

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO NUMÉRICO SOBRE O ESPALHAMENTO DO FOGO EM UM DEPÓSITO  
INDUSTRIAL

por

Lucas Klöckner Boaz

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2021

## CIP - Catalogação na Publicação

Klöckner Boaz, Lucas

ESTUDO NUMÉRICO SOBRE O ESPALHAMENTO DO FOGO EM UM  
DEPÓSITO INDUSTRIAL / Lucas Klöckner Boaz. -- 2021.

25 f.

Orientador: Felipe Roman Centeno.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Simulação Numérica. 2. FDS. 3. Incêndio em  
Armazém. 4. Prevenção de Incêndio. I. Roman Centeno,  
Felipe, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Lucas Klöckner Boaz

ESTUDO NUMÉRICO SOBRE O ESPALHAMENTO DO FOGO EM UM DEPÓSITO  
INDUSTRIAL

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Sérgio Frey

Prof. Dr. Diogo E.V. Andrade

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, maio de 2021.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e ao meu irmão por todo suporte proporcionado durante a graduação e aos meus colegas de curso pelos desafios e pelas vitórias. E claro, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo ensino de qualidade.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

ESTUDO NUMÉRICO SOBRE O ESPALHAMENTO DO FOGO EM UM  
DEPÓSITO INDUSTRIAL

**Boaz, Lucas Klöckner**  
[lucaskboaz@gmail.com](mailto:lucaskboaz@gmail.com)

**Resumo.**

*O estudo de incêndios é um processo muito importante para as áreas de engenharia e de segurança industrial, permitindo encontrar os principais fatores que causam, aumentam e reduzem o fogo. Assim, é possível identificar soluções para instalações industriais e construções civis, prevenindo acidentes, principalmente com o uso de softwares que permitem desenvolver pesquisas que embasam essas soluções. O presente trabalho tem como objetivo comparar um caso numérico-experimental de incêndio em prateleiras de um depósito industrial com o software FDS (Fire Dynamics Simulator) e, a partir do código criado, desenvolver estudos para analisar modificações que reduziriam os impactos do incêndio. Para isso, foi utilizado um estudo experimental disponível na literatura para criar e comparar a simulação. Com o caso comparado, são feitas alterações de espaçamento entre paletes e de acionamento de sprinklers conforme as normas existentes. Este estudo demonstra que o aumento do espaçamento entre prateleiras e o acionamento de sprinklers conduziram a reduções em temperaturas e fluxos de calor, os quais seriam benéficos para reduzir o espalhamento do fogo.*

**Palavras-chave:** Simulação numérica, FDS, incêndio em armazém, prevenção de incêndio.

**Abstract.**

*The study of fires is a very important process for the areas of engineering and industrial safety, allowing to find the main factors that cause, increase and reduce fire. Thus, it is possible to identify solutions for industrial installations and civil construction, preventing accidents, mainly with the use of software that allows the development of research that supports these solutions. The present work aims to compare a numerical-experimental case of fire on shelves in an industrial warehouse with the FDS (Fire Dynamics Simulator) software and, based on the code created, to develop studies to analyze changes that would reduce the impacts of the fire. For this, an experimental study available in the literature was used to create and compare the simulation. With the case compared, changes are made to the spacing between pallets and to the sprinkler activation according to the existing standards. This study demonstrates that the increase in spacing between shelves and the activation of sprinklers led to reductions in temperatures and heat flows, which would be beneficial in reducing the spread of fire.*

**Keywords:** Numerical simulation, FDS, warehouse fire, fire prevention.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO DO PROBLEMA .....	1
2.1. O SOFTWARE FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS) .....	1
2.2. TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR (HRR) .....	2
3. METODOLOGIA.....	4
3.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	4
3.2. COMPARAÇÃO NUMÉRICA.....	5
3.3. ESTUDO DE MALHA .....	6
3.4. ESTUDOS DE CASO: MODIFICAÇÕES NO CASO ORIGINAL .....	7
4. RESULTADOS .....	9
4.1. COMPARAÇÃO NUMÉRICA.....	9
4.2. ESTUDO DE CASO: MODIFICAÇÕES EM UM RACK.....	10
4.3. MODIFICAÇÕES EM TRÊS RACKS .....	11
4.4. ESTUDO DE CASO: INFLUÊNCIA DO AFASTAMENTO ENTRE PALETES.....	13
5. CONCLUSÃO.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
ANEXO A .....	16
APÊNDICE A .....	16

## NOMENCLATURA

Símbolos		
u	Velocidade	m/s
t	Tempo	s
p	Pressão	Pa
$\dot{m}_b'''$	Taxa de Perda de Massa	kg/(m <sup>3</sup> .s)
hs	Entalpia	J
g	Aceleração Gravitacional	m/s <sup>2</sup>
f	Fator RAMP	
Letras Gregas		
$\rho$	Massa Específica	kg/m <sup>3</sup>
$\alpha$	Taxa de Crescimento do Incêndio	kW/s <sup>2</sup>
Abreviaturas		
FDS	Fire Dynamics Simulator	
CO	Monóxido de Carbono	
CFD	Computational Fluids Dynamics	
LES	Large Eddy Simulation	
HRR	Heat Release Rate	kW
MRR	Mass Release Rate	kg/s
HRRPUA	Heat Release Rate per Unit Area	kW/m <sup>2</sup>
NFPA	National Fire Protection Association	
T	Transversal	
L	Longitudinal	

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comportamento <i>t-Squared</i> da Taxa de Crescimento do Incêndio até a ignição efetiva de 1.055kW. Fonte: Adaptado de NFPA 92B, 2009. ....	3
Figura 2: (a) Desenho técnico da estrutura e dos paletes. Fonte: Desenho autoral no AutoCAD 2021. (b) Visão traseira da estrutura no experimento. Fonte: (YANG;TAN;XIN,2011). (c) Geometria da simulação. Fonte: Imagem autoral do FDS SmokeView.....	4
Figura 3: Comportamento do HRR na Simulação do Artigo Base e na Taxa de Crescimento Ultra Rápido. Fonte: (YANG;TAN;XIN,2011) adaptado. ....	5
Figura 4: Volumes de 1000 cm <sup>3</sup> da 3ª Malha simulada. Fonte: Autoral (FDS SmokeView).....	6
Figura 5: Desenho esquemático dos espaçamentos em estruturas de armazenagem. ....	7
Figura 6: (a) Desenho da estrutura com três <i>racks</i> , sem espaçamento e com <i>sprinklers</i> . ....	8
Figura 7: Resultados comparativos entre experimento, simulação do artigo base e malhas da simulação autoral: (a) TC1; (b) TC2; (c) TC2; (d) HRR. Fonte: Autoral. ....	9
Figura 8: Comparativo entre os principais resultados do HRR para o estudo de caso. Fonte: (YANG;TAN;XIN,2011) adaptado. ....	10
Figura 9: Resultados comparativos da simulação autoral com modificações de distanciamento e acionamento de sprinklers: (a) TC1; (b) TC2; (c) TC2; (d) HRR. Fonte: Autoral.....	10
Figura 10: Resultados comparativos da simulação com três racks e modificações de distanciamento e acionamento de sprinklers: (a) TC1; (b) TC2; (c) TC3; (d) T3A; (e) T3B; .	12
Figura 11: (a) Tempo de ignição (s) vs Afastamento entre caixas (m). Fonte. Autoral. (b) Tempo de ignição (s) vs Fluxo de Calor (kW/m <sup>2</sup> ). Fonte: Autoral. ....	13
Figura 12: Simulação com 284s e 2m de afastamento. Fonte: Autoral (FDS Smoke View)...	13

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tempo para a Taxa de Crescimento do Incêndio alcançar 1.055 kW segundo a NFPA. Fonte: Adaptado de NFPA 92B, 2009. ....	3
Tabela 2: Propriedades e materiais do problema. Fonte: Autoral. ....	5
Tabela 3: Taxa de Crescimento ( $\alpha$ ) em diferentes categorias de combustíveis. Fonte: Adaptado de Dusso et al (2016). ....	5
Tabela 4: Comparativo entre os resultados do Experimento do Artigo Base e das Malhas do código autoral. Fonte: Autoral. ....	7
Tabela 5: Comparativo dos impactos causados pelas modificações na simulação autoral (com um rack). Fonte: Autoral. ....	11
Tabela 6: Comparativo dos impactos causados pelas modificações na simulação autoral (com três racks). Fonte: Autoral. ....	12

## 1. INTRODUÇÃO

O avanço da ciência favoreceu o crescimento de tecnologias e atividades que impulsionaram diversas descobertas, como a eletricidade e o motor à combustão, permitindo o desenvolvimento da humanidade. Todavia, tais avanços trouxeram riscos para o ser humano quando utilizados de forma equivocada, como o incêndio. Exemplos desse problema ocorreram em Santa Maria/RS com a Boate Kiss (2013) e no Rio de Janeiro/RJ com o Museu Nacional (2018). Com isso, surgem grandes desafios e oportunidades: utilizar todo o avanço tecnológico citado, como softwares de simulação, para auxiliar na prevenção de incêndios.

