



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

ESTUDO DA EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DE UM DEPÓSITO DE GRANDES DIMENSÕES EM SITUAÇÃO SIMULADA DE INCÊNDIO, OBTIDA ATRAVÉS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL.

*STUDY OF THE INTERNAL TEMPERATURE GROWTH RATE IN A
BURNING BIG SIZED WAREHOUSE, BASED ON A COMPUTER
SIMULATION.*

Autor: Eng. Civil Jakelyne dos Santos Rocha (jakelyne.rocha@hotmail.com)

Orientador: Prof. Dr. Jacinto Manuel Antunes de Almeida (jasscarnival@gmail.com)

RESUMO

O presente estudo busca analisar a influência das principais variáveis de desenvolvimento de incêndios, sendo estas, a carga de incêndio e o grau de ventilação, através da modelagem computacional, tendo como estudo de caso um depósito de produtos acabados. Para tal, foram modeladas duas situações de incêndio da mesma edificação e a partir dos resultados obtidos com o software *Pyrosim*, foram realizadas análises comparativas quanto ao desencadeamento e à propagação do incêndio, bem como à influência das aberturas do depósito. Os resultados obtidos demonstraram que as docas do depósito foram importantes para a extração da fumaça que se acumulou na cobertura, facilitando a evacuação da edificação, uma vez que a fumaça não chegou a prejudicar a visibilidade durante os segundos ensaiados.

Palavras-chave: Modelagem computacional. Incêndio. Pyrosim. Fire Dynamics Simulator. Segurança contra incêndio.

ABSTRACT

The following study intent to analyze the main influence of fire development, the fire load and the level of ventilation, through computational modeling, having a warehouse as a case of study. For this purpose, two fire situations had been simulated, both from the same building, the final results of the computer simulation were used to make comparative analyzes, regarding the triggering and propagation of the fire, as well the influence of the warehouse openings. The results show that the permanent openings of the warehouse were important for the smoke extraction that accumulated in the roof, facilitating the evacuation of the building, since the smoke did not harm the visibility during the seconds tested.

Keywords: Computer modeling. Fire. Pyrosim. Fyre Dynamics Simulator. Fire safety.



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

1 INTRODUÇÃO

O grau de ventilação, a carga de incêndio e até mesmo sua disposição, bem como os materiais existentes em um compartimento, são fatores que afetam severamente o desenvolvimento de um incêndio (Seito et al., 2008). Estes fatores tornam a variação da temperatura, em função do tempo, diretamente relacionada aos materiais presentes e a quantidade de aberturas em um compartimento. Desta forma, cada compartimento possui um fator próprio de desenvolvimento de incêndio e devido às complicações que essa especificidade poderia trazer para o cálculo estrutural, convencionou-se adotar a curva ISO 834 (1999) como modelo de incêndio-padrão. No entanto, a curva não representa um modelo real de incêndio, uma vez que não considera a carga de incêndio, o grau de ventilação ou as características dos materiais do compartimento (MELAO; SILVA, 2014).

Este artigo procura identificar qual a interferência do grau de ventilação e da ação de um sistema de supressão na propagação do incêndio e produzir conteúdo que possibilite a otimização do uso de medidas passivas de segurança contra incêndio, bem como estimular a produção de trabalhos na área da segurança contra incêndio.

A partir deste panorama e da possibilidade de otimizar o desempenho das medidas de segurança contra incêndio, o presente estudo estabelece o seguinte problema de pesquisa: Qual a interferência da ventilação e do uso de um sistema de supressão no desenvolvimento de um incêndio em um depósito de grandes dimensões? Assim, o objetivo geral deste estudo é analisar o desenvolvimento de um incêndio em um depósito por meio da modelagem computacional e com carga de incêndio conhecida. Posteriormente, apresentar os conceitos básicos da interferência da ventilação e do sistema de sprinklers na propagação de um incêndio. Além disso, o presente estudo tem como objetivos específicos avaliar a influência das variáveis relacionadas a carga de incêndio e disposição da ventilação na propagação do incêndio e comparar duas modelagens do mesmo depósito: Uma demonstrando o desenvolvimento do incêndio no caso real e outra desconsiderando a existência das aberturas. Assim pode-se verificar quais seriam os ganhos com relação a segurança contra incêndio, gerados a partir das mudanças nas variáveis em estudo.



2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Dinâmica de propagação do fogo

A propagação do fogo está relacionada às formas de transmissão do calor, que podem ocorrer de três maneiras distintas: Radiação, Condução e Convecção. Essa transmissão ocorre quando existe diferença de temperatura entre dois corpos ou sistemas, transferindo calor para o corpo ou sistema mais frio até que estes alcancem o equilíbrio térmico (BELTRAMI, 2012).

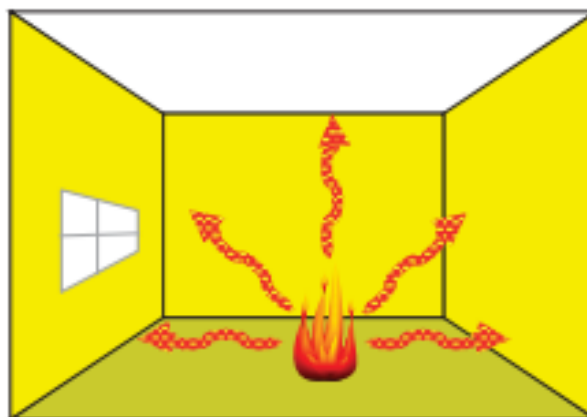
Segundo SILVA (2012) o fluxo de calor, seja por radiação ou convecção, provocado pela diferença térmica entre componentes da estrutura e gases quentes do ambiente, atuando na estrutura, pode ser definido como ação térmica.

2.1.1 Radiação

SILVA (2012) definiu radiação como sendo o processo pelo qual o calor flui por ondas de um corpo mais quente para o outro mais frio, conforme Figura 1 abaixo. Um exemplo deste fenômeno é o calor sentido ao aproximar a mão de uma lâmpada (incandescente) acesa, mesmo em um ambiente de vácuo.

Semelhante a luz, a radiação térmica partindo de um corpo aquecido, acontece em todas as direções. As propriedades dos materiais emissores de radiação, o tamanho e a existência de compartimentação interna, são os fatores de influência no alcance da radiação. (BRENTANO, 2015 apud LUZ, 2017).

Figura 1: Fluxo de Calor Radiante



(Fonte: SILVA, 2006)



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

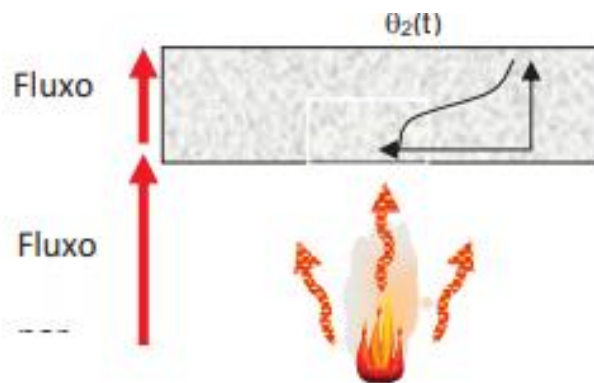
www.ufrgs.br/esci
(2020)

2.1.2 Condução

A condução é a transferência de energia calorífica que ocorre no interior dos sólidos, decorrente da movimentação e choques das moléculas que formam os sólidos, conforme Figura 2. Se a fonte de calor fosse de temperatura constante e duração prolongada, haveria uma equalização térmica em todas as regiões da estrutura, igualando-se a temperatura da fonte de calor (NEGRISOLO et al., 2019).

Por exemplo, se aquecermos a extremidade de uma barra metálica, o corpo da barra terá um aumento de temperatura gradual até alcançar a outra extremidade, em função da transferência de calor entre moléculas provenientes dos choques causados pela movimentação vigorosa das mesmas (FLORES et al., 2016).

Figura 2: Fluxo de Calor por Condução em um Elemento



(Fonte: SILVA, 2006)

2.1.3 Convecção

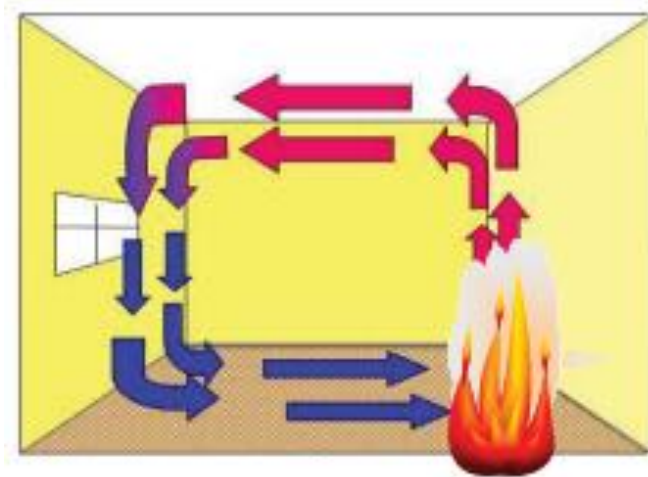
Sobre o movimento de convecção, podemos afirmar que:

Convecção é o processo pelo qual o calor flui, envolvendo movimentação de mistura de fluido, principalmente entre sólidos e fluidos. Decorrente da diferença de densidades entre os gases com diferentes temperaturas no ambiente em chamas, eles se movimentam e tocam as estruturas transferindo-lhes calor. (SILVA, 2012, p. 35).

A convecção foi definida por SEITO et al., (2008) como o sistema no qual, através da movimentação do meio fluido aquecido (líquido ou gás), a energia se transmite, conforme figura 3 abaixo.



