



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CAMPUS UFRJ-MACAÉ  
Professor Aloísio Teixeira



**ARTHUR BELMONT DA SILVA**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM MODELO PARA SUPORTE DE FERRAMENTAS  
PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS UTILIZANDO O PROGRAMA  
*ABAQUS***

**MACAÉ**

**2020**

**ARTHUR BELMONT DA SILVA**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM MODELO PARA SUPORTE DE FERRAMENTAS  
PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS UTILIZANDO O PROGRAMA  
*ABAQUS***

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro *campus* – Macaé, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. D.Sc. Marcelo Costa Cardoso

**MACAÉ**

**2020**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM MODELO PARA SUPORTE DE FERRAMENTAS  
PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS UTILIZANDO O PROGRAMA  
*ABAQUS***

Arthur Belmont da Silva

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO *CAMPUS* – MACAÉ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Examinado por:

---

Prof. Marcelo Costa Cardoso, D.Sc.

---

Prof. Lucas Lisbôa Vignoli, D. Sc.

---

Prof. Rudineli Demarque, D. Sc.

MACAÉ, RJ - BRASIL  
NOVEMBRO DE 2020

S586a

Silva, Arthur Belmont da

Análise estrutural de um modelo para suporte de ferramentas pelo método dos elementos finitos utilizando o programa Abaqus. / Arthur Belmont da Silva. -- Macaé, 2020.

70 f.

Orientador: Marcelo Costa Cardoso.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) -- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus Macaé Professor Aloísio Teixeira, Bacharel em Engenharia Mecânica, 2020.

1. Elementos finitos. 2. Abaqus. 3. I. Cardoso, Marcelo Costa, orient. II. Título.

**Dedico este trabalho aos meus pais, pois sem eles eu não seria quem sou hoje.**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado forças e me ajudado a seguir durante todo o caminho da minha vida até aqui.

Aos meus pais, Cátia e Luiz, que me ensinaram a importância dos estudos e mostraram que conhecimento é a chave do sucesso. Toda minha formação devo a eles, de caráter e moral, pois ajudaram a me tornar quem eu sou hoje. Não há palavras para descrever minha gratidão por todo amor proporcionado e também por não hesitaram em me ajudar para que eu alcançasse meus objetivos.

A toda minha família, por todo apoio e carinho e que de certa forma acompanharam minha jornada.

A minha namorada, Camila, que nessa reta final esteve ao meu lado me apoiando e incentivando para concluir esse trabalho.

Aos meus amigos que fiz ao longo da minha vida e me acompanharam durante toda a jornada da faculdade, proporcionando experiências inesquecíveis e ajudando a tomar decisões importantes. Especialmente para: Victor Jou, Dener Nascimento, Vicente Peruzzi, Henrique Ligeiro e Kevin Couto.

A todos do time de OFS-SBS, que contribuíram para o início da minha formação profissional e estiveram dispostos a me ajudar no que fosse preciso, principalmente nesta monografia. Especialmente para: Felipe Zamorano, Fabio Castro, Glauber Rodrigues, Bruno Malacarne, Sidiney Souza e Renato Pereira.

Ao meu orientador, Marcelo Cardoso, que não hesitou em aceitar meu convite e se dispôs a ajudar a concluir este trabalho.

Aos professores que passaram seus conhecimentos e muito somaram na minha formação acadêmica.

E, por fim, a todos que mesmo não citados aqui, de alguma forma contribuíram para que eu chegasse a este momento.

Obrigado.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro *campus* – Macaé, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

## ANÁLISE ESTRUTURAL DE UM MODELO PARA SUPORTE DE FERRAMENTAS PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS UTILIZANDO O PROGRAMA *ABAQUS*

Arthur Belmont da Silva

Novembro/2020

Orientador: D.Sc. Marcelo Costa Cardoso

Curso: Engenharia Mecânica

Neste trabalho, foi avaliado um modelo para suporte de ferramentas através da análise de tensão por meio dos elementos finitos utilizando o programa *Abaqus*, de acordo com as requisições da empresa proprietária. Como as propriedades mecânicas dos materiais são de suma importância para esta análise, foi possível realizar a inspeção dos corpos de prova por líquido penetrante a fim de garantir a eficácia do ensaio de tração, conforme a norma ASTM E8/E8M, para determinar o limite de escoamento do material utilizado no modelo. Após esta etapa, foi realizado um teste de carga e ensaios de inspeção visual e por partículas magnéticas nas juntas soldadas do modelo para sua validação. O material recebido foi uma viga utilizada na construção do protótipo, usinando os corpos de prova também seguindo a norma ASTM E8/E8M. Observou-se que o ensaio por líquido penetrante se mostrou eficiente na detecção das discontinuidades superficiais dos corpos de prova. A simulação feita no modelo se deu satisfatória, levando em consideração os requisitos pré-estabelecidos. Além disso, o teste de carga realizado foi aprovado, pois não houve deformações plásticas e nenhuma discontinuidade foi detectada pelas inspeções visuais e por partículas magnéticas nas juntas soldadas devido à sobrecarga da estrutura.

*Palavras-chave:* Elementos Finitos; *Abaqus*; Ensaio de Tração; Líquido Penetrante.

Abstract of Undergraduate Project presented to Federal University of Rio de Janeiro *campus* – Macaé, as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Mechanical Engineer.

STRUCTURAL ANALYSIS OF A MODEL FOR TOOL SUPPORTING BY FINITE  
ELEMENT METHOD USING SOFTWARE *ABAQUS*

Arthur Belmont da Silva

November/2020

Advisor: D.Sc. Marcelo Costa Cardoso

Course: Mechanical Engineering

In this project, a prototype was evaluated by stress analysis through finite elements method using the Abaqus Software, according to the third party's requirements. As the material's mechanical properties are very important for this analysis, it was possible to accomplish the inspection of specimens by dye penetrant test to guarantee the efficiency of tensile testing, as set by norm ASTM E8/E8M, to determine the yield limit of the material used in the model. After this stage, a loading test and visual inspection tests by magnetic particles were performed in the model's welded joints for its validation. The material received was a beam used in the assembly of the prototype, by machining the specimens also according to the norm ASTM E8/E8M. It was observed that dye penetrant testing showed itself efficient for the detection of superficial discontinuities of the specimens.

*Keywords:* Finite Element; *Abaqus*; Tensile Test, Dye Penetrant.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo aparente de aço bruto.....	15
Figura 2 - Diagrama de fases ferro-carbono até 6,7%C. ....	19
Figura 3 - Representação esquemática de um mecanismo usado para conduzir um ensaio de tração. O corpo de prova é alongado pelo movimento da barra enroscada; a célula de carga e o extensômetro medem, respectivamente, a magnitude da força aplicada e o alongamento. ....	22
Figura 4 - Comportamento típico da curva tensão-deformação de engenharia até a falha. Os detalhes circulares representam as mudanças na geometria das amostras em vários pontos ao longo da curva. ....	23
Figura 5 - Diagrama tensão-deformação de um aço qualquer, distinguindo as regiões com os comportamentos do material (não está em escala). ....	24
Figura 6 - Exemplo do comportamento devido ao alongamento do eixo z e as contrações laterais x e y resultante da tensão aplicada. As linhas sólidas representam as dimensões após a aplicação da carga e as linhas tracejadas, antes. ....	26
Figura 7 - Modelo dos corpos de prova com (a) seção transversal circular e (b) seção transversal retangular. ....	28
Figura 8 - Representação esquemática de um diagrama tensão-deformação para o comportamento de materiais frágeis e dúcteis sob carregamento até a fratura. ....	29
Figura 9 - Tipos básicos de fraturas devido à tração. ....	29
Figura 10 - Trinca superficial em uma peça originando um campo de fuga. ....	31
Figura 11 - Magnetização da peça a ser ensaiada por partículas magnéticas. ....	31
Figura 12 - Trinca de uma peça (a) antes e (b) durante o ensaio por partículas magnéticas com o auxílio de luz ultravioleta. ....	32
Figura 13 - Aplicação do líquido penetrante numa superfície. ....	33
Figura 14 - Aplicação do filme revelador na superfície. ....	34
Figura 15 - Trincas detectadas durante o ensaio por líquido penetrante. ....	34
Figura 16 - Ilustração de uma malha da seção transversal de uma paleta de turbina. ....	36
Figura 17 - Esquema dos procedimentos experimentais. ....	39
Figura 18 - Dimensões, em milímetros, dos corpos de prova para os ensaios de tração. ....	39
Figura 19 - Corpos de prova com líquido penetrante aplicado. ....	40
Figura 20 - Teste com o bloco padrão com o líquido penetrante. ....	40
Figura 21 - Corpos de prova com o revelador aplicado. ....	41

Figura 22 - Máquina universal de ensaios mecânicos para execução de ensaio uniaxial de tração. .....	42
Figura 23 - Guindaste utilizado para a condução do teste de carga. ....	43
Figura 24 - Pontos da estrutura em que foi realizado o ensaio por partículas magnéticas. ....	44
Figura 25 - Modelo da estrutura a ser analisada pelo método dos elementos finitos. ....	44
Figura 26 – Desenho da estrutura com suas dimensões, em milímetros. ....	45
Figura 27 - Croqui para medição de espessura. ....	45
Figura 28 - Instrumento de ultrassom utilizado para medição de espessura. ....	46
Figura 29 - Modelo da estrutura e tipo de seção aplicada com dimensões em milímetros. ....	47
Figura 30 - Malha e tipo de elemento utilizado na estrutura. ....	49
Figura 31 - Interação entre as partes do modelo. ....	50
Figura 32 - Tipo de análise considerada no <i>Abaqus</i> . ....	50
Figura 33 - Aplicação do carregamento no modelo, em Newton. ....	51
Figura 34 - Condição de contorno de deslocamento nulo na direção vertical Y. ....	52
Figura 35 - Resultado do ensaio por líquido penetrante no bloco padrão para teste e a fotografia de referência. ....	53
Figura 36 - Resultado do ensaio por líquido penetrante nos corpos de prova. ....	53
Figura 37 - Diagrama tensão-deformação de engenharia dos corpos de prova. ....	54
Figura 38 - Diagrama tensão-deformação real dos corpos de prova. ....	54
Figura 39 - Interseção entre os gráficos para determinar a tensão de escoamento do corpo de prova 1. ....	56
Figura 40 - Interseção entre os gráficos para determinar a tensão de escoamento do corpo de prova 2. ....	56
Figura 41 - Interseção entre os gráficos para determinar a tensão de escoamento do corpo de prova 3. ....	57
Figura 42 - Interseção entre os gráficos para determinar a tensão de escoamento do corpo de prova 4. ....	57
Figura 43 - Interseção entre os gráficos para determinar a tensão de escoamento do corpo de prova 5. ....	58
Figura 44 - Processo de estrição do corpo de prova durante o ensaio de tração. ....	58
Figura 45 - Comparação entre os corpos de prova com (a) fratura dúctil e (b) fratura frágil. .	59
Figura 46 - Interseção entre os gráficos para determinar a tensão de escoamento do corpo de prova 6. ....	59

Figura 47 - Tensão de von Mises, em MPa, com a aplicação da carga de teste uniformemente distribuída. ....	61
Figura 48 - Deslocamento, em milímetro, com a aplicação da carga de teste uniformemente distribuída. ....	62
Figura 49 - Deslocamento na direção X, em milímetro. ....	62
Figura 50 - Modelo proposto para trabalhos futuros. ....	65

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson para diferentes ligas metálicas à temperatura ambiente. ....	27
Tabela 2 - Elementos químicos presentes na série AISI 1000. ....	38
Tabela 3 - Resultados da análise dimensional dos corpos de prova. ....	42
Tabela 4 – Registro das medições de espessuras das vigas da estrutura. ....	46
Tabela 5 - Estudo para convergência da malha. ....	48
Tabela 6 - Propriedades mecânicas da série AISI 1000. ....	49
Tabela 7 - Análise do diagrama tensão-deformação de engenharia. ....	55
Tabela 8 - Análise do diagrama tensão-deformação de engenharia do corpo de prova 6. ....	60

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_0$	Seção transversal original
$F_{nó}$	Força aplicada em cada nó
$F_{teste}$	Carga de teste
$L_0$	Comprimento de referência original do corpo de prova
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASM	<i>American Society for Metals</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAE	<i>Computer-Aided Engineering</i>
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
CP	Corpo de prova
EDO	Equações Diferenciais Ordinárias
EDP	Equações Diferenciais Parciais
END	Ensaio Não Destrutivo
LRT	Limite de Resistência à Tração
MEF	Método dos Elementos Finitos
$E$	Módulo de elasticidade
$P$	Carga aplicada
$\varepsilon_c$	Deformação convencional
$\varepsilon_r$	Deformação real
$\sigma_c$	Tensão convencional
$\sigma_e$	Tensão de escoamento
$\sigma_f$	Tensão de ruptura
$\sigma_{lp}$	Limite de proporcionalidade
$\sigma_r$	Tensão real

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>xii</b>
<b>CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1 Contextualização.....	15
1.2 Motivação pessoal.....	16
1.3 Objetivos.....	17
<b>1.3.1 Objetivo geral.....</b>	<b>17</b>
<b>1.3.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>17</b>
1.4 Estrutura do trabalho.....	17
<b>CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>18</b>
2.1 Aços.....	18
2.2 Ensaaios destrutivos.....	20
<b>2.2.1 Ensaio de tração.....</b>	<b>21</b>
2.3 Ensaaios não destrutivos.....	29
<b>2.3.1 Inspeção visual.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.2 Ensaio por partículas magnéticas.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.3 Ensaio por líquidos penetrantes.....</b>	<b>32</b>
2.4 Introdução ao método dos elementos finitos.....	34
<b>2.4.1 Solidworks.....</b>	<b>36</b>
<b>2.4.2 Abaqus.....</b>	<b>37</b>
2.5 Critérios de projeto.....	37
<b>CAPÍTULO III – MATERIAIS, MÉTODOS E MODELAGEM.....</b>	<b>38</b>
3.1 Materiais.....	38

3.2 Métodos .....	38
<b>3.2.1 Usinagem dos corpos de prova .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.2 Ensaio por líquido penetrante nos corpos de prova .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.3 Ensaio de tração.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.4 Teste de carga e inspeção visual .....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.5 Ensaio por partículas magnéticas nas juntas soldadas .....</b>	<b>43</b>
3.3 Modelagem .....	44
<b>3.3.1 Geometria do modelo .....</b>	<b>45</b>
<b>3.3.2 Convergência da malha e tipo de elemento utilizado .....</b>	<b>47</b>
<b>3.3.3 Propriedades mecânicas do material .....</b>	<b>49</b>
<b>3.3.4 Interação entre as partes do modelo e tipo de análise.....</b>	<b>50</b>
<b>3.3.5 Carregamento e condições de contorno.....</b>	<b>51</b>
<b>CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>53</b>
4.1 Ensaio por líquido penetrante .....	53
4.2 Ensaio de tração .....	54
4.3 Simulação numérica.....	61
4.4 Teste de carga e inspeção visual .....	63
4.5 Ensaio por partículas magnéticas.....	63
<b>CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>64</b>
5.1 Conclusão.....	64
5.2 Trabalhos Futuros .....	65
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>66</b>

## CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

Os materiais estão provavelmente mais enraizados na cultura de um povo do que a maioria das pessoas sabem. Transporte, habitação, vestuário, comunicação, recreação e produção alimentar, praticamente todo segmento do dia a dia da humanidade é influenciado em algum grau pelos materiais. Historicamente, o desenvolvimento e avanço das sociedades estão intimamente conectados à habilidade dos membros de produzir e manipular materiais para suprir suas necessidades. De fato, civilizações antigas foram designadas pelos níveis de desenvolvimento dos seus materiais (Idade da Pedra, Idade do Bronze, Idade do Ferro) (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2014).

Uma das diversas maneiras de classificar os materiais é dividi-los em grupos, já que possuem diferentes estruturas e propriedades. Os metais e as ligas, incluindo os aços, formam um grupo amplamente utilizado para suporte de carga, pois as suas propriedades mecânicas são de grande interesse prático. Vale ressaltar que os aços são altamente procurados devido ao excelente custo/benefício em relação a outras ligas (ASKELAND *et al.*, 2010). Isto pode ser observado pelo consumo aparente de aço bruto em alguns países no período de 2014 a 2019, conforme os dados da Figura 1.

Figura 1 - Consumo aparente de aço bruto.

<b>Consumo Aparente de Aço Bruto/ Apparent Consumption of Crude Steel</b>		<b>Unid./Unit: 10<sup>6</sup>t</b>					
<b>Pais/Country</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	
China	740	700	709	806	870	945	
Índia/ India	87	89	95	101	108	109	
EUA/ USA	122	108	103	110	113	109	
Japão/ Japan	73	68	68	70	71	70	
Coréia do Sul/ South Korea	58	58	60	59	56	55	
Rep. Fed. Alemanha/ F. R. Germany	43	43	43	43	43	37	
México/ Mexico	26	28	29	30	28	27	
Itália/ Italy	23	26	25	27	28	26	
Brasil/ Brazil	28	24	21	22	24	23	
Argentina	6	6	5	6	6	4	

Fonte: Aço Brasil (2020).



A fim de garantir que os materiais terão alto desempenho e confiabilidade futuramente, a maioria dos fabricantes realiza testes que não alteram as propriedades do produto. Desse modo, o mesmo pode ser submetido a Ensaios Não-Destrutivos (END), onde a sua qualidade será colocada à prova. Na indústria petrolífera, é bastante comum que haja inspeções em regiões críticas regularmente, já que são as mais suscetíveis a episódios de *stress*, fadiga e corrosão. Isso é feito para que o problema seja prontamente identificado e resolvido antes mesmo que cause algum dano à operação (BARBOSA, 1999).

A busca desenfreada por produtos de alta qualidade tanto por empresas, quanto por consumidores, aumentou a competitividade, de modo que as indústrias modernas precisam se adaptar a tais condições, fabricando produtos altamente confiáveis (DE OLIVEIRA, 2014). Ainda não é possível utilizar métodos analíticos clássicos para descrever o comportamento de determinadas estruturas sob esforços estáticos e dinâmicos, para isto apela-se às soluções aproximadas. O método dos elementos finitos (MEF) é a principal ferramenta utilizada para solucionar esses problemas. Um modelo numérico eficiente proporciona a redução de custos na fabricação dos protótipos e também garante a confiabilidade do produto final (RADE, 2011).

Diante dos pontos abordados, o presente trabalho fundamenta-se no estudo de um protótipo através da análise de tensão por meio dos elementos finitos utilizando o programa *Abaqus*.

## **1.2 Motivação pessoal**

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso surgiu da minha primeira experiência profissional como estagiário numa empresa multinacional prestadora de serviços no ramo de óleo e gás.

Com o objetivo de certificar cada equipamento da base para garantir a segurança de todos os colaboradores e também atender as normas vigentes de segurança, uma das etapas deste processo é a análise estrutural por meio dos elementos finitos, em que despertou meu interesse por este método, bem como o programa *Abaqus*, utilizado para modelar cada problema. Então, para compreender melhor como funciona e aprofundar mais neste tema, originou-se o presente estudo.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo geral**

O objetivo deste trabalho é validar o modelo para suporte de ferramentas através da análise de tensão por meio dos elementos finitos utilizando o programa *Abaqus*, de acordo com as requisições da empresa proprietária.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Inspeccionar e confirmar a eficiência do ensaio por líquidos penetrantes nos corpos de prova para ensaio de tração.
- Determinar o limite de escoamento do material utilizado no modelo pelo ensaio de tração.
- Validar o modelo pelo teste de carga e pelos ensaios de inspeção visual e por partículas magnéticas nas juntas soldadas.