Os pesquisadores (WU; ZHANG; ZHU, 2011) analisaram um armazém logístico com o intuito de identificar os riscos do local caso ocorresse um incêndio. Utilizando o software Fire Dynamics Simulator (FDS) eles conseguiram analisar as condições de temperatura, concentração de CO e a visibilidade da fumaça, identificar que o tempo seguro para uma pessoa ficar nesse cenário era de 844s, ou seja, as rotas de fuga e demais normas de segurança deviam permitir a evacuação nesse tempo e concluíram que a estrutura de aço é efetiva, já que a temperatura máxima da simulação não ultrapassou a limite do material. Além disso, encontraram oportunidades na estrutura do local para permitir o trabalho das equipes de resgate e facilitar a ventilação nas rotas de fuga.

Segundo (DING; KHAN; JI, 2020), o incêndio é a principal ameaça da propriedade e da vida em armazenagens industriais, como estoques de combustível, plástico e madeira. Além disso, são locais de alta densidade de materiais que permitem o espalhamento do fogo. Com o estudo, conseguiram identificar, usando o método “*Bow Tie*”, as principais formas de evitar, prevenir, controlar e mitigar os incêndios, destacando o uso de sistemas de supressão (sprinklers) e de detecção (sensores e alarmes).

Em um estudo, (YE *et al.*, 2016) utilizaram o FDS para estudar diferentes modelos de ativação de sprinklers em grandes construções comerciais. Foram analisadas situações com e sem o uso de supressão do incêndio, observando calor liberado, temperatura, fumaça e tempo de evacuação. Com os resultados obtidos, foi concluído que o uso de sprinklers consegue suprimir a evolução do incêndio no estágio inicial, aumentando o tempo disponível para evacuação. Além disso, a mudança de materiais e de layout do ambiente também contribuem para reduzir os impactos do fogo.

Com base nos diferentes estudos sobre incêndio apresentados, tanto do uso de simulações numéricas quanto da grande complexidade em armazéns, o objetivo deste trabalho é comparar um estudo numérico-experimental de uma estrutura de armazenagem (rack) pegando fogo com um código autoral no software FDS, simular diferentes configurações de caso, como distância entre prateleiras e uso de sprinklers, e analisar os impactos no incêndio, como calor liberado e temperatura.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO DO PROBLEMA

### 2.1. O SOFTWARE FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS)

O software *Fire Dynamics Simulator* é um CFD que resolve as equações de Navier-Stokes com baixa velocidade ( $Ma < 0.3$ ) para simular o comportamento da fumaça e do calor utilizando o método numérico de volumes finitos. Sua principal aplicação ocorre na resolução de problemas práticos de engenharia, como a reconstituição de acidentes, experimentos e nos estudos sobre combustão e dinâmica de incêndios. O software utiliza o método LES (do inglês: *Large Eddy Simulation*) e, com isso, o uso de malhas simples e uniformes são preferíveis, resultando em sistemas cartesianos com três dimensões. As principais equações resolvidas pelo

FDS seguem de 1 a 3, respectivamente: continuidade (onde  $\rho$  representa a massa específica,  $u$  a velocidade e  $t$  o tempo), momentum (onde  $p$  indica a pressão,  $\dot{m}_b''' u_{b,i}$  o efeito de pirólise e  $f_{d,i}$  as partículas Lagrangianas) e conservação de energia (onde  $h_s$  é a entalpia sensível,  $\dot{q}'''$  a taxa de calor liberado por unidade de volume,  $\dot{q}_b'''$  a energia transferida às partículas e  $\dot{q}''$  ao fluxo de calor radiativo, condutivo e difusivo).

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho u_i u_j = - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + f_{d,i} + \dot{m}_b''' u_{b,i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s u) = - \frac{D\bar{p}}{Dt} + \dot{q}''' + \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{q}'' \quad (3)$$

O simulador permite que o usuário utilize diversos tipos de condições de entrada (temperatura, calor específico, densidade de fumaça, entre outras) e métodos de controle (sprinklers, termopares, detectores de fumaça, entre outras). A taxa de queima do combustível pode ser implementada de duas formas: Pirólise Simples, onde a taxa de queima é prescrita pelo usuário, ou Complexa, na qual a taxa de queima é resolvida pelo programa. A primeira é utilizada quando a queima é controlada com os dados de taxa de calor liberado (HRR, *Heat Release Rate*) ou taxa de massa queimada (MLR, *Mass Loss Rate*), ou seja, a taxa de massa queimada pela substância é conhecida. A segunda ocorre quando o combustível possui mais parâmetros, como um líquido que libera vapor, ou não se sabe o comportamento do mesmo, sendo necessário informar as concentrações de carbono, oxigênio e demais moléculas envolvidas.

## 2.2. TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR (HRR)

A taxa de calor liberada (*Heat Release Rate*) é comumente prescrita em simulações que empregam Pirólise Simples, onde o objetivo é analisar o comportamento da fumaça e do fogo no incêndio. Nesse caso, o valor da taxa de calor liberado é especificado para uma superfície sólida, como um fluxo de massa de combustível, sendo normalmente atrelado a uma unidade de área (kW/m<sup>2</sup>), chamado de HRRPUA (*Heat Release Rate Per Unit Area*).

Todavia, a liberação de calor em um incêndio não ocorre de forma linear e com o valor máximo desde o início da ignição, devido ao desenvolvimento do fogo nos seus estágios iniciais. Para isso, o FDS permite adicionar o comando “RAMP” que controla o HRRPUA liberado em função do tempo de acordo com um fator ( $f$ ) que varia entre 0 e 1. Segundo a NFPA (*National Fire Protection Association*), o crescimento citado do HRR pode ser expresso pela Equação (4), onde  $Q$  equivale ao HRR,  $\alpha$  ao coeficiente de crescimento do incêndio,  $t_t$  ao tempo total e  $-t_g$  (Equação 5) ao tempo após a ignição efetiva. A Tabela 1 apresenta  $t_g$ , o tempo necessário para o incêndio alcançar o valor de 1.055 kW que representa o momento de ignição efetiva, e a classificação dos 4 tipos de crescimento de incêndio, conforme a norma NFPA 92B.

$$Q = \alpha \cdot t^2 \quad (4)$$

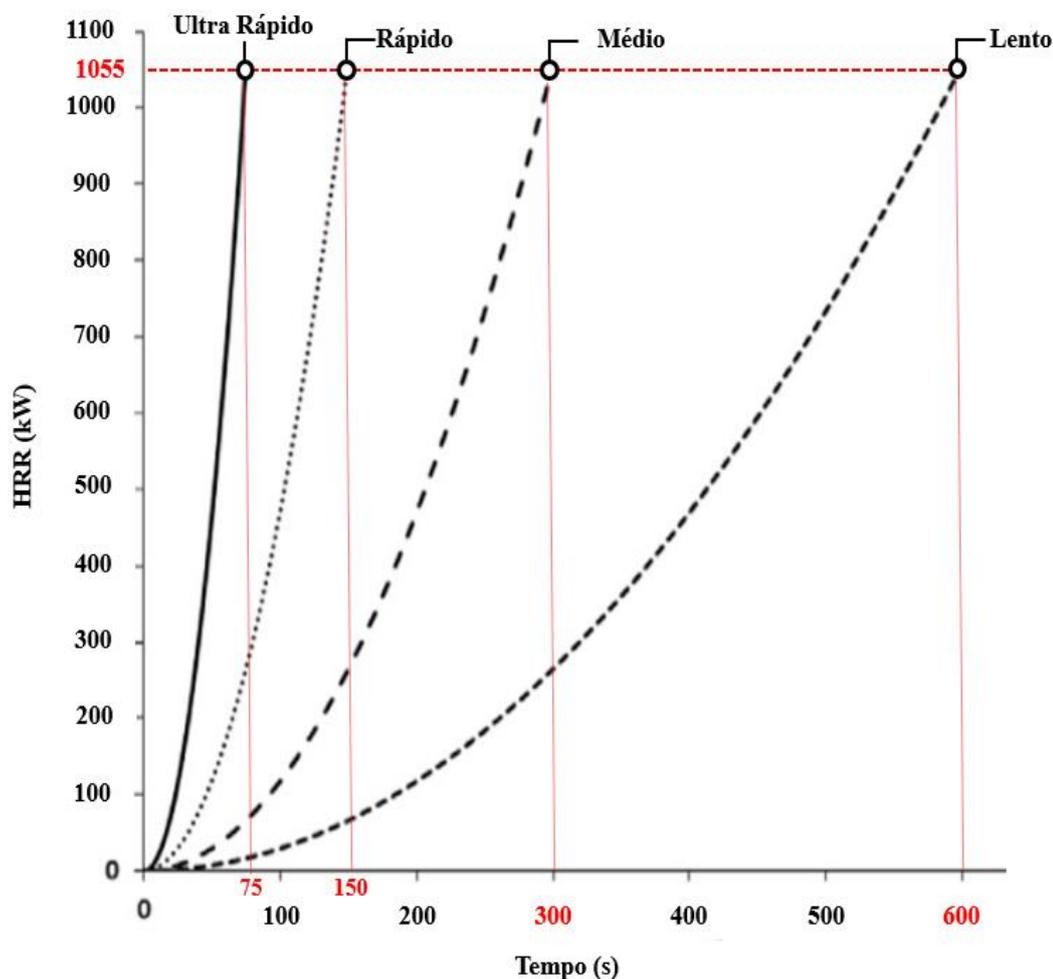
$$t = t_t - t_g \quad (5)$$

Tabela 1: Tempo para a Taxa de Crescimento do Incêndio alcançar 1.055 kW segundo a NFPA. Fonte: Adaptado de NFPA 92B, 2009.

