



Centro Universitário de Brasília – Uniceub

Faculdade de Tecnologia e Ciências Aplicadas- FATECS

**GABRIEL ALVES BORGES DE SOUSA**

**SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO UTILIZANDO O PROGRAMA FIRE  
DYNAMICS SIMULATOR, ESTRUTURA DE AÇO.**

BRASÍLIA

2019

GABRIEL ALVES BORGES DE SOUSA

**SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO UTILIZANDO FIRE DYNAMICS  
SIMULATOR, ESTRUTURA DE AÇO.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Civil do Centro Universitário de Brasília como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Honório Assis Filho Crispim.

BRASÍLIA

2019

GABRIEL ALVES BORGES DE SOUSA

**SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO UTILIZANDO FIRE DYNAMICS  
SIMULATOR, ESTRUTURA DE AÇO.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Civil do Centro Universitário de Brasília como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Honório Assis Filho Crispim.

Brasília, 05 de julho de 2019

Banca Examinadora

---

Engº. Civil: Dr. Honório Assis Filho Crispim  
Orientador

---

Examinador Interno

---

Examinador Externo

## **AGRADECIMENTOS**

Ao apoio da minha mãe, irmã e amigos que desde o início estiveram me apoiando e me dando força para concluir com sabedoria e perseverança um dos meus objetivos profissionais.

Ao Uniceub - Centro Universitário de Brasília que durante os cinco anos de curso me permitiu ampliar meus horizontes para melhor encarar minha vida profissional.

E ao meu professor orientador por ter me guiado e impulsionado para atingir resultados positivos tanto em meu trabalho de conclusão quanto a ensinamento que levarei para o resto da vida.

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos”.

(Isaac Newton)

## RESUMO

Com o grande crescimento da tecnologia muitos testes que ocorriam em pequena escala a fim de simular acontecimentos em escala real foram substituídos por modelos lógicos, programas de computadores. O presente trabalho irá apresentar a simulação de um incêndio em estrutura predominantemente de aço para avaliar o comportamento da mesma após o incêndio. Utilizado do programa Fire Dynamics Simulator para lançar a estrutura, uma empresa de dois pavimentos, com o propósito de colher dados e avaliar o comportamento da estrutura após o incêndio. A metodologia vem com o objetivo de coletar dados para a elaboração de uma simulação mais semelhante a realidade, mudando efetivamente o sistema construtivo. Através desta simulação foi possível avaliar que a estrutura após o incêndio perde algumas das características, mas não chega a ruína. Foi possível avaliar também que a simulação necessita de um grande tempo de processamento e de uma máquina que tenha grande poder de processamento de dados.

**Palavras-chave:** Fire simulation. Fire Dynamics Simulator. Fire in Buildings.

## **ABSTRACT**

With the great growth of technology many tests that occurred on a small scale in order to simulate events on a real scale were replaced by logic models, computer programs. The present work will present the simulation of a fire in a predominantly steel structure to evaluate its behavior after the fire. Used the Fire Dynamics Simulator program to launch the structure, a two-story company, with the purpose of collecting data and evaluating the behavior of the structure after the fire. The methodology comes with the objective of collecting data for the elaboration of a simulation more similar to reality, effectively changing the construction system. Through this simulation it was possible to evaluate that the structure after the fire loses some of the characteristics, but does not reach the ruin. It was also possible to evaluate that the simulation requires a great processing time and a machine that has great power of data processing.

**Key words:** screed, construction waste, artificial sands.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – TRIANGULO DO FOGO .....	17
FIGURA 2 – TETRAEDRO DO FOGO .....	18
FIGURA 3 – CONDUÇÃO DE CALOR.....	19
FIGURA 4 – CONDUÇÃO DE CALOR POR UMA SUPERFÍCIE.....	20
FIGURA 5 – CONVECÇÃO DE CALOR .....	21
FIGURA 6 – PROCESSOS DE CONVECÇÃO .....	22
FIGURA 7 – EXEMPLO DE RADIAÇÃO .....	24
FIGURA 8 – CURVA TEMPERATURA – TEMPO DE UM INCÊNDIO REAL .....	24
FIGURA 9 – VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE COM A TEMPERATURA .....	27
FIGURA 10 – EDIÇÃO DE TODOS OBJETOS MODELO .....	28
FIGURA 11 – SISTEMA DE AVALIAÇÃO DINÂMICO .....	28
FIGURA 12 – LOCALIZAÇÃO DE SATÉLITE SAMA PROMOÇÕES E EVENTOS..	32
FIGURA 13 – PLANTA BAIXA TÉRREO .....	33
FIGURA 14 – PLANTA BAIXA 1º PAVIMENTO .....	34
FIGURA 15 – PLANTA DE CORTE AA.....	35
FIGURA 16 – PERFIS ESTRUTURAIS GERDAU .....	35
FIGURA 17 – PERFIS METÁLICOS EM PLANTA 2D .....	37
FIGURA 18 – PERFIS METÁLICOS EM PLANTA 3D .....	38
FIGURA 19 – PERFIL DE VIGA E PILAR DETALHADO .....	38
FIGURA 20 – PLANTA DO TÉRREO 3D .....	39
FIGURA 21 – PLANTA DO 1º PAVIMENTO 3D.....	39
FIGURA 22 – DETALHAMENTO DAS CARGAS DE COMBUSTÃO NO DEPÓSITO .....	40
FIGURA 23 – VISÃO PARTE ANALISADA SITUAÇÃO 2.....	42
FIGURA 24 – PLANTA BAIXA TÉRREO – SITUAÇÃO 2 .....	43
FIGURA 25 – PLANTA BAIXA 1º PAVIMENTO – SITUAÇÃO 2.....	43
FIGURA 26 – VISÃO 3D TÉRREO – SITUAÇÃO 2 .....	43
FIGURA 27 – VISÃO 3D 1º PAVIMENTO– SITUAÇÃO 2.....	43
FIGURA 28 - PROPAGAÇÃO DO INCÊNDIO EM 6 SEGUNDOS.....	44
FIGURA 29 - PROPAGAÇÃO DO INCÊNDIO EM 12 SEGUNDOS.....	44
FIGURA 30 - PROPAGAÇÃO DO INCÊNDIO EM 18 SEGUNDOS.....	45



FIGURA 31 - DISTRIBUIÇÃO DE CALOR AO LONGO DA LÂMINA X=5,5 .....	44
FIGURA 32 – VIGA COM CARGA LANÇADA NO FTOOL. ....	47
FIGURA 33 – DEFLEXÃO A PARTIR DA VIGA.....	47
FIGURA 34 – DEFLEXÃO NA VIGA DURANTE O INCÊNDIO.....	48

## **LISTA DE TABELAS**

TABELA 1 – VALORES TÍPICOS DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO.....	23
--	----

## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ATM – Atmosfera

CBMDF – Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal

CFD – *Computer Fluid Dynamics*

FDS – *Fire Dynamics Simulator*

NIST – *The National Institute of Standards and Technology*

SMV – *Smokeview*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$q''_x$  = Fluxo térmico dado em ( $W/m^2$ );

$dT/dx$  = Gradiente de temperatura na direção X;

-K = Parâmetro de condutividade térmica

T(x) = Temperatura

T1 = Temperatura 1

T2 = Temperatura 2

$\Delta T$  = Temperatura 1 - Temperatura 2

A = Área (m<sup>2</sup>)

L = Comprimento (m)

$q_x$  = Taxa de transferência de calor (W)

Ts – Temperatura superfície

T $\infty$  - Temperatura do fluido

h – Coeficiente de transferência de calor por convecção

Eb = Taxa de energia liberada em ( $W/m^2$ )

Ts = Temperatura absoluta (K) da superfície

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann

E é a taxa de energia liberada pela superfície real em relação ao corpo negro em ( $W/m^2$ )

Ts = temperatura absoluta da superfície

$\epsilon$  = emissividade do material

K = Temperatura absoluta (Kelvin)

G abs = Energia absorvida por irradiação

G = Total de energia por irradiação incidida na superfície

P = Pressão

V = Volume de n moles de gás

q = Calor transferido para o sistema

$\omega$  = Trabalho realizado pelo sistema

F = Força

$q_v$  = Calor transferido para o volume constante do sistema

V1 = Volumes inicial

V2 = Volume final

$\Delta H$  = Entalpia

$\Delta E$  = Energia interna

$\Delta H_c$  = Calor de combustão

$\sigma$  = Tensão normal

$\tau$  = Tensão de cisalhamento

$P$  = Pressão estática

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	16
2.1 Objetivo geral.....	16
2.2 Objetivos específicos.....	16
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
3.1 Fogo.....	17
3.2 Combustão .....	18
3.3 Transferência de Calor .....	18
3.3.1 <i>Condução</i> .....	19
3.3.2 <i>Convecção</i> .....	20
3.3.3 <i>Radiação</i> .....	23
3.4 Incêndio.....	24
3.4.1 Flashover – Fase de Aquecimento.....	25
3.4.2 Pirólise .....	25
3.5 Propriedades do Aço.....	25
3.5.1 Processo de fabricação .....	25
3.5.2 Padronização ABNT .....	26
3.5.3 Propriedades dos Aços .....	26
3.6 Pyrosim .....	28
3.6.1 Fire Dynamics Simulator (FDS) e Smokeview .....	29
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	31
4.1 Estrutura.....	31
4.1.1 <i>Empresa</i> .....	31
4.1.2. <i>Localização</i> .....	31

4.2 Levantamento de dados.....	32
4.3 Plantas extraídas do AutoCAD .....	32
4.4 Estrutura de aço .....	35
5 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO.....	37
5.1 Lançamentos estruturais .....	37
5.1.1 Perfis metálicos.....	37
5.1.2 Alvenarias e Drywall.....	39
5.2 Carga de incêndio.....	39
5.3 Configuração de incêndio.....	41
5.4 Dispositivos .....	41
5.5 Processamento de dados .....	41
5.6 Segunda Situação.....	42
5.6.1 Área definida.....	42
5.5.2. Condições de contorno .....	43
6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	44
6.1 Propagação do incêndio .....	44
6.2 Distribuição de calor .....	44
6.3 Analise comportamento Viga .....	46
6.3.1 Cargas na Viga .....	46
6.3.2 Alterações devido a altas temperaturas.....	47
7 CONCLUSÃO .....	49
8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	50

## 1 INTRODUÇÃO

Estruturas de aço estão sendo cada vez mais utilizadas na construção civil e diante desta forma construtiva diversos estudos estão sendo feitos a fim de definir melhores condições de construção, benefícios e riscos que à acometem. Como um dos riscos mais importantes é tido como o calor, ou elevadas temperaturas, que faz com que o aço perca parte das características físicas principais. Com intuito de analisar a estrutura de aço diante de uma situação de incêndio, em que possua grande quantidade de calor, está pesquisa mostrará através de uma simulação de incêndio em uma estrutura de aço, sendo está uma estrutura de residência padrão.

O aço é extremamente suscetível a perda de características devido a elevada temperatura e a simulação tem como objetivo identificar o comportamento do aço em uma estrutura residencial submetida a um incêndio, previamente determinado de forma a ter uma propagação grande o suficiente para afetar ou interagir com a estrutura.

Através da utilização do Pyrosim, programa que utiliza de dois softwares sendo eles o Fire Dynamics Simulator (FDS) e o Smokeview que analisam as condições de propagação do incêndio e gases, será medida a temperatura de uma peça da estrutura. Nesta peça foi colocado sensor, no próprio programa, ao qual geram resultados segundo a segundo da evolução da temperatura na peça. A partir destes dados e com as referências bibliográficas da relação da resistência do aço com a temperatura terá resultados satisfatórios ou não.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Simular um incêndio em uma estrutura, construída predominantemente de aço, através do programa Fire Dynamics Simulator (FDS).

