio. Numa edificação, o ar quente se expande e se eleva. Por essa razão, o fogo que se propaga por convecção se faz, normalmente, em direção ascendente. As correntes de convecção geralmente são a causa do movimento de calor de um piso a outro, assim como de uma área a outra. A propagação do incêndio

por corredores, escadas e dutos, entre paredes e através das fachadas é causada principalmente por convecção de correntes quentes.

A transmissão de calor por convecção exerce um papel muito importante durante o incêndio, uma vez que esta efetua o transporte de uma quantia considerável de energia química libertada durante o fogo ao ambiente, através do movimento dos gases quentes (SFPE, 2000). Este movimento pode ser induzido naturalmente pelo próprio fogo (gases quentes sobem e ocorre entrada de ar frio no ambiente) ou por uma fonte externa ao fogo, como o vento. Tanto a convecção natural como a forçada podem ocorrer simultaneamente, resultando em um modo integrado de transferência de calor. No entanto, para a ciência do incêndio, o estudo da transmissão de calor por condução natural é mais usual.

Segundo KRAUS e BEJAN (2003), para superfícies verticais, a condução pode ser expressa de acordo com a Equação 3.5, que determina a relação entre a taxa de transferência de calor, q , e a diferença de temperatura entre a superfície do material e o ambiente.

$$q = hA\Delta T \quad 3.5$$

Onde:

q - taxa de transferência de calor através da área A (W);

h_c - coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m².°C);

A - área de superfície através da qual o calor é transferido (m²);

ΔT - variação de temperatura.

O coeficiente da transferência de calor por convecção h é conhecido por ser uma função das propriedades do fluido (condutividade térmica, densidade e viscosidade), dos parâmetros da corrente (velocidade e natureza da corrente) e da geometria da superfície (dimensões e ângulo em relação à corrente), além de ser função de ΔT . Valores típicos do coeficiente h são dados na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 - Coeficientes de transferência de calor por convecção.

Convecção Natural	h (W/m ² °C)	Convecção Forçada	h (W/m ² °C)
Placa vertical em ar - 0,3 m de altura	4,5	Ar a 2 m/s sobre placa quadrada de 0,2 m de lado.	12
Cilindro horizontal em ar - 5cm de diâmetro	6,5	Ar a 35 m/s sobre placa quadrada de 0,75 m de lado	75
Cilindro horizontal em água - 2cm de diâmetro	890	Água a 0,5kg/s escoando num tubo de 2,5 cm de diâmetro	3500

Fonte: BEJAN, A; KRAUS, A. D (2003).

3.5.3 Radiação

Radiação se configura como a transferência de energia por ondas eletromagnéticas que podem se conduzir no vácuo, ou através de gás. Esse fenômeno é extremamente importante nos incêndios em função de ser o principal mecanismo de transferência de calor das chamas para a face dos materiais combustíveis, da fumaça para os objetos do edifício e do edifício de incêndio para outro. Percebe-se que o processo de conflagração do incêndio se deve, principalmente, a essa forma de transmissão de calor. Sabe-se que a transferência de calor por radiação é o modo dominante em chamas com características de comprimento de onda superiores a 0,2m, enquanto a convecção é mais significativa em chamas menores (SFPE, 2002).

Entre os gases envolvidos nesse processo, os de maior importância no estudo de segurança contra incêndio são o vapor de água e o dióxido de carbono, por apresentarem comprimento de onda entre 1 e 100 μm . Alguns materiais com base no petróleo, como os plásticos, envolvem o aquecimento de gases hidrocarbonetos, que são fortemente absorvidos.

A radiação incorpora da luz visível até a infravermelha, o que corresponde a comprimentos de onda variando entre 0,4 e 100 μm . Quando um corpo é aquecido e sua temperatura aumenta, este perde calor parcialmente por convecção (caso de um fluido

tal como o ar) e parcialmente por radiação. Quando a temperatura aumenta, mudanças de cores são observadas, as quais podem ser usadas como um guia primário para a temperatura (veja Figura 3.7 e Tabela 13). Essas mudanças são referentes à variação na distribuição do espectro com a temperatura.

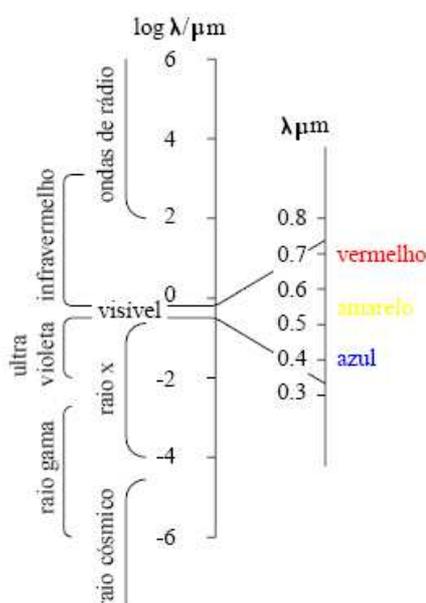


FIGURA 3.7 – Espectro eletromagnético.

FONTE: Adaptado de DRYSDALE (1999).

TABELA 3.3 - Cores visíveis de objetos aquecidos.

Temperatura °C	Aparência
550	Avermelhado
700	Vermelho
900	Vermelho cereja
1100	Laranja
1400	Branco

FONTE: DRYSDALE (1999).

Estudos termodinâmicos mostram que um emissor ideal (um corpo negro, por exemplo) emite energia numa taxa proporcional à quarta potência da temperatura absoluta do corpo. Quando dois corpos trocam calor por radiação, a troca líquida de calor é

proporcional à subtração em T^4 , conforme a Equação 3.6, válida somente para corpos negros.

$$q = \sigma A(T_1^4 - T_2^4) \quad 3.6$$

Onde:

q - taxa de transferência de calor sobre a área A (W);

σ - constante de proporcionalidade ou constante de Boltzmann, que vale $5,669 \times 10^{-8}$ (W/m².K⁴);

A - área de superfície através da qual o calor é transferido (m²);

T - Temperatura (°C).

O corpo negro recebe esta denominação por possuir superfície negra tal como um pedaço de metal coberto por fuligem. Outros tipos de superfícies pintadas (ou mesmo uma placa metálica polida, por exemplo) não emitem tanta energia quanto o corpo negro. Todavia, a radiação total emitida por esses ainda é proporcional a T^4 . Considerando-se que essas superfícies são de natureza “acinzentada”, é introduzido o fator de emissividade ε na Equação 1.6, que relaciona a radiação de uma superfície qualquer com a de uma superfície ideal. Além disto, deve-se considerar que a radiação que deixa uma superfície não é integralmente a mesma que alcançará outra, haja vista que a radiação eletromagnética propaga-se segundo linhas retas, havendo perdas para o ambiente. A Equação 1.7 apresenta a situação descrita acima.

$$q = \Phi \varepsilon \sigma A(T_1^4 - T_2^4) \quad 3.7$$

Onde:

Φ - fator de configuração, sendo função da emissividade e da geometria;

ε - emissividade, sendo a eficiência de uma superfície quando esta é considerada um radiador.

A Tabela 3.4 apresenta um comparativo da absorvidade de alguns materiais.

TABELA 3.4 - Cores visíveis de materiais aquecidos, comuns em residências.

Superfície	Absorvidade	
	Radiação solar	Radiação térmica a baixa temp. (25°C)
Alumínio Polido	0,15	0,04
Cobre Polido	0,18	0,03
Cobre Oxidado	0,65	0,75
Ferro Fundido	0,94	0,21
Mármore Branco	0,46	0,95
Asfalto	0,90	0,9
Tijolo Vermelho	0,75	0,93
Cascalho	0,29	0,85
Verniz Preto Fosco	0,96	0,95
Tintas Brancas, Vários Tipos de Pigmentos	0,12 – 0,16	0,90 – 0,95

FONTE: Universidade de São Paulo (2007).

3.6 Dinâmica dos fluidos

O estudo da dinâmica dos fluidos desenvolve as equações básicas na forma integral para aplicação em volumes de controle⁶, por dois motivos. Primeiramente, pela dificuldade na análise de um sistema de fluidos em se identificar e seguir a mesma massa de fluido em todos os instantes. Em segundo lugar, pelo interesse desse estudo se focar no efeito do movimento global do fluido sobre algum objeto, e não o movimento de uma dada massa de fluido (FOX, et al, 2004).

Segundo o ANEXO D do EUROCODE 1, PARTE 1-2: 2002, os mecanismos dos sistemas de fluxo, quando resolvidos por modelos computacionais de CFD, discutidos no Capítulo 7, envolvem dinâmica dos fluidos e termodinâmica. Para tanto, são

⁶ Volume de controle, no estudo da Termodinâmica, é uma região fixa no espaço para a compreensão do balanço de massa e energia em sistemas de fluido.

abordadas a conservação de massas, conservação de momento e conservação de energia do fluido (gás ou líquido).

3.6.1 Conservação de massas

Segundo a Lei de Conservação de Massas, numa reação química que se processe num sistema fechado a massa permanece constante, de forma que a soma das massas dos reagentes seja igual à soma das massas dos produtos.

A redução na massa de um combustível resulta na liberação de energia na forma de luz e calor. Esse princípio permite que sejam calculadas as taxas de liberação de calor de materiais, a partir de instrumentos que determinam a perda de massa e ganho de temperatura quando um combustível é queimado.

3.6.2 Conservação do momento

A Segunda Lei de Newton se aplica à conservação do momento. Para um diferente volume de controle de um sistema de fluido, essa lei estabelece que a soma de todas as forças externas ao volume de controle (ou ao sistema), sejam iguais à taxa de variação da quantidade de momento linear desse volume (ou sistema).

3.6.3 Conservação de energia

A temperatura, T , em um sistema de fluido, necessária para determinar o coeficiente de transferência de calor, é obtida pela aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica em um volume de controle.

3.7 Taxa de liberação de energia

As temperaturas que se desenvolvem em um compartimento de incêndio são o resultado direto da energia liberada pela queima dos combustíveis. A taxa de liberação de calor, ou *heat release rate* (HRR), é a taxa de energia térmica gerada durante a queima (NFPA 101, Life Safety Code, 2001). Para uma reação de combustão, a HRR depende da natureza do material combustível, das proporções do incêndio e da quantidade de ar disponível. A HRR de um material pode ser descrita como a variável mais importante nos perigos de um incêndio e é medida em kilowatts (kW) ou Btu/s. A taxa de liberação de calor está relacionada diretamente à quantidade de combustível que é consumido com o passar do tempo e o calor de combustão do objeto de queima. Calor de combustão, ou valor calorífico, é definido como a quantidade de calor liberada durante a combustão completa por unidade de massa do combustível e a maioria dos materiais sólidos, líquidos e gasosos, apresenta o valor calorífico entre 15 e 50MJ/kg (BUCHANAN, 2001).

Na Tabela 3.5 é possível verificar o máximo valor de liberação de calor atribuído a alguns materiais comuns a edificações residenciais:

TABELA 3.5 – Taxa de liberação de calor para materiais comuns em residências.

Taxa de liberação de calor (HRR) para materiais comuns		
Material	Máxima taxa de liberação de calor	
	KW	Btu/s
Cesto de lixo (0.53 kg) com caixas de papelão de leite (0.40 kg)	15	14,2
Cadeira forrada com tecido de algodão (31.9 kg)	370	350,7
Quatro cadeiras próximas (estrutura de metal, poliuretano, almofada de espuma) (7.5 kg cada)	160	151,7
Cadeira forrada (espuma de poliuretano) (28.3 kg)	2100	1990
Colchão (algodão e juta) (25 kg)	40	37,9
Colchão (espuma de poliuretano) (14 kg)	2630	2492,9
Colchão tipo <i>box</i> (algodão e espuma de poliuretano) (62.4 kg)	660	626
Sofá forrado com tecido (espuma de poliuretano) (51.5 kg)	3200	3033
Árvore de Natal (seca) (7.4 kg)	500	474

FONTE: *Essential of Fire Fighting* (2001).

A taxa de liberação de calor, \dot{Q} , é convenientemente expressa em termos da taxa de queima, expressa como a taxa de perda de massa, \dot{m} (kg/s), como visto na Equação 3.8.

$$\dot{Q} = \dot{m} \times \Delta H_c \quad 3.8$$

Onde:

ΔH_c - é o calor de combustão do material combustível (kJ/g);

No entanto, a Equação 1.8 assume um incêndio com combustão completa, sendo esta impossível de ocorrer para incêndios naturais. Dessa forma, assume-se que o incêndio apresenta ventilação controlada e que todo o ar presente no compartimento é queimado. Dessa maneira, o HRR em um compartimento de incêndio pode ser calculada pela Equação 3.9.

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{ar} \times \Delta H_c(ar) \quad 3.9$$

Onde:

\dot{m}_{ar} - é o fluxo de massa de ar no compartimento (kg/s), dado pela Equação 3.10, onde A_w é a área efetiva de ventilação (m²) e h_v é a altura da abertura da ventilação.

$$\dot{m}_{ar} = 0,52 A_w h^{1/2} \quad 3.10$$

$\Delta H_c(ar)$ - é o calor de combustão do material combustível por unidade de massa de ar consumido (kJ/g).

Se um objeto entra em ignição, como um item de mobília, e é queimado em ambiente com exposição livre de ar, sua taxa de liberação de calor tende a aumentar exponencialmente, assim como suas chamas e temperatura. Ao atingir o pico da HRR, esta começa a decair. Nota-se que a taxa de liberação de calor depende da geometria do ambiente e da natureza do material combustível, o que torna o alcance do pico da HRR de um material em queima em compartimento possível de não ser alcançado, uma vez que a disposição de ar pode ser insuficiente para este evento.

Alguns objetos de mobiliário são apresentados na Figura 3.8, com suas taxas de liberação de calor obtidas em queimas realizadas em laboratório, segundo parâmetros da ISO 5660 (1993).

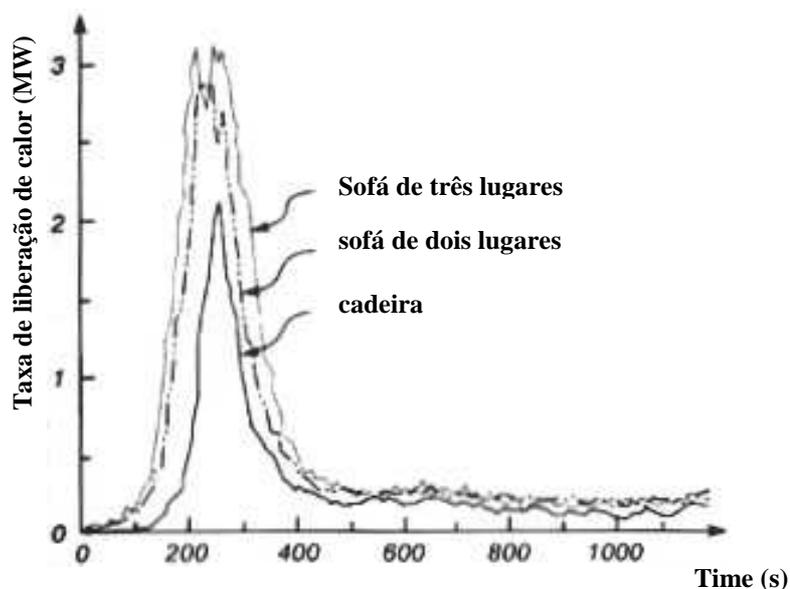


FIGURA 3.8 – Taxa de liberação de calor (HRR) para itens de mobiliário.

FONTE: BABRAUSKAS (1995) apud NFPA.

3.7.1 Incêndio “t²”

Qualquer material combustível pode assumir o aumento de sua temperatura em função do quadrado do tempo. Isso se refere ao incêndio “t²”. Essa escala de crescimento constante pode demonstrar várias taxas de crescimento do incêndio, de muito baixas a muito altas, dependendo do tipo de combustível envolvido (BUCHANAN, 1994). Esta

informação é relevante por entender que o incêndio “t²” é freqüentemente utilizado em aplicações de engenharia de incêndio.

A taxa de liberação de calor Q (MW) para incêndio “t²” é dada pela Equação 3.8.

$$Q = [t/k]^2 \quad 3.11$$

Sendo:

t - o tempo (em segundo);

k - constante de crescimento ($s / MW^{1/2}$), onde s é o tempo em segundo.

Para a proposta da engenharia de segurança contra incêndio, convencionam-se os valores para k , em modelos de incêndio real, adotados na Tabela 3.6. O valor de k é o tempo em segundo para o fogo alcançar a produção de calor de 1MW. A taxa de liberação de calor, nas condições do incêndio “t²”, é mostrada na Figura 3.6.

TABELA 3.6 - Parâmetros das taxa de liberação de calor para itens de mobiliário.

Taxa de crescimento do fogo	k ($s / MW^{1/2}$)	Fontes típicas
Baixo	600	Piso de madeira sólida com orientação horizontal.
Médio	300	Móvel sólido de madeira, como mesas.
Rápido	150	Mobiliário de madeira leve, como armário de compensado.
Ultra-rápido	75	Mobiliário acolchoado.

FONTE: BUCHANAN (1994).

O fogo pode ser considerado crescente de acordo com a curva “t²” até o combustível ser consumido, ou até a taxa de liberação de calor alcançar um valor de pico esperado para aquele combustível em particular. Os cálculos atribuídos a essa curva não serão abordados neste trabalho.

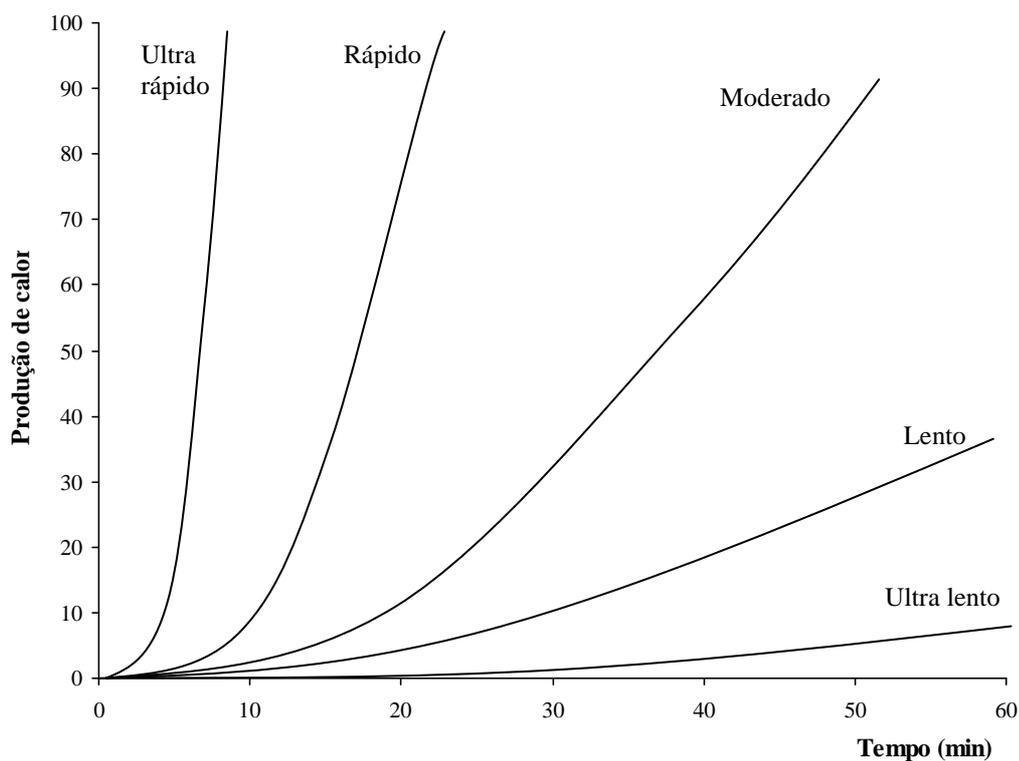


FIGURA 3.9 – Velocidade de liberação de calor (HRR) para itens de mobiliário.

FONTE: NFPA apud BABRAUSKAS (1995).

3.8 Carga de incêndio

Segundo a Instrução Técnica 09 do Corpo de Bombeiros de Minas Gerais (2006), carga de incêndio 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. Cada material tem uma capacidade própria de produzir calor em situação de incêndio, que é denominada potencial calorífico, H_i , (conforme pode ser visto na Tabela 3.7). Desta forma, os materiais existentes na edificação, sejam estes aplicados na construção ou utilizados na ocupação desta, definirão a quantidade de calor que poderá ser liberada na situação de incêndio.

A carga de incêndio específica de um compartimento, h , é a carga de incêndio dividida pela área do piso desse compartimento, sendo dada em MJ/m².

TABELA 3.7 – Potencial calorífico para itens de mobiliário.

Tipo de material	H (MJ/kg)	Tipo de material	H (MJ/kg)	Tipo de material	H (MJ/kg)
Acrílico	28	Lã	23	Poliéster	31
Algodão	18	Lixo de cozinha	18	Poliétileno	44
Borracha	Espuma – 37 Tiras - 32	Madeira	19	Polipropileno	43
Couro	19	Palha	16	Poliuretano	23
Epoxi	34	Papel	17	PVC	17
Grãos	17	Petróleo	41	Resina melemínica	18
Graxa, lubrificante	41	Policarbonato	29	Seda	19

FONTE: ABNT NBR 14432:2001

As normas brasileiras e algumas normas internacionais consideram carga de incêndio apenas a parte da carga combustível total que de fato entra em combustão durante um incêndio, desconsiderando as vedações (paredes, piso e teto) e as aberturas. O valor da carga de incêndio específica pode ser obtido pela Equação 3.9.

$$q_{fi} = \frac{\sum M_i H_i}{A_f} \quad 3.12$$

Onde:

q_{fi} - valor da carga de incêndio específica por metragem da área de piso (MJ/m²);

M_i - massa total de cada componente i do material combustível (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 - potencial calorífico específico de cada componente i do material combustível (MJ/kg), conforme Tabela 3.3;

A_f - área do piso do compartimento (m²).

Com o objetivo de simplificação, admite-se considerar a carga de incêndio como sendo formada totalmente por madeira e a expressa como a massa da madeira equivalente à soma de todo material combustível do compartimento, em estudo pela área do piso deste (sendo kg de madeira equivalente por m²). Isso se deve pelo fato de muitos materiais apresentarem sua carga de incêndio muito próxima da madeira, como é o caso da palha, papel, PVC, grãos, algodão, roupas, seda, couro e lã, com valores entre 16 e 23 MJ/kg, e o potencial calorífico da madeira entre 17 e 20 MJ/kg.

Uma vez que a carga de incêndio específica (q_{fi}) é de difícil determinação, a norma brasileira ABNT NBR 14432:2001 dispõe de tabelas padronizadas para cada tipo de ocupação. Na Tabela 3.10 são apresentadas as cargas de incêndio específicas de ocupações residenciais, por ser este o foco do presente trabalho.

TABELA 3.8 – Cargas de incêndio para ocupações residenciais.

Ocupação/Uso	Descrição	Carga de incêndio (q_{fi}) em MJ/m ²
Residencial	Alojamentos estudantis	300
	Apartamentos	300
	Casas térreas ou sobrados	300
	Pensionatos	300

FONTE: ABNT NBR 14432:2001.

3.9 Desenvolvimento do fogo

Um incêndio em compartimento, ou incêndio compartimentado, pode se desenvolver de várias maneiras diferentes por depender, principalmente, da geometria do compartimento de incêndio, ventilação e o tipo de combustível, quantia e área de superfície (PURKISS, 1996). De maneira esquemática, o incêndio pode se desenvolver em três fases: crescimento ou *pré-flashover*; queima generalizada ou *pós-flashover* e diminuição ou decaimento. A Figura 3.10 apresenta esses estágios típicos do desenvolvimento do incêndio natural em compartimentos.

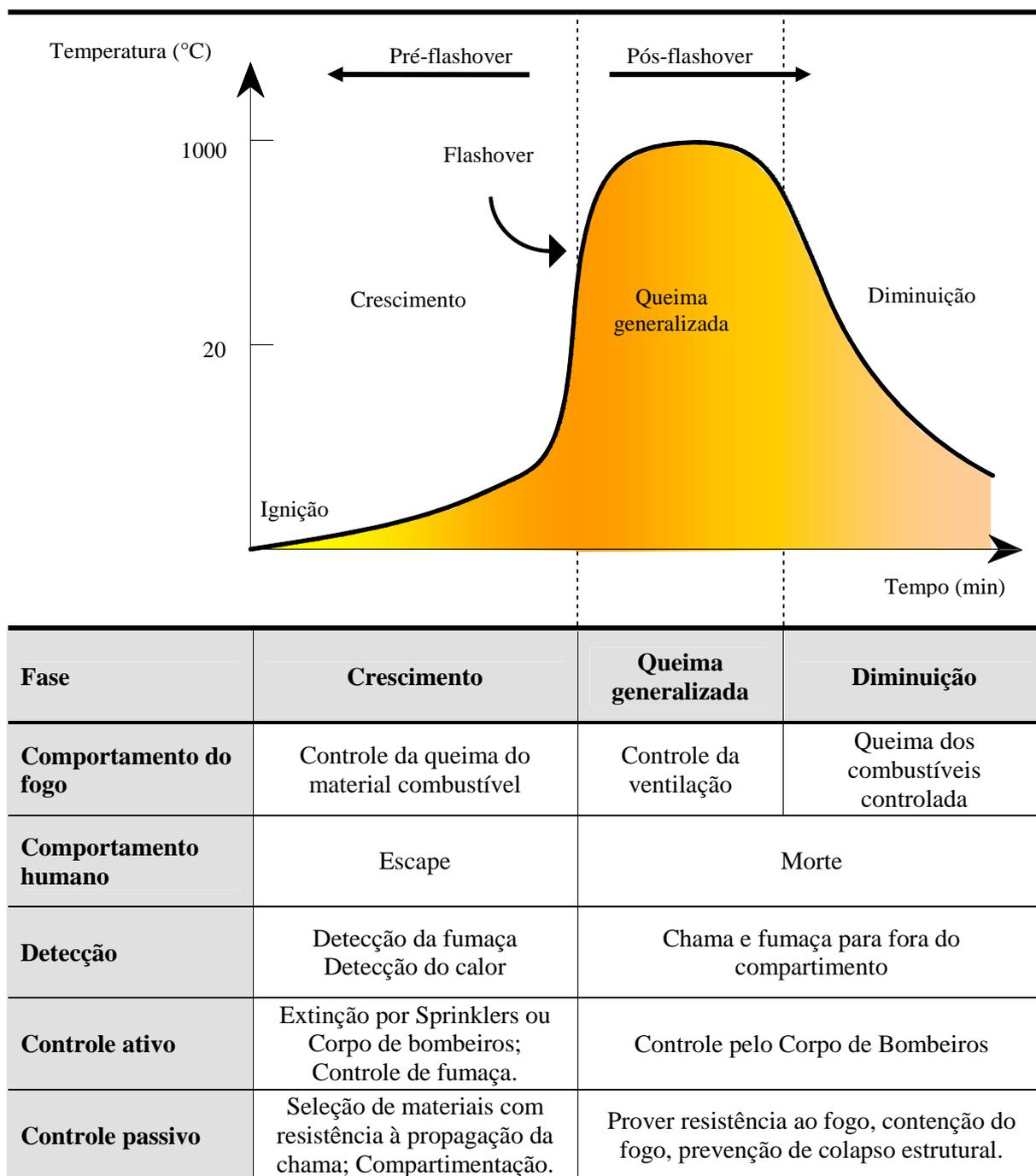


FIGURA 3.10 - Fases típicas do desenvolvimento do incêndio.

FONTE: Adaptado de BUCHANAN (1995)

3.9.1 Ignição

A ignição é definida como o começo ou iniciação de combustão. É um processo onde os vapores gerados pela liberação de calor da face de um material, misturados com o ar, formam uma mistura combustível (SPFE, 2002).

O processo de ignição pode ocorrer por ignição espontânea ou por chama piloto. No primeiro caso, o material combustível inicia a combustão sem a presença de chama por duas maneiras distintas: com exposição ao calor, sem presença de chamas e própria de materiais celulósicos; e a que se verifica sem exposição direta a uma fonte de calor externa, mas por acumulação de calor produzido pelo próprio material. Para a ignição devido a uma chama piloto, é necessário que haja alguma fonte auxiliar como, por exemplo, uma fagulha. Sabe-se que a intensidade de radiação nessa ocorrência é menor do que a necessária para a ocorrência da ignição espontânea (ROSSO, 1975).

Existem numerosas fontes de calor responsáveis pela ignição num incêndio. Essas incluem fontes com chama (fósforos, velas, aquecedores a gás, pontos de fogo localizado), fontes sem chama (cigarros), fontes elétricas e de radiação (objetos quentes, reatores), como também superfícies aquecidas, fricção, raio, dentre outros.

3.9.2 Crescimento

O conhecimento sobre o crescimento do incêndio, anterior ao período do *flashover*, é fundamental para a segurança contra incêndio, em função de tanto o calor quanto a produção de fumaça serem produzidos nessa fase. Medidas de proteção contra incêndio, como *sprinklers* e detectores de fumaça, são designadas para operarem nesse momento.

Nem sempre o fogo se manifesta com chamas, podendo ocorrer a combustão incompleta, com baixo consumo de oxigênio. Uma vez iniciado esse tipo de combustão, o fogo continua a se desenvolver, a menos que não se apresentem mais fontes

combustíveis no compartimento ou ocorram medidas de controle ou extinção do fogo (BUCHANAN, 1994).

Durante o crescimento, as condições podem levar à formação de um modelo de duas camadas, como mostrado na Figura 3.11. Ainda no estágio inicial, a camada mais baixa mantém-se próxima da temperatura ambiente. A pluma⁷ do fogo carrega fumaça e gases quentes para a camada superior, juntamente com um considerável volume de entrada de ar, e a temperatura dessa camada se eleva rapidamente em função do calor dos produtos da combustão carregados pela pluma.

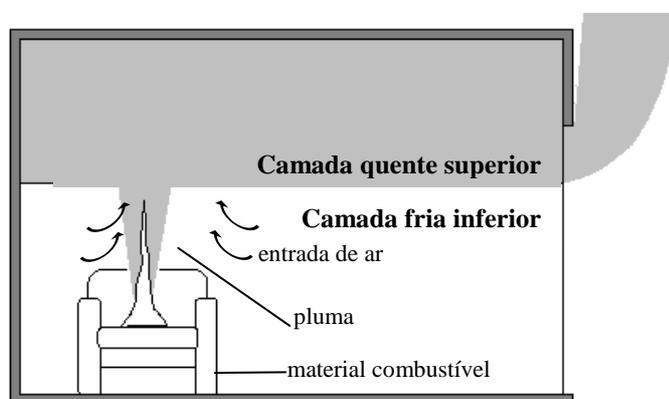


FIGURA 3.11 – Modelo de duas camadas para incêndio.

FONTE: QUINTIERE (1998) e BUCHANAN (1994).

O desenvolvimento dessa fase é favorecido principalmente por grandes superfícies de materiais combustíveis, como paredes, divisórias e forros, além da quantidade, volume e espaçamentos dos materiais combustíveis; pelo tamanho e situação das fontes de combustão; pela área e locação das janelas (grau de ventilação⁸); pela velocidade e direção do vento e forma e dimensões do compartimento (ROSSO, 1975).

⁷ Pluma do fogo é a coluna flutuante ascendente de chama e produtos quentes da combustão acima da fonte de combustível (ver item 3.10 deste Capítulo).

⁸ A abordagem quanto ao grau de ventilação será apresentada no item 3.11 deste capítulo.

A importância dada à posição relativa dos objetos e a natureza dos revestimentos se dá em função da transmissão de calor que ocorre nesta fase, principalmente por convecção e radiação.

3.9.3 Flashover

Segundo o NFPA 921 (2004) apud *Flashover and Fire Analysis* (2003), a definição mais completa para *flashover* é consistir-se de uma fase transitiva no desenvolvimento do fogo em compartimentos, no qual todas as superfícies expostas à radiação térmica alcançam a temperatura de ignição quase que simultaneamente e o fogo se alastra rapidamente ao longo do espaço, resultando numa inflamação completa do compartimento ou área delimitada. A Figura 3.12 demonstra esta fase.

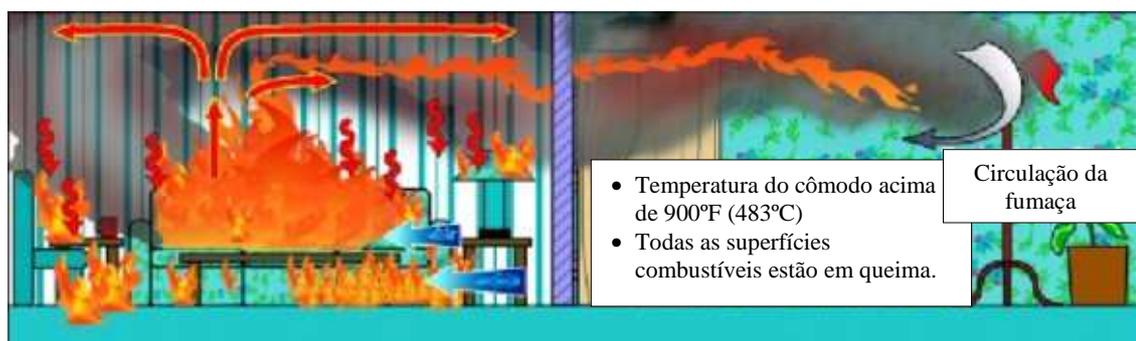


FIGURA 3.12 – *Flashover* em compartimento de incêndio.

FONTE: *Essential of Fire Fighting* (2001).

Uma vez que a temperatura da camada superior alcança aproximadamente 600°C e a radiação no nível próximo ao piso chega a 20kW/m², todo o material combustível exposto entra em ignição (BUCHANAN, 1994).

Antes de *flashover*, o crescimento de fogo está principalmente limitado pela taxa de pirólise dos combustíveis envolvidos no fogo. Depois do *flashover*, a proporção máxima do incêndio em um compartimento se limita, normalmente, tanto pela ventilação disponível, quanto pela presença de mais material combustível que queimará na quantidade de oxigênio disponível no ambiente. Dessa forma, não é possível sobreviver

a um incêndio após o *flashover* em função das altas temperaturas, elevadas concentrações de monóxido de carbono e fumaça, além da falta de oxigênio (BUCHANAN, 1994).

3.9.4 Queima generalizada

O desenvolvimento completo do incêndio, ou fase de queima generalizada, é de grande importância na consideração das propriedades dos materiais de revestimento contra fogo, estabilidade estrutural e a possibilidade de propagação do fogo para outras propriedades.

Uma vez ocorrido o *flashover*, o fogo já se encontra na fase de queima generalizada, que é caracterizada pela elevada taxa de liberação de calor e altas temperaturas (Figura 3.13). Durante o completo desenvolvimento do fogo, chega-se à máxima taxa de liberação de calor e a ameaça a compartimentos vizinhos é maior. Além da ameaça evidente aos ocupantes que permanecem dentro do edifício, é durante essa fase que o dano estrutural pode acontecer, levando ao possível colapso estrutural, parcial ou total do edifício (DRYSDALE 2002),



FIGURA 3.13 – Fase da queima generalizada em compartimento de incêndio.

FONTE: *Essential of Fire Fighting* (2001).

3.9.5 Diminuição ou decaimento

Uma vez que o suprimento de material combustível diminui a ponto de não sustentar o processo de queima, apresenta-se a fase de diminuição do fogo. A transição para esta fase se define no momento em que 80% do material combustível já foram consumidos. Durante a fase de diminuição, o incêndio passa a ser controlado pelo material e quantidade combustível, e não mais pela ventilação, como nas fases anteriores. Esvaindo-se a fonte combustível, acaba-se o fogo.

3.10 Pluma e *Ceiling Jet*

3.10.1 Pluma

Pluma, ou *fire plume*, como definido na bibliografia internacional, é a coluna flutuante ascendente de chama e produtos quentes da combustão acima da fonte de combustível. Segundo DRYSDALE (2002), este termo também é usado para descrever a coluna de convecção que cresce acima da fonte de calor. Força flutuante é uma força que surge em um fluido devido à diferença de densidade (QUINTIERE, 1998). Os gases quentes da chama são rodeados por gases mais frios e os mais quentes, menos densos, sobem devido à diferença de densidade, ou força flutuante. Essa mistura de produtos da combustão e ar se encontra no teto do compartimento do fogo e levará à formação de uma camada de gases quentes, por convecção. Com a ascensão dos gases quentes, os gases frios são induzidos a fluírem até a base da pluma, e a este processo de fluxo denomina-se “entrada de ar”. A taxa dessa entrada de ar é responsável pela altura da chama e pelas características da pluma. Da mesma forma, esta taxa de ar sustenta a chama e forma-se uma relação de dependência entre os processos. Caso a temperatura dos gases seja reduzida à temperatura ambiente, esta força flutuante, derivada da diferença de densidade, se torna zero e a pluma deixa de subir (QUINTIERE, 2000). A Figura 3.14 representa de maneira esquemática a turbulência na pluma originada da fonte da chama, que pode ser sólida ou líquida.

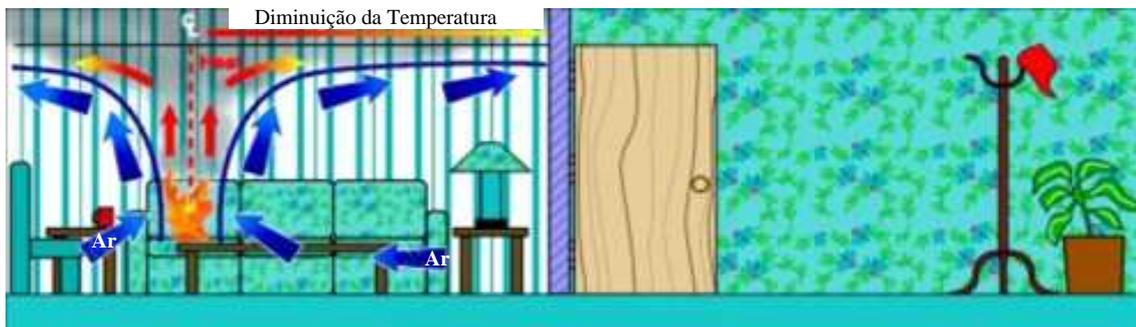


FIGURA 3.14 – Desenvolvimento da pluma em um compartimento de incêndio.

FONTE: *Essential of Fire Fighting* (2001).

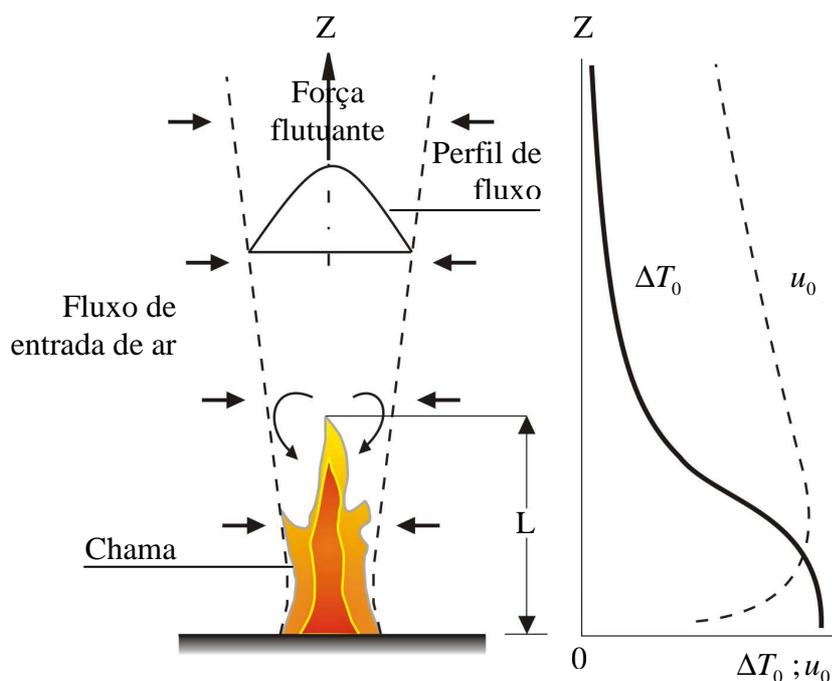


FIGURA 3.15 – Características da turbulência da pluma de incêndio, incluindo variações axiais na linha de centro para a temperatura, ΔT_0 , e velocidade, u_0 .

Fonte: Adaptado de (SFPE, 2002).

Na Figura 3.15, a linha tracejada ao redor da chama representa o limite, ou contorno, de todos os produtos flutuantes da combustão e da entrada de ar. O perfil de fluxo pode indicar a média da elevação de temperatura sobre a temperatura ambiente, ou a

concentração de um gás gerado pelo fogo, como o CO_2 , ou ainda a velocidade axial da pluma (SFPE, 2002). Nota-se também, o comportamento da temperatura, ΔT_0 , e da velocidade, u_0 , ao longo do eixo da pluma, Z . Nesse exemplo, a temperatura é praticamente constante na porção inferior da chama, diminuindo na porção superior, justificado pela diminuição das reações de combustão e pela entrada de ar com temperaturas mais baixas que a da pluma. Quanto à velocidade, u_0 , tende a apresentar seus valores máximos logo abaixo da altura da chama e diminuir à medida que se distancia verticalmente desta. Se o combustível é poroso e suporta combustão interna, pode não ocorrer uma pronunciada redução da velocidade do gás logo acima do material combustível, como mostrado na Figura 3.15.

3.10.2 *Ceiling Jet*

Quando o fluxo da pluma encontra o teto, os gases se espalham por este como um jato de abrangência circular, denominado *Ceiling Jet*. A velocidade e temperatura desse jato são importantes para se realizar estimativas acerca dos sistemas ativos de segurança, como detectores de fumaça e *sprinklers*. Como pode ser notado na Figura 3.16, o jato de teto pode alcançar as paredes do compartimento e, ao longo desta, realizar um movimento descendente. No entanto, os gases do jato ainda estão mais quentes que os gases circundantes e o fluxo tornará a subir devido a flutuabilidade.

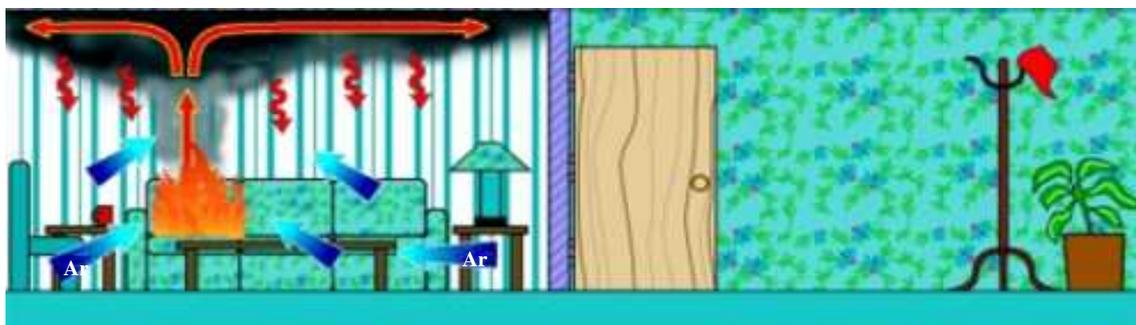


FIGURA 3.16 – Desenvolvimento da pluma em um compartimento de incêndio.

FONTE: *Essential of Fire Fighting* (2001).

3.10.3 Equações básicas

A altura da chama, pode ser definida como mostrado na Equação 3.13, segundo o NFPA 204, *Standard for Smoke and Heat Venting* (2002).

$$L_c = -1,02D + 0,235Q^{2/5} \quad 3.13$$

Onde:

- L_c - altura da chama sobre a base do fogo (m);
- D - diâmetro da fonte do fogo (m);
- Q - Taxa de Liberação de Calor (TLC) total (kW).

A origem virtual da pluma, z_0 , é o eixo da fonte da pluma do incêndio, calculada conforme a Equação 3.14.

$$z_0 = 0,083Q^{2/5} - 1,02D \quad 3.14$$

Onde:

- Q - Taxa de Liberação de Calor (HRR) total (kW).
- D - diâmetro da fonte do fogo (m);

Esta fórmula também é aplicada a plumas assimétricas, onde D é o diâmetro efetivo de fontes de fogo não circulares, podendo ser calculado como: $\frac{\pi D^2}{4}$ = área da fonte de fogo.

Segundo o ANEXO C do EUROCODE 1 Parte 1-2 (2002), no cálculo da altura da chama, o valor multiplicador de Q se apresenta diferente do apresentado pelo NFPA, como mostrado na Equação 3.15 (ver Figura 3.17).

$$L_c = -1,02D + 0,0148Q^{2/5} \quad 3.15$$

Ainda nesse documento, aponta-se a Equação 3.16 para determinar a temperatura da pluma dada em °C, $\theta_{(z)}$, ao longo do eixo vertical da pluma, quando a chama não alcança o teto do compartimento ($L_f \leq H$) ou o incêndio ocorra em espaço aberto (ver Figura 3.17).

$$\theta_{(z)} = 20 + 0,25Q_c^{2/3} (z - z_0)_{-5/3} \leq 900 \quad 3.16$$

Onde:

- D - Diâmetro do fogo (m);
- Q - Taxa de Liberação de Calor, HRR (W);
- Q_c - parte convectiva do HRR (W), com $Q_c = 0,8Q$;
- z - é a altura ao longo do eixo vertical da pluma (m);
- H - é a distância entre a fonte de fogo e o teto (m).

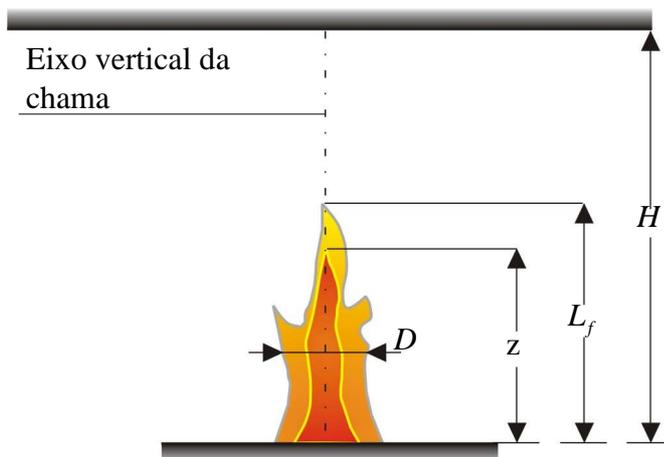


FIGURA 3.17 – Parâmetros para chama abaixo do nível do teto.

Fonte: Adaptado do EUROCODE 1, Parte 1-2 (2002).

Quando a chama entra em contato com o teto ($L_f \geq H$), o fluxo de calor, \dot{h} (W/m²), recebido pela exposição ao fogo de uma unidade de área da superfície do teto, é dado pela Equação 3.17 (ver Figura 3.18).

$$\begin{aligned} \dot{h} &= 100000 && \text{Se } y \leq 0,30 \\ \dot{h} &= 136300 - 121000y && \text{Se } 0,30 < y < 1,0 \\ \dot{h} &= 15000y^{-3,7} && \text{Se } y \geq 1,0 \end{aligned} \quad 3.17$$

Onde:

y - parâmetro adimensional dado por $y = \frac{r + H + z'}{L_h + H + z'}$;

r - distância horizontal (m) entre o eixo vertical do fogo e o ponto ao longo do teto, onde o fluxo térmico é calculado (ver Figura 3.18);

H - é a distância (m) entre a fonte do fogo e o teto (ver Figura 3.18).

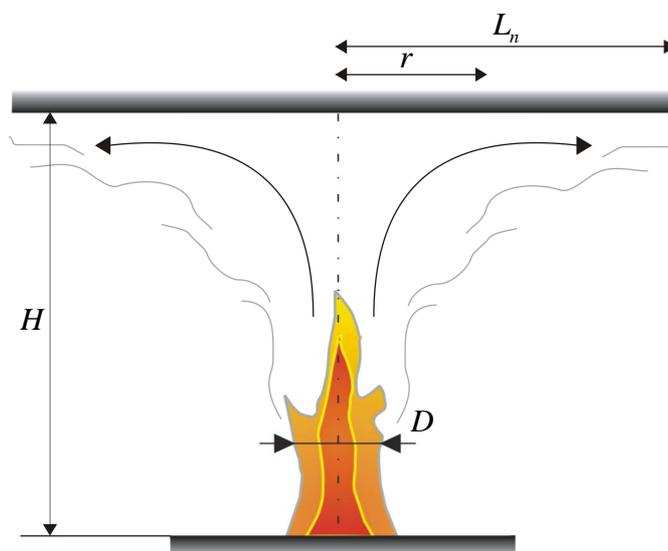


FIGURA 3.18 – Parâmetros para chama que impacta o teto.

Fonte: Adaptado do EUROCODE 1, Parte 1-2 (2002).

L_n - comprimento horizontal da chama (m), dado pela Equação 3.18 (Ver Figura 3.18).

$$L_n = (2,9H(Q_H^*)^{0,33}) - H \quad 3.18$$

Q_H^* - é a taxa de liberação de calor não dimensional, dada pela Equação 3.19.

$$Q_H^* = Q / (1,11 \times 10^6 \times H^{2,5}) \quad 3.19$$

z' - é a posição vertical da fonte virtual de calor e é dada pela Equação 3.20.

$$\begin{aligned} z' &= 2,4D(Q_D^{*2/5} - Q_D^{*2/3}), \text{ quando } Q_D^* \leq 1,0 \\ z' &= 2,4D(1,0 - Q_D^{*2/5}), \text{ quando } Q_D^* \geq 1,0 \end{aligned} \quad 3.20$$

Onde:

$$Q_D^* = Q / (1,11 \times 10^6 \times D^{2,5}) \quad 3.21$$

É importante salientar que as fórmulas e parâmetros apresentados são válidos para diâmetros de fogo e taxa de liberação de calor, limitados, respectivamente, a 10 m a 50 MW.

3.11 Grau de ventilação

O grau de ventilação de uma edificação é de grande importância no processo de combustão, juntamente na sua associação com a carga de incêndio. A presença do material comburente (oxigênio) no ambiente em chamas alimenta o incêndio.

O grau de ventilação em um compartimento é representado pelo fator de abertura (v), que é o parâmetro que considera a quantidade de oxigênio no ambiente, sendo este utilizado tanto em análise experimental quanto numérica (Figura 3.19). A Equação 3.22 representa o grau de ventilação.

$$v = \frac{A_v \sqrt{h_a}}{A_t} \quad 3.22$$

Onde:

v - grau de ventilação ou fator de abertura ($m^{1/2}$);

A_v - área total das aberturas para o ambiente externo ao edifício. Incluem-se janelas que se supõem quebradas durante um incêndio (m^2);

A_t - área total incluindo vedações (paredes, piso e teto) e aberturas (m^2);

h_a - altura média das aberturas (m), sendo expressa por $\Sigma(h_i A_i)/A_v$, conforme Figura 3.19;

h_i - altura da abertura i , sendo expressa por $\Sigma A_i = A_v$;

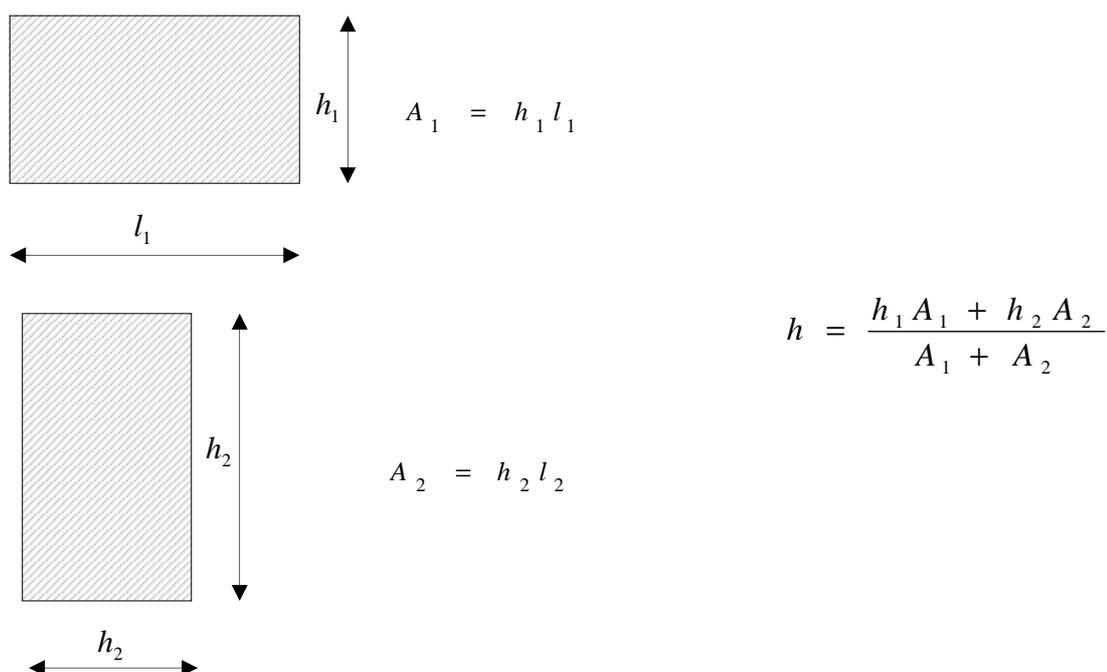


FIGURA 3.19 – Altura média das aberturas.

FONTE: SILVA (2001)

A relação entre grau de ventilação e a quantidade de material combustível pode ser expressa pela Equação 3.23.

$$\xi = \frac{A_q}{A_v \sqrt{h}} \quad 3.23$$

Onde:

A_q - área da superfície do material combustível que pode participar da combustão (este valor é de difícil determinação, tendo serventia como análise qualitativa feita a seguir).

Para um determinado compartimento, tendo-se a quantidade de material combustível suficientemente grande ou o grau de ventilação suficientemente pequeno, ou melhor, um alto valor de ξ , a temperatura dos gases que envolvem as chamas será função apenas do grau de ventilação. Esse tipo de incêndio é denominado incêndio de ventilação controlada. Quando se tem um compartimento com um baixo valor de ξ – baixa quantidade de material combustível e grau de ventilação elevado, denomina-se de incêndio controlado pelo combustível, ou seja, a temperatura depende tão somente da carga de incêndio.

4

PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

4.1 Introdução

Os componentes de uma edificação são fabricados a fim de satisfazer os requisitos mínimos de utilização e segurança. Desse último, tem-se como um dos principais parâmetros a resistência ao fogo, fundamentada no fato de que a integridade estrutural deve ser preservada mesmo que outros parâmetros se tornem falhos em situação de incêndio.

Resistência ao fogo é a propriedade de um elemento construtivo resistir à ação do fogo por um determinado tempo, mantendo sua integridade, estanqueidade e isolamento e/ou características de vedação aos gases e chamas.

Nesse trabalho, são abordadas as principais características de alguns elementos construtivos, a considerar estrutura e vedação, além de algumas atribuições aos elementos constituintes do mobiliário.

4.2 Classificação dos materiais

Quanto à composição, os materiais podem ser classificados como homogêneos ou heterogêneos. Materiais homogêneos apresentam a mesma composição e propriedades ao longo de seu volume e raramente são encontrados na natureza. Os heterogêneos, por sua vez, possuem características distintas. Vale ressaltar que a maioria dos materiais de construção é classificada como heterogênea, como por exemplo, o concreto.

Os materiais sólidos têm sido classificados em três espécies: metais, cerâmicos e polímeros. Embora existam materiais intermediários, a maioria se encaixa nessa classificação, baseada principalmente na sua composição química e na estrutura atômica. Dessa forma, discorre-se sucintamente sobre esses materiais.

Metais - em geral, são combinações de elementos metálicos. Possuem elétrons livres e muitas de suas propriedades decorrem deste fenômeno. Uma definição simples para os metais é apresentá-los como substâncias químicas elementares, opacas, lustrosas, boas condutoras de calor e de eletricidade e boas refletoras de luz, quando devidamente polidas. Possuem estrutura cristalina, na qual os átomos se situam em um arranjo repetitivo e periódico ao longo de grandes distâncias atômicas, conforme pode ser visto na Figura 4.1. São encontrados principalmente como elementos construtivos estruturais.

De forma geral, os metais podem ser classificados em ferrosos e não-ferrosos:

- **Metais Ferrosos:** Aços e Ferros fundidos. Os metais ferrosos em sua maioria são ligas de Ferro e Carbono. Aços se caracterizam por possuir uma porcentagem de Carbono em suas ligas entre 0,008% e 2%. Os Ferros Fundidos possuem uma porcentagem de Carbono superior a 2%.

