



## ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DE UM COMPARTIMENTO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

### Theoretical and experimental study of the behavior of a compartment in fire situation

Kamyla Lima da Mata (1); Francisco Carlos Rodrigues (2); Rodrigo Barreto Caldas (3);  
Janaína Costa Rezende (4)

- (1) Arquiteta e Urbanista, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.
- (2) Dr. Prof., Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.
- (3) Dr. Prof., Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.
- (4) Arquiteta e Urbanista, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil.

Email para Correspondência: [kamylalima.arq@gmail.com](mailto:kamylalima.arq@gmail.com); (P) Kamyla Lima da Mata

**Resumo:** Os incêndios são ocorrências em que o fogo se apresenta fora de controle. Esses fenômenos oferecem grande risco à vida, e são, em grande parte dos casos, responsáveis por inúmeras perdas patrimoniais, uma vez que o fogo em grandes proporções pode levar uma estrutura à ruína. Este fato impossibilitaria a fuga de seus usuários e prejudicaria a aproximação e o acesso de meios de combate ao fogo. Portanto, é fundamental que se compreenda o comportamento de um incêndio, bem como dos compartimentos perante essa situação, para que os elementos arquitetônicos e estruturais sejam dimensionados e as edificações estejam aptas a resistir ao calor, pelo menos o tempo suficiente para evitar seu colapso antes de sua completa desocupação. O objetivo deste trabalho é a análise (de modo teórico e experimental) do comportamento de um compartimento – tipo container, simulador de uma real situação de incêndio, utilizado pelo Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais durante os treinamentos. A partir dos resultados, desenvolver-se-á um modelo computacional calibrado que fornecerá subsídios e fomentará eventuais pesquisas e experimentos futuros sobre o comportamento de estruturas e materiais construtivos em altas temperaturas. Tendo em vista que a determinação dos reais valores e comportamento da temperatura - dentro desse compartimento sinistrado – transformá-lo-á em um forno adaptado para ensaios controlados.

*Palavras-chave: Temperatura. Incêndio. Segurança Contra Incêndio. Incêndio em Compartimento.*

**Abstract:** The fires are occurrences where the fire is out of control. These phenomena offer great risk to life, and are, in most cases, responsible for numerous property losses, since fire in large proportions can take a structure to ruin. This fact would make it impossible to escape from their users and would undermine the approach and the access of firefighting resources. Therefore, it is essential to understand the behavior of a fire, as well as the compartments in this situation, for the architectural and structural elements are sized and the buildings are able to withstand the heat, at least long enough to prevent their collapse before of their complete unemployment. The main objective of this work is the analysis (theoretical and experimental) of the behavior of a compartment - container type,



simulator a real fire situation, used by the Minas Gerais Military Fire Department during training. From the results, a calibrated computational model will be developed that will provide subsidies and encourage future research and experiments on the behavior of structures and building materials at high temperatures. Considering that the determination of the real values and temperature behavior - inside this sinister compartment - will transform it into a furnace adapted for controlled trials.

**Keywords: Temperature. Fire. Fire Safety. Fire in compartment.**

## 1 INTRODUÇÃO

Incêndio é definido como rápido processo de combustão dispersado descontroladamente pelo tempo e espaço, de acordo com a normatização internacional, ISO 8.421-1 “*General terms and phenomena of fire*” (2000). Esses fenômenos oferecem grande risco à vida, e são, em grande parte dos casos, responsáveis por inúmeras perdas patrimoniais, uma vez que o fogo em grandes proporções pode levar a estrutura de uma edificação ao colapso parcial ou total, o que impossibilitaria a fuga de seus usuários ou prejudicaria a aproximação e o acesso de meios de combate ao fogo. Portanto, é fundamental que se compreenda a dinâmica e o comportamento de um incêndio, bem como dos compartimentos perante essa situação, para que os elementos arquitetônicos e estruturais sejam dimensionados e as edificações estejam aptas a resistir ao calor, pelo menos até sua completa desocupação.

No Brasil, a busca pela melhora na qualidade de instalações, equipamentos, procedimentos e criação de programas de orientação aos fabricantes e usuários das edificações clama por pesquisas sobre causas e efeitos de incêndios, uma vez que são uma fonte importante de dados. No entanto, as pesquisas sobre sistemas estruturais e materiais construtivos em situações de incêndio ainda são pouco difundidas, visto que são poucos os laboratórios experimentais apropriados e que conseguem simular um real incêndio, dado o oneroso custo dos fornos de simulação.

Diante da importância do estudo sobre efeitos de conflagrações em compartimentos, principalmente no que concerne aos aspectos estruturais, o principal objetivo deste trabalho é a análise (de modo teórico e experimental) do comportamento de um compartimento – tipo container marítimo – high cube, com aproximadamente 28,3m<sup>2</sup> de área interna, utilizado como simulador de uma real situação de incêndio pelo Corpo de Bombeiro Militar de Minas Gerais (CBMMG) durante os treinamentos. Por intermédio dos resultados, desenvolver-se-á um modelo computacional calibrado, através dos *softwares Fire Dynamics Simulator – FDS versão 6.4.0* (MCGRATTAN *et al.*, 2015) e *PyroSim* (Thunderhead Engineering, 2016), versão 2016.2.0922, que fornecerá subsídios e fomentará eventuais pesquisas e experimentos futuros sobre o comportamento de estruturas e materiais construtivos em altas temperaturas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Treinamento em Containers

O Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG) tem utilizado durante o treinamento para instrução e observação dos efeitos do fogo, um container marítimo – tipo high cube com dimensões de 40'x8'x9'6", ou seja, 12,032m de comprimento, 2,352m de largura, totalizando 28,299m<sup>2</sup> de área interna, com 2,698 metros de altura.

