



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**COMPARTIMENTAÇÃO DE EDIFICAÇÕES
EM CASO DE INCÊNDIO: UMA ANÁLISE COMPUTACIONAL
DAS LEGISLAÇÕES**

Karoline Bertol de Oliveira e Souza

Lajeado, junho de 2019

Karoline Bertol de Oliveira e Souza

**COMPARTIMENTAÇÃO DE EDIFICAÇÕES
EM CASO DE INCÊNDIO: UMA ANÁLISE COMPUTACIONAL
DAS LEGISLAÇÕES**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari Univates, como parte da exigência para obtenção do título de bacharela em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa Ma. Rebeca Jéssica Schmitz

Lajeado, junho de 2019

Karoline Bertol de Oliveira e Souza

**COMPARTIMENTAÇÃO DE EDIFICAÇÕES
EM CASO DE INCÊNDIO: UMA ANÁLISE COMPUTACIONAL
DAS LEGISLAÇÕES**

Profa. Ma. Rebeca Jéssica Schmitz – orientadora
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Profa. Dra. Betina Hansen
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Esp. Paulo Ricardo Theves

Lajeado, 03 julho de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha orientadora Profa. Ma. Rebeca Jéssica Schmitz por ter guiado os passos deste trabalho, sempre atenciosa e disposta a ajudar no desenvolvimento do mesmo.

À Thunderhead Engineering pelo fornecimento e renovação da licença educacional do Pyrosim, extremamente necessário para a realização do presente estudo.

Agradeço de forma especial ao meu querido e amado Fernando, pelas inúmeras vezes em que me auxiliou, me compreendeu e me incentivou nos momentos de desânimo, pela paciência, carinho e dedicação.

Aos amigos e colegas pelo apoio nas horas difíceis.

Aos meus pais por todo o apoio em minha jornada e confiança na minha capacidade de superação em todas as fases da minha vida.

E ao Marcos Dahlem pelo auxílio ao final deste, com a solução para a determinação dos resultados.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis” José de Alencar

RESUMO

Os incêndios são recorrentes nas edificações localizadas nas cidades mais urbanizadas, e uma das formas de reduzir os danos causados por estes sinistros é a compartimentação de ambientes, esta medida protetiva muitas vezes obrigatória para edificações de grandes alturas, outras dimensionada para a redução de sistemas, como isolamento de risco. A compartimentação vertical externa prevê afastamento vertical entre as aberturas, com ou sem marquises como barreira física, limitando assim a propagação do fogo aos pavimentos consecutivos superiores. Esta monografia visou analisar se os distanciamentos previstos nas atuais legislações estaduais garantem a estanqueidade da edificação ao fogo verticalmente, e apresentar 12 casos de análise que são aplicáveis a todas as edificações, propondo uma maior segurança contra incêndio das mesmas. Variáveis de carga de incêndio, alturas de pé direito, bem como as janelas estreitas e largas, foram alteradas para verificar os corretos dimensionamentos para a compartimentação externa sem abas horizontais, modelando edificações genéricas em um *software* de análise específico para incêndios. Foi definido o programa Pyrosim para a modelagem das estruturas, o qual possui uma interface mais simples para a entrada de dados e utiliza o FDS como ferramenta de análise computacional e visualização gráfica dos resultados. As temperaturas internas do incêndio, bem como os locais passíveis de sinistro, foram analisadas e verificou-se que as modelagens não atenderam as legislações estaduais atuais para os dois distanciamentos analisados nos modelos de média e alta carga de incêndio, com temperaturas superiores em até 60% do valor de análise, e há diferenças tanto na temperatura externa quanto no tempo de *flashover* do incêndio com a alteração das dimensões de pé direito das edificações. As edificações de cargas de incêndio até 300 MJ/m² podem ser consideradas compartimentadas até nos distanciamentos de 1,2 metros.

Palavras-chave: Compartimentação Vertical; Incêndio; Modelagem Computacional; Pyrosim; FDS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Comportamento do incêndio.....	22
Figura 02 – Curva padrão de incêndio.....	23
Figura 03 – Modelo de Compartimentação Horizontal.....	29
Figura 04 – Modelo de Compartimentação Vertical.....	30
Figura 05 – Modelo de Compartimentação Vertical.....	31
Figura 06 – Modelo de Compartimentação Vertical com Marquises.....	32
Figura 07 – Resistência dos materiais x temperatura.....	34
Figura 08 – Etapas Metodológicas.....	43
Figura 09– Modelos analisados para pé direito baixo e janelas estreitas.....	46
Figura 10– Modelos analisados para pé direito alto e janelas largas.....	46
Figura 11 - Curva temperatura-tempo de incêndios com variação de carga de incêndio e ventilação.....	48
Figura 12 – Modelos testes de dimensões 3x3 m.....	49
Figura 13 – Modelos testes de dimensões 10x10 m.....	50
Figura 14 – Modelos testes de dimensões 25x25 m.....	50

Figura 15- Dados de Reação da simulação.....	56
Figura 16 – Testes de ignição.....	57
Figura 17 – Comparativo Gráfico original e suavizado.....	60
Figura 18 – Dinâmica do incêndio no Pyrosim.....	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Valores de termopares para 300 MJ.....	64
Gráfico 02 – Valores de termopares para 1200 MJ.....	66
Gráfico 03 – Valores de termopares para 4000 MJ.....	67
Gráfico 04 – Valores de termopares para 4000 MJ e pé direito alto.....	68
Gráfico 05 – Temperatura interna pé direito baixo e distanciamento de 1,2 m.....	69
Gráfico 06– Temperatura interna pé direito baixo e distanciamento de 3,0 m.....	70
Gráfico 07 – Temperatura interna pé direito alto e distanciamento de 3,0 m.....	71
Gráfico 08 – Temperatura interna pé direito alto e distanciamento de 3,0 m.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Classificação das edificações quanto à carga de incêndio.....	39
Tabela 02– Modelos analisados.....	45
Tabela 03 – Característica da Madeira.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CBMSP - Corpo de Bombeiros Militar de São Paulo

CBMRS - Corpo de Bombeiros Militar do Rio Grande do Sul

FDS - *Fire Dinamic Simulator*

ISO - *International Organization for Standardization*

IT - Instrução Técnica

MJ - Megajoule

NBR - Norma Brasileira

NIST - Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos da América

PPCI - Plano de Prevenção e Proteção Contra Incêndio

RT – Resolução Técnica

TRRF - Tempo Requerido de Reação ao Fogo TRRF

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Tema.....	13
1.2 Objetivos.....	13
1.2.1 Objetivo geral.....	13
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 Justificativa	14
1.4 Delimitação do tema.....	15
1.5 Estrutura do trabalho.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Incêndio.....	18
2.2 Propagação do fogo.....	19
2.3 Fases do incêndio.....	20
2.3.1 Ignição.....	20
2.3.2 Pré- <i>flashover</i> ou fase de aquecimento.....	20
2.3.3 Pós- <i>flashover</i> ou resfriamento.....	21
2.4 Curva de temperatura x tempo.....	22
2.5 Normatização de segurança contra Incêndios.....	24
2.6 Medidas de proteção.....	26
2.7 Compartimentação.....	27
2.7.1 Compartimentação horizontal.....	28
2.7.2 Compartimentação vertical.....	29
2.7.3 Segurança estrutural.....	33
2.7.4 Estruturas em situação de incêndio	33
2.8 Critérios de Resistência ao fogo.....	35
2.8.1 Isolamento Térmico.....	35
2.8.2 Estanqueidade.....	36
2.8.3 Resistência Mecânica.....	36
2.9 Modelagem computacional.....	36
2.9.1 Modelagem pelo método dos elementos finitos.....	37
2.9.2 Carga de incêndio.....	38
2.9.3 Aberturas.....	39
2.9.4 Fire Dinamic Sistem – FDS.....	40
2.9.5 Pyrosim.....	42

3 PROCEDIMENTOS METOLÓGICOS.....	43
3.1 Desenvolvimento dos modelos de análise.....	44
3.1.1 Determinação das dimensões de pés-direitos e janelas.....	44
3.1.2 Determinação da área de ventilação.....	47
3.1.3 Determinação das dimensões em planta.....	49
3.2 Desenvolvimento do modelo computacional.....	51
3.2.1 Estrutura inerte.....	52
3.2.2 Malhas.....	52
3.2.3 Ventilação Externa.....	53
3.2.4 Parâmetros da Madeira.....	53
3.2.4.1 Autoignição da madeira.....	54
3.2.4.2 Cargas de incêndio.....	55
3.2.5 Reação.....	56
3.2.6 Ignição.....	57
3.2.7 Tempo de simulação.....	58
3.3 Saída de dados e análise.....	59
3.4 Tratamento dos Resultados	59
3.5 Critérios para análise da compartimentação.....	60
 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	 62
4.1 Dinâmica do incêndio.....	62
4.2 Resultados para Baixa Carga de Incêndio.....	63
4.3 Resultados para Média Carga de Incêndio.....	65
4.4 Resultados para Alta Carga de Incêndio.....	67
4.5 Comparativo entre cargas de incêndio.....	69
 5 CONCLUSÃO.....	 73
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 75
 APÊNDICE A.....	 78

1. INTRODUÇÃO

Os incêndios não só ocasionam mortes, como também afetam as pessoas neles envolvidas, causando mudanças comportamentais e traumas psicológicos. A segurança contra incêndio não acompanhou o desenvolvimento do país nos últimos 200 anos, conforme Seito et al. (2008), pois trata-se de uma área muito mais complexa de conhecimento, além de estar presente em todas as áreas e todos os lugares. Atualmente, de acordo com Brentano (2015), há um grande avanço e desenvolvimento do país, que em escala continental e sem recursos, força um ritmo muito mais lento nas exigências de proteção contra incêndios.

Segundo Seito et al. (2008), o alastramento do incêndio pode ser restrito à um único local se a edificação for subdividida em compartimentos separados por elementos resistentes ao fogo e fumaça. A compartimentação é a divisão física vertical e horizontal de uma ou mais edificações por meio de barreiras corta-fogo com o objetivo de confinar o incêndio em um único ambiente, limitando sua propagação, bem como o calor gerado, os gases e fumaça resultantes. É a medida de proteção mais econômica, pois na maioria das edificações são utilizados os elementos estruturais e só depende de um bom projeto para se fazer valer, gerando *layouts* de edificações mais eficientes na contenção de incêndios (BRENTANO, 2015).

Algumas das proteções contra incêndio presentes em uma edificação são constituídas por sistemas incorporados a ela, os quais não necessitam de nenhum tipo de acionamento para atuar e atendem normalmente aos usuários em situação normal, porém, em situação de incêndio possuem um comportamento especial no qual retardam o alastramento do fogo, impedem grandes emissões de fumaça, ou até permitem a saída rápida e segura dos ocupantes.

A compartimentação é uma proteção importante que impede o crescimento do incêndio atuando como uma barreira física resistente ao fogo (SEITO et al., 2008).

Na visão de Rodrigues (2009) a compartimentação vertical externa prevê afastamento vertical entre as janelas e aberturas, ou ainda a construção de abas horizontais entre estas aberturas, limitando assim a propagação do fogo aos pavimentos consecutivos superiores.

Neste trabalho será abordada a análise dos distanciamentos das legislações do Rio Grande do Sul para as compartimentações das fachadas das edificações e verificados em análises computacionais.

1.1 Tema

O trabalho trata do estudo da compartimentação vertical externa de uma edificação em concreto armado de acordo com a IT CBMRS 09/2018 e Resolução Técnica de Transição CBMRS de 2017, com a verificação dos distanciamentos previstos nestas legislações em um programa computacional de modelagem, garantido a estanqueidade da edificação.

1.2 Objetivos

Os objetivos do trabalho exercem papéis mediadores entre o tema central e a hipótese a ser confirmada ou não durante a execução do estudo. A seguir serão apresentados os objetivos geral e específicos do presente trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa é investigar as prescrições de normas técnicas quanto à compartimentação vertical externa de edificações na segurança contra incêndios.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- a) apresentar casos hipotéticos em que se possa analisar as questões de compartimentação vertical externa conforme as exigências normativas;
- b) desenvolver um modelo computacional base adequado às análises utilizando o *software* Pyrosim¹ para modelagem e o *software* FDS² (*Fire Dinamic Simulator*) para a análise do estudo.

1.3 Justificativa

Conforme Macintyre (2017), existe uma tendência da população de desprezar a possibilidade da ocorrência de sinistros, o que tem por efeito uma justificativa infundada na economia com a execução de instalações inadequadas e o não atendimento às exigências arquitetônicas e construtivas, que podem ter como consequência catástrofes e a perda de vidas.

Como caracteriza Silva (2009) apud Ruschel (2011), a cada dois minutos ocorre um incêndio no Brasil, e pelo menos uma pessoa morre por hora, decorrente de incêndios, gerando perdas inestimáveis e incontáveis prejuízos materiais.

Apesar de a probabilidade de ocorrência dos incêndios ser baixa comparada ao número de edificações existentes, as consequências podem ser catastróficas, portanto, há exigências legais e normativas de resistência ao fogo para as estruturas (MELÃO; SILVA, 2014).

¹ PyroSim é uma interface gráfica do usuário para o Fire Dynamics Simulator (FDS), criado e comercializado pela Thunderhead Engineering Consultants, Inc desde 2006, na qual sua última versão utilizada é 2018.2.0730.

² O Fire Dynamics Simulator é um modelo computacional de dinâmica de fluidos do fluxo de fluido acionado por fogo, com linguagem C de programação. É um software livre desenvolvido pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST).

Algumas medidas devem ser consideradas desde o momento de iniciação de um projeto arquitetônico, onde se elaboram as especificações dos materiais, a previsão das saídas de emergência, dispositivos de segurança e o confinamento do incêndio pelo isolamento de áreas, desta forma, visando reduzir prejuízos e salvaguardando vidas (MACINTYRE, 2017).

Segundo Brentano (2015) a compartimentação de edificações é uma das formas mais econômicas e eficazes de se proteger uma edificação, pois o custo é definido já no projeto arquitetônico.

Devido ao alto custo de implantação para as instalações e equipamentos necessários à realização de ensaios experimentais nas estruturas em situação de incêndio, este tipo de pesquisa é praticamente inexistente no Brasil, e bastante escasso no mundo, portanto, uma boa alternativa é o uso de simulações computacionais (RUSCHEL, 2011).

Conforme Rodrigues (2009), a compartimentação não possui ainda uma Norma Brasileira (NBR), apesar de ser exigida em muitos casos e em quase todas as edificações altas, a eficiência deste sistema não consta nos códigos de segurança contra incêndio e pânico, tão pouco há referências científicas sobre o assunto.

Concordando, Costa e Silva (2006), acrescentam que a única norma nacional a qual se refere à compartimentação, apenas define genericamente o termo, não especificando como deve ser empregada a técnica, adicionam ainda que na ausência de uma regulamentação ou norma nacional, Instruções técnicas do Corpo de Bombeiros, bem como Decretos Estaduais devem ser empregados.

1.4 Delimitação do tema

Foi utilizado um programa computacional para modelagem e análise do estudo, portanto o presente trabalho possui sua delimitação na utilização eletrônica da verificação. O presente estudo se baseou na Resolução Técnica de Transição (RTT) do Corpo de Bombeiros do Rio Grande do Sul (CBMRS) em sua última versão de 2017, e como legislação complementar a esta, devido a algumas lacunas, utilizou-se a Instrução Técnica (IT) do Corpo de Bombeiros de São Paulo (CBMSP) nº 09/2018, legislações estas, atualmente vigentes no Estado do Rio Grande do Sul.

Foi analisada uma edificação de concreto armado, por ser uma estrutura bastante resistente à elevação da temperatura e estruturalmente estável quando dimensionada corretamente.

Na modelagem foram utilizados revestimentos incombustíveis e inertes na fachada de acordo com o que preconiza a atual legislação vigente no Estado do Rio Grande do Sul, proveniente do Estado de São Paulo, estes materiais serão selecionados conforme opções programadas do programa Pyrosim a ser utilizado. As cargas de incêndio foram dimensionadas conforme a carga máxima possível em Megajoule (MJ) por metro quadrado de área de cada faixa de risco de incêndio, sendo elas 300 MJ/m² para risco baixo, 1200 MJ/m² para risco médio e 4000 MJ/m² para risco alto, visando criar o pior cenário admissível para o teste das dimensões elencadas como viáveis para compartimentação das unidades.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, sendo que o primeiro capítulo consiste em uma apresentação introdutória ao contexto da engenharia de segurança contra incêndios, bem como sua legislação sobre compartimentação e modelagem computacional. Integra também a proposição do problema, hipótese, objetivos, delimitações e justificativas do trabalho.

O segundo capítulo abrange a revisão de literatura que incide nos conceitos e referenciais que fundamentam a formulação da proposta de comparativo entre a atual legislação de compartimentação de edificações com a análise em um modelo computacional das distâncias mínimas necessárias para o isolamento de riscos de duas unidades, bem como o referencial teórico que abrange o referido tema de engenharia de segurança contra incêndios e modelagem computacional.

O terceiro capítulo minuciosa a metodologia utilizada na elaboração deste estudo. Traz a abordagem do problema, os procedimentos técnicos e planejamento do estudo.

O quarto capítulo do estudo incide na exteriorização dos resultados obtidos com a realização das análises propostas, bem como a discussão dos resultados obtidos necessários para o alcance aos objetivos do estudo.

O quinto capítulo contempla as considerações finais do estudo, sintetizando e confrontando as principais resultantes com as referências tidas como embasamento da pesquisa.

Ao final deste presente trabalho foram apresentadas as referências bibliográficas consultadas para a fundamentação teórica do estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica com abordagem dos conteúdos que fundamentam o tema escolhido para o presente trabalho.

2.1 Incêndio

Os incêndios fazem parte da história de várias cidades ao redor do mundo e, protagonizaram mudanças significativas na urbanização e nas propriedades construtivas das edificações (BRENTANO, 2015).

Silva (2014) disserta que a segurança absoluta contra incêndios é impossível, porém, visa-se minimizar a probabilidade de seu acontecimento por meio de medidas de segurança.

Conforme Seito et al. (2008), excetuando algumas particularidades de clima seco e locais classificados como alto risco de incêndio, como por exemplo a exploração de bacias petrolíferas, geralmente os episódios de incêndios são maiores em locais mais intensamente povoados.

A ocorrência de incêndios e outras formas de sinistros são raros, no entanto ocasionam não só prejuízos financeiros, mas também a ocorrência de mortes e graves lesões corporais aos ocupantes das edificações (MOHAMAD, 2015).

Segundo Silva (2014), a principal causa das mortes em incêndios é a exposição à fumaça, que ocorre logo no início do sinistro, por isso, a rápida desocupação da edificação é primordial para a segurança à vida. A compartimentação da edificação, o rápido alerta à população e as rotas de fuga projetadas adequadamente são fundamentais para atingir este fim.

2.2 Propagação do fogo

O fogo é composto por apenas quatro elementos: comburente, combustível, calor e reação em cadeia, e só acontece se existir um combustível que alcance seus pontos de fulgor e combustão, provocando assim a geração de gases inflamáveis, que ao serem misturados a um comburente, necessitam somente de uma outra fonte qualquer de calor para incendiar, provocando a ignição da reação em cadeia (CAMILLO JUNIOR, 2013).

De acordo com o referido autor, o alastramento do fogo ocorre devido à chama entrar em contato diretamente com outros materiais combustíveis, pois há deslocamento de partículas incandescentes desprendidas de materiais que já se encontram em combustão e pela ação direta do calor. O calor se propaga por três processos diferentes de transmissão, são eles: condução, convecção e irradiação, definidos a seguir.

A condução ocorre quando a transmissão acontece de molécula a molécula, ou corpo a corpo, para que isto ocorra é imperativo que os materiais estejam conectados, passando de corpo para corpo de forma direta. Concordando, Brentano (2015) adiciona que há possibilidade de propagação pelo contato direto das próprias labaredas que passaram por aberturas existentes e inflamam outros materiais presentes no ambiente adjacente, tais como cortinas, móveis, carpetes.

A convecção, para Camilo Junior (2013), é a transmissão do calor que ocorre através de uma massa de ar aquecida em chamas que se desloca, levando consigo calor suficiente para que os demais corpos alcancem seu ponto de combustão, desta forma origina outro foco de fogo. Durante um incêndio, este processo é o responsável pelo seu alastramento.

O fenômeno da irradiação é definido pela transmissão que ocorre por ondas, através do espaço, sem empregar qualquer outro meio material. É o fogo calorífico que irradia o calor,

um bom exemplo é o Sol, pois a transmissão do calor solar para o nosso planeta ocorre desta maneira. Brentano (2015) completa que é a sensação térmica que sentimos em nossa pele quando nos aproximamos do fogo.

2.3 Fases do incêndio

O incêndio pode ser dividido em três fases, são elas: ignição, pré – *flashover* ou fase de aquecimento e pós -*flashover* ou fase de resfriamento, cada uma delas está melhor descrita conforme os itens abaixo.

2.3.1 Ignição

Conforme Castro (2005), este fenômeno é caracterizado pelo início da queima dos materiais no local, e nesta fase a quantidade de material incendiado é substancialmente baixa, desta forma, pouca energia térmica é liberada e não apresenta elevações expressivas de temperatura, porém há um crescimento gradual. O incêndio é de pequena dimensão e não apresenta riscos à vida e a estrutura.

Esta etapa é muito importante, conforme acreditam Coutinho e Corrêa (2016), pois possui as maiores chances de controle do sinistro se forem detectados precocemente.

2.3.2 Pré – *flashover* ou fase de aquecimento

O foco de incêndio pode vir a evoluir e passar da ignição para a fase de inflamação generalizada, muito conhecida como *flashover*, ou seja, inicia-se o alastramento do fogo para os arredores, inflamando uma boa quantidade do material combustível já existente no ambiente, ocorre o aumento da temperatura e o surgimento de fumaça e gases inflamáveis (COUTINHO; CORRÊA, 2016).

Em um local com oxigênio abundante, o *flashover* ocorre em no máximo 20 minutos após a ignição, conforme foi descrito por Mitidieri (2008) apud Coutinho e Corrêa (2016).

De acordo com Souza (2007) apud Coutinho e Corrêa (2016), nessa etapa, o incêndio já atingiu o *flashover* no cômodo de origem, gerando o risco da propagação para as demais unidades da edificação e até mesmo para edificações vizinhas. Dificilmente consegue-se extinguir o fogo, tornando impraticável a sobrevivência no ambiente.