Figura 3: Fluxo de Calor Convectivo



(Fonte: SILVA, 2006)

2.2 Desenvolvimento do incêndio

O desenvolvimento de um incêndio se dá em fases, que também podem ser compreendidas como uma curva de desenvolvimento de um incêndio, que fornecerá a temperatura média em função do tempo.

2.2.1 Elevação da Temperatura

Conforme Figura 5, que representa o desenvolvimento do incêndio através da temperatura em função do tempo, pode-se observar que a curva terá como início a fase de ignição, onde ocorre a elevação da temperatura, neste período o risco de morte está associado aos gases tóxicos ou asfixiantes, provenientes do material em chamas. Entretanto, nessa fase do incêndio não haverá riscos à estrutura, pois são necessárias altas temperaturas para este dano ser causado (SILVA, 2012).

2.2.2 Instante de Inflamação Generalizada – *Flashover*

Esta fase tem início quando a temperatura do ambiente chega a aproximadamente 600 °C, neste momento o ambiente estará cheio de gases e vapores combustíveis provenientes da pirólise (SEITO et al., 2008).



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

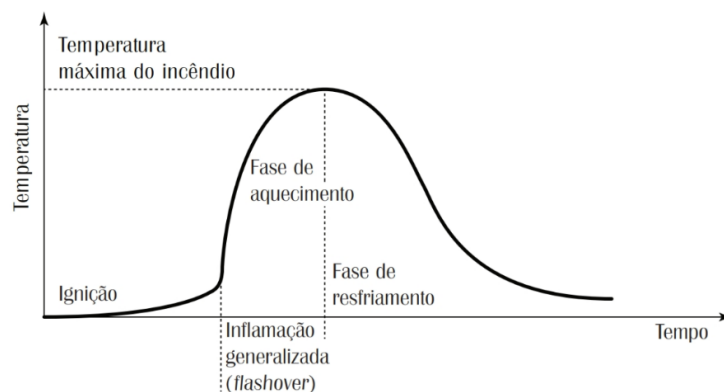
www.ufrgs.br/esci
(2020)

Deste modo o incêndio aumentará suas proporções, pois todos os combustíveis presentes no ambiente entrarão em ignição simultaneamente, a temperatura dos gases também se elevará rapidamente, até que todo material combustível seja consumido (SILVA, 2012).

2.2.3 Resfriamento e Extinção do Incêndio

SILVA, (2012) afirma que após o *flashover* a temperatura dos gases sofrerá uma redução gradual, relacionada a diminuição dos níveis de oxigênio (comburente) presente no ambiente, na curva representada pela fase de resfriamento, como pode ser vista abaixo na Figura 4. O incêndio será extinto quando os combustíveis forem completamente consumidos e o oxigênio estiver abaixo de 13% (CAMILLO JÚNIOR, 2013).

Figura 4: Curva de Desenvolvimento do Incêndio



(Fonte: SILVA, 2012, p. 38)

2.3 Variáveis de influência do incêndio

Segundo SEITO et al., (2008) pode-se afirmar que as principais variáveis que influenciam no desenvolvimento de um incêndio são a carga de incêndio e a ventilação.

O incêndio será mais severo em situações em que a carga de incêndio é formada por hidrocarbonetos, que são compostos orgânicos formados exclusivamente por carbono e hidrogênio, por exemplo o GLP, devido ao elevado potencial calorífico do material, conforme aponta a curva teórica utilizada para ensaios e modelagens na Figura 5. Também pode-se dizer que em um incêndio com alta ventilação e, com isso uma grande oferta de oxigênio

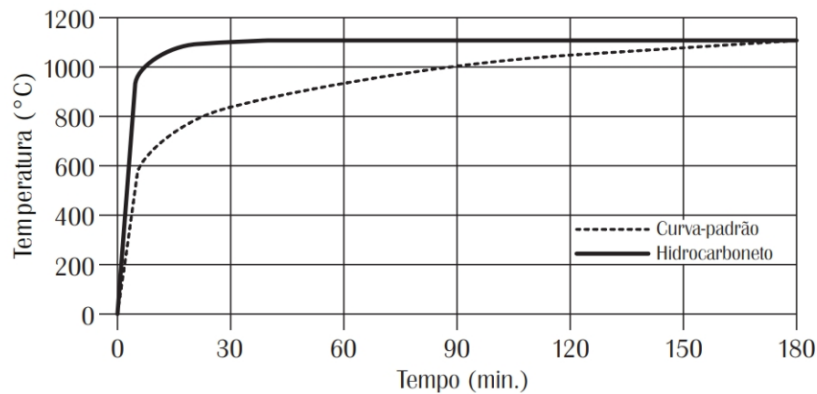


Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

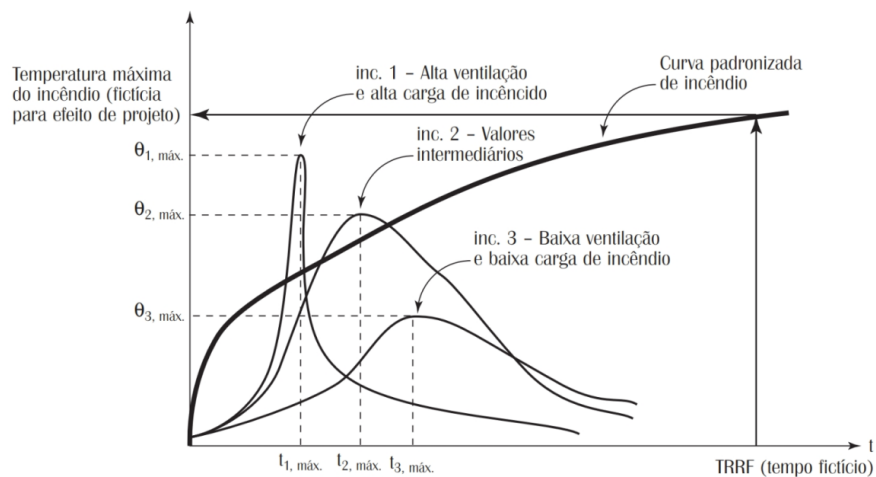
(comburente), este permanecerá com chamas por mais tempo, com isso alcançando maiores temperaturas, conforme pode-se observar na Figura 6 (SILVA, 2012).

Figura 5: Curva teórica temperatura-tempo para Hidrocarbonetos



(Fonte: SILVA, 2012, p. 40)

Figura 6: Curvas temperatura-tempo de incêndio



(Fonte: SILVA, 2012, p. 69)

2.3.1 Carga de Incêndio

Para SEITO et al., (2008) a duração de um incêndio está ligada a carga de incêndio existente no compartimento, pois seu desenvolvimento é diretamente proporcional ao consumo do material combustível existente e seu potencial calorífico.



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

Carga de incêndio é a medida do calor máximo que seria liberado se todos os combustíveis em determinada área queimassem. A máxima liberação de calor é produto do peso de cada combustível multiplicado pelo seu potencial calorífico. Em um edifício típico, a carga de incêndio inclui mobiliário, acabamento interno, acabamento do piso e elementos estruturais. SEITO et al., (2008).

Já para COUGHY (2006) os incêndios dominados pela carga de incêndio tendem a ser mais curtos, isto pode ocorrer devido a boa ventilação do compartimento ou de uma disponibilidade baixa de combustível, porém o pico de temperatura alcançado tende a ser maior do que em incêndio dominados pela ventilação, este tipo de incêndio ocorre em edifícios com grandes aberturas, como por exemplo, prédios de escritórios, porém ressalta que a severidade de um incêndio não pode ser determinada por apenas um fator.

Esta pode ser representada pela carga de incêndio específica, expressa pela Equação 1.

$$q_{fi} = \frac{\sum M_i H_i}{A_f} \quad (\text{equação 1})$$

Onde:

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

M_i = massa total de cada componente (i) do material combustível, em quilograma. Esse valor não pode ser excedido durante a vida útil da edificação exceto quando houver alteração de ocupação, ocasião em que (M_i) deve ser reavaliado;

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

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

2.3.2 Ventilação

A ventilação trata-se da movimentação do ar, podendo servir tanto para a entrada, quanto para a extração do ar de um compartimento, com a sua origem podendo ser natural ou mecânica (NEGRISOLO et al., 2019).

SEITO et al., (2008) avalia que a ventilação está relacionada à quantidade e geometria das aberturas existentes e que a intensidade máxima do incêndio ocorrerá quando a taxa de ventilação for suficiente para alimentar os vapores e gases combustíveis no ambiente. A taxa de ventilação pode ser aumentada quando o incêndio alcançar temperaturas elevadas e as



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

portas e janelas do compartimento não puderem aguentar a temperatura. Neste momento, haverá a entrada de ar no compartimento, aumentando a quantidade de comburente (oxigênio) disponível no local, aumentando assim as chamas e, conseqüentemente, a temperatura.

Para COUGHY (2006) os incêndios dominados pela ventilação, isto é, casos em que a ventilação é baixa, são mais destrutivos. Nesses casos, ainda que possuam uma carga de incêndio moderada possuem um pico de temperatura menor, se comparados aos dominados pela carga de incêndio, porém seu tempo de duração será maior, tornando-o mais destrutivo e com maior probabilidade de propagação para outros ambientes.

2.4 Simulação computacional de dinâmicas de fogo

Simuladores de dinâmicas de fogo são ferramentas que têm facilitado a testagem de cenários de incêndio e auxiliado profissionais da segurança contra incêndio, devido à praticidade que esses softwares trouxeram. Um estudo como este, por exemplo, que busca conhecer como um incêndio se desenvolveria em um galpão de grandes dimensões e testar diferentes variáveis, pode se utilizar da modelagem computacional para fazer suas análises de maneira segura, respeitadas as diferenças e limitações, sem que haja a necessidade de simulações, seja em escala real ou reduzida.