Este simulador é modular e permite reproduzir mais de um compartimento, como uma sala ou um quarto. Dado quando há esta exceção, os containers passam por poucas alterações antes de abrigar os treinamentos. No container utilizado pelo CBMMG, foram previstas duas portas laterais de acesso com dimensões 0,80m x 2,10m, além da abertura frontal que foi remodelada e dividida em quatro portas iguais de 1,17m x 1,29m (ver Figuras 1a, 1b).

Outra adaptação é uma viga de 0,195m x 2,252m x 0,0026m, a aproximadamente 8,85m de distância da abertura frontal, e o piso do local de queima revestido por 180 tijolos refratários. O restante do compartimento é mantido intacto, inclusive o piso de madeira, que é o mesmo utilizado para o transporte de cargas nos navios. No mais, o compartimento é dotado de características físicas que influenciam no incêndio, como: ventilação, quantidade e disposição de cargas de incêndio.



Figura 1: Container utilizado para treinamento do CBMMG.

O estado de Minas Gerais é o terceiro a adotar este tipo de equipamento para treinamentos no Brasil, seguindo o estado do Espírito Santo e o Distrito Federal. O treinamento foi desenvolvido na Suécia, e o modelo adotado no Brasil é mais similar ao europeu do que ao treinamento americano. Segundo o CBMMG (2015), durante o treinamento de aproximadamente 25 minutos, os participantes são confrontados com visibilidade restrita, devido à saturação de fumaça, calor extremo, vapor d'água e chamas reais, o que propicia um treinamento mais realista para uma melhor atuação nas ocorrências. Uma simulação real tem por intuito capacitar os bombeiros no combate ofensivo e atender às novas premissas de

melhoria das táticas de combate que, atualmente, pregam por economia de esforços militares, otimização técnica e economia de água, como mostrado nas Figuras 2a, 2b, 2c, abaixo.



Figura 2: Atuação do CBMMG durante treinamento em container.

Para o treinamento, é realizada uma queima controlada dentro do container. O padrão estabelecido para carga de incêndio pelo CBMMG, determina a adesão de 7 folhas de madeirites de 10mm. No entanto, este material tem custo oneroso e em geral, é substituído pela utilização de 12 *palets*, preferencialmente constituídos de madeira mais leve. Um produto composto por Propano 6%, Nor-Butano 60% e Iso-Butano 34% é usado para ignição do foco inicial, comumente constituídos por 1 ½ ou 2 *palets* desmontados.

Uma câmera térmica já foi utilizada externamente durante uma simulação pelo CBMMG, e estimou-se que é possível chegar a temperaturas de até 1000°C no teto, sendo diminuída a 300°C a temperatura (a cada um metro), e, de fato, podem-se testar as funções dos equipamentos de proteção individual, além do aparelho de respiração autônomo. Durante as instruções, são apresentadas técnicas de atuação em casos de *flashover* e *backdraft* (caracterizado pela explosão provocada pela diminuição de oxigênio e altas concentrações de gases inflamáveis).

## 2.2 CBMGO (2015)

A norma operacional n. 15 “*Treinamento no Simulador de Combate a Incêndio em Tempo Real Tipo Container*” do Corpo de Bombeiros do Estado do Goiás (CBMGO), estabelece a padronização e regulamentação do uso do simulador de combate a incêndio – tipo container, propiciando maior segurança nos treinamentos.

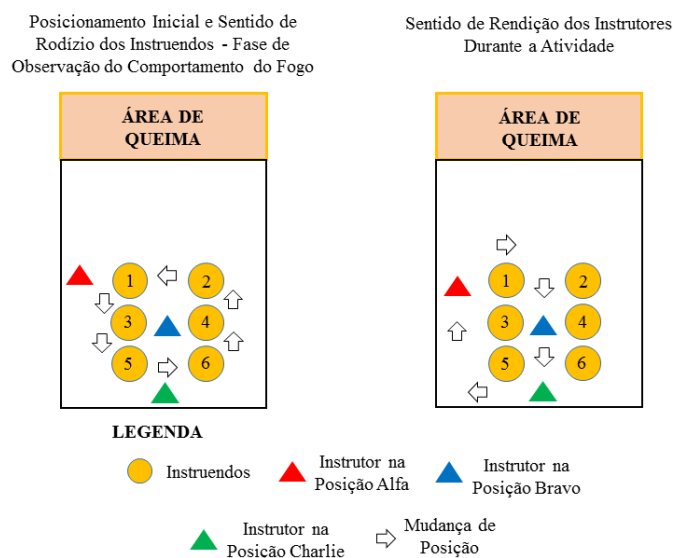
Determina-se que antes de submetidos ao treinamento, os participantes devam ter preparação e conhecimento prévio sobre teoria do fogo, técnicas de armação de linhas de mangueiras no plano horizontal, adaptação ao equipamento de proteção individual – EPI e estar



apto a solucionar problemas no equipamento de proteção respiratória autônomo – EPRA, técnicas de progressão, bem como de recuo em ambiente confinado, técnicas de ataque e técnica de rescaldo.

Cada turma de treinamento é composta por 3 instrutores e um militar de segurança responsáveis pela queima e, no máximo, 6 instruídos. O militar de segurança é responsável por isolar a área imediatamente à frente do container, mantendo um espaço seguro para observadores externos e coordenar todo o trabalho de montagem do cenário. Ao longo de todo o processo, são seguidos protocolos e medidas de segurança rígidos, como o posicionamento de viaturas de água e atendimento pré-hospitalar, para que se evitem quaisquer intercorrências.