### **2.2 Objetivos específicos**

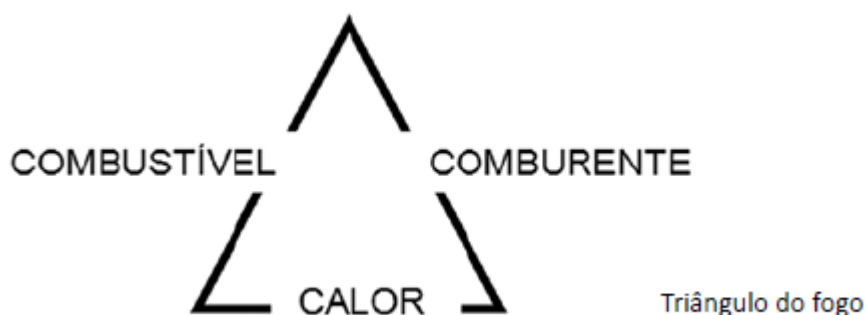
- ✓ Verificar:
  - Maior temperatura atingida;
  - Duração de incêndio;
  - Propagação do fogo;
- ✓ Analisar a estrutura de aço após incêndio;
  - Características que foram alteradas e as que permanecem
- ✓ Constatar a severidade do incêndio;
- ✓ Exigências de resistência.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Fogo

O fogo é utilizado a milhares de anos nas civilizações e é uma das principais fontes de energia na atualidade, mas apesar de se ter muita experiência com ele a comunidade científica ainda não entrou num consenso para defini-lo. O fogo é definido de diferentes formas em diversos países, mas segundo a NBR 13860 (Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 1997, p. 6) “fogo é um processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz”.

**Figura 1** – Triângulo do fogo

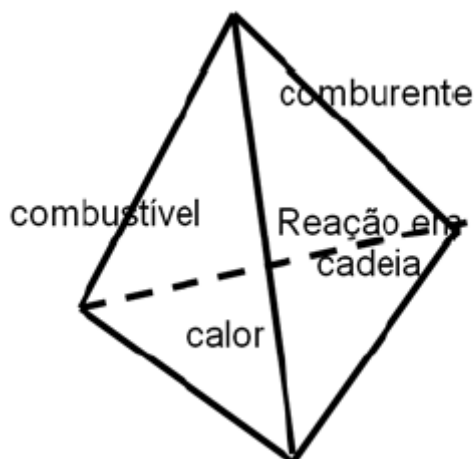


Fonte: SEITO et al, 2008

Para que se haja fogo é necessário a presença de três elementos essenciais, que são o combustível, o comburente e o calor (energia de ignição). Com a falta de um destes elementos ou mesmo a retirada de um destes o fogo entrará em extinção (SEITO et al, 2008, p. 35).

Um ponto de extrema importância para que ocorra a ocorrência do fogo é a reação em cadeia. Esta reação leva com o que os três elementos possam interagir constantemente e de forma sequencial. Seito et al, (2008) afirma que para que o fogo se mantenha os elementos combustível, comburente, calor e reação em cadeia devem coexistir ligados. Esta coexistência é conhecida como Tetraedro do Fogo.

**Figura 2 – Tetraedro do fogo**



Fonte: SEITO et al, 2008

### 3.2 Combustão

É o processo principal pelo qual as chamas (fogo) tem desenvolvimento e continuidade, associado a “Reação exotérmica de um combustível com um comburente, geralmente acompanhada de chamas e/ou brasa e/ou emissão de fumaça” NBR 13860 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997).

Ainda segundo a NBR 13860 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997) no detalhamento dos dois reagentes tem-se que combustível é todo material que capaz de queimar, madeira, gás de cozinha, plástico, etc. e o comburente é toda substancia que sustenta a combustão, que em sua maioria é o oxigênio.

Para a início desta reação tem se o calor, “energia em trânsito que flui de uma parte de um sistema para outra, ou de um sistema para outro, em virtude somente da diferença de temperatura” (ZEMANSKY, 1978, p. 75), que é a energia e/ou gatilho. A reação de combustão irá variar dependendo dos diferentes combustíveis criando diferentes reações químicas.

Outro aspecto importante ao se analisar a combustão é a temperatura na qual um combustível começa a queimar, ou temperatura de inflamação. “Para combustíveis sólidos a temperatura de inflação indica a transição entre o processo de oxidação lenta e o de combustão propriamente dita” (COSTA et al, 1977, p. 265).

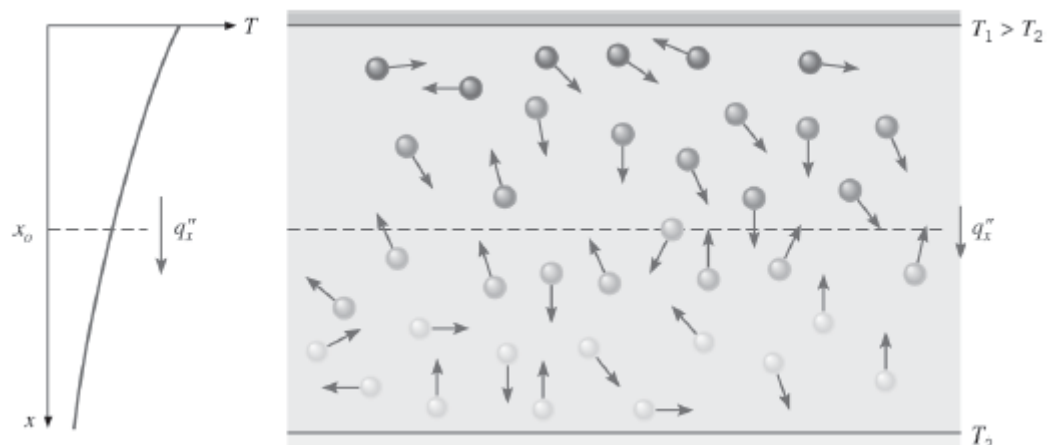
### 3.3 Transferência de Calor

Transferência de calor é movimentação de energia entre um sistema ou dois sistemas com diferentes temperaturas. A transferência ocorre através de três modos essenciais que são a condução, convecção e radiação.

### 3.3.1 Condução

“A condução pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido as interações das partículas” (BERGMAN et. al, 2017). Com energias moleculares mais altas, ou temperaturas mais altas, há a necessidade no sistema de entrar em equilíbrio levando estas moléculas serem levadas para a parte do sistema em que as energias moleculares sejam menores, temperaturas menores.

**Figura 3 – Condução de calor**



Fonte: BERGMAN et. al, 2017

Alguns exemplos deste modo de condução são: as paredes externas de uma casa em um dia quente de verão, nelas a temperatura exterior da parede é conduzida para a parte de interior da parede, quando uma colher é colocada em um líquido quente, a parte submersa da colher conduz a temperatura para a parte não submersa, etc.

O processo de transferência de calor pode ser quantificado através de equações de taxa. Na condução a equação de taxa é conhecida como lei de Fourier.

$$\text{Equação 1 - } q'' = -k \frac{dT}{dx}$$

ou ainda

$$\text{Equação 2 - } q'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = -k \frac{\Delta T}{L}$$

Onde:

$q''$  = fluxo térmico, (W/m<sup>2</sup>);

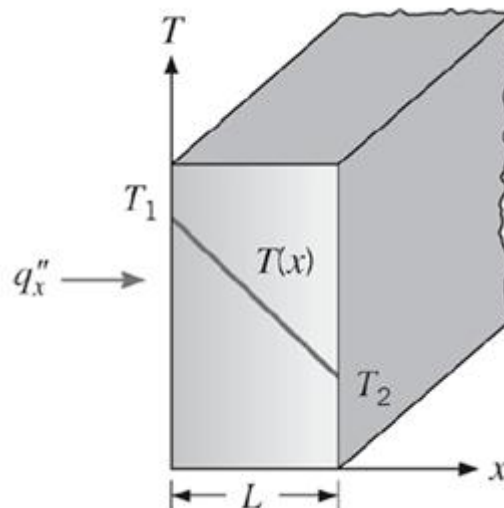
$k$  = condutibilidade térmica, (W/ (m\*K));

$T_2$  = maior temperatura, (K);

$T_1$  = Menor temperatura, (K);

$L$  = distancia na direção do fluxo, (m).

**Figura 4 –** Condução de calor por uma superfície



Fonte: BERGMAN et. al, 2017

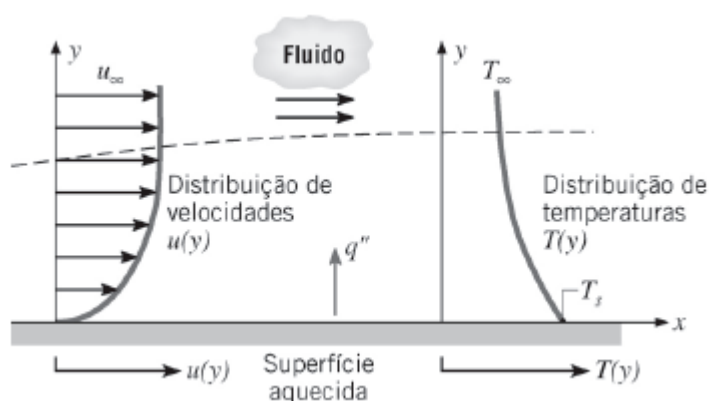
Conforme apresentado na equação 2 o fluxo térmico é dado a partir de uma diferença de temperatura, distância entre as temperaturas e a condutibilidade térmica do material, que é uma característica individual de cada material a uma determinada temperatura realizar a movimentação de energia das células.

### 3.3.2 Convecção

“Transferência de calor por convecção ocorre com o contato entre um fluido em movimento e uma superfície, estando os dois a diferentes temperaturas” (BERGMAN et. al, 2017). Diferente da condução, em que a transferência ocorre entre um mesmo sistema ou sistemas diferentes sólidos, na convecção a transferência de calor ocorrer entre um sistema sólido e um fluido, líquido ou gases. Quanto maior for a temperatura,

quantidade de calor, no sistema solido maior será a distância da camada transferida de calor, ver Figura 5.

**Figura 5 – Convecção de calor**



Fonte: BERGMAN et. al, 2017

Os processos de transferência de calor por convecção podem ser classificados de acordo com a natureza do escoamento sendo classificados como convecção forçada, convecção natural, ebulição e condensação” (BERGMAN et. al, 2017).