Classificação	$t_g$ (s)	$\alpha$ (kW/s <sup>2</sup> )
Ultra Rápido	75	0,1876
Rápido	150	0,0469
Médio	300	0,0117
Lento	600	0,0029

O incêndio segue o crescimento de uma função quadrática, onde o tempo é a variável responsável por esse comportamento, também chamado de “*t-squared fire*”. Esse desenvolvimento do fogo pode ser visto como uma taxa de calor por unidade de área (HRRPUA) constante pela superfície dos materiais que se propaga de forma circular e aumenta com o raio ao quadrado. A Figura 1 apresenta as classificações de incêndio conforme a NFPA e as suas curvas, exemplificando a Tabela 1. Esses resultados foram obtidos de diversos experimentos em diferentes materiais e cenários.

Figura 1: Comportamento *t-Squared* da Taxa de Crescimento do Incêndio até a ignição efetiva de 1.055kW. Fonte: Adaptado de NFPA 92B, 2009.



### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Um dos principais desafios de uma simulação numérica é garantir que os resultados encontrados estejam de acordo com a realidade. Para isso, o primeiro passo é comparar o código com os resultados de um experimento. No presente estudo, foi utilizada a pesquisa numérica-experimental de (YANG; TAN; XIN, 2011) como base e o software FDS. Apesar dos autores terem também utilizado o software FDS nas simulações de seus estudos, o código não foi disponibilizado. Então foi feita uma simulação com base nas informações fornecidas na pesquisa e na literatura.

O problema em estudo tem como base um acidente ocorrido na China em 2008 onde um estoque de materiais com mais de 3.800m<sup>2</sup> incendiou. A análise experimental foi realizada em uma estrutura que não foi destruída, onde foram adicionados 3 sensores de temperatura (TC1, TC2 e TC3) para coletarem dados e utilizados na comparação da modelagem computacional. As Figuras 2(a), 2(b) e 2(c) apresentam, respectivamente, o desenho, o experimento e a simulação do código autoral deste trabalho e a Tabela 2 mostra as propriedades do problema. A estrutura de ferro continha paletes de poliestireno (1,1m x 1,1m x 0,15m) com caixas de papelão (0,5m x 0,5m x 0,5m) preenchidas de plástico e a ignição ocorreu na caixa frontal do primeiro pallet junto ao chão. O valor de HRRPUA foi usado como dado de entrada e variado até que os resultados tivessem um comportamento semelhante com o experimento. Após vários testes, um HRRPUA de 55.000 kW/m<sup>2</sup> foi selecionado para que o fogo tivesse o desenvolvimento do estudo. As condições de contorno usadas foram laterais abertas, teto e piso fechados e adiabáticos, temperatura inicial 31 °C e estrutura de ferro não combustível.

Figura 2: (a) Desenho técnico da estrutura e dos paletes. Fonte: Desenho autoral no AutoCAD 2021. (b) Visão traseira da estrutura no experimento. Fonte: (YANG;TAN;XIN,2011). (c) Geometria da simulação. Fonte: Imagem autoral do FDS SmokeView.

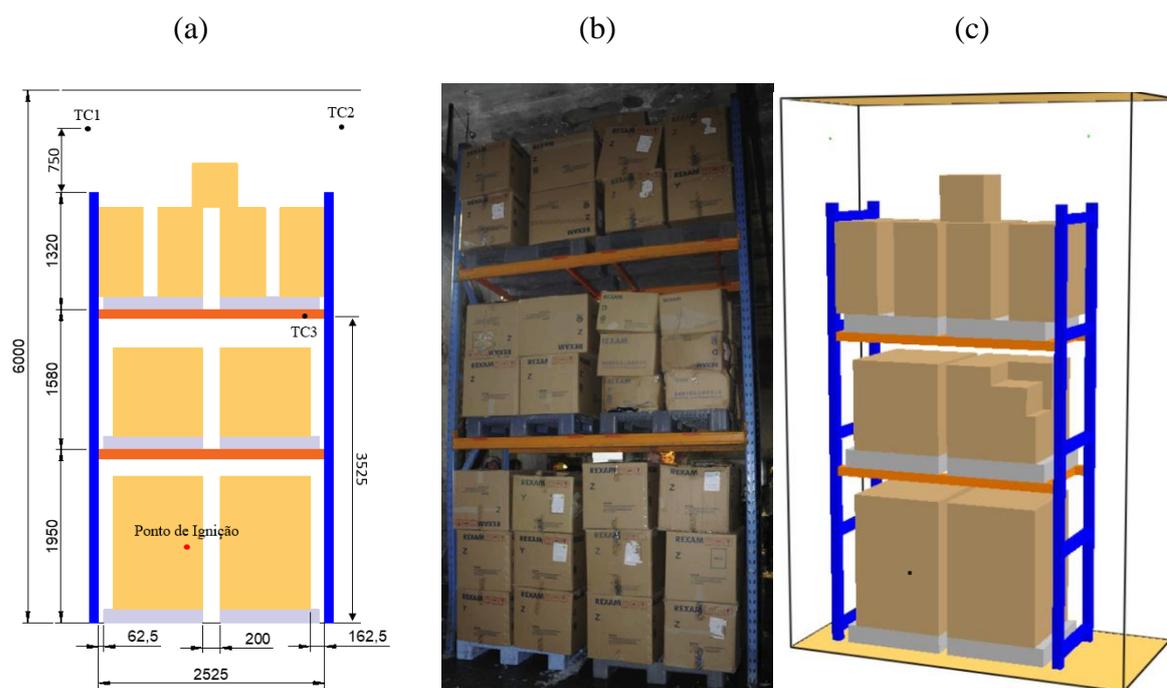


Tabela 2: Propriedades e materiais do problema. Fonte: Autoral.

Objeto	Material	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	HRRPUA (kW/m <sup>2</sup> )
Estrutura/Prateleiras	Aço	7.600	(não combustível)
Paletes	Poliestireno	300	1.000
Caixas	Papelão e PET	170	55.000

### 3.2. COMPARAÇÃO NUMÉRICA

Os critérios utilizados para comparar o código autoral criado foram a comparação dos pontos de medição de temperatura TC1, TC2 e TC3 durante 300 s e o HRR em 360 s (Figura 3). Para isso, primeiramente foi necessário entender qual a classificação da Taxa de Crescimento do Incêndio (Tabela 1). Seguindo a Tabela 3 de (DUSSO; GRIMAZ; SALZANO, 2016), é possível determinar o tipo de propagação do fogo com base nos materiais envolvidos.

Figura 3: Comportamento do HRR na Simulação do Artigo Base e na Taxa de Crescimento Ultra Rápido. Fonte: (YANG; TAN; XIN, 2011) adaptado.

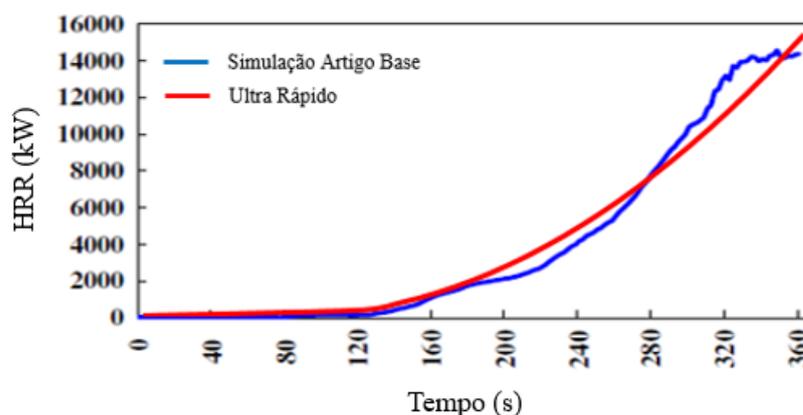


Tabela 3: Taxa de Crescimento ( $\alpha$ ) em diferentes categorias de combustíveis. Fonte: Adaptado de Dusso et al (2016).