O processo começa através da leitura das normas para todos participantes e instrutores. Posteriormente, o militar de segurança divide os grupos de trabalho e faz orientações sobre o passo a passo do processo que deve ser desempenhado durante o combate ao foco de incêndio dentro do compartimento. Após as primeiras preparações, os alunos e instrutores são munidos de EPI completo, realizam os devidos testes no EPRA e se dirigem à área de treinamento. Após a abertura das portas, sob o comando de “rendição” proferido pelo instrutor, os instruídos deslocam-se e assumem a linha de segurança. Na Figura 3 são demonstradas as posições iniciais, com respectivo sentido de rodízio e rendição dos instruídos durante as atividades.



**Figura 3: Posicionamento e sentido de rodízio durante fase de observação.**

**Fonte: A autora, baseado em CBMGO, (2015).**

Durante treinamento são realizados exercícios de técnicas de combate a incêndio, como: ataque tridimensional, ataque combinado (ataque tridimensional e pacote de água) e jato mole no rescaldo. Ficando a cargo do instrutor dar a ordem para a realização de cada evento de ataque.

O processo da queima deve obedecer fielmente ao que foi explicado durante o ensaio. O militar de segurança deve observar, de local seguro, os procedimentos que estão sendo realizados dentro do simulador e determinar a saída se verificar perigo iminente. A saída dos participantes deve acontecer de joelhos e sempre de frente para o foco. Após a queima é

providenciado a verificação das condições físicas de saúde dos instrutores e alunos para liberação ou não da viatura de atendimento pré-hospitalar. A finalização das atividades vem após a desmontagem e manutenção do local e dos equipamentos, consistindo na remoção do sistema hidráulico, limpeza e manutenção dos esguichos, acondicionamento das mangueiras (secando), colocação do material móvel para dentro do simulador, limpeza das máscaras do EPRA e por fim, conduzir os materiais aos depósitos. O simulador deverá ficar totalmente limpo, sem restos da queima.

### 2.3 CBMDF (2009)

O Grupo de Pesquisa na Área de Combate a Incêndios Urbanos do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (CBMDF) avaliou a evolução e influência da temperatura no corpo e a eficiência dos equipamentos de proteção individual – EPI dos bombeiros durante uma simulação em um container de treinamento.

Por meio de experimentos com termopares coletaram-se dados do comportamento térmico no compartimento. Para isso, foram conectados os dispositivos termopares sob o EPI (roupa de aproximação, capacetes, botas, luvas, etc.) de um grupo profissionais durante uma dessas simulações no estágio de *flashover*. A madeira foi adotada como material combustível. Foram aferidas as temperaturas dentro do compartimento através da fixação de quatro pontos no centro do container, com as respectivas alturas: 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0m, e os testes tiveram duração de cerca de 49 minutos.

Quando comparado o gráfico resultante dos testes realizados, mostrado na Figura 4, com a curva de um incêndio-natural em que o incêndio permanece até o final sem ser perturbado, percebe-se que o resultado do ensaio se apresenta confuso e com uma variação na temperatura no decorrer da atividade - justificado pela extinção através do combate com jatos de água. Entretanto, ainda sim, nota-se a semelhança nas partes iniciais da curva do gráfico; a fase de *flashover*.

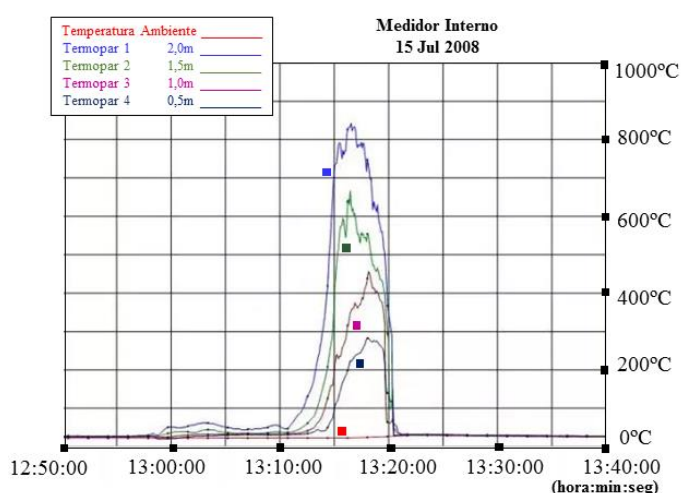


Figura 4 – Medições aferidas dentro do compartimento.

Fonte: Adaptado de CBMDF, (2009).



O grupo de pesquisa analisou quatro sensores posicionados no bolso interno da capa de aproximação, pescoço, perna e braço direito (punho). Na primeira aferição, o portador dos termopares permaneceu a aproximadamente, 3,0m do foco do incêndio. Ao final do exercício, o mesmo foi deslocado para a porta de entrada, mais afastado do foco. Nos dois casos, na região externa próxima ao capacete foram registradas temperaturas de aproximadamente 150°C.

Contudo, segundo o CBMDF (2009), constatou-se que a 2,0m de altura o compartimento em situação de incêndio pode alcançar valores próximos de 900°C, e a 1,5m alcançar cerca de 700°C. Além disso, o modelo teórico do *flashover* aproxima-se muito à realidade. O crescimento e o pico de temperatura se dão em um intervalo menor que 10 minutos. Conclui-se que é impraticável a permanência do bombeiro no compartimento, caso falte qualquer parte do EPI, já que a ausência de um dos equipamentos traria prejuízos fatais ou causaria lesões imediatas. Observou-se também que não somente a chama oferece riscos, mas, principalmente, a fumaça. O calor acarreta efeitos no organismo como problemas de concentração, confusão mental, dificuldade de obedecer a ordens simples e orientações (como, por exemplo, fechar o esguicho).