Embora seja um recurso relativamente novo, no ambiente de estudo da segurança contra incêndio, se faz relevante citar que já existem alguns trabalhos desenvolvidos na UFRGS através do Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais (LEME) que antecederam este estudo e utilizaram a mesma prática de modelagem computacional para seu desenvolvimento, tem-se como exemplo Mazonni (2010) que simulou computacionalmente o incêndio no Condomínio Edifício Cacique em Porto Alegre-RS e demonstrou que os resultados obtidos com o uso do FDS foram condizentes com o registro fotográfico do ambiente sinistrado, foi possível também observar que os recuos da fachada frontal funcionaram como compartimentação vertical, assim como a circulação externa no décimo sétimo andar afastou as chamas, evitando a propagação do fogo para as andares acima deste. Ruschel (2011) desenvolveu um estudo avaliando a utilização de ferramentas de simulação computacional para reconstrução de incêndios, aplicado ao caso shopping total, também na cidade de Porto Alegre-RS concluiu, desde que existam dados razoáveis com respeito à arquitetura, natureza e quantidade da carga



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

de incêndio e resposta dos materiais que compõem sua estrutura, pode ser possível o uso de simulação computacional para a reprodução de sinistros reais, além da necessidade de validar adequadamente a ferramenta para casos reais, também pontou que o efeito chaminé ocorrido durante o desenvolvimento do incêndio limitou a propagação horizontal do fogo, as simulações sugeriram que se a compartimentação vertical fossem mais eficiente, os demais andares seriam menos afetado, porém, a propagação horizontal do calor e da fumaça seria mais intensa, possivelmente colocando vidas em risco. Além dos dois autores já citados, temos a Luz (2017) que produziu um estudo sobre modelagem computacional em um galpão e identificou que a carga de incêndio interfere muito no comportamento do incêndio após variá-la por 12 vezes, pode-se dizer que o tempo estimado para a ocorrência do *flashover* esta ligado a carga de incêndio disponível. Também pode-se citar Brunetto (2015), que modelou computacionalmente o prédio novo da escola de engenharia da UFRGS, simulando três cenários variando sua ventilação. O estudo demonstrou que a falta de ventilação da biblioteca impediu a propagação do fogo, porém a fumaça foi toda deslocada para a região da escada, deste modo, não sendo segura para a evacuação do edifício. Os estudos tiveram a modelagem como ferramenta chave para suas análises, uma vez que esta permite avaliar diferentes cenários de incêndio sem a necessidade do uso de modelos em escala reduzida ou testes laboratoriais. As dificuldades encontradas no estudo estão relacionadas ao longo tempo necessário para que as modelagens sejam processadas, fazendo com que o número de variáveis e cenários testados seja limitado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo utilizou uma abordagem qualitativa para a análise do desenvolvimento de um incêndio, em um galpão determinado como objeto de pesquisa.

3.1 Materiais

O tipo de análise utilizado para os cenários de incêndio simulados foi o CFD (Computational Fluid Dynamics), pois com este, foi possível prever níveis de fumaça, de monóxido de carbono, temperatura e outras substâncias. Para tal análise, utilizou-se o software de modelagem computacional FDS (Fire Dynamics Simulator), uma ferramenta desenvolvida



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

pelo NIST (National Institute of Standards and Technology). Este modelo de simulação tem sido a melhor opção para analisar a segurança de edificações existentes ou a construir e até mesmo em situações pós sinistro, como alternativa de remontar o incêndio, auxiliando investigações (THUNDERHEAD ENGINEERING, 2015, p. 1, tradução da autora). Foi escolhido o *Pyrosim* como interface gráfica, pois, segundo BRUNETTO (2015) ele permite uma revisão imediata de todos os parâmetros inseridos, garantindo assim que estes estão no formato adequado para ser exportado para o FDS.

3.2 Métodos

Para o efetivo desenvolvimento dos objetivos específicos em um corpo consistente de análise e argumentação, adotaremos uma abordagem experimental e qualitativa como processo metodológico. A partir de dados coletados no local, referentes a dimensões das aberturas, o distanciamento entre os bicos de sprinkler e por revisão bibliográfica buscamos analisar os conceitos chave tratados neste artigo, possibilitando um aprofundamento sobre o tema pesquisado e contribuindo com novas reflexões e prismas de estudo.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 Objeto de Estudo

Utilizou-se como objeto de estudo nesta modelagem computacional, um galpão industrial pré moldado existente, com estrutura e paredes em concreto pré-fabricado e cobertura de telha metálica, conforme pode ser observado na Figura 7. Esta construção é utilizada como depósito de produtos acabados, sendo estes produtos: ferramentas motorizadas (motosserras, roçadeiras, cortadores a disco, etc), do qual utilizaremos como base, o projeto em *AutoCAD* com as disposições reais das prateleiras de estoque utilizadas.

As dimensões deste galpão são 130,6 metros de largura por 108 metros de comprimento e 12,8 metros de altura. Foram contabilizadas apenas as áreas que se enquadram como depósito, portanto, na modelagem proposta a área total considerada do galpão foi de 12.369 m², a Figura 8 mostra em magenta a área considerada na modelagem e em ciano a área administrativa excluída da análise e seu corte pode ser encontrado na Figura 9.



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

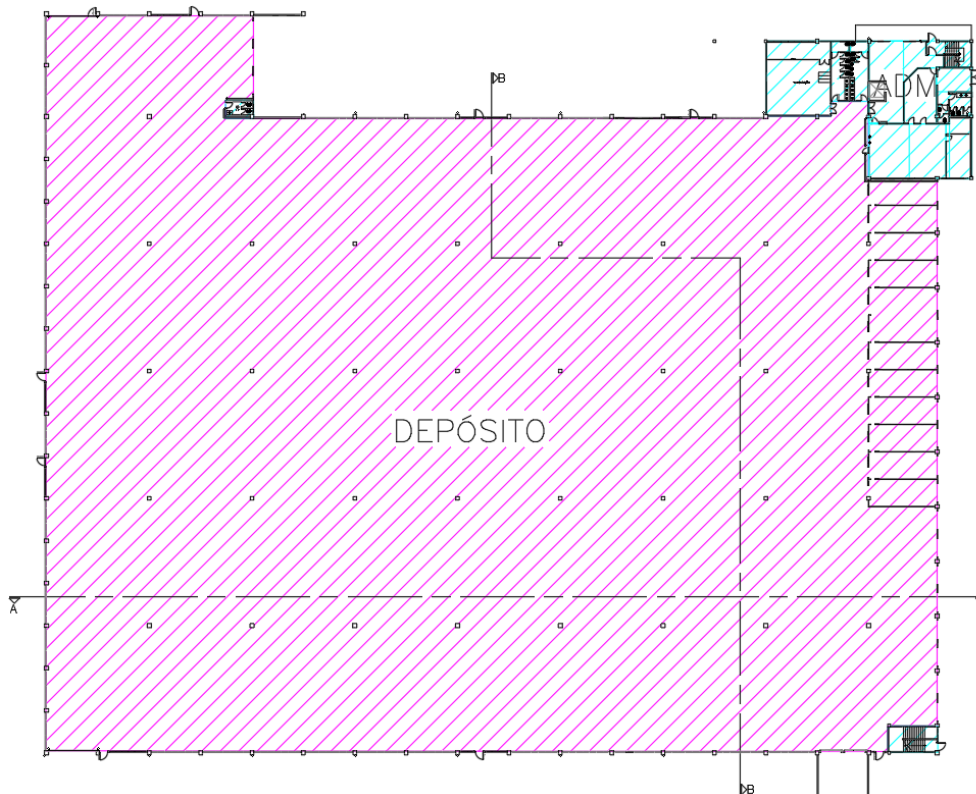
www.ufrgs.br/esci
(2020)

Figura 7: Imagem Superior do Depósito



(Fonte: GCP Arquitetura e Urbanismo)

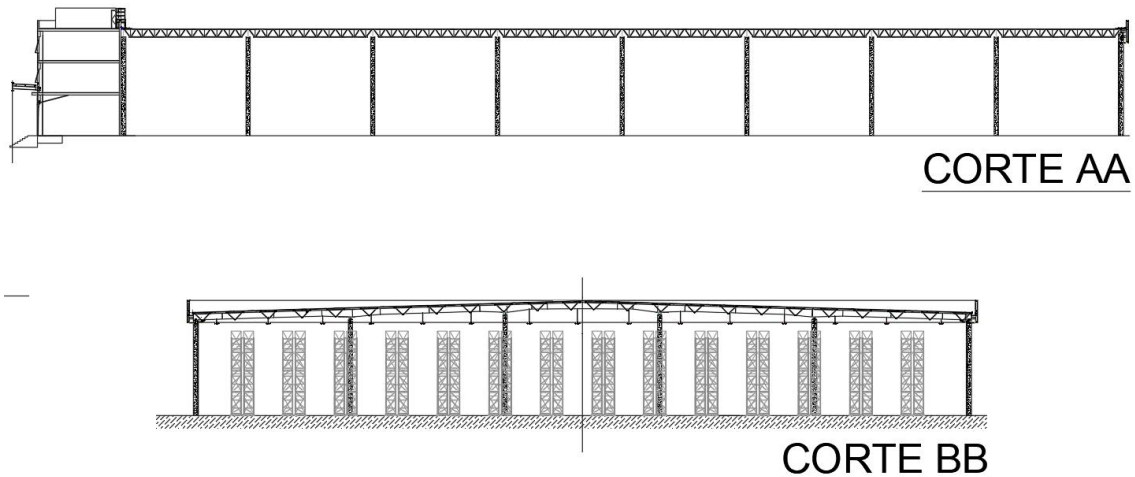
Figura 8: Planta Baixa do Depósito



(Fonte: Elaborado pela autora)



Figura 9: Cortes do Galpão com Layout de Prateleiras



(Fonte: Elaborado pela autora)

4.2 Carga de Incêndio

Considerando a totalidade dos materiais necessários para o produto acabado estar em estoque, teremos presente em cada caixa do galpão uma grande quantidade de metais, provenientes de motores, serras e correias. Além disso, existe uma pequena quantidade de plástico utilizado para o acabamento e segurança das ferramentas e ainda, em menor quantidade, o papelão da embalagem do produto, estes são alocados em paletes de madeira com dimensões máximas de 1,20 metros por 2,20 metros, armazenados em estantes metálicas com 4 prateleiras, com dimensões máximas de 1,20 metros de largura e 57 metros de comprimento. Apesar da maior parte do volume estocado ser de materiais metálicos, os quais possuem uma baixa carga de incêndio, o depósito conta com 6 empilhadeiras movidas a combustível o que aumenta o risco atribuído ao local, deste modo consideraremos o galpão como sendo de risco médio. As Figuras 10 e 11 ilustram a carga de incêndio do depósito e seu layout de armazenagem.



