THIAGO MENEZES DE ANDRADE

COMPARTIMENTAÇÃO DE EDIFÍCIOS PARA A SEGURANÇA CONTRA
INCÊNDIO

São Paulo
2018

THIAGO MENEZES DE ANDRADE

COMPARTIMENTAÇÃO DE EDIFÍCIOS PARA A SEGURANÇA CONTRA
INCÊNDIO

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências

São Paulo
2018

THIAGO MENEZES DE ANDRADE

COMPARTIMENTAÇÃO DE EDIFÍCIOS PARA A SEGURANÇA CONTRA
INCÊNDIO

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de concentração:
Construção Civil

Orientador:
Prof. Dr. Valdir Pignatta e Silva

São Paulo
2018

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 10 de agosto de 2018

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Catálogo-na-publicação

Andrade, Thiago Menezes de
Compartimentação de edifícios para a segurança contra incêndio / T. M.
Andrade -- São Paulo, 2018.
321 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.INCÊNDIO 2.MODELAGEM COMPUTACIONAL 3.ENGENHARIA CIVIL
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

Nome: ANDRADE, Thiago Menezes de Andrade

Título: Compartimentação de edifícios para a segurança contra incêndio

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Dedico este trabalho com todo meu amor a Silvia, Maia e Maíra, pais e irmã queridos que me apoiaram e incentivaram durante todo o longo período de desenvolvimento desta dissertação.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Valdir Pignatta e Silva, por toda a confiança, apoio e orientação, sem a qual este trabalho jamais teria se concretizado.

Ao Professor Doutor Fernando Akira Kurokawa, por todo o auxílio e tempo dispendido.

À Sara Prates, que me apoiou e incentivou no período mais difícil dessa dissertação, por todo o companheirismo e cumplicidade.

Aos amigos Cristiano Schmidt e José Leite pelo carinho e amizade.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o
que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”
(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Os métodos para se projetar um edifício com segurança adequada para a situação de incêndio são pouco estudados e aplicados no Brasil. Essa falta de estudo é ainda mais visível quando nos deparamos com o assunto compartimentação, tópico pouco desenvolvido e ainda não normatizado pela ABNT.

A compartimentação, especialmente a vertical, é fundamental para a segurança à vida, pois minimiza a propagação do incêndio entre pavimentos de edifícios.

Para validar os procedimentos normatizados de dimensionamento de estruturas em situação de incêndio é necessário considerar que as edificações são compartimentadas. Atualmente as exigências sobre compartimentação são apresentadas apenas em Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros, variando de estado para estado.

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre a compartimentação, uma análise de sua influência na segurança contra incêndio das edificações e a comparação da visão do assunto em países de quatro continentes distintos.

Após um estudo comparativo entre a visão e normatização do Brasil, Portugal, Inglaterra, Hong Kong e Estados Unidos foram realizadas simulações computacionais com base na teoria dos volumes finitos e da fluidodinâmica computacional de forma a se tentar verificar de forma mais aprofundada a influência das exigências de compartimentação na real propagação de um incêndio.

Por fim, o principal foco deste trabalho é demonstrar que é possível utilizar a Dinâmica dos Fluidos Computacionais (CFD) de maneira a auxiliar o estudo do incêndio, e possibilitar uma análise mais aprofundada do assunto.

Palavras-Chave: incêndio, compartimentação, normatização, resistência ao fogo, dinâmica dos fluidos computacional, FDS, modelagem computacional.

ABSTRACT

Methods for designing a building with adequate fire safety are poorly studied and applied in Brazil. This lack of study is even more present in the compartmentation subject, much-undeveloped topic and not yet standardized by ABNT.

The compartmentation, especially the vertical, is critical to life safety, since it minimizes the spread of fire between building floors, and to validate the standardized procedures for structures in fire situation, because an important hypothesis of design methods is the vertical compartmentation. Currently the requirements of compartmentation are only present in the Technical Instructions of the States Fire Department, varying from state to state.

This paper presents a study on compartmentation, its influence on the fire safety of buildings and a comparison of the vision of some countries of four different continents on this subject.

After a comparative study of the vision and standardization between countries such as Brazil, Portugal, England, Hong Kong and the United States, computer simulation based on the theory of the finite volumes and computational fluid dynamics were carried out in order to try to check thoroughly the influence of compartmentation requirements in a real fire spread.

Ultimately, the main focus of this work is to demonstrate that the Computational Fluid Dynamics (CFD) can be used in order to assist the study of fire, in order to allow a more in-depth analysis of the subject.

Keywords: fire, compartmentation, standardization, fire resistance, computational fluid dynamics, FDS, computational modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fluxo de calor através de um volume elementar	53
Figura 2 – Representação gráfica do fogo. a) Triângulo do fogo; b) Tetraedro do fogo	55
Figura 3 – Exemplo dos detalhes da compartimentação horizontal	61
Figura 4 - Exemplo dos detalhes da compartimentação vertical	62
Figura 5 - Curvas temperatura-tempo de incêndios variando ventilação e carga de incêndio.....	73
Figura 6 - Curva de incêndio real em ensaio (perfil vertical)	75
Figura 7 - Curva de incêndio real em ensaio (perfil horizontal)	75
Figura 8 - Curva de incêndio real, apresentando suas três fases.	76
Figura 9 – Equivalência de severidade entre a curva do incêndio real e a curva normalizada.....	78
Figura 10 – Modelo do incêndio natural em comparação com o incêndio real.....	79
Figura 11 - Exemplo de curva natural de incêndio em comparação com a curva de incêndio-padrão.....	80
Figura 12 - Curvas temperatura-tempo segundo grau de ventilação	81
Figura 13 – Curva temperatura-tempo com ramo descendente após 150 min de incêndio.....	82
Figura 14 - Fluxo de calor em um compartimento.....	83
Figura 15 - Calor gerado durante a combustão em função do tempo	84
Figura 16 - Fluxo de calor através de um volume elementar do elemento de vedação	84
Figura 17 - Exemplo de curvas de Pettersson variando a carga de incêndio.....	85
Figura 18 - Exemplo de curvas de Pettersson variando o grau de ventilação.....	85
Figura 19 - Exemplo de curva natural pelo Eurocode 1 variando o grau de ventilação com a relação $\sqrt{(\rho \times c \times \lambda)}$ fixa = 1.160 [J/m ² .s ^{1/2} .°C].....	86
Figura 20 - Curva de incêndio-padrão segundo a ISO 834 (1999).....	89
Figura 21 - Curvas de incêndio-padrão segundo o Eurocode 1 - EN 1991-1-2 (2002)	90
Figura 22 - Curva de incêndio-padrão segundo a ASTM E 119 (2000).....	91
Figura 23 – Comparativo das curvas de incêndio-padrão	91

Figura 24 – Comparativo das curvas de incêndio natural	92
Figura 25 – Comparativo das curvas de incêndio-padrão com as curvas de incêndio natural	93
Figura 26 – Elevação de fachada para exemplo de distância entre áreas de exposição a risco de dois compartimentos.....	112
Figura 27 - Exemplo de uma região contínua e sua discretização	134
Figura 28 – Exemplo de tipos de estruturas de malhas:	136
Figura 29 - Exemplo de malha uniforme	137
Figura 30 - Exemplo de malha não uniforme.....	138
Figura 31 - Exemplo de malha não estruturada	138
Figura 32 – Posição dos valores de cálculo em uma célula da malha	148
Figura 33 – Vistas superior e lateral da área de simulação e posicionamento da carga de incêndio	154
Figura 34 - Visão 3D do modelo.....	155
Figura 35 – Disposição do plano de medição de temperatura no modelo.....	157
Figura 36 - Representação gráfica do incêndio modelado nos instantes $t = 0, 390, 495$ e 540 s	158
Figura 37 - Temperaturas no plano Y-Z nos instantes $t = 0, 390, 495$ e 540 s.....	159
Figura 38 – Curva da taxa de liberação de calor (HRR) do modelo	159
Figura 39 - Curva da taxa de geração de gases no tempo (MLR_TOTAL) do modelo	160
Figura 40 – Vista inferior do modelo para destacar a área aberta.....	161
Figura 41 - Visão 3D do modelo.....	161
Figura 42 - Disposição do plano de medição de temperatura no modelo	164
Figura 43 - Representação gráfica do incêndio modelado nos instantes $t = 0, 60, 600$ e 1000 s	165
Figura 44 - Temperaturas no plano Y-Z nos instantes $t = 0, 60, 600, 700, 900$ e 1000 s	166
Figura 45 – Curva da taxa de liberação de calor (HRR) do modelo	167
Figura 46 - Curva da taxa de geração de gases no tempo (MLR_TOTAL) do modelo	167
Figura 47 - Vista inferior do modelo para destacar a área aberta e corte	168
Figura 48 - Visão 3D do modelo.....	169
Figura 49 – Detalhe da malha mais refinada na área do “estéreo”	170

Figura 50 – Detalhe 3D do “estéreo” e do ignitor	171
Figura 51 - Disposição do plano de medição de temperatura no modelo	172
Figura 52 - Representação gráfica do incêndio modelado nos instantes $t = 0, 30, 240$ e 1000 s	173
Figura 53 - Representação gráfica do fogo modelado nos instantes $t = 0, 30, 300, 600, 700$ e 1000 s	174
Figura 54 - Temperaturas no plano Y-Z nos instantes $t = 0, 30, 120, 700, 720$ e 1000 s	175
Figura 55 – Curva da taxa de liberação de calor (HRR) do modelo	176
Figura 56 - Curva da energia de radiação (Q_{RADI}) do modelo.....	176
Figura 57 - Curva da energia de convecção (Q_{CONV}) do modelo	177
Figura 58 - Curva da energia de condução (Q_{COND}) do modelo.....	177
Figura 59 - Curva da energia total (Q_{TOTAL}) do modelo	178
Figura 60 - Curva da taxa de geração de gases no tempo (MLR_{TOTAL}) do modelo	178
Figura 61 – Vista superior do modelo do compartimento para os estudos de caso preliminares.....	182
Figura 62 – Visão 3D do compartimento modelado para os estudos de caso preliminares.....	183
Figura 63 - Disposição dos pontos de medição de temperatura no compartimento (vista superior).....	186
Figura 64 - Disposição dos pontos de medição de temperatura no compartimento (visão 3D).....	187
Figura 65 - Disposição dos planos de medição de temperatura no modelo.....	188
Figura 66 - Disposição da carga de incêndio no compartimento.....	190
Figura 67 - Perspectiva do incêndio aos 15 min de simulação com presença da fumaça	191
Figura 68 - Representação gráfica do incêndio nos instantes $t = 0, 15, 300$ e 900 s	192
Figura 69 - Temperaturas no plano Y-Z nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s	193
Figura 70 - Temperaturas no plano X-Z com $Y = 4,4\text{ m}$ nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s	193
Figura 71 - Temperaturas no plano X-Y nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s	194

Figura 72 - Temperaturas no plano X-Y no instantes $t = 612$ s	195
Figura 73 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da cozinha	195
Figura 74 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise do quarto	196
Figura 75 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da sala	196
Figura 76 - Disposição da carga de incêndio no compartimento	197
Figura 77 - Perspectiva do incêndio aos 15 min de simulação com presença da fumaça	198
Figura 78 - Representação gráfica do incêndio nos instantes $t = 0, 15, 300$ e 900 s	199
Figura 79 - Temperaturas no plano Y-Z nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s	200
Figura 80 - Temperaturas no plano X-Z com $Y = 4,4$ m nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s	200
Figura 81 - Temperaturas no plano X-Y nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s	201
Figura 82 - Temperaturas no plano X-Y no instantes $t = 780$ s	202
Figura 83 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da cozinha	202
Figura 84 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise do quarto	203
Figura 85 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da sala	203
Figura 86 - Disposição da carga de incêndio no compartimento	204
Figura 87 - Perspectiva do incêndio aos 15 min de simulação com presença da fumaça	205
Figura 88 - Representação gráfica do incêndio nos instantes $t = 0, 15, 300$ e 900 s	206
Figura 89 - Temperaturas no plano Y-Z nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s	207
Figura 90 - Temperaturas no plano X-Z com $Y = 4,4$ m nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s	207
Figura 91 - Temperaturas no plano X-Y nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s	208
Figura 92 - Temperaturas no plano X-Y no instantes $t = 345$ s	209
Figura 93 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da cozinha	209
Figura 94 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise do quarto	210
Figura 95 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da sala	210
Figura 96 - Visão 3D do modelo para o estudo de caso final	213
Figura 97 – Vista superior dos compartimentos inferiores	214
Figura 98 – Vista superior dos compartimentos superiores	215

Figura 99 – Vista lateral do modelo para visualização do posicionamento da carga de incêndio.....	217
Figura 100 – Detalhamento do posicionamento dos aparelhos de medição de temperatura.....	220
Figura 101 - Disposição dos aparelhos de medição de temperatura nos compartimentos inferiores	221
Figura 102 - Disposição dos aparelhos de medição de temperatura nos compartimentos superiores	222
Figura 103 - Disposição dos planos de medição de temperatura.....	223
Figura 104 – Evolução da fumaça gerada pelo incêndio nos instantes $t = 0, 15, 900$ e 1800 s	224
Figura 105 – Vista em planta da fumaça no andar superior nos instantes $t = 30$ e 300 s	224
Figura 106 - Detalhe do incêndio modelado nos instantes $t = 0, 60, 1650$ e 3600 s	225
Figura 107 - Temperaturas no plano Y-Z com $X = 4,0$ m nos instantes $t = 0, 30, 60, 1250, 1500$ e 3600 s	226
Figura 108 – Detalhe da temperatura do plano Y-Z com $X = 4,0$ no instante $t = 720$ s	227
Figura 109 – Temperatura do plano Y-Z com $X = 8,8$ m nos instantes $t = 0, 170, 570$ e 810 s.....	227
Figura 110 - Temperaturas no plano X-Z com $Y = 4,4$ m nos instantes $t = 0, 60, 1200$ e 3600 s.....	228
Figura 111 – Detalhe da temperaturas no plano X-Y com $Z = 2,0$ m no instante $t = 820$ s	228
Figura 112 - Temperaturas no plano X-Y com $Z = 2,0$ m nos instantes $t = 0, 30, 60, 1200, 1500$ e 3600 s	229
Figura 113 - Temperaturas no plano X-Y com $Z = 4,6$ m nos instantes $t = 0, 60, 1200$ e 3600 s	230
Figura 114 - Detalhe da temperaturas no plano X-Y com $Z = 4,6$ m no instante $t = 830$ s	230
Figura 115 - Curva taxa de liberação de calor (HRR) do modelo.....	231
Figura 116 - Curva da energia de radiação (Q_{RADI}) do modelo.....	231

Figura 117 - Curva da energia de convecção (Q_CONV) do modelo	232
Figura 118 - Curva da energia de condução (Q_COND) do modelo	232
Figura 119 - Curva da energia total (Q_TOTAL) do modelo	233
Figura 120 - Curva da taxa de geração de gases no tempo (MLR_TOTAL) do modelo	233
Figura 121 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da cozinha ...	234
Figura 122 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise do quarto	234
Figura 123 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da sala	235
Figura 124 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da janela do quarto do compartimento superior esquerdo	235
Figura 125 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da janela do quarto do compartimento inferior direito	236
Figura 126 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da janela do quarto do compartimento superior direito	236
Figura 127 - Exemplo de uma porta corta fogo	254
Figura 128 - Exemplo de um vedador corta fogo	256
Figura 129 - Exemplo de um vedador corta fogo	256
Figura 130 - Exemplo de um registro corta fogo	257
Figura 131 - Exemplo de selo corta fogo	258
Figura 132 - Exemplo de chuveiro automático	259

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potencial Calorífico [MJ/kg].....	70
Tabela 2 - Potencial Calorífico por m ³ de armazenamento [MJ/m ³]	71
Tabela 3 - Carga de Incêndio-Padrão [MJ/m ²]	71
Tabela 4 - Tabela para obtenção da curva de incêndio-padrão segundo ASTM	90
Tabela 5 - TRRF para cada elemento por tipo de construção nos Estados Unidos	100
Tabela 6 - Classificação dos elementos.....	103
Tabela 7 – Área Máxima de Compartimentação para o Estado de São Paulo	116
Tabela 8 - Área Máxima de Compartimentação para o Portugal.....	118
Tabela 9 - Área Máxima de Compartimentação para a Inglaterra.....	119
Tabela 10 - Área Máxima de Compartimentação para Hong Kong	120
Tabela 11 - Área Máxima de Compartimentação, número máximo de andares e altura máxima da edificação para os Estados Unidos.....	123
Tabela 12 – Caracterização da Madeira	156
Tabela 13 – Tabela de áreas do apartamento.....	181
Tabela 14 – Caracterização da Madeira	185
Tabela 15 – Carga de incêndio	190
Tabela 16 – Carga de incêndio	198
Tabela 17 – Carga de incêndio	205
Tabela 18 – Tabela de áreas do apartamento.....	213
Tabela 19 – Caracterização da Madeira	216
Tabela 20 – Carga de incêndio do compartimento incendiado.....	218
Tabela 21 – Carga de incêndio dos demais compartimentos.....	218
Tabela 22 - TRRF para habitações	260
Tabela 23 - TRRF para estacionamentos	260
Tabela 24 - TRRF para edifícios administrativos ou de serviço	261
Tabela 25 - TRRF para instituições de ensino	261
Tabela 26 - TRRF para hospitais ou casas de repouso	261
Tabela 27 - TRRF para locais de reunião de público	262
Tabela 28 - TRRF para edifício de hospedagem.....	262
Tabela 29 - TRRF para edifícios comerciais	262
Tabela 30 - TRRF para museus ou galerias de arte	263

Tabela 31 - TRRF para bibliotecas ou arquivos	263
Tabela 32 - TRRF para indústrias	264
Tabela 33 - TRRF para depósitos	264
Tabela 34 - TRRF para habitações	265
Tabela 35 - TRRF para estacionamentos	265
Tabela 36 - TRRF para edifícios administrativos ou de serviço	265
Tabela 37 - TRRF para instituições de ensino	266
Tabela 38 - TRRF para hospitais ou casas de repouso	266
Tabela 39 - TRRF para locais de reunião de público	266
Tabela 40 - TRRF para edifício de hospedagem.....	267
Tabela 41 - TRRF para edifícios comerciais	267
Tabela 42 - TRRF para museus ou galerias de arte	267
Tabela 43 - TRRF para bibliotecas ou arquivos	268
Tabela 44 - TRRF para indústrias	269
Tabela 45 - TRRF para depósitos	269
Tabela 46 - TRRF para habitações	270
Tabela 47 - TRRF para estacionamentos	270
Tabela 48 - TRRF para edifícios administrativos ou de serviço	270
Tabela 49 - TRRF para instituições de ensino	271
Tabela 50 - TRRF para hospitais ou casas de repouso	271
Tabela 51 - TRRF para locais de reunião de público	271
Tabela 52 - TRRF para edifício de hospedagem.....	272
Tabela 53 - TRRF para edifícios comerciais	272
Tabela 54 - TRRF para museus ou galerias de arte	272
Tabela 55 - TRRF para bibliotecas ou arquivos	273
Tabela 56 - TRRF para indústrias	273
Tabela 57 - TRRF para depósitos	273
Tabela 58 - TRRF para habitações	274
Tabela 59 - TRRF para estacionamentos	274
Tabela 60 - TRRF para edifícios administrativos ou de serviço	274
Tabela 61 - TRRF para instituições de ensino	274
Tabela 62 - TRRF para hospitais ou casas de repouso	274
Tabela 63 - TRRF para locais de reunião de público	275
Tabela 64 - TRRF para edifício de hospedagem.....	275

Tabela 65 - TRRF para edifícios comerciais	275
Tabela 66 - TRRF para museus ou galerias de arte	275
Tabela 67 - TRRF para bibliotecas ou arquivos	275
Tabela 68 - TRRF para indústrias	276
Tabela 69 - TRRF para depósitos	276
Tabela 70 - TRRF para habitações	277
Tabela 71 - TRRF para estacionamentos	277
Tabela 72 - TRRF para edifícios administrativos ou de serviço	278
Tabela 73 - TRRF para instituições de ensino	278
Tabela 74 - TRRF para hospitais ou casas de repouso	279
Tabela 75 - TRRF para locais de reunião de público	279
Tabela 76 - TRRF para edifício de hospedagem.....	280
Tabela 77 - TRRF para edifícios comerciais	280
Tabela 78 - TRRF para museus ou galerias de arte	281
Tabela 79 - TRRF para bibliotecas ou arquivos	281
Tabela 80 - TRRF para indústrias	282
Tabela 81 - TRRF para depósitos	283

LISTA DE SÍMBOLOS

A = Área [m^2]

A_i = Área da abertura i [m^2]

A_r = Diferença entre a área total do compartimento e a área de ventilação [m^2]

A_t = Área total do compartimento [m^2]

A_a = Área da superfície exposta ao fogo [m^2]

A_v = Área de ventilação [m^2]

A_w = Área da abertura de ventilação [m^2]

c = Calor específico [$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]

d_c = Distância frente-fundo do compartimento [m]

e = Energia interna

F_i = Componente da força na direção i

h = Altura média das aberturas [m]

$\dot{h}_c$ = Fluxo convectivo por unidade de área [W/m^2]

h_i = Altura da abertura i [m]

$\dot{h}_r$ = Fluxo radiante por unidade de área [W/m^2]

h_w = Altura da abertura de ventilação [m]

i = Índice para a i -ésima linha

j = Índice para a j -ésima coluna

l_0 = Comprimento inicial [m]

L = Carga de incêndio equivalente em madeira [kg]

l_f = Comprimento final [m]

m_f = Razão de queima em massa [kg/s]

m_{fe} = Razão de queima equivalente à da madeira [kg/m^3]

p = Pressão do fluido

$\dot{q}$ = Vetor fluxo de calor

q'' = Fluxo de calor por unidade de área aquecida [W/m^2]

$q_{fi,d}$ = Carga de incêndio em relação à área [MJ/m^2]

$\dot{Q}_c$ = Fluxo de calor transferido por convecção [W]

$\dot{Q}_{comb}$ = Calor gerado durante a combustão [W]

$\dot{Q}_k$ = Fluxo de calor transferido por condução [W]

$\dot{Q}_p$ = Calor dissipado para e através dos elementos de vedação [W]

$\dot{Q}_r$ = Fluxo de calor emitido por radiação [W]

$\dot{Q}_R$ = Calor dissipado por radiação pelas aberturas [W]

$\dot{Q}_V$ = Valor da troca de calor com o ambiente externo através das aberturas [W]

t = Tempo

t = Tempo de incêndio [min]

t_{ig} = Tempo que demora para o material entrar em autoignição [s]

τ_{ij} = Tensão viscosa na direção ij

u = Velocidade na direção x

v = Velocidade na direção y

V = Vetor velocidade

w = Velocidade na direção z

w_c = Largura da parede que contém a abertura de ventilação [m]

α = Coeficiente de dilatação térmica linear [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

α_c = Coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$]

α_r = Coeficiente de transferência de calor por radiação [$\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$]

Δl = Variação do comprimento [m]

Δt_f = Duração do incêndio [s]

Δx = distância discreta em x

Δy = distância discreta em y

Δz = distância discreta em z

$\Delta \theta$ = Variação da temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

ε_{1-2} = Diferença entre as emissividades dos corpos 1 e 2

ε_r = Emissividade da superfície radiante

θ = Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

θ_0 = Temperatura inicial [$^{\circ}\text{C}$]

θ_1 = Temperatura do corpo 1 [$^{\circ}\text{C}$]

θ_2 = Temperatura do corpo 2 [$^{\circ}\text{C}$]

θ_a = Temperatura da superfície exposta ao fogo [$^{\circ}\text{C}$]

θ_f = Temperatura final [$^{\circ}\text{C}$]

θ_g = Temperatura dos gases quentes [$^{\circ}\text{C}$]

θ_{ig} = Temperatura de autoignição [$^{\circ}\text{C}$]

$\theta_{g,max}$ = Temperatura máxima dos gases [°C]

$\theta_{t,max}$ = Temperatura máxima [°C]

λ = Coeficiente de condutividade térmica [W/(m.°C)]

λ = Segundo coeficiente de viscosidade dinâmica do fluido

μ = Primeiro coeficiente de viscosidade dinâmica do fluido

ν = Grau de ventilação [m^{1/2}]

ρ = Densidade [kg/m³]

σ = Constante de Boltzmann = $5,6 \times 10^{-8}$ [W/m².°C]

∇ = Vetor gradiente

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	7
RESUMO.....	9
ABSTRACT	10
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	11
LISTA DE TABELAS	17
LISTA DE SÍMBOLOS.....	20
SUMÁRIO.....	23
1 INTRODUÇÃO	39
1.1 Objetivos	42
1.1.1 Objetivos Gerais	42
1.1.2 Objetivos Específicos	42
1.2 Justificativa.....	43
1.3 Método	44
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	46
2.1 Princípios da Termodinâmica.....	46
2.1.1 Lei Zero da Termodinâmica (Equilíbrio Térmico).....	46
2.1.1.1 Dilatação Térmica	47
2.1.2 Primeira Lei da Termodinâmica	48
2.1.2.1 Calor Específico	49
2.1.2.2 Transferência de Calor.....	50
2.1.3 Segunda Lei da Termodinâmica	53
2.2 Fundamentos de Fogo e Incêndio.....	54
2.2.1 Combustão	55
2.2.2 Temperatura de Combustão.....	55
2.2.3 Ponto de Fulgor e Ponto de Combustão dos Líquidos	55

2.2.4	Gases Combustíveis.....	56
2.2.5	Temperatura de Autoignição	56
2.2.6	Propagação Superficial de Chama	57
2.3	O Conceito de Compartimentação	57
2.3.1	Isolamento térmico	58
2.3.2	Estanqueidade.....	58
2.3.3	Estabilidade ao fogo	59
2.3.4	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF).....	59
2.3.5	Tempo de Resistência ao Fogo (TRF).....	59
2.3.6	Compartimentação horizontal	60
2.3.7	Compartimentação vertical.....	61
2.3.8	Segundo instituições brasileiras	62
2.3.9	Segundo instituições internacionais.....	65
2.3.9.1	Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC – Portugal) - Portaria nº 1532/2008	65
2.3.9.2	<i>Her Majesty's Government (HM Government – Inglaterra) – The Building Regulations 2010 – Fire Safety</i>	66
2.3.9.3	Buildings Department (Hong Kong) – Code of Practice for Fire Safety in Buildings 2011	66
2.3.9.4	<i>International Code Council (ICC – Estados Unidos) – 2012 International Building Code</i>	67
2.3.10	Comparação das normas	67
2.3.11	Distância de isolamento de risco.....	68
2.4	O Incêndio na Engenharia.....	69
2.4.1	Carga de Incêndio	70
2.4.2	Grau de Ventilação	72
2.4.2.1	Incêndio Controlado pela Ventilação.....	73
2.4.2.2	Incêndio Controlado pela Carga de Incêndio	74

2.4.3	Curva de Incêndio Real	74
2.4.3.1	Severidade do Incêndio	77
2.4.4	Curva de Incêndio Natural	78
2.4.4.1	ABNT NBR 14432:2001	80
2.4.4.2	SBN 67.....	80
2.4.4.3	Modelo de Pettersson	82
2.4.4.4	Eurocode 1 - EN 1991-1-2 (2002)	86
2.4.5	Curva de Incêndio-Padrão.....	87
2.4.5.1	ISO 834 (1999).....	88
	ABNT NBR 5628:2001 e ABNT NBR 14432:2001.....	89
2.4.5.2	Eurocode 1 - EN 1991-1-2 (2002)	89
2.4.5.3	ASTM E 119 (2000)	90
2.4.6	Análise.....	91
3	LEGISLAÇÕES, CÓDIGOS, NORMAS E REGULAMENTOS	95
3.1	Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) de paredes ou lajes de compartimentação	96
3.1.1	Brasil.....	97
3.1.2	Portugal	97
3.1.3	Inglaterra	98
3.1.4	Hong Kong.....	98
3.1.5	Estados Unidos.....	99
3.1.6	Análise.....	101
3.2	Elementos de Compartimentação	101
3.2.1	Brasil.....	102
3.2.2	Portugal	103
3.2.3	Inglaterra	104
3.2.4	Hong Kong.....	106

3.2.5	Estados Unidos.....	107
3.2.6	Análise.....	108
3.3	Compartimentação Vertical.....	109
3.3.1	Brasil.....	109
3.3.2	Portugal	110
3.3.3	Inglaterra	111
3.3.4	Hong Kong.....	112
3.3.5	Estados Unidos.....	113
3.3.6	Análise Crítica.....	113
3.4	Compartimentação Horizontal.....	115
3.4.1	Brasil.....	115
3.4.2	Portugal	117
3.4.3	Inglaterra	118
3.4.4	Hong Kong.....	120
3.4.5	Estados Unidos.....	121
3.4.6	Análise.....	124
3.5	Análise Geral.....	126
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA COMPUTACIONAL.....	128
4.1	Dinâmica dos Fluidos Computacional	128
4.1.1	Equações de Navier-Stokes	130
4.1.2	Etapas para solução numérica do CFD	133
4.1.3	Tipos de estruturas de malhas.....	134
4.1.4	Tipos de malhas	137
4.2	Uma Visão Geral Sobre: Diferenças Finitas, Volumes Finitos e Elementos Finitos	139
4.3	Método dos Volumes Finitos (MVF)	141
4.3.1	Condição de Contorno.....	143

4.4	Simulação das Grandes Escalas de Turbulência (LES).....	143
5	PROGRAMAS PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIO	146
5.1	<i>Fire Dynamics Simulator</i> (FDS).....	146
5.1.1	Malha.....	147
5.1.2	Transporte de Massa.....	148
5.1.3	Procedimento de Cálculo da Pressão.....	149
5.1.4	Combustão e Radiação	150
5.1.4.1	Combustão.....	150
5.1.4.2	Radiação.....	151
5.1.5	Procedimento de Solução.....	152
5.2	<i>PyroSim</i>	152
5.3	<i>Smokeview</i> (SMV).....	152
6	SIMULAÇÕES PRELIMINARES	153
6.1	Queima de Ripa de Madeira	153
6.1.1	Hipóteses e características do modelo	153
6.1.1.1	Dimensões	153
6.1.1.2	Tempo de simulação.....	155
6.1.1.3	Definição da malha	155
6.1.1.4	Caracterização dos materiais.....	156
6.1.1.5	Caracterização das superfícies	156
6.1.1.6	Carga de incêndio	156
6.1.1.7	Posicionamento e caracterização dos ignitores	157
6.1.1.8	Pontos de análise de temperatura	158
6.1.2	Resultados.....	158
6.2	Queima de Bloco de Madeira.....	160
6.2.1	Hipóteses e características do modelo	160
6.2.1.1	Dimensões	160

6.2.1.2	Tempo de simulação.....	162
6.2.1.3	Definição da malha	162
6.2.1.4	Caracterização dos materiais e superfícies.....	163
6.2.1.5	Carga de incêndio	163
6.2.1.6	Posicionamento e caracterização dos ignitores	163
6.2.1.7	Pontos de análise de temperatura	163
6.2.2	Resultados.....	164
6.3	Queima de 1/8 de “Estéreo”	168
6.3.1	Hipóteses e características do modelo	168
6.3.1.1	Dimensões	168
6.3.1.2	Tempo de simulação.....	169
6.3.1.3	Definição da malha para simulação	169
6.3.1.4	Caracterização dos materiais e superfícies.....	170
6.3.1.5	Carga de incêndio adotada	171
6.3.1.6	Posicionamento e caracterização dos ignitores	171
6.3.1.7	Pontos de análise de temperatura	172
6.3.2	Resultados.....	172
6.4	Análise	179
7	ESTUDOS DE CASO PRELIMINARES	181
7.1	Parâmetros Gerais	181
7.1.1	Hipóteses e características do modelo	181
7.1.1.1	Dimensões	181
7.1.1.2	Tempo de simulação.....	184
7.1.1.3	Definição da malha para simulação	184
7.1.1.4	Caracterização dos materiais.....	185
7.1.1.5	Caracterização das superfícies	185
7.1.1.6	Posicionamento e caracterização dos ignitores	186

7.1.1.7	Pontos de análise de temperatura	186
7.2	Estudo de Caso 1.....	189
7.2.1	Carga de incêndio adotada.....	189
7.2.2	Resultados.....	191
7.3	Estudo de Caso 2.....	197
7.3.1	Carga de incêndio adotada.....	197
7.3.2	Resultados.....	198
7.4	Estudo de Caso 3.....	204
7.4.1	Carga de incêndio adotada.....	204
7.4.2	Resultados.....	205
7.5	Análise	211
8	ESTUDO DE CASO FINAL.....	212
8.1	Definições	212
8.1.1	Hipóteses e características do modelo	212
8.1.1.1	Dimensões	212
8.1.2	Tempo de simulação	216
8.1.3	Caracterização dos materiais	216
8.1.4	Caracterização das superfícies.....	216
8.1.5	Carga de incêndio adotada.....	217
8.1.6	Posicionamento e caracterização dos ignitores.....	218
8.1.7	Definição da malha	219
8.1.8	Pontos de análise de temperatura	219
8.2	Resultados	224
9	CONCLUSÕES	237
	REFERÊNCIAS.....	240
	REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES.....	250

APÊNDICE A - DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO PARA PROPAGAÇÃO DO INCÊNDIO.....	254
A.1 Porta Corta Fogo (PCF)	254
A.2 Cortina Corta Fogo.....	255
A.3 Vedador Corta Fogo.....	256
A.4 Registro Corta Fogo.....	257
A.5 Selo Corta Fogo	258
A.6 Chuveiro Automático	259
APÊNDICE B – TRRF BRASIL	260
APÊNDICE C – TRRF PORTUGAL	265
APÊNDICE D – TRRF INGLATERRA.....	270
APÊNDICE E – TRRF HONG KONG.....	274
APÊNDICE F – TRRF ESTADOS UNIDOS	277
APÊNDICE G – ARQUIVO FDS – ESTUDO DE CASO 1.....	284
APÊNDICE H – ARQUIVO FDS – ESTUDO DE CASO 2.....	291
APÊNDICE I – ARQUIVO FDS – ESTUDO DE CASO 3	296
APÊNDICE J – ARQUIVO FDS – ESTUDO DE CASO FINAL.....	305
ANEXO A – O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS.....	315
ANEXO B – CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS	317
ANEXO C – PROCEDIMENTO DE SOLUÇÃO – <i>FIRE DYNAMICS SIMULATOR TECHNICAL REFERENCE GUIDE VOLUME 1: MATHEMATICAL MODEL</i>	323

1 INTRODUÇÃO

Com o constante crescimento e adensamento das grandes cidades ao redor do mundo, a segurança contra o incêndio se torna cada vez mais importante.

Por mais que se tomem medidas para reduzir as causas dos incêndios, tais como, melhoria das instalações elétricas, manutenção adequada de equipamentos, instalação de detectores de fumaça, dentre muitos outros, a segurança absoluta contra o incêndio é impossível. Sendo assim, uma vez que o incêndio se inicia, é de absoluta importância que o projeto da edificação seja adequado para garantir condições mínimas ou adequadas para a desocupação de todas as pessoas do seu interior (SILVA, 2014).

A *National Fire Protection Association* (NFPA) é uma entidade Americana especializada em segurança contra incêndio, realizando inúmeros estudos nos Estados Unidos referente às perdas ocasionadas por incêndios.

Em 2014, estima-se que os corpos de bombeiros americano atenderam 1.298.000 chamados de incêndio, sendo 494.000 em edificações (aproximadamente 38%), das quais, aproximadamente, 74% ocorreram em edificações residenciais (367.500).

Nesses 367.500 incêndios que ocorreram em edifícios residenciais, foram registradas 2.745 mortes, equivalendo a 84% das mortes por incêndio no país.

Os 494.000 incêndios em edificações foram responsáveis por 85% dos ferimentos por incêndio no país (13.425 pessoas), dos quais, 75% (11.825) foram ocasionados pelos incêndios residenciais (367.500).

Ainda considerando somente o ano de 2014, estima-se que o dano patrimonial em edificações foi de aproximadamente 9,8 bilhões de dólares¹, dos quais 6,8 bilhões (69% aproximadamente) são referentes a danos em edifícios residenciais (HAYNES, 2015).

Percebe-se claramente que, por mais que a quantidade de incêndios em edificações, em relação ao total no país seja baixa, apenas 38%, esses incêndios são a maior causa de fatalidades e ferimentos, sendo responsáveis por aproximadamente 85% do total.

¹ Valor equivalente à, aproximadamente, 84% dos 11,6 bilhões de dólares estimado em dano ao patrimônio em todos os incêndios.

Os danos ao patrimônio causados por incêndio, entre 1980 e 2011 nos Estados Unidos, variam entre 15 e 22 bilhões de dólares por ano (HALL JUNIOR, 2014), se considerar que, em média, 85% dos danos ocasionados por incêndio ocorrem em edificações, tem-se algo entre 12,75 e 18,7 bilhões de dólares por ano em danos ocasionados por incêndio².

Os grandes incêndios acompanham a história da humanidade, causando enormes perdas materiais e principalmente grande perda de vidas humanas.

Dos grandes incêndios com dimensões urbanas, como Roma no ano 64, Londres (1666), Hamburgo (1842), Chicago (1871) e Boston (1872), que não devem se repetir nas cidades atuais, principalmente pela modernização da urbanização e pela presença dos automóveis³ (GILL; NEGRISOLO; OLIVEIRA, 2008).

Aos incêndios em grandes edificações, tais como: Opera Rhoads (Boyertown, Pensilvânia - 1908), Lake View Elementary School (Cleveland, Ohio - 1908), Triangle Shirtwaist Company (Nova York - 1911), e os brasileiros, Gran Circo Norte-Americano (Niterói, RJ - 1961), Edifício Andraus (São Paulo, SP - 1972) e Edifício Joelma (São Paulo, SP - 1974) (SILVA, 2014).

Percebe-se que o incêndio sempre fará parte da história humana. Inclusive, Del Carlo (1988) aponta que alguns dos fatores responsáveis pelo aumento do risco de incêndio e sua propagação pela fachada são o aumento das aberturas, a diminuição da incombustibilidade e diminuição da estabilidade das estruturas, somados a um acréscimo da carga de incêndio existente nas edificações. Enquanto que, Seito (1988), considera que um dos principais fatores para a propagação dos incêndios são os materiais de acabamento das fachadas que, muitas vezes, não são feitos com medidas de segurança contra incêndio com a devida importância para o resguardo da vida humana e do patrimônio.

Os incêndios são tão importantes para a sociedade que, uma maneira tradicional de se medir o desenvolvimento dos países é por meio do número de incêndios registrados, uma vez que, o empobrecimento e o enriquecimento de uma nação refletem de forma direta no modo de vida da sociedade e, conseqüentemente, aumenta ou diminui o número de incêndios (ONO, 1997).

² É importante frisar que os custos do sistema de saúde não foram considerados.

³ A presença massiva dos automóveis nas cidades criou uma hierarquização das ruas e, conseqüente, aumentou o afastamento das edificações.

Os exemplos apresentados anteriormente demonstram como a proteção contra incêndio é importante e por que a cada ano, novos sistemas de proteção são desenvolvidos e milhões são gastos na proteção das edificações novas e antigas.

No Brasil, os incêndios do Edifício Andraus e do Edifício Joelma marcaram o início efetivo da implantação das medidas de segurança contra o incêndio no país. Porém, é importante ressaltar, que os grandes incêndios não são os reais vilões. Eles simplesmente refletem a situação geral da segurança contra incêndio no país, servindo como alerta para a população (ONO, 1997).

Mais recentemente incêndios como o do Ycua Bolaños (Assunção, Paraguai - 2004), do Cromagnon (Buenos Aires, Argentina - 2004) servem como lembrete para a população da importância e seriedade do assunto, uma vez que todos ocorreram em locais de reunião de público, com alto potencial para fatalidades (GILL; NEGRISOLO; OLIVEIRA, 2008), da mesma forma que o incêndio da Boate Kiss (Santa Maria, RS – 2013) no Brasil.

Segundo a ABNT NBR 14432:2001, existem dois tipos de proteção contra incêndio, a proteção ativa e a proteção passiva:

- a) proteção ativa: e todo e qualquer tipo de proteção que precisa ser ativado (manualmente ou automaticamente) em resposta aos estímulos causados pelo incêndio. Esse tipo de proteção é geralmente composto por instalações prediais de proteção contra incêndio;
- b) proteção passiva: são todas as medidas incorporadas à edificação, presentes naturalmente durante o uso comum do edifício, e que reage passivamente ao desenvolvimento do incêndio, seja estabelecendo condições pouco propícias ao crescimento e propagação do fogo, quanto garantindo a resistência ao fogo necessária a um elemento, ou até mesmo facilitando a evacuação dos usuários do edifício e facilitando o ingresso das equipes para o desenvolvimento das ações de combate ao fogo (MARCATTI; COELHO FILHO; BERQUÓ FILHO, 2008).

A compartimentação na proteção passiva tem a função de evitar, ou retardar, a propagação do fogo entre compartimentos. Para isso, atenta-se para diversas características do projeto da edificação, dentre eles: arquitetônicas (como as dimensões dos espaços fechados, concepção das fachadas, localização dos elementos de compartimentação, rotas de fuga); medidas urbanísticas (como a

distância mínima entre as edificações); projeto de estruturas da edificação e seu desempenho em situação de incêndio; a própria construção (vedando quaisquer passagem entre compartimentos) (COSTA; ONO; SILVA, 2005).

Deve-se lembrar que para desenvolver um projeto adequado de compartimentação todos os elementos da edificação devem ser especificados e projetados para tal fim, incluindo as vedações, estrutura, revestimentos e fechamentos de vãos externos. Se um único elemento não estiver adequado, a compartimentação é quebrada e o projeto se torna ineficaz.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

O objetivo do trabalho é analisar a compartimentação de edificações à luz da interação entre as prescrições normativas nacionais e estrangeiras e simulações computacionais avançadas, utilizando-se a dinâmica dos fluidos computacional através do programa FDS⁴. Apresentando assim, o potencial da simulação computacional para o estudo da segurança contra o incêndio, de maneira a incentivar a melhoria das atuais normas de incêndio vigentes no país.

1.1.2 Objetivos Específicos

Pretende-se comparar os valores, referentes à compartimentação vertical e horizontal, apresentados nas instruções técnicas do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo e na legislação do Estado de São Paulo⁵, com os valores presentes nas normas, códigos e leis internacionais⁶.

Escolher estudos de caso adequados para demonstrar o potencial da simulação computacional na análise de parâmetros normativos divergentes internacionalmente e realizar as simulações necessárias.

⁴ FDS: *Fire Dynamics Simulator*.

⁵ As Instruções Técnicas (IT's) do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, bem como a legislação do Estado de São Paulo, foram as escolhidas por se tratarem das diretrizes mais avançadas do país referentes à segurança contra o incêndio. Sendo atualmente adotadas em diversos outros estados.

⁶ Foram escolhido quatro países para a comparação: Portugal, Inglaterra, Hong Kong e Estados Unidos.

1.2 Justificativa

A importância deste trabalho decorre do fato da engenharia de segurança contra o incêndio ainda ser, no Brasil, uma área muito pouco estudada e de enorme importância para a segurança à vida.

Percebe-se também que essa área possui normas divergentes em nível internacional, demonstrando a importância da simulação computacional, de forma a facilitar o estudo e verificar os inúmeros parâmetros adotados, de maneiras distintas, ao redor do mundo.

O autor acredita que deveria haver incentivos para que se pesquisasse mais sobre modelagem de incêndio, uma vez que é possível estudar situações únicas, presentes em projetos específicos, como, por exemplo, o MASP, a Oca do parque do Ibirapuera ou mesmo o Pavilhão do Anhembi.

Muitos problemas poderiam ser melhor analisados do que empregando métodos simplificados normatizados, garantindo a segurança das edificações e, possivelmente, reduzindo custos de construção.

Além disso, como bem colocado pelo professor Francisco Landi (1988), as principais medidas para se proteger a vida humana no caso de incêndio em um edifício é promover de maneira segura e adequada a fuga de seus ocupantes, papel desempenhado pela compartimentação e proteção das rotas de fuga.

O programa FDS, utilizado para realizar as simulações, tem por base a CFD⁷, ou seja, possui suas vantagens e limitações. Em muitas áreas de estudo a CFD ainda precisa desenvolver modelos mais acurados, como por exemplo, na radiação e na combustão (MCGRATTAN et al., 2015a). Mesmo assim, com a aplicação de condições de contorno apropriadas, que descrevam corretamente a geometria do domínio de cálculo, é possível gerar modelos adequados de incêndio. Porém, é preciso ressaltar ainda que existe a necessidade de aperfeiçoamento das técnicas numéricas de maneira a ampliar a capacidade de resolução de problemas mais complexos.

É importante lembrar que, a CFD é uma ferramenta em desenvolvimento, cuja principal função é auxiliar na busca das soluções de problemas reais, não sendo, ainda uma técnica definitiva para cálculo.

⁷ CFD: Fluidodinâmica Computacional ou Dinâmica dos Fluidos Computacional.

Por fim, deve-se lembrar que a utilização de métodos avançados para a simulação computacional de edificações em situação de incêndios ainda está se iniciando no país.

1.3 Método

Para que o objetivo da dissertação fosse atingido foram necessárias duas etapas distintas:

a) a primeira etapa consistiu em agrupar e fundamentar o conhecimento internacional referente às edificações em situação de incêndio. Para que isso fosse possível estudou-se desde os princípios termofísicos da transferência de calor, passando pelas propriedades térmicas do incêndio, até o entendimento e a legislação de diversos países referentes à compartimentação, apresentados em normas, leis e livros técnicos (“Handbooks”), sendo os principais:

- ABNT NBR 10636:1989 (Brasil);
- ABNT NBR 14432:2001 (Brasil);
- ABNT NBR 15200:2012 (Brasil);
- ABNT NBR 5628:2001 (Brasil);
- Instrução Técnica N° 3 (2015) do CBPMESP (Estado de São Paulo);
- Instrução Técnica N° 7 (2015) do CBPMESP (Estado de São Paulo);
- Instrução Técnica N° 8 (2015) do CBPMESP (Estado de São Paulo);
- Decreto N° 56.819 de 10 de Março de 2011 (Estado de São Paulo);
- Decreto-Lei n° 220/2008 (Portugal);
- Portaria n° 1532/2008 da ANPC (Portugal);
- *The Building Regulations 2010 – Fire Safety* (Inglaterra);
- *External fire spread: building separation and boundary distances* (BR 187, BRE 1991) (Inglaterra);
- *Code of Practice for Fire Safety in Buildings 2011* (Hong Kong);
- *2012 International Building Code* (Estados Unidos);

b) a segunda etapa consistiu na determinação de quais características eram mais importantes para serem estudadas e consequentemente determinação dos

estudos de caso modelados⁸. Os estudos de caso foram simulados, por meio da interface gráfica *PyroSim* (versão 2016.1.0425), desenvolvida pela empresa *Thunderhead Engineering*, para o programa de computador *Fire Dynamics Simulator* (FDS) (versão 6.0.4), desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST). Sendo que as simulações foram subdivididas em três blocos:

- simulações preliminares. Cujo objetivo é apresentar o combustível utilizado nos demais estudos de caso e demonstrar a congruência dos valores simulados com valores experimentais, validando os demais estudos de caso;
- estudos de caso preliminares. Cujo objetivo é demonstrar a sensibilidade do modelo para a variação da carga de incêndio;
- estudo de caso final. Cujo objetivo é apontar a viabilidade de solução de alguns dos pontos divergentes das normas internacionais.

Com essas etapas desenvolvidas, espera-se contribuir com o estudo de segurança contra incêndio no Brasil, demonstrando a viabilidade do uso da CFD na resolução de problemas complexos de maneira mais assertiva e economicamente viável no Brasil.

⁸ Configurações do computador:

- Processador: Intel® Xeon® CPU E5-2630 v 4 @ 2,20 GHz 2,20 GHz (2 processadores)
- Memória Instalada (RAM): 64,0 GB
- Sistema Operacional: Windows 10 64 bits

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Princípios da Termodinâmica

Para se entender o funcionamento de um o incêndio deve-se, inicialmente, conhecer os princípios da termodinâmica básica, para, a partir deles, tentar entender os mecanismos de troca de calor e os processos físicos e químicos presentes em um incêndio real.

Dentre os princípios básicos tem-se a lei zero da termodinâmica (equilíbrio térmico), a primeira lei da termodinâmica e a segunda lei da termodinâmica, bem como os fundamentos básicos de cada uma delas. A terceira lei da termodinâmica não será abordada, pois foge completamente do escopo deste trabalho, considerando sistemas com temperaturas próximas do zero absoluto.

A partir desses princípios é possível entender melhor a termodinâmica no incêndio, assim como, os conceitos principais utilizados neste trabalho, como por exemplo: dilatação térmica, radiação, condução, convecção e temperatura de autoignição.

Uma vez que, os princípios da termodinâmica são considerados com introdutórios para o estudo de incêndio, este capítulo terá por finalidade apresentar de forma superficial o tema visando guiar o leitor pelos princípios básicos que serão utilizados, facilitando assim, o entendimento da dissertação.

Não será realizado um estudo mais aprofundado pelo simples fato do tema fugir do escopo da dissertação.

2.1.1 Lei Zero da Termodinâmica (Equilíbrio Térmico)

Um sistema termodinâmico consiste em uma quantidade de matéria contida dentro de um ambiente, podendo ter limites fixos ou móveis (como no caso dos pistões de um motor, por exemplo) (SERWAY; JEWETT JUNIOR, 2004).

Os materiais dos limites, ou paredes, de um sistema termodinâmico são de extrema importância, pois eles ajudam a determinar como o sistema irá se inter-relacionar com o ambiente externo. Por exemplo, em um incêndio, pode-se pensar na diferença entre uma porta corta fogo e uma porta convencional de madeira. No primeiro caso, existe

o isolamento do sistema termodinâmico com o ambiente externo, enquanto no segundo existe uma interação direta.

Muitas vezes, em simulações computacionais, é preciso considerar os limites do sistema termodinâmico como sendo adiabático, ou seja, que não permite interação com o exterior.

Caso todas as paredes sejam adiabáticas tem-se um sistema isolado, sistema esse, que tende a alcançar um equilíbrio térmico onde nenhuma característica macroscópica se altera com o tempo, o que é exatamente o oposto do que tem-se em situações de incêndio.

É preciso lembrar que todo sistema, mesmo que aberto, tende a encontrar uma situação de equilíbrio. Sendo assim, se um material está com uma temperatura muito superior (ou inferior) aos outros, os materiais tendem a trocar energia em busca de um equilíbrio térmico, sendo exatamente o que ocorre durante um incêndio.

A lei zero da termodinâmica constata que dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro estão em equilíbrio térmico entre si.

2.1.1.1 Dilatação Térmica

A dilatação térmica nada mais é do que a alteração das dimensões de um objeto pela variação de sua temperatura. Essa mudança dimensional ocorre pela modificação do espaçamento interatômico médio do material.

Assim sendo, é possível determinar o coeficiente de dilatação térmica linear de um material a partir da variação de seu comprimento após uma alteração de temperatura, conforme a Equação (1).

$$\Delta l = l_0 \times \alpha \times \Delta \theta \quad (1)$$

Em que:

- Δl = Variação do tamanho ($l_f - l_0$) após uma alteração de temperatura $\Delta \theta$ [m];
- l_0 = Tamanho inicial à uma temperatura θ_0 [m];
- l_f = Tamanho final à uma temperatura θ_f [m];
- α = Coeficiente de dilatação térmica linear do material [$^{\circ}\text{C}^{-1}$];
- $\Delta \theta$ = Variação de temperatura ($\theta_f - \theta_0$) [$^{\circ}\text{C}$];
- θ_0 = Temperatura inicial [$^{\circ}\text{C}$];
- θ_f = Temperatura final [$^{\circ}\text{C}$].

Para análises mais avançadas, pode-se utilizar coeficientes de dilatação térmica (α) distintos para diferentes faixas de temperatura do material, obtendo-se dessa forma resultados mais precisos.

Na prática, toda dilatação de materiais é volumétrica, ou seja, um objeto altera suas dimensões nas três direções (x, y, z). No entanto, para efeitos de cálculo e simulações, realizam-se simplificações de acordo com as dimensões de cada objeto, podendo ele sofrer: uma dilatação térmica linear, como por exemplo, uma barra metálica⁹; uma dilatação térmica superficial, como no caso de uma chapa metálica¹⁰; ou mesmo uma dilatação térmica volumétrica, em objetos com as três dimensões com a mesma ordem de grandeza.

Para os casos de dilatações volumétricas, ou superficiais, também deve ser considerado qual o tipo de material que está sendo analisado, ou seja, se é um material isotrópico¹¹ ou anisotrópico¹².