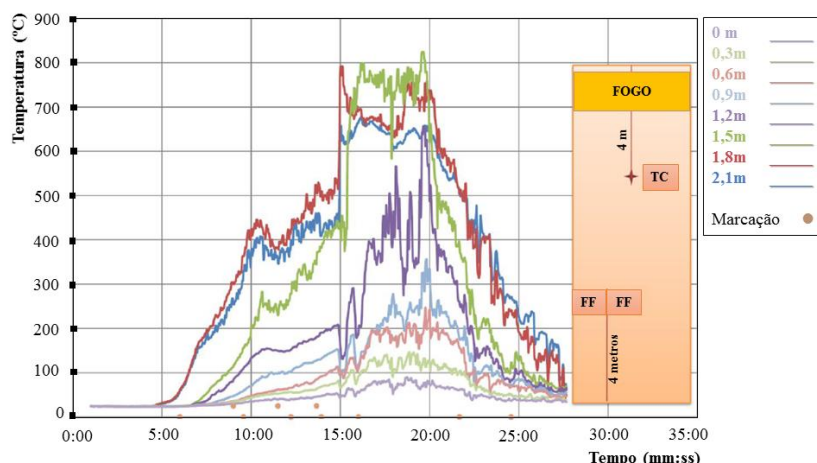
## 2.4 Braga *et al.* (2016)

Os autores analisaram a dinâmica do incêndio durante o treinamento realizado em containers por um grupo de bombeiros, com intuito de controlar o ambiente e verificar a influência da temperatura, tanto no compartimento quanto no corpo e no equipamento de proteção individual – EPI destes profissionais. Para isso, foram acoplados na parte externa das roupas dos bombeiros ou no capacete, sensores termopares tipo K com isolamento de fibra de vidro, e dentro da roupa ou no interior do capacete, os termopares com isolamento de PVC. Além destes materiais, foram utilizados medidores de fluxo de calor, do tipo Schmidt Boelter de fundo de escala de 20 kW/m<sup>2</sup> e tamanho de 1 polegada, para investigar a situação a que os profissionais estavam submetidos em estágio de *pré-flashover* durante o combate. Os demais dados foram coletados por um registrador de temperatura da marca Yokogawa, modelo MV220 de 30 canais ou pelo sistema CompactDAQ da National Instruments, e imagens térmicas por uma câmera térmica da marca MSA, modelo 5200HD.

Foram aferidas as temperaturas em diferentes pontos na roupa de proteção: ombro, peito, coxa, ambos do lado interno e externo. Isso possibilitou verificar que a temperatura máxima chegou a 200°C na parte externa da perna e do peito. Já o ombro apresentou uma temperatura um pouco mais baixa, próxima de 160°C, supostamente, porque a medida foi coletada na lateral da roupa e não de frente para o foco do incêndio. As temperaturas internas variaram entre 80°C e 95°C. Mas, vale salientar que essa não é a temperatura na pele do bombeiro, uma vez que os sensores foram acoplados no forro interno da vestimenta, e além disso, o profissional ainda trajava calça e camisa por baixo da roupa de proteção. Os autores constataram que, o fluxo de calor chegou a 6 kW/m<sup>2</sup>. Esse valor está abaixo do nível limite de segurança, de 7 kW/m<sup>2</sup>, de acordo com valores adotados por Lawson (2009). No entanto, em outros testes anteriormente realizados, foram medidos fluxos de calor mais altos, próximos a 8 a 9 kW/m<sup>2</sup>, nos instantes em que os profissionais se levantaram como parte do treinamento (visualização da camada de fumaça).

Na Figura 5 é exibido o perfil vertical de temperatura dentro do container. A posição dos sensores termopares (TC), bem como da localização dos bombeiros (BM) no início do teste

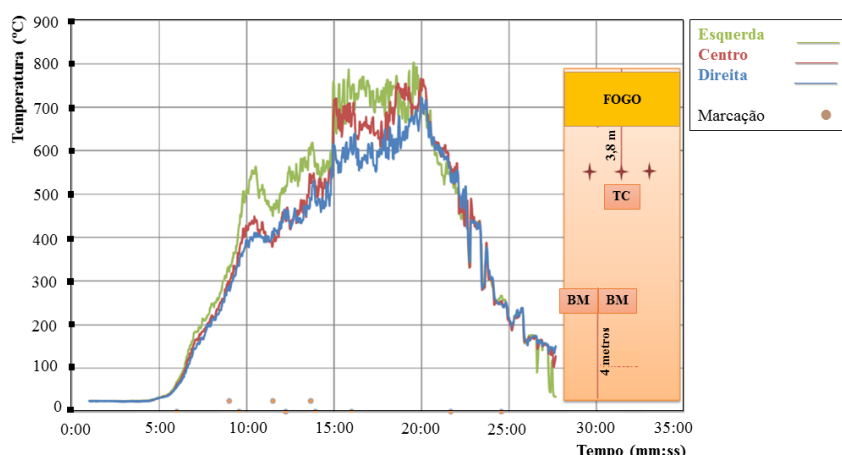
estão representadas no desenho esquemático do container à direita da figura. Pelo gráfico, é possível concluir que a diferença de temperatura na altura do ombro de um bombeiro agachado (0,9 m) e em pé (1,5 m) pode chegar até 550°C.