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

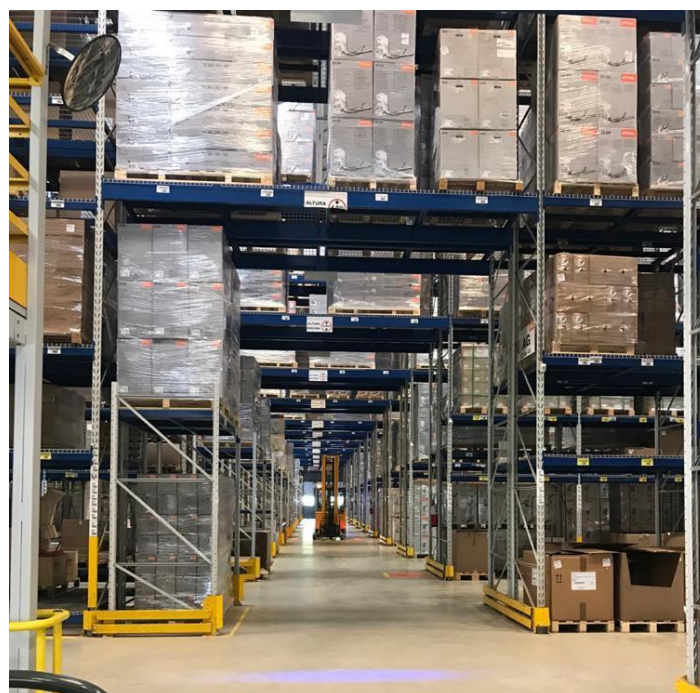
www.ufrgs.br/esci
(2020)

Figura 10: Carga de Incêndio e Layout de Armazenagem 1



(Fonte: Acervo Pessoal)

Figura 11: Carga de Incêndio e Layout de Armazenagem 2



(Fonte: Acervo Pessoal)



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

4.3 Grau de Ventilação – Aberturas

Tratando-se de uma edificação existente, suas características construtivas serão mantidas neste estudo. Desta forma, podemos verificar que o galpão conta com 9 portas com vão livre de 1,10 metros e altura de 2,20, todas possuindo barra antipânico e permitindo acesso a uma área segura a céu aberto. Existem ainda 24 janelas de modelo basculante, de 5,6 metros de largura por 0,94 metro de altura, além de outras 2 portas rápidas de lona, com dimensões de 6 metros de largura por 3 metros de altura, 21 aberturas, denominadas como docas, com dimensões de 2,70 metros de largura por 3 metros de altura, que possibilitam o abastecimento de caminhões com os produtos e por fim, uma abertura permanente de acesso a empilhadeiras que facilitam a logística do galpão, de 6,80 metros de largura por 3 metros de altura. Abaixo a Figura 12 ilustra o modelo de aberturas existente no galpão.

Figura 12: Modelo de Aberturas do Depósito



(Fonte: Acervo Pessoal)

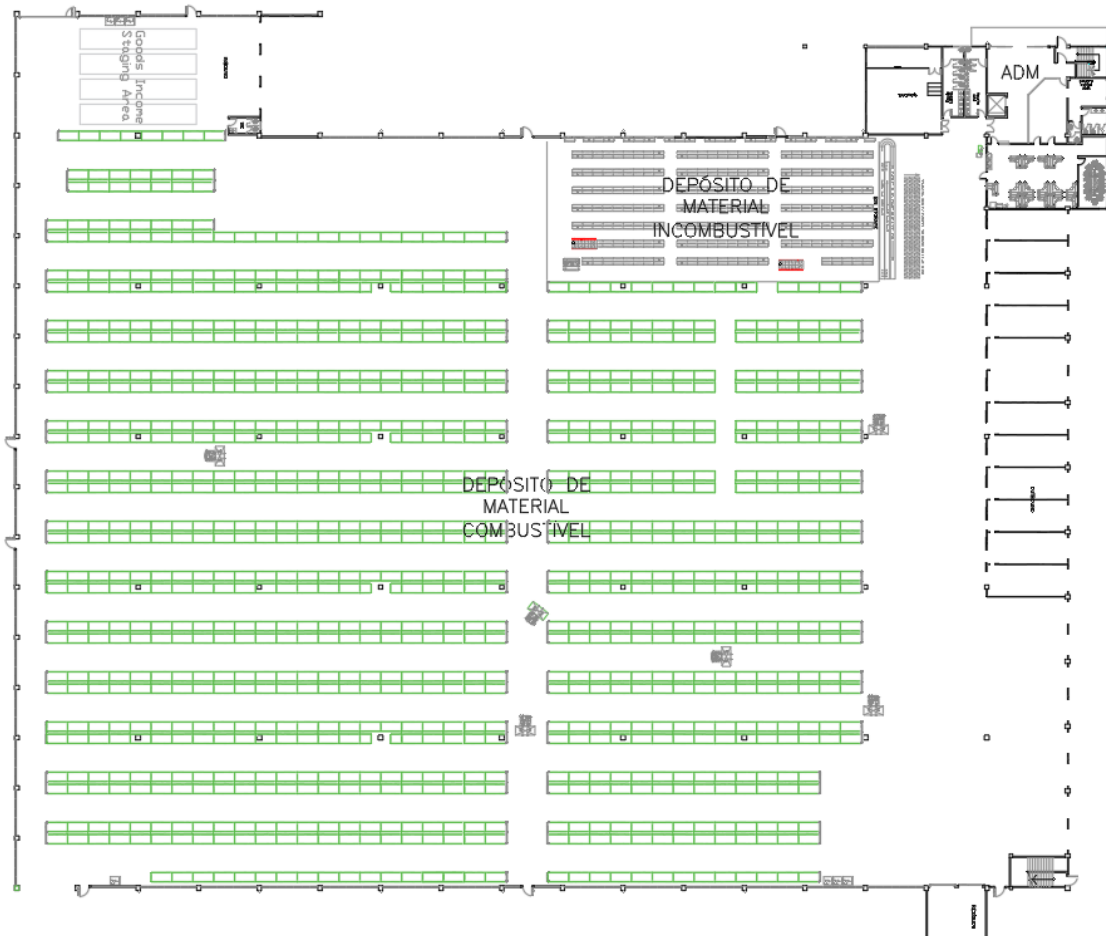
4.4 Layout de Armazenamento

O depósito é composto por prateleiras metálicas para paletes, de fileira dupla, os produtos são armazenados em estantes metálicas com 4 prateleiras, com dimensões máximas de 1,20 metros de largura e 57 metros de comprimento e sua altura máxima de empilhamento é de 10



metros. As prateleiras de armazenamento possuem capacidade para um total de 3.736 paletes e estão dispostas em 15 colunas e duas fileiras, de tamanhos variados, conforme Figura 13.

Figura 13: Layout de Armazenamento



(Fonte: Elaborado pela autora)

4.5 Parâmetros da Modelagem

Com o objetivo de obter com esta simulação, dados condizentes com a realidade, faz-se necessária a inserção de dados referentes a propriedade dos materiais presentes na edificação e parâmetros da fonte de ignição, da malha da simulação e das ferramentas selecionadas para a coleta dos dados resultantes da simulação.

Para tal, definiu-se como variáveis a serem analisadas neste estudo, o grau de ventilação através das aberturas e o acionamento da rede de sprinklers. Além disso, utilizou-se como constante o tempo da simulação e também o fator ígneo que resultou no início do incêndio,



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

dado através de uma falha no sistema de injeção de uma das empilhadeiras. Assim resultando nos 2 possíveis cenários de incêndio a seguir:

Caso 1: Incêndio iniciado por falha no sistema de injeção de uma empilhadeira, no centro do depósito, com todas as aberturas fechadas, durante 150 segundos.

Caso 2: Incêndio iniciado por falha no sistema de injeção de uma empilhadeira, no centro do depósito, com todas as aberturas abertas, durante 150 segundos.

4.5.1 Propriedade dos Materiais

Conforme citado anteriormente, os materiais disponíveis no depósito são, metais, plásticos, papeis e a madeira dos paletes, estes são também combustíveis para alimentar e propagar o fogo em uma situação de incêndio, além disso, a temperatura de ignição do papel foi definida em 200°C.

