

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS – *CAMPUS* BETIM  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

André Luís do Couto Souza

**ANÁLISE ESTÁTICA DA ESTRUTURA DE UM *SKID* ATRAVÉS DO MÉTODO  
DOS ELEMENTOS FINITOS COM AUXÍLIO DO SOFTWARE ANSYS.**

Betim  
2021

ANDRÉ LUÍS DO COUTO SOUZA

**ANÁLISE ESTÁTICA DA ESTRUTURA DE UM *SKID* ATRAVÉS DO MÉTODO  
DOS ELEMENTOS FINITOS COM AUXÍLIO DO SOFTWARE ANSYS.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do  
Instituto Federal de Minas Gerais– *Campus* Betim  
como requisito parcial para a obtenção do grau de  
bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Evanilton José Alves Barbosa

Betim

2021

S729a Souza, André Luís do Couto

Análise estática da estrutura de um *skid* através do método dos elementos finitos com auxílio do software Ansys. / André Luís do Couto Souza. – 2021.  
55 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais Campus Betim, 2021.

Orientação: Prof. Me. Evanilton José Alves Barbosa.

1. Elementos finitos. 2. Análise estática. I. Título. II. Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Betim, Bacharelado em Engenharia Mecânica.

CDU 621.38

Elaborada pelo Bibliotecário Samuel Gonçalves Proença CRB-6/3265

André Luís do Couto Souza

**ANÁLISE ESTÁTICA DA ESTRUTURA DE UM *SKID* ATRAVÉS DO MÉTODO  
DOS ELEMENTOS FINITOS COM AUXÍLIO DO SOFTWARE ANSYS.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do  
Instituto Federal de Minas Gerais– *Campus* Betim  
como requisito parcial p a obtenção do grau de  
bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 17/ 12/ 2021 pela banca examinadora:



-----  
Prof. Me. Evanilton José Alves Barbosa- IFMG- *Campus* Betim (Orientador)



-----  
Prof. Dra. Nayara Aparecida Neres da Silva- IFMG- *Campus* Betim



-----  
Prof. Me. Pedro Colen Neto- IFMG- *Campus* Betim

Dedico este trabalho a Deus, a minha família, ao meu orientador e a minha companheira, pois graças a eles, fui capaz de concluí-lo com maestria.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiro agradeço a Deus.

Aos meus pais Roberto e Andréia, meu padrasto Adriano, meu irmão Bernardo e aos meus tios Wilton e Adélia, pelo apoio, confiança e paciência.

Agradeço a minha namorada Isabele pelo amor, paciência e cumplicidade.

Ao programa de Graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Minas Gerais.

Aos amigos e professores do IFMG- Campus Betim em especial o meu orientador e Professor Me. Evanilton José Alves Barbosa.

A empresa Ages Plásticos LTDA e os colegas de trabalho pela parceria, contribuição e disponibilidade para realização do trabalho.

## RESUMO

O dimensionamento estrutural abrange diversas áreas da Engenharia. A confiabilidade e segurança de equipamentos é essencial para um processo de produção, visto que, uma organização que visa lucro e competitividade devem estar isentas de falhas em seus processos afim de evitar acidentes e perda de tempo. O presente trabalho consistiu em uma análise estática estrutural pelo método dos elementos finitos de um *Skid* de pintura, este equipamento é parte de um sistema para imersão e movimentação das peças metálicas a serem pintadas no processo de pré-tratamento e pintura *E-coat*. Essas análises foram realizadas a partir de fundamentos da mecânica dos sólidos, teoria de falhas e o método dos elementos finitos onde foram analisados possíveis carregamentos durante o processo, sendo identificado os pontos críticos da estrutura, cálculos analíticos foram realizados utilizando o *software* Ansys para validação dos resultados. Este estudo foi realizado para determinar a carga real da estrutura do *Skid* em relação a capacidade de carga do pórtico de transporte. Os resultados obtidos indicaram que a capacidade de carga *Skid* é inferior a carga suportada pelo pórtico, porém é possível a realização de melhorias para aumento da capacidade de carga do equipamento.

Palavras-chave: Elementos finitos. Análise estática. *Skid* de pintura.

## ABSTRACT

Structural design covers several areas of Engineering. The reliability and safety of equipment is essential for a production process, since an organization that seeks profit and competitiveness must be free from failures in its processes in order to avoid accidents and loss of time. The present work consisted of a static structural analysis by the finite element method of a paint *skid*, this equipment is part of a system for immersion and movement of metallic parts to be painted in the pre-treatment and E-coat painting process. These analyzes were carried out from the foundations of solid mechanics, failure theory and the finite element method, where possible loads during the process were analyzed, identifying the critical points of the structure, analytical calculations were performed using Ansys software to validate the results. This study was carried out to determine the actual load of the *Skid* structure in relation to the load capacity of the transport gantry. The results obtained indicated that the *Skid* load capacity is lower than the load supported by the gantry, but it is possible to make improvements to increase the load capacity of the equipment.

Keywords: Finite elements. Static analysis. Paint *skid*.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aços comerciais (a) barras (quadrada, redonda e tiras); (b) chapas; (c) perfis estruturais laminados; (d) trilho; (e) tubo quadrado e (f) tubo redondo. ....	18
Figura 2 - Estado plano de tensões. ....	19
Figura 3 - Diagrama Tensão-deformação aço. ....	21
Figura 4 - Forças internas em uma seção qualquer do corpo. ....	21
Figura 5 - Estado de tensões tridimensionais para o elemento cúbico infinitesimal. ....	23
Figura 6 - Corpo sem deformação (a) e corpo deformado (b). ....	23
Figura 7 - Viga AB sob ação da Carga P e curva de deflexão. ....	24
Figura 8 - Barra retangular. ....	25
Figura 9 - Representação das tensões ao longo das seções. ....	26
Figura 10 - Exemplos de regiões com concentração de tensão provocada pela geometria da peça, com indicação dos pontos críticos. ....	27
Figura 11 - (a) Fratura dúctil (b) Fratura frágil. ....	28
Figura 12 - Representação gráfica das Teorias de Von Misses (DE) e Tresca (MSS). ....	29
Figura 13 - Malha de elementos finitos. ....	30
Figura 14 - Diferentes tipos de geometrias para análise MEF. ....	31
Figura 15 - Nós e elementos presentes em uma malha. ....	31
Figura 16 - Relação entre Força e Deslocamento de uma mola. ....	33
Figura 17 - Matriz de rigidez de um elemento (mola), matriz de rigidez de uma viga. ....	34
Figura 18 - <i>Skid</i> . ....	35
Figura 19 - Viga de sustentação. ....	36
Figura 20 - Gaiola para armazenamento de produtos. ....	37
Figura 21 - Posicionamento do <i>Skid</i> no pórtico. ....	39
Figura 22 - <i>Skid</i> em elevação máxima. ....	39
Figura 23 - Região de aplicação da carga na ABA lateral. ....	40
Figura 24 - Geometria 3D e superfícies médias. ....	41
Figura 25 - Malha de elementos finitos. ....	42
Figura 26 - Regiões de aplicação de contato ligado (bonded). ....	43
Figura 27 - Condições de contorno aplicado ao modelo. ....	43
Figura 28 - Tensões de Von Mises $F = 29,3$ kN. ....	44
Figura 29 - Concentração de tensão na cantoneira de fixação e aba lateral $F = 29,3$ kN. ....	45
Figura 30 - Deformações resultantes $F = 29,3$ kN. ....	46

Figura 31 - Aba lateral. ....	47
Figura 32 - Cantoneira de fixação. ....	47
Figura 33 - Tensão de Von Mises na cantoneira de fixação e aba lateral $F = 16,01$ kN. ....	51
Figura 34 - Deformações resultantes na viga superior $F = 16,01$ kN.....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos aços estruturais quanto a tensão de escoamento mínima. ....	17
Tabela 2 - Comparação entre os aços SAE1020 e ASTM A36. ....	18
Tabela 3 - Somatório de massas. ....	40
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço estrutural. ....	42
Tabela 5 - Erro relativo entre valores de tensão calculados e resultados obtidos via software. ...	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- [F] Matriz com todas as cargas nodais;
- [k] Matriz Rigidez da Estrutura que relaciona as forças e os deslocamentos nodais;
- [U] Matriz coluna com os deslocamentos nodais;
- As Área da seção transversal;
- ASTM *American Society for Testing and Materials*;
- c distância perpendicular do eixo neutro a um ponto mais afastado do eixo neutro onde a tensão máxima;
- CAD *Computer Aided Design*;
- CAE *Computer Aided Engineering*;
- F Força;
- $F_{\text{cantoneira}}$  Força aplicada a cantoneira de fixação;
- I Momento de inércia;
- Kt Concentração de tensão;
- $l_0$  Comprimento original antes da aplicação de carga;
- $l_f$  Comprimento instantâneo após aplicação de cargas externas;
- M Momento fletor;
- MEF Método dos Elementos Finitos;
- $\sigma_1, \sigma_2$  e  $\sigma_3$  Tensões principais máxima, média e mínima respectivamente;
- $\sigma_e$  Tensão equivalente de Von Mises;
- $\sigma_{max}$  Tensão máxima;
- $\sigma_{nom}$  Tensão nominal;
- $\tau$  Tensão de cisalhamento.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1	Justificativa .....	14
1.2	Objetivo geral .....	15
1.2.1	Objetivos específicos .....	15
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>16</b>
2.1	Aços para construção de estruturas metálicas .....	16
2.2	Dimensionamento de Estruturas .....	19
2.2.1	Tensão e deformação .....	20
2.2.2	Flexão .....	23
2.2.3	Princípio de Saint- Venant .....	24
2.2.4	Concentração de Tensão .....	26
2.2.5	Critério de falha .....	27
2.3	Método dos elementos finitos .....	29
2.3.1	Matriz de Rigidez .....	32
2.3.2	Tipos de Análise .....	34
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
3.1	Definições preliminares .....	37
3.2	Pré-Processamento .....	40
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>43</b>
4.1	Solução e Pós processamento .....	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O dimensionamento estrutural, tem grande parte de seus fundamentos desenvolvidos nas disciplinas de Mecânica dos Sólidos e Mecânica dos Fluidos. Os conceitos e equações desenvolvidas permitem o cálculo analítico de componentes diversos, porém, com limitações de quantidade e de geometria. O método analítico deve ser empregado em condições específicas, como pequenas deformações, em seções constantes e carregamento estático. Caso contrário, recomenda-se trabalhar com fatores de segurança mais elevados. Os fundamentos da Mecânica dos sólidos constituem princípios fundamentais para o desenvolvimento de análises estáticas estruturais por elementos finitos. Segundo Alves Filho (2000), os programas de elementos finitos não são ferramentas que independem do engenheiro, a estruturação para realização da análise e a interpretação dos resultados requer conhecimento técnico para obtenção de respostas confiáveis.

O uso das tecnologias *Computer Aided Design (CAD)* e *Computer Aided Engineering (CAE)* se configura como uma ferramenta de alta competitividade, através da redução de custos, por meio do desenvolvimento de protótipos virtuais, que dão respostas reais quando em análise e permitem alterações simultâneas e/ou comparações entre modelos gerados para definição do melhor produto em função do comportamento observado na análise (ALVES FILHO, 2000).

Neste contexto, este trabalho apresenta um estudo realizado em um equipamento industrial, utilizado para fixação de peças para tratamentos superficiais e pintura, por meio de cálculo analítico e análise por elementos finitos.

### 1.1 Justificativa

Os *Skids* são estruturas modulares projetadas e fabricadas para içamento e acomodação de componentes e equipamentos industriais, além de serem construídas conforme a necessidade de cada empresa, estas estruturas são muito utilizadas para automatização de processos de manutenção e produção.

Em uma empresa de pré tratamento e pintura através do processo de eletrodeposição catódica, são utilizados vinte *Skids* para içamento e acomodação de produtos metálicos, estes equipamentos são construídos em perfis de aço laminados de baixo teor de carbono e divididos em duas partes: Viga de sustentação e a gaiola de acomodação de peças.

Neste processo os *Skids* são içados e movimentados por dois pórticos automatizados que os posicionam ao longo de tanques e transportadores do processo, quando abastecidos os *Skids* ficam sujeitos à carregamentos constantes, devido ao somatório das massas das peças a serem pintadas, tendo em vista a capacidade de carga dos dois pórticos, tendo em vista a capacidade de carga do pórtico, nota-se fragilidade em alguns pontos da estrutura do *Skid* em relação aos mesmos, pontos se melhorados possibilitariam aumento de produção devido a maior quantidade de peças a serem montadas por *Skid*.

## **1.2 Objetivo geral**

Analisar o comportamento estrutural de um *Skid* de acomodação e içamento de produtos metálicos a serem pintados, sujeito a carregamento estático constante e uniforme identificando sua capacidade de carga máxima.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

Para atendimento ao objetivo geral, lista-se os seguintes objetivos específicos:

- Estudo do dimensionamento da estrutura em campo e realizar o modelamento CAD;
- Conhecer os pontos críticos da estrutura e verificar se a mesma suportará esforços estabelecidos;
- Realizar análise estática por meio de elementos finitos utilizando o software ANSYS;
- Realizar cálculo analítico para validação do resultado obtido por meio do software;
- Verificar a possibilidade de melhorias da estrutura, visando melhor desempenho.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo abordou conceitos necessários para realização do trabalho, características e propriedades de materiais para construção de estruturas metálicas de modo geral, fundamentos de resistência dos materiais e os métodos a serem aplicados à análise por elementos finitos.

### 2.1 Aços para construção de estruturas metálicas

De modo geral os profissionais de engenharia que lidam diretamente com projetos de produtos ou estruturas devem-se atentar a critérios importantes quanto a escolha de um determinado material dentre várias opções. O conhecimento das condições de trabalho dos produtos, possíveis alterações que possam ocorrer nas propriedades dos materiais quando em uso e os aspectos econômicos, são imprescindíveis a esses profissionais no que se refere a elaboração de projetos confiáveis e solução rápida de problemas de engenharia (CALLISTER,2002).

Para Van Vlack (2000), o desenvolvimento de novos projetos exige do engenheiro conhecimento de características dos materiais como a propriedade e estrutura, sendo a propriedade mais comum para determinadas aplicações a resistência mecânica que é a capacidade do material resistir a esforços sem sofrer deformação plástica, porém há outras importantes propriedades que definem o comportamento do material em função do tipo de carregamento e condições de trabalho.

Os materiais são divididos basicamente em três categorias: metais, cerâmicos e polímeros. Os metais, ou de fato, ligas metálicas, combinação de dois ou mais elementos sendo pelo menos um metal, são materiais de ampla utilização na construção de estruturas devido a sua boa resistência mecânica e ductilidade. Estes materiais são caracterizados por apresentarem propriedades como: boa condução térmica e elétrica, opacidade e aparência lustrosa quando polido (CALLISTER, 2002).