**Figura 5: Gráfico do perfil vertical de temperatura dentro do container.**

Fonte: Adaptado de Braga *et al.*, (2016).

A temperatura interna à máscara de proteção respiratória (EPR) é próxima de 120°C, e, diferentemente da roupa de proteção, bem próxima à temperatura externa na lente da máscara, de 160°C. Esse fato demonstrou uma menor proteção térmica da lente confeccionada em policarbonato, o que pode ocasionar o amolecimento do material com temperaturas próximas de 267°C, e até vir a derreter em temperaturas maiores. Na Figura 6 é apresentado o perfil horizontal próximo ao teto, a 2,3 metros de altura, e exibe temperaturas máximas de aproximadamente 800° C.



**Figura 6: Gráfico do perfil horizontal de temperatura dentro do container.**

Fonte: Adaptado de Braga *et al.*, (2016).





Sucintamente, segundo Braga *et al.*, conclui-se que em algumas condições os bombeiros ficaram submetidos a temperaturas de até 200°C no lado externo da roupa de proteção, e de 80°C dentro da mesma, o que representa a picos de fluxo de calor próximos a 8 kW/m<sup>2</sup>. No entanto, deve-se ter cuidado absoluto para que o ambiente esteja sempre abaixo das condições críticas, ou seja, em temperatura abaixo de 235°C e radiação térmica abaixo de 10kW/m<sup>2</sup>, para que não haja lesões de saúde graves a esses profissionais. Salienta-se a importância de se manter um protocolo de utilização e controle da quantidade de material combustível, para que a temperatura e fluxo de calor esteja dentro dos limites consideráveis de exposição térmica, evitando riscos desnecessários e desgaste acentuado dos equipamentos de proteção individual.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Programas FDS e Pyrosim

O emprego de *softwares* simuladores para avaliação do comportamento do fogo, bem como de seus efeitos nos materiais e sistemas estruturais de um edifício, garante que os impactos de um sinistro sejam estudados e previstos, podendo contribuir com reformulações necessárias tanto em projetos, como em ferramentas consideradas norteadoras para ações do Corpo de Bombeiros. O estudo do comportamento do container em situação de incêndio será realizado por meio de modelos computacionais desenvolvidos pelos *softwares Fire Dynamics Simulator – FDS versão 6.4.0* (MCGRATTAN *et al.*, 2015) e *PyroSim* (Thunderhead Engineering, 2016), versão 2016.2.0922.

O FDS foi concebido com intuito resolver casos práticos de proteção contra incêndios, e, ao mesmo tempo, é considerado um importante recurso para avaliação da dinâmica do incêndio, visto que as simulações fornecem uma gama de dados com uma variável possibilidade de hipóteses, diversos cenários e causas. O *software* não tem uma interface de fácil de manuseio, mas, outros programas como o *PyroSim* são utilizados para modelar e gerar o arquivo de texto que fornece os parâmetros de entrada com os dados necessários. O *PyroSim* possui uma interface gráfica simples, de alto nível para modelagem 2D e 3D para simulação de complexos ambientes em situação de incêndio. Nele é possível inserir a geometria do ambiente, os materiais e suas propriedades, início do incêndio entre outras inúmeras possibilidades.

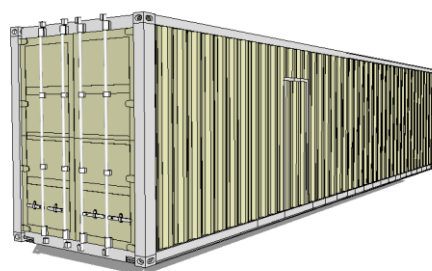
#### 3.2 Descrição do Cenário

A modelagem da geometria no *software Pyrosim* foi elaborada a partir de uma malha tridimensional concebida através do sistema de coordenadas em três eixos com 56 x 9 x 18 células, totalizando de 9.072 células, com dimensões de 0,25m x 0,26m x 0,26m. Sabe-se que ao usar malhas com alta resolução constituídas de um grande número de células maior é o refinamento de dados, mas, este fato ocasiona um aumento no tempo das simulações computacionais. E em virtude a esta observação, é essencial especificar tamanhos de células que possibilitem uma razoável precisão, além de considerar as limitações computacionais.

Tendo em vista a complexidade geométrica do container, devido às ondulações da chapa do aço, realizou-se a média entre suas dimensões internas e externas, conforme seguem os dados expressos na Tabela 1. A partir disso, a volumetria foi concebida com 12,11m de comprimento

na direção do eixo X, 2,34m de largura na direção do eixo Y, e 2,70m de altura na direção do eixo Z.

**Tabela 1: Dados do container utilizado para treinamento do CBMMG.**



**Abertura Frontal**

2.34m x 2.70m

**Aberturas Laterais**

0.80m x 2.10m

**Capacidade**

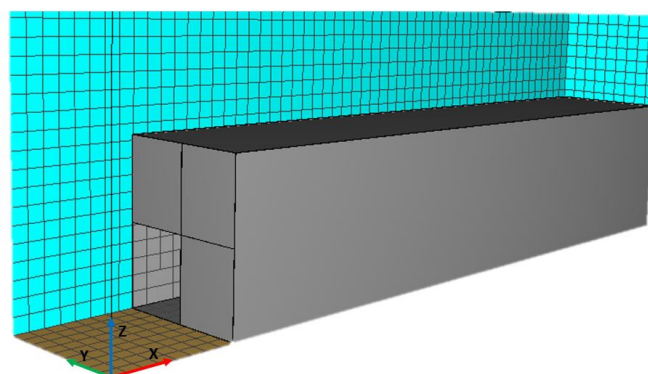
Total: 76.4m<sup>3</sup>

Medidas Externas	Medidas Internas	Média - Simulação	Pesos
Comprimento: 12.191m	Comprimento: 12.032m	Comprimento: 12.11m	Máximo: 32.500 Kg
Largura: 2.438m	Largura: 2.252m	Largura: 2.34m	Tara: 3.900 Kg
Altura: 2.895m	Altura: 2.698m	Altura: 2.70m	Carga: 28.600 Kg