As propriedades dos materiais foram definidas a partir de dados do *Pyrosim* e portanto relativos a padrões estrangeiros. Abaixo, na Figura 14, estão as configurações definidas do *Pyrosim* para estes materiais:

Figura 14: Propriedades dos Materiais Combustíveis Definidos no *Pyrosim*

| | |
|---|--|
| Material ID: STEEL | Material ID: PAPELÃO |
| Description: Drysdale, Intro to Fire Dynamics - ATF | Description: |
| Material Type: Solid | Material Type: Solid |
| Thermal Properties Pyrolysis Advanced | Thermal Properties Pyrolysis Advanced |
| Density: 7850,0 kg/m ³ | Density: 750,0 kg/m ³ |
| Specific Heat: Constant 0,46 kJ/(kg·K) | Specific Heat: Constant 1,336 kJ/(kg·K) |
| Conductivity: Constant 45,8 W/(m·K) | Conductivity: Constant 0,1 W/(m·K) |
| Emissivity: 0,95 | Emissivity: 0,9 |
| Absorption Coefficient: 5,0E4 1/m | Absorption Coefficient: 5,0E4 1/m |
| Material ID: YELLOW PINE | Material ID: PLASTICO |
| Description: Quintiere, Fire Behavior - NIST NRC Vali | Description: |
| Material Type: Solid | Material Type: Solid |
| Thermal Properties Pyrolysis Advanced | Thermal Properties Pyrolysis Advanced |
| Density: 640,0 kg/m ³ | Density: 1190,0 kg/m ³ |
| Specific Heat: Constant 2,85 kJ/(kg·K) | Specific Heat: Constant 3,1E-5 kJ/(kg·K) |
| Conductivity: Constant 0,14 W/(m·K) | Conductivity: Constant 0,17 W/(m·K) |
| Emissivity: 0,9 | Emissivity: 0,84 |
| Absorption Coefficient: 5,0E4 1/m | Absorption Coefficient: 5,0E4 1/m |

(Fonte: Elaborado pela autora)



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

4.5.2 Malha da Simulação

A malha da simulação definirá o quão precisos serão os resultados obtidos, uma vez que quanto menor a malha, mais preciso será o resultado obtido com a simulação. Porém, quanto menor a malha definida, maior será a demanda por processamento computacional. Não foi possível despendar o tempo necessário para analisar a sensibilidade da malha de cálculo, deste modo foi escolhida uma malha que pudesse ser processada pelo computador disponível para o estudo em um tempo máximo de até 36 horas e também pelos apontamentos trazidos por Luz (2017) evidenciando que a malha de 0,50 m possui uma adequação satisfatória entre a relação de precisão dos resultados e o tempo necessário para o processamento do modelo, assim, a malha definida foi de 0,50x0,50x0,50 m, resultando em um número total de células na malha, de 20.591.904.

4.5.3 Fonte de Ignição

A fonte de ignição foi definida conforme os riscos associados à dinâmica de trabalho do depósito, que devido a alta circulação de empilhadeiras no local, faz com que estas sejam um possível fator de desencadeamento de um incêndio. Portanto, determinou-se que a fonte inicial de calor em todas as simulações foi gerada por uma falha no sistema de injeção de uma empilhadeira movida à combustível e localizada no centro do depósito.

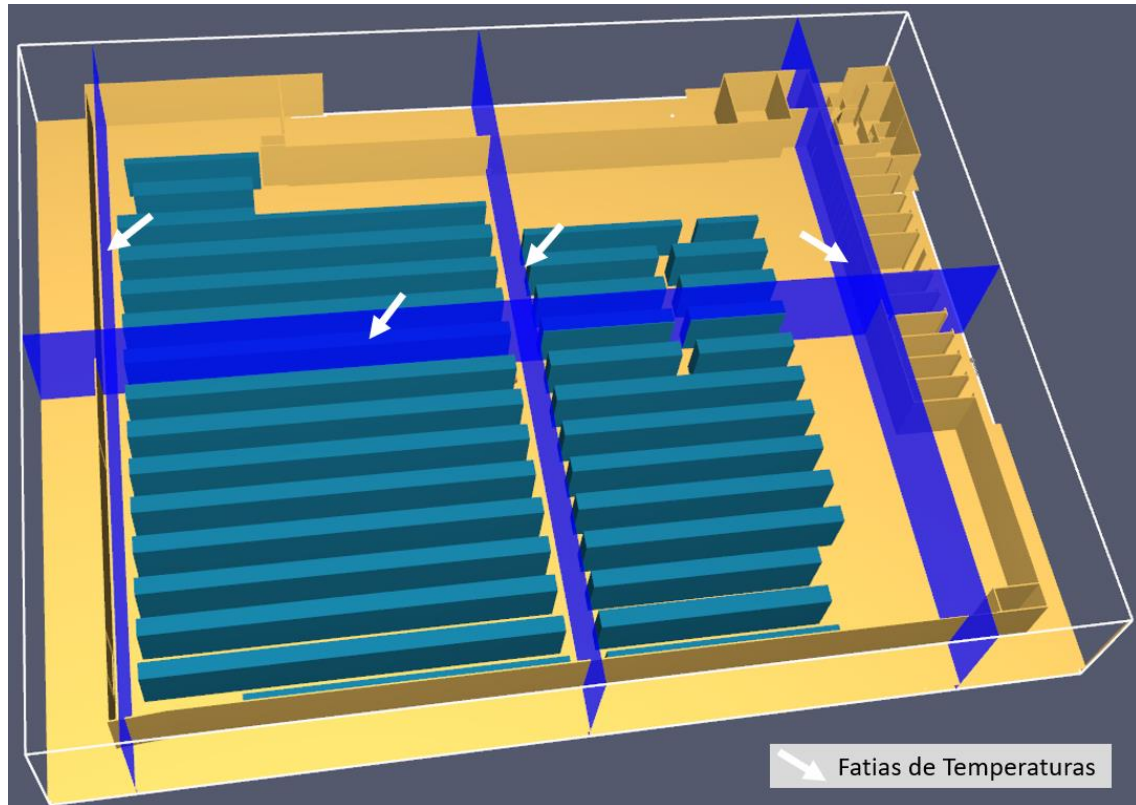
4.5.4 Dados Coletados

Escolheu-se coletar dados referentes a temperatura, a quantidade de monóxido de carbono e os níveis máximos de fumaça que serão alcançados durante o período simulado.

Para a temperatura foi utilizada a ferramenta fatia de temperaturas, conforme Figura 15, que mostra o desenvolvimento da temperatura e a dissipação do calor no ambiente foi posicionada em dois eixos centrais do galpão e em duas rotas de fuga, para que o desenvolvimento do incêndio pudesse ser acompanhado de maneira mais visual, através dos níveis de temperatura demonstrados por esse recurso.



Figura 15: Posição das Fatias de Temperatura para Análise da Região



(Fonte: Elaborado pela autora)

5 RESULTADOS

Após simuladas as duas modelagens propostas neste estudo, foram feitas análises visuais e qualitativas dos resultados obtidos através do *Pyrosim*, durante 150 segundos de incêndio, período que foi definido devido a grande complexidade envolvida em modelar um depósito de 12.369 m² e o tempo disponível para o desenvolvimento deste estudo.

Estas simulações tiveram sua liberação inicial de calor através da ignição do combustível de uma empilhadeira localizada na região central do depósito, e por isso definiu-se que o queimador seria um cubo de dimensões 0,90x0,50x0,90cm alocado no nível do piso com liberação de calor de 12000 kW/m². Como resultado, o fogo alastrou-se pelas prateleiras mais próximas já nos segundos iniciais, este ocorrido pode estar relacionado ao alto poder calorífico do combustível, capaz de alcançar rapidamente, por exemplo a temperatura de ignição do papel, estabelecida em 200°C, de acordo com National Bureau Of Standards (2003). A Figura 16 mostra os níveis de fumaça e a temperatura máxima alcançada durante