Como descrito por Costa e Silva (2006) há uma mudança súbita no crescimento da temperatura e todo o material presente no local entra em combustão, a temperatura dos gases é superior à 300°C, e o incêndio atinge o pico da curva, onde possui sua temperatura máxima, conforme mostrado no item 2.4 a seguir. No caso de um incêndio compartimentado, a temperatura máxima pode ser superior à 1000°C, afirma o autor.

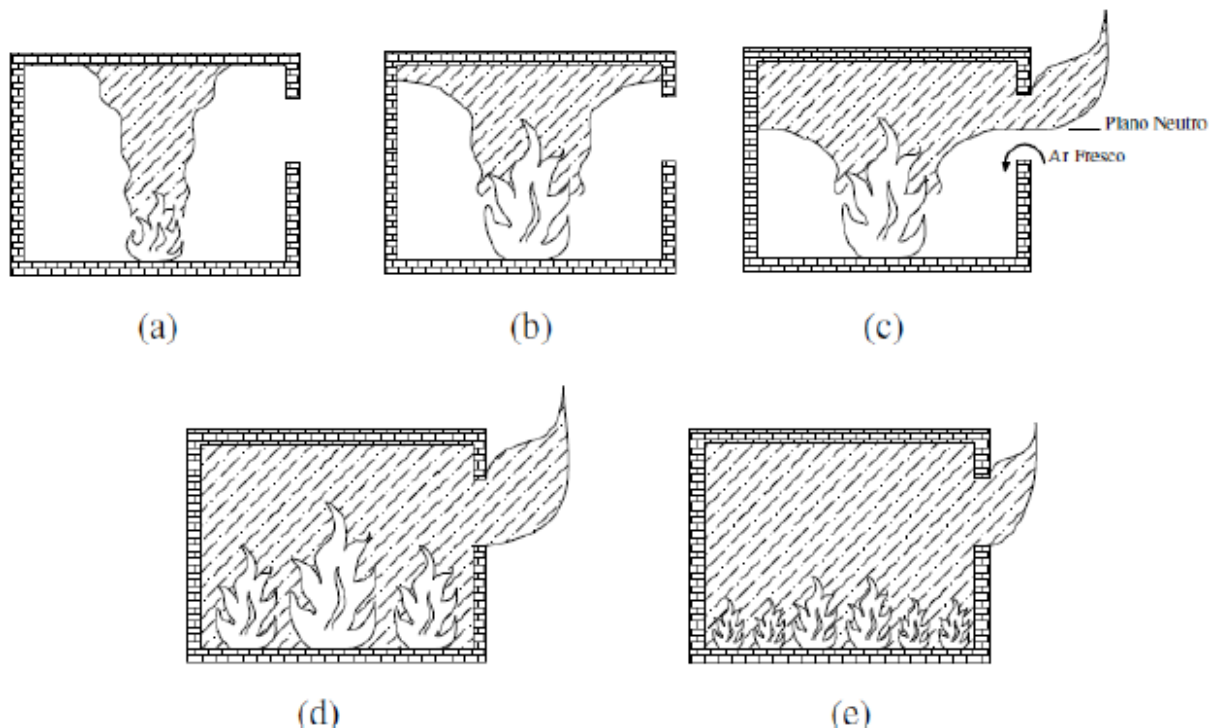
2.3.3 Pós -*flashover* ou resfriamento

Segundo Castro (2005), esta fase é conhecida como a etapa de diminuição da temperatura ou etapa de resfriamento. Com a queima total do material combustível, não haverá mais nenhuma liberação de energia térmica, assim sendo, a redução gradativa da temperatura começa a ocorrer.

Concordando, Costa e Silva (2006) acrescentam que mesmo com a diminuição da temperatura dos gases no ambiente, a temperatura nos elementos estruturais ainda aumentará durante alguns minutos no período de resfriamento.

A Figura 01 representa o comportamento de um incêndio em um ambiente compartimentado, com a evolução do fogo em todas as suas fases, desde sua ignição, representado pela Figura 01.a, passando pela fase de pré-*flashover*, nas imagens 01.b e 01.c, nas quais ainda há entrada de ar externo, o momento caracterizado pela inflamação generalizada do material, na Figura 01.d, e finalmente a fase de resfriamento, onde há o início da extinção do fogo, na última figura.

Figura 01 – Comportamento do incêndio



Fonte: Machado (2015, p. 09).

2.4 Curva de temperatura x tempo

Conforme Castro (2005), o desenho básico de um incêndio é feito por meio de curvas temperatura-tempo, as quais associam o aumento da temperatura em função da duração do incêndio, estimando a temperatura máxima dos gases, e a curva de um incêndio padrão é dada pela Expressão 01:

$$\theta_g = \theta_o + 345 \log \sqrt{8t + 1} \quad (1)$$

Sendo:

t – tempo de incêndio em minutos, desde o início da queima do material combustível;

θ_g - temperatura dos gases em função do tempo;

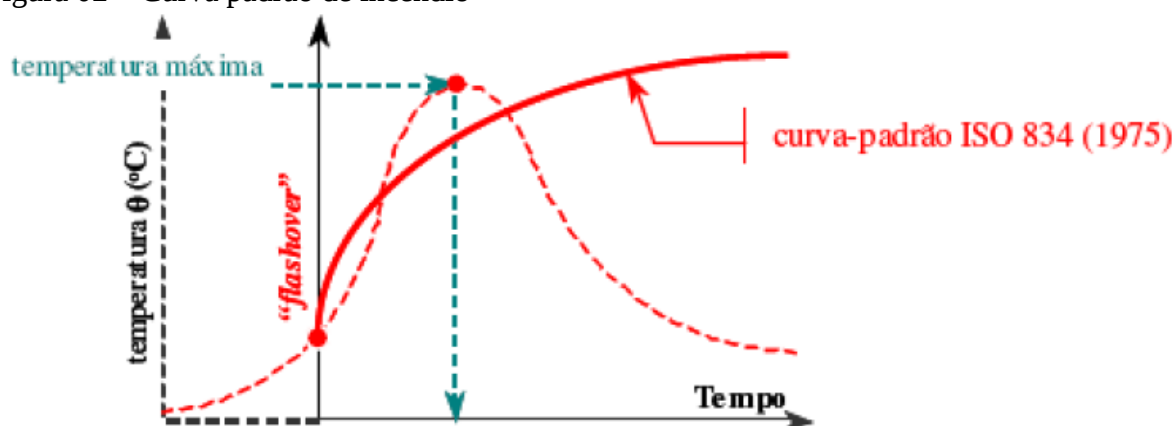
θ_o - temperatura inicial ambiente, usualmente adotada igual a 20 °C.

Esta curva, refere-se à uma padronização definida pela NBR 5628 (ABNT, 2001) e pela ISO 834 (1999) e trata-se de um modelo idealizado para análises experimentais e por mais que não representem a realidade total de um incêndio, no ponto de vista de Costa e Silva (2006), elas facilitam os ensaios dos materiais e elementos construtivos e são indicadores qualitativos da resistência do material em função do aquecimento do incêndio, além de serem internacionalmente recomendadas tanto em normas como em procedimentos de ensaios por sua praticidade.

A intensidade e duração de um incêndio, de acordo com Brentano (2015), dependem da abundância de combustível disponível, sua taxa de queima e o ar disponível para a combustão, podendo ser expressa em um gráfico denominado curva padrão tempo-temperatura. Esta curva foi adotada pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) no ano de 1918 e deste então, vem sendo a base da maioria dos testes de resistência ao fogo de materiais.

A Figura 02 representa a curva padrão de incêndio, conforme mostra a linha contínua desenvolvida pela ISO 834 (1999), e a variação da temperatura de um incêndio real compartimentado representado pela linha tracejada, onde podemos verificar o ponto de *flashover*, que é caracterizado pela inflamação generalizada do ambiente. A temperatura máxima da curva real caracteriza o ponto de mudança entre a fase de aquecimento e a de resfriamento, elencadas no item 2.3 deste presente estudo.

Figura 02 – Curva padrão de incêndio



Fonte: Negriscolo (2011, p. 209).

As curvas de incêndio, especificamente a de incêndio padrão, são exemplos mais sucintos de como o Tempo Requerido de Reação ao Fogo (TRRF) incorpora as muitas variáveis do sistema de modo subjetivo (MAZZONI, 2010).

Machado (2015) acredita que as curvas de incêndio-padrão foram planejadas para experimentos de elementos submetidos a temperaturas elevadas, não levando em consideração qualquer particularidade da compartimentação, portanto, não pode ser considerado igual à um incêndio real.

No estudo de Costa e Silva (2006), quando submetidas a altas temperaturas, as estruturas apresentam mudanças no comportamento, bem como a redução das resistências mecânicas, com o aumento dos esforços solicitantes devido à ação térmica, há uma sobrecarga estrutural e para simular os efeitos causados por estas ações térmicas, é possível caracterizar o aquecimento em modelos matemáticos, associando o tempo com a variação térmica.

2.5 Normatização de segurança contra incêndios

A preocupação com a prevenção dos incêndios deve ser feita na concepção do projeto, juntamente com o estrutural, elétrico, hidráulico e outros tantos necessários para a realização da obra. A cultura de realização do Plano de Prevenção e Proteção Contra Incêndio (PPCI) ao final da execução da edificação deve ser mudada, pois o PPCI deve ser concretizado quando a obra estiver nas fundações, ou se possível antes, pois a primeira licença para o Habite-se é o alvará do Corpo de Bombeiros, 2007.

Até o final da década de 60, no Brasil, a segurança contra incêndio praticamente não possuía nenhum tipo de regulamentação, sendo a única existente, proveniente da área de seguros (CASTRO, 2015).

Silva (2014) concorda, e adiciona que o Corpo de Bombeiros possuía uma certa regulamentação, esta era advinda da área de seguros que indicava a obrigatoriedade de medidas de combate como a instalação de hidrantes e extintores, bem como a sinalização dos mesmos.

A primeira legislação no Brasil, em termos de prevenção de incêndios, ocorreu na cidade de São Paulo, pioneira no assunto, devido os grandes incêndios que ocorreram na

capital nas décadas de 70 e 80, a prefeitura publicou uma semana após o incêndio no edifício Joelma, um decreto que estabelecia a regulamentação para a segurança de edifícios (NEGRISOLO, 2011).

Seito et al. (2008) acreditam que a revisão da legislação deve ser constante, para a atualização ocorrer em função das necessidades sociais da comunidade, bem como da evolução dos equipamentos, devido à tecnologia.

Silva (2014) informa que a legislação no Brasil é estadualizada, sendo de responsabilidade de cada estado elaborar a sua, ou como muitos, basear-se em outras normas, tais como NBR e IT.

Como caracteriza Carvalho Junior (2017), cada Estado da federação possui uma legislação de Segurança Contra Incêndio (SCI) distinta, tornando-se didático transcrever parcialmente algumas IT do Corpo de Bombeiros Militar de São Paulo (CBMSP).

A Resolução Técnica (RT) número 02 do Corpo de Bombeiros Militar do Rio Grande do Sul (CBMRS, 2014, p.19), em seu item 4.273, define prevenção contra incêndios como sendo:

Conjunto de medidas que visam: a evitar o incêndio; a permitir o abandono seguro da população; a impedir a propagação do incêndio; a propiciar meios de controle e extinção do incêndio, além de permitir o acesso do Corpo de Bombeiros.

Após a tragédia ocorrida na madrugada do mês de janeiro de 2013 na Kiss, uma casa noturna em Santa Maria, região central do estado do Rio Grande do Sul, a legislação de prevenção contra incêndios do estado foi questionada, pois datava de 1997 e desde então não havia sofrido maiores atualizações (BRENTANO, 2015).

Devido à necessidade de realizar uma atualização da legislação de prevenção e proteção contra incêndios, foi proposto na Assembleia Legislativa do Rio Grande do Sul o Projeto de Lei Complementar 155/2013 que depois teve a sua aprovação sob o número 14376 (ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, 2013), e recebeu o título popular de Lei Kiss. Com o drama sucedido na Boate Kiss, descreveram a nova legislação anti-incêndios, aumentando intensamente o rigor nas exigências dos sistemas de prevenção e nas medidas obrigatórias de combate.

A normatização a respeito da prevenção e proteção contra incêndio visa tornar os lugares mais protegidos para que, em caso de sinistro, os habitantes possam controlar o fogo com treinamento, antes da chegada do Corpo de Bombeiros, e garantam a saída em segurança dos ocupantes (CAMILLO JUNIOR, 2013). Seito et al. (2008) completam que as regulamentações existem para estabelecer e garantir um atendimento do nível mínimo de segurança.

A nova lei complementar gaúcha foi baseada quase que integralmente na legislação de São Paulo, sendo na prática, uma transcrição adaptada, pois a legislação do Estado de São Paulo é referência para todo o país (BRENTANO, 2015). Concordando, Silva (2014) discursa que a legislação paulista inspirou diversos estados brasileiros acerca da segurança contra incêndio.

Nesta legislação passou a ser exigido o Controle de Materiais de Acabamento e de Revestimento (CMAR) nos imóveis, pela primeira vez no estado gaúcho, e em algumas situações, o controle de fumaça também é uma exigência. Porém, esta lei complementar vem sofrendo constantes atualizações devido às lacunas na legislação inicial (COUTINHO; CORRÊA, 2016).

2.6 Medidas de proteção

As medidas de segurança são um conjunto de sistemas ativos e passivos imprescindíveis para evitar o surgimento de um incêndio, criar meios de combatê-lo e proporcionar proteção à vida. São medidas que deverão ser instaladas nas edificações, podendo ser divididas em dois grupos: medidas ativas e medidas passivas, exemplifica Carvalho Junior (2017) conforme segue.

As medidas ativas só entram em ação em caso de sinistro, já as medidas passivas independem da ação do incêndio e devem ser incorporadas à arquitetura da edificação. A compartimentação está inclusa neste último grupo, é composta por elementos de construção resistentes ao fogo e deve ser analisada pelo projetista durante a elaboração do projeto arquitetônico.

Conforme definido pela RT número 02 do Corpo de Bombeiros Militar do Rio Grande do Sul (CBMRS, 2014, p.20), em seus itens 4.284 e 4.286, as definições de medidas ativas e passivas são consecutivamente:

Proteção ativa são medidas de segurança contra incêndio que dependem de uma ação inicial para o seu funcionamento, seja ela manual ou automática. Exemplos: extintores, hidrantes, chuveiros automáticos, sistemas fixos de gases etc.

Proteção passiva são medidas de segurança contra incêndio que não dependem de ação inicial para o seu funcionamento. Exemplos: compartimentação horizontal, compartimentação vertical, escada de segurança, materiais retardantes de chama etc.”

Os sistemas exigidos como medidas de proteção contra incêndio deverão, conforme a legislação pertinente, ter sua implantação e execução atendidas de acordo com as normas técnicas criadas pelo Corpo de Bombeiros Militar de cada estado e em casos omissos na legislação, deverão adotar as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (BRENTANO, 2015).

2.7 Compartimentação

Segundo Negriscolo (2011), o dano máximo provável de uma edificação é determinado pela criação de divisões dos seus espaços e suas vedações, que são comumente chamados de compartimentações na segurança estrutural.

A compartimentação da edificação deve ser perfeita, isto é, as paredes e lajes que a circundam devem impedir que tanto o calor, como o fogo, as atravessem, portanto, toda a tubulação, duto ou *shaft* que interligue os dois compartimentos deve possuir vedação, em caso de portas, devem ser tipo corta-fogo e manterem-se fechadas (SILVA, 2014).

A compartimentação contra incêndio de um ambiente, conforme aborda Negriscolo (2011), é uma característica que limita o tamanho do incêndio a determinado local, ou que impede que o fogo chegue a determinados elementos ou áreas, permitindo assim o escape da população e a estabilidade da estrutura.

Carvalho Junior (2017) afirma que a limitação da área e a altura da edificação estão intrinsecamente ligadas no combate ao fogo, pois quanto maior a altura do edifício, mais difícil será a saída da população e o acesso das equipes para o combate, por isto, maior deverá ser a exigência de sistemas de segurança.

A IT nº 09 do Corpo de Bombeiros Militar de São Paulo (CBMSP) de 2018, complementar à RTT do CBMRS de 2017 são as legislações vigentes atualmente e estabelecem os parâmetros de compartimentação horizontal e vertical das edificações, possuem a função de evitar a dispersão de gases e fumaças interna ou externamente para o mesmo pavimento e para os pavimentos superiores, mantendo as rotas de fuga seguras durante um incêndio, e evitando a transferência do fogo para outros ambientes.

Independente da abertura existente nas paredes de compartimentação, estas devem ser seladas de forma a trazer a vedação corta-fogo completa entre as unidades compartimentadas, sejam elas designadas à passagem de instalações de qualquer natureza (CBMSP, 2018).

2.7.1 Compartimentação horizontal

Como descrito por Carvalho Junior (2017), a compartimentação visa impedir a propagação do sinistro para outras unidades no plano horizontal, seja por meio de distanciamento ou por dispositivos isolantes com certificação da ABNT.

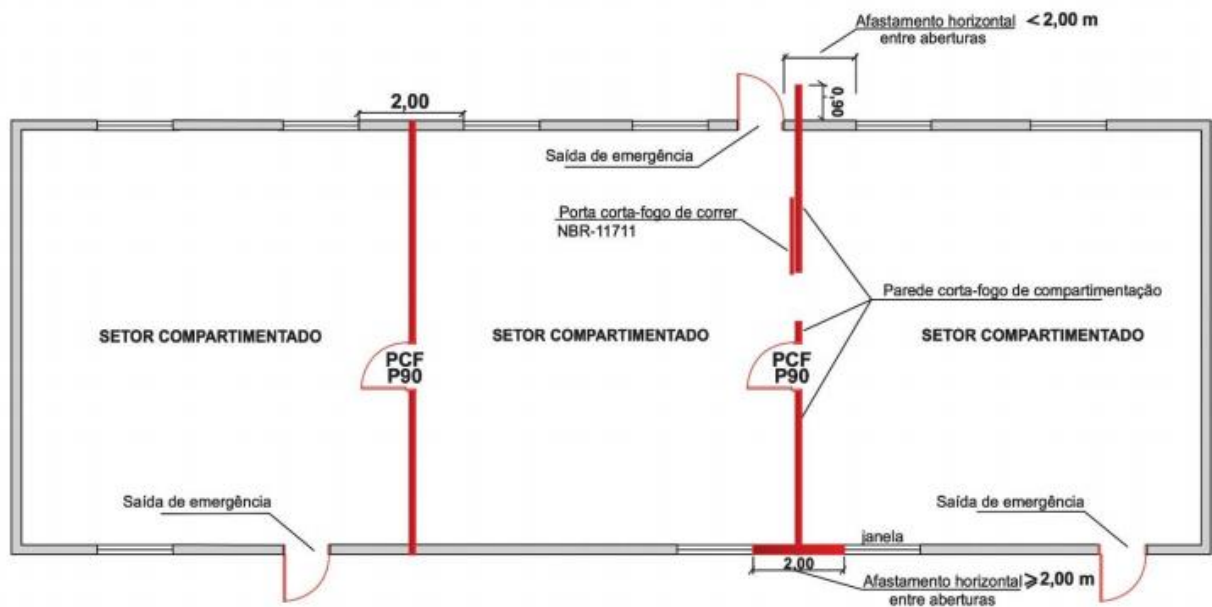
Normalmente a compartimentação é limitante e determina áreas máximas de acordo com as regulamentações vigentes, em função das cargas de incêndio, ocupações e da altura da edificação (NEGRISCOLO, 2011).

As especificações das distâncias entre as aberturas, abas e outras, são determinadas pela IT 09 (CBMSP, 2018), na qual as aberturas localizadas na mesma fachada, em direções opostas de uma parede de compartimentação, precisam ser distantes no mínimo 2 m entre si, esta distância deve ser adotada entre as aberturas mais próximas no plano horizontal, independente do pavimento. Algumas exceções podem ser adotadas alterando estas distâncias:

- a) nas áreas frias é possível reduzir para 0,90 metros;
- b) possibilidade de substituição por uma ampliação da parede de compartimentação, esta externa à edificação, com distância mínima de 0,90 metros;
- c) as aberturas localizadas em fachadas ortogonais, devem estar distanciadas na projeção horizontal 4 metros, prevenindo a propagação do fogo por radiação térmica.

A Figura 03 exemplifica os distanciamentos necessários ao isolamento entre unidades na projeção horizontal da edificação, com a possibilidade de substituição por uma expansão da parede de compartimentação.

Figura 03 – Modelo de Compartimentação Horizontal



Fonte: IT CBMSP 09 (2018, anexo A).

2.7.2 Compartimentação vertical

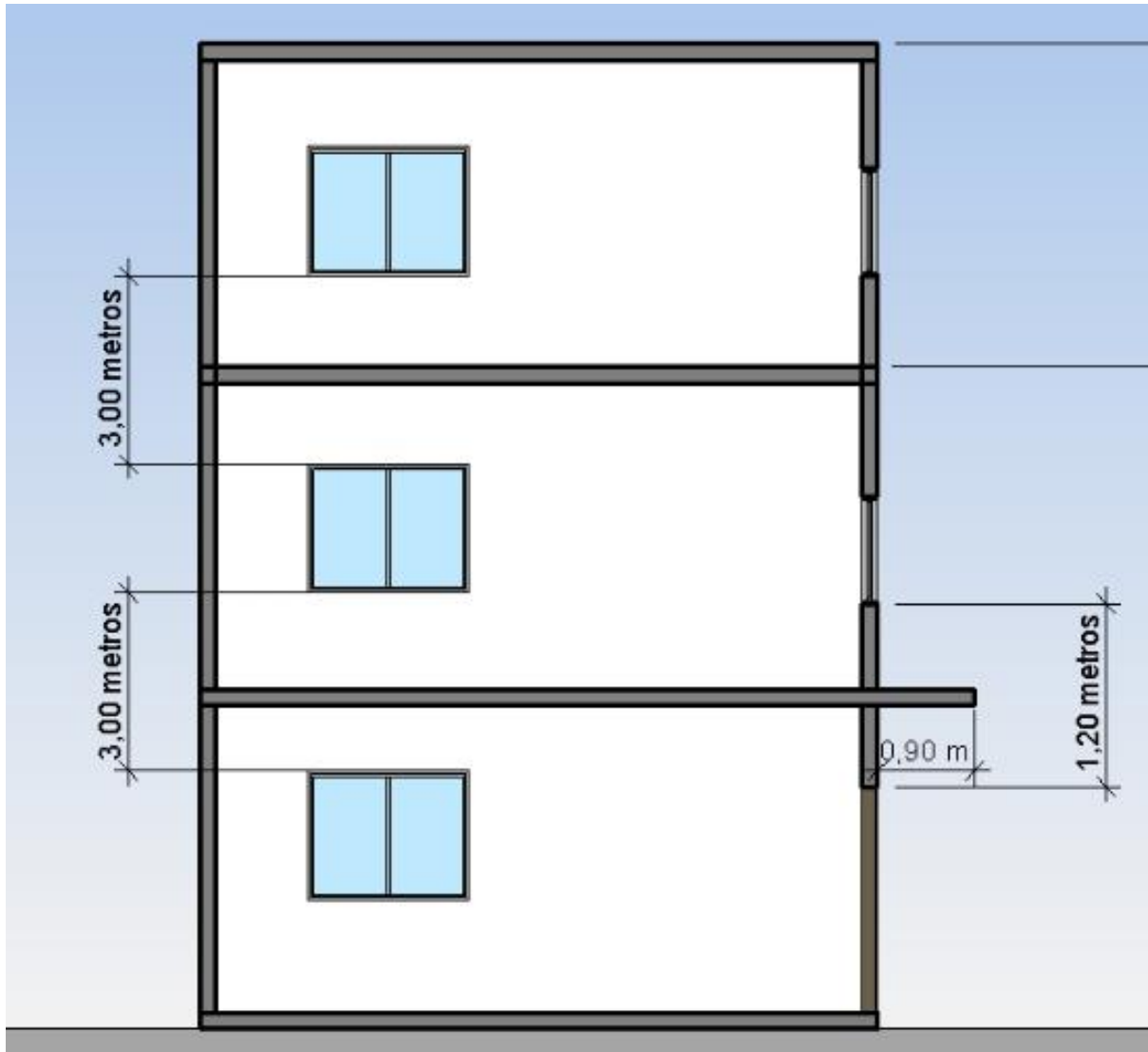
Para Negriscolo (2011) mais importante que evitar o alastramento horizontal do fogo, é conter sua ascensão vertical, e compartimentar um ambiente verticalmente é evitar que o fogo siga seu caminho natural, ou seja, que ele suba, impactando principalmente na fachada da edificação.