\*Espessura do aço: 2,6mm

Como citado no item 2.1, a abertura frontal padrão do container de 2,34m x 2,70m foi remodelada em quatro portas de 1,17m x 1,35m. Durante as simulações a porta inferior esquerda permanece constantemente aberta. Após aproximadamente 12 minutos do início do incêndio, acontece o acionamento de abertura das duas portas do lado direito, sendo a última e superior porta esquerda mantida fechada durante todo o restante do processo (ver disposição das portas na Figura 8). As portas laterais foram desprezadas durante a simulação computacional, tendo em vista que durante a análise experimental elas são mantidas constantemente fechadas, e não tem funcionalidade específica, como por exemplo, de ventilação.

Para análise do fluxo da fumaça e propagação do fogo fora do modelo, optou-se por prolongar a malha 2,0m além da face com aberturas, e acima do teto do container, conforme apresentado na Figura 7.



**Figura 7: Modelo computacional do container.**

Quanto à carga de incêndio, de acordo com Li e Ingason (2014), a taxa máxima de liberação de calor (TCL) em uma pilha com 20 *pallets* de madeira com umidade entre 10% a 12%, quando completamente envolvida, é igual a 3800kW. Segundo testes realizados pelos autores, o valor da TCL para *pallets* de madeira é considerado constante, contudo, uma unidade de *pallet* com dimensão padrão gera entre 176 a 192 kW.

Utilizando a planilha de Overholt (2017), considerando D\* (diâmetro do fogo) igual a 1,339 a maior dimensão da célula adotada neste trabalho (0,26m) é classificada entre a malha grossa e moderada, ou seja, entre D\*/4 e D\*/10, como mostra a Tabela 2.

**Tabela 2: Cálculo de tamanho de célula**

<b>Carga de Incêndio</b>		
TCL: 12 x 192kW = 2.304kW (Li e Ingason, 2014)		
D* = 1,339	Tamanho da célula Overholt (2017)	Número total de células
D*/4 (malha grossa)	0,3347	4.116
D*/10 (malha moderada)	0,1339	62.475
D*/16 (malha fina)	0,0837	296.032
Maior dimensão da célula adotada nesse trabalho	0,26 (D*/5)	9.072

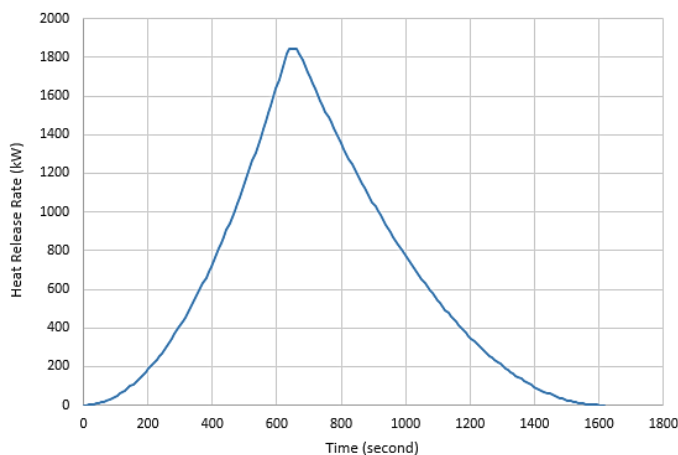
Neste trabalho adotou-se a dimensão padrão dos *pallets* como 1,0m x 1,2m x 0,15m, ou seja, 1,2m<sup>2</sup> de área, conforme PBR I - “Especificação do palete padrão para distribuição nacional - Comitê Permanente de Paletização”. No entanto, considerando 12 *pallets* como foco do fogo, tem-se 14,5m<sup>2</sup> de madeira *Pinus* distribuídos ao fundo do compartimento do container, em uma área de queima de aproximadamente 3,5m<sup>2</sup>. A partir destes dados, estimando-se um peso de 20kgs para cada *pallet*, e considerando segundo SFPE (2016), o poder calorífico da madeira *Pinus* como 19,4MJ, obtêm-se um total de 4656,0MJ/kg de carga de incêndio, e 164,30MJ/m<sup>2</sup> de carga de incêndio específica.

### 3.3 Parâmetros e Simulação

Com intuito de posteriormente comparar e analisar os resultados obtidos na simulação experimental, foram adotados os seguintes critérios para a referida modelagem computacional:

- Ocorrência do incêndio: semelhante ao incêndio real disposto durante simulação experimental. Tempo de duração com intervalo entre 1500 a 2000 segundos. Temperatura ambiente de 25°C.
- Início do incêndio: a ignição é realizada a partir da aplicação do produto CAMPGÁS do fabricante NTK, composto por Propano 6%, Nor-Butano 60% e Iso-Butano 34% em um foco de incêndio inicial, composto por 1 ½ ou 2 *pallets* desmontados, localizado no nível do piso. Porém, a quantidade utilizada do produto é mínima, e foi desprezada na simulação computacional.