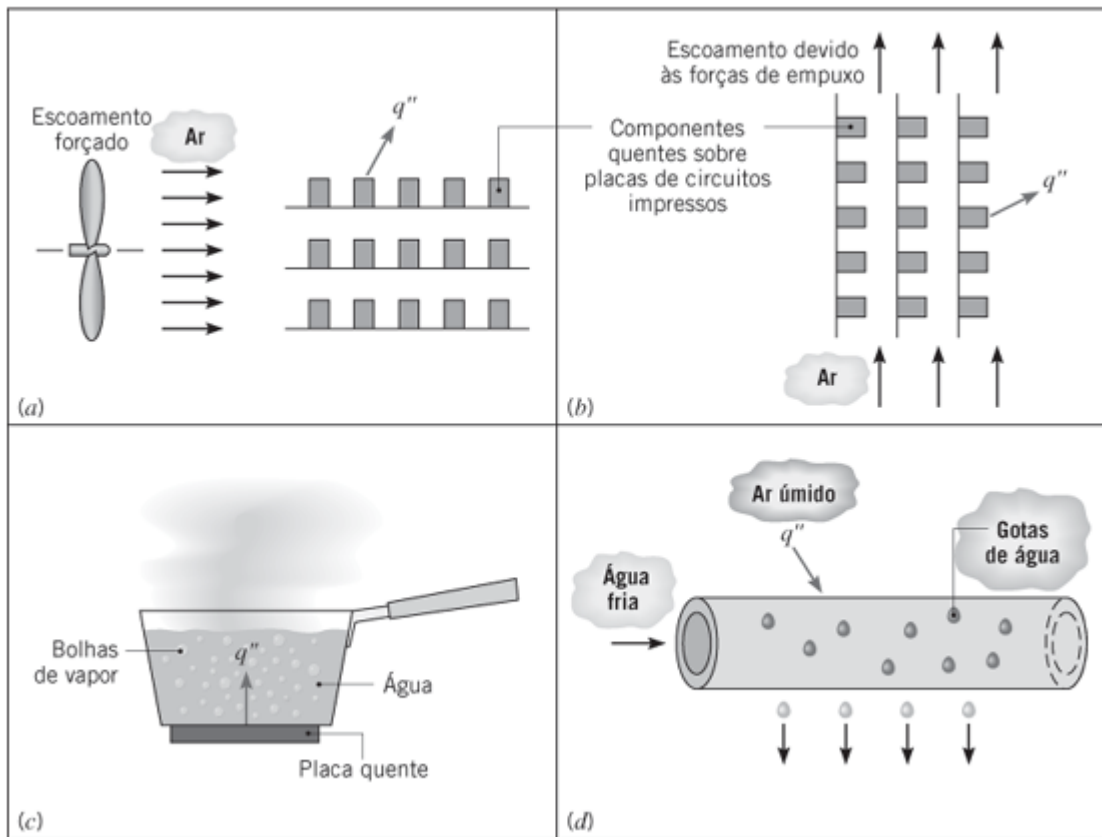
O processo de convecção forçada é quando o escoamento do líquido do ocorre de maneira forçada. Exemplo: utilizando um ventilador.

A convecção natural ocorre através do empuxo do líquido ou gás. Exemplos: a movimentação do ar na própria troca de calor e as correntes dos ventos.

O processo de ebulição ocorre quando um sistema aquece um líquido qualquer levando este a alteração do seu estado de líquido para estado de vapor. Exemplo: esquentar uma panela de água, leite ou qualquer outro líquido. O que vai diferir neste processo é que devido a propriedades dos líquidos será necessária uma temperatura determinada para que o processo ocorra.

A condensação ocorre no processo inverso da ebulição, quando o sistema tem uma temperatura menor que a do gás levando este ceder calor para o sistema, muitas vezes mudando o estado de vapor para líquido. Exemplo: quando uma garrafa de água gelada é cheia, neste momento ao redor da garrafa o ar úmido na troca de calor com a garrafa se torna água.

**Figura 6 – Processos de convecção**



Fonte: BERGMAN et. al, 2017

E a equação para a taxa de transferência de calor no modo de convecção é dada por:

$$\text{Equação 3 - } q'' = h(T_S - T_\infty)$$

Onde:

$q''$  = fluxo de calor por convecção ( $W/m^2$ );

$T_S$  = temperatura do sistema, (K);

$T_\infty$  = temperatura do fluido, (K);

$h$  = coeficiente de transferência de calor por convecção.

Sobre o coeficiente  $h$  é correto afirmar que:

“Depende das condições na camada-limite, as quais, por sua vez, são influenciadas pela geometria da superfície, pela natureza do escoamento do fluido e por uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido” (BERGMAN et. al, 2017).

Veja tipos de coeficiente  $h$  em diferentes processos na tabela 1:

**Tabela 1** – Valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção

Processo	$h$ (W/(m <sup>2</sup> · K))
Convecção natural	
Gases	2–25
Líquidos	50–1000
Convecção forçada	
Gases	25–250
Líquidos	100–20.000
Convecção com mudança de fase	
Ebulição ou condensação	2500–100.000

Fonte: BERGMAN et. al, 2017

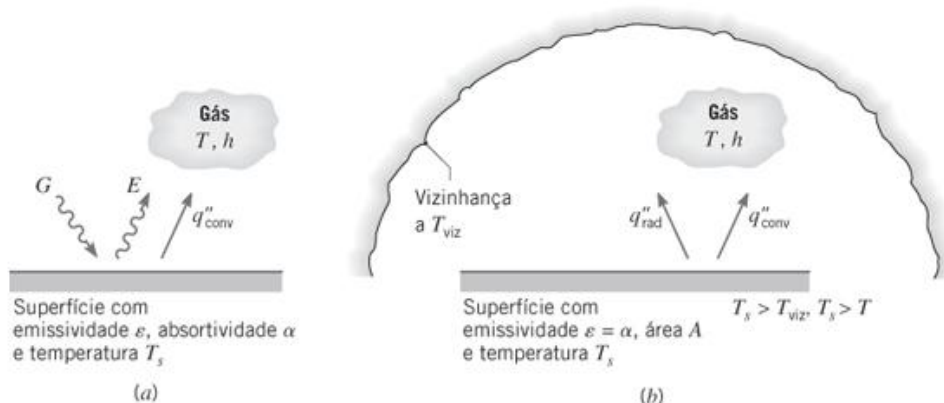
### 3.3.3 Radiação

A radiação é energia emitida pela matéria que esteja com temperatura diferente de zero, praticamente todo sistema emite radiação. Esta energia por ondas eletromagnéticas, e diferente dos modos de condução anteriores não precisa de um meio para transporte. “A transferência por radiação ocorre mais eficientemente no vácuo” (BERGMAN et. al, 2017).

O grande exemplo de energia transferida por radiação é a energia solar, no qual está partindo do sol a milhares de quilômetros e percorrer todo o vácuo até chegar nas superfícies dos planetas. Outro aspecto interessante é a absorvidade que nada mais é que a capacidade do material de absorver a radiação em uma determinada superfície. Veja os exemplos de radiação na figura 7.



**Figura 7 – Exemplo de radiação**



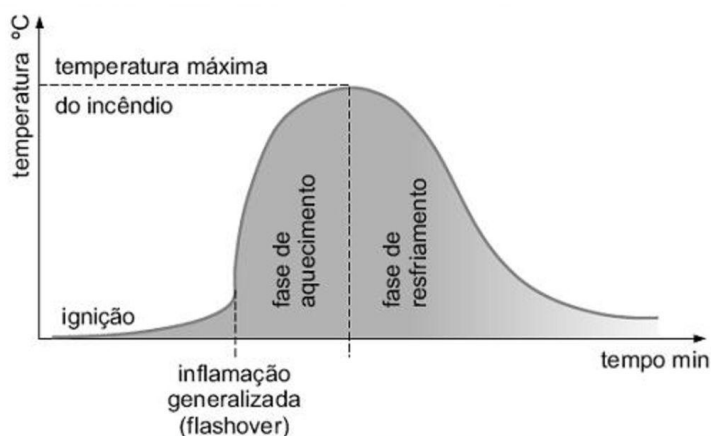
Fonte: BERGMAN et. al, 2017

### 3.4 Incêndio

O fenômeno do incêndio é determinado como o desenvolvimento descontrolado do fogo. Após o início do fogo no sistema em que tenha as condições de combustível, comburente e transferência de calor seja possível é inevitável a reação em cadeia até que um dos elementos citados, Item 3.1, não esteja mais presente.

O incêndio pode ser caracterizado por fases bem definidas e que são: ignição, fase de aquecimento e fase de resfriamento (VARGAS et. al, 2003). Estas três fases geram uma curva temperatura-tempo real de um incêndio, no qual devido a alguns fatores, material combustível, grau de ventilação e tipo dos materiais de vedação, cada incêndio tem um gráfico próprio. O resultado tido como comportamento padrão segue na Figura abaixo.

**Figura 8 – Curva temperatura – Tempo de um incêndio real**



Fonte: VARGAS et. al, 2003

### **3.4.1 Flashover – Fase de Aquecimento**

Dentre as três fases a que é mais importante em estudos, devido à complexidade na obtenção de informações, é a fase de aquecimento também conhecida como flashover que é “instante de inflamação generalizada e ocorre quando toda carga combustível presente no ambiente entra em ignição” (VARGAS et. al, 2003). Assim que todo o material combustível entra em combustão é questão de tempo para que haja a falta dele na reação dando partida a fase seguinte.

### **3.4.2 Pirólise**

Em um sistema em que ocorre um incêndio dois fatores se tornam evidentes que são o aumento da temperatura e falta de oxigênio, devido a queima, e levam a decomposição química dos combustíveis produzindo gases, água e produtos sólidos, cinzas e carvão, sendo este fenômeno chamado de pirólise.

## **3.5 Propriedades do Aço**

“O aço e o ferro fundido são ligas de ferro e carbono, com outros elementos” (PFEIL et al, 2014), são estes elementos residuais e elementos adicionados com o intuito de melhorar as características físicas e mecânicas do material.

A diferença do aço para o ferro fundido é a concentração de carbono na liga onde segundo Pfeil o “aço é a liga ferro-carbono em que o teor de carbono varia desde 0,008% até 2,11%” (apud CHIAVERINI, 1996).

De acordo com a quantidade de carbono, elementos residuais e aditivos o aço será classificado e esta classificação é de acordo com as características do aço. As características mais **importantes** para estruturas são boa ductilidade, homogeneidade, soldabilidade e uma alta tensão resistente e de escoamento (PFEIL et al, 2014).

### **3.5.1 Processo de fabricação**

“O principal processo de fabricação do aço consiste na produção de ferro fundido no alto-forno e posterior refinamento em aço no conversor de oxigênio” (PFEIL et al, 2014). O carvão é de extrema importância neste processo que além de permitir

que na queima alcance elevadas temperaturas também reduz a quantidade de carbono no aço.

O minério de ferro e carvão são previamente preparados e levado ao alto-forno no qual ocorre a queima. O resultado desta queima é que o ferro se liquefaz e uma outra parte sólida que é chamada de escória.

Na etapa seguinte o ferro líquido é levado para o conversor de oxigênio com intuito de reduzir a quantidade de carbono nele, esta redução se dá com a adição de elementos.

### **3.5.2 Padronização ABNT**

A norma NBR 7007 – Aços para perfis laminados para uso estrutural, defino as categorias do aço de acordo com o limite de escoamento do aço  $f_y$  (PFEIL et al, 2014).

MR 250, aço de média resistência ( $f_y = 250$  Mpa;  $f_u = 400$  Mpa)

AR350, aço de alta resistência ( $f_y = 350$  Mpa;  $f_u = 450$  Mpa)

AR-COR415, aço de alta resistência ( $f_y = 415$  Mpa;  $f_u = 520$  Mpa), resistente à corrosão.

O aço MR250 corresponde ao aço ASTM A36.

### **3.5.3 Propriedades dos Aços**

#### **3.5.3.1 Constante Físicas**

A temperatura ambiente todos os aços possuem as seguintes características:

- Módulo de deformação longitudinal ou módulo de elasticidade  $E = 200.000$  Mpa;
- Coeficiente de Poisson  $\nu = 0,3$ ;
- Coeficiente de dilatação térmica  $\beta = 12 \times 10^{-6}$  por °C;
- Massa específica  $\rho_a = 7850$  kg/m<sup>3</sup>.