Concordando Ono (2008) apud Rodrigues (2009) acredita que a compartimentação vertical é obtida quando cada pavimento atua independente em relação aos demais, desta forma isolando-os da propagação do incêndio, as lajes e paredes resistentes ao fogo são um sistema extraordinário de compartimentação, entretanto os pontos de maior atenção devem ser os vãos internos e externos, como as janelas.

Atualmente, a legislação em vigor no Estado do Rio Grande do Sul é a RTT elaborada pelo CBMRS datada de 2017, a mesma deve ser atendida de forma completa, e tratando-se da compartimentação, os distanciamentos devem ser de 3,0 metros entre as aberturas para todos

os graus de incêndio quando não possuírem marquises e 1,20 metros quando as abas possuírem no mínimo 0,90 metros no plano horizontal, conforme mostra a Figura 04 a seguir.

Figura 04 – Modelo de Compartimentação Vertical



Fonte: RTT CBMRS (2017)

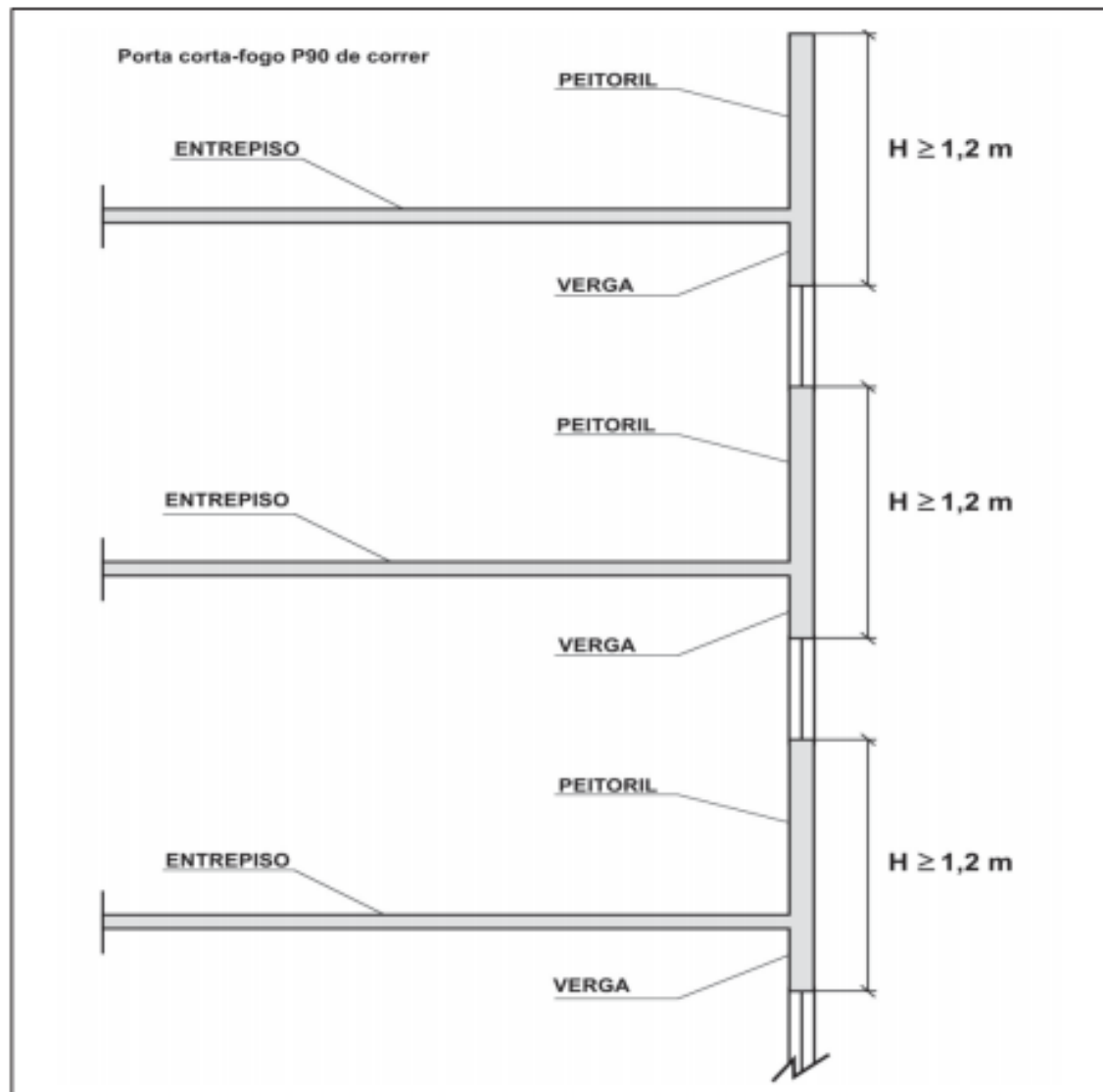
Paralelamente, e contradizendo as dimensões apresentadas pela Resolução gaúcha, as seguintes condições nas fachadas, com o intuito de dificultar o alastramento vertical do incêndio pelo exterior dos edifícios são determinadas pela IT 09 (CBMSP, 2018):

- a) quando o isolamento for executado por vigas e/ou parapeitos, a altura mínima deve ser de 1,2 metros, separando aberturas de pavimentos sucessivos;

- b) no caso de prolongamentos dos entrepisos, as abas precisam se projetar, no mínimo, 0,90 metros além do plano externo da fachada;
- c) a fachada deve ser constituída de componentes corta-fogo, separando aberturas de pisos consecutivos, com o tempo de resistência determinado pela IT 08 (CBMSP, 2018).

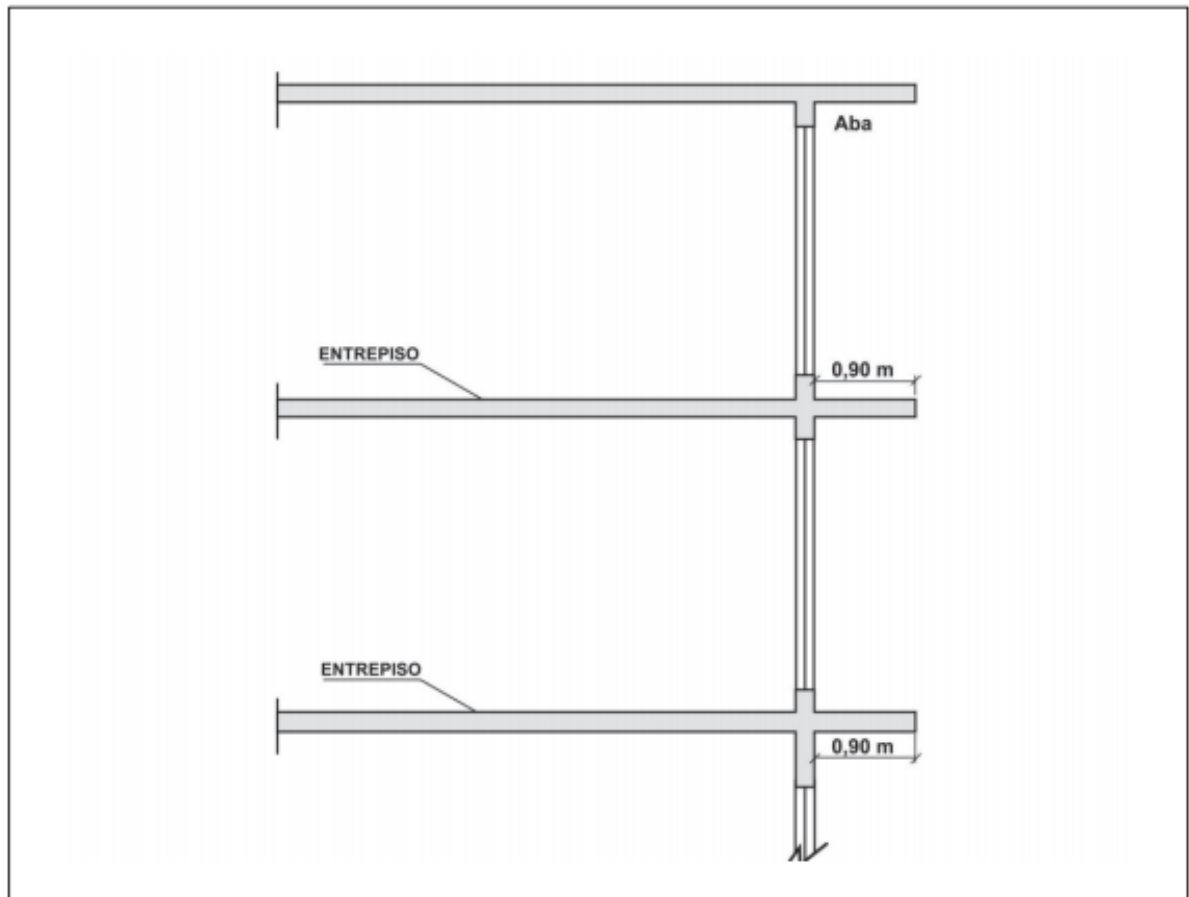
As Figuras 05 e 06 representam graficamente as distâncias preconizadas na legislação base deste presente estudo, a Figura 05, refere-se a edificações nas quais não há o prolongamento de marquises, ou o recuo de um dos pavimentos.

Figura 05 – Modelo de Compartimentação Vertical



A Figura 06 exemplifica os modelos de edificações mais comuns as quais carecem de isolamento de riscos por compartimentação vertical, as que possuem abas, normalmente utilizadas em sacadas de edifícios.

Figura 06 – Modelo de Compartimentação Vertical com Marquises



Fonte: IT CBMSP 09 (2018, anexo A).

Portanto, como as legislações divergem entre si, mesmo sendo complementares, é necessária uma análise mais profunda, em prol da segurança das edificações, possibilitando o desenvolvimento estrutural da edificação em sua fase de projeto.

2.7.3 Segurança estrutural

A desocupação das pessoas e as operações de combate ao incêndio devem ser feitas sem risco de desmoronamento da edificação em decorrência do incêndio, portanto a estrutura deve possuir resistência ao fogo (SILVA, 2014).

A função corta-fogo de uma estrutura, segundo a NBR 15200 (ABNT, 2004) é não permitir que o fogo ou o calor a ultrapasse em quantidade suficiente, de forma a gerar combustão na unidade oposta ao incêndio inicial, compreendendo assim, o isolamento térmico e a estanqueidade à passagem das chamas.

O TRRF é um valor adotado em consenso, e possui um elevado valor, para que a temperatura associada a ele possua pouca probabilidade de ser atingida e a estrutura não entre em colapso (SILVA, 2014).

As paredes de compartimentação necessitam ser dimensionadas de maneira a manterem sua estabilidade estrutural e não colapsarem em caso de ruína da cobertura da edificação próxima afetada pelo incêndio (CBMSP, 2018).

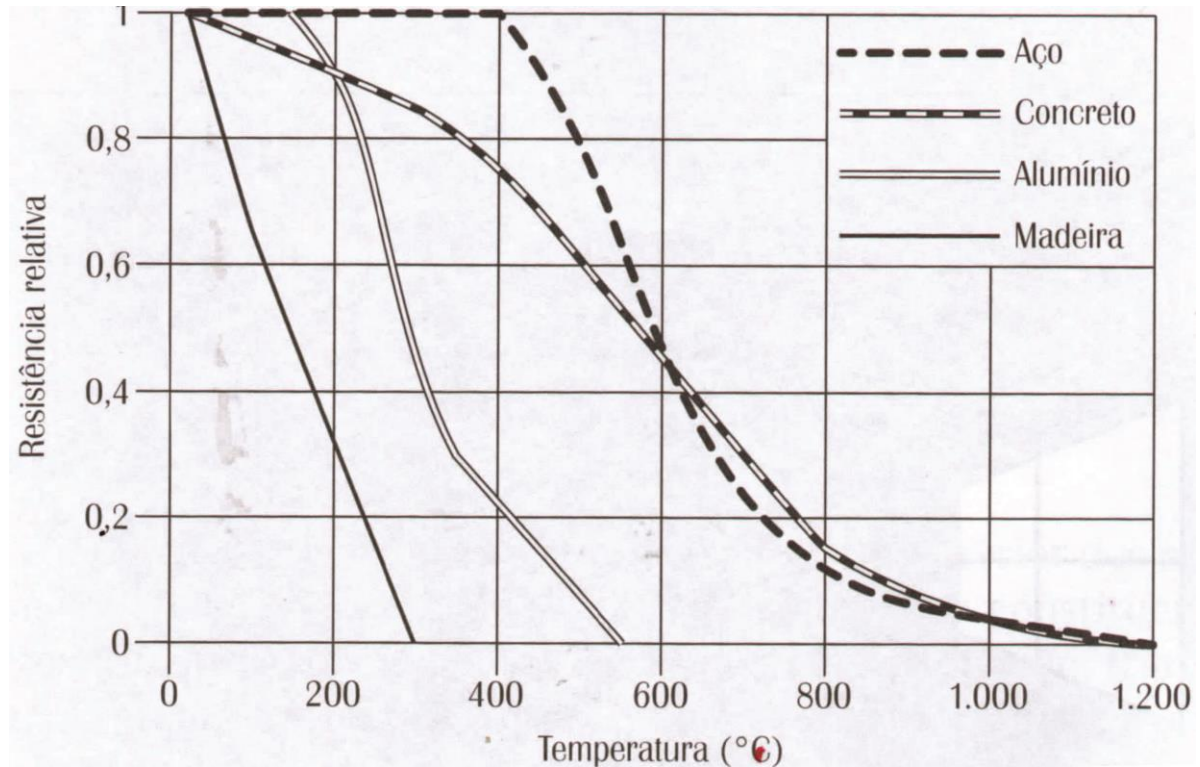
2.7.4 Estruturas em situação de incêndio

Rocha e Silva (2017) dissertam que no caso de um incêndio, o concreto é eficiente na proteção do aço da temperatura excessiva, motivando um tempo maior para a fuga da população. Entretanto, em função do tempo de exposição ao fogo, bem como da taxa de aquecimento do material, os constituintes do concreto podem reagir quimicamente, iniciando processos mecânicos de expansões, fragmentações, fissurações e ocasionando a perda da resistência.

A fundamental propriedade da ação térmica que age sobre uma estrutura, em altas temperaturas, é a curva da temperatura dos gases em função do TRRF. Analisando curvas padronizadas internacionais, com o tempo de incêndio, encontra-se a temperatura aparente dos gases e, por esta temperatura, é possível determinar a temperatura no elemento estrutural considerado (MOLINA et al., 2012).

A Figura 07 representa a perda de resistência dos materiais em função do aumento da temperatura em caso de incêndio, verificamos que o aço, mesmo com alto grau de resistência, quando atinge a temperatura de 400°C, sua resistência diminui bruscamente em mais de 50%, até os 600°C.

Figura 07 – Resistência dos materiais x temperatura



Fonte: Silva (2014, p.77).

Metha e Monteiro (2014) dissertam em sua obra que diferentemente do aço, o concreto é capaz de conservar resistência suficiente por períodos razoavelmente longos quando exposto a temperaturas de 700 a 800°C, permitindo assim operações de resgate e baixo risco de colapso estrutural.

Quando o uso de materiais combustíveis no interior do edifício for inevitável, alternativas devem ser buscadas para reduzir a potencialização do incêndio que esses materiais podem ocasionar. Com o bom emprego de alguns retardantes, é possível, por exemplo, evitar a combustão absoluta da madeira, significando menor calor gerado (ROCHA; SILVA, 2017).

Conforme Brentano (2015) a limitação no uso dos materiais determinada pelas legislações é importante para que o incêndio, caso ocorra, seja pequeno e controlável, não gerando fumaças e gases perigosos e dando aos ocupantes, tempo de reação e desocupação.

É pertinente estudar a velocidade de aquecimento nas estruturas de concreto armado, visto que a reação do concreto é influenciada diretamente pela taxa de aquecimento. A desagregação do material é causada por gradientes térmicos que levam ao aumento das tensões térmicas na estrutura global, e se as tensões térmicas exibirem magnitudes superiores à resistência à tração do concreto já endurecido, surgirão fissurações excessivas e lascamentos, fragmentado assim todo o material (COSTA et al., 2002 apud COSTA; SILVA, 2006).

2.8 Critérios de Resistência ao fogo

Na NBR 6479 (ABNT, 1992) encontramos a definição de resistência ao fogo para portas e vedadores, sendo um parâmetro de grande importância para determinar e avaliar o desempenho de aberturas em situação de incêndio. A resistência ao fogo é caracterizada pela capacidade de confinamento do fogo em sua estanqueidade e isolamento térmico, bem como a propriedade em manter a estabilidade e/ou resistência mecânica da construção durante um período previamente determinado, desta forma, os ambientes contíguos são protegidos da ação do fogo.

Os vidros se quebram acima de 500°C conforme Andrade (2018), esta temperatura foi estimada também no estudo de Rodrigues (2009) para a verificação da compartimentação, pois consideram que as chamas que saem verticalmente pela janela só propagarão o fogo quando excederem este valor, proveniente de estudos de Rosso (1975).

2.8.1 Isolamento Térmico

O parâmetro de isolamento térmico é analisado na face não exposta ao fogo de um corpo de prova, pelo aumento da temperatura em termopares instalados em no mínimo cinco pontos distintos, posicionados de forma que obtenham as temperaturas mais críticas da face não exposta. A média aritmética das temperaturas medidas pelos termopares deve ser inferior

à 140°C acrescidos da temperatura inicial do ensaio, ou 180°C acrescidos da temperatura inicial, em qualquer termopar de análise. (ABNT NBR 6479, 1992)

2.8.2 Estanqueidade

De acordo com a NBR 6479 (ABNT, 1992) a verificação da estanqueidade ocorrida num corpo de prova deve ser verificada através de um chumaço de algodão, garantindo a completa vedação contra as chamas e os gases quentes produzidos em um incêndio, caso haja a inflamação do algodão, o ensaio é considerado não-estanque.

2.8.3 Resistência Mecânica

A estabilidade ao fogo pode ser determinada pela capacidade de integridade de um elemento estrutural ou não, durante um determinado tempo, quando submetido a um experimento normatizado, sem apresentar colapso. Esse tempo de resistência é exibido nas como sendo o TRRF, citado no item 2.7.3 deste presente trabalho.

2.9 Modelagem computacional

Uma ferramenta computacional quando usada de forma responsável e criteriosa, traz grandes vantagens para a elaboração de projetos, originando assim mais produtividade, qualidade e segurança (KIMURA, 2007).

Seito et al. (2008) acreditam que a corrida tecnológica na ciência da proteção contra incêndios traz sistemas inteligentes, programas computacionais, automação e automatização além da constante criação de novos materiais igníficos e retardantes e a pesquisa e o desenvolvimento nacional devem ocorrer de acordo com a necessidade das legislações e edificações.

A revolução tecnológica possui um papel fundamental na engenharia de estruturas, e influencia diretamente como os projetos estruturais são elaborados. A computação gráfica surgiu para aperfeiçoar a engenharia e jamais substituí-la, portanto, os engenheiros devem ser

preparados para utilizar de forma responsável os sistemas computacionais, sabendo aproveitar seus benefícios e verificar suas limitações (KIMURA, 2007).

Com a informática progredindo exponencialmente, tornou-se uma ferramenta de suma importância para os profissionais da engenharia, o surgimento do programa AutoCAD³ provocou uma grande revolução, possibilitando grandes avanços na computação gráfica, até chegar ao sofisticado mundo digital atual (CARVALHO JUNIOR, 2017).

Lemonje et al. (2017) acreditam que programas computacionais os quais permitem simular os fatos ocorridos durante um sinistro estão se tornando cada vez mais benéficos na reconstrução dos cenários reais ocorridos e com eles, ainda é possível analisar situações potenciais de risco em outros acontecimentos.

2.9.1 Modelagem pelo método dos elementos finitos

De acordo com Kimura (2007), a primeira etapa da elaboração de uma estrutura em um sistema computacional é definir os dados a serem empregados, pré-dimensionar os elementos e definir quais serão as ações que atuarão sobre a estrutura.

Na visão de Campos e Braga (2011), não há um simulador computacional de incêndio inteiramente completo que abranja todas as aplicações admissíveis. Além do mais, a inconstância do fogo pode induzir a resultados dúbios. Portanto, quando houver dúvidas sobre a legitimidade dos resultados, a bibliografia deve ser examinada e ensaios devem ser realizados.

O método das diferenças finitas normalmente é utilizado para problemática relacionada ao escoamento de fluidos, já os elementos finitos foram disseminados na área das estruturas, com problemas de elasticidade (MAZZONI, 2010).