2.1.2 Primeira Lei da Termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica determina que: o trabalho realizado para levar um sistema termicamente isolado de um dado estado inicial a um dado estado final é independente do caminho (NUSSENZVEIG, 2002).

Isso significa que: o trabalho adiabático necessário para a transferência de um sistema entre dois estados distintos independe das etapas envolvidas no processo. Da mesma forma, conclui-se que a energia interna de um sistema que sofreu uma variação de estado é igual ao trabalho adiabático necessário para realizar a mesma variação de estado.

Existem dois tipos de processos principais: os reversíveis e os irreversíveis.

Processo reversível é todo processo que pode ser retornado ao seu estado original, como por exemplo: a variação de pressão dentro de um cilindro, ocasionada pelo deslocamento de um pistão.

⁹ Somente uma de suas dimensões varia, pois ela é consideravelmente maior que as outras duas dimensões.

¹⁰ Onde duas dimensões são muito maiores que a terceira e, conseqüentemente, só elas variam.

¹¹ Materiais isotrópicos são aqueles cuja dilatação térmica é igual em todas as direções.

¹² Materiais anisotrópicos são aqueles cuja dilatação varia de acordo com a direção analisada.

Processo irreversível é todo aquele que, independentemente do que aconteça, jamais retornará ao seu estado original. Esse é o caso de quase todos os processos envolvidos em um incêndio, e portanto, o mais importante para esse trabalho.

Para entender como um sistema pode ser transferido entre dois estados distintos deve-se também entender os diversos princípios e mecanismos de transferência de calor de um sistema, sendo estes explicados de forma simplificada a seguir.

2.1.2.1 Calor Específico

O calor específico (c) de um material é determinado pela quantidade de calor necessária para elevar um grama desse material em um grau Celsius.

Quantidade de calor é o valor de calorias necessárias para alterar uma determinada quantidade de material de uma temperatura à outra, por exemplo: o total de calorias necessárias para que 1 kg de ferro à 20 °C atinja 30 °C é a quantidade de calor necessária para realizar tal ação.

Uma caloria é definida como a quantidade de calor necessária para elevar 1 g de água de 14,5 °C para 15,5 °C.

Deve-se lembrar, no entanto, que o calor específico varia de acordo com a temperatura do material, por exemplo, o calor específico da água a 14,5 °C é de 1 cal/(g.°C), enquanto o da água a 0 °C é de 1,008 cal/(g.°C). Como essa variação é geralmente pequena¹³ ela é desprezada em cálculos manuais, adotando-se valor único para cada material. Porém, quando se trata de simulação computacional, normalmente adotam-se valores normalizados de calor específico em função da temperatura, de forma a se aproximar da realidade.

Por mais que a unidade [cal/(g.°C)] seja bastante usual para o calor específico na literatura mais antiga, o SI determina que sua unidade seja [J/(kg.K)], sendo então o mais adotado atualmente. Aproveita-se aqui para lembrar que a equivalência entre as unidades é de 1 cal = 4,184 J.

¹³ Deve-se tomar cuidado ao adotar esta hipótese para gases, uma vez que a alteração da pressão faz com que a variação deixe de ser desprezável.

2.1.2.2 Transferência de Calor

Transferência de calor, ou condução de calor, é a reação que ocorre em um material ao procurar entrar em equilíbrio com seu ambiente. Podendo-se dar de três maneiras distintas: radiação, convecção e condução.

2.1.2.2.1 Radiação Térmica

Essa transferência de calor ocorre por meio da irradiação eletromagnética, propagando-se inclusive no vácuo. A irradiação térmica é emitida de um corpo aquecido para outro em temperatura inferior que, ao absorvê-la, eleva sua temperatura.

Em 1879 J. Stefan determinou experimentalmente a Equação (2), que possibilita calcular o fluxo de calor emitido por radiação de um corpo irradiador ideal¹⁴, a teoria utilizada por ele deriva das teorias desenvolvidas por L. Boltzmann em 1884 (SILVA, 2006).

$$\dot{Q}_r = \sigma \times A \times (\theta + 273)^4 \quad (2)$$

Na qual:

- $\dot{Q}_r$ = Fluxo de calor emitido por radiação [W];
- σ = Constante de Boltzmann = $5,6 \times 10^{-8}$ [W/m².°C];
- A = Área [m²];
- θ = Temperatura [°C].

Uma vez que a Equação (2) é uma simplificação para um corpo ideal, é importante frisar que, para o caso do fluxo de calor entre dois corpos reais, deve-se sempre utilizar a Equação (3).

$$\dot{Q}_r = \sigma \times A \times \varepsilon_{1-2} \times [(\theta_1 + 273)^4 - (\theta_2 + 273)^4] \quad (3)$$

Onde:

- $\dot{Q}_r$ = Fluxo de calor emitido por radiação [W];
- σ = Constante de Boltzmann = $5,6 \times 10^{-8}$ [W/m².°C];
- A = Área [m²];
- ε_{1-2} = Diferença entre as emissividades dos corpos 1 e 2;
- θ_1 = Temperatura do corpo 1 [°C];
- θ_2 = Temperatura do corpo 2 [°C].

¹⁴ Entende-se por corpo irradiador ideal um corpo negro.

Ou, de maneira referencial, utiliza-se a Equação (4).

$$\dot{Q}_r = \dot{h}_r \times A_a \quad (4)$$

Em que:

- $\dot{Q}_r$ = Fluxo de calor emitido por radiação [W];
- A_a = Área da superfície exposta ao fogo [m²];
- $\dot{h}_r$ = Fluxo radiante por unidade de área [W/m²] [Equação (5)].

$$\dot{h}_r = \alpha_r \times (\theta_g - \theta_a) \quad (5)$$

Na qual:

- $\dot{h}_r$ = Fluxo radiante por unidade de área [W/m²];
- θ_a = Temperatura da superfície exposta ao fogo [°C];
- θ_g = Temperatura dos gases quentes [°C];
- α_r = Coeficiente de transferência de calor por radiação [W/m².°C] [Equação (6)].

$$\alpha_r = \frac{\sigma \times \varepsilon_r \times [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4]}{(\theta_g - \theta_a)} \quad (6)$$

Onde:

- α_r = Coeficiente de transferência de calor por radiação [W/m².°C];
- σ = Constante de Boltzmann = $5,6 \times 10^{-8}$ [W/m².°C];
- ε_r = Emissividade da superfície radiante;
- θ_a = Temperatura da superfície exposta ao fogo [°C];
- θ_g = Temperatura dos gases quentes [°C].

2.1.2.2.2 Convecção

Ocorrendo tipicamente em fluidos, a convecção se caracteriza pela transferência de calor pelo próprio fluido por intermédio de sua movimentação, constituindo uma corrente de convecção.

Um fluido aquecido localmente tem sua densidade reduzida, tendendo a subir no espaço, sendo substituído por um fluido mais frio, gerando naturalmente uma corrente de convecção. Esse efeito pode ser feito de forma artificial, por exemplo, pelo o uso de bombas.

No caso do incêndio, o fluxo de calor por convecção é gerado pela diferença de densidade dos gases quentes gerados pelo incêndio. Os gases quentes são menos densos e tendem a ocupar o volume superior do ambiente, substituindo o ar frio lá existente, que por sua vez é mais denso e tende a se aproximar das chamas do

incêndio. O contato entre os gases quentes e frios ocasiona a transferência de calor por convecção, que pode ser calculada pela Equação (7), já devidamente adaptada para o estudo de incêndio (SILVA, 2005).

$$\dot{Q}_c = \dot{h}_c \times A_a \quad (7)$$

Em que:

- $\dot{Q}_c$ = Fluxo de calor transferido por convecção [W];
- A_a = Área da superfície exposta ao fogo [m²];
- $\dot{h}_c$ = Fluxo convectivo por unidade de área [W/m²] [Equação (8)].

$$\dot{h}_c = \alpha_c \times (\theta_g - \theta_a) \quad (8)$$

Na qual:

- α_c = Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m².°C];
- θ_a = Temperatura da superfície exposta ao fogo [°C];
- θ_g = Temperatura dos gases quentes [°C].

2.1.2.2.3 Condução

A condução pode ocorrer tanto em sólidos quanto em líquidos, porém depende necessariamente de um meio material (diferente da radiação). Um exemplo prático da condução é o de que ao aquecer a ponta de uma barra metálica ela se aquece por inteiro, sem a transferência de material ou mesmo a interação com outros corpos. O objeto troca calor com si próprio, eliminando a diferença de temperatura existente entre suas moléculas. O mesmo pode ocorrer com dois materiais em contato, como o caso de uma panela com água no fogão, a panela esquentando a água por condução.

Esse meio de transmissão de calor segue algumas regras, sendo elas (SILVA, 2002):

- a) o calor sempre flui do ponto de temperatura mais alta para o de temperatura mais baixa;
- b) a quantidade de calor transportada é:
 - proporcional à diferença de temperatura entre os pontos;
 - proporcional à área pela qual o calor está fluindo;
 - proporcional ao intervalo de tempo em que ocorre a transferência.

Dessa forma, pode-se utilizar de forma diferencial a Equação (9) para se determinar o fluxo de calor por condução térmica, ou seja, a quantidade de calor transferida na unidade de tempo, no interior de um material.

$$\dot{Q}_k = -\lambda \times A_a \times \frac{\partial \theta_a}{\partial x} \quad (9)$$

Onde:

- $\dot{Q}_k$ = Fluxo de calor transferido por condução [W];
- λ = Condutividade térmica do material [W/m².°C];
- A_a = Área da superfície exposta ao fogo [m²];
- θ_a = Temperatura da superfície exposta ao fogo [°C].

Deve-se lembrar que, o coeficiente de condutividade térmica do material também pode ser descrito como sendo um coeficiente de proporcionalidade característico do meio condutor, variando normalmente com a temperatura do material.

Na Figura 1 é possível verificar de forma ilustrativa a condução do calor na direção x em uma espessura infinitesimal (Δx) de um elemento.

Figura 1 - Fluxo de calor através de um volume elementar

Fonte: SILVA, 2002 (adaptada)

2.1.3 Segunda Lei da Termodinâmica

Para facilitar o entendimento da segunda lei da termodinâmica pode-se analisar dois enunciados formulados em meados do século XIX, por Clausius e por Kelvin.

Clausius afirma que: É impossível realizar um processo cujo único efeito seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.

Já Kelvin afirma que: É impossível realizar um processo cujo único efeito seja remover calor de um reservatório térmico e produzir uma quantidade equivalente de trabalho. O que se pode concluir das duas afirmações é que não existe um ciclo de trabalho perfeito, ou seja, não é possível se obter um ciclo onde o calor se transfira completamente em trabalho e vice-versa. Se tal efeito fosse possível seria viável a construção de um “moto perpétuo”.

Assim sendo, todo processo envolve perdas, inviabilizando o retorno ao estado original, uma vez que a quantidade de entropia de um sistema, caso ele seja isolado, tende a aumentar até atingir um valor máximo, da mesma forma que a energia tende a dividir-se por igual até que o sistema entre em equilíbrio.

2.2 Fundamentos de Fogo e Incêndio

O estudo do fogo como ciência tem pouco mais de trinta anos, tendo sido iniciado com a criação da IAFSS (*International Association for Fire Safety Science*), uma associação internacional que reuniu cientistas das maiores universidades e institutos do mundo (SEITO, 2008).

É interessante ressaltar que até hoje não existe um consenso mundial para a definição de fogo, como apresentado por Seito (2008, p. 35):

- a) **Brasil – NBR 13860:** fogo é o processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz.
- b) **Estados Unidos da América – (NFPA):** fogo é a oxidação rápida auto-sustentada acompanhada de evolução variada da intensidade de calor e de luz.
- c) **Internacional – ISSO 8421-1:** fogo é o processo de combustão caracterizado pela emissão de calor acompanhado de fumaça, chama ou ambos.
- d) **Inglaterra – BS 4422:Part 1:** fogo é o processo de combustão caracterizado pela emissão de calor acompanhado por fumaça, chama ou ambos.

A teoria clássica conhecida como Triângulo do Fogo (Figura 2) apresentava de forma gráfica os três elementos¹⁵ necessários para a manutenção do fogo, bem como, explicava os meios de sua extinção, pela retirada de um deles. Sendo substituída pela teoria de Tetraedro do Fogo¹⁶ (Figura 2) após a descoberta do agente extintor “halon”.

¹⁵ Os três elementos que compõe cada lado do triângulo são: combustível, comburente e calor.

¹⁶ Cada uma das faces que compõe o tetraedro representa um elemento necessário para a manutenção do fogo, sendo eles: combustível, comburente, calor e reação em cadeia.

Figura 2 – Representação gráfica do fogo. a) Triângulo do fogo; b) Tetraedro do fogo

Fonte: Elaborada pelo autor

2.2.1 Combustão

Segundo Souza (1988), a combustão é uma reação química complexa que pode ser considerada, de forma mais simplista, como uma série de reações de oxirredução que, em condições adequadas, ocorrem de forma violenta, produzindo calor e luz.

De forma simplificada, pode-se dizer que as reações de oxirredução são reações químicas envolvendo a transferência de elétrons entre os materiais envolvidos.

No caso dos incêndios o agente oxidante¹⁷ da reação é, normalmente, o oxigênio, também denominado comburente. Já o agente redutor¹⁸ da reação, que é o responsável pela geração de calor, é o combustível presente nas edificações. (SOUZA, 1988).

2.2.2 Temperatura de Combustão

A temperatura de combustão é o valor máximo que um determinado material pode chegar ao atingir sua combustão completa, por exemplo: madeira (1200 °C), petróleo (1800 °C), metano (2000 °C) e dinamite (3600 °C) (TOSI, 1950).

2.2.3 Ponto de Fulgor e Ponto de Combustão dos Líquidos

Ponto de fulgor é a menor temperatura em que um líquido se inflama por meio da aplicação de uma chama piloto nos vapores desprendidos pelo material.

¹⁷ Agente oxidante é o que recebe os elétrons.

¹⁸ Agente redutor é a substância oxidada na reação, ou seja, a que cede os elétrons.

Uma vez que os líquidos combustíveis estão diretamente relacionados ao aumento do risco de incêndio em uma edificação é importante o conhecimento do ponto de fulgor dos materiais presentes num edifício. A classificação dos líquidos como inflamável se dá em função de suas propriedades de evaporação e ponto de fulgor baixo (SEITO, 2008).

2.2.4 Gases Combustíveis

Quando misturados com o oxigênio presente no ar, os gases combustíveis, formam uma mistura explosiva que, na presença de uma energia ativa, pode entrar em combustão espontânea, tendo resultados extremamente perigosos (SEITO, 2008).

2.2.5 Temperatura de Autoignição

A temperatura de autoignição é definida como a temperatura em que um dado material entra em combustão sem a existência de uma fonte externa de ignição em condições ambientes, ou seja, o material é ignizado somente por sua temperatura superficial. Essa temperatura pode ser calculada pela Equação (10).

$$\theta_{ig} = q'' \times \sqrt{\frac{4 \times t_{ig}}{\pi \times \lambda \times \rho \times c}} + \theta_o \quad (10)$$

Em que:

- θ_{ig} = Temperatura de autoignição [°C];
- θ_o = Temperatura inicial [°C];
- t_{ig} = Tempo que demora para o material entrar em autoignição [s];
- λ = Coeficiente de condutividade térmica [W/(m.°C)];
- ρ = Densidade [kg/m³];
- c = Calor específico [J/(kg.°C)];
- q'' = Fluxo de calor por unidade de área aquecida [W/m²].

Alguns dos materiais mais comumente encontrados em edifícios não industriais e suas respectivas temperaturas aproximadas de autoignição são:

- a) algodão: 400 °C;
- b) carpete: 300-465 °C;
- c) espuma: 390-435 °C;

- d) madeira: 298-400 °C;
- e) papel: 218-246 °C;
- f) PVC: 340-350 °C.

2.2.6 Propagação Superficial de Chama

Segundo Alexandre Seito (1988), o material de acabamento das paredes, pisos e tetos se ignizam inicialmente em sua superfície, percorrendo-a completamente. Somente após isso é que o fogo consumirá o material. Esse efeito é denominado propagação superficial de chama, sendo ele um dos principais mecanismos de alastramento do incêndio.

Francisco Landi (1988) também considera muito importante a análise da propagação superficial de chamas dos materiais empregados em uma edificação, recomendando inclusive o uso exclusivo de materiais incombustíveis nas rotas de fuga do edifício. Além disso ele também considera importante as características de liberação de calor e de fumaça dos materiais.

A propagação superficial está diretamente relacionada à inflamabilidade dos materiais, porém constitui em grande parte um fenômeno independente, mas influenciado por diversos fatores, tais como: calor conduzido por condução e convecção; incidência e intensidade de radiação externa e emitida pelo próprio material. Caso a somatória dos fatores anteriores ultrapasse 300 °C é possível haver a ignição piloto do material (ROSSO, 1975).

2.3 O Conceito de Compartimentação

Um compartimento é uma edificação, ou parte dela, podendo conter um ou mais cômodos, espaços, corredores e até mesmo andares, construídos de tal forma a evitar a propagação de um incêndio para as áreas ou os edifícios adjacentes.

Um dos principais objetivos da compartimentação é permitir à brigada de incêndio combater e controlar o fogo de forma mais eficiente (LANDI, 1988).

A compartimentação de uma parte da edificação ou de um edifício é garantida pela existência de elementos de compartimentação ou por um adequado afastamento entre duas aberturas ou edificações.

Para que um elemento seja considerado um elemento de compartimentação é necessário que ele possua três qualidades simultaneamente: isolamento térmico, estanqueidade e estabilidade ao fogo.

A compartimentação é subdividida em: compartimentação horizontal, cuja função é evitar a propagação horizontal do incêndio, e pode ser exemplificada pela área máxima de um compartimento; e compartimentação vertical, cuja função é evitar a propagação vertical do incêndio, ou seja, evitar que o incêndio passe para um andar superior ao de origem.

Teodoro Rosso (1975) reforça que a compartimentação deve ser sempre efetiva, ou seja, ela deve interromper definitivamente qualquer camada de material combustível para seu exterior.

É importante frisar que nas grandes cidades a compartimentação vertical possui uma importância extremamente grande, uma vez que a verticalização dos grandes centros urbanos aumenta de forma considerável o dano patrimonial e o risco à vida que pode ser causado pelo alastramento vertical de um incêndio.

2.3.1 Isolamento térmico

O isolamento térmico pode ser definido pela capacidade de um elemento limitar a passagem de calor através de sua espessura com o objetivo de evitar a combustão espontânea de materiais fora do compartimento onde o incêndio se iniciou.

A garantia do isolamento térmico é obtida por meio de ensaios seguindo procedimentos normatizados, ou por análise térmica com base em valores normatizados.

Para as normas brasileiras ABNT NBR 5628:2001 e ABNT NBR 10636:1989, um elemento pode ser considerado isolante, se tiver a capacidade de garantir um aumento máximo da temperatura na face oposta ao incêndio de 140 °C, em média, ou 180 °C, em qualquer ponto.

2.3.2 Estanqueidade

A estanqueidade pode ser definida como a capacidade de um elemento evitar a formação de fissuras que propicie a passagem de chamas ou gases quentes através dele.

A garantia da estanqueidade é atualmente obtida experimentalmente por meio de procedimentos normatizados na ABNT NBR 10636:1989. Esse procedimento consiste em observar a formação de fissuras em um elemento e verificar se a fissura tem uma dimensão suficiente para permitir a passagem de chamas capazes de ignizar um chumaço de algodão próximo à superfície.

2.3.3 Estabilidade ao fogo

A estabilidade ao fogo pode ser definida como a capacidade de um elemento manter-se íntegro durante um certo período de tempo sem apresentar colapso quando submetido a ensaio normatizado. Pode se tratar de um elemento não estrutural (ABNT NBR 10636:1989) ou estrutural (ABNT NBR 5628:2001). Esse período de tempo é apresentado nas normas e códigos brasileiros como o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF).

2.3.4 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF)

O TRRF consiste em um tempo mínimo, geralmente apresentado em minutos, que um elemento deve garantir sua resistência ao fogo na presença de um incêndio-padrão. Sendo resistência ao fogo aqui entendida como a união do isolamento térmico, estanqueidade e estabilidade.

O incêndio-padrão é uma curva logarítmica de aumento de temperatura em função do tempo, adotada internacionalmente, que não representa um incêndio real, mas em associação ao TRRF, espera-se que represente um acréscimo de temperatura difícil de ser atingido.

O TRRF é fornecido, no Brasil, pelas Instruções Técnicas dos Corpos de Bombeiros de cada estado, ou na ausência delas, pela ABNT NBR 14432:2001.

2.3.5 Tempo de Resistência ao Fogo (TRF)

O TRF consiste no tempo máximo, normalmente dado em minutos, cujo elemento em questão garante sua resistência ao fogo na presença de um incêndio-padrão. Lembrando que resistência ao fogo é a manutenção de: isolamento térmico, estanqueidade e estabilidade (COSTA, 2008).

É importante entender a diferença entre TRRF e TRF. Um elemento deve possuir um TRF superior ou igual ao seu TRRF, uma vez que o TRRF é um valor mínimo solicitado em norma para o dado elemento, enquanto o TRF é seu valor real.

2.3.6 Compartimentação horizontal

A compartimentação horizontal é a medida de proteção passiva, constituída por elementos construtivos, de maneira a impedir a propagação horizontal do incêndio entre compartimentos adjacentes em um mesmo pavimento (MARCATTI; COELHO FILHO; BERQUÓ FILHO, 2008).

Essa medida é muito importante pois reduz a área afetada pelo incêndio e, conseqüentemente, facilita o combate e reduz as perdas.

Os elementos presentes na compartimentação horizontal são:

- a) paredes cujas características (material e espessura) garantem o isolamento, a estanqueidade e a estabilidade de acordo com o TRRF correspondente àquela edificação;
- b) portas corta fogo¹⁹ (PCF) dimensionadas de acordo com o TRRF da edificação;
- c) -distância mínima horizontal entre aberturas para o exterior de compartimentos adjacentes (Figura 3), ou opcionalmente o emprego de abas verticais para minimizar a propagação horizontal do incêndio (Figura 3);
- d) -selagem de toda e qualquer ligação horizontal entre dois compartimentos adjacentes, como por exemplo, passagem de tubulações, dutos e shafts, com a utilização de materiais incombustíveis e preenchimento dos vãos com substâncias igualmente incombustíveis. Lembrando que os materiais incombustíveis devem respeitar o TRRF adequado para a edificação.

¹⁹ Uma definição mais abrangente de PCF, bem como dos demais dispositivos de proteção para propagação do incêndio, está localizada no apêndice A.

Figura 3 – Exemplo dos detalhes da compartimentação horizontal

Fonte: MARCATTI; COELHO FILHO; BERQUÓ FILHO, 2008 (adaptada)

2.3.7 Compartimentação vertical

Um dos maiores riscos de propagação do incêndio entre andares distintos de uma edificação é a passagem de chamas por suas aberturas, sendo esse, um dos fatores predominantes para as dimensões incontroláveis dos grandes incêndios em nosso país (DEL CARLO, 1988).

A compartimentação vertical é a medida de proteção passiva com função de impedir a propagação vertical do fogo, ou seja, garante que o andar imediatamente superior ao que está pegando fogo não seja atingido pelo incêndio (MARCATTI; COELHO FILHO; BERQUÓ FILHO, 2008).

Essa medida é uma das mais importantes e eficientes para a segurança contra o incêndio, pois cada vez mais as grandes cidades se verticalizam.

Os elementos presentes na compartimentação vertical são:

- a) fachadas, parapeitos e abas horizontais construídos com materiais adequados²⁰ e com dimensões mínimas adequadas para evitar que as chamas propagadas para fora da edificação retorne ao andar superior (Figura 4);

²⁰ Entende-se por materiais adequados qualquer material incombustível que respeitem o TRRF da edificação.

- b) enclausuramento de escadas de emergência e rotas de fuga, por meio de paredes e PCF, que devem ser adequadas ao TRRF da edificação;
- c) espessura mínima das lajes, garantindo dessa forma o isolamento, a estanqueidade e a estabilidade do elemento para o TRRF do edifício;
- d) selagem de todas as ligações verticais entre os pavimentos, tais como, dutos, passagem de tubulações, shafts etc., com o uso de produtos incombustíveis e preenchimento dos vãos com substâncias também incombustíveis. Lembrando novamente que os materiais incombustíveis devem respeitar o TRRF adequado para a edificação.

Figura 4 - Exemplo dos detalhes da compartimentação vertical

Fonte: MARCATTI; COELHO FILHO; BERQUÓ FILHO, 2008 (Adaptada)

2.3.8 Segundo instituições brasileiras

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define a compartimentação horizontal e vertical em inúmeras normas técnicas, sempre de forma similar sendo as principais delas:

- a) NBR 13860:1997 – Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio;

- b) NBR 14323:2013 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio;
- c) NBR 14432:2001 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento;
- d) NBR 15200:2012 – Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.

A NBR 14432:2001 é a que possui a definição mais completa, sendo dela interpretadas as seguintes definições:

- a) isolamento térmico: capacidade que um elemento construtivo possui de impedir o aumento da temperatura, da face oposta à exposta ao fogo, a valores maiores que 140 °C, na média, ou 180 °C em qualquer ponto;
- b) estanqueidade: é a capacidade de um elemento de compartimentação impedir, durante incêndios, a aparição de fissuras que propiciem a passagem de chamas e gases quentes capazes de ignizar um chumaço de algodão próximo à face não exposta ao fogo;
- c) resistência ao fogo: propriedade que um elemento possui de resistir à ação do fogo por um determinado período de tempo, sem comprometer suas características estruturais, sua estanqueidade e seu isolamento térmico (quando aplicável);
- d) tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF): é o tempo mínimo que um elemento construtivo precisa ter de resistência ao fogo, quando sujeito ao incêndio-padrão, conforme definido em norma;
- e) compartimentação: é a medida de proteção passiva que, por meio de vedos (fixos ou móveis) evita, ou minimiza, a propagação de fogo, bem como de calor e gases quentes, em um mesmo pavimento, ou entre pavimentos, e entre edifícios vizinhos;
- f) compartimento: é uma edificação, ou parte dela, que compreende uma ou mais áreas (dentre elas: cômodos, espaços ou pavimentos), construídas de tal maneira que se evite ou minimize a propagação de um incêndio para fora de seus limites (sendo os limites áreas ou edifícios adjacentes).

Somente a ABNT NBR 13860:1997 define o que são compartimentação vertical e horizontal, porém de forma muito simplificada. Por sua vez, o Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, em sua Instrução Técnica N° 3 (2015),

possui uma definição mais aprofundada do tema compartimentação, sendo a interpretação dela:

- a) compartimentação: são medidas de proteção passiva, que se baseiam na utilização de elementos de construção resistentes a fogo, cujo objetivo é evitar ou minimizar a propagação de um incêndio (fogo, calor ou gases quentes). Essa propagação pode ser evitada tanto internamente, no mesmo pavimento ou para pavimentos adjacentes, quanto externamente ao edifício;
- b) compartimentação horizontal: visa limitar a propagação horizontal do incêndio, utilizando-se dos seguintes elementos:
 - paredes corta fogo de compartimentação;
 - portas e elementos vedadores corta fogo nas paredes de compartimentação;
 - selagem corta fogo nas passagens das instalações prediais presentes nas paredes de compartimentação;
 - registros corta fogo nas tubulações de ventilação e de ar condicionado nas paredes de compartimentação;
 - paredes corta fogo de isolamento entre unidades autônomas;
 - paredes corta fogo entre unidades autônomas e áreas comuns;
 - portas corta fogo de ingresso em unidades autônomas.
- c) compartimentação vertical: visa limitar a propagação vertical do incêndio, utilizando-se dos seguintes elementos:
 - entrepisos ou lajes corta fogo (de compartimentação);
 - vedadores corta fogo nas lajes (ou entrepisos);
 - enclausuramento de *shafts* por meio de paredes corta fogo;
 - enclausuramento de escadas de segurança por meio de paredes e portas corta fogo;
 - selagem corta fogo dos *shafts* na altura dos pisos;
 - paredes externas com resistência ao fogo;
 - parapeitos ou abas resistentes ao fogo, cuja função é separar as aberturas de pavimentos consecutivos;
 - registros corta fogo nos dutos de ventilação e de ar condicionado em cada pavimento.

O Decreto N° 56.819 de 10 de Março de 2011 do Estado de São Paulo também chega a definir compartimentação, porém de forma semelhante e mais simplificada do que já foi apresentado.

2.3.9 Segundo instituições internacionais

2.3.9.1 Autoridade Nacional de Proteção Civil (ANPC – Portugal) - Portaria nº 1532/2008

A Autoridade Nacional de Proteção Civil define²¹ os principais termos referentes à segurança contra o incêndio da seguinte maneira:

- a) isolamento térmico: é a propriedade de um elemento construtivo, com função de compartimentação, de garantir que a temperatura na face não exposta ao fogo não se eleve acima de um determinado limite em um certo tempo pré-estabelecido;
- b) estanqueidade: é propriedade de um elemento construtivo, com função de compartimentação, de não deixar passar chama ou gases quentes em um certo tempo pré-estabelecido;
- c) estabilidade: é a propriedade de um elemento estrutural resistir ao colapso durante a ação de incêndio, por um período de tempo pré-determinado;
- d) resistência ao fogo: é a propriedade que um elemento construtivo, ou não, tem de conservar durante a ação de um incêndio, por um período pré-determinado, sua estabilidade, estanqueidade, isolamento térmico, resistência mecânica, ou qualquer outra função específica do elemento;
- e) compartimento: é a parte de um edifício, com um ou mais cômodos, divisões ou pisos, delimitada por elementos de compartimentação, ou seja, elementos com resistência ao fogo adequada ao tempo de resistência determinado em norma para garantir a proteção do edifício, ou para impedir a propagação do incêndio às outras áreas da edificação.

²¹ As definições apresentadas são a interpretação do autor, não uma transcrição literal.

2.3.9.2 *Her Majesty's Government (HM Government – Inglaterra) – The Building Regulations 2010 – Fire Safety*

O governo inglês apresenta as seguintes definições²² para os principais termos referentes à segurança contra o incêndio:

- a) compartimento: edifício, ou parte dele, composto por um ou mais ambientes, espaços ou andares, construído de tal forma a prevenir o alastramento do fogo de/para outra parte do mesmo edifício, ou edifício adjacente;
- b) parede ou laje de compartimentação: são paredes ou lajes que possuem resistência ao fogo adequada utilizadas para separar um compartimento do outro;
- c) resistência ao fogo: característica inerente a um componente, ou elemento construtivo, que garanta, por um período de tempo, algumas ou todas as características físicas e construtivas pertinentes a este componente/elemento (características estas especificadas em teste padronizado).

2.3.9.3 Buildings Department (Hong Kong) – Code of Practice for Fire Safety in Buildings 2011

O departamento de obras de Hong Kong define²³ os principais termos referentes à segurança contra o incêndio do seguinte modo:

- a) compartimento: é um espaço delimitado por barreiras, ou elementos construtivos, de tal forma que se previna a passagem do fogo entre espaços adjacentes;
- b) área de compartimentação: é a área de um pavimento delimitado externamente por paredes de compartimentação;
- c) volume de compartimentação: é o volume de uma parte da edificação delimitada externamente, em todas as direções, por elementos de compartimentação (paredes e lajes), formando um compartimento;
- d) tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF): é um período de tempo em que um edifício, ou elemento estrutural, deve ser capaz de resistir quando submetido à ação do fogo (se testado de acordo com a ISO 834, BS476 ou

²² Sendo elas interpretação do autor.

²³ As definições apresentadas são a interpretação do autor, não uma transcrição literal.

equivalente). O tempo requerido de resistência ao fogo é determinado para garantir três características do elemento ou da estrutura, sendo eles: Isolamento térmico, estanqueidade e estabilidade.

2.3.9.4 *International Code Council (ICC – Estados Unidos) – 2012 International Building Code*

As definições²⁴ presentes no *International Building Code* para os principais termos referentes à segurança contra o incêndio são:

- a) área de compartimentação: é a área do edifício compreendida por paredes de compartimentação (não estrutural), paredes corta fogo (estrutural) ou paredes externas;
- b) paredes de compartimentação: são paredes cujas dimensões e materiais de fabricação são determinadas de tal forma a evitar o alastramento de um incêndio;
- c) resistência ao fogo: é a propriedade que um material ou elemento construtivo possui de prevenir ou retardar a passagem de calor excessivo, chamas ou gases quentes, em condições de uso;
- d) tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF): é o período de tempo a qual um edifício, ou elemento construtivo, deve manter sua habilidade de confinar o fogo e continuar a exercer sua função estrutural (caso possua), como determinado por testes e procedimentos pré-definidos.

2.3.10 *Comparação das normas*

Por mais que as definições dos conceitos principais para a segurança contra o incêndio seja similar em todos os países analisados, algumas diferenças merecem ser destacadas.

No Brasil um compartimento é uma edificação, ou parte dela, cujas características minimizam ou impedem a propagação do incêndio para seu exterior, enquanto em Portugal, na Inglaterra e em Hong Kong um compartimento deve sempre evitar a propagação do incêndio para seu exterior. O que aparenta ser uma pequena diferença

²⁴ Sendo elas interpretação do autor.

demonstra na realidade que a visão brasileira é de certa forma mais flexível que a visão internacional.

Em Hong Kong a definição de área de compartimentação como sendo uma área delimitada por paredes de compartimentação é bem similar à dos outros países, com exceção dos Estados Unidos, onde uma área de compartimentação pode ser delimitada por paredes de compartimentação, paredes corta fogo (conceito só presente na norma americana) ou paredes externas, demonstrando claramente que os Estados Unidos possuem uma caracterização própria para este tipo de parede.

Por fim, Hong Kong é o único país que trabalha e define volume de compartimentação, conceito este muito interessante para ser utilizado em depósitos e indústrias.

É possível perceber então que existe congruência internacional no que se diz respeito às definições básicas da engenharia de segurança contra incêndio.

2.3.11 Distância de isolamento de risco

A distância de isolamento de risco é a distância mínima entre fachadas de dois edifícios de maneira a controlar o risco de propagação do incêndio por radiação, convecção e transmissão de chamas, de maneira que o incêndio não passe de uma edificação para a outra (MARCATTI; COELHO FILHO; BERQUÓ FILHO, 2008).

A Instrução Técnica Nº 7 (2015) do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo fornece um procedimento para a determinação de tal distância mínima, com base na norma norte-americana NFPA 80A (1996).

Um ponto importante a ser observado é que, nas instruções técnicas dos corpos de bombeiros, a distância mínima entre fachadas é tratada como isolamento de risco, não sendo considerada como parte da compartimentação horizontal. O autor acredita que, apesar de obviamente isolar o risco, se a distância mínima não for respeitada, o fogo pode se propagar para o outro edifício e, pelo conceito, aumentando a área compartimentada.

Segundo Silva (2012) é fundamental dominar-se o conceito de compartimentação, para a correta decisão sobre o valor a ser adotado como área de compartimento no uso do método do tempo equivalente.

Uma vez que este tema não é considerado como parte da compartimentação de uma edificação (compartimentação vertical ou horizontal) ele não será estudado de forma mais aprofundada.

2.4 O Incêndio na Engenharia

Conforme explanado anteriormente, o fluxo de calor ocasionado pela queima dos materiais combustíveis é feito da seguinte forma: pela radiação da própria queima ou pela radiação proveniente da diferença de temperatura dos elementos existentes na edificação; pela convecção dos gases quentes provenientes da queima e dos gases frios existentes no interior do edifício; e pela condução devida à diferença de temperatura nos próprios elementos.

Um dos princípios mais importantes para o estudo, e consequentemente para a modelagem da propagação de um incêndio, é o entendimento da temperatura de autoignição de um material, pois é ela uma das principais responsáveis pelo alastramento de um incêndio, uma vez que não é preciso o contato direto da chama com o objeto para haver ignição, podendo este ocorrer pelo simples aquecimento de paredes ou lajes.

O autor considera que para se estudar de forma adequada a propagação de calor deve-se primeiro caracterizar o incêndio, sendo que para tal, deve-se obter o campo de temperaturas no compartimento em chamas em função do tempo.

Uma forma simplificada de aplicação é a determinação de uma curva que forneça a evolução da temperatura dos gases quentes com o tempo. Essa curva é denominada curva temperatura-tempo dos gases quentes de um incêndio, ou simplesmente curva do incêndio.

Essa curva pode ser apresentada de algumas formas distintas, sendo elas a curva de incêndio-padrão (que independe do tipo de incêndio), a curva de incêndio real e a curva de incêndio natural.

Para efeito de projeto, a curva de incêndio real é impossível de se conseguir, uma vez que é única para cada incêndio. Sendo assim, foram desenvolvidas simplificações, denominadas curvas de incêndio natural compartimentado, que simulam de forma mais realista o incêndio do que a curva de incêndio-padrão.

Um parâmetro importante a ser considerado na análise do incêndio aplicado à engenharia é a carga de incêndio em um compartimento, ou seja, quanto material combustível existe dentro do compartimento em estudo. Esse fator influi diretamente na curva real de incêndio e, consequentemente, numa possível escolha de curva natural.

Outro parâmetro importante para a caracterização de uma curva de incêndio, é o grau de ventilação do compartimento²⁵, uma vez que a quantidade de comburente influencia diretamente na velocidade de propagação da combustão, bem como na severidade do incêndio²⁶.

2.4.1 Carga de Incêndio

A ABNT NBR 14432:2001 define carga de incêndio como sendo a soma das energias caloríficas que poderiam ser liberadas pela combustão completa de todos os materiais combustíveis em um espaço, inclusive os revestimentos das paredes divisórias, pisos e tetos.

A carga de incêndio é a soma do potencial calorífico de todos os materiais presentes no interior de um compartimento, incluindo mobiliário, revestimentos e elementos estruturais inflamáveis (como no caso das estruturas de madeira).

Tabela 1 - Potencial Calorífico [MJ/kg]

Potencial Calorífico Específico [H]	
Tipo de Material	H [MJ/kg]
Algodão	20
Couro	20
Madeira	17,5
Papel	20
Pneu	30

Fonte: EN 1991-2: Eurocode 1, 2002 (adaptado)

O potencial calorífico de um material é a quantidade de energia térmica gerada pelo material em combustão. É medido usualmente em megajoule (MJ) e geralmente expresso de forma específica, ou seja, seu potencial calorífico por unidade de massa [MJ/kg] (Tabela 1) ou por unidade de volume [MJ/m³] (Tabela 2). Uma vez que esse valor não é preciso, variando caso a caso, padronizou-se valores médios para cada tipo de material.

²⁵ De forma simplificada o grau de ventilação é a relação entre a área de aberturas para o exterior e a área total do compartimento. Esse conceito será abordado de forma mais aprofundada no Item 2.4.2.

²⁶ De forma simplificada a severidade de um incêndio pode ser caracterizado por quão danoso é o incêndio. Esse conceito será abordado de forma mais aprofundada no Item 2.4.3.1.

Tabela 2 - Potencial Calorífico por m³ de armazenamento [MJ/m³]²⁷

Potencial Calorífico Específico [H]	
Tipo de Material	H [MJ/m³]
Algodão	585
Couro	765
Madeira em troncos	2.835
Papel	3.780
Pneu	810

Fonte: Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2015e (adaptada)

A determinação da carga de incêndio pode ser obtida por meio de medições específicas de cada elemento. Multiplica-se o potencial calorífico específico de cada elemento pela sua massa encontrada na medição, obtendo-se dessa forma o valor de carga de incêndio mais próximo do real.

Pela dificuldade dessa medição, é comum valer-se de valores padronizados de carga de incêndio específica, que é o valor da carga de incêndio em um compartimento dividido pela área de piso. A unidade é megajoule por unidade de área [MJ/m²]. Alguns exemplos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Carga de Incêndio-Padrão [MJ/m²]

Carga de Incêndio-Padrão	
Tipo de Ocupação	Carga [MJ/m²]
Residencial	300
Serviços de hospedagem	500
Escritório	700
Escola	300
Biblioteca	2.000

Fonte: Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2015e (adaptada)

No passado, a madeira chegou a ser utilizada como um material padrão para o incêndio, uma vez que diversos materiais possuem um potencial calorífico específico similar. É possível encontrar em literaturas antigas a carga de incêndio sendo fornecida em kg/m² de madeira equivalente (SILVA, 2014).

²⁷ A Instrução Técnica N° 14 denomina o potencial calorífico dos materiais como carga de incêndio dos materiais, porém este autor considera mais adequado denominar carga de incêndio como sendo somente a soma dos potenciais caloríficos de todos os materiais presentes em um compartimento.

2.4.2 Grau de Ventilação

De forma simplificada, para que a combustão ocorra são necessários três elementos: o combustível, representado pela carga de incêndio, e o comburente, que é o oxigênio e o calor, representado pela temperatura de ignição do combustível.

Durante um incêndio, o calor da queima destila gases dos combustíveis e gera gases pela combustão. Esses gases possuem densidades distintas, variando inclusive pela sua temperatura, porém, suas densidades são sempre inferiores aos gases frios do exterior. Essas diferenças de densidades são responsáveis pela movimentação da massa de ar entre o interior e o exterior da edificação (ROSSO, 1975).

O grau de ventilação de um compartimento determina a quantidade de comburente disponível no compartimento, uma vez que, quanto maior a área de ventilação, maior será a quantidade de oxigênio disponível para a queima, uma vez que facilita a movimentação dos gases e a troca entre o interior e o exterior da edificação.

O grau de ventilação (ν) de um compartimento é um a relação entre a área de aberturas para o exterior (A_v), a área total do compartimento (A_t) e a altura média das aberturas (h), conforme a Equação (11) (SILVA, 1997).

$$\nu = \frac{A_v \times \sqrt{h}}{A_t} \quad (11)$$

Na qual:

- ν = Grau de ventilação [$\text{m}^{1/2}$]
- A_v = Área de ventilação [m^2]
- A_t = Área total do compartimento (parede, piso, teto e aberturas) [m^2]
- h = Altura média das aberturas $\sum(h_i \times A_i)/A_v$ [m]
- A_i = Área da abertura i [m^2]
- h_i = Altura da abertura i, sendo $\sum A_i = A_v$ [m]

Considerando-se que em um incêndio severo²⁸ todo vidro se quebra²⁹ durante o incêndio, a área de ventilação (A_v) geralmente pode ser obtida por meio da somatória das áreas de janelas voltadas para o exterior do compartimento.

²⁸ Conforme apontado anteriormente, a severidade do incêndio será abordada de forma mais detalhada na seção 0.

²⁹ Uma vez que não faz parte do escopo deste trabalho detalhar a mecânica da quebra dos vidros em um incêndio o autor recomenda, para aprofundamento no tema, a leitura do artigo *Thermal Glass Breakage* de Patrick J. Pagni (2002).

Utilizando-se apenas dos dois parâmetros de incêndio apresentados até o momento, ou seja, a carga de incêndio e o grau de ventilação, é possível obter curvas temperatura-tempo dos gases quentes muito distintas entre si, como pode ser verificado na Figura 5, em que $\theta_{t,max}$ são as temperaturas máximas dos gases quentes em cada tipo de incêndio e $t_{\theta,max}$ o instante em que essas temperaturas são obtidas.

Figura 5 - Curvas temperatura-tempo de incêndios variando ventilação e carga de incêndio

Fonte: SILVA, 2014

2.4.2.1 Incêndio Controlado pela Ventilação

Caso a relação entre a carga de incêndio e o grau de ventilação seja alto, ter-se-á um incêndio cuja temperatura dos gases dependerá somente do grau de ventilação do compartimento, uma vez que o limitante para a combustão será o comburente. Esse tipo de incêndio é denominado incêndio de ventilação controlada e possui um grau de severidade menor.

Alexandre Seito (2008) apresenta pela Equação (12) a formulação para se obter a razão de desenvolvimento do calor ao se considerar que a carga de incêndio irá queimar como madeira³⁰, o que pode ser considerado adequado somente para alguns casos específicos.

³⁰ Considerar que um material queima como madeira é o equivalente substituir a carga de incêndio do material em megajoule com o seu valor de kg/m² de madeira equivalente.

$$m_f = 0,02 \times \sqrt{A_r \times \frac{w_c}{d_c} \times A_w \times h_w^{1/2}} \quad (12)$$

Onde:

- m_f = Razão de queima em massa [kg/s];
- A_r = Diferença entre a área total do compartimento e a área de ventilação [m²];
- w_c = Largura da parede que contém a abertura de ventilação [m];
- d_c = Distância frente-fundo do compartimento [m];
- A_w = Área da abertura de ventilação [m²];
- h_w = Altura da abertura de ventilação [m].

2.4.2.2 Incêndio Controlado pela Carga de Incêndio

Caso o incêndio possua um alto grau de ventilação, tem-se um incêndio onde a temperatura dos gases e das chamas depende somente da carga de incêndio no compartimento, sendo denominado incêndio controlado pelo combustível, apresentado na Figura 5 de maneira simplificada (SILVA, 1997).

Da mesma forma que no incêndio controlado pela ventilação, Alexandre Seito (2008) apresenta por meio da Equação (13) a formulação para se obter a razão de desenvolvimento do calor em incêndio controlado pelo combustível. Assim como no caso anterior, deve-se considerar que a carga de incêndio queima como madeira.

$$m_{fe} = \frac{L}{\Delta t_f} \quad (13)$$

Em que:

- m_{fe} = Razão de queima equivalente à da madeira [kg/m³];
- L = Carga de incêndio equivalente em madeira [kg];
- Δt_f = Duração do incêndio [s].

2.4.3 Curva de Incêndio Real

A curva de incêndio real deve apresentar as temperaturas exatas do incêndio em determinada edificação. Essa curva é específica para cada incêndio e teoricamente só pode ser obtida por meio de ensaios, lembrando que a curva obtida em um ensaio só é real para aquele ensaio específico, ou seja, a curva real é única para cada caso.

Figura 6 - Curva de incêndio real em ensaio (perfil vertical)

Fonte: BRAGA, 2010 (adaptado)

Figura 7 - Curva de incêndio real em ensaio (perfil horizontal)

Fonte: BRAGA, 2010 (adaptado)

A Figura 6 apresenta o gráfico do perfil vertical³¹ e a Figura 7 apresenta o gráfico do perfil horizontal³² de um ensaio de incêndio realizado em um contêiner dentro de um

³¹ Entende-se por perfil vertical a temperatura em um mesmo ponto no plano horizontal, porém em alturas distintas.

³² Entende-se por perfil horizontal a temperatura em pontos distintos no plano horizontal, porém em uma mesma altura, no caso apresentado a 3,8 m do piso.

sistema de treinamento de combate ao incêndio realizado pelo Corpo de Bombeiros do Distrito Federal (BRAGA, 2010). O posicionamento dos termopares (TC) pode ser observado no esquema à direita das curvas.

A curva de incêndio real, apresentada na Figura 8, possui três fases principais, sendo elas:

- a) ignição: fase inicial do incêndio, geralmente é considerado como um incêndio de ventilação controlada, cujo conceito foi apresentado na seção 2.4.2;
- b) fase de aquecimento: essa fase se inicia após uma inflamação generalizada do compartimento, também conhecido como *flashover*. Nessa fase a temperatura do incêndio cresce abruptamente até o esgotamento de todo o material combustível do compartimento e, conseqüentemente, atingir a temperatura máxima do incêndio;
- c) fase de resfriamento: essa fase é característica do final do incêndio, uma vez que, com o término da combustão as chamas se apagam e as trocas gasosas no compartimento bem como as transferências de calor com o ambiente externo resfriam o ambiente retornando-o à sua temperatura inicial de equilíbrio.

Figura 8 - Curva de incêndio real, apresentando suas três fases.

A primeira fase do incêndio é considerada de pequena proporção, com grande risco à vida, porém sem risco à estrutura. É nessa fase que ainda há a possibilidade de o incêndio ser extinto por sistemas de proteção e combate ao incêndio eficientes (caso presentes), tais como, brigadas de incêndio, detectores de fumaça, chuveiros automáticos, dentre outros (SILVA, 2004).

Após a ocorrência da inflamação generalizada, ou seja, após todo material combustível do compartimento ter entrado em ignição, o incêndio se torna de grandes proporções, sendo praticamente impossível seu combate e, conseqüentemente, com enormes riscos à vida e à estrutura da edificação.

Por mais que a curva real seja a ideal, ela é praticamente impossível de se prever, uma vez que ela é única para cada ambiente. Dessa forma é inviável sua utilização em projetos de segurança contra incêndio.

No entanto, por meio de simulações computacionais, é possível se obter curvas próximas às curvas de incêndio real, que se costuma denominar de curvas simuladas, pois é possível modelar um ambiente de forma a aproximá-lo da realidade.

2.4.3.1 Severidade do Incêndio

Segundo Teodoro Rosso (1975), a severidade de um incêndio está diretamente relacionado com a capacidade dos elementos construtivos de manterem sua capacidade de desempenho, em função do tempo de incêndio, de maneira a fornecerem segurança às pessoas e ao bem material.

Por sua vez, Souza (1988), afirma que a duração do incêndio, de forma isolada, não é capaz de refletir seu potencial danoso, sendo assim, é necessário a utilização do termo severidade, que considera conjuntamente diversos fatores do incêndio que condicionam o aquecimento dos componentes construtivos da edificação.

A severidade de um incêndio tem sido expressada, apesar das críticas à simplicidade da abordagem, como sendo o tempo em que a área entre a curva temperatura-tempo do incêndio real durante a fase de aquecimento do incêndio equivale à área da curva temperatura-tempo normalizada³³ do incêndio (SOUZA, 1988).

³³ A curva de incêndio normalizada também é conhecida como Curva de Incêndio-Padrão, sendo abordada de forma mais detalhada na seção 2.4.5.

Além disso, Teodoro Rosso (1975) também afirma que incêndios mais severos são aqueles que atingem maiores temperaturas de maneira mais rápida, ou seja, são os incêndios que apresentam um maior risco à vida e à estrutura da edificação.

A Figura 9 apresenta de forma ilustrativa a severidade de um incêndio, sendo que a linha base nela apresentada equivale à eliminação da fase de ignição do incêndio.

Figura 9 – Equivalência de severidade entre a curva do incêndio real e a curva normalizada

Fonte: SOUZA, 1988

Além dos fatores apresentados anteriormente outras diversas variáveis também influenciam na severidade de um incêndio, como por exemplo a disposição das cargas de incêndio. Um exemplo simples é diferença entre um edifício com alta concentração de combustível em um único local, como um depósito, contra uma carga de incêndio melhor distribuída, como numa residência. Sendo assim, é muito difícil se prever o real comportamento de um incêndio.

2.4.4 Curva de Incêndio Natural

Pela dificuldade de se generalizar, ou mesmo obter o campo térmico ou a curva temperatura-tempo de um incêndio real, estudos mais aprofundados costumam utilizar-se de modelos de incêndio denominados incêndios naturais.

Esses modelos podem ser obtidos por meio computacional, ou empregando modelos simplificados normatizados, devendo ser utilizados dentro de certos limites de aplicação.

O modelo simplificado mais conhecido é o modelo de incêndio parametrizado (Figura 10) fornecido pelo Eurocode³⁴ 1 parte 1-2, que simula as curvas em função de 3 parâmetros: a quantidade de material combustível (ou carga de incêndio); o grau de ventilação do compartimento; as características físico-térmicas dos elementos de compartimentação.

Figura 10 – Modelo do incêndio natural em comparação com o incêndio real

Fonte: Elaborada pelo autor

Uma vez que a curva parametrizada tem por hipótese desconsiderar a fase de aquecimento, iniciando-se somente após a inflamação generalizada, a Figura 10 apresenta a curva parametrizada deslocada (em dez minutos) de maneira a coincidir com o ponto de inflamação generalizada da curva de incêndio real, com o objetivo de facilitar a comparação das curvas.

Atualmente essas curvas são as mais utilizadas em modelos mais simplificados, ou em simulações computacionais.

³⁴ Também conhecido como Eurocódigo, é o conjunto de normas europeias para dimensionamento estrutural desenvolvidos pelo Comitê Europeu de Normatização.

2.4.4.1 ABNT NBR 14432:2001

No início das pesquisas internacionais sobre esse assunto, obtiveram-se as primeiras curvas naturais compartimentadas. Essas curvas foram desenvolvidas a partir de ensaios em compartimentos reais com aberturas para o exterior, de forma a garantir-se as características de isolamento térmico, estanqueidade e estabilidade estrutural do compartimento (SILVA, 2004).

A principal diferença da curva natural para a curva-padrão é que a curva natural possui um ramo ascendente e um ramo descendente, equivalentes às fases de aquecimento e resfriamento da curva de incêndio real, enquanto que a curva-padrão que só possui o ramo ascendente.

Para a norma brasileira, a curva de incêndio natural é a curva temperatura-tempo de incêndio que simula um incêndio real em função da geometria do compartimento, seu grau de ventilação e das características específicas da carga de incêndio em seu interior, tais como, quantidade e origem dos materiais (Figura 11).