#### **3.5.3.2 Ductibilidade**

Segundo PFEIL, 2014 ductilidade é a capacidade do material se deformar sob a ação de cargas. Para exemplificar ao pegar uma barra de aço e colocar uma carga e ir aumentando gradativamente esta barra irá deformar antes que chegue na sua ruptura, momento que ela não suporta mais carga.

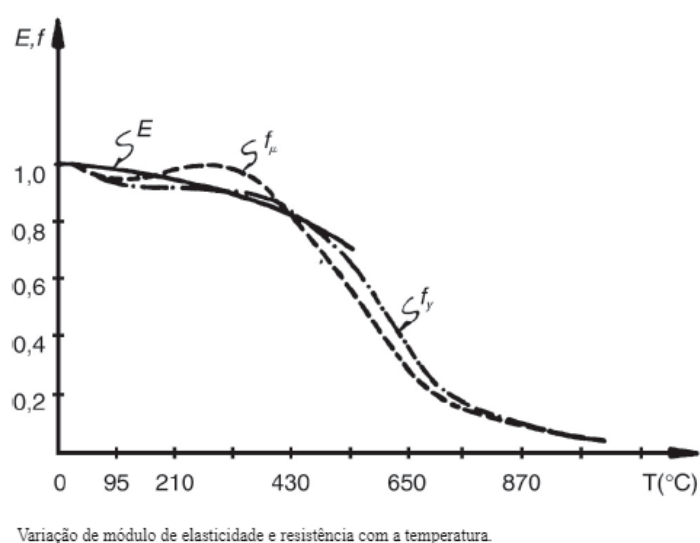
Nesta deformação o aço atende por dois regimes distintos. O primeiro é conhecido como **elasticidade** no qual toda deformação sofrida pelo aço com a aplicação da carga é restaurada após a retirada desta carga. Já o segundo é a **plasticidade**, este ocorre se a aplicação da carga continuar, momento em que a carga é tanta que o aço se deforma de maneira definitiva após a retirada da carga.

A transição do regime elástico para plástico é conhecida como regime de escoamento. Este limite é conhecido para todos os tipos de aço, e caracterizado por uma tensão correspondente.

### **3.5.3.3 Efeito de Temperatura Elevada**

À medida que a temperatura do aço é elevada sua propriedade física é alterada. “Temperaturas acima de 100°C tentem a eliminar o limite de escoamento bem definido” (PFEIL et al, 2014). A principal mudança é nos limites de escoamento, de ruptura e modulo de elasticidade, conforme figura 9.

**Figura 9** – Variação do módulo de elasticidade com a temperatura



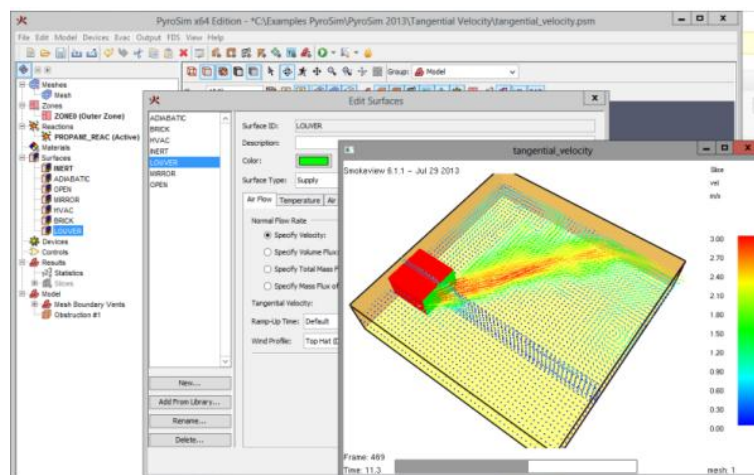
**Fonte:** PFEIL et al, 2014

### 3.6 Pyrosim

O Pyrosim é um software desenvolvido pela empresa Thunderhead Engineering no qual gera uma interface gráfica do Fire Dynamics Simulator (FDS) e Smokeview. Este software tem por finalidade facilitar a interação dos FDS e Smokeview de maneira mais simples, visto complexidade destes, além de proporcionar diversos recursos como importar arquivos de modelos CAD, edição de objetos de maneira interativa, resultados visuais, biblioteca de propriedades, entre outros.

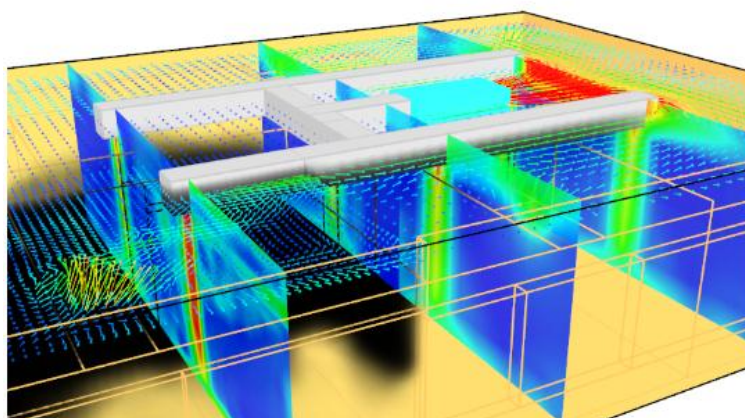
Abaixo segue representações de algumas funcionalidades do Pyrosim.

**Figura 10** – Edição de todos objetos modelo



Fonte: <https://www.thunderheadeng.com/pyrosim/pyrosim-features/>

**Figura 11** – Sistema de avaliação dinâmico



Fonte: <https://www.thunderheadeng.com/pyrosim/pyrosim-features/>

Abaixo será apresentado os principais softwares de base do Pyrosim, como citado anteriormente, e são o Fire Dynamics Simulator (FDS) e o Smokeview.

### 3.6.1 Fire Dynamics Simulator (FDS) e Smokeview

O Fire Dynamics Simulator (FDS) é um modelo computacional de dinâmicas de fluídos (*computational fluid dynamics* – CFD), no qual resolve numericamente uma das formulas das equações de Navier-Stokes apropriadas para o fluxo de baixa velocidade. Desenvolvido pela National Institute of Standards and Technology (NIST) tem como objetivo facilitar e possivelmente gerar resultados que possam ser usados no projeto de edificações mais seguras e/ou eficientes contra incêndio.

No FDS a sistema a ser analisado é fracionado em campos cúbicos muito menores no qual sofre análise através da equação de Navier-Stokes, que leva em consideração a tensão normal, de cisalhamento e a pressão estática ao qual o fluido está sendo submetido.

Na forma geral de Navier-Stokes tem-se:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \nabla P + \rho f$$

Onde:

$$P = \begin{pmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}$$

- $\sigma$  é a tensão normal;
- $\tau$  é a tensão de cisalhamento;
- $P$  é a pressão estática.

Ajustando de forma mais simplificada a equação chega ao seguinte resultado:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \nabla T + \rho f$$

O lançamento do sistema é feito através de linhas de códigos que exercem uma determinada função na equação, e deve ser lançada da forma correta.

Além do desenvolver o FDS o NIST para auxiliar e visualizar os resultados obtidos a partir do mesmo a empresa desenvolveu o Smokeview, que é um programa de visualização que é usado para mostrar graficamente os resultados do FDS.

## **4 METODOLOGIA**

Na seguinte seção do trabalho será apresentado todos os procedimentos para realização deste.

### **4.1 Estrutura**

Com a intuito de trazer a simulação para um contexto mais aproximado do real foi escolhida uma estrutura que já é utilizada, uma empresa em atividade, com as devidas alterações para atender ao caso proposto por este trabalho.

#### **4.1.1 Empresa**

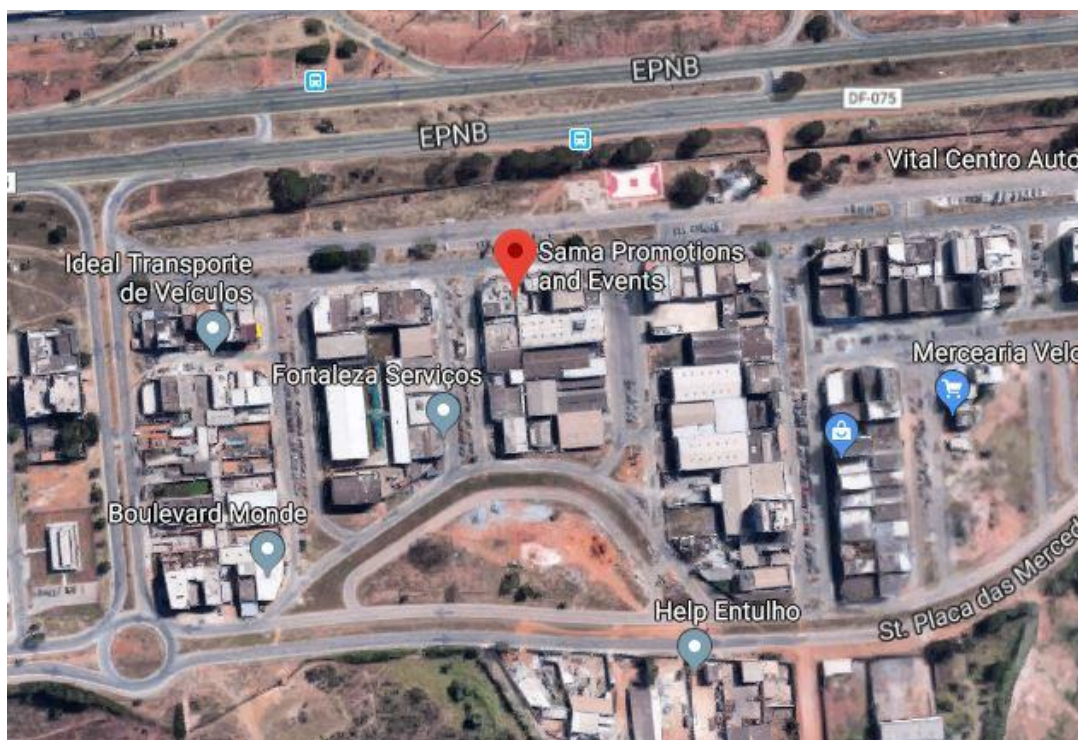
É uma empresa de recrutamento, seleção, logística e terceirização de mão de obra, conhecida pelo nome fantasia Sama Promoções e Eventos. É composta por dois pavimentos, sendo o térreo e o primeiro pavimento, no qual será descrita mais especificamente em próximos tópicos. Com o total de 17 colaboradores trabalhando diariamente e visitantes, cliente, candidatos, prestadores de serviços numa média de 20 pessoas por dia.

#### **4.1.2 Localização**

Localizada no Setor Placa das Mercedes, Conjunto 4, Lote 02, na região administrativa Núcleo Bandeirante, Distrito Federal, Brasil.



**Figura 12 – Localização de satélite Sama Promoções e Eventos**



Fonte: <https://www.google.com/maps/place/Sama+Promoções+and+Events/@-15.8780505,-48.000319,17.21z/data=!4m5!3m4!1s0x935a2e7c23c3b5f9:0xd7b2f949d0ca46e2!8m2!3d-15.878089!4d-47.998164>.

