



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

ANÁLISE DOS FATORES DE INFLUÊNCIA NO DESENVOLVIMENTO DO INCÊNDIO ATRAVÉS DE CURVAS PARAMÉTRICAS

*Analysis of factors of influence on the development of fire through parametric
curves*

Autor: Eng. Civil Carla Cristina de Mello Valadão (carlavaladao@yahoo.com.br)

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

RESUMO

Diversos fatores influenciam o desenvolvimento do incêndio em um compartimento, como carga de incêndio e ventilação, porém estes parâmetros não são considerados nas curvas de incêndio padrão. A presente pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de estudar o desenvolvimento da temperatura dos gases produzidos durante a ocorrência de um incêndio, dentro de um compartimento, através da análise de curvas paramétricas, de acordo com o EN 1991-1-2(2010), considerando a influência da carga de incêndio, do grau de ventilação e das medidas de proteção ativa existentes, especificamente, medidas normais e chuveiros automáticos. Para a obtenção das curvas teóricas foi utilizado o software FIN EC – Parametrical Temperature Curve (Finesoftware, 2020) e foram mantidas constantes as dimensões do compartimento, as características dos materiais do compartimento e o risco de ativação pelo tipo de ocupação. Os resultados mostraram que, de forma geral, o aumento da área de ventilação reduziu proporcionalmente o instante em que se atinge a temperatura máxima durante o incêndio e que para cargas baixas de incêndio a interação entre a carga de incêndio e o grau de ventilação pode ser determinante para a evolução da temperatura na fase de aquecimento. A presença de sprinklers contribuiu para a redução considerável da quantidade de energia térmica gerada durante o incêndio.

Palavras-chave: incêndio, temperatura, curvas paramétricas.

ABSTRACT

Several factors influence the development of fire in a room, such as fire load and ventilation, but these parameters are not considered in standard fire curves. This research was developed with the objective of studying the development of the temperature of the gases produced during the occurrence of a fire, inside a compartment, through the analysis of parametric curves, according to EN 1991-1-2 (2010), considering the influence of the fire load, the degree of ventilation and the existing active protection measures, specifically, normal measures and automatic showers. To obtain the theoretical curves, the FIN EC software - Parametrical Temperature Curve (Finesoftware, 2020) was used and the dimensions of the compartment, the characteristics of the compartment materials and the risk of activation by the type of occupation were kept constant. The results showed that, in general, the increase in the ventilation area reduced proportionally the amount at which the maximum temperature is



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

reached during the fire and that for low fire loads the interaction between the fire load and the degree of ventilation can be determinant for the evolution of the temperature in the heating phase. The presence of sprinklers contributed to a considerable reduction in the amount of thermal energy generated during the fire.

Keywords: fire, temperature, parametric curves.

1 INTRODUÇÃO

O incêndio é um fenômeno desenvolvido por reações químicas entre os materiais combustíveis e o oxigênio, e propicia o movimento dos vapores e a transferência de energia térmica entre os elementos e materiais presentes no ambiente, podendo potencializar a sua propagação. Inúmeros são os fatores que influenciam no desenvolvimento do fogo em um compartimento, e embora os cenários sinistrados possam apresentar similaridades, as curvas reais dos incêndios nunca serão iguais. Os sólidos combustíveis, gases e líquidos possuem propriedades distintas e as condições físicas dos ambientes são diversas, o que implica em diferentes formas de propagação e em diferentes proporções tomadas pelo incêndio. Segundo Costa & Silva (2006), os fatores que determinam as variáveis de um incêndio em edificações são: carga de incêndio, grau de ventilação e características da compartimentação. A dinâmica do fogo pode ser modelada para estudos numéricos ou para realizar ensaios padronizados, utilizando equações onde é possível obter curvas de desenvolvimento da temperatura em função do tempo. A curva ISO 834(1999), utilizada na Europa e no Brasil para ensaios de resistência ao fogo e no projeto de estruturas em situação de incêndio, permite obter a evolução da temperatura como uma função logarítmica do tempo, porém ao contrário das curvas paramétricas, não leva em consideração diversos fatores que se aproximam mais de um cenário real, como carga de incêndio, tipo de ocupação e medidas de proteção instaladas. O objetivo desta pesquisa é estudar o desenvolvimento do incêndio em um compartimento genérico através da análise de curvas parametrizadas de acordo com EN 1991-1-2(2010), considerando fatores de influência mais próximos de um cenário real. Como objetivos específicos pretende-se avaliar a contribuição dos parâmetros carga de incêndio, grau de ventilação e medidas de proteção, especificamente, medidas consideradas básicas e chuveiros automáticos (sprinklers), na evolução da temperatura dentro de um compartimento, utilizando como ferramenta o software gratuito FIN EC – Parametrical Temperature Curve



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

(Finesoftware, 2020). Para os diferentes cenários teóricos, foram mantidas constantes as dimensões do compartimento, as características dos materiais do compartimento e o risco de ativação pelo tipo de ocupação.

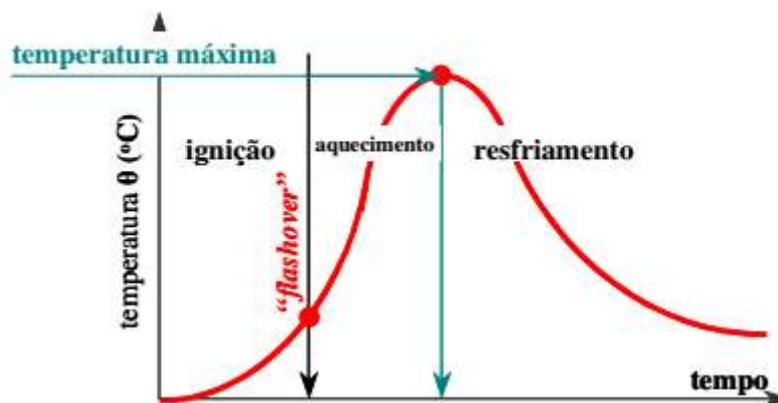
2 DESENVOLVIMENTO DO INCÊNDIO

De acordo com (SILVA, 2012), os produtos do incêndio geram fumaça e gases em altas temperaturas, colocando em risco os ocupantes e as equipes de combate ao incêndio; para diminuir os riscos as edificações devem oferecer condições seguras para o abandono rápido e manter a estabilidade estrutural dos elementos construtivos. A adoção de medidas de proteção e combate a incêndio deve ser planejada pelo projetista com embasamento científico. Segundo SILVA et al. (2010), o fogo é um fenômeno físico-químico caracterizado por uma reação de oxidação com emissão de calor e luz entre os elementos coexistentes que são: combustível, comburente, calor e reação em cadeia. Na transferência de calor por convecção o fluxo de calor é gerado pela diferença de densidade entre os gases quentes, que se movimentam de forma ascendente, e os gases frios, que tendem a descer; esse movimento gera contato entre os gases quentes, o mobiliário e os elementos construtivos. De acordo com Silva et al. (2010) na combustão podem ocorrer duas situações: se o volume de ar que entra for maior que o requisitado pela combustão o processo se dará de maneira rápida e completa; ao contrário, se o volume de ar for menor que o requisitado pela combustão, o processo ocorrerá de forma incompleta e o incêndio terá maior duração, expondo as estruturas por mais tempo à temperaturas elevadas. A transmissão de calor por radiação sucede-se na forma de propagação de ondas, no gás ou no vácuo, partindo de superfícies em alta temperatura para superfícies com temperatura mais baixa e é influenciada pela capacidade da superfície de um corpo refletir, absorver e transmitir calor. Na transferência por condução, o calor transfere-se de uma região de temperatura elevada em direção a outra região de temperatura mais baixa no corpo sólido. A transferência de calor por condução é influenciada pelas propriedades térmicas dos materiais, como o calor específico e a condutibilidade térmica, entre outros fatores. A natureza dos materiais componentes da carga de incêndio afeta o desenvolvimento do fogo, sendo que o processo é diferenciado conforme o estado físico da matéria em combustão. De acordo com (Drysdale, 2011) a chama é um fenômeno de fase gasosa e os materiais voláteis produzidos na combustão são extremamente complexos e devem ser



