



CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO AÇO SAE 4140
SUBMETIDO A ENSAIOS MECÂNICOS**

Ednildo Turatti

Lajeado, junho de 2017

Ednildo Turatti

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO AÇO SAE 4140
SUBMETIDO A ENSAIOS MECÂNICOS**

Monografia apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão do Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Me. Gabriel Birck

Coorientador: Dr. Marcelo André Toso

Lajeado, junho de 2017

Ednildo Turatti

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO AÇO SAE 4140
SUBMETIDO A ENSAIOS MECÂNICOS**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão do Curso II, na linha de formação específica em Engenharia Mecânica, do Centro Universitário UNIVATES, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica:

Me. Gabriel Birck – Orientador
Centro Universitário Univates

Dr. Marcelo André Toso – Coorientador
Universidade Federal de Santa Maria

Prof. _____
Centro Universitário Univates

Prof. _____
Centro Universitário Univ
ates

Lajeado, junho de 2017

À minha família, de maneira especial aos meus pais, Helio Turatti e Hortenila Turatti pelo apoio e o grande incentivo, os quais nunca mediram esforços para que eu realizasse esse sonho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter possibilitado a minha caminhada, me guiando sempre pelo caminho, e dando-me força e capacitando para seguir e enfrentar as dificuldades.

Ao professor e orientador Gabriel Birck, prontamente disposto na minha orientação, pelo apoio, confiança e amizade durante a realização deste trabalho.

Aos meus pais Helio e Hortenila, pelo incentivo, pelo exemplo de dignidade, de caráter e a toda minha família por todo apoio dado nas horas difíceis.

Ao professor coorientador Doutor Marcelo Toso, que mesmo com o afastamento da instituição se colocou à disposição quando possível.

A todos os professores do curso de Engenharia Mecânica da Univates, em especial ao professor Guilherme Cortelini pelo incentivo na realização deste trabalho.

À empresa Metalmecânica (2012) que possibilitou a realização dos ensaios em seu laboratório.

Aos meus amigos e colegas e a todas as pessoas que, de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Falhas de componentes são recorrentes em diversas áreas da indústria, portanto, a correta caracterização do material empregado na fabricação de determinado produto é importante. As falhas por fadiga, que geralmente ocorrem em componentes com carregamento cíclico, são as mais comuns. Assim, com a realização correta do ensaio de fadiga pode-se determinar o limite de resistência à fadiga dos materiais, possibilitando a avaliação dos resultados antes da fabricação de um componente por um determinado material, evitando a quebra inesperada do componente. O objetivo do trabalho é avaliar o aço SAE 4140 por ensaios mecânicos de tração, dureza e impacto em corpos de prova em condições controladas em laboratório seguindo as especificações impostas por normas. Além de realizar o ensaio de fadiga axial em um componente, um parafuso utilizado na indústria automotiva. Os ensaios foram realizados nas dependências de uma indústria da região e no laboratório da Univates. E finalmente, os resultados foram discutidos e comparados com outras referências, concluindo que as propriedades estão próximas daquelas obtidas de outras fontes.

Palavras-chave: Ensaios mecânicos. Propriedades mecânicas. Fadiga. SAE 4140.

ABSTRACT

Component failures are recurrent in many areas of industry; therefore, the correct material characterization used in the component is important. The fatigue failures, which usually occur in components with cyclic loading, are the most common. Thus, the correct performance of the fatigue test method it's possible to determine the limit of fatigue resistance of materials, allowing the evaluation of the results before manufacturing the component, preventing unexpected component fail. The work aims is evaluate the steel SAE 4140 by mechanical tests of strength, hardness and impact on specimens in controlled laboratory conditions following the specifications imposed by Brazilian Rules (NBR). In addition, axial fatigue test is performed on a component, a screw used in the automotive industry. The tests were realized in an industry of the region and in Univates's laboratory. And finally, the results were discussed and compared with other references, concluding that the properties are close to those obtained from other sources.

