

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Lucas Lopes Braga

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIOS: ESTUDO
DE FACHADAS COM DIFERENTES PROPRIEDADES
GEOMÉTRICAS**

Porto Alegre
dezembro de 2019

LUCAS LOPES BRAGA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIOS: ESTUDO
DE FACHADAS COM DIFERENTES PROPRIEDADES
GEOMÉTRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Ângela Gaio Graeff

Porto Alegre
dezembro de 2019

LUCAS LOPES BRAGA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIOS: ESTUDO
DE FACHADAS COM DIFERENTES PROPRIEDADES
GEOMÉTRICAS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pela Professora Orientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2019

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ângela Gaio Graeff (UFRGS)
PhD pela Universidade de Sheffield
Orientadora

Prof. José Alberto Azambuja (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng.^a Juliane Natália Dolvitsch (UFRGS)
Engenheira pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Ten-cel Eduardo Estêvam Camargo Rodrigues (CBMRS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha mãe, Dirce Elaine, pelo apoio, em todos os momentos, em especial durante a graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Ângela Graeff, pelos seus múltiplos ensinamentos no decorrer do curso e da elaboração deste trabalho, pelas orientações, pelas frases motivacionais para o âmbito da vida profissional e acadêmica.

À empresa *Thunderhead Engineering*, que disponibilizou seu programa *Pyrosim* com uma licença institucional.

À minha mãe Dirce Elaine Ferreira Lopes, base da minha educação, motivação e competência na vida e que foi a maior apoiadora na minha formação acadêmica.

Não se deve ir atrás de objetivos fáceis, é
preciso buscar o que só pode ser alcançado
por meio dos maiores esforços.

Albert Einstein

RESUMO

Após grandes incêndios na sociedade, o ser humano vem criando legislações e normativas com o intuito de minimizar os danos causados por estes sinistros e, através destas normativas, podemos padronizar alguns sistemas inclusos numa edificação. Neste artigo, são apresentados os resultados de três simulações de incêndio, em edifícios habitacionais com baixo risco (até 300MJ/m²), realizadas num software chamado *Pyrosim*, que é integrado ao *Fire Dynamic Simulator* e *Smokeview*. Estas simulações consistem no estudo da eficiência de formas quantitativas e qualitativas de compartimentações verticais em fachadas, sugeridas pela Instrução Técnica nº 9 do CBMSP (2019). Os resultados, considerando limitações que serão descritas, demonstram uma certa ineficiência de alguns modelos sugeridos pela normativa brasileira e, portanto, sugere-se que mais estudos sejam realizados acerca da Instrução Técnica nº 9 do CBMSP (2019).

Palavras-chave: Simulação computacional. *Pyrosim*. Compartimentação vertical. Incêndio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelos de compartimentação vertical: espaçamento vertical entre aberturas (a); avanço de laje técnica (b); fachada com pele de vidro (c) e conjunto de avanço de laje técnica e verga-peitoril (d).....	4
Figura 2. Densidade aparente dos blocos de papel para aplicar a carga de incêndio de 300 MJ/m ²	6
Figura 3. Configurações editadas no programa Pyrosim para definição da reação que acontecerá no modelo, sendo: a composição atômica do fluido (a) e os produtos gerados com a reação química (b).	7
Figura 4. Posicionamento dos termopares na fachada da edificação.	8
Figura 5. Posicionamento dos perfis térmicos: perfis transversais (a) e perfil longitudinal (b)....	9
Figura 6. Posicionamento da fonte de ignição.	10
Figura 7. Configuração no Pyrosim para definição da perda de massa e ignição do papel.	10
Figura 8. Gráfico com a temperatura em relação ao tempo para cada pavimento para simulação 1 – modelo (a).....	13
Figura 9. Comportamento das chamas na fachada no pico máximo de temperatura (a) e na fase de resfriamento (b) para a simulação 1 – modelo (a).	13
Figura 10. Propagação da fumaça nos tempos de: 10 s (a), 60 s (b) e 190 s (c) para a simulação 1 – modelo (a).....	14
Figura 11. Gráfico com a temperatura em relação ao tempo para cada pavimento para simulação 2 – modelo (b).	15
Figura 12. Comportamento das chamas na fachada no pico máximo de temperatura (a) e na fase de resfriamento (b) para a simulação 2 – modelo (b).....	16
Figura 13. Propagação da fumaça nos tempos de: 10 s (a), 60 s (b) e 200 s (c) para a simulação 2 – modelo (b).	17
Figura 14. Gráfico com a temperatura em relação ao tempo para cada pavimento para simulação 3 – modelo (d).	17
Figura 15. Comportamento das chamas na fachada no pico máximo de temperatura (a) e na fase de resfriamento (b) para simulação 3 – modelo (d).....	18
Figura 16. Propagação da fumaça nos tempos de: 10 s (a), 60 s (b) e 200 s (c) para a simulação 3 – modelo (d).	19

Figura 17. Comparativo das temperaturas do primeiro (a), segundo (b) e terceiro (c) pavimentos para as 3 simulações.	20
Figura 18. Comparativo das temperaturas máximas na fachada do segundo pavimento entre as três simulações realizadas neste trabalho e quatro ensaios em escala reduzida realizados no trabalho de Rodrigues (2009).	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades térmicas do papel.	7
Tabela 2. Resultados com diferentes malhas.....	11
Tabela 3. Dimensões das janelas.	12

LISTA DE SIGLAS

CBMSP – Corpo de Bombeiros Militar de São Paulo

CBMRS – Corpo de Bombeiros do Rio Grande do Sul

FDS – *Fire Dynamic Simulator*

SMV – Smokeview

NIST – National Institute of Standards and Technology

LISTA DE SÍMBOLOS

a = aba

A = área do piso do compartimento analisado

b = verga

$^{\circ}\text{C}$ = graus Celsius

H = somatório de verga e peitoril (m)

H_i = resistência à compressão característica do concreto

J = joules, unidade utilizada para medir energia térmica

k = condutividade térmica do material ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$)

K = temperatura em escala Kelvin

kg = unidade de massa

m = metros

M_i = massa total de cada componente (i) do material combustível (kg)

min = minutos

q_{fi} = Carga de incêndio específica (MJ/m^2)

s = segundos

T = temperatura em Kelvin

W = potência (J/s)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
2	MÉTODO DE PESQUISA	3
2.1	MODELO COMPUTACIONAL.....	3
2.1.1	AMBIENTE SIMULADO	3
2.1.2	CARGAS DE INCÊNDIO	5
2.2	PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	6
2.2.1	REAÇÃO DE COMBUSTÃO	6
2.2.2	MATERIAIS COMBUSTÍVEIS	7
2.2.3	DISPOSITIVOS PARA COLETA DE DADOS.....	8
2.2.4	FONTE DE IGNIÇÃO	9
2.2.5	TAXA DE PERDA DE MASSA.....	10
2.2.6	MALHA DA SIMULAÇÃO	11
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	12
3.1	SIMULAÇÃO 1 – MODELO (A)	12
3.2	SIMULAÇÃO 2 – MODELO (B)	15
3.3	SIMULAÇÃO 3 – MODELO (D)	17
3.4	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	19
3.5	COMPARAÇÃO COM ESTUDO REALIZADO POR RODRIGUES (2009).....	21
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	23
5	AGRADECIMENTOS	23
6	REFERÊNCIAS.....	24

Simulação computacional de incêndios: estudo de fachadas com diferentes propriedades geométricas

Computer simulation of fires: study of facades with different geometric properties

Resumo

Após grandes incêndios na sociedade, o ser humano vem criando legislações e normativas com o intuito de minimizar os danos causados por estes sinistros e, através destas normativas, podemos padronizar alguns sistemas inclusos numa edificação. Neste artigo, são apresentados os resultados de três simulações de incêndio, em edifícios habitacionais com baixo risco (até 300MJ/m²), realizadas num software chamado *Pyrosim*, que é integrado ao *Fire Dynamic Simulator* e *Smokeview*. Estas simulações consistem no estudo da eficiência de formas quantitativas e qualitativas de compartimentações verticais em fachadas, sugeridas pela Instrução Técnica nº 9 do CBMSP (2019). Os resultados, considerando limitações que serão descritas, demonstram uma ineficiência de alguns modelos sugeridos pela normativa brasileira e, portanto, sugere-se que mais estudos sejam realizados acerca da Instrução Técnica nº 9 do CBMSP (2019).

Palavras-chave: *Simulação computacional, Fire Dynamics Simulator, compartimentação vertical, incêndio*

Abstract

After major fires in society, the human being has been creating laws and regulations in order to minimize the damage caused by these accidents and, through these regulations, we can standardize some systems included in a building. This paper presents the results of three fire simulations in low-risk residential buildings (up to 300MJ / m²), executed on a software called *Pyrosim*, which is integrated with *Fire Dynamic Simulator* and *Smokeview*. These simulations consist of a study of quantitative and qualitative efficiency of vertical façade compartments, suggested by CBMSP Technical Instruction No. 9 (2019). The results, considering the configurations that will be described, demonstrate the ineffectiveness of some models suggested by the Brazilian standard and, therefore, suggest that further studies are conducted by CBMSP Technical Instruction No. 9 (2019).

Keywords: *Computer simulation, Fire Dynamics Simulator, vertical compartments, fire.*

1 Introdução

O ser humano vem criando legislações e normativas para determinar barreiras contra o fogo em descontrole, denominado incêndio. Infelizmente, estas especificações somente são elaboradas após grandes danos à sociedade, como em meados dos anos 70, onde ocorreram 3 graves incêndios no Brasil: do Edifício Joelma, do Edifício Andraus e do estabelecimento da Volkswagen do Brasil, todos situados em São Paulo. Após tais sinistros, o Estado de São Paulo foi o pioneiro na criação de leis e normativas próprias.

Estas diretrizes são desenvolvidas com o intuito de minimizar ou até mesmo erradicar os danos causados por este tipo de sinistro e são regidas por cada Estado através dos Corpos de Bombeiros Militares (CBMRS, no caso do Rio Grande do Sul) e em alguns casos, com auxílio da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Estas legislações estaduais são atribuídas por uma legislação federal, a Lei nº 13.425 (Lei Kiss), que foi criada em 30 de março de 2017, após o incêndio com o segundo maior número de mortos do Brasil, na Boate Kiss, localizada em Santa Maria-RS, em 2013, cujo número de óbitos foi de 242.