Tipos	Características (Combustível/Geometria)	Exemplos	$\alpha$ Taxa de Crescimento
1	Madeira, Materiais Espessos: >20mm)	Móveis, livros	Lento
2	Madeira, Materiais Finos: <=20mm)	Papelão, caixas, paletes de madeira	Rápido/Ultra Rápido
3	Eletrônicos	Computador, impressora, lavadora	Lento/Médio
4	Materiais Plásticos	Sofás, colchões, cadeiras	Médio/Rápido
5	Materiais Plásticos (Finos)	Mobília (cortinas, cadeiras, caixas)	Rápido/Ultra Rápido
6	Materiais de cozinha	Óleo, "Snacks" (Chips)	Rápido/Ultra Rápido

Analisando os materiais do estudo presentes na Tabela 2 e os tipos de combustíveis na Tabela 3, conclui-se que o problema se caracteriza por uma Taxa de Crescimento Ultra Rápida. Em posse disso, é possível estimar o fator ( $f$ ) usado no RAMP implementado no FDS (Figura 3), o qual determina o percentual de liberação de calor conforme o incêndio evolui. Para isso, foi utilizado o resultado de  $HRR_{Artigo\ Máx.}$  (14.500 kW) e o tempo total (360s) da simulação numérica do artigo base. Com as Equações 4 e 5 e os valores de  $\alpha$  (Tabela 1) e  $t_g$  (Tabela 2) foi possível encontrar um valor de  $HRR_{Ultra\ Rápido\ Máx.}$  próximo ao do artigo de 14.708 kW. Assim, usando a Equação 6 foi possível encontrar o comportamento do RAMP para o fogo, apresentado no APÊNDICE A.

$$f = \frac{HRR(t)_{Ultra\ Rápido}}{HRR_{Ultra\ Rápido\ Máx.}} \quad (6)$$

### 3.3. ESTUDO DE MALHA

A análise da malha das simulações do código autoral foi realizada comparando os resultados obtidos nos experimentos do artigo base, mesma abordagem seguida pelos autores do artigo. Foram utilizadas 3 malhas diferentes até alcançar valores próximos aos desejados. As malhas foram feitas com volumes cúbicos iguais em todas as direções, sendo a 1ª Malha com 12cm, 2ª Malha com 11cm e a 3ª Malha com 10cm de lado. A Figura 4 representa os volumes da 3ª Malha na simulação de comparação e a Tabela 4 apresenta os resultados e as diferenças das temperaturas máximas medidas em TC1, TC2 e TC3 entre o artigo base e as simulações com diferentes malhas. Conforme a malha foi refinada, observa-se que os valores da presente simulação se aproximam dos valores experimentais, com desvios que partem de -500% para a malha mais grosseira e atingem -9% para a malha mais refinada ( $\Delta x = 10$  cm). Apesar de ainda apresentar desvios importantes entre os resultados numéricos e experimentais (atingindo até 30%) por limitações computacionais disponíveis (processador i3 e 2GB RAM), a malha com  $\Delta x = 10$  cm foi adotada para a continuidade do presente estudo. A Seção 4.1 apresenta a comparação de resultados numéricos obtidos com esta malha em relação aos dados experimentais transientes.

Figura 4: Volumes de 1000 cm<sup>3</sup> da 3ª Malha simulada. Fonte: Autoral (FDS SmokeView).

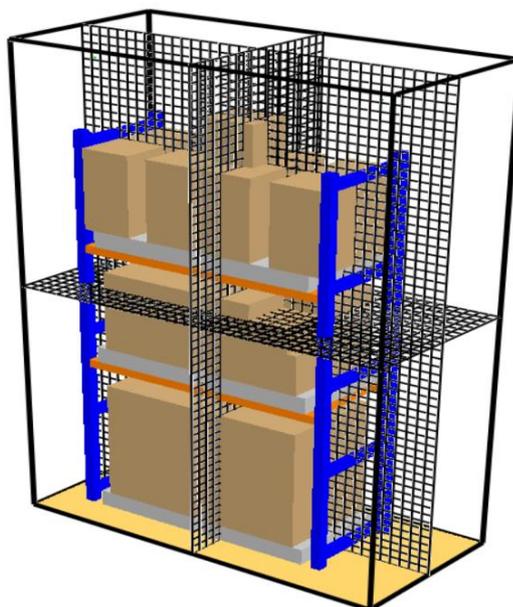


Tabela 4: Comparativo entre os resultados do Experimento do Artigo Base e das Malhas do código autoral. Fonte: Autoral.

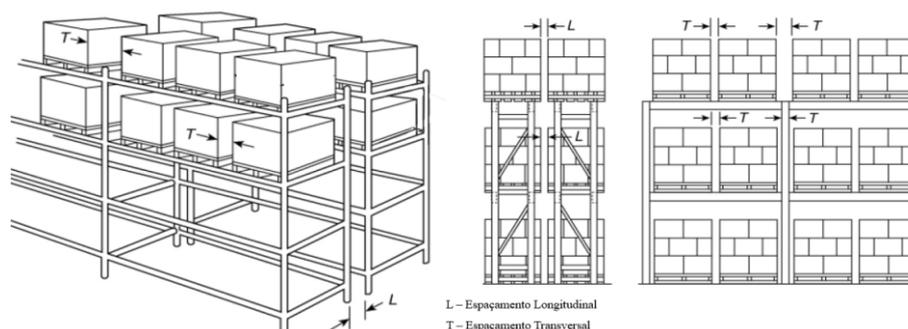
Análise	Tamanho do Volume (cm)	Número de Volumes	TC1 Máx. (°C)	TC2 Máx. (°C)	TC3 Máx. (°C)
Experimento Artigo Base	-	-	879	723	630
Malha 1	12	23.750	167,4	111	151
Diferença: Malha 1 x Experimento Artigo Base	-	-	-425%	-551%	-317%
Malha 2	11	30.834	239	236	587
Diferença: Malha 2 x Experimento Artigo Base	-	-	-268%	-206%	-7%
Malha 3	10	41.040	664	665	808
Diferença: Malha 3 x Experimento Artigo Base	-	-	-32%	-9%	22%

### 3.4. ESTUDOS DE CASO: MODIFICAÇÕES NO CASO ORIGINAL

Em posse do código autoral comparado foi possível modificar e adicionar novos cenários. Analisando o problema e as normas existentes, foi escolhido investigar os impactos em relação ao espaço entre paletes e caixas. A Figura 5 mostra os espaçamentos transversais (T) e longitudinais (L) que devem ser respeitados na montagem de estruturas de armazenagem, segundo a NFPA. Para estruturas com mais de 7,6 m de altura, as distâncias T e L devem ser de 15,24 cm, porém, para estruturas com altura menor, apenas o espaçamento transversal é o suficiente. Quando uma série de estruturas chega ao final ou não possui mais nenhuma ao seu lado, o distanciamento transversal pode ser reduzido pela metade, 7,62 cm.

Segundo a Norma, o espaçamento entre as estruturas e as cargas armazenadas é um ponto fundamental para um bom plano de prevenção de incêndio. A função deste distanciamento é permitir que o calor, a fumaça e o fogo sigam um caminho vertical pelo espaço livre e não se espalhem lateralmente, aumentando as proporções do incêndio. Além disso, a temperatura no topo do armazém aumenta mais rapidamente com o calor que sobe, permitindo que os sistemas de sprinklers tenham um tempo de reposta mais rápido e que a água liberada penetre nas estruturas pelos espaços livres, reduzindo os impactos do incêndio.

Figura 5: Desenho esquemático dos espaçamentos em estruturas de armazenagem.  
Fonte: Adaptado da NFPA (National Fire Protection Association).



O caso de estudo (Figura 2) possui três prateleiras e duas colunas de paletes. O espaço central entre as colunas possui 20 cm, 4,76 cm a mais que o necessário, porém as distâncias laterais tanto da esquerda quanto da direita possuem 6,25 cm, 1,37 cm a menos do que a norma estabelece. Além disso, as caixas nas prateleiras superiores cobrem os espaços livres, sendo o central menos prejudicado, pois tem apenas uma caixa.