Figura 11 - Exemplo de curva natural de incêndio em comparação com a curva de incêndio-padrão

Fonte: Elaborada pelo autor

2.4.4.2 SBN 67

A norma Sueca (*Svensk Bygg Norm* - SBN) de 1967, foi a primeira norma a introduzir o conceito do incêndio natural (SILVA, 2004), tanto uma equação de incêndio-padrão

geral, vide Equação (14), quanto curvas que variavam com o grau de ventilação do compartimento (para o ramo ascendente), como ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Curvas temperatura-tempo segundo grau de ventilação

Fonte: SBN, 1967 (adaptada)

$$\theta_g = 1\,325 - 430 \times e^{-0,2 \times t} - 270 \times e^{-1,7 \times t} - 635 \times e^{-19 \times t} + \theta_0 \quad (14)$$

Na qual:

- θ_g = Temperatura dos gases quentes em um determinado instante [°C];
- θ_0 = Temperatura inicial do compartimento [°C] - geralmente 20 °C;
- t = Tempo de incêndio [min].

Um exemplo de equação para o ramo ascendente (fase de aquecimento) é dado pela Equação (15), onde se considera um grau de ventilação igual a 0,04 m^{1/2}.

$$\theta_g = 1\,325 \times (1 - 0,324 \times e^{-0,2 \times t} - 0,204 \times e^{-1,7 \times t} - 0,472 \times e^{-19 \times t}) + \theta_0 \quad (15)$$

Onde:

- θ_g = Temperatura dos gases quentes em um determinado instante [°C];
- θ_0 = Temperatura inicial do compartimento [°C] - geralmente 20 °C;

- t = Tempo de incêndio [min].

Além disso a norma Sueca também permitiam a utilização de um ramo descendente (fase de resfriamento), sendo ele um ramo reto com inclinação de 10 °C/min a partir do ponto definido pelo tempo máximo do incêndio e, consequentemente, temperatura máxima dos gases (Figura 13).

Figura 13 – Curva temperatura-tempo com ramo descendente após 150 min de incêndio.

Fonte: Elaborada pelo autor

2.4.4.3 Modelo de Pettersson

Pettersson, Magnusson e Thor (1976) deduziram um procedimento que possibilitou a determinação das curvas temperatura-tempo de um incêndio natural no interior de um compartimento.

Para essa dedução, Pettersson, Magnusson e Thor (1976) admitiram as seguintes hipóteses:

- o incêndio é restrito a um compartimento, não sendo possível sua propagação para seu exterior;
- o fluxo de calor existe entre as chamas e os elementos de compartimentação (parede, piso e teto) por meio de radiação e convecção e, através dos elementos de compartimentação, por condução;
- os elementos de compartimentação absorvem calor;
- a distribuição da temperatura dos gases é uniforme em todo o compartimento;
- o incêndio é considerado como de ventilação controlada;

- f) o material combustível é somente formado por madeira (incêndio celulósico), porém pode ser utilizado também (caso adaptado de maneira adequada) a outros materiais, com exceção de hidrocarbonetos;
- g) os materiais dos elementos de compartimentação (como por exemplo paredes, lajes, portas dentre outros) devem possuir a relação $\sqrt{\rho \times c \times \lambda} = 1.160$ [J/m².s^{1/2}.°C]; para valores inferiores a 1.160 obter-se-ão resultados contra a segurança;
- h) considera-se válido o equilíbrio térmico da termodinâmica conforme a Equação (16), podendo também ser verificado de forma ilustrativa na Figura 14.

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{Q}_P + \dot{Q}_R + \dot{Q}_V \quad (16)$$

Em que:

- $\dot{Q}_{comb}$ = Calor gerado durante a combustão [W];
- $\dot{Q}_P$ = Calor dissipado para e através dos elementos de vedação [W];
- $\dot{Q}_R$ = Calor dissipado por radiação pelas aberturas [W];
- $\dot{Q}_V$ = Valor da troca de calor com o ambiente externo através das [W].

O calor gerado durante a combustão em função do tempo pode ser visualizado de maneira mais ilustrativa na Figura 15. Sendo possível identificar claramente os ramos ascendentes e descendentes.

Figura 14 - Fluxo de calor em um compartimento

Figura 15 - Calor gerado durante a combustão em função do tempo

Fonte: SILVA, 2004 (adaptada)

O valor de $\dot{Q}_p$ pode ser determinado por intermédio das equações de transferências de calor, tendo o elemento de compartimentação discretizado em camadas de largura Δx , cuja absorção de calor se concentra no ponto médio da camada $\Delta x/2$ (Figura 16)

Figura 16 - Fluxo de calor através de um volume elementar do elemento de vedação

Fonte: SILVA, 2004 (adaptado)

$\dot{Q}_R$ pode ser obtido por meio da equação de transferência de calor por radiação de Stefan-Boltzmann com coeficiente de emissividade igual a um.

O valor de $\dot{Q}_V$ só pode ser obtido a partir de valores experimentais.

Figura 17 - Exemplo de curvas de Pettersson variando a carga de incêndio

Fonte: Elaborada pelo autor

Dessa forma, o modelo de Petterson nos possibilita encontrar de forma prática inúmeras curvas de incêndio natural de acordo com a carga de incêndio presente em um compartimento (Figura 17) e seu grau de ventilação (Figura 18).

Figura 18 - Exemplo de curvas de Pettersson variando o grau de ventilação

Fonte: Elaborada pelo autor

2.4.4.4 Eurocode 1 - EN 1991-1-2 (2002)

O Eurocode 1 (1995) passou a recomendar, alternativamente à utilização de curvas padronizadas, o uso de curvas que simulam incêndios naturais em áreas compartimentadas, denominando-as de curvas parametrizadas (Figura 19).

Figura 19 - Exemplo de curva natural pelo Eurocode 1 variando o grau de ventilação com a relação $\sqrt{(\rho \times c \times \lambda)}$ fixa = 1.160 [J/m².s^{1/2}.°C]

Fonte: Elaborada pelo autor

O ramo ascendente (fase de aquecimento) das curvas parametrizadas pode ser obtido por meio das Equações (17) a (19).

$$\theta_g = 1.325 \times (1 - 0,324 \times e^{-0,2 \times t^*} - 0,204 \times e^{-1,7 \times t^*} - 0,472 \times e^{-19 \times t^*}) + \theta_0 \quad (17)$$

$$t^* = t \times \Psi \quad (18)$$

$$\Psi = \left(\frac{v}{0,04} \right)^2 \times \left(\frac{1.160}{\sqrt{\rho \times c \times \lambda}} \right)^2 \quad (19)$$

Na qual:

- θ_g = Temperatura dos gases quentes em um determinado instante [°C];
- θ_0 = Temperatura inicial do compartimento [°C];
- t = Tempo de incêndio [min];
- v = Grau de ventilação [m^{1/2}];
- ρ = Massa específica do material do elemento de compartimentação [kg/m³];
- c = Calor específico do material do elemento de compartimentação [J/kg.°C];

- λ = Condutividade térmica do material do elemento de compartimentação [W/m.°C].

Da mesma forma que o SBN o Eurocode 1 também prevê um ramo descendente (fase de resfriamento) para suas curvas naturais de incêndio, sendo que ele pode ser obtido por meio das Equações (21), (22) ou (23), dependendo do valor de t_d obtido pela Equação (20).

$$t_d = 0,13 \times 10^{-3} \times \frac{q_{fi,d}}{v} \times \Psi \quad (20)$$

Onde:

- $q_{fi,d}$ = Valor de cálculo da carga de incêndio específica em relação à área total do compartimento [MJ/m²] variando entre 50 e 1000 MJ/m²;
- v = Grau de ventilação [m^{1/2}];
- Ψ = Equação (19).

$$\theta_g = \theta_{g,max} - 625 \times (t^* - t_d^*) \quad \text{para} \quad t_d^* \leq 0,5h \quad (21)$$

$$\theta_g = \theta_{g,max} - 250 \times (3 - t_d^*) \times (t^* - t_d^*) \quad \text{para} \quad 0,5h < t_d^* \leq 2h \quad (22)$$

$$\theta_g = \theta_{g,max} - 250 \times (t^* - t_d^*) \quad \text{para} \quad t_d^* > 2h \quad (23)$$

Nas quais:

- θ_g = Temperatura dos gases quentes em um determinado instante [°C];
- $\theta_{g,max}$ = Temperatura máxima dos gases [°C];
- t^* = Equação (18);
- t_d = Equação (20);

2.4.5 Curva de Incêndio-Padrão

Uma vez que a curva de incêndio real ou natural varia para cada compartimento de cada edificação, inclusive variando com o passar do tempo em um mesmo compartimento, convencionou-se adotar uma curva única padronizada de incêndio, denominada, curva de incêndio-padrão.

A característica principal da curva-padrão é a de possuir somente um ramo ascendente, ao invés dos dois ramos referentes às fases de aquecimento e resfriamento de um incêndio real. A fase de ignição é desconsiderada, uma vez que é

considerada como sendo de baixo risco à estrutura e aos elementos de compartimentação.

Em projeto, geralmente se usa essa curva associada ao TRF e ao TRRF. Supõe-se que essas curvas conduzam a resultados favoráveis à segurança.

Por mais que a curva seja padronizada ela não é única para todas as nações, sendo calculadas de formas distintas, porém semelhantes.

Deve ser ressaltado que, essa curva não tem por finalidade se assemelhar a um incêndio real, mas sim permitir projetar com mais segurança do que qualquer incêndio real, uma vez que, para a curva-padrão são desconsiderados fatores importantes do incêndio, tais como a carga de incêndio e o grau de ventilação do compartimento.

Pelos objetivos desta Dissertação, a curva-padrão não será utilizada e sim modelos mais avançados de análise.

2.4.5.1 ISO 834 (1999)

A *International Organization for Standardization*, por meio da ISO 834 (1999) (*Fire-resistance tests – Elements of building construction*), determina que a curva de incêndio-padrão é obtida por uma expressão logarítmica em que a temperatura dos gases quentes em graus Celsius em um determinado instante (θ_g) varia em função da temperatura inicial do compartimento (θ_0) e do tempo (t), conforme pode ser verificado na Equação (24).

$$\theta_g = \theta_0 + 345 \times \log(8 \times t + 1) \quad (24)$$

Em que:

- θ_g = Temperatura dos gases quentes em um determinado instante [°C];
- θ_0 = Temperatura inicial do compartimento [°C];
- t = Tempo de incêndio [min].

Uma vez que, pela norma, a temperatura inicial (θ_0) deve ser sempre considerada igual a 20 °C, tem-se uma curva única para projeto (Figura 20).

Figura 20 - Curva de incêndio-padrão segundo a ISO 834 (1999)

Fonte: Elaborada pelo autor

ABNT NBR 5628:2001 e ABNT NBR 14432:2001

As normas brasileiras possuem apenas uma única curva de incêndio-padrão, seguindo as recomendação da ISO 834 (1999). Dessa forma a curva é determinada pela Equação (24).

2.4.5.2 Eurocode 1 - EN 1991-1-2 (2002)

A norma europeia possui duas curvas-padrão principais, diferentemente da norma brasileira.

A primeira curva é equivalente à presente na ABNT NBR 14432:2001 sendo utilizada para incêndios em ambientes cujo combustível predominante é formado por materiais celulósicos, vide Figura 21 e Equação (24).

A segunda curva deve ser utilizada em incêndios cujo combustível predominante é formado por hidrocarbonetos, vide Figura 21 e Equação (25) (COSTA; SILVA, 2006).

$$\theta_g = 1.080 \times (1 - 0,325 \times e^{-0,167 \times t} - 0,675 \times e^{-2,5 \times t}) + 20 \quad (25)$$

Onde:

- θ_g = Temperatura dos gases quentes em um determinado instante [°C];
- t = Tempo de incêndio [min].

Figura 21 - Curvas de incêndio-padrão segundo o Eurocode 1 - EN 1991-1-2 (2002)

Fonte: Elaborada pelo autor

2.4.5.3 ASTM E 119 (2000)

Diferentemente da ABNT e do EUROCODE a *American Specification of Testing and Materials* (ASTM) recomenda a curva-padrão de incêndio por meio de valores tabelados (Tabela 4), e não de uma equação matemática (Figura 22).

Essa curva de incêndio-padrão foi adotada em 1918 pela ASTM, tendo sido fundamentada e proposta pelo *Underwriters Laboratory de Chicago* (UL). Uma vez que esse laboratório estava realizando ensaios de incêndio em pilares à época, acredita-se que os valores obtidos sejam provenientes de ensaios reais (SILVA, 2004).

Tabela 4 - Tabela para obtenção da curva de incêndio-padrão segundo ASTM

Temperatura dos gases quentes X Tempo de incêndio - ASTM E 119					
Tempo [min]	Temperatura [°C]	Tempo [min]	Temperatura [°C]	Tempo [min]	Temperatura [°C]
0	20	40	878	180	1.052
5	538	45	892	210	1.072
10	704	50	905	240	1.093
15	760	55	916	270	1.114
20	795	60	927	300	1.135
25	821	90	978	360	1.177
30	843	120	1.010	420	1.218
35	862	150	1.031	480	1.260

Fonte: ASTM E 119 (2000) (Adaptada)

Figura 22 - Curva de incêndio-padrão segundo a ASTM E 119 (2000)

Fonte: Elaborada pelo autor

2.4.6 Análise

Como é possível verificar na Figura 23, a curva-padrão para materiais celulósicos presentes na ISO, ABNT e Eurocode é bem semelhante à curva apresentada na ASTM, mesmo esta última sendo fruto, teoricamente, de valores experimentais. A principal diferença entre elas é a temperatura final que é um pouco mais baixa na ASTM onde, por exemplo, aos 120 min possui uma diferença de 39 °C, valor este desprezível se comparado aos 1010 °C presentes na curva da ASTM.

Figura 23 – Comparativo das curvas de incêndio-padrão

Fonte: Elaborada pelo autor

A diferença real entre as curvas-padrão se dá pela diferença entre as curvas do incêndio de materiais celulósicos e do incêndio de hidrocarbonetos, porém essa diferença é esperada dada a origem dos materiais.

Agora, por sua vez, as curvas naturais de incêndio são relativamente distintas entre si, como é possível observar na Figura 24. Nessa figura estão representadas somente as curvas naturais para um grau de ventilação de $0,04 \text{ m}^{1/2}$ de maneira a ilustrar a comparação.

Figura 24 – Comparativo das curvas de incêndio natural

Fonte: Elaborada pelo autor

Inicialmente é possível verificar que, com exceção da SBN 67, todas as curvas têm uma fase de aquecimento inicial semelhante. Após os primeiros dez minutos, aproximadamente, a curva do Eurocode começa a ter acréscimos maiores de temperatura, chegando a valores finais mais elevados, ou seja, está mais a favor da segurança.

A SBN 67 destoa completamente das outras curvas, atingindo valores extremamente altos em pouquíssimo tempo, porém é interessante notar que sua temperatura máxima é similar à apresentada pelo Eurocode.

É importante lembrar que, tanto para as curvas do Eurocode quanto para a SBN, não foram posicionadas os ramos de resfriamento (curvas descendentes), uma vez que eles poderiam ser posicionadas em qualquer lugar das suas respectivas curvas.

Ao analisarmos o gráfico apresentado, é possível concluir que as curvas de Pettersson se assemelham mais a uma curva real de incêndio, uma vez que seu ramo

descendente se aproxima mais das curvas reais (Figura 8), não sendo simplesmente um ramo descendente linear.

De maneira ilustrativa, a Figura 25 compara as curvas de incêndio padrão apresentadas anteriormente com as curvas de incêndio natural para grau de ventilação = $0,04 \text{ m}^{1/2}$.

Figura 25 – Comparativo das curvas de incêndio-padrão com as curvas de incêndio natural

Fonte: Elaborada pelo autor

É interessante de se observar que a curva da SBN 67 tem um formato similar, porém mais severo, ao da curva padrão para hidrocarbonetos do Eurocode. Uma hipótese para isso ter ocorrido é que talvez a SBN não tenha se baseado em incêndios com somente materiais celulósicos, como ocorre nos demais casos.

Outro ponto interessante de ser observado é que, a curva natural do Eurocode é mais severa que as curvas-padrão da ASTM e do próprio Eurocode. Uma hipótese para isso ocorrer é que talvez a curva natural do Eurocode leve em conta o incêndio de diversas matérias, não se restringindo somente à materiais de base celulósica.

Agora, de uma maneira geral, é possível afirmar que, com base no gráfico comparativo, ao utilizar as curvas-padrão, para cálculos de engenharia de segurança contra o incêndio, estamos a favor da segurança.

3 LEGISLAÇÕES, CÓDIGOS, NORMAS E REGULAMENTOS

De forma a homogeneizar os conhecimentos e preceitos apresentados em normas nacionais e estrangeiras, foi preciso inicialmente estudar e entender a visão de cada país sobre compartimentação.

Neste item serão apresentadas, de forma individualizada, as exigências de compartimentação horizontal e vertical presentes em normas ou códigos dos países selecionados.

É importante ressaltar que este trabalho não tem por finalidade estudar a fundo cada uma das legislações vigentes em cada país, mas sim, apresentar aos leitores de uma forma resumida as principais características das normas, permitindo desta maneira realizar uma comparação simplificada de todas as normas, verificando pontos de congruência e divergência.

Segundo Santos (1988), a classificação tipológica das edificações em relação ao comportamentos do fogo como um todo é importante para se criar uma sistematização dos riscos envolvidos e, conseqüentemente, das medidas de ação contra o fogo adequadas.

Para facilitar e uniformizar a comparação de algumas das características principais abordadas, o autor padronizou a comparação, selecionando doze grupos tipológicos distintos de uso das edificações. Sendo eles:

- a) habitações;
- b) estacionamentos;
- c) administrativos ou serviços;
- d) instituições de ensino;
- e) hospitais ou casas de repouso;
- f) locais de reunião de público;
- g) serviços de hospedagem;
- h) comerciais;
- i) museus ou galerias de arte;
- j) bibliotecas ou arquivos;
- k) indústrias;
- l) depósitos.

Por fim, a seleção dos países foi realizada de maneira a se obter a visão mais globalizada possível do tema. Sendo assim, chegou-se aos seguintes países e sua importância para a análise:

- a) Brasil: representante da América do Sul, possui uma engenharia focada em edificações de concreto, sua população possui um baixo poder aquisitivo e é o país para o qual este estudo está sendo feito. Uma vez que o Brasil não possui uma legislação unificada de segurança contra o incêndio, mais especificamente de compartimentação, adotou-se por padrão a legislação do Estado de São Paulo e as instruções técnicas do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, que são as mais avançadas do país. Sendo assim, quando esse texto se referir às normas brasileiras, entenda-se normas do Estado de São Paulo;
- b) Portugal: representante da Europa continental, possui a cultura mais próxima possível do Brasil e é um país com médio poder aquisitivo para os padrões europeus;
- c) Inglaterra: representante da Europa insular, possui uma cultura distinta da brasileira ou da portuguesa, possui um alto poder aquisitivo para os padrões europeus;
- d) Hong Kong: representante da Ásia, possui um altíssimo poder aquisitivo para a construção civil e possui a cultura mais distante de todos os países selecionados;
- e) Estados Unidos: representante da América do Norte, possui uma cultura mais próxima da inglesa, sua construção civil é focada em madeira para edificações pequenas e aço para edificações grandes, possuindo características e cultura construtiva únicas, além de possuir um alto poder aquisitivo.

3.1 Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) de paredes ou lajes de compartimentação

Embora os TRRF sejam, geralmente, associados às estruturas, os elementos de compartimentação também devem seguir exigências de TRRF. Por isso, resolveu-se comentar neste subitem, de forma resumida, sobre as exigências de TRRF dos elementos principais de compartimentação (paredes e lajes) por país.

3.1.1 *Brasil*

O tempo requerido de resistência ao fogo para cada uso de edificação pode ser encontrado na Instrução Técnica N° 08 de 2015 do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo.

No caso do Brasil, os únicos parâmetros utilizados para a determinação do TRRF são: uso do edifício, altura do edifício e profundidade do subsolo. A única exceção encontrada foi para as áreas industriais e de depósito, que também são influenciadas pela carga de incêndio média do edifício.

Existem também alguns tipos de edifícios que não possuem valores determinados na Instrução Técnica N° 08 de 2015, uma vez que essas edificações deverão ser submetidas à análise por uma Comissão Técnica do Corpo de Bombeiros por suas especificidades.

Tabelas adaptadas e padronizadas com os valores de TRRF para paredes e lajes de compartimentação do Brasil estão apresentadas no Apêndice B.

3.1.2 *Portugal*

O TRRF para cada uso de edificação pode ser verificado no Decreto-Lei n° 220/2008 e na Portaria n° 1532/2008.

Em Portugal o sistema para a determinação do TRRF é bem desenvolvido, tendo duas características principais:

- a) a primeira é que existem quatro classes de risco distintas com TRRF específicos para cada uso possível do edifício;
- b) a segunda é que utilizando-se das características da edificação e do tipo de uso a que se destina, determina-se a classe de risco do edifício e, consequentemente, seu TRRF.

Para facilitar o entendimento seguem as características utilizadas em cada tipo de uso da edificação para se determinar sua classe de risco:

- a) habitações: altura do edifício e número de subsolos.
- b) estacionamentos: altura do edifício, número de subsolos e área bruta ocupada.
- c) administrativos ou Serviços: altura do edifício e efetivo³⁵.

³⁵ Em Portugal, entende-se por efetivo o total de pessoas admitidas na edificação, somando-se funcionários e visitantes.

- d) instituições de ensino: altura do edifício e efetivo.
- e) hospitais ou casas de repouso: altura do edifício e efetivo.
- f) locais de reunião de público: altura do edifício, número de subsolos e efetivo.
- g) serviços de hospedagem: altura do edifício e efetivo.
- h) comerciais: altura do edifício, número de subsolos e efetivo.
- i) museus ou galerias de arte: altura do edifício e efetivo.
- j) bibliotecas ou arquivos: altura do edifício, número de subsolos e carga de incêndio.
- k) indústrias: número de subsolos e carga de incêndio.
- l) depósitos: número de subsolos e carga de incêndio.

Tabelas adaptadas e padronizadas com os valores de TRRF para paredes e lajes de compartimentação de Portugal estão apresentadas no Apêndice C.

3.1.3 Inglaterra

O tempo requerido de resistência ao fogo para cada uso de edificação pode ser encontrado em *The Building Regulations 2010*.

Da mesma forma que o Brasil, os únicos parâmetros utilizados para a determinação do TRRF são: uso do edifício, altura do edifício e profundidade do subsolo.

Tabelas adaptadas e padronizadas com os valores de TRRF para paredes e lajes de compartimentação da Inglaterra estão apresentadas no Apêndice D.

3.1.4 Hong Kong

O tempo requerido de resistência ao fogo para cada uso de edificação pode ser encontrado em *Code of Practice for Fire Safety in Buildings 2011*.

A norma de Hong Kong difere completamente das outras normas apresentadas anteriormente, uma vez que o TRRF de um edifício é determinado, na maioria dos casos, somente pelo tipo de uso do edifício.

O TRRF também é determinado pela dimensão do compartimento, sendo dividido em dois subgrupos, menores que 2.500 m² e menores que 10.500 m² nas seguintes categorias: Instituições de ensino, locais de reunião de público, comerciais, museus ou galerias de arte e bibliotecas e museus.

Tabelas adaptadas e padronizadas com os valores de TRRF para paredes e lajes de compartimentação de Hong Kong estão apresentadas no Apêndice E.

3.1.5 Estados Unidos

O tempo requerido de resistência ao fogo para cada tipo e para cada uso da edificação pode ser encontrado no *International Building Code 2012*.

Na norma americana o TRRF das paredes de compartimentação variam de acordo com: a atividade existente no edifício; o tipo de construção; sua distância à edificação adjacente (no caso da parede de compartimentação ser uma parede externa).

Diferentemente de todas as normas apresentadas neste trabalho, a norma norte-americana é a única que subdivide as edificações não só pelo tipo de atividade a que se destina, como também pelas características e materiais usados em suas construções.

Estão presentes no IBC 2012 cinco tipos de construções em que, simplificada, podemos considerar:

- a) tipo I: são construções, inclusive a cobertura, cujas estruturas e paredes externas e internas são feitas de materiais incombustíveis, que devem respeitar determinado TRRF. Por exemplo, a estrutura principal deve resistir a 180 min do incêndio-padrão (considerada construção tipo IA) ou 120 min (considerada construção tipo IB);
- b) tipo II: são construções semelhantes ao Tipo I, porém com TRRF mais brando. Por exemplo, a estrutura principal deve resistir a 60 min (considerada construção tipo IIA) ou isenta de verificação estrutural (considerada construção tipo IIB);
- c) tipo III: são construções compostas por paredes externas incombustíveis e elementos construtivos no interior podendo ser combustíveis, respeitando determinados TRRF. Por exemplo, a estrutura principal deve respeitar 60 min (considerada construção tipo IIIA) ou isenta de verificação estrutural (considerada construção tipo IIIB);
- d) tipo IV: são construções compostas por paredes externas de materiais incombustíveis e interiormente, de madeira de alta densidade, denominadas *Heavy Timber* (HT), possuindo características peculiares. Por serem praticamente inexistentes no Brasil e possuírem característica extremamente

específicas, não se entrará no mérito das exigências para este tipo de construção;

- e) tipo V: são construções compostas por qualquer material, que não a defina como um dos tipos citados anteriormente.

Elementos estruturais, assim como entrelpis e telhados, possuem um TRRF específico para cada tipo de construção, diferentemente das outras normas que separam somente pelo uso da edificação (Tabela 5).

Tabela 5 - TRRF para cada elemento por tipo de construção nos Estados Unidos

Para Qualquer Tipo de Atividade									
TRRF		Tipo de Construção							
		IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	VA	VB
Estrutura	Elementos estruturais*	180**	120**	60	0	60	0	60	0
	Paredes estruturais (externas)*	180	120	60	0	120	120	60	0
	Paredes estruturais (internas)	180**	120**	60	0	60	0	60	0
	Piso e elementos secundários associados	120	120	60	0	60	0	60	0
	Teto e elementos secundários associados	90	60	60	0	60	0	60	0
* Os valores destas linhas não podem ser menores do que os apresentados nas tabelas específicas para cada uso da edificação									
** Pode ser reduzido em 60 min caso suporte apenas o telhado									

Fonte: ICC, 2011 (adaptada)

Os tipos de construção³⁶ (com exceção do tipo IV) possuem duas subdivisões, sendo elas denominadas protegidas (A) e não protegidas (B). As edificações do tipo A possuem uma proteção adicional ao fogo de no mínimo uma hora em todos os elementos estruturais, enquanto as edificações do tipo B não possuem qualquer tipo de proteção adicional em seus elementos estruturais, somente a resistência intrínseca a eles (ABIDE BUILDING COMPONENT SYSTEMS).

Tabelas adaptadas e padronizadas com os valores de TRRF para paredes de compartimentação, corta fogo e paredes externas dos Estados Unidos estão apresentadas no Apêndice F.

³⁶ Pare entender de maneira mais completa os tipos de edificações presentes na norma americana o autor recomenda a leitura do *2009 IBC HANDBOOK – Fire- and Life-Safety Provisions* de Douglas W. Thornburg.

3.1.6 *Análise*

Ao realizar uma análise entre as normas apresentadas, pode-se dizer que os critérios utilizados para a obtenção do TRRF para as paredes e lajes de compartimentação possuem uma variação grande:

- a) Hong Kong possui o sistema mais simplificado, tendo como único diferencial, em alguns casos, o tamanho máximo do compartimento da edificação, além, é claro, do tipo de uso do edifício;
- b) tanto o Brasil quanto a Inglaterra baseiam o TRRF de uma edificação em dois critérios além de seu uso: a altura do edifício e a profundidade do subsolo;
- c) Portugal, possui um método mais específico para a determinação do TRRF, pois considera os fatores mais importantes para o aumento do risco a cada tipo de uso da edificação. Os critérios básicos são altura e número de subsolos, porém diversos outros critérios também são levados em conta, tais como: área bruta ocupada; efetivo; efetivo de pessoas consideradas de risco (crianças, pessoas com dificuldade de locomoção, dentre outros); e carga de incêndio;
- d) os Estados Unidos se destacam nos critérios utilizados para a determinação do TRRF. Em primeiro lugar eles classificam a edificação conforme seu tipo de uso, assim como as demais normas. Em segundo lugar eles levam em conta o tipo da edificação, considerando sistemas construtivos, revestimentos e altura da edificação. Por último, ao invés de possuir uma regra única para todas as paredes de compartimentação, eles possuem regras específicas para entresijos, telhados, e principalmente para as paredes internas e para as paredes externas, considerando para estas inclusive o afastamento entre edificações.

3.2 **Elementos de Compartimentação**

Neste item serão apresentados todos os elementos de compartimentação que existem tanto na compartimentação vertical quanto na compartimentação horizontal, como por exemplo, como realizar o tratamento de aberturas entre compartimentos distintos.

Por mais que esta não seja a forma tradicional de se apresentar este tema, o autor considera que a comparação das cinco normas ficará mais clara se subdividida desta maneira.

3.2.1 *Brasil*

No Brasil, para que a compartimentação seja garantida deve-se seguir as seguintes regras:

- a) as paredes e entrepisos de compartimentação devem respeitar as exigências para estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico para o TRRF estipulado para cada tipo de edificação (seção 3.1.1);
- b) as PCF devem ser dimensionadas de acordo com a edificação por meio da norma ABNT NBR 11742:2014, tendo seu TRRF limitado em cento e vinte minutos, diferentemente do TRRF das estruturas, que pode ser superior. Caso a PCF dê acesso ao pavimento ela deve possuir resistência mínima de 90 min, ou se possuir antecâmara, 60 min, independentemente do TRRF da estrutura;
- c) todas as passagens entre compartimentos devem ser fechadas utilizando-se de selos corta fogo ou vedadores corta fogo com o TRRF equivalente ao TRRF do elemento de compartimentação em que está sendo instalado;
- d) as selagens das ligações entre compartimentos de passagens das instalações de serviço não podem possuir TRRF inferior a 60 min. Devendo ser produzidas com materiais ensaiados e caracterizados como resistentes ao fogo por meio dos procedimentos previstos na ABNT NBR 6479:1992. Os tubos plásticos com dimensões superiores a 40 mm devem receber uma proteção adicional para que, após serem consumidos pelo fogo, a selagem seja capaz de fechar o buraco remanescente e que as selagens não sejam destruídas pela ação do fogo;
- e) para a passagem de dutos de ventilação e ar-condicionado deve-se utilizar registros corta fogo automáticos, com TRRF de ao menos 120 min, ou devem ser constituídos de material com resistência ao fogo equivalente à parede ou entrepiso de compartimentação em que está instalada;
- f) paredes corta fogo e prumadas de ventilação permanentes devem possuir TRRF mínimos de 60 min e 30 min, respectivamente.

3.2.2 Portugal

Todas as regras e especificações sobre compartimentação podem ser verificadas no Decreto-Lei n° 220 de 2008 e na Portaria n° 1532 de 2008.

Para a legislação portuguesa todos os edifícios devem ser feitos respeitando-se as exigências de compartimentação, independentemente do uso ou tamanho (exceto edificações unifamiliares).

Portugal possui uma classificação padrão de desempenho da resistência ao fogo dos elementos, sendo atribuídas letras para cada tipo de resistência a um determinado TRRF. A classificação existente é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação dos elementos

Classificação	
R	Estabilidade
E	Estanqueidade
I	Isolamento
W	Radiação
M	Ação mecânica
C	Fechamento automático
S	Passagem de fumaça
P / PH	Fornecimento de energia
G	Resistência ao fogo
K	Capacidade de proteção ao fogo

Fonte: PORTUGAL, 2008a (adaptada)

Para exemplificar o disposto no decreto, apresenta-se alguns dos principais elementos construtivos e suas respectivas classificações:

- elementos estruturais com função de compartimentação são classificados sempre como RE, REI, REI-M ou REW;
- elementos de fachada devem ser E, EI ou EW;
- vedações de aberturas para passagem de tubos de cabo são sempre E ou EI;
- PCF devem ser E, EI ou EW.

As classificações dos demais elementos podem ser verificados nos Quadros I a VI do Anexo II do Decreto-Lei n° 220 (2008).

Todas as edificações são classificadas em quatro classes de risco de acordo com suas características específicas de uso, ou altura da edificação, ou número de

pavimentos, ou área bruta, dentre outros, que podem ser verificados nos Quadros I a X do Anexo III do Decreto-Lei nº 220 (2008).

Para se ter a compartimentação de uma área em Portugal deve-se seguir algumas regras:

- a) cada elemento de compartimentação possui uma classificação própria de resistência ao incêndio, conforme apresentado anteriormente na Tabela 6, devendo ser utilizado de acordo com o TRRF da edificação até o um valor máximo determinado em norma para aquele tipo de elemento, por exemplo, existem pisos falsos com resistência de quinze ou trinta minutos, devendo ser utilizado o de trinta para estruturas com TRRF iguais ou superiores a trinta minutos;
- b) as paredes e os entrepisos de compartimentação, bem como os elementos estruturais, devem garantir estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico (classe REI);
- c) as PCF são dimensionadas de acordo com o TRRF da estrutura, existindo PCF com resistência de até duzentos e quarenta minutos³⁷;
- d) todas as aberturas entre compartimentos devem ser vedadas com selos corta fogo ou vedadores corta fogo de resistência equivalente à parede ou laje;
- e) toda a tubulação deve estar protegida por dutos resistentes ao fogo providos de registros corta fogo automático;
- f) os dutos de ar-condicionado e ventilação devem possuir registros corta fogo automático entre compartimentos distintos.

3.2.3 Inglaterra

Todas as regras e especificações sobre compartimentação podem ser verificadas em *The Building Regulations* (2010), que são válidas para a Inglaterra e País de Gales. Na Inglaterra, a obrigatoriedade da compartimentação se dá de forma similar à obrigatoriedade em Portugal, onde todas as edificações devem ser compartimentadas (com exceção das edificações unifamiliares). Além dessa obrigatoriedade, existem algumas especificidades quanto às edificações geminadas, edificações de uso misto e outros usos específicos, mas que no geral só solicitam uma separação de

³⁷ É interessante lembrar que no Brasil, conforme apresentado no item 3.2.2, as PCF são limitadas em cento e vinte minutos.

compartimentos, ou seja, num mesmo edifício de uso misto uma área comercial e uma área residencial devem constituir compartimentos isolados, mesmo estando no mesmo pavimento.

Além disso, a norma inglesa também se utiliza da classificação apresentada pela norma portuguesa para a classificação do TRRF (Tabela 6).

A compartimentação na Inglaterra é determinada da seguinte forma:

- a) as paredes e entrepisos de compartimentação, bem como os elementos estruturais, devem garantir estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico para um tempo mínimo estipulado para cada tipo de edificação (TRRF), ou seja, são de classe REI;
- b) outros elementos do edifício, tais como vigas, pilares, pisos, dutos, podem possuir TRRF distintos entre si, uma vez que seus valores são tabelados (tabelas A1 e A2 do Anexo B do *The Building Regulations* (2010));
- c) todas as paredes de compartimentação ou lajes que separem os usos comercial e residencial devem ser de classe REI com TRRF mínimo de 60 min, qualquer outro piso deve seguir o TRRF da estrutura;
- d) todo tipo de enclausuramento, independentemente do que está sendo enclausurado, deve ter TRRF mínimo de 30 min de classes E, EI ou REI;
- e) as PCF devem ser dimensionadas para um mínimo equivalente ao TRRF da estrutura, possuindo um valor mínimo de resistência de vinte, trinta ou sessenta minutos, dependendo do tipo de edificação. A norma inglesa permite também a associação de duas portas corta fogo, no caso da presença de uma antecâmara, de forma a ampliar o tempo de resistência ao fogo total do grupo. Por exemplo, é possível que uma PCF 30 dê para um corredor com outra PCF 30, sendo equivalente a uma PCF 60. Deve-se lembrar que nesse último caso ambas as PCF devem possuir resistência mínima de trinta minutos;
- f) as aberturas entre compartimentos, para passagem de tubulações e similares, devem possuir dimensões máximas de acordo com o material de constituição dos tubos, variando entre quarenta milímetros (para materiais combustíveis) até cento e sessenta milímetros (para matérias incombustíveis). Essas aberturas devem ser seladas com materiais que garantam a estanqueidade e o isolamento térmico da abertura por um tempo igual ou superior ao TRRF da

edificação. Esses selantes podem ser feitos à base de cimento, gesso, fibra de vidro, escória de alto-forno, dentre outros;

- g) Todos os entroncamentos, *shafts* e tubulações que interligam compartimentos distintos devem ser protegidos com materiais resistentes ao fogo em harmonia com o TRRF do elemento de compartimentação no qual está alocado;
- h) Dutos de ventilação e ar-condicionado podem ser protegidos por meio de registros corta fogo automáticos, ou estando enclausurados por materiais com TRRF equivalente ao da estrutura, com TRRF mínimo de 30 min e classe E;
- i) Shafts específicos para o combate ao incêndio (com tubulações de chuveiros automáticos por exemplo) devem possuir enclausuramento de classe REI com TRRF mínimo de 60 min;
- j) Todos os elementos resistentes ao fogo de uma edificação, que não sejam de compartimentação, devem possuir TRRF mínimo de 30 min de classe REI.

3.2.4 Hong Kong

Todas as regras e especificações sobre compartimentação podem ser verificadas em *Code of Practice for Fire Safety in Buildings* (2011).

Assim como a norma portuguesa, a norma hongconguesa determina que, todos os edifícios devem ser feitos respeitando-se as exigências de compartimentação, ou seja, todas as edificações, independentemente do tipo de uso, área bruta ou mesmo número de pavimentos, devem possuir elementos de compartimentação em sua estrutura, seja internamente (caso exceda a área máxima do compartimento) ou externamente (quando próxima a outra edificação).

A normatização de Hong Kong é bem simplificada, mas não menos segura³⁸, sendo que, para garantir a compartimentação deve-se seguir os seguintes preceitos:

- a) todas as paredes e entrepisos de compartimentação devem garantir estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico para, no mínimo, o tempo de resistência ao fogo requerido para o edifício;
- b) todas as aberturas e passagens entre compartimentos devem ser seladas por materiais que garantam a estanqueidade e o isolamento térmico da parede de

³⁸ Na realidade a norma hongconguesa acaba sendo até mais rígida que as demais normas, uma vez que a falta de subdivisões acarreta a utilização de TRRF mais alto para edificações de menor porte.

- compartimentação por um tempo mínimo equivalente ao TRRF da estrutura, paredes e lajes de compartimentação;
- c) as PCF devem possuir um tempo de resistência ao fogo equivalente ou superior ao TRRF da edificação em questão, podendo ser reduzido em 30 min caso existam chuveiros automáticos dos dois lados da porta.

3.2.5 Estados Unidos

As regras e especificações sobre compartimentação podem ser verificadas no *International Building Code 2012*.

Para o código americano todas as edificações devem ser compartimentadas e cada compartimento deve ser considerado como uma edificação distinta, sendo uma visão mais radical e bem diferente das apresentadas nas outras normas.

A norma americana prevê que, para que seja garantida a compartimentação, deve-se seguir os seguintes princípios:

- a) todas as paredes de compartimentação, assim como os elementos estruturais, devem garantir sua estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico para um determinado TRRF, variando não só de acordo com o tipo e uso da edificação, como também para cada elemento construtivo distinto, conforme apresentando anteriormente no item 3.1.5;
- b) as PCF devem ser dimensionadas para resistirem no mínimo o mesmo tempo que o TRRF da estrutura em que ela está sendo instalada;
- c) uma vez que para a norma americana cada compartimento deve ser considerado como uma edificação distinta, as selagens das ligações entre compartimentos devem ser realizadas com materiais que garantam a estanqueidade e o isolamento térmico por um período mínimo equivalente ao TRRF da parede em questão;
- d) as aberturas existentes para o exterior de um compartimento são limitadas a uma porcentagem da área da parede, variando de acordo com o tipo de construção e de sua distância para outra edificação. Em alguns casos específicos, edificações com chuveiros automáticos podem ter sua área máxima de abertura para o exterior ampliada;
- e) todos os dutos de ventilação e ar-condicionado devem ser protegidos por registros corta fogo automáticos.

3.2.6 *Análise*

Fazendo uma análise similar à realizada no item anterior referente ao TRRF, após compararmos as normas dos países selecionados percebemos que o principal consenso encontrado foi a definição de compartimentação, conforme pode ser observado também no item 2.3.9, além do fato da preocupação com a selagem de vãos de passagem de tubulações ser sempre similar.

Por mais que os tipos de edificações não sejam agrupados sempre da mesma forma nas diversas normas, foi possível verificar que a ideia geral e as características básicas são sempre as mesmas.

O ponto divergente mais evidente foi a rigidez presente nas legislações, sendo que, de forma resumida temos:

- a) Portugal possui uma legislação bem direcionada para cada tipo de elemento, possuindo valores e classes de TRRF para cada elemento. Fora isso não existem muitas exceções para TRRF específicos para dutos, PCF e similares;
- b) a Inglaterra apresenta diversos valores mínimos de resistência para elementos de compartimentação, como enclausuramentos, PCF, dutos de ventilação e similares. Isso ocorre pelo fato da legislação inglesa ser mais branda quanto à determinação do TRRF das paredes e lajes de compartimentação, uma vez que possuem seus valores muitas vezes reduzidos pelo uso de chuveiros automáticos em compartimentos;
- c) Hong Kong possui a legislação com menor número de exceções, tendo o valor do TRRF de todos os elementos de compartimentação em harmonia com o TRRF da estrutura. A única exceção é a da redução do TRRF da PCF no caso de existirem chuveiros automáticos dos dois lados da porta;
- d) os Estados Unidos possuem uma norma extremamente rígida, uma vez que consideram cada compartimento como sendo uma edificação isolada, não possuindo muitas exceções, assim como a norma de Hong Kong;
- e) a norma Brasileira é de longe a norma com maior número de exceções e especificidades, possuindo valores específicos de TRRF para PCF, selagens, dutos e passagens de ventilação, prumadas de ventilação dentre outros, que muitas vezes são bem superiores à exigida para as paredes e entrepisos de compartimentação. Um exemplo claro é o do caso de uma PCF que dê acesso a um pavimento, devendo possuir resistência mínima de 90 min, enquanto a

edificação pode ter uma resistência de apenas 30 min. Por sua vez, é possível ter uma PCF com 120 min em uma edificação com TRRF igual a 240 min.

3.3 Compartimentação Vertical

É importante lembrar que neste item só serão abordados elementos exclusivos à compartimentação vertical. Elementos conjuntos à compartimentação horizontal, tais como: selantes, passagens de tubulações e similares, já foram abordados no item anterior (3.2).

3.3.1 *Brasil*

Segundo o decreto estadual Nº 58.819 de 2011 do Estado de São Paulo, só será necessária a compartimentação vertical caso a área de compartimentação seja superior a 750 m² ou caso a altura da edificação seja superior a 12 m³⁹. Em alguns casos específicos a compartimentação vertical pode ser substituída por detectores de fumaça ou chuveiros automáticos. Podendo inclusive ser exigida a compartimentação vertical em edificações mais baixas, como é o caso de hospitais. Para se garantir a compartimentação vertical, deve-se seguir os seguintes preceitos:

- a) as escadas devem ser sempre enclausuradas, existindo duas classes principais de escadas, as enclausuradas protegidas (EP), com TRRF do enclausuramento de valor igual ou maior que 120 min e PCF com TRRF de 90 min, e as enclausuradas à prova de fumaça (PF), onde o TRRF do enclausuramento deve ser de 120 min e possuir PCF com TRRF de 60 min;
- b) os elevadores, monta-carga e poços devem ser enclausurados, utilizando-se inclusive de PCF nas aberturas. O TRRF dos elementos de elevadores de segurança⁴⁰ deve seguir o padrão apresentado para as escadas, enquanto os

³⁹ Exemplificando: um edifício com 10 m de altura e pavimento de 1.000 m² pode ou não ter compartimentação vertical obrigatória. Se cada pavimento for um único compartimento, será necessária a compartimentação vertical, porém, se o pavimento for composto por dois compartimentos de 500 m², a compartimentação vertical não é obrigatória.

⁴⁰ Elevadores de segurança são elevadores desenvolvidos especificamente para suportarem o uso em situações de incêndio.

demaís devem seguir o padrão das paredes de compartimentação e PCF do compartimento;

- c) deve existir separação vertical entre aberturas de compartimentos consecutivos na fachada, constituídos de vigas, parapeitos ou prolongamento dos entrepisos. No caso de separação por vigas ou parapeitos, a distância mínima entre as aberturas deve ser de 1,2 metro. Se a separação for feita por meio do prolongamento do entrepiso, ele deve possuir ao menos noventa centímetros de projeção.

3.3.2 Portugal

Todas as regras e especificações sobre compartimentação vertical podem ser verificadas no Decreto-Lei n° 220 (2008) e na Portaria n° 1532 (2008).

É importante lembrar que, para a legislação portuguesa, todos os edifícios devem ser compartimentados (exceto edificações unifamiliares), sendo que cada pavimento deve necessariamente fazer parte de um compartimento distinto.

A compartimentação vertical em Portugal garante-se seguindo as seguintes regras:

- a) todas as vias de evacuação devem ser enclausuradas, devendo-se utilizar PCF ou até mesmo câmaras corta fogo para edifícios com mais de 28 metros de altura (edifícios altos). As outras vias de circulação vertical devem ser enclausuradas com paredes de compartimentação com TRRF de 30 min (para pequenas e médias alturas) e 60 min (para edifícios altos) e utilizar portas resistentes ao fogo com TRRF de 15 ou 30 min de acordo com a altura da edificação. As paredes estruturais devem ser de classe REI, as não estruturais de classe EI e as PCF devem ser de classe EC;
- b) elevadores e similares devem possuir paredes de compartimentação resistentes a 60 min (de classes EI ou REI) e portas resistentes a 30 min (de classe EC);
- c) também devem se respeitar uma distância mínima de 1,1 metro entre aberturas verticais de compartimentos distintos e subsequentes, lembrando que todas as paredes externas são consideradas paredes de compartimentação. Caso a abertura possua um elemento saliente, tais como palas, varandas ou similares, prolongadas por no mínimo 1 metro para cada lado do vão com resistência ao

fogo de ao menos 60 min, a distância mínima entre as aberturas é de 1,1 metro menos o tamanho da saliência.

3.3.3 Inglaterra

Todas as regras e especificações sobre compartimentação vertical podem ser verificadas em *The Building Regulations* (2010) e no relatório *External fire spread: building separation and boundary distances* (BR 187, BRE 1991), que são válidas para a Inglaterra e País de Gales.

É importante lembrar que, para a legislação inglesa, toda edificação deve ser compartimentada (com exceção das edificações unifamiliares), e que cada pavimento deve necessariamente constituir um compartimento distinto.

A compartimentação vertical na Inglaterra é obtida da seguinte maneira:

- a) todas as vias de evacuação vertical, escadas e elevadores, devem possuir enclausuramento com TRRF mínimo de 30 min e classe REI;
- b) para se obter a distância mínima entre aberturas verticais presentes em compartimentos distintos deve-se utilizar um método tabular que funciona simplificada da seguinte forma (Figura 26):
 - primeiro determinam-se todas as áreas não protegidas da fachada em análise do compartimento, sendo que esta área pode ser tanto um vão livre como uma parede que não seja de compartimentação (parede comum);
 - com todas as áreas não protegidas definidas, determina-se um retângulo imaginário, o menor possível, que as englobe, denominado área de exposição a risco;
 - com esta área em mãos determina-se sua largura, altura e porcentagem de áreas não protegidas em relação à área total do retângulo;
 - levam-se estes dados a uma tabela (sempre procurando o valor mais próximo superior ao real) e obtém-se a distância mínima desta área de exposição a risco para a área de exposição a risco do compartimento subsequente. As distâncias mínimas podem variar de 1 metro ao extremo de 55,5 metros.

Figura 26 – Elevação de fachada para exemplo de distância entre áreas de exposição a risco de dois compartimentos

Fonte: Elaborada pelo autor

3.3.4 Hong Kong

Todas as regras e especificações sobre compartimentação vertical podem ser verificadas em *Code of Practice for Fire Safety in Buildings* (2011).

Assim como a legislação portuguesa e inglesa, todos os edifícios devem ser compartimentados em Hong Kong (exceto edificações unifamiliares), sendo que cada pavimento deve necessariamente fazer parte de um compartimento distinto.

Para se garantir a compartimentação vertical em Hong Kong deve-se seguir os seguintes preceitos:

- vãos de diferentes compartimentos (vertical) devem ser separados por um elemento vertical de no mínimo noventa centímetros, ou de uma projeção horizontal de no mínimo cinquenta centímetros, sendo estes elementos de TRRF equivalente ao da edificação. Esses elementos são dispensados em edificações unifamiliares ou que possuam chuveiros automáticos;

- b) todos os poços de elevadores devem ser feitos com paredes de compartimentação com TRRF de no mínimo 120 min, bem como possuir PCF com também no mínimo 120 min de TRRF;
- c) todos os materiais presentes em escadas devem ser incombustíveis, sendo enclausuradas com um TRRF equivalente ao exigido pela edificação, incluindo PCF de mesma categoria.

3.3.5 Estados Unidos

As regras e especificações sobre compartimentação vertical dos Estados Unidos podem ser verificadas no *International Building Code 2012*.

É importante lembrar que para a legislação americana todas as edificações devem ser compartimentadas, assim como, cada compartimento deve ser tratado como um edifício distinto.

Para se garantir a compartimentação vertical nos Estados Unidos, deve-se seguir os seguintes princípios:

- a) todas as escadas, elevadores e shafts devem ser enclausurados com paredes de compartimentação de TRRF de no mínimo 120 min, com exceção se shafts não acessíveis e que não possuam matérias combustíveis em seu interior, onde o enclausuramento pode ser feito com paredes de TRRF igual a 60 min;
- b) aberturas presentes em dois compartimentos verticais subsequentes devem ser separados por um elemento vertical com no mínimo 91,5 centímetros, ou uma projeção horizontal de no mínimo 76,2 centímetros, sendo que ambos os elementos devem possuir um TRRF de no mínimo 60 min. Esses parâmetros são dispensados em edifícios com chuveiros automáticos, garagens abertas ou edifícios de até três pavimentos.

3.3.6 Análise Crítica

Ao realizar uma comparação entre as normas do mesmo modo que foi realizado anteriormente podemos perceber que nesse quesito existe uma convergência entre as normas, uma vez que todas exigem o enclausuramento de escadas, elevadores e similares, e exigirem um afastamento vertical entre vãos de compartimentos distintos, mesmo que cada uma possua uma exigência específica e única para esses quesitos.

Em todos os países existe a obrigação de compartimentação para todas as edificações, com exceção do Brasil que exige somente em edifícios com mais de doze metros de altura ou área de compartimento superior a setecentos e cinquenta metros quadrados.

Por outro lado, o entendimento de quando uma edificação deve ser compartimentada varia muito de país para país. De maneira resumida temos:

- a) o Brasil possui uma das normas mais brandas nesse quesito, exigindo a compartimentação vertical somente em edificações com mais de doze metros de altura ou com áreas de compartimentação superiores a 750 m². Por outro lado, possui valores mínimos de TRRF bem altos (120 min) para o enclausuramento de vias de evacuação, garantindo uma segurança mínima na evacuação;
- b) Portugal possui uma norma bem rígida para a compartimentação vertical, uma vez que todos os pavimentos são considerados compartimentos distintos, independentemente do uso da edificação. Assim como no Brasil, também são exigidos valores mínimos de TRRF para o enclausuramento das vias de evacuação vertical, porém com valores mais brandos que os presentes na norma brasileira;
- c) assim como em Portugal, a legislação de Hong Kong exige que todos os pavimentos de uma edificação sejam considerados compartimentos distintos, independentemente do uso da edificação. Por outro lado, a norma de Hong Kong é a mais rígida no TRRF mínimo do enclausuramento de escadas e elevadores, tendo o mesmo valor que no Brasil (120 min), porém com TRRF das PCF mais elevados (120 min contra 60 min do Brasil);
- d) a Inglaterra possui uma norma mais simples, porém tão rígida quanto a de Portugal e Hong Kong, pois solicita a compartimentação em todas as edificações, mas não possui tantas especificidades, somente um TRRF mínimo para o enclausuramento das vias de evacuação vertical;
- e) além de exigirem a compartimentação em todas as edificações, como Portugal, Inglaterra e Hong Kong, os Estados Unidos, são bem rígidos na exigência do enclausuramento de escadas, elevadores e *shafts*, assim como Hong Kong, exigindo um TRRF mínimo de 120 min. A única exceção são os *shafts* não acessíveis, cujo TRRF deve ser no mínimo 60 min.