Segundo a Norma de desempenho de edificações habitacionais NBR 15575 (ABNT, 2013), uma das formas de se avaliar o desempenho de uma habitação com relação à segurança ao fogo é por meio de ensaios em escala real, o que demanda um demasiado tempo e custo para elaboração dos mesmos. Rockett já estudava em 1969 o uso das ferramentas computacionais para simulações de incêndio e concluiu que a obtenção de dados qualitativos era satisfatória, porém se fazia necessária uma melhoria nos cálculos de fluxo de ar. No entanto, com o avanço da tecnologia e desenvolvimento de computadores com uma capacidade maior de processamento, o uso de ferramentas computacionais para simulações de incêndios vêm se mostrando cada vez mais viável.

Estas ferramentas englobam diversas análises de comportamento do incêndio, como: estudos de compartimentações verticais externas com diferentes configurações de aberturas (Rodrigues, 2009), a reconstituição de incêndios em edificações de concreto armado (Ruschel, 2011), a propagação do incêndio e análise do tempo de evacuação de um edifício da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brunetto, 2016), o comportamento de incêndios num depósito com diferentes cargas de incêndios e aberturas (Luz, 2017) ou até mesmo para simulações de abandono de edificações (Berticelli, 2018). Todos estes estudos citados com o

uso de ferramentas computacionais mostraram dados compatíveis com a realidade, considerando algumas premissas. De acordo com Ruschel (2011) e com Rodrigues (2009), a ferramenta utilizada para simulação conseguiu atender o objetivo de seus trabalhos, porém se torna necessário uma melhor especificação das propriedades dos materiais situados no ambiente sinistrado para se aproximar mais à realidade.

No presente artigo, será demonstrada a aplicação de uma ferramenta de simulação computacional de incêndios para o estudo de fachadas de edifícios residenciais com diferentes formatos de compartimentação vertical, sugeridos pela Instrução Técnica nº 9 do CBMSP (2019). O *software* utilizado para tal estudo chama-se *Pyrosim*, desenvolvido pela *Thunderhead Engineering*, e é integrado ao *Fire Dynamics Simulator* (FDS) e ao *Smokeview* (SMV), ambos desenvolvidos pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST).

2 Método de pesquisa

Neste item é detalhado o método de pesquisa utilizado para o desenvolvimento do trabalho. O método é composto pela descrição do modelo computacional e dos parâmetros de simulação utilizados.

2.1 Modelo computacional

Para este estudo, o modelo computacional foi dividido entre o ambiente simulado e as cargas de incêndio. No ambiente simulado são detalhados todos os itens do ambiente que são inertes. Logo, nas cargas de incêndio, é detalhado todo o material combustível situado no modelo.

2.1.1 Ambiente simulado

O modelo computacional em questão tem o foco de estudar o comportamento de incêndios em uma fachada de uma edificação habitacional. Sendo assim, o ambiente foi simplificado a um retângulo de dimensões 9x3 m sem divisões internas com três pavimentos de pé direito igual a 2,75 metros e duas janelas por pavimento localizadas em uma mesma fachada. O sinistro foi aplicado ao primeiro pavimento, com o intuito de analisar o fluxo das chamas, o desenvolvimento das temperaturas nos andares superiores e se ocorreria a propagação do incêndio através de convecção para os materiais combustíveis nos andares superiores. Convém mencionar que as janelas foram definidas como aberturas, não havendo nenhum material de fechamento nestas aberturas.

Com estas propriedades fixadas, variou-se a geometria da fachada, conforme sugestões da Instrução Técnica nº 9 do CBMSP (2019) que propõe quatro tipos de compartimentações verticais, conforme mostra a Figura 1.

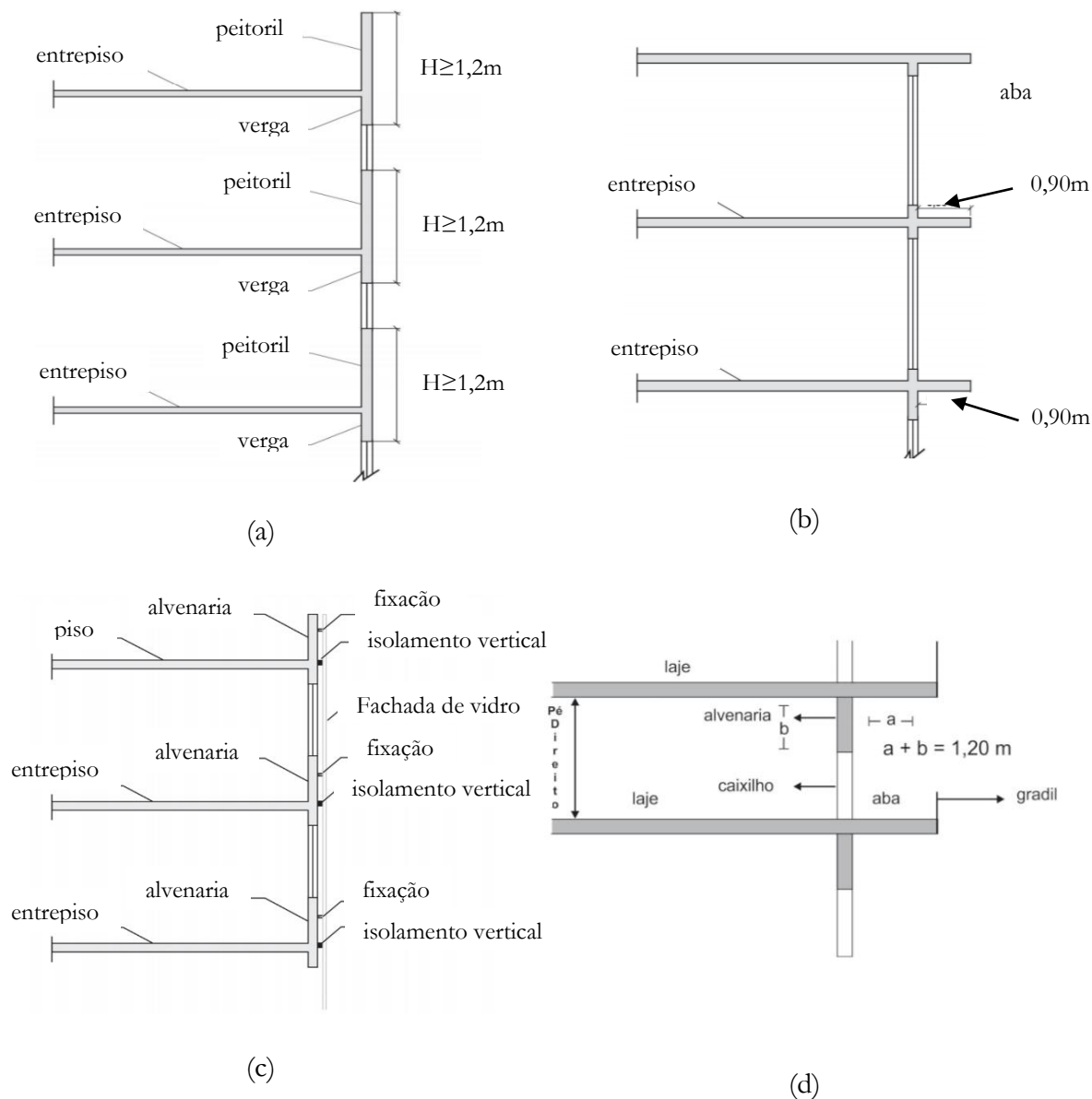


Figura 1. Modelos de compartimentação vertical: espaçamento vertical entre aberturas (a); avanço de laje técnica (b); fachada com pele de vidro (c) e conjunto de avanço de laje técnica e verga-peitoril (d).

Dentre os modelos citados na Figura 1, os escolhidos para elaborar simulações foram (a), (b) e (d). Para o modelo (d) foi escolhido um tamanho de 0,70 m para o avanço da laje técnica e 0,50

m para a verga. O modelo (c) não foi simulado devido às pequenas dimensões dos isolamentos verticais e espessura do vidro, trazendo a necessidade de se trabalhar com uma malha de células menores para uma melhor precisão do modelo computacional. Sendo assim, geraria um número muito elevado de células que poderia inviabilizar a execução da simulação, para fins desta pesquisa, devido ao elevado tempo exigido de processamento. Foi realizado um teste para verificar a possibilidade deste modelo e terá maior detalhamento no item 2.2.6.

2.1.2 Cargas de incêndio

De uma maneira didática, optou-se pela aplicação de apenas um material combustível para as simulações, o papel. Os demais materiais da edificação, como paredes e lajes, foram considerados inertes, ou seja, não há transferência de calor através destes materiais.

As edificações no Estado do Rio Grande do Sul são classificadas em 3 níveis de risco: baixo, médio e alto. Esses riscos são determinados pela carga de incêndio da edificação, sendo que valores de até 300 MJ/m² configuram em um grau de risco baixo. Valores acima de 300 e até 1200 MJ/m² configuram em um grau de risco médio. Por fim, valores acima de 1200 MJ/m² configuram em risco alto. Para edificações de uso residencial, o grau de risco de incêndio é baixo, ou seja, com uma carga de incêndio de 300 MJ/m² (Decreto nº 53.280, 2016).

Desta forma, sabendo-se que a energia de combustão do papel é de 17 MJ/kg (Resolução Técnica nº 3 do CBMRS, 2019, p. 6), a distribuição do material combustível se deu pela equação ilustrada na Equação 1, onde foram fixadas todas suas variáveis em 5 blocos de 1 m³ por pavimento, com exceção da sua densidade, conforme mostra na Figura 2.

$$q_{fi} = \frac{\sum(M_i \cdot H_i)}{A}$$

Onde:

q_{fi} =Carga de incêndio específica, em mega Joule por metro quadrado de área do piso considerado.

H_i =potência calorífica específica de cada componente do material i, em mega Joule por quilograma.