entendidos conforme a natureza química do combustível. Se nos sólidos é necessário que sejam convertidos ao estado gasoso para queimar, para os líquidos a combustão acontece pela ebulição evaporativa. Nos sólidos a decomposição química ou pirólise é necessária para tornar volátil a superfície e produzir chama. Devido à grande complexidade dos processos de combustão, a quantificação desses efeitos dificulta a criação de curvas de incêndio reais, por esta razão os estudos normalmente são realizados através de curvas de incêndio teóricas simplificadas. De acordo com Negrisolo et al (2019), o incêndio real apresenta estágios de evolução em função da temperatura dos gases produzidos caracterizados pela fase de ignição, fase de aquecimento e fase de resfriamento, representadas na figura 1.

Figura 1: Curva de incêndio real simplificada



(Fonte: Costa & Silva, 2006).

2.2 Curvas de incêndio- padrão

O incêndio padrão é um modelo de incêndio idealizado para análises experimentais e representa a evolução da temperatura dos gases, em um ambiente compartimentado, em função do tempo. As normas brasileiras NBR 14432 (ABNT, 2001) e NBR 5628 (ABNT, 2001) recomendam a equação 1 para a elevação padronizada de temperatura em função do tempo, com base na ISO 834(1999) - curva temperatura-tempo para materiais celulósicos.

$$\theta_g = 345 \log_{10}(8t + 1) + \theta_{g,0} \quad (1)$$

Sendo:

θ_g = temperatura dos gases no ambiente em chamas (°C);



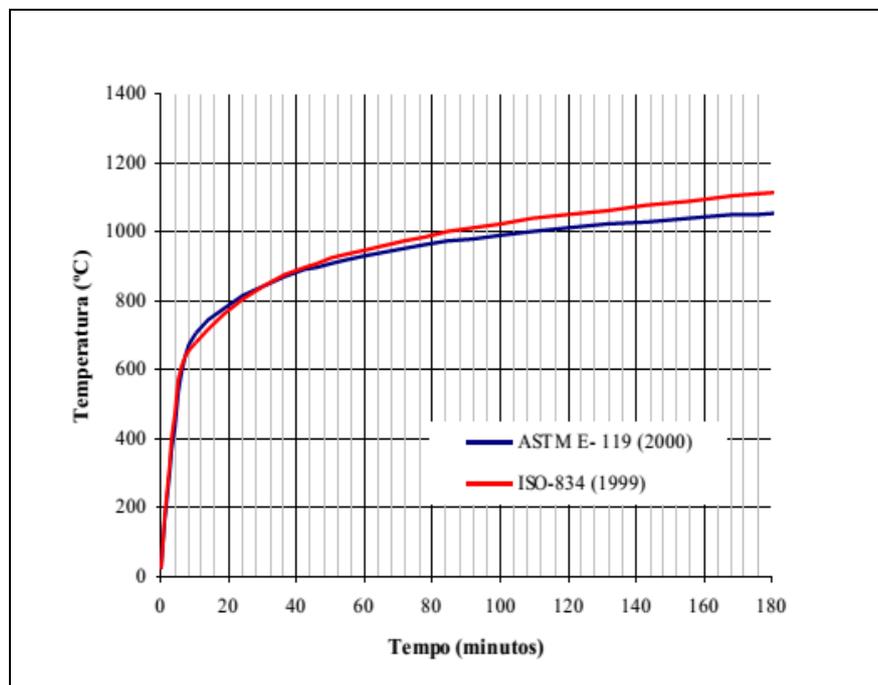
Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

$\theta_{g,0}$ = temperatura dos gases no instante $t=0$ (geralmente admitida 20°C), sendo $t = \text{min}$.

Nos EUA o incêndio padrão é especificado pela American Society for Testing and Materials (ASTM) - “Standard test methods for fire test of building construction and materials” - ASTM E119 (2000). As curvas padrão possuem apenas o ramo ascendente (figura 2), com a temperatura crescendo em relação ao tempo, independente da influência da carga de incêndio, do grau de ventilação e das propriedades térmicas dos materiais de compartimentação, ou seja, não representam uma situação real de incêndio.

Figura 2: Curva de incêndio-padrão para materiais celulósicos.



(Fonte: Junior & Molina ,2012)

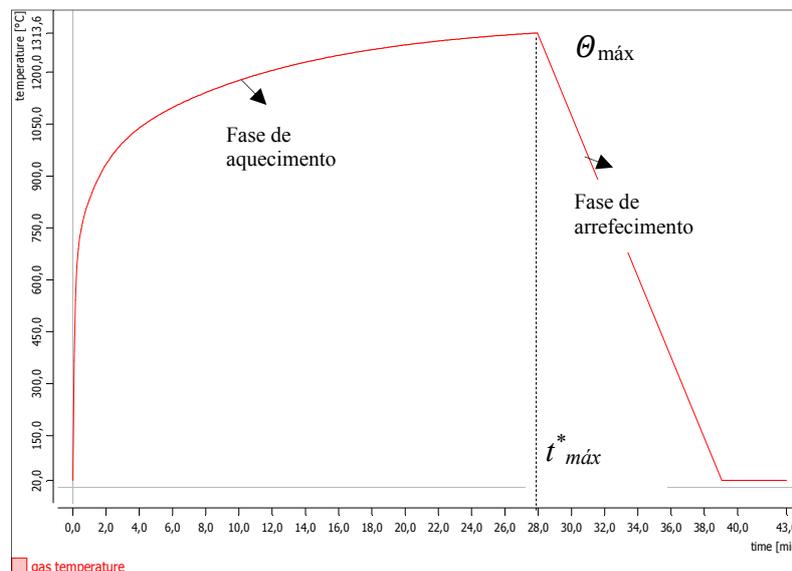
2.3 Curvas paramétricas de incêndio.

De acordo com (Silva,2012) a determinação da temperatura dos gases em um compartimento pode ser mais precisa utilizando o modelo de incêndio natural compartimentado com a parametrização dos fatores que influenciam diretamente o aumento de temperatura dos gases, especificamente carga de incêndio e grau de ventilação, entre outros, ou seja, através de curvas paramétricas de incêndio. Uma curva paramétrica de incêndio é formada por duas equações que a dividem em dois ramos: o ramo de curva ascendente com o aquecimento dos



gases do incêndio no compartimento e o ramo descendente ou de arrefecimento, com a redução linear da temperatura conforme a figura 3. A evolução teórica da temperatura dos gases resultantes de um incêndio em um compartimento pode ser obtida através do método especificado pela norma europeia EN 1991-1-2 (2010), levando em consideração a influência da carga de incêndio, da ventilação e das características dos elementos de compartimentação, entre outros fatores, porém, algumas limitações devem ser ressaltadas: a área máxima do compartimento em planta deverá ser de 500 m² e a altura máxima do compartimento deverá ser de 4 metros, sem aberturas no teto; se as cargas de incêndio forem definidas sem levar em conta o comportamento da combustão, esta abordagem deverá limitar-se a compartimentos com carga de incêndio com predominância de materiais celulósicos; admite-se que a carga de incêndio do compartimento é completamente consumida.