Tabaczinski et al. (2017) desenvolveram um estudo com os principais trabalhos feitos com simuladores computacionais específicos para simulação de incêndio como ferramenta

³ AutoCAD é um software criado e comercializado pela Autodesk, Inc. desde 1982, usado essencialmente na elaboração de peças de desenho técnico em duas dimensões e para criação de modelos tridimensionais, foi utilizada a versão 2018 para o desenvolvimento dos modelos.

para investigações e reconstrução de sinistros ocorridos, bem como a criação de simulações prognósticas, neste estudo verificou-se que sistemas de fluidodinâmica computacional estão sendo utilizados de modo promissor e possuem confiabilidade em seus resultados, se calibrados corretamente.

2.9.2 Carga de incêndio

A carga de incêndio de uma edificação é descrita pelo somatório de energias caloríficas prováveis de serem transformadas na combustão total de todos os materiais presentes na edificação, incluindo os materiais de revestimento de paredes, pisos e tetos dividido pela área de piso do local, expressa em MJ/m² ou kcal/m². Na maioria das legislações, há valores médios preconizados por ocupação, já tabelados (BRENTANO, 2015).

A máxima liberação do calor, ou seja, a carga de incêndio é descrita por Seito et al. (2008) como o resultado entre a multiplicação do peso de cada combustível pelo seu potencial calorífico, em uma edificação comum, este valor deve incluir o mobiliário, os acabamentos e os elementos estruturais, geralmente demonstrada em carga de incêndio específica, que pode ser determinada pelo peso de combustível equivalente dividido pela área de piso do local, representado pela Equação 2:

$$q_{fi} = \frac{(\sum M_i H_i)}{A_f} \quad (2)$$

Sendo:

q_{fi} = valor da carga de incêndio específica, em MJ por metro quadrado de área de piso;

M_i = massa total de cada componente (i) do material combustível, em quilograma;

H_i = potencial calorífico específico de cada componente do material combustível, em MJ por quilograma;

A_f = área do piso do compartimento, em metro quadrado.

Após definida a carga de incêndio, é necessário verificar a Lei Complementar 14.376 do Estado do Rio Grande do Sul (2013) na qual categoriza as ocupações segundo a carga de

incêndio encontrada, conforme a Tabela 01 a seguir, na qual divide as edificações em três categorias: baixo, médio e alto risco.

Tabela 01 – Classificação das edificações quanto à carga de incêndio

Risco	Carga de Incêndio MJ/m²
Baixo	Até 300 MJ/m ²
Médio	Entre 300 e 1.200 MJ/m ²
Alto	Acima de 1.200 MJ/m ²

Fonte: Estado Do Rio Grande Do Sul (2013, p. 25)

A maior carga de incêndio tabelada pela a Lei Complementar 14.376 do Estado do Rio Grande do Sul (2013) é de 4.000 MJ/m² para diversas ocupações, sendo elas comerciais e industriais.

2.9.3 Aberturas

Em um trabalho desenvolvido por Rodrigues (2009), base para este presente estudo, verifica-se uma análise cuja finalidade foi avaliar a eficácia do sistema de compartimentação vertical por afastamento entre as aberturas, bem como por projeções horizontais como as marquises e prolongamentos de lajes, conforme as exigências das legislações do Brasil.

O autor realizou simulações computacionais utilizando o programa FDS (*Fire Dinamic Sistem*), além de efetuar ensaios físicos em escala reduzida, utilizando-se de diversas configurações de fachadas e aberturas, além de alterar as cargas de incêndio utilizadas para ignição, possibilitando uma comparação dos resultados.

Tabaczenski et al. (2017), alega que Rodrigues (2009) comprovou que incidem consideráveis diferenças no desenvolvimento do incêndio em uma mesma área de abertura, com distintas dimensões, como regra, aberturas mais largas do que altas, propagam maior chama verticalmente pela fachada, concluindo que a geometria da edificação e suas aberturas, alteram a dinâmica de propagação do incêndio.

É visto no estudo do referido autor que as edificações que possuem abas e marquises como projeção externa, funcionam como uma excelente barreira na propagação do incêndio vertical.

Negriscolo (2011) concorda e acrescenta que janelas largas e forros altos geram uma chama rente à fachada da edificação, já em janelas estreitas e locais com forro baixo, a geometria das chamas é mais afastada da fachada.

Os resultados encontrados no estudo de Rodrigues (2009) confirmam que as geometrias das aberturas modificam significativamente o comportamento do fogo. O estudo comprovou que os afastamentos previstos entre aberturas situadas na mesma projeção vertical, de 1,2 metros mostraram-se satisfatórias para o risco baixo, porém, nas ocupações classificadas como risco médio, não obtiveram resultados positivos na compartimentação entre unidades.

2.9.4 Fire Dynamic System – FDS

O simulador computacional empregado neste trabalho é o FDS, um modelo de dinâmica de incêndios criado pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos da América (NIST) foi desenvolvido no ano de 2000 e constantemente atualizado com novas versões e possui um código aberto e livre, além de ser gratuito.

O programa computacional é o responsável pela simulação de incêndio propriamente dita e possui seu funcionamento por meio de uma lista de comandos, nos quais necessitam ser inseridas as coordenadas de todos os obstáculos e funções que o modelo necessita, este sistema oferece uma interface de visualização do desenvolvimento do incêndio (LEMONJE et al. 2017).

Este *software* resolve as equações de Navier-Stokes e possui ênfase no transporte de calor e de fumaça, conforme esclarece Campos e Braga (2011), e vem acompanhado de um programa de visualização gráfica dos resultados, o Smokeview.

O FDS é uma ferramenta potente capaz de prever corretamente o comportamento de incêndios, servindo de embasamento para avaliação da eficiência de sistemas de proteção passiva e confecção de pareceres técnicos sem os custos advindos de ensaios experimentais (TABACZENSKI et al. 2017, p.95).

Como caracteriza Mcgrattan et al. (2010) apud Campos e Braga (2011) este *software* pode ser usado para modelar o transporte de calor e produtos da combustão, transferência de calor por radiação e por convecção entre gases e superfícies sólidas, pirólise, propagação de chamas e crescimento do incêndio, até mesmo calcular temperatura, fluxo de calor entre outras variáveis nos sólidos. No modelo hidrodinâmico, a turbulência é abordada por meio do método de LES (*Large Eddy Simulation*), um modelo matemático computacional para solucionar a turbulência empregada na dinâmica de fluidos.

Tabaczinski et al. (2017) acrescentam que o objetivo principal do FDS é representar o comportamento dos incêndios reais em gráficos e modelos tridimensionais por meio de, dentre outros critérios: temperaturas, movimentação de fumaça, gases tóxicos e quantidade de oxigênio disponível no ambiente simulado.

Todos os parâmetros de entrada requeridos pelo sistema para criar um ambiente simulado de incêndio, são enviados por meio de um arquivo de texto incluindo as informações do domínio físico e computacional, a geometria da edificação, as propriedades físico-químicas dos materiais, além das especificações sobre a reação de combustão e os dados de saída a serem gravados, tudo elaborado pelo usuário do sistema (CAMPOS; BRAGA, 2011).

Tabaczinski et al. (2017) realizaram um estudo acerca do FDS e concluíram que este *software* de fluidodinâmica computacional é bastante promissor, tanto em investigações de incêndios já ocorridos como forma de laudos técnicos, bem como para tornar os projetos futuros mais eficientes.

Os autores ainda acreditam que este *software* de simulação de incêndios é o mais empregado em pesquisas acadêmicas e laudos técnicos de acordo com as pesquisas realizadas, pois desde o princípio da sua publicação, vem sendo largamente utilizado em estudos de segurança contra incêndios ao redor do mundo, portanto, tornou-se o que possui maior literatura disponível. No país, as primeiras pesquisas realizadas datam de 2008 e, gradualmente vem ganhando espaço no meio acadêmico e científico.

A dinâmica dos fluidos computacional ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*), pode ser apresentada como uma simulação computacional de qualquer processo físico ou físico-químico que envolve fluidos, como exemplo, pode-se citar a modelagem do incêndio do World Trade Center, as conhecidas “torres gêmeas” (REHM et al., 2003 apud ANDRADE, 2018).

2.9.5 Pyrosim

Os atuais modelos computacionais disponibilizam vários recursos de entrada de dados, e cabe ao engenheiro verificar a solução mais adequada prevendo seu comportamento, pois definir as posições e dimensões da estrutura a ser criada exige experiência, bom senso e raciocínio (KIMURA, 2007).

O programa Pyrosim oferece uma interface gráfica, semelhante à de alguns programas de desenhos de precisão mundialmente conhecidos, tais como o AutoCAD, o que facilita a modelagem das estruturas que serão simuladas (LEMONJE et al. 2017).

Este *software* foi desenvolvido pela *Thunderhead Engineering Consultants*, e opera como uma interface gráfica de entrada do FDS, sem a necessidade da utilização de arquivos texto, auxiliando desta forma, o usuário para o desenvolvimento de modelos simulados sem a necessidade de utilizar as linhas de comando do FDS (TABACZENSKI et al., 2017).

Este pré-processador serve para aprimorar e facilitar a utilização do FDS, uma vez que ele foi desenvolvido para utilização do sistema MS DOS, sendo pouco intuitivo, já que utiliza apenas linhas de comando em sua entrada de dados.

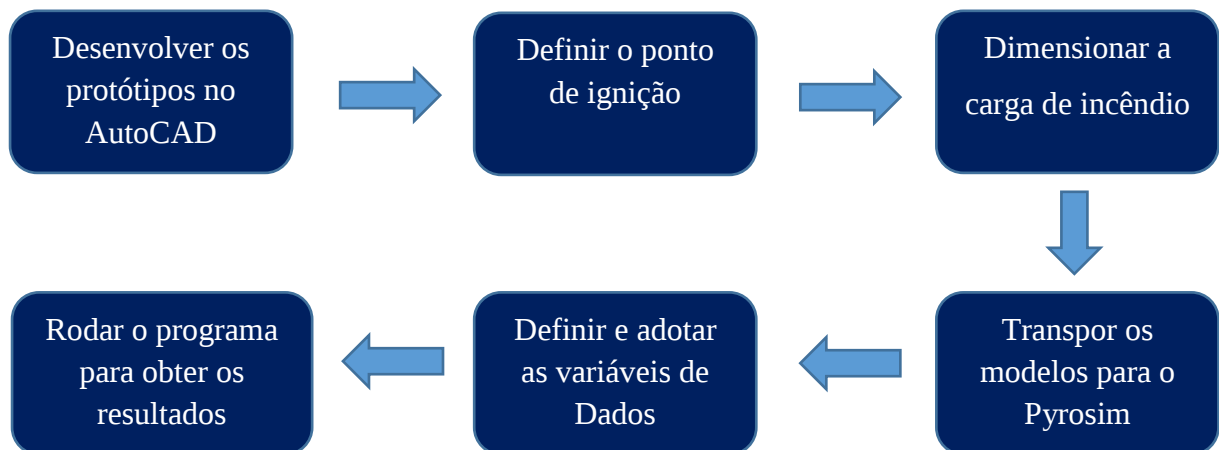
Andrade (2018) acredita que o Pyrosim, proporciona ao usuário uma visualização da estrutura em 3 dimensões e propicia uma melhor verificação dos dados inseridos pelo usuário, utilizando como base de análise o próprio FDS que faz a leitura dos dados, sem a necessidade de utilizar duas plataformas distintas para desenho e análise.

Deste modo, o *software* pode favorecer a melhoria das normas técnicas e garantir um maior controle dos materiais empregados nas edificações. Assim sendo, os edifícios se viabilizam economicamente e podem ser adequados às peculiaridades de cada um, sem deixar de lado a segurança contra incêndio.

3. PROCEDIMENTOS METOLÓGICOS

A seguir, será descrita a metodologia para a modelagem através do Pyrosim, bem como as particularidades do programa utilizado neste estudo. A Figura 08 refere-se às etapas que foram executadas durante o processo deste presente trabalho para a obtenção dos resultados.

Figura 08 – Etapas Metodológicas



Fonte: Da autora.

3.1 Desenvolvimento dos modelos de análise

3.1.1 Determinação das dimensões de pés-direito e janelas

Na primeira etapa definiram-se as propriedades geométricas da edificação, isto é, área de piso, altura, pavimentos e informações das aberturas, tais como a área total e a altura média das mesmas. Em seguida, determinaram-se os revestimentos do piso, teto e paredes, desenvolvendo desta forma um protótipo no programa AutoCAD, que possibilitou uma visualização melhor da estrutura e correções necessárias para adequar o modelo à realidade estudada.

Rodrigues (2009) analisou a influência das extensões das janelas e das alturas de pés direito com a pluma de fogo decorrente de um incêndio nas janelas para a compartimentação vertical externa das edificações. Ao final, o referido autor verificou que em edificações com janelas estreitas e pé direito baixo, os ambientes produziam uma chama menor e, inversamente, as janelas largas e pé direito alto, geravam uma maior chama, sendo menos viável para a segurança contra incêndio das edificações.

Estes resultados serviram como base e inspiração para a definição das dimensões de pés-direito e janelas dos modelos. Foram dimensionados dois tipos de aberturas para análise neste presente estudo: aberturas largas, que representam aproximadamente 1:4, ou seja, altura de 0,70 m e largura de 2,65 m, e aberturas estreitas, consideradas dimensões aproximadas de 1;1 sendo praticamente quadradas de 1,5 m de largura e 1,4 m de altura.

Desta forma, é possível fazer uma generalização para aplicação em todas as edificações de acordo com os tamanhos de aberturas propostos, de forma a atender as legislações municipais e serem possíveis de instalação e análise.

A Tabela 02 representa os casos a serem analisados considerando as distâncias entre aberturas para as duas legislações, bem como as dimensões de janelas e alturas de pé direito.

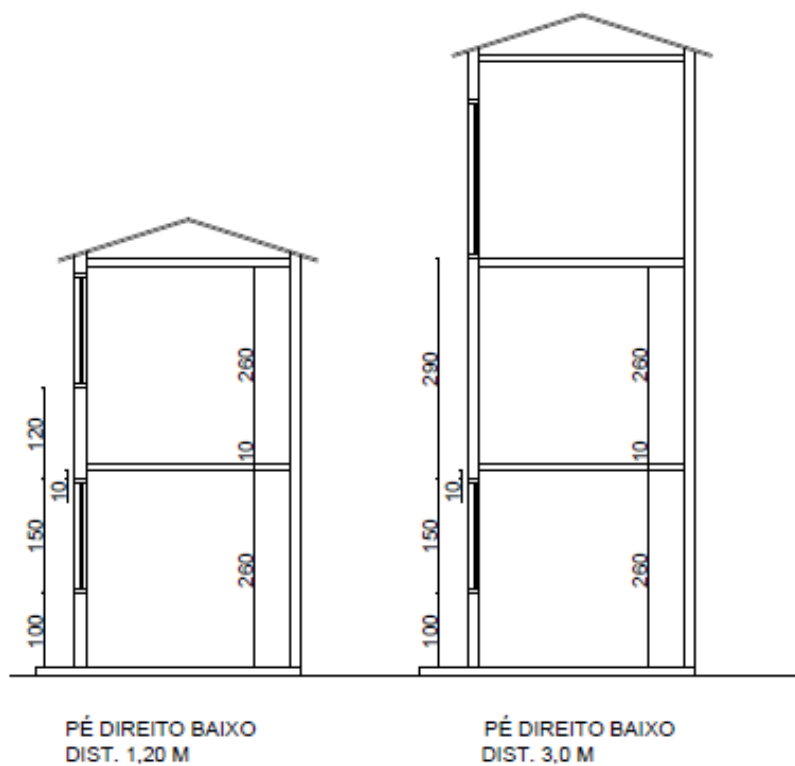
Tabela 02– Modelos analisados

Modelo	Distância entre aberturas	Carga de Incendio
Janelas largas e pé direito baixo	1,20 m	300 MJ/m ²
Janelas largas e pé direito baixo	1,20 m	1200 MJ/m ²
Janelas largas e pé direito baixo	1,20 m	4000 MJ/m ²
Janelas estreitas e pé direito alto	3,0 m	300 MJ/m ²
Janelas estreitas e pé direito alto	3,0 m	1200 MJ/m ²
Janelas estreitas e pé direito alto	3,0 m	4000 MJ/m ²
Janelas largas e pé direito baixo	1,20 m	300 MJ/m ²
Janelas largas e pé direito baixo	1,20 m	1200 MJ/m ²
Janelas largas e pé direito baixo	1,20 m	4000 MJ/m ²
Janelas estreitas e pé direito alto	3,0 m	300 MJ/m ²
Janelas estreitas e pé direito alto	3,0 m	1200 MJ/m ²
Janelas estreitas e pé direito alto	3,0 m	4000 MJ/m ²

Fonte: da autora.

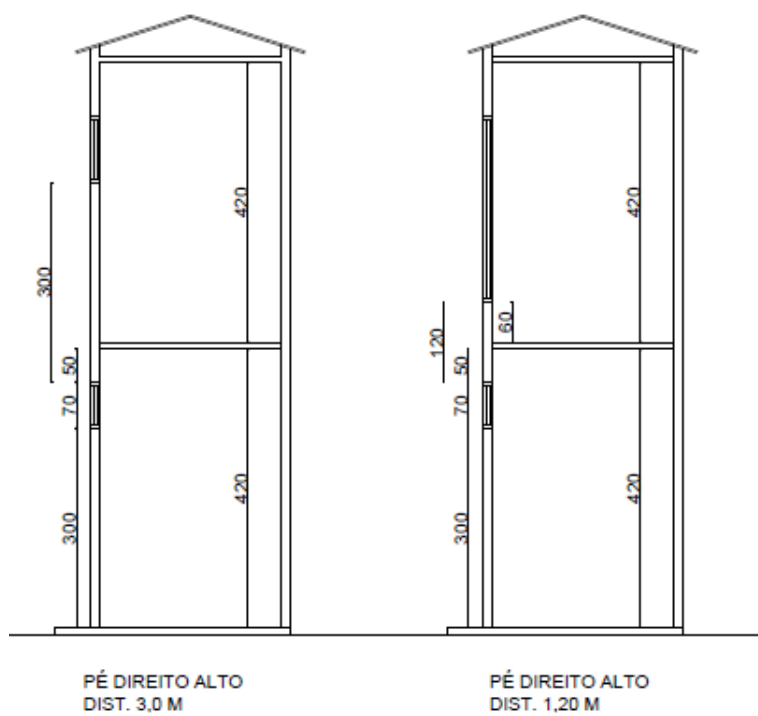
Foram elaborados no programa AutoCAD os modelos que seriam analisados para melhor verificação antes da devida modelagem para a validação das estruturas como executáveis. As Figuras 09 e 10 representam o corte das edificações modeladas para estudo das situações de incêndio.

Figura 09– Modelos analisados para pé direito baixo e janelas estreitas



Fonte: da autora.

Figura 10– Modelos analisados para pé direito alto e janelas largas



Fonte: da autora.

Para o caso de pé direito baixo com espaçamento de aberturas a 3,0 m, foi necessário utilizar um pavimento intermediário sem aberturas, exatamente como ocorre atualmente em alguns casos, onde as aberturas precisam ser localizadas apenas em algumas faces da edificação para atendimento da norma vigente. Estes casos geram grande dificuldade para o projetista em casos que não são possíveis inserir aberturas em outras faces, desta forma, é obrigatório o uso de marquises, de forma a reduzir o espaçamento.

3.1.2 Determinação da área de ventilação

O grau de ventilação de um local determina quanto há disponível de comburente para queima do combustível, proporcionalmente, quanto maior a área de ventilação, maior o oxigênio disponível, facilitando assim a movimentação dos gases e promovendo a troca entre a parte interna e externa do edifício (ANDRADE, 2018).

O fluxo de ar é necessário para manter o fogo ativo e não haver extinção automática, para isto, o cálculo da área de abertura por patamar foi dimensionada conforme o grau de ventilação determinado por Andrade (2018), de forma a garantir o caso mais desfavorável para a segurança contra incêndio das edificações.

O grau de ventilação pode ser determinado pela relação entre a área de aberturas para o exterior, a área total e a altura média das aberturas, conforme a Expressão 03 que segue:

$$v = \frac{A_v \times \sqrt{h}}{A_t} \quad (3)$$

Sendo:

v = Grau de ventilação [m^{1/2}]

A_v = Área de ventilação [m²]

A_t = Área total do compartimento (parede, piso, teto e aberturas) [m²]

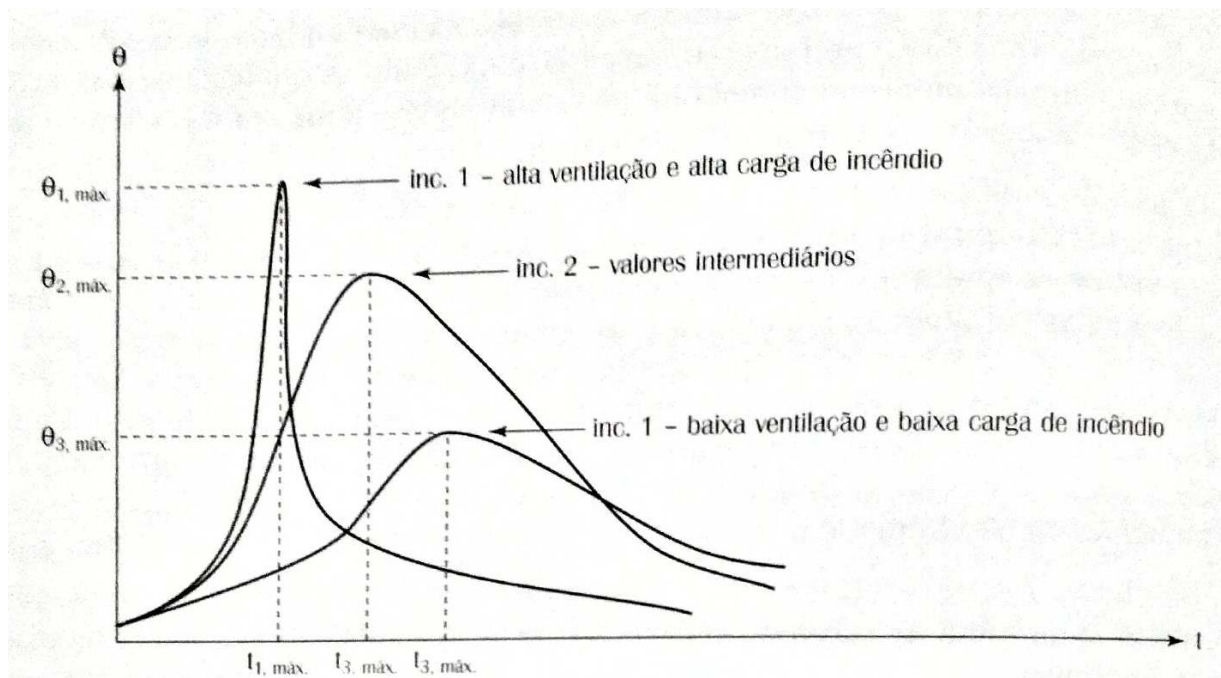
h = Altura média das aberturas $\sum(h_i \times A_i)/A_v$ [m]

A_i = Área da abertura i [m²]

h_i = Altura da abertura i , sendo $\sum A_i = A_v$ [m]

A Figura 11 representa as curvas da variação da carga de incêndio e ventilação, sendo apresentada a temperatura do sinistro pelo tempo de duração do mesmo. Pode-se observar que edificações com alta ventilação e carga de incêndio, possuem temperaturas muito mais elevadas em menor tempo, se comparadas às edificações com baixas cargas de incêndio e pequena ventilação. Portanto, as variáveis determinadas são de grande importância para a modelagem correta do incêndio que se pretende analisar.