M_i =massa de cada componente i do material, em quilograma.

A =área do piso do compartimento analisado, em metro quadrado.

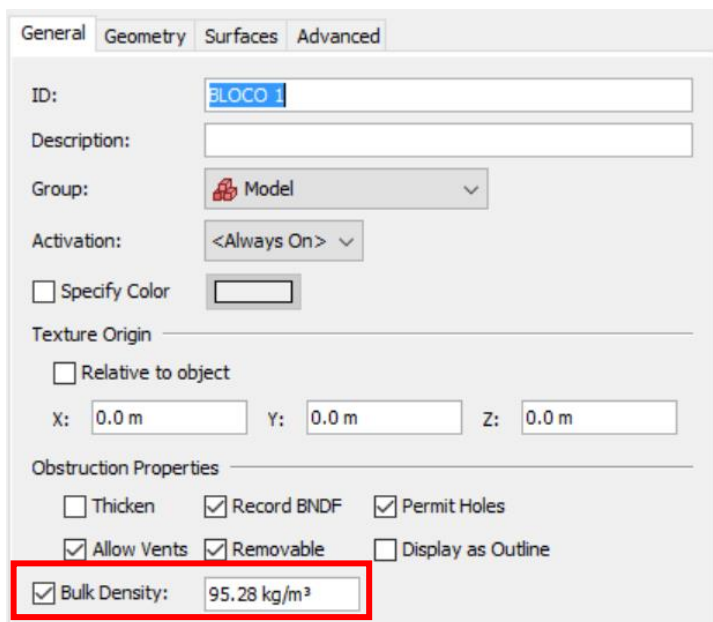


Figura 2. Densidade aparente dos blocos de papel para aplicar a carga de incêndio de 300 MJ/m^2 .

2.2 Parâmetros da Simulação

Os parâmetros da simulação são as premissas e simplificações necessárias que devem ser tomadas pelo autor para que a simulação computacional se aproxime da realidade. Estas simplificações são escolhidas conforme necessidade do modelo e o que será estudado nele. Os itens na sequência explicam alguns dos parâmetros utilizados no trabalho.

2.2.1 Reação de combustão

Por falta de conhecimento de todas reações químicas ocorridas num incêndio em um edifício habitacional devido aos diferentes materiais combustíveis, transferências de energia e gases presentes no ambiente. Foi admitida a redução destas reações em uma única reação. Esta reação foi estipulada por um código de verificação de edificações a incêndio da Nova Zelândia. Este código teve uma abordagem inicial nos estudos de Brunetto (2016). Para incêndios precedentes ao *flashover*, o *New Zealand Building Code* (2014, p. 28) propõe uma única reação que define todas reações ocorridas num edifício habitacional. No programa *Pyrosim*, esta reação é definida como um Modelo Químico Simples, que contém as seguintes configurações de produto, conforme mostrado na Figura 3.

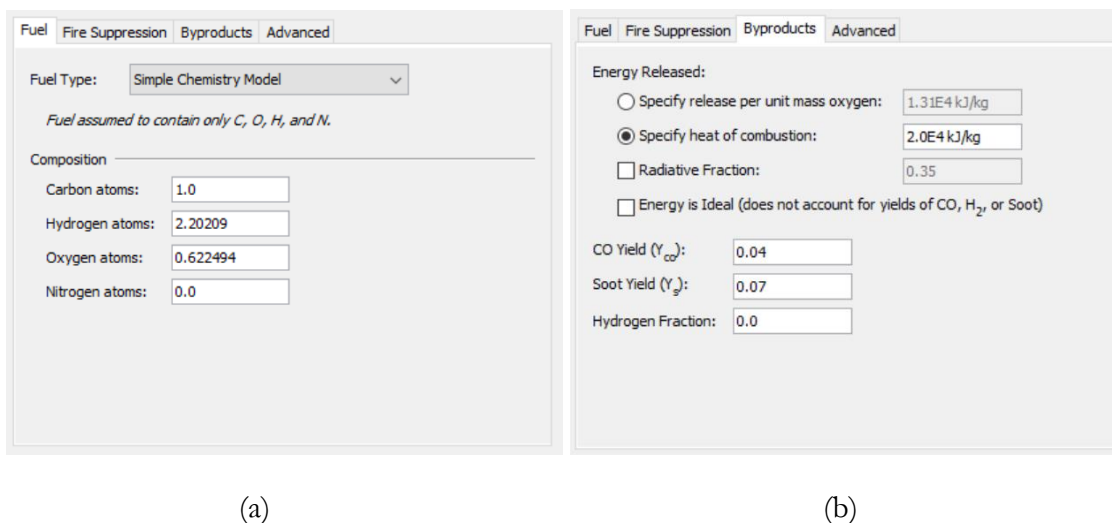


Figura 3. Configurações editadas no programa *Pyrosim* para definição da reação que acontecerá no modelo, sendo: a composição atômica do fluido (a) e os produtos gerados com a reação química (b).

2.2.2 Materiais combustíveis

A escolha do papel como material combustível se deu pelo fato de que sua taxa de perda de massa é grande, conforme será mostrado no item 2.2.5, viabilizando as simulações elaboradas, pois tornou o tempo de processamento menor.. Também já foi aplicado em outros estudos, como o de Brunetto (2016) e Luz (2017) e testadas no *Pyrosim* com uma simulação de um bloco de 1 m³ e densidade de 100 kg/m³ com o propósito de analisar as energias totais liberadas, tendo resultados coerentes com a realidade (Brunetto, 2016, pg. 51).

As propriedades térmicas do papel foram extraídas do *The Engineering Tool Box* (2002, p. 49) e são mostradas na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1. Propriedades térmicas do papel.

Propriedade	Valor	Unidade
Densidade	750	Kg/m ³
Calor específico	1,336	KJ/(kg*K)
Condutividade	0,1	W/(m*K)
Emissividade	0,93	
Coefficiente de absorção	50000	1/m

2.2.3 Dispositivos para coleta de dados

No *Pyrosim* há diversos tipos de dispositivos disponíveis para medição de informações sobre o incêndio, como, por exemplo, temperaturas em pontos específicos ou em perfis térmicos, densidade de fumaça, densidade de oxigênio disponível no ambiente, liberação de energia de combustão, gases, etc. Os dispositivos escolhidos para coletar os dados deste estudo foram: os termopares, que coletam temperaturas em relação ao tempo num ponto escolhido, e os perfis, que ilustram o comportamento da temperatura em um corte na edificação.

Os termopares foram posicionados na face externa das janelas em cada pavimento, sendo 1 termopar por janela no primeiro pavimento e 2 termopares por janela nos segundo e terceiro pavimentos, conforme mostra a Figura 4. Com essa configuração de posicionamento, chegou-se ao número de 10 termopares para a análise da fachada.

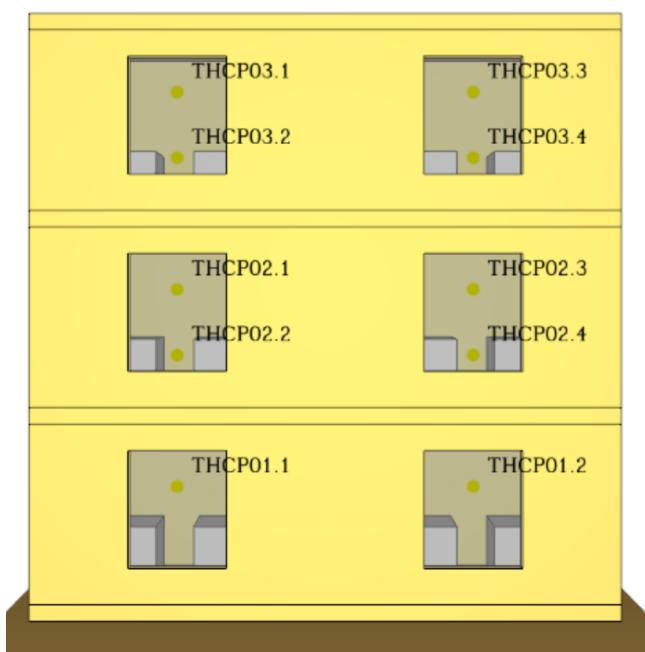


Figura 4. Posicionamento dos termopares na fachada da edificação.

Os perfis térmicos foram posicionados com o intuito de visualizar o comportamento das chamas tanto de uma forma frontal, quanto lateral em relação ao edifício. Foram alocados dois perfis transversais para demonstrar a saída das chamas das janelas, sendo uma em cada janela e um alocado no meio da edificação com o propósito de analisar a propagação interna entre os blocos, conforme mostra a Figura 5. Salienta-se que o perfil longitudinal foi utilizado apenas para análise qualitativa para determinação do início do *flashover* nos devidos pavimentos.

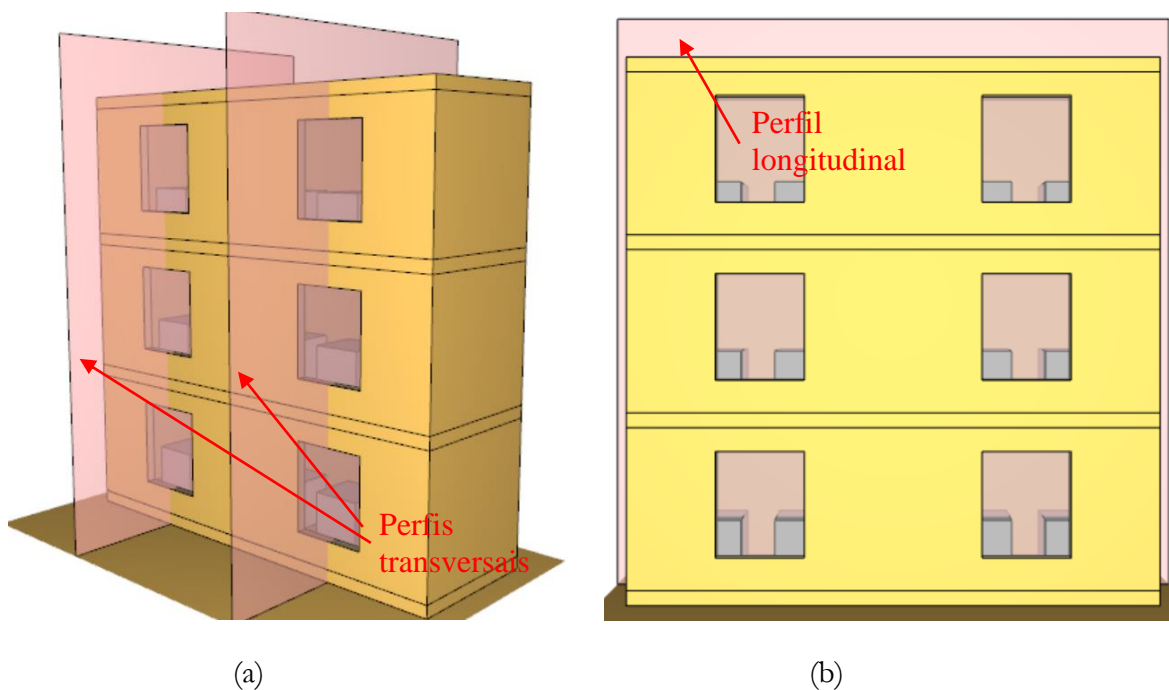


Figura 5. Posicionamento dos perfis térmicos: perfis transversais (a) e perfil longitudinal (b).