As indústrias de diferentes ramos de atuação, em especial as de construção civil e de transportes, cada vez mais utilizam os chamados aços estruturais, para isso, alguns requisitos para seleção desses materiais são observados: custo benefício; boa resistência mecânica, ductilidade, soldabilidade e a relação resistência/peso (CHIAVERINI,1977).

Segundo Chiaverini (1977), os aços estruturais podem ser basicamente divididos em dois grupos distintos, aço carbono e os aços de baixa liga e alta resistência mecânica. Cortez *et al* (2017) classifica esses dois grupos conforme sua composição química, sendo os aços

carbono, classificado de acordo com a concentração (baixa, média e alta) de carbono e os aços de baixa liga são aqueles acrescidos de elementos de liga (cromo, cobre, manganês, entre outros) que conferem melhoria a algumas de suas propriedades.

Segundo CBCA (2021), os aços estruturais possuem propriedades adequadas para construções sujeitas a carregamentos diversos, algumas características importantes desses materiais são: tensão de escoamento, tenacidade, ductilidade, soldabilidade e boa trabalhabilidade entre outras, conferem a esses materiais uma manufatura mais simples e acessível, como furação, cortes e dobramentos sem a ocorrência de fissuras ou defeitos. Os aços estruturais podem ser classificados em função da tensão de escoamento mínima especificada, conforme Tabela 1.

Dentre os diversos aços utilizados para construções de estruturas metálicas, o ASTM A36 (*American Society for Testing and Materials*) é o mais utilizado, ele é classificado como aço carbono de média resistência mecânica e é equivalente ao aço SAE 1020, porém com aplicações voltadas para montagem de estruturas, a Tabela 2 apresenta as propriedades, composição química e aplicação destes dois tipos de aço (CBCA, 2021).

Tabela 1: Classificação dos aços estruturais quanto a tensão de escoamento mínima.

Tipo	Limite de escoamento mínimo [MPa]
Aço carbono de média resistência	195 a 259
Aço de alta resistência e baixa liga	290 a 345
Aços ligados tratados termicamente	630 a 700

Fonte: CBCA,2021.

Os aços carbonos são utilizados de diversas maneiras na construção de uma estrutura metálica, quando se trata de perfis estruturais estes são encontrados sob diversas formas: Em tiras, vigas em “T”, em “U”, em “I” e em “L”, além de cantoneiras, tubos e barras laminadas, como apresentado a Figura 1. (PFEIL, 2009).

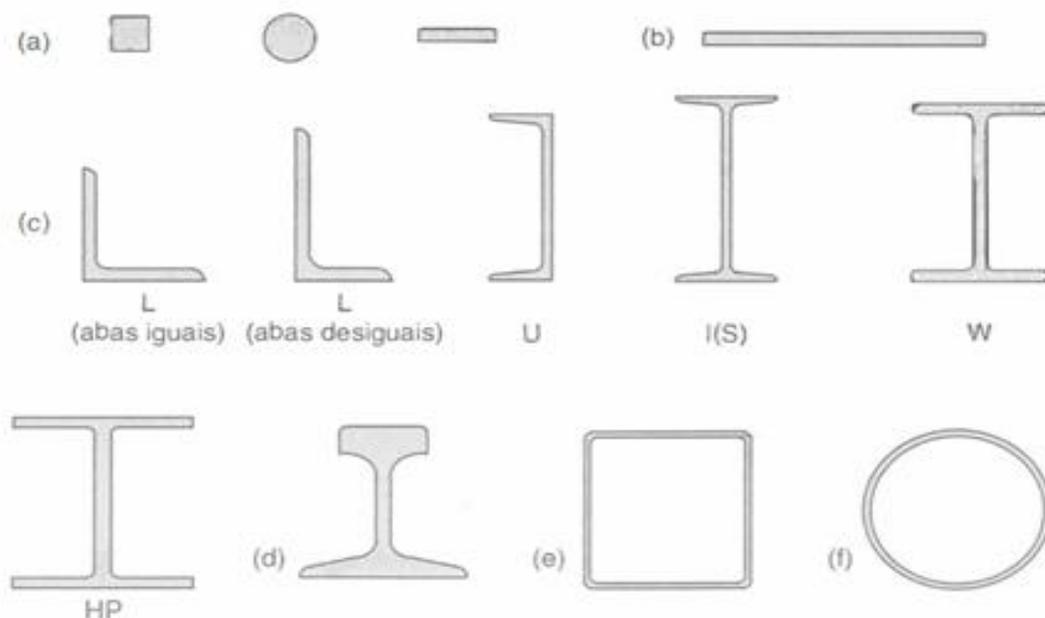
Tabela 2: Comparação entre os aços SAE1020 e ASTM A36.

Aço	Composição química	Limite de escoamento [MPa]	Limite de resistência à tração [MPa]	Aplicação
SAE 1020	%C (0,18 a 0,23) %Mn (0,30 a 0,60) %P máx. (0,03) %S máx. (0,05)	300	410	Indústria mecânica, não aplicável para fins estruturais.
ASTM A 36	%C máx. (0,28) %Mn (0,60 a 0,90) %P (0,04) %Si máx. (0,04) %Cu min. (0,20) quando especificado.	250	400 - 500	Fins estruturais, não indicado para fins mecânicos (Usinagem, Trefila e Descascamento)

Fonte: Tenax, 2021.

Os materiais listados na Figura 1 são de boa aplicação nos mais diversos tipos de estruturas, apresentam percentual de carbono inferior a 0,3%, destacam-se por apresentarem boa ductilidade, favorecendo assim trabalhos mecânicos, como usinagem, conformação e soldagem (CCBA, 2021).

Figura 1: Aços comerciais (a) barras (quadrada, redonda e tiras); (b) chapas; (c) perfis estruturais laminados; (d) trilho; (e) tubo quadrado e (f) tubo redondo.



Fonte: Pfeil, 2009.

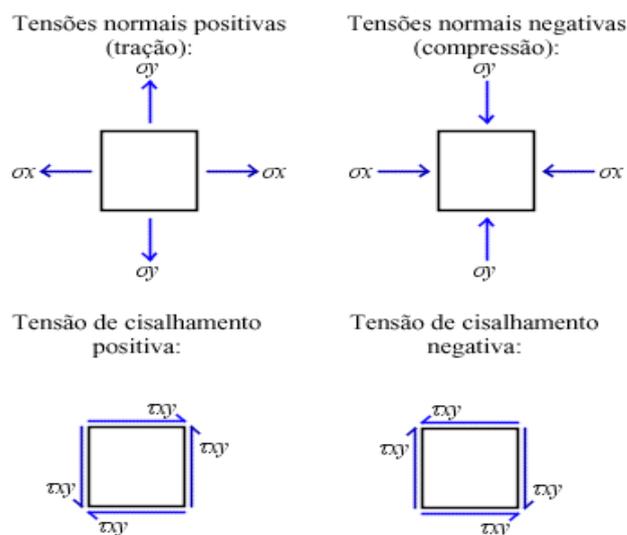
## 2.2 Dimensionamento de Estruturas

O dimensionamento estrutural exige uma compreensão das relações, entre cargas externas aplicadas a um corpo deformável e a intensidade das forças que atuam dentro do corpo. (HIBBELER, 2004). O dimensionamento estrutural advém da necessidade do estudo de estruturas diversas, como: edificações, pontes, veículos e etc. Conceitos e fundamentos, embasados nas propriedades dos materiais, auxilia na identificação do comportamento das estruturas em função das solicitações aplicadas, contribuindo assim para o seu dimensionamento (BOTELHO, 1973).

Para realização de um projeto de uma estrutura ou máquina, faz-se necessário a determinação de cargas internas que atuam sobre seus membros, dessa forma os princípios da estática são de extrema importância para análises, como também o conhecimento do material utilizado para a construção sendo possível melhor compreensão do comportamento do material e definição das equações utilizadas na resistência dos materiais (HIBBELER, 2004).

De acordo com Botelho (1973), devido aos esforços ativos e reativos à estrutura em equilíbrio, é possível que a mesma se rompa caso estes conduzam a sua desintegração material, isso ocorrerá se as partes que constituem a estrutura venham a sofrer valores extremos em face dos valores de tensões. Na Figura 2 são apresentados alguns exemplos de esforços atuantes em um estado plano de tensões referente as tensões normais e de cisalhamento.

Figura 2: Estado plano de tensões.



Fonte: Martha, 2004.

### 2.2.1 Tensão e deformação

Para realização do projeto de uma estrutura devem-se levar em consideração certos aspectos, como, as condições de carregamento a qual estão submetidas e as respectivas deformações causadas, o autor trata como importante, evitar que as deformações saiam de controle e venham a impedir o correto funcionamento da estrutura, conforme tenha sido projetada e que também é possível determinar as tensões baseando-se na análise das deformações (BEER *et al*, 1995).

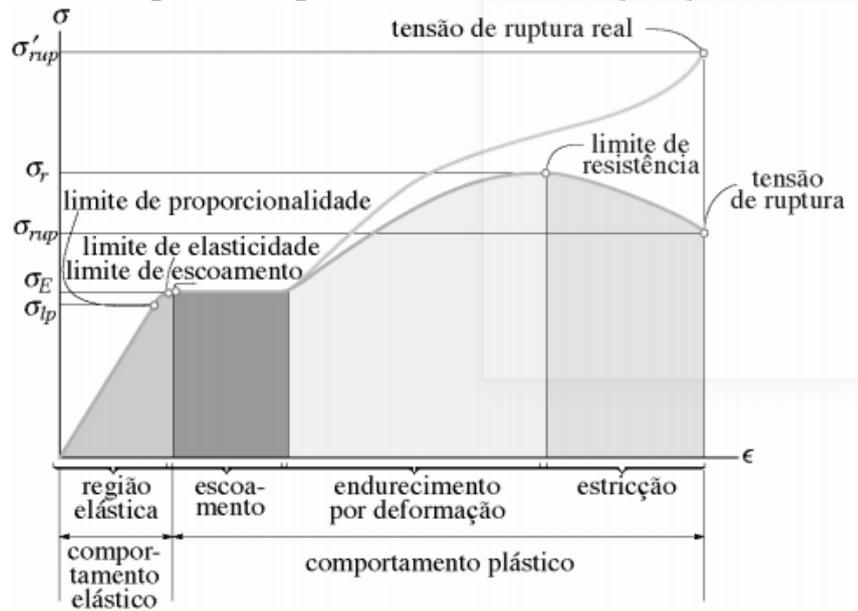
A relação entre tensão e deformação pode ser representada pelo diagrama tensão x deformação, para plotagem deste diagrama é necessário conhecer as características do material utilizado e a carga aplicada, geralmente é realizado um ensaio de tração na amostra do material. Neste ensaio um corpo de prova é posicionado em uma máquina de teste onde é aplicada uma carga  $F$  e a medida que esta carga  $F$  é aumentada, tem-se por consequência o aumento da distância entre as duas marcas no corpo de prova que indicam a distância  $L$  e o alongamento, obtido esses dados, para calcular a tensão  $\sigma$  divide-se o valor da carga  $F$  aplicada pela área da seção transversal inicial  $A_0$  do corpo de prova. Para a deformação  $\varepsilon$  divide-se o alongamento  $\delta$  pelo comprimento inicial  $L_0$  entre as duas marcas, dessa forma, obtém-se o diagrama tensão-deformação onde  $\varepsilon$  corresponde ao eixo “x” e  $\sigma$  corresponde ao eixo “y” (BEER *et al*, 1995).

A curva plotada no diagrama tensão-deformação varia de material para material, complementando a descrição anterior, Hibbeler (2004), apresenta a curva característica do aço, este material é dúctil e muito utilizado em fabricação de estruturas e elementos de máquinas. No diagrama apresentado pela Figura 3 são destacados alguns pontos importantes, sendo eles: Limite de proporcionalidade, a qual as tensões são diretamente proporcionais as deformações; limite de elasticidade, fase onde o material recupera suas dimensões após a retirada dos esforços atuantes; limite de escoamento, início da deformação plástica; limite de resistência, capacidade da máxima tensão que o material suporta até se romper e tensão de ruptura, que corresponde ao ponto de fratura do material.

A Tensão normal-  $\sigma$  é definida por Callister (2002), como a relação entre Força por unidade de área, representado pela equação 1.

$$\sigma = \frac{F}{A_S} \quad (1)$$

Figura 3: Diagrama Tensão x deformação aço.



Fonte: Hibbeler, 2004.

temos que  $F$  é a força aplicada perpendicular à seção de área  $A_s$ . A deformação é definida pela equação 2.

$$\varepsilon = \frac{(l_f - l_0)}{l_0} \quad (2)$$

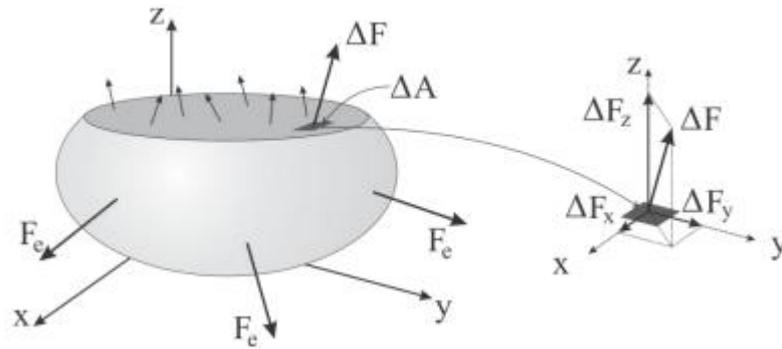
onde  $l_0$  representa o comprimento original antes da aplicação de carga e  $l_f$  o comprimento instantâneo após aplicação de cargas externas (Callister, 2002).

Nos casos Tensões de Cisalhamento-  $\tau$  diferentemente da tensão normal, a força  $F$  é aplicada paralelamente a seção de área-  $A_0$ , sendo calculada pela equação 3:

$$\tau = \frac{F}{A_0} \quad (3)$$

Considerando a Figura 4, têm-se que a relação entre a força e área tendem para um limite finito, denominado Tensão, sendo que a tensão normal  $\sigma$  é definida pela intensidade de força  $\Delta F_z$  por unidade de área que atua perpendicular à área  $\Delta A$ , por outro lado, a tensão de cisalhamento quando as forças  $\Delta F_x$  e  $\Delta F_y$  atuam no sentido tangencial da área  $\Delta A$  (ARGENTA,2012).

Figura 4: Forças internas em uma seção qualquer do corpo.



Fonte: Argenta,2012.

Como  $\Delta F_z$  é normal área, obtém-se a equação 4:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} = \frac{d_z}{dA} \quad (4)$$

Para as componentes de força tangencial, obtém-se as equações 5 e 6.