Figura 3: Curva de incêndio paramétrica



(fonte: elaborado pela autora)

2.3.1 Curva de incêndio paramétrica, na fase de aquecimento

Na fase de aquecimento a curva paramétrica de incêndio é obtida pela equação 2, onde a temperatura é uma função exponencial de um tempo fictício.

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0,324 e^{-0,2t^*} - 0,204 e^{-1,7t^*} - 0,472 e^{-19t^*}) \quad (2)$$



Onde θ_g é a temperatura dos gases no compartimento do incêndio [$^{\circ}\text{C}$].

2.3.2 Tempo de evolução da curva de incêndio

O tempo fictício que compõe a equação da curva ascendente de temperatura dos gases no compartimento do incêndio é dado pela equação 3.

$$t^* = t \cdot \Gamma \text{ [h]} \quad (3)$$

Onde t^* é o tempo fictício em horas, calculado por meio da equação (3).

O tempo fictício é o produto do tempo estimado pela taxa de crescimento do incêndio e o fator de conversão do tempo.

2.3.3 Fator de conversão do tempo

O fator de conversão é a relação entre o fator de abertura e a absorvidade térmica dos elementos de compartimentação. O fator de conversão é dado pela equação (4). No caso de $\Gamma=1$ a equação (2) da temperatura dos gases no incêndio aproxima-se da curva de incêndio padrão.

$$\Gamma = [O/b]^2 / (0,04/1160)^2 \text{ [-]} \quad (4)$$

Onde (Γ) é o fator de conversão do tempo em função do fator de abertura (O) e da absorvidade térmica dos elementos de compartimentação (b).

2.3.4 Fator de abertura

O fator de abertura (O) é a relação entre a área de aberturas verticais de todas as paredes (A_v) com a média ponderada de todas as alturas de aberturas verticais (h_{eq}) e a área total da superfície envolvente (paredes, cobertura e pavimento incluindo aberturas) (A_t). O fator de aberturas deve se manter entre os limites $0,02 \leq O \leq 0,20$, e é quantificado pela equação (5).

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t \text{ [m}^{1/2}\text{]} \quad (5)$$



2.3.5 Absortividade térmica

A absortividade térmica é a propriedade das superfícies dos elementos de compartimentação de absorver o calor do incêndio. A absortividade térmica é dada pela equação (6).

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} \quad (6)$$

Os fatores determinantes da absortividade térmica dos elementos do compartimento são:

ρ = massa volumétrica da envolvente do compartimento [kg/m³];

c = calor específico envolvente do compartimento [J/Kg.K];

λ = condutibilidade térmica da envolvente do compartimento [W/m. K];

A absortividade térmica deve se manter nos limites de $100 \leq b \leq 2200$ [J/m². S^{1/2}. K]. Quando as superfícies dos elementos de compartimentação possuírem diversas camadas diferentes de materiais a absortividade térmica deverá ser determinada conforme EN 1991-1-2 (2010), anexo A, notas 5 e 6.

2.3.6 Temperatura máxima dos gases

A temperatura máxima dos gases no compartimento ($\theta_{máx}$) na fase de aquecimento ocorre para $t^* = t_{máx}$, o instante em que a curva ascendente atinge a temperatura máxima dos gases no incêndio. O $t^*_{máx}$ é o tempo fictício de temperatura máxima dos gases, produto do tempo estimado pela taxa de crescimento do incêndio e o fator de conversão do tempo. O tempo de temperatura máxima é dado pela equação (7) em horas.

$$t^*_{máx} = t_{máx} \cdot \Gamma [h] \quad (7)$$

O tempo $t_{máx}$ é equivalente ao tempo limite (t_{lim}), no caso do incêndio ser controlado pelo combustível, sendo que t_{lim} deve ser estipulado conforme a taxa de crescimento do incêndio: no caso de taxa de crescimento lenta $t_{lim} = 25\text{min}$; no caso de taxa de crescimento média $t_{lim} = 20\text{min}$ e no caso de taxa de crescimento rápida $t_{lim} = 15\text{min}$.



Se incêndio for controlado pela ventilação, t_{lim} será função da carga de incêndio ($q_{t,d}$) e do fator de abertura (O) e é igual a $(0,2 \cdot 10^3 \cdot q_{t,d}/O)$.

2.3.7 Densidade de carga de incêndio da envolvente

O valor de cálculo da carga de incêndio por unidade de área da envolvente do compartimento é definida pela equação (8).

$$q_{t,d} = q_{f,d} \cdot A_f / A_t \text{ [MJ/m}^2\text{]} \quad (8)$$

Onde:

A_f = área de piso do compartimento [m^2];

A_t = área total da superfície envolvente (paredes, cobertura e pavimento, incluindo aberturas) [m^2];

$q_{f,d}$ = valor de cálculo da carga de incêndio por unidade de área do compartimento [MJ/m^2].

A carga de incêndio da envolvente total do compartimento determina o tempo de temperatura máxima ou o tempo limite quando o incêndio é controlado pela ventilação. A carga de incêndio da envolvente para o método de curvas paramétricas deve estar entre os seguintes limites: $50 \leq q_{t,d} \leq 1000 \text{ [MJ/m}^2\text{]}$;

Os fatores de ativação de incêndios utilizados no método de curvas paramétricas são determinados pelas dimensões do compartimento (δq_1), pelo tipo de ocupação (δq_2) e pelas medidas de combate a incêndio (δni) conforme anexo E da norma EN 1991-1-2(2010). Segundo item(4) do anexo as medidas normais ou básicas de combate a incêndio que deverão estar presentes são: vias de acesso seguras, dispositivos manuais de combate a incêndio e sistemas de exaustão de fumaça nas escadas.

2.3.8 Curvas de incêndio paramétricas na fase de arrefecimento

No intervalo de tempo posterior ao instante em que é atingida a temperatura máxima dos gases no incêndio tem início a fase de resfriamento, período em que acontece a queda linear da temperatura. Na fase de arrefecimento a temperatura é obtida pelas equações 9, 10 e 11.

(x é o fator em função da relação entre $t_{máx.}$ e t_{lim}).



$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 625(t^* - t^*_{\max} \cdot x) \quad (9)$$

Para $t^*_{\max} \leq 0,50$.

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 250(3 - t^*_{\max})(t^* - t^*_{\max} \cdot x) \quad (10)$$

Para $0,50 < t^*_{\max} < 2,0$.

$$\Theta_g = \Theta_{\max} - 250(t^* - t^*_{\max} \cdot x) \quad (11)$$

Para $t^*_{\max} \geq 2$ $x = 1,0$ se $t_{\max} > t_{\lim}$, ou $x = t_{\lim} / t^*_{\max}$ se $t_{\max} = t_{\lim}$

4 DESENVOLVIMENTO

Este item apresenta os métodos utilizados e os parâmetros utilizados para a modelagem numérica dos cenários de incêndio em um compartimento. As curvas paramétricas foram obtidas no software FIN EC – Parametrical Temperature Curve (Finesoftware, 2020), respeitando os limites determinados nos anexos A e E, da norma EN 1991-1-2(2010), para um compartimento com as características contidas descritas no item 4.1. Foram testados diferentes fatores de influência na evolução do incêndio, especificamente carga de incêndio (baixa, média e elevada), grau de ventilação (baixo, médio e elevado) e medidas de proteção (medidas básicas e existência de chuveiros automáticos-*sprinklers*). Após a modelagem, foram plotados os resultados numéricos para análise e correlação entre fatores e, após a análise de resultados, foram feitas as considerações finais.