Keywords: Mechanical test. Mechanical properties. Fatigue. SAE 4140.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama S-N ou Curva de Wohler (resistência à fadiga x vida esperada)	30
Figura 2 – Estrias de fadiga na superfície da ruptura de uma liga de alumínio	33
Figura 3 – Representação esquemática da superfície de fratura de um aço	34
Figura 4 – Superfície do material após ruptura	34
Figura 5 – Tensões cíclicas alternadas, repetidas e pulsantes	35
Figura 6 – Diagrama S-N	37
Figura 7 – Diagrama ϵ -N	38
Figura 8 – Tensão x tempo	39
Figura 9 – Diagrama S-N	40
Figura 10 – Curvas S-N ou curvas de Wohler	42
Figura 11 – Representação esquemática das superfícies de fratura de fadiga.....	48
Figura 12 – Esquema de uma máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa.....	52
Figura 13 – Curva tensão x deformação	53
Figura 14 – Máquina de ensaio <i>Charpy</i>	56
Figura 15 – Fluxograma representando a metodologia utilizada no trabalho	58
Figura 16 – Representação do corpo de prova	60
Figura 17 – Modelo do corpo de prova para ensaio de impacto.....	60
Figura 18 – Máquina universal de ensaios mecânicos.....	61
Figura 19 – Extensômetro	62
Figura 20 – Máquina para ensaio de fadiga	63
Figura 21 – Máquina de <i>Charpy</i>	64
Figura 22 – Microscópio manual.....	65
Figura 23 – Barras de aço SAE 4140.....	67
Figura 24 – Prensa hidráulica para corte	68

Figura 25 – Usinagem dos corpos de prova de tração.....	69
Figura 26 – Corpos de prova para ensaio de tração	70
Figura 27 – Fresadora.....	71
Figura 28 – Brochadeira.....	72
Figura 29 – Corpo de prova para ensaio de <i>Charpy</i>	73
Figura 30 – Parafuso M8 utilizado no ensaio de fadiga.....	74
Figura 31 – Geometria do parafuso.....	74
Figura 32 – Durômetro	76
Figura 33 – Amostra ensaiada no durômetro	77
Figura 34 – Máquina de ensaio de fadiga (corpo de prova acoplado com extensômetro)	78
Figura 35 – Falha por fadiga no parafuso de aço 4140.....	89
Figura 36 – Fotografia obtida por microscópico manual.....	90

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Gráfico tensão x deformação para o aço 4140 (amostra 1).....	79
Gráfico 2 – Gráfico tensão x deformação para o aço 4140 (todas amostras)	80
Gráfico 3 – Linha de tendência para Módulo de Elasticidade amostra 3.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fator de acabamento superficial	44
Tabela 2 – Fator devido ao tamanho de peças cilíndricas	44
Tabela 3 – Fator de carregamento devido à diferentes ensaios.....	45
Tabela 4 – Fator de temperatura variando com faixas de temperatura	45
Tabela 5 – Fatores de confiabilidade correspondente a 8% de padrão de resistência à fadiga	46
Tabela 6 – Composição química do aço SAE 4140	59
Tabela 7 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de impacto.....	73
Tabela 8 – Dimensões do parafuso.....	75
Tabela 9 – Valores médios de dureza de núcleo	77
Tabela 10 – Valores de resistência à tração e de escoamento para o aço 4140.	79
Tabela 11 – Alongamento para o aço 4140	81
Tabela 12 – Estrição para o aço ASTM 4140.....	82
Tabela 13 – Valores dos Módulos de Elasticidade para as quatro amostras	83
Tabela 14 – Resultados do ensaio de impacto do aço SAE 4140.....	84
Tabela 15 – Resultados <i>staircase</i> para o aço 4140	85
Tabela 16 – Resultados para 50% de probabilidade para que o componente sobreviva à carga dinâmica	87
Tabela 17 – Distribuição da constante “t” <i>student</i>	88
Tabela 18 – Resultados para 99% de probabilidade para que o componente sobreviva a carga dinâmica	88
Tabela 19 – Resultados gerais para o aço 4140.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DIN	<i>Deutsch Institut für Norming</i>
FAC	Fadiga de Alto Ciclo
FBC	Fadiga de Baixo Ciclo
HR	Dureza Rockwell
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
logS-logN	Log de tensão por log de número de ciclos
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação
RPM	Rotações por minuto
SAE	<i>Society os Automotive Engineers</i>
S-log	Log de tensão
S-N	Tensão por número de ciclos
S-N-P	Tensão x número de ciclos x probabilidade