• Material combustível: 12 pallets de madeira *Pinus*, os quais apresentam uma rápida propagação do fogo e produção de fumaça. A taxa de calor liberado (TCL) máxima varia, e em virtude das flutuações desse valor, nos cálculos, foi considerado a TCL de 2.304kW, conforme Li e Ingason (2014). Esse fator resulta em uma taxa de liberação de calor por unidade de área (HRRPUA) de 650,285kW/m<sup>2</sup>. A curva da TCL foi baseada em uma curva validada para *pallets* de madeira disponibilizada pelo site do *software Pyrosim*, de acordo com o laboratório *Building and Fire Research Laboratory (BRFL, 1996)*, do NIST (*Nacional Institute os Standards and Technology*), como mostra Figura 8.



**Figura 8:** Curva de TCL para *pallets* de madeira.

**Fonte:** *Pyrosim apud BFRL Data, (1996)*.

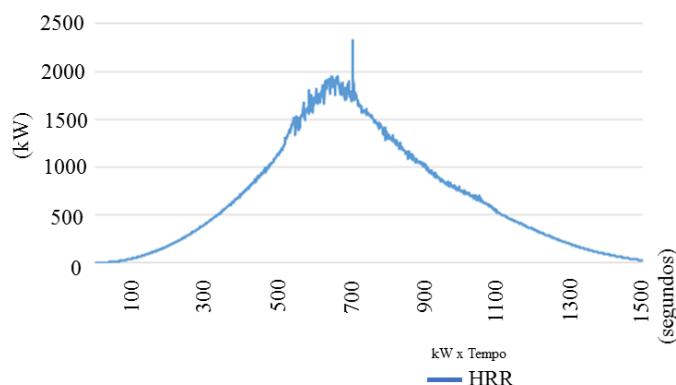
A parede com as aberturas e o teto foram modelados como *Obstruction* e as demais paredes e piso como *Vents*. Paredes, piso e teto de aço foram especificados com 0,0026m de espessura com propriedades fornecidos pela própria biblioteca do *software Pyrosim*: densidade de 7850,0 kg/m<sup>3</sup>; calor específico de 0,46kJ/(kg°K); condutividade de 45,8W/(m°K); emissividade de 0,95. As propriedades da madeira *Pinus* também foram mantidas conforme biblioteca fornecida: densidade de 640,0 kg/m<sup>3</sup>; calor específico de 2,85kJ/(kg°K); condutividade de 0,14W/(m°K); emissividade de 0,9.

Para reação (*Reaction*) foi considerando apenas a composição química da madeira *Pinus* de acordo com dados viabilizados pelo *software*, sendo informando apenas o calor de combustão de 19.400 kJ/kg, valor determinado com base ao manual SPFE (2016), página 143, tabela 5.3. A fração de massa de combustível convertida em partículas de fumaça foi tomada igual a 0,015. A fração de massa de combustível convertida em monóxido de carbono foi tomada igual a 0,005. A fração de radiação utilizada foi 0.35, valor padrão do *software*.

Para aferir as temperaturas foram acoplados dispositivos termopares (*Thermocouple*) a cada 1,0m ao longo do comprimento do compartimento, bem como ao longo de sua altura, sendo nesta espaçados a 0,675m. Onze dispositivos medidores de camada de fumaça (*Layer Zoning Device*) também foram instalados ao longo do comprimento e centralizados ao eixo Y.



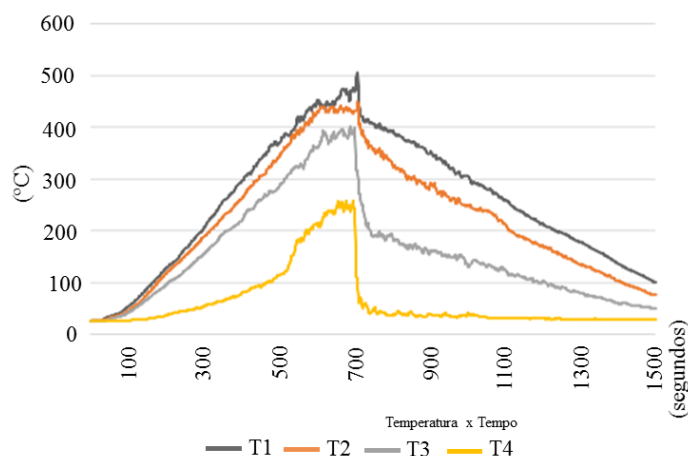
Na Figura 9 é apresentado o gráfico gerado para taxa de calor liberado (TCL), conhecida internacionalmente como *heat release rate* (HRR). Observa-se que o pico máximo esperado na TCL de 2.304kW ocorreu aos 700 segundos devido à entrada de oxigênio através do acionamento de abertura das portas, porém, após esse pico acontece um decaimento rápido em virtude da diminuição do calor ocasionado pela extração natural da fumaça, até que se extingue o material combustível, e conseqüentemente o fogo aos 1500 segundos.



**Figura 9: Curva de HRR do container.**

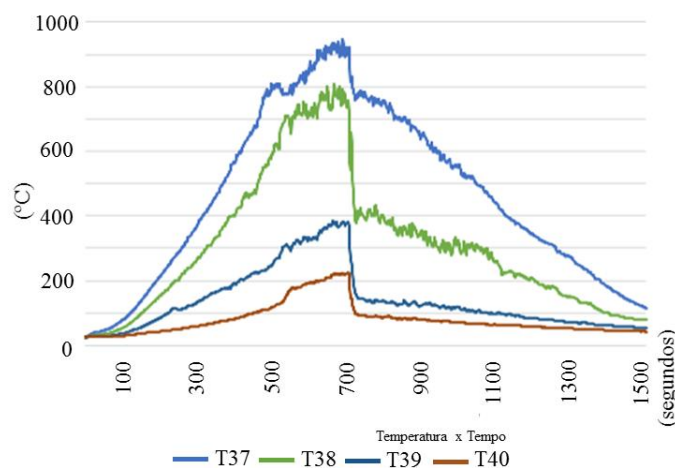
São expostos na Figura 10 os gráficos correspondentes às temperaturas dos dispositivos termopares nomeados como T1, T2, T3 e T4, alocados a aproximadamente 10,0 metros de distância da área de queima, cujas alturas são 2,60m; 2,025m; 1,35m e 0,625m, respectivamente.