## **1.4 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo introduz o conteúdo do estudo. O segundo capítulo abordará os principais conceitos sobre aços, ensaios destrutivos e não destrutivos e o método dos elementos finitos através de uma revisão bibliográfica. O terceiro capítulo apresentará os procedimentos experimentais e a modelagem do problema através do programa *Abaqus*. Já o quarto capítulo discutirá as simulações e os resultados obtidos. Por fim, no quinto capítulo serão apresentadas as considerações finais e as possibilidades para trabalhos futuros.

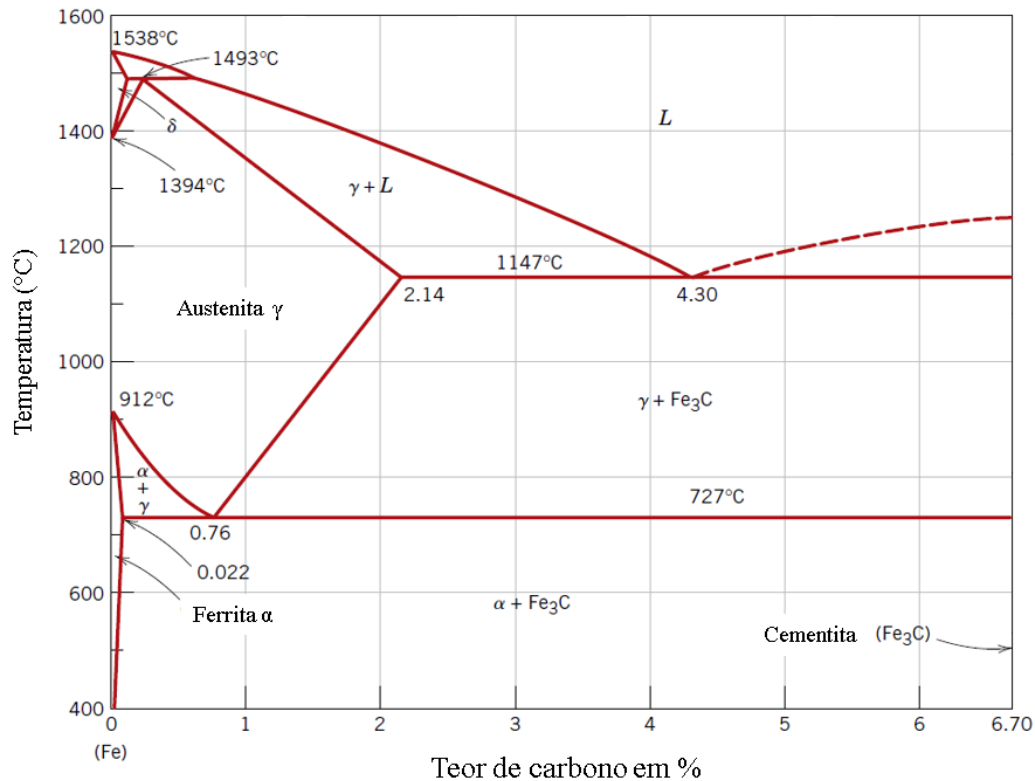
## CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aços

Aços podem ser definidos como ligas de ferro-carbono que contêm até 2% de carbono (C) em peso. Existem centenas de ligas que possuem diferentes composições e tratamentos térmicos. São amplamente utilizados no mundo inteiro, desde a fabricação de bens de consumo e bens de produção até as diversas aplicações em inúmeras áreas das indústrias, como automobilística, construção civil, naval, entre outras (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2014).

O ferro (Fe) é o elemento majoritário nos aços, existente em duas formas cristalinas abaixo do ponto de fusão. Uma forma é a cúbica de corpo centrado (CCC), que é estável em temperatura ambiente até 912 °C e a partir de 1394 °C até o ponto de fusão de 1530 °C. Na primeira faixa de temperatura, esta microestrutura CCC do ferro também é conhecida como  $\alpha$ -Fe ou ferrita, enquanto que na faixa de temperatura mais elevada é denominada  $\delta$ -Fe. A outra forma cristalina é a cúbica de face centrada (CFC), estabilizada em 912 °C até 1394 °C, nessa faixa de temperatura a microestrutura é denominada  $\gamma$ -Fe ou austenita. A solubilidade do carbono na ferrita e na austenita está em função da temperatura, ou seja, quando os átomos de carbono não conseguem mais se alojar entre os átomos de ferro, uma nova fase se formará, permitindo a acomodação de mais átomos de carbono em sua estrutura cristalina. Esta nova fase é conhecida como cementita ou carboneto de ferro ( $Fe_3C$ ) (ASM HANDBOOK COMMITTEE, 1990; CALLISTER JR e RETHWISCH, 2014). A Figura 2 mostra o diagrama de fases ferro-carbono e as mudanças que o carbono induz na fase de equilíbrio do ferro puro. Além de ferro e carbono, os aços contêm outros elementos nas ligas que alteram os limites do diagrama e, conseqüentemente, suas propriedades (ASM HANDBOOK COMMITTEE, 1990).

Figura 2 - Diagrama de fases ferro-carbono até 6,7%C.



Fonte: CALLISTER JR e RETHWISCH (2014) [adaptado].

As propriedades mecânicas dos aços estão diretamente relacionadas à quantidade de carbono em sua composição, que altera sua microestrutura. Usualmente, o teor de carbono permanece em níveis baixos nos aços que demandam alta ductilidade, alta tenacidade e boa soldabilidade e é mantido em níveis elevados nos aços que requerem alta resistência, alta dureza, resistência à fadiga e ao desgaste (*ASM HANDBOOK COMMITTEE*, 1990; CALLISTER JR e RETHWISCH, 2014).

Alguns dos aços mais comuns são classificados de acordo com a concentração de carbono, sendo eles baixo, médio e alto carbono. Os aços baixo-carbono são produzidos em larga escala, dentre os demais e geralmente contêm menos de 0,25% em peso de carbono e não formam a martensita com o tratamento térmico. A resistência deste aço é adquirida com um tratamento a frio e sua microestrutura consiste basicamente em ferrita e perlita. Como resultado, essas ligas são relativamente leves e fracas, em contrapartida, possuem uma excelente ductibilidade e tenacidade. Também são usináveis, soldáveis e, de todos os aços, os mais baratos de produzir. Exemplos de aplicações incluem componentes do chassi automotivo e vigas estruturais (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2014).

Já os aços médio-carbono possuem concentrações entre 0,25% e 0,60% em peso de carbono. Estas ligas são obtidas através do aquecimento até a austenização, seguida de um

resfriamento rápido para obter a microestrutura martensítica e, por fim, é feito o tratamento de têmpera, a fim de melhorar suas propriedades mecânicas. A adição de cromo (Cr), níquel (Ni) e molibdênio (Mo) aumenta a capacidade de tratamento térmico dessas ligas, originando diversas combinações de ductibilidade-dureza. As ligas médio-carbono são mais resistentes em comparação com as ligas baixo-carbono, no entanto, há uma perda em sua ductibilidade e tenacidade. Exemplos de aplicações incluem rodas e trilhos ferroviários, engrenagens e diversas outras partes estruturais de maquinários de alta resistência (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2014).

Os aços alto-carbono normalmente contêm em sua composição cerca de 0,60% e 1,4% em peso de carbono. São os aços mais resistentes e possuem alta dureza e, como consequência, possuem a menor ductibilidade. Usualmente são empregados elementos como cromo, vanádio (V), tungstênio (W) e molibdênio que, quando combinados com o carbono, tornam essas ligas bastante duras e resistentes ao desgaste. Exemplos de aplicações incluem ferramentas de corte, molas e fios de alta resistência (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2014).

Outra classificação válida de destacar são os aços inoxidáveis, que são altamente resistentes à corrosão nos mais diversos ambientes, principalmente na atmosfera. O elemento mais importante desta liga é o cromo, com uma concentração de pelo menos 0,11%, pois é ele que dá essa característica de ser inoxidável. A adição de níquel e molibdênio em sua composição melhora a resistência à corrosão (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2014).

## **2.2 Ensaios destrutivos**

Os ensaios destrutivos podem ser definidos como ensaios mecânicos que provocam a inutilidade parcial ou total dos corpos de prova, conforme seus respectivos procedimentos. São amplamente utilizados a fim de determinar ou verificar as propriedades mecânicas dos materiais, sendo adequados para medir a capacidade de suportar algum tipo de esforço em uma peça e, na maioria dos casos, só podem ser conhecidos com a aplicação desses ensaios. Tenacidade à fratura, flexão, torção, fluência, fadiga, dureza e tração são alguns exemplos de ensaios destrutivos (ZOLIN, 2010; GARCIA *et al.*, 2012).

Diferentes métodos de ensaios exigem a normalização com o propósito de fixar os conceitos e procedimentos gerais cabíveis. Com isso, pode-se citar que algumas das principais vantagens são de tornar a qualidade do produto mais uniforme e reduzir os tipos similares de materiais, bem como permitir a comparação de resultados obtidos em diferentes laboratórios (GARCIA *et al.*, 2012).

### 2.2.1 Ensaio de tração

Ensaio de tração são desenvolvidos por inúmeras razões em que os resultados deste teste são amplamente utilizados na área de engenharia para seleção de materiais (DAVIS, 2004). Ainda, este ensaio é um procedimento importante padrão da engenharia com o objetivo de caracterizar relevantes parâmetros elásticos e plásticos relacionados ao comportamento mecânico dos materiais (CABEZAS e CELENTANO, 2004).

A vasta aplicabilidade deste ensaio é devido ao fato de ser executado de maneira relativamente simples e rápida. Também acrescenta que, de todas as vantagens deste método, pode-se citar a enorme flexibilidade do ensaio, visto que é utilizado desde tiras e arames até tarugos e blocos e a amplitude de informações fornecidas quanto à caracterização dos materiais empregados na engenharia, como por exemplo polímeros, metais, cerâmicos, compósitos, entre outros (GARCIA *et al.*, 2012).

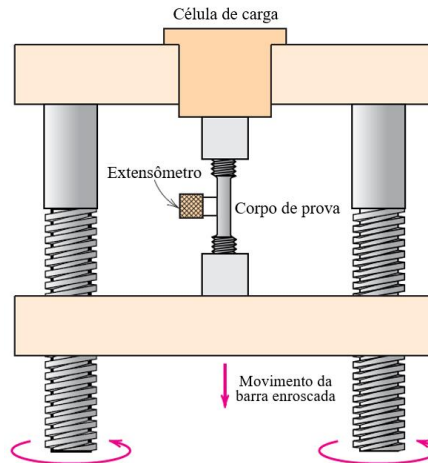
O princípio deste teste consiste em submeter um corpo de prova a uma tensão uniaxial até a sua falha, ou seja, a destruição ou rompimento da amostra. Além dos resultados serem usados para a seleção do material, o teste é comumente utilizado para controle de qualidade e, principalmente, prever como determinando material irá reagir sob diversos tipos de forças aplicadas a ele. As principais propriedades diretamente mensuradas através deste ensaio são: limite de resistência à tração, máxima deformação e redução da área transversal. Conseqüentemente, é possível obter outros parâmetros importantes destas propriedades, como por exemplo o módulo de Young e o coeficiente de Poisson (BLAGA *et al.*, 2012).

Sabe-se que as máquinas de teste são utilizadas para desenvolver melhores informações referentes a materiais já conhecidos ou desenvolver novos materiais e manter sua qualidade. No mercado há diversos tipos de máquinas de teste, entretanto a mais comum é a universal, cujos ensaios possíveis são de tensão, compressão e flexão. O equipamento deve conter as características próprias do teste das amostras a serem ensaiadas. Existem três principais parâmetros: capacidade de força, velocidade, precisão e exatidão. Com isso, o principal uso da máquina de teste é criar o diagrama tensão-deformação. Uma vez que esse diagrama é gerado, um algoritmo computacional pode ser utilizado para calcular a tensão de escoamento, o limite de resistência à tração, módulo de Young ou alongamento total (BLAGA *et al.*, 2012). Observa-se na Figura 3 uma representação esquemática de condução de um ensaio de tração por uma máquina de teste.

É válido destacar que os resultados obtidos pelo ensaio de tração sofrem fortes influências da temperatura, velocidade da deformação, anisotropia do material, tamanho do

grão, porcentagem de impurezas, assim como pelas condições ambientais durante o processo (GARCIA *et al.*, 2012).

Figura 3 - Representação esquemática de um mecanismo usado para conduzir um ensaio de tração. O corpo de prova é alongado pelo movimento da barra enroscada; a célula de carga e o extensômetro medem, respectivamente, a magnitude da força aplicada e o alongamento.



Fonte: CALLISTER JR e RETHWISCH (2014) [adaptado].

A partir dos dados registrados de um determinado ensaio de tração, é possível construir um gráfico com os diversos valores de tensão e deformação referentes ao corpo de prova, denominado diagrama tensão-deformação, usualmente descrito de duas formas: diagrama tensão-deformação convencional ou de engenharia e diagrama tensão-deformação real. No primeiro caso, a tensão e deformação convencionais ou de engenharia são regidas pelas equações (1) e (2), respectivamente. Para o cálculo descrito nas equações anteriores, considera-se que a tensão é constante na seção transversal e em toda a região entre os pontos de calibragem, bem como a deformação. O diagrama de tensão-deformação real é obtido através da área de seção transversal e comprimento reais do corpo de prova no instante em que a carga é medida, utilizando as mesmas equações (HIBBELER, 2010; GARCIA *et al.*, 2012).

A tensão convencional ou de engenharia ( $\sigma_c$ ) é dada por:

$$\sigma_c = \frac{P}{A_0} \quad (1)$$

Em que:

$\sigma_c$  – Tensão convencional (Pa);

$P$  – Carga aplicada (N);

$A_0$  – Seção transversal original (m<sup>2</sup>).

Nota-se que 1 N/m<sup>2</sup> = 1 Pa e que 1 N/mm<sup>2</sup> = 1 MPa = 1.000.000 Pa.

A deformação convencional ou de engenharia ( $\varepsilon_c$ ) é dada por:

$$\varepsilon_c = \frac{\delta}{L_0} \quad (2)$$

Em que:

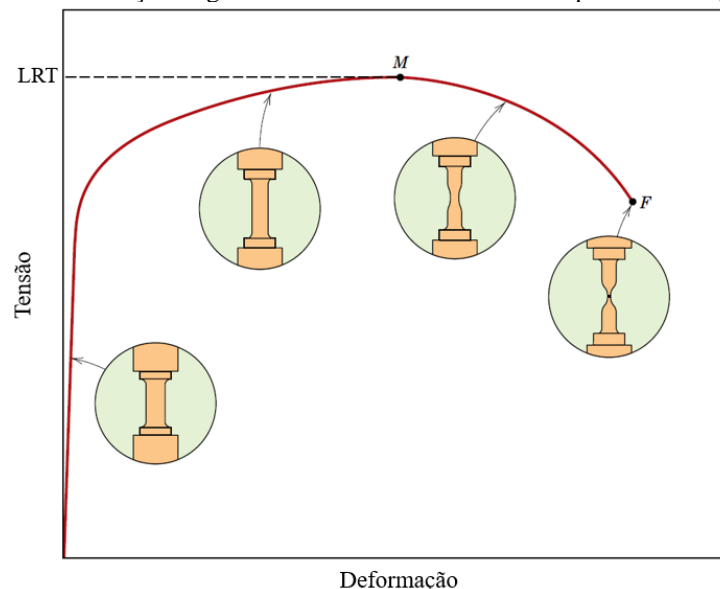
$\varepsilon_c$  – Deformação convencional (adimensional);

$\delta$  – Variação no comprimento de referência do corpo de prova (m);

$L_0$  – Comprimento de referência original do corpo de prova (m).

Durante um ensaio de tração, é possível visualizar as mudanças na geometria da amostra. A Figura 4 exemplifica um diagrama tensão-deformação de engenharia, resultado de um teste com destaque para as diversas fases ao longo da curva. É notável que, para um material continuar a se deformar, é necessário o crescimento da tensão até um ponto máximo M e, posteriormente, o decrescimento de forma gradativa até a falha no ponto F. O limite de resistência à tração (LRT) é definido como a tensão máxima que uma estrutura pode suportar sob efeito de uma força de tração, representado pelo ponto máximo da curva. Se mantiver a tensão aplicada, ocasionará na fratura do material (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2014).

Figura 4 - Comportamento típico da curva tensão-deformação de engenharia até a falha. Os detalhes circulares representam as mudanças na geometria das amostras em vários pontos ao longo da curva.

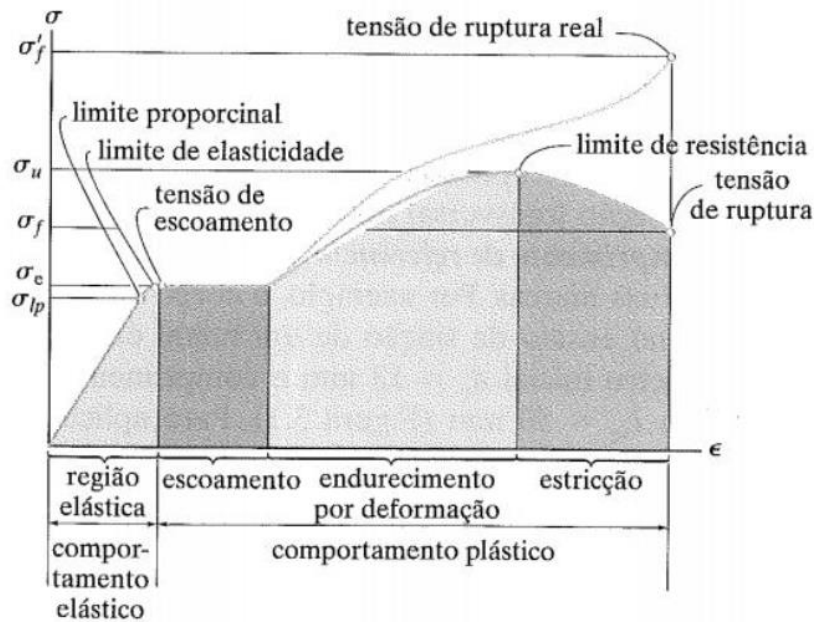


Fonte: CALLISTER JR e RETHWISCH (2014) [adaptado].

Na Figura 5 a seguir, destacam-se os quatro modos distintos de comportamentos do material, caracterizando-os de acordo com o grau de deformação nele induzido durante a execução do ensaio (HIBBELER, 2010; GARCIA *et al.*, 2012).



Figura 5 - Diagrama tensão-deformação de um aço qualquer, distinguindo as regiões com os comportamentos do material (não está em escala).



Fonte: HIBBELER (2010).

A primeira região do gráfico na Figura 5 corresponde ao comportamento elástico e, em grande parte desta fase, a curva tem uma aparência linear, de forma que a tensão é proporcional à deformação, caracterizando o material como linearmente elástico. É válido ressaltar que nesse estágio a estrutura retorna às suas dimensões originais caso uma carga aplicada seja removida. Essa relação linear se baseia até um limite máximo de tensão, denominado limite de proporcionalidade  $\sigma_{tp}$ . A partir do momento que a tensão ultrapassar sutilmente esse limite, apesar do corpo poder responder de maneira elástica, a proporcionalidade deixará de existir e a reta tenderá a se encurvar e achatarse. Esse comportamento é válido até a tensão atingir o limite de elasticidade, dificilmente determinado para os aços, visto que é muito próximo do limite de proporcionalidade (HIBBELER, 2010; CALLISTER JR e RETHWISCH, 2014).