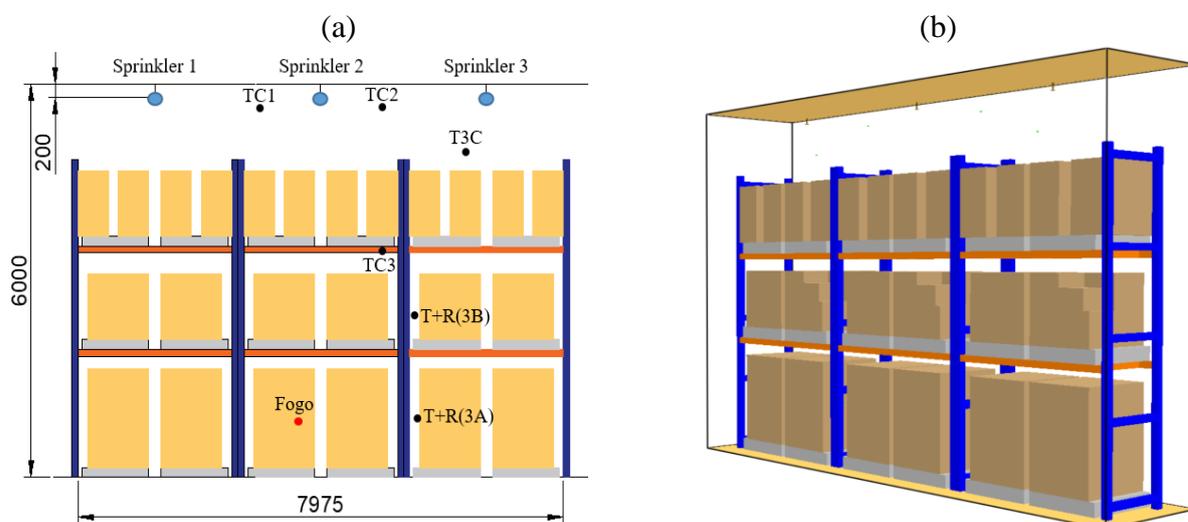
Com base nas considerações anteriores, foram utilizados dois layouts: o primeiro igual ao estudo de caso da comparação numérica (1 *rack*) e o segundo com uma estrutura nova em cada lado (3 *racks*). Para cada modelo foram possíveis quatro análises: com ou sem espaçamento e com ou sem uso de *sprinklers*. Além disso, no caso com três estruturas foram adicionados sensores de fluxo de calor e novas tomadas de temperatura (Figura 6). O caso “com espaçamento” leva em conta o ajuste das caixas laterais do andar superior, desobstruindo os espaços transversais dos lados, e dos paletes para atender o distanciamento correto proposto pela norma. A caixa superior central foi removida, pois anularia o efeito do *sprinkler* obstruindo a saída de água, prejudicando a comparação com os casos sem *sprinkler*.

Segundo Bauroth (2021) os *sprinklers* devem estar a no máximo 35,6 cm e no mínimo 15,2 cm do teto, sem obstruções e ser do tipo ESFR (do inglês *Early Suppression Fast Response*, ou Supressão Precoce e Resposta Rápida), o qual utiliza alta pressão para acionar o sistema de água. Assim, a caixa superior de cada estrutura foi retirada para não afetar o espalhamento da água e a comparação dos resultados. A vazão dos *sprinklers* de 18,3 l/min, a pressão de 1 bar e o diâmetro do bico de 13mm foram selecionados de acordo com a norma (NFPA, 2013) no ANEXO A, onde são sugeridos os parâmetros para diversas configurações de armazenagem. As demais propriedades foram usadas como recomendadas pelo guia do FDS (MCGRATTAN *et al.*, 2006), como a temperatura de acionamento de 74 °C.

Um último estudo foi realizado relacionando a distância entre os paletes ao lado do foco de incêndio com o tempo e o fluxo de calor incidente na superfície do material até o momento da ignição. Segundo (WANG *et al.*, 2020) o fluxo de calor crítico para iniciar a ignição é de 8 – 10 kW/m<sup>2</sup>, com isso as simulações foram feitas variando a distância entre as estruturas e sensores localizados nos pontos de ignição analisando a quantidade de calor recebida.

Figura 6: (a) Desenho da estrutura com três *racks*, sem espaçamento e com *sprinklers*.

Fonte: AutoCAD 2021. (b) Geometria da estrutura com três *racks*, sem espaçamento e com *sprinklers*. Fonte: Autoral (FDS SmokeView).

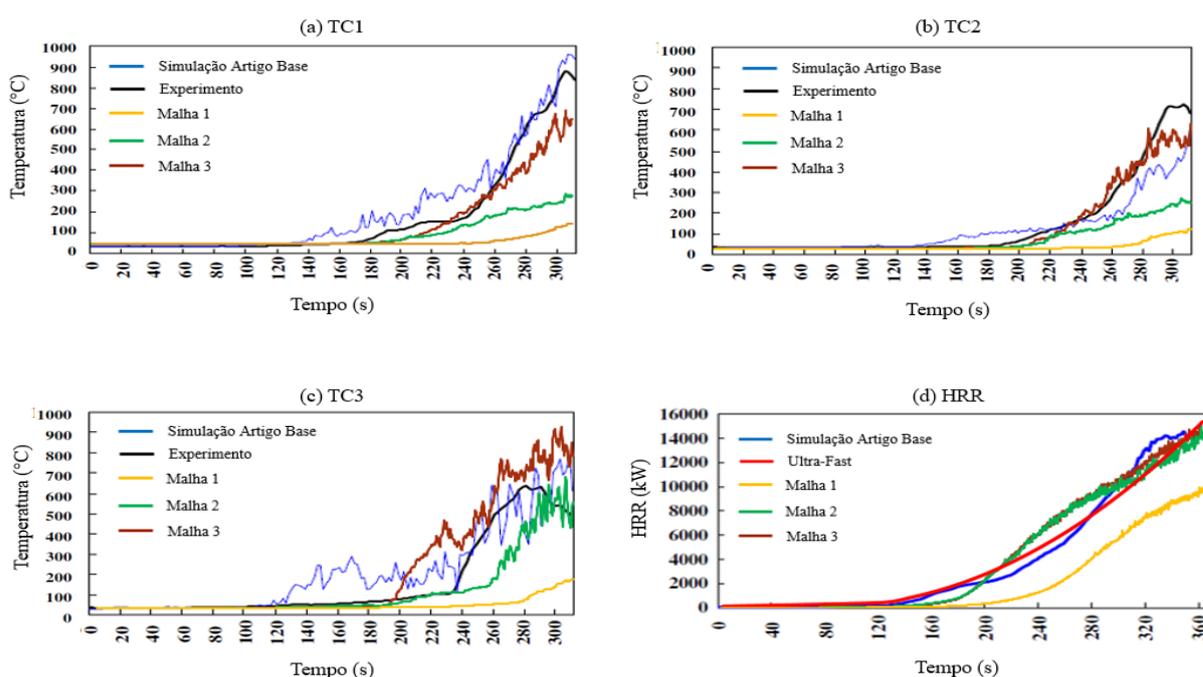


## 4. RESULTADOS

### 4.1. COMPARAÇÃO NUMÉRICA

Após a criação de trinta e seis códigos e mais de duzentas horas de simulação até atingir resultados adequados, chegou-se nos resultados do estudo. Primeiramente as análises foram feitas para comparar com o código autoral, como discutido nas Seções 3.2 e 3.3. A Figura 7 apresenta os resultados do experimento, da simulação do artigo base e das malhas da simulação.

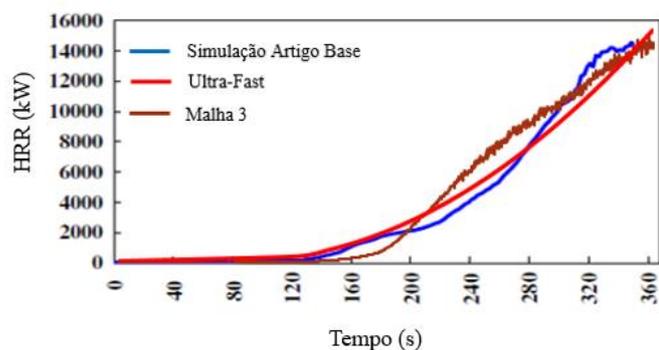
Figura 7: Resultados comparativos entre experimento, simulação do artigo base e malhas da simulação autoral: (a) TC1; (b) TC2; (c) TC2; (d) HRR. Fonte: Autoral.



As Figuras 7 (a), (b) e (c) apresentam os valores de temperatura. No ponto TC1, a malha 3 apresentou um resultado abaixo dos valores obtidos pelo experimento e pela simulação do artigo base, porém obteve um comportamento de crescimento semelhante. Nos pontos TC2 e TC3, a temperatura ultrapassou em alguns instantes os resultados de comparação e ficaram com um comportamento mais próximo para a comparação do código, usando novamente a malha 3. Isso pode ser explicado pelos resultados da malha (Tabela 4), onde ficam evidentes as diferenças nos resultados, e também pela malha ser grosseira em comparação a do artigo base, onde o valor utilizado foi de 5 cm.