Quanto à distância mínima vertical entre vãos de compartimentos distintos vale ressaltar:

- a) a norma brasileira exige uma distância de 1,2 metro entre vãos, e a existência de uma projeção ao menos 90 centímetros do entrepiso;
- b) em Portugal deve-se respeitar uma distância mínima vertical de 1,1 metro entre os vãos, podendo esse valor ser reduzido caso exista a presença de saliências na fachada (como varandas e similares) com resistência ao fogo e de comprimento ao menos um metro a mais para cada lado que a largura do vão. Nesses casos a distância passa a ser 1,1 metro menos o valor do balanço do elemento existente;
- c) a norma de Hong Kong é a mais branda nesse quesito, exigindo uma separação vertical mínima de noventa centímetros ou uma projeção horizontal de no mínimo cinquenta centímetros. Um ponto bem divergente das outras normas é que essa distância mínima também pode ser substituída pelo uso de chuveiros automáticos nos compartimentos;
- d) o cálculo da distância entre vãos na Inglaterra é, não só o mais complexo, como também o mais rígido de todos, tendo as seguintes características: a distância mínima entre aberturas verticais e horizontais é a mesma; o valor da distância mínima varia de acordo com todos os vãos presentes em um mesmo plano de fachada do compartimento, não sendo uma distância simples entre duas aberturas (como nas outras normas apresentadas); seus valores variam entre 1 e 55,5 metros;
- e) nos Estados Unidos exige-se uma separação vertical entre vãos mínima de 91,5 centímetros, ou uma projeção horizontal com ao menos 76,2 centímetros, sendo que em ambos os casos os elementos de afastamento devem possuir um TRRF de ao menos 60 min. É importante frisar que, caso o edifícios possua chuveiros automáticos, a distância vertical entre aberturas deixa de ser exigida.

3.4 Compartimentação Horizontal

3.4.1 *Brasil*

No Brasil, para que a compartimentação horizontal seja adequada deve-se garantir:

- a) a distância mínima horizontal entre aberturas para o exterior de compartimentos adjacentes deve ser de dois metros, podendo ser substituída por uma prolongação da parede de compartimentação com ao menos noventa centímetros. Essa distância também pode ser substituída pelo uso de portas/vedadores/vidros corta fogo de resistência equivalente à da estrutura;
- b) os compartimentos devem possuir uma área máxima, podendo possuir múltiplos pavimentos, conforme descrito a seguir.

As áreas máximas permitidas para um compartimento, são apresentadas na Instrução Técnica N° 09 de 2015 do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo. A Tabela 7 apresenta os valores que essa norma determina como área máxima para um compartimento, baseado na altura da edificação e no seu tipo de uso.

As áreas máximas de compartimentos apresentadas variam entre 800 e 20.000 m² (além de áreas ilimitadas para alguns tipos de edificações).

Pode se observar que para algumas ocupações, por exemplo em serviços ou shoppings, a área máxima reduz com o aumento da altura da edificação, porém, a partir de determinada altura, a área máxima aumenta. Isso acontece porque a partir dessa altura há exigência extras de segurança contra incêndio, como por exemplo, a obrigatoriedade da instalação de chuveiros automáticos. Isso alerta que as IT's devem ser sempre empregadas em conjunto.

Tabela 7 – Área Máxima de Compartimentação para o Estado de São Paulo

Área Máxima de Compartimentação (m²)								
		Altura da Edificação						
		Térrea	≤ 6 m	≤ 12 m	≤ 23 m	≤ 30 m	> 30 m	
Tipo de Edificação	Habitações		-	-	-	-	-	-
	Estacionamentos		-	-	-	-	-	-
	Administrativos ou Serviços		5.000*	2.500*	1.500	1.000	800	1.500
	Instituições de Ensino		-	-	-	-	-	-
	Hospitais ou Casas de Repouso		-	-	-	2.000	1.500	1.000
	Locais de Reunião de Público		-	-	-	2.000**	1.500**	1.000**
	Serviços de Hospedagem		-	5.000	4.000	3.000	1.500	1.500
	Comerciais	Comércios em geral	10.000*	5.000*	2.500	2.000	1.500	1.500
		Shoppings	5.000*	2.500*	1.500	1.000	800	1.000
	Museus ou Galerias de Arte		-	-	-	-	-	-
	Bibliotecas ou Arquivos		-	-	-	-	-	-
	Indústrias	Carga de incêndio ≤ 300 MJ/m²	-	10.000	5.000	3.000	1.500	2.000
		Carga de incêndio ≤ 1.200 MJ/m²	-	10.000	5.000	3.000	1.500	2.000
		Carga de incêndio > 1.200 MJ/m²	7.500*	5.000	3.000	1.500	1.000	1.500
	Depósitos	Materiais incombustíveis	-	-	-	-	-	-
		Carga de incêndio ≤ 300 MJ/m²	10.000*	5.000	3.000	1.500*	2.000	1.500
		Carga de incêndio ≤ 1.200 MJ/m²	7.500*	3.000	2.000	2.500	1.500	1.000
		Carga de incêndio > 1.200 MJ/m²	4.000*	2.500	1.500	2.000	1.500	1.000

* Esta área pode ser dobrada caso haja sistemas de detecção e controle de fumaça

** Somente: locais destinado às artes cênicas; auditórios; clubes sociais ou de diversão; locais para refeição

Fonte: Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2015d (adaptada)

Segundo o decreto nº 56.819 do Estado de São Paulo de 2011 em praticamente todos os edifícios com altura inferior a trinta metros, cuja área máxima de compartimentação é obrigatória (determinada por meio desse mesmo decreto), é possível substituir a restrição de área pela utilização de chuveiros automáticos, sendo algumas vezes necessário associá-los à detectores de incêndio. Alguns exemplos em que nunca é possível realizar esta substituição são edifícios especiais como centros de comunicação ou centros de produção, armazenagem, manipulação e distribuição de materiais inflamáveis ou combustíveis.

3.4.2 Portugal

Para se garantir a compartimentação horizontal segundo as normas de Portugal (Decreto-Lei nº 220 de 2008 e Portaria nº 1532 de 2008) deve-se garantir que:

- a) as distâncias mínimas horizontais entre aberturas para o exterior de compartimentos adjacentes são previstas somente nos casos de fachadas anguladas, onde não se pode haver aberturas com distâncias menores que um metro do vértice (para ângulos entre 100° e 135°) e menores que 1,5 metro (para ângulos de até 100°). A classe de resistência dessas paredes se dá pela altura do edifício, possuindo TRRF mínimo de 30 min para edifícios de altura menor ou igual a 28 m e mínima de 60 min para edifícios maiores. Em ambos o TRRF deve ser de classe EI;
- b) as paredes exteriores do edifício devem ser de classe EI ou REI com TRRF mínimo de 60 min, tendo seus vãos guarnecidos por elementos de classe E com TRRF mínimo de 30 min;
- c) também são previstas áreas máximas para os compartimentos, conforme apresentado a seguir.

Tabela 8 - Área Máxima de Compartimentação para o Portugal

Área Máxima de Compartimentação (m ²)			
		Subsolos	Sobresolos
Tipo de Edificação	Habitacões	1.600	1.600
	Estacionamentos	3.200	6.400
	Administrativos ou Serviços	1.600	1.600
	Instituições de Ensino	Comuns	1.600
		de Risco*	800
	Hospitais ou Casas de Repouso	Comuns	1.600
		de Risco*	800
	Locais de Reunião de Público	1.600	1.600
	Serviços de Hospedagem	1.600	1.600
	Comerciais	1.600	1.600
	Museus ou Galerias de Arte	1.600	1.600
	Bibliotecas ou Arquivos	400	800
	Indústrias	Carga de incêndio ≤ 500 MJ/m ² (ou ≤ 1.000 MJ/m ² se for ao ar livre)**	-
		Carga de incêndio ≤ 5.000 MJ/m ² (ou ≤ 10.000 MJ/m ² se for ao ar livre)***	2.400
		Carga de incêndio ≤ 15.000 MJ/m ² (ou ≤ 30.000 MJ/m ² se for ao ar livre)***	800
		Carga de incêndio > 15.000 MJ/m ² (ou > 30.000 MJ/m ² se for ao ar livre)****	400
	Depósitos	Carga de incêndio ≤ 5.000 MJ/m ² (ou ≤ 10.000 MJ/m ² se for ao ar livre)**	-
		Carga de incêndio ≤ 50.000 MJ/m ² (ou ≤ 100.000 MJ/m ² se for ao ar livre)***	2.400
		Carga de incêndio ≤ 150.000 MJ/m ² (ou ≤ 300.000 MJ/m ² se for ao ar livre)***	800
		Carga de incêndio > 150.000 MJ/m ² (ou > 300.000 MJ/m ² se for ao ar livre)****	400

* Entende-se por risco instituições que abriguem crianças com menos de seis anos ou deficientes físicos

** Sem subsolo

*** Até 1 nível de subsolo

**** Independentemente da carga de incêndio caso possua mais de um subsolo

OBS: Para as indústrias e os depósitos os valores apresentados correspondem a edificações que possuam divisa apenas com edifícios industriais ou de depósito. Se houver divisa com edificação que possua espaços de habitação, ou com edificação que receba público, os valores devem ser divididos por três para subsolos e para sobressolos com carga de incêndio maiores que 5.000 MJ/m² (ou maior que 10.000 MJ/m² caso seja ao ar livre) ou por dois para os demais casos, sendo a área mínima de 400 m². Se essas edificações coexistirem com outros tipos de utilização as áreas máximas devem ser divididas por oito para sobressolos com carga de incêndio menores que 500 MJ/m² (ou menores que 1.000 MJ/m² caso seja ao ar livre) e por seis em todos os demais subsolos e sobressolos, sendo a área mínima de 400 m². Se o edifício for isolado não existem limites para a área máxima de compartimentação.

Fonte: PORTUGAL, 2008 (Portaria n° 1532) (adaptada)

Pode-se verificar na Tabela 8, que a legislação portuguesa determina as áreas máximas de compartimentação com base em apenas dois critérios: o tipo de uso da edificação e se o pavimento é um subsolo ou se é localizado acima do solo, exceto para edifícios industriais e depósitos para os quais a carga de incêndio também é considerada.

As áreas máximas de compartimentação apresentadas variam entre 400 e 12.800 m² (além de áreas ilimitadas para alguns tipos de edificações).

3.4.3 Inglaterra

As regras e especificações sobre compartimentação horizontal para a Inglaterra (e País de Gales) estão presentes em *The Building Regulations* (2010) e no relatório

External fire spread: building separation and boundary distances (BR 187, BRE 1991), podendo ser garantidas da seguinte maneira:

- para se obter a distância mínima entre aberturas horizontais presentes em compartimentos distintos deve-se utilizar o mesmo método tabular apresentado para a distância mínima entre aberturas verticais, ou seja, as distâncias horizontais e verticais entre aberturas deve ser a mesma;
- os compartimentos devem obedecer a área máxima prevista em norma de acordo com o tipo de edificação, conforme pode ser observado a seguir.

Tabela 9 - Área Máxima de Compartimentação para a Inglaterra

Área Máxima de Compartimentação (m²)							
		Altura da Edificação					
		Sem Sprinklers			Com Sprinklers		
		Térreo	≤ 12 m	> 12 m	Térreo	≤ 12 m	> 12 m
Tipo de Edificação	Habitações	*	*	*	*	*	*
	Estacionamentos	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado
	Administrativos ou Serviços	Ilimitado	2.000	2.000	Ilimitado	4.000	4.000
	Instituições de Ensino	*	*	*	*	*	*
	Hospitais ou Casas de Repouso	*	*	*	*	*	*
	Locais de Reunião de Público	Ilimitado	2.000	2.000	Ilimitado	4.000	4.000
	Serviços de Hospedagem	*	*	*	*	*	*
	Comerciais	Ilimitado	2.000	2.000	Ilimitado	4.000	4.000
	Museus ou Galerias de Arte	Ilimitado	2.000	2.000	Ilimitado	4.000	4.000
	Bibliotecas ou Arquivos	Ilimitado	2.000	2.000	Ilimitado	4.000	4.000
	Indústrias**	Ilimitado	7.000	2.000	Ilimitado	14.000	4.000
Depósitos	Ilimitado	20.000	4.000	Ilimitado	40.000	8.000	
* Estas edificações não possuem área máxima de compartimentação. Utiliza-se apenas um limite máximo de deslocamento para fuga							
** Altura limite de 18m ao invés de 12m							

Fonte: HER MAJESTY'S GOVERNMENT, 2006 (adaptada)

Como pode ser verificado na Tabela 9, a legislação inglesa determina a área máxima de um compartimento somente para utilizações consideradas não residenciais, com base na altura da edificação e na presença ou não de um sistema de chuveiros automáticos, cujas características podem ser encontradas no *The Building Regulations* (2010).

Além disso verifica-se que as áreas máximas de compartimentação variam entre 2.000 e 40.000 m² (além de áreas ilimitadas para alguns tipos de edificações).

No caso em que não são determinadas áreas máximas de compartimentação é aplicado simplesmente uma distância máxima de fuga da edificação.

3.4.4 Hong Kong

Para garantir a compartimentação horizontal em Hong Kong deve-se seguir os seguintes preceitos presentes no *Code of Practice for Fire Safety in Buildings* (2011):

- a) da mesma forma que a norma portuguesa, existe uma distância mínima horizontal entre duas aberturas de dois compartimentos adjacentes (nesse caso sendo ou não da mesma edificação) dependendo da angulação da fachada. Para ângulos maiores que 135° deve-se afastar a abertura no mínimo noventa centímetros da parede de compartimentação, entanto para ângulos menores do que 135° a distância aumenta para cento oitenta centímetros. Esses valores só são aplicados a duas edificações distintas caso estejam afastados a menos de 1,8 metros entre si em um mesmo lote;
- b) os compartimentos devem possuir uma área máxima, conforme apresentado a seguir.

A norma de Hong Kong é bem diferente das normas citadas anteriormente, pois, como pode ser verificado na Tabela 10, a área máxima de compartimentação depende única e exclusivamente do tipo de uso que a edificação possuirá.

Os grupos das indústrias e dos depósitos, além de uma área máxima de compartimentação possuem também um volume máximo de compartimentação, que varia entre 7.000 e 28.000 m³.

As áreas máximas de compartimentação apresentadas variam entre 2.500 e 10.500 m² (além de áreas ilimitadas para alguns tipos de edificações).

Tabela 10 - Área Máxima de Compartimentação para Hong Kong

Área Máxima de Compartimentação (m ²)		
Tipo de Edificação	Habitacões	Ilimitado
	Estacionamentos	10.500
	Administrativos ou Serviços	10.500
	Instituições de Ensino	10.500
	Hospitais ou Casas de Repouso	2.500
	Locais de Reunião de Público	10.500
	Serviços de Hospedagem	Ilimitado
	Comerciais	10.500
	Museus ou Galerias de Arte	10.500
	Bibliotecas ou Arquivos	10.500
	Indústrias*	10.500
	Depósitos*	10.500
	* O volume máximo é de 28.000 m ³ ou 7.000 m ³ para materiais ou procesos potencialmente inflamáveis ou explosivos	

Fonte: BUILDINGS DEPARTMENT, 2012 (adaptada)

3.4.5 Estados Unidos

Para que seja garantida a compartimentação horizontal nos Estados Unidos, deve-se seguir os parâmetros presentes no *International Building Code 2012*, sendo eles:

- a) a parede de compartimentação horizontal deve, por padrão, se projetar para o exterior da edificação por, no mínimo, 45,7 centímetros, garantindo assim a compartimentação horizontal. Essa projeção pode, no entanto, ser dispensada em alguns casos específicos, tais como:
 - se a parede externa for uma parede de compartimentação resistente a no mínimo 60 minutos com no mínimo 1,22 metros para cada lado e que qualquer abertura deve possuir proteção de no mínimo 45 minutos;
 - se a parede externa for de material incombustível com no mínimo 1,22 metros para cada lado;
 - caso a edificação possua chuveiros automáticos;
- b) no caso de faixadas anguladas de até 180 graus, provenientes de compartimentos distintos, deve-se criar uma faixa de proteção com no mínimo 1,22 metros em cada empena, sendo que esta faixa deve possuir TRRF de no mínimo 60 min e todas as aberturas devem possuir proteção com TRRF de no mínimo 45 min;
- c) os compartimentos também devem seguir áreas limites de pavimento, que por similaridade aos demais países serão consideradas como áreas de compartimentação. Além disso a norma define também alturas máximas das edificações.

Essas áreas de compartimentação horizontal fazem parte de um conjunto de limites construtivos que, como um todo, o IBC considera adequado à segurança contra incêndio para cada tipo de construção.

Esse conjunto de limites é formado por: limites de área; tipo de construção (que possuem TRRF específicos); altura do edifício; tipo de uso da edificação.

As áreas máximas de compartimentação, conforme pode ser visto na Tabela 11, variam entre 511 e 7.339 m² (permitindo áreas ilimitadas em algumas situações).

O número máximo de andares varia entre 2 e 11 (ou ilimitado em alguns tipos construtivos e atividades).

As alturas máximas variam entre 12,2 e 48,8 m (ou ilimitado para o caso de edificações do tipo IA).

Tabela 11 - Área Máxima de Compartimentação, número máximo de andares e altura máxima da edificação para os Estados Unidos

Área Máxima de Compartimentação (m²), Número Máximo de Andares (un) e Altura Máxima da Edificação (m)																		
Altura Máxima (m)		Tipo de Construção																
		IA		IB		IIA		IIB		IIIA		IIIB		VA		VB		
		Ilimitado		48,8		19,8		16,8		19,8		16,8		15,2		12,2		
		Área	Andares	Área	Andares	Área	Andares	Área	Andares	Área	Andares	Área	Andares	Área	Andares	Área	Andares	
Tipo de Edificação	Habitações	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	11	2.230	4	1.486	4	2.230	4	1.486	4	1.115	3	650	2	
	Estacionamentos	Ilimitado	Ilimitado	3.298	5	1.765	4	790	2	1.301	3	790	2	836	2	511	1	
	Administrativos ou Serviços	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	11	3.484	5	2.137	3	2.648	5	1.765	3	1.672	3	836	2	
	Instituições de Ensino	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	5	2.462	3	1.347	2	2.183	3	1.347	2	1.719	1	883	1	
	Saúde	Hospitais	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	4	1.394	2	1.022	1	1.115	1	-	-	883	1	-	-
		Casas de Repouso	Ilimitado	Ilimitado	5.620	5	2.462	3	1.208	2	2.183	3	1.208	2	1.719	1	836	1
	Locais de Reunião de Público	Casas de Espetáculos e Similares	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	5	1.440	3	790	2	1.301	3	790	2	1.068	2	511	1
		Parques, Estádios e Similares	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado
		Outros	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	11	1.440	3	883	2	1.301	3	883	2	1.068	2	557	1
	Serviços de Hospedagem	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	11	2.230	4	1.486	4	2.230	4	1.486	4	1.115	3	650	2	
	Comerciais	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	11	1.997	4	1.161	2	1.719	4	1.161	2	1.301	3	836	1	
	Museus ou Galerias de Arte	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	11	1.440	3	883	2	1.301	3	883	2	1.068	2	557	1	
	Bibliotecas ou Arquivos	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	11	1.440	3	883	2	1.301	3	883	2	1.068	2	557	1	
	Indústrias	Geral	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	11	2.323	4	1.440	2	1.765	3	1.115	2	1.301	2	790	1
		Baixa carga de incêndio	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	11	3.484	5	2.137	3	2.648	4	1.672	3	1.951	3	1.208	2
		Alta carga de incêndio*	1.951	1	1.533	1	1.022	1	650	1	883	1	650	1	697	1	-	-
	Depósitos		Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	7	3.484	5	2.137	3	2.648	5	1.765	3	1.672	3	836	2
Geral		Ilimitado	Ilimitado	4.459	11	2.415	4	1.626	2	2.415	3	1.626	2	1.301	3	836	1	
Baixa carga de incêndio		Ilimitado	Ilimitado	7.339	11	3.623	5	2.415	3	3.623	4	2.415	3	1.951	4	1.254	2	
Alta carga de incêndio*		1.951	1	1.533	1	1.022	1	650	1	883	1	650	1	697	1	-	-	
		Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado	7	3.484	5	2.137	3	2.648	5	1.765	3	1.672	3	836	2	

* As indústrias e os depósitos com alta carga de incêndio possuem muitas subdivisões, para facilitar estão representados os valores máximos e mínimos destas categorias

* As indústrias e os depósitos com alta carga de incêndio possuem muitas subdivisões, para facilitar estão representados os valores máximos e mínimos destas categorias

Fonte: ICC, 2011 (adaptada)

3.4.6 Análise

Seguindo o padrão de análises realizadas nesse capítulo nota-se que há países (Portugal e Hong Kong) em que a compartimentação horizontal é obrigatória para todos os edifícios, independentemente de seu uso, enquanto em outros países, há dispensa de compartimentação para alguns usos. No Brasil, por exemplo, não é obrigatória a compartimentação de edifícios residenciais, enquanto em Portugal e Hong Kong é obrigatório.

Além disso é possível notar também que os critérios para a determinação das áreas máximas de um compartimento variam muito:

- a) Hong Kong possui o método mais simplificado, onde cada tipo de uso recebe uma área ou volume máximo de compartimentação, independentemente das características gerais do edifício. Em contrapartida, para eles, toda e qualquer edificação, independentemente de seu uso, possui compartimentação vertical e horizontal, porém as áreas máximas são extremamente elevadas se comparadas aos outros países, o que pode acabar se tornando desvantajoso para a segurança contra o incêndio;
- b) em Portugal as áreas máximas de compartimentação variam, em geral, pelo tipo de uso do edifício e pelo pavimento ser acima ou abaixo do nível do terreno. Por mais que, à primeira vista, possa parecer um método mais simplificado, uma vez que a altura da edificação não influencia em sua área máxima, a normatização portuguesa é uma das mais rígidas, já que todas as edificações possuem obrigatoriamente compartimentação vertical e horizontal (assim como em Hong Kong). Outro fator importante a ser levantado em conta é que esse método é menos econômico do que o brasileiro, uma vez que obriga edificações mais baixas a terem compartimentos menores o que, por outro lado, é vantajoso no âmbito da segurança contra o incêndio e na preservação de vidas;
- c) o Brasil possui um dos critérios mais específicos e detalhados de todos, teoricamente possui uma legislação mais rígida do que a de Hong Kong, pois além de possuir áreas menores de compartimentação horizontal, quanto mais alta a edificação maior é a redução da área requerida do compartimento. Porém, na realidade a norma acaba sendo muito mais branda, uma vez que o

- decreto do Estado de São Paulo nº 56.819 de 2011 permite a eliminação da área máxima de compartimentação para praticamente todas as edificações (com altura inferior a trinta metros), em troca do uso de chuveiros automáticos;
- d) a Inglaterra possui um sistema semelhante ao brasileiro. As áreas máximas são determinadas de acordo com o uso e a altura da edificação, porém é feita de forma muito mais simplificada, uma vez que só divide as edificações em três categorias de altura, enquanto o Brasil possui seis classificações. Outro ponto importante é que o código inglês dá muito mais ênfase que a norma brasileira quando se trata de chuveiros automáticos. Na legislação brasileira temos um decreto estadual que menciona a possibilidade da substituição das áreas máximas, porém como simples nota de rodapé, enquanto a norma inglesa coloca lado a lado a utilização ou não dos chuveiros automáticos, demonstrando um claro destaque ao uso de tais dispositivos (explicado, possivelmente, por um uso mais extensivo do sistema no país, se comparado ao Brasil). Por último, é importante frisar uma diferença crucial no uso dos chuveiros automáticos, pois enquanto no Brasil seu uso elimina as áreas máximas de compartimentação, na Inglaterra eles apenas ampliam sua área, deixando claro a importância dada para a compartimentação horizontal pelos ingleses;
- e) os Estados Unidos possuem um sistema de classificação muito diferente dos países analisados anteriormente. Eles levam em conta um conjunto de características para definir se um edifício é seguro em situação de incêndio, em especial o material de construção. Por outro lado eles desconsideram a altura da edificação na definição da área máxima de compartimentação e, simultaneamente, definem uma altura máxima da edificação de acordo com suas características construtivas e tipo de uso. Esse comportamento pode ser explicado, possivelmente, pelo fato de que nos Estados Unidos utiliza-se muito a construção em madeira, além de possuir um largo histórico de incêndios, o que os deve ter levado a analisar de uma forma diferenciada as edificações em situação de incêndio.

Fora isso, a visão da distância mínima horizontal entre vãos de compartimentos distintos é bem diferente:

- a) no Brasil exige-se uma distância mínima de dois metros, ou uma prolongação da parede de compartimentação de ao menos noventa centímetros;
- b) Portugal determina uma faixa de proteção nos extremos dos compartimentos de acordo com a angulação da fachada, variando entre um metro e um metro e meio. Por outro lado, não são definidas distâncias mínimas entre vãos caso exista uma angulação maior do que 135° entre as fachadas dos compartimentos;
- c) Hong Kong possui uma norma muito semelhante à portuguesa, porém a faixa de proteção possui valores mínimos de noventa e cento e oitenta centímetros, de acordo com a angulação da fachada. Assim como em Portugal, a faixa de proteção é inexistente no caso de angulações superiores a 135° entre as fachadas;
- d) a Inglaterra possui a norma mais complexa de afastamento entre vãos dentre todos os analisados, considerando a área total das aberturas existentes na fachada, com valores entre 1 e 55,5 metros;
- e) os Estados Unidos possuem, novamente, a normatização mais diferenciada. Sua norma exige a projeção de paredes de compartimentação por no mínimo 45,7 cm da fachada, podendo ser substituída por faixas de proteção semelhantes às especificadas em Portugal e Hong Kong, porém com valor mínimo de 1,22 metros e características específicas de TRRF. Sendo que essa faixa de proteção é exigida em fachadas anguladas com até 180° . É importante frisar que no caso de edificações com chuveiros automáticos a distância horizontal entre aberturas deixa de ser exigida.

3.5 Análise Geral

Pode-se perceber ao longo de todas as análises e comparações realizadas diversos pontos de convergência e de divergência entre as normas. Sendo que de maneira resumida temos:

- a) Portugal possui a legislação mais rígida, o que pode ser explicado pelo poder aquisitivo médio europeu. Mesmo sendo um país de poder aquisitivo médio na Europa os recursos financeiros voltados para a segurança da população são altíssimos;

- b) a Inglaterra possui um sistema um pouco mais flexível do que Portugal, porém está longe de ser menos seguro. As normas inglesas incentivam de forma clara o uso de equipamentos de proteção ativa nas edificações (item 3.4.3), demonstrando uma maior inclinação para o desenvolvimento tecnológico nessa área;
- c) Hong Kong possui uma legislação mais branda do que as europeias analisadas, o que talvez possa ser explicado pelo enorme interesse do governo Chinês em desenvolver economicamente a região;
- d) os Estados Unidos possuem um código extremamente complexo e rígido, o que pode ser explicado pelas inúmeras tipologias utilizadas e pelos diversos incêndios que ocorreram no passado, além de ser um país com enorme poder financeiro para investir na segurança da população;
- e) o Brasil claramente ainda está nos passos iniciais de uma normatização de segurança contra incêndio, por mais que esteja tentando se adequar às visões internacionais, ainda deixa muito a desejar na rigidez das normas em que, pela falta de recursos, é obrigada a criar inúmeras classificações com normas específicas tornando as edificações o mais economicamente viáveis possível.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA COMPUTACIONAL

4.1 Dinâmica dos Fluidos Computacional

A dinâmica dos fluidos computacional, mais conhecida como CFD (*Computational Fluid Dynamics*), pode ser descrita de forma simplificada como sendo a simulação computacional de todo processo físico ou físico-químico envolvendo fluidos.

Esse tipo de simulação é utilizado para a predição de campos de concentração de velocidades, pressão, temperatura e propriedades turbulentas de um modelo, utilizando-se dos princípios de conservação de massa, momento e energia.

Ao se tratar de engenharia de segurança contra incêndio, a utilização da técnica de CFD é fundamental, pois é uma das melhores formas de se prever o comportamento dos gases quentes e frios (fluidos) existentes em um compartimento, bem como obter campos de pressão, velocidades e temperaturas atingidas.

O surgimento dos programas baseados na técnica de CFD é atribuída à indústria aeroespacial e se deu nas décadas de 1960 e 1970 (CENTENO; CASSOL; RODRIGUES, 2015).

Na década de 1980 viabilizou-se a utilização da ciência computacional na resolução das equações de Euler, que descrevem o escoamento compressível invíscido, tanto em duas quanto em três dimensões, sendo esse um grande avanço na CFD. Após esse período passou-se a simular fluidos viscosos utilizando-se as equações de Navier-Stokes (CARVALHO, 2013).

Aos poucos, a utilização da CFD foi crescendo, sendo cada vez mais utilizada em áreas diversas, como em mecânica, oceanografia, astrofísica, meteorologia, naval, dentre outros. Mais recentemente, a CFD também passou a ser utilizada na engenharia civil e arquitetura (CENTENO; CASSOL; RODRIGUES, 2015).

Um exemplo de grande repercussão internacional foi a modelagem do incêndio do World Trade Center em 11 de Setembro de 2001 (REHM et al., 2003). Outros exemplos de aplicação são: a modelagem de incêndio para o estudo da radiação emitida, utilizando-se do Método dos Volumes Finitos⁴¹ (MVF) e do método de simulação das Grandes Escalas de Turbulência⁴² (LES) (HOSTIKKA; MCGRATTAN;

⁴¹ O Método dos Volumes Finitos será abordado na seção 4.3.

⁴² A Simulação das Grandes Escalas de Turbulência será abordada na seção 4.4.

HAMINS, 2003), o estudo de incêndios turbulentos em túneis ventilados (WANG; JOULAIN, 2003).

A utilização da CFD para a modelagem de incêndio se iniciou na década de 1980, por meio do código computacional UNDSAFE-I, passando pela utilização de programas como JASMINE e FLOW-3D desenvolvidos pela *Fire Research Station e Atomic Energy Authority*, chegando finalmente até o *Fire Dynamics Simulator* (FDS) desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST) no ano de 2000 (CARVALHO, 2013).

Em seus primórdios, as simulações de incêndio levavam em consideração somente a resolução das equações de transporte para a taxa de liberação de calor de um incêndio, desconsiderando os efeitos da combustão e da radiação. Atualmente, apresentam-se modelos muito mais complexos para a simulação de incêndios, englobando a modelagem e previsão simultânea da combustão, radiação, convecção, geração de resíduos e fuligem (CARVALHO, 2013).

O FDS é atualmente um dos programas mais utilizados para o estudo de incêndio, sendo o programa que será utilizado nesse trabalho.

A relativa simplicidade física e computacional dos modelos de zona impulsionou seu uso na análise de situações de incêndio. Uma vez que, as distribuições espaciais detalhadas não são necessárias, conseguido se aproxima razoavelmente da realidade de maneira simples (MCGRATTAN et al., 2015a).

O rápido crescimento do poder de cálculo computacional aliado à abordagem de CFD levaram ao desenvolvimento de modelos bases, aplicados à pesquisa de segurança contra o incêndio.

Grande parte dos trabalhos em CFD baseia-se na estrutura conceitual fornecida pelas equações de Navier-Stokes, em particular, o modelo de turbulência k- ϵ de Patankar e Spalding (2D), o que não é o caso do FDS, que utiliza LES (3D).

Com o advento da tecnologia computacional e das técnicas numéricas tornaram-se possíveis a modelagem e simulação de incêndios em geometrias complexas, além de permitir a incorporação de uma grande variedade de fenômenos físicos. No entanto, esses modelos ainda possuem limitações.

Infelizmente, devidas às características intrínsecas das simulações, como por exemplo, a simplificação da disposição da carga de incêndio e a simplificação de sua

composição, grande parte das características reais das labaredas do incêndio, como por exemplo, seu alastramento, são perdidas.

Às vezes, argumenta-se que o processo de média utilizado em CFD para definir suas equações é uma "média de conjunto" de várias repetições da mesma experiência ou cenário postulado. No entanto, este é um ponto discutido pelos pesquisadores da área de segurança contra o incêndio, uma vez que, nem experimentos nem cenários reais são replicados no sentido exato exigido para garantir de forma ideal a interpretação das equações utilizadas. A aplicação da técnica de Simulação das Grandes Escalas de Turbulência, aplicadas nas simulações de incêndio, tem por finalidade extrair uma maior fidelidade temporal e espacial nas simulações de incêndio, realizando simulações em malhas mais finas nos pontos de maior interesse, permitindo assim um ganho computacional (MCGRATTAN et al., 2015a).

4.1.1 *Equações de Navier-Stokes*

As equações de Navier-Stokes são descrições matemáticas do comportamento dos fluidos, determinadas a partir dos trabalhos realizados anteriormente por Claude Navier, Simeon Poisson e George Stokes. Essas equações variam de acordo com as propriedades do fluido e as características de seu escoamento (FORTUNA, 2012).

Uma das formas de se utilizar as equações de Navier-Stokes é na forma conservativa, representando-as por meio de coordenadas cartesianas tridimensionais para escoamentos turbulentos⁴³ e isotérmicos, conforme:

- a) a equação de continuidade, representando o princípio da conservação de massa [Equação (26)];
- b) a equação de conservação de momento linear na direção x [Equação (27)], a equação de conservação de momento linear na direção y [Equação (28)] e a conservação de momento linear na direção z [Equação (29)], representando a segunda lei de Newton;
- c) o princípio de conservação da energia [Equação (30)], representando a primeira lei da termodinâmica (FORTUNA, 2012).

⁴³ Entende-se por escoamento turbulento todo tipo de fluxo que possua agitação caótica entre suas várias camadas, ou seja, o vetor velocidade é diferente nos diversos pontos do fluido. O escoamento turbulento é o mais comum na natureza e nos incêndios.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho F_x \quad (27)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho F_y \quad (28)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho F_z \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e V) = \rho \frac{\partial Q}{\partial t} - \nabla \cdot \dot{q} - p(\nabla \cdot V) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \\ + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} \end{aligned} \quad (30)$$

Nas quais:

- u = Velocidade na direção x ;
- v = Velocidade na direção y ;
- w = Velocidade na direção z ;
- t = Tempo;
- ρ = Densidade do fluido;
- p = Pressão do fluido;
- τ_{ij} = Tensão viscosa na direção ij ;
- F_i = Componente da força na direção i ;
- e = Energia interna;
- ∇ = Vetor gradiente⁴⁴;
- $\dot{q}$ = Vetor fluxo de calor;
- V = Vetor velocidade.

Para casos específicos, em que se analisa fluidos newtonianos, é possível simplificar a equação de conservação de energia [Equação (31)], uma vez que, as tensões viscosas (τ_{ij}), podem ser substituídas por suas simplificações [Equações (32) a (37)]

e é possível utilizar a hipótese de Stokes, $\lambda = -\frac{2}{3}\mu$.

⁴⁴ O vetor gradiente em coordenadas cartesianas e três dimensões é dado por: $\nabla = \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z}$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e V) = \rho \frac{\partial Q}{\partial t} - \nabla \cdot \dot{q} - p(\nabla \cdot V) + \Phi \quad (31)$$

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda(\nabla \cdot V) \quad (32)$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \lambda(\nabla \cdot V) \quad (33)$$

$$\tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} + \lambda(\nabla \cdot V) \quad (34)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (35)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (36)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (37)$$

Nas quais:

- u = Velocidade na direção x ;
- v = Velocidade na direção y ;
- w = Velocidade na direção z ;
- t = Tempo;
- ρ = Densidade do fluido;
- p = Pressão do fluido;
- μ = Primeiro coeficiente de viscosidade dinâmica do fluido;
- λ = Segundo coeficiente de viscosidade dinâmica do fluido;
- τ_{ij} = Tensão viscosa na direção ij ;
- e = Energia interna;
- ∇ = Vetor gradiente⁴⁵;
- $\dot{q}$ = Vetor fluxo de calor;
- V = Vetor velocidade;
- Φ = Função de dissipação [Equação (38)].

$$\begin{aligned} \Phi = 2\mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \\ + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \lambda(\nabla \cdot V)^2 \end{aligned} \quad (38)$$

⁴⁵ O vetor gradiente em coordenadas cartesianas e três dimensões é dado por: $\nabla = \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z}$

Uma vez que as equações de Navier-Stokes são equações diferenciais parciais não lineares, a solução analítica delas não é trivial. Sendo assim, foi necessário o desenvolvimento de métodos numéricos que as solucionasse com menor custo computacional.

4.1.2 Etapas para solução numérica do CFD

A primeira etapa para se solucionar um problema é identificar todas as variáveis existentes e modelar⁴⁶ a física do problema.

Os modelos resultantes podem ser expressos por equações, que devem correlacionar as grandezas físicas presentes de forma a se possibilitar explicar e prever o comportamento do sistema em análise.

Uma vez que um sistema pode possuir inúmeras grandezas, a simulação fiel se torna extremamente complexa, sendo assim, geralmente, os modelos desenvolvidos só admitem uma solução analítica (com custo computacional adequado) ao se realizarem simplificações no sistema, como por exemplo, desprezar uma ou mais grandezas de menor influência (FORTUNA, 2012).

Para se trabalhar com um modelo, do ponto de vista computacional, é necessário se determinar o domínio⁴⁷ para qual as equações são válidas, suas condições de contorno e características básicas.

Uma vez que é impossível se prever o comportamento de uma região contínua inteira, pois cada ponto da região possui uma característica própria, deve-se inicialmente discretizar a região, ou seja, dividi-la em um número finito de pontos.

As soluções das equações serão encontradas somente para os pontos discretos (ij), e não para as áreas (Figura 27).

Conforme pode ser visto na Figura 27, a discretização da região é formada por um conjunto de pontos com espaçamento uniforme⁴⁸ nas direções x e y (respectivamente denominadas Δx e Δy). O conjunto de pontos discretos é denominado malha.

⁴⁶ Entende-se por modelar a determinação de quais grandezas físicas estão presentes, se, e como influenciam o problema em questão.

⁴⁷ Domínio pode ser entendido como uma região contínua (R) a ser analisada.

⁴⁸ O conjunto de pontos também pode possuir distâncias não uniformes, mas somente no caso de malhas não simétricas, como apresentado na seção 0.

A disposição adequada dos pontos no domínio é fundamental para se obter uma solução numérica adequada das equações, e consequentemente, para a obtenção de resultados assertivos.

Figura 27 - Exemplo de uma região contínua e sua discretização

Fonte: FORTUNA, 2012

Intuitivamente, percebe-se que quanto maior o número de pontos discretos existente em uma malha, ou seja, quanto mais fina for a malha, mais próximo da solução exata do problema se chegará, uma vez que o modelo se torna cada vez mais fiel à realidade. Por outro lado, quanto mais fina a malha, maior será o custo computacional para se resolver um problema, devendo-se sempre buscar um equilíbrio entre a precisão necessária do modelo e o custo computacional para se obtê-lo.

4.1.3 Tipos de estruturas de malhas

Oliveira (2009) apresenta de forma sucinta os quatro tipos de estruturas de malha⁴⁹ existentes para os diversos tipos malhas⁵⁰ existentes. Sendo eles:

- a) malha deslocada: possui a pressão localizada no centro do volume de controle e cada componente de velocidade no centro de suas faces. Além disso, também são necessárias componentes vetoriais nas fronteiras sólidas do modelo. Sendo que, a componente do momento paralela à fronteira deve ser irregularmente espaçada, enquanto a componente normal pode ser regularmente espaçada.

⁴⁹ Entende-se por tipo de estrutura de malha o local de aplicação dos componentes vetoriais ou escalares em cada volume de controle da unidade utilizados para cálculo.

⁵⁰ Entende-se por tipo de malha a disposição e o formato dos volumes de controle existente na malha. Este conceito será explicado de maneira mais aprofundada no item 4.1.4.

A Figura 28a apresenta de forma simplificada a malha deslocada, sendo que, as coordenadas dos elementos principais são dadas da seguinte forma:

- vértices do volume de controle: (i, j) ;
- pontos de pressão: $(i \pm 1/2, j \pm 1/2)$;
- nó da componente horizontal do vetor velocidade: $(i, j \pm 1/2)$ (exceto nos limites do domínio);
- nó da componente vertical do vetor velocidade: $(i \pm 1/2, j)$;

b) malha semi-deslocada: assim como na malha deslocada, a pressão se localiza no centro do volume de controle, porém ambas componentes vetoriais da velocidade estão co-localizadas em seus vértices.

Apresenta-se de forma simplificada, na Figura 28b, a malha semi-deslocada, onde as coordenadas dos elementos principais são dadas da seguinte maneira:

- vértices do volume de controle: (i, j) ;
- pontos de pressão: $(i \pm 1/2, j \pm 1/2)$;
- nó do vetor velocidade: (i, j) ;

c) malha co-localizada nos centros: este tipo de malha permite que o domínio seja totalmente preenchido com volumes de controle de continuidade, por outro lado, os componentes de velocidade próximos às fronteiras sólidas são irregularmente espaçados.

Tanto a pressão quanto as componentes vetoriais de velocidade se localizam no centro do volume de controle, existindo também as componentes do vetor velocidade no centro da aresta dos volumes de controle que se encontram próximos às fronteiras.

De forma simplificada, a Figura 28c, apresenta a malha co-localizada nos centros, sendo que as coordenadas dos elementos principais são dadas assim:

- vértices do volume de controle: (i, j) ;
- pontos de pressão: $(i \pm 1/2, j \pm 1/2)$;
- nó do vetor velocidade: $(i \pm 1/2, j \pm 1/2)$ (exceto nos limites do domínio).

d) malha co-localizada nos vértices: este tipo de malha tem como principal característica permitir que as componentes da velocidade perto dos contornos

sejam regularmente espaçadas, porém não é possível se impor a continuidade nas metades de célula adjacentes às fronteiras sólidas.

Tanto a pressão quanto as componentes vetoriais de velocidade se localizam nos vértices do volume de controle.

De maneira simplificada, a Figura 28d, apresenta a malha co-localizada nos vértices, tendo as coordenadas dos elementos principais dadas da seguinte forma:

- vértices do volume de controle: (i, j) ;
- pontos de pressão: (i, j) ;
- nó do vetor velocidade: (i, j) .

Figura 28 – Exemplo de tipos de estruturas de malhas:
a) Deslocada, b) Semi-deslocada, c) Co-localizada nos vértices, d) Co-localizada nos centros.

Venkatakrishnan (1995) discute em seu trabalho as implicações da escolha das malhas co-localizadas (utilizando-se de células triangulares em simulações bidimensionais ou células tetraédricas em simulações tridimensionais), uma vez que o número de células se torna muito maior que o número de vértices. Enquanto que, nas malhas estruturadas, o número de células e vértices é equivalente. Ele aponta também que, as relações entre os nós internos são idênticas em ambas opções, diferindo apenas com relação aos nós próximos dos limites sólidos.

4.1.4 Tipos de malhas

Existem alguns tipos de malhas que podem ser utilizadas em modelagem computacional, sendo que as principais serão apresentadas aqui de forma simplificada.

O primeiro tipo de malha são as denominadas malhas uniformes, que são caracterizadas por sua simplicidade, uma vez que todos os pontos estão uniformemente espalhados no domínio, como pode ser verificado na Figura 29.

Figura 29 - Exemplo de malha uniforme

Fonte: FORTUNA, 2012

O segundo tipo, denominado malha não uniforme, são malhas utilizadas em domínios cujas geometrias são mais complexas e, conseqüentemente, solicitam malhas mais elaboradas do que as malhas uniformes. Elas são caracterizadas por possuírem

pontos distribuídos com distâncias variáveis entre si, conforme pode ser observado na Figura 30.

Figura 30 - Exemplo de malha não uniforme

Fonte: FORTUNA, 2012

Figura 31 - Exemplo de malha não estruturada

Fonte: FORTUNA, 2012

Atualmente vem crescendo o uso de um terceiro tipo de malha para as simulações computacionais, as malhas não estruturadas. Elas se caracterizam pela inexistência de regularidade na distribuição dos pontos no domínio, assim como pode ser observado na Figura 31. Esse tipo de malha permite a discretização de domínios com geometrias muito complexas, discretizando-o de uma maneira mais direta do que seria

possível por meio de uma malha estruturada. Por padrão, as malhas não estruturadas, são também malhas não uniformes (FORTUNA, 2012).

Segundo Maliska (1995), a malha estruturada apresenta uma série de vantagens para a implementação do programa computacional, uma vez que a ordenação dos elementos simplifica as rotinas de cálculo. Outro ponto importante é que a matriz resultante de cálculo possui diagonais fixas, permitindo então a utilização de métodos para matrizes de banda fixa, que são mais fáceis de se implementar.

Maliska (1995) também aponta que as matrizes não estruturadas possuem uma vantagem em relação às estruturadas, elas são mais versáteis e adaptáveis para casos mais complexos. Por outro lado, apresentam dificuldade na ordenação. Uma vez que esse tipo de malha proporciona uma variação no tamanho da banda da matriz, inúmeros métodos de solução de sistemas lineares não podem ser utilizados.

É possível verificar então que os dois tipos de malha possuem vantagens e desvantagens. Para este trabalho serão utilizadas malhas estruturadas uniformes, uma vez que o domínio de simulação é relativamente regular, com poucos detalhes e de grandes dimensões.

Por mais que a utilização deste tipo de malha reduza a precisão na simulação, o ganho na velocidade de cálculo é considerável. Para contornar a falta de detalhe, o FDS se utiliza do método da Simulação das Grandes Escalas de Turbulência⁵¹, criando uma sub-malha mais fina nos pontos de maior interesse, aumentando assim a precisão da simulação sem ter um custo computacional excessivo.

4.2 Uma Visão Geral Sobre: Diferenças Finitas, Volumes Finitos e Elementos Finitos

Maliska (1995) apresenta de uma forma bem ilustrativa a história e a comparação entre os três métodos utilizados na simulação computacional, estando sua visão apresentada de forma resumida neste item.

O método das diferenças finitas (MDF) sempre foi utilizado na análise de escoamento de fluidos, enquanto o método dos elementos finitos (MEF) era utilizado na área estrutural para resolver problemas de elasticidade. Do ponto de vista físico, os dois

⁵¹ A Simulação das Grandes Escalas de Turbulência será abordada com mais detalhes na seção 4.4.

problemas apresentados, são extremamente diferentes. Os escoamentos se baseiam nas equações de Navier-Stokes e são extremamente não-lineares, enquanto os problemas de elasticidade não possuem os termos convectivos não lineares⁵².

Por consequência da natureza dos problemas estudados, os pesquisadores do MDF, focaram seus estudos no domínio das não linearidades dos termos convectivos e no difícil acoplamento entre as equações. Tais problemas não eram enfrentados pelos pesquisadores do MEF, dada a característica linear de seus problemas.

As dificuldades encontrada no MDF fizeram com que o tratamento de geometrias complexas fosse deixado para segundo plano, tendo seu desenvolvimento baseado nos sistemas de coordenadas ortogonais⁵³. Por causa disso, o MDF é até hoje vinculado, equivocadamente, às malhas cartesianas. Porém, na realidade é possível utilizar qualquer tipo de malha em sua resolução, inclusive malhas não estruturadas. Uma vez que os pesquisadores do MEF não se depararam com os mesmos problemas dos pesquisadores do MDF, dada a linearidade de seus problemas, foi possível, desde o início, focar seu desenvolvimento na utilização de malhas não estruturadas para a resolução de geometrias complexas.

Durante muito tempo acreditou-se que, para que o MEF fosse aplicável, a equação diferencial a ser resolvida, em problemas na área de fluidos, necessitava de um princípio variacional. Uma vez que as equações de Navier-Stokes não possuem esta propriedade, o desenvolvimento do MEF na área foi atrasado.

Até o início da década de setenta os métodos de cálculo computacional se encontravam da seguinte maneira: o MDF possuía grande desenvoltura na área dos fluidos, porém não conseguia resolver problemas de geometrias complexas; O MEF possuía grande habilidade para resolver problemas com grande complexidade geométrica, porém não possuía ferramentas para tratar os termos convectivos presentes nas equações de movimento.

Uma vez que, mesmo após a implementação do método de Galerkin no MEF para resolver a questão do princípio variacional das equações de movimento, ainda se encontravam inúmeros problemas nos dois métodos. Com isso, motivou-se a pesquisa e o aprimoramento do método dos volumes finitos (MVF), no qual as

⁵² Problemas de transferência de calor puramente difusivos também não possuem os termos convectivos não lineares.

⁵³ Entende-se por sistemas de coordenadas ortogonais os sistemas: cartesiano, cilíndrico e esférico.

equações aproximadas são obtidas pelo balanço de conservação da propriedade envolvida⁵⁴ no volume elementar.

Uma vez que, no MVF, era possível se observar o caráter físico de cada um dos termos da equação diferencial, foi possível desenvolver métodos mais robustos de cálculo. A possibilidade de associar a interpretação matemática com a física auxiliou para que praticamente todos os pesquisadores do MDF migrassem para o MVF. Com isso, foram realizados importantes desenvolvimentos no MVF, mas ainda focados em coordenadas ortogonais (mais especificamente cartesianas).

Paralelamente ao desenvolvimento do MVF, o MEF passou a empregar outras funções de interpolação, tratando de forma adequada os termos convectivos não lineares, e conseqüentemente, avançando consideravelmente a área no estudo do escoamento dos fluidos.

Um grande esforço de pesquisa ainda está sendo dedicado à implementação do uso de malhas não estruturadas, semelhantes às utilizadas pelo MEF, no método dos volumes finitos, de maneira a torna-lo mais poderoso.

De maneira geral pode-se afirmar que os três métodos são equivalentes, cada um sendo melhor aplicado para um determinado tipo de problema.

4.3 Método dos Volumes Finitos (MVF)

De forma simplificada, o método dos volumes finitos é um método com o qual se possibilita a resolução das equações diferenciais parciais de balanço de massa, energia e quantidade de movimento de um determinado volume sob a forma algébrica (EYMARD; GALLOUËT; HERBIN, 2000).

Como visto no item anterior, ele evoluiu do método das diferenças finitas e, conseqüentemente, se assemelha a ele. Sendo assim, os valores são calculados para volumes discretos sob uma geometria em malha. O “volume finito” se refere ao volume discreto (pequeno volume) em torno de cada nó da malha que está sendo analisada. O MVF é um método de discretização bem adequado para a simulação numérica de diversos tipos das leis de conservação, e por isso tem sido amplamente utilizado em diversos campos da engenharia, tais como, transferência de calor, transferência de

⁵⁴ Massa, quantidade de movimento, entalpia etc..

massa ou mecânica dos fluidos. Uma vez que esse método possibilita sua utilização em geometrias arbitrárias (utilizando-se de malhas estruturadas ou não estruturadas) ele é considerado como um método robustos de simulação computacional (EYMARD; GALLOUËT; HERBIN, 2000).

Existem dois modos de se obter as equações aproximadas no MVF. O primeiro é realizando o balanço de cada uma das propriedade do elemento simulado nos volumes elementares (ou volumes finitos). O segundo é partindo da equação diferencial na sua forma conservativa⁵⁵, integrando-a sobre o volume elementar no espaço e no tempo. Ambos processos são equivalentes uma vez que é necessário realizar um balanço no volume infinitesimal e em seguida fazer o processo de limites para se obter as equações diferenciais (MALISKA, 1995).

Uma explicação mais detalhada pode ser vista no Anexo A deste trabalho (MALISKA, 1995, p. 36-38).

O sistema linear principal de cálculo obtido no MVF é uma equação aproximada para um volume elementar genérico obtido para os volumes internos do domínio. Sendo assim, também é necessário obter a equação para os volumes de fronteira. Um dos modos de se obter estas equações se vale da criação de uma malha na qual o ponto central do volume de controle coincide com a fronteira, dando origem a um meio volume de controle próximo da fronteira e volumes inteiros em seu interior.

Esse procedimento possui um grande inconveniente para simulações tridimensionais, uma vez que estarão presentes, nestas simulações, volumes inteiros, meio volumes, quarto de volumes e oitavo de volumes. Aumentando consideravelmente a complexidade de resolução, além de trazer problemas para a uniformização das sub-rotinas de cálculo dos coeficientes. (MALISKA, 1995).

Existem dois procedimentos que respeitam a conservação para todos os volumes do domínio. O primeiro é o da criação de volumes fictícios e o segundo é o de balanço dos volumes de fronteira. Esses dois procedimentos estão explicados de maneira mais aprofundada no Anexo B deste trabalho (MALISKA, 1995, p. 46-51).

⁵⁵ A forma conservativa, também conhecida como forma divergente, é aquela em que, na equação diferencial, os fluxos aparecem dentro do sinal da derivada.