LISTA DE SIGLAS

%	Por cento
Af	Área final
Ai	Área inicial
Al	Alumínio
atm	Atmosfera
C	Carbono
Cr	Cromo
Cu	Cobre
d	Diâmetro
E	Módulo de Elasticidade
g	Gramas
GPa	Giga Pascal
HRc	Rockwell
Hz	Hertz

J	Joules
Ka	Fator de Modificação da Superfície
Kb	Fator de Tamanho
Kc	Fator de Carregamento
Kd	Fator de Temperatura
Ke	Fator de Confiabilidade
Kf	Fator de modificação Efeitos Variados
Kg	Quilograma
KN	Quilo Newton
Lf	Comprimento Final
Li	Comprimento Inicial
mm	Milímetros
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
MPa	Mega Pascal
N	Número de Ciclos
Ni	Níquel
°C	Graus celsius
P	Fósforo
R	Razão
S	Enxofre

S'_e	Limite de Resistência à Fadiga Corrigido
S_e	Limite de Resistência à Fadiga
S_{ut}	Limite de Resistência a Tração
T	Temperatura
$\Delta\sigma$	Varição de Tensão
ε	Deformação Específica
$\varepsilon-N$	Deformação por número de ciclos
λ	Alongamento
σ	Tensão de Engenharia
σ_a	Tensão Alternada
σ_m	Tensão Média
σ_{max}	Tensão Máxima
σ_{min}	Tensão Mínima
σ_o	Tensão no Corpo de Prova com Entalhe
φ	Estricção

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Justificativa do trabalho e relevância do trabalho	18
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivos específicos.....	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 Revisão bibliográfica	20
2.2 Fadiga.....	29
2.3 Mecanismos da falha por fadiga	31
2.3.1 Início da trinca	31
2.3.2 Propagação da trinca.....	32
2.3.3 Fratura	33
2.4 Carregamento cíclico	34
2.5 Métodos de previsão de vida em fadiga.....	36
2.5.1 Abordagem tensão-vida.....	37
2.5.2 Abordagem deformação-vida.....	38
2.5.3 Abordagem da mecânica da fratura.....	39
2.6 Resistência à fadiga e limite de resistência a fadiga	39
2.7 Método S-N	41
2.8 Fatores modificadores	42
2.8.1 Fatores modificadores das curvas S-N	43
2.9 Ductibilidade e fragilidade.....	46
2.10 Concentradores de tensão e entalhes.....	47
2.11 Ensaio de fadiga.....	48
2.11.1 Tipos de ensaios	49
2.11.1.1 Ensaio de fadiga axial	49
2.11.1.2 Ensaio de torção.....	50
2.11.1.3 Ensaio de flexão rotativa	51
2.12 Ensaio de tração.....	52
2.13 Ensaio de dureza	55
2.14 Ensaio de impacto (<i>charpy</i>).....	55
3 METODOLOGIA	57
3.1 Fluxograma	57

3.2 Materiais.....	59
3.3 Métodos.....	59
3.3.1 Corpos de prova.....	59
3.3.2 Ensaio de dureza.....	61
3.3.3 Ensaio de tração.....	61
3.3.4 Ensaio de resistência à fadiga	62
3.3.5 Ensaio de impacto (<i>Charpy</i>).....	63
3.3.6 Análise das superfícies de fratura	64
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1 Elaboração dos corpos de prova.....	66
4.2 Ensaio de dureza.....	75
4.3 Ensaio de tração.....	78
4.3.1 Alongamento	81
4.3.2 Estricção	81
4.3.3 Módulo de elasticidade.....	82
4.4 Ensaio de impacto (<i>charpy</i>).....	84
4.5 Ensaio de resistência à fadiga	84
4.6 Análise de fratura	90
4.7 Resumo dos resultados.....	91
5 CONCLUSÃO	92
REFERÊNCIAS.....	93