A segunda região do gráfico corresponde ao comportamento de escoamento do material. Nesse caso, a tensão aplicada denotada por tensão de escoamento ou ponto de escoamento  $\sigma_e$  está acima do limite de elasticidade, ocasionando num colapso do material e fazendo-o se deformar permanentemente, ou seja, ocorre a deformação plástica. Uma vez que o ponto de escoamento foi alcançado, o material continuará a se deformar sem qualquer aumento na carga (HIBBELER, 2010).

O comportamento da curva descrito na terceira região é chamado de endurecimento por deformação. Com o fim do escoamento, pode-se aplicar uma carga adicional na amostra, tornando-a mais alongada e, conseqüentemente, com uma área de seção transversal menor. Tais

variações são consideradas razoavelmente uniformes no comprimento de referência do corpo de prova. De acordo com a Figura 5, há um crescimento contínuo na curva de forma menos acentuada até alcançar a tensão máxima  $\sigma_u$  ou LRT, denominada limite de resistência. Esse comportamento de endurecimento acontece conforme os planos cristalinos escorregam entre si, até que são freados ou impedidos gradualmente pelas discordâncias que atingem os contornos de grãos e, assim, exigindo cada vez mais esforço para deformar o material (HIBBELER, 2010; GARCIA *et al.*, 2012).

Por fim, a estricção é a quarta e última região de deformação no diagrama tensão-deformação, onde inicia-se o processo de ruptura do material. Esse fenômeno acontece porque o corpo de prova tende a se alongar cada vez mais à medida que em uma região bem localizada, a área de seção transversal começa a reduzir, de forma contínua e gradativa. Com isso, o esforço necessário que induz a deformação se reduz ao longo do tempo até o instante da ruptura total da amostra, atingindo a tensão de ruptura  $\sigma_f$ , denominada como a tensão em que ocorrerá a fratura total (HIBBELER, 2010; GARCIA *et al.*, 2012).

A maioria das estruturas são projetadas para garantir que ocorra somente a deformação elástica quando um esforço é aplicado. Um modelo que teve suas partes deformadas plasticamente pode não estar apto a funcionar como desejado (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2014).

É de suma importância na engenharia o estudo do comportamento elástico dos materiais que, na maioria das vezes, o diagrama tensão-deformação tem uma relação linear entre tensão e deformação nessa região e, como efeito disso, a deformação cresce proporcionalmente com a tensão. Em 1676, tal comportamento foi descoberto e estudado por Robert Hook e ficou conhecido como Lei de Hook, que é descrita matematicamente, conforme a seguir, pela equação de uma mola (HIBBELER, 2010; GARCIA *et al.*, 2012).

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

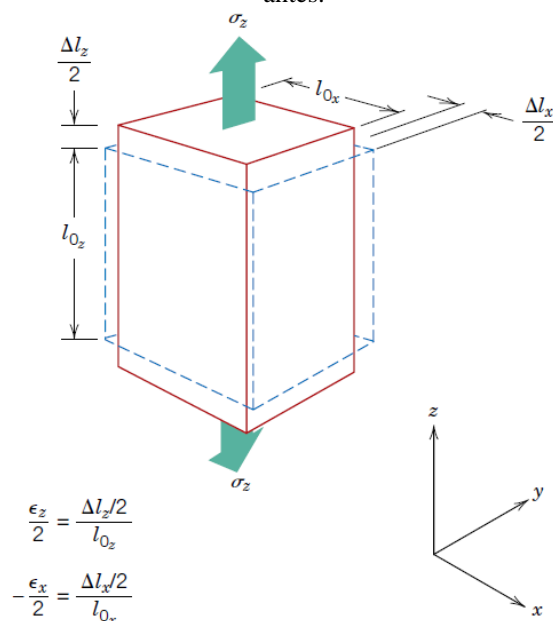
Na equação (3) citada anteriormente, o parâmetro  $E$  representa a constante de proporcionalidade e é denominado como módulo de elasticidade ou módulo de Young, em homenagem feita ao pesquisador Thomas Young, que fez uma explicação da Lei de Hook em 1807. O módulo de elasticidade é definido como o grau de rigidez de um material sólido qualquer que depende das forças de ligação interatômicas (HIBBELER, 2010; GARCIA *et al.*, 2012).

Outro principal parâmetro da região elástica que pode ser analisado de modo mais detalhado é o coeficiente de Poisson, nome que se deve ao matemático Siméon Denis Poisson. Denotado pela letra grega  $\nu$ , ele mede a rigidez do material na direção perpendicular à direção de aplicação da carga uniaxial. O corpo de prova quando submetido a tração, arbitrariamente tomada na direção  $z$ , sofre um alongamento elástico acompanhado de uma deformação  $\epsilon_z$  resultante na direção da força aplicada. Na tentativa de manter o volume constante, ocorrerá uma deformação  $\epsilon_x$  e  $\epsilon_y$  nas direções laterais  $x$  e  $y$ , também perpendicular à direção da força aplicada. Se o material for isotrópico e sabendo que a força é uniaxial, tem-se que  $\epsilon_x = \epsilon_y$ . Matematicamente, o coeficiente de Poisson é definido pela equação (4) a seguir (GARCIA *et al.*, 2012; CALLISTER JR e RETHWISCH, 2014):

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \quad (4)$$

O sinal negativo é incluído na equação, visto que as deformações  $\epsilon_x$  e  $\epsilon_y$  são sempre negativas devido às contrações laterais  $x$  e  $y$  à medida que o corpo de prova se alonga no eixo  $z$ . Dessa forma, garante-se que o valor de  $\nu$  sempre será positivo (GARCIA, 2012; CALLISTER JR e RETHWISCH, 2014). Na Figura 6 é possível observar esse comportamento no corpo de prova.

Figura 6 - Exemplo do comportamento devido ao alongamento do eixo  $z$  e as contrações laterais  $x$  e  $y$  resultante da tensão aplicada. As linhas sólidas representam as dimensões após a aplicação da carga e as linhas tracejadas, antes.



Fonte: CALLISTER JR e RETHWISCH (2014).

A Tabela 1 a seguir mostra alguns valores do coeficiente de Poisson e do módulo de elasticidade para diferentes ligas metálicas à temperatura ambiente. Teoricamente, o material que não sofre nenhuma alteração em seu volume possui um coeficiente de Poisson máximo de 0,5 (GARCIA *et al.*, 2012).

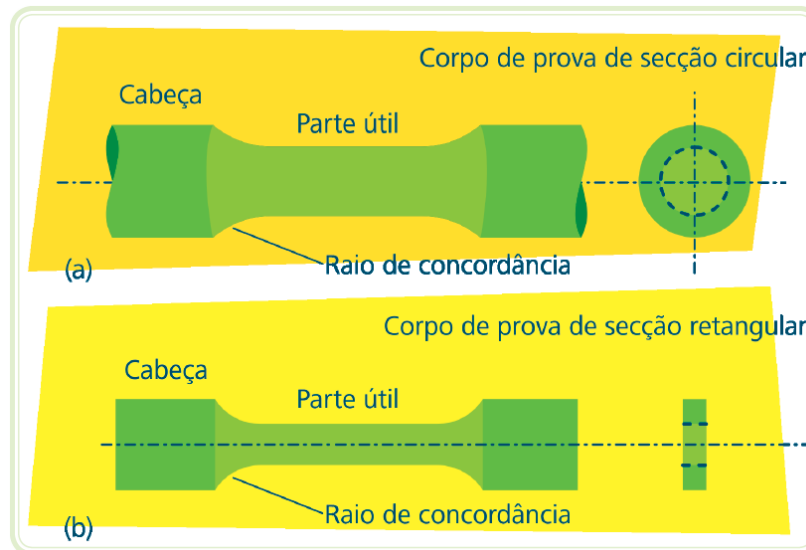
Tabela 1 - Módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson para diferentes ligas metálicas à temperatura ambiente.

Liga metálica	Módulo de elasticidade (GPa)	Coeficiente de Poisson
Alumínio	69	0,33
Latão	97	0,34
Cobre	110	0,34
Magnésio	45	0,29
Níquel	207	0,31
Aço	207	0,30
Titânio	107	0,34
Tungstênio	407	0,28

Fonte: CALLISTER JR e RETHWISCH (2014) [adaptado].

Com o objetivo de ter uma maior confiabilidade nos ensaios de tração, os corpos de prova podem ser retirados do próprio material da estrutura e, obrigatoriamente, possuem dimensões e forma já estabelecidas por normas específicas. A Figura 7 a seguir mostra os formatos dos corpos de prova, cujos modelos podem ser com seção transversal circular ou retangular (ZOLIN, 2010).

Figura 7 - Modelo dos corpos de prova com (a) seção transversal circular e (b) seção transversal retangular.

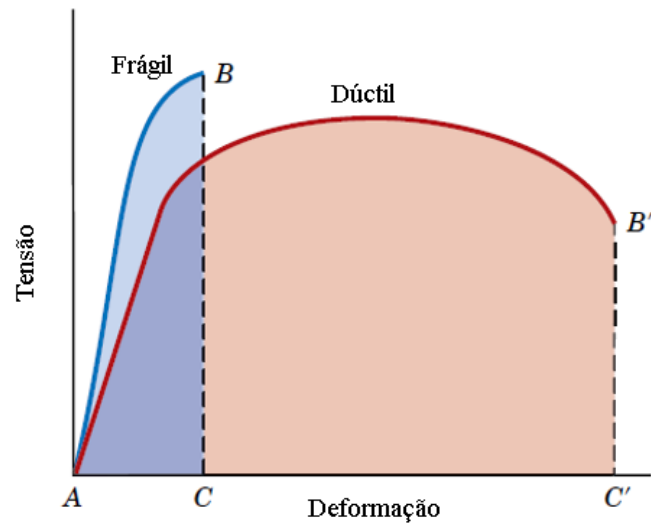


Fonte: ZOLIN (2010).

A parte útil do corpo de prova possui uma seção transversal menor em relação às extremidades, a fim de concentrar as tensões nessa região central, que não é afetada pelas garras da máquina e também reduzir a probabilidade de fratura nas extremidades durante o ensaio de tração (CHIAVERINI, 1986; CALLISTER JR e RETHWISCH, 2014).

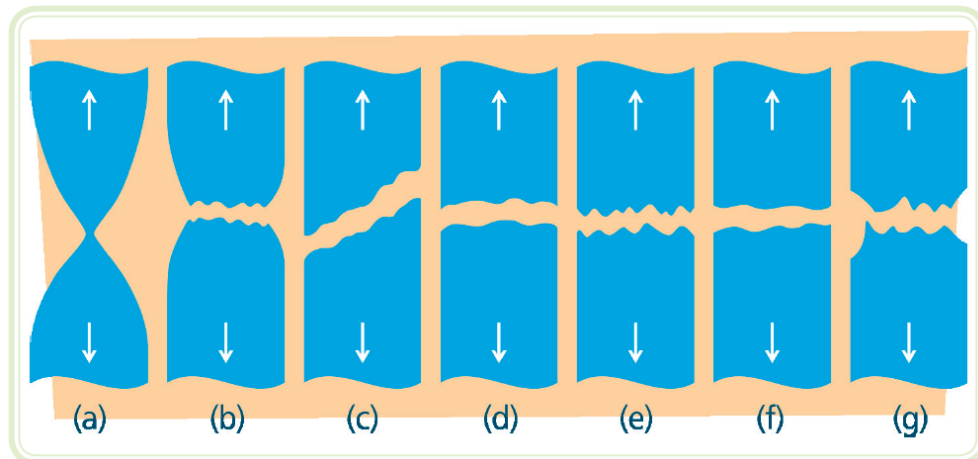
As fraturas dos corpos de prova ensaiados à tração são classificadas, conforme a intensidade da deformação plástica que antecede a fratura, em dúctil ou fibrosa e frágil ou cristalina, de modo macroscópico. Sabe-se que os materiais dúcteis possuem deformações plásticas bem definidas, com sinais de alongamento visíveis, podendo antecipar o momento de ruptura. No caso dos materiais frágeis, a ruptura ocorre quase que imediatamente após a fase elástica e, com isso, quase não há vestígios de deformação plástica. Na Figura 8 é possível verificar ambos comportamentos na representação esquemática do diagrama tensão-deformação e a Figura 9 mostra alguns exemplos de materiais dúcteis em (a) e (b) e frágeis em (c), (d), (f) e (g) (ZOLIN, 2010).

Figura 8 - Representação esquemática de um diagrama tensão-deformação para o comportamento de materiais frágeis e dúcteis sob carregamento até a fratura.



Fonte: CALLISTER JR e RETHWISCH (2014) [adaptado].

Figura 9 - Tipos básicos de fraturas devido à tração.



Fonte: ZOLIN (2010).

### 2.3 Ensaios não destrutivos

Ensaios não destrutivos são aqueles que não comprometem a integridade e não deixam vestígios na peça ensaiada, não havendo o seu descarte posteriormente. Bastante utilizado nas indústrias de diversas áreas, este tipo de ensaio permite a obtenção de dados quantitativos e qualitativos de uma determinada peça antes mesmo de sua utilização inicial, assim como a realização de inspeções periódicas ao longo da vida útil com a finalidade de apontar o momento ideal de sua troca, evitando assim que ocorram falhas em função do serviço realizado (ZOLIN, 2010; GARCIA *et al.*, 2012).

### 2.3.1 Inspeção visual

O procedimento da inspeção visual é uma técnica simples que consiste na observação ótica de uma peça, normalmente com o auxílio de lupas, microscópios, projetores óticos, gabaritos e comparadores. A facilidade deste ensaio o torna mais utilizado na detecção e avaliação de trincas superficiais dos materiais, por isso o resultado depende das condições de acesso ao local, da iluminação do ambiente e, principalmente, de um bom treinamento e experiência do inspetor que tenha conhecimento claro das exigências mecânicas da peça em questão (*ASM HANDBOOK COMMITTEE*, 1990; ZOLIN, 2010; GARCIA *et al.*, 2012).

Antes de qualquer aplicação de outros métodos mais sofisticados e caros em qualquer programa de controle de qualidade, a inspeção visual é o ensaio não destrutivo mais indicado para avaliação a fim de detectar falhas e revelar potenciais problemas de fabricação, uma vez que possui como vantagem a simplicidade e baixo custo operacional. Ocasionalmente, necessita-se da inspeção visual remota, com a utilização de microcâmeras e um sistema de iluminação adequado, visto que alguns lugares são de difíceis acesso. Caso a peça ensaiada mostre sinais de alguma falha, recomenda-se a interrupção do processo nesta etapa, visando reduzir os custos (HOLDREN, 2001; ZOLIN, 2010; GARCIA *et al.*, 2012).

### 2.3.2 Ensaio por partículas magnéticas

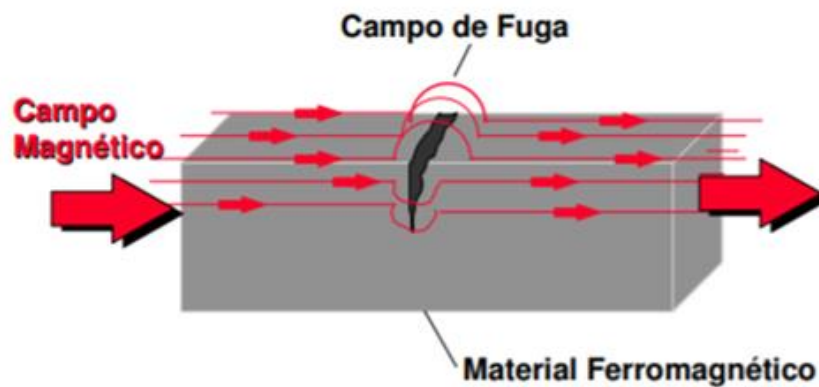
O ensaio por partículas magnéticas consiste em localizar descontinuidades superficiais e subsuperficiais nos materiais ferromagnéticos, utilizando suas propriedades a partir do princípio do magnetismo. Destaca-se a aplicabilidade deste ensaio durante as etapas de fabricação e em peças acabadas e semiacabadas (*INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY*, 2005; MIX, 2005).

Para que ocorra este ensaio, é necessário induzir um campo magnético na peça graças a uma passagem de corrente elétrica ou imergi-la em um campo magnético. Logo após, aplica-se um pó magnético, constituído de partículas bem refinadas que são atraídas para as regiões de escape do campo. Denomina-se tal fenômeno como campo de fuga, conforme Figura 10, em consequência das descontinuidades existentes na peça, a título de exemplo trincas e porosidades, onde o fluxo magnético é distorcido. O acúmulo desse pó nos campos de fuga indica a presença de uma descontinuidade, sendo possível visualizar seu formato e sua extensão (MODENESI, 2001; ANDREUCCI, 2018).

Os procedimentos de ensaio por partículas magnéticas são limitados devido a sua aplicação somente em materiais ferromagnéticos. À vista disso, em materiais como vidro, cerâmica, aços austeníticos e ligas de aço inoxidável ou, em casos peças soldadas, cujo material

de adição depositado não for magnetizável, este tipo de ensaio não pode ser aplicado. Ademais, torna-se uma dificuldade se o material de adição possuir características magnéticas compatíveis com as do material de base (AWS COMMITTEE ON METHODS OF INSPECTION, 2000; GONÇALVES NETO, 2013). A orientação das trincas pode ser um problema para esse processo, pois as trincas que têm direção paralela ao campo tendem a não gerar indicações (MODENESI, 2001).

Figura 10 - Trinca superficial em uma peça originando um campo de fuga.



Fonte: ANDREUCCI (2018).

Nas Figuras 11 e 12, observa-se a magnetização de uma peça e o ensaio por partículas magnéticas sendo realizado, respectivamente.

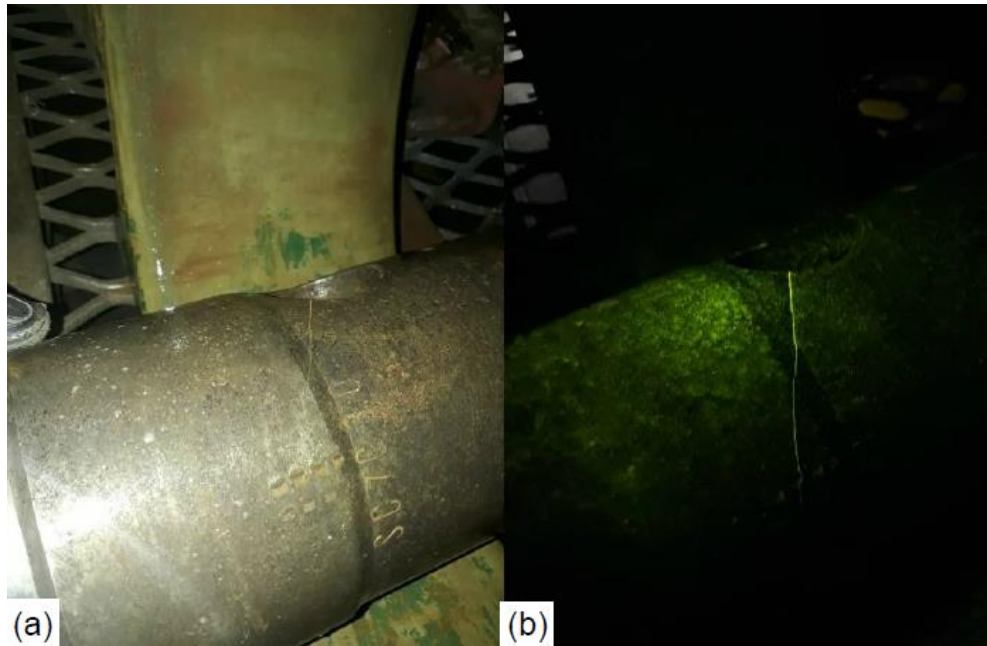
Figura 11 - Magnetização da peça a ser ensaiada por partículas magnéticas.