4.3.1 Condição de Contorno

Para resolver o sistema de equações diferenciais parciais (continuidade, momento, energia e transportes), as condições de contorno nas superfícies que delimitam o domínio e os objetos devem ser claramente definidas. As principais condições de contorno são:

- a) temperatura;
- b) radiação
- c) fração mássica;
- d) densidade;
- e) velocidade;
- f) vãos livres (para a equação de Poisson);
- g) objetos sólidos;
- h) interfaces entre malhas.

Detalhes sobre as especificações das condições de contorno ver McGrattan et al. (2015a).

4.4 Simulação das Grandes Escalas de Turbulência (LES)

A simulação das grandes escalas de turbulência, também conhecida por *Large-Eddy Simulation* (LES), é um método de representação dos escoamentos turbulentos e transicionais. Entende-se por escoamento turbulento qualquer escoamento cujas partículas se movimentem de forma caótica, sendo o tipo de escoamento mais comum na natureza. Tendo em vista que o escoamento dos gases quentes em um incêndio se dá de forma turbulenta é necessária a utilização do LES.

Imagine que se deseje realizar uma simulação computacional utilizando-se o MVF para o escoamento de fluidos, porém a grade necessária para se obter resultados adequados seja muito grande, excedendo a capacidade disponível de seu computador. Sendo assim, será necessária a utilização de uma malha mais grosseira, que é capaz de resolver de forma adequada os redemoinhos maiores no fluxo, porém, não consegue resolver os que são menores que uma ou duas células. Do ponto de vista físico, existe uma interação entre o movimento em todas as escalas, ou seja, o

resultado das grandes escalas de turbulência estariam errados ao se eliminar a influência das escalas menores (FRÖHLICH; RODI, 2002).

O LES se baseia na decomposição do domínio em dois: o campo das grandes escalas de turbulência⁵⁶, denominado campo resolvido onde se realizam as simulações explícitas, e o campo das pequenas escalas de turbulência, utilizando-se de um modelo sub-malha, também denominado campo residual, para a representação das ações das pequenas estruturas, cujas dimensões são menores que o tamanho da malha (LOPES, 2000).

Na solução numérica, o modelo LES, utiliza em seu processo de aproximação os valores médios de velocidade. Alguns trabalhos mostram que esse modelo consegue simular de maneira adequada fluxos naturalmente dirigidos, porém, exige uma afinidade grande com o comportamento da turbulência e experiência com simulações numéricas. Além disso, o modelo necessita de um tempo elevado de processamento, mesmo em computadores de alto desempenho (CUNHA, 2016).

Ao utilizar um sistema com malha e sub-malha, o método LES otimiza os recursos computacionais, garantindo resultados mais precisos do que a modelagem clássica turbulenta, isso ao compararmos simulações custo computacional equivalente.

A resolução das grandes escalas de turbulência⁵⁷ do fluxo, ao modelar apenas as pequenas escalas e não o espectro inteiro, é uma vantagem da abordagem LES em comparação com métodos baseados nas equações de Navier-Stokes da média de Reynolds (Reynolds Average Navier Stokes). Uma vez que, mesmo com os métodos mais atuais, muitas vezes encontram-se dificuldades ao aplicá-los em fluxos complexos com vórtice pronunciados, ou com influências especiais de flutuabilidade, curvatura, rotação ou compressão. Enquanto o LES dá acesso ao movimento instável dominante para que, por exemplo, ele possa ser usado no estudo de aero-acústica ou o acoplamento de estruturas fluidas (FRÖHLICH; RODI, 2002).

Tendo em vista que as menores escalas de turbulência tentem a ser mais homogêneas e isotrópicas, elas são menos afetadas pelas condições de contorno do modelo, garantindo assim que a metodologia LES possa ser utilizada de forma mais

⁵⁶ Entende-se por grandes escalas de turbulência as maiores estruturas que ocorrem no escoamento, sendo determinadas geralmente pela geometria que as originou.

⁵⁷ Uma vez que este trabalho não tem por objetivo se entender na definição e metodologia de cálculo do modelo das Grandes Escalas de Turbulência o autor recomenda, para se obter um entendimento mais aprofundado do assunto, a leitura do artigo *Introduction to Large-Eddy Simulation of Turbulent Flows* de J. Fröhlich e W. Rodi (2002) e do livro *Mathematics of Large Eddy Simulation of Turbulent Flows* de Luigi C. Berselli, Traian Iliescu e William J. Layton (2006).

universal e independente do tipo de escoamento que está sendo analisado, se comparado com as demais metodologias clássicas (FERREIRA, 2006).

5 PROGRAMAS PARA A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIO

5.1 *Fire Dynamics Simulator (FDS)*

É um simulador que se baseia na teoria LES (*Large-Eddy Simulation*), desenvolvido pelo National Institute of Standards and Technology (NIST). O FDS é voltado para os fluxos de baixa velocidade, com ênfase em transporte de fumaça e calor de incêndios. Este programa utiliza a teoria dos volumes finitos para realizar os cálculos computacionais, sendo que suas equações governantes são aproximadas utilizando-se métodos de segunda ordem.

O FDS foi concebido para uso de profissionais da área de segurança contra incêndio, proporcionando simulações computacionais rápidas e de modelagem relativamente simples, utilizando-se de malhas regulares, onde deve-se simplesmente definir as três dimensões da malha (Δx , Δy , Δz). Cada cubo existente na malha (de dimensões Δx , Δy e Δz) são volumes finitos, denominados células, nas quais são atribuídas grandezas escalares para seus interiores e componentes vetoriais para suas faces. Nesse trabalho foi utilizada a versão 6.5.1.

Uma vez que o FDS possui manuais⁵⁸ completos abordando todos os modelos matemáticos, métodos numéricos, condições de contorno, limitações, verificações e validações, será apresentado aqui, de forma sucinta, as características do programa (equações governantes) e seu procedimento de solução geral.

O FDS possui uma metodologia de solução que o torna prático para a realização de simulações de fluxo termicamente direcionadas, particularmente do fogo. As principais características do modelo, em sua operação padrão, são:

- a) malha de baixa densidade associada à simulação das grandes escalas de turbulência (LES);
- b) modelo numérico de energia cinética conservativa explícita de segunda ordem;
- c) malha estruturada uniforme;
- d) Método de fronteira imersa simples, para o tratamento de obstruções de fluxo;

⁵⁸ São três os manuais principais: *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model*; *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 2: Verification*; *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation*.

- e) Método generalizado de parâmetros concentrados (química simplificada usando variáveis de progresso na reação);
- f) Método de Deardorff para a viscosidade de Foucault⁵⁹;
- g) Constantes turbulentas de Schmidt e Prandtl;
- h) Conceito de dissipação de redemoinho (química rápida) para reação de passo único entre combustível e comburente;
- i) Modelo da soma-ponderada-de-gases-cinza com solução de volume finito para a equação de transporte de radiação.

5.1.1 Malha

Uma vez que o FDS é projetado para ser utilizado por engenheiros, para uma infinidade de proteções contra incêndio e outras aplicações de fluxo térmico, ele foi desenvolvido de maneira a ser relativamente rápido e robusto, devendo ser fácil descrever o cenário a ser simulado. Isso significa que, o usuário precisar especificar apenas um pequeno número de parâmetros numéricos, concentrando-se na descrição física do problema.

Como o domínio computacional nas simulações do FDS geralmente engloba um volume no interior de uma edificação, ou o edifício inteiro, a malha que mais se adequa nesses casos é a estruturada uniforme, sendo assim, os únicos parâmetros numéricos escolhidos pelo usuário final são as três dimensões da malha.

Uma vez definida a malha a ser utilizada na simulação, é relativamente simples definir obstruções retangulares que definem a geometria do ambiente, sendo que o nível de resolução é determinado pela malha. As obstruções de "encaixam" na malha subjacente, uma forma muito elementar do método de fronteira imersa.

As equações governantes são aproximadas valendo-se das diferenças finitas de segunda ordem em uma coleção de malhas tridimensionais uniformemente espaçadas. É possível realizar o processamento de múltiplas malhas em paralelo, utilizando-se da bibliotecas MPI⁶⁰.

⁵⁹ Também conhecida como viscosidade de redemoinho ou *eddy viscosity*.

⁶⁰ MPI (Message Passing Interface): é um padrão computacional para a comunicação de dados em paralelo, existindo várias modalidades.

As propriedades escalares são atribuídas ao centro de cada célula da malha, enquanto os componentes vetoriais são atribuídos nas faces das células apropriadas (Figura 32), ou seja, o FDS utiliza-se de uma malha deslocada⁶¹.

Figura 32 – Posição dos valores de cálculo em uma célula da malha

Fonte: Elaborada pelo autor

5.1.2 Transporte de Massa

A descrição básica da química do fogo é a reação de um combustível de hidrocarboneto com o oxigênio, produzindo dióxido de carbono e vapor de água. Como o fogo é um processo de combustão relativamente ineficiente que envolve gases combustíveis múltiplos que contêm mais do que apenas átomos de carbono e hidrogênio, o número de tipos de gases possíveis de se existir na simulação é virtualmente ilimitado. No entanto, para que as simulações sejam viáveis, o FDS limita, geralmente, a um o número de combustíveis e a um ou dois o número de reações químicas.

O FDS também possui um mecanismo para interromper a queima automaticamente por falta de comburente no ambiente, como ocorre por exemplo, quando um incêndio real se extingue em um compartimento fechado.

Mesmo com essa abordagem simplificada da química, ainda é necessário rastrear no mínimo seis gases distintos⁶², além de partículas de fuligem.

⁶¹ Ver item 4.1.3.

⁶² Sendo eles: combustível, O₂, CO₂, H₂O, CO e N₂.

Ao utilizar uma reação de passo único, não é necessário resolver explicitamente sete equações de transporte⁶³, na realidade, só seria necessário resolver duas, uma para o combustível e uma para os produtos. O ar é considerado como todo elemento que não é combustível nem produto da combustão, no entanto, para garantir a resolução adequada dos transportes parciais de massa, o FDS resolve uma equação de transporte para cada elemento com densidade distinta, para em seguida, obter a densidade de massa da mistura por soma das densidades dos gases individuais.

Considerando que o combustível, geralmente, é um único gás, o ar e os produtos são denominados "gases agrupados". Um gás agrupado representa uma mistura de gases distintos que são transportados em conjunto, ou seja, os "gases agrupados" possuem um único conjunto de propriedades de transporte e reagem em conjunto. Do ponto de vista do modelo numérico, o gás agrupado pode ser tratado como um único gás. Na realidade, as equações de transporte de massa não fazem distinção entre um gás ou um conjunto de gases agrupados. Por exemplo, o ar é um gás agrupado que consiste em nitrogênio, oxigênio, vestígios de vapor de água e dióxido de carbono.

5.1.3 Procedimento de Cálculo da Pressão

Rehm e Baum observaram que, para fluxos de baixa velocidade, como o fogo, a pressão resolvida espacialmente e temporalmente, pode ser decomposta em uma "pressão de fundo" (*"background" pressure*) e uma perturbação, sendo que apenas a "pressão de fundo" é mantida na equação de estado (lei de gás ideal) (MCGRATTAN et al., 2015a).

Esta aproximação tem algumas consequências. A primeira é que os compartimentos conectados por meio de um sistema de aquecimento, ventilação ou ar condicionado podem manter suas "pressões de fundo" independente. O ar que flui entre os compartimentos pode ser descrito em termos das diferenças nas "pressões de fundo", eliminando a necessidade de resolver equações de fluxo detalhadas dentro dos dutos de ventilação. A segunda consequência é que a energia interna e a entalpia podem estar relacionadas em função da pressão termodinâmica (de fundo).

De maneira simplificada, o procedimento de cálculo que o FDS usa para calcular a velocidade do fluxo no tempo é o seguinte: primeiro ele estima as variáveis

⁶³ Uma para cada um dos seguintes elementos: combustível, O₂, CO₂, H₂O, CO e N₂ e partículas de fuligem.

termodinâmicas, em seguida, calcula o divergente, e somente então resolve a equação da pressão, garantindo assim, que o divergente da velocidade atualizada seja idêntica à calculada exclusivamente a partir das variáveis termodinâmicas.

5.1.4 Combustão e Radiação

O FDS é descrito como um “modelador de fogo”, uma vez que incorpora termos e condições de contorno necessários para se descrever: a combustão turbulenta de combustíveis gasoso e oxigênio; o transporte de radiação térmica pelos gases quentes; o transporte de fuligem; a decomposição térmica de materiais reais; a ativação de detectores de fumaça e chuveiros automáticos; o transporte de gotículas de água e de combustíveis líquidos; além de diversas outras características que descrevem os incêndios dentro e fora de edifícios.

A combustão e a radiação são introduzidas, como termos de equação, tanto nas equações governantes quanto na equação do transporte de energia. Uma vez que, a equação de energia não é resolvida explicitamente, esses termos são obtidos na expressão do divergente.

5.1.4.1 Combustão

Para a maioria das aplicações, o FDS utiliza um modelo de combustão baseado em misturas limitadas de reação infinitamente rápida de “materiais agrupados”. Esses materiais reagem de maneira escalar, representando uma mistura de materiais. Por exemplo, o ar é um “material agrupado”, uma vez que é uma mistura de nitrogênio, oxigênio, vapor de água e dióxido de carbono.

A reação entre o combustível e o oxigênio não é necessariamente instantânea ou completa, existindo diversos modelos opcionais, projetados para simular a combustão de materiais em espaços sub-ventilados.

Para uma reação infinitamente rápida, os reagentes em uma dada célula da malha são convertidas em “materiais agrupados” de acordo uma taxa determinada por um tempo de mistura característico. A taxa de liberação de calor por unidade de volume é definida pela soma das taxas de produção em massa dos “materiais agrupados” multiplicado por seus respectivos índices de geração de calor.

5.1.4.2 Radiação

O FDS possui a capacidade de dividir o espectro de radiação em um número relativamente pequeno de bandas e resolver separadamente as equações de transporte de radiação para cada banda. Porém, geralmente isso não é necessário, dado que em incêndios reais a fuligem é a principal fonte de geração e absorção da radiação térmica, não sendo ela particularmente sensível a nenhum comprimento de onda. O coeficiente de absorção médio, é dado em função da composição e temperatura do material em questão, sendo que seus valores são obtidos por um modelo de banda estreita denominado RadCal.

Em simulações de incêndio em grande escala, as células da malha são geralmente da ordem de dezenas de centímetros. Dado que as labaredas não podem ser resolvidas de maneira adequada, pela malha grosseira, a temperatura média calculada em uma célula pode ser significativamente menor do que a temperatura que se esperaria encontrar em uma chama aberta. Conseqüentemente, o termo principal de cálculo é aproximado nas células da malha onde o combustível e o oxigênio reagem, enquanto nos demais locais, o campo de temperaturas em uma célula pode ser considerado homogêneo, podendo ter seu termo principal calculado diretamente. O FDS trabalha com uma estimativa empírica para determinar a fração global da energia que é emitida como radiação térmica, sendo que, normalmente, um fogo comum, com geração de fuligem, irradia aproximadamente um terço da energia gerada por sua combustão total.

A equação de radiação é resolvida usando uma técnica semelhante a um método de volumes finitos para transporte convectivo, portanto esse método é conhecido como Método de Volume Finito. O FDS utiliza-se de aproximadamente 100 ângulos discretos, que são atualizados em vários passos de tempo, para a realização dos cálculos. O solucionador de volumes finitos demanda de aproximadamente 20% do tempo total de cálculo da CPU, um custo modesto dada a complexidade da transferência de calor por radiação.

As gotículas de água podem absorver e espalhar a radiação térmica, sendo importante em cenários envolvendo sistemas de supressão de névoa de água, mas também desempenhando um papel importante em todos os casos envolvendo chuveiros automáticos. Os coeficientes de absorção e espalhamento são baseados na teoria de

Mie. A dispersão das espécies gasosas e fuligem é considerada insignificante e não está incluída no modelo.

5.1.5 Procedimento de Solução

Cada célula da malha, num determinado passo de tempo “ n ”, possui as seguintes características individuais: densidade; fração de massa referente ao “material agrupado”; vetor velocidade; integral de Bernoulli. Além disso, para cada compartimento no domínio computacional, tem-se uma “pressão de fundo”. Sendo assim, a temperatura é encontrada a partir da equação de estado, onde essas variáveis são avançadas no tempo utilizando-se um modelo de predição e correção explícito de segunda ordem.

Esse procedimento de solução pode ser verificado de maneira mais completa no Anexo C deste trabalho (MCGRATTAN et al., 2015a, p. 11-12).

5.2 *PyroSim*

Este pré-processador, desenvolvido pela Thunderhead Engineering Consultants, Inc., é simplesmente uma interface gráfica para melhorar e facilitar a utilização do FDS, já que ele foi desenvolvido para o sistema MS DOS, se tornando pouco intuitivo.

Foi utilizada a versão 2016 para todas as modelagens deste trabalho.

5.3 *Smokeview (SMV)*

Este pós-processador, também foi desenvolvido pelo National Institute of Standards and Technology (NIST), é um programa de visualização utilizado para exibir a saída de simulações do FDS. A versão utilizada neste trabalho é a 6.3.9.

6 SIMULAÇÕES PRELIMINARES

Uma vez que, para garantirmos a qualidade de uma simulação computacional, é de vital importância realizar um refinamento dos dados de entrada a serem utilizados. Esta seção tem por objetivo apresentar de maneira esclarecedora as principais características do material que será utilizado nos estudos de caso, a madeira. Além disso, pretende-se demonstrar a diferença de realizarmos simulações utilizando uma carga de incêndio sólida de grande dimensão comparativamente à uma carga de incêndio mais detalhada, ou seja, um “estéreo”⁶⁴.

De maneira a possibilitar a comparação com resultados reais de incêndios utilizou-se o trabalho de Rinne et al. “*Experimental Validation of the FDS Simulations of Smoke and Toxic Gas Concentrations*” (2007). Utilizou-se também os tutoriais fornecidos pela *Thunderhead Engineering Consultants* (2014a, 2014b, 2014c) com o objetivo de verificar os resultados obtidos pelo autor com simulações realizadas por outros profissionais habilitados e experientes na área.

6.1 Queima de Ripa de Madeira

Esta simulação simples tem como objetivo apresentar a combustão de uma única ripa de madeira até o consumo total de sua carga de incêndio, tendo sido baseada no tutorial da *Thunderhead Engineering Consultants* (2014b).

6.1.1 Hipóteses e características do modelo

6.1.1.1 Dimensões

A área de simulação é um paralelepípedo com cento e quarenta e quatro decímetros cúbicos (144 dm³) de volume, tendo comprimento de noventa centímetros (90 cm) e seção quadrada de quarenta centímetros (40 cm) (Figura 33).

⁶⁴ A medida “estéreo” é uma medida volumétrica criada na França em 1978, correspondente a um metro cúbico de madeira empilhada (sendo a somatória volumétrica da madeira com os espaços vazios existentes). Geralmente é utilizada para medir o empilhamento de toras de madeira para diversos fins, como por exemplo lenha (BATISTA, COUTO, 2002).

Todos os limites laterais e superior foram definidos como vãos livres, sendo representados pela cor azul (Figura 33 e Figura 34).

Figura 33 – Vistas superior e lateral da área de simulação e posicionamento da carga de incêndio

Vista superior

Vista lateral

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 34 - Visão 3D do modelo

Fonte: Elaborada pelo autor

6.1.1.2 Tempo de simulação

Foi determinado um tempo total de simulação de dez minutos (seiscentos segundos), de maneira a garantirmos a queima total da carga de incêndio.

6.1.1.3 Definição da malha

Conforme explicado anteriormente, o FDS só permite a utilização de malhas estruturas regulares, onde cada “volume finito” é denominado célula. Dessa forma definiu-se como padrão, células com dimensões 0,01 x 0,01 x 0,01 m, totalizando 144.000 células.

Esse tamanho de célula foi escolhido de maneira a garantir que a seção da madeira possuísse mais de uma célula.

6.1.1.4 Caracterização dos materiais

A caracterização da Madeira foi realizada seguindo os dados apresentados no trabalho de Rinne et al. (2007) e nos tutoriais da *Thunderhead Engineering Consultants* (2014a, 2014b, 2014c), como podem ser observados na Tabela 12.

Utilizou-se também, de maneira comparativa, o manual *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (NFPA, 2002) para verificar a adequação dos valores adotados para o material.

Tabela 12 – Caracterização da Madeira

Caracterização da Madeira	
Densidade [kg/m³]	369,6
Átomos de Carbono (Composição)	3,4
Átomos de Hidrogênio (Composição)	6,2
Átomos de Oxigênio (Composição)	2,5
Índice de produção de Fuligem	0,015
Calor Específico [kJ/(kg.K)]	1,36
Condutividade [W/(m.K)]	0,13
Emissividade	0,9
Coefficiente de absorção [1/m]	$5,0 \times 10^4$
Potencial calorífico [kJ/kg]	$1,79 \times 10^4$
Taxa de Liberação de Calor (HRR) [kW/m²]	175

Fonte: Elaborada pelo autor

6.1.1.5 Caracterização das superfícies

Também seguindo os dados apresentados no trabalho de Rinne et al. (2007) e nos tutoriais da *Thunderhead Engineering Consultants* (2014a, 2014b, 2014c) utilizou-se uma reação governada manualmente com $HRR = 175 \text{ kW/m}^2$ e combustão espontânea a $384,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para maior fidelidade de simulação selecionou-se a opção que permite que qualquer objeto desse material seja consumido até seu esgotamento.

6.1.1.6 Carga de incêndio

A madeira possui seção quadrada com quatro centímetros (4 cm) de lado e meio metro de comprimento (0,5 m), totalizando um volume de oitocentos centímetros cúbicos

(800 cm³), localizando-se no centro da área de simulação à oito centímetros (8 cm) do piso (Figura 33).

Para melhorar a qualidade da simulação ativou-se a opção de determinar a densidade aparente de cada objeto⁶⁵ de maneira individual. Determinando-se sempre o valor de 369,6 kg/m³.

Tendo em vista que a área de piso da simulação é de três mil e seiscentos centímetros quadrados (3.600 cm²), a carga total de incêndio é de aproximadamente 14,10 MJ/m², ou 5,29 MJ.

6.1.1.7 Posicionamento e caracterização dos ignitores

Para realizar uma combustão homogênea em todo o material criou-se uma superfície do tipo “Aquecedor”, com um fluxo de calor líquido de 100 kW/m².

Foi posicionada uma placa aquecedora em todo o piso da área de simulação, representada pela cor vermelha na Figura 33, Figura 34 e Figura 35.

Figura 35 – Disposição do plano de medição de temperatura no modelo

Fonte: Elaborada pelo autor

⁶⁵ Os objetos são denominados obstruções pelo programa *PyroSim*.

6.1.1.8 Pontos de análise de temperatura

Foi determinado somente um plano de análise⁶⁶ de temperatura, sendo ele no plano direcional vertical Y-Z do modelo com $X = 0,2$ m (Figura 35).

6.1.2 Resultados

De maneira gráfica Figura 36 apresenta a combustão da madeira e seu consumo total aos, aproximadamente, quinhentos segundos (500 s) de simulação.

Figura 36 - Representação gráfica do incêndio modelado nos instantes $t = 0$, 390, 495 e 540 s

$t = 0$ s

$t = 390$ s

$t = 495$ s

$t = 540$ s

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 37 é possível verificar o plano Y-Z de temperaturas, tendo como maior valor obtido mil graus ($1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$) na chama e um aquecimento do ar na ordem dos setecentos graus ($700\text{ }^{\circ}\text{C}$).

⁶⁶ Os planos de análise são denominados *Slices* pelo programa *PyroSim*.

Figura 37 - Temperaturas no plano Y-Z nos instantes $t = 0$, 390, 495 e 540 s

Fonte: Elaborada pelo autor

Por fim é possível verificar tanto a curva da taxa de liberação de calor (HRR) da simulação (Figura 38), quanto a curva da taxa de geração de gases (Figura 39)

Figura 38 – Curva da taxa de liberação de calor (HRR) do modelo

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 39 - Curva da taxa de geração de gases no tempo (MLR_TOTAL) do modelo

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

6.2 Queima de Bloco de Madeira

Esta simulação é uma simplificação da simulação realizada Rinne et al. (2007), onde o “estéreo” de madeira é substituído por um bloco maciço, sendo baseada no tutorial da *Thunderhead Engineering Consultants* (2014a).

6.2.1 Hipóteses e características do modelo

6.2.1.1 Dimensões

O volume a ser simulado é de setecentos e cinquenta metros cúbicos (750 m³), sendo subdividido em duas áreas. A primeira área possui as dimensões 10 m x 10 m x 5 m, tendo todos os seus limites compostos por elementos adiabáticos⁶⁷; a segunda área possui as dimensões 5 m x 10 m x 5 m, sendo o piso de material adiabático e os demais limites considerados como vãos livres (Figura 40).

⁶⁷ A utilização de limites adiabáticos é uma simplificação da simulação apresentada pelo tutorial da *Thunderhead*. Uma vez que os valores da temperatura nas paredes, teto e piso não são importantes para este estudo, a utilização de outro tipo de superfície que reaja com a temperatura só levaria a um maior custo computacional sem nenhum benefício adicional.

Figura 40 – Vista inferior do modelo para destacar a área aberta

Fonte: Elaborada pelo autor

Entre as duas áreas existe uma parede de material adiabático e espessura infinitesimal, onde está localizada uma abertura com dois metros (2 m) de largura e altura, estando posicionada no centro da parede a meio metro (0,5 m) do piso, conforme pode ser verificado na Figura 41.

Figura 41 - Visão 3D do modelo

Fonte: Elaborada pelo autor

6.2.1.2 Tempo de simulação

Foi determinado um tempo total de simulação de pouco mais de quinze minutos (mil segundos), uma vez que, com esse tempo de queima, já seria possível fazer comparações com a simulação da combustão do “estéreo”.

6.2.1.3 Definição da malha

Pope (2006) verificou em seu trabalho que, para análises mais simplificadas, é possível utilizar células com volumes entre $0,2 \text{ m}^3$ e $0,4 \text{ m}^3$. Essas malhas mais grosseiras⁶⁸, apresentam diferença nos resultados finais, porém, de certa maneira, aceitáveis pelo aumento da velocidade de cálculo.

Em sua conclusão, Pope (2006) admite que, para análises mais precisas, a utilização de malhas cujas células possuam volume igual a $0,1 \text{ m}^3$ é mais adequada⁶⁹.

De maneira a realizar uma simulação mais precisa foram utilizadas malhas de diferentes tamanhos, sendo elas:

- a) malha na área do cubo de madeira com células de $0,05 \text{ m} \times 0,05 \text{ m} \times 0,05 \text{ m}$: posicionada no centro da carga de incêndio, iniciando no piso com dimensões $1,2 \text{ m} \times 1,2 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$. Totalizando 11.520 células;
- b) malha na área superior do bloco com células de $0,1 \text{ m} \times 0,1 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}$: posicionada no centro da carga de incêndio, iniciando a $1,0 \text{ m}$ do piso com dimensões $1,2 \text{ m} \times 1,2 \text{ m} \times 4,0 \text{ m}$. Totalizando 5.760 células;
- c) malha ao redor do bloco⁷⁰ com células de tamanho $0,2 \text{ m} \times 0,2 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}$: posicionada no centro da carga de incêndio, iniciando no piso com dimensões $10,0 \text{ m} \times 10,0 \text{ m} \times 5,0 \text{ m}$. Totalizando 61.600 células;
- d) malha da área externa com células de $0,2 \text{ m} \times 0,2 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}$: posicionada na área exterior, iniciando no piso com dimensões $10,0 \text{ m} \times 5,0 \text{ m} \times 5,0 \text{ m}$. Totalizando 31.250 células.

De maneira geral o modelo possui sete malhas com 110.130 células.

⁶⁸ Malhas cujas células possuem dimensões aproximadas de $0,585 \text{ m} \times 0,585 \text{ m} \times 0,585 \text{ m}$ ($0,2 \text{ m}^3$) e $0,737 \text{ m} \times 0,737 \text{ m} \times 0,737 \text{ m}$ ($0,4 \text{ m}^3$).

⁶⁹ Células com dimensões aproximadas de: $0,464 \text{ m} \times 0,464 \text{ m} \times 0,464 \text{ m}$.

⁷⁰ Para não haver sobreposição de malhas, ela foi formada por quatro malhas distintas, deixando vazio o centro onde estão localizadas as duas malhas mais refinadas.

6.2.1.4 Caracterização dos materiais e superfícies

A característica do material e da superfície simuladas são as mesmas apresentadas nos itens 6.1.1.4 e 6.1.1.5.

6.2.1.5 Carga de incêndio

A madeira possui formato cúbico com cinquenta centímetros (50 cm) de lado, totalizando um volume de cento e vinte e cinco decímetros cúbicos (125 dm³), estando localizada no centro da área fechada da simulação a trinta centímetros (30 cm) do piso. Como pode ser verificado na Figura 41.

Assim como no 6.1.1.6, ativou-se a opção de determinar a densidade aparente de cada objeto, mantendo-se sempre o valor de 369,6 kg/m³.

Uma vez que a área de piso do ambiente em que ocorre a queima é de cem metros quadrados (100 m²), a carga total de incêndio é de aproximadamente 8,27 MJ/m², ou 826,98 MJ.

6.2.1.6 Posicionamento e caracterização dos ignitores

Para realizar uma combustão homogênea no material utilizou-se uma superfície do tipo *Burner*, representada pela cor vermelha, com taxa de liberação de calor (HRR) igual a 1.750 kW/m² e área superficial de 0,16 m², totalizando 280 kW de carga. Posicionou-se a superfície na parte superior de um objeto inerte com mesma área e altura igual a dez centímetros (10 cm), centralizado com a carga de incêndio, como pode ser visto na Figura 41.

6.2.1.7 Pontos de análise de temperatura

Foi determinado somente um plano de análise de temperatura, estando localizado no plano direcional vertical Y-Z, com X = 5 m (Figura 42).

Figura 42 - Disposição do plano de medição de temperatura no modelo

Fonte: Elaborada pelo autor

6.2.2 Resultados

De maneira ilustrativa a Figura 43 apresenta a evolução da combustão da madeira, bem como a evolução do acúmulo de fumaça no ambiente e seu escape para a área exterior.

Na Figura 44 é possível verificar campo de temperaturas no plano Y-Z, tendo como valor máximo de temperatura setecentos e vinte graus (720°C) na chama e um aquecimento do ar na ordem dos trezentos graus (300°C).

Figura 43 - Representação gráfica do incêndio modelado nos instantes $t = 0$, 60, 600 e 1000 s

$t = 0$ s

$t = 60$ s

$t = 600$ s

$t = 1000$ s

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 44 - Temperaturas no plano Y-Z nos instantes $t = 0, 60, 600, 700, 900$ e 1000 s

Fonte: Elaborada pelo autor

Por fim, é possível verificar tanto a curva da taxa de liberação de calor (HRR) da simulação (Figura 45), quanto a curva da taxa de geração de gases (Figura 46).

Figura 45 – Curva da taxa de liberação de calor (HRR) do modelo

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 46 - Curva da taxa de geração de gases no tempo (MLR_TOTAL) do modelo

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

6.3 Queima de 1/8 de “Estéreo”

Esta simulação foi baseada no trabalho de Rinne et al. (2007) e no tutorial da *Thunderhead Engineering Consultants* (2014c), sendo realizada a combustão de 1/8 de “estéreo”, ou seja, um oitavo de metro cúbico de peças de madeira com espaçamento entre elas.

6.3.1 Hipóteses e características do modelo

6.3.1.1 Dimensões

Os valores e características são virtualmente idênticas⁷¹ às utilizadas na simulação anterior, estando apresentadas no item 6.2.1.1 (Figura 47).

Figura 47 - Vista inferior do modelo para destacar a área aberta e corte

Fonte: Elaborada pelo autor

⁷¹ Uma vez que o valor da largura das células não é múltiplo de dez foi preciso ajustar a posição das paredes (24 cm na direção X, 8 cm na direção Y da sala, 12 cm na direção Y da área externa, e 12 cm na direção Z), o que pode ser considerado desprezível dado volume da simulação.

Figura 48 - Visão 3D do modelo

Fonte: Elaborada pelo autor

6.3.1.2 Tempo de simulação

Assim como no modelo anterior, determinou-se um tempo total de simulação um pouco superior a quinze minutos (mil segundos), de maneira a obter-se um resultado consistente com a simulação do bloco de madeira.

6.3.1.3 Definição da malha para simulação

Para esta simulação foram utilizadas malhas de diferentes tamanhos, sendo elas:

- a) malha na área do “estéreo” com células de 0,02 m x 0,02 m x 0,02 m: posicionada no centro da carga de incêndio, iniciando no piso com dimensões 0,96 m x 0,96 m x 1,76 m. Totalizando 202.752 células (Figura 49);
- b) malha na área superior do “estéreo” com células de 0,04 m x 0,04 m x 0,04 m: posicionada no centro da carga de incêndio, iniciando a 1,76 m do piso com dimensões 0,96 m x 0,96 m x 3,36 m. Totalizando 48.384 células;

- c) malha ao redor do “estéreo”⁷² com células de 0,08 m x 0,08 m x 0,08 m: posicionada no centro da carga de incêndio, iniciando no piso com dimensões 3,52 m x 3,52 m x 5,12 m. Totalizando 114.688 células;
- d) malha mais grosseira⁷³ completando o resto do ambiente a ser simulado com células de 0,16 m x 0,16 m x 0,16 m: posicionada no centro da carga de incêndio, iniciando no piso com dimensões 10,08 m x 10,24 m x 5,12 m. Totalizando 113.536 células;
- e) malha da área externa com células de 0,16 m x 0,16 m x 0,16 m: posicionada na área exterior, iniciando no piso com dimensões 10,24 m x 5,12 m x 5,12 m. Totalizando 65.536 células;

De maneira geral o modelo possui onze malhas com 544.896 células.

Figura 49 – Detalhe da malha mais refinada na área do “estéreo”

Fonte: Elaborada pelo autor

6.3.1.4 Caracterização dos materiais e superfícies

A característica do material e da superfície simuladas são as mesmas apresentadas nos itens 6.1.1.4 e 6.1.1.5.

⁷² Para não haver sobreposição de malhas, ela foi formada por quatro malhas distintas, deixando vazio o centro onde estão localizadas as duas malhas mais refinadas.

⁷³ Para não haver sobreposição de malhas, ela foi formada por quatro malhas distintas, deixando vazio o centro onde estão localizadas as malhas mais refinadas.

6.3.1.5 Carga de incêndio adotada

Para criar o 1/8 de “estéreo”⁷⁴ foram utilizadas setenta (70) ripas de madeira iguais a apresentada no item 6.1.1.1, com oitocentos centímetros cúbicos (800 cm³) de volume. Totalizando então, cinquenta e seis decímetros cúbicos (56 dm³) de madeira. As ripas foram igualmente espaçadas com seis centímetros (6 cm) de distância em grupos de cinco ripas, tendo sua orientação alternada em noventa graus entre cada camada, como pode ser observado na Figura 50.

Assim como no 6.1.1.6, ativou-se a opção de determinar a densidade aparente de cada objeto, mantendo-se sempre o valor de 369,6 kg/m³.

Dado que a área de piso do ambiente em que ocorre a queima é de cem metros quadrados (100 m²), a carga total de incêndio é de aproximadamente 3,70 MJ/m², ou 370,49 MJ.

Figura 50 – Detalhe 3D do “estéreo” e do ignitor

Fonte: Elaborada pelo autor

6.3.1.6 Posicionamento e caracterização dos ignitores

De modo a possibilitar a comparação com a queima do bloco de madeira, utilizou-se o mesmo ignitor apresentado no 6.2.1.6 (Figura 50).

⁷⁴ Mais precisamente tem-se 14% de “estéreo”, ao invés de 12,5% de “estéreo”, uma vez que este foi o simulado por Rinne et al. (2007).

6.3.1.7 Pontos de análise de temperatura

Foi utilizado somente um plano de análise de temperatura, estando localizado no plano direcional vertical Y-Z, com $X = 5$ m (Figura 51).

Figura 51 - Disposição do plano de medição de temperatura no modelo

Fonte: Elaborada pelo autor

6.3.2 Resultados

De maneira ilustrativa a Figura 52 apresenta a evolução da combustão da madeira, bem como a evolução do acúmulo de fumaça no ambiente e seu escape para a área exterior.

Figura 52 - Representação gráfica do incêndio modelado nos instantes $t = 0$, 30, 240 e 1000 s

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 53 apresenta um detalhe da evolução do fogo no “estéreo”, bem como a labareda de fogo de maneira detalhada.

Figura 53 - Representação gráfica do fogo modelado nos instantes $t = 0, 30, 300, 600, 700$ e 1000 s

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 54 apresenta a evolução do campo de temperaturas no plano Y-Z, tendo como valor máximo mil graus ($1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$) na chama e um aquecimento do ar na ordem dos oitocentos graus ($800\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Figura 54 - Temperaturas no plano Y-Z nos instantes $t = 0, 30, 120, 700, 720$ e 1000 s

Fonte: Elaborada pelo autor

Nas Figuras Figura 55 a Figura 60 estão as principais curvas para se realizar uma análise mais profunda da combustão de um material, ou até mesmo de um incêndio completo. Sendo elas: a curva da taxa de liberação de calor (HRR), a curva da taxa de geração de gases e as curvas de energia (radiação, convecção, condução e total).

Figura 55 – Curva da taxa de liberação de calor (HRR) do modelo

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 56 - Curva da energia de radiação (Q_RADI) do modelo

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 57 - Curva da energia de convecção (Q_CONV) do modelo

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 58 - Curva da energia de condução (Q_COND) do modelo

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 59 - Curva da energia total (Q_{TOTAL}) do modelo

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 60 - Curva da taxa de geração de gases no tempo (MLR_{TOTAL}) do modelo

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

6.4 Análise

Na simulação de queima de uma ripa de madeira os resultados obtidos foram dentro do esperado.

A temperatura máxima de queima (Figura 37) alcançou um valor adequado de mil graus (1000°C) e a curva da taxa de liberação de calor (HRR) estava correta, podendo ser comparada com os resultados apresentados pelo tutorial da *Thunderhead Engineering Consultants* (2014b).

Um outro ponto importante a ser levantado é que foi possível realizar a combustão completa do material, com uma taxa de liberação de calor coerente, que é a base para uma simulação adequada de um incêndio.

As duas outras simulações são importantes do ponto de vista comparativo, sendo que foi observada uma grande variação do comportamento de queima do material, como era esperado.

A queima do bloco sólido de madeira atingiu valores bem menores de temperatura. Foram atingidos os setecentos e vinte graus (720°C) (Figura 44) contra mil graus (1.000°C) (Figura 54) na queima do “estéreo”. Esse aumento de quase quarenta por cento (40 %) era esperado, pois, mesmo que a carga de incêndio total seja cento e vinte e três por cento (123%) maior, a área de contato com o ar, ou seja, a área e contato com o comburente, é pouco mais de dezesseis vezes menor.

Ao comparar os gráficos da taxa de liberação de calor em função do tempo (Figura 38 e Figura 45), é possível verificar a enorme diferença entre os dois métodos de modelagem. No “estéreo” atingiu-se uma média de dezessete mil e quinhentos quilowatt (17.500 kW) contra duzentos quilowatt (200 kW) no bloco de madeira.

É importante frisar que essa diferença não é um erro de modelagem, mas sim uma diferença presente em situações reais de incêndio. Um modo de verificar que a simulação do bloco de madeira foi realizada de forma adequada é o consumo aparente da carga de incêndio, que pôde ser observada na Figura 43.

Por último, foi possível verificar a coerência da simulação computacional ao ser comparada a uma simulação real, uma vez que os valores encontrados foram equivalentes ao apresentados no trabalho de Rinne et al. (2007) e no tutorial da *Thunderhead Engineering Consultants* (2014c).

Por meio desta análise foi possível concluir que o formato da carga de incêndio é de extrema importância para o modelo. Sendo assim, é importante estudar o quanto detalhada deve ser sua carga de incêndio de maneira a alcançar bons resultados.

7 ESTUDOS DE CASO PRELIMINARES

Esta seção tem por objetivo principal demonstrar a influência da carga de incêndio presente em um compartimento e a capacidade do FDS de simular incêndios distintos de maneira realista, possibilitando assim o estudo de compartimentação de maneira mais aprofundada.

Para isso foram realizadas três simulações com o intuito de viabilizar a comparação de incêndios num mesmo ambiente, porém com cargas distintas.

7.1 Parâmetros Gerais

Neste item estão descritas as características básicas utilizadas na simulação dos três modelos executados.

7.1.1 Hipóteses e características do modelo

7.1.1.1 Dimensões

O modelo utilizado tem por finalidade simular uma habitação genérica, ou seja, um apartamento de aproximadamente cinquenta metros quadrados (50 m²) e pé direito de dois metros e oitenta centímetros (2,8 m). As áreas de cada ambiente pode ser verificada na Tabela 13.

Tabela 13 – Tabela de áreas do apartamento

Tabela de Áreas [m ²]	
Banheiro	2,00
Cozinha	10,64
Entrada	3,64
Hall	1,92
Lavanderia	3,08
Quarto	10,08
Sala	9,12
Área Interna (sem considerar paredes)	40,48
Varanda	9,62
Área Total	50,10

Fonte: Elaborada pelo autor

Uma vez que o intuito dessas simulações não é o estudo da condução do calor nas paredes internas, externas, piso ou teto do apartamento, e este foi considerado como um compartimento, ou seja, suas paredes externas, piso e teto possuem estabilidade, estanqueidade e isolamento térmico de acordo com as exigências de projeto (já que devem seguir uma normatização específica e serem ensaiadas para esse fim), definiu-se que todos esses elementos seriam modelados como adiabáticos, de forma a aliviar o custo computacional das simulações sem abrir mão da precisão necessária para uma análise adequada do incêndio.

Figura 61 – Vista superior do modelo do compartimento para os estudos de caso preliminares

Fonte: Elaborada pelo autor

As paredes internas e o teto foram modelados com vinte centímetros (20 cm) de espessura, enquanto as paredes externas foram modeladas com quarenta centímetros (40 cm) de espessura, conforme pode ser verificado na Figura 61. Uma

vez que o piso está localizado no limite da área de simulação ele foi modelado com espessura infinitesimal. É importante frisar que as medidas utilizadas nas espessuras de paredes não foram escolhidas de acordo com a prática da arquitetura, mas sim de maneira a facilitar a modelagem e simplificar as malhas adotadas.

Todos os demais limites da área de simulação foram definidos como áreas abertas, ou vãos livres, representados pela cor azul (Figura 61 e Figura 62), de maneira a simular um apartamento⁷⁵.

Conforme apresentado na Figura 62, foram locadas nas paredes externas três janelas e uma porta para acesso à varanda.

Tanto a janela da sala quanto a do quarto possuem um metro (1 m) de altura e dois metros (2 m) de comprimento, estando posicionadas no centro do ambiente a um metro e meio (1,5 m) de altura. A janela do banheiro por sua vez possui seção quadrada com meio metro (0,5 m) de lado, estando locada no centro do ambiente a dois metros (2 m) de altura.

Por fim, a porta da varanda foi modelada com dois metros (2 m) de largura e dois metros e meio (2,5 m) de altura, sendo posicionada a dois metros e vinte centímetros (2,2 m) da parede onde estão localizadas as janelas (pelo lado exterior).

Figura 62 – Visão 3D do compartimento modelado para os estudos de caso preliminares

Fonte: Elaborada pelo autor

⁷⁵ Nota: a ideia deste modelo não é seguir os padrões da arquitetura e nem ser totalmente realista. Muitas simplificações foram realizadas para simplificar a simulação como, por exemplo, a inexistência da porta de entrada, uma vez que a ideia é simular um compartimento fechado.

Por fim, de maneira a simplificar a simulação, todas as portas (internas ou externa) e janelas foram consideradas como vãos abertos, considerando que suas cargas de incêndio equivalente já estão somadas na carga de incêndio disposta no apartamento. Além disso, considerou-se que todos os vidros já estariam quebrados, seguindo o princípio apresentado no item 2.4.2 para incêndios severos.

7.1.1.2 Tempo de simulação

Foi determinado um tempo total de simulação de quinze minutos (15 min), ou novecentos segundos (900 s).

Esse tempo relativamente baixo foi escolhido já que o incêndio será iniciado após a inflamação generalizada, ou *flashover*, sendo assim, com este tempo já pode ser considerado suficiente para se verificar as principais características do incêndio, tais como: projeção de labaredas para o exterior e as temperaturas internas média e máxima do compartimento.

7.1.1.3 Definição da malha para simulação

De maneira a tentar balancear precisão e custo computacional, foram utilizada malhas com três tamanhos de células:

- a) malha mais refinada, com células de dimensões: 0,05 m x 0,05 m x 0,05 m;
- b) malha de refinamento médio, com dimensões: 0,1 m x 0,1 m x 0,1 m;
- c) malha mais grosseira, cujas dimensões são: 0,4 m x 0,4 m x 0,4 m.

A malha mais refinada foi utilizada nas áreas que receberam carga de incêndio (quarto, cozinha, sala e parte da entrada) com oitenta centímetros (80 cm) de altura, partindo do piso. Totalizando 236.544 células.

A malha de refinamento médio foi utilizada nos demais ambientes (lavanderia, hall, banheiro e resto da entrada) com a mesma altura da malha mais refinada e em toda a área interna do compartimento entre oitenta centímetros (80 cm) do piso e um metro e sessenta centímetros (1,60 m). Totalizando 48.768 células.

Por fim, a malha mais grosseira foi utilizada na parte superior do compartimento, entre um metro e sessenta centímetros (1,60 m) e três metros e vinte centímetros (3,20 m) do piso, e nas áreas externas ao compartimento⁷⁶. Totalizando 3.976 células.

⁷⁶ As dimensões da área simulada são: 10 m x 10,4 m x 3,2 m, totalizando um volume de 332,8 m³.

De maneira geral o modelo possui onze (11) malhas com 289.288 células.

7.1.1.4 Caracterização dos materiais

A caracterização da Madeira foi a mesma utilizada nas simulações preliminares⁷⁷, estando novamente apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Caracterização da Madeira

Caracterização da Madeira	
Densidade [kg/m³]	369,6
Átomos de Carbono (Composição)	3,4
Átomos de Hidrogênio (Composição)	6,2
Átomos de Oxigênio (Composição)	2,5
Índice de produção de Fuligem	0,015
Calor Específico [kJ/(kg.K)]	1,36
Condutividade [W/(m.K)]	0,13
Emissividade	0,9
Coeficiente de absorção [1/m]	$5,0 \times 10^4$
Potencial calorífico [kJ/kg]	$1,79 \times 10^4$
Taxa de Liberação de Calor (HRR) [kW/m²]	175

Fonte: Elaborada pelo autor

7.1.1.5 Caracterização das superfícies

Da mesma forma que nas simulações preliminares⁷⁸, utilizou-se uma reação governada manualmente com $HRR = 175 \text{ kW/m}^2$ e combustão espontânea da madeira a $384,0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Assim como feito anteriormente, para uma maior fidelidade de simulação optou-se por selecionar a opção que permite que os objeto desse material sejam consumidos até seu esgotamento.

⁷⁷ Baseada no trabalho de Rinne et al. (2007) e nos tutoriais da *Thunderhead Engineering Consultants* (2014a, 2014b, 2014c).

⁷⁸ Baseadas no trabalho de Rinne et al. (2007) e nos tutoriais da *Thunderhead Engineering Consultants* (2014a, 2014b, 2014c).

7.1.1.6 Posicionamento e caracterização dos ignitores

Para garantir a inflamação generalizada do compartimento e uma combustão homogênea em todo o material criou-se uma superfície do tipo “Aquecedor”, com um fluxo de calor líquido de 100 kW/m² equivalente à criada no item 6.1.1.7.

Foi posicionada uma placa aquecedora em todo o piso do compartimento, estando representada pela cor vermelha na Figura 61.

Optou-se por esse método de ignição por dois fatores principais:

- a) o primeiro é que ao garantirmos a homogeneidade da combustão garantimos uma simulação mais generalista, que seria ideal para a utilização, por exemplo, em normas técnicas;
- b) o segundo ponto é que, a simulação em que um único foco de incêndio deve se alastrar para todo o compartimento de maneira a atingir a inflamação generalizada é, não só muito mais específica, quanto consideravelmente mais complexa de ser modelada. Além de necessitar de um maior tempo de simulação e consequentemente exigir um maior custo computacional.

7.1.1.7 Pontos de análise de temperatura

Figura 63 - Disposição dos pontos de medição de temperatura no compartimento (vista superior)

Para se obter uma análise mais completa do incêndio foram dispostos no ambiente, cinco pontos de análise de temperatura⁷⁹, como pode ser observado na Figura 63. Eles foram dispostos no centro de cada ambiente principal (banheiro, cozinha, lavanderia, quarto, sala) a um metro e quarenta centímetros (1,4 m) do piso (na metade do pé direito) com orientação $Z = -1$ ⁸⁰ (Figura 63 e Figura 64).

Figura 64 - Disposição dos pontos de medição de temperatura no compartimento (visão 3D)

Fonte: Elaborada pelo autor

As posição cartesiana (X,Y) dos pontos de análise são:

- a) banheiro: $X = 5,80$ m e $Y = 6,30$ m
- b) cozinha: $X = 1,60$ m e $Y = 6,60$ m
- c) lavanderia: $X = 1,60$ m e $Y = 9,25$ m
- d) quarto: $X = 5,00$ m e $Y = 8,40$ m
- e) sala: $X = 4,90$ m e $Y = 4,40$ m

Por fim, também foram determinados cinco planos de análise de temperatura, sendo três no plano direcional X-Z e um em cada plano direcional adicional do modelo, como pode ser verificado na Figura 65.

⁷⁹ Os pontos de análise são denominados *Devices* pelo programa *PyroSim*.

⁸⁰ Ter orientação $Z = -1$ significa que o “medidor de temperatura” está apontando para baixo, ou seja, para o piso do ambiente.

As posições dos planos de análise são as seguintes:

- a) plano Y-Z com $X = 4,0$ m: no centro da porta da varanda.
- b) plano X-Z com $Y = 4,4$ m: no centro da janela da sala.
- c) plano X-Z com $Y = 6,3$ m: no centro da janela do banheiro.
- d) plano X-Z com $Y = 8,4$ m: no centro da janela do quarto.
- e) plano X-Y com $Z = 2,0$ m: no centro das janelas da sala e do quarto.

Figura 65 - Disposição dos planos de medição de temperatura no modelo

Fonte: Elaborada pelo autor

7.2 Estudo de Caso 1

7.2.1 Carga de incêndio adotada

A Instrução Técnica N° 14 (2015) do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo apresenta em seu Anexo A uma tabela de cargas de incêndio específicas por ocupação, devendo-se lembrar que os valores nela apresentados não são valores limites. Para apartamentos residenciais a carga de incêndio apresentada é de trezentos megajoules por metro quadrado de área construída (300 MJ/m²).

O decreto estadual N° 46.076 de 2011 do Estado de São Paulo apresenta em sua Tabela 3 a classificação das áreas de risco quanto à carga de incêndio, sendo considerado da seguinte forma:

- a) baixo risco: até 300 MJ/m²
- b) médio risco: entre 300 e 1.200 MJ/m²
- c) alto risco: acima de 1.200 MJ/m²

Sendo assim, decidiu-se que o primeiro estudo de caso deveria possuir aproximadamente a carga de incêndio para edifícios residenciais apresentada pela Instrução Técnica N° 14 (2015) do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo.

Para compor a carga de incêndio utilizou-se vigas de madeira de seção quadrada com quinze centímetros (15 cm) de largura, com comprimento variável de acordo com o ambiente em que foi colocado e com espaçamento de quinze centímetros (15 cm) entre elas a cinco centímetros (5 cm) do piso (Figura 66).

Uma vez que em uma residência real pode-se dizer que a maior parte da carga de incêndio estará concentrada na cozinha, quarto e sala, foram nestes ambientes que se concentraram as vigas de madeira.

Na Tabela 15 estão apresentadas de forma mais detalhada a carga de incêndio existente no compartimento, totalizando 15.019,61 MJ, ou 299,79 MJ/m². É importante ressaltar que, na sala, foi preciso utilizar dois tamanhos distintos de vigas, de maneira a evitar um conflito na união das malhas do modelo. Sendo assim, apresenta-se na tabela os valores de carga para cada tamanho de viga e a somatória total da carga de incêndio da sala.

Figura 66 - Disposição da carga de incêndio no compartimento

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 15 – Carga de incêndio

Carga de Incêndio				
Ambiente	l_{viga} [m]	n_{vigas}	V [dm ³]	Carga [MJ]
Cozinha	3,8	9	769,50	5.090,89
Entrada	1,3	2	58,50	387,03
Quarto	2,8	12	756,00	5.001,58
Sala	2,4	6	324,00	2.143,53
	2,3	7	362,25	2.396,59
Sala - Somatória	-	13	686,25	4.540,12
Total	-	36	2.956,50	15.019,61

Fonte: Elaborada pelo autor

7.2.2 Resultados

A Figura 67 tem por objetivo apresentar para o leitor a quantidade de fumaça gerada após dez minutos de inflamação generalizada, bem como sua projeção para o exterior do compartimento pelos vãos livres existentes na fachada.