Figura 11 - Curva temperatura-tempo de incêndios com variação de carga de incêndio e ventilação



Fonte: Silva (2014, p. 84)

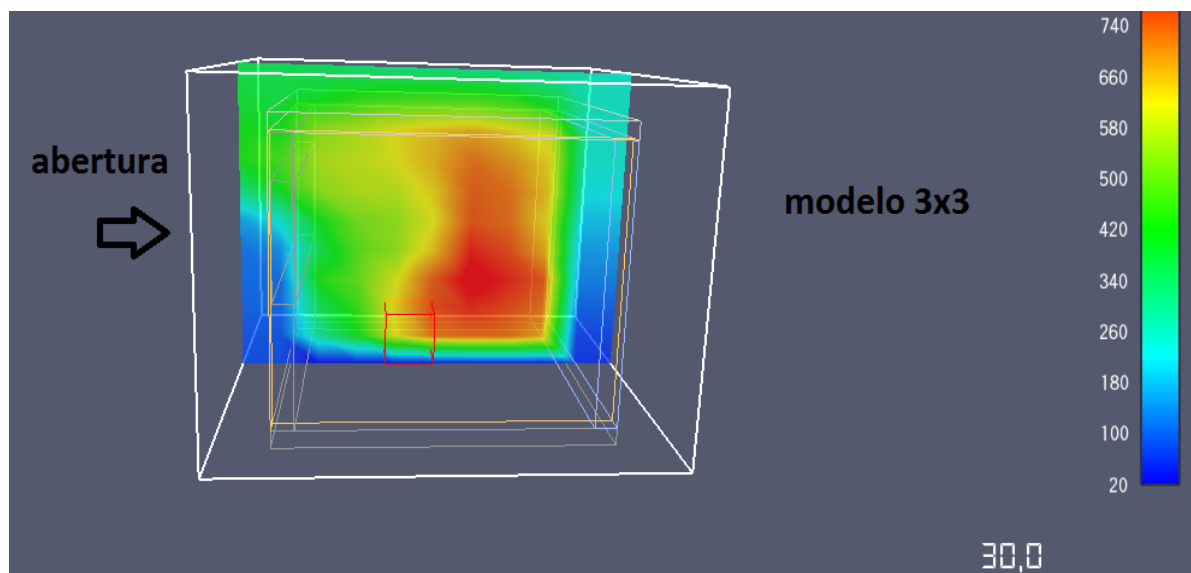
O grau de ventilação mínima segundo a maioria dos códigos de obras municipais é de 1/12 da área de piso da edificação, o que representa pouco mais de 8% da área a ser analisada. Para o presente trabalho foi considerado área mínima de 8,1 m² em todos os casos apresentados, considerando o mínimo de aberturas necessárias para o atendimento das legislações e graus de ventilação propostos.

3.1.3 Determinação das dimensões em planta

Foram desenvolvidos modelos com dimensões 3x3 metros, 10x10 metros e 25x25 metros, de forma a verificar se as dimensões do compartimento alterariam o comportamento do incêndio, com as mesmas características e propriedades.

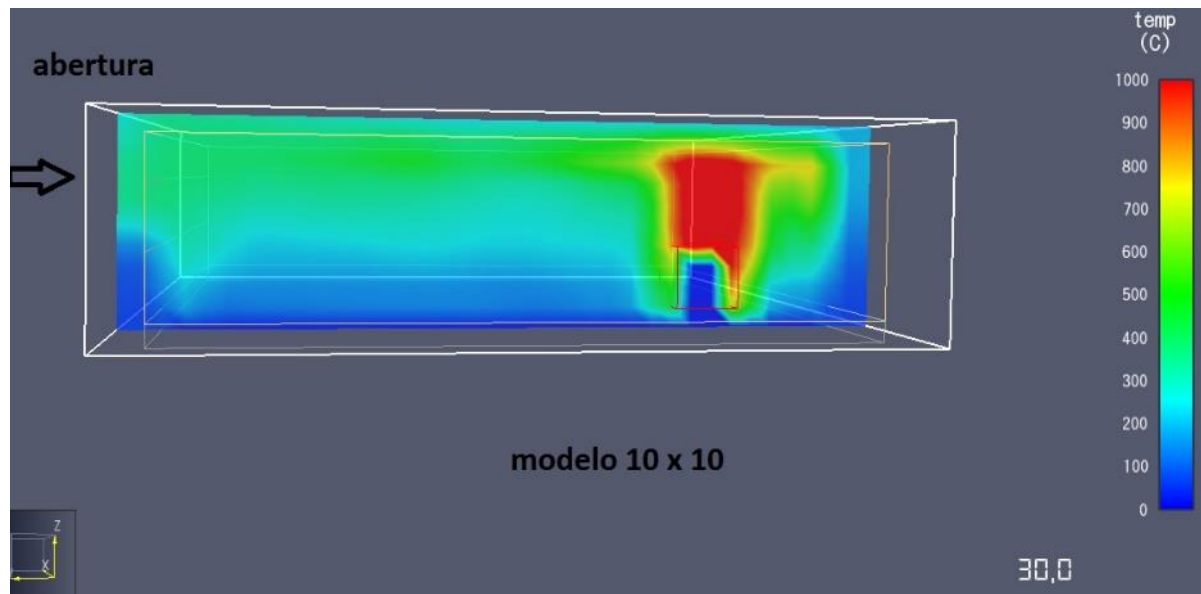
Estas propriedades de materiais e ignição foram posteriormente aperfeiçoadas, porém, para este teste, as 3 diferentes dimensões foram analisadas com os mesmos dados, dando assim validade ao mesmo, pois a intenção era apenas verificar se haveria diferenças no comportamento do fogo se a área fosse alterada. Desta forma, estão apresentadas as Figuras 12, 13 e 14 que exemplificam os modelos testados.

Figura 12 – Modelos testes de dimensões 3x3 m



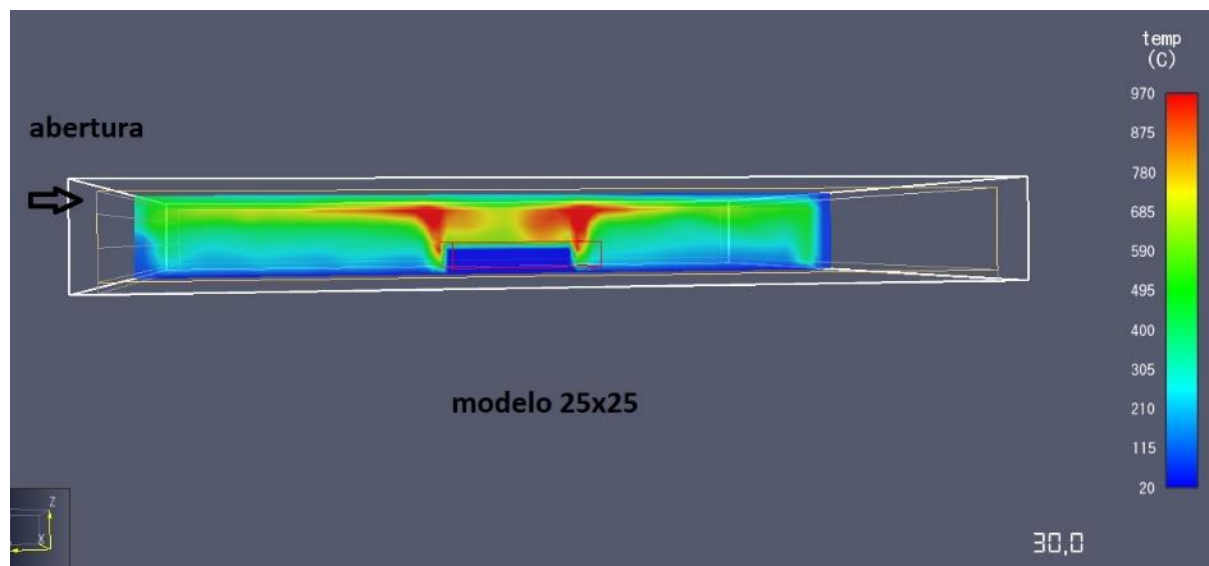
Fonte: da autora.

Figura 13 – Modelos testes de dimensões 10x10 m



Fonte: da autora.

Figura 14 – Modelos testes de dimensões 25x25 m



Fonte: da autora.

Decidiu-se adotar o modelo de 10x10m, visto as dimensões estarem mais próximas à realidade das edificações e não haver grandes diferenças no comportamento do incêndio com o aumento da área, conforme modelo adotado.

3.2 Desenvolvimento do modelo computacional

Este trabalho utilizou a modelagem de edificações fictícias no *software* Pyrosim, com simulação no FDS, com base em um modelo computacional em três dimensões criado como maquete para iniciação da modelagem. O *software* foi disponibilizado pela Thunderhead Engineering Consultants ao autor deste como versão estudantil pelo período de 180 dias, e renovado por mais 180 de forma gratuita, sendo de fundamental importância para a realização deste presente estudo.

Através das simulações computacionais nos modelos adotados podem-se propor medidas de controle de incêndios mais próximas da realidade, além de proporcionar economia à construção, além disto, comprovam a eficácia da norma. O *script* gerado pelo programa foi colocado no Apêndice A deste presente estudo, o qual visa auxiliar demais análises sobre o assunto, facilitando o desenvolvimento de outros modelos.

Para desenvolver os modelos a serem analisados foi necessário verificar outros trabalhos relacionados e reproduzi-los para averiguar quais possuíam todos os dados necessários para a realização do presente estudo.

Constatou-se que dos poucos trabalhos científicos relacionados ao FDS e ao Pyrosim, nenhum possuía todas as informações necessárias para a completa reprodução, de forma que apenas com o estudo de Andrade (2018) foi possível fazer os mesmos modelos, e encontrar os mesmos resultados, sendo necessário assim reunir vários estudos para a determinação deste.

Para este estudo, foi necessária a obtenção dos dados de temperatura e os gases gerados pelo compartimento, para verificar se os ambientes próximos permaneceram ou não isolados do sinistro. Inúmeros testes foram elaborados pelo autor de forma a determinar o modelo exato de análise para o *software*, tanto para análise da madeira, como para as malhas, locais de ventilação e ponto de ignição.

Elaborou-se então a base de análise com os parâmetros corretos para um incêndio com temperaturas próximas aos 1000°C, valores mínimos determinados em um incêndio real, com curvas de temperatura esperadas para um modelo matemático que simula um real incêndio, validando assim os modelos gerados. Como caracteriza a IT N° 02 CBMSP (2011) a temperatura média de um incêndio em um aposento após a combustão generalizada é de aproximadamente 900 °C.

3.2.1 Estrutura inerte

A estrutura da edificação modelo é em concreto armado, com padrões de material adotados do banco de dados do próprio *software* FDS e Pyrosim. Quanto às características construtivas, a edificação foi classificada com mediana resistência ao fogo, visto que a maioria das edificações está atualmente classificada como risco médio. No estudo deste modelo generalizado, as paredes, teto e piso não contribuirão para a propagação do fogo.

Frequentemente é necessário, nas simulações computacionais, considerar os limites do sistema como adiabático, ou seja, sem interação com o exterior, para que haja um sistema isolado que tende a alcançar um equilíbrio térmico, o que é exatamente o contrário do que acontece em situações de incêndio reais, porém, todos os sistemas abertos ou fechados, tendem a encontrar o equilíbrio (ANDRADE, 2018).

Os materiais utilizados como estrutura neste estudo foram considerados adiabáticos, ou seja, não há troca de calor entre as paredes, piso e forro, conforme analisa Mazzoni (2010). Isso se justifica, pois, o foco principal deste trabalho é verificar a dinâmica do incêndio e as temperaturas presentes nos limites das aberturas superiores, não sendo o foco principal a análise da compartimentação pelos materiais utilizados para a edificação.

3.2.2 Malhas

O FDS utiliza de malhas regulares, definidas em três dimensões X, Y e Z. Cada cubo, denominado célula, existente na malha possui volumes finitos, nos quais são aplicadas grandezas escalares para o interior e elementos vetoriais para suas faces (ANDRADE, 2018).

As malhas são dependentes do equipamento disponível para a simulação e das características do ensaio, o refinamento para cálculo, depende da quantidade de células utilizadas na análise (MANZONI, 2010).

A diminuição do tamanho das células aumenta a precisão dos resultados, porém também aumenta a necessidade de processamento e tempo computacional de análise, portanto, é necessário utilizar com sabedoria as dimensões das malhas. Utilizaram-se malhas de 30 centímetros para a análise do presente estudo, de forma que a precisão dos resultados não seria comprometida, porém, não acarretariam muito tempo computacional de análise.

3.2.3 Ventilação Externa

Com o desenrolar do incêndio, o calor gera gases devido à combustão dos materiais inseridos como carga de incêndio, os quais possuem distintas densidades devido à variação entre temperaturas, essas diferenças são responsáveis pela movimentação das massas de ar entre o interior da edificação e sua parte externa, que deve ser inserida no modelo para que haja a troca destes e a dinâmica do incêndio ocorra corretamente.

Utilizou-se a ventilação “OPEN” própria do Pyrosim para gerar a ventilação externa a qual possibilita a movimentação do ar fora da edificação modelada. Após muitas tentativas na definição do modelo, verificou-se que esta ventilação deve ficar fora da malha de análise do programa, sendo que se inserida dentro da malha, o FDS não faz a análise da estrutura.

O *software* possui um mecanismo que interrompe a queima automaticamente quando há falta de comburente no ambiente modelado, tornando o modelo muito mais real, pois em uma situação de incêndio real, o mesmo se extingue automaticamente em um compartimento fechado e sem entrada de ar.

3.2.4 Parâmetros da Madeira

Considerar que a carga de incêndio irá queimar como madeira é adequado, conforme Seito (2008), somente para alguns casos específicos, porém muito utilizado para estudos e simulações de sinistros, pois iguala todos os materiais.

A madeira era utilizada como material padrão para a origem de um incêndio, visto que muitos materiais possuem um potencial calorífico específico similar à mesma, e nas antigas literaturas a carga de incêndio era fornecida em kg/m² de madeira equivalente (SILVA, 2014).

Os parâmetros definidos para a madeira foram de acordo com os tutoriais da criadora do Pyrosim, a Thunderhead Engineering Consultants, bem como o estudo de Andrade (2018) o qual comparou os valores adotados para o material. Na Tabela 03 elencou-se todas as características utilizadas para o material.

Tabela 03 – Característica da Madeira

Características da Madeira		
Densidade	kg/m ³	369,6
Átomos de Carbono	Composição	3,4
Átomos de Hidrogênio	Composição	6,2
Átomos de Oxigênio	Composição	2,5
Calor específico	kJ/kg.K	1,36
Condutividade	W/m.K	0,13
Emissividade		0,9
Potencial calorífico	kJ/kg	17900
Taxa de liberação de Calor (HRRPUA)	kW/m ²	175

Fonte: da autora, baseado em Andrade (2018).

A opção “*burn away*” foi selecionada para a madeira, esta opção só pode ser ativada para materiais que entram em ignição. É um bom indicador antes da análise do sistema, para verificar se a carga de incêndio irá funcionar como combustível.

3.2.4.1 Autoignição da madeira

Um dos princípios mais importantes, segundo Andrade (2018), é o entendimento da temperatura de autoignição de um material, sendo o responsável pela maioria dos alastramentos de incêndio, visto que não é necessário o contato direto da chama, a ignição pode ocorrer pelo simples aquecimento do ambiente.

A temperatura de autoignição é definida por Andrade (2018) como o valor em que um certo material entra em combustão automaticamente, sem a existência de outra fonte de ignição, na qual, o material é ignizado unicamente por sua temperatura superficial. A temperatura de ignição da madeira varia entre 298 e 400° C.

A carga de incêndio foi dimensionada com o cálculo de metros cúbicos de madeira dispostas lado a lado, com temperatura de autoignição de 298°C, o menor valor determinado pela aproximação conforme Andrade (2018), visando um pior cenário no caso de sinistro.

3.2.4.2 Cargas de incêndio

Para o uso do programa computacional é indispensável adotar o montante para o cálculo da carga de incêndio específica, significando que a carga de incêndio deve ser calibrada por determinados coeficientes característicos.

Utilizou-se como base a Lei Complementar 14.376 e suas atualizações, as cargas de incêndio foram dimensionadas conforme a carga máxima possível de cada faixa de risco de incêndio, sendo elas 300 MJ/m² para risco baixo, 1200 MJ/m² para risco médio e 4000 MJ/m² para risco alto. Desta forma, pode-se prever o cenário mais desfavorável possível, evitando todo e qualquer tipo de sinistro em edificações ou ambientes vizinhos, bem como consecutivos, proveniente deste tipo de medida de prevenção.

Conforme estudos de Andrade (2018), um bloco sólido de madeira possui menor área de contato com o ar, e consequentemente, atinge menores temperaturas de queima se comparado às ripas de madeira empilhadas. Segundo o estudo, a temperatura atinge valores 40% superiores, e para o presente trabalho, foi utilizado como modelo de carga de incêndio, ripas de madeira sobrepostas, ampliando a área de queima.

As dimensões foram definidas partindo de um cálculo elaborado para determinar a metragem cúbica de madeira necessária para a carga de incêndio desejada, valores estes determinados a partir da densidade aparente da madeira e seu potencial calorífico. A carga de incêndio é calculada a partir da divisão do potencial calorífico da madeira pela área em metros quadrados do compartimento, conforme demonstra a Expressão 04.

$$C = \frac{Pot\ cal.}{\acute{a}rea} \quad (4)$$

Sendo:

C = Carga de incêndio [MJ/m²]

Pot cal. = Potencial Calorífico [MJ]

Área = área do compartimento [m²]

Para determinar o potencial calorífico do volume de madeira, é necessário transformar em kg, utilizando a densidade aparente do material. A partir disto, é feita uma regra de três para verificar quantos metros cúbicos de madeira representam a carga de incêndio desejada.

Para o risco baixo, foram necessários aproximadamente 76 blocos de 0,06 m³ para satisfazer os 300 MJ caracterizados para esta classe de risco. Já para o risco médio, foram utilizados 303 blocos de mesma dimensão para atingir 1200 MJ e 1008 blocos para o risco alto que possui 4000 MJ, empilhados aleatoriamente.

3.2.5 Reação

Foram determinadas as reações de Combustão das estruturas conforme dados obtidos pelos estudos de Rodrigues (2009), Andrade (2018) e Ruschel (2011), que foram sintetizados na Figura 15 abaixo.

Figura 15- Dados de Reação da simulação

The figure displays three screenshots of a software interface for defining reaction parameters, likely for fire simulation software.

Top Left Screenshot: Shows the 'Description' field set to 'reação' and 'Reaction Type' set to 'Simple Chemistry'. The 'Fuel' tab is selected, showing 'Fuel Type' as 'Simple Chemistry Model' with the note 'Fuel assumed to contain only C, O, H, and N.' The 'Composition' section lists: Carbon atoms: 3,4; Hydrogen atoms: 6,2; Oxygen atoms: 2,5; Nitrogen atoms: 0,0.

Top Right Screenshot: Shows the 'Energy Released' section. The 'Specify heat of combustion' radio button is selected, with a value of 1,79E4 kJ/kg. The 'Radiative Fraction' is set to 0,35. The 'Energy is Ideal' checkbox is unchecked. The 'CO Yield (Y_{CO})' is 0,0; 'Soot Yield (Y_S)' is 0,015; and 'Hydrogen Fraction' is 0,0.

Bottom Screenshot: Shows the 'Fire Suppression' tab selected. The 'Enable Fire Suppression' checkbox is checked. The 'Critical Flame Temperature' is set to 1427,0 °C and the 'Autoignition Temperature' is set to 0,0 °C.

Fonte: da autora.

Estes dados são importantes para a determinação da correta simulação e desenvolvimento do incêndio, validando assim os modelos elaborados.

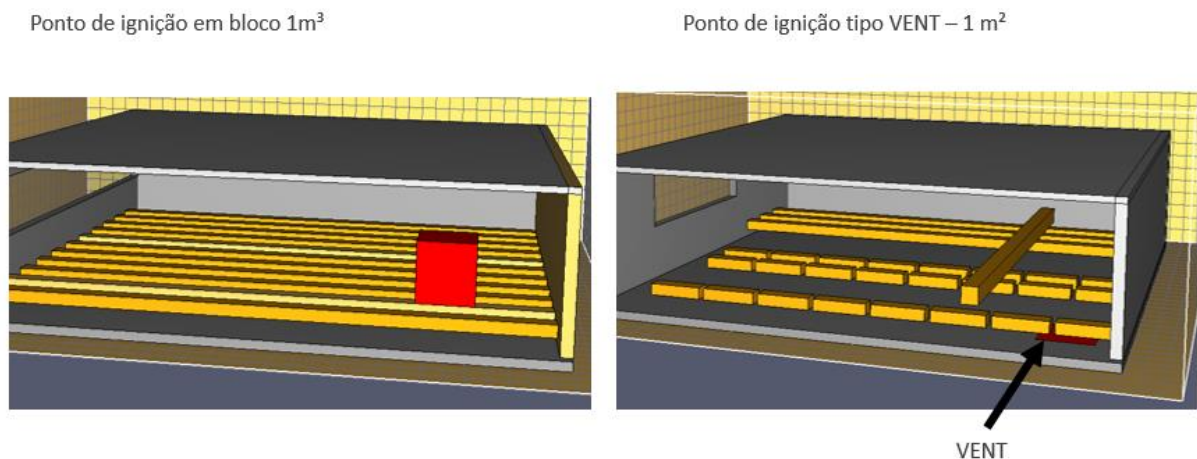
3.2.6 Ignição

Em seguida, foi definido o local de inserção da carga de incêndio, no qual ocorreria a ignição e a propagação do fogo. Decidiu-se por um canto da edificação onde facilmente poderia iniciar um sinistro devido um curto-circuito.