Fonte: COUTO (2019).



Figura 12 - Trinca de uma peça (a) antes e (b) durante o ensaio por partículas magnéticas com o auxílio de luz ultravioleta.



Fonte: COUTO (2019).

### 2.3.3 Ensaio por líquidos penetrantes

Devido à necessidade das indústrias que trabalham com ligas não ferrosas em inspecioná-las, visto que o ensaio por partículas magnéticas não se aplica a esses materiais, ensaios utilizando líquidos penetrantes foram adotados com o objetivo de detectar defeitos superficiais (FARIAS *et al.*, 2017).

O ensaio por líquidos penetrantes é um método desenvolvido que consiste na detecção de discontinuidades superficiais onde o líquido penetra nessas aberturas e, conforme já citado anteriormente, é comumente utilizado em alumínio, ligas de titânio e aços inoxidáveis austeníticos. Isso ocorre devido ao fenômeno da capilaridade, ou seja, à capacidade de penetração do líquido numa área consideravelmente pequena em consequência da tensão superficial (ATKINS, 2010; DE ANDRADE e DANTAS, 2018; ANDREUCCI, 2019).

De maneira geral, aplica-se um líquido penetrante na superfície do material ensaiado, de acordo com os procedimentos pré-estabelecidos. Deve-se aguardar um período ideal para que ocorra a penetração do líquido nas discontinuidades e, após isso, o excesso também deverá ser retirado. Por fim, aplica-se superficialmente um filme revelador no material, induzindo o líquido penetrante a sair das discontinuidades e ser absorvido pelo revelador, indicando sinais mais fáceis de visualizar que os próprios defeitos em si (MIX, 2005).

A fim de garantir a confiabilidade, o ensaio não é recomendado em superfícies porosas, contaminadas ou com alta rugosidade, portanto, necessita-se de uma limpeza e secagem do

material antes de iniciar o ensaio (ANDREUCCI, 2019). Ainda, pode-se acrescentar que o ensaio por líquidos penetrantes é um método para detectar descontinuidades abertas confiável, inclusive em comparação com outros ensaios não destrutivos, como por exemplo o ensaio por radiografia, se feito corretamente nesta aplicação (AWS COMMITTEE ON METHODS OF INSPECTION, 2000; MIX, 2005).

Pode-se classificar o ensaio por líquidos penetrantes em duas categorias: a que utiliza líquido penetrante fluorescente e a que utiliza líquido penetrante visível. Os resultados da primeira categoria só podem ser indicados com o auxílio da luz ultravioleta, demandando equipamentos especiais e condições adequadas de iluminação. A segunda utiliza líquido penetrante de cor vermelha, que gera um contraste com o filme revelador de cor branca. Ambas categorias mostram indicações com boa visibilidade, porém o líquido penetrante fluorescente é melhor se comparado com o líquido penetrante de contraste (AWS COMMITTEE ON METHODS OF INSPECTION, 2000).

Nas Figuras 13, 14 e 15, é possível verificar algumas etapas do ensaio por líquido penetrante.

Figura 13 - Aplicação do líquido penetrante numa superfície.



Fonte: COUTO (2019).

Figura 14 - Aplicação do filme revelador na superfície.



Fonte: COUTO (2019).

Figura 15 - Trincas detectadas durante o ensaio por líquido penetrante.



Fonte: COUTO (2019).

## 2.4 Introdução ao método dos elementos finitos

Sabe-se que uma grande variedade dos problemas de engenharia utiliza modelos matemáticos representativos, de forma a se adequar o mais próximo possível da realidade, sendo eles por equações diferenciais ordinárias (EDO) ou equações diferenciais parciais (EDP), cujas equações podem possuir soluções analíticas desconhecidas, devido à complexidade do problema (FONSECA, 2002; RADE, 2011).

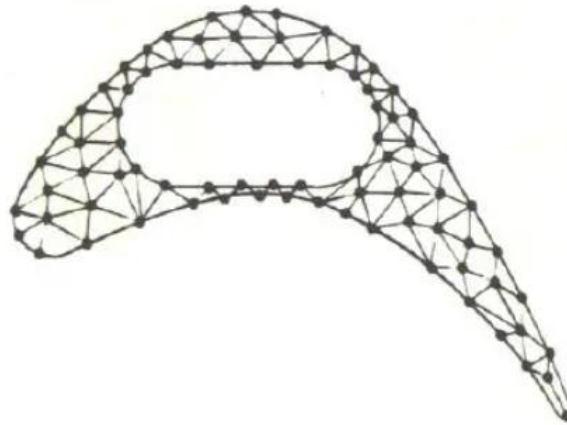
Desta forma, os engenheiros têm a necessidade de buscar alternativas para suas necessidades, ocasionando em soluções analíticas mais elaboradas e complicadas de serem resolvidas, fato que levou à utilização do método dos elementos finitos, uma técnica capaz de fornecer soluções numéricas aproximadas, de forma precisa e acessível (FONSECA, 2002; RADE, 2011).

O MEF é a técnica de discretizar meios contínuos a fim de obter soluções aproximadas dos problemas regidos por EDO e EDP, consistindo em vários métodos numéricos e sendo o processo mais seguro para isso. O engenheiro deve ter a capacitação e total responsabilidade para avaliar as soluções encontradas e os erros associados aos problemas, conforme as simplificações utilizadas. Com sua ampla utilização e o desenvolvimento computacional, surgiram programas comerciais para estas análises, tais como: *ANSYS*, *Abaqus*, *NASTRAN* e diversos outros. O MEF, antes desenvolvido para fins estruturais, agora se estende para múltiplas áreas da engenharia, como por exemplo: mecânica dos sólidos, mecânica dos fluidos, eletromagnetismo, transmissão de calor, acústica, entre outras áreas. (FONSECA, 2002; RADE, 2011).

Nos problemas modelados, pode-se dizer que há duas divisões para as soluções analíticas: a solução homogênea e a solução particular. A primeira se refere ao comportamento natural e às propriedades físicas do sistema, como o módulo de elasticidade, resultando na matriz de rigidez. Já a segunda se relaciona com parâmetros de perturbação do sistema, como as forças externas, gerando a matriz de carregamento. Ainda, os problemas descritos pelas EDO e EDP possuem formulações na “forma forte” e na “forma fraca”. Na “forma forte” a solução do problema físico é feita de forma direta, enquanto que, na “forma fraca” utiliza aproximações numéricas (RADE, 2011).

Pelo fato de o MEF ser um processo essencialmente de discretização, todo o domínio do sistema é particionado em regiões com geometria mais simples interconectadas com dimensões finitas, denotadas elementos. Cada conexão entre os elementos, de número finito, é chamada de nós. Esse conjunto de elementos, por fim, é denominado malha (RADE, 2011). A Figura 16 apresenta a malha de um problema com geometria complexa.

Figura 16 - Ilustração de uma malha da seção transversal de uma paleta de turbina.



Fonte: RADE (2011).

A precisão da solução obtida pelo MEF depende do grau de refinamento da malha, ou seja, do número de elementos. Sendo assim, conforme aumenta o número desses elementos, seu tamanho é reduzido. Esse refinamento é feito até que a solução numérica convirja para a solução analítica do problema. Por outro lado, se o número de elementos tende ao infinito, maiores serão as exigências computacionais para o processamento de dados. Além disso, os tipos de funções de forma empregadas também influenciam na precisão do problema já que estão relacionadas ao número de nós dos elementos, determinando se as aproximações dos deslocamentos nodais serão lineares ou quadráticas (RADE, 2011).

A avaliação do número de graus de liberdade dos elementos da malha é de suma importância no MEF. Define-se grau de liberdade como a quantidade de movimentos possíveis que uma partícula ou um corpo pode realizar no espaço. No MEF, cada grau de liberdade está relacionado a uma possível realização do movimento de um nó, cujos deslocamentos são os principais pontos analisados neste método (RADE, 2011).

Devido a sua vasta aplicabilidade, o MEF se tornou uma ferramenta comum na resolução dos principais problemas da engenharia. Por ser um método com soluções aproximadas, cada simplificação realizada no problema pode gerar resultados diferentes do esperado com a realidade. O conhecimento teórico, tanto da física do problema quanto do método de análise, é relevante para detecção de possíveis erros no estudo e, principalmente, na interpretação dos resultados e validação do caso (RADE, 2011).

#### **2.4.1 Solidworks**

O *Solidworks* é um programa CAD (*Computer-Aided Design*) de projetos mecânicos que permite a designers esboçarem rapidamente suas ideias, com os mais diversos recursos

avançados para produzir modelos e desenhos detalhados (*DASSAULT SYSTÈMES CORP.*, 2015).

#### **2.4.2 Abaqus**

O *Abaqus* é um programa CAE (*Computer-Aided Engineering*) que oferece soluções completas através da análise por elementos finitos para problemas de engenharia de rotina, desde os mais simples até os mais sofisticados, abrangendo uma vasta gama de aplicações industriais. Na indústria automotiva, por exemplo, engenheiros conseguem considerar as cargas completas do veículo, vibração dinâmica, acoplamento térmico e os mais diversos parâmetros relevantes para a concepção do projeto (*DASSAULT SYSTÈMES CORP.*, 2020).

### **2.5 Critérios de projeto**

Nos projetos de engenharia deve-se cumprir todos os aspectos incluídos no modelo, sejam eles econômicos, de segurança ou funcionalidade do produto, todos regidos por códigos e padrões. Logicamente, também leva-se em conta as incertezas presentes em todos os projetos, sendo resolvidas por meio do fator de segurança e do projeto cujos termos são determinísticos ou estatísticos. O estado de um componente mecânico na maioria dos casos está relacionado com a tensão e a resistência, porém em uma dada situação do projeto há outras características importantes que devem ser priorizadas, tais como desgaste, corrosão, ruído, forma, propriedades térmicas, entre outros diversos parâmetros (*BUDYNAS e NISBETT*, 2011).

O modelo em estudo neste presente trabalho levou em consideração dois pontos chave: a rigidez e a integridade. No primeiro caso, pode-se dizer que a rigidez está relacionada com as tensões e deflexões máximas permitidas na estrutura, sendo impostas pelo cliente. Já no segundo caso, a integridade está ligada diretamente à perda de função do material e, conseqüentemente, ocorre a falha de projeto (*BUDYNAS e NISBETT*, 2011). Trincas e deformações plásticas serão consideradas falhas para tal evento.

## CAPÍTULO III – MATERIAIS, MÉTODOS E MODELAGEM

### 3.1 Materiais

O material disponibilizado é um pedaço da viga de uma estrutura que seria descartada, semelhante ao modelo em estudo, cedido pela empresa proprietária. Também foi informado que o material é um aço baixo carbono AISI série 1000. Uma visão geral da composição química desse material pode ser vista na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Elementos químicos presentes na série AISI 1000.

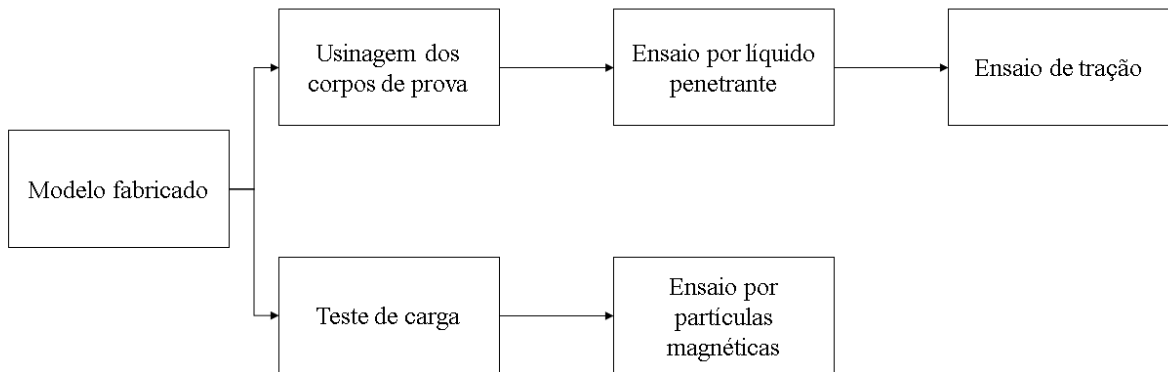
Elemento	Porcentagem (%)
Alumínio	0,0150 - 0,0200
Carbono	0,0600 - 1,03
Cobre	0,250 - 0,300
Ferro	96,8 - 100
Chumbo	0,150 - 0,360
Manganês	0,250 - 2,05
Molibdênio	0,060 - 0,250
Níquel	0,100 - 0,400
Fósforo	0,0200 - 0,400
Silício	0,100 - 0,400
Enxofre	0,0150 - 0,500
Titânio	0,005
Vanádio	0,0300 - 0,100

Fonte: *MATWEB MATERIAL PROPERTY DATA* [adaptado]. Acesso em: 25/10/2020.

### 3.2 Métodos

Neste presente trabalho, a parte experimental consistiu em cinco etapas, descritas a seguir: usinagem dos corpos para ensaio de tração, ensaio por líquidos penetrantes, ensaio de tração, teste de carga e ensaio por partículas magnéticas. Todas estas etapas foram realizadas à temperatura ambiente. A Figura 17 esquematiza através de um fluxograma os procedimentos realizados.

Figura 17 - Esquema dos procedimentos experimentais.

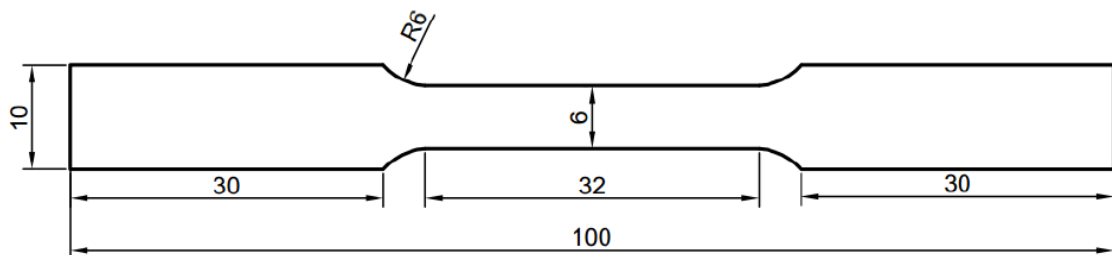


Fonte: Autoria própria.

### 3.2.1 Usinagem dos corpos de prova

Em um primeiro instante, cortou-se o material em 16 pequenas chapas de 10 x 100 mm, a fim de originar os corpos de prova. Após isso, encaminhou-se essas amostras para uma empresa qualificada para usinar os corpos de prova, de acordo com as dimensões estabelecidas pela norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*) E8/E8M, conforme a Figura 18. A espessura foi de  $5 \pm 1$  mm para todos os corpos de prova.

Figura 18 - Dimensões, em milímetros, dos corpos de prova para os ensaios de tração.



Fonte: COUTO (2019).

### 3.2.2 Ensaio por líquido penetrante nos corpos de prova

A inspeção para verificar se havia alguma descontinuidade, principalmente trincas, após a usinagem dos corpos de prova foi realizada pelo ensaio por líquido penetrante. Um inspetor qualificado foi responsável por dirigir este ensaio seguindo o procedimento estabelecido pela norma ASME SEC V.

Em um primeiro instante, as amostras foram limpas com um desengraxante POLEN D336, visto que não pode haver nenhum resíduo na superfície a ser ensaiada. No próximo passo



após a limpeza, o inspetor verificou as condições do ambiente, como iluminação e temperatura, através de um luxímetro e um termômetro certificados, respectivamente. A fim de garantir a confiabilidade do ensaio, aplicou-se o líquido penetrante em um bloco padrão para testes (Figura 20), cujo ensaio deve ter o mesmo resultado apresentado em uma fotografia de referência. Feito isso, aplicou-se o líquido penetrante VP 30 da *Metal Check* em todos os corpos de prova, conforme a Figura 19.

Figura 19 - Corpos de prova com líquido penetrante aplicado.



Fonte: Autoria própria.

Figura 20 - Teste com o bloco padrão com o líquido penetrante.



Fonte: COUTO (2019).

Em seguida, aguardou-se cerca de quinze a vinte minutos para que o líquido penetrante pudesse atingir eventuais descontinuidades. Ao término do tempo necessário, removeu-se o líquido penetrante com água, após isso secou-se os corpos de prova, retirando todo vestígio de líquido e preparando-os para a aplicação do revelador D71 (Figura 21), também da *Metal Check*. Novamente, esperou-se mais quinze minutos para que as descontinuidades pudessem ficar visíveis, caso existissem. Finalmente, o inspetor pôde examinar os corpos de prova, comparando-os com o bloco padrão e a fotografia de referência.

Figura 21 - Corpos de prova com o revelador aplicado.



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.3 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi conduzido rigorosamente conforme a norma ASTM E8/E8M. Para isso, utilizou-se a máquina universal para ensaios mecânicos da marca INSTRON modelo EMIC23-100, equipada com uma célula de carga de 100 KN e um extensômetro acoplado INSTRON modelo 2630-112. A velocidade do ensaio considerada foi de 1 mm/min.

Foram realizados cinco ensaios a fim de obter uma média para o limite de escoamento do material e outras propriedades mecânicas. Como a área é um parâmetro fundamental para a obtenção das tensões, cada corpo de prova foi medido com o auxílio de um micrômetro e os resultados obtidos foram registrados na Tabela 3. Feito isso, escolheu-se os melhores corpos de prova dentre os quinze usinados. Na Figura 22 é possível visualizar a montagem do equipamento para o ensaio de tração.

Figura 22 - Máquina universal de ensaios mecânicos para execução de ensaio uniaxial de tração.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 - Resultados da análise dimensional dos corpos de prova.

**Análise dimensional dos corpos de prova**

<b>Amostras</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Espessura (mm)</b>
Corpo de prova 1	5,64	4,56
Corpo de prova 2	5,98	4,66
Corpo de prova 3	5,55	4,42
Corpo de prova 4	5,90	4,38
Corpo de prova 5	5,88	4,41
<b>Média</b>	<b>5,790</b>	<b>4,486</b>

Fonte: Autoria própria.

### 3.2.4 Teste de carga e inspeção visual

Uma empresa certificada e qualificada foi responsável pela condução do teste de carga. A primeira etapa deste ensaio consiste na inspeção visual da estrutura, com objetivo de garantir que o modelo esteja em perfeitas condições para a sobrecarga, evitando assim que quaisquer deformações, trincas e outras descontinuidades influenciem no resultado ou até mesmo causem

danos irreversíveis e, certamente, gerem custos a mais para o cliente. É válido destacar que antes da realização do teste de carga, foi feita uma simulação numérica do modelo.

Após a garantia de que a estrutura está em perfeitas condições, inicia-se a sobrecarga no modelo. Para isso, verifica-se os parâmetros informados pelo cliente, nesse caso uma carga de trabalho de 400 kgf e fator de segurança de 1,5, portanto, a carga de teste foi de 600 kgf. O sistema gerador de carga foi um guindaste com uma célula de carga com medição de 55 toneladas e base de ancoragem. O tempo estipulado para o teste foi de 1 minuto. Por fim, há uma nova inspeção visual após a sobrecarga para garantir a integridade física da estrutura. A Figura 23 mostra o guindaste e o local em que foi conduzido o teste de carga.