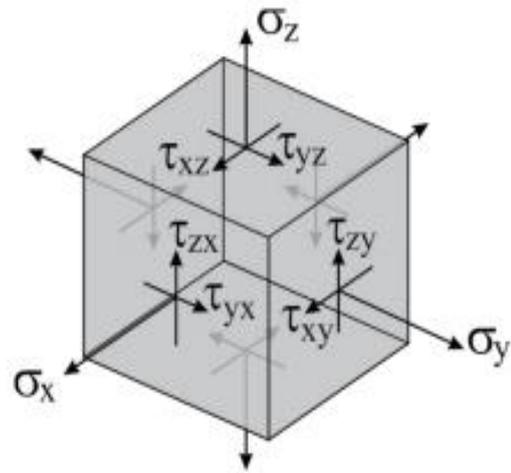
$$\tau_{xz} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} = \frac{d_x}{dA} \quad (5)$$

$$\tau_{yz} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} = \frac{d_y}{dA} \quad (6)$$

Caso o corpo também seja seccionado por planos paralelos ao plano x-z e y-z, pode-se então extrair um elemento cúbico do corpo, conforme a Figura 5, o qual terá o volume tendendo a zero.

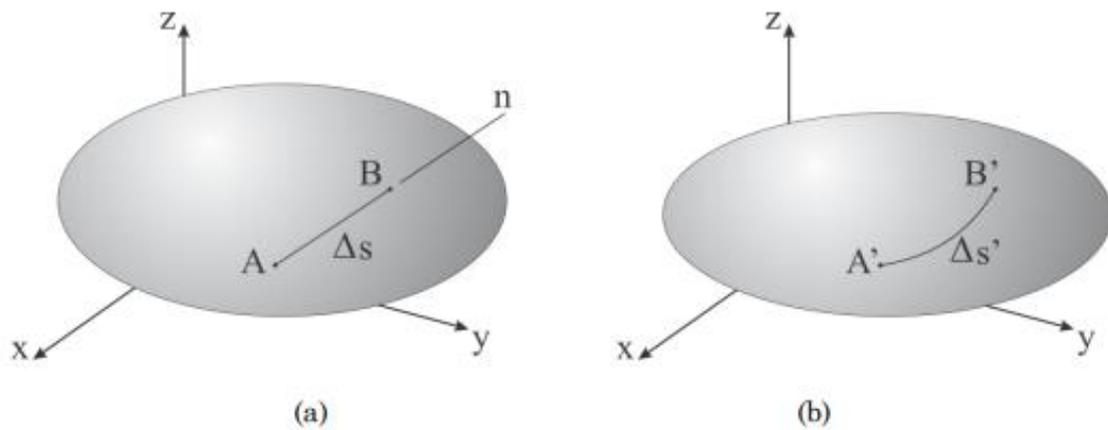
A deformação plástica de um corpo se dá quando este sofre mudanças em sua forma e tamanho. Essas mudanças podem ser perfeitamente visíveis ou praticamente imperceptíveis sem equipamentos de medições precisas. Na Figura 6 é apresentado um exemplo de um corpo em deformação que pode ser observado através da mudança de posição do segmento de reta (ARGENTA,2012).

Figura 5: Estado de tensões tridimensionais para o elemento cúbico infinitesimal.



Fonte: Argenta,2012.

Figura 6: Corpo sem deformação (a) e corpo deformado (b).

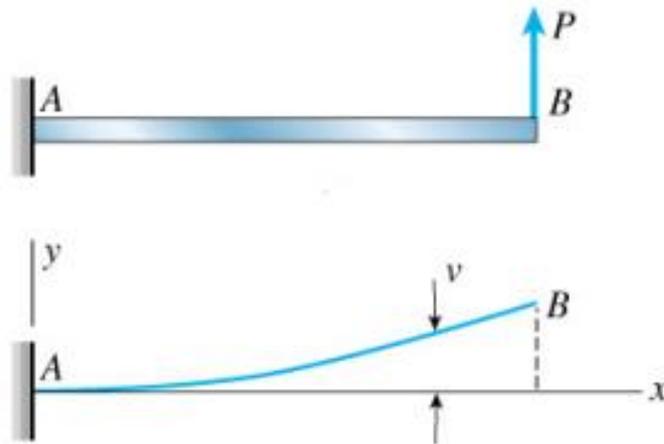


Fonte: Argenta,2012.

### 2.2.2 Flexão

Segundo Gere (2016), flexão é quando o eixo de uma viga é deformado em uma curva a partir de aplicações de cargas, que quando atuam, fazem a viga fletir (curvar). A Figura 7 representa uma viga engastada AB submetida a uma carga P em sua extremidade.

Figura 7: Viga AB sob ação da Carga P e curva de deflexão.



Fonte: Gere, 2016.

Em um equilíbrio estático têm-se variação linear de tensão ao longo da seção transversal do membro, sendo esta máxima nas extremidades e mínima quanto mais próxima do eixo neutro, a deformação de uma viga provoca tensões de tração e compressão em ambas as extremidades, para determina-las utiliza-se a equação 7, onde o momento resultante na seção transversal é igual ao momento produzido pela distribuição linear da tensão normal em torno do eixo neutro (UFPEL, 2021).

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (7)$$

- $\sigma$  = tensão máxima;
- M= Momento fletor;
- c = distância perpendicular do eixo neutro a um ponto mais afastado do eixo neutro onde a tensão máxima;
- I = momento de inércia.

### 2.2.3 Princípio de Saint- Venant

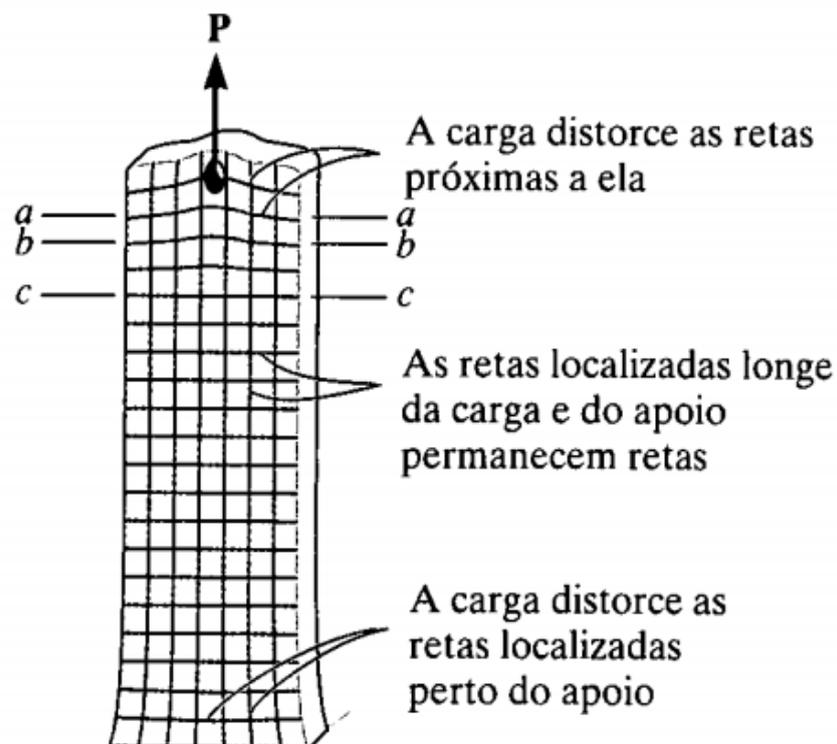
No ramo da engenharia mecânica é possível analisar o comportamento de elementos estruturais por meio da aplicação do princípio de Saint -Venant. Dessa maneira é notório a realização de alguns estudos relacionados ao tema.

Através do método dos elementos finitos, Silva *et al* (2017) apresenta a explicação do Princípio de Saint-Venant, em seu estudo ele faz uma comparação quantitativa e qualitativa de uma barra prismática baseando -se nos conceitos de Resistência dos Materiais.

No estudo realizado por Horgan (1989) *apud* Silva *et al* (2017), vê-se que o princípio de Saint- Venant analisa o comportamento de um material quando este é submetido a uma aplicação de carga, sendo que as tensões atingem níveis elevados próximo às regiões de aplicação de carga e diminuem quando se afastam, obtendo- se valores médios de tensão.

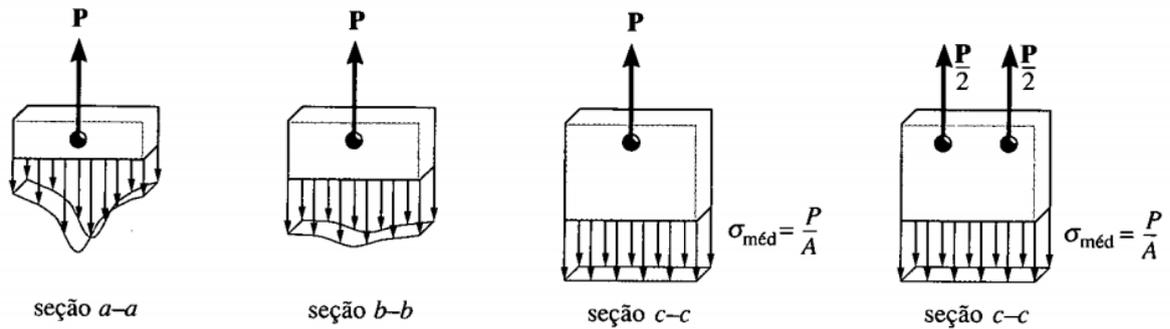
Para efeito de demonstração do Princípio de Saint- Venant, Hibbeler (2004), considera uma barra retangular como mostrada na Figura 8, nesta uma força  $P$  é aplicada próxima ao furo, através das retas traçadas na barra é possível perceber a ocorrência de deformação localizada tanto nas retas superiores próximas ao furo quanto nas retas inferiores. As seções a-a, b-b e c-c mostradas na Figura 9, demonstram como as tensões internas do material se comportam e a tendência a tensão média com afastamento da região de aplicação de carga (seção c-c).

Figura 8: Barra retangular.



Fonte: Hibbeler,2004.

Figura 9: Representação das tensões ao longo das seções.



Fonte: Hibbeler, 2004.

#### 2.2.4 Concentração de Tensão

Descrito por Teixeira *et al* (2012), as concentrações de tensões ocorrem devido às discontinuidades presentes em certas regiões solicitadas mecanicamente, seja em um componente mecânico de uma máquina ou estruturas. Tais discontinuidades podem ser furos, rasgos de chavetas, entalhes dentre outras geometrias, que provocam mudanças na distribuição de tensão nas regiões próximas, ou seja, concentração de tensão. Para quantificar a concentração de tensões, deve-se realizar a razão entre a tensão máxima nas regiões próximas às discontinuidades e a tensão que ocorre na seção total longe da discontinuidade, conforme é apresentada pela equação 8.

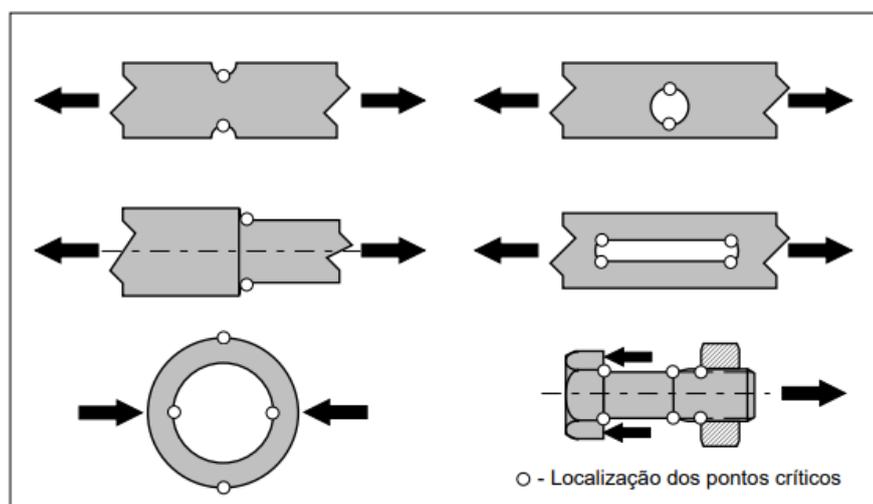
$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (8)$$

Onde:

- $K_t$  : Concentração de tensão;
- $\sigma_{max}$  : Tensão máxima;
- $\sigma_{nom}$  : Tensão nominal.

Na Figura 10 são ilustrados os pontos críticos referente a solicitação máxima de tensão do material sob diferentes geometrias e esforços, nestes pontos são onde ocorre o efeito proveniente da concentração de tensão (ROSA, 2002).

Figura 10: Exemplos de regiões com concentração de tensão provocada pela geometria da peça, com indicação dos pontos críticos.



Fonte: Rosa, 2002.

### 2.2.5 Critério de falha

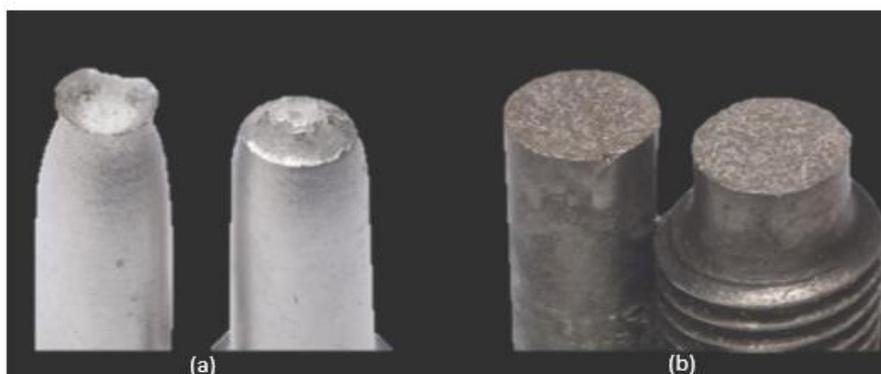
A falha de materiais de engenharia como quase sempre é um evento indesejável capaz de gerar perdas econômicas, materiais, de produtos, serviços e até mesmo vidas humanas. A não ocorrência de falhas é difícil de ser garantida, porém, cabe ao profissional de engenharia prever em projeto possíveis falhas, processar os materiais utilizados de maneira apropriada e se planejar para caso ocorram uma falha, esta deve ser bem avaliada a fim de evitar novos incidentes (CALLISTER, 2002).

Segundo Budynas e Nisbett (2011), um projetista pode se referir a uma falha de diversas maneiras, como, separação de uma peça em duas partes ou mais, distorções permanentes que comprometam a geometria de determinado item tornando-o incapaz de desempenhar sua função, dentre outras situações. No que se refere a falha por fadiga, ela se caracteriza em três estágios: No primeiro estágio ocorre o início de uma ou mais micro trincas, no segundo estágio ocorre a progressão de micro trincas em macro trincas, formando superfícies de fraturas tal qual platôs paralelos separados por sulcos paralelos denominados por marcas de praia e no terceiro estágio ocorre no ciclo de tensão final quando material já não suporta as cargas resultando em uma fratura rápida e repentina.