4.1 Parâmetros de modelagem

4.1.1 Compartimento modelo

O compartimento modelo é um salão comercial sem paredes divisórias localizado no pavimento térreo de um edifício de ocupação mista comercial no térreo e residencial nos pavimentos superiores. Para análise foram atribuídas as seguintes características ao compartimento, comuns a todos os modelos:

Área de piso do compartimento = 450 m² (comprimento 30 m e largura 15 m)

Altura do compartimento = 3,50 m



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

O material utilizado foi concreto, com as seguintes propriedades:

ρ = Densidade - 2400 [kg/m³];

λ = Condutibilidade térmica - 1,13 [W/m. K];

c = Calor específico 1000 [J/Kg. K].

Quanto ao perigo de ativação, função das dimensões do compartimento, foi adotado o fator $\delta q_1 = 1,0$, de acordo com o anexo E, quadro E.1 da EN 1991-1-2(2010).

Quanto ao perigo de ativação, função do tipo de ocupação, foi adotado $\delta q_2 = 1,0$, de acordo com o anexo E, quadro E.1 da EN 1991-1-2(2010).

Quanto à existência de medidas ativas de combate ao incêndio, foi adotado $\delta ni = 1,0$ para os modelos com medidas básicas, e $\delta ni = 0,61$ para os modelos onde foi considerada a existência de *sprinklers*, de acordo com anexo E, quadro E.1 da EN 1991-1-2(2010).

4.1.2 Níveis adotados para os fatores ventilação, carga de incêndio e medidas de proteção

Para avaliar a influência da ventilação e da carga de incêndio no compartimento com medidas básicas de proteção foram consideradas cargas de incêndio de 300, 600 e 2000 MJ/m², respectivamente, para grau de risco de incêndio baixo, médio e alto, e áreas de ventilação de 21, 41 e 83 m², mantendo fixa a altura das aberturas verticais em 1,6m e variando a largura. As tabelas 1 e 2 resumem os dados de entrada no software para os modelos 1 a 9.

Tabela 1: Dados de entrada para a análise dos fatores ventilação e carga de incêndio

PARÂMETROS	MOD 01	MOD 02	MOD 03	MOD 04	MOD 05	MOD 06	MOD 07	MOD 08	MOD 09
Altura h	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
At m ²	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Av m ²	21	41	83	21	41	83	21	41	83
Piso [ρ] kg/m ³	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Piso [c] J/kg/K	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Piso [λ] W/m/K	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
Teto [ρ] kg/m ³	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Teto [c] J/kg/K	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Teto [λ] W/m/K	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

Tabela 2: Parâmetros do incêndio considerando os fatores ventilação e carga de incêndio

PARÂMETROS	MOD 01	MOD 02	MOD 03	MOD 4	MOD 05	MOD 06	MOD 07	MOD 8	MOD 9
[ρ] kg/m ³	800	800	800	800	800	800	800	800	800
[c] J/kg/K	960	960	960	960	960	960	960	960	960
[λ] W/m/K	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
[t_{lim}] min	20	20	20	20	20	20	20	20	20
[q_{ck}] MJ/m ²	300	300	300	600	600	600	2000	2000	2000
Fat.combustão [m]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Fat. [δ_{q1}]	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Fat [δ_{q2}]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Fat. [δ_{ni}]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Para avaliar a influência do sistema de *sprinklers* foi fixada a área de ventilação intermediária (40,96 m²) e foram considerados 3 diferentes níveis para a carga de incêndio (300, 600 e 2000MJ/m²), conforme mostram as tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Dados de entrada para a análise dos fatores carga de incêndio e *sprinklers*

PARÂMETROS	MOD 10	MOD 11	MOD 12	MOD 13	MOD 14	MOD 15
Altura do compartimento m	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Área do piso m ²	450	450	450	450	450	450
Área de aberturas m ²	41	41	41	41	41	41
Densidade do piso de concreto [ρ] kg/m ³	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Calor específico do piso de concreto [c] J/kg/K	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Condutibilidade térmica do piso [λ] W/m/K	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
Densidade do teto [ρ]kg/m ³	2400	2400	2400	2400	2400	2400
Calor específico do teto [c] J/kg/K	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Condutibilidade térm. do teto [λ] W/m/K	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13



Tabela 4: Parâmetros do incêndio considerando os fatores de carga de incêndio e *sprinklers*

PARÂMETROS	MOD 10	MOD 11	MOD 12	MOD 13	MOD 14	MOD 15
Densidade do compartimento [ρ] kg/m ³	800	800	800	800	800	800
Calor específico do compart. [c] J/kg/K	960	960	960	960	960	960
Condutibilidade térmica do compartimento. [λ] W/m/K	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58
Tempo limite [t _{lim}] min	20	20	20	20	20	20
Carga incêndio do compartimento [q _{f,k}] MJ/m ²	300	300	600	600	2000	2000
Fator de combustão [m]	0,8	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Fator de ativação pelas dimensões do compart. [δq ₁]	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Fator de ativação pelo tipo ocupação [δq ₂]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Fator de ativação medidas de combate ao incêndio [δq _{ni}]	1,0	0,61	1,0	0,61	1,0	0,61

4.2 Dados de saída do software

A tabela 5 e as figuras 4, 5, 6, 7 e 8 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos na modelagem e as curvas paramétricas de incêndio, para análise dos fatores ventilação e carga de incêndio. Nos modelos pode-se observar a evolução da temperatura máxima do incêndio Θ_g , a energia absorvida pelas superfícies do compartimento pela absorvidade térmica b , a carga de incêndio da envolvente resultante $q_{t,d}$ e o instante em que o incêndio atinge a temperatura máxima $t_{m\acute{a}x}$.