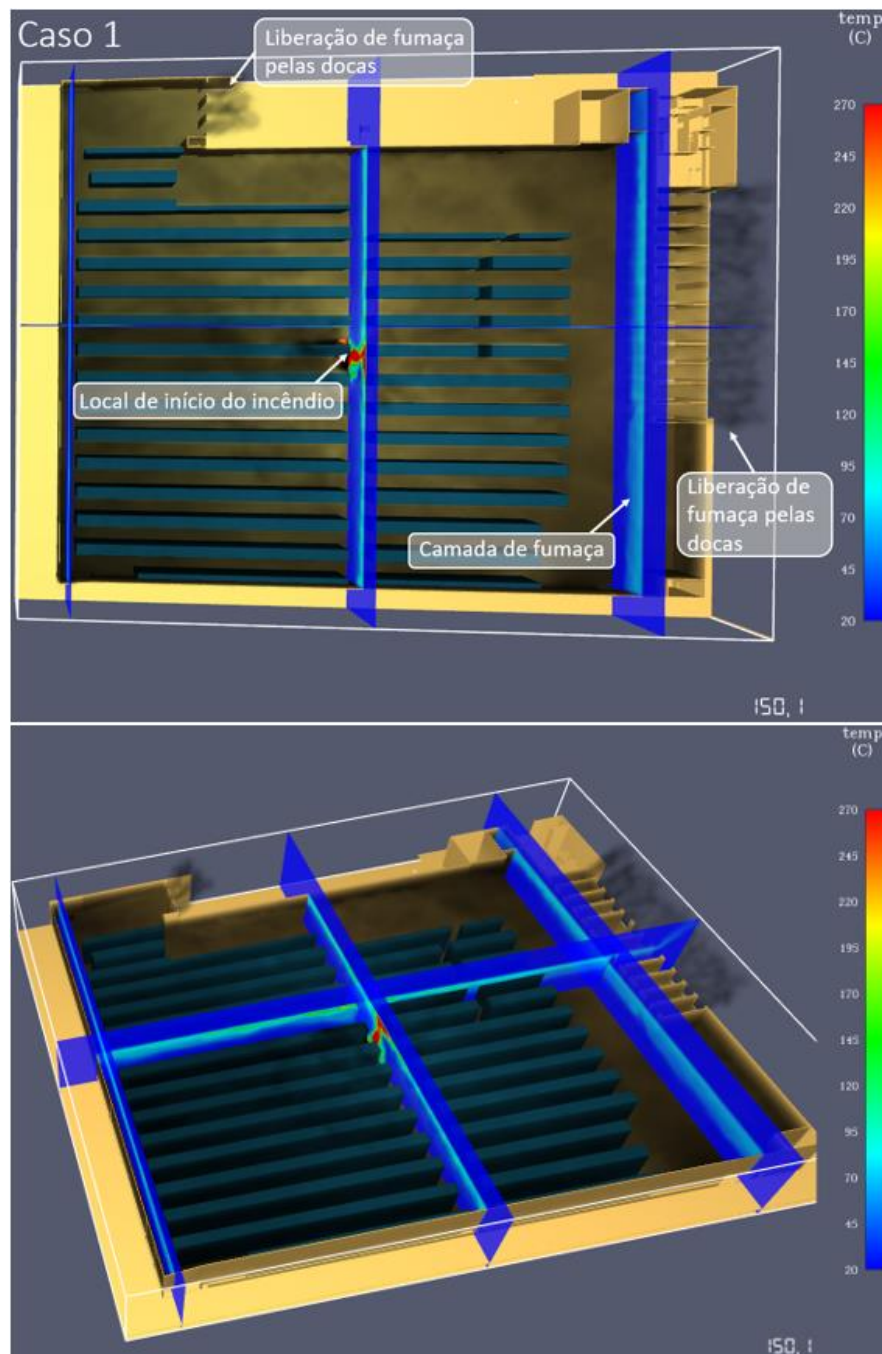


Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

os 150 segundos de ensaio para o Caso 01, que considera todas as aberturas do galpão, já a Figura 17 mostra os níveis de fumaça e a temperatura máxima alcançada durante os 150 segundos de ensaio para o Caso 02, que considera o galpão sem aberturas.

Figura 16: Propagação do Fogo em Função do Tempo no Caso 1



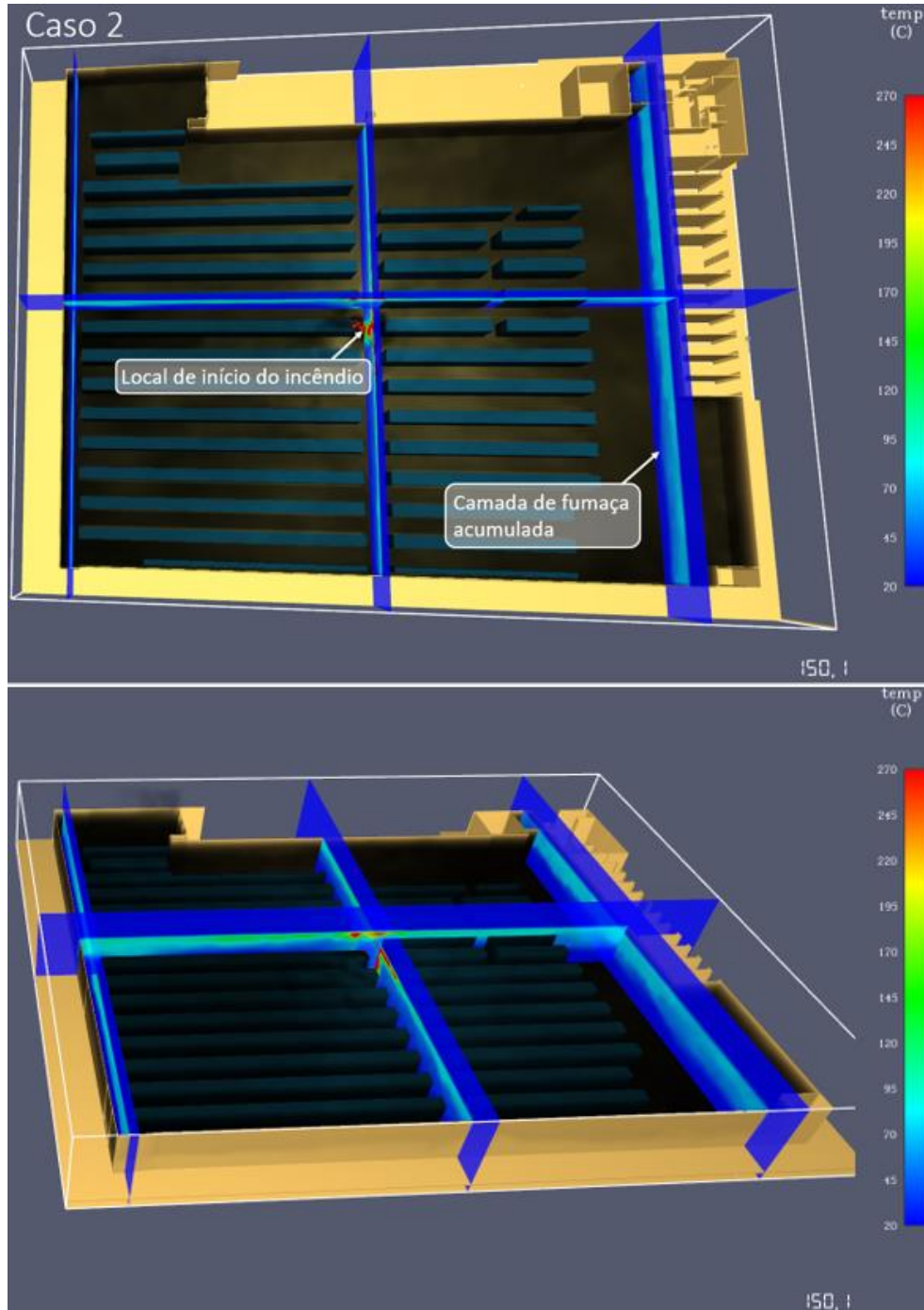
(Fonte: Elaborado pela autora)



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

Figura 17: Propagação do Fogo em Função do Tempo no Caso 2



(Fonte: Elaborado pela autora)

Conforme mostram as figuras 16 e 17, uma grande quantidade de fumaça pode ser percebida se acumulando junto à cobertura do depósito e nos segundos posteriores, encaminhando-se

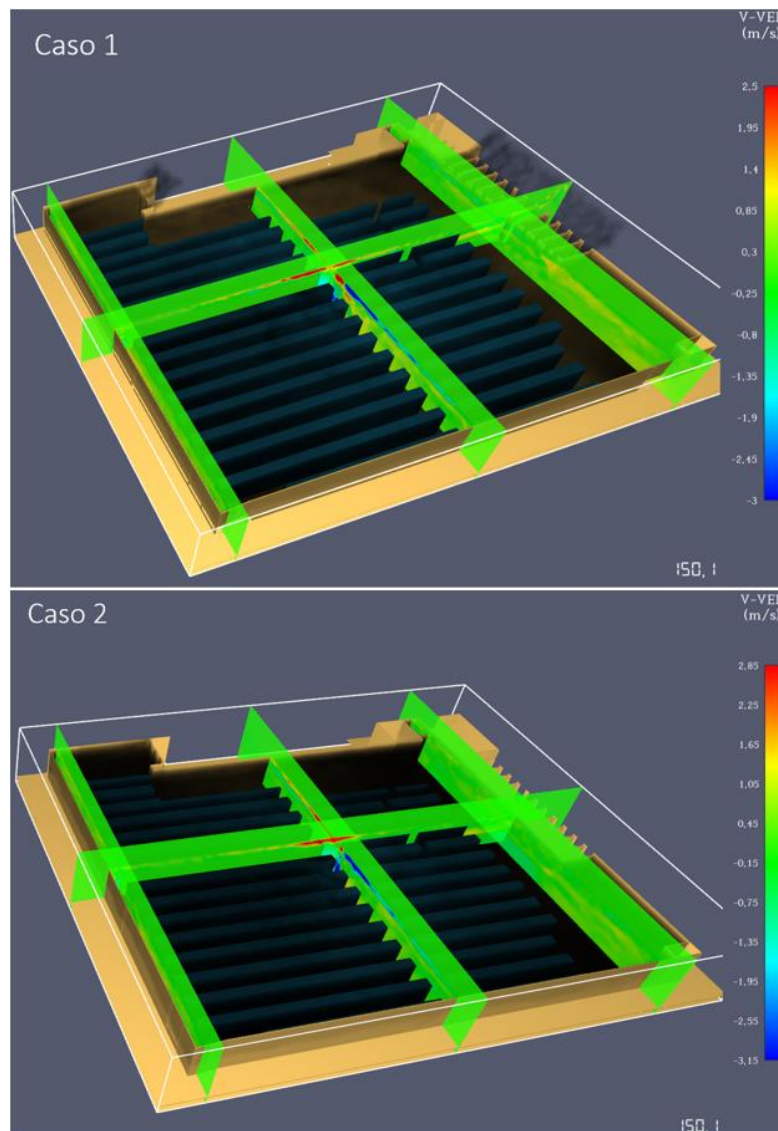


Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

para regiões mais baixas, devido as correntes de ar existentes no Caso 01, em alguns pontos atingindo rotas de fuga, o que poderá causar uma diminuição da visibilidade local, dificultando a evacuação da ocupação. No Caso 02, mesmo que parecida com o Caso 01, pode-se notar que a fumaça, após preencher a cobertura, chegou a níveis mais baixos, devido à falta de aberturas, o que diminui ainda mais a visibilidade dentro da edificação. A diferença na movimentação da fumaça pode ser vista na Figura 18 e o impacto gerado pela corrente de ar que circula dentro do depósito pode ser analisado através da velocidade de movimentação do ar, que pode ser vista na Figura 19.