Callister (2002), relaciona dois tipos de falhas que podem ocorrer por ação de cargas estáticas. A Figura 11 mostra respectivamente os exemplos de falha por fratura dúctil e frágil, ambas estão relacionadas à propagação de trincas, sendo que na fratura frágil elas se propagam

de forma rápida e com pouca deformação plástica, por outro lado, na dúctil de maneira lenta e deformação plástica mais aparente.

Figura 11: (a) Fratura dúctil (b) Fratura frágil.



Fonte: Amuchastegui, 2016.

Para definição do critério de falha, é necessário realizar a caracterização do material identificando se o mesmo é dúctil ou frágil, dessa forma determina-se se o material falhará por escoamento ou por tração (AMUCHASTEGUI, 2016).

Segundo Amuchastegui 2016, os critérios de falha apresentados por Henri Tresca e Von Mises são utilizados para materiais dúcteis. O primeiro prevê falha de um material dúctil submetido a qualquer carregamento e considera que o escoamento do material começa quando a tensão de cisalhamento máxima absoluta atinge o valor da tensão de cisalhamento que provoca escoamento do material em um ensaio de tração ou compressão. O segundo se baseia nos conceitos de energia de distorção de um elemento, ou seja, a energia necessária para causar mudança na forma do elemento.

Budynas e Nisbett (2011, p. 239) apresentam conceitos quanto a teoria da tensão de cisalhamento máxima (Tresca) e a teoria da energia de distorção (Von Mises):

A teoria da tensão de cisalhamento máxima prediz que o escoamento começa sempre que a tensão de cisalhamento máxima em qualquer elemento se torna igual ou excede a tensão de cisalhamento máxima em um espécime de ensaio de tração do mesmo material quando aquele espécime começa a escoar. A teoria MSS também é conhecida como teoria de Tresca ou Guest (BUDYNAS; NISBETT, 2011, p. 239)

A teoria da energia de distorção prediz que o escoamento ocorre quando a energia de deformação por distorção em uma unidade de volume alcança ou excede a energia de deformação por distorção por unidade de volume no escoamento sob tração ou compressão simples do mesmo material (BUDYNAS; NISBETT, 2011, p. 239)

Para calcular a tensão de Von Mises utiliza-se a seguinte equação 9:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}} \quad (9)$$

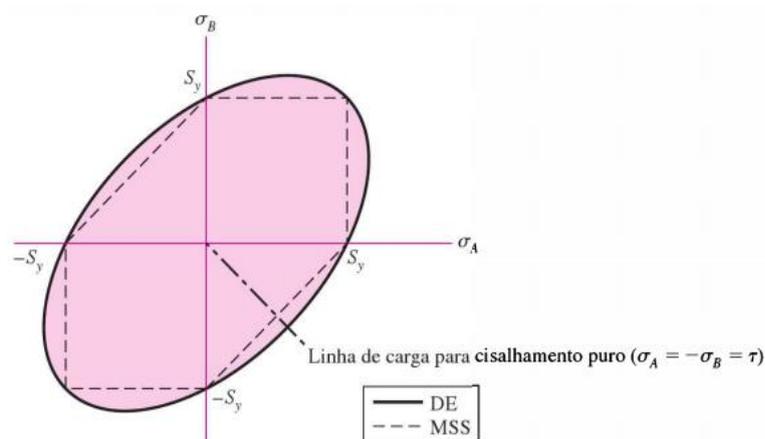
onde,  $\sigma_e$  é a tensão equivalente de Von Mises e  $(\sigma_1, \sigma_2$  e  $\sigma_3)$  são as tensões principais máxima, média e mínima respectivamente.

Para o estado plano de tensão  $\sigma_2 = 0$  podemos reescrever o critério de Von Mises conforme equação 10:

$$\sigma_e > \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xx} \sigma_{yy} + 3 \tau_{xy}^2} \quad (10)$$

A Figura 12 representa graficamente os critérios de falha de Von Mises e Tresca com embasamento em suas teorias apresentadas.

Figura 12: Representação gráfica das Teorias de Von Mises (DE) e Tresca (MSS).

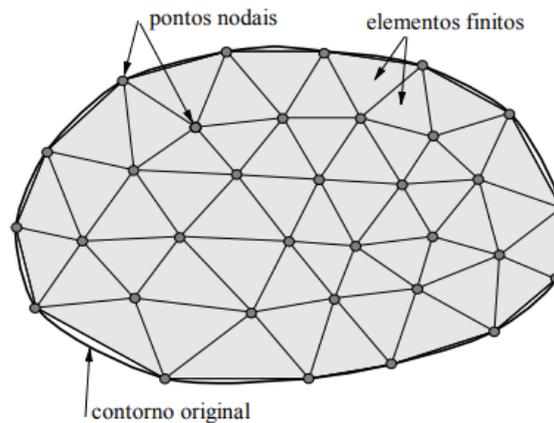


Fonte: Budynas e Nisbett, 2011.

### 2.3 Método dos elementos finitos

No ramo da engenharia lidar com problemas complexos é muito comum, a ideia do método dos elementos finitos (MEF) exposta por Souza (2003), consiste em subdividir o domínio de um problema em sub-regiões simples de geometrias definidas. Na Figura 13 é apresentado a esquematização de um domínio subdividido em elementos finitos triangular.

Figura 13: Malha de elementos finitos.



Fonte: Souza, 2003.

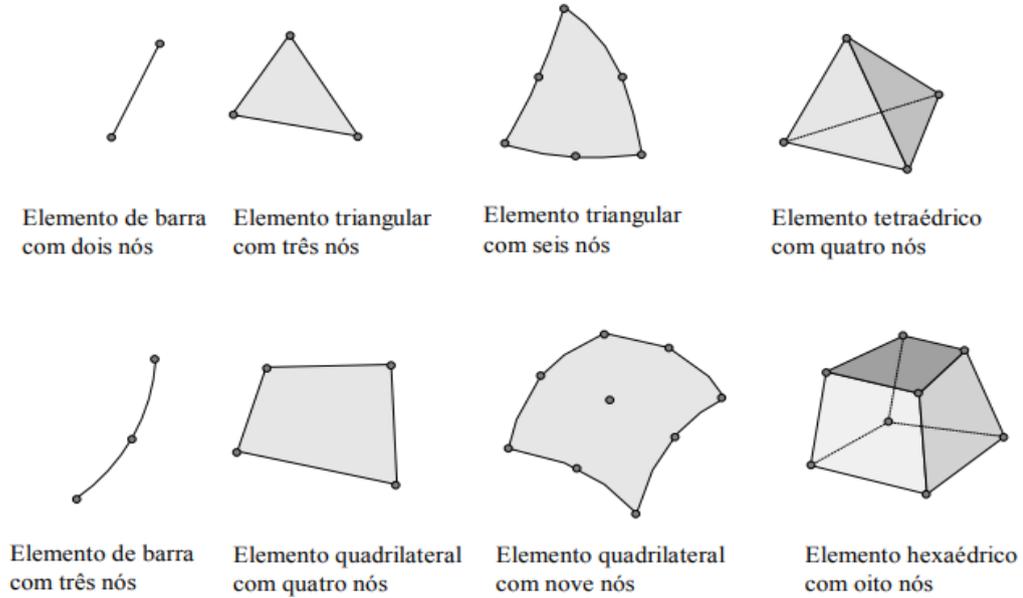
Para realizar a análise MEF, é preciso definir o tipo de elemento a ser utilizado. Souza (2003) apresenta conforme Figura 14 algumas geometrias já desenvolvidas, sendo elas: linear, triangular, tetraédrica, quadrilateral e hexaédricas estas também apresentadas de acordo com o tipo e dimensão do problema sendo eles: unidimensional, bidimensional e tridimensional.

O MEF é um método numérico realizado sob elementos finitos, que por sua vez são interligados entre si através de pontos denominados nós ou pontos nodais, sendo que, o conjunto de elementos finitos é definido como malha. Para maior precisão dos resultados, faz-se necessário levar em consideração algumas condições, como: quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha. A representação da interligação entre os nós e elementos de uma malha pode ser vista na Figura 15 a qual apresenta também a escala de cores dos gráficos de uma análise real de uma peça (MIRLISENNA, 2016).

O método dos elementos finitos é uma ferramenta muito utilizada no meio acadêmico para realização de pesquisas e análises numéricas de estruturas em diferentes áreas do conhecimento. Azevedo e Soriano destacam que a evolução computacional facilitou as análises de estruturas através do método dos elementos finitos, a priori eles se basearam no procedimento físico e intuitivo, subdividindo um modelo complexo de um meio contínuo em

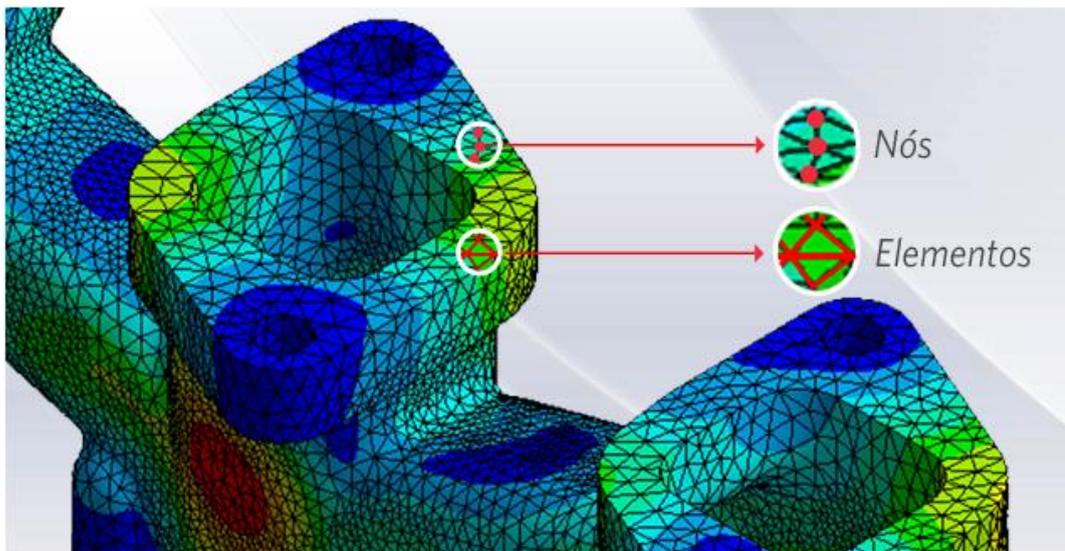
elementos de geometria simplificada, criando malhas de elementos finitos para análises a fim de obter facilidade para solução (MALAGUTTI, 2013).

Figura 14: Diferentes tipos de geometrias para análise MEF.



Fonte: Souza,2003.

Figura 15: Nós e elementos presentes em uma malha.



Fonte: Mirlisenna, 2016.

Argyris e Kelsey (1955) foram os primeiros engenheiros a utilizarem o MEF, eles o aplicaram na indústria aeronáutica, tendo como objetivo a realização de análises da distribuição de tensões em chapas da asa de avião (SORIANO, 2003).

Citado por Pinho e Moraes (2014), os primeiros a utilizarem o MEF foram Dantas, (1971), que utilizou o MEF na análise de problemas assimétricos e Rodrigues (1972), fez uma abordagem do método dos elementos finitos na análise de cascas de revolução sob carregamento assimétrico.

A versatilidade da ferramenta de análise computacional abrange também áreas da medicina, Jesus, Neto e Coutinho (2015), utiliza a ferramenta para analisar a biomecânica da estrutura óssea da órbita de um paciente, levando em consideração os deslocamentos e tensões causadas por condições fisiológicas e patológicas.

Mirlisenna (2016) destaca que a simulação computacional é amplamente utilizada nas empresas no que se refere às análises prévias de projetos e produtos, sendo que, a maioria dessas análises são realizadas por *softwares* que utilizam o MEF, possibilitando a obtenção de respostas para inúmeros problemas de engenharia.

### 2.3.1 Matriz de Rigidez

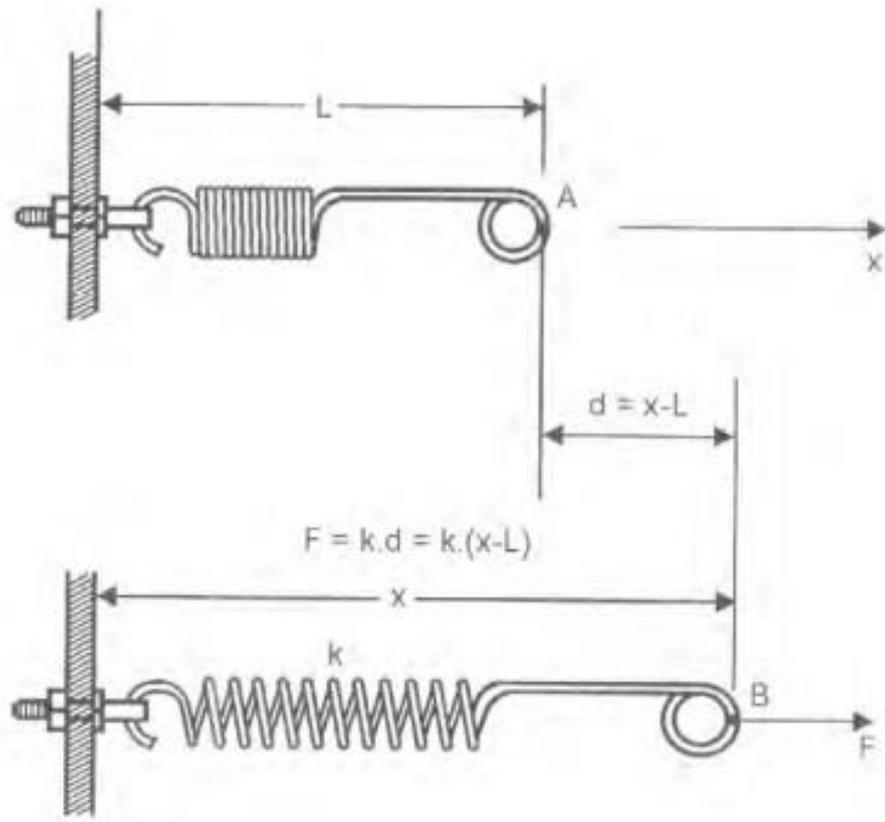
Alves Filho (2000) define rigidez baseando nos primórdios da Análise Matricial de Estruturas e o Método dos Elementos Finitos, ambos fazem a relação entre as forças nodais e deslocamentos nodais de um único elemento. Para exemplificar o conceito de rigidez é verificado a relação entre a carga aplicada e o deslocamento sofrido por uma mola, sendo esta relação a medida de rigidez da mola, figura 16. De modo geral este exemplo, permite a compreensão do que acontece em um elemento finito, visto que o modelo de análise é realizado pela equação 11, levando em consideração os diferentes tipos de esforços aplicados à estrutura e por consequência as componentes de rigidez.

$$[F] = [k] [U] \quad (11)$$

Onde:

- $[F]$  é a matriz com todas as cargas nodais;
- $[k]$  é a Matriz Rigidez da Estrutura que relaciona as forças e os deslocamentos nodais;
- $[U]$  É a matriz coluna com os deslocamentos nodais.