Figura 23 - Guindaste utilizado para a condução do teste de carga.



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.5 Ensaio por partículas magnéticas nas juntas soldadas

Este ensaio por partículas magnéticas nas juntas soldadas da estrutura é um complemento da inspeção visual para detecção de falhas devido à sobrecarga. Para a preparação do ensaio, todas as juntas soldadas foram lixadas até a remoção completa de tintas e outras substâncias. Após essa limpeza, verificou-se todas condições relevantes para o ensaio, principalmente a temperatura, luz e a suspensão da mistura com partícula ferromagnética.

A técnica de magnetização utilizada foi longitudinal, via úmida, com yoke e uma corrente alternada. A concentração das partículas ferromagnéticas em água foi de 1,8 ml por 100 ml, com coloração vermelha. Toda aparelhagem e produtos citados neste ensaio são da *Metal Check*. Ao final do ensaio, toda parte lixada foi pintada conforme as cores da estrutura. A Figura 24 mostra alguns pontos em que foi realizado o ensaio por partículas magnéticas.

Figura 24 - Pontos da estrutura em que foi realizado o ensaio por partículas magnéticas.



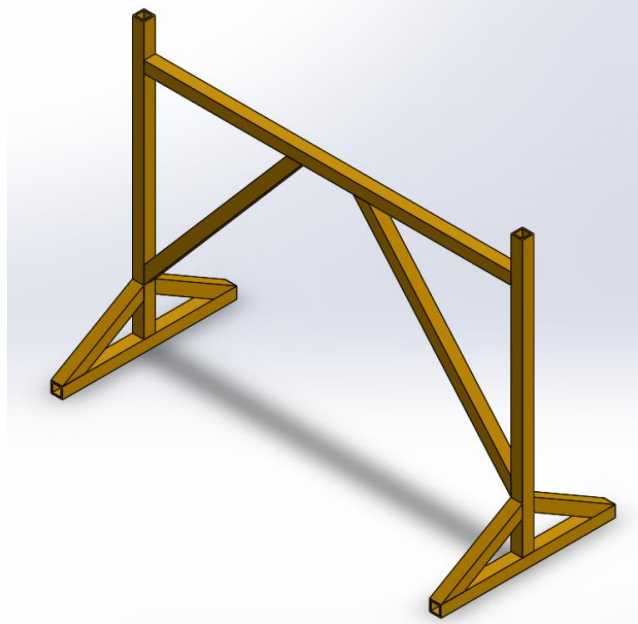
Fonte: Autoria própria.

### 3.3 Modelagem

Todas as decisões tomadas para a modelagem do problema (Figura 25) serão expostas para análise pelo método dos elementos finitos, seguindo estritamente as informações e procedimentos determinados pela empresa proprietária da estrutura. Para isso, foi utilizado o programa *Abaqus* 6.14-2 conforme as etapas a seguir.

Ressalta-se que no programa *Abaqus* não há um padrão de unidades, portanto, todos os parâmetros estão de acordo para que o resultado final das tensões seja obtido em megapascal e os deslocamentos em milímetros.

Figura 25 - Modelo da estrutura a ser analisada pelo método dos elementos finitos.

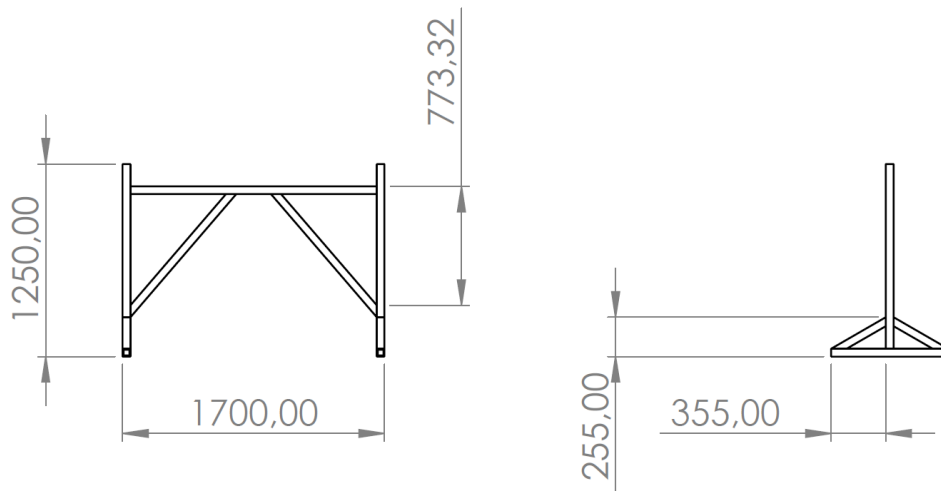


Fonte: Autoria própria.

### 3.3.1 Geometria do modelo

Inicialmente, tomou-se todas as dimensões da estrutura em campo com o auxílio de uma trena e um paquímetro. Após isso, fez-se um desenho utilizando o programa *Solidworks* contendo todas as informações dimensionais para a criação do modelo. A estrutura é composta por vigas de seção quadrada 50 x 50 mm. Para a medição das espessuras registradas na Tabela 4, utilizou-se um aparelho de ultrassom (Figura 28) em quatro pontos da superfície de cada viga lixada, determinados como A, B, C e D. O desenho da estrutura e o croqui para a medição de espessura podem ser vistos nas Figuras 26 e 27, respectivamente.

Figura 26 – Desenho da estrutura com suas dimensões, em milímetros.



Fonte: Autoria própria.

Figura 27 - Croqui para medição de espessura.



Fonte: Autoria própria.

Figura 28 - Instrumento de ultrassom utilizado para medição de espessura.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 – Registro das medições de espessuras das vigas da estrutura.

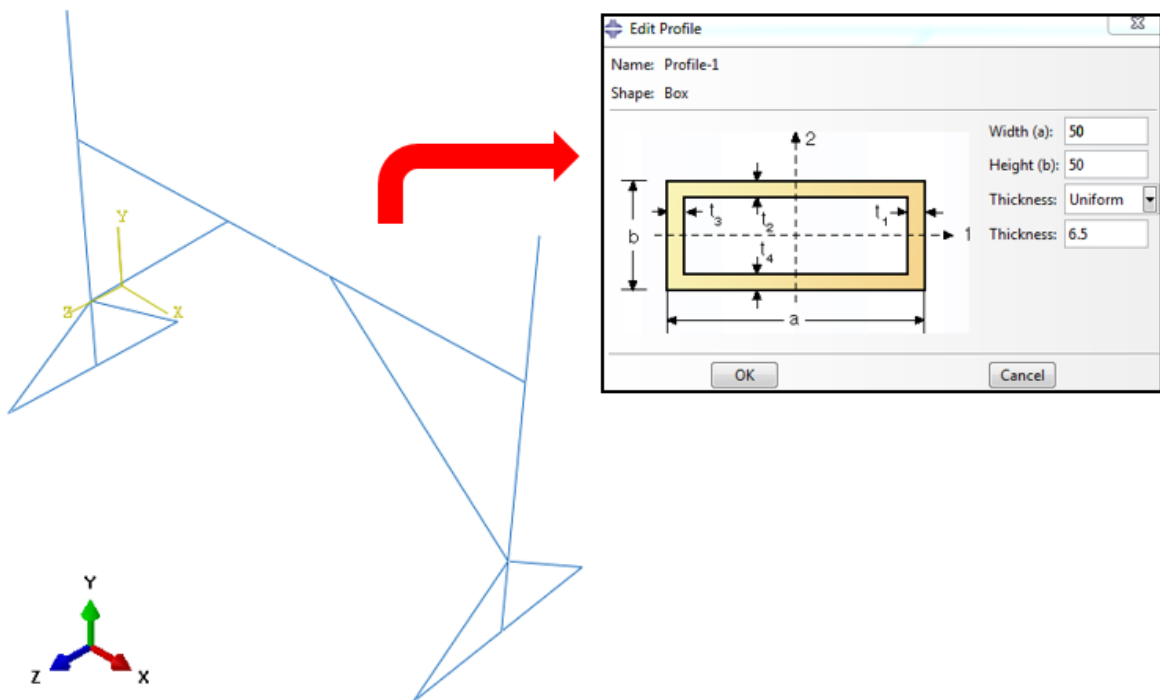
<b>Registro das medições</b>			
<b>Pontos</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Pontos</b>	<b>Espessura (mm)</b>
1A	6,52	6C	6,52
1B	6,51	6D	6,52
1C	6,53	7A	6,51
1D	6,50	7B	6,51
2A	6,53	7C	6,53
2B	6,52	7D	6,51
2C	6,51	8A	6,52
2D	6,51	8B	6,53
3A	6,51	8C	---
3B	6,53	8D	6,52
3C	6,52	9A	6,51
3D	6,51	9B	6,51
4A	6,52	9C	6,52
4B	6,54	9D	6,51
4C	6,50	10A	6,52

4D	6,52	10B	6,51
5A	6,51	10C	6,53
5B	6,51	10D	6,50
5C	6,52	11A	6,53
5D	6,51	11B	6,52
6A	6,53	11C	---
6B	6,52	11D	6,53

Fonte: Autoria própria.

Para o modelo feito no *Abaqus*, conforme Figura 29, utilizou-se o elemento do tipo viga 3D deformável com uma seção quadrada. Considerou-se a menor espessura registrada na Tabela 4, adotando critério conservador.

Figura 29 - Modelo da estrutura e tipo de seção aplicada com dimensões em milímetros.



Fonte: Autoria própria.

### 3.3.2 Convergência da malha e tipo de elemento utilizado

Sabe-se que a malha e o seu grau de refinamento são pontos fundamentais para análise por elementos finitos, definindo o custo computacional e a precisão da simulação, dependendo do quão complexa é a geometria do problema e o tipo de elemento utilizado.



Para a geração da malha, escolheu-se um elemento de viga linear da livreria padrão do *Abaqus* que possui dois nós no espaço do tipo “*beam*”, denominado B31.

Com o intuito de determinar o tamanho médio dos elementos utilizados, fez-se um estudo de convergência de malha. Nota-se que as tensões e as deformações são os principais parâmetros a serem obtidos, então este estudo consistiu em aplicar um carregamento na estrutura, a fim de perceber a influência da malha nos resultados. Caso a variação nos resultados seja muito pequena a partir de um certo grau de refinamento, diz que há uma convergência da malha. O melhor grau de refinamento é aquele em que os resultados obtidos são mais precisos, levando-se em consideração os recursos computacionais, ou seja, o tempo de execução.

No presente estudo, utilizou-se a deformação máxima e a tensão máxima de von Mises como parâmetros para convergência da malha e o tempo de simulação como custo computacional. Os resultados deste estudo foram registrados na Tabela 5.

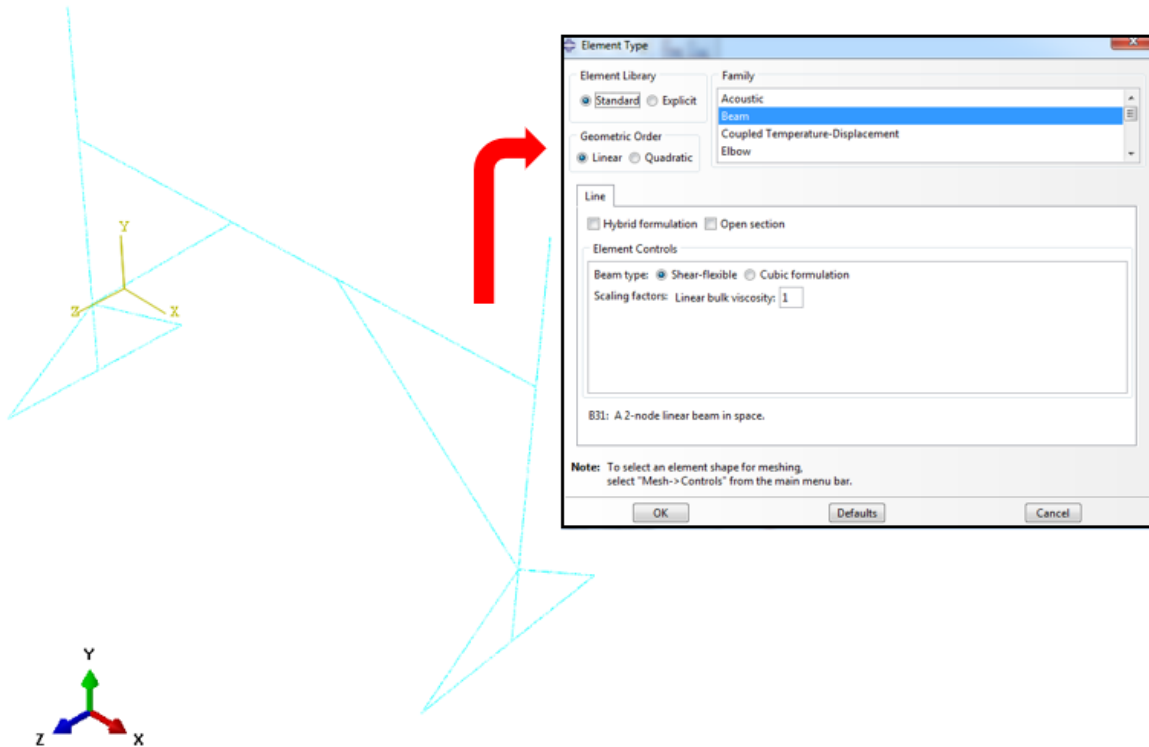
Tabela 5 - Estudo para convergência da malha.

<b>Convergência da malha</b>				
<b>Tamanho aproximado do elemento (mm)</b>	<b>Número de elementos</b>	<b>Tempo de simulação (s)</b>	<b>Tensão equivalente máxima de von Mises (MPa)</b>	<b>Deslocamento máximo (mm)</b>
20	87	3	75,526	10,271
10	173	3,11	75,965	9,299
5	341	3,47	75,982	4,641
1	1701	4,69	75,997	4,625

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que a malha já convergiu para um elemento com tamanho aproximado de 5 mm, pois quando comparado com a malha formada por elementos de 1 mm, houve uma variação de somente 0,020% para a tensão máxima de von Mises e de 0,345% na deformação máxima. Tendo em vista que, para esse projeto o tempo de simulação foi consideravelmente rápido, apesar de ser 35% superior ao tempo de simulação com elementos de 5 mm, optou-se pela malha mais refinada em que o tamanho aproximado do elemento é de 1 mm. No entanto, para projetos que exijam uma maior capacidade de processamento, este tempo deve ser considerado para análise de convergência da malha. A Figura 30 mostra a estrutura com a malha e o tipo de elemento utilizado.

Figura 30 - Malha e tipo de elemento utilizado na estrutura.



Fonte: Autoria própria.

### 3.3.3 Propriedades mecânicas do material

É fato que as propriedades mecânicas do material são de suma importância para uma análise, sejam elas determinadas através de ensaios ou fornecidas pelo fabricante do material. Devido às limitações, poucas informações foram disponibilizadas, portanto, algumas propriedades que são relevantes para esta análise foram retiradas da internet. Conforme já citado anteriormente, somente foi informado que o material é um aço baixo carbono AISI série 1000 e algumas de suas propriedades podem ser vistas na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas da série AISI 1000.

#### Aço AISI Série 1000

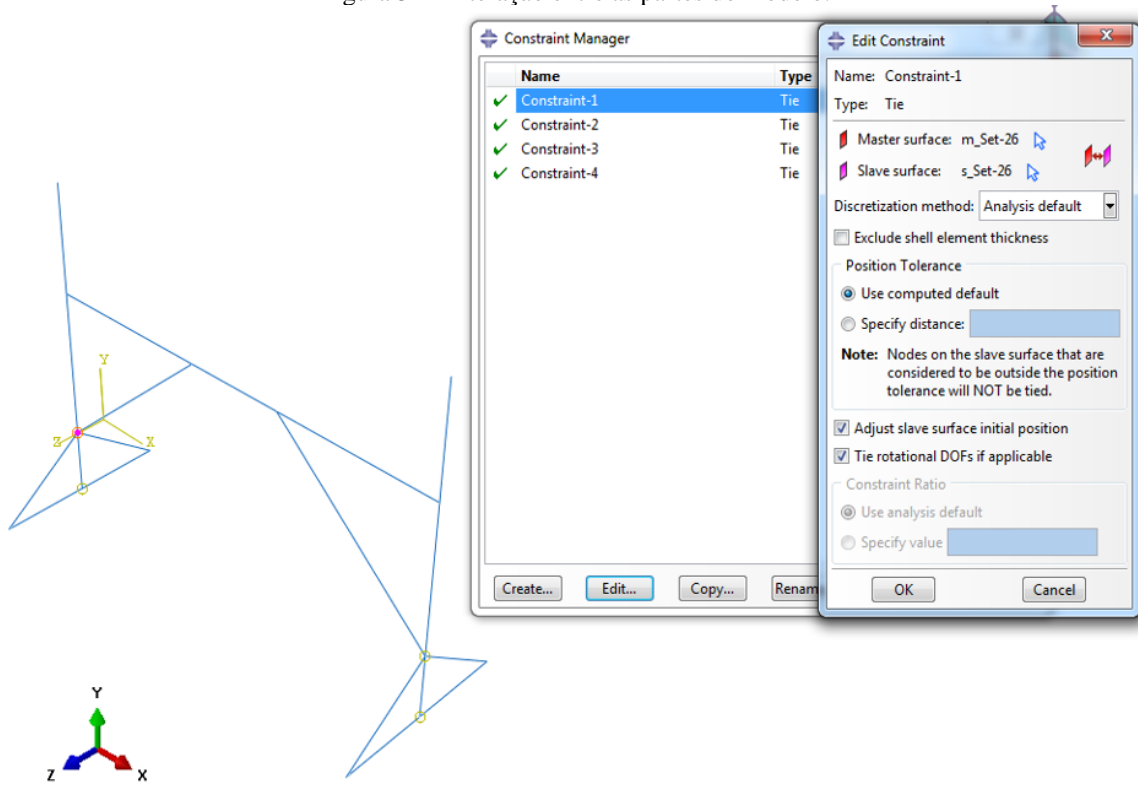
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	7,87
Tensão de escoamento (MPa)	165 - 1260
Módulo de elasticidade (GPa)	200
Coefficiente de Poisson	0,29

Fonte: *MATWEB MATERIAL PROPERTY DATA* [adaptado]. Acesso em: 25/10/2020.

### 3.3.4 Interação entre as partes do modelo e tipo de análise

Para a interação entre as partes que formam o conjunto utilizou-se o tipo “Tie” entre as regiões que foram soldadas no equipamento (Figura 31), representando essa junção.

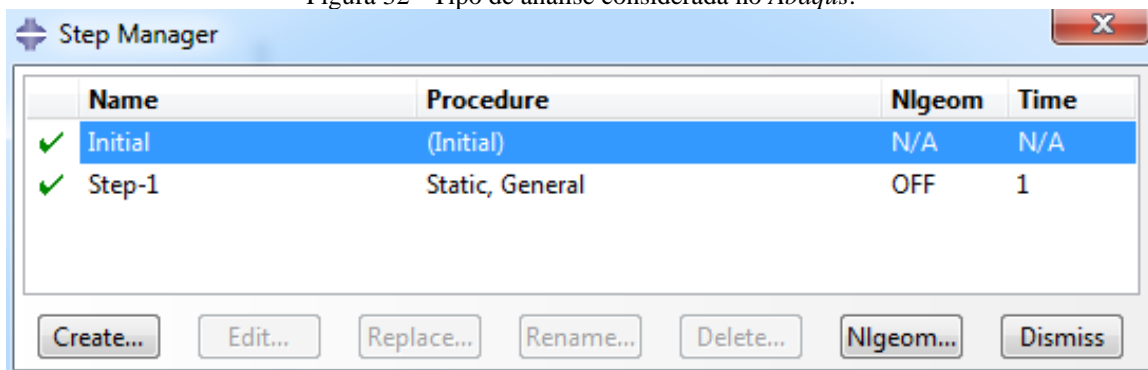
Figura 31 - Interação entre as partes do modelo.