É importante lembrar que a fumaça deve ser vista como uma projeção de gases quentes, que é um dos principais causadores da quebra e compartimento pelo exterior de um compartimento.

Figura 67 - Perspectiva do incêndio aos 15 min de simulação com presença da fumaça

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 68 apresenta de maneira gráfica o desenvolvimento do incêndio, podendo ser verificado inclusive uma projeção pequena da labareda pela porta da varanda no instante $t = 300$ s e pela janela do banheiro no instante $t = 900$ s.

Figura 68 - Representação gráfica do incêndio nos instantes $t = 0$, 15, 300 e 900 s $t = 0$ s $t = 15$ s $t = 300$ s $t = 900$ s

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 69, assim como na Figura 70, é possível verificar a evolução da temperatura dentro do compartimento. É possível também verificar a complexidade da simulação e o potencial do FDS nos cálculos e desenvolvimento da convecção de calor do compartimento, bem como o detalhamento dos vórtices dos gases quentes. É possível verificar a entrada de gases frios pela parte inferior da porta da sacada, assim como a projeção dos gases quentes por seu extremo superior.

Figura 69 - Temperaturas no plano Y-Z nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s

Fonte: Elaborada pelo autor

Um ponto importante que pôde ser verificado é que a temperatura média no interior do compartimento ficou entre novecentos (900°C) e mil e duzentos graus (1.200°C), sendo a menor temperatura mais presente na parte superior do compartimento e a mais quente próximo da carga de incêndio, o que era esperado. A temperatura máxima encontrada foi de aproximadamente mil e quatrocentos graus (1.400°C) nas proximidades da carga de incêndio.

Figura 70 - Temperaturas no plano X-Z com $Y = 4,4$ m nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 71 apresenta de forma mais clara a temperatura média do compartimento, variando entre oitocentos (800 °C) e mil (1.000 °C), o que está dentro do esperado para esse tipo de incêndio.

Figura 71 - Temperaturas no plano X-Y nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 72 é possível verificar a projeção de calor para o exterior do compartimento de maneira mais ilustrativa, possibilitando verificações das distâncias de risco e afastamento horizontal mínimo entre aberturas de compartimentos distintos. O afastamento vertical também pode ser verificado através da análise da projeção dos gases quentes apresentados na Figura 69.

É importante lembrar que também é possível obter as curvas de temperatura-tempo pelos pontos de análise posicionados nos ambientes, possibilitando assim a obtenção

de dados mais precisos para melhor analisar os locais de maior interesse da simulação (Figura 73, Figura 74 e Figura 75).

Figura 72 - Temperaturas no plano X-Y no instantes $t = 612$ s

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 73 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da cozinha

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 74 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise do quarto

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 75 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da sala

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

7.3 Estudo de Caso 2

7.3.1 Carga de incêndio adotada

Uma vez que o intuito desse conjunto de simulações é verificar a influência da quantidade de carga na severidade do incêndio em um mesmo compartimento, adotou-se aproximadamente metade da carga utilizada no estudo de caso 1.

Foram mantidas todas as características das vigas, com exceção do afastamento, que foi adotado como sendo quarenta e cinco centímetros (45 cm) (Figura 76).

Figura 76 - Disposição da carga de incêndio no compartimento

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 16 – Carga de incêndio

Carga de Incêndio				
Ambiente	l_{viga} [m]	n_{vigas}	V [dm³]	Carga [MJ]
Cozinha	3,8	5	427,50	2.828,27
Quarto	2,8	6	378,00	2.500,79
Sala	2,4	4	216,00	1.429,02
	2,3	3	155,25	1.027,11
Sala - Somatória	-	7	371,25	2.456,13
Total	-	18	1.548,00	7.785,19

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 16 detalha a carga de incêndio existente no compartimento, sendo que, para este estudo de caso, tem-se o total de 7.785,19 MJ, ou 155,39 MJ/m².

7.3.2 Resultados

De maneira a unificar os resultados obtidos, com o intuito de facilitar a comparação dos dados entre os três estudos de casos, este item apresenta entre a Figura 77 e a Figura 85 a mesma sequência de imagens do item 7.2.2.

Figura 77 - Perspectiva do incêndio aos 15 min de simulação com presença da fumaça

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 77 é possível verificar uma menor quantidade de fuligem produzida, em comparação com o estudo de caso anterior (Figura 67).

Figura 78 - Representação gráfica do incêndio nos instantes $t = 0$, 15, 300 e 900 s

$t = 0$ s

$t = 15$ s

$t = 300$ s

$t = 900$ s

Fonte: Elaborada pelo autor

A temperatura média no interior do compartimento ficou em torno dos setecentos e cinquenta graus (750°C), apresentando uma maior homogeneidade de temperatura. A temperatura máxima ficou próxima dos mil e duzentos graus (1.200°C) (Figura 79 e Figura 80).

Figura 79 - Temperaturas no plano Y-Z nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s

Fonte: Elaborada pelo autor

É possível verificar na Figura 79 que, por consequência da temperatura menor do incêndio, a entrada dos gases frios do exterior se dá de forma mais acentuada no compartimento.

Figura 80 - Temperaturas no plano X-Z com $Y = 4,4$ m nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 81 é possível verificar que, na parte superior do compartimento, onde existe menos influência dos gases frios do exterior, a temperatura média é de novecentos graus (900 °C), o que está dentro do esperado.

Figura 81 - Temperaturas no plano X-Y nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s

Fonte: Elaborada pelo autor

Também é possível verificar uma projeção menor dos gases quentes, para o exterior, em comparação com a simulação anterior (Figura 81 e Figura 82).

As curvas temperatura-tempo da cozinha (Figura 83) e do quarto (Figura 84) são muito similares às curvas obtidas no estudo de caso 1, o que não pode ser dito da curva temperatura-tempo da sala (Figura 85), que teve em média trezentos graus (300 °C) a menos. Isso pode ser explicado pela maior influência dos gases frios do exterior nesse ambiente.

Figura 82 - Temperaturas no plano X-Y no instantes $t = 780$ s

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 83 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da cozinha

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 84 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise do quarto

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 85 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da sala

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

7.4 Estudo de Caso 3

7.4.1 Carga de incêndio adotada

Uma vez que já foram simuladas cargas de incêndio próximas de cento e cinquenta (150 MJ/m^2) e trezentos megajoules por metro quadrado (300 MJ/m^2), a carga de incêndio para este estudo de caso foi determinada como seiscentos megajoules por metro quadrado (600 MJ/m^2). Para isso, foram mantidas todas as características das vigas do estudo de caso 1, adicionando ainda uma nova camada de vigas afastadas verticalmente em quinze centímetros (15 cm) da primeira (Figura 86).

Figura 86 - Disposição da carga de incêndio no compartimento

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 17 detalha a carga de incêndio no compartimento, onde obteve-se um total de 30.039,22 MJ, ou 599,59 MJ/m².

Tabela 17 – Carga de incêndio

Carga de Incêndio				
Ambiente	l_{viga} [m]	n_{vigas}	V [dm³]	Carga [MJ]
Cozinha	3,8	18	1.539,00	10.181,78
Entrada	1,3	4	117,00	774,05
Quarto	2,8	24	1.512,00	10.003,15
Sala	2,4	12	648,00	4.287,06
	2,3	14	724,50	4.793,18
Sala - Somatória	-	26	1.372,50	9.080,24
Total	-	72	5.913,00	30.039,22

Fonte: Elaborada pelo autor

7.4.2 Resultados

Ainda com o intuito de unificar os resultados, facilitando a comparação dos dados entre os três estudos de casos, este item apresenta entre a Figura 87 e a Figura 95 a mesma sequência de imagens do item 7.2.2 e 7.3.2.

Na Figura 87 é possível verificar um aumento da produção de fumaça em comparação com as simulações anteriores.

Figura 87 - Perspectiva do incêndio aos 15 min de simulação com presença da fumaça

Fonte: Elaborada pelo autor

Também é possível observar um aumento considerável no tamanho das labaredas projetadas para o exterior do compartimento se comparada com as simulações anteriores (Figura 87).

Figura 88 - Representação gráfica do incêndio nos instantes $t = 0$, 15, 300 e 900 s

$t = 0$ s

$t = 15$ s

$t = 300$ s

$t = 900$ s

Fonte: Elaborada pelo autor

A temperatura média no compartimento foi de, aproximadamente, mil e cem graus ($1.100\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Figura 89 e Figura 90), com valores mínimos em torno de novecentos graus ($900\text{ }^{\circ}\text{C}$) e máximos em torno de mil trezentos e cinquenta graus ($1.350\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Figura 89 - Temperaturas no plano Y-Z nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s

Fonte: Elaborada pelo autor

Também é possível observar na Figura 89 uma enorme projeção de gases, a aproximadamente mil graus (1.000°C), para o exterior.

Figura 90 - Temperaturas no plano X-Z com $Y = 4,4$ m nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 91 verifica-se que a temperatura média na parte superior do compartimento foi de, aproximadamente, mil graus (1.000°C).

Figura 91 - Temperaturas no plano X-Y nos instantes $t = 0, 30, 450$ e 900 s

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 92 apresenta de forma ilustrativa a projeção para o exterior dos gases quentes, sendo possível verificar um grande aumento da distância, em comparação com as simulações anteriores.

Nas curvas de temperatura-tempo (Figura 93, Figura 94 e Figura 95) é possível verificar um comportamento um pouco diferente do obtido até aqui. Isso pode ser explicado pelo fato do incêndio, neste caso, não iniciar exatamente na inflamação generalizada, uma vez que é necessário que a camada inferior de vigas entre em combustão para que a camada superior se ignize, ou seja, é possível observar o final da fase de aquecimento do incêndio.

Figura 92 - Temperaturas no plano X-Y no instantes $t = 345$ s

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 93 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da cozinha

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 94 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise do quarto

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 95 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da sala

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

7.5 Análise

O primeiro ponto a ser observado é que a carga de incêndio influencia de maneira categórica na severidade do incêndio, como já era sabido. Além disso, foi possível confirmar que as principais características para se garantir a compartimentação vertical e horizontal são diretamente influenciadas, como por exemplo, a distância vertical entre vãos e a influência de abas horizontais na prevenção do alastramento do fogo.

Um ponto interessante a ser observado também é que a carga de incêndio é mais prejudicial para a compartimentação vertical do que para a compartimentação horizontal (o que também era esperado).

Outro ponto importante de ser levantado é o detalhamento que é possível se obter dos vórtices formados pelo choque entre os gases frios do exterior e os gases quentes do interior, como havia sido mencionado anteriormente. Isso auxilia na corroboração de que o FDS é capaz de simular incêndios de forma adequada e que é possível realizar análises mais profundas para, tanto a solução de problemas pontuais em edificações específicas, quanto para o desenvolvimento de normas mais apuradas e embasadas cientificamente.

Em todas as simulações a temperatura média do incêndio oscilou entre setecentos (700 °C) e mil e duzentos graus (1.200 °C) o que podem ser considerados resultados extremamente adequados uma vez que de acordo com a Instrução Técnica N° 2 de 2011 do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo a temperatura média de um incêndio em um compartimento após a inflamação generalizada é de aproximadamente novecentos graus (900 °C).

Infelizmente pelo curto tempo de simulação, quinze minutos (15 min), não foi possível observar por meio dos pontos de análise de temperatura o ramo de resfriamento da curva. Da mesma maneira não pode ser observado o ramo ascendente da curva, uma vez que o método de ignição pulou esta etapa, partindo da inflamação generalizada. É possível concluir que as dimensões escolhidas para a carga de incêndio foram adequadas, uma vez que os resultados obtidos estavam todos dentro do esperado. Para trabalhos futuros seria interessante analisar de forma mais profunda qual seria o formato ideal para uma carga de incêndio generalizada, de maneira a ser possível obter bons resultados com o menor custo computacional possível.

8 ESTUDO DE CASO FINAL

O estudo de caso final desta dissertação tem por objetivo apresentar de maneira ilustrativa os resultados de uma simulação que permita a análise de alguns dos principais problemas que se tem na engenharia de segurança contra o incêndio no que diz respeito à compartimentação.

8.1 Definições

A modelo tem por objetivo simular uma parte de um edifício que possui uma fachada angulada de noventa graus (90°). De maneira simplificada, o modelo é formado por quatro compartimentos, sendo dois por andar.

8.1.1 *Hipóteses e características do modelo*

8.1.1.1 Dimensões

Cada um dos quatro apartamentos terá a mesma planta e característica do apartamento modelado para as simulações preliminares (7.1.1.1). Relembrando:

- a) área de aproximadamente cinquenta metros quadrados (50 m^2);
- b) pé direito de dois metros e oitenta centímetros (2,8 m);
- c) ambientes com áreas de acordo com a Tabela 18;
- d) paredes internas, externas, piso e teto modelados como adiabáticos;
- e) paredes internas com vinte centímetros (20 cm) de espessura;
- f) tetos com vinte centímetros (20 cm) de espessura;
- g) paredes externas com quarenta centímetros (40 cm) de espessura;
- h) piso dos compartimentos inferiores com espessura infinitesimal;
- i) janelas da sala e quarto com um metro (1 m) de altura e dois metros (2 m) de comprimento, posicionadas no centro do ambiente a um metro e meio (1,5 m) do piso;
- j) a janela do banheiro de seção quadrada com meio metro (0,5 m) de lado, posicionada no centro do ambiente a dois metros (2 m) do piso;
- k) portas (internas e externa) consideradas como vãos livres;

- l) janelas consideradas como vãos livres;
- m) limites da área de simulação consideradas como vão livre.

Tabela 18 – Tabela de áreas do apartamento

Tabela de Áreas [m²]	
Banheiro	2,00
Cozinha	10,64
Entrada	3,64
Hall	1,92
Lavanderia	3,08
Quarto	10,08
Sala	9,12
Área Interna (sem considerar paredes)	40,48
Varanda	9,62
Área Total	50,10

Fonte: Elaborada pelo autor

Para facilitar a visualização do modelo temos, na Figura 97 a vista superior do andar inferior, na Figura 98 a vista superior do andar superior e na Figura 96 uma vista em 3D do modelo.

Figura 96 - Visão 3D do modelo para o estudo de caso final

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 97 – Vista superior dos compartimentos inferiores

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 98 – Vista superior dos compartimentos superiores

Fonte: Elaborada pelo autor

8.1.2 Tempo de simulação

Foi determinado um tempo total de simulação de uma hora (três mil e seiscentos segundos).

Conforme pode ser verificado no Apêndice B deste trabalho: edifícios residenciais com até vinte e três metros (23 m) de altura e dez metros (10 m) de subsolo possuem um TRRF inferior ou igual a uma hora.

Sabe-se que o TRRF não representa o tempo de incêndio propriamente dito, mas um tempo mínimo de resistência caso seja aplicado um incêndio padrão, porém esse valor foi considerado adequado para esta simulação.

8.1.3 Caracterização dos materiais

A caracterização da madeira foi a mesma utilizada nas simulações preliminares⁸¹ e nos estudos de caso preliminares, estando novamente apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Caracterização da Madeira

Caracterização da Madeira	
Densidade [kg/m³]	369,6
Átomos de Carbono (Composição)	3,4
Átomos de Hidrogênio (Composição)	6,2
Átomos de Oxigênio (Composição)	2,5
Índice de produção de Fuligem	0,015
Calor Específico [kJ/(kg.K)]	1,36
Condutividade [W/(m.K)]	0,13
Emissividade	0,9
Coeficiente de absorção [1/m]	$5,0 \times 10^4$
Potencial calorífico [kJ/kg]	$1,79 \times 10^4$
Taxa de Liberação de Calor (HRR) [kW/m²]	175

Fonte: Elaborada pelo autor

8.1.4 Caracterização das superfícies

Da mesma forma que nas simulações preliminares e nos estudos de caso preliminares, utilizou-se uma reação governada manualmente com HRR = 175 kW/m² e combustão espontânea da madeira a 384,0 °C.

⁸¹ Baseada no trabalho de Rinne et al. (2007) e nos tutoriais da *Thunderhead Engineering Consultants* (2014a, 2014b, 2014c).

Optando-se por selecionar a opção que permite que os objetos desse material sejam consumidos até seu esgotamento, para garantir maior fidelidade de simulação.

8.1.5 Carga de incêndio adotada

Valendo-se da justificativa apresentada anteriormente para a carga de incêndio do estudo de caso 1 (7.2.1) considerou-se adequada a utilização da mesma carga de incêndio, ou seja, aproximadamente trezentos megajoules por metro quadrado de área construída (300 MJ/m^2), assim como a disposição da carga no compartimento que será incendiado.

Para compor a carga de incêndio utilizou-se:

- no compartimento que será incendiado (inferior esquerdo): vigas de madeira de seção quadrada com quinze centímetros (15 cm) de lado, com comprimento variável de acordo com o ambiente em que foi colocado e com espaçamento de quinze centímetros (15 cm) entre elas a cinco centímetros (5 cm) do piso;
- nos demais compartimentos: vigas de madeira de seção quadrada com quarenta (40 cm) de lado e comprimento variável de acordo com o ambiente em que está locado, espaçamento de quarenta centímetros (40 cm) entre elas a um metro e sessenta centímetros (1,6 m) do piso (de modo a ficar posicionado na altura das janelas da sala e quarto (locais com maior probabilidade de atingir a temperatura de combustão espontânea da madeira).

A Figura 97, Figura 98 e Figura 99 apresentam a disposição da carga de incêndio

Figura 99 – Vista lateral do modelo para visualização do posicionamento da carga de incêndio

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 20 apresenta de forma mais detalhada a carga de incêndio que será incendiada, totalizando 15.019,61 MJ, ou 299,79 MJ/m². É importante lembrar que, na sala, foi preciso utilizar dois tamanhos distintos de vigas, de maneira a evitar um conflito na união das malhas do modelo, da mesma maneira que nos estudos de caso preliminares. Sendo assim, apresenta-se na tabela os valores de carga para cada tamanho de viga e a somatória total da carga de incêndio da sala.

Tabela 20 – Carga de incêndio do compartimento incendiado

Carga de Incêndio - Compartimento Incendiado				
Ambiente	l_{viga} [m]	n_{vigas}	V [dm³]	Carga [MJ]
Cozinha	3,8	9	769,50	5.090,89
Entrada	1,3	2	58,50	387,03
Quarto	2,8	12	756,00	5.001,58
Sala	2,4	6	324,00	2.143,53
	2,3	7	362,25	2.396,59
Sala - Somatória	-	13	686,25	4.540,12
Total	-	36	2.956,50	15.019,61

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Tabela 21 está apresentada de forma mais detalhada a carga de incêndio dos demais compartimento, totalizando 15.031,19 MJ, ou 300,02 MJ/m².

Tabela 21 – Carga de incêndio dos demais compartimentos

Carga de Incêndio - Demais Compartimentos				
Ambiente	l_{viga} [m]	n_{vigas}	V [dm³]	Carga [MJ]
Cozinha	3,8	1	608,00	4.022,43
Quarto	2,8	2	896,00	5.927,79
Sala	2,4	2	768,00	5.080,97
Total	-	5	2.272,00	15.031,19

Fonte: Elaborada pelo autor

8.1.6 Posicionamento e caracterização dos ignitores

Assim como nos estudos de caso preliminares, de maneira a garantir a inflamação generalizada do compartimento, e uma combustão homogênea em todo o material, criou-se uma superfície do tipo “Aquecedor”, com um fluxo de calor líquido de 100 kW/m² equivalente à criada no item 6.1.1.7.

Foi posicionada uma placa aquecedora em todo o piso do compartimento a ser incendiado, sendo representada pela cor vermelha na Figura 97.

A justificativa para a utilização deste tipo de ignitor é a mesma apresentada para os estudos de caso preliminares no item 7.1.1.6.

8.1.7 Definição da malha

Assim como nos estudos de caso preliminares, o tamanho das células e a disposição das malhas foram escolhidas de maneira a tentar balancear precisão e custo computacional, tendo sido utilizado malhas com três tamanhos de células:

- a) malha mais refinada, com células de dimensões: 0,05 m x 0,05 m x 0,05 m;
- b) malha de refinamento médio, com dimensões: 0,1 m x 0,1 m x 0,1 m;
- c) malha mais grosseira, cujas dimensões são: 0,4 m x 0,4 m x 0,4 m.

A malha mais refinada foi utilizada nas áreas que receberam carga de incêndio (quarto, cozinha, sala e parte da entrada) com oitenta centímetros (80 cm) de altura, partindo do piso. Totalizando 236.544 células.

A malha de refinamento médio foi utilizada nos demais ambientes (lavanderia, hall, banheiro e resto da entrada) com a mesma altura da malha mais refinada e em toda a área interna do compartimento entre oitenta centímetros (80 cm) do piso e um metro e sessenta centímetros (1,60 m). Totalizando 48.768 células.

Por fim, a malha mais grosseira foi utilizada na parte superior do compartimento, a partir de um metro e sessenta centímetros (1,60 m) do piso, nos demais compartimentos e nas áreas externas. Totalizando 25.048 células.

De maneira geral o modelo possui onze (11) malhas com 310.360 células.

8.1.8 Pontos de análise de temperatura

Para obter uma análise mais detalhada do incêndio, foram dispostos cinco pontos de análise de temperatura no compartimento incendiado e seis nos demais compartimentos, sendo dois em cada (Figura 100, Figura 101 e Figura 102). Todos os pontos de análise tem orientação $Z = -1$, sendo suas posições:

- a) compartimento incendiado: os pontos foram posicionados no centro de cada ambiente principal (banheiro, cozinha, lavanderia, quarto, sala) a um metro e quarenta centímetros (1,4 m) do piso (na metade do pé direito) (Figura 101);

- b) demais compartimentos: os pontos foram locados no centro das janelas das salas e cozinhas (Figura 100).

As posição cartesiana (X,Y) dos pontos de análise são:

- a) banheiro: $X = 5,80$ m e $Y = 6,30$ m;
- b) cozinha: $X = 1,60$ m e $Y = 6,60$ m;
- c) lavanderia: $X = 1,60$ m e $Y = 9,25$ m;
- d) quarto: $X = 5,00$ m e $Y = 8,40$ m;
- e) sala: $X = 4,90$ m e $Y = 4,40$ m;
- f) sala (inferior direito): $X = 13,00$ m, $Y = 10,40$ m e $Z = 2,00$ m;
- g) quarto (inferior direito): $X = 9,00$ m, $Y = 10,40$ m e $Z = 2,00$ m;
- h) sala (superior esquerdo): $X = 7,00$ m, $Y = 4,40$ m e $Z = 5,00$ m;
- i) quarto (superior esquerdo): $X = 7,00$ m, $Y = 8,40$ m e $Z = 5,00$ m;
- j) sala (superior direito): $X = 13,00$ m, $Y = 10,40$ m e $Z = 5,00$ m;
- k) quarto (superior direito): $X = 9,00$ m, $Y = 10,40$ m e $Z = 5,00$ m.

Figura 100 – Detalhamento do posicionamento dos aparelhos de medição de temperatura

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 101 - Disposição dos aparelhos de medição de temperatura nos compartimentos inferiores

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 102 - Disposição dos aparelhos de medição de temperatura nos compartimentos superiores

Fonte: Elaborada pelo autor

Por fim, também foram determinados oito planos de análise de temperatura, sendo três em cada plano direcional vertical e dois no plano direcional horizontal do modelo, como pode ser verificado na Figura 103.

As posições dos planos de análise são as seguintes:

- a) plano Y-Z com $X = 4,0$ m: no centro da porta da varanda;

- b) plano Y-Z com $X = 8,8$ m: a um metro e sessenta centímetros (1,6 m) da parede onde estão localizadas as janelas do compartimento incendiado;
- c) plano Y-Z com $X = 12,8$ m: a quatro metros e sessenta centímetros (4,6 m) da parede onde estão localizadas as janelas do compartimento incendiado;
- d) plano X-Z com $Y = 4,4$ m: no centro da janela da sala do compartimento incendiado;
- e) plano X-Z com $Y = 6,3$ m: no centro da janela do banheiro do compartimento incendiado;
- f) plano X-Z com $Y = 8,4$ m: no centro da janela do quarto do compartimento incendiado;
- g) plano X-Y com $Z = 2,0$ m: no centro das janelas da sala e do quarto dos compartimentos inferiores;
- h) plano X-Y com $Z = 4,6$ m: a um metro e sessenta centímetros (1,6 m) do piso dos compartimentos superiores.

Figura 103 - Disposição dos planos de medição de temperatura

Fonte: Elaborada pelo autor

8.2 Resultados

A Figura 104 apresenta de maneira ilustrativa a geração de fumaça e sua dissipação após o esgotamento da carga de incêndio.

Figura 104 – Evolução da fumaça gerada pelo incêndio nos instantes $t = 0$, 15, 900 e 1800 s

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 105 – Vista em planta da fumaça no andar superior nos instantes $t = 30$ e 300 s

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 105 é possível observar quão rápido o compartimento superior é invadido pela fumaça e pelos gases quentes do incêndio.

Figura 106 - Detalhe do incêndio modelado nos instantes $t = 0$, 60, 1650 e 3600 s

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 106 apresenta de maneira ilustrativa a queima da carga de incêndio até seu completo esgotamento.

É possível verificar, por meio da Figura 107, que a temperatura média do incêndio oscilou entre seiscentos (600°C) e mil e quinhentos graus (1.500°C), ou seja, pode-se considerar que a temperatura média no compartimento durante todo o do incêndio foi de aproximadamente mil e cinquenta graus (1.050°C), o que pode ser considerado um valor ligeiramente elevado, porém aceitável.

Figura 107 - Temperaturas no plano Y-Z com $X = 4,0$ m nos instantes $t = 0, 30, 60, 1250, 1500$ e 3600 s

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 108 é possível verificar o alcance de gases cuja temperatura é na ordem de mil e duzentos graus (1.200°C), sendo bem interessante para a análise do afastamento vertical mínimo entre aberturas de compartimentos distintos.

De maneira análoga a Figura 109 é interessante para se observar a distância de risco entre edificações e a distância vertical entre vãos de compartimentos distintos em fachada angulada.

Figura 108 – Detalhe da temperatura do plano Y-Z com $X = 4,0$ no instante $t = 720$ s

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 109 – Temperatura do plano Y-Z com $X = 8,8$ m nos instantes $t = 0, 170, 570$ e 810 s

Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 110 corrobora os dados da Figura 107 e a análise realizada.

Figura 110 - Temperaturas no plano X-Z com $Y = 4,4$ m nos instantes $t = 0, 60, 1200$ e 3600 s

Fonte: Elaborada pelo autor

O plano de temperaturas X-Y apresentado pela Figura 112 também apresenta uma variação entre seiscentos (600°C) e mil e quinhentos graus (1.500°C) no compartimento incendiado, além de ser possível verificar as distâncias que os gases quentes atingem, assim como na Figura 111.

Figura 111 – Detalhe da temperaturas no plano X-Y com $Z = 2,0$ m no instante $t = 820$ s

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 112 - Temperaturas no plano X-Y com $Z = 2,0$ m nos instantes $t = 0, 30, 60, 1200, 1500$ e 3600 s

Fonte: Elaborada pelo autor

Tanto a Figura 113 quanto a Figura 114 apresentam a variação de temperatura nos compartimentos superiores causado pela convecção de gases quentes, sendo possível verificar a temperatura máxima de cento e cinquenta graus (150°C) no compartimento logo a cima do apartamento incendiado.

Figura 113 - Temperaturas no plano X-Y com $Z = 4,6$ m nos instantes $t = 0, 60, 1200$ e 3600 s

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 114 - Detalhe da temperaturas no plano X-Y com $Z = 4,6$ m no instante $t = 830$ s

Fonte: Elaborada pelo autor

Para finalizar estão apresentadas as principais curvas obtidas pela simulação entre a Figura 115 e a Figura 126.

Figura 115 - Curva taxa de liberação de calor (HRR) do modelo

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 116 - Curva da energia de radiação (Q_RADI) do modelo

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 117 - Curva da energia de convecção (Q_CONV) do modelo

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 118 - Curva da energia de condução (Q_COND) do modelo

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 119 - Curva da energia total (Q_TOTAL) do modelo

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 120 - Curva da taxa de geração de gases no tempo (MLR_TOTAL) do modelo

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 121 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da cozinha

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 122 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise do quarto

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 123 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da sala

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 124 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da janela do quarto do compartimento superior esquerdo

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 125 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da janela do quarto do compartimento inferior direito

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

Figura 126 - Curva temperatura-tempo obtida pelo ponto de análise da janela do quarto do compartimento superior direito

Fonte: Resultado obtido pelo Smokeview

9 CONCLUSÕES

Antes de mais nada é preciso apontar duas características desta conclusão. A primeira é referente à parte do trabalho que tange a análise da normatização internacional referente à compartimentação, já a segunda refere-se às análises e conclusões obtidas na parte de simulação computacional.

- a) Uma vez que foram analisadas somente as legislações e normas de cinco países é complicado afirmar que foi possível ter uma visão internacional completa do assunto, dada a existência de mais de cento e noventa países. Por outro lado, a escolha dos países deste trabalho permite ter uma análise mais ampla da visão internacional referente à segurança contra incêndio, uma vez que, seria extremamente trabalhoso analisar a legislação de todos os países existentes;
- b) No que diz respeito às conclusões referentes às simulações computacionais deve-se lembrar que o autor não afirma em nenhum momento que as hipóteses adotadas nas simulações são as mais adequadas, ou mesmo, que todas as premissas estão corretas e seriam adequadas para análises com o intuito de serem aplicadas em edificações reais ou mesmo em normas.

Dito isso, foi possível verificar, em primeiro lugar, que a compartimentação vertical e horizontal são de extrema importância para a segurança à vida da população em geral, porém que a normatização internacional ainda é dispersa.

Por mais que inúmeros fatores sejam concordantes, esses são apenas os pontos mais simples e claros para serem adotados, como por exemplo, a obrigatoriedade dos selos corta fogo possuírem um TRRF igual ou superior ao elemento de compartimentação a qual ele está sendo aplicado. Esse tipo de conceito já foi adotado por todos os países, e claramente estão corretos.

Por outro lado, foi possível verificar uma enorme divergência nas normas quando se referem à separação de aberturas de compartimentos distintos. Essas distâncias estão entre os pontos mais importantes para a compartimentação, uma vez que em toda edificação existem inúmeras aberturas para o exterior, e todos são possíveis pontos de quebra de compartimentação.

No que diz respeito às simulações foi possível concluir inúmeros pontos:

- a) a utilização de madeira como carga de incêndio aparenta ser uma opção adequada e de fácil modelagem;
- b) as dimensões da carga de incêndio são de extrema importância para garantir que os resultados finais sejam adequados;
- c) a quantidade da carga de incêndio altera de maneira considerável a projeção das labaredas para o exterior, sendo um ponto de enorme importância para a compartimentação vertical;
- d) o refinamento da malha nas regiões da carga de incêndio é fundamental, porém não deve-se exagerar no detalhamento, uma vez que a diminuição do tamanho das células acarreta um aumento considerável no custo computacional;
- e) é de fundamental importância a utilização de malhas mais grosseiras, pois alivia o processamento sem sacrificar muito a qualidade dos resultados, se utilizada de maneira adequada;
- f) foi possível verificar as distâncias mínimas de afastamento horizontal e vertical de vãos, para este caso específico, para fachadas anguladas;
- g) foi possível verificar o afastamento mínimo entre edificações (mesmo que este não seja um parâmetro de compartimentação), para este caso específico;
- h) foi possível verificar a eficiência da utilização de abas horizontais para a compartimentação vertical.

O autor considera que os resultados obtidos nas simulações foram adequados e que é possível a realização de simulações computacionais, dada as devidas simplificações, em estudos mais pontuais, para serem utilizados em estruturas reais, e para estudos mais avançados, de forma a se desenvolver uma normatização com maior cunho científico.

O tempo necessário para rodar a simulação final⁸² desta dissertação foi de cento e quarenta e três horas (143 h), trinta e três minutos (33 min) e cinquenta e sete segundos (57 s), ou seja, aproximadamente seis dias.

De maneira geral, para a realização de estudos futuros, concluiu-se que:

⁸² Configurações do computador:

- Processador: Intel® Xeon® CPU E5-2630 v 4 @ 2,20 GHz 2,20 GHz (2 processadores)
- Memória Instalada (RAM): 64,0 GB
- Sistema Operacional: Windows 10 64 bits

- a) é possível a realização de modelos simplificados para a resolução de problemas pontuais;
- b) para a obtenção de dados com volume suficiente para a utilização em normas é necessária a utilização de um cluster com grande capacidade de processamento de dados, uma vez que, se faz necessária a simulação de inúmeros casos específicos de forma a se encontrar um resultado médio que possa se adequar à grande maioria dos casos reais.

Para estudos futuros, sugere-se uma análise mais aprofundada do formato ideal da carga de incêndio generalizada, bem como a influência do seu posicionamento na geração de labaredas para o exterior da edificação. Outro ponto sugerido é o estudo do tamanho de malha ideal para de minimizar o custo computacional sem sacrificar os resultados finais da simulação.

Ressalta-se que o conhecimento adquirido neste trabalho pode auxiliar no desenvolvimento de novos trabalhos científico na área de segurança contra incêndio no Brasil, podendo ser utilizado como ponto de partida para estudos futuros.

REFERÊNCIAS

ABIDE BUILDING COMPONENT SYSTEMS. **Building Types Reference**. Disponível em: <<http://abidebuilding.com/building-types-reference/>>. Acesso em: 08 ago. 2014.

AIR BALANCE. Disponível em: <<http://airbalance.com/product-catalog/dampers/fire-and-smoke/fire-and-smoke-dampers/img/hi-res/ast12-fire-smoke-transition.jpg>>.

Acesso em: 03 ago. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM E119-00a**: Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. West Conshohocken, 2000. 23 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5628**: Componentes construtivos estruturais - Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 2001a. 13 p.

_____. **NBR 6479**: Portas e vedadores - Determinação da resistência ao fogo - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992. 8 p.

_____. **NBR 10636**: Paredes divisórias sem função estrutural - Determinação da resistência ao fogo - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1989. 7 p.

_____. **NBR 10897**: Sistemas de proteção contra incêndio por chuveiros automáticos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014. 142 p.

_____. **NBR 11711**: Portas e vedadores corta-fogo com núcleo de madeira para isolamento de riscos em ambientes comerciais e industriais. Rio de Janeiro, 2003a. 37 p.

_____. **NBR 11742**: Porta corta-fogo para saída de emergência. Rio de Janeiro, 2003b. 19 p.

_____. **NBR 13860**: Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro, 1997. 10 p.

_____. **NBR 14323**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013. 75 p.

_____. **NBR 14432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações. Rio de Janeiro, 2001b. 15 p.

_____. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012. 54 p.

BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z. O “Estéreo”. In: METRVM, n. 2, p. 1-18, 2002, Piracicaba. **Publicação on-line...** Piracicaba: ESALQ, 2002. Disponível em: <<http://img.esalq.usp.br/METRVM/>>. Acesso em: 07 out. 2017.

BERSELLI, L. C.; ILIESCU, T.; LAYTON, W. J. **Mathematics of Large Eddy Simulation of Turbulent Flows**. 1th Edition. Germany: Springer, 2006.

BLOGSCI. Disponível em: <<https://blogsci.com.br/compartimentacao-com-cortinas/>>. Acesso em: 23 mai. 2017.

BRAGA, G. C. B. A temperatura e fluxo de calor em uma situação de incêndio e seu impacto nos bombeiros. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE BOMBEIROS, 11., 2010, Blumenau. **SENABOM**. Blumenau: SENABOM, 2010.

BUILDINGS DEPARTMENT (Hong Kong). **Code of Practice for Fire Safety in Buildings 2011**. Hong Kong, 2012.

BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT (BRE). **BR 187, BRE 1991**. External fire spread: building separation and boundary distances. Borehamwood: R. E. H. Read, 1991.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). **BS 476**: Fire Tests. London: British Standards Institution.

CARVALHO, J. E. C. **Aplicação de fluidodinâmica computacional para análise de segurança de túneis rodoviários sob incêndio**. 2013, 65p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

CENTENO, F. R.; CASSOL, F.; RODRIGUES, E. E. C. Validação do Software Fire Dynamics Simulator para um ambiente habitacional em situação de incêndio. In: CLARK DOOR. Disponível em: <<http://www.clarkdoor.com/system/files/Panic%20Escape%20door.jpg>>. Acesso em: 03 ago. 2016.

CONGRESSO IBERO-LATINO-AMERICANO SOBRE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO, 3., 2015, Porto Alegre. **CILASCI**. Porto Alegre: CILASCI, 2015.

CONTACT ROLLER SHUTTERS. Disponível em: <<http://contactrollershutters.co.uk/wp-content/uploads/2012/01/Fire-Shutter-Norwich-2.jpg>>. Acesso em: 03 ago. 2016.

CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO (CBPMESP). **Instrução Técnica N° 2 / 2011**: Conceitos básicos de segurança contra incêndio. São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2011.

_____. **Instrução Técnica N° 3 / 2015**: Terminologia de segurança contra incêndio. São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2015a.

_____. **Instrução Técnica N° 7 / 2015**: Separação entre edificações (isolamento de risco). São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2015b.

_____. **Instrução Técnica N° 8 / 2015**: Segurança estrutural nas edificações - Resistência ao fogo dos elementos de construção. São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2015c.

_____. **Instrução Técnica N° 9 / 2015**: Compartimentação horizontal e compartimentação vertical. São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2015d.

_____. **Instrução Técnica N° 14 / 2015**: Carga de incêndio nas edificações e áreas de risco. São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2015e.

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. 2008. 724 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

COSTA, C. N.; ONO, R.; SILVA, V. P. A importância da compartimentação e suas implicações no dimensionamento das estruturas de concreto em situação de incêndio.

In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 49., 2005, Olinda. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2005. v. III. p. III1-III26.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NUTAU 2006: Inovações Tecnológicas e Sustentabilidade. 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo: FUPAM/NUTAU/FAUUSP, 2006.

CUNHA, L. J. B. F. **O desempenho da compartimentação horizontal seletiva na promoção da segurança contra incêndio em edificações:** Simulação computacional como instrumento de avaliação em edificações universitárias. 2016, 238p. Tese (Doutor em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2016.

DEL CARLO, U. Fachadas. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTALAÇÕES PREDIAIS, 5., 1988, São Paulo. **Arquitetura e proteção contra incêndios...** São Paulo: PCC – Eventos, 1988. p. 241-248.

DESIGN COLLABORATIVE. Disponível em:<<http://www.designcollaborative.com/designcollaborative/assets/Image/Blog/Fire-Sprinkler.jpg>>. Acesso em: 03 ago. 2016.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **EN 1991-2:** Eurocode 1: actions on structures - part 1.2: general actions – actions on structures exposed to fire. Brussels: CEN, 2002. 59 p.

EYMARD, R.; GALLOUËT, T.; HERBIN, R. Finite Volume Methods. In: CIARLET, P. G.; LIONS, J. L. **Handbook of Numerical Analysis**, Amsterdam, v. 7, p. 713-1018, 2000.

FERREIRA, R. L. **Simulação de grandes escalas de escoamentos turbulentos usando modelagem dinâmica.** 2006, 164p.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos.** 2ª Edição. São Paulo: Edusp, 2012.

FRÖHLICH, J., RODI, W. Introduction to Large Eddy Simulation of Turbulent Flows. In: LAUNDER, B. E.; DANDHAM, N. D. (Ed.). **Closure Strategies for Turbulent and Transitional Flows**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. p. 25-40.

GILL, A. A.; NEGRISOLO, W.; OLIVEIRA, S. A. Aprendendo com os grandes incêndios. In: SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B.; DEL CARLO, U.; SILVA, V. P. (Ed.). **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. cap. 3, p. 19-33.

HALL JUNIOR, J. R. **The total cost of fire in the United States**. National Fire Protection Association (NFPA). Quincy: NFPA, 2014.

HAYNES, H. J. G. **Fire Loss in the United States During 2014**. National Fire Protection Association (NFPA). Quincy: NFPA, 2015.

HER MAJESTY'S GOVERNMENT. **The Building Regulations 2010 - Fire Safety**. HMSO: London, 2006.

HOSTIKKA, S.; MCGRATTAN, K. B.; HAMINS, A. Numerical Modeling of Pool Fires Using LES and Finite Volume Method for Radiation. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIRE SAFETY SCIENCE, 7., 2002, Massachusetts. **Proceedings...** Worcester: International Association for Fire Safety Science (IAFSS), 2003. p. 383-394.

INTERNATIONAL CODE COUNCIL (ICC). **2012 International Building Code**. 1th Edition. U.S.A.: ICC, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 834-1: Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements**. Geneva, 1999.

LANDI, F. R. A arquitetura e o incêndio. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTALAÇÕES PREDIAIS, 5., 1988, São Paulo. **Arquitetura e proteção contra incêndios...** São Paulo: PCC – Eventos, 1988. p. 313-332.

LOPES, J. A. C. S. **Simulação das Grandes Escalas da Turbulência em Geometrias Complexas**. 2000. 195p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2000.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacionais: Fundamentos e coordenadas generalizadas**. Rio de Janeiro: LTC, 1995.

MARCATTI, J.; COELHO FILHO, H. S.; BERQUÓ FILHO, H. S. Compartimentação e afastamento entre edificações. In: SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B.; DEL CARLO, U.; SILVA, V. P. (Ed.). **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. cap. 3, p. 169-179.

MCGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S.; MCDERMOTT, R.; FLOYD, J.; WEINSCHENK, C.; OVERHOLT, K. **Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide: Volume 1: Mathematical Model**. 6th ed. Maryland: NIST, 2015a.

MCGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S.; MCDERMOTT, R.; FLOYD, J.; WEINSCHENK, C.; OVERHOLT, K. **Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide: Volume 2: Verification**. 6th ed. Maryland: NIST, 2015b.

MCGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S.; MCDERMOTT, R.; FLOYD, J.; WEINSCHENK, C.; OVERHOLT, K. **Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide: Volume 3: Validation**. 6th ed. Maryland: NIST, 2015c.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA). **NFPA 80A: Recommended Practice for Protection of Buildings from Exterior Fire Exposures**. Quincy: NFPA, 1996.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA). **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**. 3th. Quincy: NFPA, 2002.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica 2**. São Paulo: Blücher, 2002.

OLD DOMINION FIRESTOPPING. Disponível em: <http://olddominionfirestopping.com/wp/wp-content/uploads/2015/06/DSC_0025.jpg>. Acesso em: 03 ago. 2016.

OLIVEIRA, K. P. M. **Estudo comparativo de malhas e esquemas de discretização para as equações de Navier-Stokes em escoamentos incompressíveis**. 2009. 237

p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

ONO, R. **Segurança contra incêndio em edificações – Um sistema de coleta e análise de dados para avaliação de desempenho**. 1997. 160 p. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

PAGNI, P. J. Thermal Glass Breakage. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIRE SAFETY SCIENCE, 7., 2002, Massachusetts. **Proceedings...** Worcester: International Association for Fire Safety Science (IAFSS), 2003. p. 3-24.

PETTERSSON, O.; MAGNUSSON, S., THOR, J. **Fire engineering design of steel structures**. Stockholm: Swedish Institute of Steel Construction, 1976.

POPE, N. D.; BAILEY, C. G. Quantitative comparison of FDS and parametric fire curves with post-flashover compartment fire test data. **Fire Safety Journal**, Netherlands, v. 41, p. 99-110, 2006.

PORTUGAL (País). Decreto-Lei nº 220/2008, de 12 de novembro. Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndio em Edifícios. **Diário da República**, Ministérios da administração interna e das obras públicas, transportes e comunicações, Lisboa, p. 67, 2008a.

PORTUGAL (País). Portaria nº 1532/2008, de 29 de dezembro: Regulamento Técnico de segurança Contra Incêndio (RT-SCIE). **Diário da República**, Ministérios da administração interna e das obras públicas, transportes e comunicações, Lisboa, p. 244, 2008b.

REHM, R. G.; PITTS, W. M.; BAUM, H. R.; EVANS, D. D.; PRASAD, K.; MCGRATTAN, K. B.; FORNEY, G. P. Initial Model for Fires in the World Trade Center Towers. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIRE SAFETY SCIENCE, 7., 2002, Massachusetts. **Proceedings...** Worcester: International Association for Fire Safety Science (IAFSS), 2002, cap. 8, p. 267-298.

REVISTA EMERGÊNCIA. **Cortinas corta-fogo têm ampla aplicação na proteção contra incêndio**. 2013. Disponível em: <<http://www.revistaemergencia.com.br/noticias/>

[leia na edicao do mes/cortinas corta-fogo tem ampla aplicacao na p r o t e c a o contra incendio/AJyJ9jj/5536>.](#) Acesso em: 03 jun. 2017.

RINNE, T.; HIETANIEMI, J.; HOSTIKKA, S. **Experimental Validation of the FDS Simulations of Smoke and Toxic Gas Concentrations**. Finland: VTT, 2007.

ROSSO, T. **Incêndios e arquitetura**. São Paulo: FAUUSP, 1975.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 46.076 de 31 de agosto de 2011: Institui o Regulamento de Segurança contra Incêndio das edificações e áreas de risco para os fins da Lei nº 684, de 30 de setembro de 1975 e estabelece outras providências. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, Poder Executivo, São Paulo, p. 41, 31 ago. 2011.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 56.819 de 10 de março de 2011: Institui o Regulamento de Segurança contra incêndio das edificações e área de risco no Estado de São Paulo e estabelece outras providências. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, Poder Executivo, São Paulo, p. 43, 10 mar. 2011.

SANTOS, E. R. Tipologia dos edifícios. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTALAÇÕES PREDIAIS, 5., 1988, São Paulo. **Arquitetura e proteção contra incêndios...** São Paulo: PCC – Eventos, 1988. p. 287-300.

SEITO, A. I. Materiais de revestimento. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTALAÇÕES PREDIAIS, 5., 1988, São Paulo. **Arquitetura e proteção contra incêndios...** São Paulo: PCC – Eventos, 1988. p. 303-312.

SEITO, A. I. Fundamentos de fogo e incêndio. In: SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B.; DEL CARLO, U.; SILVA, V. P. (Ed.). **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. cap. 3, p. 35-54.

SERWAY, R. A.; JEWETT JUNIOR, J. W. **Princípios de Física: Movimentos Ondulatórios e Termodinâmica**. São Paulo: Thomson, 2004.

SILVA, V. P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. 1997, 170p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo. São Paulo: 1997.

SILVA, V. P. Estruturas de aço em situação de incêndio. Determinação da temperatura nos elementos estruturais de aço com proteção térmica. Uma proposta de revisão da NBR 14323:1999. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL, 30., 2002, Brasília. **Proceedings...** Brasília: UnB, 2002.

SILVA, V. P. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. São Paulo: Zigurate, 2004.

SILVA, V. P. On the determination of the temperature of unprotected steel members under fire situations. In: IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 26., 2005, Espírito Santo. **CILAMCE**. Espírito Santo: CMNE/CILAMCE, 2005.

SILVA, V. P. Determination of the temperature of thermally unprotected steel members under fire situations. Considerations on the section factor. **Latin American Journal of Solids and Structures**, São Paulo, v. 3, p. 113-125, 2006.

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. São Paulo: Blücher, 2012.

SILVA, V. P. **Segurança contra incêndio em edifícios**. São Paulo: Blücher, 2014.

SOUZA, U. E. L. Materiais de revestimento. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTALAÇÕES PREDIAIS, 5., 1988, São Paulo. **Arquitetura e proteção contra incêndios...** São Paulo: PCC – Eventos, 1988. p. 1-15.

SUÉCIA (País). Svensk Bygg Norm (SBN) 1967. **BABS 1967**, Byggnadsstyrelsen och Planverket, Stockholm, p. 528, 1968.

THORNBURG, D. W. **2009 IBC HANDBOOK – Fire- and Life-Safety Provisions**. U.S.A.: The American Institute of Architects (AIA), 2009.

TOSI, A. **Tecnologie antincendi nelle costruzione**: Materiali da costruzione, strutture, edifici e loro comportamento al fuoco. Milano: Antonio Vallardi, 1950.

VENKATAKRISHNAN, V. A perspective on unstructured grid flow solvers. **AIAA Journal**, Reston, v. 34, n. 3, p. 533-547, 1996.

WANG, H. Y.; JOULAIN, P. Numerical Simulation of Wind-Aided Turbulent Fires in a Ventilated Model Tunnel. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIRE SAFETY SCIENCE, 7., 2002, Massachusetts. **Proceedings...** Worcester: International Association for Fire Safety Science (IAFSS), 2003. p. 161-172.

THUNDERHEAD ENGINEERING CONSULTANTS. **Modeling Fire, Part 3 – Combustion using HRR**. 2014a. Disponível em: <<https://www.thunderheadeng.com/2014/02/pyrosim-modeling-fire-part-3-combustion-hrr/>>. Acesso em: 05 mai. 2017.

THUNDERHEAD ENGINEERING CONSULTANTS. **Modeling Fire, Part 4 – Combustion with HRR, Ignition, and Burn Away**. 2014b. Disponível em: <<https://www.thunderheadeng.com/2014/03/pyrosim-modeling-fire-part-4-combustion-hrr-ignition-burn/>>. Acesso em: 12 mai. 2017.

THUNDERHEAD ENGINEERING CONSULTANTS. **Modeling Fire, Part 4 Addendum – Re-Analysis using HRRPUA Curve**. 2014c. Disponível em: <<https://www.thunderheadeng.com/2014/03/pyrosim-modeling-fire-part-4-addendum-re-analysis-hrrpua-curve/>>. Acesso em: 12 mai. 2017.

REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES

ALARIFI, A. A.; DAVE J.; PHYLAKTUO H. N.; ALJUMAIAH O. A.; ANDREWS, G. E. Effects of fire-fighting on a fully developed compartment fire: Temperatures and emissions. **Fire Safety Journal**, Netherlands, v. 68, p. 71-80, 2014.

ASSAN, A. E. **Método dos elementos Finitos**. 1ª Edição. Campinas: Editora Unicamp, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6479**: Portas e vedadores - Determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 17240**: Sistemas de detecção e alarme de incêndio – Projeto, instalação, comissionamento e manutenção de sistemas de detecção e alarme de incêndio – Requisitos. Rio de Janeiro, 2010.

BERLIN, G. N. A System for Describing the Expected Hazards of Building Fires. **Fire Safety Journal**, Netherlands, v. 2, p. 181-189, 1979/80.

BISHOP, S. R.; HOLBORN P. G. Nonlinear Dynamics of Flashover in Compartment Fires. **Fire Safety Journal**, Netherlands, v. 21, p. 11-45, 1993.

CARLOS, T.; MARIANI, L.; MORAES, H. Avaliação do Desempenho de Sistemas de Controle de Fumaça por Modelagem Numérica. In: CONGRESSO IBERO-LATINO-AMERICANO SOBRE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO. 3., 2015, Porto Alegre. **CILASCI**. Porto Alegre: CILASCI, 2015.

CHENG, H.; HADJISOPHOCLEOUS G. V. Experimental study and modeling of radiation from compartment fires to adjacent buildings. **Fire Safety Journal**, Netherlands, v. 53, p. 43-62, 2012.

COWLARD, A.; BITTERN, A.; ABECASSIS-EMPIS, C.; TORERO, J. Fire safety design for tall buildings. **Procedia Engineering**, Netherlands, v. 60, p. 169-181, 2013.

CUNHA, L. J. B. F.; PINTO, E. M. Estudo do desempenho da compartimentação horizontal seletiva em ambientes universitários, por meio da simulação computacional.

In: CONGRESSO IBERO-LATINO-AMERICANO SOBRE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO. 3., 2015, Porto Alegre. **CILASCI**. Porto Alegre: CILASCI, 2015.

DOLVITSCH, J. N.; KLEIN, D. L. Segurança Contra Incêndios: Simulação Computacional. In: CONGRESSO IBERO-LATINO-AMERICANO SOBRE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO. 3., 2015, Porto Alegre. **CILASCI**. Porto Alegre: CILASCI, 2015.

GOO, J. Development of the size distribution of smoke particles in a compartment fire. **Fire Safety Journal**, Netherlands, v. 47, p. 46-53, 2012.

HAMINS, A.; JOHNSON, E.; DONNELLY, M.; MARANGHIDES, A. Energy balance in a large compartment fire. **Fire Safety Journal**, Netherlands, v. 43, p. 180-188, 2008.

HU, L. H.; LU, K. H.; TANG, F.; DELICHATSIOS, M.; HE, L. H. A global non-dimensional factor characterizing side wall constraint effect on facade flame entrainment and flame height from opening of compartment fires. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Netherlands, v. 75, p. 122-129, 2014.