1 INTRODUÇÃO

A solução para os problemas relacionados com a fadiga vem sendo investigada há muito tempo. Esses problemas sofrem um agravante devido à exigência do mercado por componentes com maior desempenho. A disputa por melhores preços, redução de custos e desperdícios, são de grande importância para que a indústria se mantenha competitiva diante um alto nível de exigência do mercado.

Segundo Dowling (1999), a maior parte dos componentes mecânicos contidos em estruturas, veículos e máquinas, geralmente sofre carregamentos cíclicos. Esses carregamentos podem ocasionar trincas microscópicas que podem se tornar macroscópicas, podendo levar à quebra do componente. A este processo dá-se o nome de fadiga.

Uma das principais causas de falhas em metais é a fadiga, representando cerca de 90% dos casos (CALLISTER JR., 2002). Segundo o relatório do Departamento de Comércio Norte Americano, cerca de 4% do PIB dos Estados Unidos é gasto com falhas ou fraturas em componentes utilizados em máquinas e estruturas mecânicas (NORTON, 2013).

O desgaste prematuro ou a ocorrência de falhas decorrentes das solicitações empregadas em componentes mecânicos de máquinas e estruturas, levaram à pesquisa do fenômeno fadiga, através dos ensaios mecânicos com carregamento cíclico, a fim de prever e prevenir essas falhas mecânicas ocasionadas, muitas vezes, pela escolha equivocada de um material com nível de resistência menor do que a solicitação imposta.

Para conduzir de maneira adequada os ensaios, deve ser realizada a caracterização do material, análise da composição química, condições de fabricação, local onde será empregado e quais solicitações atuam no componente. Dimensões de corpos de prova e outros fatores, inclusive a temperatura em que será realizado o ensaio, influenciam de maneira direta nos resultados obtidos. É necessário conhecimento do funcionamento do equipamento utilizado e a utilização de normas adequadas para cada ensaio. Assim, diversos fatores e especificações são necessários para obter resultados coerentes e satisfatórios, seguindo de maneira correta todas as especificações impostas nos ensaios.

A escolha de um material ideal pela indústria deve ser baseada em ensaios mecânicos, analisando-se as condições a que o mesmo será submetido. A análise de fadiga em componentes de alta resistência representa um dos testes mais importantes a serem delineados para a avaliação da qualidade do material. Por conseguinte, o presente trabalho tem por objetivo executar os ensaios mecânicos de tração, impacto, dureza e fadiga em condições controladas em laboratório, seguindo as especificações impostas pela Norma Brasileira (NBR) e, como consequência, obter a vida em fadiga do aço SAE 4140 utilizada na fabricação de parafusos e a caracterização do material.

1.1 Justificativa do trabalho e relevância do trabalho

As falhas decorrentes da fadiga em materiais constituem um custo muito elevado e significativo para as indústrias, principalmente a automobilística. Aços de alta resistência são utilizados em diversos componentes. Além do custo envolvido e do desperdício de materiais, pode-se envolver vidas humanas. A utilização de materiais inadequados para suportar solicitações maiores que o seu limite de resistência à fadiga acarreta a fratura repentina do componente. Quando se objetiva a relação custo x benefício, a escolha do material apropriado deve ser fundamentada em ensaios mecânicos, considerando as condições a que o material será submetido. A precisão dos testes necessita, além de uma boa calibração do equipamento, o conhecimento dos ensaios e o manuseio adequado do equipamento, para que os

testes apresentem resultados concretos quanto à vida em fadiga dos componentes, evitando consequências mais graves.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo geral executar os ensaios mecânicos propostos em condições controladas em laboratório, seguindo as especificações impostas pelas normas e, como consequência, obter os resultados dos ensaios para a caracterização do aço SAE 4140 e da vida em fadiga de um componente fabricado com esse material.