- Metais Não-ferrosos: Alumínio, Cobre, Zinco, Estanho, Níquel, entre outros.

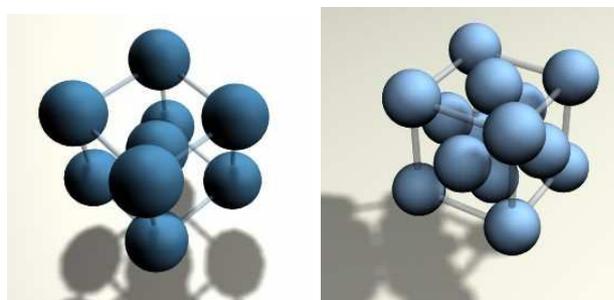


FIGURA 4.1 – Estruturas cristalinas cúbica de corpo centrado e cúbica de face centrada.

FONTE: arquivos da autora

Cerâmicos – são materiais inorgânicos, não-metálicos, os quais consistem de elementos metálicos e não-metálicos, que se interagem por ligações iônicas e covalentes. A exemplo tem-se os tijolos, concretos, vidro, refratários, dentre outros. Apresentam, em geral, estrutura cristalina (ver Figura 4.1); possuem ligações iônicas e covalentes; apresentam elevada temperatura de fusão; possuem baixa tenacidade e ductilidade; excelente estabilidade química e podem ser considerados isolantes elétricos e térmicos.

Polímeros – em sua maioria, são compostos orgânicos baseados em ligações de carbono, hidrogênio e em outros elementos não-metálicos. Apresentam estrutura molecular muito extensa, baixas densidades e são muito flexíveis. Quanto à classificação, os materiais polímeros podem ser classificados de vários modos. Primeiramente, quanto à origem, como naturais e sintéticos. Outra classificação pertinente é quanto às suas propriedades físicas, em particular o módulo de elasticidade e alongamento, o que permite classificá-los como elastômeros, plásticos e fibras. Os elastômeros, ou borrachas, são caracterizados por apresentarem alto grau de deformação e reversibilidade à temperatura ambiente. Os plásticos apresentam apenas reversibilidade parcial da deformação, enquanto as fibras se destacam pela alta resistência à tensão e baixo coeficiente de deformação. O módulo de elasticidade dos elastômeros está entre 10^5 e 10^6 N/m², enquanto os plásticos possuem valores entre 10^7 e 10^8 N/m² e as fibras entre 10^9 e 10^{10} N/m². Em termos de alongamento, elastômeros

podem atingir uma deformação de 500 a 1000%, plásticos entre 100 a 200% e fibras somente 10 a 30%, antes da ocorrência da fratura do material (SFPE, 2002).

Os materiais de construção podem ser classificados como combustíveis e não combustíveis. Nesse caso, um projeto adequado de edificação deve contemplar o desempenho estrutural do edifício frente ao fogo e considerar as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais envolvidos.

Os materiais combustíveis de uma edificação são aqueles que sofrem ignição. Quanto ao desempenho a altas temperaturas, os materiais construtivos podem ser divididos em cinco grupos (SFPE, 2002):

- Materiais do Grupo L (*estruturais*). Materiais capazes de resistir a grandes esforços, principalmente tração e compressão. Com estes materiais, as propriedades mecânicas relativas ao comportamento nos esforços citados são de grande interesse.
- Materiais do Grupo L/I (*estruturais/isolamento*). Materiais capazes de resistir moderadamente a esforços e, em situação de incêndio, constituem como materiais de resistência ao grupo L. Nesse grupo, as propriedades térmicas e mecânicas são de igual interesse, sendo a última relativa principalmente ao comportamento na compressão.
- Materiais do Grupo I (*isolamento*). Materiais que não são designados a resistir esforços. Sua função é apresentar resistência à transmissão de calor a outros elementos da edificação, ou promover o isolamento dos materiais pertencentes aos Grupo L ou Grupo M/I. Nesse grupo, apenas as propriedades térmicas são relevantes.
- Materiais do Grupo L/I/F (*estruturais/isolamento/combustível*). Materiais do Grupo L/I que podem se tornar combustíveis em um incêndio.

- Materiais do Grupo I/F (*isolamento/combustível*). Materiais do Grupo I que podem se tornar combustíveis em um incêndio.

4.3 Propriedade dos materiais a temperaturas elevadas

O comportamento de um elemento estrutural exposto ao fogo depende tanto das propriedades térmicas e mecânicas de seus materiais, como da sua composição química. Os projetos de segurança contra incêndios em edifícios consideram informações sobre as propriedades dos materiais construtivos para temperaturas entre 20°C e 800°C (SFPE, 2002).

No entanto, a maioria desses materiais não permanece estável ao longo dessa faixa de temperatura e, com o aumento da temperatura, passam por alterações físico-químicas acompanhadas por transformações em sua microestrutura e propriedades.

As propriedades dos materiais podem ser divididas em quatro grupos, conforme a Tabela 4.1, incluindo as que não dependem da temperatura. Entretanto, estas podem ser úteis para se entender o comportamento dos materiais em um incêndio.

TABELA 4.1 - Lista das propriedades dos materiais.

Química	Física	Mecânica	Térmica
Decomposição	Densidade	Resistência	Condutividade
Carbonização	Expansão	Elasticidade	Calor específico
	Amolecimento	Deformação	
	Derretimento	Deformação lenta	
	Lasqueamento		

FONTE: MALHOTRA (1982).

As propriedades termo-físicas e mecânicas da maioria dos materiais podem ser alteradas com o aumento da temperatura. No campo do estudo de segurança contra incêndio, a pesquisa de materiais se encontra frente a diversas dificuldades. Na elevação de temperatura, alguns materiais passam por mudanças físico-químicas, enquanto a

maioria das propriedades depende da temperatura e sensibilidade a alguns parâmetros verificados em testes, como a taxa de liberação de calor, deformação, gradiente de temperatura, e outros.

A falta de conhecimento adequado sobre o comportamento dos materiais em elevadas temperaturas é um fato atual e presente na engenharia de segurança contra incêndio (SFPE, 2002). Verifica-se, assim, uma tendência a usar valores empíricos de propriedade dos materiais em análise computacionais numéricas, ou melhor, valores que são entendidos entre empíricos e resultados analíticos. Em consequência, essa prática possivelmente conduzirá à proliferação de teorias que são desprovidas de validade universal.

A seguir são apresentadas as principais propriedades de alguns materiais de construção a elevadas temperaturas.

4.3.1 Propriedades do aço

O aço pertence aos materiais do grupo L. Para o aço, todas as propriedades, exceto a densidade, são fortemente influenciadas pela temperatura.

Conforme será mencionado no Capítulo 5, nos edifícios habitacionais de baixo custo de cinco pavimentos e estruturados em PFF usa-se o aço estrutural USI SAC 300, similar ao aço ASTM A588 (grau 50). Classificado como aço de baixa liga, enquadra-se nos aços de alta resistência mecânica - termo designativo de todos os aços que, devido à sua resistência, ductilidade e outras propriedades, são adequados para a utilização em elementos da construção sujeitos a carregamento e resistentes à corrosão atmosférica.

É possível verificar a composição química do aço USI SAC 300 através da Tabela 4.2, sendo que o ferro é o outro elemento restante desse material.

TABELA 4.2 - Composição Química Especificada (% em massa)

Aço	Espessura (mm)	C Max.	Mn max.	Si	P	S max.	Cu	Cr máx.	Ni	Ti	Nb
USI SAC 300	2,0 a 12,70	0,18	1,30	0,50 a 1,50	0,010 a 0,060	0,030	0,05 a 0,4	0,60	0,40	0,150	0,050

FONTE: MATTOS (2000).

4.3.1.1 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas definem o comportamento do aço quando sujeito a esforços mecânicos e correspondem às propriedades determinantes pra resistir e transmitir os esforços que lhe são aplicados.

Especificamente para o aço USI SAC 300, a Tabela 4.3 apresenta as propriedades mecânicas deste aço.

TABELA 4.3 – Propriedades mecânicas do aço USI SAC 300.

Aço	Teste de Tração (em chapas)						Dobramento (Transversal)
	Espessura (mm)	LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamento			
				ESP. (mm)	BM (mm)	Valor (%)	Diâmetro (mm)
USI SAC 300	2,0 ~ 12,70	≥ 300	402 ~ 510	2,0 ~ 5,0	50	19	1,5 (e)
				5,0 ~ 12,70	200		

LE – limite de escoamento

LR – limite de ruptura

e – espessura da chapa

FONTE: MATTOS (2000).

Segundo informações do *American Institute of Steel Construction* (AISC, apud SFPE, 2000), para 538 °C a resistência ao escoamento do aço é aproximadamente 60% do valor da resistência à temperatura ambiente. Dessa forma, limita-se a tensão de projeto

máxima permitida em aproximadamente 60% da resistência de escoamento. Assim, para elementos estruturais a 538 °C, projetados para resistir à tensão máxima permitida, a tensão aplicada é aproximadamente a mesma da resistência do elemento. Nota-se também, que para 538 °C, o módulo de elasticidade diminui consideravelmente se comparado ao valor da temperatura ambiente.

Por apresentar uma estrutura cristalina, o posicionamento dos átomos mantém um padrão tridimensional repetitivo durante seu processo de solidificação. No entanto, a altas temperaturas, suas estruturas cristalinas são modificadas, como verificado na Figura 4.2. Porém, para estruturas de aço baixo carbono, mudanças significativas na sua estrutura somente começam a ocorrer acima de 650 °C (923K).

Quando a resistência ao escoamento do aço é reduzida entre 30 e 40% da sua resistência ao escoamento em temperatura ambiente, à temperaturas entre 600 e 650°C, as falhas são possíveis de ocorrer antes da estrutura cristalina se transformar significativamente, caso os elementos sejam tensionados a um nível próximo da tensão máxima permitida.

A deformação do aço em elevadas temperaturas passa a ser significativa quando esta ultrapassa os 450 °C. A taxa de deformação aumenta aproximadamente 300 vezes para o aço estrutural ASTM A36, quando a temperatura do aço é elevada de 450 °C para 510 °C (SFPE, 2000). A deformação é um fenômeno complexo, dependente do nível de tensão e da taxa de aquecimento, entre outros fatores, freqüentemente não considerados nos cálculos de resistência ao fogo.

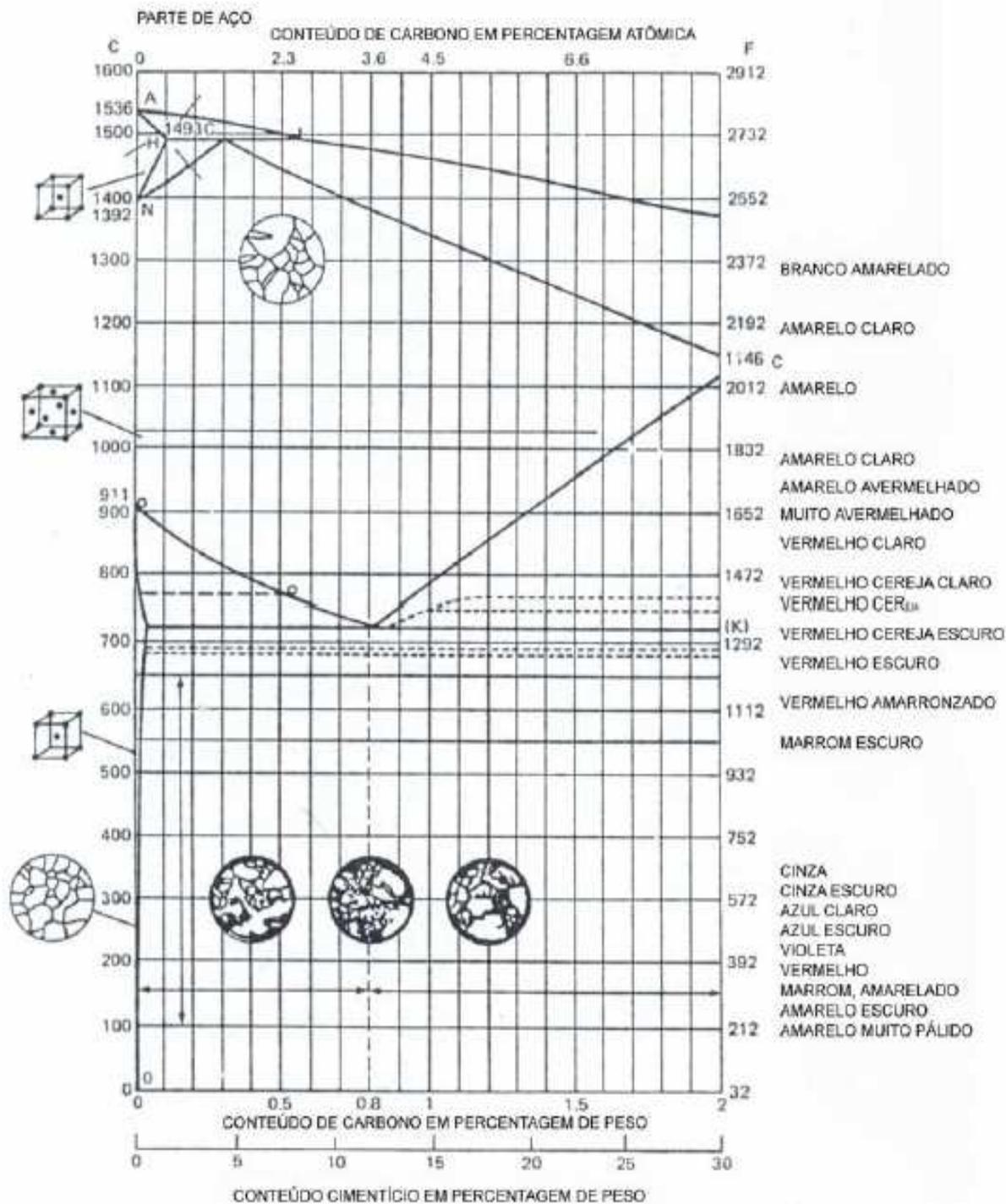


FIGURA 4.2 - Influência das temperaturas elevadas versus conteúdo de carbono no aço.

FONTE: adaptado de SFPE (2000).

A Figura 4.3 mostra os fatores de redução, relativos a 20°C, para o limite de escoamento dos aços laminados a quente, para o limite de escoamento dos aços trefilados e para o módulo de elasticidade de todos os tipos de aço, em temperatura elevada.

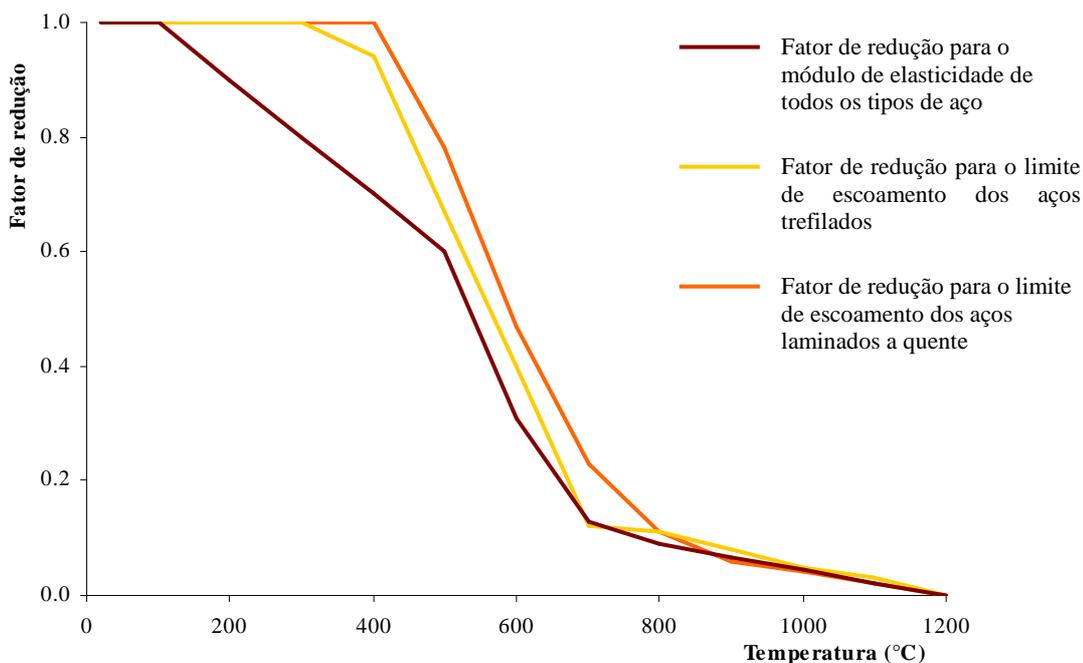


FIGURA 4.3 - Fatores de redução para o limite de escoamento e o módulo de elasticidade do aço com a temperatura.

FONTE: adaptado de ABNT NBR 14323:1999.

Massa específica - Segundo a norma brasileira ABNT NBR 14323:1999 e o EUROCODE 3, PARTE 2 (2003), a massa específica do aço pode ser considerada independente da temperatura, como mostrado na Equação 4.1

$$\rho_a = 7.850 \text{ Kg/m}^3$$

4.1

4.3.1.2 Propriedades térmicas

Condutividade térmica - A condutividade térmica do aço é alta se comparada, por exemplo, com a do concreto. Em temperatura ambiente, é cerca de 50 W/m °C, enquanto que para o concreto a condutividade está abaixo de 2 W/ m °C. É comumente assumido que a condutividade do aço é alta o suficiente – em seções de tamanho normal – para se ter uma temperatura uniforme em toda sua extensão; porém, em grandes seções, existem diferenças de temperatura, assim como em seções em que se pode perder calor (MALHOTRA, 1982).

Segundo a norma brasileira ABNT NBR 14323:1999, a condutividade térmica do aço pode ser determinada segundo as Equações 4.2 ou 4.3, em W/m°C.

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

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \text{ W/m}^{\circ}\text{C} \quad 4.2$$

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

$$\lambda_a = 27,3$$

Onde:

θ_a - temperatura do aço em graus Celsius (°C).

Se o cálculo for baseado no método simplificado, como descrito na seção 8 da norma ABNT NBR 14323:1999, o valor da condutividade térmica pode ser considerado independente da temperatura do aço. Neste caso, pode ser adotado o seguinte valor:

$$\lambda_a = 45 \text{ W/m } ^{\circ}\text{C}$$

As formas descritas podem ser vistas na Figura 4.4.

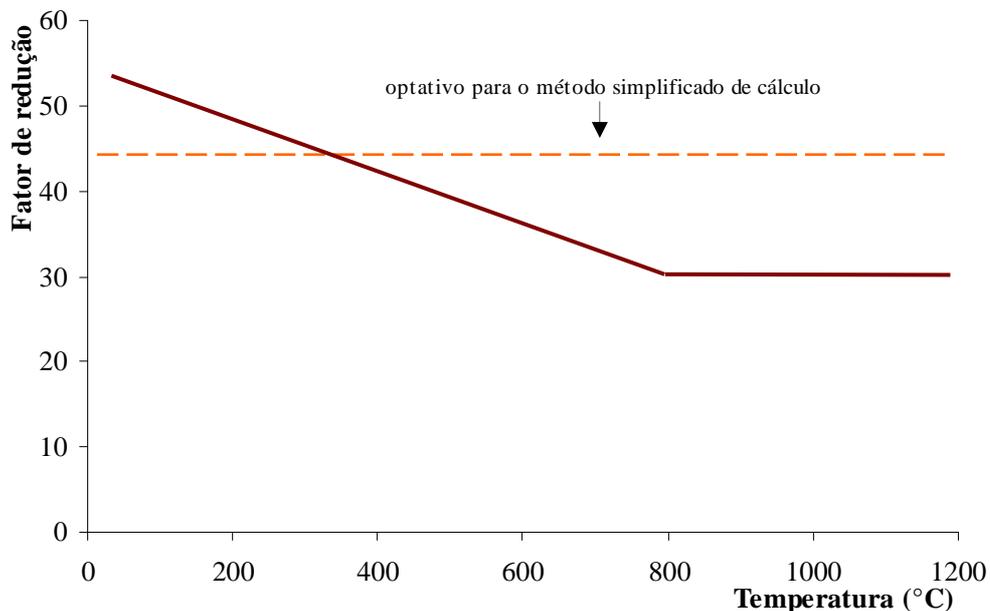


FIGURA 4.4 - Condutividade térmica do aço em função da temperatura.

FONTE: ABNT NBR 14323:1999.

Alongamento - O alongamento do aço, $\Delta l/l$, deve ser determinado conforme as Equações 4.3, 4.4 e 4.5. Ver Figura 4.5.

Para $20^{\circ} \text{C} \leq \theta_a < 750^{\circ} \text{C}$:

$$\Delta l/l = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4} \quad 4.3$$

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

$$\Delta l/l = 1,12 \times 10^{-2} \quad 4.4$$

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

$$\Delta l/l = 2,0 \times 10^{-5} \theta - 6,2 \times 10^{-3} \quad 4.5$$

Onde:

L - comprimento inicial da peça de aço em temperatura ambiente;

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

θ_a - temperatura no aço (°C).

Se o cálculo for baseado no método simplificado, como descrito na seção 8 da norma ABNT NBR 14323:1999, a relação entre o alongamento do aço e a temperatura pode ser considerada constante. Neste caso, o seguinte valor pode ser adotado (ver Figura 4.5).

$$\Delta l/l = 14,0 \times 10^{-6} (T_a - 20) \quad 4.6$$

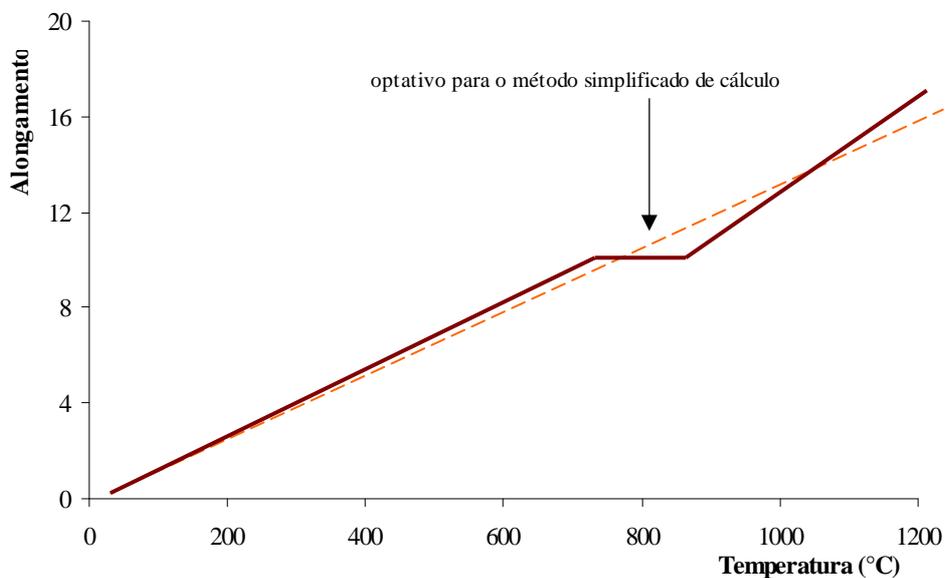


FIGURA 4.5 - Alongamento do aço em função da temperatura.

FONTE: ABNT NBR 14323:1999.

Calor específico - Definido como a capacidade térmica de um corpo por unidade de massa, o calor específico, segundo a ABNT NBR 14323:1999, é dado em Joule por quilograma e por grau Celsius (J/kg °C), conforme as Equações 4.7 a 4.10..

Para $20^\circ \text{C} \leq \theta_a < 600^\circ \text{C}$:

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad 4.7$$

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

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad 4.8$$

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

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad 4.9$$

Para $900^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1000^{\circ}\text{C}$:

$$c_a = 650 \quad 4.10$$

Onde:

θ_a - temperatura do aço em $^{\circ}\text{C}$.

Se o cálculo for baseado no método simplificado, como descrito na seção 8 da norma ABNT NBR 14323:1999, o valor do calor específico pode ser considerado independente da temperatura do aço. Neste caso, a Equação 4.11 pode ser adotada (ver Figura 4.6).

$$c_a = 600 \text{ J/kg } ^{\circ}\text{C} \quad 4.11$$

A Figura 4.6 ilustra estas duas considerações acerca do alongamento no aço.

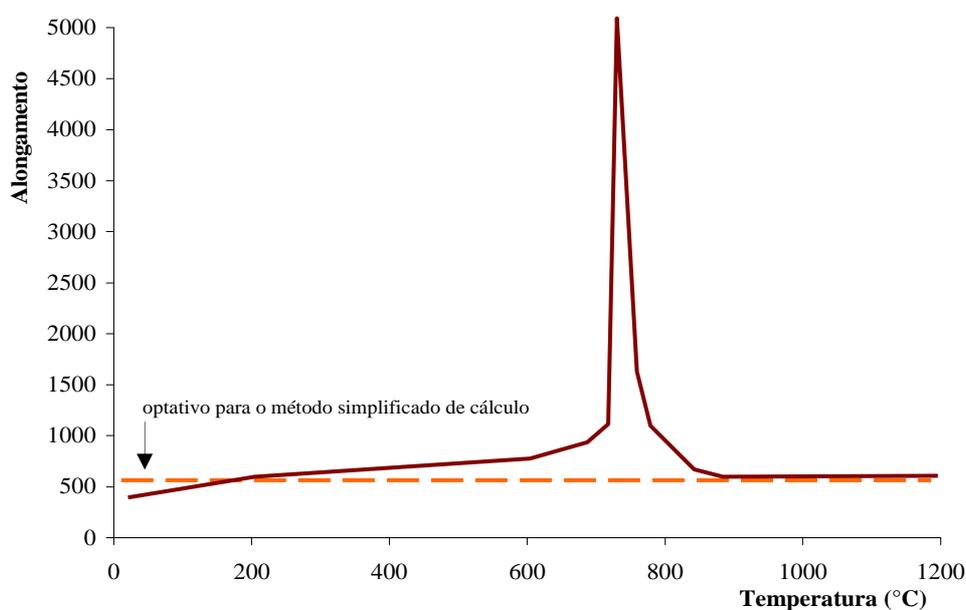


FIGURA 4.6 - Calor específico do aço em função da temperatura.

FONTE: ABNT NBR 14323:1999.

4.3.2 Propriedades da alvenaria

Os tijolos são classificados como materiais do Grupo L/I. A variável mais significativa que caracteriza o desempenho da alvenaria a temperaturas elevadas é a densidade, dependendo do tipo de tijolo adotado em função da sua porosidade.

De acordo com o EUROCODE 6, *Design of Masonry Structures* (2001), os elementos unitários (tijolos) da alvenaria podem ser classificadas em função do tipo de material empregado:

- Tijolos cerâmicos (barro);
- Tijolos refratários (com silicato de cálcio);
- Tijolos de concreto;
- Tijolos de concreto celular autoclavado;
- Tijolos de pedra manufaturadas;
- Tijolos de pedra natural.

Neste trabalho são apresentados apenas dados relacionados aos blocos cerâmicos, por constituírem o sistema de alvenaria do Edifício Habitacional estudado.

Os blocos cerâmicos são constituídos de barro queimado a altas temperaturas. A ação do calor dá origem a um processo de sinterização⁹, que funde todas as partículas do barro e desenvolve laços cerâmicos extremamente fortes nos elementos do bloco. Tais laços são altamente estáveis, o que resulta na capacidade desses tijolos de resistir a ações severas de desgaste e a permanecerem inertes a diversos ataques químicos,

Densidade - A densidade, ρ , dos tijolos varia entre 1660 a 2270 kg/m³, dependendo do material empregado e da técnica de conformação. Para o tijolo cerâmico padronizado pelas normas inglesas, esse valor se apresenta em 2180 kg/m³, segundo SFPE (2002).

⁹ A sinterização é um processo no qual pós com preparação cristalina ou não, uma vez compactados, recebem tratamento térmico, no qual a temperatura de processamento é sempre menor que a sua temperatura de fusão.

Módulo de elasticidade - O módulo de elasticidade, E , varia entre 10×10^3 e 20×10^3 MPa. Em temperatura ambiente, o coeficiente de expansão térmica, α , dos tijolos cerâmicos é de $5,5 \times 10^{-6} m.m^{-1}.K^{-1}$.

Calor específico - O calor específico é significativamente independente da densidade do tijolo, podendo ser calculado, em (kJ/kg°C), segundo a Equação 4.12 (HARMATHY, apud PURKISS, 1996). Ver Figura 4.7.

$$C_{PM} = 0,851 + 0,512 \times 10^{-3} \theta_m - \frac{8,676 \times 10^3}{(\theta_m + 273)^2} \quad 4.12$$

Sendo:

θ_m - temperatura da alvenaria.

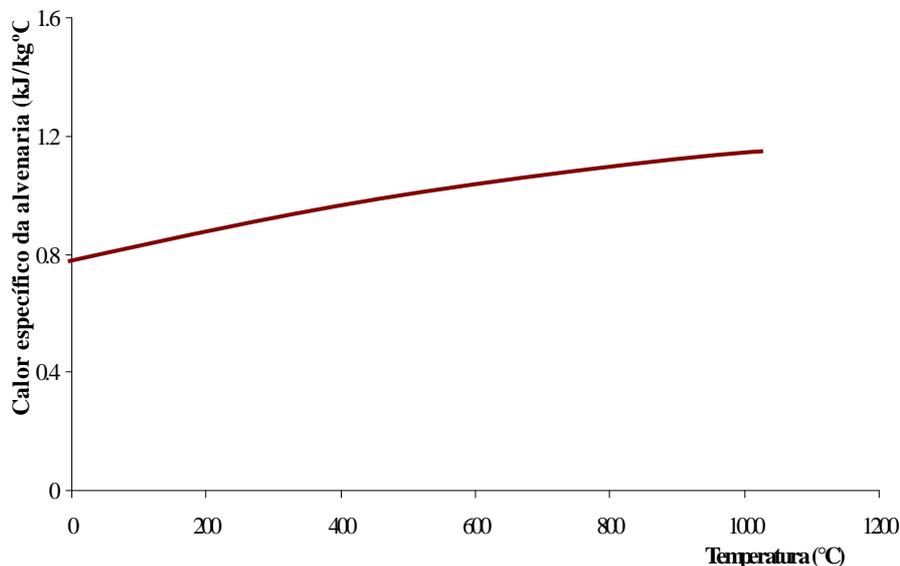


FIGURA 4.7 - Calor específico da alvenaria em função da temperatura.

FONTE: MALHOTRA, apud PURKISS, 1996.

Condutividade térmica - A condutividade térmica da alvenaria depende da densidade do tijolo. Dessa forma, quanto maior a densidade, maior a condutividade (MALHOTRA, apud PURKISS, 1996). A Figura 4.8 ilustra essa propriedade em função da temperatura.

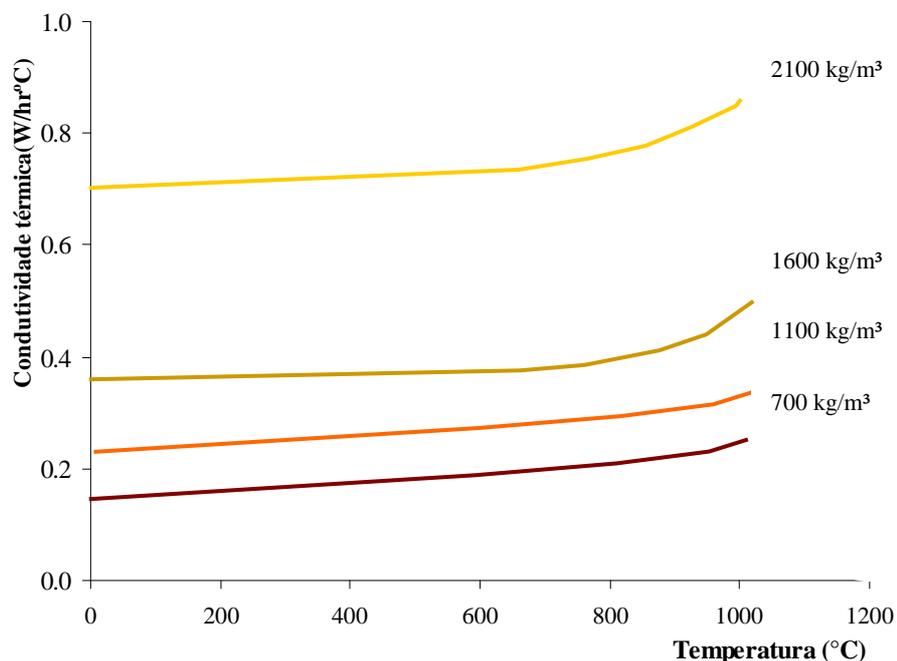


FIGURA 4.8 – Condutividade térmica da alvenaria em função da temperatura.

FONTE: MALHOTRA, apud PURKISS, 1996.

4.3.3 Propriedade da madeira

As madeiras são classificadas como materiais do Grupo L/I/F ou I/F. No edifício foco desse trabalho, esse material é encontrado no mobiliário e nas portas internas dos apartamentos.

A madeira é um material anisotrópico¹⁰, o que influencia sua resistência e dureza pela orientação dos grãos, tanto na direção longitudinal quanto transversal. Dessa forma, as propriedades mecânicas são afetadas pela temperatura e influenciadas pelo material, taxa de queima e orientação do grão. Comparando-se os anéis de crescimento da madeira, as propriedades mecânicas da porção mais recente são drasticamente diferentes

¹⁰ Anisotrópico é o material que exibe diferentes valores de uma propriedade em diferentes direções cristalográficas (CALLISTER, 2000, pg. 563).

de um anel mais antigo. A Figura 4.9 mostra essas duas estruturas para uma madeira de Pino.

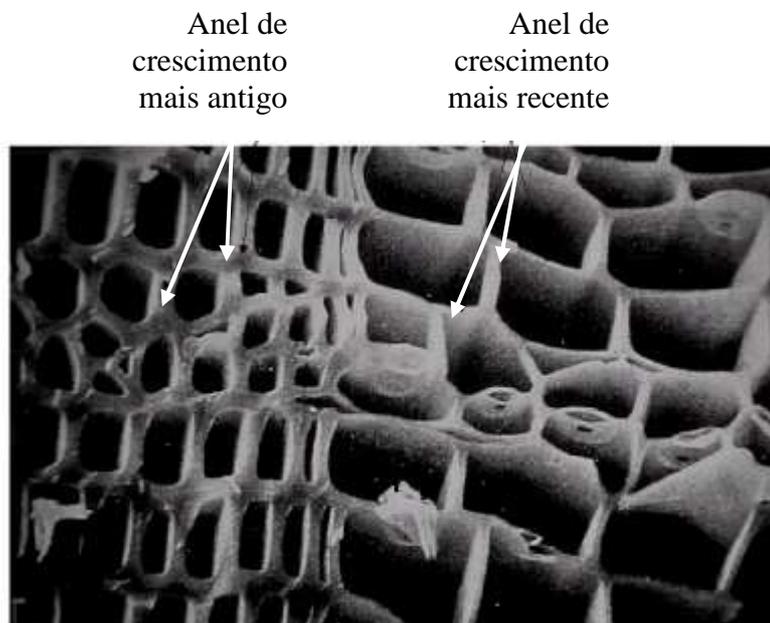


FIGURA 4.9 – Microestrutura da madeira nos anéis de crescimento.

FONTE: *University of Wisconsin* (2006).

Densidade - Segundo o SFPE (2002), a densidade, ρ , da madeira seca varia entre 300 kg/m³, para Cedro, a 700 kg/m³, para algumas madeiras escuras, com diminuição proporcional ao aumento de temperatura. O módulo de elasticidade, E , ao longo do grão varia entre 5.5×10^3 a 15×10^3 MPa. A maioria das propriedades da madeira são variáveis em função da espécie.

Carbonização - A carbonização é uma das propriedades mais importantes a altas temperaturas para a madeira. A taxa de carbonização é influenciada pelo fluxo de calor ou severidade do incêndio. Geralmente, em exposição ao fogo, uma constante transversal granular da madeira carboniza a uma taxa de 0.6 mm / min, sendo que a taxa de carbonização para grãos paralelos é aproximadamente duas vezes maior do que em grãos posicionados transversalmente (SFPE, 2002, pg. 1-174). Elementos retardantes podem ser usados para reduzir a propagação da chama na madeira, reduzindo a taxa de carbonização.

4.4 Ensaio de mobiliário

Na comunidade de estudos da segurança contra incêndio é de conhecimento comum que o mobiliário, na maioria das vezes, é a principal causa das taxas de propagação do fogo e é freqüentemente responsável pelo pico de energia térmica liberada durante um incêndio em compartimento.

Os edifícios habitacionais apresentam um elevado risco à vida humana, em função de ser um ambiente de elevada permanência de pessoas e contar com uma multiplicidade de elementos combustíveis, a considerar o mobiliário como o primeiro ou segundo elemento ignizado.

As descrições encontradas neste item se referem a testes realizados pelo *National Bureau of Standards* (NBS), em 1983 e atentam-se a itens de mobiliários, especificamente a cadeiras, sofás, estante de livros, cama e guarda-roupas .

De maneira a delimitar esta pesquisa ao edifício habitacional estudado, e mais precisamente ao apartamento de incêndio, são apresentados os dados apenas de um sofá e um guarda-roupa¹¹.

Sofá - O sofá apresenta-se com estrutura em madeira e almofadas em espumas de polietileno para três lugares e possui 51,50 kg (Figura 4.10).

¹¹ A opção pelo guarda-roupa decorre deste material ser constituído de madeira e pela dificuldade de obtenção de dados seguros de estante nas bibliografias consultadas.

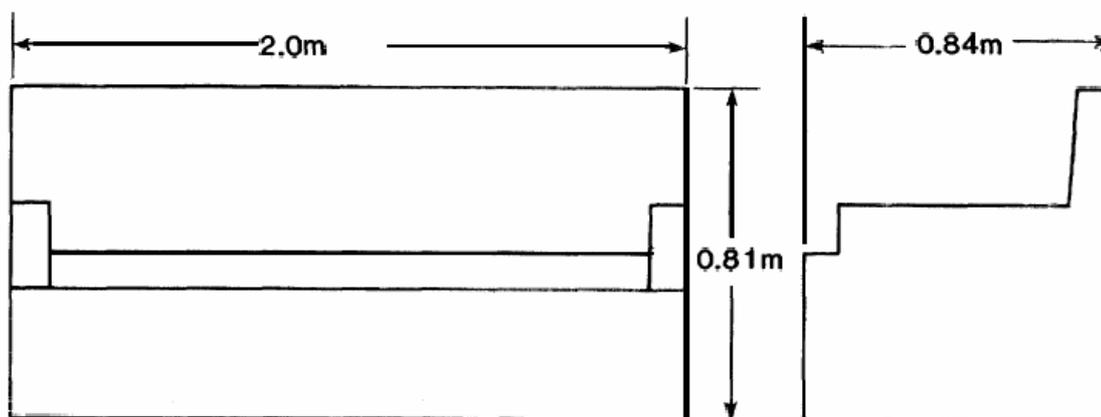


FIGURA 4.10 – Dimensões do sofá testado de três lugares.

FONTE: NBS (1983)

A queima deste sofá apresentou a máxima taxa de liberação de calor em valor superior a 3000 kW/h. Considerado muito alto, este valor de HRR poderia causar facilmente o *flashover* em qualquer espaço compartimentado, como salas e quartos. A radiação térmica, no valor de 38 kW/m², torna facilitada a ignição de qualquer combustível comum presente no ambiente.

As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam os gráficos da taxa de liberação de calor e taxa de perda de massa, respectivamente, em função da temperatura. A Tabela 4.4 apresenta os resultados da queima do sofá.

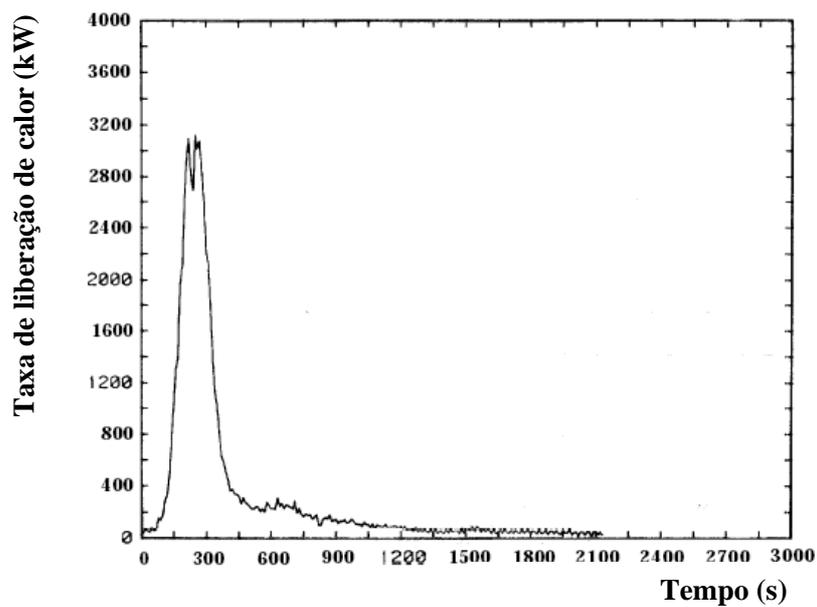


FIGURA 4.11 – Taxa de liberação de calor para sofá de três lugares.

FONTE: NBS (1983)

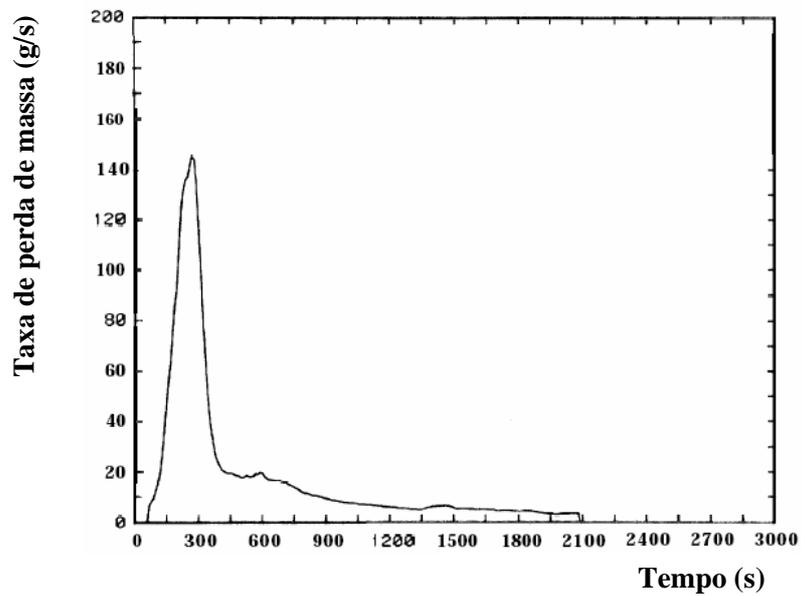


FIGURA 4.12 – Taxa de perda de massa para sofá de três lugares.

FONTE: NBS (1983)

TABELA 4.4 – Resultados de queima do sofá.

Elemento do mobiliário	Massa (kg)	Total de liberação de calor (MJ)	Pico de perda de massa (g/s)	Calor de combustão (MJ/kg)	Radiação térmica (kW/m ²)	Total de produção de fumaça (g)	Pico Monóxido de carbono (g/s)
Sofá com almofadas	51,5	714	145,3	18,9	38	558	4,5

FONTE: NBS (1983)

Guarda-roupas – As dimensões e materiais considerados neste item se assemelham a um exemplar verificado nas pesquisas de campo realizadas durante a pesquisa. Toda a estrutura desse item é constituída por compensado de madeira (Figura 4.13).

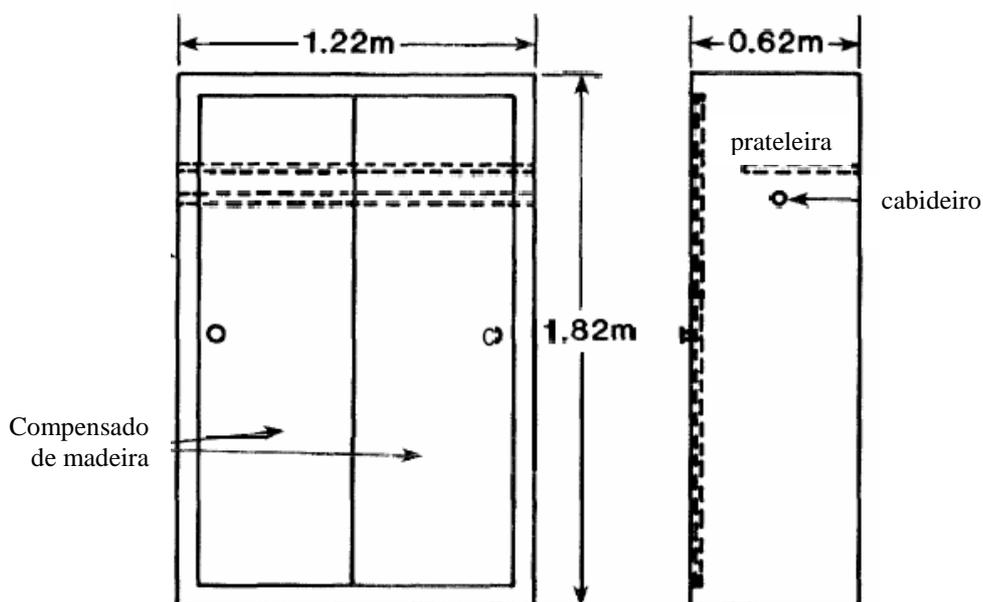


FIGURA 4.13 – Dimensões de guarda-roupa testado.

FONTE: NBS (1983)

Foi verificada uma taxa de liberação de calor inicial superior a 6000kW aos 130 segundos, apresentando taxa de perda de massa de 301 g/s.

As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam os gráficos da taxa de liberação de calor e taxa de perda de massa, respectivamente, em função da temperatura. A Tabela 4.5 apresenta os resultados da queima do sofá.

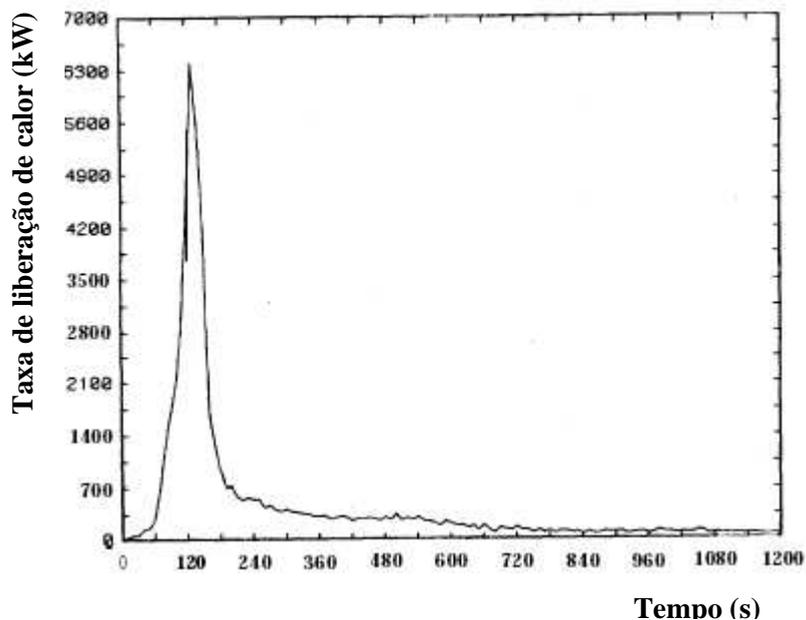


FIGURA 4.14 – Taxa de liberação de calor para o guarda-roupa testado.

FONTE: NBS (1983)

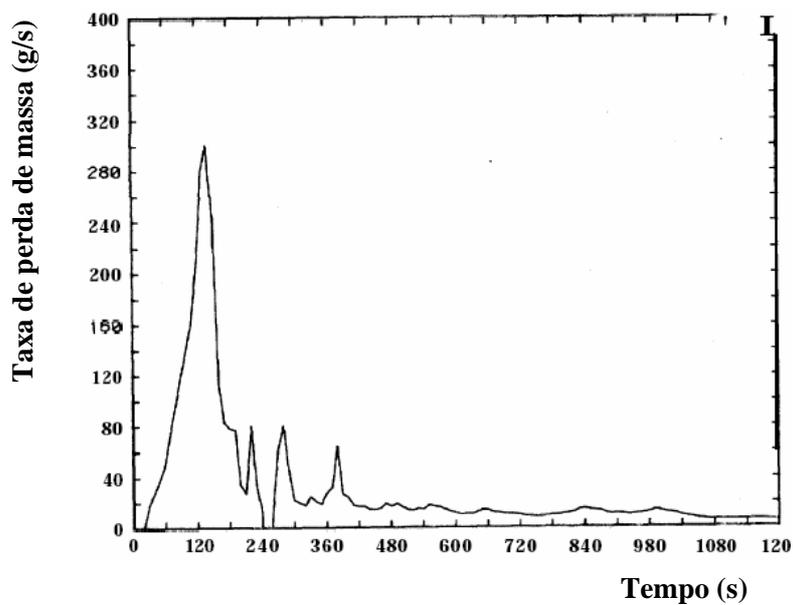


FIGURA 4.15 – Taxa de perda de massa para o guarda-roupa testado.

FONTE: NBS (1983)

Foi verificado uma taxa de liberação de calor inicial de mais de 6000kW em 130 segundos, apresentando taxa de perda de massa de 301 g/s.

TABELA 4.5 – Resultados de queima do guarda-roupas.

Elemento do mobiliário	Massa (kg)	Total de liberação de calor (MJ)	Pico de perda de massa (g/s)	Calor de combustão (MJ/kg)	Radiação térmica (kW/m²)	Total de produção de fumaça (g)	Pico Monóxido de carbono (g/s)
Guarda-roupa em madeira compensada	36	590	301,3	16,9	19,5	67	3,1

FONTE: NBS (1983)

5

EDIFÍCIOS HABITACIONAIS ESTRUTURADOS EM AÇO – PARÂMETROS DE SEGURANÇA

5.1 Introdução

O ato de morar faz parte da própria história do desenvolvimento da vida humana. Isso significa dizer que não é possível viver sem ocupar lugar no espaço. Entretanto, as características desse ato mudam de acordo com o contexto social, político e econômico de cada época e país.

No Brasil, o conceito de habitação popular emergiu junto às políticas habitacionais resultantes do desenvolvimento econômico, principalmente a partir da década de 60. Nesse período, essas políticas se tornaram expressão de uma preocupação do Estado Brasileiro ao problema da moradia, que se agravava em função do rápido movimento migratório desencadeado após 1964. Nesse momento, a questão do déficit de moradia já era pertinente.

Em função dos elevados custos de terra e taxas para aquisição da casa própria, a autoconstrução se tornou um mecanismo desenfreado para a solução imediata da questão habitacional. Desse modo, emergem com grande intensidade as chamadas áreas clandestinas, ou não regulamentadas, onde predominam as favelas, os cortiços e as vilas, que não oferecem condições adequadas de habitabilidade e segurança.

No que tange ao cenário brasileiro atual, o déficit habitacional se encontra próximo de sete milhões (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2007), mantendo as ações de políticas habitacionais atuantes. A considerar o enfoque deste trabalho, discorre-se brevemente sobre as políticas habitacionais dos estados de São Paulo e Minas Gerais.

Em 1965, foi criada a Companhia de Habitação do Estado de Minas Gerais (COHAB-MG) pelo Governo do Estado, com o intuito de enfrentar o desafio do combate ao déficit habitacional e da urbanização de favelas. A iniciativa foi resultado direto do êxodo rural e da migração da população para os grandes centros urbanos, atraída pela geração de riqueza produzida na transformação econômica e social em que o Brasil e Minas Gerais enfrentaram na década de 60. Ainda segundo a Fundação João Pinheiro, o déficit habitacional em Minas Gerais, no ano de 2000, equivalia a 632 mil. Ao público pertencente a esse quadro é que a COHAB aplica sua produção de moradias populares.

A Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano do Estado de São Paulo (CDHU-SP), vinculada à Secretaria de Habitação, foi fundada em 1949, embora tenha este presente nome desde 1989. Sua ação envolve o atendimento à população de baixa renda (entre 1 a 10 salários mínimos) e intervenções no desenvolvimento urbano de acordo com as diretrizes da Secretaria da Habitação.

Diferente das décadas de 70 e 80, quando havia maior disponibilidade de recursos fiscais e orçamentários para a habitação popular, essas empresas contam hoje com novos conceitos acerca das tecnologias empregadas, visando necessariamente projetos que levem em consideração a praticidade, a rapidez das obras e os custos de construção, além da valorização da forma de habitar da classe popular brasileira. Nota-se o uso do

aço, e mais precisamente dos perfis formados a frio (PFF), uma constante na atuação dessas companhias.

Nesse contexto, é necessário mencionar a Solução Usiminas para Habitação de Interesse Social, anteriormente denominada USITETO, consolidada em 1999, resultado de uma parceria técnica entre a USIMINAS, COHAB-MG, CDHU e o Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais (DEES-UFMG). Com foco na especificação e dimensionamento de uma solução construtiva para edifícios de até sete pavimentos, foram permitidas agilidade e possibilidade de complementação do processo construtivo com mão-de-obra comunitária, não especializada, em sistema de mutirão assistido. Atendendo às necessidades habitacionais brasileiras, os prédios com estrutura em aço possuem quatro, cinco ou sete pavimentos, com um número de unidades de 16, 20 e 28 por edificação, respectivamente (CBCA, 2006).

Este capítulo tem por finalidade apresentar o objeto da presente pesquisa, que consiste de um edifício habitacional de baixo custo, de cinco pavimentos e estruturado em PFF, localizado em São Paulo, resultado da parceria mencionada. A escolha do objeto pode ser justificada por alguns pontos:

Localização: São Paulo - São Paulo apresenta uma ocupação mais remota dos edifícios habitacionais de cinco pavimentos, comparado ao estado de Minas Gerais. Dessa forma, aspectos da população e pós-ocupação puderam ser melhor parametrizados; ocorrência, de incêndio em um apartamento de edifício da mesma tipologia, porém de quatro pavimentos¹², no ano de 2002, por algumas vezes já referenciado por outros autores (PANNONI, et al, 2005); aquisição de dados técnicos disponibilizados pelas empresas de projeto e CDHU-SP.

¹² O apartamento citado se refere a um apartamento do quarto andar do Conjunto Habitacional Juscelino Kubitschek de Oliveira, localizado no número 41 da Rodovia Angelo Perill, em Limeira, São Paulo.

Dados do apartamento e materiais: Minas Gerais - Em função da viabilidade técnica de visitas a campo, foi adotado para estudo de *lay-out* e materiais constituintes do mobiliário, um apartamento de edifício de quatro pavimentos localizado na Vila São José, em Belo Horizonte, de mesma tipologia e projeto arquitetônico do de cinco pavimentos escolhido em São Paulo.

Pode-se inferir que os edifícios habitacionais de cinco pavimentos, construídos tanto pela COHAB-MG quanto pela CDHU-SP, como referenciado anteriormente, apresentam similaridade entre seus projetos e implantação. As pequenas divergências encontradas se constituem como insignificantes no escopo deste trabalho, que pretende uma análise ampla acerca dos edifícios habitacionais de cinco pavimentos dessa tipologia.

Os assuntos abordados nos capítulos anteriores, somados ao entendimento da edificação apresentada e o estudo do comportamento dos materiais em altas temperaturas, especificado no Capítulo 4, tornam possível a posterior análise desse edifício nos *softwares Smartfire e buildingEXODUS*, conforme apresentado no Capítulo 7.

5.2 Edifício habitacional de cinco pavimentos: caracterização

5.2.1 Arquitetura

Conforme o Decreto Estadual nº. 38.069, Especificações para instalações de proteção contra incêndios (CBPMESP, 1993), edificações de interesse social são as unidades ou conjuntos exclusivamente residenciais, contemplados pelos benefícios estabelecidos em programas habitacionais de alcance social.

Os edifícios habitacionais de baixo custo, de cinco pavimentos e estruturados em PFF apresentam tipologia “H”, formados por dois blocos com dez apartamentos cada e separados pela caixa de escada (Figura 5.1). Cada pavimento possui quatro

apartamentos, divididos em sala, cozinha, área de serviço, banheiro e dois quartos. As Figuras 5.2 e 5.3 representam, respectivamente, o *lay-out* padrão dos apartamentos e a planta tipo dos pavimentos. A Figura 5.4 mostra os cortes AA e BB, respectivamente.



FIGURA 5.1 – Conjunto Habitacional de cinco pavimentos na Solução Usiminas para Habitação de Interesse Social.