A Figura 7 (d) mostra os resultados para o HRR liberado nas simulações estudadas e o comportamento do HRR calculado pela Equação (3) para determinar o RAMP de um fogo Ultra Rápido. O resultado obtido com a malha 3 foi o que mais se aproximou da simulação do artigo base, alcançando um valor máximo de 14.856 kW, 2% a mais do que o esperado, e obteve um desenvolvimento da curva (vermelho escuro) semelhante com o do artigo base (azul), onde ocorre em ambas a intersecção com a curva do comportamento Ultra Rápido e depois voltam a cruzá-la em valores próximos (Figura 8).

Figura 8: Comparativo entre os principais resultados do HRR para o estudo de caso. Fonte: (YANG;TAN;XIN,2011) adaptado.



## 4.2. ESTUDO DE CASO: MODIFICAÇÕES EM UM RACK

As próximas análises foram feitas nas modificações criadas para estudar os impactos da mudança do distanciamento e do acionamento de sprinklers. A Figura 9 e a Tabela 5 apresentam os resultados obtidos no caso com layout original (com um rack), sem a caixa superior e com ou sem as modificações.

Figura 9: Resultados comparativos da simulação autoral com modificações de distanciamento e acionamento de sprinklers: (a) TC1; (b) TC2; (c) TC2; (d) HRR. Fonte: Autoral.

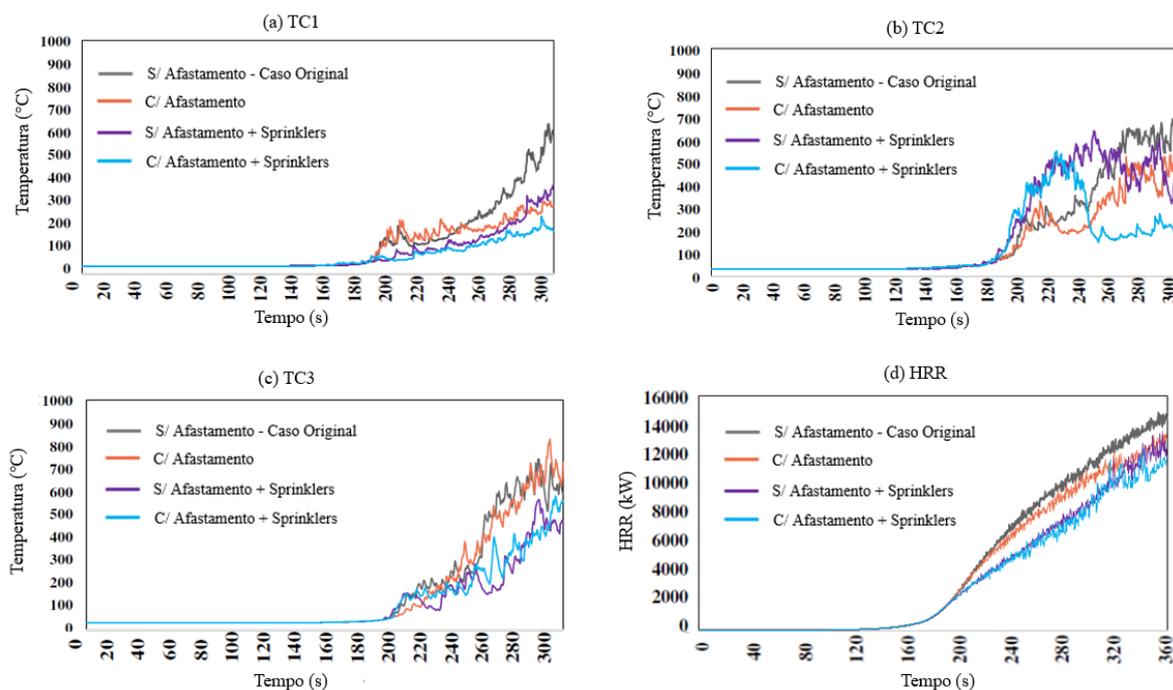


Tabela 5: Comparativo dos impactos causados pelas modificações na simulação autoral (com um rack). Fonte: Autoral.

Modificações	TC1 Máx. (°C)	TC2 Máx. (°C)	TC3 Máx. (°C)	HRR Máx. (kW)
S/ Distanciamento	941,4	984,1	911,9	14.843,8
C/ Distanciamento	621,4	588,1	908,1	13.602,6
Diferença: S/ Distanciamento x C/ Distanciamento	-51,5%	-67,3%	-0,4%	-9,1%
S/ Distanciamento + Sprinkler	803,7	704,0	764,0	13.431,0
Diferença: S/ Distanciamento x S/ Distanciamento + Sprinkler	-17,1%	-39,8%	-19,4%	-10,5%
C/ Distanciamento + Sprinkler	552,8	547,2	712,2	12.353,2
Diferença: S/ Distanciamento x C/ Distanciamento + Sprinkler	-70,3%	-79,8%	-28,0%	-20,2%

Os resultados indicam claramente a redução da temperatura e do calor liberado com a aplicação das medidas preventivas de incêndio. É interessante notar que o uso do distanciamento ou do sprinkler pode ser mais efetivo dependendo da análise. Nos pontos TC1 e TC2, os quais estão localizados mais próximos dos sprinklers e sem caixas ou paletes em cima, apenas o uso do espaçamento como medida preventiva teve mais impacto na redução de temperatura, -51,5 % e -67,3 % respectivamente, do que somente usar os sprinklers, -17,1 % e -39,8 % respectivamente. O ponto TC3, o qual fica abaixo de caixas e paletes da última prateleira, a utilização de sprinklers apresentou uma redução melhor, -19,4 %, do que o uso do distanciamento, - 0,4%. Uma provável explicação é que os pontos TC1 e TC2 são muito altos, quase na altura do sprinkler, fazendo com que o espalhamento da água não os atinja, já em TC3, como fica abaixo do sprinkler, a água consegue reduzir os impactos do fogo

Quando analisado o HRR, o qual considera um valor global do cenário, os sprinklers têm um efeito de -10,5 % contra -9,1 % do distanciamento. No caso de usar as duas medidas preventivas em conjunto, o resultado é bastante efetivo, com TC1, TC2 e TC3 reduzindo, respectivamente, -70,3 %, -79,8 % e -28 %. A quantidade de calor liberada diminuiu -20,2 %.

Um ponto importante observado é que o fogo não apagou e o incêndio continuou crescendo, mas de maneira reduzida. A principal explicação para isso é que o código foi criado com um valor de HRRPUA fixo, já que não eram conhecidos os detalhes do modelo do artigo base. Assim, as caixas e paletes liberam calor independentemente das medidas protetivas, o que é um ponto a ser aprimorado em futuras simulações deste problema.

### 4.3. MODIFICAÇÕES EM TRÊS RACKS

O estudo simulou a mesma estrutura anterior, porém com mais uma estrutura em cada lado. Os mesmos critérios anteriores de espaçamento e de sprinklers foram utilizados, todavia novos sensores de fluxo de calor foram adicionados para avaliar os impactos do fogo nas superfícies ao lado. A Figura 10 e a Tabela 6 apresentam os resultados do caso.

Novamente os resultados apresentados mostram a redução dos impactos do incêndio com a aplicação das medidas preventivas de incêndio e que a efetividade desses métodos pode variar dependendo do estudo. Os pontos TC1, TC2 e TC3 nesse estudo não tiveram um

comportamento igual ao do caso anterior, provavelmente pela influência de outros sprinklers no cenário. Os pontos T3A e R3A, sensores nos locais mais baixos das simulações, tiveram as maiores reduções, chegando a -342,1% e -175%. Os resultados de R3B (filtrados com a média móvel para retirar as flutuações e permitir uma melhor visualização) apresentam valores dentro dos descritos por (WANG *et al.*, 2020), onde os fluxos de calor críticos ficam entre 8-10 kW/m<sup>2</sup>. O HRR mais uma vez mostrou que as modificações propostas tiveram grande impacto no incêndio, sendo reduzido em -10,2 % com afastamento, -33,8 % com sprinklers e -41,4 % com as duas medidas preventivas.

Figura 10: Resultados comparativos da simulação com três racks e modificações de distanciamento e acionamento de sprinklers: (a) TC1; (b) TC2; (c) TC3; (d) T3A; (e) T3B; (f) T3C; (g) R3A; (h) R3B; (i) HRR. Fonte: Autoral.