Fonte: Autoria própria.

Como a estrutura está sob um esforço estático, considerou-se a análise do tipo “Estática-Geral” (Figura 32) para a verificação da tensão aplicada à estrutura com aplicação de uma carga de teste estática.

Figura 32 - Tipo de análise considerada no *Abaqus*.



Fonte: Autoria própria.

### 3.3.5 Carregamento e condições de contorno

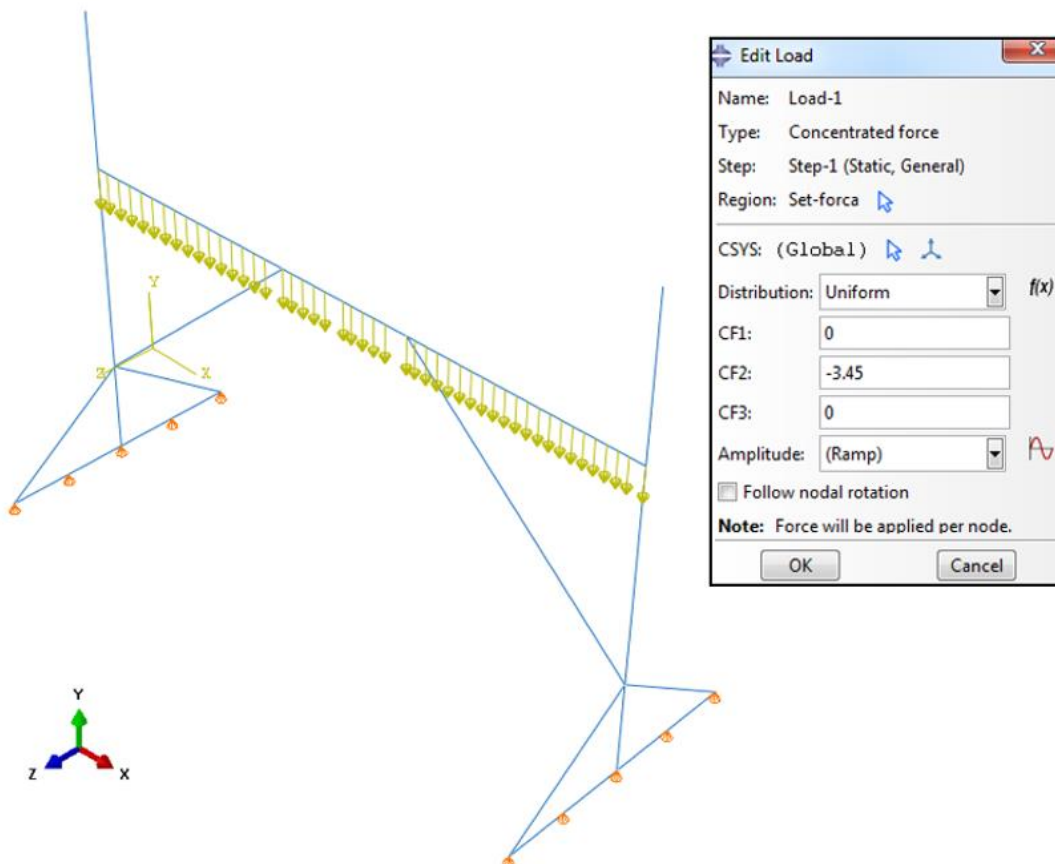
Segundo procedimento interno da empresa, a tensão máxima de von Mises não pode exceder a 85% da tensão de escoamento do material e deve utilizar um fator de segurança de 1,5 para a sobrecarga da estrutura.

A carga de trabalho estabelecida para essa estrutura foi de 400 kgf, portanto a carga de teste estabelecida será de 600 kgf. Esse carregamento foi distribuído uniformemente em 1701 nós na viga horizontal superior do modelo, representando como as ferramentas cilíndricas estão dispostas na estrutura. Desse modo, em cada nó aplicou-se o valor de 3,45 N, conforme a equação 5. O produto pela gravidade de 9,8 m/s<sup>2</sup> é necessário para que a força seja obtida com a unidade em Newton.

$$F_{nó} = \frac{F_{teste} \times 9,8}{\text{número de nós}} = \frac{600 \times 9,8}{1701} = 3,45 \text{ N} \quad (5)$$

A Figura 33 mostra como o carregamento foi aplicado no programa *Abaqus*. O valor negativo indica o sentido da força em relação ao sistema de coordenadas X, Y e Z.

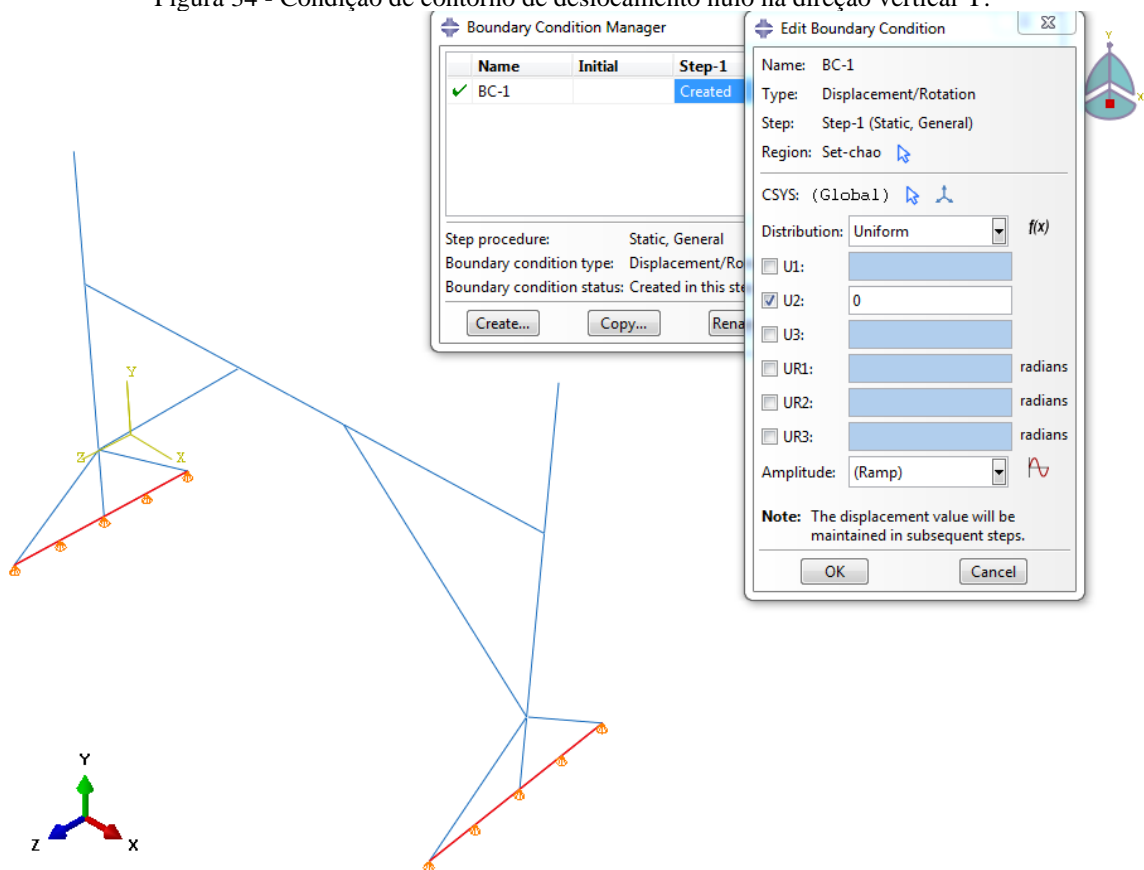
Figura 33 - Aplicação do carregamento no modelo, em Newton.



Fonte: Autorial própria.

Na superfície de contato com o chão colocou-se restrição de deslocamento na direção vertical Y do modelo, destacado na Figura 34.

Figura 34 - Condição de contorno de deslocamento nulo na direção vertical Y.



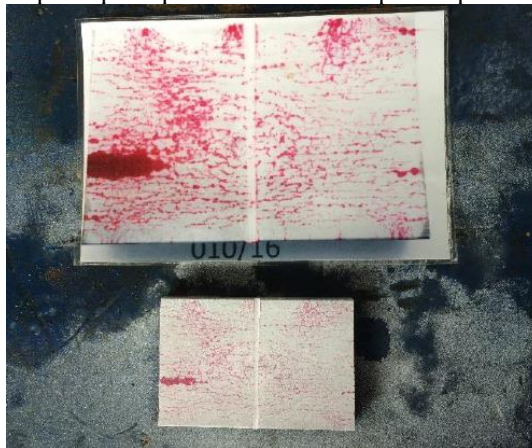
Fonte: Autorial própria.

## CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Ensaio por líquido penetrante

A Figura 35 mostra o resultado do ensaio de líquido penetrante no bloco padrão, bem como a fotografia de referência. Desta forma, garantiu-se a confiabilidade do ensaio, pois os resultados no bloco de teste estão conforme a fotografia de referência. Na Figura 36, o inspetor verificou a existência de descontinuidades nos corpos de prova, indicados pelos números 6 e 9, respectivamente, sendo reprovados e descartados para o ensaio de tração, visto que poderiam influenciar nos resultados.

Figura 35 - Resultado do ensaio por líquido penetrante no bloco padrão para teste e a fotografia de referência.



Fonte: COUTO (2019).

Figura 36 - Resultado do ensaio por líquido penetrante nos corpos de prova.

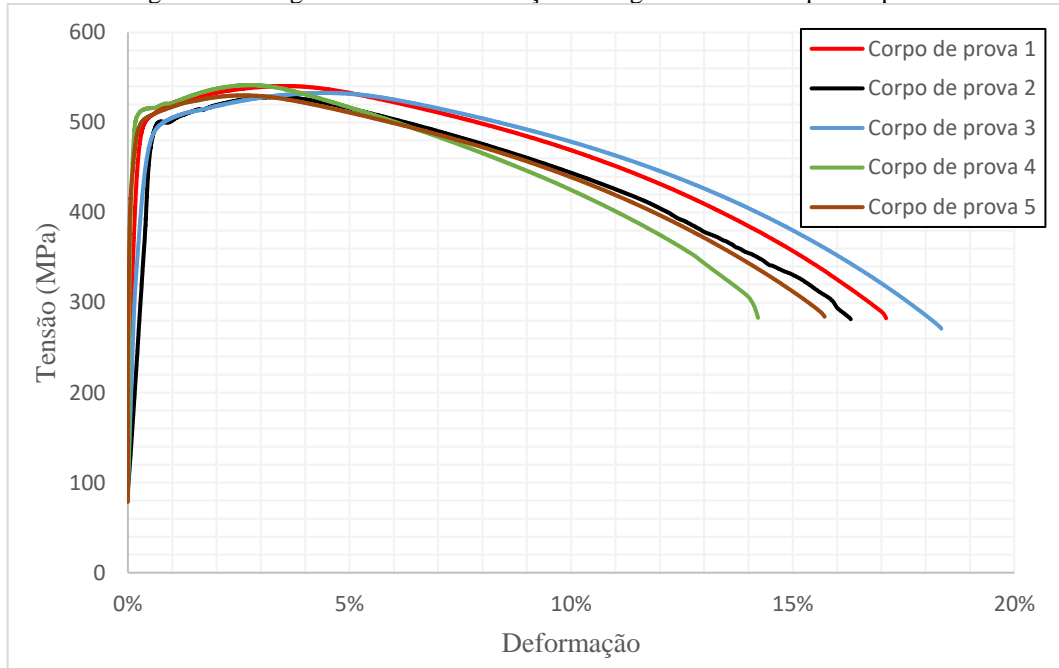


Fonte: Autoria própria.

## 4.2 Ensaio de tração

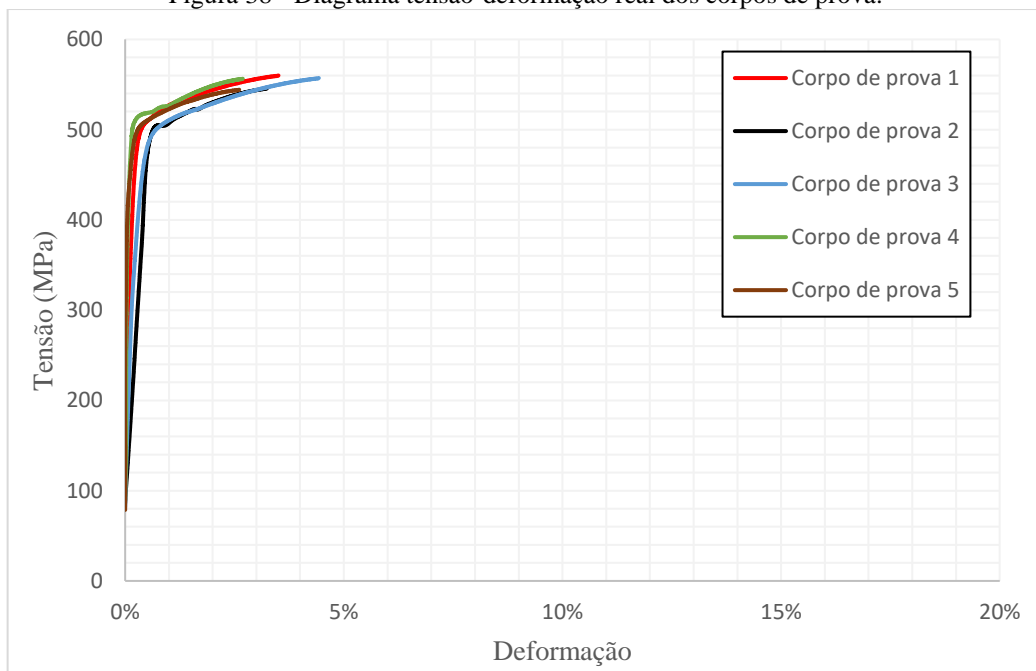
Os diagramas tensão-deformação de engenharia e tensão-deformação real concebidos pelo ensaio de tração nos corpos de prova podem ser vistos nas Figuras 37 e 38, respectivamente. Para o cálculo das tensões e deformações reais, utilizou-se as equações (6) e (7) (MARCOMINI, 2020).

Figura 37 - Diagrama tensão-deformação de engenharia dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

Figura 38 - Diagrama tensão-deformação real dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

$$\sigma_r = \sigma_c(1 + \varepsilon_c) \quad (6)$$

$$\varepsilon_r = \ln(1 + \varepsilon_c) \quad (7)$$

Os resultados obtidos pelo diagrama tensão-deformação de engenharia estão descritos na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 - Análise do diagrama tensão-deformação de engenharia.

**Análise do diagrama tensão-deformação de engenharia**

<b>Amostras</b>	<b>Limite de resistência à tração (MPa)</b>	<b>Tensão de escoamento (MPa)</b>	<b>Tensão de ruptura (MPa)</b>	<b>Deformação final (%)</b>
Corpo de prova 1	540,6	494,1	282,5	17,1
Corpo de prova 2	528,3	503,1	281,5	16,3
Corpo de prova 3	533,0	485,9	271,0	18,3
Corpo de prova 4	541,6	507,5	283,0	14,2
Corpo de prova 5	530,2	497,9	284,2	15,7
<b>Média</b>	534,7	497,7	280,4	16,3

Fonte: Autoria própria.

Em um primeiro instante, é válido destacar que a ruptura ocorreu na parte útil de cada corpo de prova, conforme era esperado, gerando bons resultados para este estudo (Figura 37).

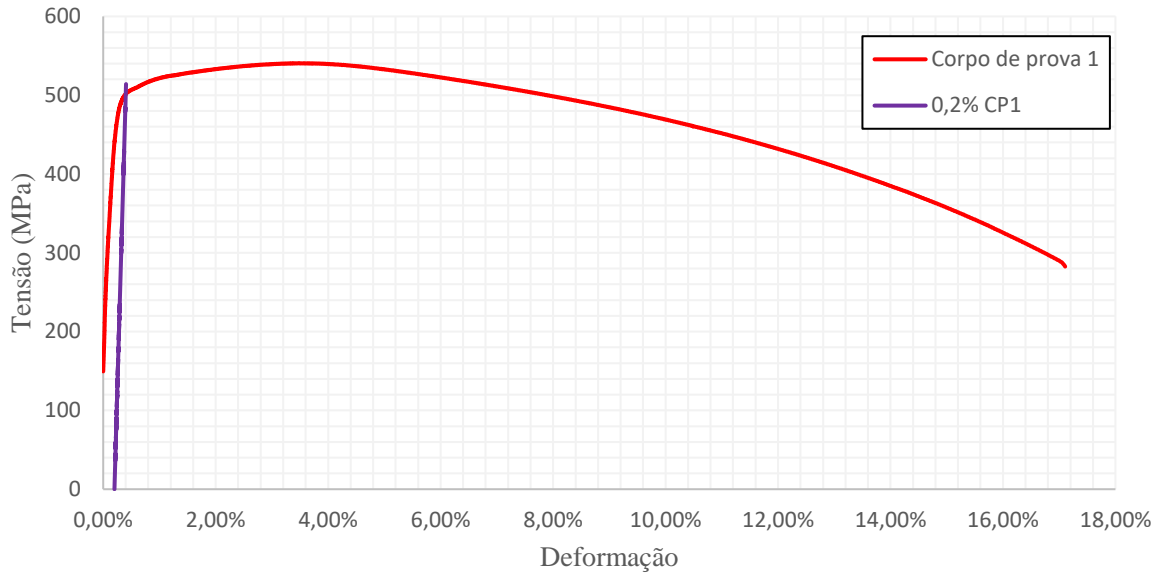
Considerou-se a média dos resultados obtidos para as propriedades mecânicas. Para o LRT e a tensão de ruptura, as médias obtidas foram de, respectivamente, 534,7 MPa e 280,4 MPa. A variação entre o maior valor e o menor valor obtido para o LRT foi cerca de 2,5% e, para a tensão de ruptura, a variação obtida foi de aproximadamente 5%. Outro fator importante é a comparação com o diagrama tensão-deformação real, cujo LRT foi de 552,7 MPa e uma variação de 3,5% em relação ao diagrama tensão-deformação de engenharia, fato que também indica um bom resultado.