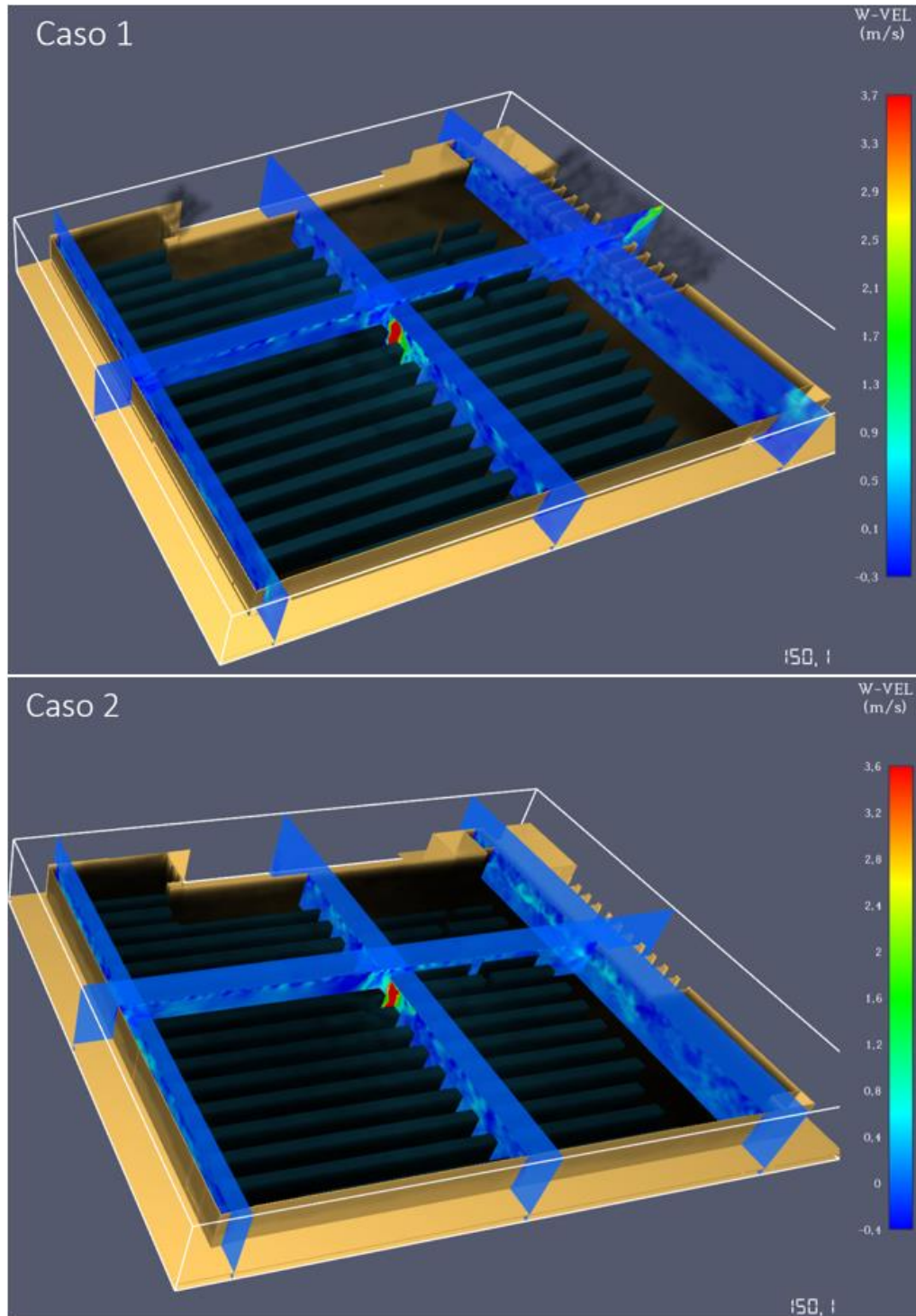
Figura 18: Fluxo de Fumaça em Cada Caso



(Fonte: Elaborado pela autora)



Figura 19: Velocidade do Ar em Cada Caso



(Fonte: Elaborado pela autora)



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

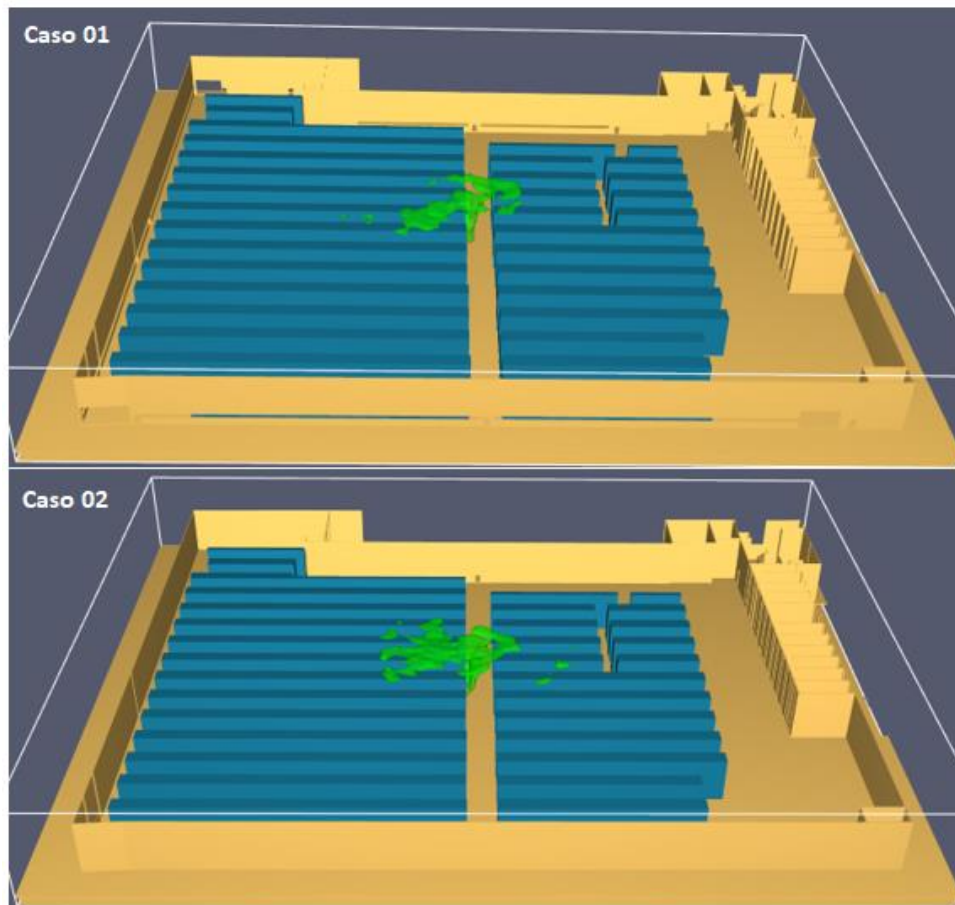
www.ufrgs.br/esci
(2020)

As fatias de temperatura registraram curvas de temperatura em 4 regiões do galpão, as fatias que cortaram o eixo central, local no ponto de início do incêndio, registraram as maiores temperaturas, as aberturas permanentes, denominadas docas tiveram um papel importante na dispersão da fumaça, contribuindo para que a rota de fuga não fosse tão afetada. Nestes 150 segundos iniciais, os níveis de monóxido de carbono não atingiram $2,97 \text{ kg/m}^3$, valor mínimo considerado na escala pelo *Pyrosim* para iniciar o registro da presença deste gás. Portanto, não foram suficientes para gerar danos aos ocupantes do depósito, entretanto, vale ressaltar que devido à rápida propagação do fogo e à existência de mais combustível no local, o acúmulo deste gás pode aumentar e passar a ser prejudicial para os ocupantes.

A propagação do calor pelo depósito foi maior no Caso 02, como pode ser visto na Figura 20, sem as aberturas e portanto sem fluxo de ar pelo galpão, o fogo se alastrou com mais facilidade pelas prateleiras devido a grande oferta de oxigênio disponível em depósitos de grandes dimensões. A exclusão das aberturas não fez com que o oxigênio fosse rapidamente consumido, ocasionando na extinção do incêndio, como ocorreria em compartimentos menores, por exemplo, em edifícios residências pois a quantidade de oxigênio presente no espaço foi grande o suficiente para alimentar o fogo e aumentar sua propagação durante os 150 segundos ensaiados.



Figura 20: Propagação do Calor em Cada Caso



(Fonte: Elaborado pela autora)

As análises desenvolvidas com base nestas simulações sugerem que um sistema de supressão de incêndio, como por exemplo *Sprinklers*, poderia evitar a rápida propagação, causada por sua origem ígnea altamente inflamável e evidenciada na simulação.

Um modelo de simulação que considerasse a existência dos *Sprinklers* foi testado, porém, devido ao tempo necessário de 164 horas para processar os 150 segundos de incêndio em estudo, fica inviabilizado seu processamento completo para este estudo. Deste modo, foram processados os 11,4 segundos iniciais desta simulação.