FONTE: COSIPA (2006).



FIGURA 5.2 – Apartamento tipo do edifício de cinco pavimentos.
com *lay-out*.

FONTE: Arquivos da autora.

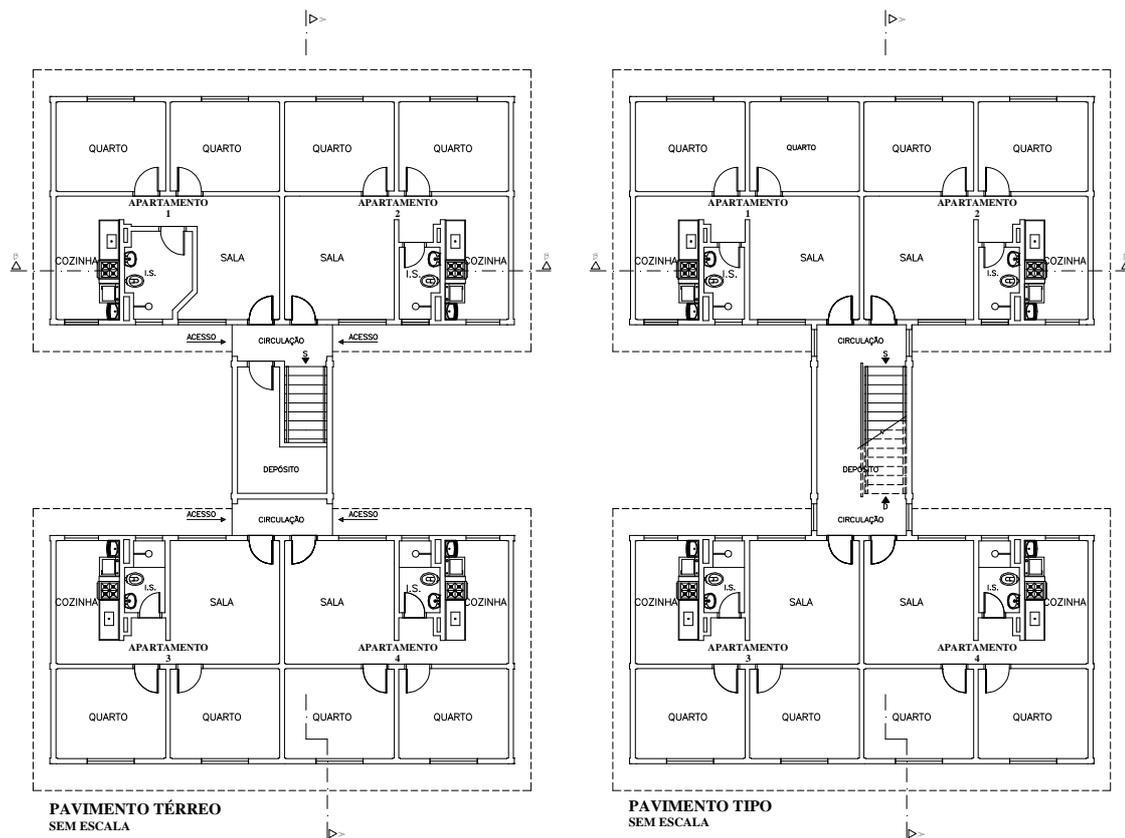


FIGURA 5.3 – Planta tipo de edifício habitacional de cinco pavimentos.

FONTE: adaptado de CDHU (2000).

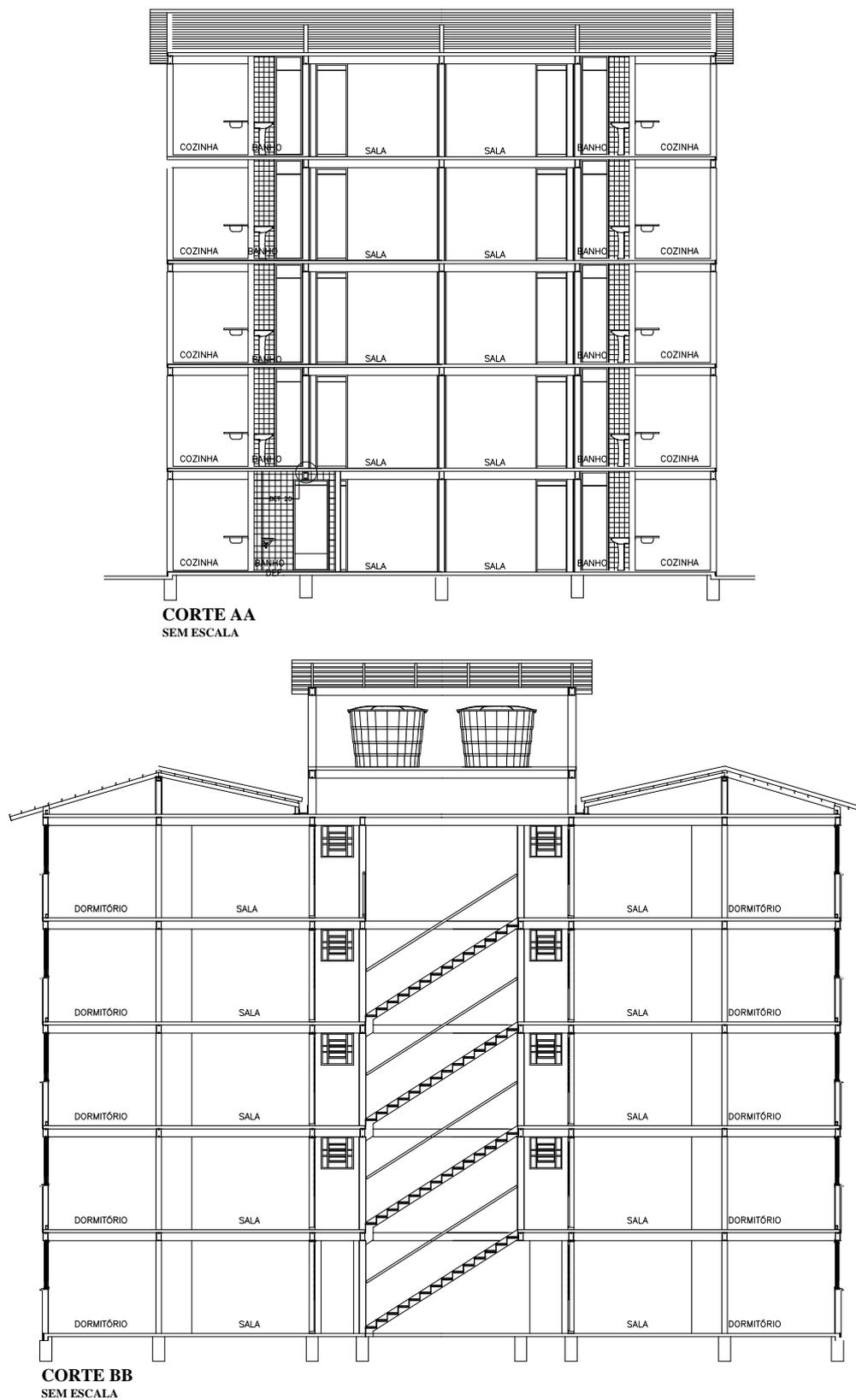


FIGURA 5.4 – Corte esquemático de edifício habitacional de cinco pavimentos.

FONTE: adaptado de CDHU (2000).

As áreas relativas ao apartamento e ao edifício são apresentadas na Tabela 5.1. As divisões encontradas demonstram claramente o mecanismo de redução de área por pavimento ao se dividir a edificação em blocos, através da caixa de escada (Figura 5.5). Dessa forma, pode-se considerar a edificação com área inferior a 750 m², como será abordado mais adiante, para efeito do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), item 5.3, e Requisitos de projeto, item 5.4.

TABELA 5.1 - Cômputo das áreas de edifício habitacional de cinco pavimentos.

Discriminação da área	Identificação		Área (m ²)
Área útil	Apartamento por cômodo	Dormitório 1	8,65
		Dormitório 2	8,65
		Instalação sanitária	2,59
		Sala	11,88
		Cozinha	4,32
		Área de serviço	2,36
		Circulação	1,66
		Total por apartamento	40,11
Área de construção	Apartamentos individuais		46,29
	Circulação por andar		18,42
	Construção por andar		203,58
Área do bloco	Construção por apartamento		46,29
	Construção por pavimento		92,58
	Total por bloco		462,90
Área da escada de ligação	Área de construção por andar		18,42
	Caixa d'água		19,55
	Total por bloco		111,65
Área do edifício (20 aptos - 2 blocos)	Pavimento tipo		1017,90
	Caixa d'água		19,55
	Total por edifício		1037,45

FONTE: CDHU (2000).

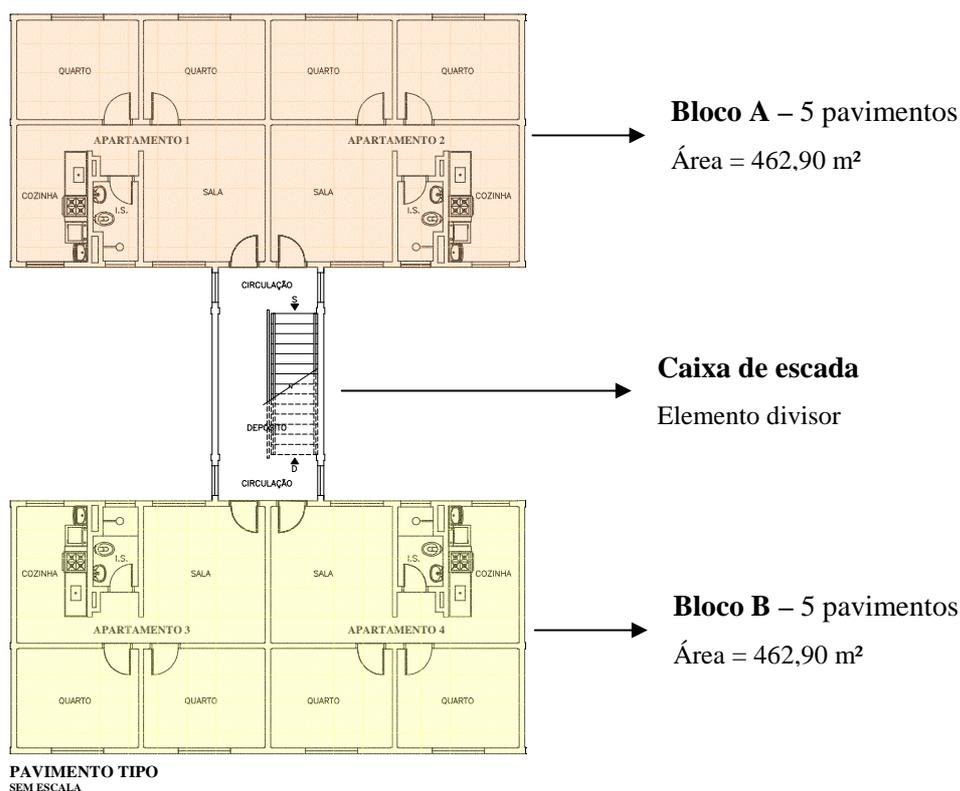


FIGURA 5.5 – Planta do pavimento tipo e áreas por blocos.

FONTE: arquivos da autora.

5.2.2 Estrutura: Perfis formados a frio

A construção metálica tem se tornado um incremento favorável na busca pela diminuição do déficit habitacional brasileiro, apresentando-se como tecnologia corrente nas Companhias de Habitação e nos demais segmentos da construção civil.

Os PFF, em função de possuírem inúmeras vantagens para a construção civil, como seu reduzido custo e simplicidade de produção, leveza estrutural, facilidade de manuseio e montagem, além da rapidez de execução, tem se apresentado como o produto mais indicado para as soluções construtivas de baixo custo.

Os perfis obtidos por conformação a frio têm hoje sua utilização em fase de rápido crescimento no Brasil. Isto se deve à diversidade de aplicações do produto que se obtém

pela conformação de chapas finas, obtendo-se concepções estruturais esbeltas e eficientes para o uso nas edificações em geral (RODRIGUES, 2007).

Na caracterização das habitações de baixo custo estruturadas em PFF quanto à estrutura, são apresentados alguns atributos.

O aço utilizado é o USI SAC 300 ou o COS AR COR 400E. Suas principais características são apresentar resistência ao escoamento de 300 MPa, boa capacidade de conformação a frio e maior resistência à corrosão atmosférica. Quanto à sua padronização e aspectos técnicos, os projetos são fundamentados na norma ABNT NBR 6355: 2003.

As especificações dos edifícios habitacionais estruturados em aço com PFF, podem ser assim descritas:

Pilares - Perfis compostos por dois perfis cartola, formando um perfil duplo cartola. Sua configuração em planta permite que paredes encaixem na sua geometria nas quatro direções, com suas faces protegidas da ação do calor, como visto esquematicamente na Figura 5.6.

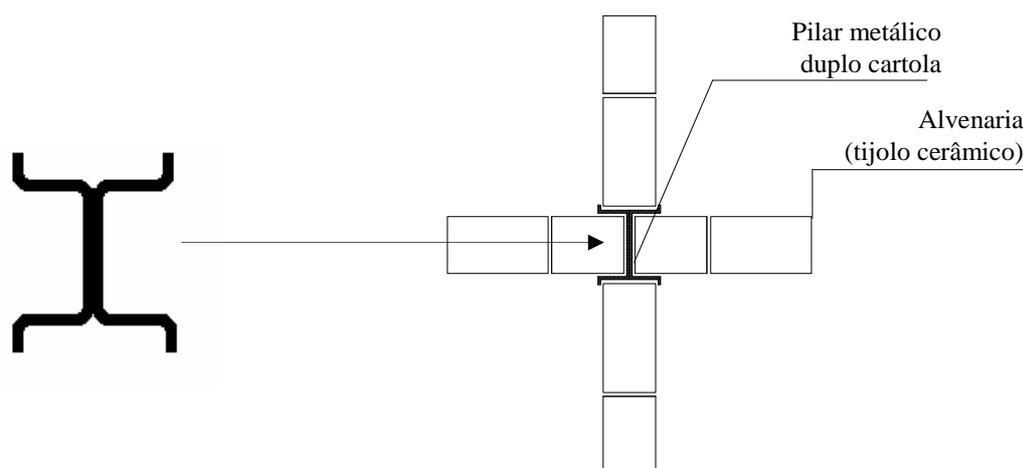


FIGURA 5.6 – Perfil duplo cartola isolado e entre paredes.

Vigas mistas – As vigas se encontram posicionadas entre as alvenarias e a laje, com as faces expostas ao calor voltadas para ambientes distintos dentro de um mesmo

apartamento, ou ainda para dois apartamentos distintos ou áreas frias. Esta forma garante um bom desempenho estrutural e, juntamente com sua conexão à laje, garante a leveza estrutural. No caso dos prédios construídos segundo o programa proposto pela USIMINAS e UFMG, a viga mista incorpora o concreto da laje a seu desempenho através de conectores de cisalhamento soldados em sua mesa superior. Este sistema explora mais a compressão do concreto da laje e a tração da maior parte da seção de aço das vigas (Figura 5.7).

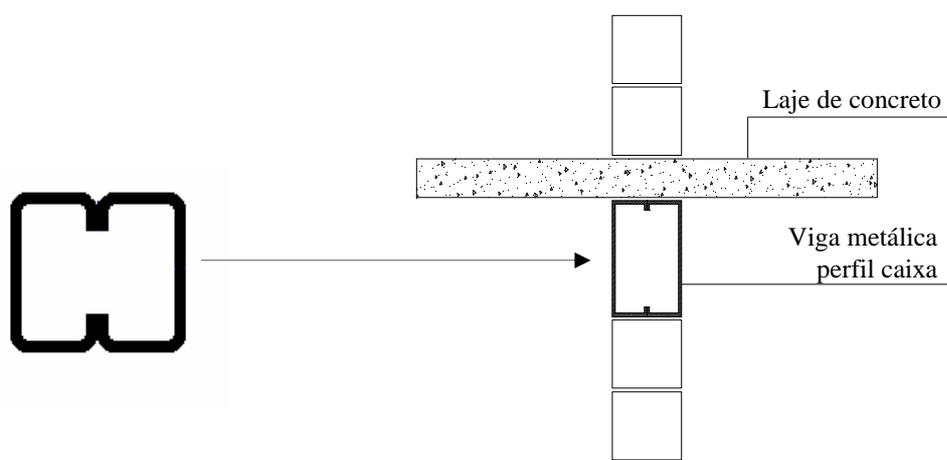


FIGURA 5.7 – Perfil caixa isolado e entre parede e laje.

A Figura 5.8 mostra as vigas e pilares *in loco*, em edificação concluída. Nota-se que os perfis se encontram entre a alvenaria e o reboco.



FIGURA 5.8 – Vista de pilares e vigas em edifício concluído.

FONTE: USMINAS (2004).

Estabilização - a estrutura é estabilizada por contraventamentos diagonais em duas direções (longitudinal e transversal) para os edifícios da COSIPA. Nos edifícios da USIMINAS, os contraventamentos apresentam-se apenas em uma direção. Na outra direção utiliza-se de pórticos planos. A laje responsabiliza-se pelo travamento horizontal da estrutura, com a formação de um diafragma rígido.

Lajes – O sistema metálico possibilita a utilização de vários tipos de lajes: maciças moldadas “*in loco*”, mistas com forma de aço incorporadas (*steel-deck*), pré-moldadas, pré-lajes e sistema de vigas mistas. Os dados específicos de cada sistema não serão abordados, em função de não exercerem influência direta nos parâmetros analisados neste trabalho.

Ligações – Para a composição dos perfis dos pilares e vigas, as ligações são soldadas entre pilares e vigas, sendo ponteados durante a montagem e completadas com cordão intermitente ao longo de todo o contato externo entre os mesmos. No caso dos prédios da COSIPA, as ligações entre vigas e pilares são parafusadas, enquanto que nos prédios da USIMINAS tais ligações são soldadas. Nas ligações rígidas o filete de solda é feito em toda a volta na união dos perfis. Nas ligações consideradas flexíveis, a solda é executada apenas nas almas das vigas. Os processos de solda podem ser os mais diversos, sendo mais comuns o elétrico ou o por arame tipo mig-mag. Em ambos os casos, deve-se atentar para o metal base da estrutura na especificação da solda utilizada.

Vedações - é possível especificar qualquer sistema de vedação. O que tem sido mais comumente utilizado, e tem suas conexões especificadas pela Solução Usiminas para Habitação de Interesse Social, é a alvenaria de blocos cerâmicos furados, a qual é considerada para o escopo deste trabalho (Figura 4.8). No entanto, pode ser verificada também o emprego de tijolos de concreto.

A Figura 5.9 apresenta o canteiro de obras do Conjunto habitacional com edifícios de cinco pavimentos. Notam-se os contraventamentos nas paredes cegas e a laje de concreto.



FIGURA 5.9 – Estrutura metálica, vedação e laje, nos edifícios de cinco pavimentos.

FONTE: USMINAS (2004).

5.3 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo e isenções

5.3.1 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo

A segurança das estruturas das rotas de saída expostas ao fogo deve ser garantida durante o tempo de evacuação em situação de incêndio, com o objetivo de garantir a salvaguarda da vida humana.

A exigência de resistência ao fogo é estabelecida como tempo, tanto apresentada pelo Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), como pelo tempo equivalente. Não se deve entender o TRRF como o tempo necessário que a estrutura da edificação tem que resistir para permitir a retirada dos ocupantes da edificação. O TRRF é o tempo em que um elemento construtivo resiste ao incêndio-padrão (em forno) antes de seu colapso. Por conseguinte, tal tempo foi internacionalmente convencionado como tempo necessário para que sejam alcançados os objetivos das normas de exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações, em especial a norma ABNT NBR 14432:2001 e IT's dos corpos de bombeiros. O estabelecimento dos tempos se dá entre 30 e 120 minutos, com intervalos de 30 minutos, em função da altura

da edificação, da área do pavimento, da ocupação do edifício, das medidas de proteção ativas, dentre outros.

A relação entre o risco à vida humana e o TRRF da edificação é diretamente proporcional. Quanto maior se apresentar o risco à vida, em função da ocupação e altura do edifício, maior as exigências de segurança e o TRRF. A Tabela 5.2 apresenta uma adaptação da norma ABNT NBR 14432:2001 para as exigências de TRRF:

TABELA 5.2 – Adaptação da tabela de exigências de TRRF.

Ocupação/uso	Altura da edificação				
	Classe P1 $h \leq 6m$	Classe P2 $6m < h \leq 12m$	Classe P3 $12m < h \leq 23m$	Classe P4 $23m < h \leq 30m$	Classe P5 $h > 6m$
Residencial	30	30	60	90	120
Hotel	30	60 (30)	60	90	120
Supermercado	60 (30)	60 (30)	60	90	120
Escritório	30	60 (30)	60	90	120
Shopping	60 (30)	60 (30)	60	90	120
Escola	30	30	60	90	120
Hospital	30	60	60	90	120
Igrejas	60 (30)	60	60	90	120

FONTE: adaptado de ABNT NBR 14432:2001.

A temperatura atuante no aço em situação de incêndio pode ser determinada por:

- Equações prescritas por normas técnicas;
- Métodos de análise térmica avançados, com utilização de softwares específicos;

Quanto às temperaturas dos gases, menciona-se:

- Método do incêndio natural compartimentado;
- Método do incêndio-padrão associado ao TRRF, em que este pode ser determinado através de três métodos: método de avaliação de risco (método de Gretener), método do tempo equivalente e método tabular. Estes serão apresentados resumidamente.

Método de Gretener – sugere a verificação da segurança global da edificação, que engloba a proteção à vida e patrimonial e utiliza-se de métodos de avaliação de risco de ocorrência e propagação do incêndio. Os meios utilizados para a segurança à vida, juntamente com fatores de projeto e uso da edificação normalmente podem se apresentar suficientes à extinção do incêndio ou, pelo menos, tornar mínima a ação térmica na estrutura, no tocante da fase *pré-flashover*.

A partir dos fatores relacionados abaixo, este método permite determinar o tempo de resistência ao fogo, via curva-padrão, necessário às estruturas e independente do material. Os fatores são:

- geometria do compartimento;
- altura do edifício;
- sistemas de exaustão de fumaça e calor;
- sistemas de prevenção e combate;
- ocupação do compartimento (carga de incêndio específica, risco de propagação do incêndio, intensidade da fumaça, ignição, risco às pessoas);
- eficiência no combate ao incêndio (distância do corpo de bombeiros e brigadas).

Método do tempo equivalente – no intuito de correlacionar o tempo de resistência ao fogo encontrado em incêndios reais e em ensaios realizados a altas temperaturas para estruturas, materiais de proteção térmica, dentre outros – segundo curvas padronizadas, é proposto o método de tempo equivalente (Figura 5.10).

Esse método consiste em calcular a temperatura do aço a partir da curva-padrão para um tempo fictício denominado tempo equivalente. Essa temperatura corresponde à máxima temperatura no aço, para a curva natural (SILVA, 2001).

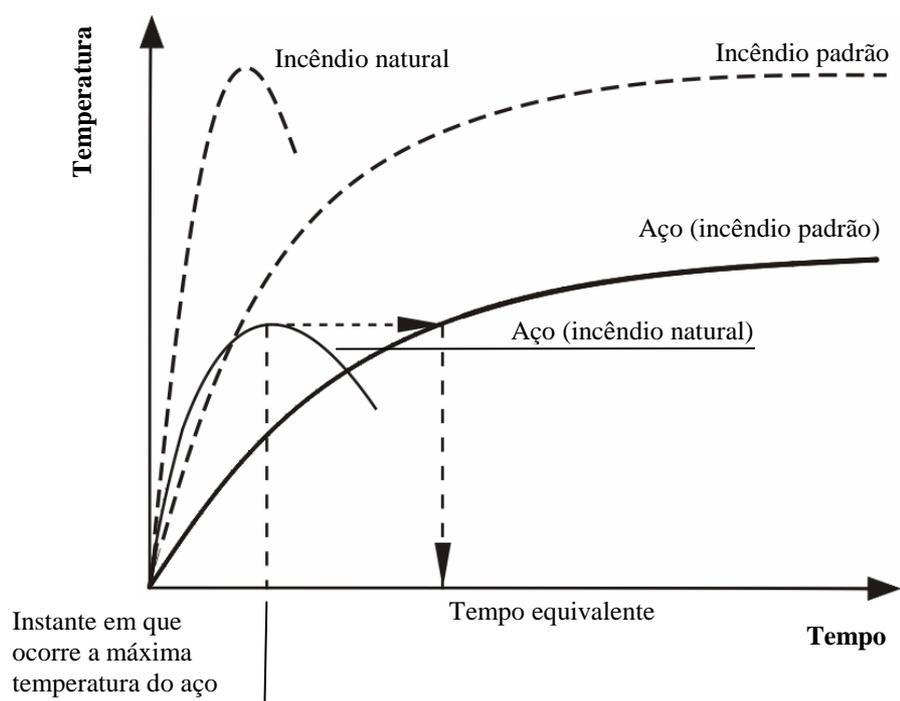


FIGURA 5.10 - Tempo equivalente aplicado a estruturas de aço.

FONTE: SILVA (2001).

Método tabular - Neste método preconizado pela norma ABNT NBR 14432:2001, os TRRF são determinados de maneira empírica, através do senso comum da sociedade científica e padronizados em normas ou regulamentos. O TRRF é função da dimensão e do tipo de uso que é dado à edificação. Este determina na curva-padrão temperatura-tempo do elemento estrutural, uma temperatura que se supõe ser equivalente à máxima temperatura do aço na curva natural.

5.3.2 Isenções de TRRF

Edifícios de fácil desocupação, tais como construções de pequeno porte, edifícios industriais ou depósitos podem dispensar a verificação da segurança estrutural, exceto quando haja interesse de proteção patrimonial. Essas isenções podem ser resumidas na Tabela 5.3, referente à norma ABNT NBR 14432:2001.

TABELA 5.3 – Tabela de isenções de verificação de segurança estrutural.

Área	Uso	Carga de incêndio específica (MJ/m ²)	Altura	Meios de proteção contra incêndio
≤ 750m ²	Qualquer	Qualquer	Qualquer	-
≤ 1500m ²	Qualquer	≤ 1000	≤ 2 pavimentos	-
Qualquer	Centros esportivos Terminais de pass.	Qualquer	≤ 23m	-
Qualquer	Garagens abertas	Qualquer	≤ 30m	-
Qualquer	Depósitos	Baixa	≤30m	-
Qualquer	Qualquer	≤ 500	Térrea	-
Qualquer	Industrial	≤ 1200	Térrea	-
Qualquer	Depósitos	≤ 2000	Térrea	-
Qualquer	Qualquer	Qualquer	Térrea	Chuveiros automáticos
≤ 5000m ²	Qualquer	Qualquer	Térrea	Fachadas de aproximação

FONTE: adaptação da ABNT NBR 14432:2001.

Segundo a Instrução Técnica nº. 6 – Segurança estrutural das edificações (CBMMG, 2006), as edificações isentas de TRRF devem ser projetadas (considerando medidas ativas e passivas) visando atender aos objetivos do Regulamento de Segurança Contra Incêndio do Corpo de Bombeiros e possuírem as saídas de emergência, rotas de fuga e condições de ventilação dimensionadas conforme regulamentações vigentes. Caso contrário, as isenções não são admitidas.

No que concerne aos edifícios habitacionais, é conferida isenção de TRRF pelos seguintes parâmetros:

- Quanto à área útil da edificação, para edificações P1 e P2 (ver Tabela 5.2) com área menor ou igual a 750m², sendo que as áreas compreendidas pelas escadas não são computadas na somatória das áreas úteis de construção para efeito das exigências.

- Altura máxima de 12 metros, medidos do piso do pavimento mais baixo ao piso do pavimento mais elevado;
- As coberturas das edificações que atendam aos requisitos abaixo:
 - não tiverem função de piso;
 - não forem usadas como rotas de fuga para saídas de emergência;
 - os elementos estruturais de cobertura cujo colapso, a critério do responsável técnico pelo projeto estrutural, comprovado através de estudos técnicos, não comprometa a estabilidade da estrutura principal da edificação.
- As escadas abertas (escadas simples), desde que não possuam materiais combustíveis incorporados em suas estruturas, acabamentos ou revestimentos.

A considerar que cada apartamento possui área total de 46,29 m², mostrado na Tabela 5.1, é possível determinar a área total de cada bloco, multiplicando-se este valor por 10 (número de apartamentos por bloco). Dessa forma, identifica-se a área total de construção igual a 462,90m² e altura de 10,40m, inferiores a 750m² e 12m, respectivamente, prescritos na norma ABNT NBR 14432:2001. Por estes quesitos, verifica-se a isenção de TRRF. No entanto, cabe verificar quanto aos demais parâmetros de projeto.

5.4 Parâmetros e verificação de desempenho

As especificações de requisitos de segurança contra incêndio objetivam proporcionar nível adequado de segurança aos ocupantes de uma edificação em casos de incêndio, bem como minimizar as probabilidades de propagação do fogo para prédios vizinhos, diminuir os danos e facilitar as ações de socorro público.

Neste item, os parâmetros de projeto para a verificação da isenção de TRRF, prescritos na norma ABNT NBR 14432:2001, assim como os requisitos de segurança exigidos

para os edifícios até cinco pavimentos, são abordados paralelamente ao processo investigativo do edifício proposto.

5.4.1 Classificação das edificações

Segundo a norma ABNT NBR 9077:2001, os edifícios habitacionais de baixo custo, de cinco pavimentos e estruturados em PFF, classificam-se, quanto ao uso, no Grupo A, Divisão A2, Habitação multifamiliar; quanto à altura, pertencem ao código M, sendo edificação de média altura ($6m \leq h \leq 12m$); quanto às dimensões de planta, código P, pequeno pavimento, sem subsolo e código T, com área total inferior a 750 m²; por fim, quanto às características construtivas, classificam-se no código Z, onde a propagação do fogo é difícil. As tabelas referentes a essas classificações estão no Anexo A deste trabalho.

Conforme o Decreto Estadual nº. 38.069 (CBMESP, 1993), a edificação abordada se classifica na categoria 2, por possuir blocos residenciais de no máximo 750 m² de área útil de construção (cada bloco), com altura máxima de 12m, com afastamento superior a 4 metros e interligados somente pela escada comum a esses blocos.

Por sua classificação, as exigências para o edifício habitacional proposto são apresentadas na Tabela 5.4, conforme o Decreto nº. 38.069 (CBMESP, 1993), que possui capítulo especial para as edificações de interesse social. Para tanto, somente estas medidas serão abordadas adiante.

TABELA 5.4 - Exigências para edificações do Grupo A, com área menor ou igual a 750 m² e altura menor ou igual a 12,00m.

Medidas de Segurança contra incêndio	A
Saídas de emergência	x
Iluminação de emergência	x ¹
Sinalização de emergência	x
Extintores portáteis	x

1 – Somente para as edificações com altura superior a 5 m;

FONTE: Decreto nº. 38.069 (CBMESP, 1993).

5.4.2 Parâmetros urbanísticos

Uma das considerações acerca da segurança contra incêndio está no acesso interno do Corpo de Bombeiros ao condomínio. Vários podem ser os problemas encontrados, como dificuldade de acesso e manobras em vias internas, que muitas vezes não são dimensionadas para suportar veículos de grande porte (ONO, 2007). Outro ponto importante, também concernente aos parâmetros urbanísticos, refere-se ao risco de conflagração do fogo entre os edifícios, por radiação e convecção, como mencionado no Capítulo 3.

Os parâmetros para esta avaliação de desempenho são tomados as seguintes documentações técnicas: Instrução Técnica nº. 6 – Acesso de Viatura na Edificação e Áreas de Risco e Instrução Técnica nº. 7 – Separação entre Edificações (CBMESP, 2004).

5.4.2.1 Acesso do Corpo de Bombeiros

Torna-se desejável que o acesso dos equipamentos dos bombeiros a pelo menos uma das fachadas do edifício atingido seja possibilitado pelas vias internas, a fim de permitir as intervenções e manobras de combate e salvamento pelo exterior.

Quanto às vias urbanas:

- Devem possuir largura mínima de 6,00m e suportar viaturas com peso de 25.000 kg;
- Os retornos circulares, para vias de acima de 45 m de comprimento, devem apresentar formato “Y” ou “T” (Figura 5.11).

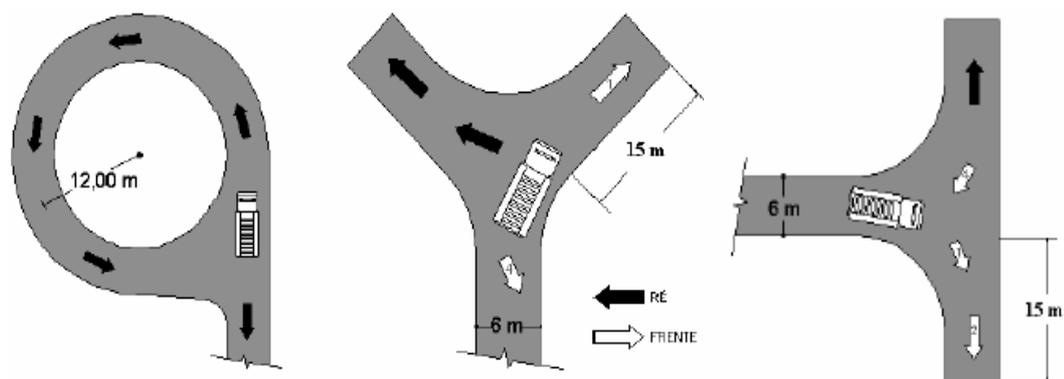


FIGURA 5.11 – Largura das vias e tipos de retorno (circular, “Y” e “T”).

FONTE: IT-06 do CBMESP (2004).

No que diz respeito à implantação dos Conjuntos Habitacionais realizados pela CDHU-SP e COHAB-MG, é possível notar a adequação aos regimentos legais de cada Estado, a partir da verificação de projetos de implantação e visitas técnicas. A Figura 5.12 ilustra a implantação do Conjunto Habitacional Juscelino Kubitschek de Oliveira, em Limeira, de edifícios de quatro pavimentos.



FIGURA 5.12 – Implantação e urbanização do Conjunto Habitacional Juscelino Kubitschek de Oliveira, em Limeira, SP.

FONTE: *Google Earth* (2007).

5.4.2.2 Separação entre edificações

Considera-se isolamento de risco a distância ou a proteção existente entre duas edificações, tornando-as independentes segundo as exigências de segurança contra incêndio.

O isolamento de risco pode ser obtido através de alguns mecanismos, tais como o isolamento entre as fachadas de edificações adjacentes; isolamento entre a cobertura de

uma edificação de menor altura e a fachada de uma edificação adjacente e por paredes corta-fogo entre edificações contíguas. Neste trabalho, torna-se pertinente apenas a verificação da edificação quanto à distância entre fachadas.

O isolamento de fachadas está diretamente ligado à quantidade de calor propagada para a face externa da edificação a outra adjacente, através de radiação. O nível de radiação, por sua vez, está associado à severidade do incêndio, áreas de aberturas existentes e à resistência dos elementos de vedação ao fogo.

No caso do edifício estudado, segundo o TRRF, não é necessária a presença de compartimentação. Nesse caso, segundo a IT nº07 do CBMESP (2004), toda a fachada do edifício deve ser considerada no dimensionamento. Abaixo, são apresentadas duas verificações diferentes: a primeira contempla a distância entre fachadas de distintos edifícios; a segunda, a distância entre fachadas dos blocos de um único edifício.

A) Na primeira verificação, o procedimento para o dimensionamento da distância de separação segura entre edifícios é determinado da seguinte maneira:

TABELA 5.5 – Determinação da fachada para dimensionamento.

Medidas existentes de segurança contra incêndio		Parte da fachada a ser considerada no dimensionamento	
Compartimentação		Edifícios térreos	H ≥ 2 Pavimentos
Horizontal	Vertical		
Não	Não	Toda a fachada do edifício	Toda a fachada do edifício
Sim	Não	Toda a fachada da área do maior compartimento	Toda a fachada da área do maior compartimento
Não	Sim	Não se aplica	Toda a fachada do pavimento
Sim	Sim	Não se aplica	Toda a fachada da área do maior compartimento

FONTE: IT-07 do CBMESP (2004).

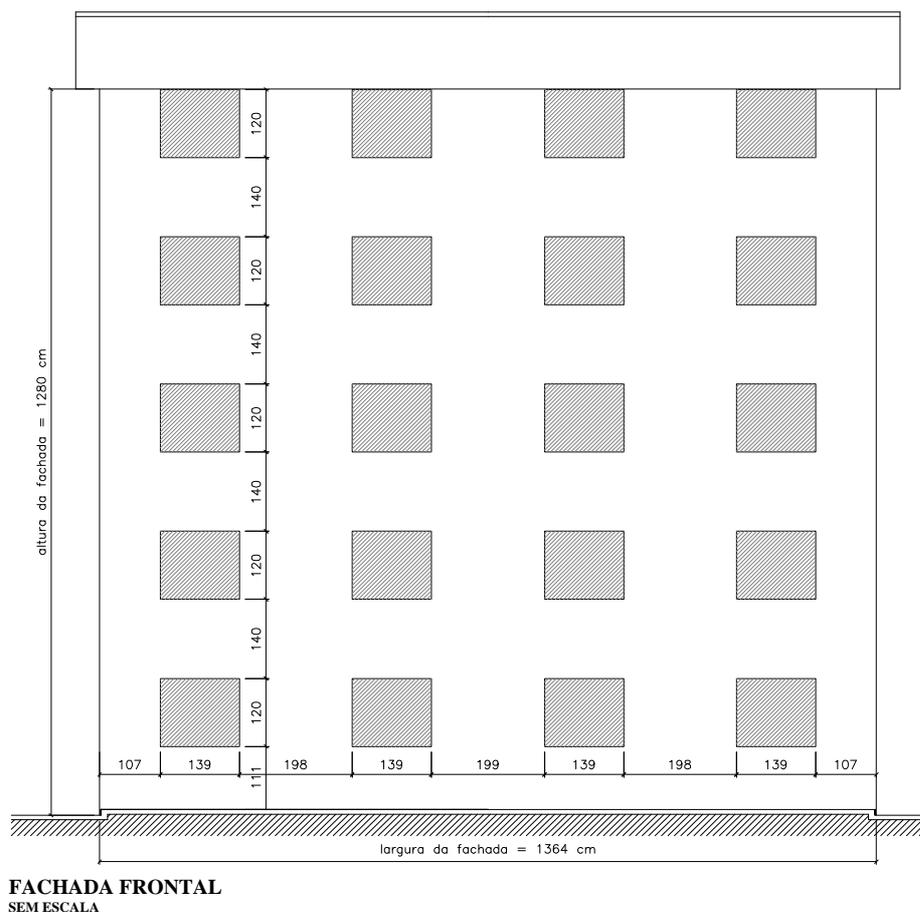


FIGURA 5.13 - Dimensões de fachada frontal e aberturas para o edifício habitacional.

FONTE: adaptado de CDHU (2000).

- Relação das dimensões (largura/altura ou altura/largura) do setor da fachada a ser considerado na edificação, conforme Tabela 5.5, dividindo-se o maior parâmetro pelo menor, para se obter o valor de x . Se o valor de x obtido for intermediário, deve-se adotar o valor imediatamente superior (ver Tabela 5 do Anexo A).

Dessa maneira, de acordo com a Figura 5.13, pode-se aferir que $x = \frac{1364}{1282}$, sendo

$x = 1,06$. Considerando que 1,06 é um valor intermediário, adota-se $x = 1,3$.

- Determinação da porcentagem de aberturas y no setor a ser considerado. Com base na Figura 5.13, tem-se:

Área da fachada: $13,64 \times 12,82 = 174,86 \text{ m}^2$

Área de aberturas: $20 \times (1,39 \times 1,20) = 33,36 \text{ m}$

Porcentagem de abertura: $y = \frac{33,36}{174,86} = 0,19 \therefore y = 19\%$. Considerando valor

imediatamente superior, $y = 20\%$.

Dessa maneira, de acordo com a Figura 5.12, pode-se inferir que $x = \frac{1364}{1282}$, sendo

1364 cm o valor da largura da fachada e 1282 cm o valor da altura da fachada.

Assim, $x = 1,06$. Considerando que 1,06 é o valor intermediário encontrado na

Tabela 5 do Anexo A, adota-se $x = 1,3$.

- Determinação da porcentagem de aberturas y no setor a ser considerado. Com base na Figura 5.13, tem-se:

Área da fachada: $13,64 \times 12,82 = 174,86 \text{ m}^2$

Área de aberturas: $20 \times (1,39 \times 1,20) = 33,36 \text{ m}$

Porcentagem de abertura: $y = \frac{33,36}{174,86} = 0,19 \therefore y = 19\%$. Considerando valor

imediatamente superior, $y = 20\%$.

- Verificação da carga de incêndio da edificação e classificação segundo a Tabela 5.6 (IT-05, CBMG, 2006). Essa edificação classifica-se na severidade I.

TABELA 5.6 – Severidade da carga de incêndio para o isolamento de risco.

Classificação da severidade	Carga de incêndio (MJ/m ²)
I	0 – 680
II	681 – 1460
III	Acima de 1461

FONTE: IT nº05-CMMG (2006)

- Obtenção do valor da distância de separação através da Equação 5.1.

$$d = \alpha \times (\text{largura ou altura}) + \beta \quad 5.1$$

Onde:

d - distância de separação em metro;

α - índice – coeficiente obtido na Tabela 5 do Anexo A, em função de x , y e classificação de severidade;

β - coeficiente de segurança do município. Para Belo Horizonte e São Paulo adota-se $\beta = 1,5$ metros.

Adotando-se os valores obtidos, soluciona-se a Equação 5.1:

$$d = \alpha \times (\text{largura ou altura}) + \beta .:$$

$$d = (0,4 \times 13,64) + \beta .:$$

$$d = 6,95 \text{ metros}$$

O afastamento entre edifícios, adotado nos projetos da CDHU e COHAB, emprega medidas entre 8 a 40m. Esta última equivale ao espaçamento designado a estacionamento, como pode ser visto na Figura 5.12. Dessa forma, o valor mínimo exigido de 6,95m, encontrado pela Equação 5.1, demonstra a ocorrência de distância de segurança entre os edifícios.

B) Na segunda verificação, o procedimento para o dimensionamento da distância de separação segura entre blocos, segue conforme prescrição IT nº07 do CBMESP (2004).

No caso de edifícios residenciais, constituídos por duas torres, com altura máxima de 12,00 m e com área útil de construção até 750 m² em cada torre (incluindo-se a área da escada, proporcionalmente), a edificação estudada será considerada isolada se atender aos requisitos abaixo:

- Houver afastamento entre as torres de no mínimo 4 m, podendo haver ligação por meio de uma escada simples, com ventilação permanente (janelas) nas extremidades, abrindo para o espaço livre exterior.
- Quanto às aberturas (ver Figura 5.13):
 - Estarem situadas junto ao teto, ou no máximo a 15 cm deste, de forma a permitir o escoamento da fumaça;
 - Ter área de ventilação efetiva mínima de 0,50 m², em cada pavimento, dotadas de venezianas ou outro material (inclusive venezianas tipo “maxiar”) que assegure a ventilação permanente.

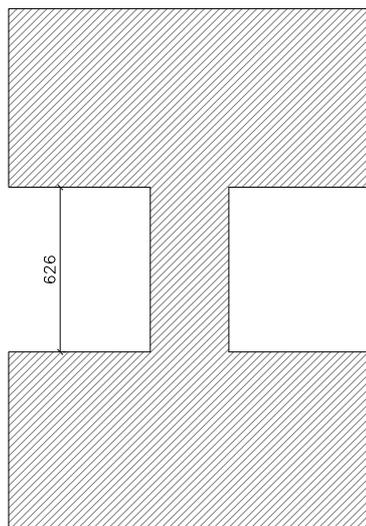


FIGURA 5.14 – Distância entre blocos do edifício habitacional.

FONTE: arquivos da autora.

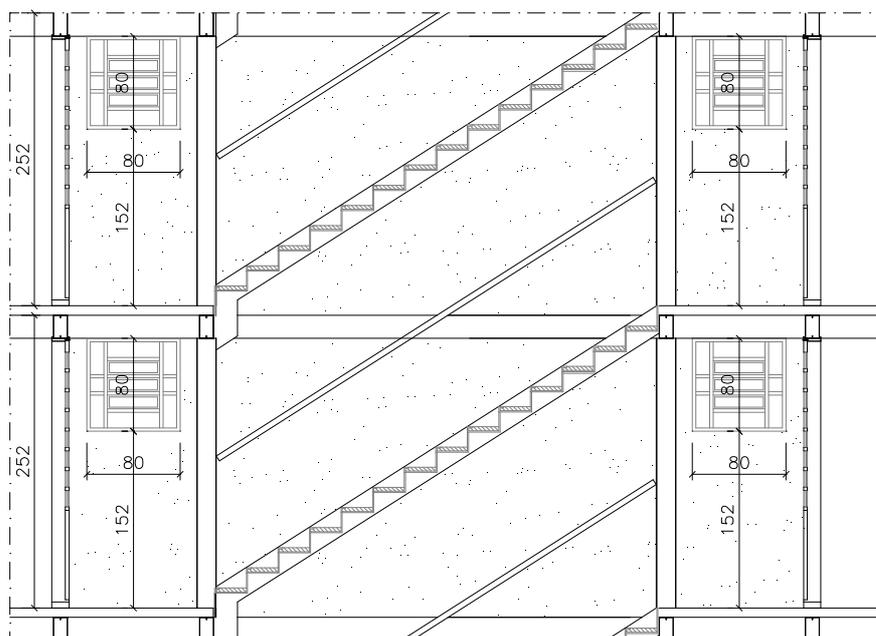


FIGURA 5.15 – Seção com dimensões das janelas venezianas da caixa de escada.

FONTE: adaptado de CDHU (2000).

No projeto apresentado, a distância entre blocos é de 6,29m, que supera o mínimo exigido de 4m, pela IT nº07 e IT nº06, do CBMESP (2004) e CBMMG (2006), respectivamente.

Em função da viga utilizada no projeto possuir alma de 20 cm, a distância entre o topo da janela e o teto ultrapassou em 5 cm a distância de 15 cm indicada pela IT nº07 do CBMESP (2004), em concordância com a IT nº05 do CBMMG (2006). No entanto, a área de ventilação efetiva supera os 0,50m² indicada nas ITs supracitadas. Para cada pavimento, a área de ventilação é de 1,28m².

Em função das proposições legais indicarem que as duas situações devam ocorrer simultaneamente e o edifício proposto se enquadrar apenas no quesito do dimensionamento, esta abordagem será verificada através da análise computacional com o *software Smartfire*, para análise da movimentação da fumaça pelas aberturas da caixa de escada (Capítulo 7).

5.4.3 Parâmetros arquitetônicos

5.4.3.1 Saídas de emergência

Toda edificação deve criar condições para que seus ocupantes possam abandoná-la em caso de um incêndio sem que sua integridade física seja afetada. A edificação também deve prover fácil acesso ao corpo de bombeiros para que este faça o devido combate ao fogo e a retirada da população.

Com o fim de que se alcancem os objetivos supracitados, faz-se necessária a provisão, ainda na fase de projeto, de saídas comuns das edificações, servindo como saídas de emergência – caso não estejam contempladas em norma saídas de emergência propriamente ditas. No edifício abordado, não existem saídas de emergência especiais.

Este item toma como base a norma ABNT NBR 9077:2001 – Saídas de emergência em edifícios.

As saídas de emergência são compostas dos seguintes componentes:

- acessos ou rotas de saídas horizontais: acessos às escadas, quando estas existirem, e respectivas portas ou ao espaço livre exterior, nas edificações térreas;
- escadas ou rampas;
- descarga.

A) População

População - As saídas de emergência são dimensionadas em função da população da edificação, podendo esta ser calculadas conforme a Tabela 5.7, considerando o grupo A2 de ocupação.

TABELA 5.7 - Dados para o dimensionamento das saídas em edifícios residenciais.

Ocupação		População	Capacidade da unid. de passagem ¹³		
Grupo	Divisão		Acessos e descargas ¹⁴	Escadas e rampas	Portas
A	A-1, A-2	Duas pessoas por dormitório ^(A)	60	45	100
	A-3	Duas pessoas por dormitório e uma pessoa por 4m ² de área de alojamento			

^(A) Em apartamentos de até dois dormitórios, a sala deve ser considerada como dormitório (...).

FONTE: adaptação da norma ABNT NBR 9077:1993.

B) Dimensionamento das saídas de emergência

O dimensionamento das saídas de emergência é função do número de pessoas que por estas deverão passar em uma situação de incêndio, sendo que as escadas, rampas e descargas devem ter seu dimensionamento baseado no pavimento de maior população. A largura destes acessos é dada pela Equação 5.2

$$N = \frac{P}{C} \quad 5.2$$

Onde:

N - número de unidades de passagem, arredondando-se para o número inteiro;

P - população, conforme coeficiente da Tabela 5.7.

C - capacidade da unidade de passagem, conforme Tabela 5.7.

¹³ A norma NBR 9077:1993 define unidade de passagem como a largura mínima para a passagem de uma fila de pessoas em 0,55 m. A capacidade de uma unidade de passagem é o número de pessoas que passa por esta unidade em 1 minuto.

¹⁴ Segundo a NBR 9077:1993, descarga é a parte da saída de emergência de uma edificação que fica entre a escada e o logradouro público ou área externa com acesso a este.

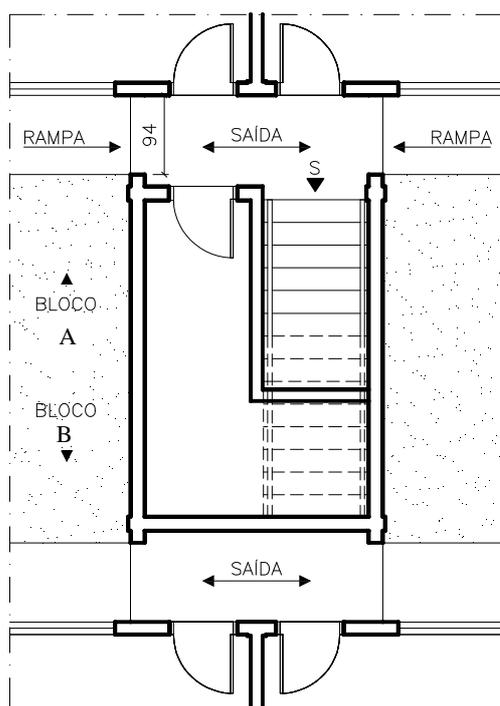


FIGURA 5.16 – Seção com dimensões das saídas de emergência.

FONTE: adaptado de CDHU (2000).

Como pode ser verificado na Figura 5.16, as saídas de emergência se concentram no Bloco A, que possui a rota de escape dos demais pavimentos. As saídas do Bloco B atendem somente aos dois apartamentos do pavimento térreo.

Dessa forma, o dimensionamento para verificação será efetuado apenas para as saídas do Bloco A

$$P = (2 \text{ pessoas} \times 3 \text{ dormitórios}) \times 18 \text{ apartamentos} \therefore P = 108;$$

$$C = 100 \text{ (para portas)}.$$

$$\text{Assim, utilizando a Equação 5.2 tem-se } N = \frac{108}{100} \therefore N = 1,08$$

Embora esse cálculo tenha determinado o número de passagem equivalente a 1,08, a norma ABNT NBR 9077:1993 determina a largura mínima de 1,10 m, correspondendo a duas unidades de passagem e 55 cm, para as ocupações em geral. A ressalva se aplica

às ocupações do grupo H, divisão H-3, com valor de 2,20 m, para permitir a passagem de macas, camas, e outros.

No edifício em questão, a dimensão de cada saída é 94 cm. Por apresentar duas saídas, tem-se o total de 188 cm. Por se considerar que uma unidade de passagem equivale a 55 cm, tem-se o equivalente a 3,44 unidades de passagem, que deve ser arredondado ao menor valor inteiro mais próximo, 3. Dessa forma, pôde-se verificar o padrão de segurança quanto às saídas de emergência.

As Figuras 5.17 e 5.18 mostram detalhes de projeto que devem contemplar as saídas de emergência.

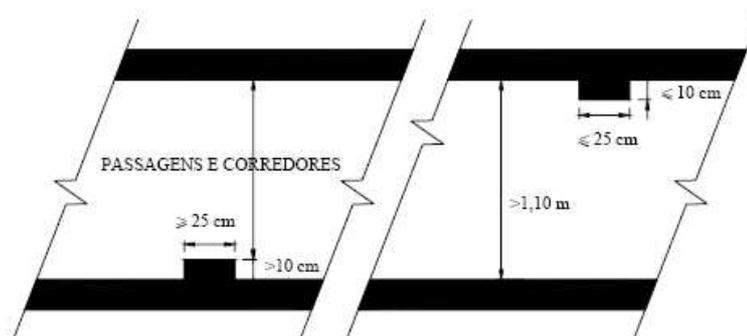


FIGURA 5.17 – Medida da largura em corredores e passagens.

FONTE: adaptação da norma ABNT NBR 9077:1993.

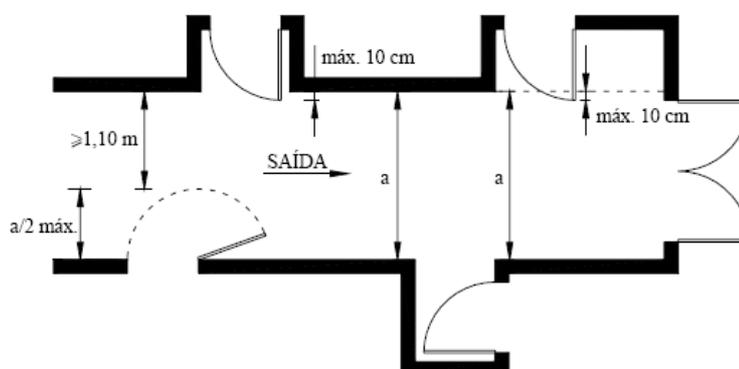


FIGURA 5.18 – Abertura das portas no sentido de trânsito de saída.

FONTE: adaptação da norma ABNT NBR 9077:1993.

Para o edifício abordado, as implicações da Figura 5.18 são meramente ilustrativas, por esse não apresentar aberturas das portas no sentido de trânsito da saída.

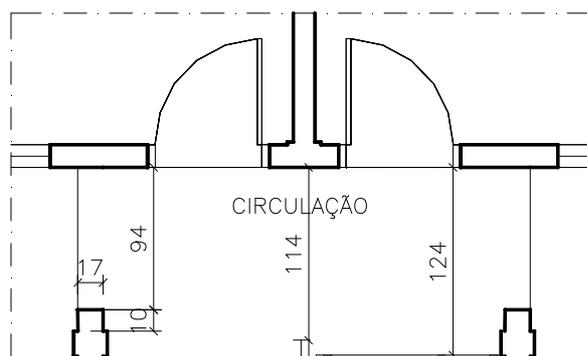


FIGURA 5.19 – Seção com medidas do corredor e passagem do pavimento térreo do edifício habitacional estudado.

FONTE: adaptado de CDHU (2000).

A Figura 5.19 demonstra a concordância do dimensionamento de corredor e passagem do edifício habitacional de cinco pavimentos, abordado nesse trabalho, à norma ABNT NBR 9077:1993.

C) Acessos, rampas e escadas

Acessos - De acordo com a norma ABNT NBR 9077:1993, os acessos devem permitir o escoamento fácil de todos os ocupantes do prédio, assim como permanecer desobstruídos em todos os pavimentos. As larguras devem obedecer ao proposto no item A e possuir pé-direito mínimo de 2,50 m com exceção de obstáculos representados por vigas, vergas de portas, e outros, cuja altura mínima livre deve ser de 2,00 m. A sinalização e iluminação devem possuir indicação clara do sentido da saída, de acordo com o estabelecido na norma supracitada.

Como visto no item 5.4.1, essa edificação classifica-se com o código Z e as distâncias máximas a serem percorridas podem ser observadas na Tabela 5.8.

TABELA 5.8 – Distâncias máximas a serem percorridas.

Tipos de edificação	Grupo e divisão de ocupação	Sem chuveiros automáticos	
		Saída única	Mais de uma saída
Z	A	40,0 m	50,00 m

FONTE: adaptação da norma ABNT NBR 9077:1993.