Tabela 5: Resultados para a análise dos fatores ventilação e carga de incêndio

PARÂMETROS	MOD 01	MOD 02	MOD 03	MOD 04	MOD 05	MOD 06	MOD 07	MOD 08	MOD 09
[O] m ^{1/2}	0,021	0,043	0,085	0,021	0,043	0,085	0,021	0,043	0,085
[b] (J/m ² s ^{1/2} K)	1405,33	1418,20	1445,34	1405,33	1418,20	1445,34	1405,33	1418,20	1445,34
[q _{t,d}] MJ/m ²	133,3	133,30	133,3	888,90	266,7	266,7	888,90	888,90	888,90
[t _{máx}] min	75,0	35,70	20	150,1	75,0	37,50	500,3	250,1	125,1
[Θ _g] °C	750,60	834,12	735,52	836,59	936,38	1035,32	1016,75	1116,02	1218,34

Figura 4: Curvas paramétricas resultantes para os modelos 1 e 2

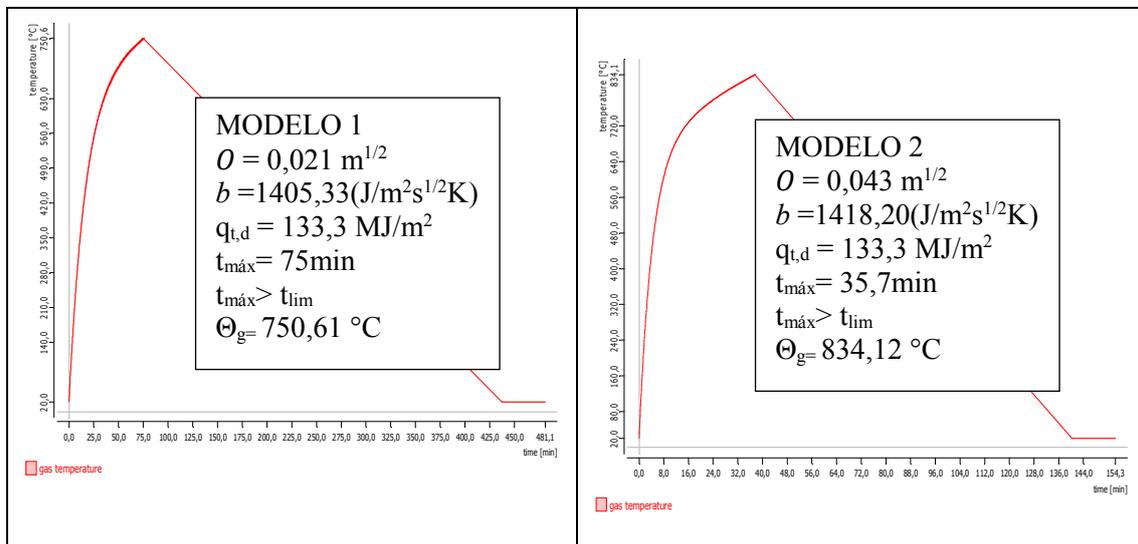
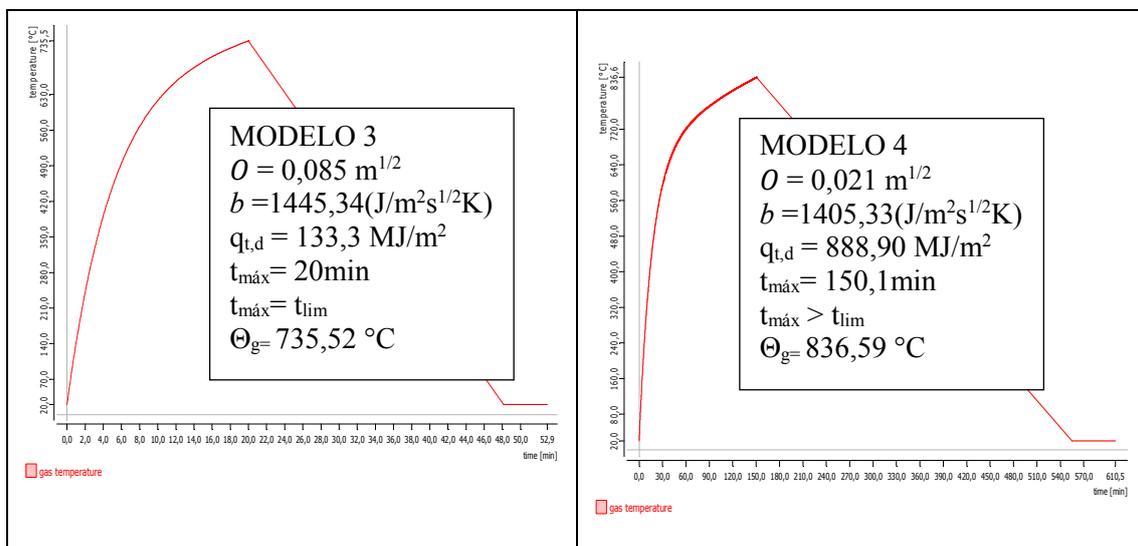