2.2.4 Fonte de ignição

Existem diversas fontes de calor para que se inicie um incêndio, todavia, em edificações habitacionais, é comum a fonte de ignição do sinistro se dar por uma falha elétrica. Portanto, para este estudo, a fonte de ignição será um arco elétrico que, de acordo com Greenwood (2003), trata-se de uma corrente elétrica que passa por um material geralmente não condutivo, movimentando-se em altas velocidades e provocando altas temperaturas, por volta de 4000 °C.

No *Pyrosim*, para representar este arco elétrico, foi gerada uma partícula localizada no centro da edificação, logo acima de um dos blocos de papel, com uma temperatura superficial de 4000 °C e uma duração de 1 s, conforme mostrado na Figura 6. Convém citar que esta fonte de ignição é exatamente igual à de Luz (2017).

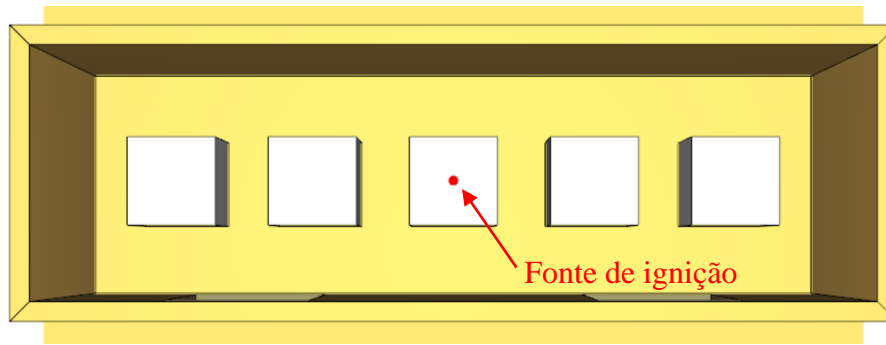


Figura 6. Posicionamento da fonte de ignição.

2.2.5 Taxa de perda de massa

Um dos pontos cruciais ao lidar com o *Pyrosim* foi a taxa de perda de massa, que é responsável, também, pelo êxito na reação em cadeia dos blocos de papel, que é um dos elementos no tetraedro do incêndio, conforme Figura 7. Outro fator importante é a função do programa que permite que os materiais combustíveis sejam consumidos. De acordo com o *The National Bureau of Standards* (2003, p.1), a fonte de ignição do papel é de 200°C.

Não foi evidenciada na literatura uma taxa de perda de massa para o papel. Porém, há estudos de que a perda de massa da madeira está em torno de 0,01 Kg/(m².s) (SHI;CHEW, 2013, p. 1401). De acordo com Luz (2017) apud TAN et al. (2011) e Hurley (2016), seus estudos mostram que a perda de massa do papel exposto ao fogo se aproxima de 0,04 Kg/(m².s).

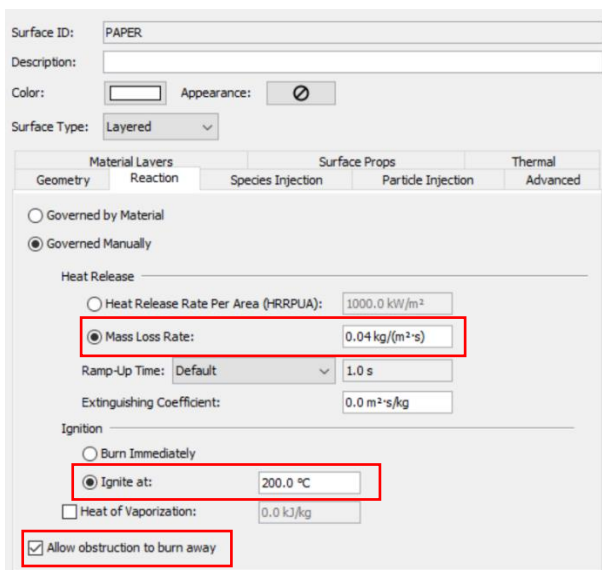


Figura 7. Configuração no *Pyrosim* para definição da perda de massa e ignição do papel.

2.2.6 Malha da simulação

A malha nada mais é que um espaço tridimensional onde nela são calculadas todas interações de transferência de energia (calor) e fluxos do ar. Este espaço é subdividido em células onde se pode determinar quais as dimensões delas. Quanto menor o tamanho da célula, maior a precisão dos efeitos na sua simulação. Entretanto, com um tamanho menor, o número de células neste espaço aumenta, exigindo um maior processamento da máquina e, conseqüentemente, aumentando o tempo exigido para rodar a simulação.

Devido ao tamanho do modelo estudado ser relativamente pequeno, o tamanho das células pôde ser pequeno o suficiente para se ter uma boa precisão e entendimento do incêndio, mesmo utilizando um computador pessoal para realizar as simulações que contém as seguintes configurações: processador Intel® Core™ i5 de 4 núcleos (com velocidade de processamento de 3.4 GHz cada), placa gráfica GeForce GT 1060 (com 6Gb de memória) e memória RAM de 8Gb. Com a análise da Tabela 2, onde estão apresentadas três simulações referentes ao modelo (a) da Figura 1, com diferentes tamanhos de células, foi considerado o tamanho de 25 cm para as células devido à proximidade dos dados gerados por elas com os dados gerados pela simulação com tamanho de célula de 20 cm, mas com um tempo de processamento de quase metade. Na simulação com células de 50 cm não houve o início da combustão.

Tabela 2. Resultados com diferentes malhas.

Tamanho da célula	Tempo de processamento (min)	Temperatura média máxima (°C)			Resultado
		Primeiro pavimento	Segundo pavimento	Terceiro pavimento	
0,50x0,50x0,50	5	20	20	20	Não Satisfaz
0,25x0,25x0,25	600	915	877	526	Satisfaz
0,20x0,20x0,20	1360	936	807	647	Satisfaz

Conforme citado no item 2.1.1, o item (c) da Figura 1 foi descartado por conter elementos na fachada de dimensões inferiores (de forma a simular a fachada de vidro), exigindo um tamanho de célula menor e, conseqüentemente, um tempo muito maior de processamento. Houve uma tentativa de rodar a simulação onde foram elaboradas duas malhas, uma de 0,25x0,25x0,25 m na maior parte do modelo e outra de 0,05x0,05x0,05 m localizada na fachada, gerando aproximadamente 180 mil células. Com isso, o tempo estipulado inicialmente pelo *Pyrosim* foi

de 120 horas e após 90 horas de simulação o tempo estimado de simulação havia aumentado consideravelmente em comparação com o previsto originalmente, além do fato de o programa ter parado de responder.

3 Resultados e discussões

Foram realizadas 3 simulações, sendo uma do modelo (a) da Figura 1, uma do modelo (b) e uma do modelo (d). Todas simulações contêm a mesma disposição dos materiais combustíveis e o valor da carga de incêndio, que é de 300 MJ/m². Além do tamanho ou inexistência das abas, outro fator incomum entre as simulações é a área de cada janela, tendo as seguintes áreas de abertura, conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Dimensões das janelas.

Simulação	Dimensões (mxm)	Área (m ²)
1 – modelo (a)	1,80x1,50	2,70
2 – modelo (b)	2,30x1,50	3,45
3 – modelo (d)	1,95x1,50	2,93

Através deste fator pôde ser observada uma certa diferença no tempo de duração do incêndio, que será discutida no item 3.4.

3.1 Simulação 1 – modelo (a)

Seguindo o modelo (a) da Figura 1, foi elaborada a simulação 1 com um tempo de 1440 s. Este modelo segue a sugestão mais simplificada da Instrução Técnica nº 9 do CBMSP (2019), onde é aplicada na maioria das edificações habitacionais, principalmente as residenciais.

Após processar a simulação, o *Pyrosim* gera uma planilha em Excel com as temperaturas captadas nos termopares a cada segundo da simulação. Com estes dados, foi possível gerar gráficos comparando as temperaturas em cada andar, conforme mostra a Figura 8.