Verifica-se que a maior temperatura atingida nessa região é de 500°C, a uma altura de 2,60m, aos 700 segundos. E a temperatura mais baixa é medida a uma altura de 0,675m, e alcança valores próximos a 250°C.



**Figura 10: Temperatura dos termopares localizados a 10,0m da área de queima.**

Os gráficos da Figura 11 apresentam as temperaturas referentes aos dispositivos denominados como T37, T38, T39 e T40, instalados a aproximadamente 2,0m de distância da área de queima, cujas alturas são 2,60m; 2,025m; 1,35m e 0,625m, respectivamente.



**Figura 11: Temperatura dos termopares localizados a 2,0m da área de queima.**

Destaca-se o quão bruscamente alta é a temperatura acima da área de queima, que varia de 900°C a 1000°C, a 0,10m do teto do container. A temperatura medida na mesma região, na altura mais baixa de 0,675m alcança 200°C.

## 4 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Indubitavelmente, é válido e importante ressaltar a necessidade e importância dos embasamentos científicos sobre os sistemas estruturais e materiais construtivos em situações de incêndio. Essa primeira análise computacional foi idealizada para simular uma conflagração real, sem quaisquer intervenções de medidas ativas ou passivas para o controle do fogo, como os jatos d'água lançados em forma de combate durante simulações experimentais nos containers. Os resultados se mostraram dentro dos padrões, quando comparados às referências bibliográficas anteriormente citadas.

Com a continuidade das análises experimentais e computacionais espera-se elaborar um modelo computacional preciso na simulação de um incêndio real. Em consequência, a equipe do CBMMG e a própria instituição Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) contarão com um equipamento calibrado, e dentro deste viés, o Departamento de Engenharia de Estruturas, poderá manipulá-lo para pesquisas e análises de corpos de provas, além de avaliar o efeito do combate de incêndios nos sistemas estruturais e materiais. Além disso, espera-se que os resultados da pesquisa contribuam para a verificação da eficiência dos equipamentos utilizados pelo Corpo de Bombeiros de Minas Gerais; pois, através deles, podem-se aperfeiçoar as práticas adotadas, bem como, apontar os reais efeitos do combate por meio de jatos na diminuição da temperatura. Logo, também fornecerá dados para analisar e melhorar as técnicas de combate a incêndios.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro em forma de fomento à pesquisa.

## **REFERÊNCIAS**

Braga, G. C.; Neto, J. P. L.; Salazar, H. F., 2016. *A temperatura e fluxo de calor em uma situação de incêndio e as consequências para os bombeiros*. Revista FLAMMAE. Recife - PE, v. 02, nº 04. Artigos Técnicos Científicos, Seção 1, p. 9-28.

BRFL - *Building and Fire Research Laboratory*. 1996. NIST - *Nacional Institute os Standards and Technology*. < <http://www.thunderheadeng.com/downloads/7747/>>. Acesso em: 16 abr 2018.

Corpo de Bombeiros Militar de Goiás. Norma Operacional - CBMGO/NO-15, 2015. – “*Treinamento no Simulador de Combate a Incêndio em Tempo Real Tipo Container*.” Goiás.

Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais, CBMMG, 2015. *Corpo de Bombeiros adquire simulador de combate a incêndios*. Disponível em: <<http://www.bombeiros.mg.gov.br/component/content/article/20-2o-bbm/45269-corpo-de-bombeiros-adquire-simulador-de-combate-a-incendio.html>>. Acesso em: 24 fev 2018.

Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal, CBMDF, 2009. *Análise da temperatura de incêndio estruturais*. Disponível em: <<http://bombeirofreitas.wordpress.com/2009/06/01/analise-da-temperatura-de-incendio-estruturais/>>. Acesso em: 24 fev 2018.

International Organization for Standardization (ISO), 2000. *General terms and phenomena of fire – Part 1*. ISO 8421-1. Geneva: ISO/ Switzerland.

Lawson, J. R., Fire Facts, 2009. NIST Special Publication 1102, NISTIR 6400, *National Institute of Standards and Technology*. Gaithersburg, MD.

Li, Y.Z. and H. Ingason. 2014. *Scaling of wood pallet fires*. SP Technical Research Institute of Sweden

MCGrattan, K., Hostikka, S., MCDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K. *Fire Dynamics Simulator - FDS. User's Guide*. NIST Special Publication 1019. Sixth Edition, 2015.

Overholt, 2017. Disponível em: <<http://www.koverholt.com/fds-mesh-size-calc/>> Acesso em 23 mar. 2018.

PBR I - *Especificação do palete padrão para distribuição nacional*. CPP - Comitê Permanente de Paletização. Associação Brasileira de Supermercados. ABRAS. 2000.

SFPE - *Handbook of Fire Protection Engineering*. 2016. Fifth Edition. Society of Fire Protection Engineers.

Thunderhead Engineering Consultants, Inc., 2016. *PyroSim User Manual*.