As incidências de ignições mais frequentes segundo Seito et al. (2008) ocorre com vazamentos de botijões de gás com explosões, curtos-circuitos por excesso de carga, produtos perigosos em locais inadequados, esquecimento de eletrodomésticos ligados.

Foram elaborados testes de ignição para determinação do modelo a ser utilizado no presente estudo, utilizou-se dois tipos de ignitores, sendo eles, um bloco de 1 m³ de dimensões e um “vent” do tipo aquecedor de 1m², ambos possuindo as mesmas propriedades, conforme demonstrado pela Figura 16.

Figura 16 – Testes de ignição



Fonte: da autora.

Decidiu-se pela utilização do modelo “vent” por ser o mais utilizado em demais estudos deste gênero. Estes queimadores são superfícies conhecidas por “burners” no qual são inseridos valores de potencial calorífico e que podem ser desligados conforme necessidade.

Para o presente trabalho, utilizou-se o tempo de início em 1 segundo e progressivamente aumentando a transferência de calor até 10 segundos, assim permanecendo em sua maior potência por mais 5 segundos, e então sendo extinto. Isso fez com que a carga de incêndio da madeira próxima queimasse automaticamente e passasse o fogo para as demais madeiras espalhadas pelo ambiente.

O valor para potência usado por Andrade (2018) é muito baixo quando se pretende utilizar a ignição como uma pequena área da edificação, somente funciona, quando o “*vent*” é colocado em toda a área do piso do pavimento incendiado. Desta forma, foi necessário testar outros casos e verificar novos estudos sobre a ignição de materiais no Pyrosim.

Descobriu-se que é necessário um alto valor de HRRPUA para que um “*vent*” reduzido, simulando um curto-circuito, desencadeando a ignição do sistema, e o incêndio ocorresse pela queima das cargas de incêndio, conforme foi descrito por Manzoni (2010).

O estudo de Ruschel (2011) determinou o valor de 5000 kW/m² para a área de fogo como taxa de liberação de calor, pois o fogo fica concentrado apenas no queimador e o incêndio é alastrado pelas madeiras espalhadas pela edificação. Sendo assim, adotou-se os mesmos parâmetros que Ruschel (2011) para o queimador.

3.2.7 Tempo de simulação

A RTT em seu item 4.12.2 afirma que:

No isolamento de riscos obtido por separação de áreas em uma mesma edificação, o tempo requerido de resistência ao fogo – TRRF, dos elementos deverá ser de:

- a) 2 horas, quando as áreas a serem isoladas tiverem grau de risco de incêndio baixo e/ou médio;
- b) 3 horas, quando pelo menos uma das áreas a serem isoladas tiver grau de risco de incêndio alto (CBMRS, 2017, p.9).

Ruschel (2010) informa que uma simulação de 120 segundos equivale à aproximadamente 3:20 horas de um incêndio real, ou seja, 1 segundo simulado representa 1,67 minutos reais de incêndio, sendo assim, as análises foram feitas para 400 segundos, o que representaria cerca de 11 horas de um incêndio real.

3.3 Saída de dados e análise

O lugar próximo à janela da edificação foi o ponto selecionado, local onde normalmente possuem cortinas e materiais em madeira, que facilitariam a propagação da chama. Foram inseridos termopares na base da abertura superior em todas as aberturas para análise da temperatura, sendo feita média deles após a saída de dados.

O Pyrosim disponibiliza a saída de dados em forma de dados em Excel, bem como modelos visuais em faixas de temperatura definidas pelo usuário em qual local de corte pode ser inserida. Desta forma, é possível analisar o aumento e decréscimo de temperatura com o passar do tempo, não só os picos ou locais pontuais, como também a variação da temperatura na estrutura segundo uma escala de cores, denominado “*slices*” ou lâminas.

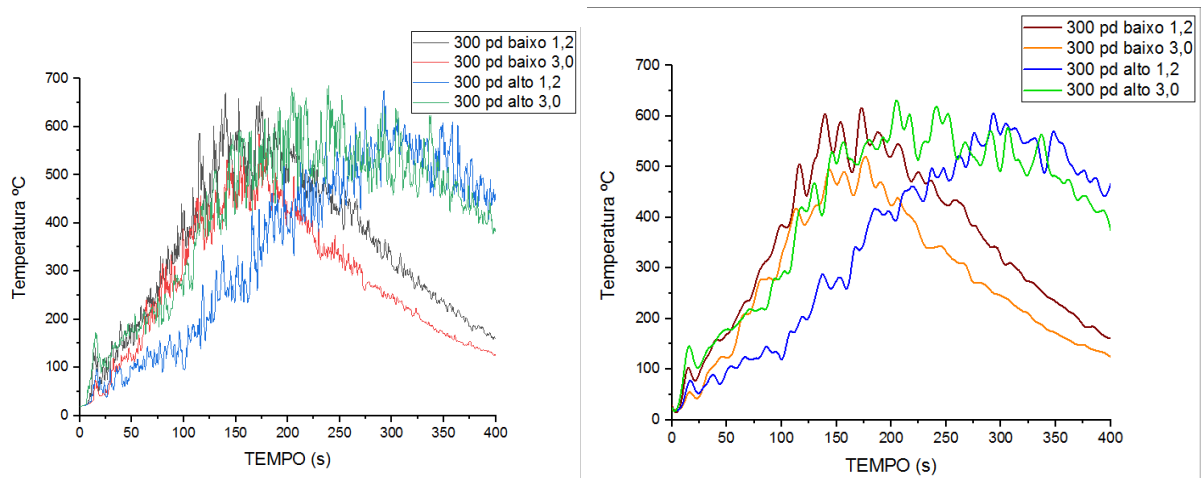
A propagação do incêndio pode ser verificada pelo vídeo gerado ao final da análise do sistema, no qual pode-se selecionar quais parâmetros, em separado ou não, que se quer analisar com o desenrolar do incêndio.

3.4. Tratamento dos Resultados

As análises foram realizadas de acordo com os resultados obtidos pelos dados disponibilizados em Excel através do Pyrosim e transformados em gráficos.

Para a realização das verificações nos gráficos, foi necessário fazer uma suavização nos ruídos, visto que com a variação de temperatura com a queima repetida dos blocos, os gráficos simples não permitem uma análise global de todos os pontos por sua grande variação dentro do mesmo segundo, sendo impossível fazer a leitura nos gráficos originais. Como pode ser verificado na comparação feita na Figura 17 abaixo, na qual o da esquerda representa o gráfico real e o da direita, as linhas de tendência elaboradas.

Figura 17 – Comparativo Gráfico original e suavizado



Fonte: da autora

O Smooth é uma técnica de processamento de suavização de ruídos utilizada no *software* Origin⁴, utilizando o filtro digital diferenciador Savitzky-Golay que executa uma regressão polinomial local em torno de cada ponto e cria um novo valor suavizado para cada ponto de dados, preservando as características dos dados, como altura e largura de pico e o perfil geral do gráfico, suavizando apenas os ruídos existentes nos dados apresentados.

3.5 Critérios para análise da compartimentação

Os materiais tendem a trocar energia (calor) entre si, em busca do equilíbrio térmico, conforme preconiza a lei zero da termodinâmica a qual verifica que dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro sistema, permanecem em equilíbrio térmico entre si.

Os critérios de resistência ao fogo utilizados para estanqueidade dos compartimentos adjacentes aos sinistrados foram conforme preconiza a ABNT NBR 6479 (1992), as médias dos termopares inferiores à 140°C acrescidos da temperatura inicial do ensaio, ou 180°C acrescidos da temperatura inicial, em qualquer termopar de análise.

Por outro lado, em um incêndio real, os vidros se quebram acima de 500 °C (ANDRADE, 2018). O estudo de Rodrigues (2009) considerou o valor de 500°C como

⁴ O Origin é um programa de análise de dados, gráficos e estatísticas desenvolvido pela Originlab, com versão utilizada OriginPro Trial 2019b.

estanqueidade às chamas para verificação da compartimentação, sendo um valor proveniente de estudos de Rosso (1975) no qual foi considerado que as chamas que saem verticalmente pela janela só terão efeito considerável para a propagação do fogo quando excederem este valor.

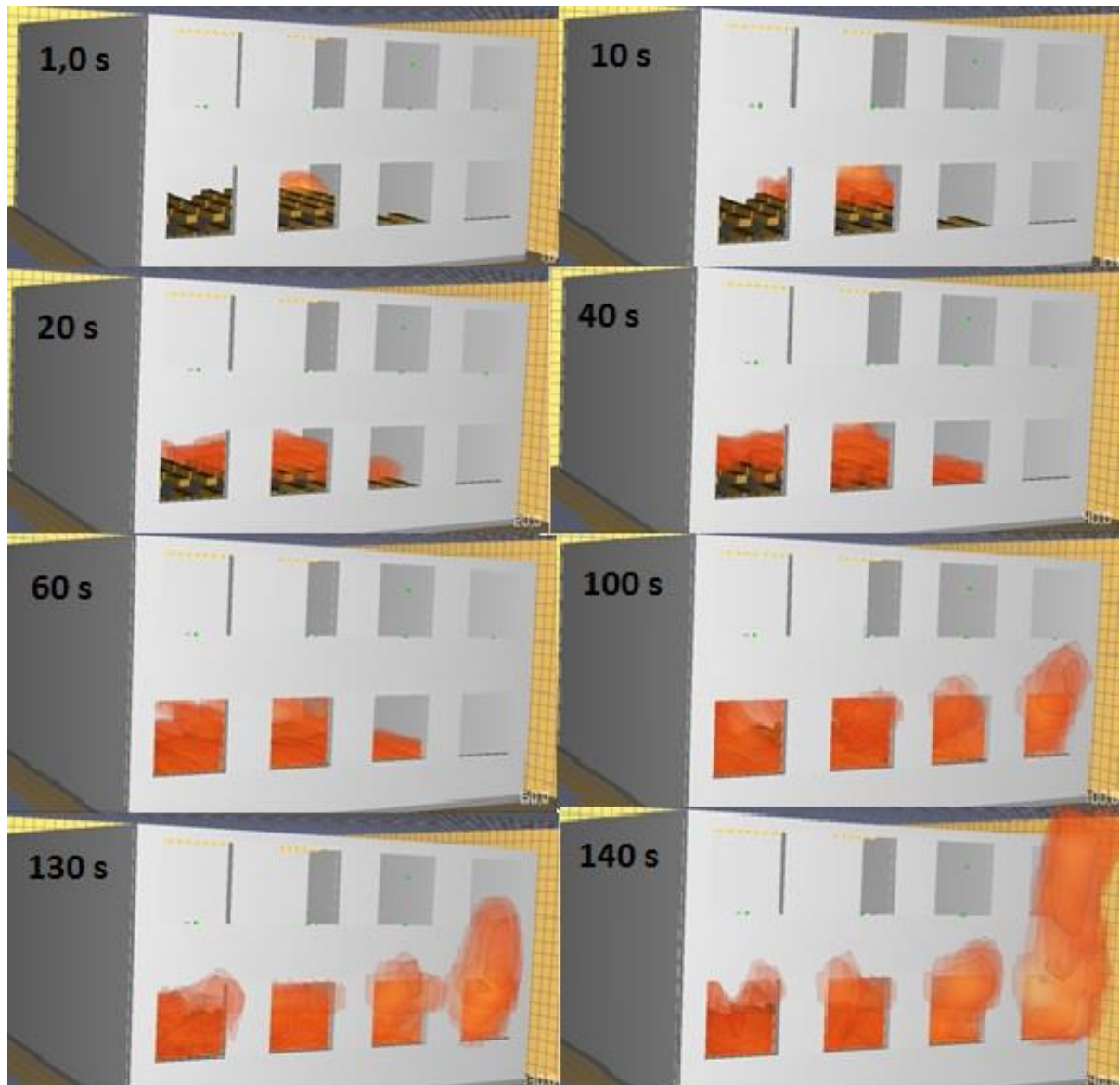
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos pela pesquisa desenvolvida bem como as análises dos mesmos conforme objetivos do trabalho, verificando o atendimento das suposições das questões de pesquisa.

4.1. Dinâmica do incêndio

A dinâmica do incêndio pode ser verificada pelo vídeo disponibilizado pelo Pyrosim, o qual demonstra com o passar do tempo, o fluxo das chamas na edificação modelada. A Figura 18 representa o desenvolvimento do fogo e o consumo das madeiras como saída de dados do *software*, podendo assim verificar os locais atingidos pelas chamas, bem como a altura da pluma de fogo, nas saídas das aberturas localizadas no térreo.

Figura 18 – Dinâmica do incêndio no Pyrosim

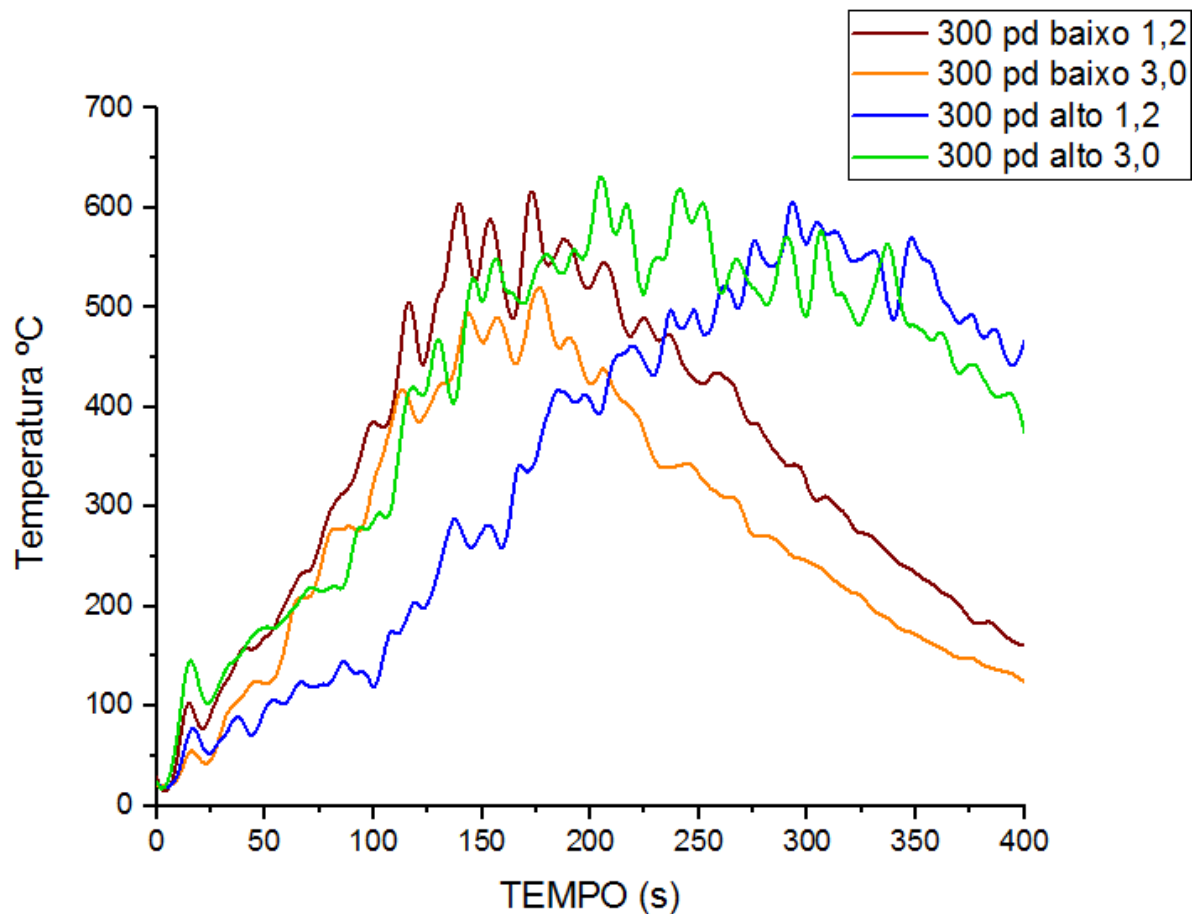


Fonte: da autora

4.2. Resultados para Baixa Carga de Incêndio

O pé direito alto com janelas largas possui um *flashover* mais tardio, se comparado com o pé direito baixo e janelas estreitas, para a mesma carga de incêndio, conforme pode ser identificado no Gráfico 01, o qual representa a média dos valores dos termopares inseridos na base da abertura superior, respeitando os distanciamentos analisados.

Gráfico 01 – Valores de termopares para 300 MJ



Fonte: da autora

Se a verificação da compartimentação for feita pela ABNT NBR 6479 (1992), nenhum dos modelos analisados poderia ser aceito, visto que as temperaturas ultrapassaram, e muito, os valores definidos pela norma de 140°C mais a temperatura inicial nas médias dos termopares, ou 180°C mais a temperatura inicial em qualquer termopar de análise, portanto, mesmo para o risco baixo.

O atendimento da ABNT NBR 6479 (1992) é somente para elementos de par-chamas, com barreiras físicas, sendo inviável para análise do presente estudo. Assim sendo será analisado a compartimentação pela temperatura de 500°C.

A curva de risco baixo com pé direito baixo e distanciamento de 3,0m, localizada no Gráfico 01 possui uma temperatura inferior à 500°C, sendo a única a ser aceita pelo método de Rodrigues (2009), conforme análises realizadas pelo *software*. Portanto, neste caso, as

edificações que possuam risco baixo, pé direito considerado comum e distanciamento entre aberturas superior à 3,0 metros, estariam compartimentadas ao fogo.

As temperaturas dos modelos de pé direito alto nos dois casos e de pé direito baixo com afastamento de 1,2 metros possuíram um aumento de aproximadamente 25 % em relação ao modelo de baixa altura e espaçamento de 3,0 metros.

Porém, analisando com mais atenção acredita-se que poderia haver uma tolerância, pois os valores de todos os modelos analisados estão muito próximos, e chegam próximo aos 600°C, inclusive as aberturas distanciadas 1,2 metros. Essa tolerância se justifica, pois foi adotada a máxima carga de incêndio da classe pela Lei Complementar 14.376 do Estado do Rio Grande do Sul (2013). Além disso, entende-se que já há um fator de segurança inserido nesta carga de incêndio, visando uma maior proteção. Avaliando sob este ponto de vista, todos os modelos de risco baixo poderiam ser aceitos.

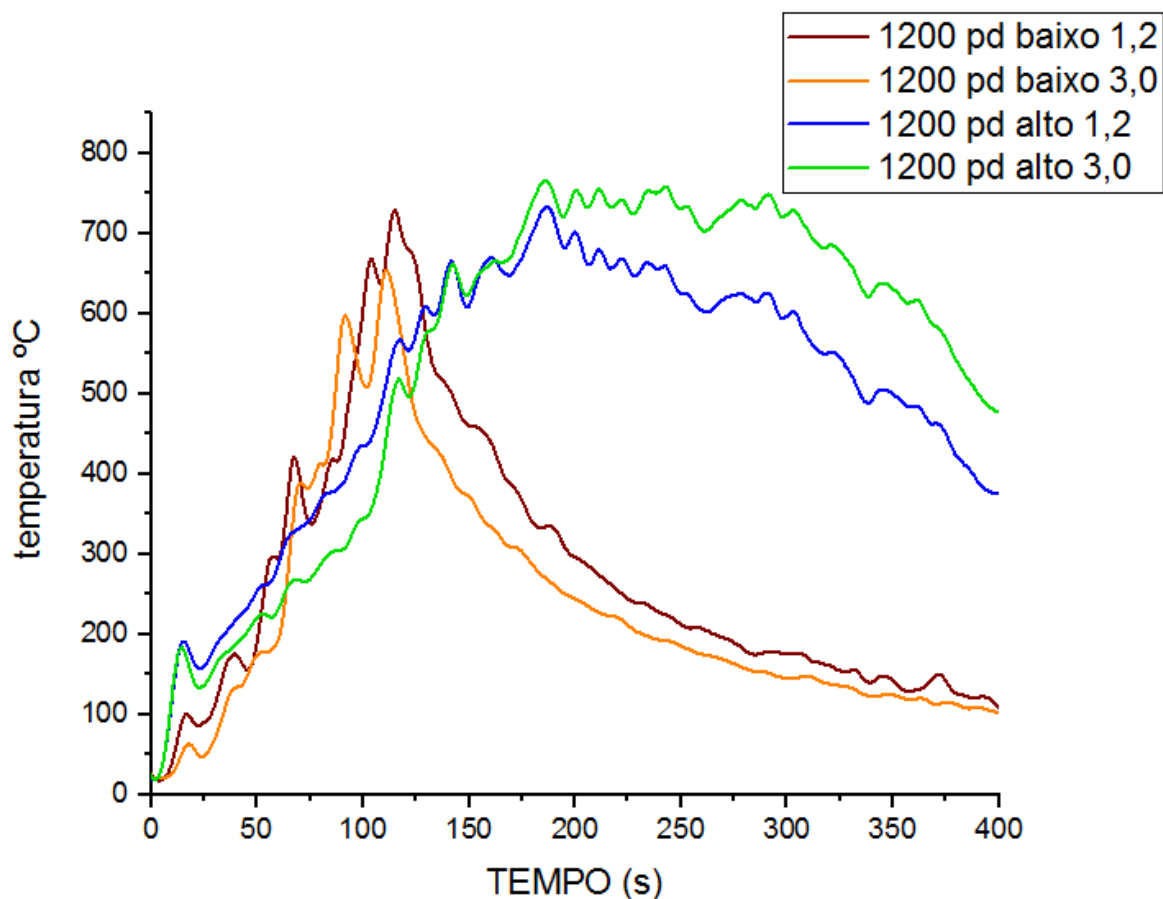
Ainda é possível verificar que houve diminuição na temperatura ao aumentar o distanciamento entre as aberturas para o pé direito baixo, entretanto não houve alteração quando alterado o pé direito.

4.3. Resultados para Média Carga de Incêndio

Os dados obtidos pelas análises dos modelos de risco médio mostram um *flashover* mais tardio das edificações com pé direito duplo, conforme mostra o Gráfico 02, se comparadas às de baixo pé direito.

O risco médio ultrapassa em todas as análises os valores de 500°C determinado por Rodrigues (2009), até mesmo nos distanciamentos superiores de 3,0 m, não sendo aceitas assim nenhuma amostra para compartimentação vertical sem marquises.