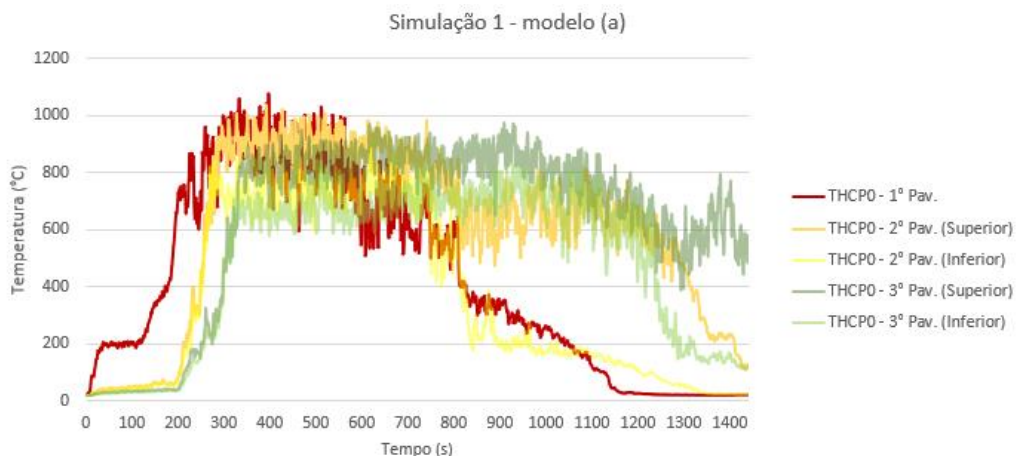


Figura 8. Gráfico com a temperatura em relação ao tempo para cada pavimento para simulação 1 – modelo (a).

Com a análise da linha vermelha (termopar situado no primeiro pavimento), podemos observar que o *flashover* deste incêndio ocorreu aproximadamente em 190 s. Comparando os dados dos primeiro, segundo e terceiro pavimentos deste gráfico, pode-se entender que a configuração do modelo (a) funciona apenas de uma forma retardatória, pois as temperaturas do segundo e terceiro pavimento se aproximam muito da temperatura do primeiro pavimento. Outro indício de retardamento é a diferença do pico de temperatura entre as linhas.

Com o uso dos perfis, podemos entender o comportamento das chamas nas janelas em diversos momentos do sinistro, como, por exemplo, no pico máximo de temperatura e no resfriamento do incêndio no primeiro pavimento, conforme ilustra a Figura 9.

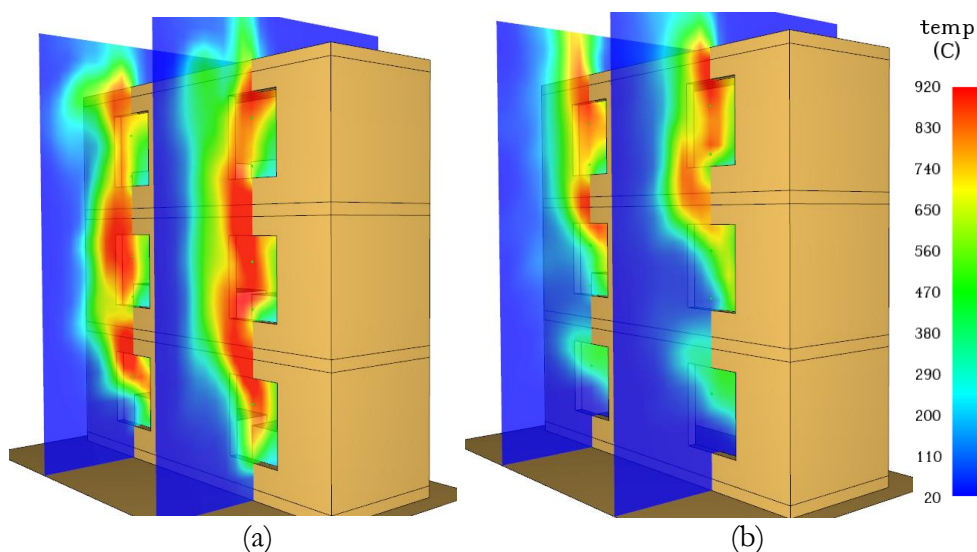


Figura 9. Comportamento das chamas na fachada no pico máximo de temperatura (a) e na fase de resfriamento (b) para a simulação 1 – modelo (a).

Após análise das Figuras 8 e 9, visto que as chamas servem como fonte de ignição para os demais pavimentos propagando o incêndio, conclui-se que a configuração deste modelo, com um somatório de verga e peitoril de 1,20 m, não satisfaz, para fins deste estudo, as condições de compartimentação vertical num edifício, que nada mais é que o impedimento da propagação do incêndio para outros ambientes (Instrução Técnica nº 9 do CBMSP, 2019, p. 3).

O *Smokeview*, integrado ao *Pyrosim*, permite que seja visualizado, também, o desenvolvimento das chamas e fumaças na simulação. Por conta de a fumaça ser um dos fatores de maior fatalidade em incêndios, torna-se interessante analisar também este componente, conforme mostra a Figura 10.

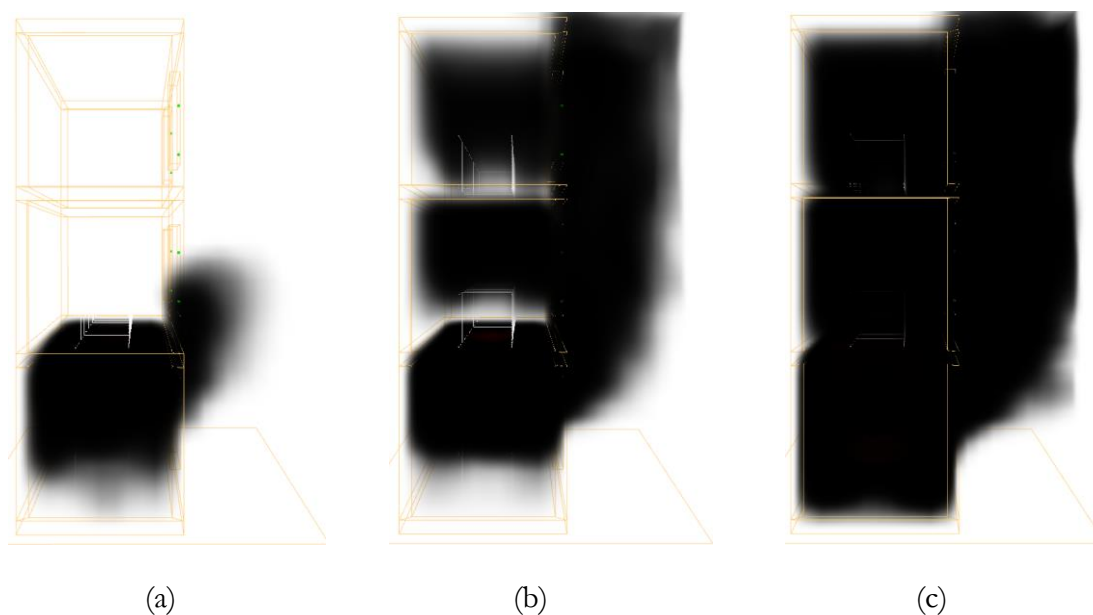


Figura 10. Propagação da fumaça nos tempos de: 10 s (a), 60 s (b) e 190 s (c) para a simulação 1 – modelo (a).

Podemos ver com a Figura 10 que a fumaça se propaga rapidamente no pavimento onde se inicia o incêndio, em apenas 10 segundos. Em 60 segundos já se têm quase todo volume do edifício preenchido com fumaça, restando apenas os espaços próximos às lajes. No *flashover*, em 190 segundos, já temos todo volume do edifício preenchido com fumaça.

Os tempos em que foram capturadas as imagens da propagação de fumaça são diferentes para cada simulação devido à dinâmica diferente do incêndio. Portanto, estas imagens são capturadas através de uma análise qualitativa.

3.2 Simulação 2 – modelo (b)

Seguindo o modelo (b) da Figura 1, foi elaborada a simulação 2 com um tempo de 1440 s. Este modelo não é muito utilizado em edificações devido sua desarmonização com a fachada, implicando, em muitos casos, na necessidade do uso de brises.

Conforme já mencionado, o *Pyrosim* gera uma planilha em Excel com as temperaturas captadas nos termopares a cada segundo da simulação. Com estes dados, foi possível gerar gráficos comparando as temperaturas em cada andar, conforme mostra a Figura 11.

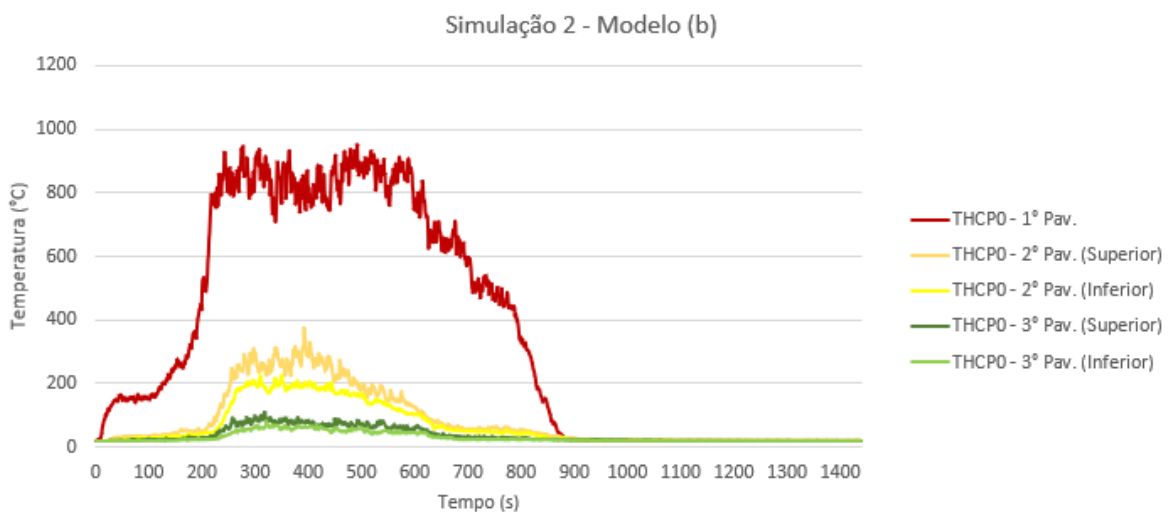


Figura 11. Gráfico com a temperatura em relação ao tempo para cada pavimento para simulação 2 – modelo (b).

Com a análise da linha vermelha (termopar situado no primeiro pavimento), podemos observar que o *flashover* deste incêndio ocorreu aproximadamente em 200 segundos. Comparando os dados dos primeiro, segundo e terceiro pavimentos deste gráfico, podemos entender que a configuração do modelo (b) funciona de maneira satisfatória, pois as temperaturas do segundo e terceiro pavimento se afastam significativamente da temperatura do primeiro pavimento.