Para o edifício abordado, a distância máxima pode ser calculada com base na Figura 5.20. Considerando que as escadas possuem distância de 4,46 m em quatro lanços¹⁵, o valor percorrido é de 17,98 m. Quanto aos patamares e corredores, com 6,28 m em quatro pavimentos, a distância equivale a 25,12 m. Dessa forma, a distância máxima a ser percorrida pelos usuários localizados no quinto piso do edifício habitacional de cinco pavimentos é de 43,1 m. Para tanto, por apresentar mais de uma saída, este valor é inferior ao limite apontado pela norma ABNT NBR 9077:1993.

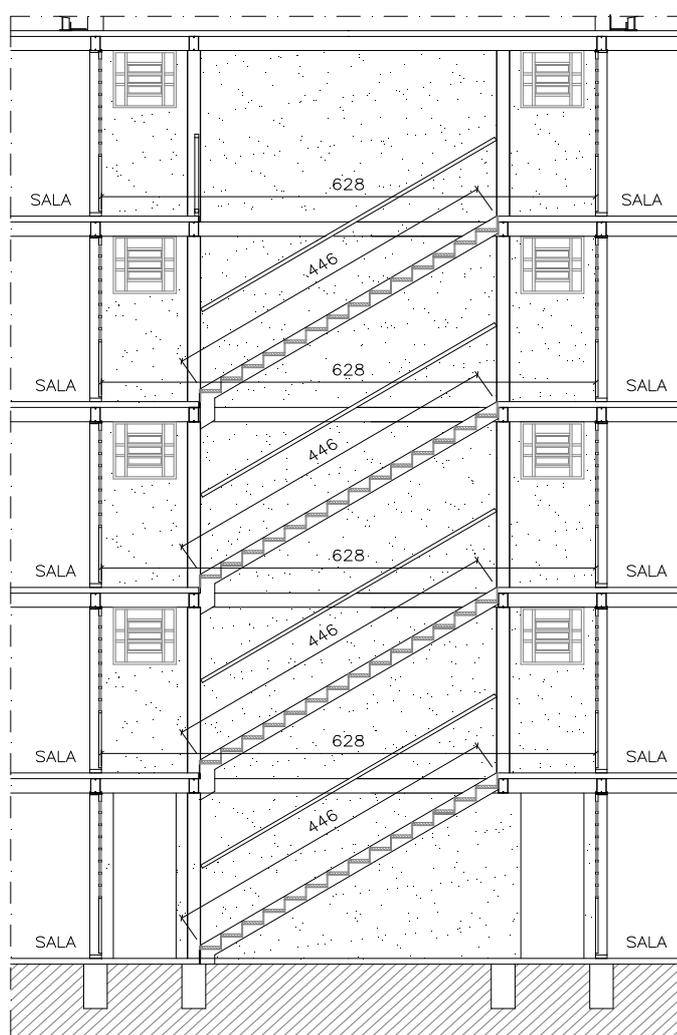


FIGURA 5.20 – Seção do corte BB, com indicativo das distâncias percorridas.

FONTE: adaptado de CDHU (2000).

¹⁵ Lanço de escada é a sucessão ininterrupta de degraus entre dois patamares sucessivos (ABNT NBR 9077:1993)

Rampas – De acordo com a norma ABNT 9077:1993, o edifício habitacional proposto se isenta da obrigatoriedade do uso da rampa. Todavia, por possuir um apartamento para portador de necessidades especiais no pavimento térreo, Bloco A, define-se uma rampa de acesso segundo os critérios de acessibilidade da norma ABNT NBR 9050:2004, mostrados na Tabela 5.9. O desnível a ser vencido é de 10 cm entre o calçamento circundante do edifício e a área da caixa de escada. A inclinação admissível é de 12,8% para esse desnível e a edificação apresenta-se concordante à norma supracitada.

TABELA 5.9 – Dimensionamento de rampas.

Inclinação admissível de cada segmento de rampa (i) – (%)	Desníveis máximos de cada segmento de rampa (d) – (m)	Números máximos de segmento de rampa (i)	Comprimentos máximos de cada segmento de rampa (s) – (m)
5,00	1,500	-	30,00
6,25	1,000	14	16,00
	1,200	12	19,20
8,33	0,900	10	10,80
10	0,274	08	2,74
	0,500	06	5,00
	0,750	04	7,50
12,50	0,183	01	1,46

FONTE norma ABNT NBR 9050:2004.

Escadas - a ABNT NBR 9077:1993 estabelece que, em qualquer que seja o edifício, os pavimentos sem saída para o espaço livre exterior devem ser providos de escadas, enclausuradas ou não. Estas devem atender a padrões quanto a seus materiais – sendo estes incombustíveis, resistentes ao fogo e propagação superficial de chama, guarda-corpos, corrimãos e atender a todos os pavimentos acima e abaixo da descarga, porém terminando obrigatoriamente no piso desta, não sendo permitido a comunicação direta com outro lanço na mesma prumada (ver Figura 5.21).

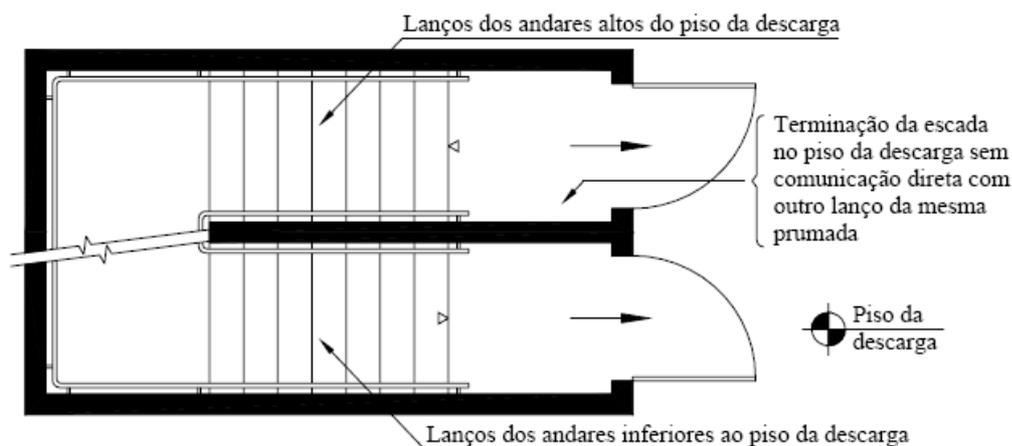


FIGURA 5.21 – Segmentação das escadas no piso da descarga.

FONTE: norma ABNT NBR 9077:1993.

Cabe destacar que nas caixas de escadas não podem existir aberturas para tubulações de lixo, passagem de rede elétrica e armários de medidores de gás – excetuadas as escadas não enclausuradas nas edificações com alturas classificadas em L e M (baixa e média altura).

Quanto ao dimensionamento de degraus, segundo a norma ABNT NBR 9077:1993 (ver Figura 5.22):

- Devem ter altura h compreendida entre 16,0 cm e 18,0 cm, com tolerância de 0,05 cm;
- Largura b dimensionada pela fórmula de Blondet (Equação 5.3):

$$63 \text{ cm} \leq (2h + b) \leq 64 \text{ cm} \quad 5.3$$

- Ter, num mesmo lanço, larguras e alturas iguais e, em lançamentos sucessivos de uma mesma escada, diferenças entre as alturas de degraus de, no máximo, 5 mm;
- Ter bocel (nariz) de 1,5 cm, no mínimo, ou, quando este inexistir, balanço da quina do degrau sobre o imediatamente inferior com este mesmo valor.

É contemplado que o lanço mínimo deve ser de três degraus e o lanço máximo, entre dois patamares consecutivos, não deve ultrapassar 3,70 m de altura.

Quanto ao comprimento dos patamares, ainda segundo a norma ABNT NBR 9077:1993, esse deve ser:

- Dado pela Equação 5.4.

$$p = (2h + b)n + b \quad 5.4$$

Onde:

p – comprimento do patamar;

h – altura do degrau (espelho);

b – largura do degrau;

n - é um número inteiro (1, 2 ou 3), quando se tratar de escada reta, medido na direção do trânsito;

- No mínimo, igual à largura da escada, quando há mudança de direção da escada sem degraus ingrauxidos, não se aplicando, neste caso, a Equação 5.23.

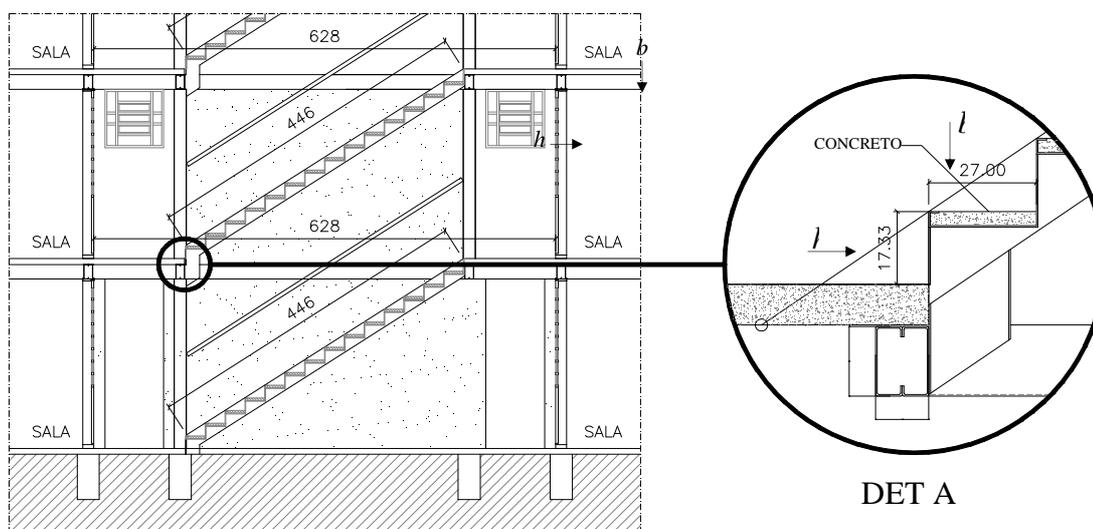


FIGURA 5.22 – Seção do corte BB, com altura e largura do degrau.

FONTE: adaptado de CDHU (2000).

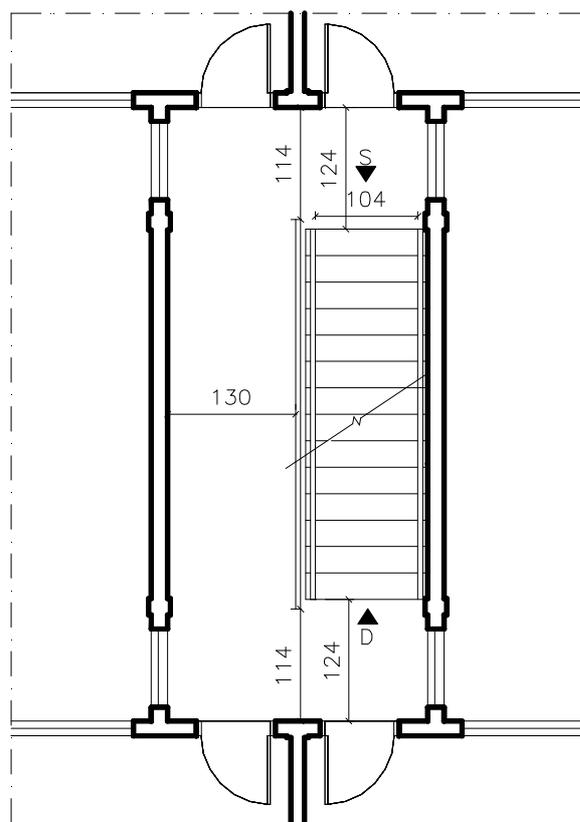


FIGURA 5.23 – Seção com dimensões de patamares e lanço de escada.

FONTE: adaptado de CDHU (2000).

Para os corrimãos, é prescrito que estejam entre 90 cm e 92 cm acima do nível do piso, sendo, em escadas, esta medida tomada verticalmente (ver Figura 5.24).

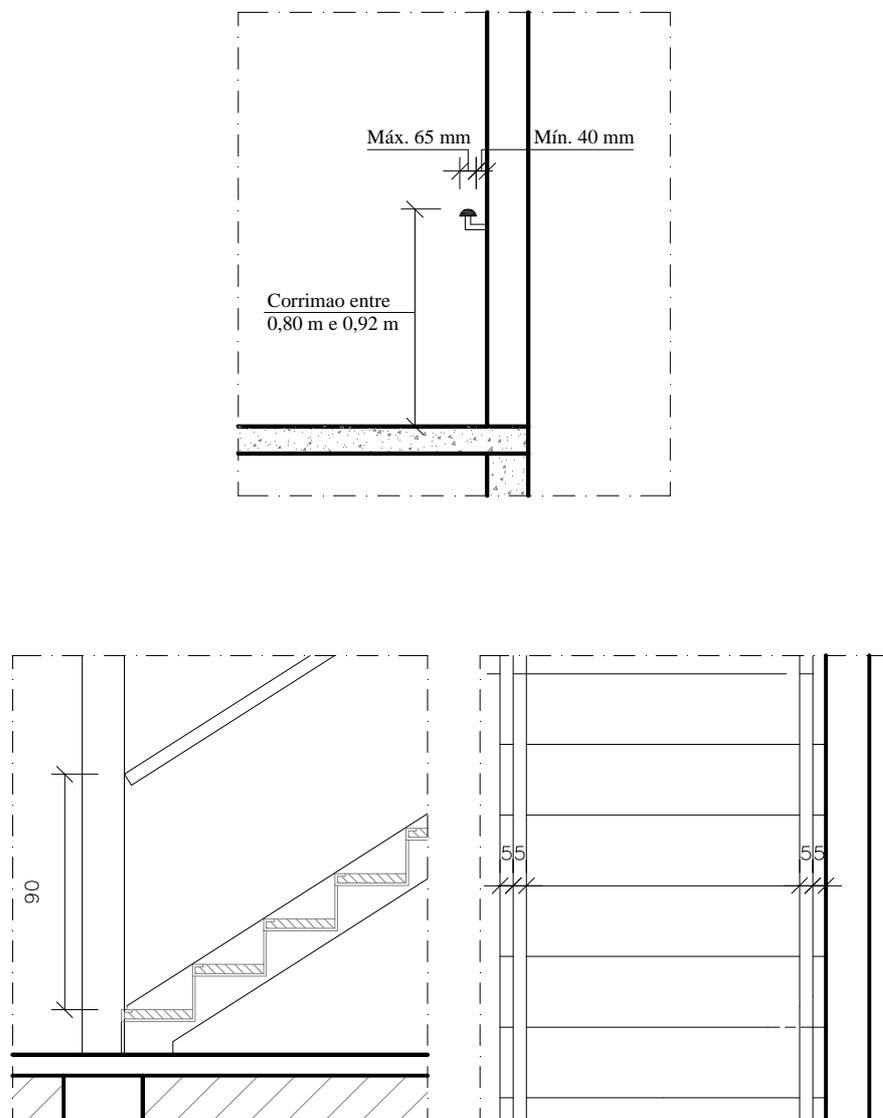


FIGURA 5.24 – Seção com dimensões de corrimãos.

FONTE: norma ABNT NBR 9077:1993.

5.4.3.2 Iluminação de emergência, sinalização de saída e extintores portáteis

Conforme o documento da ABNT, Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho - Parte 1, e o Decreto Estadual 38.069 (CBMESP, 1993), o edifício habitacional deve dispor de sinalização, iluminação de emergência e extintores portáteis.

Para o objetivo desse trabalho, atenta-se apenas a mencionar que estes parâmetros são exigíveis nas edificações habitacionais de cinco pavimentos.

5.4.4 Verificação

Para o edifício habitacional de baixo custo, estruturado em PFF e de cinco pavimentos estudado nesse trabalho, foram analisados todos os parâmetros concernentes à segurança contra incêndio no que se refere aos parâmetros urbanísticos e arquitetônicos.

Foram aqui identificadas e demonstradas as principais lacunas com relação às medidas passivas, e mencionadas as exigências quanto à iluminação e sinalização de emergência e extintores portáteis.

Dessa forma, conclui-se que as isenções de verificação de resistência ao fogo, quanto às exigências normativas, estão confirmadas. No entanto, cabe a este trabalho verificá-las frente a uma situação correspondente à real de incêndio, que será possibilitada por simulações computacionais com os softwares *Smartfire* e *buildingEXODUS* no Capítulo 7.

6

FUMAÇA E COMPORTAMENTO HUMANO

6.1 Introdução

O conhecimento sobre os efeitos dos produtos tóxicos da fumaça sobre os ocupantes de um edifício em situação de incêndio remonta desde o início da história dos incêndios. Nos Estados Unidos e Reino Unido, como exemplo, a atenção à questão da toxicidade tem sido constante em função dos grandes desastres ocorridos na história e o elevado número de mortes por gases tóxicos da fumaça (ver Capítulo 2). A considerar que a principal causa de mortes em incêndios é atribuída à fumaça, torna-se necessário compreender melhor seus efeitos em humanos.

A fumaça dos novos materiais apresentam maior teor de toxidades em função de conterem em sua composição novos produtos que ainda não foram totalmente analisados. Estes são chamados de “supertóxicos” pelos efeitos tóxicos elevados em baixas concentrações (SFPE, 2002). Dentre esses materiais estão a espuma flexível de poliuretano, que contém elemento retardante do fogo a base de fósforo, e o politetrafluoretileno (PTFE), utilizado no *Teflon*. Testes desses materiais foram

realizados em roedores e definiu-se a taxa de LC_{50} (concentração de produtos tóxicos de combustão, expressos em mg de material por litro de ar, que causa a morte de 50% dos animais expostos). A partir disso, vários testes têm sido realizados no intuito de confeccionar materiais com melhor desempenho contra toxicidade, permitindo projetos mais seguros.

6.2 Efeitos humanos

Para cenários que envolvem o escape dos ocupantes do edifício em fogo, a sobrevivência depende do resultado de dois processos paralelos.

Desenvolvimento dos perigos de incêndio – este processo envolve a ignição, a fase de crescimento do fogo e o sua expansão. A avaliação deste processo para qualquer cenário é apontar o tempo que um ocupante se mantém exposto aos riscos incapacitantes do incêndio.

O processo de escape dos ocupantes – este processo consiste em detecção, provisão de perigos, resposta às advertências (alarme ou percepção natural do incêndio), caracterização dos ocupantes (idade e habilidades físicas e mentais, estar acordado ou dormindo e densidade da população), possível egresso (busca de informações, procura de saídas, fluxo de multidões), projetos das rotas de escape, número de saídas e dimensões, e as influências psicológicas e fisiológicas da exposição ao calor e fumaça no comportamento de escape. A avaliação deste processo para qualquer cenário é apontar o tempo requerido para escape.

É possível considerar os efeitos do incêndio nas vítimas em três fases:

- A primeira fase consiste do período de crescimento do fogo, mas antes das vítimas serem expostas ao calor e à fumaça. Durante esta fase os fatores importantes que influenciam a fuga e a sobrevivência são os fatores psicocomportamentais e

logísticos, tais como a maneira como a vítima é alertada sobre o fogo e sua reação (partir ou ficar para combater o fogo), sua interação com outros indivíduos e como responde à geografia do ambiente na busca por um escape.

- A segunda fase representa o período em que as vítimas estão expostas à fumaça, calor e produtos tóxicos, assim como a seus efeitos irritantes e asfixiantes, que influenciam em suas capacidades psicológicas na busca por escape.
- A última fase é a ocorrência de morte no incêndio, que pode ser causada pelos fatores principais de toxicidade e queimaduras ou vários outros fatores.

Inúmeras pesquisas por LC_{50} demonstram que as principais causas de mortes por toxicidade são por monóxido de carbono (CO) ou cloreto de hidrogênio (HCL), conhecido como ácido clorídrico, ou misturas de decomposição térmica de materiais individuais (SFPE, 2002).

Os efeitos fisiológicos da exposição à toxicidade da fumaça e calor resultam em escalas de incapacitação que podem ocasionar a morte ou efeitos permanentes. Os efeitos de incapacitação podem incluir (PURSER, 2002, pg. 2-85):

- Prejuízos à visão, resultado da opacidade óptica da fumaça, dos efeitos dos gases irritantes ou do calor nos olhos;
- Dores, dificuldade ou danos de trato respiratório causados pela inalação de gases irritantes e a temperaturas elevadas. Em casos extremos, alguns minutos são responsáveis por asfixia devido a espasmos de laringe ou broncoconstrição e, em casos mais graves, inclusive a inflamação pulmonar, em horas de exposição.
- Asfixia por inalação de gases tóxicos, resultando em convulsão e perda de consciência.
- Dores de queimadura na pele e trato respiratório superior, seguidas de queimaduras, ou hipertermia devido aos efeitos do calor.

6.2.1 Deficiência de oxigênio

A redução da concentração de oxigênio pela reação da combustão é um dos fenômenos responsáveis pela incapacitação dos ocupantes em situação de incêndio. Os estudos em humanos classificam em quatro fases os efeitos da redução do oxigênio no organismo e faz-se equivalência à concentração de oxigênio relativo ao nível do mar (SFPE, 2002), conforme a Tabela:

TABELA 6.1 – Efeitos da redução do oxigênio.

Fases		Nível acima do mar (m)	Concentração de oxigênio (% de O ₂)	Efeitos
1	Indiferente	0 - 3000	20,9 – 14,4	<ul style="list-style-type: none"> • Redução da visão noturna; • Perda da coordenação motora
2	Compensatória	3000 – 4500	11,8 – 14,4	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento na frequência respiratória e batimentos cardíacos; • Perda leve da eficiência psicomotora para tarefas complexas; • Perda leve da memória de curto prazo.
3	Hipoxia ¹⁶	4500 - 6000	9,6 – 11,8	<ul style="list-style-type: none"> • Degradação de processo mental e controle neuromuscular; • Perda de julgamento crítico e discernimento; • Variação comportamental entre letargia e indiferença para alucinação e euforia; • Aumento abrupto na frequência respiratória e batimentos cardíacos;
4	Hipoxia crítica	6000 - 7600	7,8 – 9,6	<ul style="list-style-type: none"> • Inconsciência; • Parada respiratória e cardíaca; • Morte.

FONTE: adaptação de SFPE (2002, pg. 2-106).

¹⁶ Hipoxia é a redução de oxigênio dos tecidos orgânicos.

6.2.2 Temperaturas elevadas

Ocorrem três formas básicas do calor gerar incapacitação em um indivíduo: Hipertermia (principalmente se a umidade for alta e o indivíduo for ativo), queimaduras de pele ou queimas do trato respiratório.

A hipertermia pode ocorrer em exposições de até 15 minutos a temperaturas menores que 120°C para ambientes secos e 80°C para ambientes saturados. O aumento da temperatura do corpo para valores acima de 40°C pode levar à perda da consciência, e acima de 42,5°C à morte em minutos (BERENSON, ROBERTSON *apud* PURSER, 2002). Outra ocorrência de hipertermia se desenvolve a exposições inferiores a 15 min a temperaturas acima de 120°C. Nesse caso a hipertermia é acompanhada de queimaduras cutâneas. Acima de 30 min de exposição nessas condições ocorre a elevação da temperatura sanguínea e a posterior morte do indivíduo.

As queimaduras do trato respiratório nunca ocorrem sem antes ter ocorrido a queimadura facial. O ar seco a 300°C pode causar queimaduras na laringe e edemas pulmonares, apresentando-se como uma das principais causas de incapacitação ou mortes imediatamente após o incêndio.

6.2.3 Fumaça

Segundo o documento NFPA 204 (2002), fumaça é definida como o conjunto de partículas sólidas, líquidas e gasosas no ar, produzidas pela pirólise ou combustão de um material, juntamente com a entrada de ar nessa massa, podendo variar amplamente na aparência e na estrutura. Os efeitos da fumaça resultante do fogo dependem da quantidade produzida e da propriedade da fumaça

A emissão de fumaça do fogo representa o equilíbrio entre o processo de crescimento da chama na porção rica em combustível e na com redução de oxigênio. Enquanto não é possível prever a emissão de fumaça como uma função da química do combustível e

das condições da combustão, pode-se falar que um polímero aromático, como o poliestireno, produz mais fumaça que hidrocarbonetos com ligações simples carbono-carbono, como o polipropileno. A fumaça produzida em combustão por chamas tende a ter um maior conteúdo do elemento carbono (SFPE, 2002).

Na pirólise, o vapor envolvido na superfície do material inclui monômeros¹⁷ combustíveis, combustíveis parcialmente oxidados e cadeias de polímeros. Com o aumento dos vapores, os componentes de baixa pressão tendem a condensar e são formadas partículas de fumaça que aparecem como luzes coloridas. Na combustão sem chamas também são produzidas partículas de fumaça, mas a combustão é auto-sustentável, já que a pirólise necessita de forças de calor externas (veja Capítulo 3). Enquanto a maioria dos materiais pode ser pirolizados, somente alguns materiais, incluindo materiais celulósicos e espumas flexíveis de poliuretano, são capazes de queimar sem chama, com temperaturas próximas de 300°C a 800 °C.

A fumaça compreende duas fases: fase dos vapores invisíveis e fase das partículas visíveis. Para o estudo da toxicologia do incêndio, todos os produtos asfixiantes ocorrem na fase de vapor, enquanto os irritantes ocorrem em ambas as fases. Esta segunda fase consiste de partículas sólidas e líquidas que abrangem uma variedade de tamanhos, dependendo da natureza da fumaça. O tamanho das partículas é importante por determinar o quanto esta é capaz de ser absorvida e penetrar no trato respiratório.

Gases asfixiantes - causam incapacitação principalmente no sistema nervoso central e cardiovascular. Geralmente, o tempo para incapacitação e riscos podem ser determinados. No incêndio os dois principais gases asfixiantes são o monóxido de carbono (CO) e o cianeto de hidrogênio (HCN), descritos no item 6.2.3.1.

Gases irritantes - são substâncias que agredem as vias aéreas (nariz, garganta e laringe), os pulmões e os olhos. Ao contrário dos gases asfixiantes, que possuem seus

¹⁷ Monômero é uma pequena molécula que pode ligar-se a outros monômeros formando moléculas maiores denominadas polímeros. Os hidrocarbonetos são monômeros.

efeitos de incapacitação bem claros e conhecidos, os gases irritantes são muito mais difíceis de determinar. A incapacitação gerada por esses gases ocorre durante e depois da exposição dos indivíduos por duas maneiras distintas.

Durante a exposição, a forma de incapacitação mais importante é a irritação sensorial, responsável por dores nos olhos e no trato respiratório, que dificulta o processo de fuga dos indivíduos e aumenta o tempo de exposição aos demais gases tóxicos. Esses efeitos não dependem da dose acumulada no organismo, mas da exposição imediata. A outra forma de incapacitação é a penetração dos gases nos pulmões, que ocasiona edemas e dificuldades respiratórias e pode levar à morte num período de 6 a 24 horas após a exposição. Esses efeitos dependem do acúmulo das doses de inalação.

6.2.3.1 Gases tóxicos

Em função de serem inúmeros os gases tóxicos presentes nos incêndios, serão abordados aqui apenas os mais significativos quanto ao fator de concentração na fumaça e incapacitação dos ocupantes do edifício.

Monóxido de carbono – o CO é um gás inodoro e altamente inflamável. Está presente em quase todas as situações de incêndio, independente do material envolvido na queima ou o estágio, ou tipo, de incêndio. Isso se deve ao fato de o CO ser produzido pela queima dos materiais que possuem carbono em sua estrutura.

As trocas gasosas no sangue são realizadas pela hemoglobina. A combinação do CO com a hemoglobina ocorre de forma preferencial ao oxigênio, sendo irreversível. Essa combinação forma a carboxihemoglobina (COHb) e remete à baixa de oxigênio nos tecidos corporais, principalmente nos tecidos cerebrais, levando à inconsciência e asfixia. Níveis incapacitantes de COHb são comuns em vítimas logo em exposições imediatas ao incêndio.

Os estádios iniciais de concentração de CO no organismo humano levam à sonolência e perda das habilidades psicomotoras. Pesquisas realizadas em primatas apontam que os efeitos da concentração de COHb em indivíduos ativos é consideravelmente maior que em inativos. Em níveis de comparação, os mesmos efeitos foram encontrados para níveis acima de 40% , em primatas parados, contra 25 a 30% em ativos. Similarmente, podem-se demonstrar os efeitos do movimento em humanos, considerando que um indivíduo deitado ou escrevendo pode resistir até 55% de concentração, enquanto que outro, ao levantar o corpo ou caminhar, sucumbe a concentrações bem menores (BERENSON, ROBERTSON *apud* PURSER, 2002). Os resultados das pesquisas apontadas acima demonstram que o movimento induz ao aumento do batimento cardíaco que, por conseqüência, eleva a velocidade de propagação do COHb aos demais tecidos pela corrente sanguínea. A exposição de CO durante a gestação provoca efeitos teratogênicos (malformação) no feto, decorrente da hipoxia.

Em níveis próximos de 30% de COHb, nota-se o comprometimento das funções cardíacas, e a 40% a perda da consciência. Concentrações acima de 50 a 70% de COHb predispõe à morte, que pode ocorrer a níveis inferiores em função da debilidade do indivíduo (BERENSON, ROBERTSON *apud* PURSER, 2002).

Cianeto de hidrogênio – O HCN é um gás altamente tóxico e com presença de odor. Apresenta alta mobilidade e capacidade de penetração em substâncias ou materiais porosos, como paredes e muros, por possuir baixo peso molecular.

Os efeitos do HCN no organismo humanos são medidos no sangue de vítimas fatais e não fatais. Entretanto, esse estudo envolve a análise de indivíduos também afetados pela carboxihemoglobina, o que dificulta saber se o HCN foi o responsável pela incapacitação.

Os efeitos da intoxicação do HCN nas fases iniciais se distinguem do CO, embora apresentem similaridade nos efeitos finais. Enquanto o processo inicial de intoxicação do CO tende a ser lenta, a intoxicação por HCN é rápida e dramática.

O cianeto de hidrogênio é absorvido pelos pulmões e ao ser distribuído pela corrente sanguínea, afeta a habilidade dos tecidos do corpo de absorver oxigênio. Os órgãos mais afetados são o cérebro e o coração, que pode parar de funcionar em até oito minutos. O cianeto de hidrogênio pode ser absorvido pela pele, em função da capacidade de penetração, como supracitado.

Dióxido de carbono – O CO_2 é um gás asfixiante, encontrado na concentração de 20,95% no ar atmosférico e tende a reduzir a concentração de O_2 no ambiente. Quando sua concentração reduz o O_2 para valores inferiores a 16%, os efeitos incapacitantes começam a ocorrer.

Em concentração de 16%, a frequência respiratória e circulatória é aumentada e ocorre a diminuição da coordenação motora. A 14% de oxigênio, o indivíduo ainda está consciente, porém apresenta distúrbios respiratórios, fadiga e tontura. Em uma concentração de 10%, há o aparecimento de náuseas, inconsciência e privação motora. Já numa concentração de 6% ocorre convulsão e parada respiratória, seguido de parada cardíaca e morte.

Cloreto de hidrogênio – O HCl pode se formar a partir da queima de vários polímeros, gerando um efeito irritante e corrosivo aos olhos, pele e mucosas. A baixos níveis de exposição os efeitos do gás HCl se caracterizam por irritações na garganta, seguido de rouquidão, inflamação e ulceração das vias respiratórias e edema pulmonar. A níveis elevados ocorre o estreitamento dos brônquios, com acúmulos de líquidos nos pulmões, seguido de morte.

Acroleína – é um gás irritante extremamente tóxico se inalado. A exposição a esse gás pode causar irritações das vias respiratórias (nariz, boca e laringe) e olhos, assim como redução da função pulmonar.

Dentre os citados ainda estão o formaldeído, encontrado nos equipamentos domésticos; dióxido de nitrogênio (NO_2); dióxido de enxofre (SO_2), dentre outros, que apresentam similaridade nos efeitos incapacitantes dos gases irritantes supracitados.

A Tabela 6.2 mostra alguns dos gases mais comuns no incidente de incêndio.

TABELA 6.2 – Atmosférica tóxica do incêndio.

Atmosfera tóxica	Sensibilidade	IDLH*	Causa	Generalidades
Dióxido de carbono (CO ₂)	Inodoro e incolor	40.000 ppm**	Queima no geral	Produto final da combustão completa de materiais carboníferos.
Monóxido de carbono (CO)	Inodoro e incolor	1.200 ppm	Combustão incompleta	Causa da maioria das mortes em incêndio
Cloreto de hidrogênio (HCl)	Cor amarelada e forte odor	50 ppm	Queima de plásticos (e.g., PVC)	Irritação nos olhos e trato respiratório
Cianeto de hidrogênio (HCN)	Incolor e odor amendoado	50 ppm	Queima de lã, nylon, poliuretano, espuma, borracha e papel.	Gás asfixiante, danos respiratórios em tecidos e células.
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	Cor vermelha amarronzada e odor ácido	20 ppm	Emitidos ao redor de silos com estocagem de grãos; decomposição de plásticos por pirólise.	Irritação de nariz e garganta.

* *Immediately dangerous to life and health* – qualquer atmosfera que apresente perigo de incêndio imediato à vida ou produza efeitos irreversíveis, debilitando a saúde.

** Partes por milhão - relação do volume do contaminante (partes) comparado ao volume de ar (1 milhão de µg).

FONTE: *Essentials of Fire Fighting* (2001).

6.3 Comportamento humano em incêndios

Os estudos acerca do comportamento humano individual em incêndios têm sido realizados por aproximadamente 40 anos. Uma das metodologias desenvolvidas é o questionário aplicado pelo departamento de incêndio (corpo de bombeiro) no momento do sinistro.

A análise do comportamento humano frente ao fogo abrange o período entre a percepção do fogo e a chegada do corpo de bombeiros até os compartimentos. No caso das análises computacionais, como apresentado no Capítulo 7, esse período é definido entre o momento da percepção até o momento de saída do edifício, sem considerar a ação dos bombeiros.

6.3.1 Percepção do incidente de incêndio

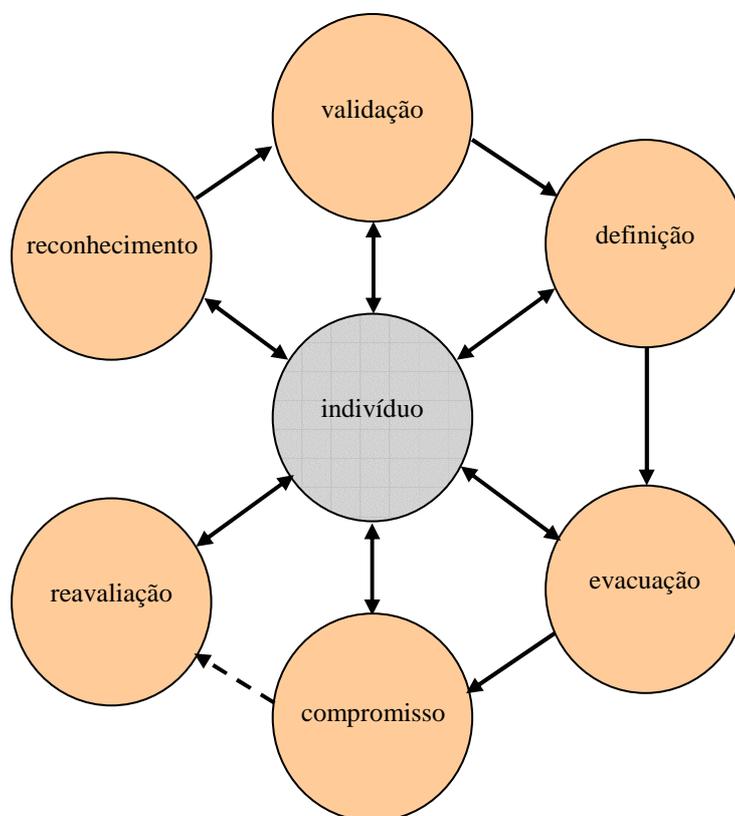


FIGURA 6.1 – Processo de decisão de um indivíduo em situação de incêndio.

FONTE: adaptado de SPFE (2001).

Durante o incêndio, são identificados sete processos (físicos e psicológicos) que um indivíduo pode utilizar para perceber, identificar, estruturar e avaliar a situação do incêndio. (WITHEY apud BRYAN, 2001, pg. 3-317).

Reconhecimento – ocorre quando o indivíduo identifica a possibilidade da existência do incêndio através da percepção e o identifica. O ocupante se mantém atento à situação em que o fogo se desenvolve e já começa a produzir fumaça. O inconsciente conceito de invulnerabilidade do indivíduo o detém certo tempo até que tome alguma atitude, como deter o fogo, ativar o alarme, avisar outros ocupante ou evacuar do edifício.

Validação - o processo de validação consiste aparentemente na busca do indivíduo creditar sua percepção inicial quanto às possibilidades de fogo, na busca por uma validação verbal por outros indivíduos.

Definição – ocorre a relação de informações absorvidas pelo indivíduo, que incluem a natureza do fogo, o local de ocorrência, magnitude e o contexto do tempo e situação em que se encontra. Nesse momento o *stress* e a ansiedade tornam-se evidentes.

Avaliação – é caracterizada pelas atividades cognitivas e psicológicas necessárias à reação ao risco. A habilidade de desenvolver estratégias para vencer o incidente depende da capacidade psicológica e fisiológica do indivíduo de controlar o stress e ansiedade para iniciar o processo de decisões. Nessa etapa, fatores como familiarização com o ambiente, treinamentos de escape e influências culturais, econômicas e sociais são apontadas como intervenientes no modelamento e agilidade das decisões.

Compromisso – consiste nos mecanismos utilizados para iniciar e validar as estratégias formuladas no processo de avaliação. Caso as estratégias não tenham sido consolidadas, o indivíduo é envolvido imediatamente no processo de reavaliação e compromisso.

Reavaliação – é o mais estressante de todos os processos, pois significa a falha nas estratégias anteriores e a reavaliação de novas, em um momento de maior desenvolvimento do fogo. Ocorre o requerimento de mais energias fisiológicas e

psicológicas ao mesmo tempo em que o indivíduo está mais suscetível aos perigos do fogo. Pelo fato do indivíduo apresentar-se debilitado nos aspectos psicológicos e físicos, as falhas de estratégias e o risco de insucessos aumentam.

Os fatores físicos são apresentados no Capítulo 7, definidos pelos parâmetros abrangidos pelo *software BuildingEXODUS*.

7

MÉTODOS COMPUTACIONAIS

7.1 Introdução

O rápido progresso da compreensão dos processos de incêndio e suas interações com os edifícios resultam no desenvolvimento de uma grande variedade de modelos de análise que são usados para simular o fogo em compartimentos. Esses modelos podem ser classificados como modelos probabilísticos e determinísticos.

Modelos probabilísticos não fazem uso direto dos princípios físicos e químicos envolvidos nos incêndios. Estes trabalham com previsões estatísticas sobre as fases do crescimento do fogo, baseadas em análises de dados experimentais e de incêndios reais pertinentes, assim como de resultados de modelos computacionais. Tais modelos não serão discutidos neste trabalho.

Os modelos determinísticos podem ser divididos em três categorias: modelos CFD, modelos de zona e modelos de cálculos manuais (QUINTIERE, 2000). Decorrente do uso do *software Smartfire* neste trabalho, que adota o modelo CFD, são apresentadas apenas descrições desse modelo.

Depois de verificados os fundamentos da segurança contra incêndio, dinâmica e comportamento do fogo, e realizada a análise do edifício habitacional de cinco pavimentos adotado, desenvolve-se o modelo computacional de incêndio natural desta edificação para a análise dos parâmetros de projeto verificados anteriormente, através de simulações.

Para a obtenção dos resultados do incêndio é utilizado o *software Smartfire*, onde são equacionados aos produtos da combustão, fumaça e temperatura. O resultado do modelo gerado no *software* citado proporciona a verificação da dinâmica e comportamento do incêndio no edifício habitacional analisado, que estabelece dados necessários à análise do processo de evacuação dos ocupantes no *software buildingEXODUS*. Neste, o processo de fuga se relaciona às influências da arquitetura, produtos do incêndio e comportamento da população frente ao fogo e pânico.

Ambos os *softwares* serão apresentados a seguir, concomitantemente à apresentação dos ensaios computacionais do edifício.

7.2 Modelo CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) é um dos ramos da mecânica dos fluidos que usa métodos numéricos e algoritmos para resolver e analisar problemas concernentes à dinâmica dos fluidos e pertence ao modelo denominado “*field model*” de modelamento de incêndio. Os computadores executam os milhões de cálculos exigidos para simular a interação de fluidos e gases numa complexa interface com a engenharia.

A base fundamental de qualquer problema em CFD são as equações *Navier-Stokes*, que se apresentam como um conjunto de equações que descrevem o movimento de substâncias fluidas como líquidos e gases. Essas equações estabelecem que mudanças no momento e aceleração de uma partícula fluida são simplesmente o produto das mudanças na pressão e forças viscosas dissipativas (similar à fricção) atuando dentro do fluido.

O ponto inicial para modelos CFD é o sistema de equações diferenciais que descrevem o balanço entre as influências do transporte de massa, momento, espécies químicas e energia, contidas no incêndio e ao longo do ambiente em que esse ocorre. Essas equações são resolvidas em um domínio geométrico dividido em volumes pequenos, geralmente conhecidos como malha, ou grade (Figura 7.1).

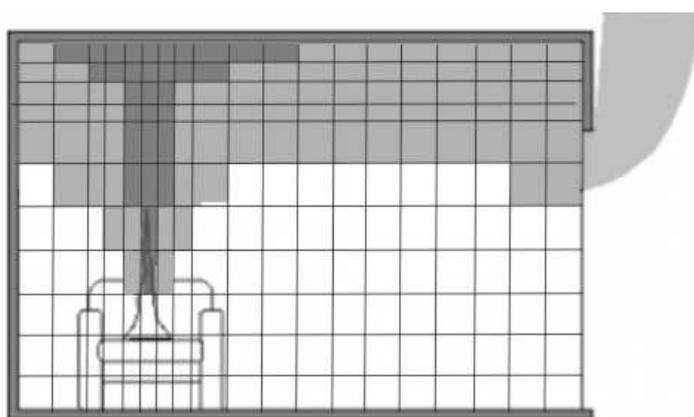


FIGURA 7.1 – Dinâmica computacional dos fluidos: compartimento dividido em células.

FONTE: QUINTIERE (2000).

O modelamento de incêndio em CFD é de tamanha complexidade, se analisados todos os parâmetros envolvidos em um incêndio em compartimento, que não há ferramentas de CFD que contemplem todos os processos desse modelo de incêndio. No entanto, existe um número de aproximações diferentes para os sub-modelos do incêndio e que devem ser consideradas. Alguns dos processos fundamentais nesse tipo de análise, e que devem ser considerados, são o modelo de turbulência, modelo de radiação e produção de fuligem, pirólise e propagação das chamas, assim como o modelo de combustão. Tais assuntos já foram apresentados no Capítulo 3.

O uso de modelos CFD requer considerável conhecimento dos processos físicos e químicos do fogo, como também de métodos numéricos e computacionais. Outro ponto importante acerca dessa ferramenta de modelamento de incêndio, é que esta demanda um longo período de tempo para realizar suas análises, além de um custo considerável de equipamentos compatíveis para executar os *softwares* e extrair resultados pertinentes. Pode-se dizer que o uso dessa metodologia ainda é raro nos estudos de engenharia contra incêndio. Entretanto, tal metodologia apresenta-se muito útil, principalmente para geometrias complexas, e pode ser a única maneira de processar e analisar certos cenários de incêndio (QUINTIERE, 2000).

7.3 Smartfire

Desenvolvido pelo Grupo de Engenharia de Segurança Contra Incêndio (*Fire Safety Engineering Group - FSEG*) da Universidade de Greenwich, na Inglaterra, o *software Smartfire* é usado para executar modelos numéricos dos cenários de incêndio, desenvolvido em C++, numa arquitetura de software em CFD. Inclui quatro componentes principais: engenharia numérica de CFD, várias interfaces de controle do usuário, ferramenta de criação de malha automatizada e um Sistema de Controle Inteligente (EWER *et al.*, 2004).

O *Smartfire* é utilizado para gerar dados dos perigos do incêndio relativos à temperatura, concentração de fumaça e radiação térmica em uma região dimensionada arbitrariamente, que pode ou não apresentar compartimentos internos múltiplos separados por paredes. O *software* utiliza soluções técnicas de volume de controle¹⁷, embora o atual sistema automatizado de malhas seja limitado a criar volumes de hexaedros regulares. Os incêndios podem ser representados como fontes volumétricas de calor ou como fontes de massa de um combustível gasoso (EWER *et al.*, 2004).

¹⁷ Volume de controle é um volume arbitrário no espaço, pelo qual ocorre o escoamento do fluido.

A saída de dados dos perigos de incêndio, denominados *hazards*, pode ser diretamente exportada para o *software buildingEXODUS*, no qual é permitida a adaptação ao modelo de evacuação. O *link* de dados é alcançado usando um filtro que processa aspectos dos dados produzidos pelo *Smartfire* e permite que os dados sejam carregados pelo *buildingEXODUS*. O *link* desenvolvido deve ser considerado o primeiro passo na criação de um ambiente dinâmico do usuário, associando incêndio e cálculos de simulação da evacuação. Nessa primeira associação gerada, é de responsabilidade do usuário garantir que a geometria e o cenário do incêndio modelados dentro do *Smartfire* sejam congruentes com aqueles do cenário do *buildingEXODUS* (EWER *et al.*, 2004).

O *Smartfire* apresenta ao usuário duas interfaces diferentes e completamente separadas para a criação do modelo de incêndio: o *Smartfire Scenario Designer* e o *Smartfire Case Specification Environment*. O primeiro determina a geometria do cenário de incêndio e o segundo insere os parâmetros do incêndio. Somente após esses passos é possível simular o modelo no *Smartfire CFD Engine*.

É relevante informar que o processo de desenvolvimento do modelo contou com o apoio da Universidade de Greenwich, através do professor John Ewer, pertencente ao corpo do suporte técnico do *softwares Smartfire*. Esse apoio consistiu de inúmeros contatos eletrônicos, com a finalidade de atribuir mais consistência às simulações e resultados, assim como complementar a bibliografia do presente trabalho.

7.3.1 Aplicação do *Smartfire* no Edifício Habitacional

Para o modelamento de incêndio do edifício habitacional analisado, foram adotados os seguintes critérios:

- Ocorrência do incêndio: apartamento do terceiro andar – Esta escolha decorre do objetivo de analisar o comportamento de fuga da população habitante, no *software BuildingEXODUS*, em três situações distintas: nos pavimentos abaixo do pavimento do incêndio, com isenção dos efeitos do fogo (primeiro e segundo pavimentos); no

pavimento de incêndio, sob os efeitos do fogo por radiação e condução; e nos pavimentos superiores, sob os efeitos da convecção e conflagração ascendente (quarto e quinto pavimentos). Com esse parâmetro é permitido o estudo comparativo, em decorrência da equivalência volumétrica, geométrica e populacional entre a primeira e última situações.

- Início do incêndio: sala - Embora seja verificada maior incidência de incêndio em cozinhas, como apresentado no Capítulo 2, a escolha do incêndio na sala fundamentou-se em três parâmetros: a possibilidade de comparação ao incêndio ocorrido em Limeira, mencionado anteriormente; a maior disponibilidade de dados de queima dos materiais combustíveis nesse ambiente; e o fato desse ser o local obrigatório de evasão da população do apartamento em chamas (ver Figura 7.2).
- Ocorrência do incêndio entre 18h e 0h – Critério adotado pela relação encontrada nos dados estatísticos apresentados no Capítulo 2, que indica os maiores índices de mortes e incidências de incêndios no intervalo entre 18h e 0h, e no período de maior densidade ocupacional em residências (horário de maior permanência).
- Simulação de 1800 segundos de incêndio – O processamento dos dados de incêndio no período de 30 minutos foi escolhido em função deste ser o tempo mínimo apresentado pela norma ABNT NBR 14432:2001 para o TRRF, embora a edificação abordada esteja isenta dos requisitos de resistência ao fogo.
- Ignição e materiais combustíveis – Adotou-se a ignição por curto-circuito no sistema elétrico do televisor, por ser esta a principal causa de incêndios nesse ambiente, conforme apresentado no Capítulo 2. Para os materiais combustíveis, assumiu-se uma estante como primeiro elemento ignicível, com posterior propagação para um sofá de três lugares (Figura 7.2). Nenhum outro elemento foi considerado no período avaliado, em função da propagação para outro elemento não afetar a conclusão dos dados esperados (EWER, 2007).

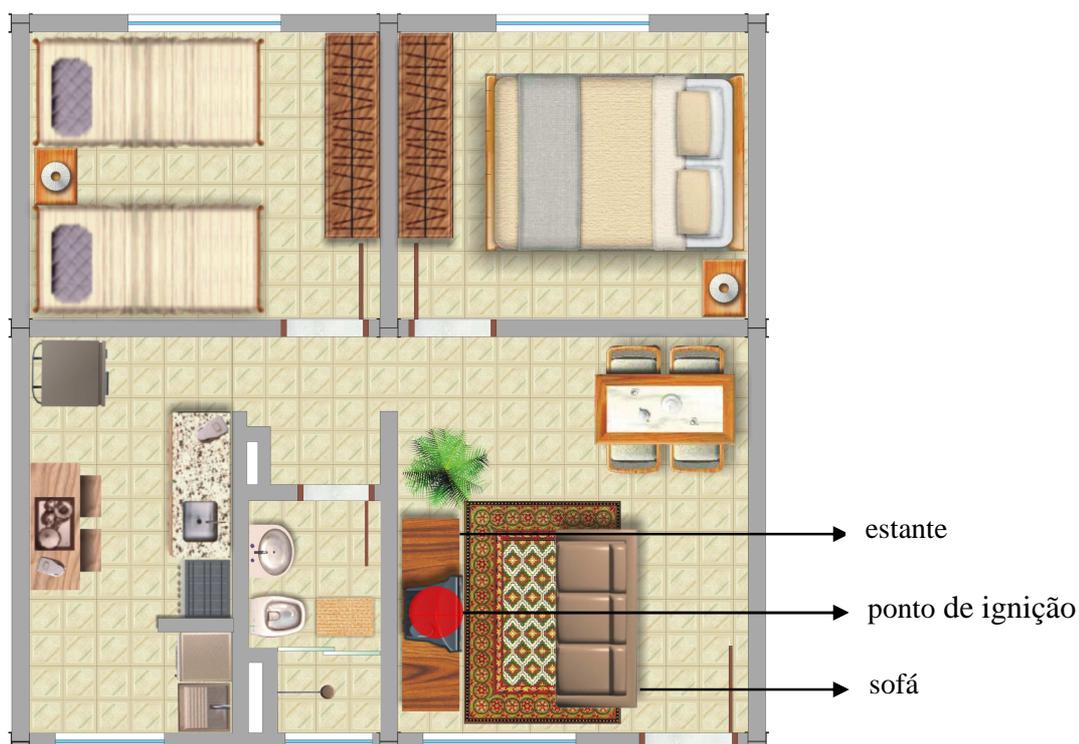


FIGURA 7.2 – Apartamento do incêndio: ponto de ignição e combustíveis adotados.

FONTE: Arquivos da autora.

Vale ressaltar que todo o processo de desenvolvimento do modelamento e simulações contou com a assiduidade do suporte técnico do *software Smartfire*, em decorrência da dificuldade de se obter um acervo bibliográfico compatível e favorável ao desenvolvimento da fumaça e produtos de combustão em edifícios, aplicado ao modelamento no *Smartfire*.

7.3.1.1 Geração do cenário

O *software Smartfire* permite que projetos em arquivo DXF¹⁸ sejam importados através do *Smartfire Scenario Designer* para a geração da geometria do cenário de incêndio.

¹⁸ DXF, ou *Drawing Exchange Format*, se refere a um formato de arquivo do software AutoCAD, desenvolvido pela Autodesk, como uma solução de permitir a interoperacionalização de dados entre o AutoCAD e outros programas.

Para o edifício habitacional analisado, o modelo tridimensional da edificação foi construído a partir da planta tipo do edifício, importado em arquivo DXF. Nessa etapa, foi necessário decidir sobre a unidade de medida, adotada em centímetro, e sobre a parametrização da malha, adotada de 20 cm x 20 cm. A função da malha é nortear a concepção da geometria que, para esse caso, tornou todas as medidas múltiplas de 20 (Figura 7.3). Dessa forma, as paredes da edificação foram padronizadas em 20 cm de espessura, não sendo relevante para efeito das considerações realizadas no *Smartfire Scenario Designer*. Quanto menor a malha, maior o refinamento, o que pode levar a desprendimento desnecessário de tempo na simulação (EWER, 2007).

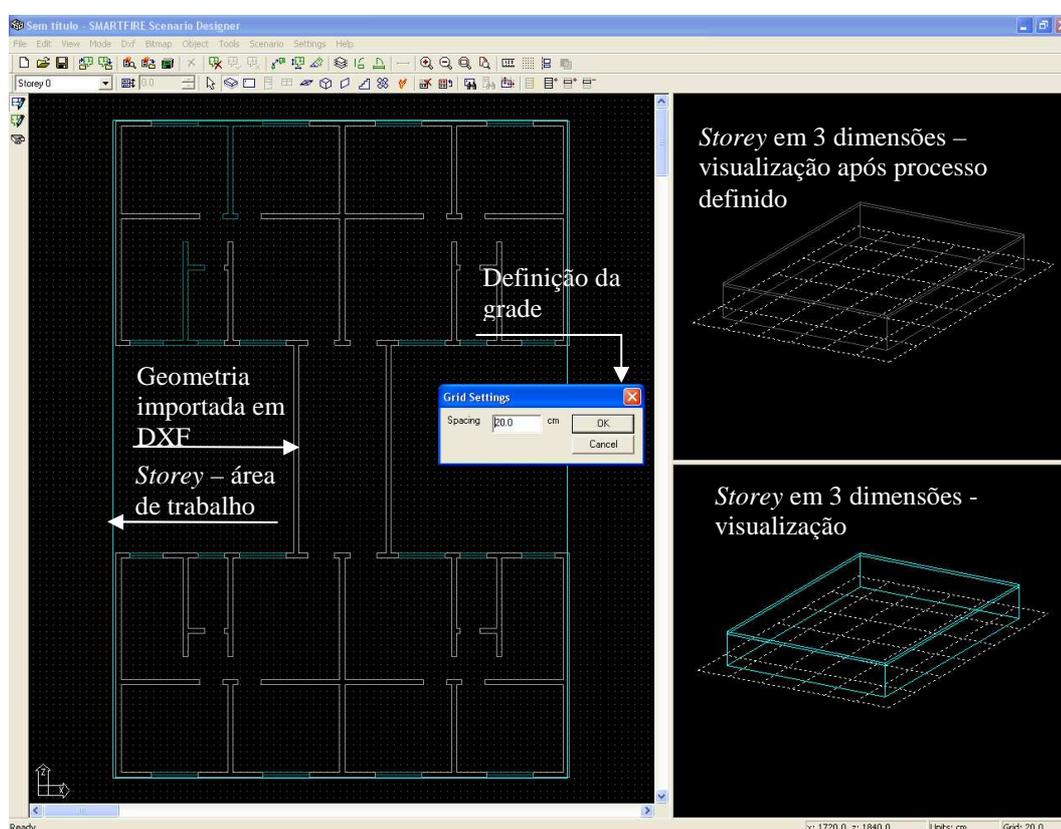


FIGURA 7.3 – *Smartfire Scenario Designer*: DXF, Storey e grade.

A primeira dificuldade encontrada no processo de uso do *Smartfire* é descrita neste momento. Uma das limitações dessa interface é a inserção de qualquer objeto não retangular em sua área de trabalho (na qual será concebida a geometria do cenário), que concebe apenas espaços retangulares (Figura 7.3). Essa área é definida como *Storey* e se aplica da mesma maneira a todos os demais pavimentos inseridos. Por essa razão,

juntamente com o fato da planta do pavimento tipo do edifício adotado representar-se na tipologia “H”, foram necessárias algumas modificações.

Para que o fator ventilação fosse contemplado na simulação, seria necessária a presença de espaços externos à edificação, preenchidos por ar. No entanto, no modelamento apresentado na Figura 7.3, as janelas do apartamento do incêndio coincidiram com a face do storey e os espaços entre os blocos e a caixa de escada foram interpretados pelo *software* como espaços internos – uma vez que o espaço estava delimitado entre as faces maciças e impermeáveis do storey. Para tanto, a solução encontrada foi cancelar o *storey* original, indicado na Figura 7.3, e definir um segundo, de maiores dimensões, a fim de propiciar espaços vazios entre a edificação e o limite do *storey*, de modo que o apartamento de incêndio estivesse envolto em ar.