Os *Sprinklers* foram modelados para iniciar o fluxo de água a partir dos 74°C, a temperatura máxima alcançada no período simulado foi de 84°C, deste modo, houve a abertura pontual dos *Sprinklers* da região, o que possibilitou a comparação do comportamento do fogo e da fumaça entre as simulações. Mesmo em poucos segundos de ação do fogo, o sistema de *Sprinklers* auxiliou na compartimentação do incêndio, evitando que este tomasse maiores

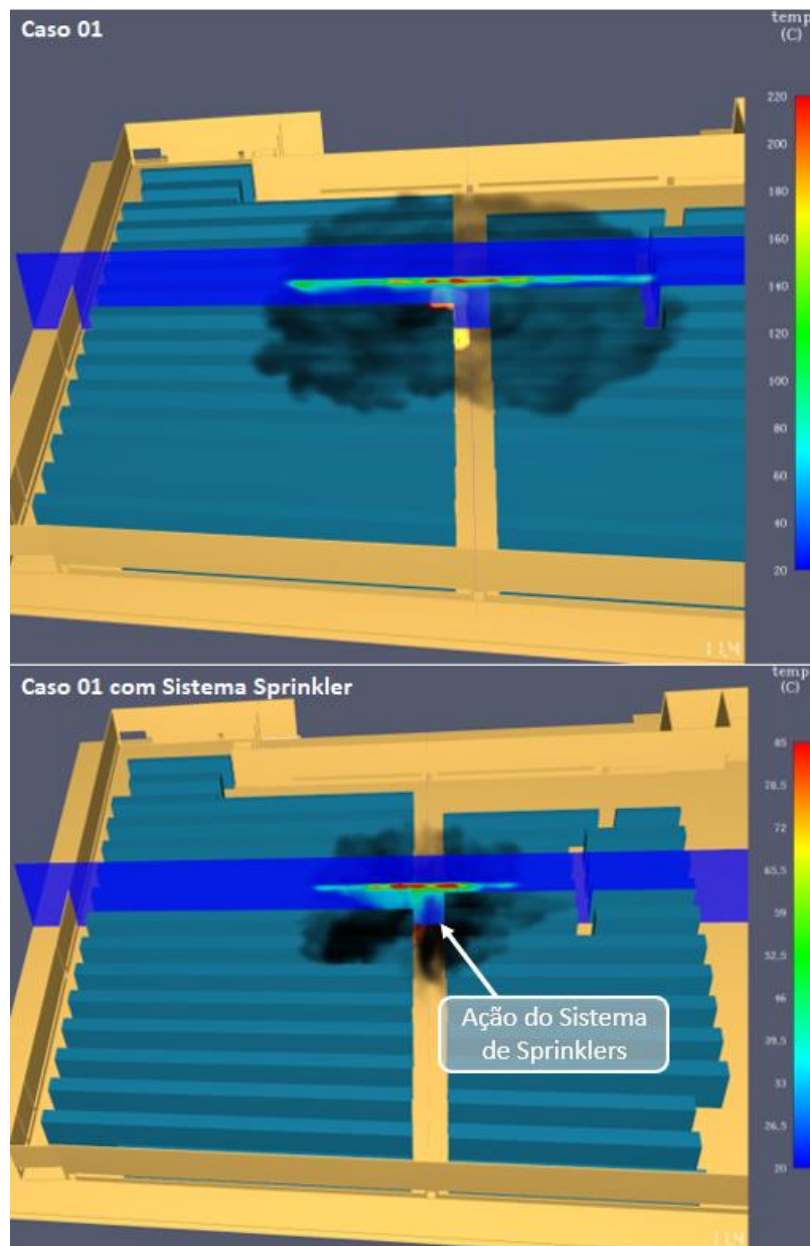


Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

proporções, bem como diminuiu significativamente a quantidade de fumaça que se espalhou pelo ambiente, se comparado ao Caso 01. A Figura 21 abaixo compara o Caso 01 com a simulação que considerou o sistema de supressão.

Figura 21: Comparação entre o Caso 01 e a Simulação com *Sprinklers* para 11,4 segundos



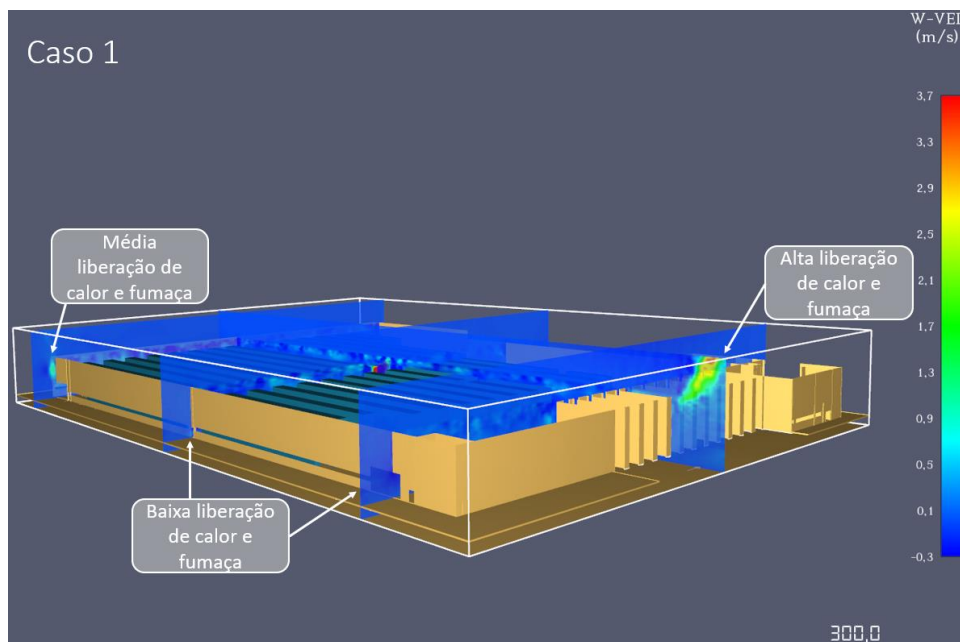
(Fonte: Elaborado pela autora)

Notou-se que durante o período simulado, os níveis de fumaça não tiveram impacto significativo nas rotas de fuga, possibilitando a evacuação segura da edificação, por pelo



menos 300 segundos após o início do incêndio, considerando todas as aberturas, conforme Figura 22 abaixo.

Figura 22: Fumaça nas Saídas



(Fonte: Elaborado pela autora)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se, portanto, que nos casos analisados a existência de uma grande quantidade de metal na carga de incêndio do depósito dificultou a propagação do incêndio durante os segundos ensaiados. Além disso, o pé direito elevado da edificação permitiu que a fumaça se acumulasse na cobertura por tempo suficiente para possibilitar a evacuação dos ocupantes do depósito e permitir o acionamento da rede de *Sprinklers* ainda nos segundos iniciais do incêndio.

As principais saídas do galpão não registraram níveis significativos de monóxido de carbono durante os 150 segundos ensaiados, diminuindo assim os riscos associados à inalação deste gás. As aberturas permanentes, denominadas docas, foram eficientes para a dispersão da fumaça devido ao fluxo de ar constante que passava por elas, expulsando o ar quente. A quantidade de oxigênio no compartimento foi suficiente para manter a reação em cadeia do fogo, assim a modelagem que desconsiderou as aberturas, Caso 2, teve uma propagação de calor maior do que o Caso 1, devido as grandes dimensões do depósito a exclusão das



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

aberturas não obteve impactos no desenvolvimento do incêndio durante os 150 segundos ensaiados.

É relevante ressaltar que os materiais utilizados no estudo possuem parâmetros estrangeiros, portanto, pode existir uma diferença no comportamento dos materiais em situação de incêndio, quando comparados aos materiais utilizados no Brasil. Deste modo, vale salientar a importância em avançar nos estudos brasileiros que visem gerar um banco de dados referente às características e comportamentos dos materiais mais utilizados no país.

Sugere-se para trabalhos futuros a análise mais aprofundada sobre o impacto do layout e altura de armazenagem, também estudos sobre sistemas construtivos e materiais que otimizem as medidas de proteção passivas de segurança contra incêndio, diferentes disposições de ventilação, que possam otimizar a extração da fumaça, além de simulações mais longas, que permitam a análise de um cenário de incêndio mais longo, em edificações utilizadas para fins de armazenamento.



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

REFERÊNCIAS

NEGRISOLO, Walter et al. **Fundamentos da segurança contra incêndio em edificações: Proteção passiva e ativa**. 1 ed. São Paulo: FUNDABOM; FIREK Educação, 2019.

LUZ, Vanessa Hernandes da. **Simulação computacional de incêndio em um depósito: análise das principais variáveis que influenciam no comportamento do incêndio**. 2017. 87 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

FLORES, Marcelo Costa. **Investigação experimental das propriedades termofísicas e da convecção forçada de nanofluido de grafeno**. 2016. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2016.

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

THUNDERHEAD ENGINEERING. **Pyrosim User Manual**. 2015. Disponível em: <<http://www.thunderheadeng.net/pyrosim/docs/PyroSimManual.pdf>>

BRUNETTO, Leonardo de Oliveira. **Simulação computacional de incêndios: uma aplicação no prédio da escola de engenharia nova da UFRGS**. 2015. 105 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MELÃO, Arthur Ribeiro; SILVA, Valdir Pignatta. **Equivalência entre incêndio-padrão e curvas paramétricas aplicadas a estruturas de aço**. In: CONSTRUMETAL, 6., 2014, São Paulo. Artigo, 2014. p. 1-21.

CAMILLO JÚNIOR, Abel Batista. **Manual de Prevenção E Combate a Incendios**. 15. ed. São Paulo: Senac, 2013.



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

SILVA, Valdir Pignatta e. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: conforme ABNT NBR 15200:2012**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2012.

BELTRAMI, Monica; STUMM, Silvana Bastos. **Controle de Riscos e Sinistros**. Curitiba: Projeto Gráfico, 2012.

RUSCHEL, Fernanda. **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. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MAZZONI, Felipe. **Simulação computacional de incêndios: Aplicação no caso do condomínio edifício Cacique em Porto Alegre-RS**. 2010. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SEITO, Alexandre Itiu *et al.* **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Editora Projeto, 2008.

CUOGHI, Ricardo de Scarabello. **Aspectos de análise de risco das estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2006. 247 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

APÊNDICE – FLUXOGRAMA DE METODOLOGIA DE PESQUISA