No caso da tensão de escoamento, por convenção, utiliza-se uma reta paralela à 0,2% (representada pela cor roxa) em relação à parte elástica da curva para obter um valor razoável para este parâmetro. O ponto de interseção entre a reta e a curva no diagrama é considerado a tensão de escoamento da amostra. Também foi considerada a média dos valores obtidos de cada ensaio para tomar como referência a tensão de escoamento do material. Neste caso, a média foi



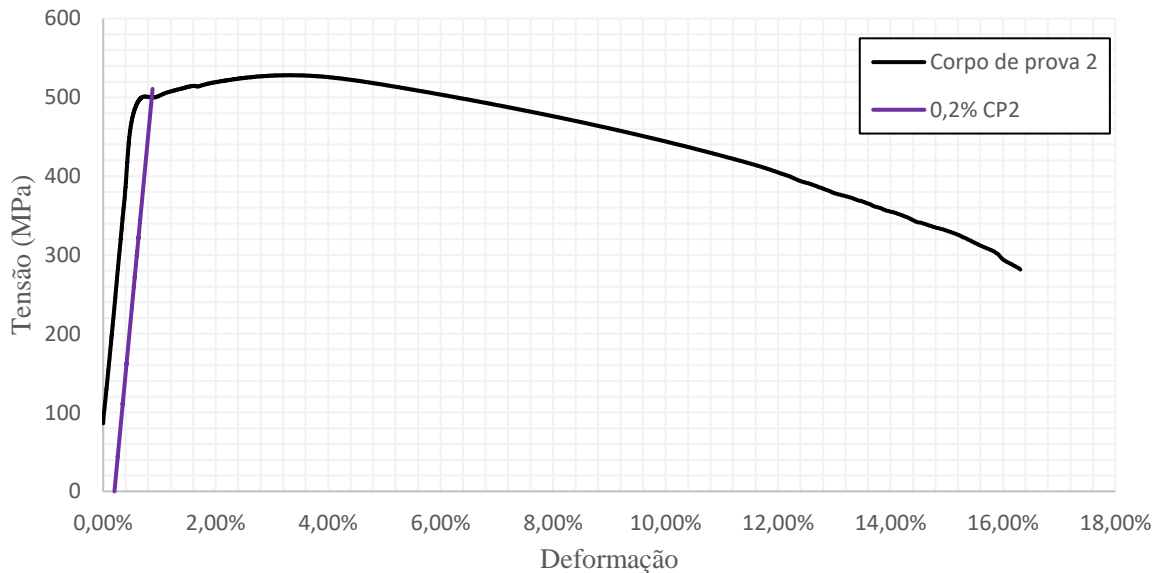
de 497,7 MPa com uma variação de aproximadamente 4,5% entre o maior e menor valor obtido. As Figuras 39, 40, 41, 42 e 43 mostram os pontos de interseção entre as curvas e as retas traçadas no diagrama tensão-deformação de engenharia.

Figura 39 - Interseção entre os gráficos para determinar a tensão de escoamento do corpo de prova 1.



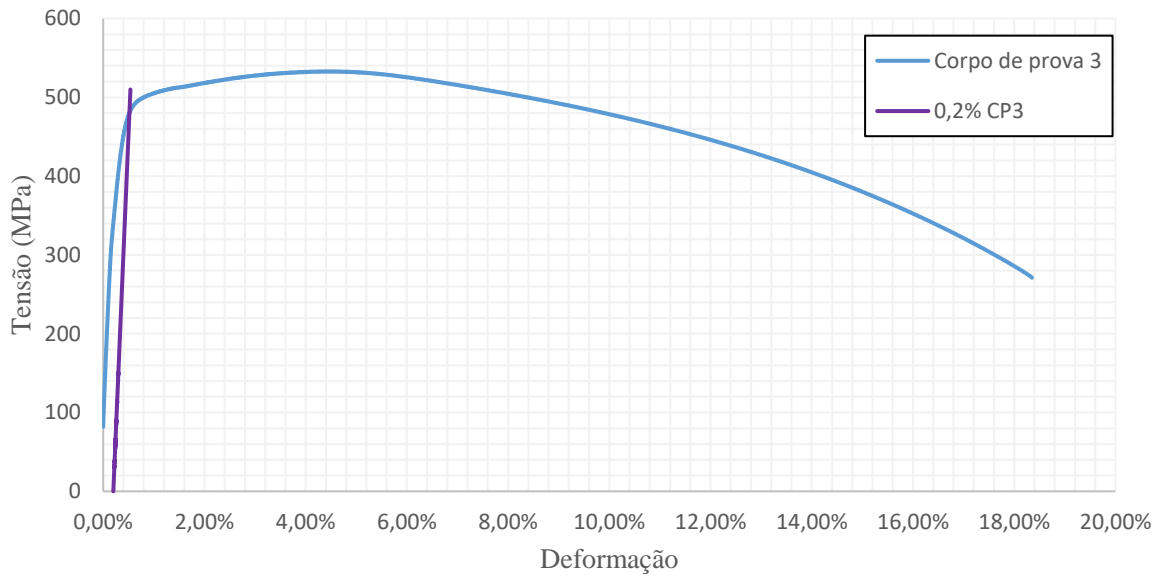
Fonte: Autoria própria.

Figura 40 - Interseção entre os gráficos para determinar a tensão de escoamento do corpo de prova 2.



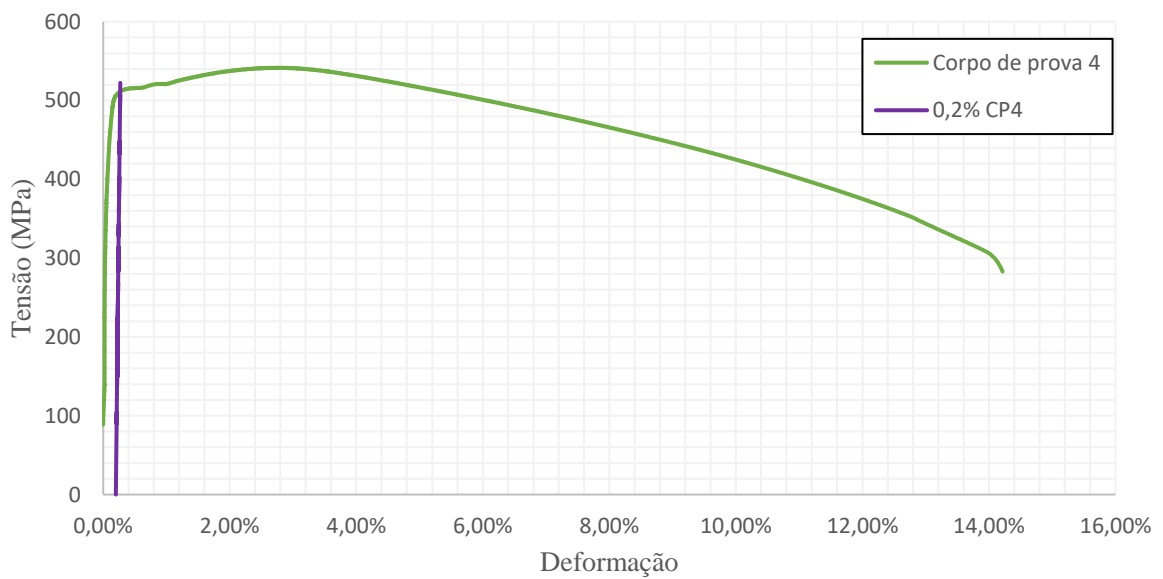
Fonte: Autoria própria.

Figura 41 - Interseção entre os gráficos para determinar a tensão de escoamento do corpo de prova 3.



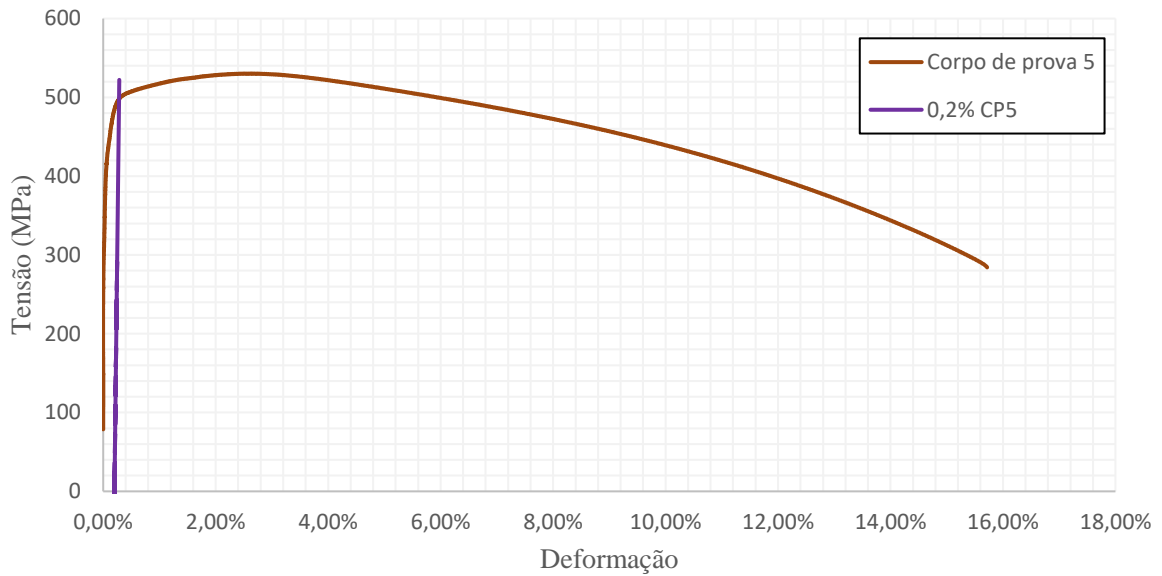
Fonte: Autoria própria.

Figura 42 - Interseção entre os gráficos para determinar a tensão de escoamento do corpo de prova 4.



Fonte: Autoria própria.

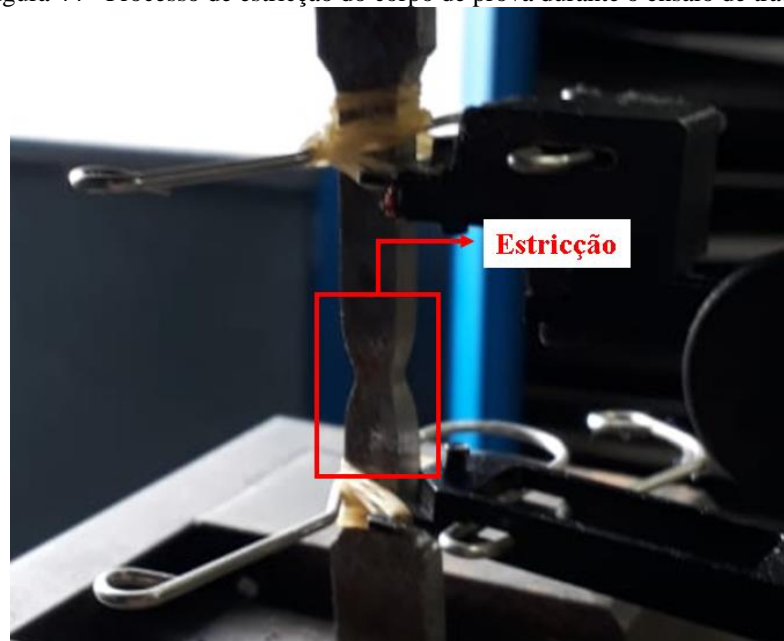
Figura 43 - Interseção entre os gráficos para determinar a tensão de escoamento do corpo de prova 5.



Fonte: Autoria própria.

Pode-se dizer que o material se comporta de forma dúctil, visto que a média das deformações finais foi de 16,3%. A grande variação nos resultados obtidos, cerca de 29%, pode ser justificada pelo fato dos corpos de prova serem usinados em diferentes partes da viga, em que determinadas regiões poderiam estar encruadas devido ao carregamento e descarregamento constante da estrutura, tornando o material mais frágil e, conseqüentemente, provocando uma menor deformação. Este fato pôde ser observado durante o ensaio de tração, no qual o corpo de prova sofre o fenômeno de estricção ou empescoçamento (Figura 44) até o momento da fratura.

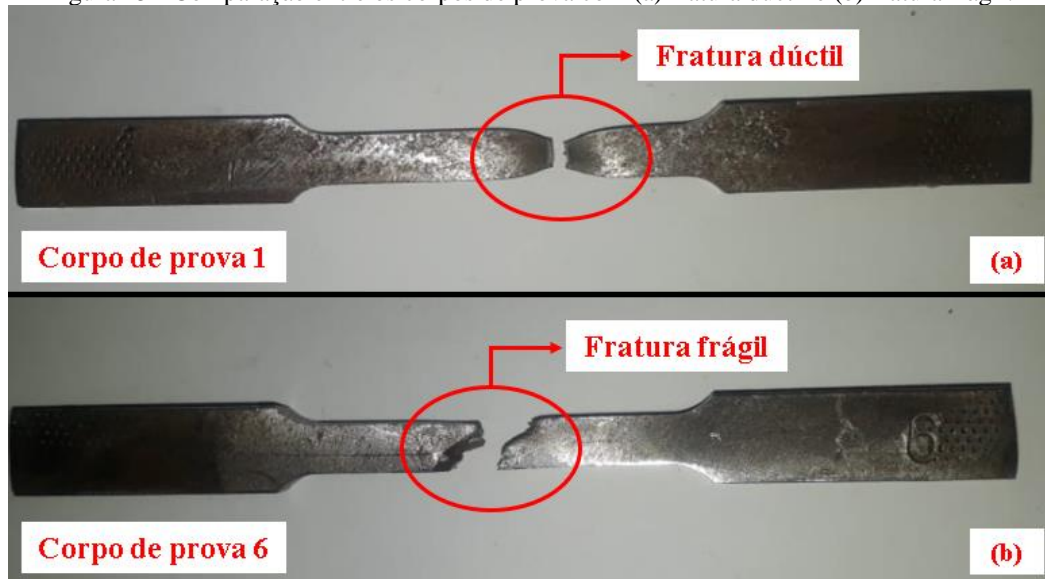
Figura 44 - Processo de estricção do corpo de prova durante o ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria.

O tipo de fratura também é um indicio de quão dúctil é um material. Como já era esperado, o corpo de prova 6 teve uma fratura frágil devido à descontinuidade relatada pelo ensaio por líquido penetrante, podendo atuar como concentrador de tensão e, conseqüentemente, reduzindo sua capacidade de suportar uma carga sob tração. Uma comparação entre os tipos de fratura dos corpos de prova 1 e 6 pode ser vista na Figura 45.

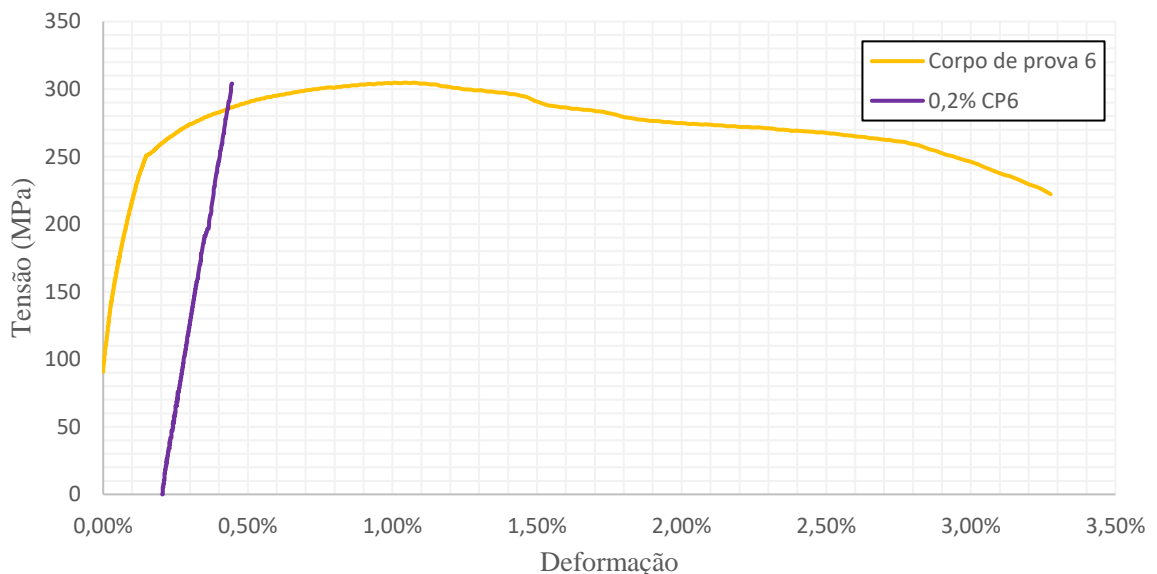
Figura 45 - Comparação entre os corpos de prova com (a) fratura dúctil e (b) fratura frágil.



Fonte: Autoria própria.

O diagrama tensão-deformação de engenharia referente ao corpo de prova 6 e o ponto de interseção para determinar a tensão de escoamento pode ser visto na Figura 46.

Figura 46 - Interseção entre os gráficos para determinar a tensão de escoamento do corpo de prova 6.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - Análise do diagrama tensão-deformação de engenharia do corpo de prova 6.

<b>Análise do diagrama tensão-deformação de engenharia</b>				
<b>Amostra</b>	<b>Limite de resistência à tração (MPa)</b>	<b>Tensão de escoamento (MPa)</b>	<b>Tensão de ruptura (MPa)</b>	<b>Deformação (%)</b>
Corpo de prova 6	304,8	283,0	222,2	3,3

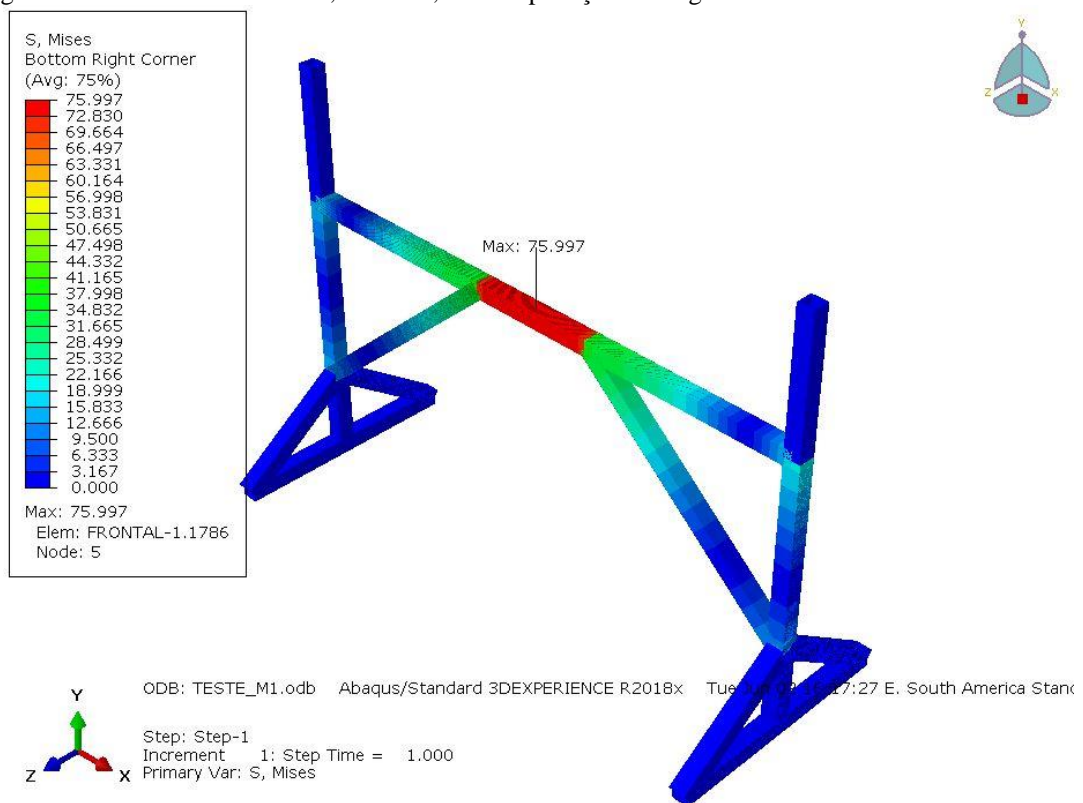
Fonte: Autoria própria.