Figura 5: Curvas paramétricas resultantes para os modelos 3 e 4





Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

Figura 6: Curvas paramétricas resultantes para os modelos 5 e 6

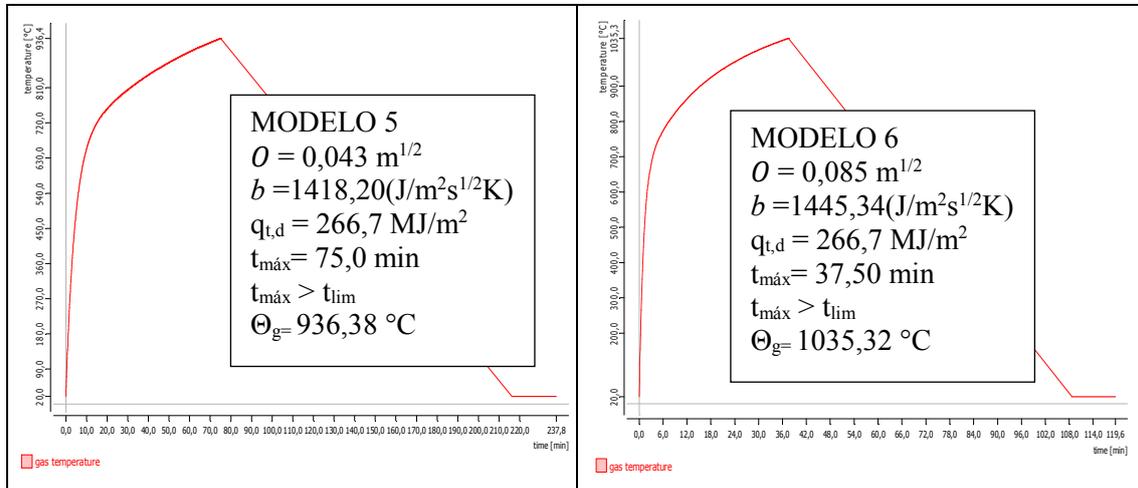


Figura 7: Curvas paramétricas resultantes para os modelos 7 e 8

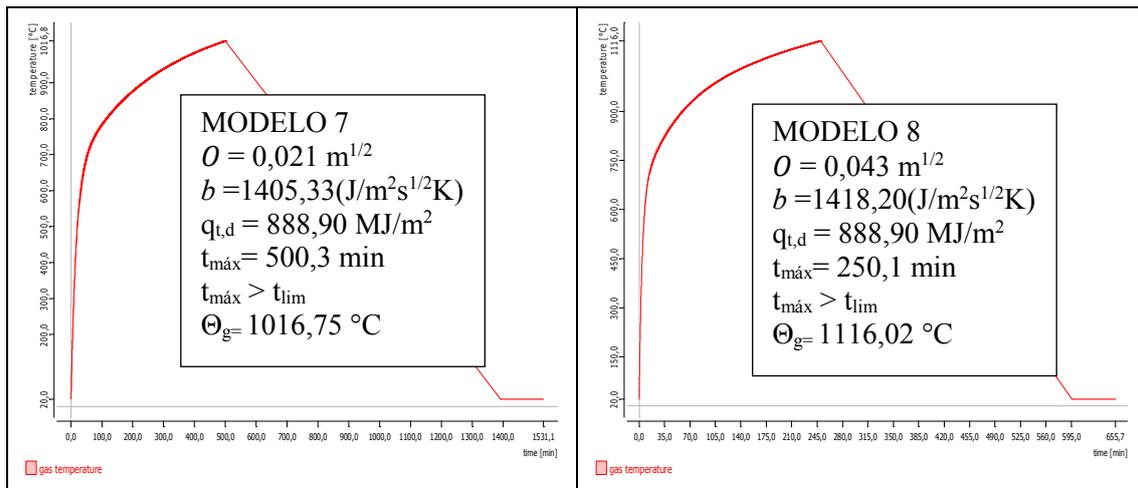
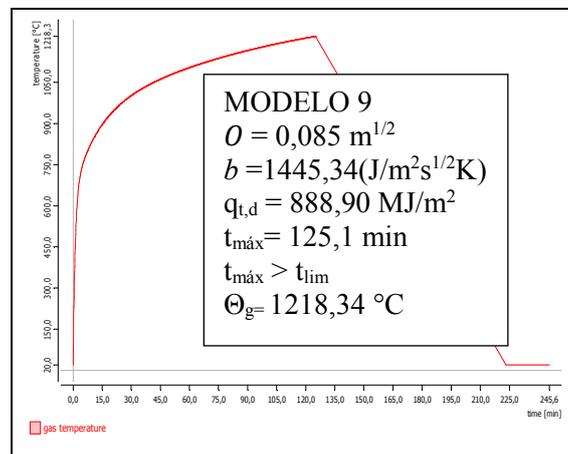


Figura 8: Curva paramétrica resultante para o modelo 9





Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

A tabela 6 e as figuras 9, 10 e 11 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos na modelagem e as curvas paramétricas de incêndio, para análise dos fatores carga de incêndio e medidas de proteção (básicas e sistema de *sprinklers*).

Tabela 6: Resultados para as análises dos fatores carga de incêndio e *sprinklers*

PARÂMETROS	MOD 10	MOD 11	MOD 12	MOD 13	MOD 14	MOD 15
Fator de abertura do compartimento [O] $m^{1/2}$	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043	0,043
Absortividade térmica dos elem. compart. [b] ($J/m^2s^{1/2}K$)	1418,20	1418,20	1418,20	1418,20	1418,20	1418,20
Carga incêndio da envolvente. [$q_{t,d}$] MJ/m^2	133,3	81,30	266,7	162,7	888,90	542,20
Instante de temperatura máxima [$t_{máx}$] min	37,50	22,90	75	45,8	250,10	152,6
Temperatura máxima dos gases no compart. [Θ_g] $^{\circ}C$	834,12	772,28	936,38	861,88	1116,02	1043,28

Figura 9: Curvas paramétricas resultantes para os modelos 10 e 11

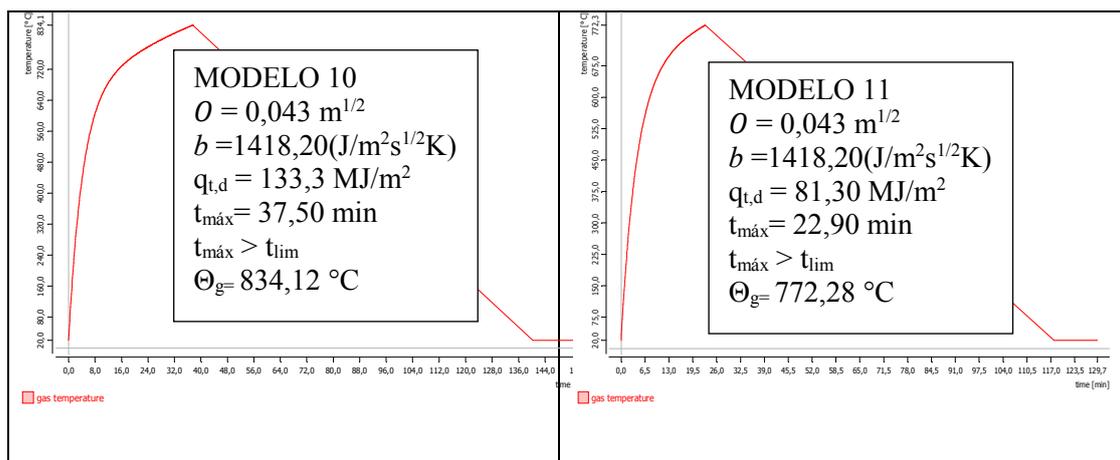




Figura 10: Curvas paramétricas resultantes para os modelos 12 e 13

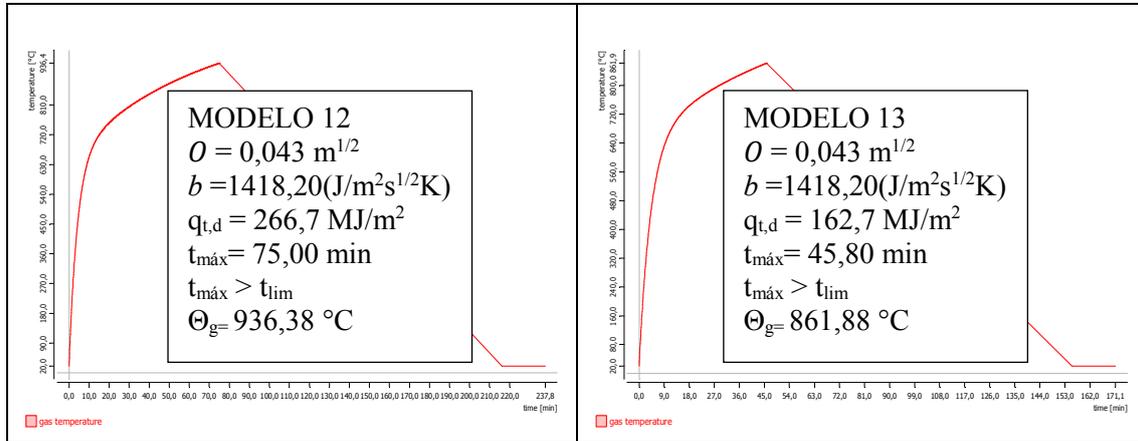
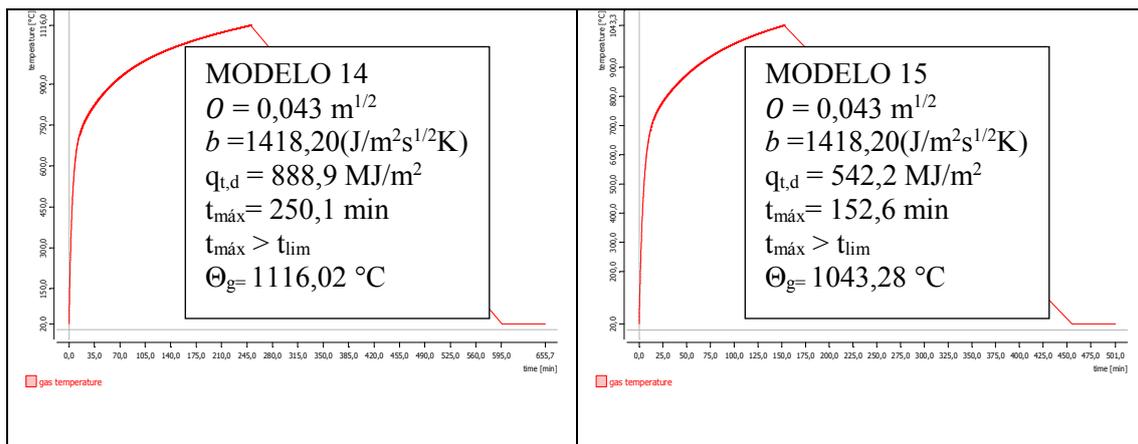