1.2.1 Objetivos específicos

- a) Elaborar uma revisão bibliográfica do tema em estudo abrangendo os conceitos básicos da teoria de falha por fadiga;
- b) Apresentar dados como composição química do aço SAE 4140 para obter maior conhecimento do material utilizado;
- c) Confeccionar corpos de prova seguindo padrões pré-determinados, de acordo com as solicitações dos equipamentos a serem utilizados para os ensaios;
- d) Realizar ensaios mecânicos de tração, impacto e dureza. Determinar os parâmetros do material a partir desses ensaios;
- e) Apresentar os procedimentos para o ensaio de vida em fadiga de um componente e obter a resistência da vida em fadiga desse componente;
- f) Analisar a superfície da fratura de forma visual a apresentar e identificar os três estágios da trinca presente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, uma breve revisão bibliográfica sobre o tema é apresentada, de maneira a enquadrar o leitor a respeito dos temas abordados no decorrer da leitura deste trabalho. Se apresentam os principais conceitos relacionados ao tema em estudo. Após, se expõem os conceitos e teorias relacionadas à fadiga e resistência dos materiais, assim possibilitando fundamentação teórica para a produção do presente trabalho.

2.1 Revisão bibliográfica

Griza (2000) analisou a interferência do torque na vida em fadiga de juntas parafusadas de duas classes de matérias fixadas, o aço e o alumínio, estando submetidos à carregamentos cíclicos. Usando parafusos ISO M6X1, classe 8.8 comercial, realizou ensaios estáticos de tração, dureza, análise microestrutural e análises químicas. Subsequentes aos ensaios de fadiga foram executados testes de torque. As curvas de Wohler, onde relaciona-se a tensão e o número de ciclos para a falha, foram geradas. Com os resultados de ruptura por torção e deformação pelo aperto dos ensaios de fadiga, o autor concluiu que elevados valores de torque ocasionam uma vida em fadiga mais longa de uma união, não dependendo do material fixo. Observou que, trabalhando dentro do regime elástico, conhecendo a solicitação em que será exposto e a natureza dos materiais fixados, consegue-se dimensionar um parafuso.

Puff (2002) demonstrou a influência que ocorre na resistência à fadiga em um aço SAE 1075 utilizado em molas planas com diferentes graus de acabamento e com dois processos de cortes distintos. Ensaiou 205 corpos de prova, tendo um tempo médio de 48 horas e, no máximo, de 186 horas, chegando ao máximo de 20 milhões de ciclos sem ruptura. Esses corpos de prova foram polidos, tamboreados, jateados ou simplesmente cortados. Além disso, passaram por dois diferentes processos de corte: a laser e por eletroerosão a fio. Uma máquina flexo rotativa alternada gerou os dados para curva S-N nas diferentes condições. Averiguou-se qual condição testada oferece melhor vantagem para alta performance e confiabilidade. O processo *shot peening*, um processo de trabalho a frio, sendo que as esferas de aço, cerâmica ou vidro projetadas na superfície com alta velocidade no material e o corte a laser, apresentaram melhores resultados quando comparados às outras condições. O autor sugere que, para obtenção de dados mais consistentes para vida infinita do material, deve-se executar mais ensaios de resistência à fadiga.