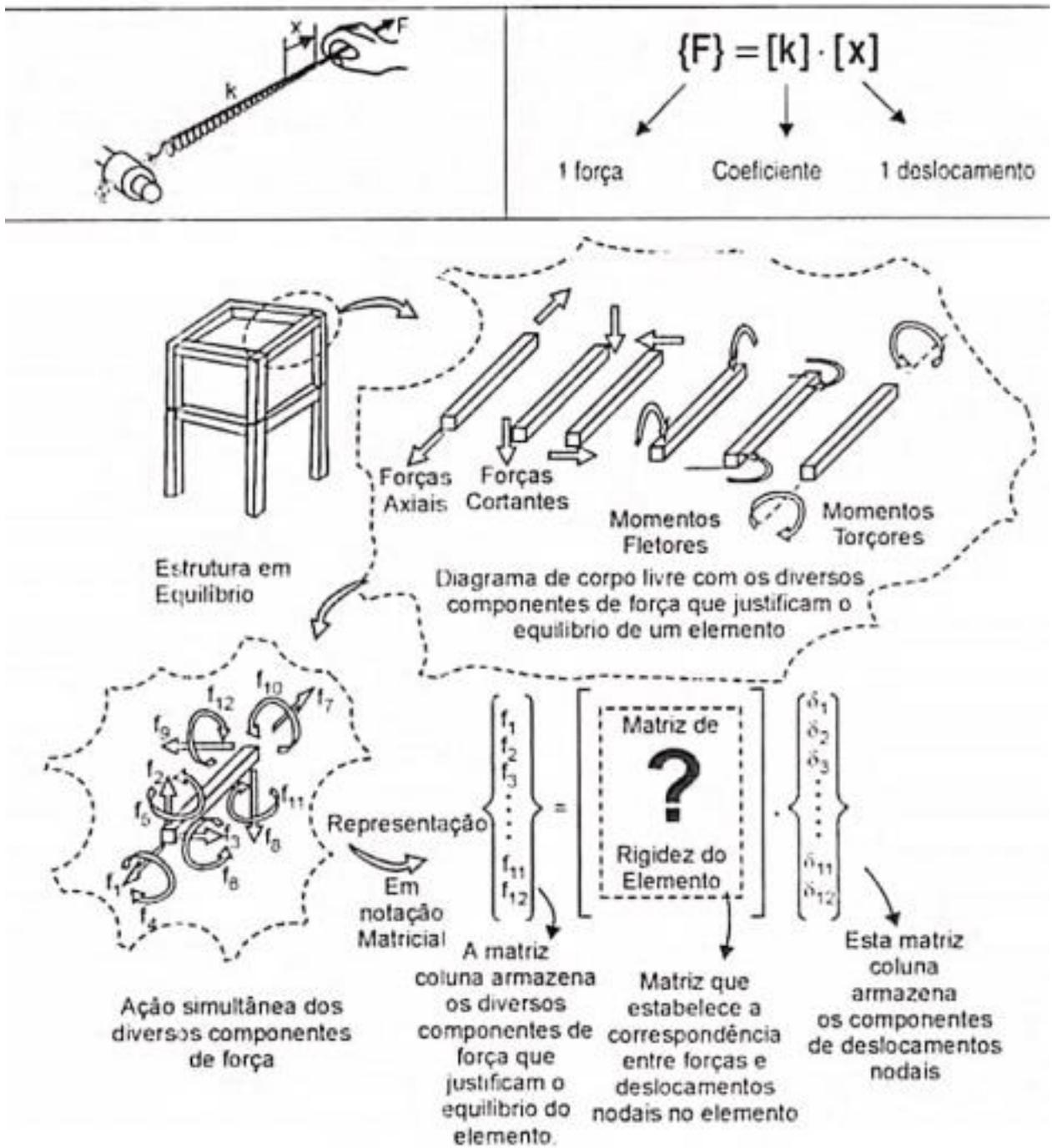
Figura 16: Relação entre Força e Deslocamento de uma mola.



Fonte: Alves Filho, 2000.

Em uma análise por elementos finitos, o conceito de rigidez é aplicado de forma mais ampla, enquanto na mola tem-se apenas rigidez axial, devido às forças axiais, em uma viga por exemplo tem-se várias componentes de rigidez simultaneamente, como rigidez axial, rigidez a torção, rigidez a flexão e ao cisalhamento. Através da figura 17, é possível visualizar a formação da matriz levando em consideração o elemento mola e uma viga, parte de um elemento de uma estrutura em equilíbrio (ALVES FILHO, 2000).

Figura 17: Matriz de rigidez de um elemento (mola), matriz de rigidez de uma viga.



Fonte: Alves Filho, 2000.

### 2.3.2 Tipos de Análise

Para Azevedo (2003), o surgimento da necessidade de análise de uma estrutura por meio do MEF, deve-se levar em consideração alguns aspectos, sendo eles: Geometria da estrutura,

Material de construção e as solicitações externas aplicadas, além disso, os diferentes tipos de análises que serão abordados a seguir.

Em se tratando da análise estática, Alves Filho (2008), afirma que esta é realizada em estruturas onde a ação de um carregamento não varia ao longo do tempo, ou varia tão lentamente, que em cada instante é correto considerá-lo estático. No caso de uma análise dinâmica são observados os efeitos das acelerações que causam variação de velocidade dos componentes e fazem com que os carregamentos variem rapidamente com o tempo, tirando assim a estrutura da sua condição de equilíbrio estático.

A análise estática se baseia em determinadas condições básicas, Nascimento (2019) apud Martha (2012), relacionam as seguintes: compatibilidade entre deslocamentos e deformações, comportamento do material de construção da estrutura, os tipos de reações de apoio, rotações, tensões e esforços.

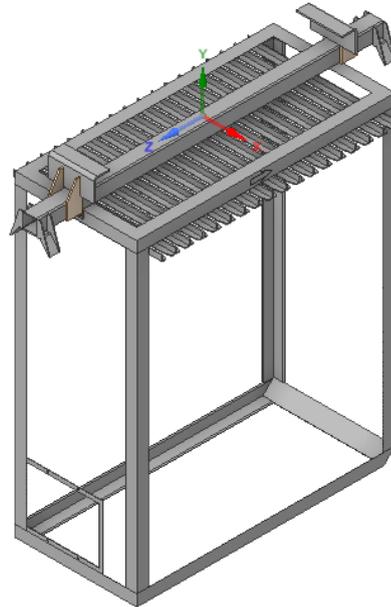
Em uma análise dinâmica de uma estrutura são consideradas as ações causadas pelas forças de inércia associadas às acelerações de cada membro que a compõem, por outro lado, a análise estática considera que essas forças são aplicadas de forma lenta e não causam efeito suficiente (AZEVEDO, 2003).

Conforme Azevedo (2003), a análise linear e não linear se difere em relação às considerações feitas sob a geometria da estrutura. Em uma análise linear, essas considerações são sob a geometria inicialmente sem deformação aparente, por outro lado, a análise não linear considera a geometria deformada pela ação das tensões e carregamentos.

Segundo Alves Filho (2008), tanto a análise linear quanto a análise não linear de uma estrutura estão relacionada ao conceito de rigidez, sendo que na análise linear a rigidez da estrutura não se altera à medida que o carregamento se manifesta, ou seja  $[k]$  é constante, por outro lado, em uma análise não linear a rigidez da estrutura é dependente do estágio do carregamento em que ela se encontra.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

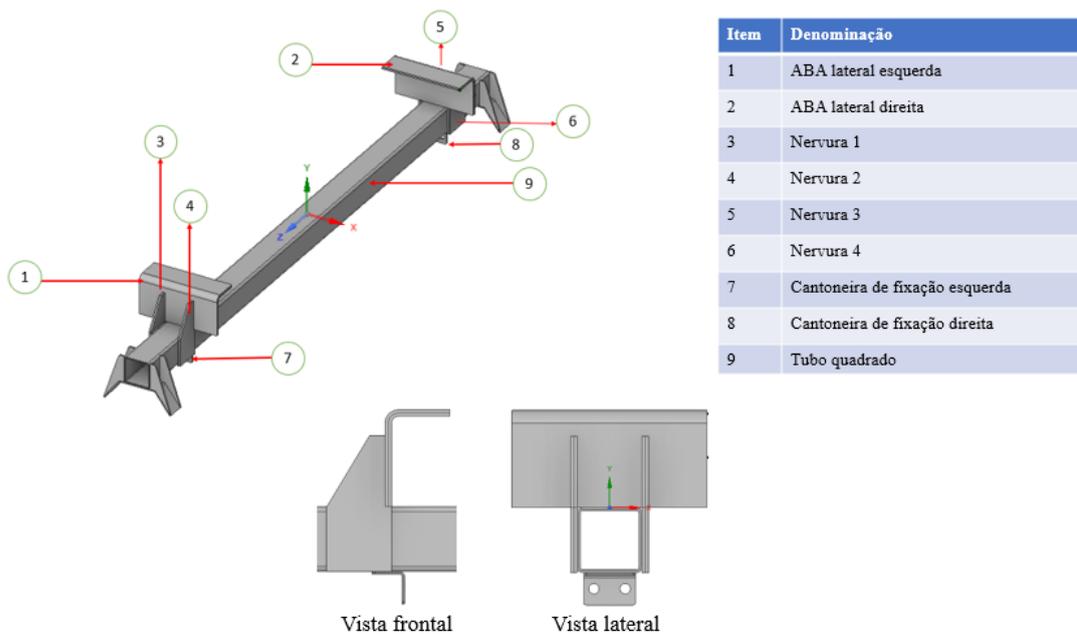
O *Skid*, como mostra a Figura 18, é um equipamento utilizado para realização da análise é um dispositivo utilizado para fixação de produtos metálicos diversos, cujo objetivo é a realização do processo de pintura e/ou banhos para limpeza e prevenção de oxidação.

Figura 18: *Skid*

Fonte: Do autor, 2021.

A viga de sustentação, representada na Figura 19, é composta pelas abas lateral esquerda e lateral direita, nervuras, cantoneiras de fixação esquerda e direita e pelo tubo quadrado.

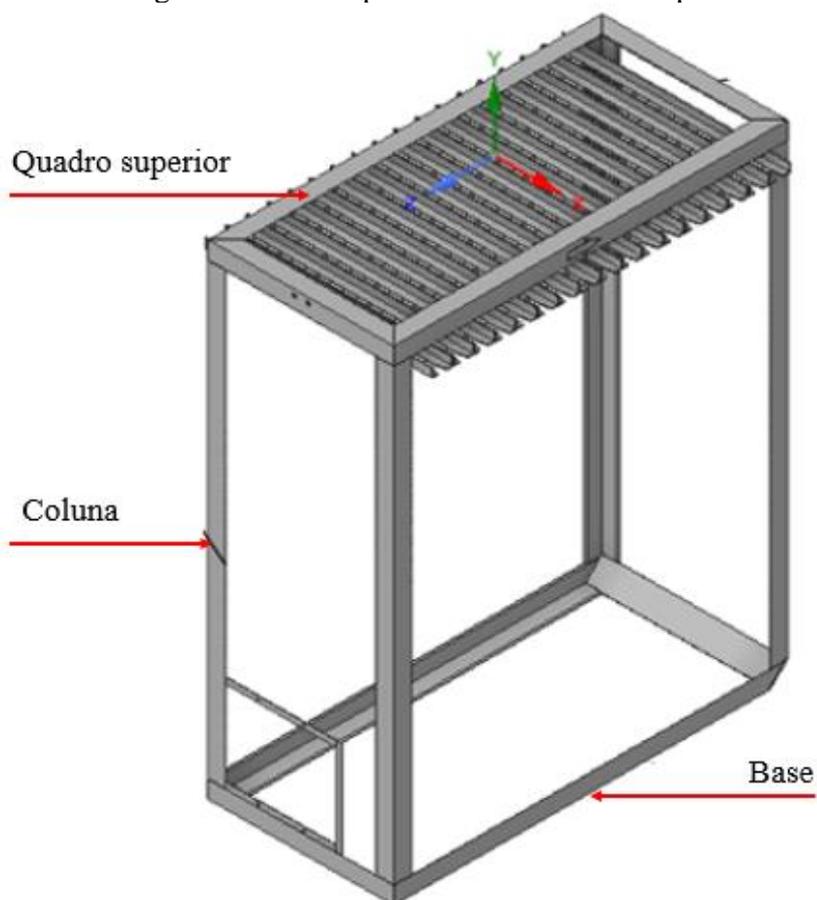
Figura 19: Viga de sustentação.



Fonte: Do autor, 2021.

A gaiola, local de armazenamento de produtos, representada pela Figura 20, é composta pela base, colunas, quadro superior e travessas para fixação das peças de trabalho, possui peso aproximado de 220 kgf, sendo este obtido via modelo CAD, utilizando o volume gerado e a densidade do material.

Figura 20: Gaiola para armazenamento de produtos.



Fonte: Do autor, 2021.

Para realização da análise algumas etapas foram seguidas: Definições preliminares e o Pré-Processamento.

### 3.1 Definições preliminares

Nesta etapa foram realizadas considerações fundamentais para entendimento do funcionamento da estrutura e consequentemente realização da análise. A definição para realização de uma análise estática, se deu em função da velocidade do carregamento da estrutura, o qual ocorre de forma muito lenta, nos possibilitando a aplicação de uma análise

estática, as condições de contorno levaram em conta o funcionamento real da estrutura em trabalho, onde a mesma recebe carregamento vertical aplicado nas abas lateral esquerda e direita conforme representado na Figura 19.

A estrutura foi desenvolvida para compor o sistema de transporte de peças metálicas nos processos de pré-tratamento e pintura por imersão, ela está sujeita a certas variações durante o processo como movimentações vertical ascendente e descendente e movimentação horizontal, sendo principalmente submetida ao carregamento estático constante devido ao somatório de massas das peças metálicas a serem pintadas. O transporte do *Skid* é realizado por meio de um pórtico automatizado e um sistema de elevação por cintas, este realiza o posicionamento dos *Skids* ao decorrer de 17 posições, sendo 13 tanques e 4 posições no transportador de *Skids*. O posicionamento do *Skid* ao pórtico é feito através das abas da viga de sustentação e as abas contrárias na estrutura do elevador do pórtico, estas possuem dimensões aproximadas e apoiam entre si como mostra a Figura 21.

Para realização deste trabalho foram desconsideradas as variações do processo de pintura e movimentação do *Skid*, dessa forma, foi realizado uma análise estática da viga de sustentação do *Skid* quando este em posição de elevação máxima realizada pelo pórtico conforme Figura 22.