Com o uso dos perfis, podemos entender de uma forma clara o comportamento das chamas nas aberturas de janelas em diversos momentos do sinistro, como, por exemplo, no pico máximo de temperatura e no resfriamento do incêndio no primeiro pavimento, conforme ilustra a Figura 12.

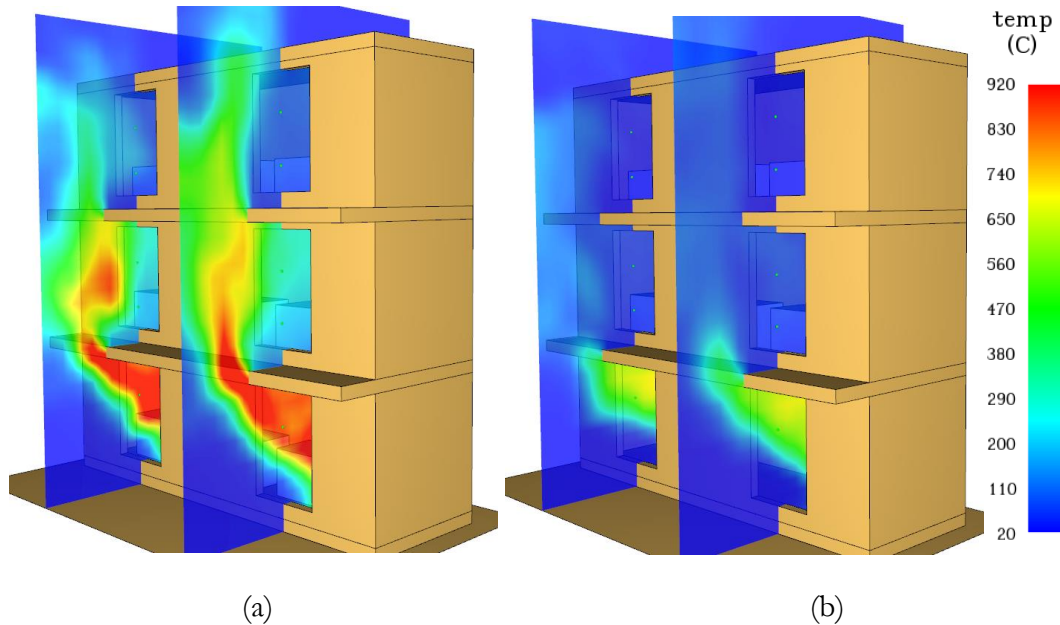


Figura 12. Comportamento das chamas na fachada no pico máximo de temperatura (a) e na fase de resfriamento (b) para a simulação 2 – modelo (b).

Após análise das Figuras 11 e 12, percebe-se que a configuração deste modelo, com um avanço da laje em 0,90 metros, satisfaz as condições de compartimentação vertical num edifício, pois as chamas se afastam da fachada, diminuindo as temperaturas nos andares superiores e, conseqüentemente, não propagando o incêndio, conforme visto na Figura 12. Foi também realizada a análise da propagação de fumaça, conforme mostra a Figura 13.

Podemos ver com a Figura 13 que a fumaça se propaga rapidamente no pavimento onde se inicia o incêndio, em apenas 10 segundos. Todavia, para este modelo, em 60 segundos pode-se observar que apenas o segundo pavimento foi preenchido com fumaça, havendo uma densidade pequena no terceiro pavimento. No instante do *flashover*, em 200 segundos, tem-se boa parte dos primeiro e terceiro pavimentos preenchidos com fumaça e o segundo totalmente preenchido.

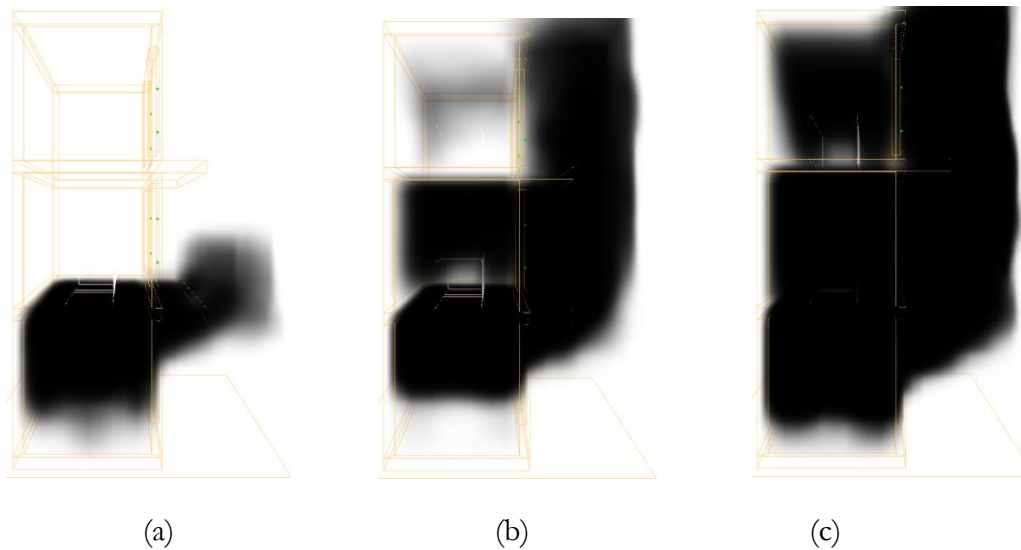


Figura 13. Propagação da fumaça nos tempos de: 10 s (a), 60 s (b) e 200 s (c) para a simulação 2 – modelo (b).

3.3 Simulação 3 – modelo (d)

Seguindo o modelo (d) da Figura 1, foi elaborada a simulação 3 com um tempo de 1440 s. Este modelo se assimila ao modelo (b) da Figura 1, sendo assim, também não é muito utilizado em edificações devido sua desarmonização com a fachada implicando, em muitos casos, na necessidade do uso de brises.

Com os dados gerados pelo *software*, foi possível gerar gráficos comparando as temperaturas em cada andar, conforme mostra a Figura 14.

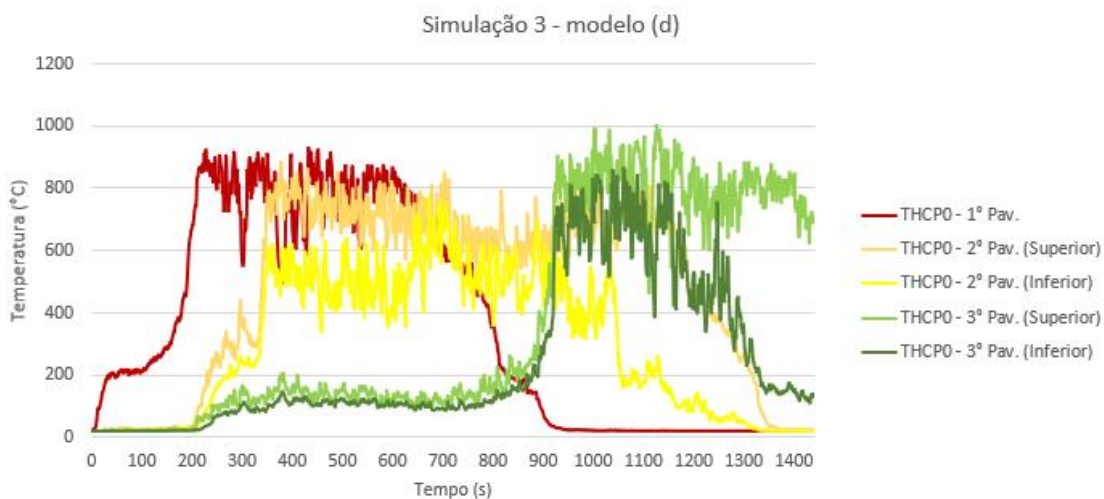


Figura 14. Gráfico com a temperatura em relação ao tempo para cada pavimento para simulação 3 – modelo (d).

Com a análise da linha vermelha (termopar situado no primeiro pavimento), podemos observar que o *flashover* deste incêndio ocorreu aproximadamente em 200 segundos. Comparando as linhas dos primeiro, segundo e terceiro pavimentos deste gráfico, podemos entender que a configuração do modelo (d) funciona de maneira intermediária entre os modelos (a) e (b), pois as temperaturas do segundo pavimento se aproximam da temperatura do primeiro, porém o terceiro pavimento se afasta significativamente da temperatura do primeiro pavimento. Contudo, isto não impede que ocorra a propagação do incêndio para os andares superiores à medida que o incêndio se desenvolve, pois a temperatura no interior dos compartimentos acima são superiores a temperatura de ignição do material combustível, que é de 200° C .

Com o uso dos perfis, podemos entender de uma forma clara o comportamento das chamas nas aberturas de janelas em diversos momentos do sinistro, como, por exemplo, no pico máximo de temperatura e no resfriamento do incêndio no primeiro pavimento, conforme ilustra a Figura 15.