Esses espaços foram interpretados pelo *software* como compartimentos, por se localizarem dentro dos limites do *storey*. Porém, foi possível torná-los preenchidos por ar e com aberturas na laje de cada pavimento, configurando-os como retângulos contíguos, vazios e abertos em suas faces superiores (EWER, 2007). Em contrapartida, os espaços que não possuem janelas em nenhuma de suas faces, não sofreram influência da propagação de calor por radiação térmica e fumaça, e configuraram-se como blocos sólidos (Figura 7.4).

Definidas a malha e a unidade de medida, os componentes da geometria foram determinados. Definiram-se os objetos e materiais de vedação, lajes, janelas e portas. Janelas foram inseridas somente no apartamento de incêndio, nos apartamentos superiores a este, em função do movimento ascendente da fumaça, e na caixa de escada. Portas foram inseridas em todos os apartamentos a partir do terceiro pavimento, para que fosse possível analisar o movimento da fumaça pela caixa de escada e sua penetração nos outros apartamentos por esta, por abertura ou frestas.

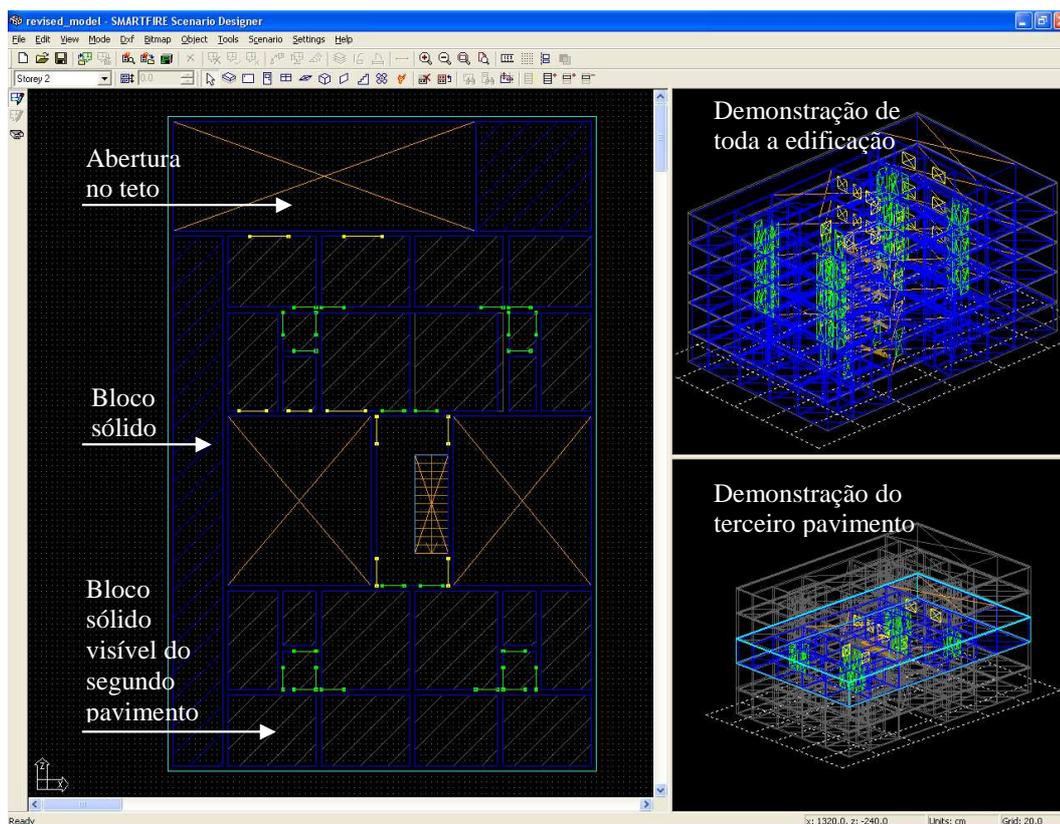


FIGURA 7.4 - Inserção de áreas contíguas à edificação.

A Figura 7.5 mostra as especificações dos materiais e situação dos objetos para alguns exemplos.

Door/Window Properties		Door/Window Properties		Door/Window Properties	
Position		Position		Position	
X	360.0	X	340.0	X	1180.0
Elevation	0.0	Elevation	100.0	Elevation	0.0
Dimensions		Dimensions		Dimensions	
Width	80.0	Width	80.0	Width	80.0
Height	210.0	Height	100.0	Height	210.0
General		General		General	
Type	Door	Type	Window	Type	Door
State	Open	State	Open	State	Closed
Material	Soft_Wood	Material	Glass	Material	Aluminium
Units: cm		Units: cm		Units: cm	
Close		Close		Close	

FIGURA 7.5 – Propriedades dos objetos janelas e portas.

Após conferidos todos os parâmetros e encontrada a solução definitiva da geometria, esta foi exportada para o *Smartfire Case Specification Environment* (Figura 7.6).

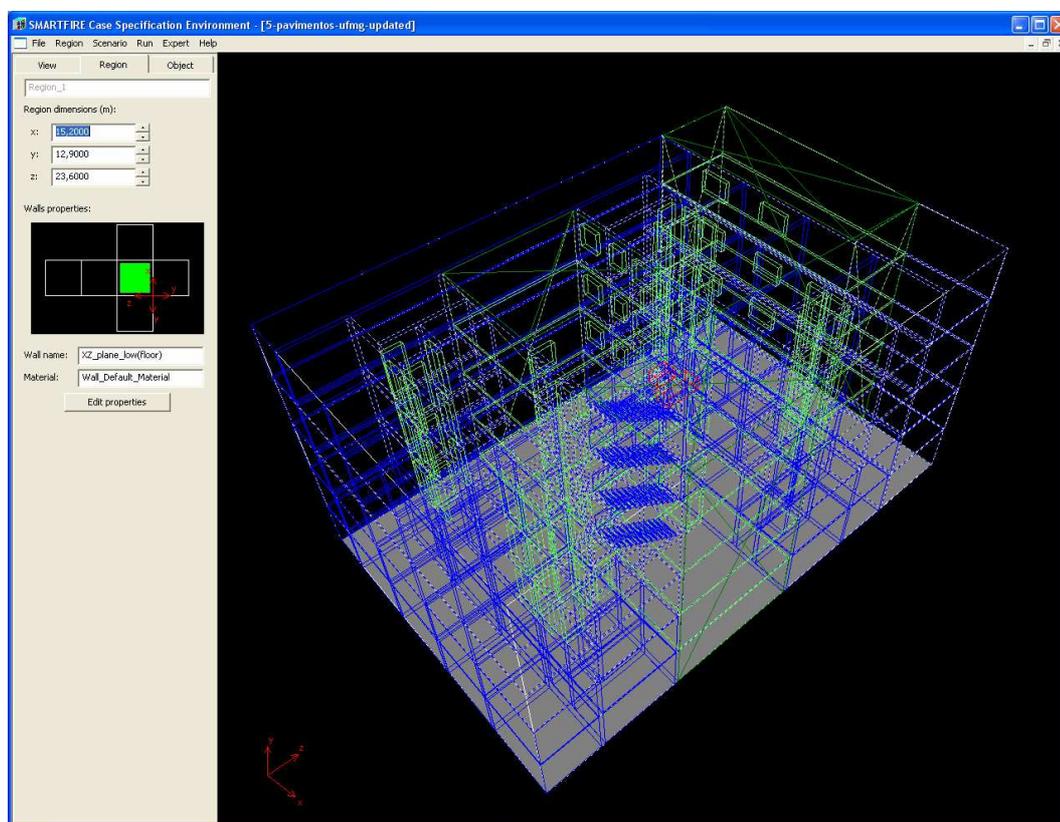


FIGURA 7.6 – Cenário da edificação já exportado para o *Smartfire Case Specification Environment*.

7.3.2 Especificação do cenário de incêndio

Determinada a geometria, define-se o cenário de incêndio, com parâmetros sobre a dinâmica e o comportamento do fogo em compartimentos, baseados nos princípios apresentados no Capítulo 3.

No momento em que a geometria construída no *Smartfire Scenario Designer* é exportada para o *Smartfire Case Specification Environment*, esta interface do *software*

se abre automaticamente mantendo as informações criadas anteriormente e as definições do cenário de incêndio podem ser iniciadas (Figura 7.6).

O *Smartfire Case Specification Environment* é apresentado como uma ferramenta capaz de configurar malhas, criar e simular uma grande variedade de modelos de incêndio. Dessa forma, permite ao usuário elaborar a geometria do objeto e realizar especificações físicas para a simulação dos cenários.

Enquanto ao *Smartfire Scenario Designer* é permitido determinar o tipo de material dos componentes da geometria, ao *Smartfire Case Specification Environment* é permitido definir as propriedades físicas dos materiais. Estas propriedades estão pré-definidas na biblioteca do *software* para materiais já estabelecidos. Caso seja necessário, o usuário pode alterar as propriedades dos materiais ou inserir novos. A Figura 7.7 apresenta as propriedades do tijolo cerâmico comum e do aço, ambos presentes no edifício habitacional analisado. Para o tijolo, não há especificação quanto a este ser comum ou furado.

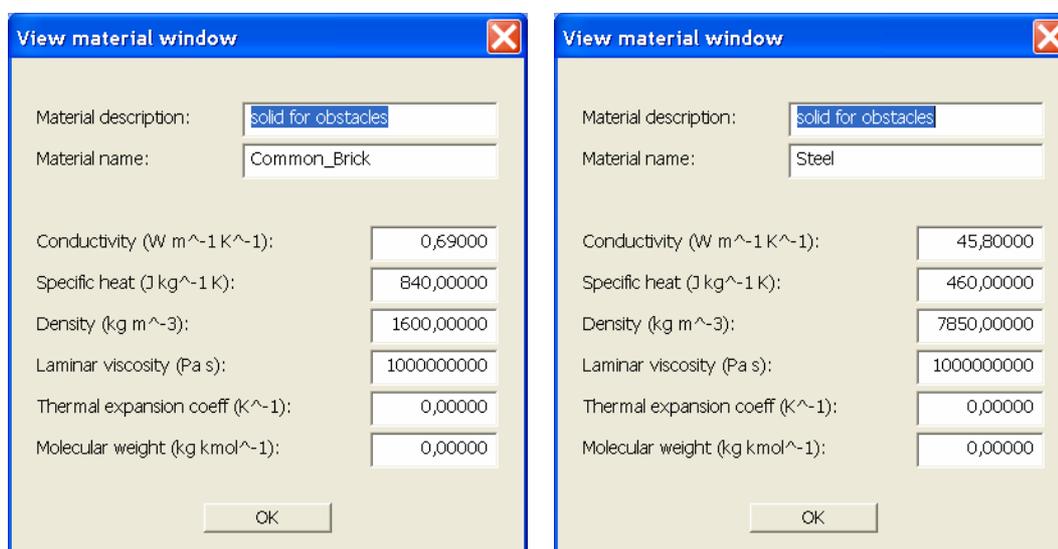


FIGURA 7.7 – Propriedades físicas do tijolo comum e do aço.

A Tabela 7.1 apresenta as propriedades físicas dos materiais utilizados em diferentes objetos do estudo em questão. Todos os materiais fazem parte da biblioteca do *Smartfire Case Specification Environment*.

TABELA 7.1 - Propriedades físicas dos materiais utilizados na simulação.

Material \ Propriedade	Condutividade térmica (W/mK)	Calor Específico ($J/kg.K$)	Densidade (kg/m^3)
Aço	45,8	460,0	7850,0
Alumínio	237,0	900,0	2700,0
Concreto	1,4	880,0	2300,0
Tijolo comum (cerâmico)	0,69	840,0	1600,0
Vidro	0,76	840,0	2700,0
Madeira macia	0,14	2850,0	640,0
Madeira dura	0,17	2380,0	800,0
Ar	0,02622	1045,78	1,17736

FONTE: SMARTFIRE V4.0, 2004.

Um fator importante no processo de modelamento é quanto à existência ou não de sistemas de proteção ativa contra incêndio nas edificações. Para edificações que contemplam sistemas de identificação de fumaça e *sprinklers*, a elaboração da simulação ocorre de maneira diferenciada em relação a uma edificação isenta de proteção ativa. Na edificação estudada, caso houvessem os sistemas mencionados, não seria necessário modelá-la totalmente, uma vez que os efeitos do fogo seriam detectados e interrompidos em pouco tempo de ocorrência (EWER, 2007). Ainda segundo o mesmo autor, caso houvesse alarmes de fumaça, os ocupantes iniciariam o processo de fuga antes do término da fase do crescimento do incêndio e seu posterior alastramento. No entanto, como o edifício não apresenta sistema de proteção ativa, a fumaça se propaga ao longo do edifício, em movimento horizontal e vertical, sendo esta a única maneira de percepção do incêndio pelos ocupantes de outros apartamentos e pavimentos. Assim, torna-se necessário simular toda a área em que há previsão de conflagração do fogo e fumaça.

7.3.2.1 Opções do cenário

A definição do cenário de incêndio é determinada, fundamentalmente, nas opções apresentadas no *Problem Type*, como verificado na Figura 7.8.

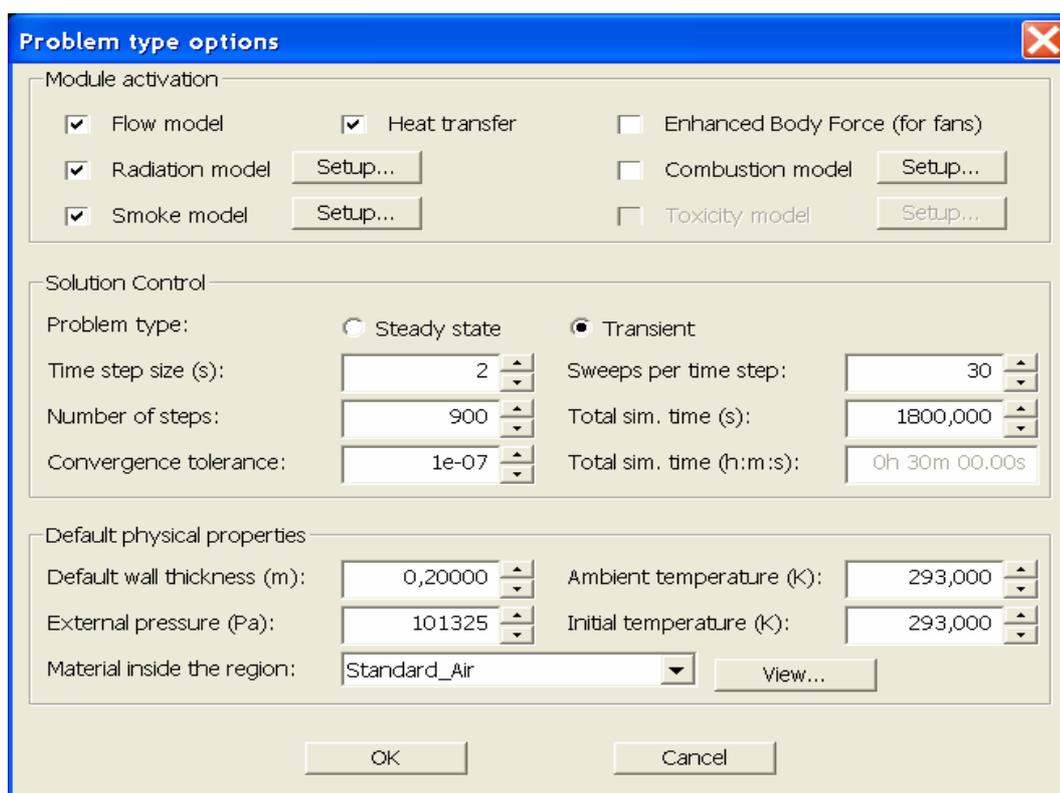


FIGURA 7.8 – Janela de opções dos tipos de problemas a serem analisados pela simulação.

Em consideração aos dados pertinentes a esta simulação, foram considerados os modelos de fluxo e transferência de calor, radiação e fumaça.

Modelo de combustão – A opção *Combustion model* não foi utilizada nesta simulação, por esta ser aplicada somente a situações em que o combustível é conhecido e é possível formular a equação correta deste elemento. No *Combustion model*, verifica-se a possibilidade de especificação da equação de combustão somente para queima de gases simples e aplicáveis a hidrocarbonetos (Figura 7.9).

Para combustíveis mais complexos e que a exata equação de combustão é desconhecida, pode-se utilizar um modelo de combustível gasoso mais simples em substituição. No caso de um plástico em chamas, poderia ser usado o metano. No entanto, se a curva da taxa de liberação de calor HRR é conhecida, é aconselhável usar somente o modelo de fumaça.

Combustion model options

Combustion model

Eddy Mixing Controlled Diffusion Controlled

Molecular ratios in combustion equation

1,00000 Fuel + 2,00000 O2 => 2,00000 H2O + 1,00000 CO2

Mass fractions in inlets

Fuel m-frac: 1,00000 Oxygen m-frac: 0,23000

Molecular weights (kg kmol⁻¹)

Fuel m-w: 16,00000 Dilutant m-w: 28,00000

Miscellaneous

Heat of Combustion (J/kg): 5e+07

Combustion efficiency: 0,80000

Eddy break up constant: 4,00000

Smoke to Fuel Ratio (kg/kg): 0,015

Combustion Oxidant Limit: 0,14000

OK Defaults Cancel

FIGURA 7.9 – Opções do modelo de combustão para hidrocarbonetos.

Modelo de fumaça - A opção *Smoke model* apresenta dados necessários à concentração do modelo de fumaça dentro do *Smartfire* (ver Figura 7.10). O campo *Smoke Density* indica a massa por unidade de volume da fumaça. Tipicamente, a fumaça será conglomerada em partículas de carbono. Já o campo *Smoke Absorption Constant* indica a relação entre a fumaça e sua absorção da radiação térmica.

O campo *Smoke Specific Extinction Coefficient* é uma constante particular da fumaça modelada e permite que um coeficiente de extinção leve seja calculado em cada célula. Coeficientes de extinção são úteis para determinar a visibilidade, devido ao aumento da concentração de fumaça (EWER, 2004).

No entanto, segundo EWER (2007), os dados mencionados acima devem ser mantidos caso o usuário possua as curvas de taxa de liberação de fumaça, ou *Smoke Release Rate* (SRR), para os materiais combustíveis propostos. Dessa forma, insere-se a curva SRR do material combustível na janela de propriedades do material a ser queimado.

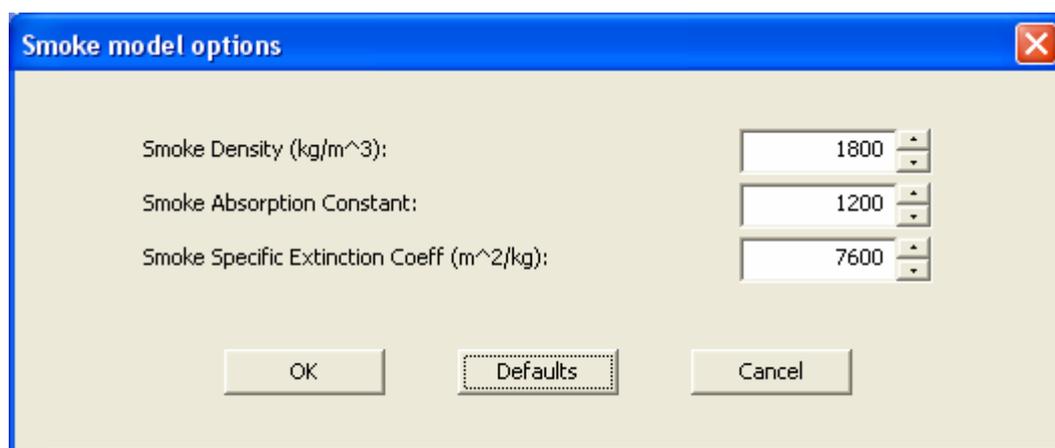


FIGURA 7.10 – Opções padrão do modelo de combustão para hidrocarbonetos.

Vale ressaltar que o modelo de combustão e o de fumaça são pertinentes somente para o objetivo de verificar os produtos da combustão.

Modelo de radiação - A opção *Radiation model* é aplicada com o tipo e operação do modelo de transferência de calor por radiação e pode ter um efeito significativo sobre os resultados da simulação do incêndio. Salienta-se que os valores de fluxo de radiação gerados no *Smartfire* são considerados constantes.

São apresentados três sub-modelos de radiação: *Radiosity*, *Six Flux* e *Multiple Ray*. Os dois primeiros devem ser usados por usuários novatos e o terceiro, indicado a usuários experientes, é acessível quando a opção *Enable Expert Problem Set-Up* do menu *Expert Options* estiver ativa (EWER, 2004).

O sub-modelo *Radiosity* soluciona uma variável extra, apresentada como o potencial de radiação em cada ponto da região analisada e é considerado o mais simples. O *Six Flux* calcula o fluxo de radioatividade em seis direções ortogonais para cada célula. Estes seis

raios de radiação usam seis variáveis extras para prover cálculos de energia térmica mais acurados.

Os modelos de radiação tendem a tornar a simulação mais real, já que a altas temperaturas a transferência de calor por radiação se apresenta dominante. Sem radiação, em simulações com elevadas cargas de incêndio, as temperaturas podem apresentar valores muito altos em função da convecção e a difusão da energia do calor não ocorre de maneira suficiente nas regiões mais quentes.

O sub-modelo *Multiple Ray* utiliza parâmetros de aproximação mais sofisticados e apresenta numerosos raios organizados em várias direções (raios múltiplos). Com apenas seis raios, esse modelo se assemelha muito ao *Six Flux*. Entretanto, para avaliações mais complexas, é conveniente especificar um número maior de raios. A vantagem oferecida por este modelo está em espalhar a radiação térmica das fontes de calor mais uniformemente ao redor do compartimento e gerar respostas mais precisas.

Para a análise da edificação estudada, foi sugerido por EWER (2007) que fosse adotado o modelo *Multiple Ray*. No entanto, foi determinado que o número de raios permanecesse em seis. Na Figura 7.11 é apresentado o quadro de parâmetros para este modelo, onde os quatro parâmetros apresentados se referem às constantes de radiação.

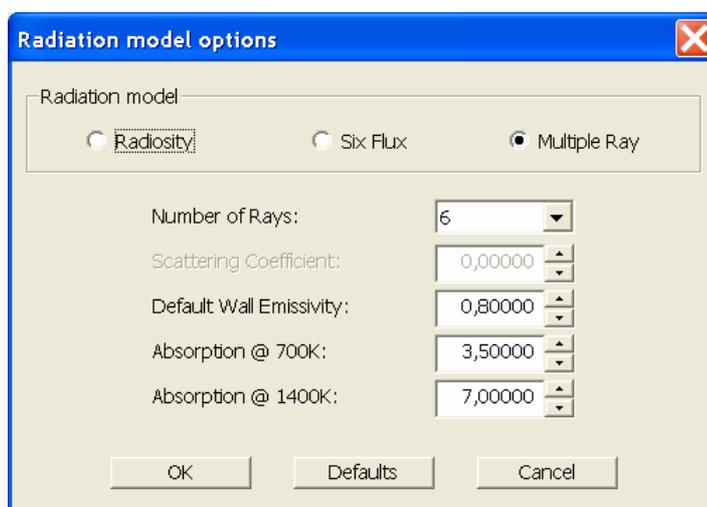


FIGURA 7.11 – Opções do modelo de radiação *Multiple Ray*, adotado na simulação.

Ainda para as configurações do *Problem Type Options*, vistas na Figura 7.8, algumas considerações relevantes sobre o modelo do edifício devem ser enfatizadas.

A opção *Problem type* define a simulação quanto à sua estaticidade. Ao considerar o incêndio como um fenômeno absolutamente instável na natureza, adotou-se a opção *Transient*.

O campo *Time step size* é usado apenas para simulações passageiras (*Transient*) e é uma maneira de saber quanto tempo de simulação resultará os cálculos do *CFD engine*. Para o estudo de caso desse trabalho foi adotado o valor de 1 segundo, conforme instruções do manual *User Guide for the Smartfire Environment* (Tabela 7.2), que adota valores tanto menores quanto maior o nível de complexidade do modelo. Esse mecanismo requer maior tempo de execução computacional, mas propicia a estabilização da solução.

TABELA 7.2 – Uso recomendado para diferentes *Time step size*.

Time step size (s)	Uso
Maior do que 5,0	Casos muito estáveis
1,0 a 5,0	Casos estáveis com moderadas cargas de incêndio
0,1 a 1,0	Altas cargas de incêndio / ou geometrias complexas
0,01 a 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 – exemplo: janelas quebradas

FONTE: Smartfire V4.0 (2004).60

Number of steps - Permite ao usuário configurar o número de passos que serão simulados no *CFD engine*. Claramente, o tempo de simulação total é o produto do *Time step size* e o *Number of steps*. Adotou-se o valor de 2s.

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. Esse número

determina o limite mais baixo do processo em um passo e o *CFD engine* não irá fazer qualquer varredura a além da que foi programada. Adotou-se o valor de 30.

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 foram convergidas. Caso as variáveis tenham convergido, então o *CFD engine* irá iniciar um novo passo ou interromperá o processo. Manteve-se o valor de 1^{-7} .

Ambient temperature e initial temperature – As opções de temperatura ambiente e temperatura inicial permitem ao usuário determinar as temperaturas aplicadas na região do incêndio. No modelo analisado, usou-se o valor de 293 K (20° C) para ambas.

Default wall thickness – Determina a espessura de paredes, para ser reconhecida pela ferramenta automatizada de malha. Embora a espessura das paredes do edifício habitacional da Solução Usiminas para Habitação de Interesse Social seja entre 14cm e 15cm, adotou-se o valor de 20cm, em função da grade estabelecida no *Smartfire Scenario Designer*.

External pressure e Material inside the region – O primeiro determina a pressão atmosférica na simulação e o segundo, o material gasoso encontrado no ambiente. Nenhum desses parâmetros foi alterado.

7.3.2.2 Refinamento da geometria

Depois de importada a geometria do *Smartfire Scenario Designer* e configurado o cenário, algumas atribuições ainda foram necessárias. Descreve-se nesse item todo o procedimento adotado de remodelamento na geometria.

Como já pré-determinado no *Smartfire Scenario Designer*, os apartamentos do primeiro e segundo pisos foram considerados como materiais sólidos. Essa solução é decorrente do modelo de fumaça, fenômeno de turbulência e *celling jet* gerarem um movimento

ascendente da fumaça e gases tóxicos, o que torna a verificação dos pavimentos inferiores ao incêndio desnecessária (EWER, 2007). Dessa forma, para a análise no *CFD engine*, definiu-se que esses apartamentos, ou compartimentos, fossem retirados. A opção de remoção dos objetos sólidos é encontrada na barra de ferramenta *Scenario*, na opção *Optimizations* (Figura 7.12).

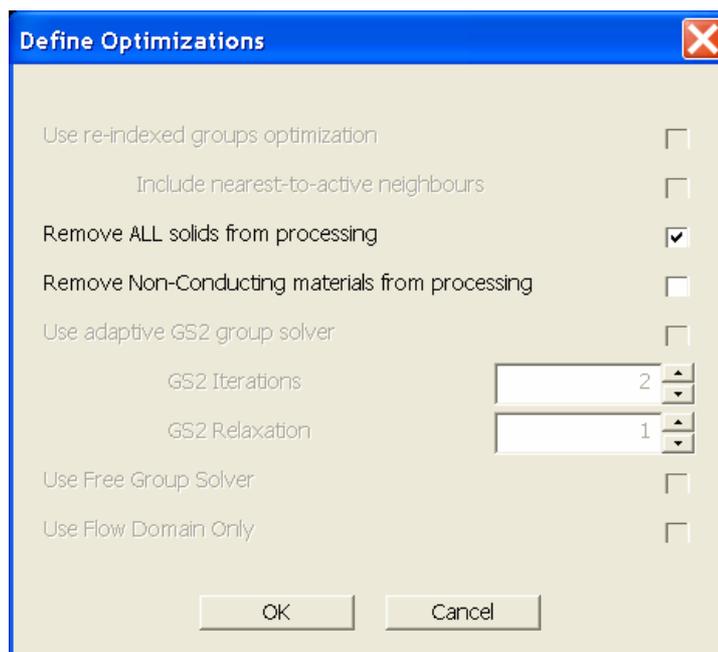


FIGURA 7.12 – Opção para remoção de objetos sólidos.

Para as portas principais dos apartamentos do terceiro, quarto e quinto pavimentos foi configurada uma abertura de 10 cm na porção inferior. Esta abertura foi possibilitada pelo objeto *face porosity*, com grau de porosidade igual a 0,1 (Figuras 7.12 e 7.13). Dessa forma, gerou-se uma abertura efetiva de 0,1cm x 10cm, que equivale a 1,0cm, simulando as pequenas aberturas entre a porta e o piso, ou entre a porta e o marco. Essa ferramenta foi utilizada para permitir o acesso da fumaça da caixa de escada ao interior dos apartamentos, já que as demais portas foram configuradas para permanecerem sempre fechadas.

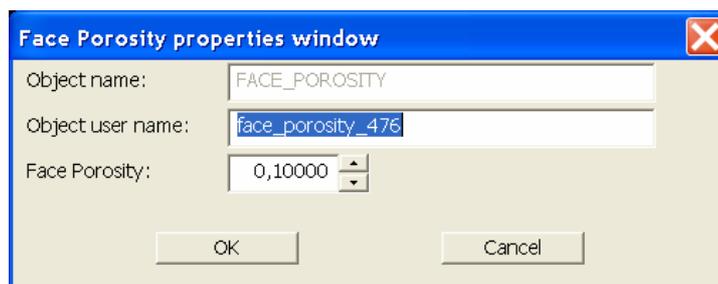


FIGURA 7.13 – Propriedade da *face porosity*.

Às regiões externas ao edifício criadas no *Smartfire Scenario Designer*, foram inseridas aberturas no topo da área de trabalho e nas faces limites desta, através do objeto *Outlet* – que somente é possível no *Smartfire Case Specification Environment* (Figura 7.14). Estes objetos permitem, na porção em que são inseridos, criar vazios na face da área de trabalho e serem identificados pelo *software* como áreas externas e passíveis de ventilação.

O grau de ventilação da edificação foi determinado pelo horário da ocorrência do incêndio. Por se tratar de um incêndio noturno, a maioria das janelas do edifício está fechada. Dessa forma, com o intuito de diminuir a malha de elementos finitos, utilizada no *CFD engine*, e considerando que as janelas fechadas não interferem na avaliação realizada, as janelas externas dos demais apartamentos não foram representadas.

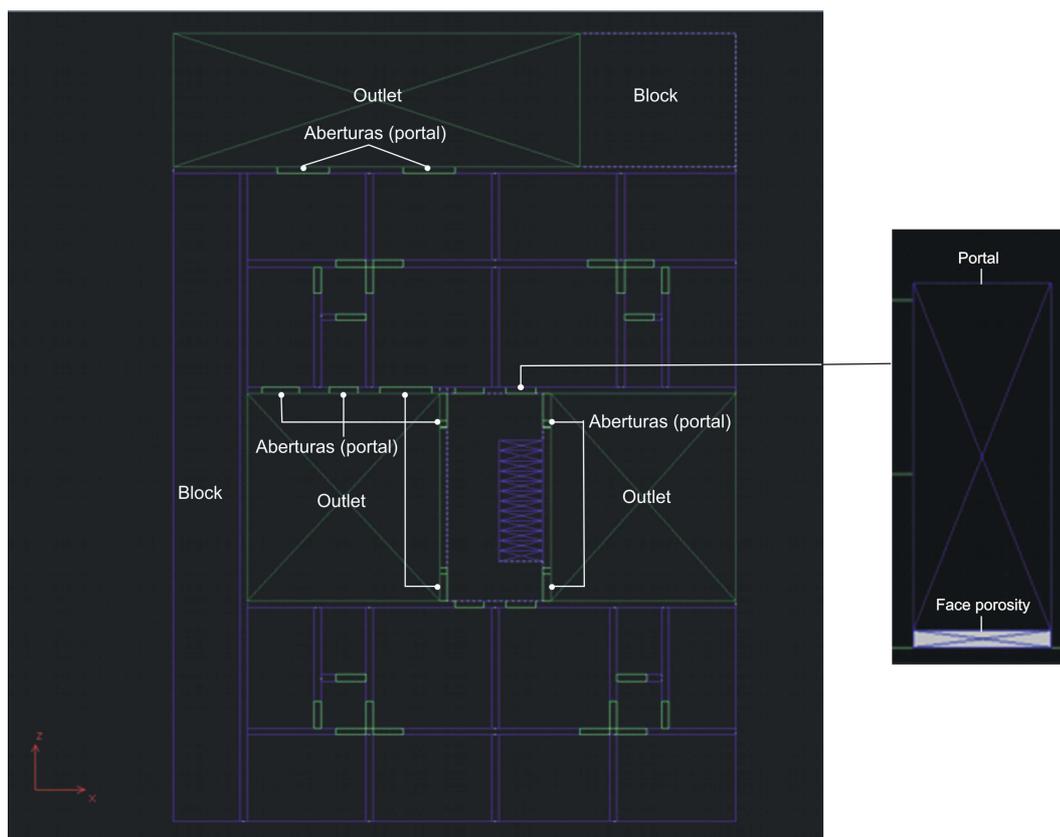


FIGURA 7.14 – Geometria do modelo e representações de *Block* e *Outlet* (planta) e *Portal* e *Face porosity* (elevação).

Para o apartamento de incêndio (compartimento de incêndio), em função do modelo de fumaça, foram consideradas todas as janelas abertas, garantindo maior grau de ventilação e disponibilidade de oxigênio ao compartimento. A porta principal, inicialmente fechada e com as mesmas características das supracitadas, foi programada para ser removida em 90 segundos, simulando a abertura desta pelos ocupantes no processo de fuga. A abertura também tentou proporcionar a vazão da fumaça e gases quentes para a área da escada e posteriormente para o restante da edificação.

A Figura 7.15 mostra uma esquematização geral da geometria modificada e pronta para inserção dos materiais combustíveis.

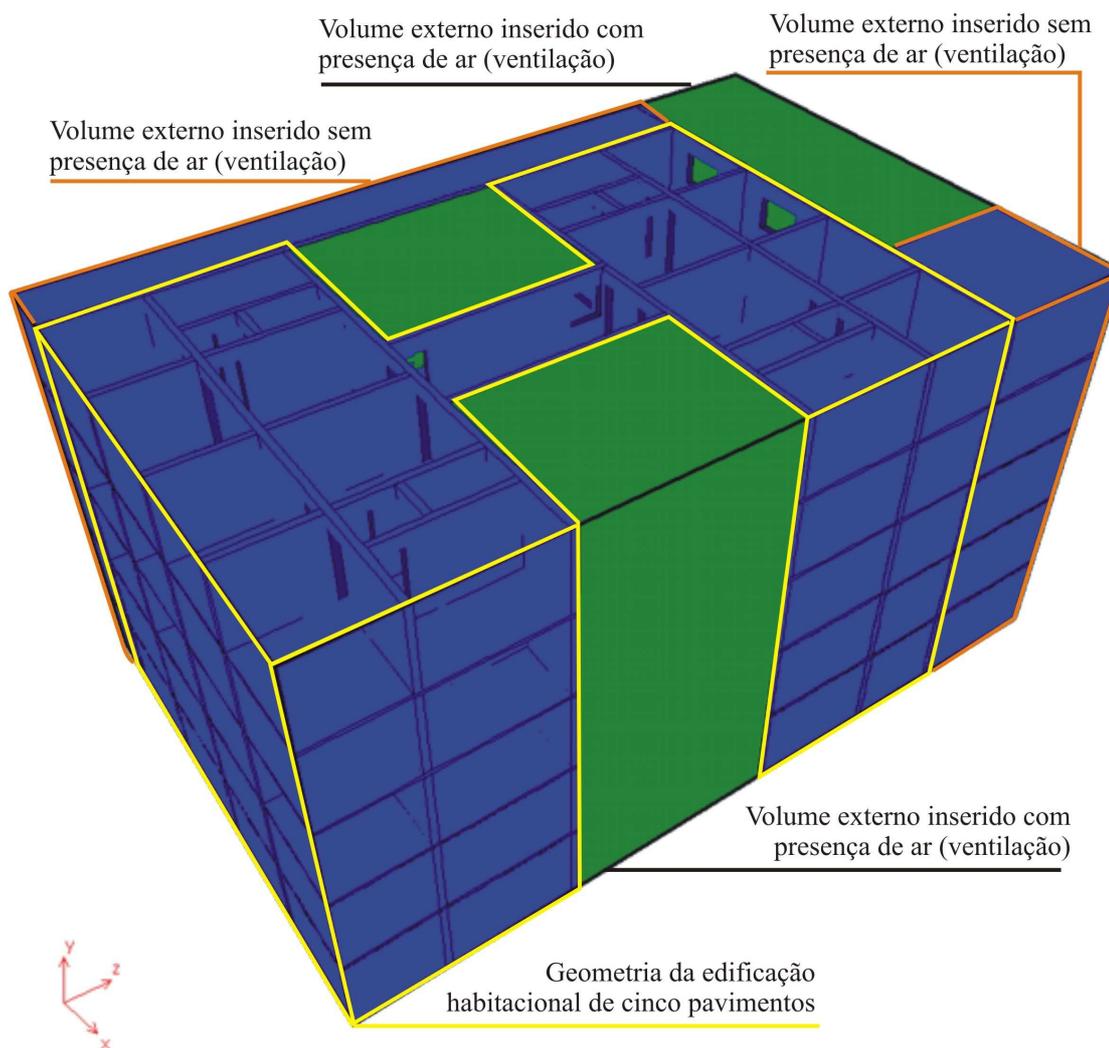


FIGURA 7.15 – Geometria final do cenário do edifício habitacional de cinco pavimentos.

7.3.2.3 Objeto Simple fire

O objeto *simple fire* refere-se ao material combustível, representado por uma fonte volumétrica de taxa de liberação de calor ou gás. Neste trabalho foram adotados dois objetos *simple fire*: estante e sofá de três lugares.

Depois de criados e dimensionados, a estes objetos foram atribuídas as características específicas de cada um através da janela de propriedades *Simple fire properties windows*. Essas propriedades serão apresentadas para cada um dos objetos *simple fire*.

Conforme mencionado anteriormente, a estante foi adotada como o primeiro objeto a experimentar o processo de combustão, por ignição resultante de curto-circuito. Em seguida, por transferência de calor, o sofá também começou a queimar.

Quanto às dimensões, esses objetos se apresentam segundo os dados contidos na Figura 7.16 para a estante e sofá, respectivamente. Suas dimensões foram abordadas de maneira simplificada, expressando objetos retangulares, a partir de medidas realizadas *in loco* em um apartamento de edifício habitacional estruturado em PFF, pertencente à Solução Usiminas para Habitação de Interesse Social em Belo Horizonte, Minas Gerais.

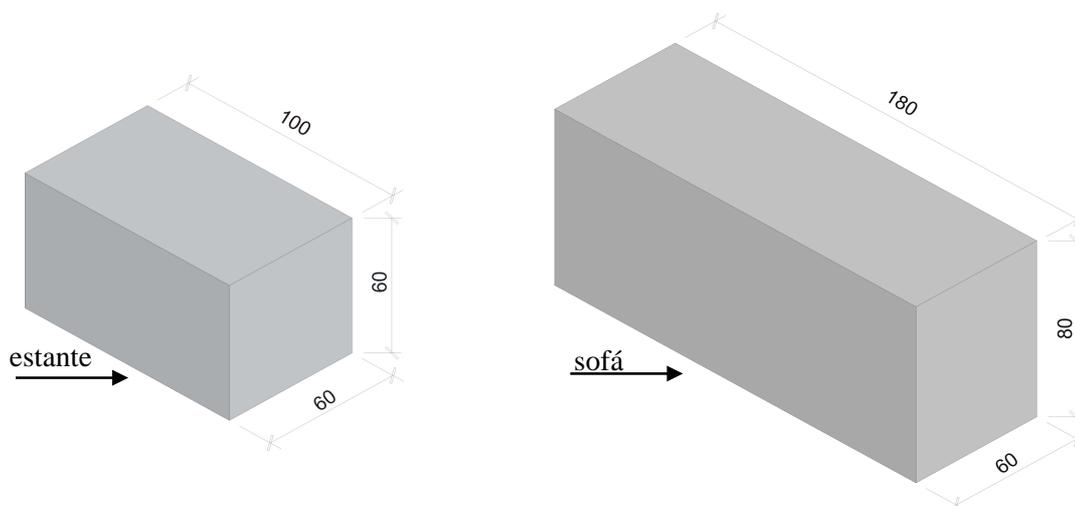


FIGURA 7.16 – Objetos simple fire: estante (60x60x100) e sofá (60x80x180).

FONTE: Arquivos da autora.

A natureza do incêndio é determinada pelo tipo de simulação implementada. Nesse caso, como o modelo de combustão não foi ativado, os parâmetros foram definidos pela taxa de liberação de calor, produção de fumaça e ativação ou desativação do fogo.

Os dados das taxas de liberação de calor dos objetos foram inseridos numericamente no campo *editor* que, automaticamente, permitiu a geração dos gráficos de liberação de calor, como mostrado nas Figuras 7.17 e 7.18. O campo *End time (s)* também foi determinado automaticamente após a inserção dos valores de HRR.

Para a determinação da curva de produção de fumaça foi necessário identificar a “massa de fumaça por segundo” (kg/s) liberada pela estante. Para tanto, segundo EWER (2007), seguiu-se o seguinte procedimento:

- Identificar a curva HRR dos objetos;
- Assumir que a combustão é bem ventilada;
- Usar o rendimento da produção de fumaça (*yield*) e o calor de combustão para calcular uma estimada curva de liberação de fumaça.

Assume-se:

- HoC = calor de combustão para a estante (J/kg) – depende do combustível;
- Yield* = rendimento da fumaça (kg de fumaça por kg de combustível queimado) – depende do material em queima;
- HRR = taxa de liberação de calor da estante (W ou J/s);
- Smoke* = massa de fumaça produzida por segundo (kg/s)

Dessa forma, pôde-se calcular a produção de fumaça estimada pela Equação 7.3 a partir do desenvolvimentos das Equações 7.1 e 7.2.

$$\text{Massa de combustível de queima por segundo} = \frac{HRR}{HoC} \quad 7.1$$

$$Smoke = Yield \times \text{massa de combustível de queima por segundo} \quad 7.2$$

Então:

$$Smoke = Yield \times \frac{HRR}{HoC} \quad 7.3$$

A ferramenta utilizada para este cálculo foi a planilha eletrônica *Excel*, aplicando-se a Equação 7.3 e a coluna de dados de HRR, e extraindo-se as curvas de fumaça de cada objeto.

Estante: *simple fire 1*

TABELA 7.3 – Informações da estante.

Dado	Descrição
Material	madeira
HRR	dado do <i>National Institute of Standards and Technology</i> (NIST)* (Figura 7.17).
SRR	dados obtidos a partir da Equação 7.3* (Figura 7.18).

* As tabelas referentes a este assunto são apresentados no Anexo B.

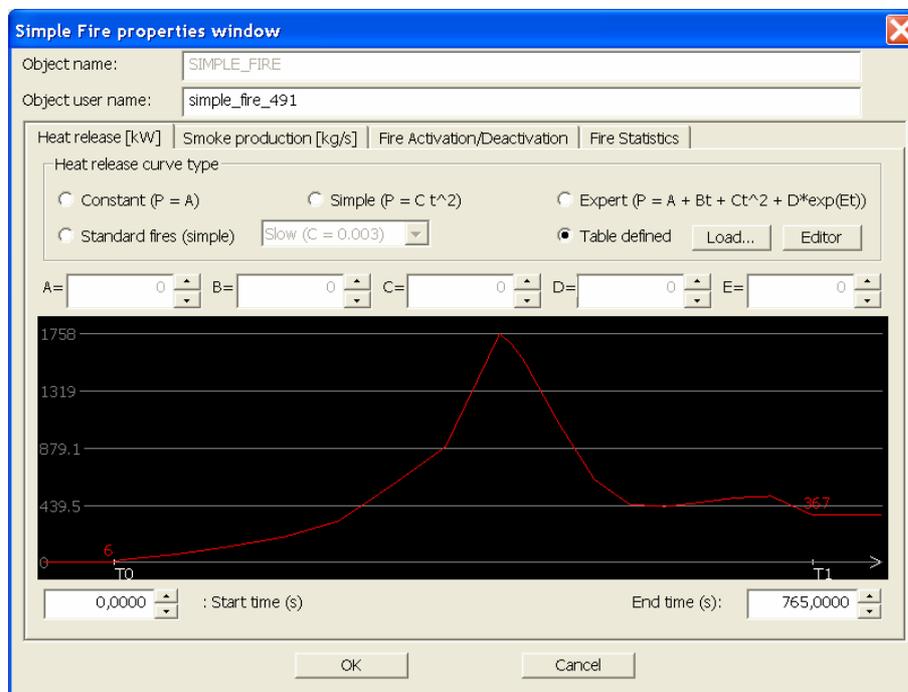


FIGURA 7.17 – Curva HRR do objeto *simple fire*: estante.

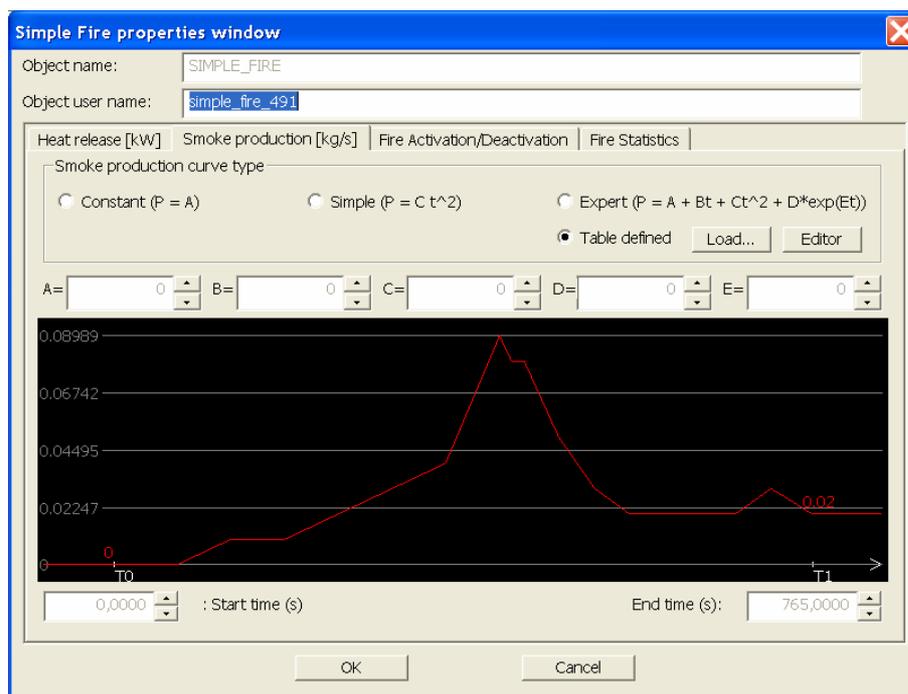


FIGURA 7.18 – Curva SRR do objeto *simple fire*: estante.

Sofá: *simple fire 2*

TABELA 7.4 - Informações do sofá.

Dado	Descrição
Material	madeira
HRR	dado do <i>National Institute of Standards and Technology</i> (NIST)* (Figura 7.19).
SRR	dados obtidos a partir da Equação 7.3* (Figura 7.20).

* As tabelas referentes a este assunto são apresentados no Anexo B.

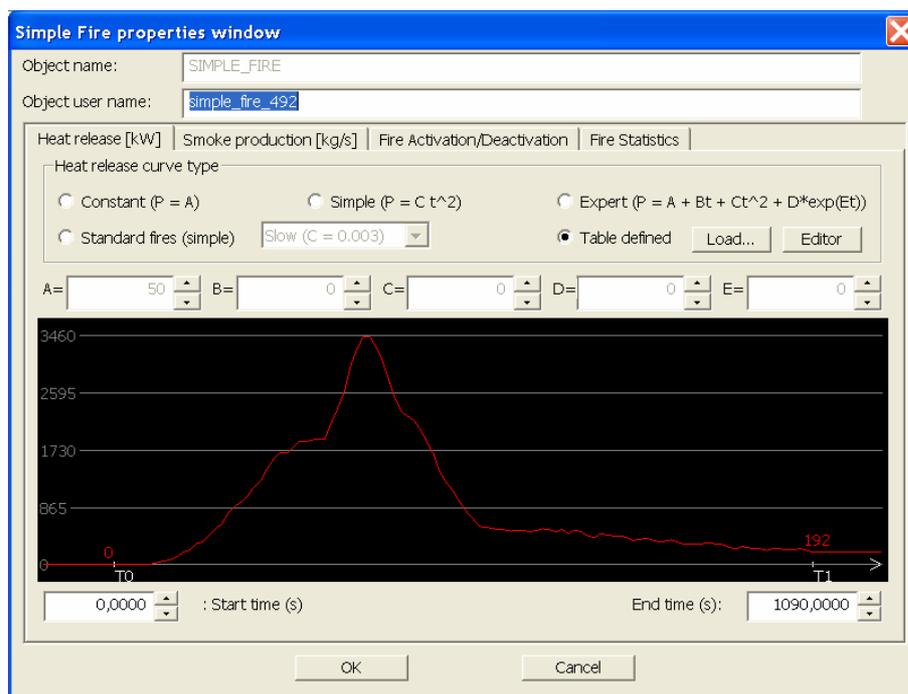


FIGURA 7.19 – Curva HRR do objeto *simple fire*: sofá.

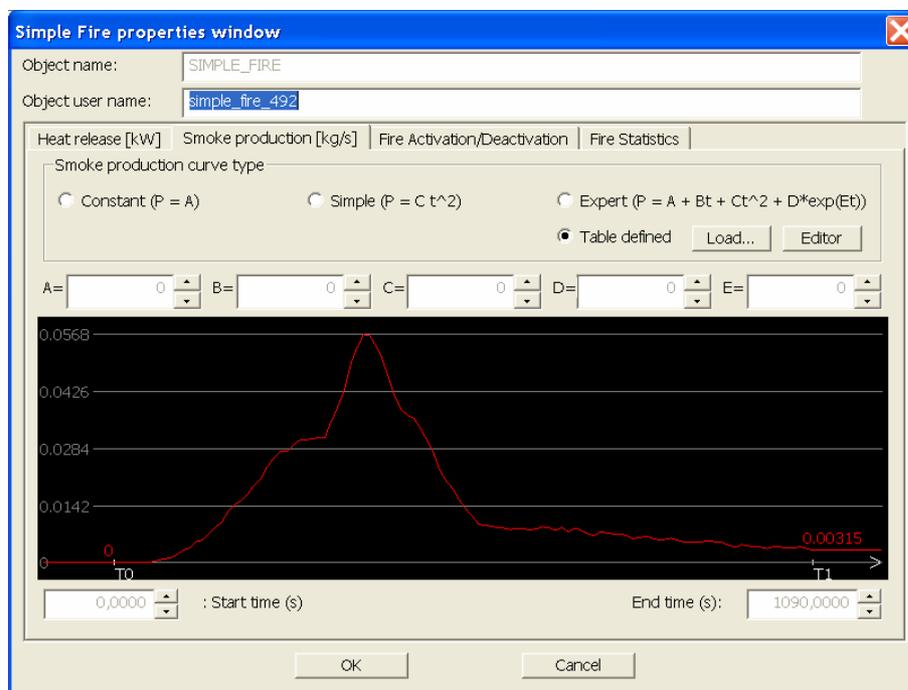


FIGURA 7.20 – Curva SRR do objeto *simple fire*: sofá.

Quanto à ignição de cada objeto, foi necessário determinar o *status* de cada um quanto à ativação ou desativação, e mecanismo de ignição (tempo ou célula de gatilho).

Para a estante, determinou-se a ignição em função do tempo, a ocorrer no intervalo entre 0 e 765 segundos, como mostrado na Figura 7.21 (PANNONI, 2006). Pode-se notar que esse tempo refere-se ao tempo máximo aplicado na curva HRR (Figuras 7.17 e 7.18).

Para o sofá, essa determinação também se apresentou em função do tempo, com início do processo de combustão a 60 segundos (Figura 7.22). Este valor foi determinado por EWER (2007), na Universidade de Greenwich, Inglaterra, em atividade de suporte técnico do *software* e colaboração a este trabalho.

“... a única mudança pertinente é quanto ao tempo de ignição da segunda carga de fogo –o sofá, ao qual deve ser fixado em 60 segundos. Este tempo provavelmente ainda é pouco, mas pelo menos determinará o começo do fogo no sofá” (EWER, 2007).

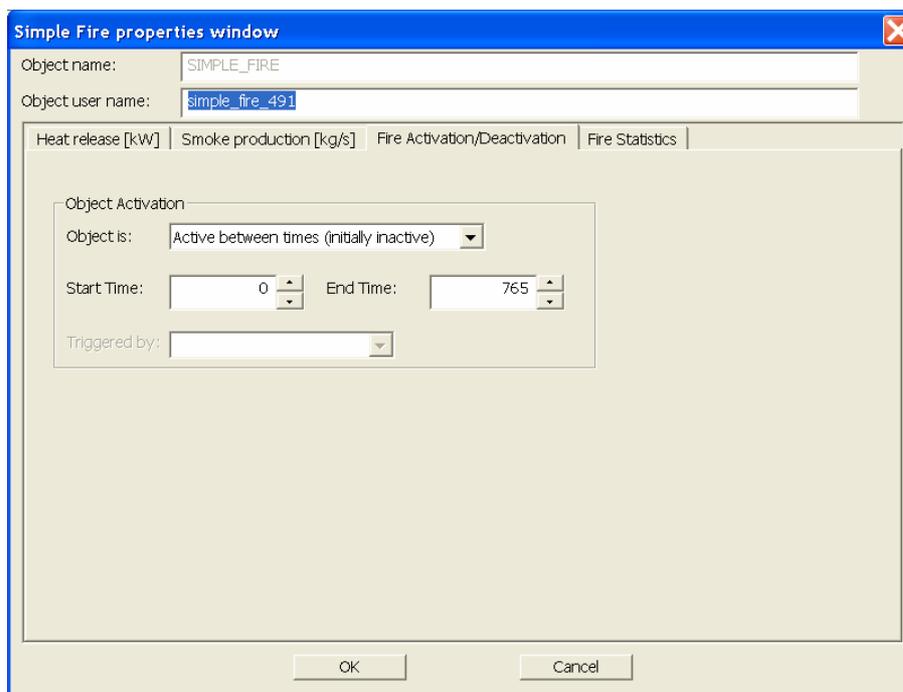


FIGURA 7.21 – Ativação da ignição no objeto *simple fire*: estante.

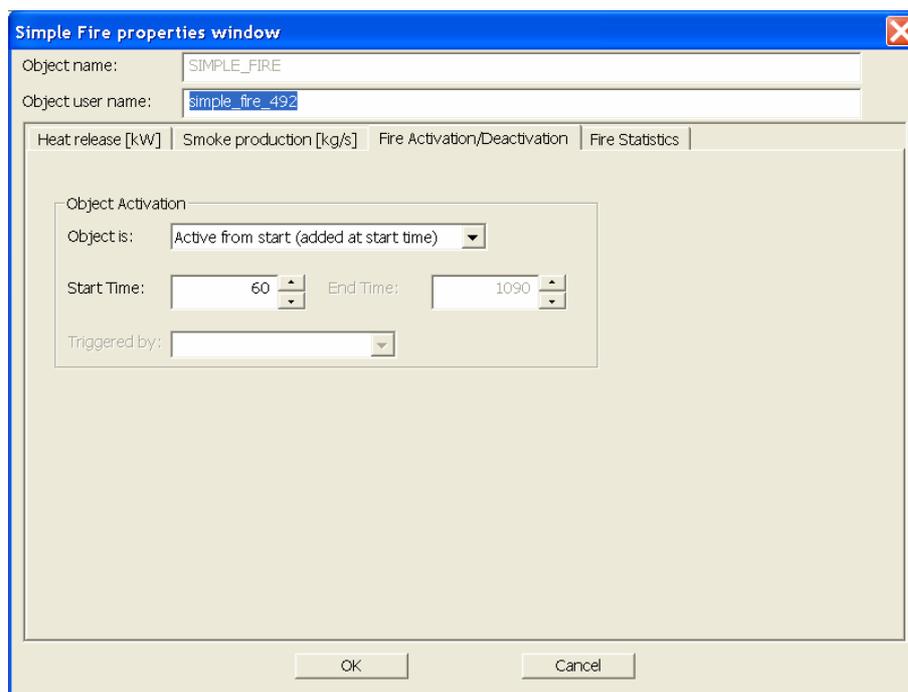


FIGURA 7.22 – Ativação da ignição no objeto *simple fire*: sofá.