A condição de contorno crítica adotada para o carregamento levou em consideração o abastecimento do *Skid* com uma quantidade de peças que possam atingir a carga aproximada ou igual a do pórtico que é de 3,0 toneladas, conforme informado pela empresa. Para isto foi utilizado como referência uma peça de aço de massa igual a 7,5 kg, a qual faz parte do processo. Na Tabela 3 são apresentados possíveis situações de abastecimento levando em consideração o somatório de massas total conforme a quantidade de peças por *Skid* adicionalmente considerada a massa da gaiola (220 kg), sendo a carga total aplicada nas abas laterais da viga de sustentação, como mostra a Figura 23.

Figura 21: Posicionamento do Skid no pórtico.



Fonte: Do autor, 2021.

Figura 22: *Skid* em elevação máxima.



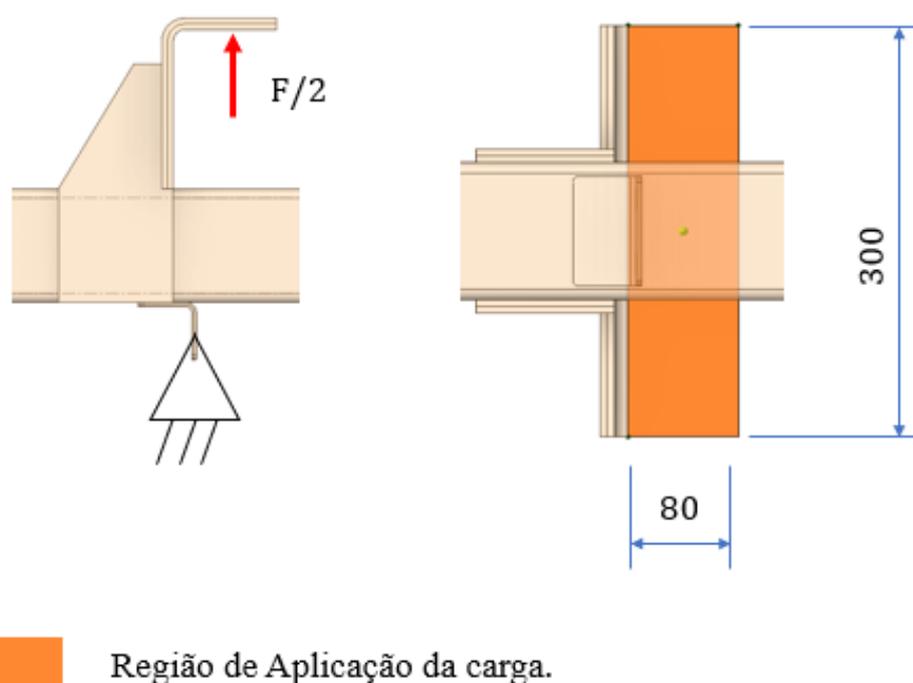
Fonte: Do autor, 2021.

Tabela 3: Somatório de massas.

Quantidade de peças por <i>Skid</i>	Massa total das peças (kg)	Somatório total de massas Peças + gaiola (kg)	Força- F (kN)	Força- F/2 (kN)
100	750,0	970,0	9,5	4,8
200	1500,0	1720,0	16,9	8,5
300	2250,0	2470,0	24,2	12,1
370	2775,0	2995,0	29,3	14,7

Fonte: Do autor, 2021.

Figura 23: Região de aplicação da carga na ABA lateral.



Fonte: Do autor, 2021.

### 3.2 Pré-Processamento

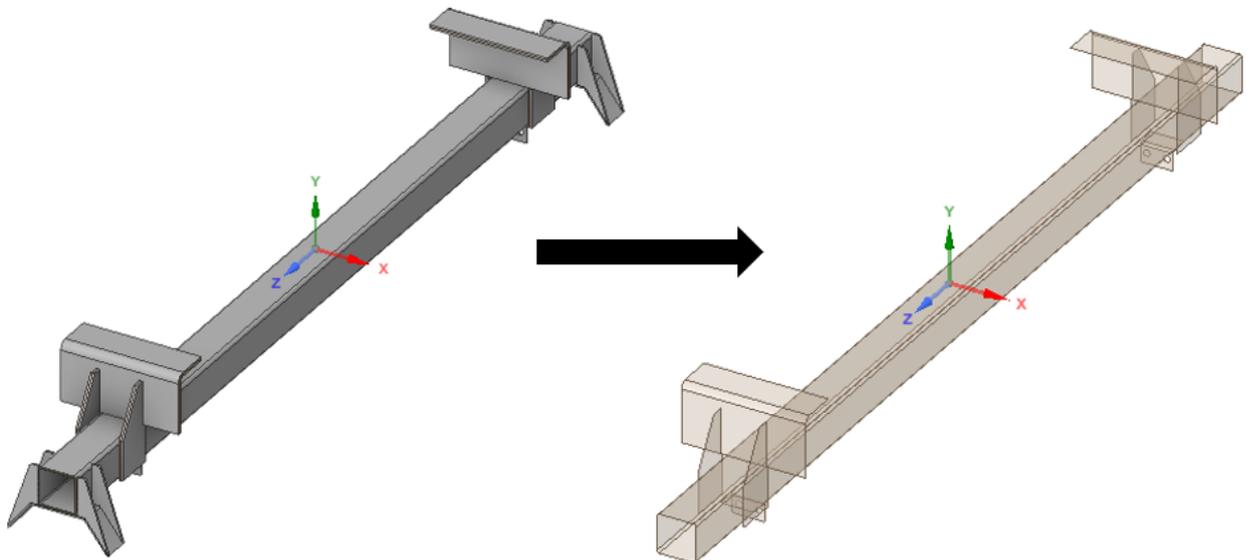
Na etapa de Pré-processamento realizou-se a preparação do modelo para realização da análise por elementos finitos. A partir da plataforma ANSYS R2 2021 Student, foi possível realizar desde o modelamento CAD da estrutura e a aplicação das restrições necessárias para realização da análise estática.

Antes de iniciar a análise, fez-se necessário coletar as dimensões da estrutura do *Skid* em campo, posteriormente foi realizado a geração da geometria 3D utilizando o *Software CAD Space Claim* da plataforma Ansys. Ao modelar e montar os componentes da viga de sustentação, foram extraídas as superfícies médias de cada corpo que a compõe, para aplicação da malha e as condições de contorno, como mostra a Figura 24. Devido, os componentes que compõe a estrutura possuírem comprimentos maiores do que as espessuras, a extração de superfícies médias permitiu a utilização do elemento quadrilateral de estado plano de tensão, sendo este aplicado em todos os componentes da estrutura representado pela Figura 25, obtendo-se um total de 5500 elementos e 5724 nós.

Utilizando o módulo *Mechanical* aplicou-se em toda a geometria o aço estrutural, a Tabela 4 apresenta suas propriedades mecânicas.

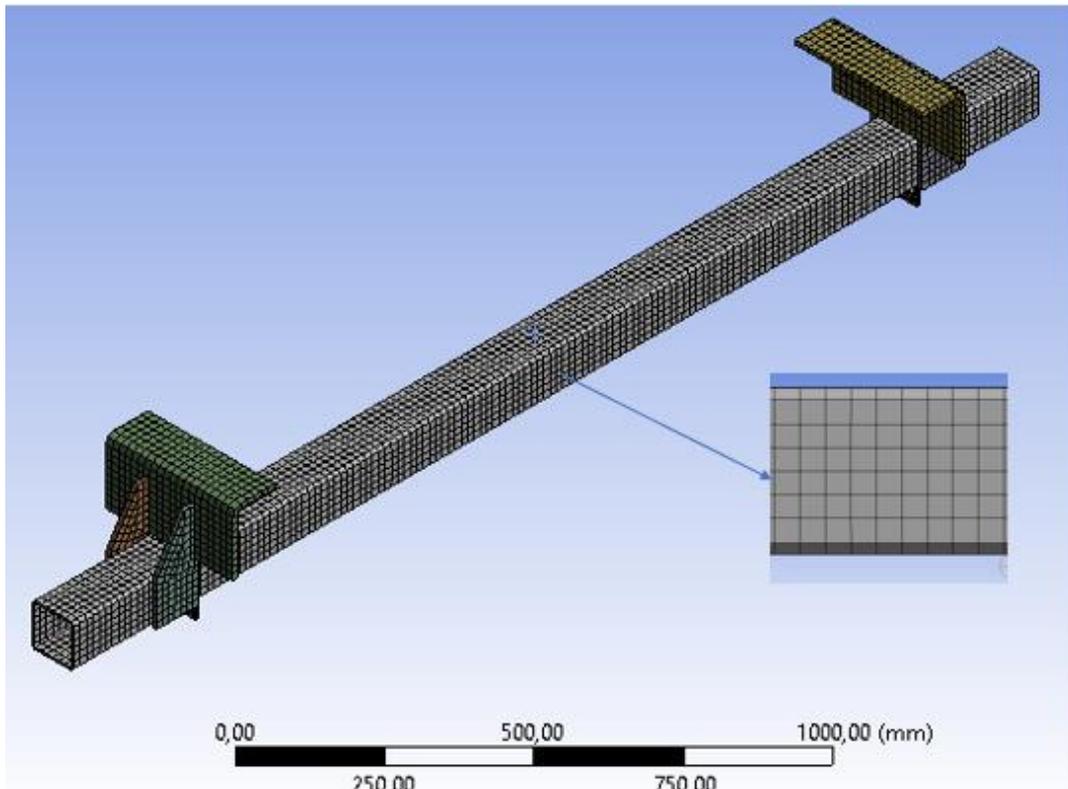
Os perfis que compõe a estrutura analisada são unidos por solda, porém para realização deste estudo os mesmos foram desconsiderados e substituídos por contatos ligados “*bonded*”, dessa maneira foram realizadas todas as conexões necessárias. Na Figura 26 são apresentadas as regiões conectadas.

Figura 24: Geometria 3D e superfícies médias.



Fonte: Do autor, 2021.

Figura 25: Malha de elementos finitos.



Fonte: Do autor, 2021.

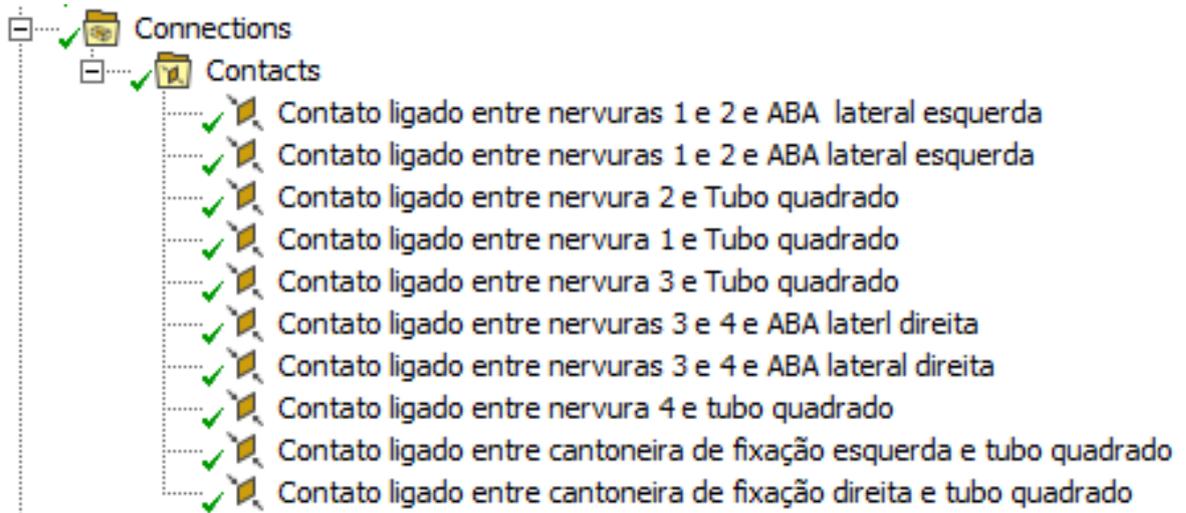
Tabela 4: Propriedades mecânicas do aço estrutural.

Tensão de ruptura- $\sigma$ [MPa]	Tensão de Escoamento- $\sigma_e$ [MPa]	Módulo de Young- E [GPa]	Coefficiente de Poisson- u	Massa específica- $\gamma$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Temperatura - T [°C]
460	250	210	0,3	7850	22

Fonte: Ansys R2, 2021.

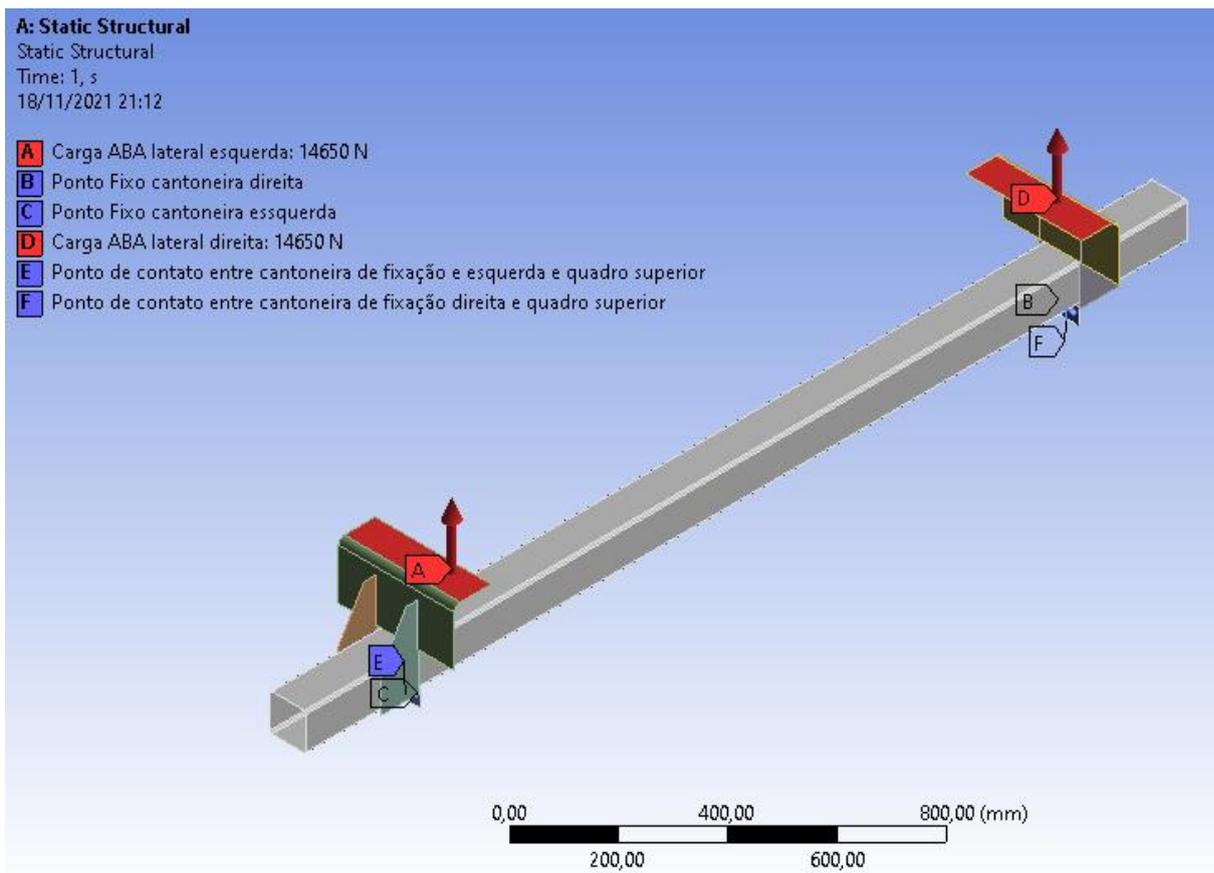
Para realização da análise foram aplicadas as condições de contornos conforme a Figura 27, os pontos “A” e “D” representam as regiões de aplicação das cargas definidas como condição crítica, os pontos “B” e “C” representam os pontos de união da viga de sustentação á gaiola de armazenamento, para realização da análise estes foram aplicados nos furos das cantoneiras de fixação como *Fixed Support*, por fim, os pontos “E” e “F” foram aplicados nas faces internas das cantoneiras de fixação como suportes *Frictionless* uma vez que estes pontos são apoiados na barra do quadro superior da gaiola.