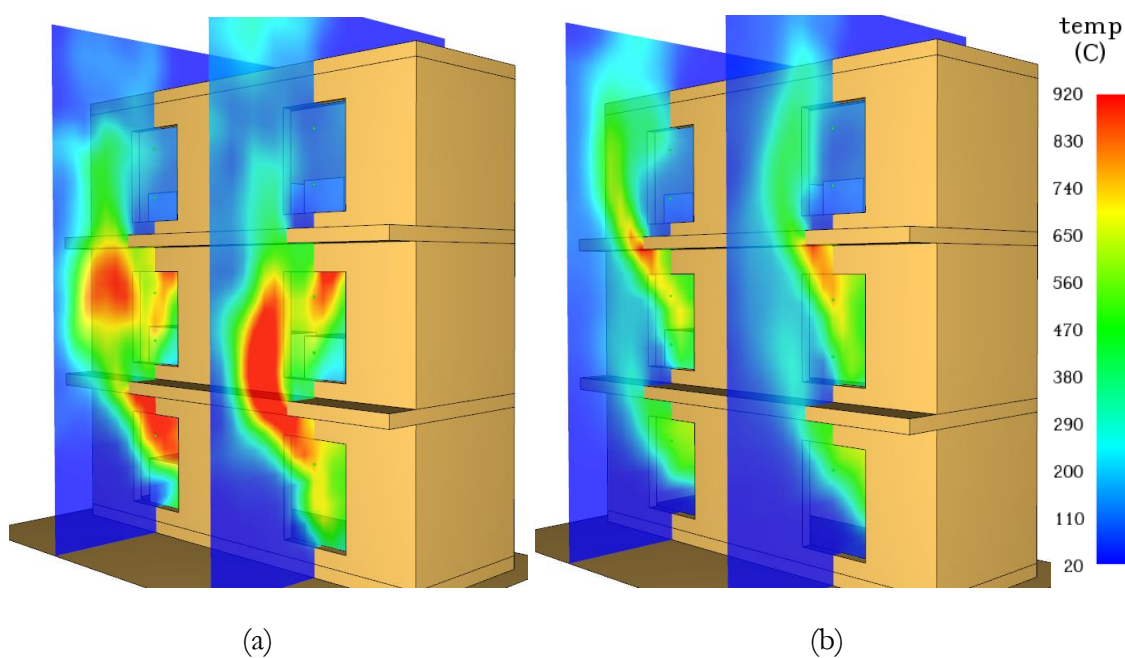


Figura 15. Comportamento das chamas na fachada no pico máximo de temperatura (a) e na fase de resfriamento (b) para simulação 3 – modelo (d).

Após análise das Figuras 14 e 15, visto que as chamas servem como fonte de ignição para os demais pavimentos propagando o incêndio, conclui-se que a configuração deste modelo, com um avanço da laje em 0,70 metros e uma verga de 0,50 metros, não satisfaz, para fins deste estudo, as condições de compartimentação vertical num edifício. Entretanto, este modelo

agrega melhores condições de compartimentação vertical em relação ao modelo (a), pois as chamas se afastam da fachada, diminuindo as temperaturas nos andares superiores e retardando a ignição destes andares, conforme visto na Figura 15. Foi também realizada a análise da propagação de fumaça, conforme mostra a Figura 16.

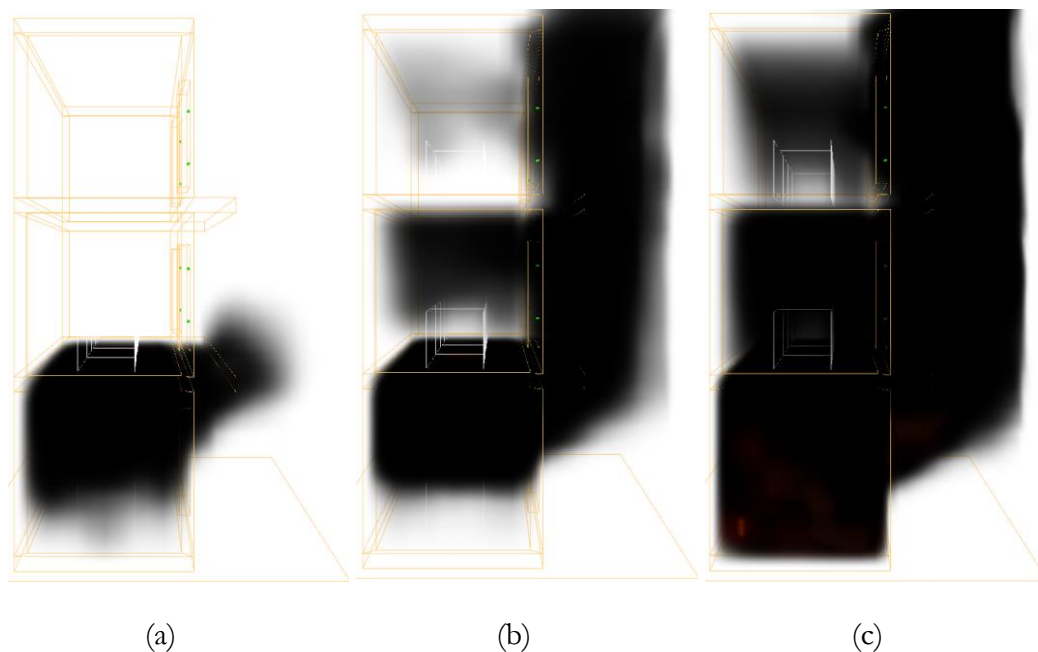


Figura 16. Propagação da fumaça nos tempos de: 10 s (a), 60 s (b) e 200 s (c) para a simulação 3 – modelo (d).

Podemos ver com a Figura 16 que a fumaça se propaga rapidamente no pavimento onde se inicia o incêndio, em apenas 10 segundos. Todavia, para este modelo, em 60 segundos pode-se observar que apenas o segundo pavimento foi preenchido parcialmente com fumaça, havendo uma densidade pequena no terceiro pavimento. No instante do *flashover*, em 200 segundos, temos o primeiro e segundo pavimentos totalmente preenchidos com fumaça e boa parte do terceiro pavimento preenchido.

3.4 Comparação dos resultados

Após o estudo de cada simulação, foram feitas algumas comparações entre os resultados obtidos. Foram desenvolvidos gráficos das temperaturas por pavimento para todas simulações, conforme mostra a Figura 17.

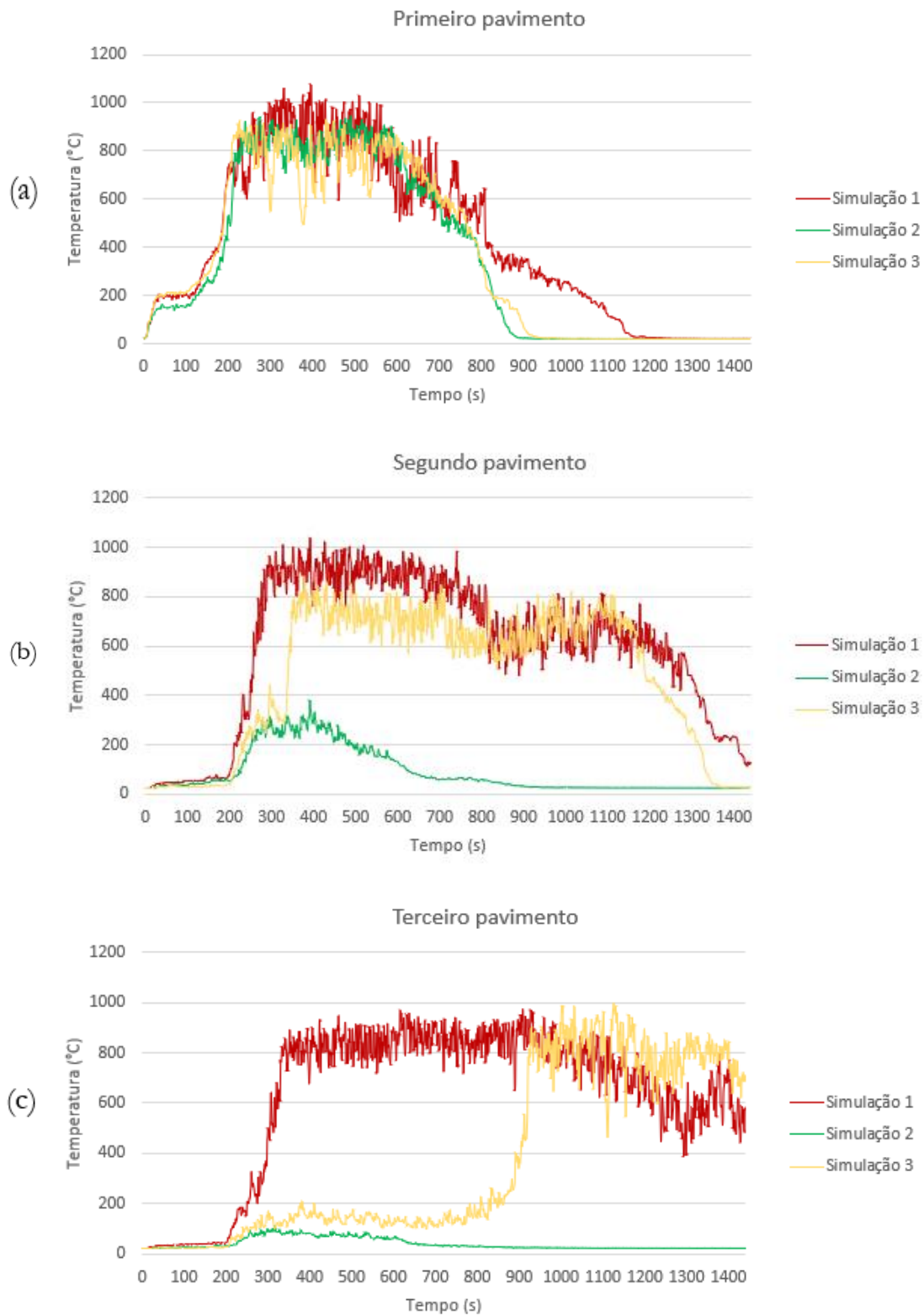


Figura 17. Comparativo das temperaturas do primeiro (a), segundo (b) e terceiro (c) pavimentos para as 3 simulações.

Pode-se observar na Figura 17 a influência positiva que as abas têm para compartimentações verticais. Em termos de eficiência pelo gradiente de temperatura entre os pavimentos, pode-se ordenar de maneira decrescente os 3 modelos propostos, sendo: o modelo (b), o (d) e o (a), respectivamente.

Além da análise da eficiência dos modelos, também pode-se verificar com a Figura 17 (a) que as dimensões das janelas parecem influenciar no tempo de duração do incêndio, tornando-o maior à medida que as dimensões das janelas, descritas na Tabela 3, diminuem. Ou seja, parece que, no caso do modelo (a) – Simulação 1, tende a se prolongar por um período de tempo maior no primeiro pavimento em relação aos demais (b) e (d). Este parâmetro talvez possa ser explicado devida quantidade menor de oxigênio disponível para o ambiente com o material combustível.