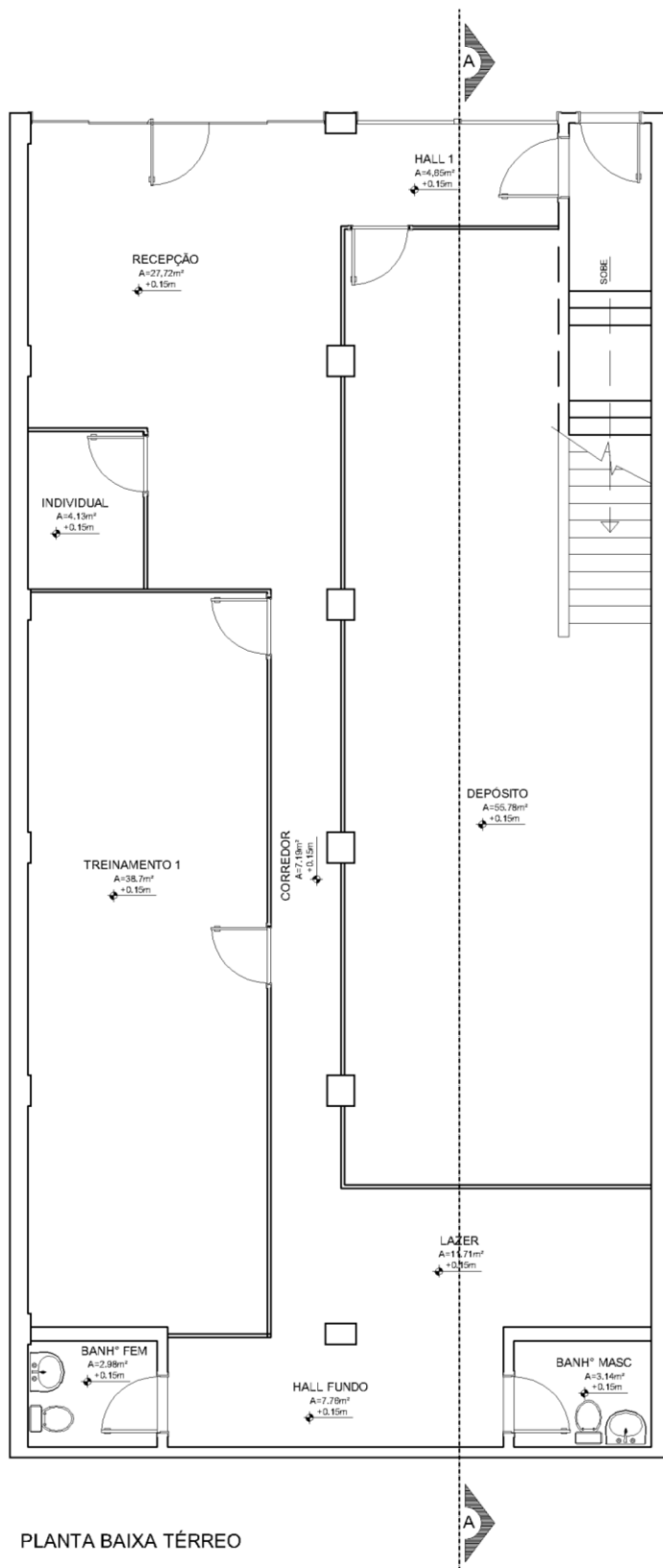
## 4.2 Levantamento de dados

O levantamento de dados realizado para a devida elaboração do projeto arquitetônico da estrutura, tendo em vista que a mesma não possuía, foi realizado in loco através de medições com uma trena. Este levantamento foi escrito em um croqui e depois transcrito para o programa AutoCAD.

## 4.3 Plantas extraídas do AutoCAD

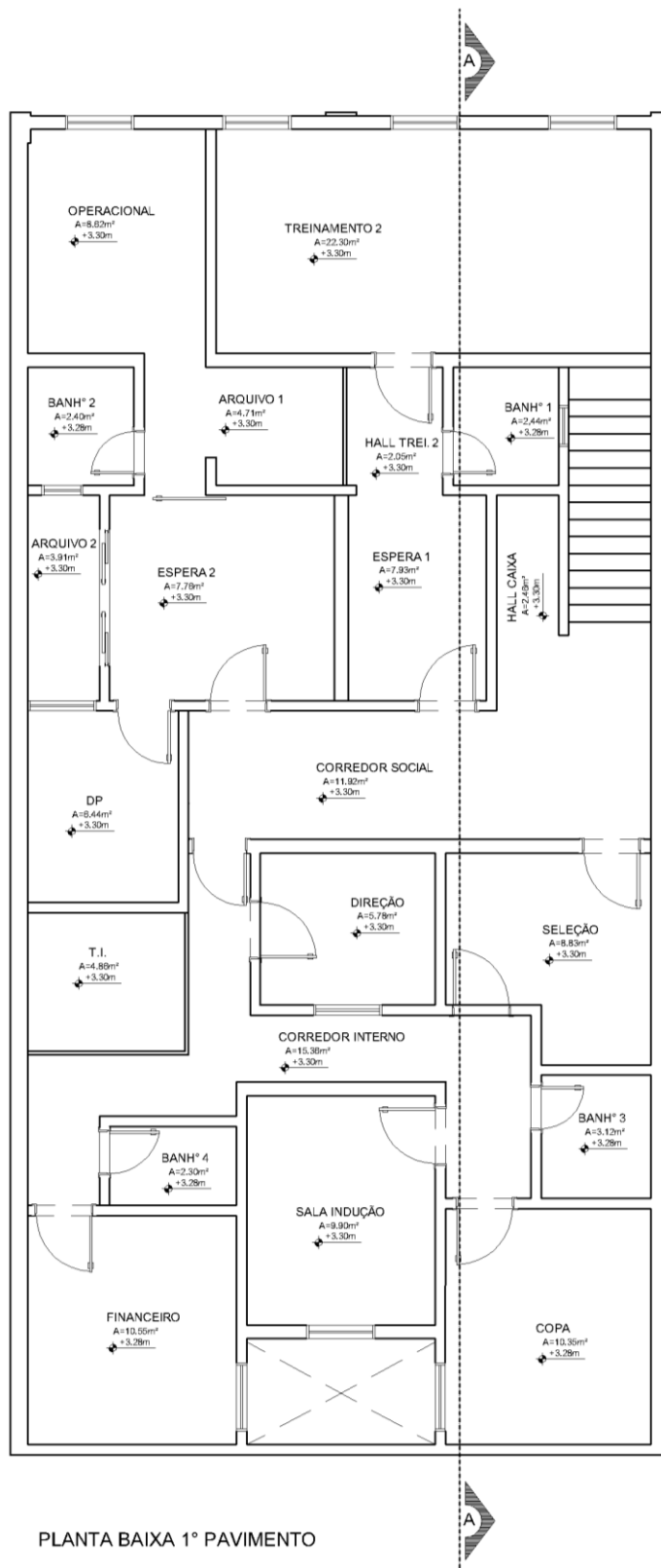
Abaixo será apresentada as plantas extraídas através do AutoCAD, no qual é possível ver todos cômodos e divisões da empresa.

Figura 13 – Planta baixa Térreo



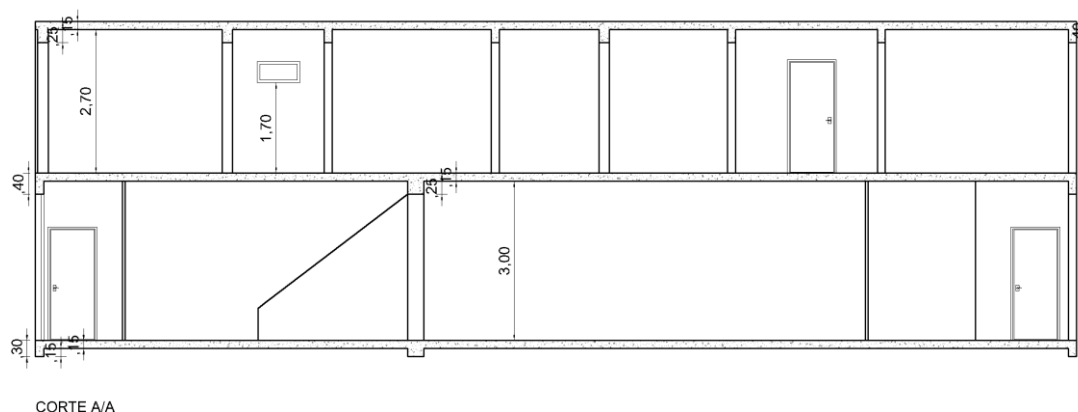
Fonte: Próprio autor, 2019.

Figura 14 – Planta baixa 1º Pavimento



Fonte: Próprio autor, 2019.

**Figura 15** – Planta de corte AA



Fonte: Próprio autor, 2019

#### 4.4 Estrutura de aço

Como a empresa base para de realização desta simulação não é originalmente construída no sistema construtivo ao qual é de interesse deste estudo avaliar, estrutura de aço, fez-se necessário a modelagem de um novo sistema construtivo.

A modelagem foi realizada no programa mCalc3D, ao qual o objetivo principal era definir perfis metálicos ao qual a estrutura estaria devidamente dimensionada. Estes perfis teriam que atender os mesmos esforços e serviços que atuam na estrutura no momento da coleta de dados.

Foram definidos dois perfis de aço encontrados nesta modelagem. O primeiro é o perfil W 150 22,5, utilizado para todos os pilares, e o segundo o perfil W 200 26,6, utilizado para todas as vigas da edificação.

**Figura 16** – Perfis Estruturais Gerdau

**TABELA DE BITOLAS**

BITOLA mm x kg/m	Massa Linear kg/m	d mm	b <sub>r</sub> mm	ESPESSURA		h mm	d' mm	Área cm <sup>2</sup>
				t <sub>r</sub> mm	t <sub>w</sub> mm			
W 150 x 13,0	13,0	148	100	4,3	4,9	138	118	16,6
W 150 x 22,5 (H)	22,5	152	152	5,8	6,6	139	119	29,0
W 150 x 29,8 (H)	29,8	157	153	6,6	9,3	138	118	38,5
W 150 x 37,1 (H)	37,1	162	154	8,1	11,6	139	119	47,8
W 200 x 15,0	15,0	200	100	4,3	5,2	190	170	19,4
W 200 x 19,3	19,3	203	102	5,8	6,5	190	170	25,1
W 200 x 26,6	26,6	207	133	5,8	8,4	190	170	34,2
W 200 x 31,5	31,5	210	134	6,4	10,2	190	170	40,5

Fonte: <https://www.gerdau.com/br/pt/productservices/products/Document%20Gallery/perfil-estrutural-tabela-de-bitolas.pdf>. Modificado.