Figura 26: Regiões de aplicação de contato ligado (bonded).



Fonte: Do autor, 2021.

Figura 27: Condições de contorno aplicado ao model



Fonte: Do autor, 2021.

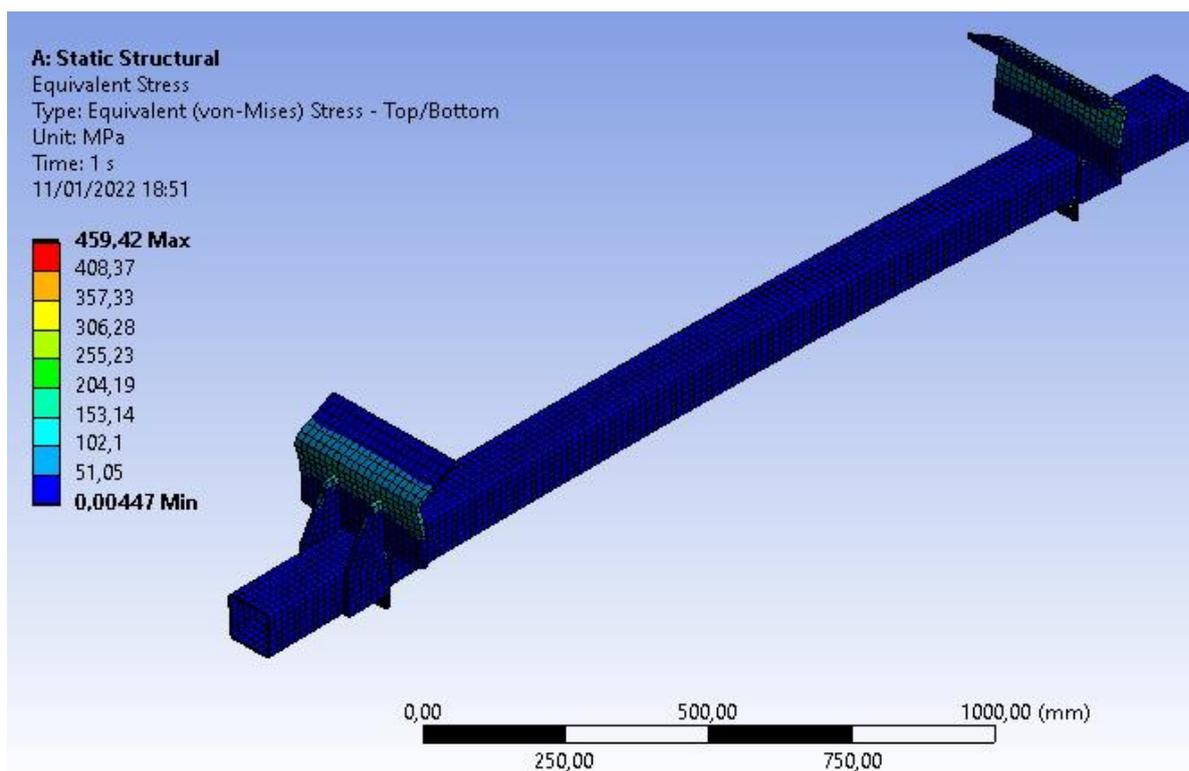
#### 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta etapa foram apresentadas as soluções analíticas, sendo estas comparadas aos resultados obtidos via software Ansys.

#### 4.1 Solução e Pós processamento.

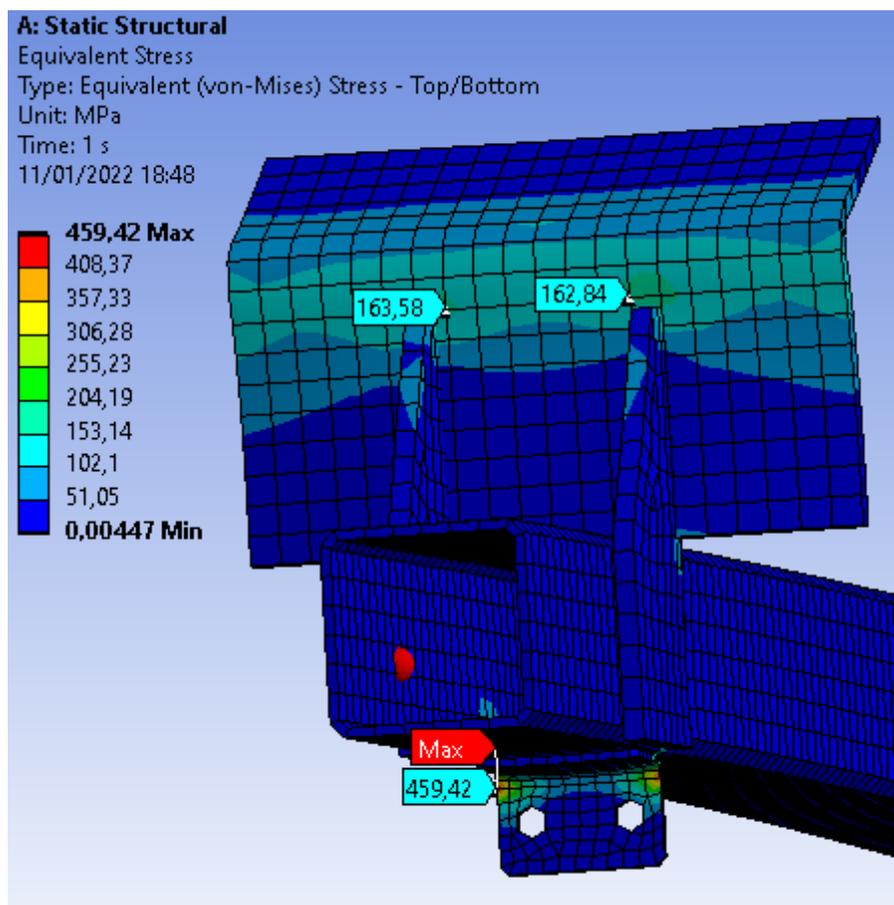
A primeira análise realizada foi utilizando a equação Equivalente de Von Mises quanto a viga de sustentação submetida ao esforço crítico de 29,3 kN sendo 14,7 kN em cada aba. A Figura 28 mostra que a tensão máxima excede o limite de escoamento do material que é de 250 MPa. O ponto de maior concentração de tensão ocorre na cantoneira de fixação da viga de sustentação á gaiola de armazenamento, que obteve um resultado de 459,42 MPa conforme mostra a Figura 29, este é devido as tensões de flexão e normal proveniente dos esforços de tração e flexão que atuam na cantoneira que possui geometria subdimensionada.

Figura 28: Tensões de Von Mises  $F = 29,3$  kN.



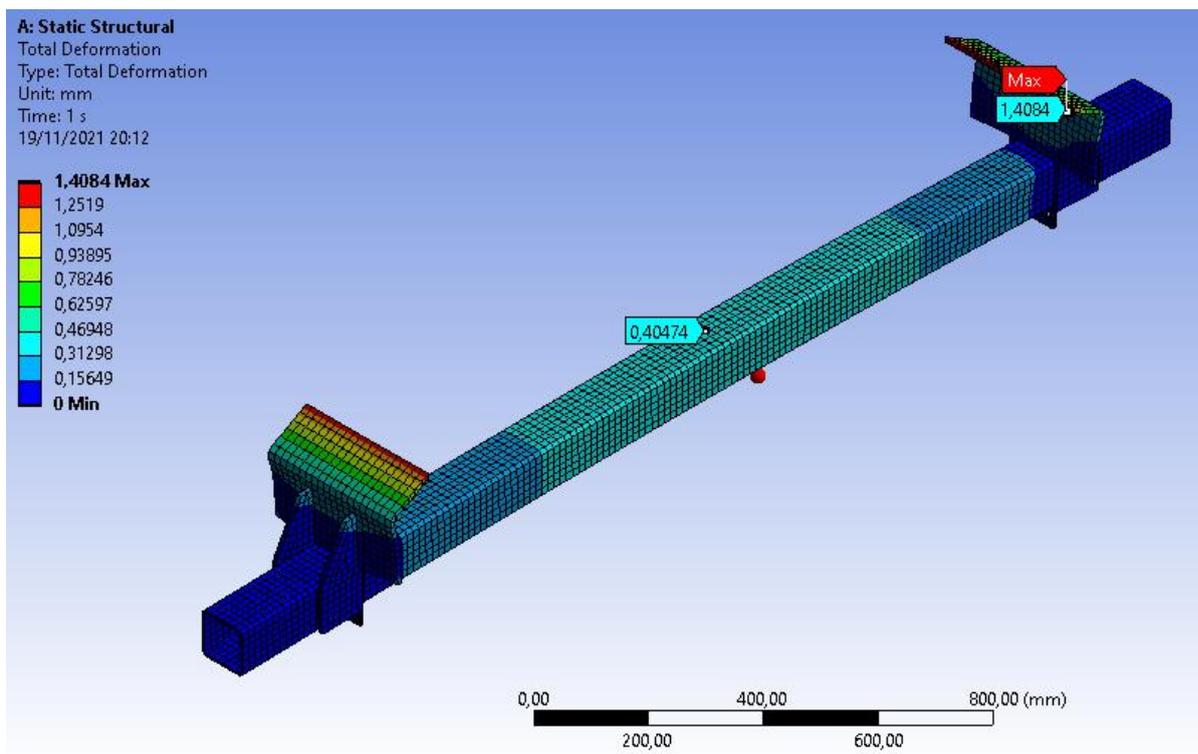
Fonte: Do autor, 2021.

Figura 29: Concentração de tensão na cantoneira de fixação e aba lateral  $F = 29,3$  kN.



Fonte: Do autor, 2021.

Outra análise realizada foi quanto as deformações existentes na estrutura da viga de sustentação, considerando o carregamento de 29,3kN. A Figura 30 mostra as deformações ocorridas. Analisando os resultados de deformações obtidos pode se observar o comportamento natural da estrutura, observa-se que a deformação máxima ocorre nas extremidades das abas laterais com valor de 1,4 mm e também deformação desprezível de 0,4 mm no centro tubo quadrado devido a ação de momento fletor.

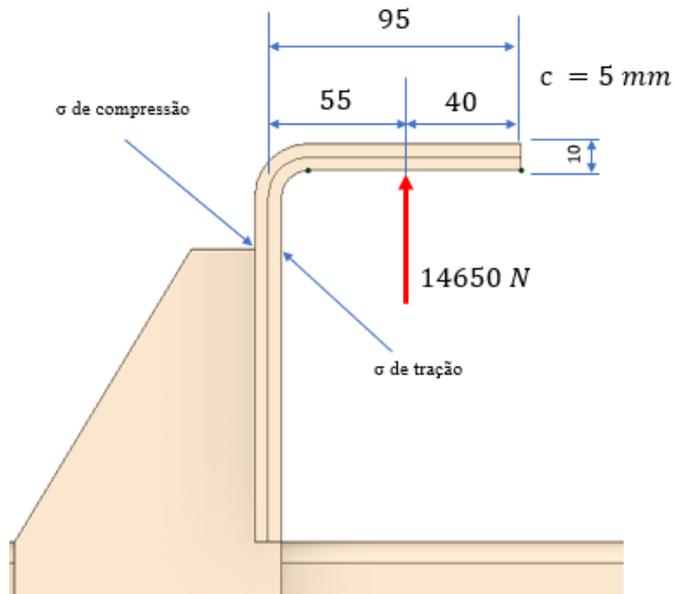
Figura 30: Deformações resultantes  $F= 29,3$  kN.

Fonte: Do autor, 2021.

Para efeito de comparação com as análises realizadas pelo *software* foram calculadas as tensões atuantes nos pontos críticos da estrutura, estes são as abas laterais e as cantoneiras de fixação, figuras 31 e 32 respectivamente. A seguir foram apresentados a formulação do cálculo das tensões atuantes nas abas laterais e posteriormente nas cantoneiras de fixação, utilizando a associação de carregamentos obteve-se os resultados de tensões compostas oriundas de flexão e o carregamento axial, ao final a Tabela 5 apresenta a comparação entre os resultados e o erro relativo.

Cálculo da tensão composta na aba lateral:

Figura 31: Aba lateral.