3.5 Comparação com estudo realizado por Rodrigues (2009).

O estudo realizado por Rodrigues (2009) consiste na análise da eficiência dos sistemas de compartimentação vertical externa por afastamento entre janelas e por projeções horizontais segundo as exigências normativas brasileiras, e nele foi analisada esta eficiência de 2 maneiras: uma através de ensaios em escala proporcionalmente reduzida, elaborados junto ao CBMRS, e outra sendo realizadas simulações no FDS. Através disto, pôde-se estabelecer uma estimativa comportamental sobre a dinâmica do fogo e a eficiência das compartimentações verticais.

Para Rodrigues (2009), os ensaios realizados em escala reduzida mostraram-se viáveis no âmbito da análise da dinâmica de propagação do incêndio e de resistência dos materiais, apresentando-se coerentes de forma qualitativa e quantitativa. Entretanto, para fins de análises feitas no âmbito brasileiro, o *Fire Dynamic Simulator* mostrou ser uma ferramenta poderosa apenas para embasamentos qualitativos, necessitando da especificação das propriedades térmicas dos materiais brasileiros, já que a ferramenta é internacional.

Para os ensaios em escala reduzida de Rodrigues (2009), obteve-se uma pequena redução das temperaturas com relação ao uso de projeções horizontais em lajes para janelas estreitas e incêndios de risco baixo (até 300 MJ/m²). Contudo, acredita-se que houve uma pequena redução da temperatura devido às pequenas dimensões das janelas, que funcionaram como forma de estrangulamento, empurrando as chamas para longe da fachada. Entretanto, para os

ensaios com aberturas largas e risco baixo de incêndio, obteve-se resultados satisfatórios, conforme mostra a Figura 18.

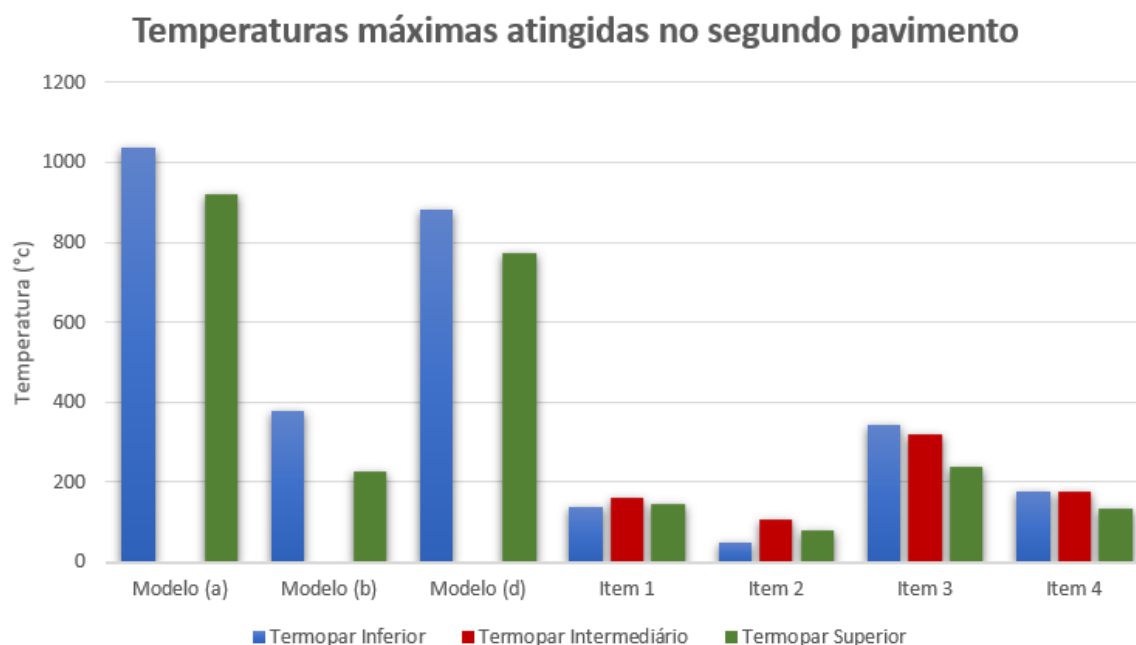


Figura 18. Comparativo das temperaturas máximas na fachada do segundo pavimento entre as três simulações realizadas neste trabalho e quatro ensaios em escala reduzida realizados no trabalho de Rodrigues (2009).

Na Figura 18 são demonstradas as temperaturas máximas realizadas em cada um dos modelos estudados neste artigo e em ensaios realizados por Rodrigues (2009), onde: Item 1 fez uso de janelas estreitas e sem o avanço da laje, Item 2 fez uso de janelas estreitas e com o avanço da laje, Item 3 fez uso de janelas largas e sem o avanço da laje, Item 4 fez uso de janelas largas e com o avanço da laje .

Todos ensaios de Rodrigues (2009) foram elaborados em escala reduzida de 1:3, com pé direito de 80 cm, dimensões internas de 1x1 m, aberturas estreitas de 44x44 cm e aberturas largas de 88x22 cm e os avanços das lajes de 30 cm, quando utilizados. Não houve cargas de incêndio nos andares superiores e o material combustível utilizado foi madeira. Com estas características, pode-se explicar a grande diferença de temperaturas entre estes ensaios e as simulações realizadas neste artigo.

4 Considerações Finais

Com as limitações impostas neste artigo, pela ausência de informações sobre simulações computacionais e de ensaios em escala reduzida em normas, e com simplificações tomadas pelo autor para viabilidade dos estudos, devem-se assumir que as conclusões obtidas não devem ser generalizadas. Entretanto, pode-se chegar às seguintes considerações finais:

- O tamanho das aberturas das janelas também influencia na dinâmica do incêndio, pois estas são a fonte do material comburente. Portanto, quanto maior a disponibilidade deste material, mais rápida será a liberação de energia das cargas de incêndio, diminuindo a duração do incêndio;
- O avanço horizontal de lajes como forma de compartimentação vertical tem grande eficácia na redução de temperaturas nos andares superiores, evitando a propagação do incêndio, dependendo do caso;
- Para se aproximar mais da realidade, faz-se necessária a especificação das propriedades térmicas dos materiais utilizados na construção civil brasileira;
- Sugere-se que mais estudos sejam realizados acerca da Instrução Técnica nº 9 do CBMSP (2019), pois os estudos realizados neste trabalho, considerando as limitações já descritas, mostraram a ineficácia de dois dos três modelos propostos.
- Para obtenção de uma maior similaridade entre as simulações estudadas neste artigo e ensaios em escala reduzida, sugere-se que sejam elaborados ensaios com as mesmas premissas estipuladas nas simulações, pois, através do comparativo realizado neste trabalho, concluiu-se que, apesar do comportamento semelhante do incêndio, ainda há uma grande diferença de temperatura.
- Sugere-se para trabalhos futuros, a inclusão de materiais combustíveis na fachada.

5 Agradecimentos

Agradeço à professora Ângela Graeff, pelos seus múltiplos ensinamentos no decorrer do curso e da elaboração deste trabalho, pelas orientações, pelas frases motivacionais para o âmbito da vida profissional e acadêmica.

À empresa Thunderhead Engineering, que disponibilizou seu programa *Pyrosim* com uma licença institucional.

À minha mãe Dirce Elaine Ferreira Lopes, base da minha educação, motivação e competência na vida e que foi a maior apoiadora na minha formação acadêmica.

6 Referências

- [1] BERTICELLI, R. **Simulações de abandono de edificações: Uma revisão preliminar**, 2018.
- [2] HURLEY, M. J. et al. **SFPE handbook of fire protection engineering**. 5 ed. Greenbelt: Springer, 2016. 3493 p.
- [3] ROCKETT J. A. **Objectives and pitfalls in the simulation of building fires with a computer**, 1969.
- [4] RODRIGUES E. E. C. **Análise da eficiência dos sistemas de compartimentação vertical externa por afastamento entre janelas e por projeções horizontais segundo as exigências normativas brasileiras**. 2009. Tese (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- [5] RUSCHEL F. **Avaliação da utilização de ferramentas de simulação computacional para reconstituição de incêndios em edificações de concreto armado: aplicação ao caso shopping total em Porto Alegre-RS**. 2011. Tese (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- [6] BRUNETTO L. O. **Simulação computacional de incêndios: uma aplicação no prédio da escola de engenharia nova da UFRGS**. 2016. Trabalho de diplomação para obtenção do título de engenheiro civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- [7] LUZ V. H. **Simulação computacional de incêndio em um depósito: análise das principais variáveis que influenciam no comportamento do incêndio**. 2017. Trabalho de diplomação para obtenção do título de engenheiro civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- [8] NEW ZEALAND BUILDING CODE. **C/VM2 Verification method: framework for fire safety design**. Wellington, 2014, 28 p.
- [9] GREENWOOD, Paul; DESMET, Koen. **Tactical firefighting**. Brussels: Cemac, 2003.
- [10] NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. **Self-ignition temperature of cellulose and magnesium**. Journal of the Franklin Institute, v. 234, n. 5, p. 492–493, 2003.
- [11] SHI, L.; CHEW, M. Y. L. **Experimental study of woods under external heat flux by autoignition: Ignition time and mass loss rate**. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 111, n. 2, p. 1399–1407, 2013.
- [12] TAN, J; XIE, Y; ZHANG, X; WANG, T. **Analysis of combustion characterization of computer monitor and paper in conic calorimeter test**. Beijing Municipal Institute of Labor Protection. Vols. 282-283, pp. 169-172. Beijing, 2011.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Desempenho de edificações habitacionais**. 2013.
- [14] CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE SÃO PAULO. **Instrução técnica nº 09: Compartimentação horizontal e compartimentação vertical**. São Paulo, 2019.

[15] CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO RIO GRANDE DO SUL. **Resolução técnica nº 03: Carga de incêndio**. Porto alegre, 2019.

[16] Assembleia Legislativa. Gabinete de Consultoria Legislativa. Decreto nº 53.280, de 26 de novembro de 2016. Altera o Decreto nº 51.803, de 10 de setembro de 2014, que regulamenta a Lei Complementar nº 14.376, de 26 de dezembro de 2013, e alterações, que estabelece normas sobre segurança, prevenção e proteção contra incêndio nas edificações e áreas de risco de incêndio no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016