Os dois perfis são regidos pelas características citadas no item 3.5.3., estão distribuídos de acordo com a

## 5 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

A partir dos dados coletados do Eberick e plantas do Autocad, iniciou-se a preparação para a modelagem no FDS. Com os seguintes preparativos:

### 5.1 Lançamentos estruturais

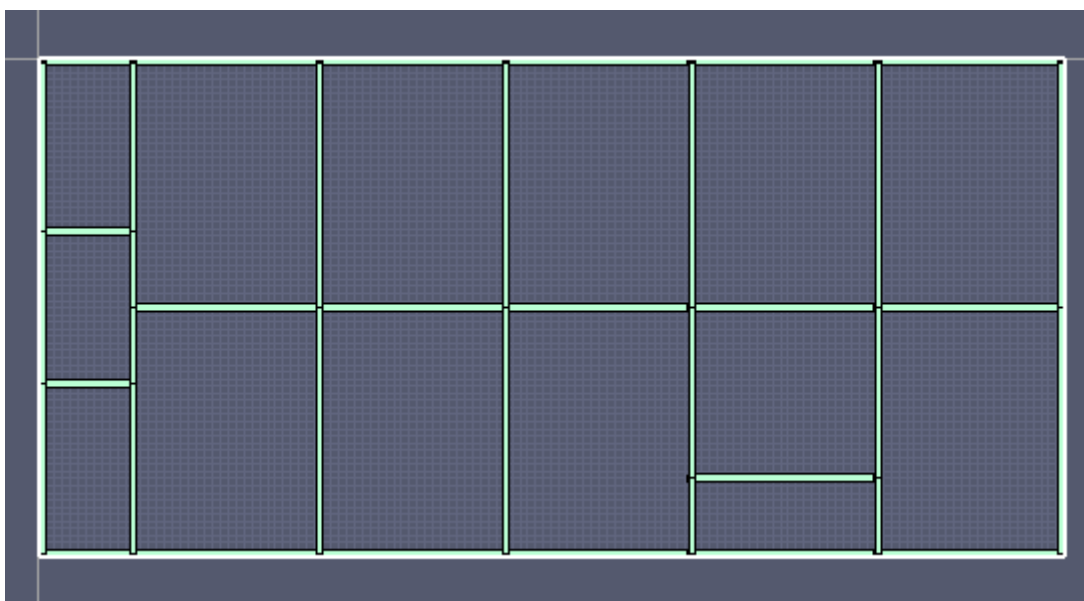
O programa FDS é um programa baseado na linguagem técnica de programação, no qual resolve numericamente as interações realizadas dentro da simulação de acordo com as condições de contornos desejadas. Já o Pyrosim é uma interface que oferece, de certa forma, uma inserção de dados visual e/ou através de coordenadas no plano cartesiano.

As estruturas da edificação são devidamente lançadas em forma de obstruções, cada elemento ou parte dele, para que posteriormente possam ter suas características alteradas.

Nos itens a seguir serão apresentadas todas as estruturas lançadas de forma individual.

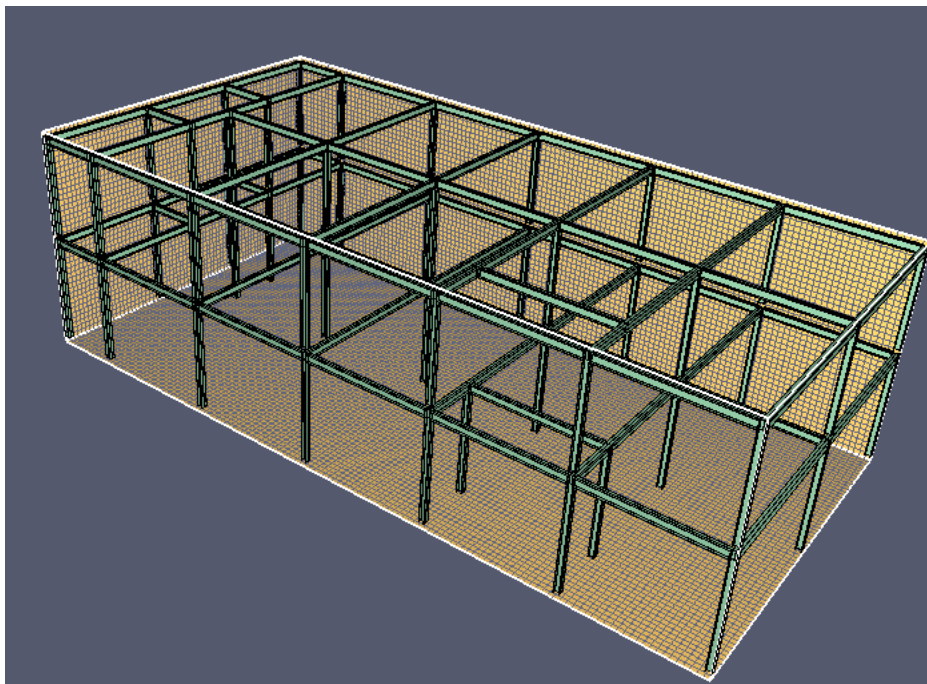
#### 5.1.1 Perfis metálicos

**Figura 17 – Perfis Metálicos em Planta 2D**



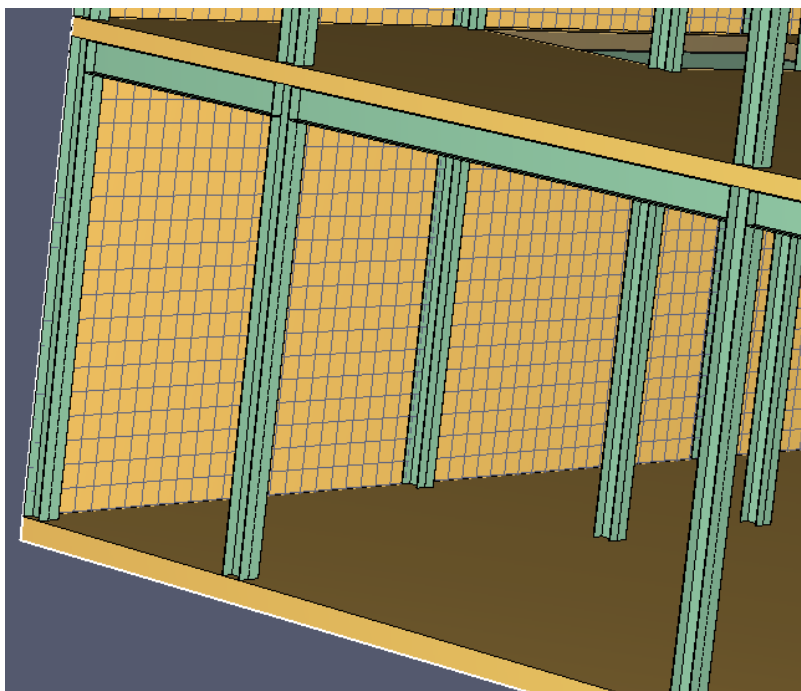
Fonte: Próprio autor, 2019

**Figura 18** – Perfis Metálicos em Planta 3D



Fonte: Próprio autor, 2019.

**Figura 19** – Perfil de Viga e Pilar Detalhado



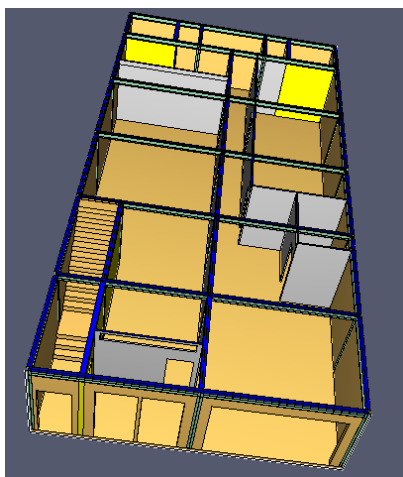
Fonte: Próprio autor, 2019.

Todos os perfis metálicos ficaram com as propriedades terminas de acordo com o já fornecido pelo simulador. Que são:

- Densidade = 7850,0 kg/m<sup>3</sup>

- Calor Especifico = 0,46 kJ/(kg\*K)
- Condutividade Térmica = 45,8 W/(m\*K)

**Figura 20** – Planta do térreo 3D



Fonte: Próprio autor, 2019.

**Figura 21** – Planta do 1º pavimento 3D



Fonte: Próprio autor, 2019.

### 5.1.2 Alvenarias e Drywall

As alvenarias foram separadas em duas, a primeira é toda alvenaria externa na qual sua propriedade térmica foi definida como adiabática, ou seja, é isolada de qualquer troca de calor. Propriedade também adotada para as lajes. A segunda são as alvenarias internas nas quais foram definidas as seguintes propriedades:

- Densidade = 1900,0 kg/m<sup>3</sup>
- Calor Especifico = 1,0 kJ/(kg\*K)
- Condutividade Térmica = 0,7 W/(m\*K)

Já as divisórias internas em Drywall tiveram as propriedades térmicas definidas como:

- Densidade = 7150,0 kg/m<sup>3</sup>
- Calor Especifico = 5,5 kJ/(kg\*K)
- Condutividade Térmica = 0,081 W/(m\*K)

## 5.2 Carga de incêndio



O ponto de início do incêndio foi selecionado por ser o cômodo em que possui a maior carga de incêndio, maior quantidade de material combustível. Este cômodo é o depósito no qual é armazenado materiais de merchandising, materiais para divulgação de promoção em lojas e campanhas, que em sua maioria é constituído de madeira e papelão.

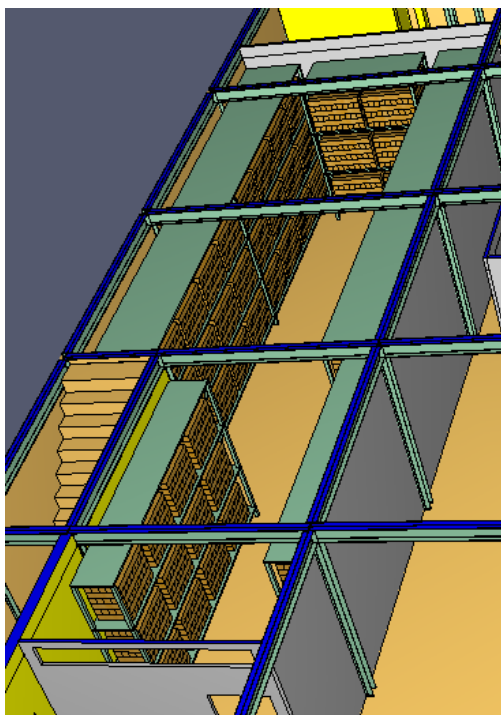
As cargas para lançar no programa foram simplificadas para perfis em filetes de 10x10 cm intercalados de forma a formarem caixas na atual distribuição das prateleiras, caso observado na empresa.

Esta configuração dos filetes tem o objetivo permitir o calor se propague com maior facilidade, sendo que para este fim cada filete vai transmitir o calor para outros filetes e por eles mesmos. As caixas de cargas ficaram em duas configurações uma de 50x80 cm e outra de 90x90 cm.

O Material determinado para ser a carga de incêndio é o pinho-amarelo, que possui as seguintes propriedades térmicas:

- Densidade = 640,0 kg/m<sup>3</sup>
- Calor Especifico = 2,85 kJ/(kg\*K)
- Condutividade Térmica = 0,14 W/(m\*K)
- 

**Figura 22** – Detalhamento das cargas de combustão no depósito



### 5.3 Configuração de incêndio

Para que o programa inicie a simulação de incêndio são necessários dois fatores, estes apresentados no capítulo de revisão, a ignição, fonte inicial de calor para a reação ocorra, e o vento, que atua na estrutura fazendo com a circulação do ar ocorra renovando e injetando o comburente da equação.

O vento foi colocado como uma lâmina em toda camada superior da estrutura. A ignição foi definida para atuar em frente a carga da primeira prateleira, a que fica em frente da porta de entrada do depósito, com uma altura de 50 cm do chão e um valor de liberação de calor de 1000 kW/m<sup>2</sup>.

Por fim o elemento final é a malha de cálculo, está com a finalidade de dividir toda a estrutura em pequenos cubos no qual são realizadas o cálculo numérico e as interações dos cubos. A malha definida foi cubos de 25x25x25 cm, cobrindo as bordas da estrutura em mais um metro.