7.3.3 Simulação da geometria

O próximo passo representa a definição da malha de elementos finitos criada pelo modelamento CFD.

A remoção dos blocos sólidos, informado no item 7.3.2.2, excluiu todas as células associadas a estes elementos e substituiu o limite ar/sólido por uma condição adiabática¹⁹. Nessa caso, ocorre a desestruturação da malha, em que se deve adotar o modelo de radiação *Multiple Ray*, apresentado anteriormente, já que o modelo de radiação contribui para a regularização dessa situação (EWER, 2007).

Definido esse procedimento, procedeu-se à criação da malha. O *software* possui um sistema automático de geração de malhas em função da característica da geometria. Normalmente só é indicado alterar as configurações resultantes se o usuário apresentar

¹⁹ Condição adiabática se refere ao processo de transformação termodinâmica na qual não há trocas de calor com o ambiente, apesar de haver variação térmica.

familiaridade ao conhecimento de elementos finitos e suas atribuições ao estudo de incêndio.

Logo que é iniciada a geração de malha na barra de ferramentas *Run*, é apresentado o quadro de seleção do tipo de geometria a que a simulação se refere. Caso a opção indicada pelo *software* não esteja coerente, o usuário é capaz de efetuar a opção mais adequada. Para o modelo proposto, selecionou-se a geometria *Multiple Storey Building Geometry* (Figura 7.23).

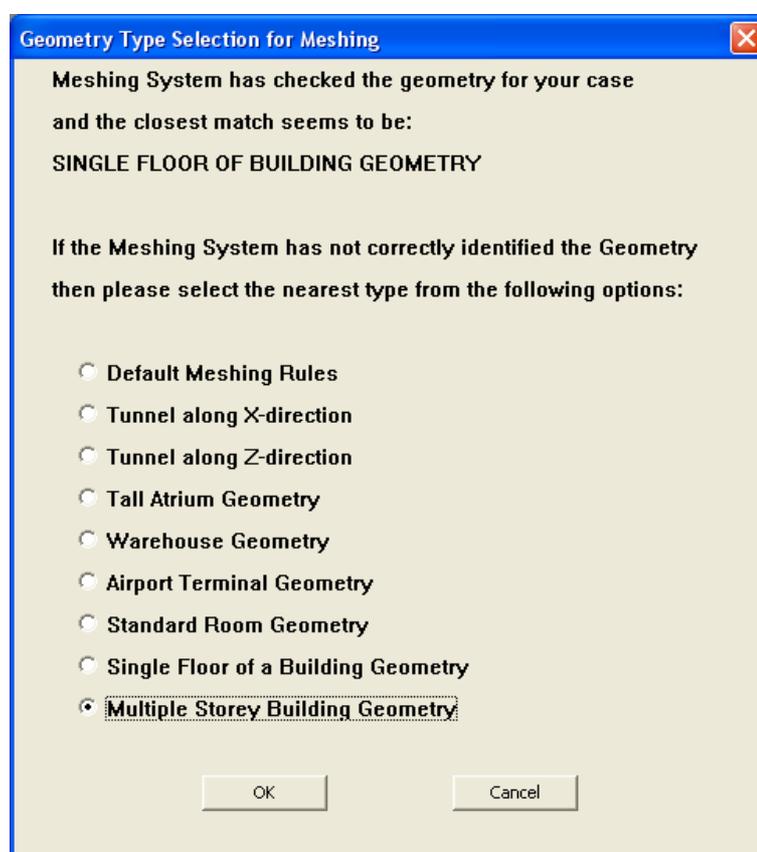


FIGURA 7.23 – Quadro de seleção de geometria para criação da malha.

Na tela de ferramentas de especificações da malha ainda é possível realizar algumas alterações, no intuito de refinar ou simplificar a malha da geometria, como visto na Figura 7.24. Nesse modelo, aceitou-se as condições indicadas pelo *software*.

A interface do *Smartfire Case Specification Environment* retorna à tela e a ferramenta *Run CFD Engine* foi selecionada para que a simulação se iniciasse.

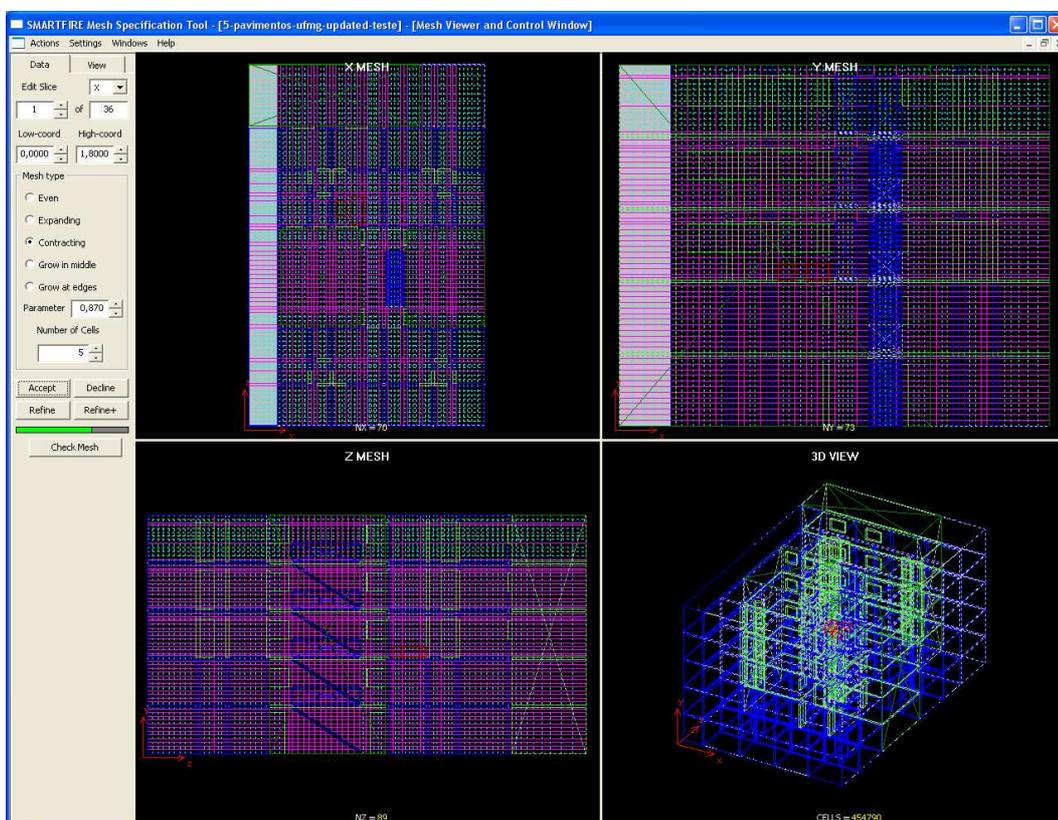


FIGURA 7.24 – Tela de ferramentas de especificações da malha.

Em função da opção de remoção dos objetos sólidos, foi solicitada confirmação desta ação (Figura 7.25).

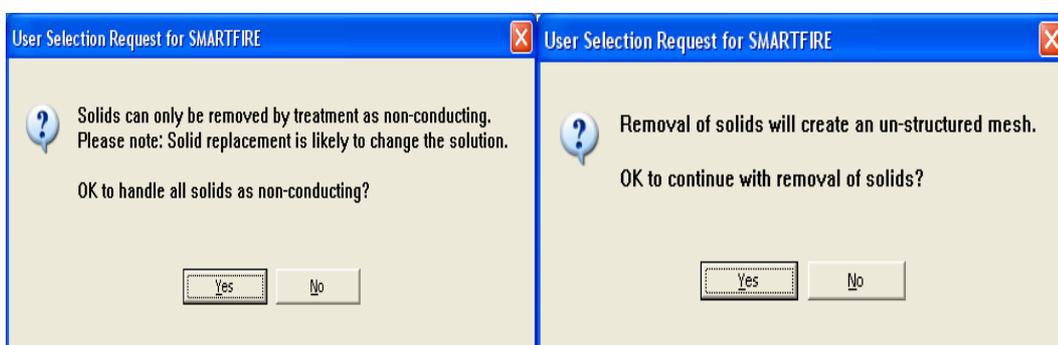


FIGURA 7.25 – Solicitação de confirmação da remoção de objetos sólidos.

Confirmada a remoção dos sólidos, o *CFD Engine* é disponibilizado e as definições acerca da captura de dados e imagens da simulação são contempladas nesse momento (Figura 7.26).

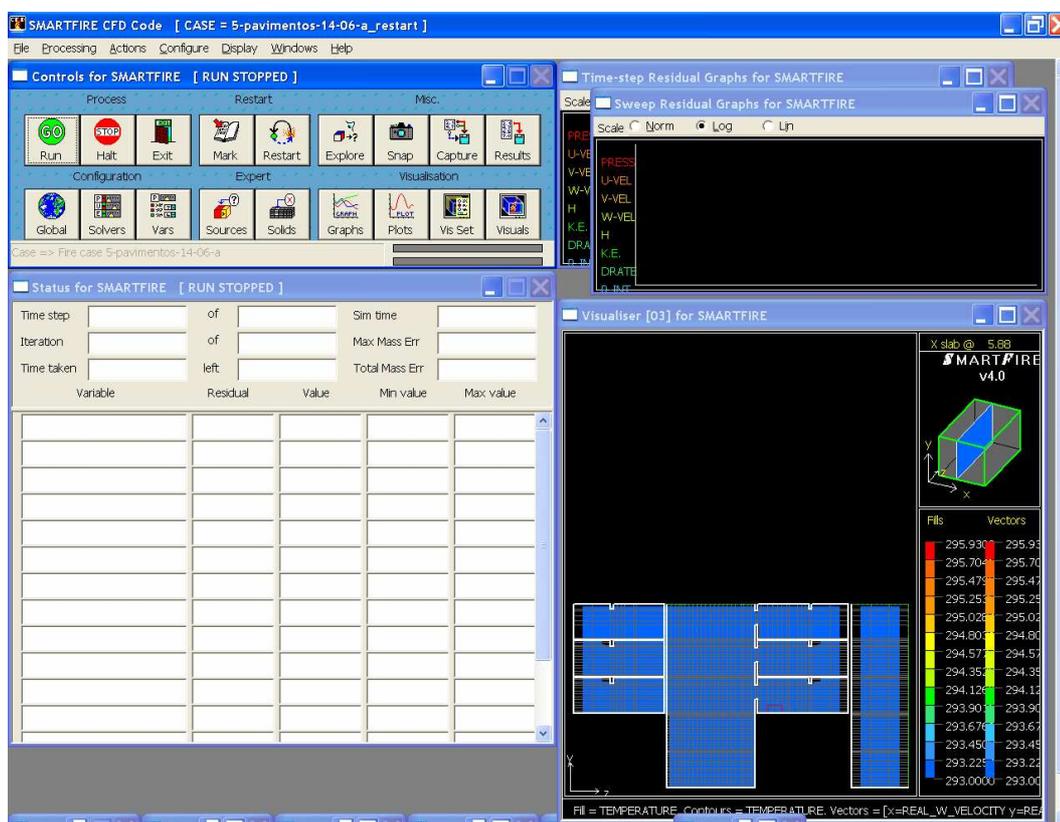


FIGURA 7.26 – Interface do *CFD Engine* e definição da área a ser simulada.

Os quadros das Figuras 7.25 e 7.26 apresentam, respectivamente, as configurações de captura de dados e das visualizações a serem geradas.

O resultado da combustão dessa simulação gera dados dos perigos do incêndio que serão utilizados para realizar a simulação pertinente ao processo de evacuação do edifício, no *buildingEXODUS*. Para tanto, a opção de geração de arquivos *Zone* foi ativada.

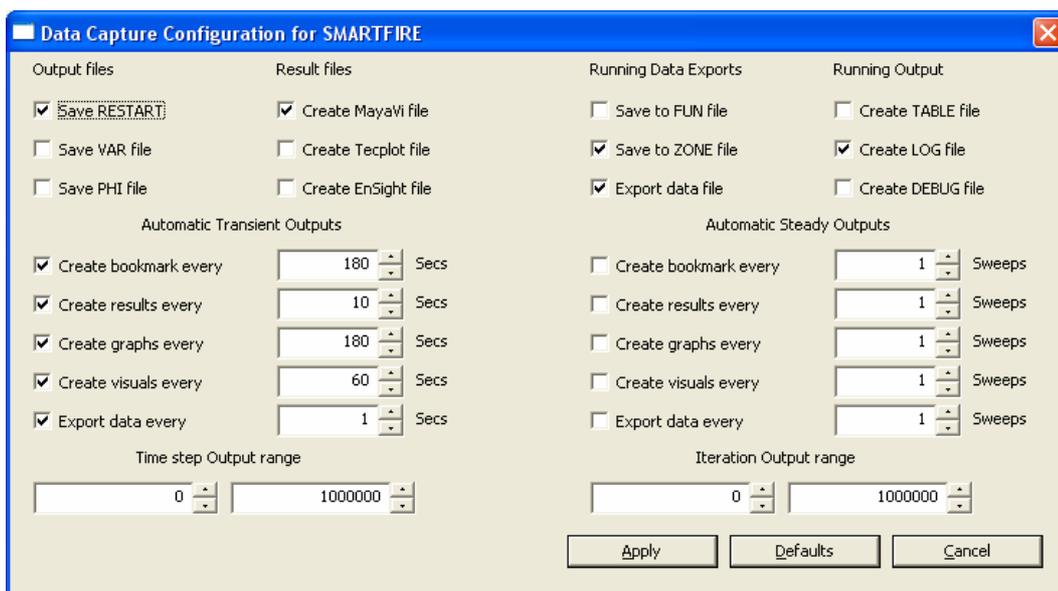


FIGURA 7.27 – Configurações de captura de dados.

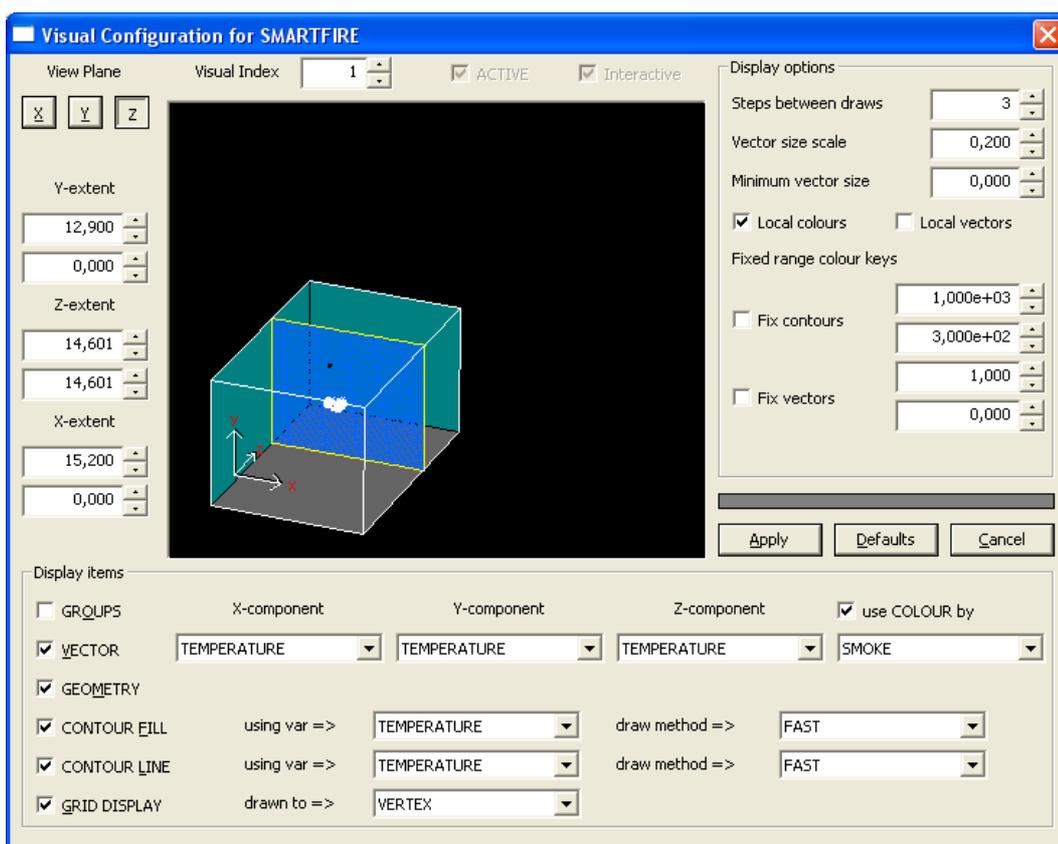


FIGURA 7.28 – Configurações de visualizações.

No *CFD Engine* os objetos sólidos já foram excluídos da análise. Dessa forma, percebe-se a ausência do primeiro e segundo pavimentos na geometria, assim como dos blocos externos criados, mostrados na Figura 7.29.

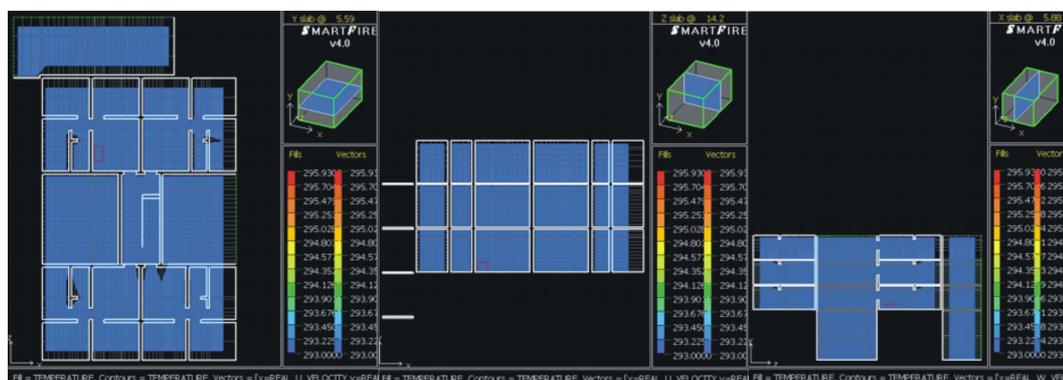


FIGURA 7.29 – Geometria simulada no *CFD Engine*.

7.3.4 Resultados auferidos

A simulação representou 30 minutos de incêndio (1800 segundos), executada num período de 105h 09m 51s. Os dados de temperaturas nos ambientes e de geração e movimentação da fumaça ao longo do edifício foram coletados a cada 180 segundos.

Os dados do incêndio formulados pelo *software Smartfire* podem ser coletados através de tabelas ou visualizações. Os primeiros são apresentados em arquivos independentes para cada ciclo da simulação. Dessa forma, para que haja um resultado de um determinado período de tempo, vários arquivos são considerados. Um detalhe importante é que estes não geram gráficos automaticamente, sendo necessário o compartilhamento de dados a outros programas, como por exemplo, o *Excel*, usado neste trabalho.

7.3.4.1 Temperatura

A temperatura do incêndio foi obtida no compartimento de fogo ao longo da simulação em dois pontos distintos: a 50 cm de altura da estante e a 1,75 cm de altura do piso, demonstrados a seguir. Nota-se, em ambos os gráficos, a formação bem definida de modelos de curva de incêndio natural.

Inicialmente foram coletadas temperaturas a 50 cm acima do objeto *simple fire 1*, representado pela estante. Como pode ser percebido na Figura 7.30, as temperaturas são extremamente elevadas, com o valor máximo de 2025K (1752°C). Na fase de decaimento, após 1000 segundos é possível perceber uma queda da velocidade de resfriamento em função do calor transferido por radiação térmica, na proximidade do objeto combustível.

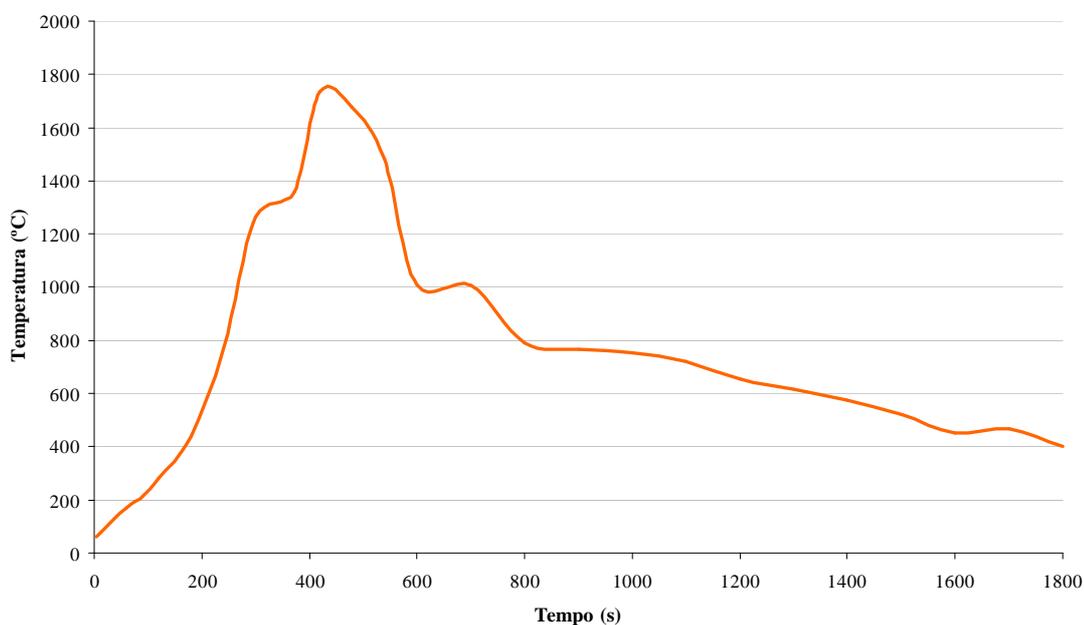


FIGURA 7.30 – Temperaturas de incêndio a 50 cm do *simple fire 1* (estante), em função do tempo.

Esta curva foi confirmada por EWER (2007), que apresentou o seguinte depoimento:

“Eu conferi os resultados da simulação e notei que a máxima temperatura no compartimento se apresenta em torno de 2000K (1752°C) ao redor dos 400 segundos. Essas temperaturas próximas do fogo são muito altas porque os volumes dos objetos de queima são muito pequenos, mas as demais temperaturas no compartimento parecem razoáveis” EWER (2007).

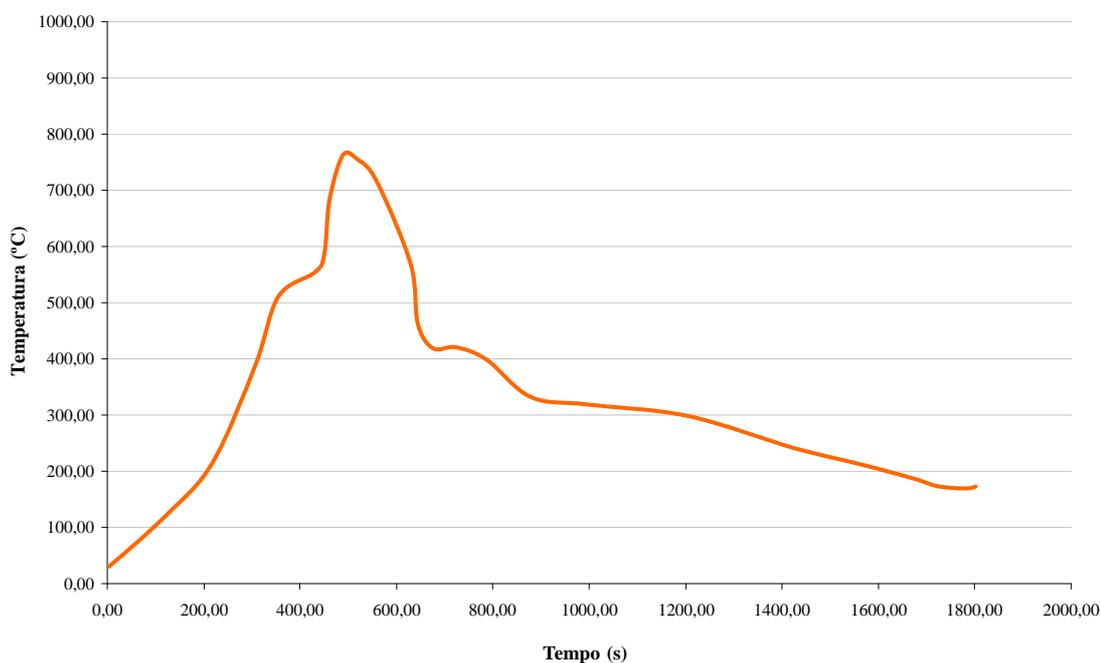


FIGURA 7.31 – Temperaturas de incêndio no compartimento a 1,75 m do piso, em função do tempo.

A Figura 7.31 representa a temperatura do compartimento de incêndio com temperatura máxima de 779,8 °C a 1,75 m de altura. Essa medida representa um valor próximo ao padrão de altura do homem adulto brasileiro, podendo-se inferir as temperaturas a que um indivíduo estaria sujeito em uma situação de incêndio se permanecesse na posição vertical.

Aos arquivos de imagem, gerados a partir das configurações de captura de dados no CFD *engine*, podem-se realizar modificações de planos e interações dentro do período de tempo estipulado, de forma a dinamizar a análise dos resultados.

A Figura 7.32 mostra a geometria tridimensional da edificação no *Smartfire Data View*, interface de visualização desse software, antes da ocorrência do incêndio. A opacidade dos objetos de vedação foi definida em 10%, de maneira que toda a edificação pudesse ser percebida. Os blocos externos inseridos na geometria podem ser observados na cor cinza à direita da edificação. No entanto, estes não interagem na simulação.

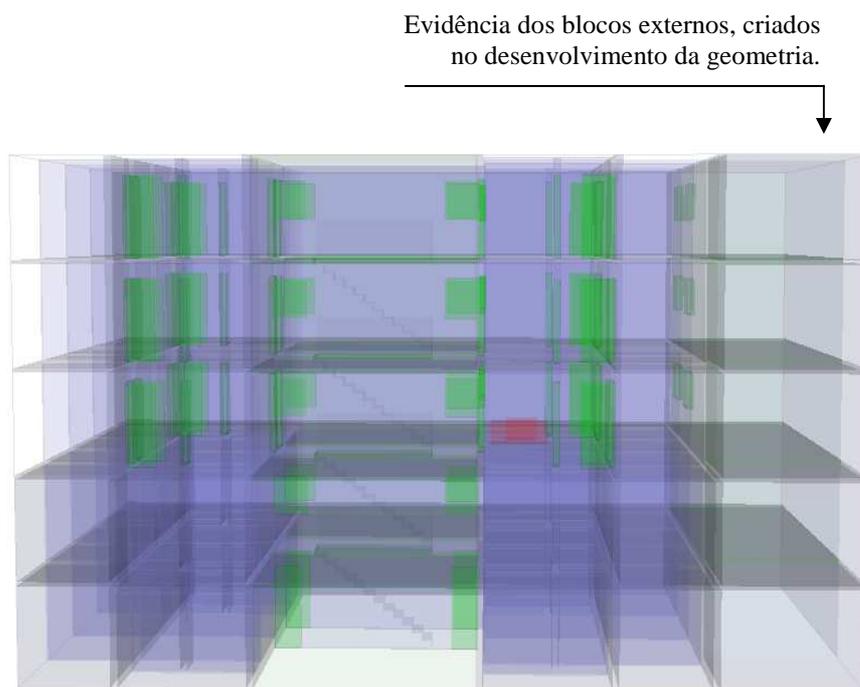


FIGURA 7.32 – Geometria do edifício antes da ocorrência do incêndio.

No *Smartfire Case Specification Environment* a porta principal do apartamento do incêndio foi programada para abrir (ser excluída) aos 90 segundos de simulação. Nesse momento, é demonstrada a temperatura a partir de uma sessão longitudinal ao edifício, como verificado na Figura 7.33. Nota-se que a temperatura imediatamente acima da estante permanece próxima de 500K (227°C) e que embora a porta principal do apartamento tivesse sido programada para ser retirada neste período, não foi possível notar os efeitos desse evento na seção apresentada.

A escala de temperatura adotada foi entre 293K e 973K, sendo 20°C e 700°C, respectivamente.

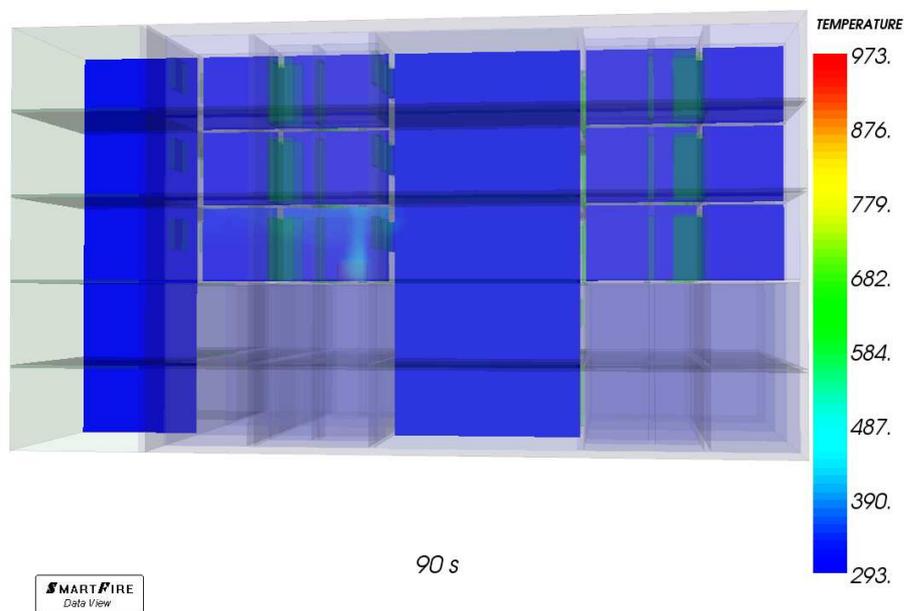


FIGURA 7.33 – Graduação da temperatura em seção pela estante, em 90 segundos.

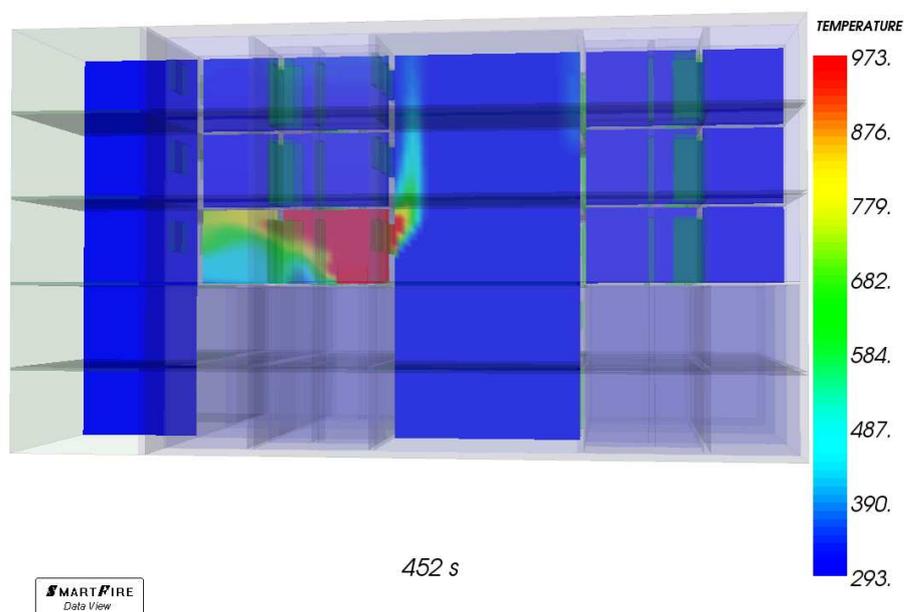


FIGURA 7.34 – Pico da temperatura no apartamento de incêndio (7,5 minutos) – seção longitudinal.

Como pode ser percebido na Figura 7.34, a temperatura chega ao pico em 7,5 minutos de incêndio (452 segundos). É possível perceber o crescimento da pluma e da temperatura no sentido das aberturas do compartimento, evidenciando o comportamento de incêndio estudado no Capítulo 3. Da mesma forma, nota-se a propagação do calor pela janela da sala do compartimento de incêndio até a fachada, em fluxo ascendente, na face externa entre os blocos do edifício. Após 8 minutos, passa-se para a fase do decaimento do fogo. Este processo é percebido até próximo dos 900 segundos, quando ocorre um pequeno aumento da temperatura, evidenciado pelo aumento da ventilação, causado pelas aberturas, e um novo decréscimo subsequente dessa.

A partir de uma seção transversal, foi possível perceber a temperatura nos dois objetos de queima, estante e *sofá*. A Figura 7.35 apresenta a imagem do incêndio em 90 segundos. Nota-se a pluma do incêndio alinhada à parede esquerda do material combustível, sem ainda se evidenciar o processo do *ceiling jet*.

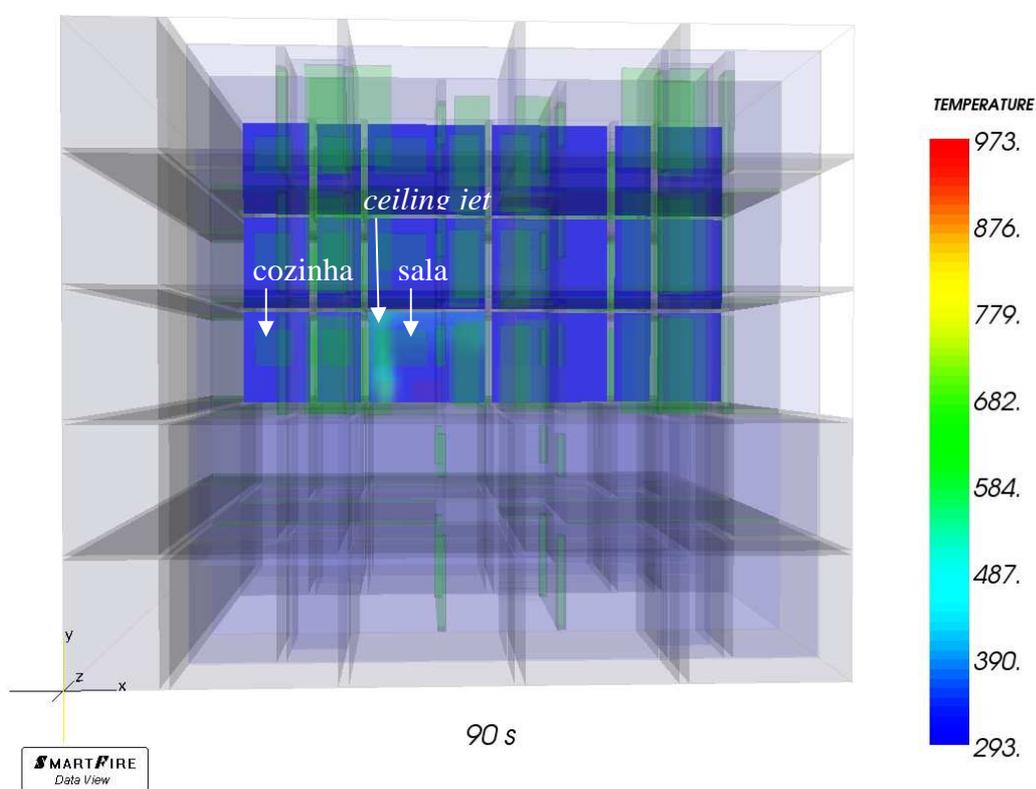


FIGURA 7.35 – Graduação da temperatura em seção pela estante e sofá, em 90 segundos.

Nesta imagem fica evidente o efeito *ceiling jet* e a propagação de calor por convecção e condução pela parede da sala, imediatamente posterior à estante. Aqui também se identifica a temperatura próxima aos 500K.

Próximo dos 5 minutos percebe-se a formação das camadas superior e inferior na sala (Figura 7.36). Neste momento, notas-se o processo de combustão nos dois elementos – estante e sofá. Na região da cozinha, a temperatura se mantém próxima de 673K (400°C), com a camada superior bem evidenciada.

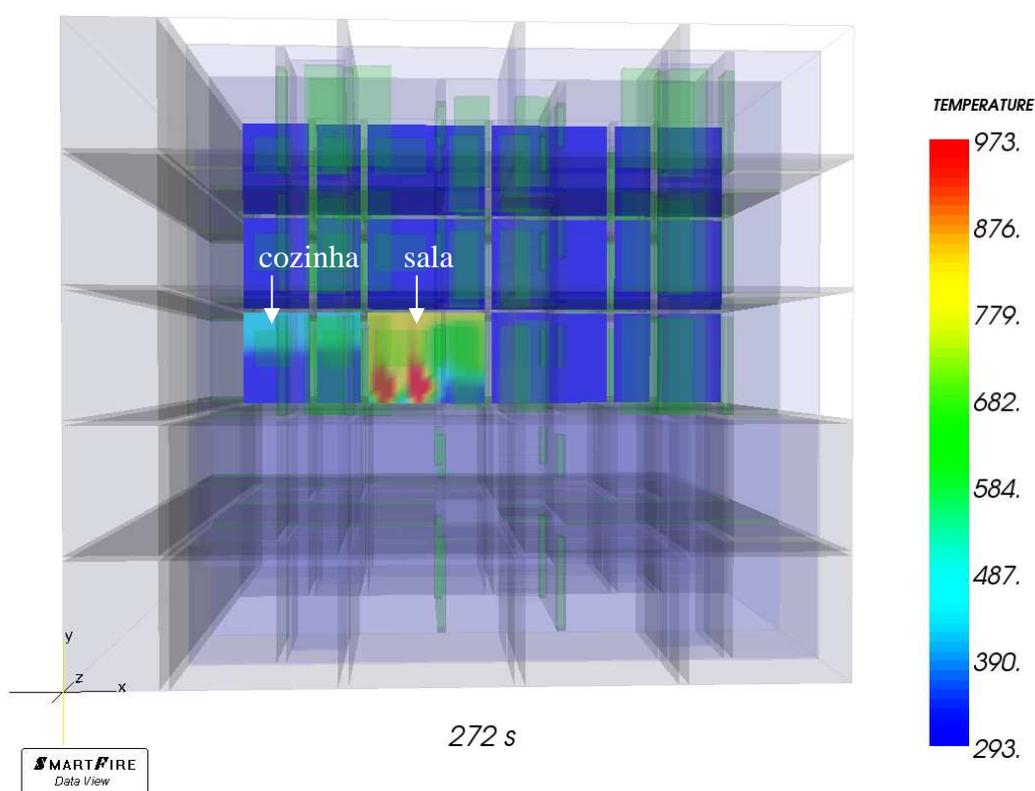


FIGURA 7.36 – Graduação da temperatura em seção pela estante e sofá, aos 272 segundos.

O *flashover* ocorreu próximo aos 5 minutos de incêndio, evidenciando uma situação de risco à população ocupante. Semelhante ao identificado na Figura 7.34, o pico da temperatura se deu aos exatos 7,5 minutos (Figura 7.37).

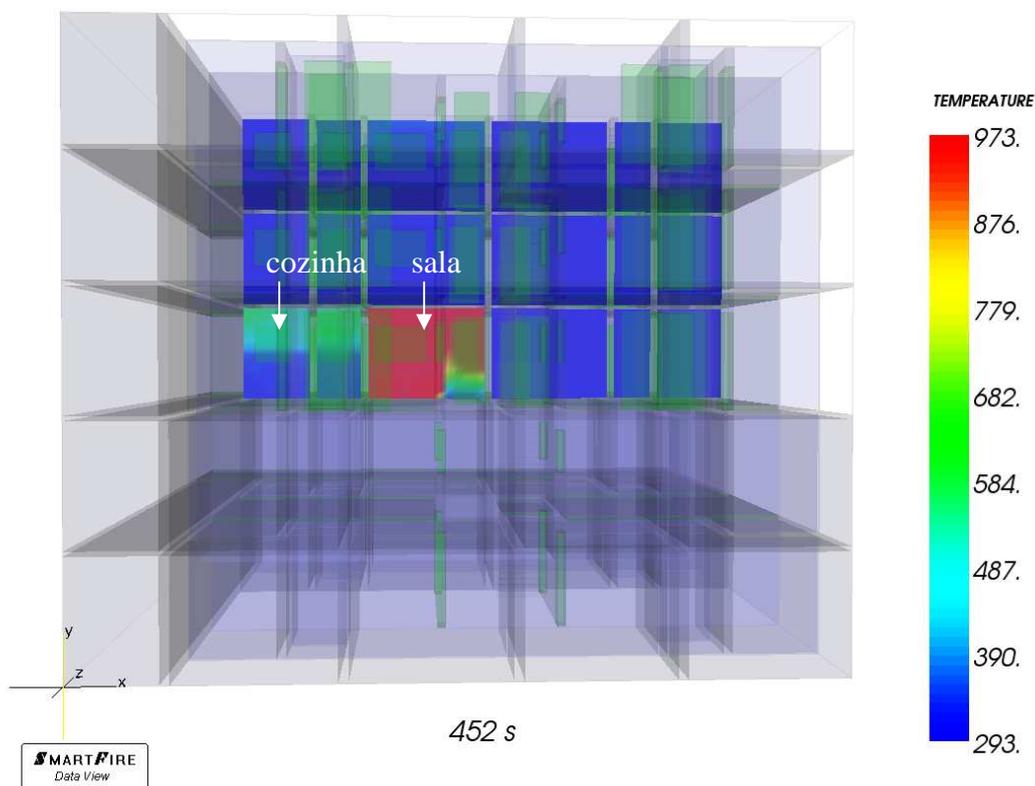


FIGURA 7.37 – Pico da temperatura no apartamento de incêndio (7,5 minutos) – seção transversal.

Dessa maneira, percebe-se as lajes e as paredes do edifício resistentes à propagação da chama e do calor, o que pôde ser verificado nas figuras apresentadas acima.

O *Smartfire Data View* permite ainda análises da velocidade do fluxo de calor na edificação, referente à propagação do calor por convecção e radiação térmicas. As Figuras 7.38 e 7.39 apresentam esses vetores em 90s e 1802s.

Em 90 segundos, nota-se claramente a propagação do calor pelas aberturas das janelas até o topo da edificação, em movimento ascendente. A concentração de vetores pode ser percebida nas localizações da janela e porta principal do apartamento (Figura 7.38).

A Figura 7.39 mostra o aumento da concentração de vetores para meia hora de incêndio (1800s). Nessa imagem, é possível perceber o calor liberado pelas janelas do apartamento de incêndio e da caixa de escada.

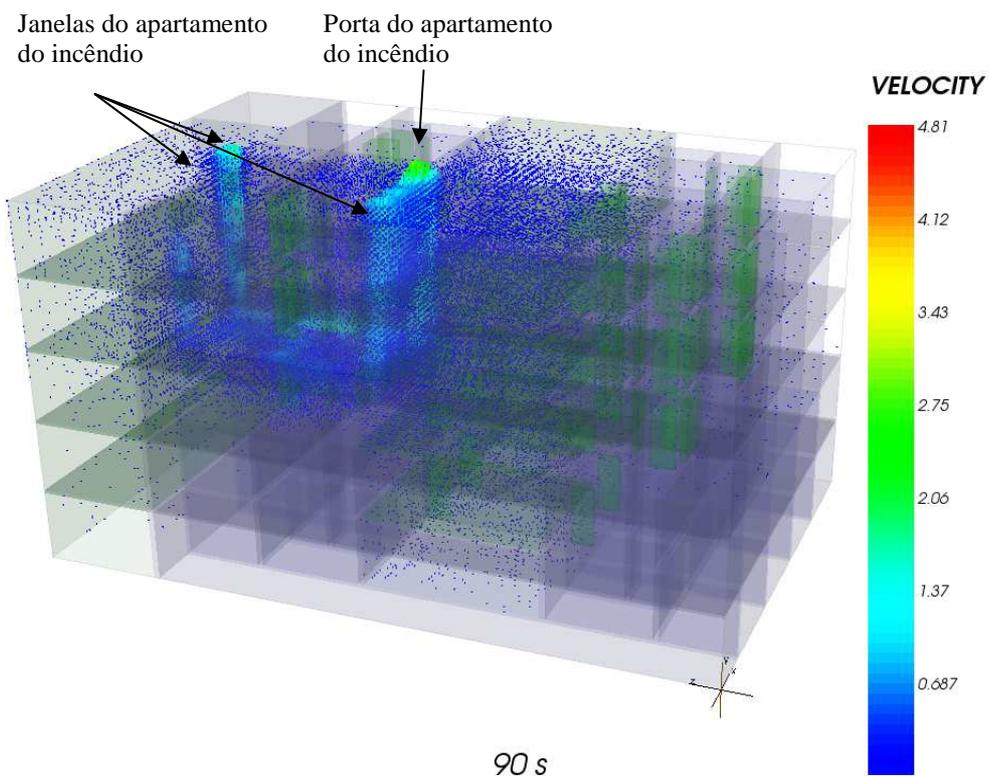


FIGURA 7.38 – Velocidade dos vetores de temperatura em 90 segundos.

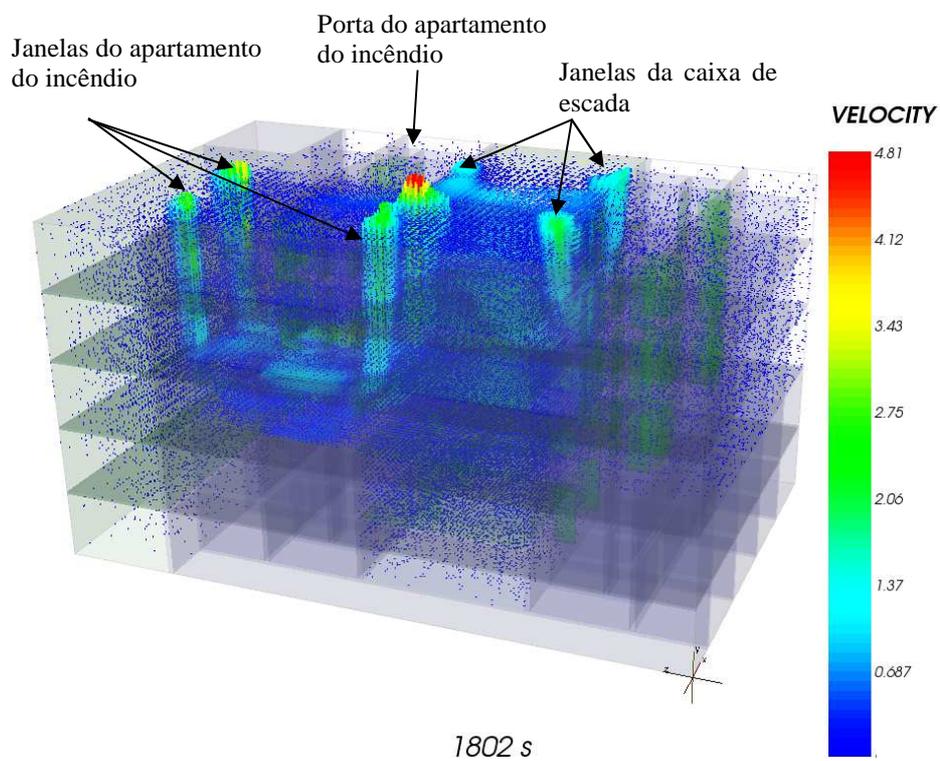


FIGURA 7.39 – Velocidade dos vetores de temperatura em 1802 segundos.

7.3.4.2 Fumaça

No presente trabalho, a análise da fumaça no *Smartfire* deteve-se apenas na avaliação da sua temperatura e no seu comportamento, apresentados por gráficos e imagens, respectivamente. A fumaça é apresentada pelos gráficos de temperatura e imagens que demonstram seu comportamento no edifício. Os produtos da combustão contidos na fumaça foram criados em arquivo para ser lido pelo software *buildingEXODUS*.

Os resultados de temperatura foram aferidos da fumaça produzida pelos materiais combustíveis durante os 1800s de simulação, com obtenção de resultados a cada 180 segundos. A Figura 3.40 apresenta as temperaturas da fumaça produzida pela estante e sofá.

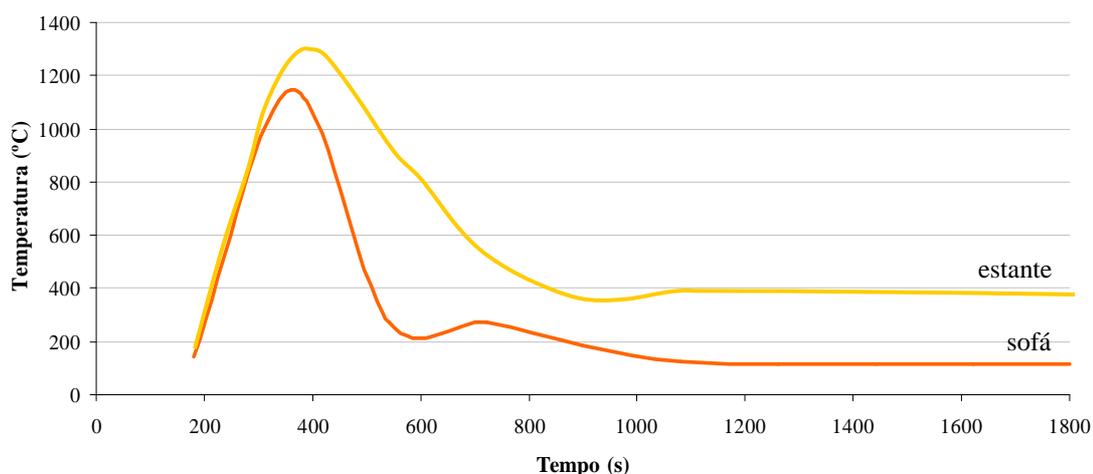


FIGURA 7.40 – Temperatura da fumaça produzida pela estante e sofá.

Para ilustrar o efeito da abertura da porta principal do apartamento em 90s de simulação, o modelo de fumaça se apresentou mais eficiente que o de temperatura do incêndio, visto no item 7.3.4.3. A figura 7.41 apresenta a seqüência de três momentos do incêndio, sendo o primeiro relativo ao período anterior à abertura da porta, representado em 70 segundos; o segundo para o momento da abertura, aos 90 segundos; e o terceiro, em instantes seguinte à abertura, em 102 segundos.

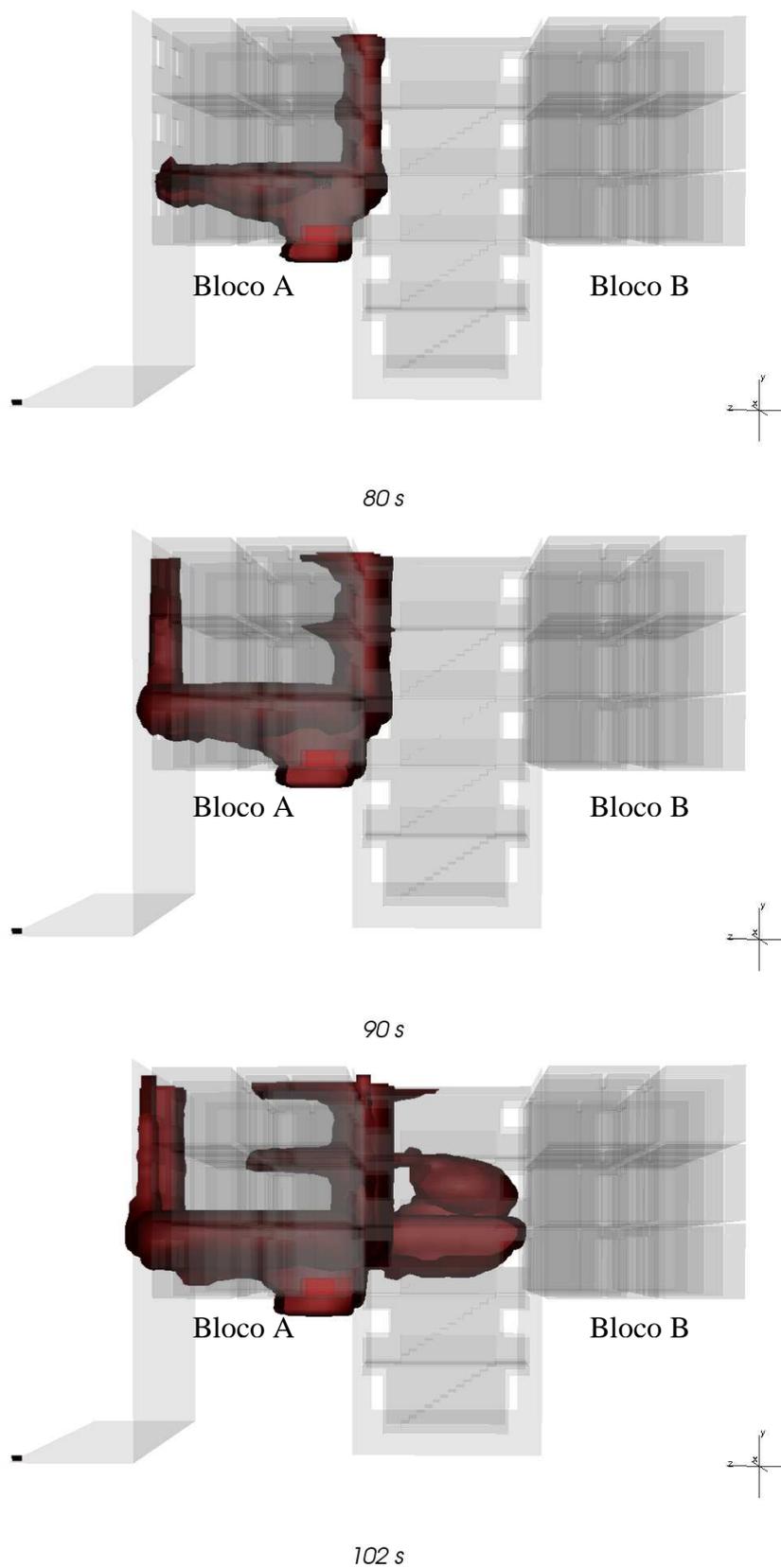


FIGURA 7.41 – Propagação da fumaça em 70s, 90, e 102s.

Com a abertura da porta, o processo de combustão foi alimentado pelo aumento considerável no volume de oxigênio no ambiente. Isso evidenciou o processo de crescimento da pluma e do *ceiling jet*, propagando a fumaça para fora do compartimento de incêndio. Nota-se que mesmo antes da abertura da porta, a fumaça já se alastrava para os pavimentos superiores através da janela da sala (compartimento do incêndio).

Em 5 minutos de incêndio a fumaça atingiu todos os apartamentos do quarto e quinto pisos, alinhados ao apartamento incendiado. É possível perceber que o acesso da fumaça pelos apartamentos se deu principalmente pelas janelas, consideradas abertas nesses apartamentos. No entanto, o Bloco B permaneceu isento do efeito da fumaça até esse momento.

A Figura 7.42 mostra a primeira influência do incêndio no Bloco B, que ocorreu em torno de 9 minutos – momento de maior pico de temperatura do incêndio. A penetração da fumaça nesse bloco é explicada pelas aberturas de 10 cm nas portas principais, consideradas na elaboração da geometria. As janelas do Bloco B, como abordado no item 7.3.1.1, não foram modeladas.

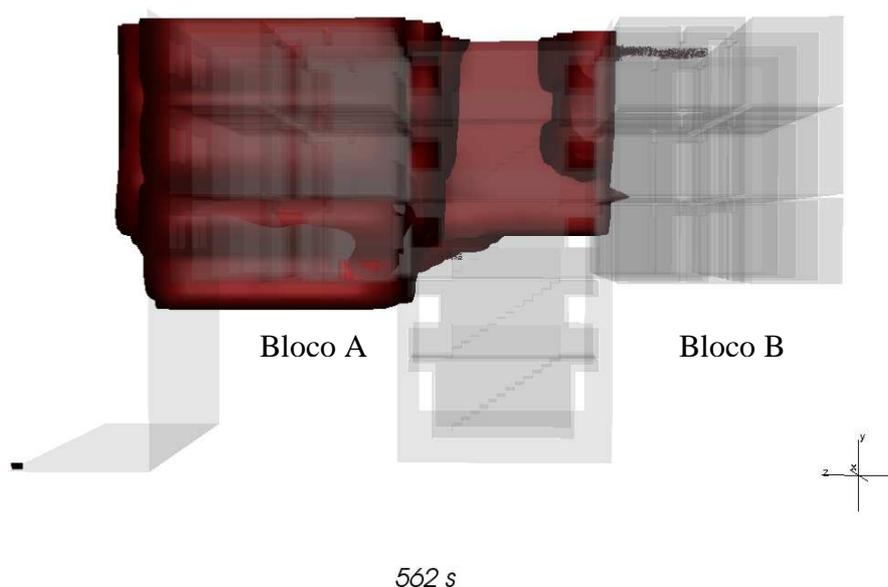


FIGURA 7.42 – Primeiro indício de fumaça no Bloco B.