HUANG, Z.-F.; TAN, K.-H. Fire resistance of compartments within a high-rise steel frame: New sub-frame and isolated member models. **Journal of Constructional Steel Research**, Netherlands, v. 62, p. 974-986, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 1182**: Reaction to fire tests for products - Non-combustibility test. Geneva, 2010a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 1716**: Reaction to fire tests for products - Determination of the gross heat of combustion (calorific value). Geneva, 2010b.

KOBES, M.; HELSLOOT, I.; VRIES, B.; POST, J. G. Building safety and human behavior in fire: A literature review. **Fire Safety Journal**, Netherlands, v. 45, p. 1-11, 2010.

LENNON, T.; MOORE D. The natural fire safety concept—full-scale tests at Cardington. **Fire Safety Journal**, Netherlands, v. 38, p. 623-643, 2003.

LU, K.; HU, L.; DELICHATSIOS, M.; TANG, F.; QIU, Z.; HE, L. Merging behavior of facade flames ejected from two windows of an under-ventilated compartment fire. **Proceedings of the Combustion Institute**, Netherlands, v. 35, p. 2615-2622, 2015.

MAZZONI, F.; KLEIN, D. L. Análise da Propagação de Incêndio em Prédios Altos através da Simulação Computacional. In: CONGRESSO IBERO-LATINO-AMERICANO SOBRE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO. 3., 2015, Porto Alegre. **CILASCI**. Porto Alegre: CILASCI, 2015.

MILKE, J. A. What is a Fire Safety Effectiveness Statement?. **Fire Safety Journal**, Netherlands, v. 2, p. 119-123, 1979/80.

NAKAYA, I.; AKITA K. A Simulation Model for Compartment Fires. **Fire Safety Journal**, Netherlands, v. 5, p. 157-165, 1983.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA). **Fire Protection Handbook**. 20th Edition. Quincy: NFPA, 2008.

PENG, L.; NI, Z.; HUANG, X. Review on the fire safety of exterior wall claddings in high-rise buildings in China. **Procedia Engineering**, Netherlands, v. 62, p. 663-670, 2013.

PRETREL, H.; LESAux, W.; AUDOUIN, L. Determination of the heat release rate of large scale hydrocarbon pool fires in ventilated compartments. **Fire Safety Journal**, Netherlands, v. 62, p. 192-205, 2013.

SUARD, S.; FORESTIER M.; VAUX S. Toward predictive simulations of pool fires in mechanically ventilated compartments. **Fire Safety Journal**, Netherlands, v. 61, p. 54-64, 2013.

THOMAS, P. H. Modelling of Compartment Fires. **Fire Safety Journal**, Netherlands, v. 5, p. 181-190, 1983.

YUAN, M.; CHEN, B.; LI, C.; ZHANG, J.; LU, S. Analysis of the combustion efficiencies and heat release rates of pool fires in ceiling vented compartments. **Procedia Engineering**, Netherlands, v. 62, p. 275-282, 2013.

ZEHFUSSA, J.; HOSSER, D. A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings. **Fire Safety Journal**, Netherlands, v. 42, p. 115-126, 2007.

ZHANG, J.; LU, S.; LI, C.; YUAN, M.; YUEN, R. On the self-extinction time of pool fire in closed compartments. **Procedia Engineering**, Netherlands, v. 62, p. 266-274, 2013.

ZHAO, C. M.; LO, S. M.; LU, J. A.; FANG, Z. A simulation approach for ranking of fire safety attributes of existing building s. **Fire Safety Journal**, Netherlands, v. 39, p. 557-579, 2004.

APÊNDICE A - DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO PARA PROPAGAÇÃO DO INCÊNDIO

Conforme comentado anteriormente a compartimentação é uma forma de se reduzir a extensão total de um incêndio, sendo que para se compartimentar um ambiente é necessária a utilização de diversos dispositivos, tais como, portas corta fogo, vedadores corta fogo, dentre outros.

Esse apêndice tem por objetivo definir e caracterizar de maneira simplificada cada um desses elementos que são fundamentais para a proteção de uma edificação, de forma a familiarizar o leitor com cada um desses dispositivos.

A.1 Porta Corta Fogo (PCF)

As PCF são portas compostas por diversas camadas de materiais distintos (Figura 127) cujo objetivo principal é possuir uma camada exterior incombustível e garantir as características de estanqueidade, isolamento e estabilidade para um determinado tempo de incêndio.

Figura 127 - Exemplo de uma porta corta fogo

Fonte: CLARK DOOR

No Brasil as características das PCF são determinadas pelas normas ABNT NBR 11742:2003 e ABNT NBR 11711:2003, sendo que na primeira definem-se as camadas de constituição das PCF, sendo elas:

- a) seu revestimento deve ser de material incombustível, classificados de acordo com as especificações presentes na ISO 1182;
- b) seu miolo pode ser composto por material homogêneo, apresentando massa volumétrica e composição uniformes, ou não homogêneo. Os materiais que compõe o miolo de uma PCF devem atender às normas ISO 1182 e ISO 1716;
- c) no caso de materiais não homogêneos eles devem ser compostos por componentes substanciais ou não substanciais;
- d) componentes substanciais são caracterizados por: constituírem uma parte significativa do material não homogêneo; comporem uma camada de gramatura maior ou igual a 0,1 g/cm²; possuir espessura mínima de 1 mm;
- e) componentes não substanciais são componentes que não atendem a todos os requisitos dos materiais substanciais.

A.2 Cortina Corta Fogo

As cortinas corta fogo (Figura 128) são dispositivos compostos de material têxtil cuja função principal é proteger aberturas, tanto em planos verticais, quanto horizontais, com o intuito de retardar a propagação de um incêndio entre dois ambientes ou compartimentos. As cortinas corta fogo podem ser destinadas à locais de passagem de pessoas ou maquinários, sendo fechados no início de um incêndio automaticamente e reabertos somente após sua extinção (BLOGSCI).

Figura 128 - Exemplo de um vedador corta fogo

Fonte: REVISTA EMERGÊNCIA. 2013

A.3 Vedador Corta Fogo

Um vedador corta fogo (*Fire Shutter*) (Figura 129) é um dispositivo móvel ou fixo cuja função principal é proteger aberturas em planos verticais ou horizontais com o intuito de retardar a propagação de um incêndio entre dois ambientes ou compartimentos. Diferentemente das PCF, os vedadores corta fogo não são destinados à passagem de pessoas, sendo fechados no início de um incêndio e reabertos após sua extinção (ABNT NBR 11711:2003).

Figura 129 - Exemplo de um vedador corta fogo

Fonte: CONTACT ROLLER SHUTTERS

Atualmente no Brasil, somente a norma ABNT NBR 11711:2003 aborda o tema vedadores corta fogo. Porém essa norma não é uma norma geral, sendo específica para vedadores corta fogo com núcleo de madeira utilizados em ambientes comerciais e industriais apenas. A Instrução Técnica N° 09 (2015) do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo também aborda o tema de forma superficial, sempre se referindo à norma ABNT NBR 11711:2003 ou à sua utilização conjunta com detectores de fumaça em edificações com classe de ocupação não abrangidos pela norma da ABNT.

Os vedadores corta fogo podem ser compostos por uma ou duas peças de vedação em uma mesma face da parede, sendo denominados vedadores corta fogo de uma ou duas folhas. Além disso, o vedador corta fogo pode ser instalado em uma única face de uma parede ou nas duas faces, denominando-se então vedadores simples ou duplos.

A.4 Registro Corta Fogo

Os registros corta fogo (Figura 130), ou *fire dampers*, são dispositivos cujo objetivo principal é evitar a passagem de fumaça e gases quentes provenientes de um incêndio pelos dutos de ventilação, exaustão ou de ar-condicionado, auxiliando assim a retardar a propagação de um incêndio para fora do compartimento.

Figura 130 - Exemplo de um registro corta fogo

Fonte: AIR BALANCE

Por padrão os registros corta fogo possuem acionamento automático, por meio de fusíveis térmicos ou detectores de fumaça. Uma vez que, inexiste normatização brasileira para registros corta fogo, a Instrução Técnica N° 09 (2015) do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo determina que esses dispositivos sejam ensaiados para caracterização de resistência ao fogo segundo os procedimentos da ABNT NBR 6479:1992, bem como seguir a normatização de detectores de fumaça (ABNT NBR 17240:2010), caso presente.

A.5 Selo Corta Fogo

O selo corta fogo ou *firestop* (Figura 131), é um sistema de proteção contra o incêndio composto por diversos materiais cuja função principal é vedar qualquer tipo de abertura existente em paredes de compartimentação, como, por exemplo, aberturas para passagem de tubulações ou cabos.

Figura 131 - Exemplo de selo corta fogo

Fonte: Site OLD DOMINION FIRESTOPPING

O selo corta fogo pode ser composto por materiais intumescentes, produtos cimentícios, materiais siliconados, compostos minerais, compostos de borracha,

dentre outros, sendo que sua principal caracterização é quanto ao tempo de incêndio para qual o material mantém sua estanqueidade e isolamento térmico.

Atualmente no Brasil não existe uma norma específica para a caracterização dos selos corta fogo. Porém a Instrução Técnica N° 09 (2015) do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo determina que os selos corta fogo devem ser ensaiados para caracterização de resistência ao fogo segundo os procedimentos da ABNT NBR 6479:1992.

A.6 Chuveiro Automático

Chuveiros automáticos ou *sprinklers* (Figura 132), são regulados no Brasil, por meio da ABNT NBR 10897:2014, sendo definidos como: dispositivos automáticos cujo objetivo principal é extinguir ou controlar a propagação de um incêndio.

Figura 132 - Exemplo de chuveiro automático

Fonte: DESIGN COLLABORATIVE

O acionamento de um chuveiro automático é feito por intermédio de um fusível térmico, que ao ser acionado permite a descarga de água sobre uma determinada área. A temperatura de acionamento dos chuveiros, assim como a área afetada pela descarga de água, são variáveis de acordo com o modelo, sendo exigidos de forma específica pela norma.

APÊNDICE B – TRRF BRASIL

Tabela 22 - TRRF para habitações

Habitações				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 6 m	30	60	90
	≤ 12 m	30	60	90
	≤ 23 m	60	60	90
	≤ 30 m	90	90	90
	≤ 80 m	120	120	120
	> 80 m	CT	CT	CT
CT = Utiliza Comissão Técnica junto ao Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo				

Fonte: Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2015d (adaptada)

Tabela 23 - TRRF para estacionamentos

Estacionamentos					
TRRF		Profundidade do subsolo			
		0* m	0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 6 m	30	30	60 (30)	90
	≤ 12 m	30	60 (30)	60 (30)	90
	≤ 23 m	30	60	60	90
	≤ 30 m	30	90	90	90
	≤ 80 m	60	120	120	120
	> 80 m	120	CT	CT	CT
CT = Utiliza Comissão Técnica junto ao Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo					
* Caso seja aberto lateralmente					

Fonte: Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2015d (adaptada)

Tabela 24 - TRRF para edifícios administrativos ou de serviço

Administrativos ou Serviços				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 6 m	30	60	90
	≤ 12 m	60 (30)	60	90
	≤ 23 m	60	60	90
	≤ 30 m	90	90	90
	≤ 80 m	120	120	120
	> 80 m	CT	CT	CT
CT = Utiliza Comissão Técnica junto ao Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo				

Fonte: Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2015d (adaptada)

Tabela 25 - TRRF para instituições de ensino

Instituições de Ensino				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 6 m	30	60	90
	≤ 12 m	30	60	90
	≤ 23 m	60	60	90
	≤ 30 m	90	90	90
	≤ 80 m	120	120	120
	> 80 m	CT	CT	CT
CT = Utiliza Comissão Técnica junto ao Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo				

Fonte: Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2015d (adaptada)

Tabela 26 - TRRF para hospitais ou casas de repouso

Hospitais ou Casas de Repouso				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 6 m	30	60	90
	≤ 12 m	60	60	90
	≤ 23 m	60	60	90
	≤ 30 m	90	90	90
	≤ 80 m	120	120	120
	> 80 m	CT	CT	CT
CT = Utiliza Comissão Técnica junto ao Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo				

Fonte: Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2015d (adaptada)

Tabela 27 - TRRF para locais de reunião de público

Locais de Reunião de Público				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 6 m	60 (30)	60	90
	≤ 12 m	60	60	90
	≤ 23 m	60	60	90
	≤ 30 m	90	90	90
	≤ 80 m	120	120	120
	> 80 m	CT	CT	CT
CT = Utiliza Comissão Técnica junto ao Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo				

Fonte: Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2015d (adaptada)

Tabela 28 - TRRF para edifício de hospedagem

Serviços de Hospedagem				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 6 m	30	60	90
	≤ 12 m	60 (30)	60	90
	≤ 23 m	60	60	90
	≤ 30 m	90	90	90
	≤ 80 m	120	120	120
	> 80 m	CT	CT	CT
CT = Utiliza Comissão Técnica junto ao Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo				

Fonte: Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2015d (adaptada)

Tabela 29 - TRRF para edifícios comerciais

Comerciais				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 6 m	60 (30*)	60	90
	≤ 12 m	60	60	90
	≤ 23 m	60	60	90
	≤ 30 m	90	90	90
	≤ 80 m	120	120	120
	> 80 m	CT	CT	CT
CT = Utiliza Comissão Técnica junto ao Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo				
* Caso possua baixa carga de incêndio				

Fonte: Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2015d (adaptada)

Tabela 30 - TRRF para museus ou galerias de arte

Museus ou Galerias de Arte				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 6 m	60 (30)	60	90
	≤ 12 m	60	60	90
	≤ 23 m	60	60	90
	≤ 30 m	90	90	90
	≤ 80 m	120	120	120
	> 80 m	CT	CT	CT
CT = Utiliza Comissão Técnica junto ao Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo				

Fonte: Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2015d (adaptada)

Tabela 31 - TRRF para bibliotecas ou arquivos

Bibliotecas ou Arquivos				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 6 m	60 (30)	60	90
	≤ 12 m	60	60	90
	≤ 23 m	60	60	90
	≤ 30 m	90	90	90
	≤ 80 m	120	120	120
	> 80 m	CT	CT	CT
CT = Utiliza Comissão Técnica junto ao Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo				

Fonte: Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2015d (adaptada)

Tabela 32 - TRRF para indústrias

Indústrias										
TRRF		Carga de incêndio $\leq 300 \text{ MJ/m}^2$			Carga de incêndio $\leq 1.200 \text{ MJ/m}^2$			Carga de incêndio $> 1.200 \text{ MJ/m}^2$		
		Profundidade do subsolo			Profundidade do subsolo			Profundidade do subsolo		
		0 m	$\leq 10 \text{ m}$	$> 10 \text{ m}$	0 m	$\leq 10 \text{ m}$	$> 10 \text{ m}$	0 m	$\leq 10 \text{ m}$	$> 10 \text{ m}$
Altura	$\leq 6 \text{ m}$	30	60 (30)	90 (60)	30	90	120	60 (30)	90	120
	$\leq 12 \text{ m}$	30	60 (30)	90 (60)	30	90	120	60 (30)	90	120
	$\leq 23 \text{ m}$	30	60 (30)	90 (60)	60 (30)	90	120	90 (60)	90	120
	$\leq 30 \text{ m}$	60	60	90 (60)	90	90	120	120 (90)	120 (90)	120
	$\leq 80 \text{ m}$	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	$> 80 \text{ m}$	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT

CT = Utiliza Comissão Técnica junto ao Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo

Fonte: Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2015d (adaptada)

Tabela 33 - TRRF para depósitos

Depósitos													
TRRF		Materiais incombustíveis			Carga de incêndio $\leq 300 \text{ MJ/m}^2$			Carga de incêndio $\leq 1.200 \text{ MJ/m}^2$			Carga de incêndio $> 1.200 \text{ MJ/m}^2$		
		Profundidade do subsolo			Profundidade do subsolo			Profundidade do subsolo			Profundidade do subsolo		
		0 m	$\leq 10 \text{ m}$	$> 10 \text{ m}$	0 m	$\leq 10 \text{ m}$	$> 10 \text{ m}$	0 m	$\leq 10 \text{ m}$	$> 10 \text{ m}$	0 m	$\leq 10 \text{ m}$	$> 10 \text{ m}$
Altura	$\leq 6 \text{ m}$	-	30	60	30	60 (30)	90	30	60 (30)	90	60	90	120
	$\leq 12 \text{ m}$	-	30	60	30	60 (30)	90	60	60	90	60	90	120
	$\leq 23 \text{ m}$	-	30	60	30	60 (30)	90	60	60	90	90 (60)	90	120
	$\leq 30 \text{ m}$	-	30	60	30	60 (30)	90	120 (90)	120 (90)	120 (90)	120 (90)	120 (90)	120
	$\leq 80 \text{ m}$	60	60	60	60	60	90	120	120	120	120	120	120
	$> 80 \text{ m}$	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT	CT

CT = Utiliza Comissão Técnica junto ao Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo

Fonte: Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2015d (adaptada)

APÊNDICE C – TRRF PORTUGAL

Tabela 34 - TRRF para habitações

Fonte: PORTUGAL, 2008 (Portaria n° 1532) (adaptada)

Habitações					
TRRF		Número de subsolos com este uso			
		≤ 1	≤ 3	≤ 5	> 5
Altura	≤ 9 m	30	60	90	120
	≤ 28 m	60	60	90	120
	≤ 50 m	90	90	90	120
	> 50 m	120	120	120	120
REI - Para elementos de suporte e compartimentação					
R - Para elementos apenas de suporte					

Tabela 35 - TRRF para estacionamentos

Fonte: PORTUGAL, 2008 (Portaria n° 1532) (adaptada)

Estacionamentos									
TRRF		Número de subsolos com este uso				Área bruta ocupada			
		≤ 1	≤ 3	≤ 5	> 5	≤ 3200 m ²	≤ 9600 m ²	≤ 32000 m ²	> 32.000 m ²
Altura	≤ 9 m	60	90	120	180	60	90	120	180
	≤ 28 m	90	90	120	180	90	90	120	180
	≤ 50 m	120	120	120	180	120	120	120	180
	> 50 m	180	180	180	180	180	180	180	180
REI - Para elementos de suporte e compartimentação									
R - Para elementos apenas de suporte									
OBS: Valores para estacionamentos cobertos, em caso de estacionamentos ao ar livre utilizar 60 min									

Tabela 36 - TRRF para edifícios administrativos ou de serviço

Fonte: PORTUGAL, 2008 (Portaria n° 1532) (adaptada)

Administrativos ou Serviços					
TRRF		Efetivo			
		≤ 100	≤ 1.000	≤ 5.000	> 5.000
Altura	≤ 9 m	30	60	90	120
	≤ 28 m	60	60	90	120
	≤ 50 m	90	90	90	120
	> 50 m	120	120	120	120
REI - Para elementos de suporte e compartimentação					
R - Para elementos apenas de suporte					

Tabela 37 - TRRF para instituições de ensino

Instituições de Ensino									
TRRF		Efetivo				Efetivo para instituição de risco*			
		≤ 100	≤ 750	≤ 2.250	> 2.250	≤ 25	≤ 100	≤ 400	> 400
Altura	≤ 9 m	30	60	90	120	30	60	90	120
	≤ 28 m	90	90	90	120	90	90	90	120
	> 28 m	120	120	120	120	120	120	120	120
REI - Para elementos de suporte e compartimentação									
R - Para elementos apenas de suporte									
* Entende-se por risco instituições que abriguem crianças com menos de seis anos, deficientes físicos, ou que possuam local destinado à pernoite (como internatos)									

Fonte: PORTUGAL, 2008a (adaptada)

Tabela 38 - TRRF para hospitais ou casas de repouso

Hospitais ou Casas de Repouso									
TRRF		Efetivo				Efetivo para instituição de risco*			
		≤ 100	≤ 500	≤ 1.500	> 1.500	≤ 25	≤ 100	≤ 400	> 400
Altura	≤ 9 m	30	60	90	120	30	60	90	120
	≤ 28 m	90	90	90	120	90	90	90	120
	> 28 m	120	120	120	120	120	120	120	120
REI - Para elementos de suporte e compartimentação									
R - Para elementos apenas de suporte									
* Entende-se por risco instituições que abriguem crianças com menos de seis anos, deficientes físicos, pessoas acamadas, ou que possuam local destinado à pernoite									

Fonte: PORTUGAL, 2008a (adaptada)

Tabela 39 - TRRF para locais de reunião de público

Locais para Espetáculos, Eventos Esportivos ou Reuniões Públicas									
TRRF		Número de subsolos com este uso				Efetivo (ao ar livre*)			
		0	≤ 1	≤ 2	> 2	≤ 100 (1.000)	≤ 1.000 (15.000)	≤ 5.000 (40.000)	> 5.000 (40.000)
Altura	≤ 9 m	30	60	90	120	30 (30)	60 (60)	90 (90)	120 (120)
	≤ 28 m	60	60	90	120	60 (30)	60 (60)	90 (90)	120 (120)
	> 28 m	120	120	120	120	120 (30)	120 (60)	120 (90)	120 (120)
REI - Para elementos de suporte e compartimentação									
R - Para elementos apenas de suporte									
* Se for ao ar livre o único parâmetro a se utilizar é o efetivo									

Fonte: PORTUGAL, 2008a (adaptada)

Tabela 40 - TRRF para edifício de hospedagem

Serviços de Hospedagem									
TRRF		Efetivo				Efetivo em risco*			
		≤ 100	≤ 500	≤ 1.500	> 1.500	≤ 50	≤ 200	≤ 800	> 800
Altura	≤ 9 m	30	60	90	120	30	60	90	120
	≤ 28 m	90	90	90	120	90	90	90	120
	> 28 m	120	120	120	120	120	120	120	120
REI - Para elementos de suporte e compartimentação									
R - Para elementos apenas de suporte									
* Entende-se por efetivo em risco um efetivo que tenha por objetivo a pernoite no local, excluindo-se crianças com menos de seis anos, deficientes físicos ou pessoas acamadas									

Fonte: PORTUGAL, 2008a (adaptada)

Tabela 41 - TRRF para edifícios comerciais

Comerciais									
TRRF		Número de subsolos com este uso				Efetivo			
		0	≤ 1	≤ 2	> 2	≤ 100	≤ 1.000	≤ 5.000	> 5.000
Altura	≤ 9 m	30	60	90	120	30	60	90	120
	≤ 28 m	60	60	90	120	60	60	90	120
	> 28 m	120	120	120	120	120	120	120	120
REI - Para elementos de suporte e compartimentação									
R - Para elementos apenas de suporte									

Fonte: PORTUGAL, 2008a (adaptada)

Tabela 42 - TRRF para museus ou galerias de arte

Museus ou Galerias de Arte					
TRRF		Efetivo			
		≤ 100	≤ 500	≤ 1.500	> 1.500
Altura	≤ 9 m	30	60	90	120
	≤ 28 m	60	60	90	120
	> 28 m	120	120	120	120
REI - Para elementos de suporte e compartimentação					
R - Para elementos apenas de suporte					

Fonte: PORTUGAL, 2008a (adaptada)

Tabela 43 - TRRF para bibliotecas ou arquivos

Bibliotecas ou Arquivos					
TRRF		Número de subsolos com este uso			
		0	≤ 1	≤ 2	> 2
Altura	≤ 9 m	60	90	120	180
	≤ 28 m	90	90	120	180
	> 28 m	180	180	180	180
TRRF		Carga de Incêndio Modificada (MJ/m²)			
		≤ 5.000	≤ 50.000	≤ 150.000	> 150.000
Efetivo	≤ 100	60	90	120	180
	≤ 500	90	90	120	180
	≤ 1.500	120	120	120	180
	> 1.500	180	180	180	180
REI - Para elementos de suporte e compartimentação					
R - Para elementos apenas de suporte					

Fonte: PORTUGAL, 2008a (adaptada)

Tabela 44 - TRRF para indústrias

Indústrias									
TRRF		Carga de Incêndio Modificada (MJ/m ²)				Carga de Incêndio Modificada (MJ/m ²) (ao ar livre)			
		≤ 500	≤ 5.000	≤ 15.000	> 15.000	≤ 1.000	≤ 10.000	≤ 30.000	> 30.000
Número de subsolos com este uso	0	60	90	120	180	60	90	120	180
	≤ 1	90	90	120	180	90	90	120	180
	> 1	180	180	180	180	180	180	180	180
REI - Para elementos de suporte e compartimentação									
R - Para elementos apenas de suporte									

Fonte: PORTUGAL, 2008a (adaptada)

Tabela 45 - TRRF para depósitos

Depósitos									
TRRF		Carga de Incêndio Modificada (MJ/m ²)				Carga de Incêndio Modificada (MJ/m ²) (ao ar livre)			
		≤ 5.000	≤ 50.000	≤ 150.000	> 150.000	≤ 10.000	≤ 100.000	≤ 300.000	> 300.000
Número de subsolos com este uso	0	60	90	120	180	60	90	120	180
	≤ 1	90	90	120	180	90	90	120	180
	> 1	180	180	180	180	180	180	180	180
REI - Para elementos de suporte e compartimentação									
R - Para elementos apenas de suporte									

Fonte: PORTUGAL, 2008a (adaptada)

APÊNDICE D – TRRF INGLATERRA

Tabela 46 - TRRF para habitações

Habitações				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 5 m	30*	60	90
	≤ 18 m	60	60	90
	≤ 30 m	90	90	90
	> 30 m	- (120)	- (120)	- (120)
* 60 min para parede de compartimentação entre edifícios				

Fonte: *HER MAJESTY'S GOVERNMENT*, 2006 (adaptada)

Tabela 47 - TRRF para estacionamentos

Estacionamentos					
TRRF		Profundidade do subsolo			
		0* m	0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 5 m	15**	30***	60	90
	≤ 18 m	15**	60	60	90
	≤ 30 m	15**	90	90	90
	> 30 m	60	120	120	120
* Caso seja aberto lateralmente					
** 45 min para elementos que protejam a rota de fuga					
*** 60 min para parede de compartimentação entre edifícios					

Fonte: *HER MAJESTY'S GOVERNMENT*, 2006 (adaptada)

Tabela 48 - TRRF para edifícios administrativos ou de serviço

Administrativos ou Serviços				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 5 m	30*	60	90 (60)
	≤ 18 m	60 (30*)	60	90 (60)
	≤ 30 m	90 (60)	90 (60)	90 (60)
	> 30 m	- (120)	- (120)	- (120)
* 60 min para parede de compartimentação entre edifícios				

Fonte: *HER MAJESTY'S GOVERNMENT*, 2006 (adaptada)

Tabela 49 - TRRF para instituições de ensino

Instituições de Ensino				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 5 m	60 (30*)	90	120
	≤ 18 m	90 (60)	90	120
	≤ 30 m	120 (90)	120 (90)	120
	> 30 m	- (120)	- (120)	- (120)
* 60 min para parede de compartimentação entre edifícios				

Fonte: HER MAJESTY'S GOVERNMENT, 2006 (adaptada)

Tabela 50 - TRRF para hospitais ou casas de repouso

Hospitais ou Casas de Repouso				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 5 m	60 (30*)	90	120
	≤ 18 m	90 (60)	90	120
	≤ 30 m	120 (90)	120 (90)	120
	> 30 m	- (120)	- (120)	- (120)
* 60 min para parede de compartimentação entre edifícios				

Fonte: HER MAJESTY'S GOVERNMENT, 2006 (adaptada)

Tabela 51 - TRRF para locais de reunião de público

Locais de Reunião de Público				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 5 m	60 (30*)	60	90 (60)
	≤ 18 m	60	60	90 (60)
	≤ 30 m	90 (60)	90 (60)	90 (60)
	> 30 m	- (120)	- (120)	- (120)
* 60 min para parede de compartimentação entre edifícios				

Fonte: HER MAJESTY'S GOVERNMENT, 2006 (adaptada)

Tabela 52 - TRRF para edifício de hospedagem

Serviços de Hospedagem				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 5 m	60 (30*)	90	120
	≤ 18 m	90 (60)	90	120
	≤ 30 m	120 (90)	120 (90)	120
	> 30 m	- (120)	- (120)	- (120)
* 60 min para parede de compartimentação entre edifícios				

Fonte: HER MAJESTY'S GOVERNMENT, 2006 (adaptada)

Tabela 53 - TRRF para edifícios comerciais

Comerciais									
TRRF		Número de subsolos com este uso				Efetivo			
		0	≤ 1	≤ 2	> 2	≤ 100	≤ 1.000	≤ 5.000	> 5.000
Altura	≤ 9 m	30	60	90	120	30	60	90	120
	≤ 28 m	60	60	90	120	60	60	90	120
	> 28 m	120	120	120	120	120	120	120	120
REI - Para elementos de suporte e compartimentação									
R - Para elementos apenas de suporte									

Fonte: HER MAJESTY'S GOVERNMENT, 2006 (adaptada)

Tabela 54 - TRRF para museus ou galerias de arte

Museus ou Galerias de Arte				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 5 m	60 (30*)	90	120
	≤ 18 m	90 (60)	90	120
	≤ 30 m	120 (90)	120 (90)	120
	> 30 m	- (120)	- (120)	- (120)
* 60 min para parede de compartimentação entre edifícios				

Fonte: HER MAJESTY'S GOVERNMENT, 2006 (adaptada)

Tabela 55 - TRRF para bibliotecas ou arquivos

Bibliotecas ou Arquivos				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 5 m	60 (30*)	90	120
	≤ 18 m	90 (60)	90	120
	≤ 30 m	120 (90)	120 (90)	120
	> 30 m	- (120)	- (120)	- (120)
* 60 min para parede de compartimentação entre edifícios				

Fonte: HER MAJESTY'S GOVERNMENT, 2006 (adaptada)

Tabela 56 - TRRF para indústrias

Indústrias				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 5 m	60 (30*)	90 (60)	120 (90)
	≤ 18 m	90 (60)	90 (60)	120 (90)
	≤ 30 m	120 (90)	120 (90)	120 (90)
	> 30 m	- (120)	- (120)	- (120)
* 60 min para parede de compartimentação entre edifícios				

Fonte: HER MAJESTY'S GOVERNMENT, 2006 (adaptada)

Tabela 57 - TRRF para depósitos

Depósitos				
TRRF		Profundidade do subsolo		
		0 m	≤ 10 m	> 10 m
Altura	≤ 5 m	60 (30*)	90	120
	≤ 18 m	90 (60)	90	120
	≤ 30 m	120 (90)	120 (90)	120
	> 30 m	- (120)	- (120)	- (120)
* 60 min para parede de compartimentação entre edifícios				

Fonte: HER MAJESTY'S GOVERNMENT, 2006 (adaptada)

APÊNDICE E – TRRF HONG KONG

Tabela 58 - TRRF para habitações

Habitações	
TRRF	Dimensão do compartimento
	Ilimitado
	60

Fonte: *BUILDINGS DEPARTMENT*, 2012 (adaptada)

Tabela 59 - TRRF para estacionamento

Estacionamentos	
TRRF	Dimensão do compartimento
	$\leq 10.500 \text{ m}^2$
	60

Fonte: *BUILDINGS DEPARTMENT*, 2012 (adaptada)

Tabela 60 - TRRF para edifícios administrativos ou de serviço

Administrativos ou Serviços	
TRRF	Dimensão do compartimento
	$\leq 10.500 \text{ m}^2$
	60

Fonte: *BUILDINGS DEPARTMENT*, 2012 (adaptada)

Tabela 61 - TRRF para instituições de ensino

Instituições de Ensino		
TRRF	Dimensão do compartimento	
	$\leq 2.500 \text{ m}^2$	$\leq 10.500 \text{ m}^2$
	60	120

Fonte: *BUILDINGS DEPARTMENT*, 2012 (adaptada)

Tabela 62 - TRRF para hospitais ou casas de repouso

Hospitais ou Casas de Repouso	
TRRF	Dimensão do compartimento
	$\leq 2.500 \text{ m}^2$
	60

Fonte: *BUILDINGS DEPARTMENT*, 2012 (adaptada)

Tabela 63 - TRRF para locais de reunião de público

Locais de Reunião de Público		
TRRF	Dimensão do compartimento	
	$\leq 2.500 \text{ m}^2$	$\leq 10.500 \text{ m}^2$
	60	120

Fonte: *BUILDINGS DEPARTMENT*, 2012 (adaptada)

Tabela 64 - TRRF para edifício de hospedagem

Serviços de Hospedagem		
TRRF	Dimensão do compartimento	
	Ilimitado	
	60	

Fonte: *BUILDINGS DEPARTMENT*, 2012 (adaptada)

Tabela 65 - TRRF para edifícios comerciais

Comerciais		
TRRF	Dimensão do compartimento	
	$\leq 2.500 \text{ m}^2$	$\leq 10.500 \text{ m}^2$
	60	120

Fonte: *BUILDINGS DEPARTMENT*, 2012 (adaptada)

Tabela 66 - TRRF para museus ou galerias de arte

Museus ou Galerias de Arte		
TRRF	Dimensão do compartimento	
	$\leq 2.500 \text{ m}^2$	$\leq 10.500 \text{ m}^2$
	60	120

Fonte: *BUILDINGS DEPARTMENT*, 2012 (adaptada)

Tabela 67 - TRRF para bibliotecas ou arquivos

Bibliotecas ou Arquivos		
TRRF	Dimensão do compartimento	
	$\leq 2.500 \text{ m}^2$	$\leq 10.500 \text{ m}^2$
	60	120

Fonte: *BUILDINGS DEPARTMENT*, 2012 (adaptada)

Tabela 68 - TRRF para indústrias

Indústrias	
TRRF	Dimensão do compartimento*
	$\leq 10.500 \text{ m}^2$
	120
* Caso seja produção de materiais inflamáveis, explosivos ou utilize processos potencialmente inflamáveis ou explosivos, o volume do compartimento deve ser $\leq 7.000 \text{ m}^3$	

Fonte: *BUILDINGS DEPARTMENT*, 2012 (adaptada)

Tabela 69 - TRRF para depósitos

Depósitos	
TRRF	Dimensão do compartimento*
	$\leq 10.500 \text{ m}^2$ e $\leq 28.000 \text{ m}^3$
	120
* Caso seja produção de materiais inflamáveis, explosivos ou utilize processos potencialmente inflamáveis ou explosivos, o volume do compartimento deve ser $\leq 7.000 \text{ m}^3$	

Fonte: *BUILDINGS DEPARTMENT*, 2012 (adaptada)

APÊNDICE F – TRRF ESTADOS UNIDOS

Tabela 70 - TRRF para habitações

Habitações - Paredes Externas, de Compartimentação ou Paredes Corta-fogo									
TRRF		Tipo de Construção							
		IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	VA	VB
Parede Corta-fogo		180	180	120	120	180	180	120	120
Distância entre edificações	< 1,5 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 3 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 9 m	60	60	60	0	60	60	60	0
	≥ 9 m	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte ICC, 2011 (adaptada)

Tabela 71 - TRRF para estacionamentos

Estacionamentos - Paredes Externas, de Compartimentação ou Paredes Corta-fogo									
TRRF		Tipo de Construção							
		IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	VA	VB
Parede Corta-fogo		180	180	120	120	180	180	120	120
Distância entre edificações	< 1,5 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 3 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 9 m	60*	60*	60*	0	60*	60*	60*	0
	≥ 9 m	0	0	0	0	0	0	0	0

* Se for ao ar livre pode ser considerado como 0

Fonte ICC, 2011 (adaptada)

Tabela 72 - TRRF para edifícios administrativos ou de serviço

Administrativos ou Serviços - Paredes Externas, de Compartimentação ou Paredes Corta-fogo									
TRRF		Tipo de Construção							
		IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	VA	VB
Parede Corta-fogo		180	180	120	120	180	180	120	120
Distância entre edificações	< 1,5 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 3 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 9 m	60	60	60	0	60	60	60	0
	≥ 9 m	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte ICC, 2011 (adaptada)

Tabela 73 - TRRF para instituições de ensino

Instituições de Ensino - Paredes Externas, de Compartimentação ou Paredes Corta-fogo									
TRRF		Tipo de Construção							
		IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	VA	VB
Parede Corta-fogo		180	180	120	120	180	180	120	120
Distância entre edificações	< 1,5 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 3 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 9 m	60	60	60	0	60	60	60	0
	≥ 9 m	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte ICC, 2011 (adaptada)

Tabela 74 - TRRF para hospitais ou casas de repouso

Hospitais ou Casas de Repouso - Paredes Externas, de Compartimentação ou Paredes Corta-fogo									
TRRF		Tipo de Construção							
		IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	VA	VB
Parede Corta-fogo		180	180	120	120	180	180	120	120
Distância entre edificações	< 1,5 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 3 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 9 m	60	60	60	0	60	60	60	0
	≥ 9 m	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte ICC, 2011 (adaptada)

Tabela 75 - TRRF para locais de reunião de público

Locais de Reunião de Público - Paredes Externas, de Compartimentação ou Paredes Corta-fogo									
TRRF		Tipo de Construção							
		IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	VA	VB
Parede Corta-fogo		180	180	120	120	180	180	120	120
Distância entre edificações	< 1,5 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 3 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 9 m	60	60	60	0	60	60	60	0
	≥ 9 m	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte ICC, 2011 (adaptada)

Tabela 76 - TRRF para edifício de hospedagem

Serviços de Hospedagem - Paredes Externas, de Compartimentação ou Paredes Corta-fogo									
TRRF		Tipo de Construção							
		IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	VA	VB
Parede Corta-fogo		180	180	120	120	180	180	120	120
Distância entre edificações	< 1,5 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 3 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 9 m	60	60	60	0	60	60	60	0
	≥ 9 m	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte ICC, 2011 (adaptada)

Tabela 77 - TRRF para edifícios comerciais

Comerciais - Paredes Externas, de Compartimentação ou Paredes Corta-fogo									
TRRF		Tipo de Construção							
		IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	VA	VB
Parede Corta-fogo		180	180	180	180	180	180	180	180
Distância entre edificações	< 1,5 m	120	120	120	120	120	120	120	120
	< 3 m	120	60	60	60	60	60	60	60
	< 9 m	60	60	60	0	60	60	60	0
	≥ 9 m	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte ICC, 2011 (adaptada)

Tabela 78 - TRRF para museus ou galerias de arte

Museus ou Galerias de Arte - Paredes Externas, de Compartimentação ou Paredes Corta-fogo									
TRRF		Tipo de Construção							
		IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	VA	VB
Parede Corta-fogo		180	180	120	120	180	180	120	120
Distância entre edificações	< 1,5 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 3 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 9 m	60	60	60	0	60	60	60	0
	≥ 9 m	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte ICC, 2011 (adaptada)

Tabela 79 - TRRF para bibliotecas ou arquivos

Bibliotecas ou Arquivos - Paredes Externas, de Compartimentação ou Paredes Corta-fogo									
TRRF		Tipo de Construção							
		IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	VA	VB
Parede Corta-fogo		180	180	120	120	180	180	120	120
Distância entre edificações	< 1,5 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 3 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 9 m	60	60	60	0	60	60	60	0
	≥ 9 m	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte ICC, 2011 (adaptada)

Tabela 80 - TRRF para indústrias

Indústrias - Paredes Externas, de Compartimentação ou Paredes Corta-fogo									
TRRF		Tipo de Construção							
		IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	VA	VB
		Indústrias com alta carga de incêndio (explosivos e inflamáveis)							
Parede Corta-fogo		*	*	*	*	*	*	*	*
Distância entre edificações	< 1,5 m	180	180	180	180	180	180	180	180
	< 3 m	180	120	120	120	120	120	120	120
	< 9 m	120	120	60	60	60	60	60	60
	≥ 9 m	0	0	0	0	0	0	0	0
		Indústrias em geral							
Parede Corta-fogo		180	180	180	180	180	180	180	180
Distância entre edificações	< 1,5 m	120	120	120	120	120	120	120	120
	< 3 m	120	60	60	60	60	60	60	60
	< 9 m	60	60	60	0	60	60	60	0
	≥ 9 m	0	0	0	0	0	0	0	0
		Indústrias de produtos com baixa carga de incêndio							
Parede Corta-fogo		120	120	120	120	120	120	120	120
Distância entre edificações	< 1,5 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 3 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 9 m	60	60	60	0	60	60	60	0
	≥ 9 m	0	0	0	0	0	0	0	0
* Para materiais explosivos ou altamente inflamáveis deve-se adotar um TRRF = 240, para materiais inflamáveis deve-se adotar um TRRF = 180, para materiais tóxicos ou corrosivos deve-se adotar um TRRF = 120 para os tipos de construção II ou V e 180 para os demais									

Fonte ICC, 2011 (adaptada)

Tabela 81 - TRRF para depósitos

Depósitos - Paredes Externas, de Compartimentação ou Paredes Corta-fogo									
TRRF		Tipo de Construção							
		IA	IB	IIA	IIB	IIIA	IIIB	VA	VB
		Depósitos com alta carga de incêndio (explosivos e inflamáveis)							
Parede Corta-fogo		*	*	*	*	*	*	*	*
Distância entre edificações	< 1,5 m	180	180	180	180	180	180	180	180
	< 3 m	180	120	120	120	120	120	120	120
	< 9 m	120	120	60	60	60	60	60	60
	≥ 9 m	0	0	0	0	0	0	0	0
		Depósitos em geral							
Parede Corta-fogo		180	180	180	180	180	180	180	180
Distância entre edificações	< 1,5 m	120	120	120	120	120	120	120	120
	< 3 m	120	60	60	60	60	60	60	60
	< 9 m	60	60	60	0	60	60	60	0
	≥ 9 m	0	0	0	0	0	0	0	0
		Depósito de produtos com baixa carga de incêndio							
Parede Corta-fogo		120	120	120	120	120	120	120	120
Distância entre edificações	< 1,5 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 3 m	60	60	60	60	60	60	60	60
	< 9 m	60	60	60	0	60	60	60	0
	≥ 9 m	0	0	0	0	0	0	0	0
* Para materiais explosivos ou altamente inflamáveis deve-se adotar um TRRF = 240, para materiais inflamáveis deve-se adotar um TRRF = 180, para materiais tóxicos ou corrosivos deve-se adotar um TRRF = 120 para os tipos de construção II ou V e 180 para os demais									

Fonte ICC, 2011 (adaptada)

APÊNDICE G – ARQUIVO FDS – ESTUDO DE CASO 1

Estudo de Caso 1.fds

Generated by PyroSim - Version 2016.1.0425

08/01/2018 16:39:40

&HEAD CHID='Estudo_de_Caso_1'/

&TIME T_END=3600.0, RESTRICT_TIME_STEP=.FALSE./

&DUMP RENDER_FILE='Estudo_de_Caso_1.ge1', DT_BNDF=5.0/

&MESH ID='Quarto - 0,05', IJK=72,64,16, XB=3.2,6.8,6.8,10.0,0.0,0.8/

&MESH ID='Cozinha - 0,05', IJK=64,88,16, XB=0.0,3.2,4.4,8.8,0.0,0.8/

&MESH ID='Entrada - 0,05', IJK=16,32,16, XB=2.4,3.2,2.8,4.4,0.0,0.8/

&MESH ID='Sala - 0,05', IJK=72,56,16, XB=3.2,6.8,2.8,5.6,0.0,0.8/

&MESH ID='Lavanderia - 0,1', IJK=32,12,8, XB=0.0,3.2,8.8,10.0,0.0,0.8/

&MESH ID='Hall + WC - 0,1', IJK=36,12,8, XB=3.2,6.8,5.6,6.8,0.0,0.8/

&MESH ID='Entrada - 0,1', IJK=24,16,8, XB=0.0,2.4,2.8,4.4,0.0,0.8/

&MESH ID='Compartimento - 0,1', IJK=68,72,8, XB=0.0,6.8,2.8,10.0,0.8,1.6/

&MESH ID='Compartimento - 0,4', IJK=17,18,3, XB=0.0,6.8,2.8,10.0,1.6,2.8/

&MESH ID='Extremo Janelas - 0,4', IJK=8,18,8, XB=6.8,10.0,2.8,10.0,0.0,3.2/

&MESH ID='Externo Sacada - 0,4', IJK=25,8,8, XB=0.0,10.0,-0.4,2.8,0.0,3.2/

&REAC ID='Wood',

FUEL='REAC_FUEL',

C=3.4,

H=6.2,

O=2.5,

CRITICAL_FLAME_TEMPERATURE=1427.0,

AUTO_IGNITION_TEMPERATURE=0.0,

SOOT_H_FRACTION=0.0,

SOOT_YIELD=0.015,

HEAT_OF_COMBUSTION=1.79E4/


```
&DEVC ID='Device - Lavanderia', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.6,9.25,1.4/
&DEVC ID='Device - Cozinha', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.6,6.6,1.4/
&DEVC ID='Device - Quarto', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=5.0,8.4,1.4/
&DEVC ID='Device - Banheiro', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=5.8,6.3,1.4/
&DEVC ID='Device - Sala', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=4.9,4.4,1.4/
```

```
&MATL ID='Wood',
    SPECIFIC_HEAT=1.36,
    CONDUCTIVITY=0.13,
    DENSITY=369.6/
```

```
&SURF ID='Wood',
    COLOR='ORANGE',
    HRRPUA=175.0,
    IGNITION_TEMPERATURE=384.0,
    BURN_AWAY=.TRUE.,
    BACKING='INSULATED',
    MATL_ID(1,1)='Wood',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.02/
```

```
&SURF ID='ADIABATIC',
    COLOR='GRAY 80',
    ADIABATIC=.TRUE./
```

```
&SURF ID='Heat Flux',
    RGB=230.0,0.0,0.0,
    NET_HEAT_FLUX=100.0/
```

```
&OBST    ID='Carga    -    Cozinha    1',    XB=0.45,0.6,4.7,8.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
&OBST    ID='Carga    -    Cozinha    2',    XB=0.75,0.9,4.7,8.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
```

&OBST ID='Carga - Cozinha 3', XB=1.05,1.2,4.7,8.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Cozinha 4', XB=1.35,1.5,4.7,8.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Cozinha 5', XB=1.65,1.8,4.7,8.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Cozinha 6', XB=1.95,2.1,4.7,8.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Cozinha 7', XB=2.25,2.4,4.7,8.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Cozinha 8', XB=2.55,2.7,4.7,8.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Cozinha 9', XB=2.85,3.0,4.7,8.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Entrada 1a', XB=2.55,2.7,4.4,4.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Entrada 1b', XB=2.55,2.7,3.2,4.4,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Entrada 2a', XB=2.85,3.0,4.4,4.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Entrada 2b', XB=2.85,3.0,3.2,4.4,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Quarto 1', XB=3.35,3.5,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Quarto 2', XB=3.65,3.8,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Quarto 3', XB=3.95,4.1,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Quarto 4', XB=4.25,4.4,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Quarto 5', XB=4.55,4.7,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Quarto 6', XB=4.85,5.0,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 7', XB=5.15,5.3,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 8', XB=5.45,5.6,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 9', XB=5.75,5.9,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 10', XB=6.05,6.2,7.0,9.8,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 11', XB=6.35,6.5,7.0,9.8,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 12', XB=6.65,6.8,7.0,9.8,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 1a', XB=3.05,3.2,4.4,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 1b', XB=3.05,3.2,3.2,4.4,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 2', XB=3.35,3.5,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 3', XB=3.65,3.8,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 4', XB=3.95,4.1,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 5', XB=4.25,4.4,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 6', XB=4.55,4.7,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 7', XB=4.85,5.0,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 8', XB=5.15,5.3,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 9', XB=5.45,5.6,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 10', XB=5.75,5.9,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 11', XB=6.05,6.2,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 12', XB=6.35,6.5,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 13', XB=6.65,6.8,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Parede - Q/C', XB=3.0,3.2,6.8,9.8,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - Q/WC', XB=3.2,6.8,6.8,7.0,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - L/C', XB=0.2,3.0,8.5,8.7,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - WC/S', XB=4.8,6.8,5.6,5.8,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - WC/S 2', XB=4.6,4.8,5.6,6.8,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - Cozinha A', XB=0.2,3.0,4.5,4.7,0.0,1.5, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Varanda', XB=0.0,7.2,1.6,2.8,2.8,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=3.2,6.8,9.8,10.0,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,6.8,9.8,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.2,4.4,8.8,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=2.4,3.2,2.8,3.2,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=3.2,6.8,2.8,3.2,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,3.2,5.6,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.2,8.8,9.8,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,3.2,9.8,10.0,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,5.6,6.8,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.2,3.2,4.4,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,2.4,2.8,3.2,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.2,3.2,9.8,0.8,1.6, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,6.8,2.8,3.2,0.8,1.6, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,6.8,9.8,10.0,0.8,1.6, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,3.2,9.8,0.8,1.6, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,6.8,2.8,3.2,1.6,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,6.8,9.6,10.0,1.6,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.0,3.2,9.6,1.6,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,3.2,9.6,1.6,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,7.2,2.8,10.0,0.0,3.2, SURF_ID='ADIABATIC'/

&HOLE ID='Porta - Quarto', XB=3.3,4.1,6.795,7.0,-0.005,2.1/

&HOLE ID='Porta - WC', XB=4.6,4.8,5.95,6.75,-0.01,2.1/

&HOLE ID='Porta - Lavanderia', XB=2.1,2.9,8.5,8.7,-0.005,2.1/

&HOLE ID='Porta - Sacada', XB=3.0,5.0,2.4,3.2,-0.005,2.5/

&HOLE ID='Janela - Sala', XB=6.4,7.6,3.5,5.3,1.5,2.5/

&HOLE ID='Janela - Quarto', XB=6.4,7.6,7.4,9.4,1.5,2.5/

&HOLE ID='Janela - WC', XB=6.4,7.6,6.05,6.55,2.0,2.5/

&VENT ID='Externo Lateral 1', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,-0.4,2.8,0.0,3.2/

&VENT ID='Externo Lateral 2', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,10.0,-0.4,-0.4,0.0,3.2/

&VENT ID='Externo Lateral 3', SURF_ID='OPEN', XB=10.0,10.0,-0.4,10.0,0.0,3.2/

&VENT ID='Externo Lateral 4', SURF_ID='OPEN', XB=7.2,10.0,10.0,10.0,0.0,3.2/

&VENT ID='Externo Fundo 1', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,7.2,-0.4,1.5,0.0,0.0/

&VENT ID='Externo Fundo 2', SURF_ID='OPEN', XB=7.2,10.0,-0.4,10.0,0.0,0.0/

&VENT ID='ExternoTopo 1', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,10.0,-0.4,2.8,3.2,3.2/

&VENT ID='ExternoTopo 2', SURF_ID='OPEN', XB=7.2,10.0,2.8,10.0,3.2,3.2/

&VENT ID='Piso', SURF_ID='ADIABATIC', XB=0.0,7.2,1.5,3.0,0.0,0.0/

&VENT ID='Ignitores', SURF_ID='Heat Flux', XB=0.0,7.0,3.0,10.0,0.0,0.0/

&BNDF QUANTITY='BURNING RATE'/

&BNDF QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX'/

&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX'/

&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX'/

&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=4.0/

&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBX=4.0/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=8.4/

&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBY=8.4/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=6.3/

&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBY=6.3/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=4.4/

&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBY=4.4/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=2.0/

&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBZ=2.0/

&TAIL /

APÊNDICE H – ARQUIVO FDS – ESTUDO DE CASO 2

Estudo de Caso 2.fds

Generated by PyroSim - Version 2016.1.0425

08/01/2018 16:40:05

&HEAD CHID='Estudo_de_Caso_2'/

&TIME T_END=3600.0, RESTRICT_TIME_STEP=.FALSE./

&DUMP RENDER_FILE='Estudo_de_Caso_2.ge1', DT_BNDF=5.0/

&MESH ID='Quarto - 0,05', IJK=72,64,16, XB=3.2,6.8,6.8,10.0,0.0,0.8/

&MESH ID='Cozinha - 0,05', IJK=64,88,16, XB=0.0,3.2,4.4,8.8,0.0,0.8/

&MESH ID='Entrada - 0,05', IJK=16,32,16, XB=2.4,3.2,2.8,4.4,0.0,0.8/

&MESH ID='Sala - 0,05', IJK=72,56,16, XB=3.2,6.8,2.8,5.6,0.0,0.8/

&MESH ID='Lavanderia - 0,1', IJK=32,12,8, XB=0.0,3.2,8.8,10.0,0.0,0.8/

&MESH ID='Hall + WC - 0,1', IJK=36,12,8, XB=3.2,6.8,5.6,6.8,0.0,0.8/

&MESH ID='Entrada - 0,1', IJK=24,16,8, XB=0.0,2.4,2.8,4.4,0.0,0.8/

&MESH ID='Compartimento - 0,1', IJK=68,72,8, XB=0.0,6.8,2.8,10.0,0.8,1.6/

&MESH ID='Compartimento - 0,4', IJK=17,18,3, XB=0.0,6.8,2.8,10.0,1.6,2.8/

&MESH ID='Extremo Janelas - 0,4', IJK=8,18,8, XB=6.8,10.0,2.8,10.0,0.0,3.2/

&MESH ID='Externo Sacada - 0,4', IJK=25,8,8, XB=0.0,10.0,-0.4,2.8,0.0,3.2/

&REAC ID='Wood',

FUEL='REAC_FUEL',

C=3.4,

H=6.2,

O=2.5,

CRITICAL_FLAME_TEMPERATURE=1427.0,

AUTO_IGNITION_TEMPERATURE=0.0,

SOOT_H_FRACTION=0.0,

SOOT_YIELD=0.015,

HEAT_OF_COMBUSTION=1.79E4/

```
&DEVC ID='Device - Lavanderia', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.6,9.25,1.4/
&DEVC ID='Device - Cozinha', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.6,6.6,1.4/
&DEVC ID='Device - Quarto', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=5.0,8.4,1.4/
&DEVC ID='Device - Banheiro', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=5.8,6.3,1.4/
&DEVC ID='Device - Sala', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=4.9,4.4,1.4/
```

```
&MATL ID='Wood',
    SPECIFIC_HEAT=1.36,
    CONDUCTIVITY=0.13,
    DENSITY=369.6/
```

```
&SURF ID='Wood',
    COLOR='ORANGE',
    HRRPUA=175.0,
    IGNITION_TEMPERATURE=384.0,
    BURN_AWAY=.TRUE.,
    BACKING='INSULATED',
    MATL_ID(1,1)='Wood',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.02/
```

```
&SURF ID='ADIABATIC',
    COLOR='GRAY 80',
    ADIABATIC=.TRUE./
```

```
&SURF ID='Heat Flux',
    RGB=230.0,0.0,0.0,
    NET_HEAT_FLUX=100.0/
```

```
&OBST    ID='Carga    -    Cozinha    1',    XB=0.45,0.6,4.7,8.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
&OBST    ID='Carga    -    Cozinha    2',    XB=1.05,1.2,4.7,8.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
&OBST    ID='Carga    -    Cozinha    3',    XB=1.65,1.8,4.7,8.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
```