Figura 11: Curvas paramétricas resultantes para os modelos 14 e 15

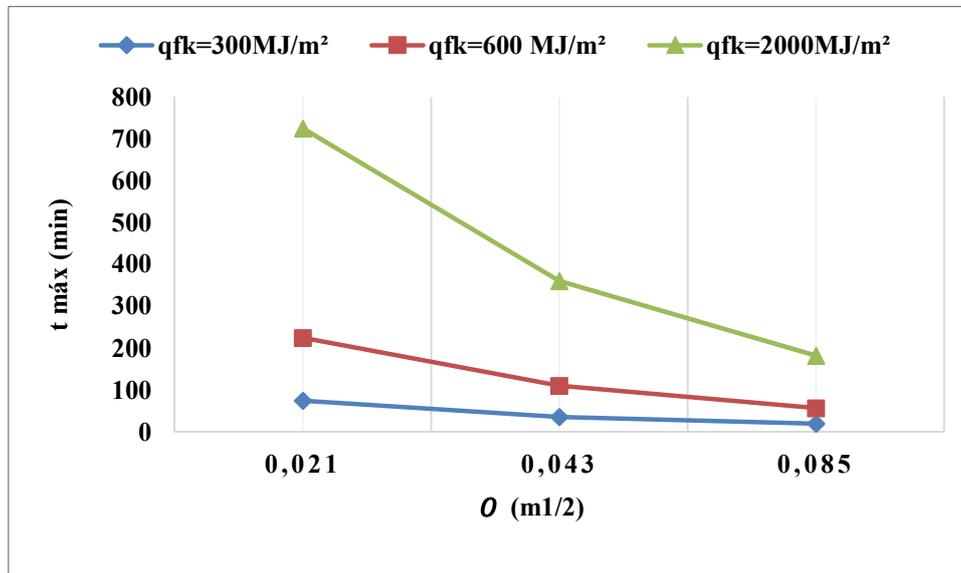


4.3 Análise da influência da ventilação e da carga de incêndio no desenvolvimento do incêndio

A figura 12 apresenta a influência da ventilação e carga de incêndio no instante em que se atinge a temperatura máxima, conforme os resultados da tabela 5. Os resultados foram obtidos para os modelos com cargas de incêndio ($q_{f,k}$) $300 \text{ MJ}/\text{m}^2$, $600 \text{ MJ}/\text{m}^2$ e $2000 \text{ MJ}/\text{m}^2$ e diferentes áreas de ventilação, considerando medidas básicas de proteção descritas em 2.3.7.



Figura 12: Influência da carga de incêndio e da área de ventilação no tempo de temperatura máxima



(fonte: elaborado pela autora)

Pelos resultados obtidos constatou-se que de forma geral o aumento para o dobro das áreas de ventilação nos modelos analisados, com conseqüente aumento nos valores do fator de abertura (O), proporcionando um processo de ventilação mais rápido, acelerou o processo de crescimento do incêndio e reduziu 50% o tempo necessário para atingir-se a temperatura máxima dos gases ($t_{máx}$). Para a carga de incêndio mais baixa a redução foi mais significativa, de 56%, e o instante de temperatura máxima reduziu-se ao tempo limite (20 minutos), sendo o incêndio controlado pelo combustível. Os resultados mostram que para altas cargas de incêndio com menor fator de ventilação o incêndio tem longa duração, pela ventilação lenta, expondo as estruturas e elementos de compartimentação a um período maior sob a ação de altas temperaturas, aumentando a probabilidade de danos estruturais ou até o colapso.

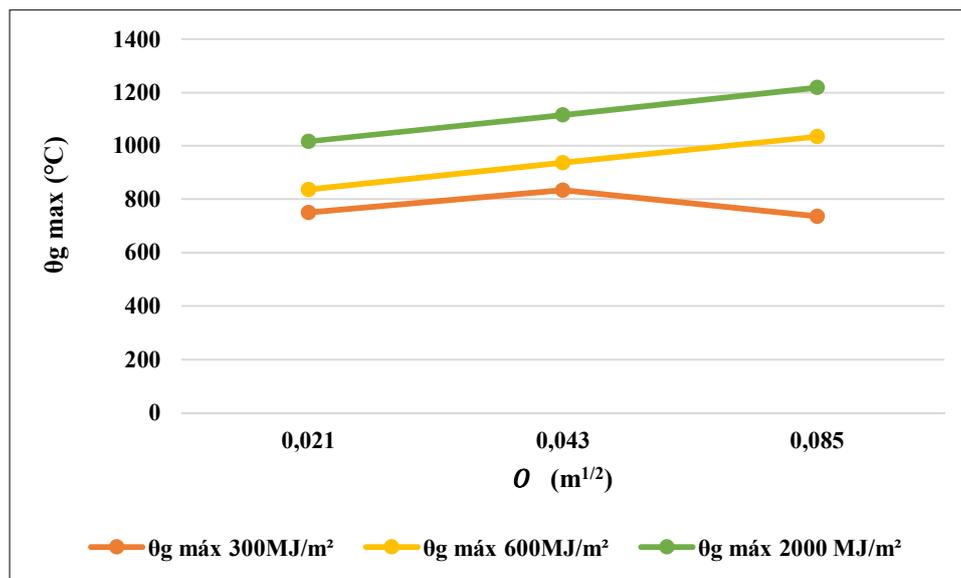
4.3.1 Análise da temperatura máxima dos gases no compartimento com a influência do fator de ventilação e da carga de incêndio.

A figura 13 mostra a elevação da temperatura a medida que aumentam o fator de ventilação (O) e a carga de incêndio. Os resultados mostram que para as cargas de incêndio de 600 e 2000 MJ/m² o processo de queima é acelerado proporcionalmente ao crescimento do fator de ventilação e, como conseqüência, ocasiona o aumento gradual de temperatura máxima. Para a



carga de incêndio baixa e fator de ventilação mais elevado a temperatura máxima reduziu. Uma explicação possível será a menor quantidade de combustível ter sido consumida muito rapidamente, causando uma temperatura máxima menor.

Figura 13: Influência da carga de incêndio e da área de ventilação na temperatura máxima atingida pelo incêndio



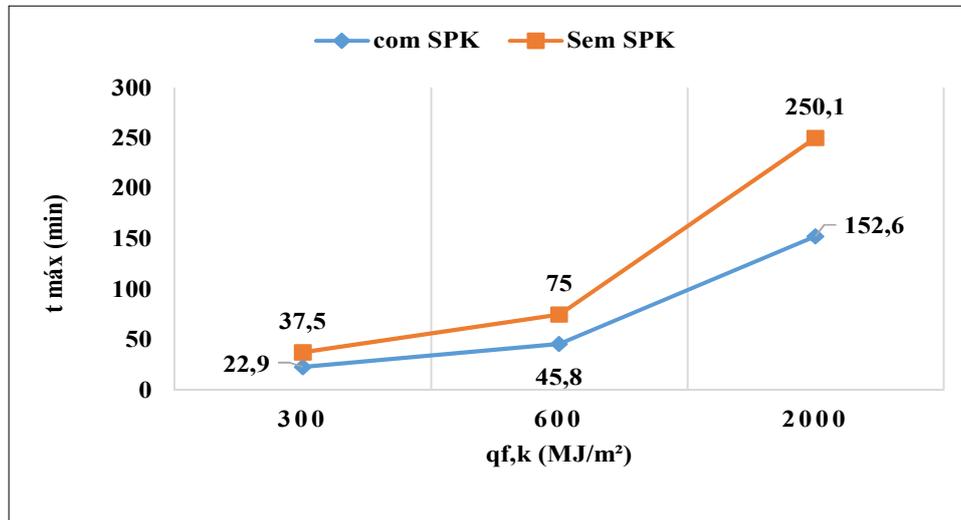
(fonte: elaborado pela autora)