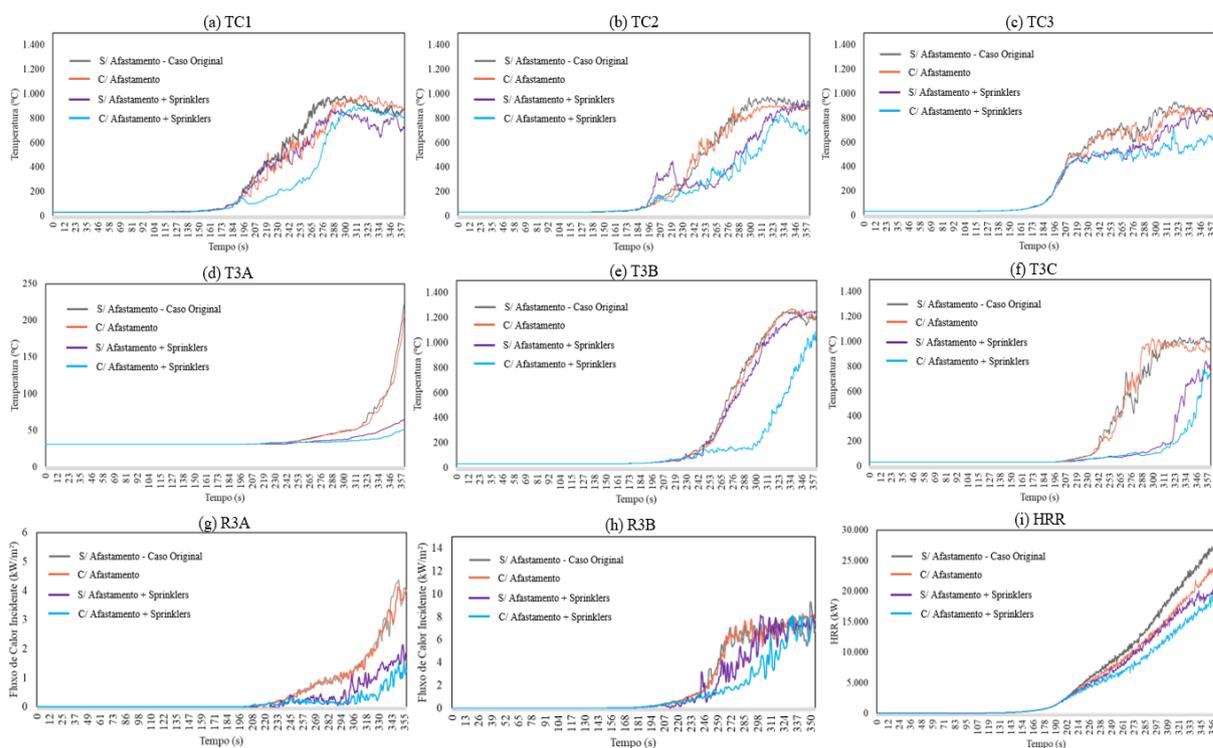


Tabela 6: Comparativo dos impactos causados pelas modificações na simulação autoral (com três racks). Fonte: Autoral.

Modificações	TC1 Máx. (°C)	TC2 Máx. (°C)	TC3 Máx. (°C)	T3A Máx. (°C)	T3B Máx. (°C)	T3C Máx. (°C)	R3A Máx. (kW/m <sup>2</sup> )	R3B Máx. (kW/m <sup>2</sup> )	HRR Máx. (kW)
S/ Distanciamento	982,2	977,0	928,9	223,5	1.252,7	1.036,7	4,40	9,40	27.515,1
C/ Distanciamento	992,2	912,9	900,9	205,1	1.269,8	1.022,3	4,10	8,20	24.960,6
Diferença: S/ Distanciamento x C/ Distanciamento	1,0%	-7,0%	-3,1%	-9,0%	1,3%	-1,4%	-7,3%	-14,6%	-10,2%
S/ Distanciamento + Sprinkler	876,3	921,5	878,0	65,1	1.250,6	844,0	2,10	8,14	20.564,5
Diferença: S/ Distanciamento x S/ Distanciamento + Sprinkler	-12,1%	-6,0%	-5,8%	-243,6%	-0,2%	-22,8%	-109,5%	-15,5%	-33,8%
C/ Distanciamento + Sprinkler	896,7	837,5	716,0	50,6	1.085,4	776,1	1,60	8,10	19.454,3
Diferença: S/ Distanciamento x C/ Distanciamento + Sprinkler	-9,5%	-16,7%	-29,7%	-342,1%	-15,4%	-33,6%	-175,0%	-16,0%	-41,4%

Importante ressaltar que da mesma forma que nas modificações com apenas um Rack, o fogo não foi extinto. Além da questão já comentada do HRRPUA fixo, outro ponto importante é que existem inúmeras variáveis que não foram consideradas e que tornam o problema complexo.

#### 4.4. ESTUDO DE CASO: INFLUÊNCIA DO AFASTAMENTO ENTRE PALETES

A última modificação no estudo foi feita para analisar os impactos do afastamento entre as estruturas com paletes, avaliando variáveis de tempo, fluxo de calor e distância. Os resultados seguem na Figura 11 e a Figura 12 ilustra a simulação.

Figura 11: (a) Tempo de ignição (s) vs Afastamento entre caixas (m). Fonte: Autoral. (b)

Tempo de ignição (s) vs Fluxo de Calor ( $\text{kW/m}^2$ ). Fonte: Autoral.

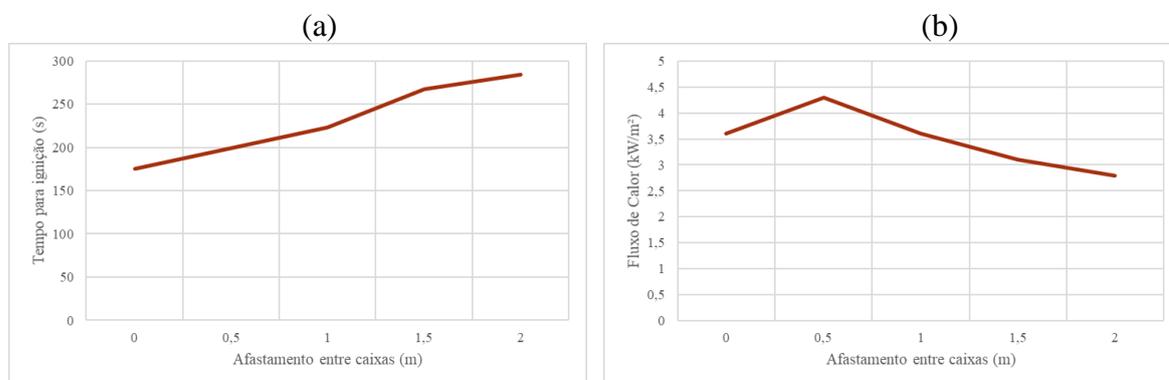
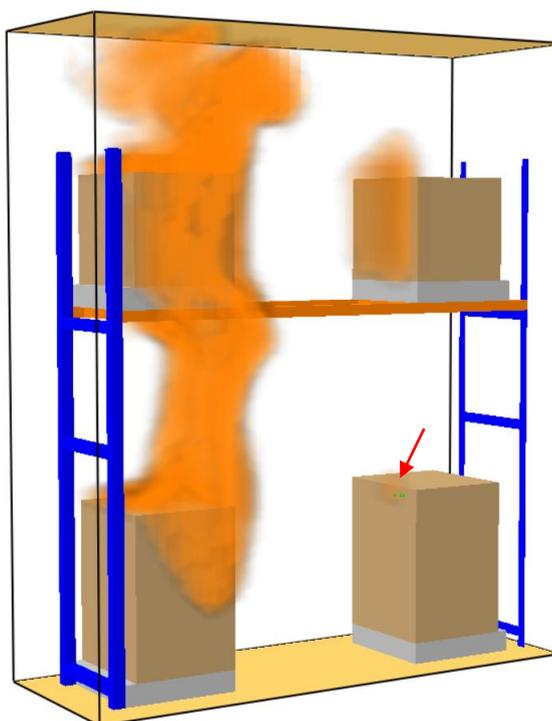


Figura 12: Simulação com 284s e 2m de afastamento. Fonte: Autoral (FDS Smoke View).



A média dos resultados de fluxo de calor é de 3,48 kW/m<sup>2</sup> no ponto onde inicia a ignição na caixa do palete adjacente. Observa-se que o valor do fluxo de calor crítico obtido numericamente não concorda com a faixa de valores disponíveis na literatura, 8-10 kW/m<sup>2</sup>, no entanto, existem diferenças entre as configurações da presente simulação e do experimento usado na literatura que podem explicar estas variações. Analisando qualitativamente os resultados numéricos, o comportamento esperado ocorre, pois com o aumento da distância o fluxo de calor diminui e o tempo para iniciar a ignição aumenta.

Além disso, a Figura 11 (b) apresenta um resultado fora do esperado em 0.5m, onde há um aumento de fluxo de calor, ao invés de redução, já que houve um afastamento. Isso pode ter ocorrido devido ao maior espaço vertical, permitindo que o fogo aumentasse sua intensidade e o fluxo de calor na vizinhança. Nos afastamentos subsequentes, o mesmo não ocorreu provavelmente porque o distanciamento lateral tem mais efeito do que o aumento da intensidade do fogo pelo espaço aberto, fazendo com que a curva decresça.