### 5.4 Dispositivos

Com a finalidade de avaliar a temperatura em algum elemento é possível instalar dispositivos que capturam estas informações durante todo o processo de simulação. Foram alocados em formas de lâminas nos eixos x e y, no qual será mostrada as temperaturas.

### 5.5 Processamento de dados

Com as configurações ajustadas o próximo passo é rodar a simulação de incêndio no FDS. A ignição irá gerar calor para o material combustível, no qual reagirá com o comburente, oxigênio, iniciando a reação em cadeia do incêndio. Este é avaliado de forma micro, no cubo da ignição, e interagindo com cubos em contato e alastrando para os demais, em forma de expansão geométrica.

No caso apresentado devido ao grande porte da estrutura o processamento dos dados resultou em um tempo muito alto de processamento. Visto que para processar 3 minutos de incêndio, 180 segundos, seriam necessárias 80 horas com o programa processando.

Com o objetivo de simulação de pelo menos 10 minutos, verificou-se a inviabilidade da simulação em toda a estrutura. Uma vez que necessitaria um computador com uma capacidade muito grande de processamento, para que o tempo fosse reduzido, para que não ocorresse a interrupção do processo, em algum momento, e todos os dados fossem perdidos.

Como solução para problema, foi sugerida a redução da área de avaliação o que levaria também a redução de tempo e processamento.

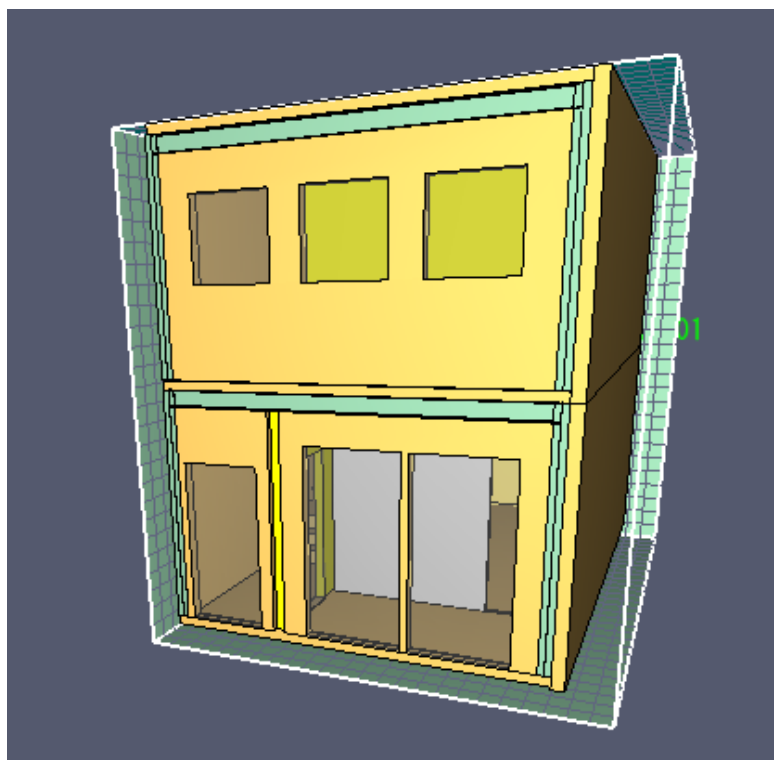
## 5.6 Segunda Situação

Será apresentado nos próximos itens como ficou a nova área de avaliação para simulação.

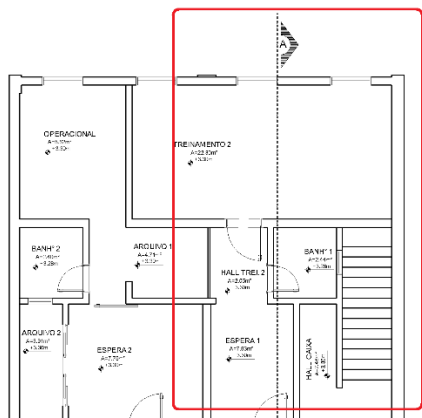
### 5.6.1 Área definida

A área definida encontra-se na parte superior direita da planta baixa, sendo utilizada nos dois pavimentos.

**Figura 23** – Visão Parte Analisada Situação 2

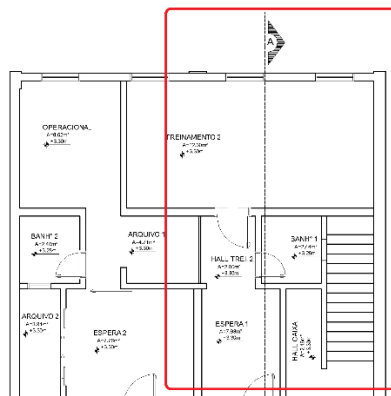


**Figura 24 – Planta Baixa Térreo – Situação 2**



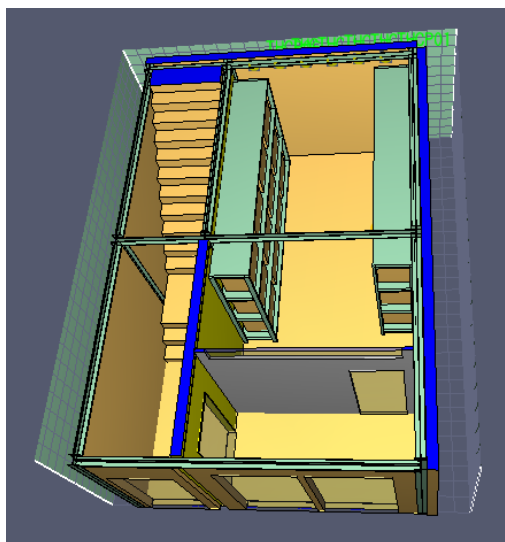
Fonte: Próprio autor, 2019.

**Figura 25 – Planta Baixa 1º Pavimento – Situação 2**



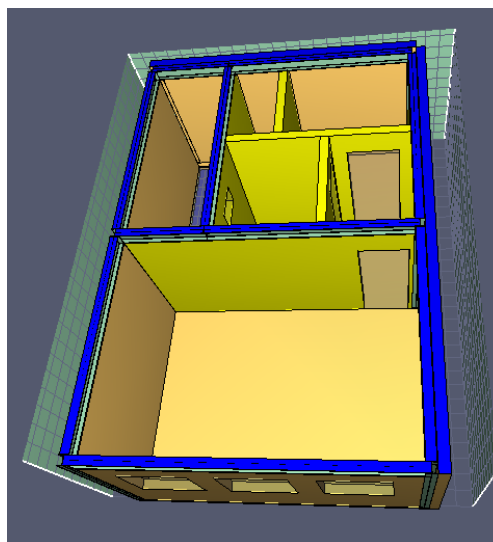
Fonte: Próprio autor, 2019.

**Figura 26 – Visão 3D Térreo – Situação 2**



Fonte: Próprio autor, 2019.

**Figura 27 – Visão 3D 1º Pavimento – Situação 2**



Fonte: Próprio autor, 2019.

### 5.5.2 Condições de contorno

As condições de contorno para a simulação continuam as mesmas das apresentadas nos itens anteriores, apenas sendo modificadas os dispositivos de captação de dados.

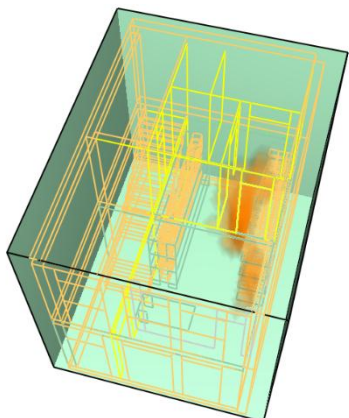
## 6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta próxima seção será apresentado os resultados obtidos com a simulação no FDS. Devido a capacidade e o tempo de processamento do computador utilizado, foi definida que a simulação teria o tempo estipulado em 10 minutos, 600 segundos.

### 6.1 Propagação do incêndio

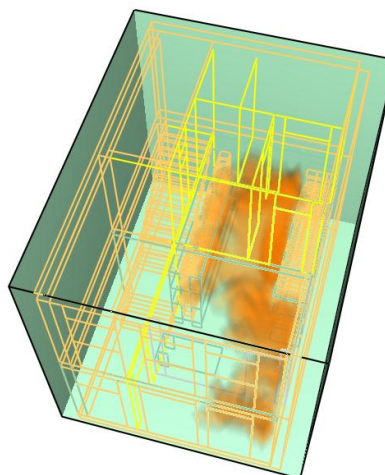
A propagação do incêndio é dada através do programa Smokeview no qual a partir do ponto de ignição e das condições dos combustíveis e comburentes é demonstrada na sequência de figuras deste tópico.

**Figura 28** - Propagação do Incêndio em 6 segundos



Fonte: Próprio autor, 2019.

**Figura 29** - Propagação do Incêndio em 12 segundos



Fonte: Próprio autor, 2019.

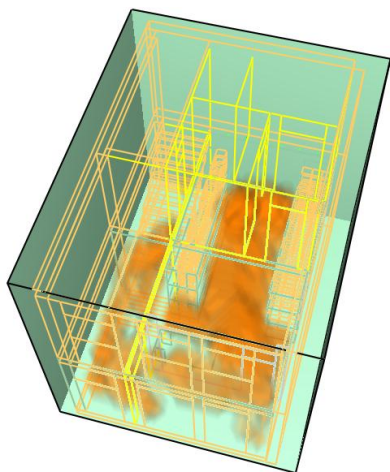
Pode-se avaliar que uma das condições estabelecidas se encontra preponderantemente superdimensionada e/ou subdimensionada. visto que a propagação das chamas acontece apenas nos primeiros 60 segundos da simulação.