Alvarenga Júnior, Mansur e Palma (2002), obtiveram curvas S-N do aço SAE 8620 com ensaios refrigerados e não refrigerados através de uma metodologia já existente para ensaio de fadiga flexo rotativo. Os corpos de prova foram submetidos a tensões crescentes e decrescentes, foi determinado seu limite de resistência à fadiga e, por fim, foi realizado um comparativo entre os resultados obtidos. Utilizou-se uma máquina de fadiga flexo rotativa com rotação de 3500 rpm em temperatura de 24°C e com refrigeração líquida sobre o corpo de prova. Para o ensaio refrigerado, aplicou-se o método Staircase, esse método utiliza um corpo de prova em seu ensaio a um determinado nível de tensão, se esse corpo de prova não falhar a um número de ciclos determinados o segundo corpo de prova será ensaiado a um nível de tensão maior, se ocorrer a falha o nível de tensão será reduzido no próximo ensaio. Esse processo é repetido com o nível de tensão maior ou menor até que se atinja a vida pré-determinada sem o surgimento da fratura. Desta maneira foi determinado a média e desvio padrão da resistência à fadiga. Na primeira fase, fez-se um ensaio com a tensão superior sobre a resistência à fadiga do material, utilizando um corpo de prova virgem até que houvesse sua ruptura. Posteriormente, os demais corpos de prova foram ensaiados causando danos com tensões crescentes e decrescentes. Os autores observaram que os danos causados por tensões decrescentes foram maiores e com dispersões menores quando comparados às tensões crescentes. Quanto à

dureza, o limite de resistência à ruptura e o limite de resistência à tração do material, houve diminuição nos valores com o dano empregado com tensões crescentes. O limite de resistência à fadiga caiu, ficando muito próximo nos dois casos. Em virtude do endurecimento cíclico, o limite de escoamento do material danificado foi maior quando comparado ao material virgem. Houve uma grande elevação da temperatura nos corpos de prova durante o ensaio não refrigerado e com tensões elevadas. Os autores sugerem a introdução da refrigeração para que o aumento de temperatura não influencie no comportamento dos materiais.

Em um estudo, Afzal e Fatemi (2004) analisaram e compararam em condições controladas em laboratório o comportamento à fadiga de uma biela constituída de aço forjado e metal em pó. Foram realizados testes de tração e de resistência à fadiga. Para os testes de resistência à fadiga, utilizaram uma bancada com uma máquina flexo rotativa com controle de carga, para controle da tensão aplicada nos dois materiais. Em seguida através dos dados obtidos nos testes foram construídas as curvas S-N para visualização da vida prevista para cada material. Os testes demonstraram que a localização da fratura dominante no metal em pó estava na região mais próxima a extremidade do pino e do aço forjado, na transição para região de extremidade da manivela. Foi realizado um comparativo com o banco de dados já existente para esses materiais com o intuito de averiguar qual material possui maior eficácia nessa aplicação. Ainda relacionaram o custo x benefícios de cada material quanto a sua vida útil. Por fim concluem observando os testes do aço forjado que sua resistência ao escoamento 19% mais elevado e que sua resistência à tração é 8% superior aos resultados obtidos no metal em pó. Quanto a vida em fadiga definem que o aço forjado tem maior vida útil quando comparado ao metal em pó. Algumas comparações foram realizadas pelos autores relacionando custo x benefícios dos materiais com intuito de verificar qual melhor relação efetiva. Com os resultados analisados, os autores consideram que a utilização do aço forjado em bielas é mais indicado, devido à sua maior força e menor custo de produção.

O desempenho da vida em fadiga de um aço de alta resistência utilizado pela aeronáutica (ABNT, 4340) com revestimento de níquel e processo sulfamato é avaliado por Rocha (2005). Para a análise, dividiu as amostras em 5 grupos, sendo o primeiro composto pelo metal base com melhor desempenho para posterior