A figura 7.43 apresenta, em 30 minutos, o comportamento final da fumaça neste período da simulação.

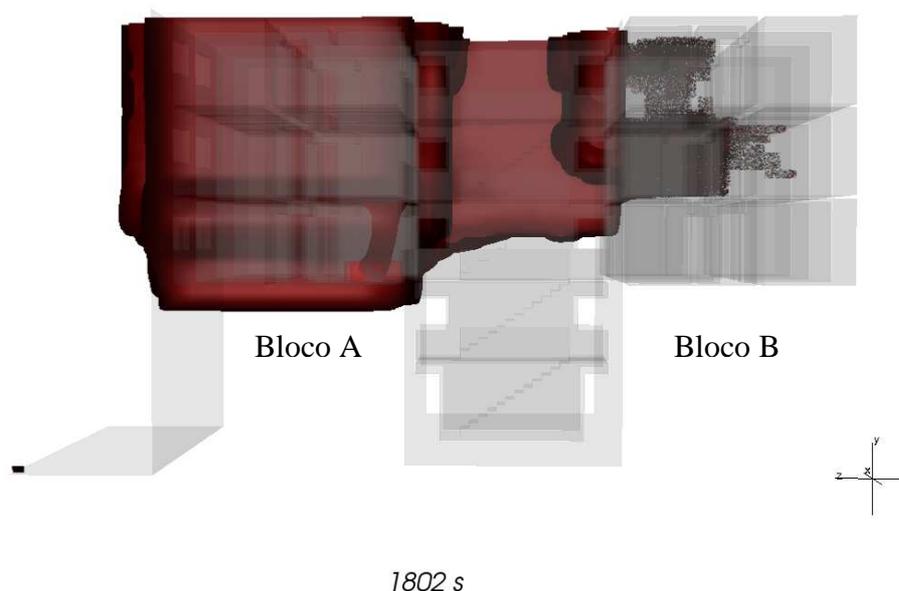


FIGURA 7.43 – Indício de fumaça no Bloco B em 30min.

Para o objetivo do presente trabalho, os resultados apresentados pelo *software Smartfire* se fazem suficientes.

7.4 *BuildingEXODUS*

7.4.1 Ferramentas e conceitos aplicados

O *EXODUS* é um *software* designado a simular a evacuação e movimentação de um grande número de indivíduos em uma estrutura complexa e, assim como o *Smartfire*, foi desenvolvido pelo Grupo de Engenharia de Segurança Contra Incêndio (*Fire Safety Engineering Group* - FSEG) da Universidade de Greenwich, na Inglaterra. O *EXODUS* consiste de um grupo de modelos de análise de evacuação, designados a tipologias bem distintas como o *airEXODUS*, para estudos em aeronaves; o *maritimeEXODUS*, para

estudos em embarcações marítimas; e o *buildingEXODUS*, para avaliações em edifícios, o qual foi utilizado no presente trabalho.

O *buildingEXODUS* é designado para aplicações em ambientes construídos e adequado para estudos em supermercados, hospitais, cinemas, terminais de aeroportos, edifícios de pequeno e grande porte, escolas, etc. O *software* pode ser usado para demonstrar, conforme os códigos de edificação, o processo de evacuação dos ocupantes e averiguar a eficiência da movimentação da população dentro dessas estruturas (GALEA, 2004).

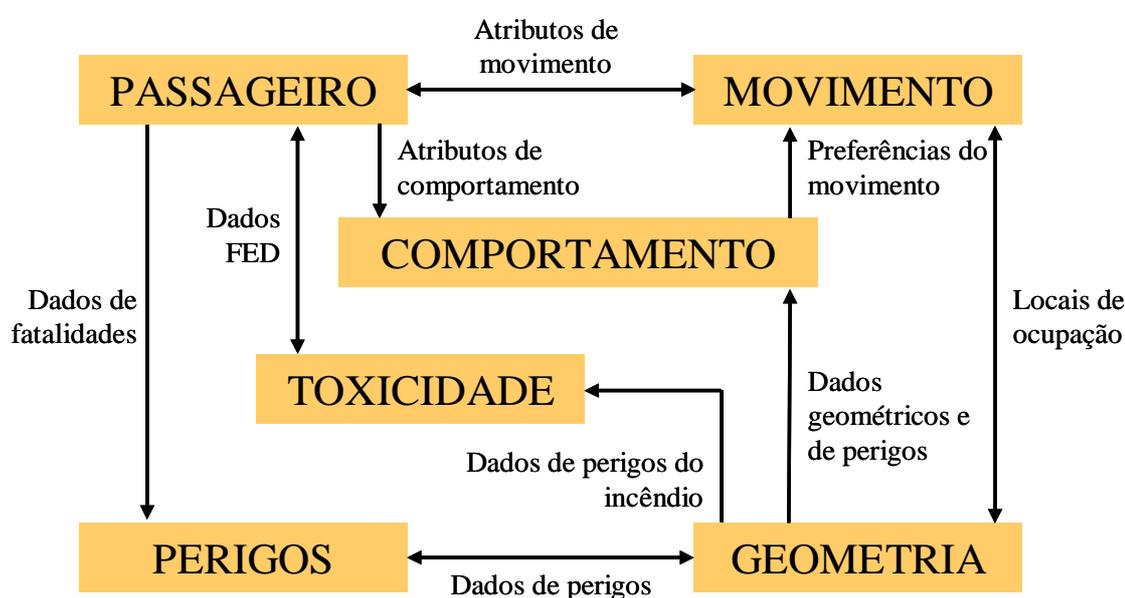


FIGURA 7.44 - Interação dos sub-modelos do *buildingEXODUS*.

FONTE: GALEA (2004).

O *buildingEXODUS* considera a interação pessoa-pessoa, pessoa-incêndio e pessoa-estrutura. O modelo localiza a trajetória de cada indivíduo, como eles fazem seu caminho de fuga, ou são vencidos pelos perigos do incêndio, tais como o calor, a fumaça e os gases tóxicos. O *EXODUS* foi escrito na linguagem C++, com a utilização de técnicas orientadas a objetos e regras básicas para controle da simulação. Assim, o comportamento e o movimento de cada indivíduo é determinado por uma configuração heurística ou de regras. Para uma flexibilidade adicional, essas regras foram categorizadas dentro de cinco sub-modelos de interação: *Occupant*, *Movement*, *Behaviour*, *Toxicity* e *Hazard* (ver Figura 7.44). Esses sub-modelos operam sobre uma

região do espaço definida pela geometria (*Geometry*) do compartimento (GALEA, 2004, pg. 2.1).

A *Geometry* do compartimento ou ambiente pode ser definida através dos arquivos da biblioteca; construída interativamente através das ferramentas oferecidas pelo *software* ou importadas por arquivos DXF.

O sub-modelo *Movement* controla os movimentos físicos de cada ocupante a partir das posições de origem destes até o local mais adequado, ou supervisionam o período de espera se não houver uma saída imediata para deslocamento. O movimento pode envolver certos comportamentos como alcance, ponderação ou outras ações evasivas.

O sub-modelo *Behaviour* determina uma resposta individual para a situação prevalente baseada nos atributos de cada indivíduo (masculino ou feminino), e transfere esta decisão para o sub-modelo *Movement*. O sub-modelo *Behaviour* funciona sobre os níveis local e global. O comportamento local determina uma resposta individual (masculina ou feminina) da situação local, enquanto que o comportamento global representa uma estratégia ampla empregada para o indivíduo. Esta pode incluir comportamentos como saída através da porta de serviço mais próxima ou evacuação através da saída mais familiar.

O sub-modelo *Occupant* descreve um indivíduo como uma coleção de atributos e variáveis definidos, tais como gênero, idade, velocidade rápida de fuga, velocidade de fuga, tempo de resposta, agilidade, etc. Alguns dos atributos são fixados durante a simulação, enquanto outros são dinâmicos, mudando conforme o resultado dos inputs de outros sub-modelos.

O sub-modelo *Hazard* controla o ambiente físico e atmosférico. Ele distribui perigos do incêndio pré-determinados, tais como calor, fumaça e produtos tóxicos ao longo da atmosfera e controla o fechamento e abertura das saídas e a disponibilidade destas.

O sub-modelo *Toxicity* determina os efeitos sobre um indivíduo exposto a produtos tóxicos distribuídos pelo sub-modelo *Hazard*. Estes efeitos são comunicados ao sub-modelo *Behaviour* que, por sua vez, alimenta-se através do movimento do indivíduo.

7.4.2 Sub-modelo do ocupante

Define o indivíduo como um conjunto de atributos divididos em quatro categorias: físicas (gênero, idade, agilidade, dentre outros); psicológicos (como paciência); experienciais (como distância, PET, dentre outros) e efeitos de perigo (como FIN, FICO2, FIH, dentre outros²⁰) – estes atributos são usados para auxiliar na distinção de um indivíduo para outro e prover uma razão para vários atributos partilhados.

7.4.2.1 Atributos físicos

Mobilidade – a mobilidade é um fator multiplicativo usado em conjunção com a velocidade de percurso (*travel speed*) e com a agilidade, respectivamente. Ela tem duas funções: inicialmente, uma planejada para permitir a introdução à inaptidão física, dentro da descrição *Occupant*. Um ocupante, não sofrendo de qualquer inaptidão, terá sua mobilidade inicial normal, enquanto um ocupante com uma pequena inaptidão, tal como um braço engessado, terá uma ligeira redução no valor da mobilidade de, por exemplo, 0,9. Uma inaptidão maior, tal como cegueira ou uma perna quebrada, resultará em uma redução considerável, dita em 0,2. A segunda função da mobilidade é reduzir a velocidade de percurso e a agilidade com respeito à exposição crescente a agentes narcóticos e concentrações de fumaça. A mobilidade pode variar de seu valor inicial (efeitos não prejudiciais) para zero. A mobilidade decresce quando FIN – determinado pelo sub-modelo *Toxicity* – aumenta e/ou a concentração de fumaça aumenta. A Tabela 7.4 mostra relação entre FIN e a mobilidade.

²⁰ As siglas PET, FIN, FICO2 e FIH serão descritas adiante.

TABELA 7.5 - Relação entre FIN e a mobilidade do ocupante.

FIN	Mobilidade
0,00 – 0,89	1,00
0,90 – 0,95	0,90
0,96 – 1,00	0,80

FONTE: GALEA (2004)

Este nível de mobilidade é multiplicado pelo nível inicial de mobilidade do ocupante para formar uma mobilidade calculada dinamicamente, dependente das condições do ambiente, como demonstra a Equação 7.4.

$$\text{Mobilidade do ocupante} = \text{mobilidade inicial} \times \text{mobilidade} \quad 7.4$$

Da mesma maneira que os gases narcóticos, os gases irritantes também afetam diretamente a mobilidade do ocupante, assim como seu bem-estar. Deve-se enfatizar que apenas o impacto instantâneo (FIC) de produtos irritantes influencia a mobilidade de um indivíduo. Conforme o valor combinado da FIC, a mobilidade de um indivíduo diminui, reduzindo a velocidade de percurso deste. A equação [7.5] representa essa relação.

$$\text{Mobilidade} = \frac{\left(e^{-((\text{FIC} \cdot 1000)/160)^2} + (-0,2 \cdot \text{FIC} + 0,2) \right)}{1,2} \quad 7.5$$

A fumaça tem o efeito de ofuscar a visão e irritar os olhos, prejudicando a habilidade de um indivíduo no momento do escape.

O impacto da fumaça sobre a mobilidade individual está relacionada à representação dos gases irritantes dentro da simulação. Caso os gases irritantes não sejam explicitamente representados nos perigos do incêndio, o banco de dados programado dos gases irritantes é usado para descrever o impacto completo da fumaça e dos gases irritantes sobre a taxa de movimento dos indivíduos expostos. A relação aplicada é

pretendida para aproximar a redução na velocidade de percurso individual devido ao impacto da fumaça irritante (incluindo o efeito de ofuscação da fumaça) GALEA (2004, pg. 2.15).

A atributo da mobilidade é mantido constante acima da concentração de fumaça de 0,1 l/m após o ponto ser calculado de acordo com a equação 7.6

$$\text{Mobilidade} = -2,08K^2 - 0,38K + 1,06 \quad 7.6$$

Onde:

K = representa o coeficiente de extinção da fumaça (l/m).

Para uma concentração de fumaça de 0,45 l/m, a Equação 7.6 reduz a mobilidade para aproximadamente a metade de seu valor original. Para concentrações de fumaça acima de 0,5 l/m a habilidade de escape do ocupante é severamente limitada e o modelo assume uma velocidade de percurso máxima equivalente à taxa de rastejo, conforme a Tabela 7.6 (GALEA, 2004).

TABELA 7.6 – Relação entre a concentração de fumaça e a mobilidade

Concentração de fumaça (l/m)	Mobilidade
0,0 – 0,1	1,0
0,2	0,92
0,3	0,76
0,4	0,57
0,5	0,36
> 0,5	0,36*

*Caso o ocupante esteja habilitado a rastejar (*Crawl*) e a velocidade de percurso (*Travel Speed*) estará dependente da taxa de rastejo (*Crawl Rate*) dos ocupantes em vez da taxa de fuga rápida (*Fast Walk*) e mobilidade.

Fonte: GALEA, 2004, p. 2.16.

A redução da mobilidade causa uma redução na velocidade de percurso. Uma velocidade de percurso de um ocupante para qualquer ponto no tempo é determinada pela Equação 7.7

$$\text{Velocidade de Percurso} = \text{Velocidade de Percurso Inicial} \times \text{Mobilidade} \quad 7.7$$

A agilidade também é afetada pela mobilidade. Ela foi desenvolvida para representar a habilidade física de um indivíduo, tal como saltar sobre assentos no momento de um escape. A agilidade de um ocupante para qualquer ponto no tempo é determinada pela Equação 7.8.

$$\text{Agilidade} = \text{Agilidade Inicial} \times \text{Mobilidade} \quad 7.8$$

Velocidade de percurso – a velocidade de percurso (*travel speed*) reflete a velocidade corrente dos ocupantes. Esta é dependente da velocidade máxima inicial dos ocupantes, da mobilidade destes e do terreno a ser atravessado. Dentro do *buildingExodus*, o usuário configura – cada ocupante – seis níveis de velocidade de percurso. Essas velocidades são identificadas como *Fast Walk*, *Walk*, *Leap*, *Crawl*, *Stairs-Up* e *Stairs-Down*. Estas representam a máxima velocidade não impedida que o ocupante pode atingir sob uma variedade de condições.

Agilidade – a agilidade é planejada para representar a habilidade dos indivíduos de saltar obstáculos. A agilidade dos ocupantes para qualquer ponto no tempo é determinada pela agilidade inicial multiplicada pela mobilidade. Dessa forma, esse atributo é modificado pela mobilidade.

Volume de ar respirado por minuto (RMV) – o volume do ar respirado por minuto é uma medida do volume de ar que entra nos pulmões (litros/min). É usado pelo sub-modelo *Toxicity* para calcular a FICO (dose de monóxido de carbono). O RMV (*Respiratory Minute Volume*) é tipicamente dependente do gênero, do peso, da idade e do tipo de atividade em que o indivíduo está envolvido. Por exemplo: um homem de 70 kg envolvido em um trabalho leve tem um RMV de cerca de 25 l/min, enquanto que, em descanso, este cai para 8,5 l/min. No caso do mesmo homem em um trabalho pesado, o RMV aumenta para 50 l/min.

7.4.2.2 Atributos psicológicos

Impulso – o impulso (*drive*) é uma medida da agressividade de um ocupante. É usada como uma base para resolução de conflitos, em uma situação na qual o ocupante compete com um outro a ocupação de um nó²¹. O impulso é atribuído em valores de 1 (baixo impulso) a 15 (alto impulso). Existem algumas evidências para sustentar a convicção de que homens jovens geralmente tenham o mais alto impulso, enquanto que mulheres idosas tendam a ter os menores impulsos.

Paciência – durante a simulação, vários ocupantes serão forçados a permanecer parados enquanto estão em uma fila ou tentando juntar-se a um fluxo de pessoas. A paciência é uma medida da quantidade de tempo (em segundo) que um ocupante é preparado para esperar antes de tentar uma ação alternativa, tal como sair da fila, tentar pular sobre as filas dos assentos, etc. Ocupantes complacentes terão uma paciência maior, enquanto os menos complacentes, uma menor. Em simulações onde os ocupantes são obrigados a esperar sua vez (por exemplo, em uma fila) e não apresentam qualquer “comportamento extremo”, a paciência deveria ser configurada para valores extremamente altos, tais como 1000 segundos.

Tempo de resposta – o tempo de resposta é planejado para ser uma medida de tempo de movimento de pré- evacuação incorrido pelo ocupante. Ele representa a diferença entre o tempo que o ocupante começa ativamente a evacuar e o tempo em que foi dada a chamada de evacuação. Ocupantes com o comportamental inativo são simulados pelo uso de um tempo de resposta extramente longo, por exemplo, 10000 segundos. A apropriada distribuição do tempo de resposta imposta sobre uma simulação é dependente de um número de cenários relacionados a fatores, incluindo a natureza da atividade em que os ocupantes estão envolvidos, a natureza do espaço ocupado, o tipo de sistema de alarme empregado, a qualidade da estrutura de gerenciamento empregada na edificação, o nível de treinamento, o público alvo a que está exposto, etc. Tempos de

²¹ Os nós são utilizados pelo *buildingExodus* para preencher os espaços vazios existentes em cada ambiente. Eles são conectados por ligações e cada um tem a dimensão de 0,5m x 0,5m. Cada nó é ocupado por no máximo um indivíduo.

resposta típicos podem variar de segundos (ocupantes acordados, treinados, familiarizados com o ambiente, sistemas de alarme e procedimentos) a muitos minutos (situações em que os ocupantes podem precisar de assistência, tais como em consultórios médicos).

Gene – o gene é usado na determinação da “identidade” do indivíduo; especialmente em relação à habilidade dos ocupantes de comunicar informações. Um valor do gene maior do que zero é usado para representar grupos relacionados. Um gene de valor zero indica que a pessoa não está relacionada a qualquer outro membro dentro do ambiente e, conseqüentemente, haverá comunicação de qualquer informação.

7.4.2.3 Atributos experienciais

Tempo decorrido por indivíduo (PET) – o PET (*Personal Elapsed Time*) é um atributo dinâmico que é calculado continuamente pelo *buildingEXODUS* para cada ocupante. É uma medida de tempo gasto pelo ocupante na evacuação. Caso o ocupante seja verificado em qualquer ponto, o PET indica a quantidade de tempo que o ocupante gastou até chegar ao local ao qual este foi interrogado. No final da simulação, o PET mede o tempo até a saída ou incapacidade. Ele é inicialmente configurado em zero.

Distância percorrida – a distância percorrida (*distance travelled*) é um atributo que é calculado continuamente pelo *buildingEXODUS* para cada ocupante. Essa distância é uma medida da distância total (medida em metro) percorrida pelo ocupante para qualquer ponto no tempo. No final da simulação, é medida a distância percorrida até uma saída, ou do ponto de incapacidade. A distância percorrida é configurada inicialmente em zero.

Distância restante – a distância restante (*distance remaining*) é um atributo que é calculado continuamente pelo *buildingEXODUS* para cada ocupante. Caso o ocupante não tenha cumprido a tarefa de sair, então o cálculo representará a distância (medida em metro) que o ocupante deve percorrer para alcançar sua saída. Caso contrário, o cálculo

mostrado será a distância para o local de sua próxima tarefa. Uma vez que a tarefa do ocupante esteja completa, o cálculo irá então representar a distância para a saída do ocupante. Caso o ocupante evacue com sucesso da edificação, no final da simulação a distância restante será zero. Se o ocupante está incapacitado, a distância restante especifica o quão próximo de uma saída ele estava para o tempo em que este ficou incapacitado. A distância restante é inicialmente configurada em zero.

Espera – a espera (*wait*) é um atributo que é calculado continuamente pelo *buildingEXODUS* para cada ocupante parado. A espera é uma medida do tempo (em segundo) que um ocupante permanece parado depois deste ter iniciado a evacuação. Uma vez que o ocupante em espera começa a mover-se, o contador de espera é zerado. O contador de espera é continuamente comparado com o atributo paciência pelo sub-modelo *Behaviour*. O atributo espera é inicialmente configurado em zero.

Tempo cumulativo de espera (CWT) – o CWT (*Cumulative Wait Time*) é um atributo dinâmico que é calculado pelo *buildingEXODUS* para cada ocupante. Esse atributo é uma medida do tempo total (em segundo) que um ocupante permanece parado depois deste ter iniciado a evacuação. O CWT representa a soma de todos os atributos de espera, incorridos por um ocupante. Esse atributo é configurado inicialmente em zero.

Porta alvo – o atributo porta alvo (*target door*) permite a um ocupante ser direcionado para uma porta externa específica, indiferentemente do mapa potencial.

Conhecimento da saída pelo ocupante (OEK) – o OEK (*Occupant Exit Knowledge*) permite a um ocupante possuir um entendimento localizado do ambiente, na forma de uma lista de saídas externas. Esse atributo é ativado caso o usuário selecione a opção *local familiarity* acessível no modo *Simulation*. Caso nenhuma saída seja especificada pelo usuário, o ocupante é dado (pelo padrão) como conhecedor da saída mais próxima.

Lista do itinerário do ocupante (OIL) – a lista do itinerário do ocupante (*Occupant Itinerary List – OIL*) permite ao ocupante possuir um número finito de tarefas que são cumpridas antes da evacuação. Essas tarefas tomam o formulário de um nó (a tarefa é

assumida como cumprida) e um tempo associado de atraso (o comprimento do tempo que a tarefa necessita). Pelo padrão, o ocupante inicialmente não tem tarefas para cumprir.

7.4.2.4 Atributos dos efeitos do perigo

A) Gases narcóticos / asfixiantes

Dose de incapacidade pessoal (PID) – o PID é uma medida da concentração de carboxi-hemoglobina (COHb) necessária para causar a incapacidade. É usado pelo sub-modelo *Toxicity* para calcular a FICO. A dose de incapacidade é conhecida por ser dependente da idade, gênero, tamanho do corpo, estado de saúde e nível de atividade. Nesta versão do *buildingEXODUS*, apenas um valor fixado é usado devido à carência de dados confiáveis.

FIH – mede a exposição cumulativa dos ocupantes ao calor convectivo e radioativo. É um atributo dinâmico calculado pelo sub-modelo *Toxicity*. Quando o FIH é igual a um, o ocupante está incapacitado devido à exposição ao calor. À medida que o FIH aumenta, a mobilidade decresce. O valor *default* do FIH é zero.

FIHc – mede a exposição cumulativa dos ocupantes ao calor convectivo. É um atributo dinâmico calculado pelo sub-modelo *Toxicity*. Quando o FIHc é igual a um, o ocupante está incapacitado devido à exposição ao calor convectivo. O valor *default* do FIHc é zero. O FIHc é um dos componentes que afeta o atributo FIH.

FIHr – mede a exposição cumulativa dos ocupantes ao calor radioativo. É um atributo dinâmico calculado pelo sub-modelo *Toxicity*. Quando o FIHr é igual a um, o ocupante está incapacitado devido à exposição ao calor radioativo. O valor *default* do FIHr é zero. O FIHr é um dos componentes que afeta o atributo FIH.

Dr – o denominador radioativo (Dr) é a dose de radiação necessária para causar o efeito desejado e tem unidade de $[s(kW/m^2)^{4/3}]$. É um atributo de uso definido utilizado no sub-modelo *Toxicity*. Dentro do *buildingEXODUS*, dois valores para Dr são providos, e estes representado o valor crítico para o “limite de dor” de $Dr = 80$ e o valor crítico para a “incapacidade” de $Dr = 1000$. Um meio é também provido para o usuário especificar qualquer valor desejado. O valor *default* para Dr é 80.

FICO – o atributo FICO mede a exposição cumulativa do ocupante ao monóxido de carbono (CO). É um atributo dinâmico calculado pelo sub-modelo *Toxicity*. Quando FICO é igual a um, o ocupante está incapacitado devido ao envenenamento com CO. O valor *default* do FICO é zero.

FICN – o atributo FICN mede a exposição cumulativa do ocupante ao cianeto de hidrogênio (HCN). É um atributo dinâmico calculado pelo sub-modelo *Toxicity*. Quando FICN é igual a um, o ocupante está incapacitado devido ao envenenamento com HCN. O valor *default* do FICN é zero.

FIO – o atributo FIO mede a exposição cumulativa do ocupante à baixa concentração de oxigênio (O₂). É um atributo dinâmico calculado pelo sub-modelo *Toxicity*. Quando FIO é igual a um, o ocupante está incapacitado devido à falta de oxigênio. O valor *default* de FIO é zero.

VCO₂ – é uma estimacão do efeito da hiperventilação causada pela exposição do ocupante ao dióxido de carbono (CO₂). É um atributo dinâmico calculado pelo sub-modelo *Toxicity*. Quando o VCO₂ aumenta, a taxa de ventilação também aumenta, e, então, a entrada de gases tóxicos aumenta. O valor *default* de VCO₂ é zero.

FICO₂ – mede a exposição cumulativa do ocupante ao dióxido de carbono (CO₂). É um atributo dinâmico calculado pelo sub-modelo *Toxicity*. Quando FICO₂ é igual a um, o ocupante está incapacitado devido ao dióxido de carbono. O valor *default* do FICO₂ é zero.

FIN – mede a exposição cumulativa do ocupante à baixa concentração de O₂, a exposição ao HCN, CO e CO₂. É um atributo dinâmico calculado pelo sub-modelo *Toxicity*. Quando FIN é igual a um, o ocupante está incapacitado devido ao efeito combinado destes gases. Quando FIN aumenta, a mobilidade diminui. O valor *default* do FIN é zero.

B) Gases irritantes

FIC – mede a exposição espontânea do ocupante de todos os gases irritantes. É um atributo dinâmico calculado pelo sub-modelo *Toxicity*. Quando FIC é igual a um, o ocupante está incapacitado. O valor *default* de FIC é zero. O FIC subdivide-se em:

- FIC_{HCL} (exposição ao cloreto de hidrogênio);
- FIC_{HBr} (exposição ao brometo de hidrogênio);
- FIC_{HF} (exposição ao fluoreto de hidrogênio);
- FIC_{SO₂} (exposição ao dióxido de enxofre);
- FIC_{NO₂} (exposição ao dióxido de nitrogênio);
- FIC_{acroleína} (exposição à acroleína);
- FIC_{formaldeído} (exposição ao formaldeído).

FDL – o atributo FDL mede a exposição cumulativa dos ocupantes aos gases irritantes. É um atributo dinâmico calculado pelo sub-modelo *Toxicity*. Quando o FDL é igual a um, o ocupante está incapacitado devido à exposição aos gases irritantes. O valor *default* do FDL é zero. O FDL subdivide-se em:

- FDL_{HCL} (exposição ao cloreto de hidrogênio);
- FDL_{HBr} (exposição ao brometo de hidrogênio);
- FDL_{HF} (exposição ao fluoreto de hidrogênio);
- FDL_{SO₂} (exposição ao dióxido de enxofre);
- FDL_{NO₂} (exposição ao dióxido de nitrogênio);
- FDL_{acroleína} (exposição à acroleína);

- FDL_{formaldeído} (exposição ao formaldeído).

7.4.2.5 Sub-modelo do movimento

O sub-modelo *Movement* é ativado apenas durante o modo *Simulation*. Ele é primeiramente preocupado com o movimento físico dos ocupantes através de diferentes tipos de *lay-outs*. Isso consiste em um número de regras, e a principal função destas é determinar a velocidade de percurso apropriada para cada tipo de *lay-out*. Por exemplo: *Leaop Speed* é selecionado para ocupantes que têm de decidir pular sobre fileiras de assentos, enquanto *Fast Walk Speed* é selecionado para um ocupante que está percorrendo uma área aberta. Em complemento, o sub-modelo *Movement* assegura que o ocupante tem capacidade de performance da ação requerida, como por exemplo checar se a agilidade do ocupante é suficiente para permiti-lo percorrer sobre nós com valores particulares dos obstáculos (*obstacle*).

Enquanto o sub-modelo *Movement* é responsável pela movimentação do ocupante, é o sub-modelo *Behaviour* que seleciona a direção do percurso. Caso um adequado movimento não esteja disponível para o ocupante, o sub-modelo *Movement* irá direcionar um período de espera. Durante o período de espera, o ocupante permanece parado até que um movimento adequado esteja disponível. A versão do *buildingEXODUS* utilizada nesta dissertação não provê que um ocupante empurre outro enquanto estão nas filas das rotas de escape. Nestas circunstâncias, o ocupante pode esperar que outro se mova, ou que sua variável paciência expire, movendo-se em volta da obstrução.

7.4.2.6 Sub-modelo do perigo

O sub-modelo *Hazard* é acessado pelo usuário durante o modo *Scenario* e utilizado pelo *buildingEXODUS* durante o modo simulação. O sub-modelo *Hazard* controla o desenvolvimento da atmosfera e do ambiente físico. Os aspectos atmosféricos

compreendem a distribuição dos perigos do incêndio, tais como CO₂, CO, HCN, ausência de O₂, calor (radioativo e convectivo) e fumaça. Os aspectos físicos incluem a configuração dos tempos de abertura e fechamento para as saídas.

A função primária do sub-modelo *Hazard* é distribuir os perigos do incêndio. O *buildingEXODUS* não possui um componente tal como uma zona ou um modelo de campo de incêndio para prever a geração ou a disseminação dos perigos do incêndio. Existem, entretanto, diversos meios pelos quais os dados dos perigos do incêndio podem ser incluídos. Existe uma entrada manual de dados, cálculos arbitrários, dados de bibliotecas ou importados diretamente do *Smartfire*.

Dentro do *buildingEXODUS* os perigos do incêndio operam para duas camadas: superior e inferior. A definição das camadas superiores e inferiores é dependente da aproximação usada para especificar os perigos. Quando usada a opção *user-defined*, os ocupantes são continuamente expostos aos perigos da camada superior, enquanto assumem a posição ereta. Os perigos definidos para as condições da camada superior são representados por uma altura nominal da cabeça do ocupante no valor de 1,7m. Quando os ocupantes são forçados a rastejar, eles são expostos então aos valores do perigo para camadas inferiores. Essa faixa da camada inferior é tomada até 1,0m acima do piso. Quando usados os perigos importados do *Smartfire*, a lógica usada é parecida com a usada quando se faz o uso dos dados *user-defined*. Quando as pessoas estão de pé, elas estão continuamente expostas às condições ambientais que existem nas camadas superiores. Quando os ocupantes são forçados a rastejar, eles então são expostos aos valores do perigo para camadas inferiores. A posição e a profundidade de ambas regiões (superiores e inferiores) são definidas pelo usuário dentro do *Smartfire*, antes de executar a simulação.

Aspectos físicos que são controlados pelo sub-modelo *Hazard* incluem configurações de tempos de abertura / fechamento das saídas. Durante o curso da evacuação, o *status* das saídas pode alterar, como um resultado da disseminação do incêndio ou do não funcionamento dos equipamentos de extinção. Algumas saídas podem não abrir durante a evacuação devido a problemas nos equipamentos, ou à incapacidade dos ocupantes

alcançarem as saídas. Saídas também se tornam inúteis devido à propagação do incêndio dentro ou fora do recinto. Igualmente, certas áreas no recinto podem tornar-se não transitáveis devido à presença de incêndio ou danos estruturais. Essas seqüências de eventos podem ser especificadas no sub-modelo *Hazard* que informa ao sub-modelo *Movement* quando e qual porta é aberta ou fechada e onde e quando áreas não transitáveis ocorrem.

7.4.2.7 Sub-modelo da toxicidade

Segundo GALEA et al. (2004), o sub-modelo *Toxicity* é acessado pelo usuário durante o modo *Scenario* e é usado pelo *buildingEXODUS* durante o modo *Simulation*. Para determinar o efeito dos perigos do incêndio sobre os ocupantes, o *software* usa um modelo tóxico da Dose Efetiva Fracional (*Fractional Effective Dose – FED*). O modelo FED assume que os efeitos de certos perigos do incêndio estão relacionados às doses recebidas antes da exposição à concentração. O modelo calcula, para esses agentes, a relação da dose recebida sobre o tempo da dose efetiva que causa a incapacidade ou a morte, e soma essas proporções durante a exposição. Quando a unidade total é alcançada, o efeito tóxico é previsto de ocorrer. Esses efeitos são comunicados ao sub-modelo *Behaviour*, o qual, por sua vez, alimenta o movimento do indivíduo. Quando o FED aproxima-se da unidade, a mobilidade, a agilidade e a velocidade de percurso do indivíduo podem ser reduzidas, tornando-se mais difícil para o ocupante afetado escapar.

O modelo de toxicidade central implementado dentro do *buildingEXODUS* é o FED. Esse modelo considera os perigos físicos e tóxicos associados com a temperatura elevada, HCN, CO, CO₂, a baixa concentração de O₂ e estima o tempo de incapacidade.

7.4.2.8 Sub-modelo do comportamento

O sub-modelo *Behaviour* é o mais complexo de todos os sub-modelos e é utilizado pelo *buildingEXODUS* durante o modo *Simulation*. Esse sub-modelo – que opera sobre dois níveis, global e local – determina a resposta do ocupante para a evacuação do cenário. O comportamento global provê uma estratégia de escape completa para os ocupantes, enquanto o comportamento local administra a resposta dos ocupantes a suas situações correntes. Na tentativa de implementar a estratégia global, um comportamento de um indivíduo pode ser significativamente modificado pelo ditame de seu comportamento local.

São analisados dois aspectos para o comportamento global. O primeiro envolve ocupantes, implementando uma estratégia de escape que conduz para seus escapes diretos. O segundo aspecto envolve ocupantes completando um grupo de tarefas antes da evacuação. O comportamento global pode resultar em uma estratégia de escape que direciona o ocupante para a saída mais próxima, uma determinada saída, ou uma saída baseada no conhecimento do ocupante. Diversos métodos são providos em que estas estratégias podem ser implementadas.

O segundo nível do sub-modelo *Behavior* diz respeito à resposta dos ocupantes a situações locais. Estas incluem a interação pessoa-pessoa (e.g. alcance da rota adequada); interação pessoa-incêndio (e.g. escape em ambiente com fumaça); interação pessoa-estrutura (e.g. escape pelas escadas de emergência). O comportamento local é fortemente influenciado pelos atributos dos ocupantes. E como certas regras de comportamento (e.g. resoluções de conflitos) são de natureza probabilística, é difícil para o *buildingEXODUS* produzir resultados idênticos, caso a simulação seja repetida.

7.4.3 Simulação do modelo

7.4.3.1 Definição da geometria

O objetivo da simulação do edifício habitacional de cinco pavimentos, analisado no presente trabalho, consiste em validar as isenções de edificações dessa tipologia através da análise comportamental da população frente a uma situação de incêndio e pânico, no processo de escape, após conferidos os parâmetros projetuais do edifício (referências normativas) e o comportamento e dinâmica do incêndio no mesmo (*software Smartfire*).

Para o desenvolvimento do modelo de evacuação do edifício habitacional de cinco pavimentos analisado, o primeiro procedimento consistiu na definição de sua geometria no *Geometry model*. Para tanto, assim como no *software Smartfire*, importou-se a planta do pavimento tipo de arquivo DXF, criado no AUTOCAD e realizaram-se as interações necessárias (Figura 7.45).

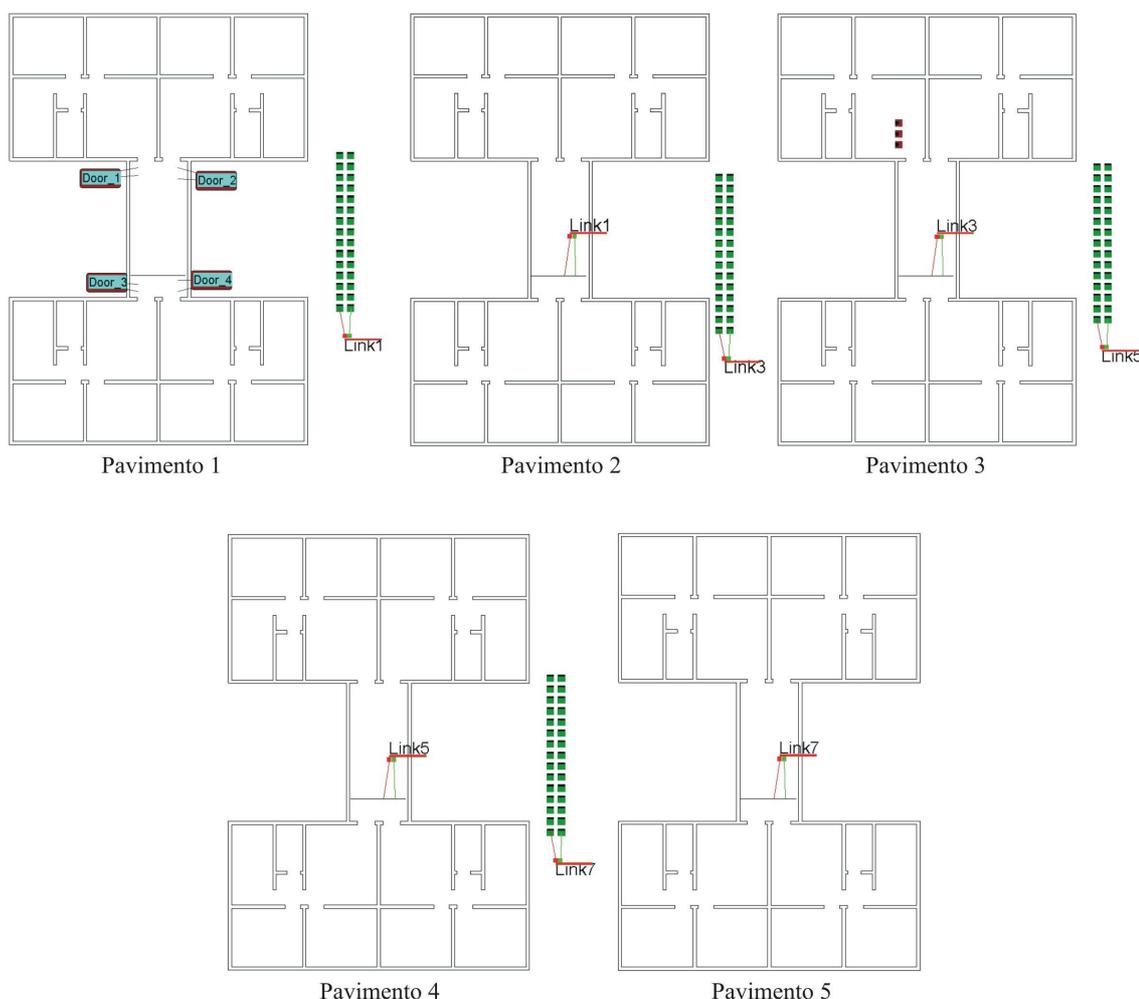


FIGURA 7.45 – Geometria dos cinco pavimentos do edifício no *buildEXODUS*.

Após inserido o projeto em DXF, foi necessário identificar os pontos de saída do edifício, que se localizam no primeiro pavimento e são representados por quatro portas. A geometria foi copiada de forma a se obter os cinco pavimentos, conectados pelas escadas representadas externamente à geometria. A ligação da finalização das escadas a cada pavimento é de extrema importância para garantir a correta conexão entre os pavimentos e a representação adequada ao projeto real, de modo que a fuga dos ocupantes não fique prejudicada. A Figura 7.46 demonstra a interface do software no modelo *Geometry* com visualização dos nós.

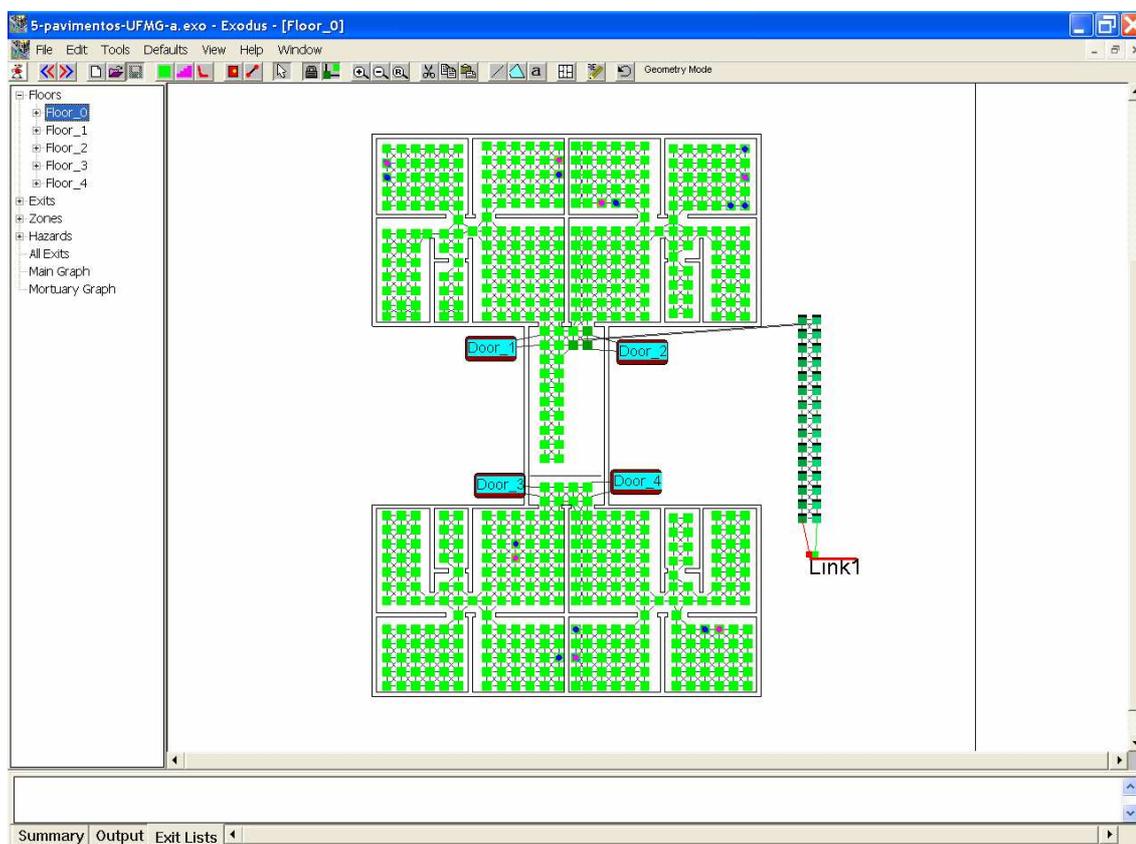


FIGURA 7.46 – Interface do software *buildingEXODUS* no modelo *Geometry*.

7.4.3.2 Definição da população

Segundo dados do IBGE (2005), a população brasileira apresenta a média de 3,8 habitantes por residência. Da mesma forma, apresenta vantagem dos adultos entre 25 e 59 anos no cômputo por idades (Figura 7.47). Fundamentada nessas informações, foi possível criar uma população mais próxima da realidade brasileira, mais notadamente do sudeste do país.

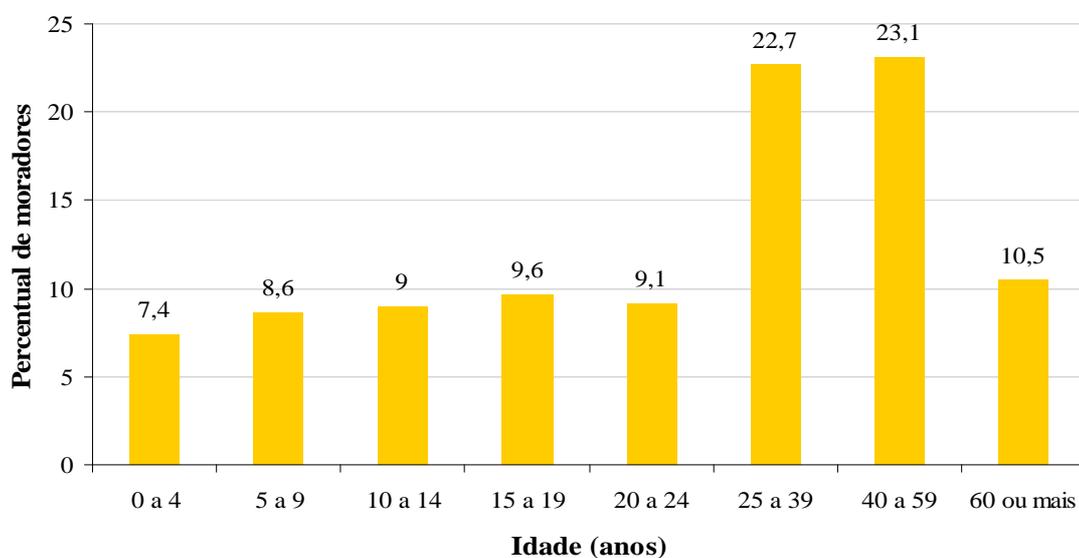


FIGURA 7.47 – Gráfico de percentual de moradores por idade no Brasil.

FONTE: IBGE (2005)

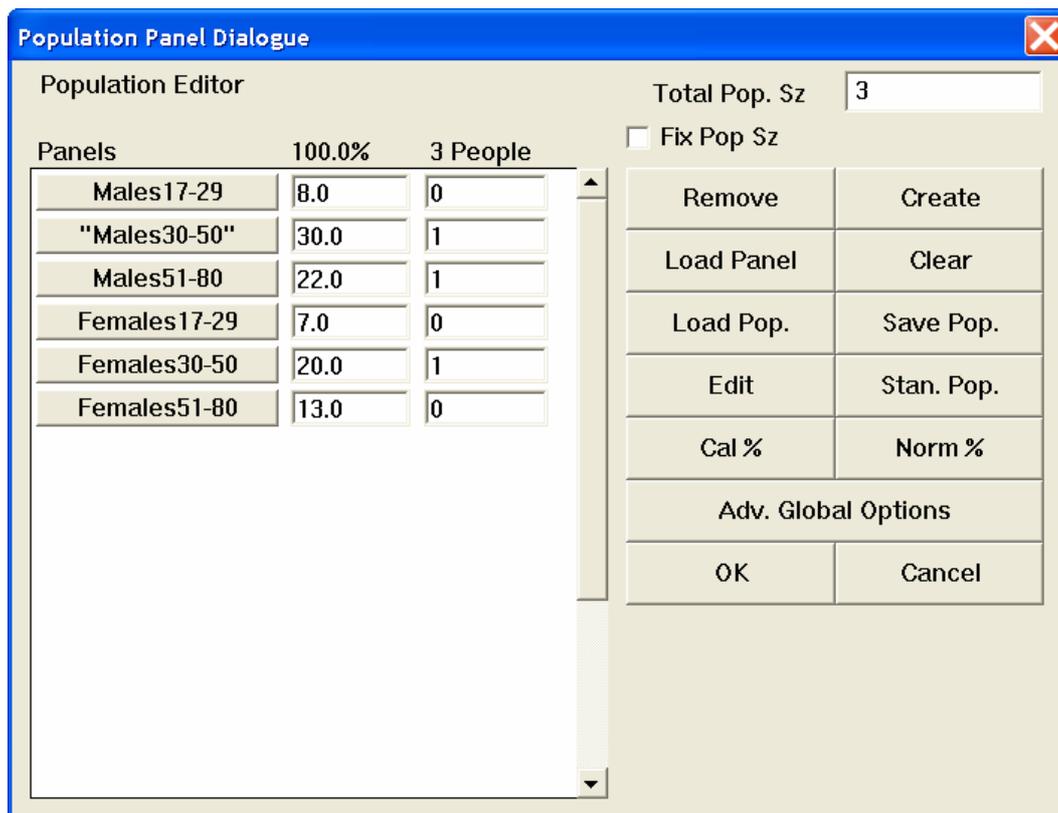


FIGURA 7.48 – Ferramenta de edição da população.

No *Population model*, a definição da população ocorre pela ferramenta *Population Panel Dialogue*, onde é definido o número de pessoas para cada grupo de idade e sexo dado (Figura 7.48). Nesse momento, são parametrizados no *Population Panel* todos os atributos físicos e psicológicos que, ao se criar a população, serão distribuídos aleatoriamente para cada indivíduo do grupo. A Figura 7.49 apresenta um exemplo para homens entre 30 e 50 anos.

FIGURA 7.49 – Edição de atributos físicos e psicológicos.

No presente trabalho, optou-se por concentrar a população nos quartos, em função do horário proposto para a ocorrência do sinistro e por esta se apresentar como a pior situação possível, já que os ocupantes se encontram nos pontos mais distantes da porta de saída.

Após inseridos os ocupantes no modo aleatório, cada indivíduo foi caracterizado quanto ao tempo de resposta, abordado no item 7.4.2.2, de acordo com sua localização no edifício. O critério adotado baseou-se nos dados de movimentação de fumaça obtidos no *Smartifire*.

Em função do edifício não apresentar sistemas de detecção de fumaça, esta somente é percebida quando ocorre seu alastramento no local de permanência da população. Dessa forma, os indivíduos do Bloco B apresentaram tempos de resposta maiores que dos indivíduos do Bloco A e, por sua vez, os indivíduos residentes no primeiro e segundo pavimentos apresentaram tempos de resposta variável, uma vez que a detecção da situação de pânico ocorre, fundamentalmente, pelo movimento e barulho provocado pela fuga dos moradores dos demais pavimentos. A Figura 7.50 mostra alguns exemplos de caracterização da população.

FIGURA 7.50 – Edição de atributos físicos e psicológicos individuais.

Cada indivíduo foi numerado e nomeado em função da sua localização (cômodo, apartamento e pavimento). A exemplo do *name* da Figura 7.50 é possível explicar esse critério (Figura 7.51).

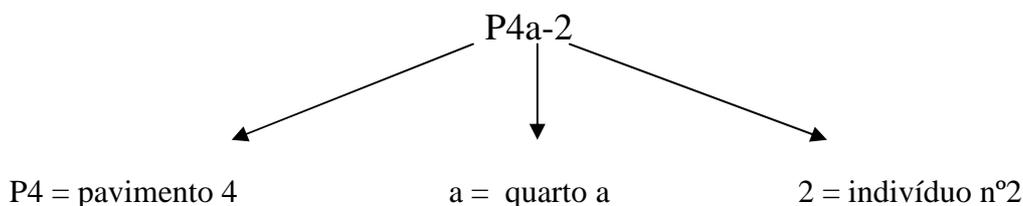


FIGURA 7.51 – Denominação dos indivíduos.

A Figura 7.52 mostra a distribuição da população inserida no quinto pavimento do edifício habitacional e a legenda determinada pelo *buildingEXODUS*. Em todo o edifício, foram distribuídos um total de 83 pessoas.

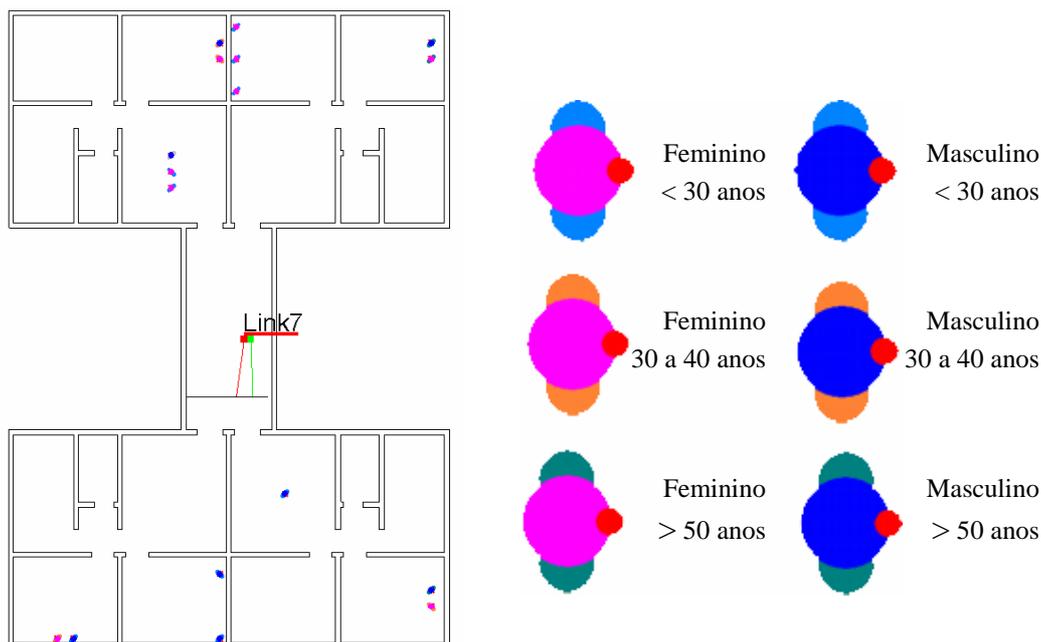


FIGURA 7.52 – Distribuição da população inserida no quinto pavimento e legenda determinada pelo *buildingEXODUS*.

7.4.3.3 Definição do cenário

A definição do cenário ocorre no *Scenario model*, onde são inseridos os perigos do incêndio, denominados *Hazards*. O sub-modelo de perigo (*hazard sub-model*) controla o desenvolvimento da atmosfera e o ambiente físico durante o modelo de simulação. Os aspectos atmosféricos compreendem os perigos do fogo, como CO_2 , CO , HCN , diminuição de O_2 , calor (radioativo e condutivo) e fumaça. Os aspectos físicos incluem o ajuste de aberturas e fechamento dos tempos de saída do edifício. Esses perigos incluem fumaça, calor, gases tóxicos e irritantes.

Na simulação do edifício, os perigos foram inseridos do arquivo de extensão *zone.dat*, que contém todos os dados dos produtos do incêndio simulado no *Smartfire*.

Para que os perigos sejam inseridos, é necessário que a geometria do arquivo do *buildingEXODUS* esteja perfeitamente coerente com a gerada no *Smartfire*, assim como

todas as zonas inseridas no primeiro software precisam ser conferidas com as zonas de perigo criadas no segundo. Entretanto, nem todas foram utilizadas. No *buildingEXODUS* somente devem ser inseridas as zonas onde os ocupantes se encontram em permanência ou efetuarão trânsito. Dessa forma, as zonas foram inseridas em toda a caixa de escada, todos os quartos, circulação e salas, e atribuído nome a cada uma delas, editadas na caixa de ferramentas *Zone Edit Dialogue* (Figura 7.53).

Após a inserção das zonas, é necessário vinculá-las aos compartimentos criados no *Smartfire*, encontrados no arquivo *zone.dat*. É nesse momento que ocorre erro de incompatibilidade, caso haja alguma divergência entre as geometrias. Por se tratar de 92 compartimentos criados no *Smartfire* e apenas 76 zonas a serem avaliadas no *buildingEXODUS*, o processo de conferência entre ambos foi efetuado manual e individualmente, por não existir uma nomenclatura padrão entre os dois programas. Essa correlação pode ser vista na Figura 7.54.



FIGURA 7.53 – Definição das zonas de perigo-a.

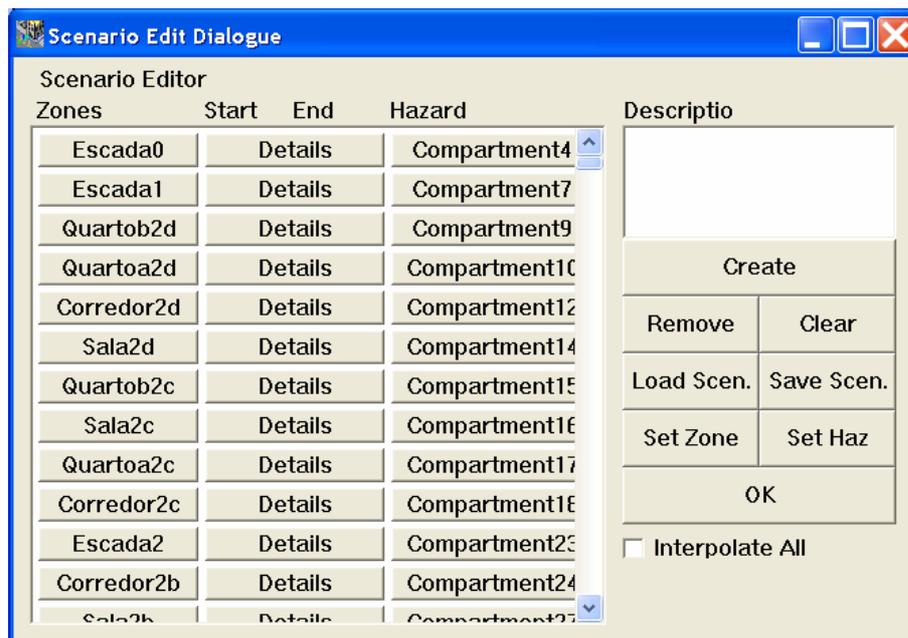


FIGURA 7.54 – Definição das zonas de perigo-b.