Gráfico 02 – Valores de termopares para 1200 MJ



Fonte: da autora

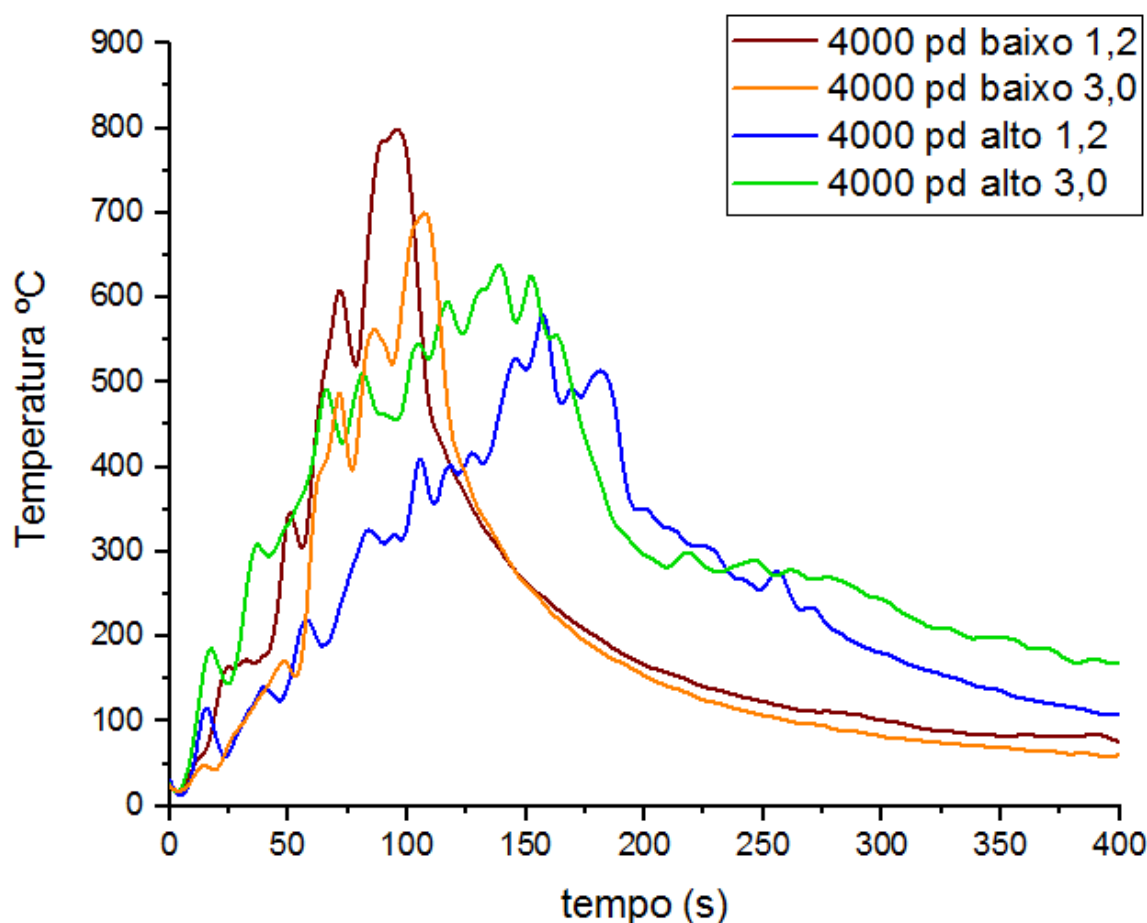
É possível verificar que o pé direito com 4,2 metros, considerado alto, demonstra maior temperatura nos termopares por mais tempo do que o pé direito baixo, mantendo o incêndio ativo prolongadamente. Já ao comparar os dois modelos de pé direito baixo, verifica-se que possuem praticamente a mesma curva, apenas com aproximadamente 100°C de diferença entre elas, isto acontece no pé direito alto também.

Os resultados mostram um aumento de cerca de 60% na temperatura limite analisada para a compartimentação da edificação, de 500°C. Desta forma, os modelos de médio risco não podem ser aceitos como alternativa de confinamento do fogo visto a elevada discrepância entre o valor definido e o encontrado, até mesmo para os modelos com maiores distanciamentos entre aberturas.

4.4. Resultados para Alta Carga de Incêndio

Para a carga de incêndio alta a situação de pé direito é invertida ao risco médio, pois verifica-se no Gráfico 03 que a temperatura nos termopares é inferior nos modelos de pé direito baixo. Não encontrou-se uma explicação para o caso, porém, acredita-se que os resultados estejam corretos, pois não houve alterações nos parâmetros da modelagem.

Gráfico 03 – Valores de termopares para 4000 MJ



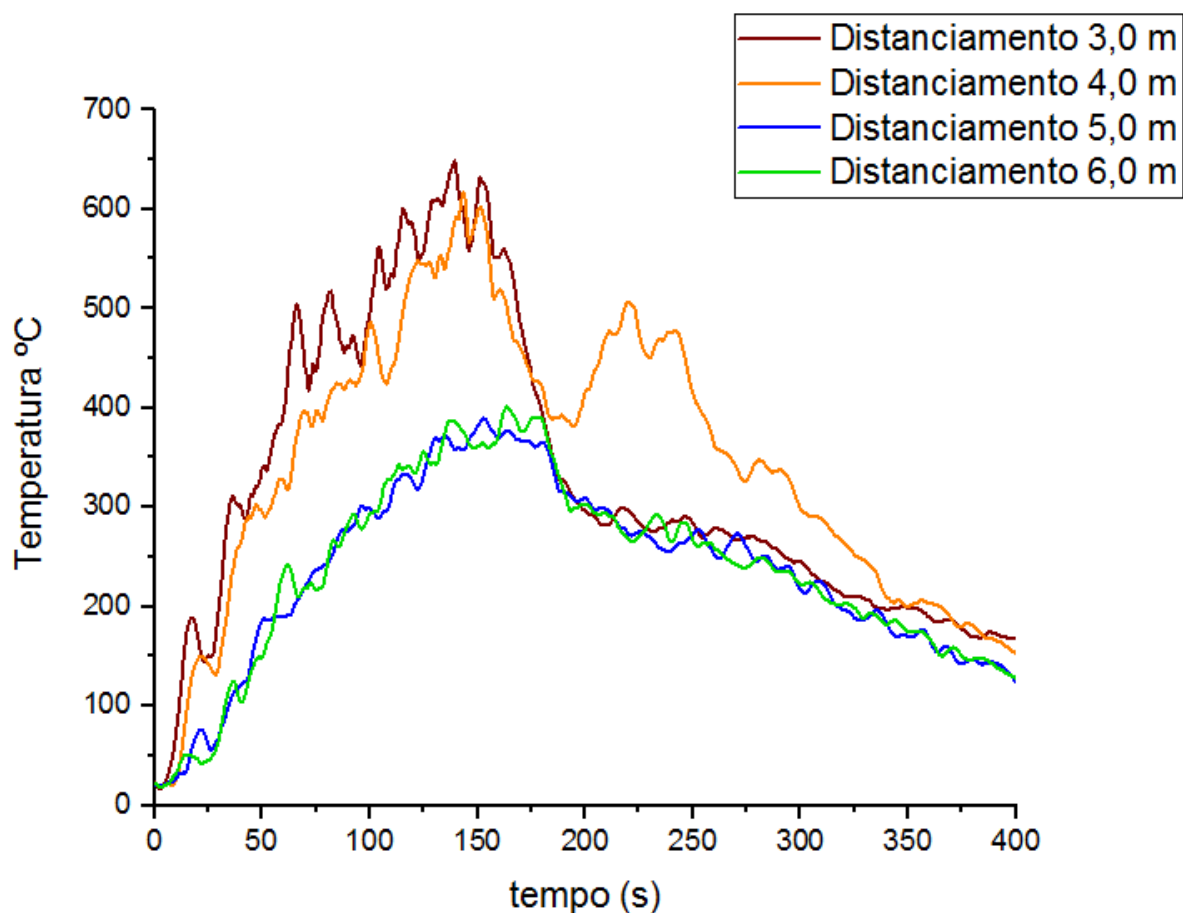
Fonte: da autora

Há uma grande variação na temperatura para o maior risco de acordo com a altura do pé direito da edificação, os picos de temperatura elevam-se entre 15 a 60% dos valores considerados viáveis para a compartimentação, conforme os estudos de Rodrigues (2009). Portanto, mesmo com alguns valores mais inferiores, nenhum modelo atende plenamente, não sendo aceitos como compartimentações verticais externas.

Todos os casos não fornecem a correta compartimentação vertical sem a presença de marquises nas fachadas. A fim de investigar melhor este caso, foi feito como análise complementar, o modelo de 4000 MJ e pé direito alto com termopares localizados em locais superiores, visando verificar qual o distanciamento necessário para atender a compartimentação.

Pode ser verificado no Gráfico 04 que a partir de 5,0 metros, a temperatura diminui consideravelmente e atende plenamente os 500°C. Portanto, de acordo com os casos analisados, para isolamento de risco alto, assim como para o risco médio, as distâncias de 1,2 ou 3,0 metros não atendem aos requisitos de compartimentação analisados.

Gráfico 04 – Valores de termopares para 4000 MJ e pé direito alto



Fonte: da autora

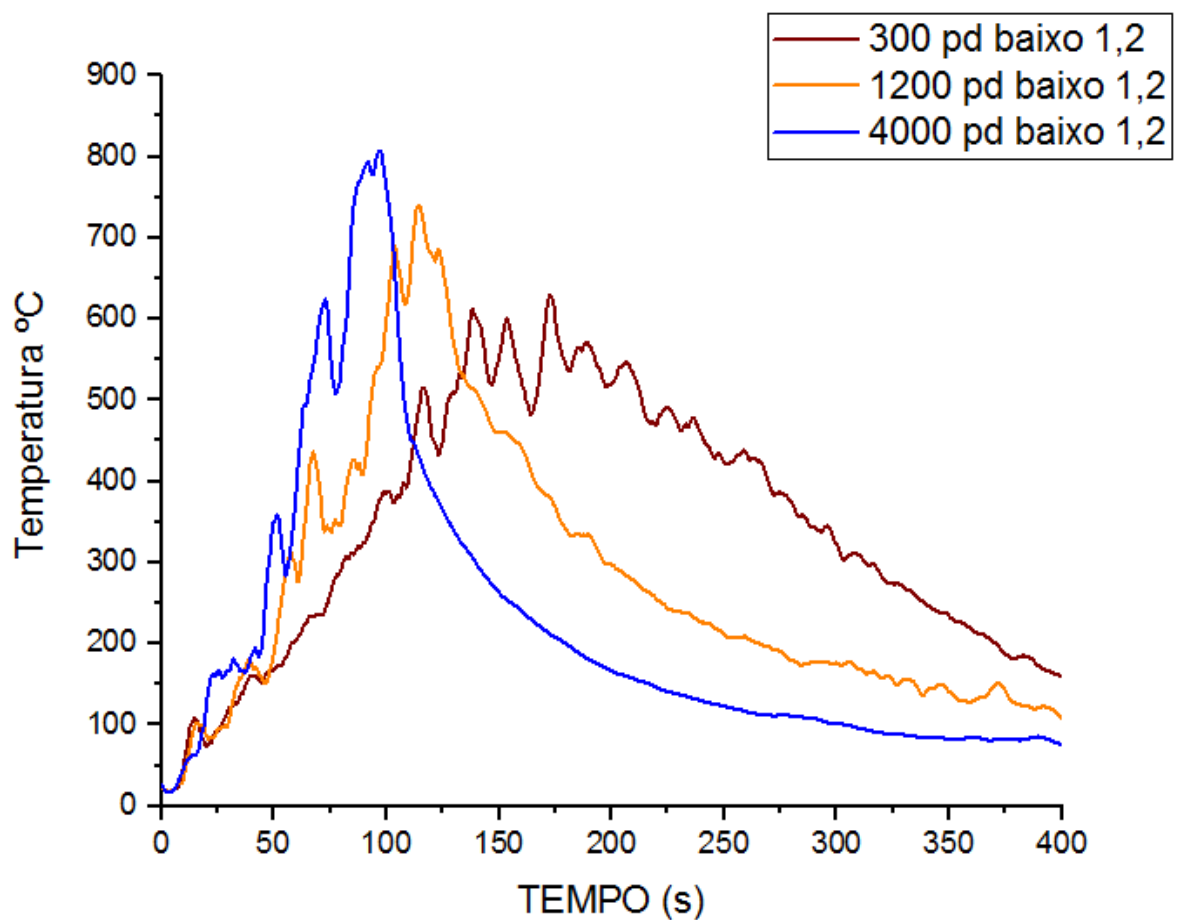
Considerando que sempre se optou por uma abordagem mais rigorosa, visando à segurança ao incêndio, entende-se que em muitos casos reais possam também não estar atendendo aos requisitos de compartimentação previstos. Portanto, os resultados desta análise

indicam que as distâncias para compartimentação devem ser revistas, caso se queira garantir a estanqueidade em qualquer edificação.

4.5. Comparativo entre cargas de incêndio

No incêndio em altas cargas ocorre queima dos materiais mais rapidamente, consumindo assim todo o oxigênio do local antes dos sinistros ocorridos com baixa carga, por este motivo, suas temperaturas internas são maiores e ocorrem antes, bem como se extinguem antes em locais altamente ventilados. Isto é reproduzido pelos Gráficos 05 a 08, os quais representam os modelos analisados, com todos os graus de risco de incêndio, trazendo agora um comparativo entre os resultados de cada carga de incêndio para os três pés direitos.

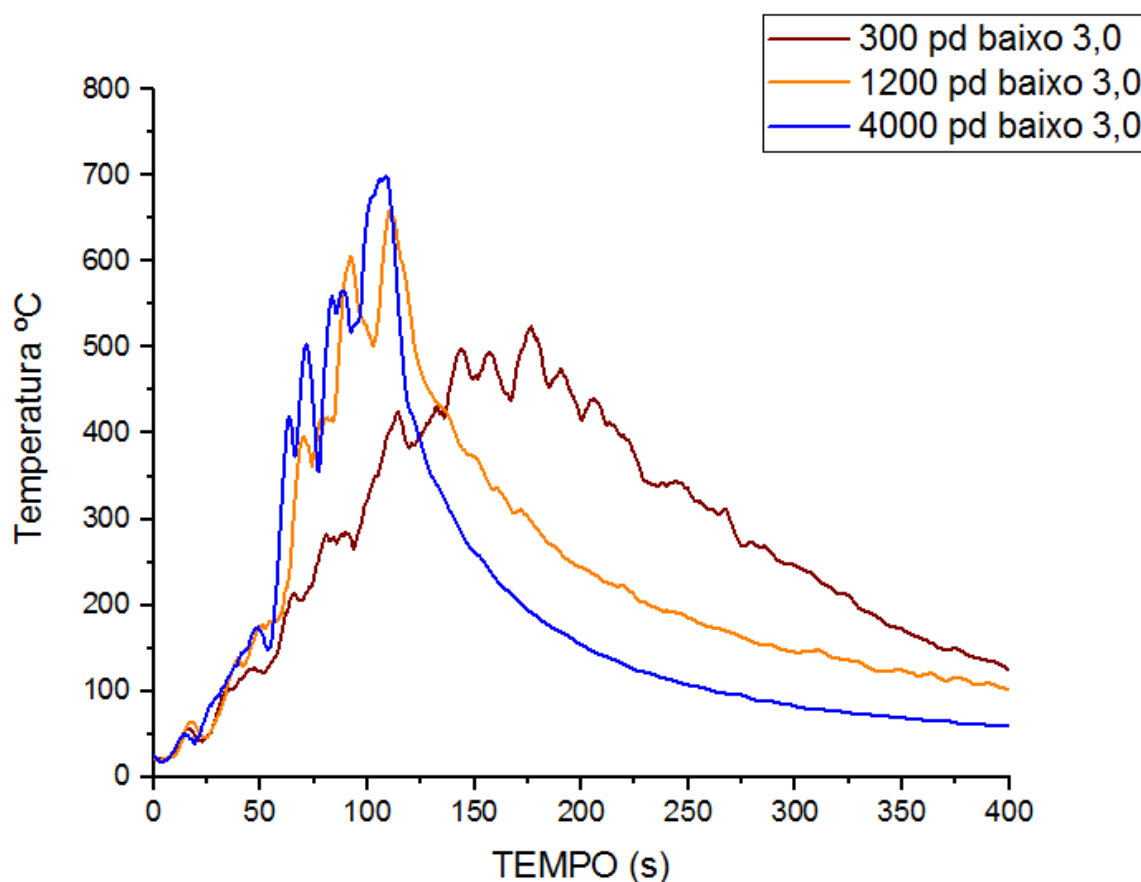
Gráfico 05 – Temperatura interna pé direito baixo e distanciamento de 1,2 m



Fonte: da autora

Os Gráficos 05 e 06 possuem uma mesma configuração do gráfico gerado para análise do grau de ventilação comparado à carga de incêndio elaborado por Silva (2014), podendo assim, garantir como validado o estudo, pela comparação entre os modelos encontrados. Verifica-se que as cargas de incêndio média e baixa, possuem uma pequena mudança em relação ao gráfico de Silva (2014), localizado na Figura 11, na página 48 deste presente estudo, pelo grau de ventilação ser alto.

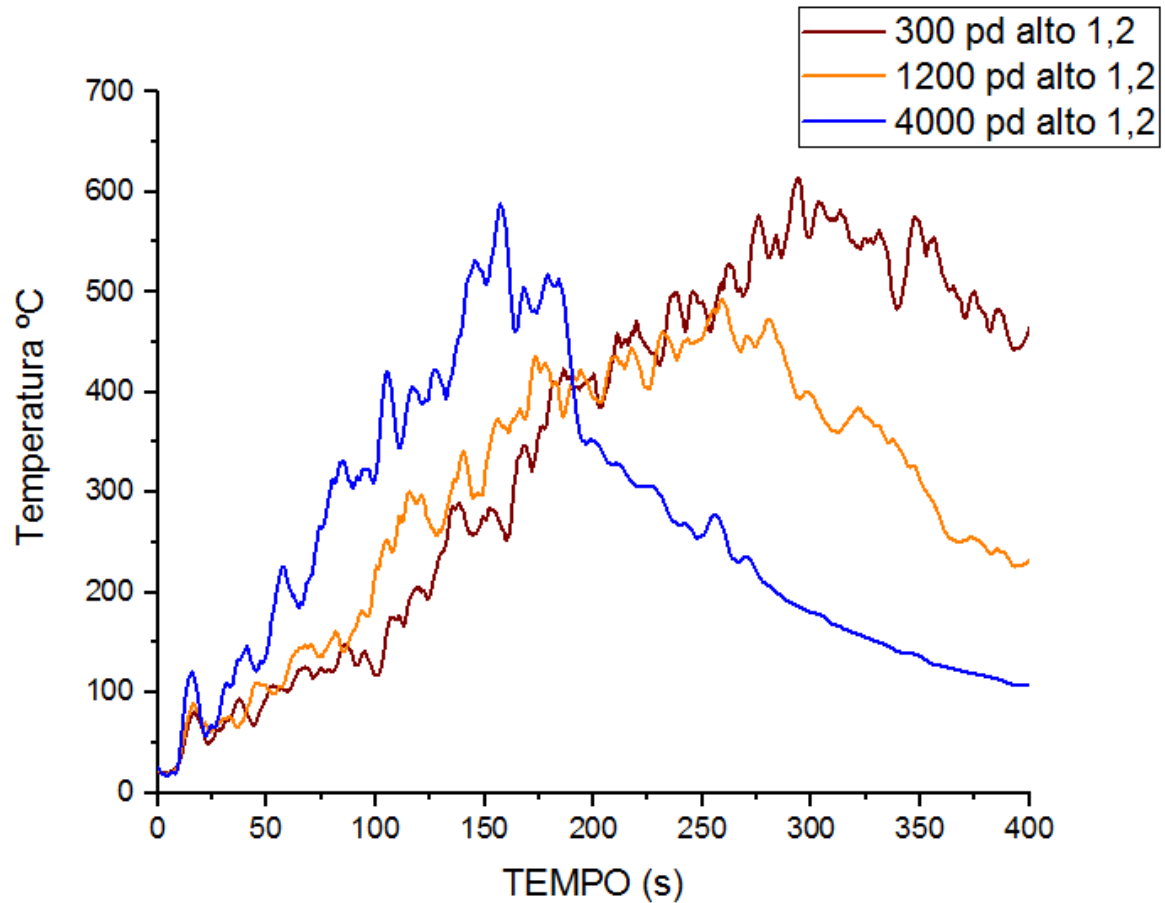
Gráfico 06– Temperatura interna pé direito baixo e distanciamento de 3,0 m



Fonte: da autora

No Gráfico 07 é possível verificar uma grande semelhança dos modelos de alta e média carga de incêndio com a Figura 11, mostrada no item 3.1.2 deste presente trabalho, pois possuem as mesmas características elencadas na Figura disponibilizada por Silva (2014). Os modelos com maior carga atingem a sua maior temperatura num momento anterior que os modelos com menores cargas.