## 5. CONCLUSÃO

O trabalho apresentado teve como objetivo a comparação de um estudo numérico-experimental de um incêndio com a criação de um código no software FDS e depois criar novas simulações com cenários e configurações diferentes para analisar os impactos e efeitos na propagação do fogo. Os resultados obtidos podem ser considerados adequados, visto que foram próximos do estudo a ser comparado, apesar dos desvios de até 30% encontrados, e demonstraram que os métodos de prevenção de incêndio propostos pela NFPA podem trazer benefícios para a segurança das estruturas em depósitos e armazéns.

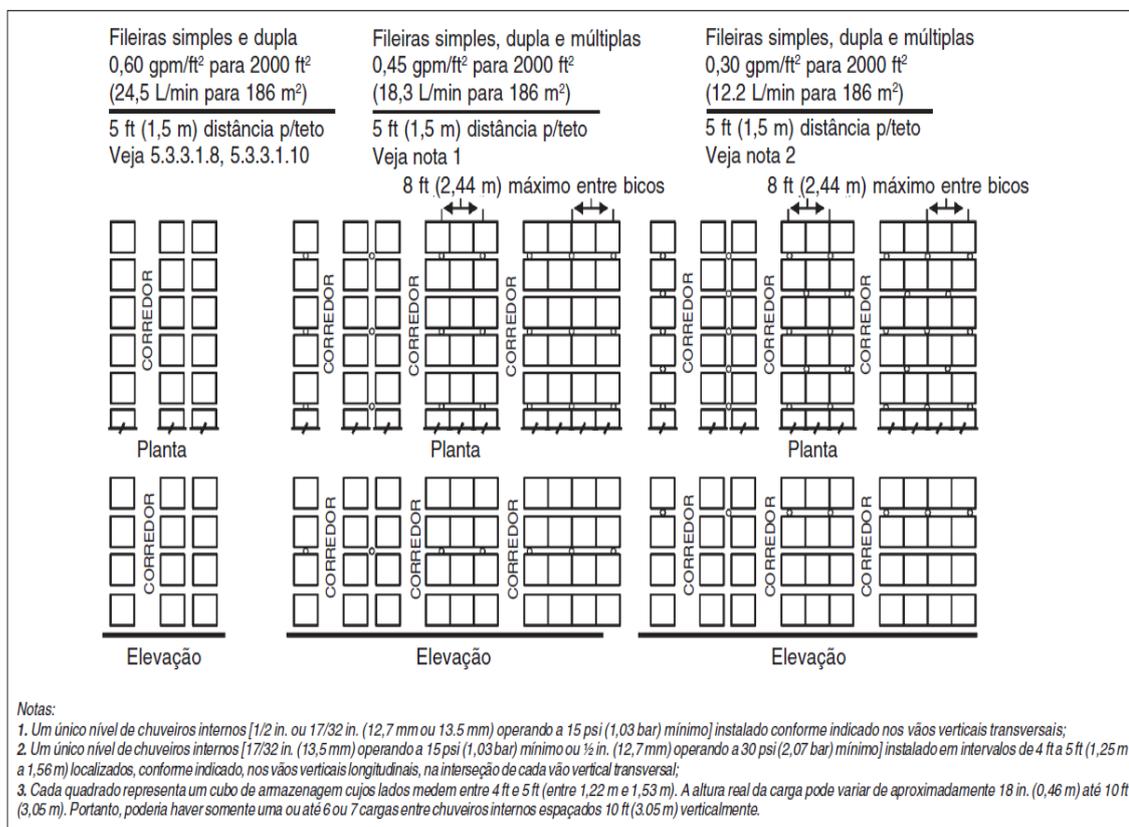
O estudo demonstrou que é possível utilizar a simulação numérica para comparar casos reais e recriar cenários diferentes que seguem os mesmos parâmetros, permitindo uma série de análises de engenharia e de segurança com o objetivo de identificar riscos, oportunidades e soluções. As modificações aplicadas evidenciaram essas possibilidades e mostraram que não são necessários grandes investimentos para aumentar a proteção contra incêndios, como colocar um sistema de sprinkler, mas a simples fiscalização de obstruções entre estruturas e insumos já traz bons resultados.

Um aprendizado importante foi que, embora a comparação de um experimento tenha resultados aceitáveis, isso não torna o código criado aplicável a qualquer outro cenário. Inúmeras variáveis mais complexas, parâmetros de entrada e condições de contorno que antes não impactavam ou eram menos expressivas podem surgir e afetar a análise de caso. Isso torna os resultados quantitativos mais difíceis de serem atingidos, mas ainda assim é possível alcançar comportamentos qualitativos satisfatórios. Assim, mesmo com uma malha relativamente grosseira (a qual recomenda-se que seja refinada em estudos futuros, de forma a aproximar os resultados numéricos dos dados experimentais), este trabalho apresenta resultados qualitativos em concordância com os fenômenos físicos que o governam, enquanto os valores quantitativos apresentados neste trabalho não devem servir de referência ou como tomada de decisão em projetos de engenharia de segurança contra incêndios ou similares.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- BOMBEIROS, C. De. It 24. [s. l.], p. 421–438, 2004.
- DING, L.; KHAN, F.; JI, J. Risk-based safety measure allocation to prevent and mitigate storage fire hazards. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 135, p. 282–293, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.01.008>
- DUSSO, A.; GRIMAZ, S.; SALZANO, E. Rapid estimation of the heat release rate of combustible items. **Chemical Engineering Transactions**, [s. l.], v. 53, p. 25–30, 2016. Available at: <https://doi.org/10.3303/CET1653005>
- MCGRATTAN, K. B. *et al.* Fire dynamics simulator (version 4): [s. l.], v. 1, p. 181, 2006. Available at: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication1018.pdf>
- NAME, S. F. Public Comment No. 4-NFPA 170-2013 [ Global Input ] National Fire Protection Association Report. [s. l.], n. 4, p. 8–11, 2013.
- WANG, Y. *et al.* Developing an experimental database of burning characteristics of combustible informal dwelling materials based on South African informal settlement investigation. **Fire Safety Journal**, [s. l.], v. 111, n. June 2019, p. 102938, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102938>
- WU, J. Q.; ZHANG, L.; ZHU, G. Q. Performance-based evaluation on the logistics warehouse. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 11, p. 522–528, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.691>
- YANG, P.; TAN, X.; XIN, W. Experimental study and numerical simulation for a storehouse fire accident. **Building and Environment**, [s. l.], v. 46, n. 7, p. 1445–1459, 2011. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.01.012>
- YE, X. *et al.* Suppression Effect of Sprinkler System on Fire Spread in Large Commercial Buildings. **Procedia Engineering**, [s. l.], v. 135, p. 455–462, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.155>
- BAUROTH, Charlie. Jornal Latino Americano NFPA: Sistemas de Sprinklers ESFR em Depósitos. Fonte: <https://www.nfpajla.org/pt/archivos/exclusivos-online/ocupaciones-industriales-almacenamiento/882-retro-instalacion-en-depositos-de-sistemas-de-rociadores-automaticos-esfr> Disponível em: <https://www.nfpajla.org/pt/archivos/exclusivos-online/ocupaciones-industriales-almacenamiento/882-retro-instalacion-en-depositos-de-sistemas-de-rociadores-automaticos-esfr>. Acessado em 03/05/21

**ANEXO A – (BOMBEIROS, 2004) NORMA NFPA 13 ADAPTADA PELO CORPO DE BOMBEIROS DO ESTADO DE SÃO PAULO (INSTRUÇÃO TÉCNICA N°24/2011 – SISTEMA DE CHUVEIROS AUTOMÁTICOS PARA ÁREAS DE DEPÓSITO).**



**APÊNDICE A – TABELA COM O COMPORTAMENTO DO HRR E DO RAMP EM FUNÇÃO DO TEMPO.**

t (s)	HRR(kw)					RAMP
	Artigo Base	Lento	Médio	Rápido	Ultra Rápido	f
0	0	0	0	0	0	0
120	200	5	19	75	300	0,0204
140	450	11	42	169	675	0,0459
160	1.000	19	75	300	1.201	0,0816
180	1.900	29	117	469	1.876	0,1276
200	2.000	42	169	675	2.701	0,1837
220	2.900	57	230	919	3.677	0,25
240	4.000	75	300	1.201	4.803	0,3265
260	5.500	95	380	1.520	6.078	0,4133
280	8.000	117	469	1.876	7.504	0,5102
300	10.300	142	567	2.270	9.080	0,6173
320	13.000	169	675	2.701	10.806	0,7347
340	14.000	198	792	3.170	12.682	0,8622
360	14.500	230	919	3.677	14.708	1