Fonte: Do autor, 2021.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} + \frac{F}{A}$$

$$M = Fd \quad M = 14650 \text{ N} * 55 \text{ mm} \quad M = 805750 \text{ Nmm}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad I = \frac{300(10)^3}{12} \quad I = 25000 \text{ mm}^4$$

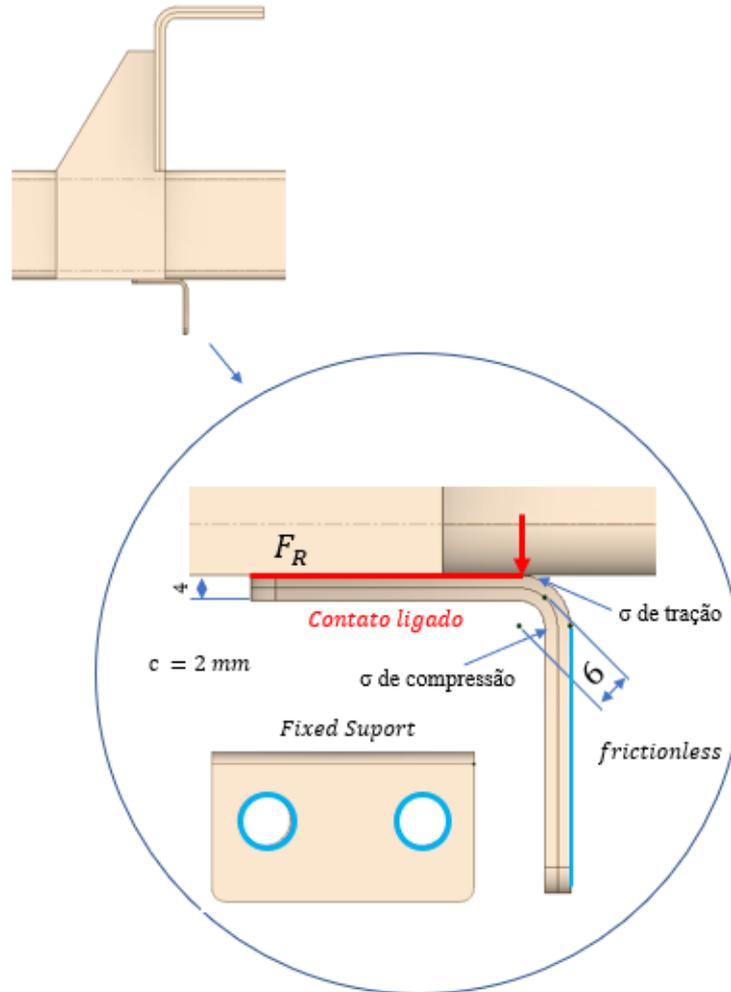
$$\sigma = \frac{Mc}{I} + \frac{F}{A}$$

$$\sigma = \frac{805750 \text{ Nmm} * 5 \text{ mm}}{25000 \text{ mm}^4} + \frac{14650 \text{ N}}{(300 \text{ mm} * 10 \text{ mm})}$$

$$\sigma = 166,03 \text{ MPa}$$

Cálculo da tensão composta na cantoneira de fixação:

Figura 32: Cantoneira de fixação.



Fonte: Do autor, 2021.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} + \frac{F}{A}$$

$$M = Fd \quad M = 14650 \text{ N} * 6 \text{ mm} \quad M = 87900 \text{ Nmm}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad I = \frac{80(4)^3}{12} \quad I = 426,67 \text{ mm}^4$$

$$\sigma = \frac{Mc}{I} + \frac{F}{A}$$

$$\sigma = \frac{87900 \text{ Nmm} * 2 \text{ mm}}{427,67 \text{ mm}^4} + \frac{14650 \text{ N}}{(80 \text{ mm} * 4 \text{ mm})}$$

$$\sigma = 456,84 \text{ MPa}$$

Tabela 5: Erro relativo entre valores de tensão calculados e resultados obtidos via software.

Componente	Carregamento aplicado [kN]	Valor calculado [MPa]	Valor Software [MPa]	Erro relativo [%]
Cantoneira de fixação	29,3	166,03	163,58	1,49
Aba lateral	29,3	456,84	459,42	-0,56

Fonte: Do autor.

Visto que ao utilizar o carregamento aproximado a capacidade de carga do pórtico, a tensão máxima atuante na cantoneira de fixação é superior ao limite de escoamento do material, então, fez-se necessário determinar a capacidade do *Skid* baseado na tensão de escoamento do material  $\sigma_{esc} = 250 \text{ MPa}$ .

$$\sigma_{esc} = \frac{Mc}{I} + \frac{F}{A}$$

$$\sigma_{esc} = \frac{Fdc}{I} + \frac{F}{A}$$

- Tensão de escoamento do aço estrutural:  $\sigma_{esc} = 250 \text{ MPa}$
- Momento fletor:  $M = 6 * F \text{ Nmm}$
- Distância até a linha neutra:  $c = 2 \text{ mm}$
- Momento de inércia:  $I = 426,67 \text{ mm}^4$
- Área da seção transversal:  $A = 320 \text{ mm}^2$

$$\sigma_{esc} = \frac{Fdc}{I} + \frac{F}{A}$$

Substituindo,

$$250 \text{ MPa} = \frac{F * 6 \text{ mm} * 2 \text{ mm}}{426,67 \text{ mm}^4} + \frac{F}{320 \text{ mm}^2}$$

$$250 = 0,0281 F + 0,003125F$$

$$F = 8005,62 \text{ N ou } 8\text{kN}$$

$$F = 8005,62 \text{ N} / 9,81 \text{ m/s}^2$$

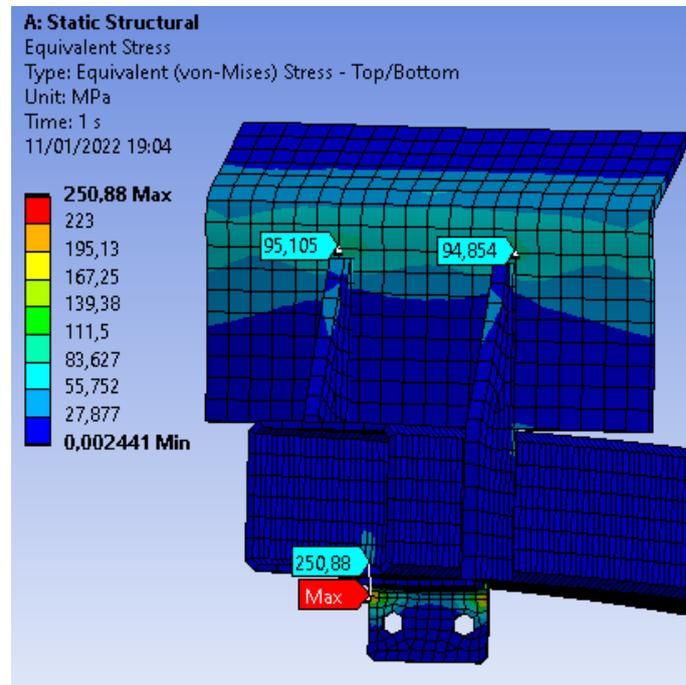
$$F_{cantoneira} = 816,06 \text{ kgf}$$

A capacidade de carga suportada por cada cantoneira de fixação equivale a 816,06 kgf, logo a capacidade de carga da viga de sustentação é igual a  $2 * F_{cantoneira}$ , ou seja, 16,01kN ou 1632,13 kgf.

Após os cálculos de capacidade máxima da viga de sustentação, foram realizadas novas análises de tensões de Von Mises e deformações totais utilizando o *software Ansys*.

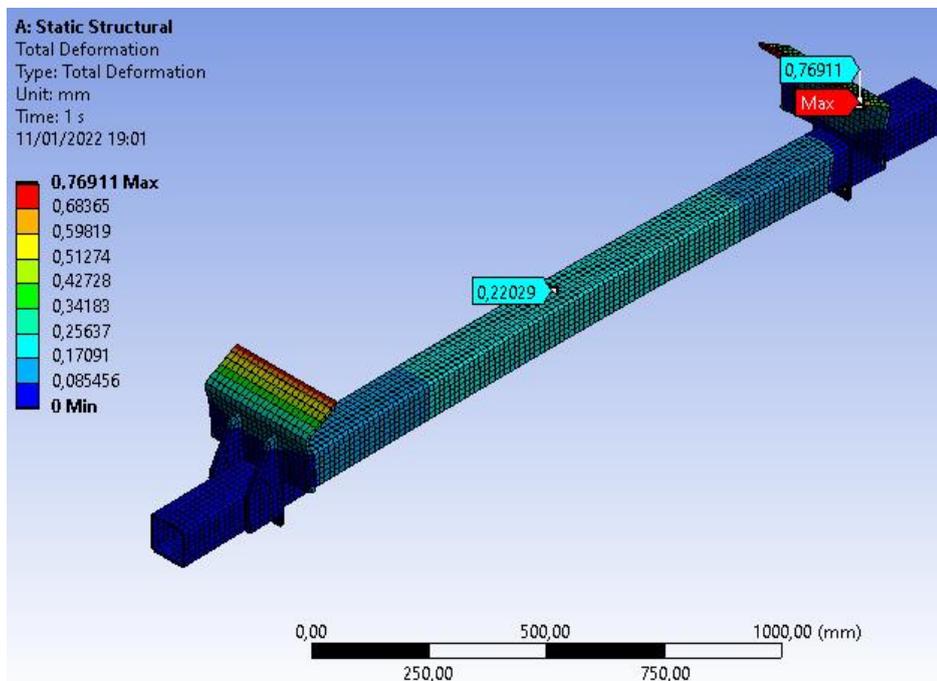
Na Figura 33 são apresentas os novos resultados proveniente das concentrações de tensões nas abas e cantoneiras e a Figura 34 as deformações da estrutura. É possível observar que estes valores não excedem os limites das propriedades do material, sendo o valor da tensão de escoamento igual a 250 MPa e as deformações são desprezíveis sendo valor máximo de 0,76 mm presente nas abas laterais. Isso significa que o carregamento tem grande influência no comportamento da estrutura e a adoção de coeficiente de segurança é necessário para garantir a confiabilidade do equipamento.

Figura 33: Tensão de Von Mises na cantoneira de fixação e aba lateral  $F = 16,01$  kN.



Fonte: Ansys R2 Student, 2021.

Figura 34: Deformações resultantes na viga superior  $F = 16,01$  kN.



Fonte: Ansys R2 Student, 2021.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Através das análises realizadas é possível compreender o comportamento da viga de sustentação do *Skid*. Com os resultados obtidos foram possíveis as seguintes conclusões:

- O *Skid* não suporta a carga de trabalho do pórtico, logo não é possível utilizá-lo como referência;
- Foi determinado a capacidade de carga da viga de sustentação, porém é necessário estabelecer o fator de segurança para a estrutura do *Skid*;
- Os valores calculados analiticamente e os obtidos via *software* apresentam baixo erro relativo o que confere confiabilidade nos resultados;
- Foram identificados os pontos críticos da estrutura e é possível realizar melhorias, como por exemplo dobrar o número de cantoneiras de fixação da viga de sustentação.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se:

- Realizar análise dinâmica da estrutura considerando as variações do processo;
- Realizar análise considerando os cordões de solda.

## REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, Avelino. **Modelos e a Interpretação CAE**: Algumas questões importantes quanto ao uso e a implantação da tecnologia CAE. Disponível em: <revista cadware.com.br>. Acesso em: abril de 2021.

ALVES FILHO, Avelino. **Tecnologia CAE é Competitividade**: Método dos Elementos Finitos. Revista Cadware. São Paulo, 2000. Disponível em: <revista cadware.com.br>. Acesso em: abril de 2021.

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos**: A Base da Tecnologia CAE. São Paulo: Érica Ltda., 2000.

ARGENTA, Marco André. **Resistência dos materiais I**. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Construção Civil, Paraná (2012).

AZEVEDO, A. F. M. **Método dos elementos finitos**. 1 ed. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto/Pt, 2003.

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON, E. Russel. **Resistência dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 1995.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos. **Resistência dos Materiais para entender e gostar**: Um texto curricular. 1973.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquina de Shigley**: Projeto de Engenharia Mecânica. 8. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2011.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**: Uma Introdução. 5ed. São Paulo: LTC, 2002.

CCBA. **Aços estruturais**. 2014. Disponível em: <http://www.cbcaacobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-acos-estruturais.php>. Acesso em: 15 mai. 2021.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica, V III**: Materiais de construção mecânica. 2. ed. 1977.

DA ROCHA CORTEZ, Lucas Azevedo *et al.* **Uso das estruturas de aço no Brasil**. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS, 2017.

GERE, James M.; GOODNO, BARRY J. **Mecânica dos materiais**. 3. ed. Cengage Learning, 2016.

AMUCHASTEGUI, José Guilherme. **Análise de Tensões**. [S. l.], 25 nov. 2016. Disponível em: <https://ensus.com.br/analise-de-tensoes/>. Acesso em: 5 jul. 2021.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 5. ed. Pearson Education do Brasil, 2004.

JESUS, Gabriela Caires de; NETO, Custódio Leopoldino de Brito Guerra; COUTINHO, Karilany Dantas. **Análise estrutural utilizando MEF para avaliação da estrutura óssea da órbita**. Revista Brasileira de Inovação Tecnológica em Saúde, [s. l.], 2015.

MALAGUTI, Ana Kelle. **Análise dinâmica de estruturas de barra empregando o método dos elementos finitos com funções de forma *b-splines* não uniformes**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2013.

MARTHA, Luiz Fernando *et al.* **E-Mohr** - Círculo de Mohr para o Plano de Tensões. [S. l.], set. 2004. Disponível em: <https://web.tecgraf.puc-rio.br/etools/mohr/>. Acesso em: 26 jun. 2021.

MIRLISENNA, Giuseppe Mirlisenna. **Método dos Elementos Finitos: o que é?** Blog ESSS, 22 jan. 2016. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>. Acesso em: 29 jun. 2021.

NASCIMENTO, Samuel Antão Ferreira do. **Análise estática e dinâmica de estrutura metálica tensionada com cobertura de telhas alternativas**. 2019.100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

Pfeil, Walter Estruturas de aço: dimensionamento prático I Walter Pfeil, Michele Pfeil. - 8.ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PINHO, Felipe Gonçalves; MORAES, Lucas Cuellar de. **Vibrações induzidas pelo vento em estruturas metálicas: UMA ABORDAGEM VIA ELEMENTOS FINITOS**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS, [S. l.], 2014.

ROSA, Edison da. **Análise de resistência mecânica: mecânica da fratura e fadiga**. Grupo de Análise e Projeto Mecânico Departamento de Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

SILVA, Fernando de Azevedo, SANTOS, Jefferson Rodrigo Marcelino dos, CHAVES, Carlos Alberto. **Explicação do princípio de Saint-Venant utilizando o método dos elementos finitos**. Revista UNIABEU, janeiro-abril 2017.

SORIANO, Humberto Lima; LIMA, Silvio de Souza. **Método de Elementos Finitos em Análise de Estruturas**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003

SOUZA, Thiago. **E- Coat: processo de pintura por eletrodeposição**. [S. l.], 2 dez. 2017. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/e-coat-processo-de-pintura-por-eletrodeposi%C3%A7%C3%A3o-thiago-souza/?originalSubdomain=pt>. Acesso em: 17 jun. 2021.

SOUZA, Remo Magalhães de. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Belém, 2003. Disponível em: <http://www.inf.ufes.br/~luciac/fem/livros-fem/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2021.

TEIXEIRA, Julia Py Braga *et al.* **Determinação de fatores de concentração de tensões em entalhes semi-elípticos**. In: 67º CONGRESSO INTERNACIONAL ABM. 2012.

UFPEL, Universidade Federal de Pelotas Centro de Engenharias. **Flexão**. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/alinepaliga/files/2014/08/Cap%C3%ADtulo-6.pdf> Acesso em: 22 nov 2021.

VAN VLACK, Lawrence H. **Princípios de ciência dos materiais**. 2000.