Gráfico 07 – Temperatura interna pé direito alto e distanciamento de 3,0 m

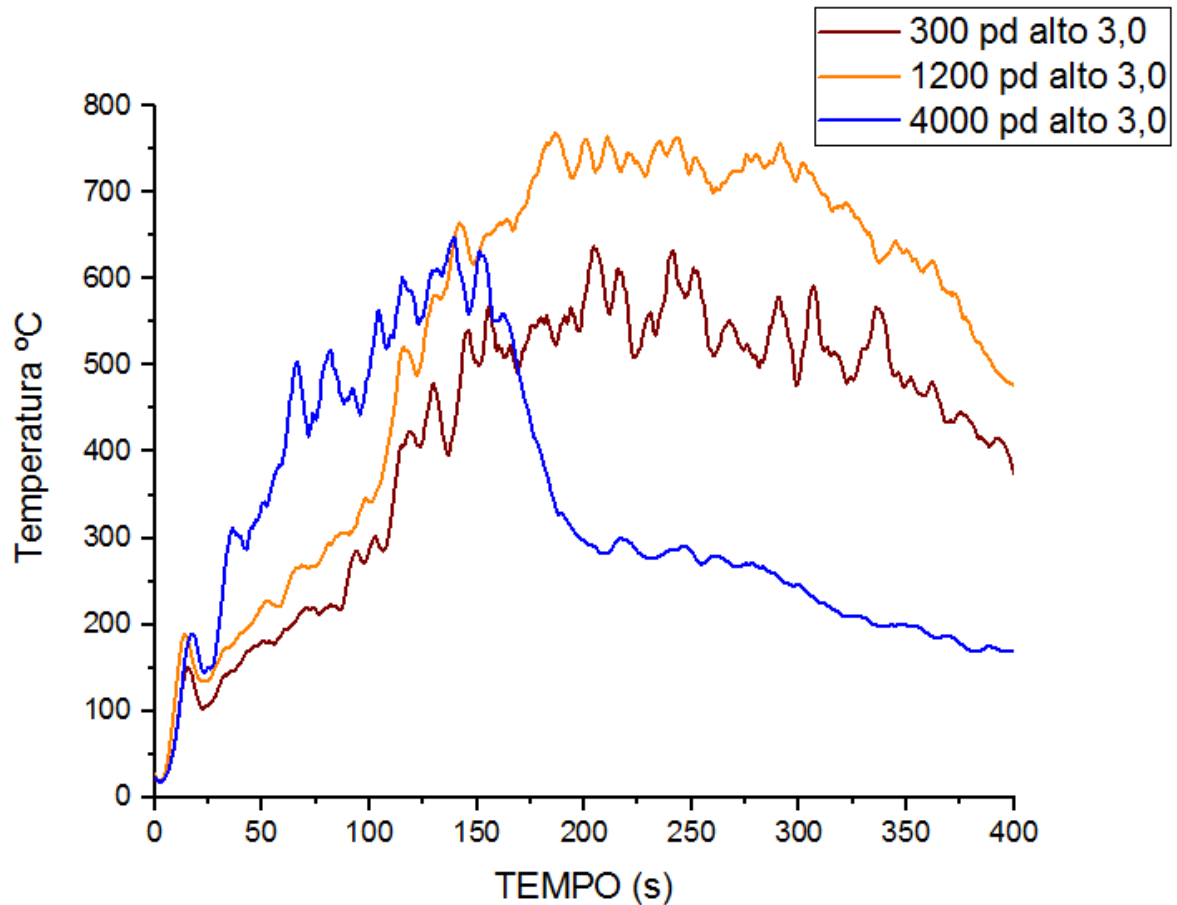


Fonte: da autora

Para o modelo de baixa carga de incêndio, a mesma não pode ser comparada com as curvas de Silva (2014), visto o grau de ventilação ser alto, garantindo assim, a continuação do incêndio por um maior tempo e atingindo maiores temperaturas, como não há sua extinção precoce.

É possível fazer uma comparação da Figura 11 com o Gráfico 08 a seguir, pois verifica-se que a alta carga de incêndio, combinada com ótima ventilação, gera um *flashover* antecipado do incêndio, criando um grande pico de temperatura em um período curto de tempo.

Gráfico 08 – Temperatura interna pé direito alto e distanciamento de 3,0 m



Fonte: da autora

Comparando com os gráficos de edificações de pé direito baixo, nas edificações de pé direito alto, a temperatura de análise diminui mais rapidamente com o risco alto, como pode ser verificado na comparação dos Gráficos 07 e 08.

Os resultados da comparação entre os 4 modelos e suas respectivas cargas de incêndio demonstram que todos os modelos, exceto os de baixo risco, não podem ser considerados bons para a compartimentação vertical das fachadas, sem a utilização de abas com materiais resistentes à fogo. Portanto, as edificações necessitam adotar outros possíveis métodos de prevenção e combate a incêndios, para riscos médios e altos, tais como detectores de fumaça e *sprinklers*, quando não for possível inserir marquises em suas fachadas.

5. CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho de investigar os distanciamentos conforme legislações atualmente vigentes quanto à compartimentação vertical externa foi plenamente atendido. Verificando as temperaturas máximas resultadas da modelagem de casos hipotéticos, porém, com possibilidade de execução em edificações reais, foi possível analisar se as edificações estão realmente seguras no quesito de compartimentação ao fogo.

Os modelos computacionais desenvolvidos utilizando o *software* Pyrosim para modelagem e o FDS para a análise do estudo garantiram resultados surpreendentes e possibilitaram analisar as normas verificando as possibilidades de distanciamento entre aberturas das mesmas.

Foi possível verificar uma grande divergência entre os distanciamentos das aberturas nas normas, no que se referem à compartimentação das edificações, um item de vital importância para se evitar o alastramento do fogo para os andares superiores dos edifícios.

Considerando as 4 simulações feitas para carga correspondente ao risco baixo, observou-se que apenas um caso demonstrou pico de temperatura abaixo de 500°C e os demais apresentaram valores em até 20% superiores. Para o risco médio as temperaturas máximas encontradas superaram em 60% os valores indicados como aceitáveis para garantir a estanqueidade ao fogo, acarretando o não aceite de todos os casos modelados para a compartimentação.

As simulações computacionais para o risco alto tiveram valores bastante distintos entre os 4 casos apresentados, visto que houve variações de 15 a 60% acima da temperatura

de 500°C. Estes modelos, determinados a partir dos valores máximos de carga de incêndio determinados pelas normas, possibilitaram a análise da influência da carga de incêndio no mesmo modelo com distanciamentos maiores visando o atendimento às temperaturas de 500°C.

Foi possível verificar em um dos casos analisados maiores distanciamentos, que acima de 5,0 metros, o calor do incêndio que atinge as aberturas é drasticamente reduzido, sendo uma possibilidade para novos estudos, ao considerarem esta distância na verificação da compartimentação das fachadas verticais.

Desta forma, acredita-se que nas edificações de médio e alto risco, quando não for possível inserir abas em suas fachadas, devem ser adotados outros métodos de prevenção e combate ao fogo, tais como detectores de fumaça e *sprinklers*, para facilitar a detecção e extinção do foco de incêndio, ainda em seu início. Para o baixo risco, pela tolerância adotada, os modelos poderiam todos serem aceitos, inclusive os distanciamentos de 1,2 metros.

A partir disso, conclui-se que como sugestão, as legislações deveriam visar a segurança e considerar compartimentações verticais somente em locais dotados de marquises, não sendo aceitas compartimentações verticais entre aberturas, somente para pés direitos baixos, que poderiam ser aceitos distanciamentos de 1,2 metros.

Portanto, acredita-se que há necessidade de maiores estudos com outros distanciamentos para adequar as normas à segurança contra incêndio das edificações, pois as atuais legislações não garantem a segurança contra o fogo de todas das edificações.

O presente trabalho foi analisado com cargas de incêndio definidas em metros cúbicos de madeira, porém, caso fosse outro material, talvez os valores encontrados fossem distintos destes, com comportamentos diferentes de incêndio, sendo essa, mais uma sugestão de trabalho futuro.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5628: Componentes construtivos estruturais - Determinação de resistência ao fogo**. Rio de Janeiro, 2001

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6479: Portas e vedadores - Determinação da resistência ao fogo**. Rio de Janeiro, 1992

BRENTANO, Telmo. **A proteção contra incêndios no projeto de edificações**. 3. ed. Porto Alegre: Telmo Brentano, 2015.

CAMILLO JUNIOR, Abel Batista. **Manual de Prevenção e Combate a Incêndios**. 15 ed. Editora Senac São Paulo, 2013.

CARVALHO JUNIOR, Roberto de. **Instalações hidráulicas e o projeto de arquitetura**. 11. ed. São Paulo: Blucher, 2017.

CASTRO, Eduardo Farias de. **Mudança nas exigências das medidas de prevenção e proteção contra incêndio em edificações devido à nova legislação (lei kiss): análise teórica e aplicação em uma edificação de uso comercial**. Artigo Final de Conclusão de Curso UFRGS, 2015

CASTRO, Gleidismar das Graças Simão. **Um método geral de cálculo para verificação de estruturas de concreto em situação de incêndio**. Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da UFMG. Belo Horizonte. 2005

COMANDO DO CORPO DE BOMBEIROS DE SÃO PAULO (CBMSP). **Instrução Técnica nº 09, Compartimentação horizontal e compartimentação vertical**. São Paulo, 2018.

COMANDO DO CORPO DE BOMBEIROS DO RIO GRANDE DO SUL (CBMRS). **Resolução Técnica 02, Terminologia aplicada a segurança contra incêndio**. Porto Alegre, 2014.

COMANDO DO CORPO DE BOMBEIROS DO RIO GRANDE DO SUL (CBMRS). **Resolução Técnica de Transição RTT**. Porto Alegre, 2017.

COSTA, Carla Neves; SILVA, Valdir Pignatta. **Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio**. Seminário internacional NUTAU, 2006 – Inovações tecnológicas e sustentabilidade, São Paulo. 2006.

COUTINHO, Bianca Alvarenga; CORRÊA, Antônio Ramos. **A Interpretação do Controle de Materiais de Acabamentos e de Revestimento no Processo de Segurança Contra Incêndio e Pânico**. Engineering and Science, Volume 2, Edição 6, 2016.

ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. **Lei Complementar nº 14376**, de 26 de dezembro de 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **Fire-Resistance Tests – Elements of Building Construction – Part 1.1: General Requirements for Fire Resistance Testing. ISO 834**. Geneva: ISO/TC, 1999

KIMURA, Alio. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculo de edifícios com o uso de sistemas computacionais**. São Paulo: PINI, 2007.

LEMONJE, A. T.; LORENZI, Alexandre; SCHMITT, C.M.; KLEIN, Dário L. **Simulação computacional de incêndio em edificações multifamiliares com escada não enclausurada**. CONPAT 2017, Vol. I. Assunção, Paraguai. 2017.

MACHADO, João Flávio Braz. **Análise avançada para verificação de estruturas mistas (aço e concreto) sob condições de incêndio**. UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Instalações hidráulicas: prediais e industriais**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MAZZONI, Filipe. **Simulação Computacional de Incêndios: Aplicação no caso do condomínio edificio Cacique em Porto Alegre-RS**. UFRGS, Porto Alegre, 2010.

MELÃO, Arthur Ribeiro; SILVA, Valdir Pignatta. **Equivalência entre incêndio-padrão e curvas paramétricas aplicados a estruturas de aço**. Congresso Latino-Americano da Construção Metálica, Construmetal, São Paulo, 2014.

MOHAMAD, Gihad. **Construções em alvenaria estrutural: materiais, projeto e desempenho**. São Paulo, 2015.

MOLINA, Julio Cesar; CALIL JÚNIOR, Carlito; KIMURA, Érica Fernanda Aiko; PINTO, Edna Moura; REGOBELLO, Ronaldo. **Numerical analysis of the behaviour of timber elements under fire conditions; Análise numérica do comportamento de elementos de madeira em situação de incêndio**. AGRIS (Food and Agriculture Organization of the United Nations) Floresta e Ambiente, 2012, Vol.(2)

NEGRISCOLO, Walter. **Arquitetando a segurança contra incêndio**. Tese de Doutorado USP, 2011.

ONO, Rosária. **Parâmetros para garantia da qualidade do projeto de segurança contra incêndio em edifícios altos**. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, São Paulo. 2007

ROCHA, P.A.S.; DA SILVA, K.I. **Estudo do desempenho de vigas em situação de incêndio a partir do modelo de fibras**. ScienceDirect (Elsevier B.V.). Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, January-June 2017, Vol.33(1-2).

RODRIGUES, Eduardo Estêvam Camargo. **Análise da eficiência dos sistemas de compartimentação vertical externa por afastamento entre janelas e por projeções horizontais segundo as exigências normativas brasileiras**. Porto Alegre, 2009

RUSCHEL, Fernanda. **Avaliação da utilização de ferramentas de simulação computacional para reconstituição de incêndios em edificações de concreto armado**. Porto Alegre, 2011

SEITO, Alexandre Itiu; GILL, Alfonso Antonio; PANNONI, Fabio Domingos; ONO, Rosaria; SILVA, Silvio Bento da; DEL CARLO, Ualfrido e PIGNATTA E SILVA, Valdir. **A Segurança Contra Incêndio no Brasil**. Editora Projeto. 2008

SILVA, Valdir Pignatta. **Segurança contra incêndio em edifícios: considerações para o projeto de arquitetura**. Blücher, 2014.

TABACZENSKI, Roberta; CORRÊA, Cristiano; SANTOS, Marina Machado Leal dos; PIRES, Tiago Ancelmo de Carvalho; SILVA, José Jeferson. Rêgo. **Aplicação do software fire dynamics simulator (FDS) no estudo da segurança contra incêndios (SCI) no brasil**. Revista FLAMMAE - Revista Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco, Seção 1. Vol.03 nº07 - jul a dez, 2017.

Apêndice A – Script desenvolvido

&MESH ID='MESH', IJK=39,41,30, XB=-0.5,11.5,-0.5,12.0,0.0,9.0/

&REAC ID='Reaction2',
 FYI='reação',
 FUEL='REAC_FUEL',
 C=3.4,
 H=6.2,
 O=2.5,
 SOOT_H_FRACTION=0.0,
 SOOT_YIELD=0.015,
 HEAT_OF_COMBUSTION=1.79E4/

&DEVC ID='THCP temp interna', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=5.0,5.0,4.1/
 &DEVC ID='THCP01 analise', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=1.75,10.55,6.9/
 &DEVC ID='THCP01 analise01', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=5.25,10.55,6.9/
 &DEVC ID='THCP01 analise02', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=9.25,10.55,6.9/
 &DEVC ID='THCP temp interna janela', QUANTITY='TEMPERATURE',
 XYZ=5.0,10.0,3.5/
 &DEVC ID='THCP01 analise03 acima', QUANTITY='TEMPERATURE',
 XYZ=5.25,10.55,7.9/
 &DEVC ID='THCP01 analise03 acima02', QUANTITY='TEMPERATURE',
 XYZ=5.25,10.55,8.9/
 &DEVC ID='THCP01 analise03', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.45,9.0,6.9/
 &DEVC ID='THCP01 analise04', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=10.55,9.0,6.9/

&MATL ID='MADEIRA',
 FYI='Madeira',
 SPECIFIC_HEAT=1.36,
 CONDUCTIVITY=0.13,
 DENSITY=369.6/

&SURF ID='ADIABATIC',
 COLOR='GRAY 80',
 ADIABATIC=.TRUE./
 &SURF ID='madeiraa',
 RGB=255,171,16,
 TEXTURE_MAP='psm_wood2.jpg',
 TEXTURE_WIDTH=0.6096,
 TEXTURE_HEIGHT=0.6096,
 HRRPUA=175.0,
 E_COEFFICIENT=0.08,
 IGNITION_TEMPERATURE=298.0,
 BURN_AWAY=.TRUE.,
 BACKING='INSULATED',
 MATL_ID(1,1)='MADEIRA',
 MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
 THICKNESS(1)=0.02/
 &SURF ID='fogo',

```

FYI='fogo',
COLOR='RED',
TEXTURE_MAP='psm_fire.jpg',
HRRPUA=5000.0,
RAMP_Q='fogo_RAMP_Q',
NET_HEAT_FLUX=5000.0/
&RAMP ID='fogo_RAMP_Q', T=1.0, F=0.1/
&RAMP ID='fogo_RAMP_Q', T=5.0, F=0.5/
&RAMP ID='fogo_RAMP_Q', T=8.0, F=0.7/
&RAMP ID='fogo_RAMP_Q', T=10.0, F=1.0/
&RAMP ID='fogo_RAMP_Q', T=15.0, F=0.0/
&RAMP ID='fogo_RAMP_Q', T=50.0, F=0.0/
&RAMP ID='fogo_RAMP_Q', T=100.0, F=0.0/
&RAMP ID='fogo_RAMP_Q', T=200.0, F=0.0/
&RAMP ID='fogo_RAMP_Q', T=300.0, F=0.0/
&RAMP ID='fogo_RAMP_Q', T=400.0, F=0.0/

&OBST ID='piso', XB=0.5,10.5,0.5,10.5,0.0,0.15, COLOR='GRAY 60',
SURF_ID='ADIABATIC'/ piso
&OBST ID='parede esquerda', XB=10.3,10.5,0.5,10.5,0.15,4.35, SURF_ID='ADIABATIC'/
&OBST ID='laje', XB=0.5,10.5,0.5,10.5,4.35,4.45, COLOR='GRAY 80',
SURF_ID='ADIABATIC'/
&OBST ID='parede janela', XB=0.5,10.5,10.3,10.5,0.15,4.35, SURF_ID='ADIABATIC'/
&OBST ID='parede direita', XB=0.5,0.7,0.5,10.5,0.15,4.35, SURF_ID='ADIABATIC'/
&OBST ID='Obstruction', XB=1.2,1.5,0.7,1.7,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='parede fundos', XB=0.5,10.5,0.5,0.7,0.15,4.35, SURF_ID='ADIABATIC'/
parede fundos
&OBST ID='Obstruction', XB=1.2,1.5,1.8,2.8,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=1.2,1.5,2.9,3.9,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=1.2,1.5,4.0,5.0,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=1.2,1.5,6.2,7.2,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=1.2,1.5,7.3,8.3,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=1.2,1.5,8.4,9.4,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=3.6,3.9,1.8,2.8,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=3.6,3.9,2.9,3.9,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=3.6,3.9,4.0,5.0,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=3.6,3.9,6.2,7.2,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=3.6,3.9,7.3,8.3,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=3.6,3.9,8.4,9.4,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=3.6,3.9,0.7,1.7,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=4.4,4.7,1.8,2.8,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=4.4,4.7,2.9,3.9,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=4.4,4.7,4.0,5.0,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=4.4,4.7,6.2,7.2,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=4.4,4.7,7.3,8.3,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=4.4,4.7,8.4,9.4,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=4.4,4.7,0.7,1.7,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=2.8,3.1,8.4,9.4,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=2.8,3.1,7.3,8.3,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
&OBST ID='Obstruction', XB=2.8,3.1,6.2,7.2,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/

```

&OBST ID='Obstruction', XB=2.8,3.1,4.0,5.0,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=2.8,3.1,2.9,3.9,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=2.8,3.1,1.8,2.8,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=2.8,3.1,0.7,1.7,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=5.2,5.5,8.4,9.4,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=5.2,5.5,7.3,8.3,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=5.2,5.5,6.2,7.2,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=5.2,5.5,4.0,5.0,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=5.2,5.5,2.9,3.9,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=5.2,5.5,1.8,2.8,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=6.8,7.1,0.7,1.7,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=6.8,7.1,1.8,2.8,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=6.8,7.1,2.9,3.9,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=6.8,7.1,4.0,5.0,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=6.8,7.1,7.3,8.3,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=6.8,7.1,8.4,9.4,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=6.8,7.1,6.2,7.2,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=7.6,7.9,0.7,1.7,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=7.6,7.9,1.8,2.8,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=7.6,7.9,2.9,3.9,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=7.6,7.9,4.0,5.0,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=7.6,7.9,7.3,8.3,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=7.6,7.9,8.4,9.4,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=7.6,7.9,6.2,7.2,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=8.4,8.7,0.7,1.7,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=8.4,8.7,1.8,2.8,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=8.4,8.7,2.9,3.9,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=8.4,8.7,4.0,5.0,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=8.4,8.7,6.2,7.2,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=8.4,8.7,7.3,8.3,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=8.4,8.7,8.4,9.4,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=9.2,9.5,0.7,1.7,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=9.2,9.5,1.8,2.8,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=9.2,9.5,2.9,3.9,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=9.2,9.5,4.0,5.0,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=9.2,9.5,6.2,7.2,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=9.2,9.5,7.3,8.3,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=9.2,9.5,8.4,9.4,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='parede esquerda 2 piso', XB=10.3,10.5,0.5,10.5,4.45,8.65,
 SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='parede fundos 2 piso', XB=0.5,10.5,0.5,0.7,4.45,8.65,
 SURF_ID='ADIABATIC'/ parede fundos
 &OBST ID='parede direita 2 piso', XB=0.5,0.7,0.5,10.5,4.45,8.65, SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='parede janela 2 piso', XB=0.5,10.5,10.3,10.5,4.45,8.65,
 SURF_ID='ADIABATIC'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=2.0,2.3,0.7,1.7,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=2.0,2.3,1.8,2.8,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=2.0,2.3,2.9,3.9,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=2.0,2.3,4.0,5.0,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=2.0,2.3,6.2,7.2,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/

&OBST ID='Obstruction', XB=2.0,2.3,7.3,8.3,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=2.0,2.3,8.4,9.4,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=6.0,6.3,0.7,1.7,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=6.0,6.3,1.8,2.8,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=6.0,6.3,4.0,5.0,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=6.0,6.3,2.9,3.9,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=6.0,6.3,7.3,8.3,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=6.0,6.3,6.2,7.2,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/
 &OBST ID='Obstruction', XB=6.0,6.3,8.4,9.4,0.3,0.5, SURF_ID='madeiraa'/

&HOLE ID='Hole', XB=0.84,3.49,10.3,10.5,3.15,3.85/ janela
 &HOLE ID='Hole', XB=4.17,6.82,10.3,10.5,3.15,3.85/ janela
 &HOLE ID='Hole', XB=7.5,10.15,10.3,10.5,3.15,3.85/ janela
 &HOLE ID='Hole', XB=0.5,0.7,7.5,10.15,3.15,3.85/ janela
 &HOLE ID='Hole', XB=10.3,10.5,7.5,10.15,3.15,3.85/ janela
 &HOLE ID='Hole', XB=0.84,3.49,10.3,10.5,6.85,7.55/ janela
 &HOLE ID='Hole', XB=4.17,6.82,10.3,10.5,6.85,7.55/ janela
 &HOLE ID='Hole', XB=7.5,10.15,10.3,10.5,6.85,7.55/ janela
 &HOLE ID='Hole', XB=0.5,0.7,7.5,10.15,6.85,7.55/ janela
 &HOLE ID='Hole', XB=10.3,10.5,7.5,10.15,6.85,7.55/ janela

&VENT ID='Vent07', SURF_ID='OPEN', XB=-0.6,11.6,12.1,13.6,0.2,0.2, RADIUS=0.5,
 XYZ=5.5,12.85,0.2/ open externo
 &VENT ID='Vent08', SURF_ID='fogo', XB=1.0,2.0,1.0,2.0,0.25,0.25/
 &VENT ID='Vent09', SURF_ID='OPEN', XB=-2.0,-0.6,-0.5,13.6,0.2,0.2/
 &VENT ID='Vent10', SURF_ID='OPEN', XB=11.6,13.0,-0.5,13.6,0.2,0.2/

&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=1.5/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=8.0/
 &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=9.0/

&DEVC ID='Temperature_MIN', QUANTITY='TEMPERATURE', STATISTICS='MIN',
 XB=2.0,3.0,2.0,3.0,0.5,1.0/
 &DEVC ID='Temperature_MAX', QUANTITY='TEMPERATURE', STATISTICS='MAX',
 XB=2.0,3.0,2.0,3.0,0.5,1.0/



UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09