7.4.3.4 Definição da Simulação

A partir das configurações para os modelos *Geometry*, *Population* e *Scenario*, realizou-se a simulação do processo de evacuação do edifício proposto.

A inserção de perigos nessa simulação intentou avaliar apenas o tempo de evacuação da população. A manutenção de dados, como tempo de espera e paciência, determinados anteriormente, contribuem para a parametrização das duas simulações de forma a possibilitar que sejam comparadas em igualdade de intervenientes.

Controle de saída de dados – a considerar que a população dos edifícios habitacionais de baixo custo não possui qualquer treinamento para situações de pânico, determinou-se critérios para se criar um cenário mais real e analisar o edifício na pior situação possível. Dessa forma, a opção de rastejamento (*crawl*) foi desativada e a opção altura (*height*) foi ativada. Esta última permite ao *software* correlacionar a altura do indivíduo à camada de fumaça durante as interações. Demais fatores físicos e psicológicos foram selecionados, assim como as variáveis e os dados de perigo (Figura 7.55).

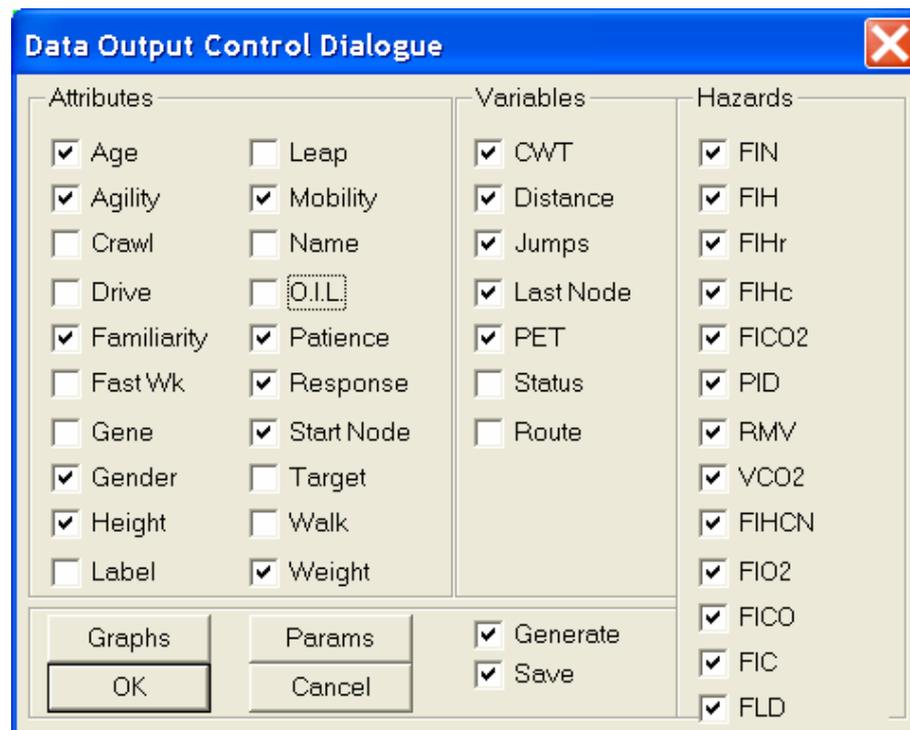


FIGURA 7.55 – Definição dos dados de saída.

Controle dos perigos – para a ativação dos perigos seguiu-se as informações do manual do usuário e a opção *Enable* foi ativada (Figura 7.56).

Controle de comportamento – o fator preponderante nessa opção é a habilitação das opções *Local Familiarity* e *All Main Exits*. A primeira determina a familiaridade dos ocupantes ao ambiente em que estão situados, sendo fundamental por se tratar de um edifício residencial (Figura 7.57). A segunda habilita todas as portas de saída como preferenciais. No caso de edifícios maiores, onde a concentração populacional é maior e existem distribuições das saídas distintas, além de treinamentos para situações de pânico, essa opção não deve ser ativada.

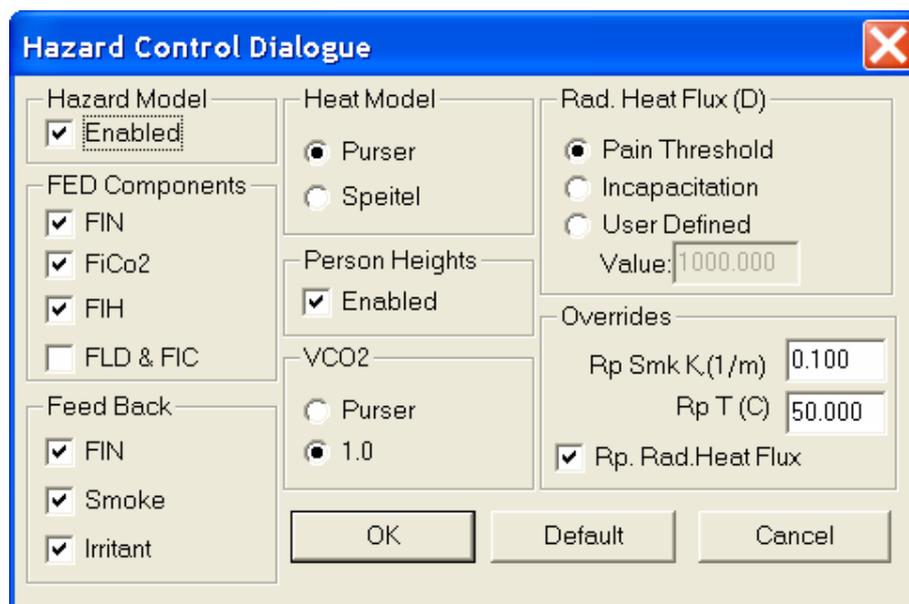


FIGURA 7.56 – Caixa de controle dos perigos.

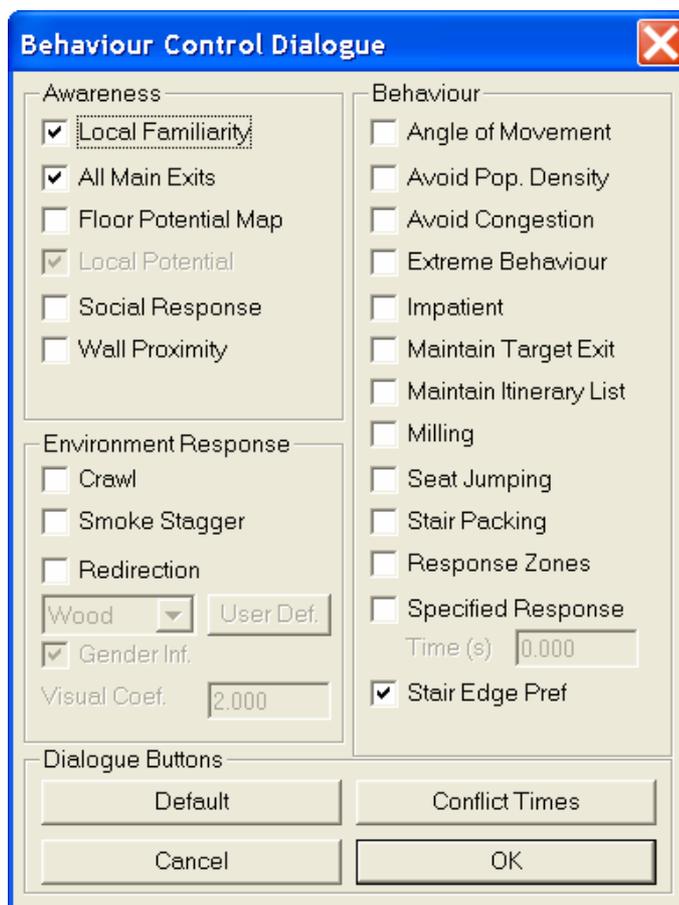


FIGURA 7.57 – Caixa de controle de comportamento.

7.4.4 Resultados auferidos

A simulação utilizou os dados dos perigos do *software Smartfire* no período de 30 minutos de incêndio (1800 segundos). Foram formulados dados do tempo de fuga de cada ocupante (83 pessoas), do número de pessoas que efetivaram fuga por cada porta, dos efeitos dos gases em cada ocupante, dentre outros. Para o objetivo deste trabalho são apresentados os resultados de maior relevância, obtidos por gráficos, imagens e tabelas.

7.4.4.1 Escape

O tempo total de escape dos 83 ocupantes foi de 3 min e 13,16 s (193.62s) e mostrado na Figura 7.58. É possível notar que a partir dos 120 segundos o número de ocupantes que deixaram o edifício sofre um aumento considerável.

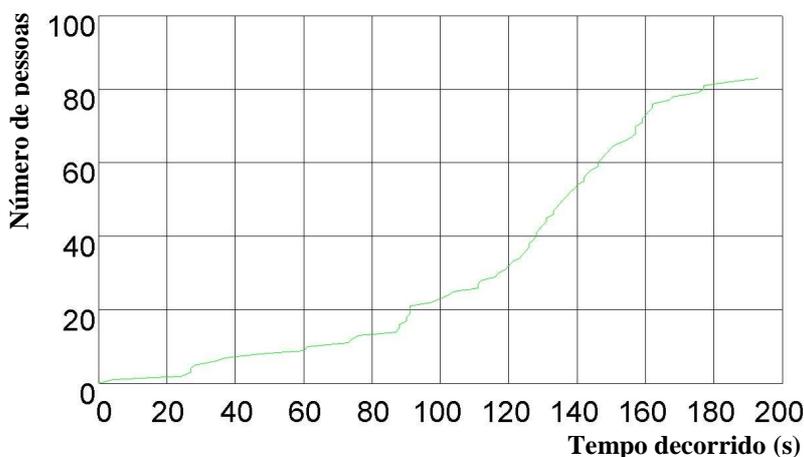


FIGURA 7.58 – Tempo de fuga para os 83 ocupantes do edifício.

A Tabela 7.7 apresenta o número de habitantes e o tempo de fuga do último ocupante de cada pavimento. É possível perceber que o tempo de fuga diminui no sentido ascendente do edifício, ou seja, os pavimentos mais altos têm um tempo de escape menor. Esse resultado é conferido pelo movimento da fumaça, que começa no terceiro pavimento.

TABELA 7.7 - Número de habitantes e tempo de fuga do último ocupante por pavimento.

Pavimento	Número de ocupantes no pavimento	Tempo de fuga do último ocupante (s)
1	17	193,62
2	16	183,62
3	18	171,44
4	15	151,00
5	17	121,05

O número de habitantes e o tempo de fuga do último ocupante por porta de saída é verificado na Tabela 7.8. As portas 1 e 2 possuem uma vazão maior em decorrência de concentrarem o fluxo de todos os cinco pavimentos, exceto pelos apartamentos do primeiro pavimento do Bloco B, que se utilizam das portas 3 e 4. Em função da escada terminar muito próximo da porta 2, esta é a melhor opção para o processo de evasão do edifício.

TABELA 7.8 - Número de habitantes e tempo de fuga do último ocupante por saída.

Porta	Número de ocupantes que efetuaram a fuga	Tempo de fuga do primeiro ocupante (s)	Tempo de fuga do último ocupante (s)
1	5	87,59	159,20
2	71	24,05	193,62
3	3	4,89	73,04
4	4	127,32	161,95

O processo de evasão do edifício habitacional pode ser verificado através de imagens tridimensionais geradas pelo software, no *vrEXODUS*. Quanto à geometria, esta é representada esquematicamente com o objetivo de demonstrar o espaço e suas relações com os usuários, como acessos, escadas e volume. A população possui representação particular para as características como idade, altura e peso. A Figura 7.59 mostra a geometria dos cinco pavimentos e o posicionamento de cada indivíduo no instante anterior ao início da simulação.

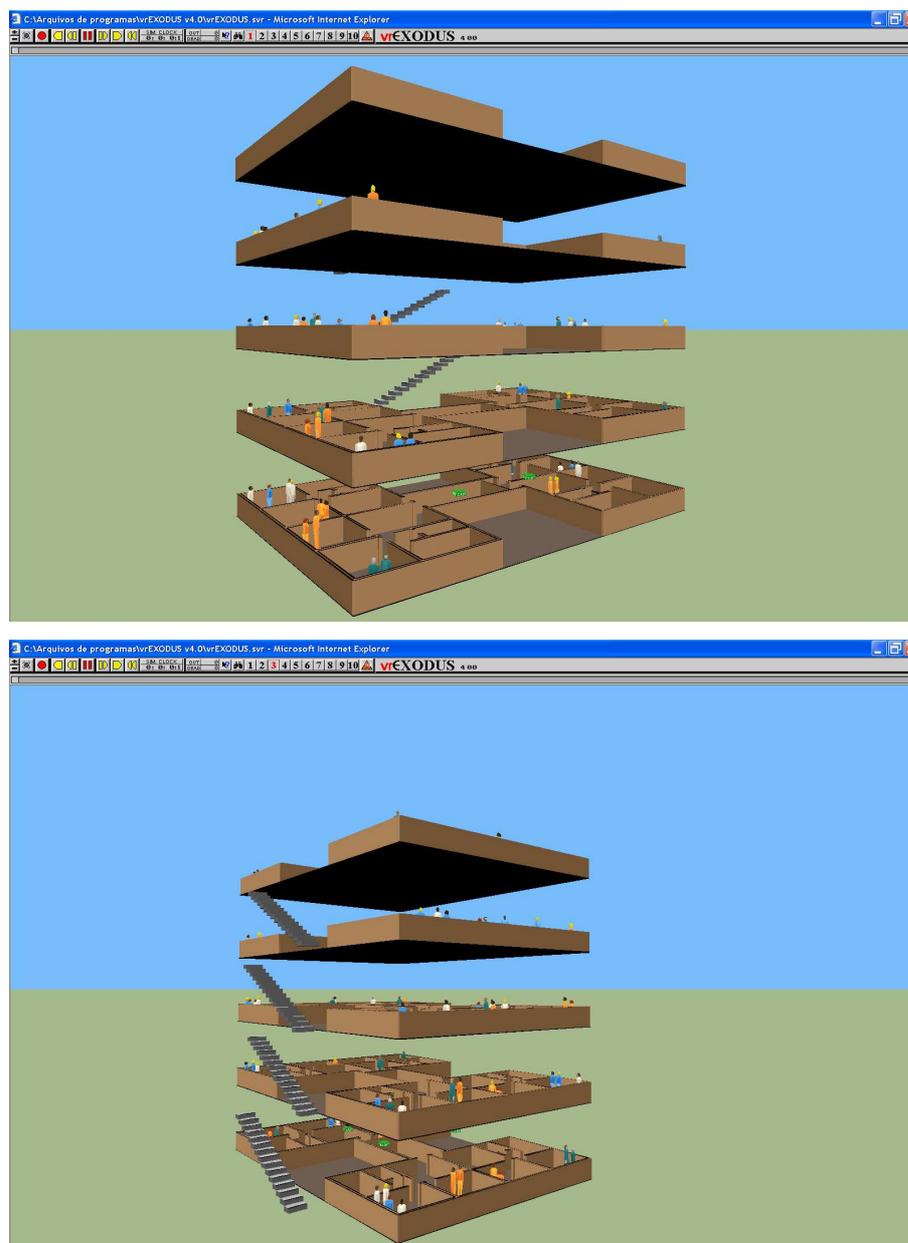


FIGURA 7.59 – Representação da geometria da edificação e posicionamento da população pelo *vrEXODUS* em dois ângulos diferentes.

A Figura 7.60 evidencia o momento em que o incêndio se inicia e a fumaça aparece no cenário tridimensional. Nota-se o deslocamento dos indivíduos a partir do seu local de origem e a completa evasão dos ocupantes do apartamento de incêndio.

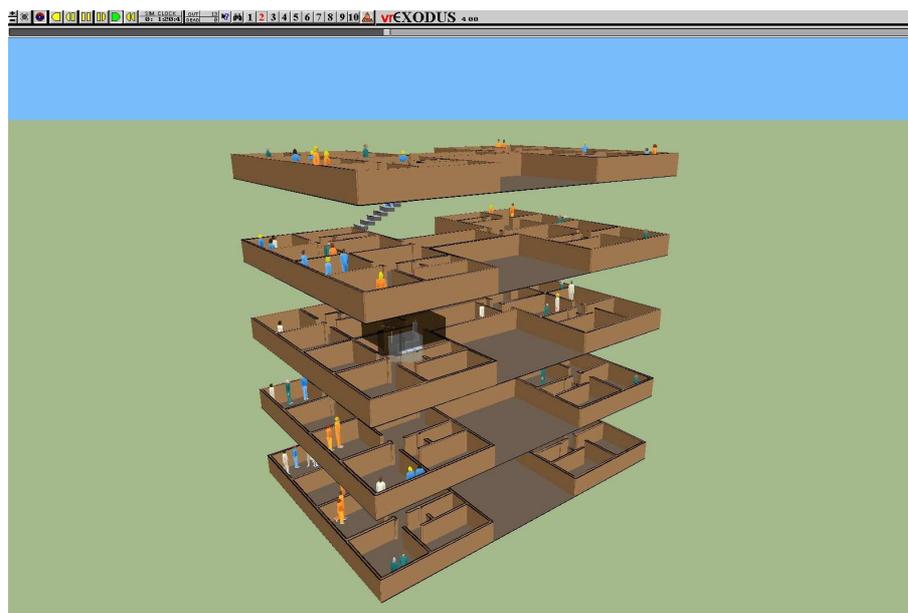


FIGURA 7.60 – Representação tridimensional do instante inicial do incêndio e do deslocamento da população.

Em 120 segundos é possível notar a conflagração da fumaça para a caixa de escada, que coincide com o momento de considerável evasão dos ocupantes do edifício (Figura 7.61).

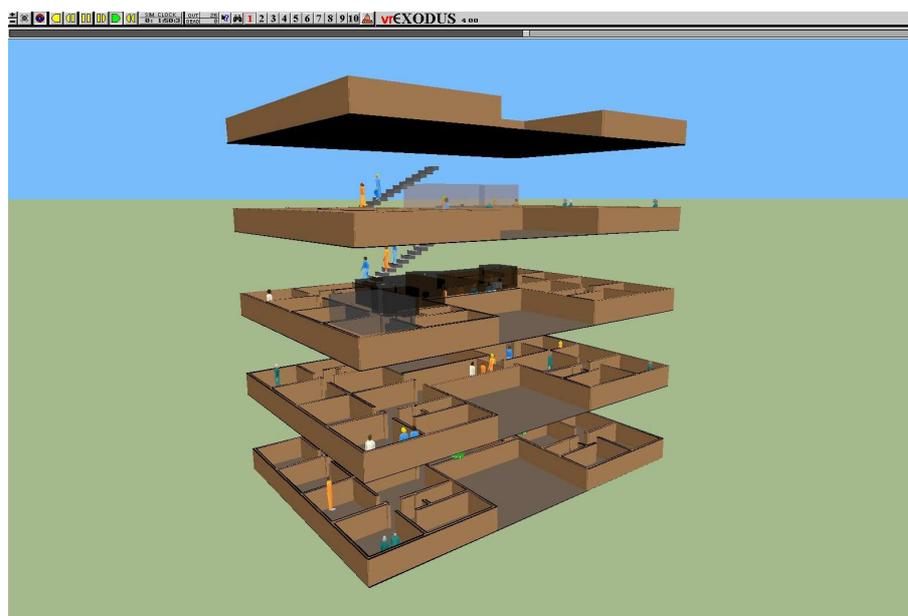


FIGURA 7.61 – Representação tridimensional do incêndio em 120 segundos.

O completo processo de evacuação, assim como do movimento da fumaça, podem ser percebidos na Figura 7.62, já em 193,62 segundos de incêndio.



FIGURA 7.62 – Representação tridimensional do incêndio em 193,62 segundos.

7.4.4.2 Intoxicação

Quanto à influência dos perigos de incêndio (*Hazards*) na população, nota-se que, embora todos os perigos estivessem acionados no quadro de definição dos dados de saída, os ocupantes somente foram envolvidos por VCO_2 , FICO e FIH. Os resultados são apresentados na Tabela 1 do Anexo C.

Para o VCO_2 , o resultado informa sobre os efeitos da hiperventilação causada pela exposição ao dióxido de carbono (CO_2). Esse dado é um atributo dinâmico com variação de 0 a 20. O valor mínimo de VCO_2 foi encontrado para o segundo ocupante a efetuar a fuga, com índice de 0,02 – P2c-50, correspondente a uma mulher de 49 anos, 1,59 m de altura e que ocupava o apartamento 3 do Bloco B no segundo pavimento. O valor máximo foi encontrado no sexagésimo quinto ocupante, com índice 15,72,

correspondente a um garoto de 10 anos, do quarto pavimento e de 1,60 m de altura, ocupante do quarto pavimento, também do bloco B e apartamento 3.

Para o FICO, dado em ppm, o resultado aponta a exposição cumulativa de monóxido de carbono em cada ocupante, assumindo que a inalação de CO é imediatamente convertida para COHb. O menor valor encontrado foi de 2,41, para a primeira pessoa a evadir, uma mulher de 46 anos, residente no apartamento C do primeiro pavimento. O maior valor foi de 54,32 para o sexagésimo terceiro ocupante a evadir, um homem de 45 anos, residente do apartamento A do quarto pavimento, que estava dormindo (paciência = 1000).

Para FIH, o resultado aborda a exposição do ocupante ao calor radioativo ou convectivo, medido em segundos. O menor valor encontrado apontou para o primeiro ocupante a sair, e o máximo para o último, no valor de 193.62s - tempo da simulação.

Embora os ocupantes tenham sido expostos a perigos como calor radioativo, CO e CO₂, não houve prejuízo a nenhum atributo que lhes conferisse incapacidade de fuga. Os dados sobre os efeitos dos gases tóxicos da fumaça e do calor foram abordados no Capítulo 6.

8

CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 Conclusões

Direcionado pela demanda habitacional brasileira e pelo processo de industrialização da construção civil, o presente trabalho focou sua análise em edifícios habitacionais de baixo custo, estruturados em aço e de cinco pavimentos, a partir de um estudo de caso, no intuito de apoiar o desenvolvimento da construção metálica no setor popular.

A relação entre habitabilidade e segurança, como preconizado por ROSSO (1975), foi verificada a partir da análise dos princípios arquitetônicos capazes de garantir a segurança contra incêndio em uma edificação, assim como da salvaguarda da vida humana.

A verificação dos dados estatísticos de incêndio evidenciou a carência de banco de dados concernentes às ocorrências de incêndio no Brasil, capaz de auxiliar no processo de evolução desse estudo no país. A maioria dos dados existentes está concentrada no

sudeste brasileiro, mais notadamente em São Paulo, onde se verificou a recente integração entre Universidades e o Corpo de Bombeiros para a composição desses dados. A partir dessa integração, originou-se a norma ABNT NBR 14023:1997 - Registro de Atividades de Bombeiros, que ainda não tem sido enfatizada junto aos setores de estatística do Corpo de Bombeiros de cada estado.

O estudo da dinâmica e comportamento do incêndio em compartimentos evidenciou processos claramente percebidos nas análises computacionais no *software Smartfire*. O entendimento aprofundado do desenvolvimento do fogo e suas fases, assim como sua relação com o grau de ventilação, carga de incêndio, geometria do compartimento e materiais construtivos, reafirmam a necessidade do pensamento projetual aliado ao conhecimento dos materiais empregados.

O processo de pesquisa deste trabalho evidenciou a carência de dados sobre as propriedades térmicas de materiais complexos, como mobiliários e eletro-eletrônicos. Embora haja uma variedade de estudos internacionais para materiais poliméricos, cerâmicos, dentre outros, nota-se que o estudo mais realístico da carga de incêndio, produção de fumaça e gases tóxicos de um determinado material ainda é pouco difundido.

Com base no estudo de caso apresentado, com o incêndio iniciado no terceiro pavimento, os ensaios computacionais permitiram concluir que:

- Para edifícios de cinco pavimentos da tipologia analisada, conclui-se que a sua isenção do Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF), preconizada pela norma ABNT NBR 14432:2001 para esse caso, pôde ser verificada quanto aos parâmetros normativos e de projeto, assim como pelas simulações realizadas com os *softwares Smartfire* e *buildingEXODUS*.

- O *Flashover* do compartimento de incêndio ocorreu em 5 minutos de incêndio;

- As temperaturas máximas atingidas no compartimento de incêndio foram de 1752 °C, obtida a 50 cm de altura da estante, e 879,8 °C, obtida a 1,75 m de altura do mesmo objeto, ambos a 452 segundos (aproximadamente 7,5 minutos);

- A fase de decaimento do fogo iniciou-se em 8 minutos;

- As temperaturas máximas da fumaça produzida pela estante e sofá foram próximas de 1300 °C e 1150 °C, respectivamente;

- Em 5 minutos de incêndio a fumaça atingiu todos os apartamentos do quarto e quinto pisos, alinhados ao apartamento incendiado. É possível perceber que o acesso da fumaça pelos apartamentos se deu principalmente pelas janelas, consideradas abertas na simulação. No entanto, o Bloco B permaneceu isento do efeito da fumaça até esse momento;

- A primeira influência do incêndio no Bloco B ocorreu em torno de 9 minutos – momento de maior pico de temperatura do incêndio no edifício;

- O tempo total para o escape dos 83 ocupantes foi de 3 min e 13,16 s (193.62s);

- Foi possível perceber que o tempo de fuga diminuiu no sentido ascendente do edifício, ou seja, os pavimentos mais altos tiveram um tempo de escape menor;

- Notou-se que, embora todos os perigos estivessem acionados no quadro de definição dos dados de saída, os ocupantes somente foram envolvidos por VCO_2 (efeito da hiperventilação causada pela exposição do ocupante ao dióxido de carbono), FICO (exposição cumulativa do ocupante ao monóxido de carbono) e FIH (exposição cumulativa dos ocupantes ao calor convectivo e radioativo), sem ocorrência de mortes;

- A arquitetura se configurou eficaz nas distâncias entre os blocos do edifício e a caixa de escada não sofreu o efeito convectivo necessário ao efeito chaminé, o que

possibilitou a rápida e eficaz evacuação dos ocupantes, como também a salvaguarda de bens e da vida.

Dessa maneira, para 30 minutos de incêndio, tempo determinado neste trabalho com caráter comparativo às tabelas de TRRF, verificou-se que edifícios dessa tipologia são de fácil desocupação e sem resultados de danos à vida humana.

8.2 Sugestões para continuidade da pesquisa

Alguns aspectos a serem estudados, e necessários para o amadurecimento do estudo de segurança contra incêndio no Brasil, não foram contemplados nessa pesquisa, sendo sugeridos os seguintes trabalhos complementares:

- a) Elaboração de pesquisa estatística junto ao Corpo de Bombeiros de Minas Gerais para levantamento de dados de ocorrência de incêndio em edificações residenciais, tais como causas, horários de incidência, número e causa de vítimas, duração e local do sinistro, tempo de atendimento do Corpo de Bombeiros, dentre outros aspectos.
- b) Elaboração de pesquisas conjuntas com as faculdades de psicologia e medicina, sendo esta com destaque ao centro de pesquisas em toxicologia, para coleta de dados de vítimas de incêndio. Na psicologia, são sugeridos dados acerca do levantamento da memória do incidente, por parte da vítima, para formulações de dados psico-comportamentais do momento da percepção do incêndio, ao de completude da fuga ou combate ao fogo. Na medicina, sugere-se dados sobre os efeitos nocivos da fumaça, como a carboxihemoglobina, diminuição de O_2 , dentre outros e os índices de morte pós-fuga. Esses dados são relevantes para se fomentar um banco de dados consistente e familiarizado à realidade brasileira, para que possa ser introduzido em softwares de análise comportamental do incêndio, como o *buildingEXODUS*.

- c) Estudo das propriedades combustíveis de materiais presentes em edificações residenciais, a partir da análise de queima em fornos parametrizados, para a composição de dados de liberação e rendimento da fumaça, gases produzidos, radiação térmica, velocidade de propagação da chama, influências de elementos retardantes, dentre outros, possibilitando pesquisas mais avançadas na Engenharia de Materiais em contribuição à segurança contra incêndio.

9

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Acessibilidade de pessoas portadoras de deficiências a edificações, espaço, mobiliário e equipamentos urbanos - NBR 9050*. Rio de Janeiro, 2004.

_____. *Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis - NBR 7505-1*. Rio de Janeiro, 2000.

_____. *Dimensionamento de estruturas de aço em edifícios em situação de incêndio - NBR 14323*. Rio de Janeiro, 1999.

_____. *Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - NBR 14432*. Rio de Janeiro, 2001.

_____. *Perfis estruturais de aço formados a frio - Padronização - NBR 6355*. Rio de Janeiro, 2003.

_____. *Registro de Atividades de Bombeiros - NBR 14023* - Rio de Janeiro, 1997.

_____. *Saídas de emergência em edifícios - NBR 9077*. Rio de Janeiro, 2001.

BEJAN, A; KRAUS, A. D. *Heat Transfer Handbook*. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2003. 1496p.

BERTO, A. F. *Fumaça no incêndio: escadas de segurança*. Tecnologia de Edificações. São Paulo: Pini – IPT, 1988. p. 385- 390.

BERTO, A. F. *Medidas de proteção contra incêndio: aspectos fundamentais a serem considerados no projeto arquitetônico dos edifícios*. São Paulo, 1991. Dissertação (Mestrado) – FAUUSP.

BUCHANAN, A. H. *Fire Engineering Design Guide*. New Zealand: University of Canterbury. A. H. Buchanan Editor, 1994. 203p.

BUCHANAN, A. H. *Structural Design for Fire Safety*. New Zealand: University of Canterbury. John Wiley & Sons Ltd., 2001. 424p.

CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. Editora LTC, 2000.

CENTRO BRASILEIRO DA CONSTRUÇÃO EM AÇO (CBCA). *Eficiência térmica de habitação de baixo custo estruturada em aço*. Disponível em <http://www.cbca-ibs.org.br/noticias_exibe.asp?Codigo=376&Refresh=200656630>. Acesso em 17 de Agosto de 2006.

CIB W014. *Rational Safety Engineering Approach to Fire Resistance in Buildings*. 2001.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO HABITACIONAL E URBANO DO ESTADO DE SÃO PAULO (CDHU-SP). Secretaria de Habitação.

COSIPA. Projeto habitacional COSIPA. Disponível em <<http://www.usiminas.com.br/Share/1/ARQUIVO/60/247/15607/projetohabitacionalcosipa.pdf>> Acesso em 15 de Novembro de 2006.

DRYSDALE, D. *An Introduction to Fire Dynamics*. New York: John Wiley & Sons Ltd., 1999. 470p.

DRYSDALE, D. *An Introduction to Fire Dynamics*. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2002. 424p.

ESSENTIALS OF FIRE FIGHTING. International Fire Service Training Association. Interactive book on cd. 4^a ed. 2001.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EUROCODE 1 – Part 1.2. *Actions on Structures – General Actions – Actions on Structures Exposed to Fire*, Brussels, 2002.

_____. EUROCODE 3 – Part 1.2. *Design of Steel Structures – General Rules*. Structural Fire Design, Brussels, 2003.

_____. EUROCODE 6 – Part 1.2. *Design of Masonry Structures – General Rules*. Structural Fire Design, Brussels, 2001.

_____. EUROCODE 6 – Part 1.3. *Design of Masonry Structures – General rules for building - Detailed rules on lateral loading*. Structural Fire Design, Brussels, 2001.

_____. EUROCODE 6 – Part 3. *Design of Masonry Structures – Simplified calculation methods and simple rules for masonry*. Structural Fire Design, Brussels, 2001.

EWER, J., et al. Overview of the smartfire software. In: Smartfire v4.0. London: University of Greenwich, aug./2004. 14p.

EWER, J., et al. User Guide for the Smartfire Environment. In: Smartfire v4.0. London: University of Greenwich, sep./2004. 236p.

FIRE STATISTICS: *UNITED KINGDOM: 2005*. National Statistics. Office of the Deputy Prime Minister: London.

FOX, R.W.; MCDONALD, A.T; PRITCHARD, P.J. *Introduction to Fluid Mechanics*. Wiley, New York, 2004, pp. 433–442.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. Déficit Habitacional no Brasil. Disponível em < http://www.fjp.mg.gov.br/exibe_subproduto.php?unidade=todas&produto=9>. Acesso em 02 de Novembro de 2006.

GALEA, E. R. et al. User Guide and Technical Manual. In: BuildingExodus v4.07. London: University of Greenwich, mar./2004.

GOMES, A. G. *Sistemas de prevenção contra incêndios*. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 1998. 220p.

GOOGLE EARTH. Disponível em < <http://earth.google.com> >. Acesso em 14 de Abril de 2007.

INSTRUÇÕES TÉCNICAS DO CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO (CBMESP). *Regulamento de Segurança Contra Incêndio das Edificações e Áreas de Risco do Estado de São Paulo*. 2004.

INSTRUÇÕES TÉCNICAS DO CORPO DE BOMBEIROS DE MINAS GERAIS (CBMMG). *Legislação de Segurança Contra Incêndio e Pânico nas áreas de Risco do Estado de Minas Gerais*. 2007.

ISO (1993). *Fire Tests – Reaction to Fire – Rate of Heat Release from Building Products*. Iso 5660. International Organization for Standardization, Geneva.

KENNEDY, P., KENNEDY, K. *Flashover and Fire Analysis: A Discussion of The Practical Use of Flashover Analysis In Fire Investigations*. John A. Kennedy and Associates, Inc. 2003.

MALHOTRA, H. L. *Design of Fire-resisting Structures*. New York: Surrey University Press, 1982. 226p.

MALHOTRA, H. L. *Fire Safety Code for Buildings Explanatory Memorandum*. First Draft. 1982.

MATTOS, L. A. D. *Estruturas de Aço: conceitos, técnicas e linguagem*. São Paulo: Zigurate Editora, 2000.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS (NBS). *Fire Performance of Furnishings as Measured in the NBS Furniture Calorimeter. Part 1*. Department of Health and Human Services. Washington, 1983

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA). Disponível em <<http://www.nfpa.org/categoryList.asp?categoryID=951&URL=Research%20&%20Reports/Fire%20statistics>>. Acesso em 18 de janeiro de 2007.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. *Life Safety Code* - NFPA 101 – 2000.

_____. *Standard for Smoke and Heat Venting* – NFPA 204 – 2004
ANUÁRIOS ESTATÍSTICOS DO CORPO DE BOMBEIROS. Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo (CBPMESP). São Paulo, 1998/2005.

ONO, R. *An Analysis of Fire Safety in Residential Buildings through Fire Statistics*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). 2005.

ONO, R. *Parâmetros de garantia da qualidade do projeto de segurança contra incêndio em edifícios altos*. Ambiente Construído. Porto Alegre, v.7, n.1. p. 97-113. jan./mar. 2007.

ONO, R. *Segurança contra Incêndio em Edificações - Um sistema de coleta e análise de dados para avaliação de desempenho*. 1997. Dissertação (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

PANNONI, F. D.; SILVA, V. P.; FAKURY, R. H.; RODRIGUES, F. C. *Simulation of the Dynamics of the Fire at 41 Angelo Perillo Road, Limeira, Brazil, 2002*. In: IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING., 2005. CILANCE 2005: proceedings. Guarapari, ES, s.n, 2005.

PETERSON, C.E.; SAWER. S.F. *Fire prevention code handbook*. 1^a. ed. Quincy, MA, NFPA, 1997.

POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO. Departamento de Operações e Defesa Civil. *Anuário estatístico do Corpo de Bombeiros*. São Paulo, 1999/2005.

PURKISS, J. A. *Fire Safety Engineering Design of Structures*. Butterworth Heinemann, Aston, 1996. 342p.

QUINTIERE, J. G. *Enclosure Fire Dynamics* . Delmar Publisher, 1998 e 2000, 315p.

ROSSO, T. *Incêndios e arquitetura*. São Paulo, FAUUSP, 1975.

SCHLEICH, J., et al. *International Fire Engineering Design for Steel Structures: State of the Art*. Brussels, Belgium: International Iron and Steel Institute (IISI), 1993.

SILVA, V. P. *Estruturas de aço em situação de incêndio*. São Paulo: Zigurate Editora, 2001. 253p.

The SFPE handbook of fire protection engineering. Society of Fire Protection Engineers e National Fire Protection Association. 3ª ed. 2002.

UNESCO. Città Italiane. Patrimonio Unesco. Disponível em < <http://www.sitiunesco.it/index.phtml?id=17>>. Acesso em 3 de Julho de 2006.

UNIVERSITY OF WISCONSIN. Disponível em < <http://www.wisc.edu/>>. Acesso em 06 de Junho de 2006.

USINAS SIDERÚRGICAS DE MINAS GERAIS (USIMINAS). *Cadernos USITETO*. 2004.

10

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Componentes construtivos estruturais – determinação da resistência ao fogo* – NBR 5628. Rio de Janeiro, 2001.

_____. *Chapas finas de aço-carbono para uso estrutural* - NBR 6649. Rio de Janeiro, 1986.

_____. *Materiais de construção - ensaio de propagação superficial de chama - método do painel radiante* – NBR 9442. Rio de Janeiro, 1986.

_____. *Paredes divisórias sem função estrutural – determinação da resistência ao fogo* – NBR 10636. Rio de Janeiro, 1989.

Costa, C. N.; Ono, R.; Silva, V. P. A. *Importância da compartimentação e suas implicações no dimensionamento das estruturas de concreto para situação de incêndio*. In: Congresso Brasileiro Do Concreto – CBC2005, 47, Volume III. Anais. Trabalho 47CBC0539, 2005. p. III 1-26.

National Fire Protection. *Fire Protection Code Handbook*, 2000.

_____. *Code for Means of Egress for Buildings and Structure*. – NFPA 101B. 1999.

_____. *Guide on Alternative Approaches to Life Safety* – NFPA 101A - 2001

_____. *NFPA's Future in Performance-Based Codes and Standards*, 1995

_____. *Standard for Fire Walls and Fire Barrier Walls* – NFPA 221. 2000.

_____. *Standard on Live Fire Training Evolutions* – NFPA 1403. 2002

_____. *NFPA's Future in Performance-Based Codes and Standards*, 1995.

_____. *Performance Based Codes and Standards Preparations*. 2000.

Panoni, F. D., Silva, V. P., Fakury, R. H., E Rodrigues, F. C. *Simulation of the Dynamics of the Fire at 41 Angelo Perillo Road, Limeira, Brazil, 2002*. Proc. XXVI Congresso Latino-Americano em Métodos Computacionais de Engenharia – CILAMCE 2005, Guarapari, ES, Brasil, 19-21 de Outubro de 2005.

Quintiere, J.G. *Compartment Fire Modeling*. The SFPE Handbook, 2nd edition, Section 3/Chapter 5, 1995.

Vargas, Mauri Resende e 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. 76p.

ANEXO A

TABELA 1 – Classificação das edificações residenciais quanto ao uso.

Grupo	Ocupação/ Uso	Divisão	Descrição	Exemplos
A	Residencial	A-1	Habitações unifamiliares	Casas térreas ou assobradadas, isoladas ou não
		A-2	Habitações multifamiliares	Edifícios de apartamentos em geral
		A-3	Habitações coletivas (grupos sociais equivalentes à família)	Pensionatos, internatos, mosteiros, conventos, residenciais geriátricos

FONTE: ANBT NBR 14432:2001

TABELA 2 – Classificação das edificações quanto à altura.

Grupo	Tipo de edificação		Alturas contadas da soleira de entrada ao piso do último pavimento, não consideradas edículas no atijo destinadas as casas de máquinas e terraços descobertos (H)
Código	Denominação		
K	Edificações térreas		Altura contada do terreno circundante e o piso da entrada igual ou inferior a 1,00 m.
L	Edificações baixas		$H \leq 6,00$ m
M	Edificação de média altura		$6,00$ m $< H \leq 12,00$ m
N	Edificações medianamente altas		$12,00$ m $< H - 30,00$ m
O	Edificações altas	0-1	$H > 30,00$ m
		0-2	Edificações dotadas de pavimentos recuados em relação aos pavimentos inferiores, de tal forma que as escadas dos bombeiros não possam atingi-las, ou situadas em locais onde é impossível ao acesso de viaturas de bombeiros, desde que a sua altura seja $H > 12,00$ m

FONTE: ANBT NBR 14432:2001

TABELA 3 – Classificação das edificações quanto às suas dimensões de planta.

Natureza do enfoque		Código	Classe da edificação	Parâmetros de área
α	Quanto à área do maior pavimento (s_p)	P	De pequeno pavimento	$s_p < 750$ m ²
		Q	De grande pavimento	$s_p \geq 750$ m ²
β	Quanto à área dos pavimentos atuados debaixo da soleira de entrada (s_s)	R	Com pequeno subsolo	$s_s < 500$ m ²
		S	Com grande subsolo	$s_s > 500$ m ²
γ	Quanto à área total (s_t) – soma das áreas de todos os pavimentos da edificação	T	Edificações pequenas	$s_t < 750$ m ²
		U	Edificações médias	750 m ² $\leq s_t < 1500$ m ²
		V	Edificações grande	1500 m ² $\leq s_t < 5000$ m ²
		W	Edificações muito grandes	$s_t > 5000$ m ²

FONTE: ANBT NBR 14432:2001

TABELA 4 – Classificação das edificações quanto ao sistema construtivo.

Código	Tipo	Especificação	Exemplos
X	Edificações em que a propagação do fogo é fácil	Edificações com estrutura e entrepisos combustíveis	Prédios estruturados em madeira, prédios com entrepisos de ferro e madeira, pavilhões em arcos de madeira laminada e outros.
Y	Edificações com mediana resistência ao fogo	Edificações com estrutura resistente ao fogo, mas com fácil propagação de fogo entre os pavimentos	Edificações com paredes-cortinas de vidro; edificações com janelas sem peitoris (distância entre vergas e peitoris das aberturas do andar seguinte menor que 1,00 m); lojas com galerias elevadas e vãos abertos e outros.
Z	Edificações em que a propagação do fogo é difícil	Prédios com estrutura resistente ao fogo e isolamento entre pisos	Prédios com concreto armado calculado para resistir ao fogo, com divisórias incombustíveis, sem divisórias leves, com parapeitos de alvenaria sobre as janelas ou com abas prolongando os entrepisos e outros.

FONTE: ANBT NBR 14432:2001

TABELA 5 - Índice das Distâncias de Segurança

$$d = \alpha \times (\text{largura ou altura}) + \beta$$

Intensidade da exposição			Relação Largura / Altura (ou inversa) - x																	
Classificação da severidade																				
I	II	III	1.0	1.3	1.6	2.0	2.5	3.2	4	5	6	8	10	13	16	20	25	32	40	
Aberturas			Índice das distâncias de segurança																	
			α																	
20	10	5	0.4	0.40	0.44	0.46	0.48	0.49	0.50	0.92	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
30	15	7.5	0.6	0.66	0.73	0.79	0.84	0.88	0.90	0.51	0.93	0.94	0.94	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
40	20	10	0.8	0.80	0.94	1.02	1.10	1.17	1.23	1.27	1.30	1.32	1.33	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34
50	25	12.5	0.9	1.00	1.11	1.22	1.33	1.42	1.51	1.58	1.63	1.66	1.69	1.71	1.71	1.71	1.71	1.71	1.71	1.71
60	30	15	1	1.14	1.26	1.39	1.52	1.64	1.76	1.85	1.93	1.99	2.03	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08	2.08
80	40	20	1.2	1.37	1.52	1.68	1.85	2.02	2.18	2.34	2.48	2.59	2.67	2.73	2.77	2.79	2.80	2.81	2.81	2.81
100	50	25	1.4	1.56	1.74	1.93	2.13	2.34	2.55	2.76	2.95	3.12	3.26	3.36	3.43	3.48	3.51	3.52	3.53	3.53
	60	30	1.6	1.73	1.94	2.15	2.38	2.63	2.88	3.13	3.37	3.60	3.79	3.95	4.07	4.15	4.20	4.22	4.24	4.24
	80	40	1.8	2.04	2.28	2.54	2.82	3.12	3.44	3.77	4.11	4.43	4.74	5.01	5.24	5.41	5.52	5.60	5.64	5.64
	100	50	2.1	2.30	2.57	2.87	3.20	3.55	3.93	4.33	4.74	5.16	5.56	5.95	6.29	6.56	6.77	6.92	7.01	7.01
		60	2.3	2.54	2.84	3.17	3.54	3.93	4.36	4.83	5.30	5.80	6.30	6.78	7.23	7.63	7.94	8.18	8.34	8.34
		80	2.6	2.95	3.31	3.70	4.13	4.61	5.12	5.68	6.28	6.91	7.57	8.24	8.89	9.51	10.0	10.5	10.8	10.8
		100	3	3.32	3.72	4.16	4.65	5.19	5.78	6.43	7.13	7.88	8.67	9.50	10.3	11.1	11.9	10.25	13.1	13.1

ANEXO B

TABELA 1 – Taxa de liberação de calor (HRR*) da estante de 0s a 765s.

Tempo (s)	HRR (kW)
0	6
10	23
69	65
128	125
187	199
246	319
305	596
364	895
423	1760
436	1680
450	1550
488	1070
527	638
565	449
604	432
642	463
681	499
720	512
765	367

* HRR = *Hate Release Rate*

FONTE: NIST (2006)

TABELA 2 – Taxa de liberação de calor (HRR*) do sofá de 0s a 1100s.

Tempo (s)	HRR (kW)	Tempo (s)	HRR (kW)
0	0	560	709,9
10	0	570	582,5
20	0	580	574,3
30	8,151	590	556,1
40	3,641	600	531,7
50	4,067	610	528,9
60	16,41	620	509
70	41,82	630	527,5
80	63,06	640	514,8

(Continua)

TABELA 2 – Taxa de liberação de calor (HRR*) do sofá de 0s a 1100s (Continuação).

Tempo (s)	HRR (kW)	Tempo (s)	HRR (kW)
90	83,06	650	506,3
100	135,9	660	518,9
110	201,6	670	547,5
120	231,1	680	530,9
130	325,7	690	496,5
140	353,4	700	539,3
150	450,7	710	471,7
160	549	720	529,9
170	635,4	730	494,7
180	794,4	740	441,3
190	899,7	750	412,9
200	953,9	760	473,5
210	1053	770	453,3
220	1187	780	438,8
230	1279	790	442
240	1460	800	415,9
250	1595	810	370,4
260	1696	820	383
270	1687	830	403,8
280	1778	840	377,9
290	1869	850	353,4
300	1864	860	356,1
310	1889	870	379,2
320	1897	880	347,3
330	1904	890	315,9
340	2147	900	317,4
350	2359	910	306,6
360	2613	920	324,8
370	3011	930	338,1
380	3260	940	312,4
390	3463	950	308,7
400	3447	960	269,7
410	3294	970	238,1
420	3092	980	278,6
430	2790	990	260,1
440	2508	1000	240,8

(Continua)

TABELA 2 – Taxa de liberação de calor (HRR*) do sofá de 0s a 1100s (Conclusão).

Tempo (s)	HRR (kW)	Tempo (s)	HRR (kW)
450	2312	1010	240,9
460	2238	1020	220,3
470	2184	1030	245,6
480	2033	1040	244,2
490	1851	1050	222,7
500	1667	1060	223,2
510	1393	1070	246,5
520	1240	1080	225,7
530	1120	1090	192,1
540	954,6	1100	216,6
550	815,2		

* HRR = *Heat Release Rate*

FONTE: NIST (2006)

TABELA 3 – Taxa de liberação de Fumaça (SRR*) da estante de 0s a 765s.

Tempo (s)	SRR (kg/s)
0	0
10	0
69	0
128	0,01
187	0,01
246	0,02
305	0,03
364	0,04
423	0,09
436	0,08
450	0,08
488	0,05
527	0,03
565	0,02
604	0,02
642	0,02
681	0,02
720	0,03
765	0,02

* SRR = *Smoke Release Rate*

FONTE: NIST (2006)

TABELA 4 – Taxa de liberação de calor (SRR*) do sofá de 0s a 1100s.

Tempo (s)	SRR (kW)	Tempo (s)	SRR (kW)
0	0	560	1,16E-01
10	0	570	9,55E-02
20	0	580	9,41E-02
30	1,34E-03	590	9,12E-02
40	5,97E-04	600	8,72E-02
50	6,67E-04	610	8,67E-02
60	2,69E-03	620	8,34E-02
70	6,86E-03	630	8,65E-02
80	1,03E-02	640	8,44E-02

(Continua)

TABELA 4 – Taxa de liberação de calor (HRR*) do sofá de 0s a 1100s (Continuação).

Tempo (s)	HRR (kW)	Tempo (s)	HRR (kW)
90	1,36E-02	650	8,30E-02
100	2,23E-02	660	8,51E-02
110	3,30E-02	670	8,98E-02
120	3,79E-02	680	8,70E-02
130	5,34E-02	690	8,14E-02
140	5,79E-02	700	8,84E-02
150	7,39E-02	710	7,73E-02
160	9,00E-02	720	8,69E-02
170	1,04E-01	730	8,11E-02
180	1,30E-01	740	7,23E-02
190	1,47E-01	750	6,77E-02
200	1,56E-01	760	7,76E-02
210	1,73E-01	770	7,43E-02
220	1,95E-01	780	7,19E-02
230	2,10E-01	790	7,25E-02
240	2,39E-01	800	6,82E-02
250	2,61E-01	810	6,07E-02
260	2,78E-01	820	6,28E-02
270	2,77E-01	830	6,62E-02
280	2,91E-01	840	6,20E-02
290	3,06E-01	850	5,79E-02
300	3,06E-01	860	5,84E-02
310	3,10E-01	870	6,22E-02
320	3,11E-01	880	5,69E-02
330	3,12E-01	890	5,18E-02
340	3,52E-01	900	5,20E-02
350	3,87E-01	910	5,03E-02
360	4,28E-01	920	5,32E-02
370	4,94E-01	930	5,54E-02
380	5,34E-01	940	5,12E-02
390	5,68E-01	950	5,06E-02
400	5,65E-01	960	4,42E-02
410	5,40E-01	970	3,90E-02
420	5,07E-01	980	4,57E-02
430	4,57E-01	990	4,26E-02
440	4,11E-01	1000	3,95E-02

(Continua)

TABELA 4 – Taxa de liberação de calor (SRR*) do sofá de 0s a 1100s (Conclusão).

Tempo (s)	HRR (kW)	Tempo (s)	HRR (kW)
450	3,79E-01	1010	3,95E-02
460	3,67E-01	1020	3,61E-02
470	3,58E-01	1030	4,03E-02
480	3,33E-01	1040	4,00E-02
490	3,03E-01	1050	3,65E-02
500	2,73E-01	1060	3,66E-02
510	2,28E-01	1070	4,04E-02
520	2,03E-01	1080	3,70E-02
530	1,84E-01	1090	3,15E-02
540	1,56E-01	1100	3,55E-02
550	1,34E-01		

* SRR = *Smoke Release Rate*

FONTE: NIST (2006)

ANEXO C

TABELA 1 – Tabela de resultado da fuga dos ocupantes no *buildingEXODUS*.

Posição	Sexo	Pavimento	Idade	VCO2	FICO (ppm)	FIH (s)
1	Mulher	1	46	0	2.41	4.89
2	Mulher	3	49	0.09	25.22	24.05
3	Homem	2	69	0	17.26	27.45
4	Homem	1	18	0	7.95	27.81
5	Mulher	3	23	0.82	30.22	28.48
6	Homem	5	25	0.00	38.64	34.24
7	Homem	5	25	0	44.02	37.83
8	Mulher	2	40	0	17.76	47.58
9	Mulher	3	42	0.11	29.36	60.41
10	Homem	3	46	1.70	29.65	61.51
11	Homem	1	48	0	1.91	73.04
12	Mulher	5	24	0	48.07	74.54
13	Mulher	1	34	0	6.95	76.58
14	Mulher	1	39	0	8.16	87.59
15	Homem	1	20	0.59	8.71	88.51
16	Mulher	3	21	0	28.39	88.99
17	Mulher	1	22	0	8.30	90.28
18	Homem	1	19	1.09	9.50	90.42
19	Homem	3	54	0	29.39	91.83
20	Homem	1	21	1.01	7.88	91.92
21	Homem	1	50	0.83	6.04	91.92
22	Homem	3	19	0.00	29.45	97.33
23	Mulher	3	50	0.67	29.10	100.99
24	Homem	3	17	0	29.72	102.09
25	Homem	4	51	0	33.09	104.06
26	Mulher	3	52	0.60	24.47	111.12
27	Homem	3	18	2.08	21.12	111.70
28	Homem	2	18	0	13.82	112.72
29	Homem	3	57	0.81	19.27	116.83
30	Mulher	5	15	1.65	42.90	117.81
31	Homem	5	19	7.91	43.90	119.25
32	Mulher	2	17	0	14.65	120.52
33	Homem	2	40	3.01	20.77	122.00

(Continua)

TABELA 1 – Tabela de resultado da fuga dos ocupantes no *buildingEXODUS*
(Continuação).

Posição	Sexo	Pavimento	Idade	VCO2	FICO (ppm)	FIH (s)
34	Homem	2	19	3.35	21.20	123.42
35	Mulher	2	30	2.95	20.35	124.32
36	Mulher	2	22	4.72	21.56	125.07
37	Mulher	2	20	3.36	14.44	126.39
38	Homem	3	18	4.09	25.96	126.75
39	Homem	1	17	0	7.44	127.32
40	Homem	1	44	0	7.95	128.06
41	Homem	4	17	2.85	39.43	128.25
42	Homem	4	51	2.38	39.35	129.19
43	Mulher	3	21	1.64	26.37	130.33
44	Mulher	3	19	1.24	26.08	131.62
45	Homem	3	20	5.27	26.34	131.92
46	Homem	4	20	3.11	41.90	133.25
47	Homem	3	18	4.81	26.45	133.42
48	Homem	4	18	8.90	41.20	134.92
49	Homem	2	66	2.04	9.54	135.82
50	Mulher	4	50	4.54	41.27	136.70
51	Mulher	5	20	4.10	43.90	137.57
52	Mulher	2	62	1.44	15.35	138.98
53	Mulher	2	46	2.62	14.89	139.88
54	Mulher	5	17	2.97	50.13	140.65
55	Homem	2	19	2.35	20.98	142.09
56	Homem	5	57	4.06	50.78	142.46
57	Mulher	2	17	3.93	20.22	143.52
58	Homem	5	50	3.72	45.21	144.96
59	Mulher	4	24	3.80	44.28	146.23
60	Mulher	5	17	3.32	51.62	146.84
61	Mulher	4	27	7.84	43.00	147.92
62	Mulher	2	19	8.01	22.71	148.67
63	Homem	5	45	11.42	54.32	149.64
64	Homem	5	8	2.50	46.51	150.61
65	Mulher	5	41	15.72	53.42	151.09
66	Homem	3	18	1.36	29.74	154.17
67	Homem	1	56	0	6.75	156.23
68	Homem	1	79	0	8.30	157.02

(Continua)

TABELA 1 – Tabela de resultado da fuga dos ocupantes no *buildingEXODUS*
(Conclusão).

Posição	Sexo	Pavimento	Idade	VCO2	FICO (ppm)	FIH (s)
69	Mulher	1	23	0	8.38	157.49
70	Homem	4	19	1.26	42.08	157.87
71	Mulher	1	80	0	8.50	159.20
72	Homem	5	10	5.18	47.26	159.76
73	Mulher	5	52	3.50	50.44	160.87
74	Mulher	1	46	0	7.25	161.95
75	Mulher	5	32	5.69	48.41	162.42
76	Mulher	4	38	3.70	39.88	162.63
77	Mulher	4	35	0	34.65	167.13
78	Mulher	4	30	0.42	36.39	168.41
79	Mulher	2	72	0	19.52	175.83
80	Homem	4	66	1.31	35.00	177.24
81	Mulher	5	48	1.05	44.23	177.25
82	Mulher	4	58	0	34.29	185.17
83	Mulher	4	52	0	34.83	193.62