### 6.2 Distribuição de calor

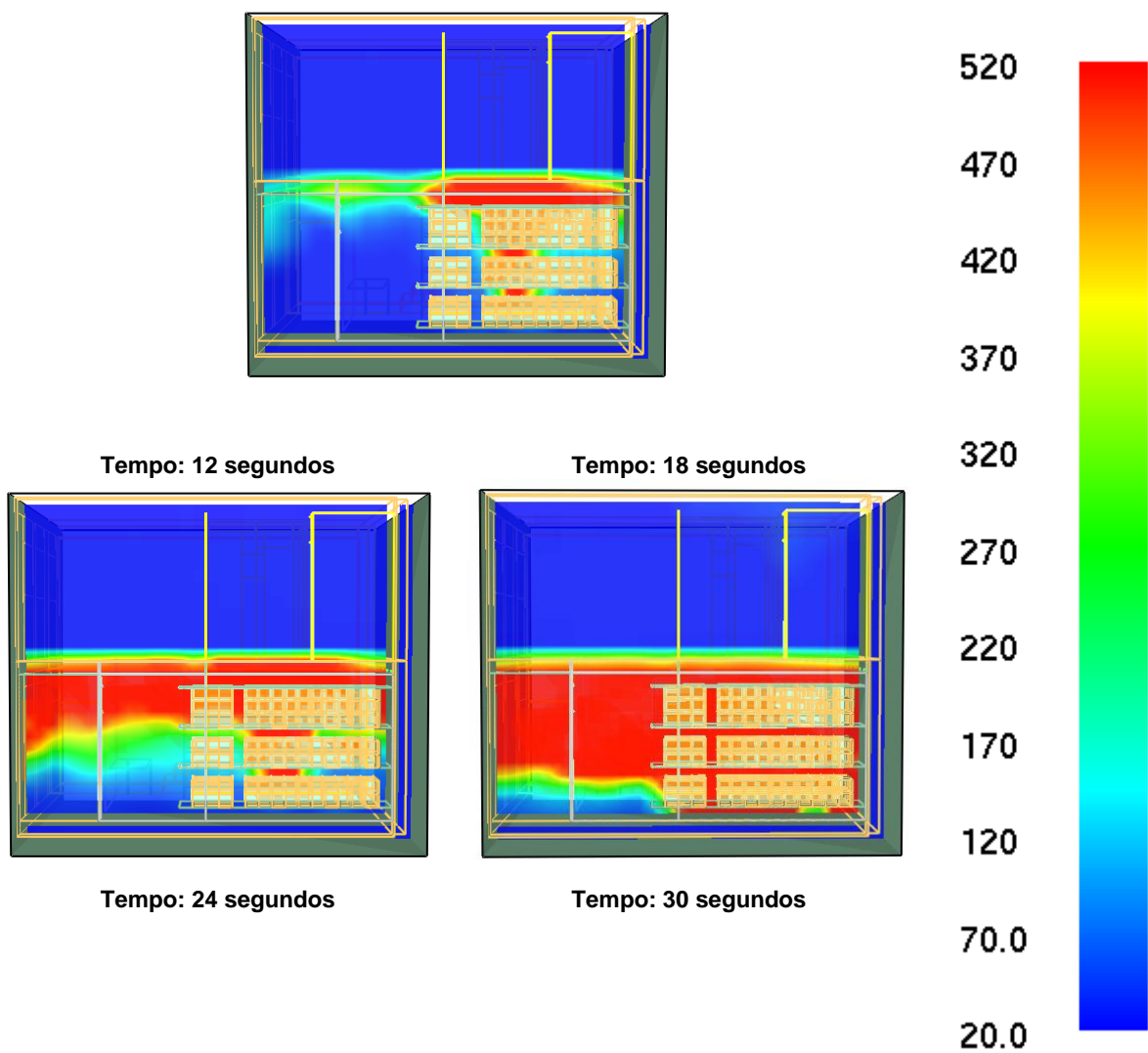
**Figura 31** - Distribuição de Calor ao longo da lâmina  $x=5,5$

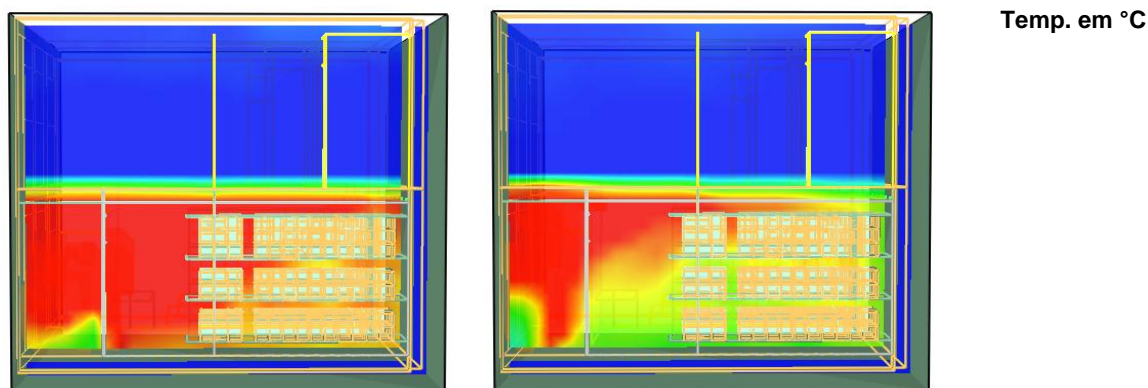
Tempo: 6 segundos

**Figura 30** - Propagação do Incêndio em 18 segundos



Fonte: Próprio autor, 2019.





Fonte: Próprio autor, 2019.

Como observado a maior temperatura atingida nesta simulação foi a de 520°C. A temperatura foi elevada, mas no cômodo que de avaliação deve uma duração muito pequena, inferior a dois minutos.

### 6.3 6.3 Analise comportamento Viga

A viga a ser analisada será a viga no centro de deposito, ao qual sofreu maior incidência de altas temperaturas.

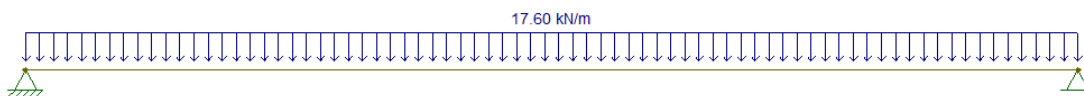
#### 6.3.1 Cargas na Viga

Para efeito de simplificação avalia-se apenas as seguintes cargas atuando nas vigas:

- Peso próprio Viga =  $0,0342 \text{ m}^2 * 7850 \text{ kgf/m}^3 \approx 270 \text{ kgf/m}$
- Peso próprio Laje =  $\frac{5,7 \text{ m}^2 * 150 \text{ kgf/m}^2}{3,25 \text{ m}} + \frac{5,8 \text{ m}^2 * 150 \text{ kgf/m}^2}{3,25 \text{ m}} \approx 530 \text{ kgf/m}$
- Revestimento =  $\frac{5,7 \text{ m}^2 * 70 \text{ kgf/m}^2}{3,25 \text{ m}} + \frac{5,8 \text{ m}^2 * 70 \text{ kgf/m}^2}{3,25 \text{ m}} \approx 250 \text{ kgf/m}$
- Carga de utilização =  $\frac{5,7 \text{ m}^2 * 200 \text{ kgf/m}^2}{3,25 \text{ m}} + \frac{5,8 \text{ m}^2 * 200 \text{ kgf/m}^2}{3,25 \text{ m}} \approx 710 \text{ kgf/m}$
- Total = 1760 kgf/m ou 17,6 kN/m

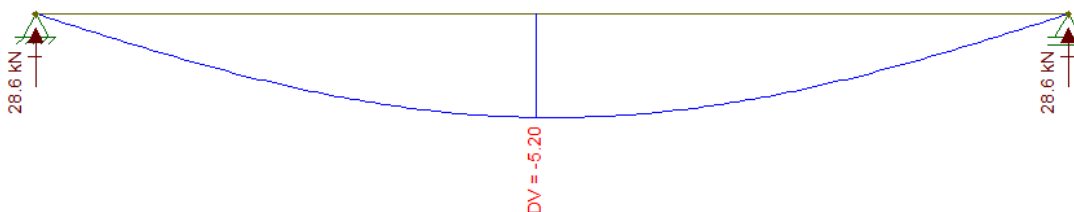
Veja o esquema no programa Ftool, com a deflexão na **figura 30**:

**Figura 32** – Viga com carga lançada no Ftool.



Fonte: Próprio autor, 2019.

**Figura 33** – Deflexão a partir da viga



Fonte: Próprio autor, 2019

Na representação acima é lançado no Ftool toda a representação da viga, citada neste projeto, e o modo de elasticidade de 200.000,00 Mpa. Com a finalidade de achar a deflexão da viga, que no caso é de 5,2 mm.

### **6.3.2 Alterações devido a altas temperaturas**

Existem diversas formas de as altas temperaturas afetarem os elementos estruturais, mas no caso do estudo o objeto principal será o módulo de elasticidade. Apresentado no item 3.5.3.3 o módulo de elasticidade quando em contato com temperaturas elevadas tem consideravelmente o valor reduzido, assim como tentem a não ter um limite de escoamento bem definido.

Levando em consideração que o valor de maior temperatura, 520°C, atingido na simulação tenha atuado tempo suficiente para validar a figura 9. o módulo de elasticidade teria sua eficiência em 60%, sofrendo uma perda de 40% devido a temperatura.

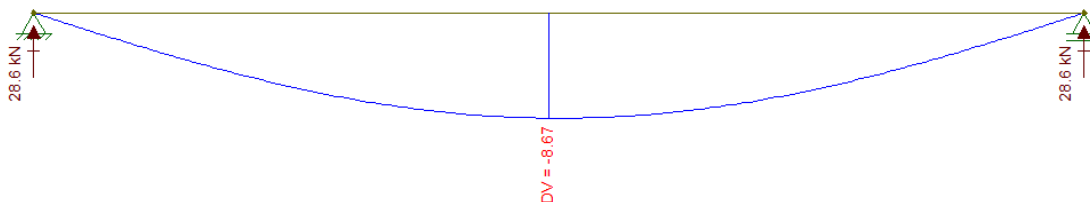
Este demonstrado numericamente com o valor de 120000 Mpa, durante o incêndio. Este módulo após a retirada do calor retornará a quase o valor original, nunca retornando com a totalidade das características.

Durante o incêndio quando o módulo de elasticidade perde 40% de sua eficiência é o momento preocupante no qual a estrutura pode entrar em ruína, já que



a carga durante o mesmo processo permanece a mesma. Vale avaliar a deflexão neste ponto.

**Figura 34 – Deflexão na viga durante o Incêndio**



Fonte: Próprio autor, 2019

O resultado foi o valor de 8,67 mm de deflexão durante o incêndio, que é aceito diferença proporcional a perda da eficiência. Vale ressaltar que não é só este valor preocupante, o limite de escoamento com elevadas temperaturas tende a perder definição deixando a estrutura exposta a ruína durante ou após a situação de incêndio.

## 7 CONCLUSÃO

A simulação de incêndio pode trazer resultados de forma a validar ou mesmo como fonte de pesquisa para entender o comportamento do incêndio. Contudo é necessário um equipamento com grande capacidade de processamento e tempo para a simulação, uma vez que os processamentos levam dias e até meses.

Para avaliar a forma de determinados materiais interagem com as elevadas temperaturas o programa atinge as expectativas deixando dados para que possam ser verificados quesitos de normas e avaliações técnicas de forma mais simplificada.

Por fim, apesar da estrutura ter atingido elevadas temperaturas, estas não duraram por tempo suficiente de levar a estrutura a ruína, deixando a análise de forma mais intuitiva, através dos conhecimentos técnicos, do que poderia acontecer. E com os dados coletado é possível definir formas com que a estrutura interage com o calor, verificando sua estabilidade após o incêndio.

## 8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se destacar:

- 1) Análise do comportamento dessa mesma edificação construída com madeira, concreto armado e alvenaria estrutural;
- 2) Pode-se definir cenários de simulação mais elaborados que implicam em usar sensores e elementos de maior controle de abertura de portas, janelas etc;
- 3) Análise do comportamento da estrutura com mais tempo de processamento, e com a análise de evacuação de pessoas.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13860: Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14323: **Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14432: **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos edificações - procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- BERGMAN, Theodore L. *et al.* **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora – LTC, 2017.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aço e Ferros Fundidos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metais – ABM, 1982.
- K. McGrattan, *et al.* **Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 2: Verification**. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, and VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, sixth edition, September 2013.
- KENNEDY, Patrick M. **A discussion of the practical use of Flashover in Fire Investigation**. Florida: 2013.
- MCGRATTAN, Kevin *et al.* **Fire Dynamics Simulator: User's Guide**. 6. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1019>. Acesso em: 03 mai. 2019.
- PFEIL, Walter *et al.* **Estruturas de Aço Dimensionamento Prático**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora – LTC, 2014.
- SEITO, Alexandre Itiu *et al.* **A Segurança Contra Incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008.
- SOUZA JUNIOR, Valdenir de. **Simulação computacional do comportamento de estruturas de aço sob incêndio**. 2004. 126 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

VARGAS, Mauri Resende *et al.* **Resistência ao Fogo das Estruturas de Aço**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia / Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2003.

ZEMANSKY, Mark W. **Calor e Termodinâmica**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978.