&OBST ID='Carga - Cozinha 4', XB=2.25,2.4,4.7,8.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Cozinha 5', XB=2.85,3.0,4.7,8.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 1', XB=3.65,3.8,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 2', XB=4.25,4.4,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 3', XB=4.85,5.0,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 4', XB=5.45,5.6,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 5', XB=6.05,6.2,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 6', XB=6.65,6.8,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 1a', XB=3.05,3.2,4.4,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 1b', XB=3.05,3.2,3.2,4.4,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 2', XB=3.65,3.8,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 3', XB=4.25,4.4,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 4', XB=4.85,5.0,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 5', XB=5.45,5.6,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 6', XB=6.05,6.2,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 7', XB=6.65,6.8,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Parede - Q/C', XB=3.0,3.2,6.8,9.8,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - Q/WC', XB=3.2,6.8,6.8,7.0,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Parede - L/C', XB=0.2,3.0,8.5,8.7,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Parede - WC/S', XB=4.8,6.8,5.6,5.8,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Parede - WC/S 2', XB=4.6,4.8,5.6,6.8,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Parede - Cozinha A', XB=0.2,3.0,4.5,4.7,0.0,1.5, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Varanda', XB=0.0,7.2,1.6,2.8,2.8,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=3.2,6.8,9.8,10.0,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,6.8,9.8,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.2,4.4,8.8,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=2.4,3.2,2.8,3.2,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=3.2,6.8,2.8,3.2,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,3.2,5.6,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.2,8.8,9.8,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,3.2,9.8,10.0,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,5.6,6.8,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.2,3.2,4.4,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,2.4,2.8,3.2,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.2,3.2,9.8,0.8,1.6, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,6.8,2.8,3.2,0.8,1.6, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,6.8,9.8,10.0,0.8,1.6, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,3.2,9.8,0.8,1.6, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,6.8,2.8,3.2,1.6,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,6.8,9.6,10.0,1.6,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.0,3.2,9.6,1.6,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,3.2,9.6,1.6,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,7.2,2.8,10.0,0.0,3.2, SURF_ID='ADIABATIC'/

&HOLE ID='Porta - Quarto', XB=3.3,4.1,6.795,7.0,-0.005,2.1/
 &HOLE ID='Porta - WC', XB=4.6,4.8,5.95,6.75,-0.01,2.1/
 &HOLE ID='Porta - Lavanderia', XB=2.1,2.9,8.5,8.7,-0.005,2.1/
 &HOLE ID='Porta - Sacada', XB=3.0,5.0,2.4,3.2,-0.005,2.5/
 &HOLE ID='Janela - Sala', XB=6.4,7.6,3.5,5.3,1.5,2.5/
 &HOLE ID='Janela - Quarto', XB=6.4,7.6,7.4,9.4,1.5,2.5/
 &HOLE ID='Janela - WC', XB=6.4,7.6,6.05,6.55,2.0,2.5/

```

&VENT ID='Externo Lateral 1', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,-0.4,2.8,0.0,3.2/
&VENT ID='Externo Lateral 2', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,10.0,-0.4,-0.4,0.0,3.2/
&VENT ID='Externo Lateral 3', SURF_ID='OPEN', XB=10.0,10.0,-0.4,10.0,0.0,3.2/
&VENT ID='Externo Lateral 4', SURF_ID='OPEN', XB=7.2,10.0,10.0,10.0,0.0,3.3/
&VENT ID='Externo Fundo 1', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,7.2,-0.4,1.5,0.0,0.0/
&VENT ID='Externo Fundo 2', SURF_ID='OPEN', XB=7.2,10.0,-0.4,10.0,0.0,0.0/
&VENT ID='ExternoTopo 1', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,10.0,-0.4,2.8,3.2,3.2/
&VENT ID='ExternoTopo 2', SURF_ID='OPEN', XB=7.2,10.0,2.8,10.0,3.2,3.2/
&VENT ID='Piso', SURF_ID='ADIABATIC', XB=0.0,7.2,1.5,3.0,0.0,0.0/
&VENT ID='Ignitores', SURF_ID='Heat Flux', XB=0.0,7.0,3.0,10.0,0.0,0.0/

```

```

&BNDF QUANTITY='BURNING RATE'/
&BNDF QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX'/
&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX'/
&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX'/
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/

```

```

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=4.0/
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBX=4.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=8.4/
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBY=8.4/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=6.3/
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBY=6.3/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=4.4/
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBY=4.4/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBZ=2.0/

```

```

&TAIL /

```

APÊNDICE I – ARQUIVO FDS – ESTUDO DE CASO 3

Estudo de Caso 3.fds

Generated by PyroSim - Version 2016.1.0425

08/01/2018 16:40:30

&HEAD CHID='Estudo_de_Caso_3'/

&TIME T_END=3600.0, RESTRICT_TIME_STEP=.FALSE./

&DUMP RENDER_FILE='Estudo_de_Caso_3.ge1', DT_BNDF=5.0/

&MESH ID='Quarto - 0,05', IJK=72,64,16, XB=3.2,6.8,6.8,10.0,0.0,0.8/

&MESH ID='Cozinha - 0,05', IJK=64,88,16, XB=0.0,3.2,4.4,8.8,0.0,0.8/

&MESH ID='Entrada - 0,05', IJK=16,32,16, XB=2.4,3.2,2.8,4.4,0.0,0.8/

&MESH ID='Sala - 0,05', IJK=72,56,16, XB=3.2,6.8,2.8,5.6,0.0,0.8/

&MESH ID='Lavanderia - 0,1', IJK=32,12,8, XB=0.0,3.2,8.8,10.0,0.0,0.8/

&MESH ID='Hall + WC - 0,1', IJK=36,12,8, XB=3.2,6.8,5.6,6.8,0.0,0.8/

&MESH ID='Entrada - 0,1', IJK=24,16,8, XB=0.0,2.4,2.8,4.4,0.0,0.8/

&MESH ID='Compartimento - 0,1', IJK=68,72,8, XB=0.0,6.8,2.8,10.0,0.8,1.6/

&MESH ID='Compartimento - 0,4', IJK=17,18,3, XB=0.0,6.8,2.8,10.0,1.6,2.8/

&MESH ID='Extremo Janelas - 0,4', IJK=8,18,8, XB=6.8,10.0,2.8,10.0,0.0,3.2/

&MESH ID='Externo Sacada - 0,4', IJK=25,8,8, XB=0.0,10.0,-0.4,2.8,0.0,3.2/

&REAC ID='Wood',

FUEL='REAC_FUEL',

C=3.4,

H=6.2,

O=2.5,

CRITICAL_FLAME_TEMPERATURE=1427.0,

AUTO_IGNITION_TEMPERATURE=0.0,

SOOT_H_FRACTION=0.0,

SOOT_YIELD=0.015,

HEAT_OF_COMBUSTION=1.79E4/

```

&DEVC ID='Device - Lavanderia', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.6,9.25,1.4/
&DEVC ID='Device - Cozinha', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.6,6.6,1.4/
&DEVC ID='Device - Quarto', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=5.0,8.4,1.4/
&DEVC ID='Device - Banheiro', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=5.8,6.3,1.4/
&DEVC ID='Device - Sala', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=4.9,4.4,1.4/

```

```

&MATL ID='Wood',
    SPECIFIC_HEAT=1.36,
    CONDUCTIVITY=0.13,
    DENSITY=369.6/

```

```

&SURF ID='Wood',
    COLOR='ORANGE',
    HRRPUA=175.0,
    IGNITION_TEMPERATURE=384.0,
    BURN_AWAY=.TRUE.,
    BACKING='INSULATED',
    MATL_ID(1,1)='Wood',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.02/

```

```

&SURF ID='ADIABATIC',
    COLOR='GRAY 80',
    ADIABATIC=.TRUE./

```

```

&SURF ID='Heat Flux',
    RGB=230.0,0.0,0.0,
    NET_HEAT_FLUX=100.0/

```

```

&OBST    ID='Carga    -    Cozinha    1',    XB=0.45,0.6,4.7,8.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
&OBST    ID='Carga    -    Cozinha    2',    XB=0.75,0.9,4.7,8.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

```

&OBST ID='Carga - Cozinha 3', XB=1.05,1.2,4.7,8.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Cozinha 4', XB=1.35,1.5,4.7,8.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Cozinha 5', XB=1.65,1.8,4.7,8.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Cozinha 6', XB=1.95,2.1,4.7,8.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Cozinha 7', XB=2.25,2.4,4.7,8.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Cozinha 8', XB=2.55,2.7,4.7,8.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Cozinha 9', XB=2.85,3.0,4.7,8.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Entrada 1a', XB=2.55,2.7,4.4,4.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Entrada 1b', XB=2.55,2.7,3.2,4.4,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Entrada 2a', XB=2.85,3.0,4.4,4.5,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Entrada 2b', XB=2.85,3.0,3.2,4.4,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Quarto 1', XB=3.35,3.5,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Quarto 2', XB=3.65,3.8,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Quarto 3', XB=3.95,4.1,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Quarto 4', XB=4.25,4.4,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Quarto 5', XB=4.55,4.7,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Quarto 6', XB=4.85,5.0,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 7', XB=5.15,5.3,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 8', XB=5.45,5.6,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 9', XB=5.75,5.9,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 10', XB=6.05,6.2,7.0,9.8,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 11', XB=6.35,6.5,7.0,9.8,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 12', XB=6.65,6.8,7.0,9.8,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 1a', XB=3.05,3.2,4.4,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 1b', XB=3.05,3.2,3.2,4.4,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 2', XB=3.35,3.5,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 3', XB=3.65,3.8,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 4', XB=3.95,4.1,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 5', XB=4.25,4.4,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 6', XB=4.55,4.7,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 7', XB=4.85,5.0,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 8', XB=5.15,5.3,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 9', XB=5.45,5.6,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 10', XB=5.75,5.9,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 11', XB=6.05,6.2,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 12', XB=6.35,6.5,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 13', XB=6.65,6.8,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Parede - Q/C', XB=3.0,3.2,6.8,9.8,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - Q/WC', XB=3.2,6.8,6.8,7.0,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - L/C', XB=0.2,3.0,8.5,8.7,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - WC/S', XB=4.8,6.8,5.6,5.8,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - WC/S 2', XB=4.6,4.8,5.6,6.8,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - Cozinha A', XB=0.2,3.0,4.5,4.7,0.0,1.5, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Carga - Cozinha 1', XB=0.45,0.6,4.7,8.5,0.35,0.5,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Cozinha 2', XB=0.75,0.9,4.7,8.5,0.35,0.5,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Cozinha 3', XB=1.05,1.2,4.7,8.5,0.35,0.5,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Cozinha 4', XB=1.35,1.5,4.7,8.5,0.35,0.5,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Cozinha 5', XB=1.65,1.8,4.7,8.5,0.35,0.5,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Cozinha 6', XB=1.95,2.1,4.7,8.5,0.35,0.5,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Cozinha 7', XB=2.25,2.4,4.7,8.5,0.35,0.5,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Cozinha 8', XB=2.55,2.7,4.7,8.5,0.35,0.5,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Cozinha 9', XB=2.85,3.0,4.7,8.5,0.35,0.5,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Entrada 1a', XB=2.55,2.7,4.4,4.5,0.35,0.5,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Entrada 1b', XB=2.55,2.7,3.2,4.4,0.35,0.5,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Entrada 2a', XB=2.85,3.0,4.4,4.5,0.35,0.5,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Entrada 2b', XB=2.85,3.0,3.2,4.4,0.35,0.5,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 1', XB=3.35,3.5,7.0,9.8,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 2', XB=3.65,3.8,7.0,9.8,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 3', XB=3.95,4.1,7.0,9.8,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 4', XB=4.25,4.4,7.0,9.8,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 5', XB=4.55,4.7,7.0,9.8,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 6', XB=4.85,5.0,7.0,9.8,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 7', XB=5.15,5.3,7.0,9.8,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 8', XB=5.45,5.6,7.0,9.8,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 9', XB=5.75,5.9,7.0,9.8,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 10', XB=6.05,6.2,7.0,9.8,0.35,0.5,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 11', XB=6.35,6.5,7.0,9.8,0.35,0.5,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 12', XB=6.65,6.8,7.0,9.8,0.35,0.5,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 1a', XB=3.05,3.2,4.4,5.5,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 1b', XB=3.05,3.2,3.2,4.4,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 2', XB=3.35,3.5,3.2,5.5,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 3', XB=3.65,3.8,3.2,5.5,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 4', XB=3.95,4.1,3.2,5.5,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 5', XB=4.25,4.4,3.2,5.5,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 6', XB=4.55,4.7,3.2,5.5,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 7', XB=4.85,5.0,3.2,5.5,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 8', XB=5.15,5.3,3.2,5.6,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 9', XB=5.45,5.6,3.2,5.6,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 10', XB=5.75,5.9,3.2,5.6,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 11', XB=6.05,6.2,3.2,5.6,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 12', XB=6.35,6.5,3.2,5.6,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 13', XB=6.65,6.8,3.2,5.6,0.35,0.5, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Varanda', XB=0.0,7.2,1.6,2.8,2.8,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=3.2,6.8,9.8,10.0,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,6.8,9.8,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.2,4.4,8.8,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=2.4,3.2,2.8,3.2,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=3.2,6.8,2.8,3.2,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,3.2,5.6,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.2,8.8,9.8,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,3.2,9.8,10.0,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,5.6,6.8,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.2,3.2,4.4,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,2.4,2.8,3.2,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.2,3.2,9.8,0.8,1.6, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,6.8,2.8,3.2,0.8,1.6, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,6.8,9.8,10.0,0.8,1.6, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,3.2,9.8,0.8,1.6, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,6.8,2.8,3.2,1.6,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,6.8,9.6,10.0,1.6,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.0,3.2,9.6,1.6,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,3.2,9.6,1.6,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,7.2,2.8,10.0,0.0,3.2, SURF_ID='ADIABATIC'/

&HOLE ID='Porta - Quarto', XB=3.3,4.1,6.795,7.0,-0.005,2.1/
 &HOLE ID='Porta - WC', XB=4.6,4.8,5.95,6.75,-0.01,2.1/
 &HOLE ID='Porta - Lavanderia', XB=2.1,2.9,8.5,8.7,-0.005,2.1/
 &HOLE ID='Porta - Sacada', XB=3.0,5.0,2.4,3.2,-0.005,2.5/
 &HOLE ID='Janela - Sala', XB=6.4,7.6,3.5,5.3,1.5,2.5/
 &HOLE ID='Janela - Quarto', XB=6.4,7.6,7.4,9.4,1.5,2.5/
 &HOLE ID='Janela - WC', XB=6.4,7.6,6.05,6.55,2.0,2.5/

&VENT ID='Externo Lateral 1', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,-0.4,2.8,0.0,3.2/
 &VENT ID='Externo Lateral 2', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,10.0,-0.4,-0.4,0.0,3.2/
 &VENT ID='Externo Lateral 3', SURF_ID='OPEN', XB=10.0,10.0,-0.4,10.0,0.0,3.2/
 &VENT ID='Externo Lateral 4', SURF_ID='OPEN', XB=7.2,10.0,10.0,10.0,0.0,3.2/
 &VENT ID='Externo Fundo 1', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,7.2,-0.4,1.5,0.0,0.0/
 &VENT ID='Externo Fundo 2', SURF_ID='OPEN', XB=7.2,10.0,-0.4,10.0,0.0,0.0/
 &VENT ID='ExternoTopo 1', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,10.0,-0.4,2.8,3.2,3.2/
 &VENT ID='ExternoTopo 2', SURF_ID='OPEN', XB=7.2,10.0,2.8,10.0,3.2,3.2/
 &VENT ID='Piso', SURF_ID='ADIABATIC', XB=0.0,7.2,1.5,3.0,0.0,0.0/
 &VENT ID='Ignitores', SURF_ID='Heat Flux', XB=0.0,7.0,3.0,10.0,0.0,0.0/

&BNDF QUANTITY='BURNING RATE'/
&BNDF QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX'/
&BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX'/
&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX'/
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=4.0/
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBX=4.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=8.4/
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBY=8.4/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=6.3/
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBY=6.3/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=4.4/
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBY=4.4/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBZ=2.0/

&TAIL /

APÊNDICE J – ARQUIVO FDS – ESTUDO DE CASO FINAL

Estudo de Caso Final.fds

Generated by PyroSim - Version 2016.1.0425

08/01/2018 16:35:23

&HEAD CHID='Estudo_de_Caso_Final'/

&TIME T_END=3600.0, RESTRICT_TIME_STEP=.FALSE./

&DUMP RENDER_FILE='Estudo_de_Caso_Final.ge1', DT_BNDF=5.0/

&MESH ID='Ap T1 - Quarto - 0,05', IJK=72,64,16, XB=3.2,6.8,6.8,10.0,0.0,0.8/

&MESH ID='Ap T1 - Cozinha - 0,05', IJK=64,88,16, XB=0.0,3.2,4.4,8.8,0.0,0.8/

&MESH ID='Ap T1 - Entrada - 0,05', IJK=16,32,16, XB=2.4,3.2,2.8,4.4,0.0,0.8/

&MESH ID='Ap T1 - Sala - 0,05', IJK=72,56,16, XB=3.2,6.8,2.8,5.6,0.0,0.8/

&MESH ID='Ap T1 - Lavanderia - 0,1', IJK=32,12,8, XB=0.0,3.2,8.8,10.0,0.0,0.8/

&MESH ID='Ap T1 - Hall + WC - 0,1', IJK=36,12,8, XB=3.2,6.8,5.6,6.8,0.0,0.8/

&MESH ID='Ap T1 - Entrada - 0,1', IJK=24,16,8, XB=0.0,2.4,2.8,4.4,0.0,0.8/

&MESH ID='Ap T1 - 0,1', IJK=68,72,8, XB=0.0,6.8,2.8,10.0,0.8,1.6/

&MESH ID='Ap T1 + Ap 11 - 0,4', IJK=17,18,12, XB=0.0,6.8,2.8,10.0,1.6,6.4/

&MESH ID='Extremo Janelas + Ap T2 + Ap 12 - 0,4', IJK=25,40,16,
XB=6.8,16.8,2.8,18.8,0.0,6.4/

&MESH ID='Externo Sacada - 0,4', IJK=42,8,16, XB=0.0,16.8,-0.4,2.8,0.0,6.4/

&REAC ID='Wood',

FUEL='REAC_FUEL',

C=3.4,

H=6.2,

O=2.5,

CRITICAL_FLAME_TEMPERATURE=1427.0,

AUTO_IGNITION_TEMPERATURE=0.0,

SOOT_H_FRACTION=0.0,

SOOT_YIELD=0.015,

HEAT_OF_COMBUSTION=1.79E4/

&DEVC ID='Device - Lavanderia', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.6,9.25,1.4/
 &DEVC ID='Device - Cozinha', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.6,6.6,1.4/
 &DEVC ID='Device - Quarto', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=5.0,8.4,1.4/
 &DEVC ID='Device - Banheiro', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=5.8,6.3,1.4/
 &DEVC ID='Device - Sala', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=4.9,4.4,1.4/
 &DEVC ID='Device - Sala Ap 11', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=7.0,4.4,5.0/
 &DEVC ID='Device - Quarto Ap 11', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=7.0,8.4,5.0/
 &DEVC ID='Device - Quarto Ap 12', QUANTITY='TEMPERATURE',
 XYZ=9.0,10.4,5.0/
 &DEVC ID='Device - Sala Ap 12', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=13.0,10.4,5.0/
 &DEVC ID='Device - Quarto Ap T2', QUANTITY='TEMPERATURE',
 XYZ=9.0,10.4,2.0/
 &DEVC ID='Device - Sala Ap T2', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=13.0,10.4,2.0/

&MATL ID='Wood',
 SPECIFIC_HEAT=1.36,
 CONDUCTIVITY=0.13,
 DENSITY=369.6/

&SURF ID='ADIABATIC',
 COLOR='GRAY 80',
 ADIABATIC=.TRUE./

&SURF ID='Wood',
 COLOR='ORANGE',
 HRRPUA=175.0,
 IGNITION_TEMPERATURE=384.0,
 BURN_AWAY=.TRUE.,
 BACKING='INSULATED',
 MATL_ID(1,1)='Wood',
 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
 THICKNESS(1)=0.02/

&SURF ID='Heat Flux',

RGB=230.0,0.0,0.0,

NET_HEAT_FLUX=100.0/

&OBST	ID='Carga	-	Cozinha	1',	XB=0.45,0.6,4.7,8.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/					
&OBST	ID='Carga	-	Cozinha	2',	XB=0.75,0.9,4.7,8.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/					
&OBST	ID='Carga	-	Cozinha	3',	XB=1.05,1.2,4.7,8.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/					
&OBST	ID='Carga	-	Cozinha	4',	XB=1.35,1.5,4.7,8.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/					
&OBST	ID='Carga	-	Cozinha	5',	XB=1.65,1.8,4.7,8.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/					
&OBST	ID='Carga	-	Cozinha	6',	XB=1.95,2.1,4.7,8.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/					
&OBST	ID='Carga	-	Cozinha	7',	XB=2.25,2.4,4.7,8.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/					
&OBST	ID='Carga	-	Cozinha	8',	XB=2.55,2.7,4.7,8.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/					
&OBST	ID='Carga	-	Cozinha	9',	XB=2.85,3.0,4.7,8.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/					
&OBST	ID='Carga	-	Entrada	1a',	XB=2.55,2.7,4.4,4.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/					
&OBST	ID='Carga	-	Entrada	1b',	XB=2.55,2.7,3.2,4.4,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/					
&OBST	ID='Carga	-	Entrada	2a',	XB=2.85,3.0,4.4,4.5,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/					
&OBST	ID='Carga	-	Entrada	2b',	XB=2.85,3.0,3.2,4.4,0.05,0.2,
BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/					
&OBST ID='Carga - Quarto 1', XB=3.35,3.5,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,					
SURF_ID='Wood'/					
&OBST ID='Carga - Quarto 2', XB=3.65,3.8,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,					
SURF_ID='Wood'/					

&OBST ID='Carga - Quarto 3', XB=3.95,4.1,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 4', XB=4.25,4.4,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 5', XB=4.55,4.7,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 6', XB=4.85,5.0,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 7', XB=5.15,5.3,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 8', XB=5.45,5.6,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 9', XB=5.75,5.9,7.0,9.8,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 10', XB=6.05,6.2,7.0,9.8,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 11', XB=6.35,6.5,7.0,9.8,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 12', XB=6.65,6.8,7.0,9.8,0.05,0.2,
 BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 1a', XB=3.05,3.2,4.4,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 1b', XB=3.05,3.2,3.2,4.4,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 2', XB=3.35,3.5,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 3', XB=3.65,3.8,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 4', XB=3.95,4.1,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 5', XB=4.25,4.4,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 6', XB=4.55,4.7,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 7', XB=4.85,5.0,3.2,5.5,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 8', XB=5.15,5.3,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 9', XB=5.45,5.6,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 10', XB=5.75,5.9,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 11', XB=6.05,6.2,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 12', XB=6.35,6.5,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 13', XB=6.65,6.8,3.2,5.6,0.05,0.2, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Parede - Q/C', XB=3.0,3.2,6.8,9.8,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - Q/WC', XB=3.2,6.8,6.8,7.0,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - L/C', XB=0.2,3.0,8.5,8.7,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - WC/S', XB=4.8,6.8,5.6,5.8,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - WC/S 2', XB=4.6,4.8,5.6,6.8,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - Cozinha A', XB=0.2,3.0,4.5,4.7,0.0,1.5, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - Q/C', XB=7.6,10.6,14.2,14.4,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - Q/WC', XB=10.4,10.6,10.6,14.2,0.0,2.8,
 SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - L/C', XB=8.7,8.9,14.4,17.2,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - WC/S', XB=11.6,11.8,10.6,12.6,0.0,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - WC/S 2', XB=10.6,11.8,12.6,12.8,0.0,2.8,
 SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - Cozinha A', XB=12.7,12.9,14.4,17.2,0.0,1.5,
 SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Carga - Cozinha 1', XB=2.4,2.8,4.7,8.5,4.4,4.8, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 1', XB=5.2,5.6,7.0,9.8,4.4,4.8, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Quarto 2', XB=6.0,6.4,7.0,9.8,4.4,4.8, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 1', XB=5.2,5.6,3.2,5.6,4.4,4.8, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 2', XB=6.0,6.4,3.2,5.6,4.4,4.8, BULK_DENSITY=369.6,
 SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Parede - Q/C', XB=3.0,3.2,6.8,9.8,2.8,5.6, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - Q/WC', XB=3.2,6.8,6.8,7.0,2.8,5.6, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - L/C', XB=0.2,3.0,8.5,8.7,2.8,5.6, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - WC/S', XB=4.8,6.8,5.6,5.8,2.8,5.6, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - WC/S 2', XB=4.6,4.8,5.6,6.8,2.8,5.6, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - Cozinha A', XB=0.2,3.0,4.5,4.7,2.8,4.3, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - Q/C', XB=7.6,10.6,14.2,14.4,2.8,5.6, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - Q/WC', XB=10.4,10.6,10.6,14.2,2.8,5.6,
 SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - L/C', XB=8.7,8.9,14.4,17.2,2.8,5.6, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - WC/S', XB=11.6,11.8,10.6,12.6,2.8,5.6, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - WC/S 2', XB=10.6,11.8,12.6,12.8,2.8,5.6,
 SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Parede - Cozinha A', XB=12.7,12.9,14.4,17.2,2.8,4.3,
 SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=3.2,6.8,9.8,10.0,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,6.8,9.8,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.2,4.4,8.8,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=2.4,3.2,2.8,3.2,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=3.2,6.8,2.8,3.2,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,3.2,5.6,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.2,8.8,9.8,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,3.2,9.8,10.0,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,5.6,6.8,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.2,3.2,4.4,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,2.4,2.8,3.2,0.0,0.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.2,3.2,9.8,0.8,1.6, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,6.8,2.8,3.2,0.8,1.6, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,6.8,9.8,10.0,0.8,1.6, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,3.2,9.8,0.8,1.6, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,6.8,2.8,3.2,1.6,6.4, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,6.8,9.6,10.0,1.6,6.4, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=0.0,0.0,3.2,9.6,1.6,6.4, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,6.8,3.2,9.6,1.6,6.4, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=6.8,7.2,2.8,10.0,0.0,6.4, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=7.2,7.6,10.4,17.2,0.0,6.4, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=7.2,14.4,10.0,10.4,0.0,6.4, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=7.2,14.4,17.2,17.6,0.0,6.4, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Paredes Externas', XB=14.0,14.4,10.4,17.2,0.0,6.4, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Carga - Cozinha 1', XB=8.8,12.8,14.8,15.2,1.6,2.0, BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Cozinha 1', XB=8.8,12.8,14.8,15.2,4.4,4.8, BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Quarto 1', XB=7.6,10.4,12.0,12.4,1.6,2.0, BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Quarto 1', XB=7.6,10.4,12.0,12.4,4.4,4.8, BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Quarto 2', XB=7.6,10.4,11.2,11.6,1.6,2.0, BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Quarto 2', XB=7.6,10.4,11.2,11.6,4.4,4.8, BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Sala 1', XB=11.6,14.0,12.0,12.4,1.6,2.0, BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Sala 1', XB=11.6,14.0,12.0,12.4,4.4,4.8, BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/
 &OBST ID='Carga - Sala 2', XB=11.6,14.0,11.2,11.6,1.6,2.0, BULK_DENSITY=369.6, SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Carga - Sala 2', XB=11.6,14.0,11.2,11.6,4.4,4.8, BULK_DENSITY=369.6,
SURF_ID='Wood'/

&OBST ID='Piso', XB=0.0,6.8,2.8,10.0,2.8,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Piso', XB=6.8,7.2,2.8,10.0,2.8,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Piso', XB=7.2,16.0,10.0,17.6,2.8,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Piso', XB=0.0,7.2,1.6,2.8,2.8,2.8, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Varanda', XB=0.0,7.2,1.6,2.8,5.6,6.0, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Varanda', XB=14.4,16.0,10.0,17.6,5.6,6.0, SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Teto', XB=0.0,6.8,3.2,9.6,5.6,6.0, COLOR='INVISIBLE',
SURF_ID='ADIABATIC'/

&OBST ID='Teto', XB=7.6,14.0,10.4,17.2,5.6,6.0, COLOR='INVISIBLE',
SURF_ID='ADIABATIC'/

&HOLE ID='Porta - Quarto', XB=3.3,4.1,6.795,7.0,-0.005,2.1/

&HOLE ID='Porta - WC', XB=4.6,4.8,5.95,6.75,-0.01,2.1/

&HOLE ID='Porta - Lavanderia', XB=2.1,2.9,8.5,8.7,-0.005,2.1/

&HOLE ID='Porta - Sacada', XB=3.0,5.0,2.4,3.2,-0.005,2.5/

&HOLE ID='Janela - Sala', XB=6.4,7.6,3.5,5.3,1.5,2.5/

&HOLE ID='Janela - Quarto', XB=6.4,7.6,7.4,9.4,1.5,2.5/

&HOLE ID='Janela - WC', XB=6.4,7.6,6.05,6.55,2.0,2.5/

&HOLE ID='Porta - Quarto', XB=10.4,10.6,13.3,14.1,-0.04,2.1/

&HOLE ID='Porta - WC', XB=10.65,11.45,12.6,12.8,-0.04,2.1/

&HOLE ID='Porta - Lavanderia', XB=8.7,8.9,14.5,15.3,-0.04,2.1/

&HOLE ID='Porta - Sacada', XB=14.2,15.0,12.4,14.4,-0.04,2.5/

&HOLE ID='Janela - Sala', XB=12.1,13.9,9.8,11.0,1.5,2.5/

&HOLE ID='Janela - Quarto', XB=8.0,10.0,9.8,11.0,1.5,2.5/

&HOLE ID='Janela - WC', XB=10.85,11.35,9.8,11.0,2.0,2.5/

&HOLE ID='Porta - Quarto', XB=3.3,4.1,6.8,7.0,3.0,5.1/

&HOLE ID='Porta - WC', XB=4.6,4.8,5.95,6.75,3.0,5.1/

&HOLE ID='Porta - Lavanderia', XB=2.1,2.9,8.5,8.7,3.0,5.1/

&HOLE ID='Porta - Sacada', XB=3.0,5.0,2.4,3.2,3.0,5.5/

&HOLE ID='Janela - Sala', XB=6.4,7.6,3.5,5.3,4.5,5.5/

&HOLE ID='Janela - Quarto', XB=6.4,7.6,7.4,9.4,4.5,5.5/

&HOLE ID='Janela - WC', XB=6.4,7.6,6.05,6.55,5.0,5.5/

&HOLE ID='Porta - Quarto', XB=10.4,10.6,13.3,14.1,3.0,5.1/
 &HOLE ID='Porta - WC', XB=10.65,11.45,12.6,12.8,3.0,5.1/
 &HOLE ID='Porta - Lavanderia', XB=8.7,8.9,14.5,15.3,3.0,5.1/
 &HOLE ID='Porta - Sacada', XB=14.2,15.0,12.4,14.4,3.0,5.5/
 &HOLE ID='Janela - Sala', XB=12.1,13.9,9.8,11.0,4.5,5.5/
 &HOLE ID='Janela - Quarto', XB=8.0,10.0,9.8,11.0,4.5,5.5/
 &HOLE ID='Janela - WC', XB=10.85,11.35,9.8,11.0,5.0,5.5/

&VENT ID='Parede 1', SURF_ID='ADIABATIC', XB=0.0,0.0,2.8,10.0,0.0,6.4/
 &VENT ID='Parede 2', SURF_ID='ADIABATIC', XB=0.0,6.8,10.0,10.0,0.0,6.4/
 &VENT ID='Externo Lateral 1', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,0.0,-0.4,2.8,0.0,6.4/
 &VENT ID='Externo Lateral 2', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,16.8,-0.4,-0.4,0.0,6.4/
 &VENT ID='Externo Lateral 3', SURF_ID='OPEN', XB=16.8,16.8,-0.4,18.8,0.0,6.4/
 &VENT ID='Externo Lateral 4', SURF_ID='OPEN', XB=6.8,16.8,18.8,18.8,0.0,6.4/
 &VENT ID='Externo Lateral 5', SURF_ID='OPEN', XB=6.8,6.8,10.2,18.8,0.0,6.4/
 &VENT ID='Externo Fundo 1', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,7.2,-0.4,1.5,0.0,0.0/
 &VENT ID='Externo Fundo 2', SURF_ID='OPEN', XB=7.2,16.8,-0.4,10.2,0.0,0.0/
 &VENT ID='Externo Fundo 3', SURF_ID='OPEN', XB=15.9,16.8,10.2,18.8,0.0,0.0/
 &VENT ID='Externo Fundo 4', SURF_ID='OPEN', XB=6.8,15.9,17.6,18.8,0.0,0.0/
 &VENT ID='Externo Fundo 5', SURF_ID='OPEN', XB=6.8,7.2,10.2,17.6,0.0,0.0/
 &VENT ID='Externo Topo 1', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,16.8,-0.4,2.8,6.4,6.4/
 &VENT ID='Externo Topo 2', SURF_ID='OPEN', XB=0.0,16.8,2.8,10.2,6.4,6.4/
 &VENT ID='Externo Topo 3', SURF_ID='OPEN', XB=6.8,16.8,10.2,18.8,6.4,6.4/
 &VENT ID='Ignitores', SURF_ID='Heat Flux', XB=0.0,7.0,3.0,10.0,0.0,0.0/
 &VENT ID='Piso', SURF_ID='ADIABATIC', XB=0.0,7.2,1.5,3.0,0.0,0.0/
 &VENT ID='Piso T2', SURF_ID='ADIABATIC', XB=7.2,15.9,10.2,17.6,0.0,0.0/

&BNDF QUANTITY='BURNING RATE'/
 &BNDF QUANTITY='CONVECTIVE HEAT FLUX'/
 &BNDF QUANTITY='NET HEAT FLUX'/
 &BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX'/
 &BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=4.0/
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBX=4.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=8.8/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=12.8/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=8.4/
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBY=8.4/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=6.3/
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBY=6.3/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=4.4/
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBY=4.4/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='HRRPUV', PBZ=2.0/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBZ=4.6/

&TAIL /

ANEXO A – O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

4.2 – O Método dos Volumes Finitos

Existem duas maneiras de se obter as equações aproximadas no método dos volumes finitos. A primeira é a realização de balanços da propriedade em questão nos volumes elementares, ou volumes finitos, e a segunda é, partindo-se da equação diferencial na forma conservativa, integrá-la sobre o volume elementar, no espaço e no tempo. Logicamente os processos são equivalentes, pois basta lembrar que para deduzir as equações diferenciais é necessário primeiro realizar um balanço em um volume infinitesimal, fazendo-se, em seguida, o processo de limites para obter a equação diferencial. Para ilustrar estes processos, considere o volume elementar bidimensional mostrado na Fig. 4.1. Nosso interesse, neste momento, é obter a equação diferencial que representa a conservação de massa. O balanço de massa no volume elementar mostrado na figura, para regime permanente, é dado por

$$\rho u \Delta y|_e - \rho u \Delta y|_w + \rho v \Delta x|_n - \rho v \Delta x|_s = 0 \quad (4.1)$$

Fig. 4.1 - Balanço de massa no volume finito.

As letras minúsculas *e*, *w*, *n* e *s* que aparecem na Fig. 4.1 representam, respectivamente, os pontos cardeais este, oeste, norte e sul e é a nomenclatura usada para identificar as faces do volume de controle na discretização numérica.

Dividindo a Eq. (4.1) por, $\Delta x \Delta y$ encontramos

$$\frac{\rho u|_e - \rho u|_w}{\Delta x} + \frac{\rho v|_n - \rho v|_s}{\Delta y} = 0 \quad (4.2)$$

* Forma conservativa ou forma divergente é aquela em que, na equação diferencial, os fluxos aparecem dentro do sinal da derivada. Neste caso, ρu e ρv representam os fluxos de massa por unidade de área.

Que, após a aplicação do limite, nos dá a forma diferencial conservativa da equação de conservação de massa,

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (4.3)$$

A Eq. (4.3) está na forma conservativa e queremos agora obter a sua aproximação numérica através da integração da mesma no volume elementar, como é a prática do modelo dos volumes finitos. Realizando a integração sobre o volume mostrado na Fig. 4.1, obtém-se

$$\int_w^e \int_s^n \left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) \right] dx dy = 0 \quad (4.4)$$

$$\int_s^n [\rho u|_e - \rho u|_w] dy + \int_w^e [\rho v|_n - \rho v|_s] dx = 0 \quad (4.5)$$

Considerando que o fluxo da massa avaliado no meio da face do volume de controle representa a média da variação na face, podemos escrever

$$\rho u \Delta y|_e - \rho u \Delta y|_w + \rho v \Delta x|_n - \rho v \Delta x|_s = 0 \quad (4.6)$$

Que é exatamente a Eq. (4.1). É comum na literatura numérica escrever a Eq. (4.6) como

$$\dot{m}_e - \dot{m}_w + \dot{m}_n - \dot{m}_s = 0 \quad (4.7)$$

Esta equação, ou a Eq. (4.1), é a equação aproximada que vale para o volume P . Portanto, realizar a integração da forma conservativa da equação diferencial ou fazer o balanço são procedimentos equivalentes. Realizando a integração para todos os volumes elementares, obtemos o sistema de equações algébricas.

A preferência em se obter as equações aproximadas integrando-se a equação diferencial vem do fato de que nem todos os balanços são fáceis de deduzir como foi o da conservação da massa. Um balanço de quantidade de movimento, por exemplo, requer a identificação e somatório de todas as tensões atuantes no volume de controle. Para volumes de controle irregulares, não é uma tarefa fácil.

A seguir, o problema da condução unidimensional transiente é analisado usando volumes finitos.

ANEXO B – CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

4.5 – Condições de Contorno

A Eq.(4.25), que é a equação aproximada para um volume elementar genérico, foi deduzida para um volume interno. Todos os outros volumes internos possuem equações aproximadas idênticas. Para se obter o sistema de equações algébricas completo é também necessário obter as equações para os volumes que estão na fronteira. Existem diversas formas de aplicação das condições de contorno. Uma delas é criar uma malha na qual o ponto central do volume de controle fique sobre a fronteira [100]. Este procedimento dá origem a meio volume de controle perto da fronteira e volumes internos inteiros, conforme pode ser visto na Fig. 4.5.

Dois problemas aparecem com este procedimento. O primeiro deles é a não-uniformidade dos volumes. Para problemas unidimensionais isto não se traduz em maiores dificuldades, pois temos apenas dois meios-volumes. Entretanto, para problemas bidimensionais e tridimensionais teremos volumes inteiros, meios-volumes, quarto de volumes e oitavo de volumes. Em uma estrutura computacional mais geral, este fato traz problemas para uniformidade das sub-rotinas de cálculo dos coeficientes. O segundo problema aparece quando a temperatura de fronteira é conhecida, isto é, T_f é dado do problema. Neste caso, a aparente vantagem em não ser necessário criar uma equação para o volume de fronteira, uma vez que T_f é conhecida, traduz-se na não-observância dos balanços de conservação, pois para os meios-volumes da fronteira, a conservação da energia (no caso deste problema de condução) não estará sendo observada. Em problema bidimensional/tridimensional teremos toda uma faixa de volumes de controle na fronteira não respeitando os princípios de conservação, conforme pode ser visto na Fig. 4.6 para a situação 2D.

Fig. 4.5 - Discretização com meio-volume na fronteira.

A seguir, dois procedimentos que respeitam a conservação para todos os volumes são apresentados. O segundo deles é o recomendado por ter mais consistência física e generalidade.

Fig. 4.6 - Discretização bidimensional com meios-volumes na fronteira.

4.5.1 – Volumes Fictícios

Uma das formas de aplicar as condições de contorno é o uso de volumes fictícios, conforme mostra a Fig. 4.7. É uma prática atraente e de fácil aplicação, que usa volumes inteiros para todos os volumes, respeitando, portanto, os princípios de conservação para todo o domínio. Todos os volumes do domínio, inclusive os de fronteira, são interpretados como internos, uma vez que são criados os volumes fictícios. A desvantagem é a criação de novas incógnitas, aumentando o tamanho do sistema linear, situação que vai se agravando quando a dimensão do problema aumenta. Em um problema unidimensional com 1.000 incógnitas teremos apenas dois volumes fictícios, representando, portanto, 0,2% dos volumes. Na situação bidimensional, também com 1.000 incógnitas, em uma malha de 33 x 33, aproximadamente, teremos 132 fictícios, representando 13,2%. Em três dimensões a malha será de 10 x 10 x 10, com 600 volumes fictícios, um aumento expressivo no número de equações do sistema linear. Para uma situação prática comum de uma

malha 3D com 30 x 30 x 30 elementos, teríamos um aumento em torno de 20% no número de equações.

Com criação dos volumes fictícios, deveremos criar as equações para estes volumes em função das condições de contorno existentes. É natural escrever tais equações na mesma forma das equações para os volumes internos, como

$$A_P T_P = A_e T_E + B \quad (4.33)$$

Fig. 4.7 - Condições de contorno com volumes fictícios.

Os diversos tipos de condições de contorno fornecerão diferentes coeficientes para a Eq. (4.33). Para temperatura prescrita, a temperatura da fronteira, T_f , é conhecida e pode ser escrita como

$$T_f = \frac{T_P + T_E}{2} \quad (4.34)$$

que permite, então, determinar as seguintes expressões para os coeficientes da Eq. (4.33):

$$A_P = 1 ; A_e = -1 ; B = 2T_f \quad (4.35)$$

para fluxo prescrito temos a seguinte expressão para o fluxo em função de T_P e T_E :

$$q_f'' = -k_f \frac{T_E + T_P}{2\Delta x_f} \quad (4.36)$$

que, de acordo com a Eq. (4.33), gera os seguintes coeficientes:

$$A_P = 1 ; A_e = 1 ; B = \frac{2q_f''\Delta x_f}{k_f} \quad (4.35)$$

A última espécie de condição de contorno para problemas de condução de calor é a de convecção na interface. Para este caso, devemos igualar o fluxo por condução ao de convecção, na forma

$$h \left(T_\infty - \frac{T_P + T_E}{2} \right) = k_f \frac{T_P - T_E}{2\Delta x_f} \quad (4.38)$$

que, mais uma vez, gera os seguintes coeficientes para a Eq. (4.33)

$$A_P = \frac{h}{2} + \frac{k_f}{2\Delta x_f} ; A_e = \frac{k_f}{2\Delta x_f} - \frac{h}{2} ; B = hT_\infty \quad (4.39)$$

O uso de pontos fictícios é uma boa alternativa, apesar de aumentar o número de equações, apenas para uma discretização ortogonal, onde é possível expressar o fluxo de calor, por exemplo, envolvendo somente um ponto fictício e um ponto interno. Para coordenadas generalizadas, isto não é possível e o procedimento não é, então, recomendado. A seguir, será descrito o método recomendado.

4.5.2 Balanço para os Volumes de Fronteira

O procedimento mais adequado, devido ao seu embasamento físico e à possibilidade de generalização para sistemas coordenados mais complexos, é realizar a integração das equações de conservação também para os volumes de fronteiras, da mesma forma realizada para os volumes internos, respeitando a condição de contorno existente. Desta forma, não existe aumento no número de equações e as condições de contorno ficam embutidas nas equações para os volumes de fronteira. Apesar de este método ser apresentado para o sistema cartesiano de coordenadas em um problema unidimensional, sua aplicação é geral.

Neste procedimento, a discretização do domínio é feita com volumes elementares inteiros. Assim, nunca teremos uma variável sobre a fronteira, sendo sempre necessários realizar os balanços para todos os volumes, independentemente do tipo de condição de contorno. Já foi salientado, anteriormente, que esta prática vem ao encontro dos procedimentos modernos de armazenamento de variáveis nos volumes elementares e permite maior generalização aos programas computacionais. Este fato ficará ainda mais claro na segunda parte deste texto, quando coordenadas generalizadas forem estudadas.

Considere-se a Fig. 4.8, onde o volume de fronteira P é mostrado. O procedimento de obtenção da equação aproximada para o volume P é idêntico aquele usado para os volumes internos, isso é, devemos integrar a equação diferencial no volume. Lembrando que nosso problema é de condução transiente, a integração resulta em

$$\frac{M_P T_P - M_P^0 T_P^0}{\Delta t} = \frac{q_f}{C_P} - \frac{k}{C_P \Delta x} \bigg|_e (T_P - T_E) \quad (4.40)$$

Na obtenção da Eq. (4.40) foi desprezado o termo fonte (sem prejuízo dos objetivos) e considerada a formulação totalmente implícita. Compare-se a Eq. (4.40) com a Eq.

(4.15) para identificar que q_f'' representa a fluxo na fronteira, o qual deve ser equacionado de acordo com a condição de contorno existente. Observe-se, também, que a Eq. (4.40) é exatamente o balanço de energia para o volume de fronteira.

Fig. 4.8 - Discretização unidimensional com volumes inteiros.

Conforme já visto para problemas de condução, três tipos de condições de contorno são possíveis. São eles:

Temperatura prescrita – Neste caso, o valor de q_f'' é dado por

$$q_f'' = k_f \frac{T_f - T_P}{\Delta x_f} \quad (4.41)$$

onde T_f é a temperatura especificada na fronteira.

Fluxo prescrito – nesta situação, o valor de q_f'' deve ser substituído pelo valor prescrito do fluxo. Esta é a condição de contorno natural, uma vez que as equações são obtidas através do balanço dos fluxos nas fronteiras. Então,

$$q_f'' = \text{valor conhecido} \quad (4.42)$$

Convecção – para esta situação física, devemos igualar o calor que chega por convecção com o calor por condução para dentro do volume de fronteira. Desta forma, temos

$$q_f'' = h(T_\infty - T_f) = k \frac{T_f - T_P}{\Delta x_f} \quad (4.43)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção. Isolando T_f da equação anterior e substituindo-a no fluxo (convectivo ou difusivo) dado por uma das duas expressões da Eq. (4.43), encontramos

$$q_f'' = \frac{h}{1 + \frac{h\Delta x_f}{k_f}} (T_\infty - T_P) \quad (4.44)$$

Levando o valor de q_f'' , de acordo com a condição de contorno existente, na Eq. (4.40), encontramos a equação aproximada para o volume de fronteira, na forma

$$A_P T_P = A_e T_E + B \quad (4.45)$$

onde os coeficientes podem ser facilmente deduzidos.

A seguir, a discretização para problemas bi e tridimensionais é realizada.

ANEXO C – PROCEDIMENTO DE SOLUÇÃO – *FIRE DYNAMICS SIMULATOR* TECHNICAL REFERENCE GUIDE VOLUME 1: MATHEMATICAL MODEL

2.7 Solution Procedure

In a given grid cell at the n th time step, we have the density, ρ^n , lumped species mass fractions, Z_α^n , velocity vector, u^n , and the Bernoulli integral, H^n . In addition, for each compartment in the computational domain, we have a background pressure, $\bar{p}^n$. The temperature is found from the equation of state. These variables are advanced in time using an explicit second-order predictor/corrector scheme. The basic procedure is as follows:

Predictor

1. Estimate ρ , Z_α , and $\bar{p}$ at the next time step with an explicit Euler step. The species mass density is estimated by

$$\frac{(\rho Z)_\alpha^* - \rho^n Z_\alpha^n}{\delta t} + \nabla \cdot \rho^n Z_\alpha^n u^n = \nabla \cdot (\rho^n D_\alpha^n \nabla Z_\alpha^n) \quad (2.18)$$

The asterisk denotes a first order accurate estimate at the next time step. Note that only transport is updated at this point; the source term is time-split, as discussed below.

2. Compute the density from $\rho^* = \sum_\alpha (\rho Z_\alpha)^*$ and mass fractions from $Z_\alpha^* = (\rho Z)_\alpha^* / \rho^*$.
3. Compute the temperature, T^* , from the equation of state.
4. Compute the divergence, $(\nabla \cdot u)^*$, from Eq. (2.10) using the estimated thermodynamic quantities. Note that we use the parentheses to emphasize that an estimate of the velocity field, u^* , at the next time step has not been computed yet, only its divergence.
5. Solve the Poisson equation for the pressure term:

$$\nabla^2 H^n = - \frac{(\nabla \cdot u)^* - \nabla \cdot u^n}{\delta t} - \nabla F^n \quad (2.19)$$

6. Estimate the velocity at the next time step.

$$\frac{u^* - u^n}{\delta t} + F^n + \nabla H^n = 0 \quad (2.20)$$

Note that this procedure guarantees that the divergence of the estimated velocity field, $\nabla \cdot u^*$, is identically equal to the divergence that is derived from the estimated thermodynamic quantities, $(\nabla \cdot u)^*$, in Step 4.

7. Check that the time step, δt , satisfies the stability condition (see Sec. 4.5). If the time step is too large, it is reduced so that it satisfies the stability constraint and the procedure returns to the beginning of the time step. If the stability criterion is satisfied, the procedure continues to the corrector step.

Corrector

1. Correct the transported species mass densities at the next time step.

$$\frac{(\rho Z_\alpha)^{**} - \frac{1}{2}(\rho^n Z_\alpha^n + \rho^* Z_\alpha^*)}{\delta t/2} + \nabla \cdot \rho^* Z_\alpha^* u^* = \nabla \cdot (\rho^* D_\alpha^+ \nabla Z_\alpha^*) \quad (2.21)$$

The background pressure is corrected similarly. The double asterisk ()^{**} indicates a value that has been corrected for transport but has not yet been updated from chemistry or bulk mass source terms.

2. Compute the density $\rho^{**} = \sum_\alpha (\rho Z_\alpha)^{**}$ and mass fractions $Z_\alpha^{**} = (\rho Z_\alpha)^{**} / \rho^{**}$.
3. Compute the temperature, T^{**} , from the equation of state.
4. *Time splitting for mass source terms.* After the corrector step for the transport scheme, source terms are applied to the scalars (for both chemical reactions and Lagrangian particles). The source terms are evaluated using the results from the corrected scalar transport scheme. For example,

$$\frac{(\rho Z_\alpha)^{n+1}_{ijk} - (\rho Z_\alpha)^{**}_{ijk}}{\delta t} = \dot{m}'_{\alpha,ijk}(Z^{**}, T^{**}) \quad (2.22)$$

5. With the updated density and composition, compute the final temperature, T^{n+1} , from the equation of state.
6. Compute the divergence, $(\nabla \cdot u)^{n+1}$, from the corrected thermodynamic quantities.
7. Compute the pressure using the estimated quantities.

$$\nabla^2 H^* = - \left[\frac{(\nabla \cdot u)^{n+1} - \frac{1}{2}(\nabla \cdot u^* + \nabla \cdot u^n)}{\delta t/2} \right] - \nabla \cdot F^* \quad (2.23)$$

8. Correct the velocity at the next time step.

$$\frac{u^{n+1} - \frac{1}{2}(u^* + u^n)}{\delta t/2} + F^* + \nabla H^* = 0 \quad (2.24)$$

Note again that the divergence of the corrected velocity field is identically equal to the divergence that was computed in Step 6.