4.4 Análise da influência do sistema de *sprinklers* e da carga de incêndio.

De acordo com a figura 14, constatou-se que os modelos sem proteção por chuveiros automáticos tiveram um período mais longo da fase de aquecimento, uma vez que o instante em que é atingida a temperatura máxima dos gases do incêndio ($t_{máx}$) foi bastante superior ao tempo obtido nos modelos com sistema de *sprinklers*. A existência de chuveiros automáticos reduziu substancialmente o tempo de exposição ao fogo na fase de crescimento, aproximadamente 61%, o que reduziria os danos causados pelo incêndio nas estruturas e elementos de compartimentação, uma vez que a quantidade de energia térmica a que seriam expostos os componentes construtivos do compartimento durante o incêndio simulado seria substancialmente inferior.



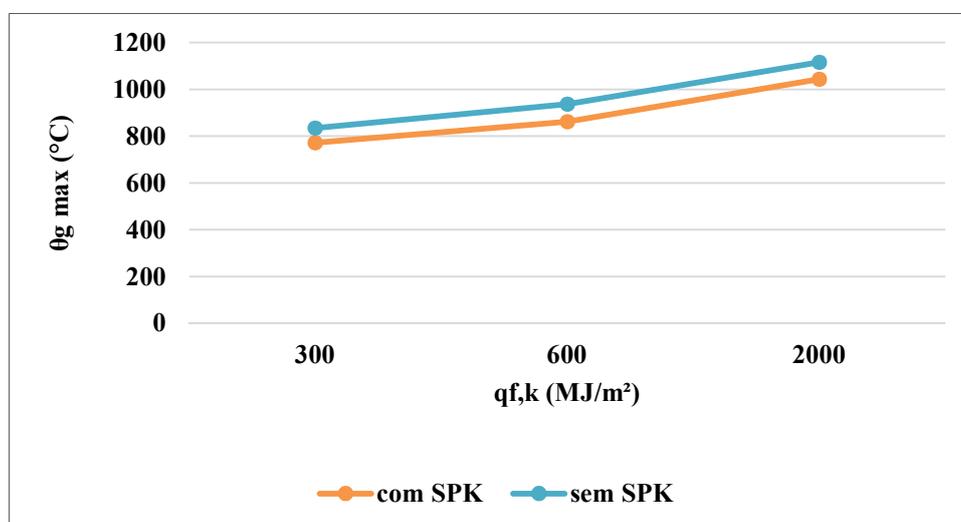
Figura 14: Influência da existência de sprinklers no tempo de temperatura máxima para as diferentes cargas de incêndio



(Fonte: elaborado pela autora)

Os resultados da figura 15 mostram que para os modelos com sprinklers as temperaturas máximas atingidas pelos gases reduziram aproximadamente 7 % mesmo sendo na fase de inflamação generalizada, para todas as cargas de incêndio de 300MJ/m², 600 MJ/m² e 2000 MJ/m². Apesar da redução da temperatura máxima não ser muito significativa com o sistema de sprinklers, a combinação desta redução com a redução da duração do incêndio demonstra o efeito benéfico do sistema de proteção para aumentar o nível de segurança no compartimento.

Figura 15: Influência do sistema de *sprinklers* na temperatura máxima atingida pelos gases no compartimento



(fonte: elaborado pela autora)



6 CONCLUSÕES

Este trabalho analisou o desenvolvimento do incêndio em um compartimento modelo pelo método das curvas de incêndio paramétricas, de acordo com EN 1991-1-2(2010), de forma a poder avaliar teoricamente a influência da carga de incêndio, do grau de ventilação e das medidas de proteção ativa existentes, especificamente, medidas normais e chuveiros automáticos. Os resultados mostraram que para cargas de incêndio maiores aumentar a área de ventilação reduziu proporcionalmente o instante em que se atinge a temperatura máxima ($t_{máx}$) na fase de aquecimento durante o incêndio, reduzindo o impacto negativo das altas temperaturas nos elementos estruturais e de compartimentação. A redução foi mais significativa para a carga de incêndio mais baixa, mostrando que a interação entre os fatores carga de incêndio e grau de ventilação pode ser determinante para a evolução da temperatura na fase de aquecimento. Os resultados mostraram também que a presença do sistema de *sprinklers* provocou a redução considerável da quantidade de energia térmica gerada durante o incêndio, o que poderia reduzir substancialmente os danos aos elementos construtivos. A modelagem de curvas paramétricas, utilizando uma ferramenta computacional de acesso livre, mostrou ser um método simplificado que permite testar diferentes cenários e obter estimativas mais próximas a um cenário real de incêndio, no entanto, como a mudança em qualquer um dos parâmetros de modelagem implicará na alteração dos resultados, os parâmetros de entrada devem reproduzir fielmente o cenário a ser estudado. Como sugestões de trabalhos futuros segure-se a modelagem de outros cenários de incêndio em diferentes compartimentos, testando diferentes níveis para as variáveis utilizadas, assim como, a verificação das estruturas e elementos de compartimentação comparando o método de curvas paramétricas com o incêndio padrão ISO 834.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14432: **Exigências de resistência ao fogo dos elementos construtivos das edificações**. Rio de Janeiro, 2001.

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



Especialização em Engenharia de Segurança Contra Incêndios

www.ufrgs.br/esci
(2020)

COSTA, C.N.; SILVA, V.P. **Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio.** NUTAU-Seminário Internacional-USP. São Paulo: 2006.

DRYSDALE, D. **An Introduction to fire dynamics.** 3rd. ed. Chichester(U.K.): John Wiley & Sons ltd, 2011.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1991-1-2: EUROCODE 1: **Actions on structures - part 1.2: general actions – actions on structures exposed to fire,** Norma portuguesa, LNEC, 2010.

FINESOFTWARE. FIN EC – Parametrical Temperature Curve. Versão 2020.5. Disponível em: <https://www.finesoftware.eu/download/demo/#tab-1>. Acesso em: 28 de Outubro de 2020.

JUNIOR, A.L. M; MOLINA, J.C., **Considerações de interesse sobre a avaliação em laboratório de elementos estruturais em situação de incêndio: contribuição à revisão da NBR5628: 2001,** São Paulo: 2012

NEGRISOLO, W. et al **.Fundamentos de segurança contra incêndio em edificações proteção passiva e ativa, FSCIE – PPA,** São Paulo: FUNDABOM, FIREX educação, 2019.

SILVA,V.P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio, conforme ABNT NBR 15200:2012,** São Paulo: Blucher,2012.

SILVA, V. P.; VARGAS,M.R.; ONO,R.; **Prevenção contra incêndio no projeto de arquitetura, Manual de Construção em aço,** Rio de Janeiro: IABr/CBCA,2010.