Nota-se que os dados obtidos na Tabela 8 foram muito inferiores em relação aos outros corpos de prova. O LRT e a tensão de escoamento tiveram uma redução de aproximadamente 76% em relação à média da Tabela 7. Já a tensão de ruptura teve uma redução de 26%, enquanto a deformação foi de quase 400%. Este último ressalta a importância do estado dos corpos de prova ao serem submetidos ao ensaio de tração, pois qualquer defeito tem influência direta nos resultados obtidos.

### 4.3 Simulação numérica

Nesta análise do modelo, constatou-se que a tensão máxima de von Mises, devido à aplicação da carga de teste de 600 kgf, foi de 76,0 MPa (Figura 47), que corresponde a aproximadamente 15% da tensão de escoamento utilizada como referência, atendendo aos critérios da empresa. Com isso, a estrutura pôde ser encaminhada para o teste de carga para que os resultados encontrados fossem avaliados e o modelo numérico fosse validado.

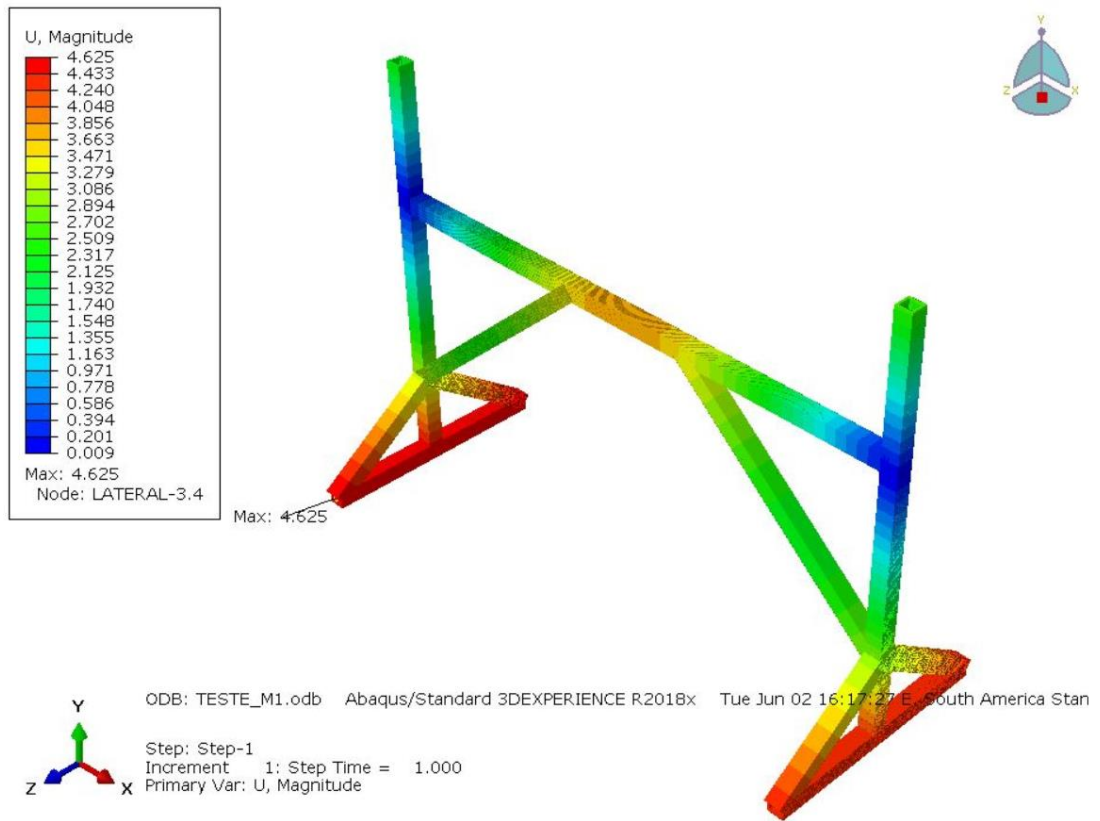
Figura 47 - Tensão de von Mises, em MPa, com a aplicação da carga de teste uniformemente distribuída.



Fonte: Autoria própria.

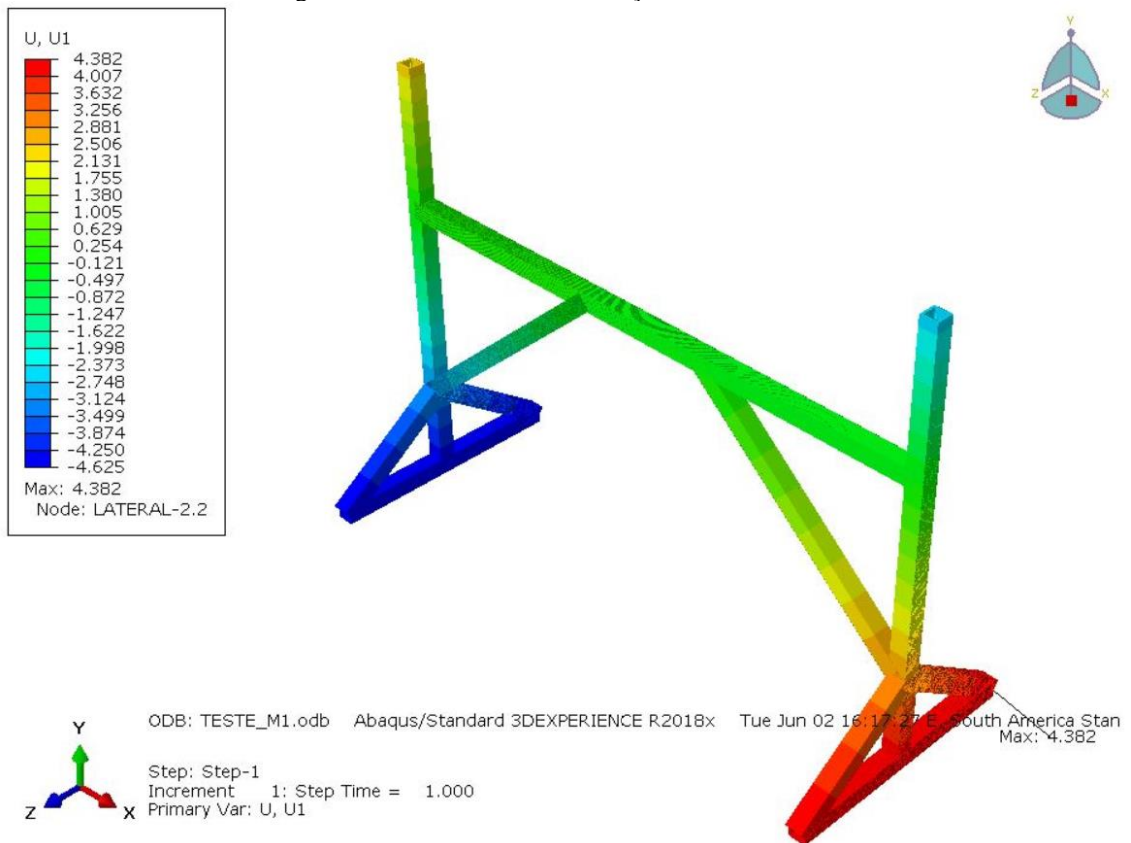
Ainda do ponto de vista das tensões, observa-se que o ponto mais crítico está localizado no meio da viga, devido à geometria do modelo, como já era esperado. Visto que as tensões estão dentro do limite estabelecido, as deformações decorrentes da sobrecarga não foram permanentes. Na Figura 48 pode-se observar os deslocamentos em toda a estrutura e vê-se que os maiores deslocamentos estão na base do modelo, já que essa parte tende a abrir em consequência do carregamento. Isso é melhor demonstrado na Figura 49.

Figura 48 - Deslocamento, em milímetro, com a aplicação da carga de teste uniformemente distribuída.



Fonte: Autoria própria.

Figura 49 - Deslocamento na direção X, em milímetro.



Fonte: Autoria própria.

#### **4.4 Teste de carga e inspeção visual**

A empresa responsável pelo teste de carga certificou-se que a estrutura foi examinada e testada conforme os métodos já descritos anteriormente, estando liberada para o uso ao qual se destina. Também se realizou uma inspeção visual no que se refere à integridade física dos componentes e não foi detectada nenhuma irregularidade provocada pela sobrecarga, principalmente deformações plásticas.

#### **4.5 Ensaio por partículas magnéticas**

Conforme laudo feito por um inspetor qualificado, não houve descontinuidades provenientes do teste de carga nas juntas soldadas de toda a estrutura.



## CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusão

Com base no estudo dos resultados experimentais e da análise numérica, pode-se estabelecer que:

- 1) O ensaio por líquido penetrante se mostrou eficiente na detecção das descontinuidades superficiais dos corpos de prova para ensaio de tração, sendo confirmadas em duas unidades como trincas e corrosões e, posteriormente, descartadas, conforme inspetor qualificado.
- 2) Através do ensaio de tração foi possível determinar a tensão de escoamento do material, além de outras propriedades mecânicas relevantes para este estudo. No caso, considerou-se a média dos resultados obtidos de cada corpo de prova:
  - i. Limite de resistência à tração – 534,7 MPa
  - ii. Tensão de escoamento – 497,7 MPa
  - iii. Tensão de ruptura – 280,4 MPa
  - iv. Deformação – 16,3%

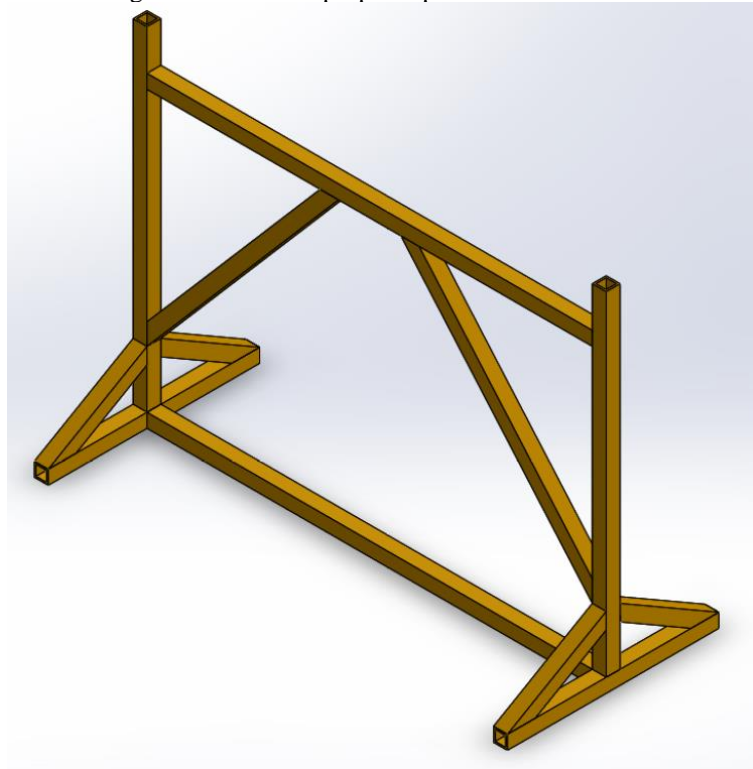
Também foi possível constatar que a presença de descontinuidades nas amostras (corpo de prova 6) para ensaio de tração permitiu que atuassem como concentradores de tensão, reduzindo drasticamente sua capacidade de deformação, cerca de 400%. Quanto à capacidade de resistir à tração, houve uma redução de aproximadamente 75% nas propriedades mecânicas do material.

- 3) A simulação feita no modelo se deu satisfatória, visto que a tensão resultante obtida foi de aproximadamente 76,0 MPa, levando-se em consideração que a tensão máxima de von Mises não deve exceder 85% da tensão de escoamento de referência do material, estabelecido por procedimentos interno da empresa proprietária da estrutura.
- 4) O teste de carga realizado no modelo foi aprovado, pois não houve deformações plásticas e nenhuma descontinuidade foi detectada pelas inspeções visuais e por partículas magnéticas nas juntas soldadas devido à sobrecarga da estrutura.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Propõe-se uma mudança na geometria da estrutura para suportar mais carga, conforme a Figura 50. Para isso, o novo modelo proposto deve ser submetido a uma análise com os mesmos parâmetros. Também é sugerido um estudo mais completo do material a ser utilizado na fabricação, que leve em conta todo o controle de qualidade de todo o processo até a certificação do modelo. O estudo da fadiga também é relevante para prever quando irá ocorrer a falha do modelo, visto que o carregamento e descarregamento da estrutura são constantes ao longo de sua vida útil.

Figura 50 - Modelo proposto para trabalhos futuros.



Fonte: Autoria própria.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREUCCI, Ricardo. **Líquidos Penetrantes**. 2019. Disponível em: <[http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/biblioteca/apostila\\_lp\\_2019.pdf](http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/biblioteca/apostila_lp_2019.pdf)>. Acessado em: 14 jul. 2020.

ANDREUCCI, Ricardo. **Partículas Magnéticas**. 2018. Disponível em: <[http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/biblioteca/apostila\\_pm\\_18.pdf](http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/biblioteca/apostila_pm_18.pdf)>. Acessado em: 14 jul. 2020.

ASKELAND, Donald R.; FULAY, Pradeep P.; WRIGHT, Wendelin J.. *The Science and Engineering of Materials*. 6. ed. Stamford: Cengage Learning, 2010.

ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE (Estados Unidos). *Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys*. 10. ed.: Asm International, 1990. 1618 p. (*ASM Handbook*).

ASTM E8/E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2010.

ATKINS, Peter; PAULA, Julio de. *Physical Chemistry*. 9. ed. New York: W.h. Freeman, 2010.

AWS COMMITTEE ON METHODS OF INSPECTION. *Welding Inspection Handbook*. 3. ed. Miami: American Welding Society, 2000. 244 p.

BARBOSA, Carlos Roberto Hall. **Ensaio não-destrutivo em estruturas metálicas utilizando o magnetômetro supercondutor squid e técnicas de inteligência computacional**. 1999. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil.

BLAGA, E., COTFAS, P. A., COTFAS, D. T., Balint, M.. 2012. *Tensile testing machine based on virtual instrumentation*. 2012 9th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation.

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

CABEZAS, Eduardo E., CELENTANO, Diego J.. 2004. **Experimental and numerical analysis of the tensile test using sheet specimens**. Finite Elements in Analysis and Design.

CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G.. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 9. ed.: Wiley, 2014. 960 p.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas**. 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986. 112 p.

COUTO, Kevin Rodrigues. Análise da influência da variação do aporte térmico na soldagem de chapas de aço inoxidável austenítico AISI316 pelo processo GTAW CC utilizando ERNICKRMO-3 como metal de adição. 2019. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé.

DASSAULT SYSTÈMES CORP.. *Abaqus Unified FEA*. 2020. Disponível em: <<https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>>. Acessado em: 20 out. 2020.

DASSAULT SYSTÈMES SOLIDWORKS CORP.. *Introducing Solidworks*. 2015. Disponível em: <[https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS\\_Introduction\\_EN.pdf](https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_EN.pdf)>. Acessado em: 20 out. 2020.

DAVIS, J.R.. *Tensile Testing*. 2. ed. Ohio: ASM International, 2004. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=5uRIb3emLY8C&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=5uRIb3emLY8C&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)>. Acessado em: 28 jul. 2020.

DE ANDRADE, Lucas Astrad Lira; DANTAS, Marcello Araújo. Avaliação de descontinuidades superficiais pelo método de líquidos penetrantes em aço SAE 1020 soldado por processo SMAW. 2018

DE OLIVEIRA, Marcio Jardim, **Indicação de descontinuidades em materiais metálicos e compósitos: uma comparação entre métodos não destrutivos**. 2014. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Brasil.

FARIAS, Stefane; DE ARAUJO, Thais; PASSOS, Anderson. 2017. *No destructive liquid penetrant testing*.

FONSECA, Jun. **Ferramentas de Simulação em Mecânica: Elementos Finitos**. 2002. Disponível em: <  
[https://www.academia.edu/40078487/Ferramentas\\_de\\_Simula%C3%A7%C3%A3o\\_em\\_Mec%C3%A2nica\\_Elementos\\_Finitos](https://www.academia.edu/40078487/Ferramentas_de_Simula%C3%A7%C3%A3o_em_Mec%C3%A2nica_Elementos_Finitos)>. Acessado em: 04 nov. 2020.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaaios dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012. 365 p.

GONÇALVES NETO, Luiz Maurício. Aplicação de fluido de corte em quantidades reduzidas para usinagem do aço SAE 52100 no processo de retificação *centerless* de passagem. 2013.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 637 p.

HOLDREN, R. L. et al. Welding Inspection and Nondestructive Examination. In: JENNEY, Cynthia L.; O'BRIEN, Annette (Ed.). *Welding Handbook: Welding Science and Technology*. 9. ed. Miami: American Welding Society, 2001. Cap. 14. p. 579-636.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário Estatístico 2020**. 2020. Disponível em: <  
[https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2020/06/Anuario\\_Completo\\_2020.pdf](https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2020/06/Anuario_Completo_2020.pdf)>. Acessado em: 12 nov. 2020.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Non-destructive Testing for Plant Life Assessment, Training Course Series No. 26*, IAEA, Vienna (2005).

MARCOMINI, José Benedito. *Introdução ao Ensaio Mecânico dos Materiais*. 2020. Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia

de Materiais, Aeronáutica e Automobilística. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5788655/mod\\_resource/content/1/SMM0342-%20IEMM%20-%20AULA%20%206M-%20Ensaio%20de%20Tra%C3%A7%C3%A3o.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5788655/mod_resource/content/1/SMM0342-%20IEMM%20-%20AULA%20%206M-%20Ensaio%20de%20Tra%C3%A7%C3%A3o.pdf)>. Acessado em: 06 dez. 2020.

MATWEB MATERIAL PROPERTY DATA. Disponível em: <<http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=81a26031d1b44cbb911f70ab863281f5&ckck=1>>. Acessado em: 25 out. 2020.

MIX, Paul E.. *Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide*. 2. ed. Haboken: Wiley-interscience, 2005. 681 p.

MODENESI, Paulo J.. Soldagem I: Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldadas. Belo Horizonte: Ufmg, 2001. 15 p.

O'BRIEN, Cynthia L.; Annette (Ed.). **Welding Handbook: Welding Science and Technology**. 9. ed. Miami: American Welding Society, 2001. Cap. 14. p. 579-636.

RADE, Domingos Alves. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. 2011. Disponível em: <[https://www.academia.edu/30871907/UNIVERSIDADE\\_FEDERAL\\_DE\\_UBERL%C3%82NDIA\\_FACULDADE\\_DE\\_ENGENHARIA\\_MEC%C3%82NICA\\_Programa\\_de\\_P%C3%B3s\\_Gradua%C3%A7%C3%A3o\\_em\\_Engenharia\\_Mec%C3%A2nica](https://www.academia.edu/30871907/UNIVERSIDADE_FEDERAL_DE_UBERL%C3%82NDIA_FACULDADE_DE_ENGENHARIA_MEC%C3%82NICA_Programa_de_P%C3%B3s_Gradua%C3%A7%C3%A3o_em_Engenharia_Mec%C3%A2nica)>. Acessado em: 04 nov. 2020.

ZOLIN, Ivan. **Curso técnico em automação industrial: ensaios mecânicos e análises de falhas**. 3. ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2010. 102 p.