comparação com os demais. Realizou-se ensaios de microdureza, ensaios de fadiga por flexão rotativa e análise das fraturas. Ao fim do trabalho o autor apresentou os resultados de cada grupo, indicando o desempenho individualizado e realizando algumas comparações entre os grupos. O terceiro grupo que possui revestimento de cromo com camada de níquel e sem jateamento de esferas, apresentou a pior resistência à vida em fadiga, com as trincas passando pelas duas camadas sem sofrer interferência na trajetória. Enquanto que o primeiro grupo composto pelo metal base usado para as comparações, apresentaram o melhor desempenho. Em relação ao quinto grupo constituído pelo material revestido com níquel, se apresentou resistência à fadiga melhor que o terceiro grupo, mas menor em relação ao primeiro grupo por apresentar tensões tratativas na superfície do corpo de prova. O segundo grupo com revestimento de níquel, recobrimento de cromo, processo sulfamato e tratamento *shot peening*, induz tensões residuais compressivas na superfície do material melhorando seu comportamento à fadiga, assim quando comparado ao terceiro grupo tem melhor desempenho. O quarto grupo com revestimento de níquel, processo sulfamato e tratamento *shot peening* quando comparado ao quinto grupo demonstrou um melhor desempenho atribuído ao jateamento de esferas. A análise comparando as curva S-N mostraram que $G3 < G2 < G5 < G4 < G1$, logo o jateamento de esferas aumentou a vida à fadiga do material enquanto que os demais tratamentos reduziram a resistência à fadiga dos corpos de prova.

Matlock et al. (2005), apresentam em seu trabalho a importância de compreender as interações entre composição de liga, de aço e de microestrutura junto com a preocupação com o processamento de superfície para melhorar a resistência à fadiga de aços aplicados na indústria automotiva. A primeira parte do trabalho baseia-se na realização dos testes de fadiga através de flexão com um aço carbonado e na caracterização de diversas situações relevantes quando se fala em fadiga, por exemplo: tamanho do grão, efeitos de outras ligas, tensões residuais. Enquanto que na segunda parte, tem-se os resultados obtidos dos ensaios em laboratório, junto com as curvas S-N para cada diferente composição utilizada para os testes. Dessa maneira, ao término do estudo os autores ressaltam que é bem conhecida a notória utilização de aços que possuam uma vida em fadiga elevada na indústria automotiva. Com tudo, enfatizam que com os resultados das diferentes composições é possível agregar mais dados para otimizar ainda mais o comportamento em fadiga dos aços

de superfície modificada através de adição de outras ligas. E ainda salientam que, com a exigência da indústria automotiva necessitando maior desempenho de todos seus componentes, a execução de tais testes futuros se tornaram cada vez mais indispensáveis para novas composições de ligas.

Uma máquina flexo rotativa foi dimensionada e fabricada a partir de modelos já existentes, com algumas alterações, para ensaiar o aço A-36 em três ambientes estabelecidos: refrigerado, lâmina d'água e submerso na água com pressão hidrostática de 5 atm (CASTRO, 2007). Verificou-se, através da curva S-N, qual o número de ciclos necessário para sua ruptura e com os dados foram criadas curvas S-N-P (tensão x número de ciclos x probabilidade) para averiguar o limite de resistência à fadiga nos ambientes. Houveram diferenças nas curvas S-N-P dos ensaios refrigerados e lâmina d'água decorrentes da temperatura constante e pelo fato dos corpos de prova estarem totalmente imerso em água. Fraturas diferentes foram observadas para cada ensaio realizado. O autor constatou que a pressão interfere de forma negativa, pois antecipa as rupturas precoces no aço.

Abrahão et al. (2008), trataram da importância do estudo da falha por fadiga em materiais expostos a ciclos repetitivos de tensão ou deformação. Descreveram os mecanismos e formato de corpos de prova usados nos ensaios de fadiga. Enfatizaram a grande utilização dos ensaios pela indústria aeronáutica e sua grande relevância econômica no cenário mundial. Relataram fatos e realizações importantes que ocorreram na história da falha por fadiga. Destacaram o episódio com os aviões Comet, que devido a concentradores de tensões elevadas nos cantos das janelas quadradas e de cortes para a colocação de antenas de localização, originaram trincas, fazendo com que a propagação de trinca por fadiga levasse à queda do avião. Além disso, através de gráficos, demonstraram os diferentes tipos de carregamento aplicados e as curvas de Wohler ou curvas S-N. Enfatizaram que o estudo da fadiga em matérias é de extrema importância em todas as áreas da engenharia e possibilitam grandes avanços e soluções para problemas em diversos processos.

Com intuito de analisar a vida em fadiga do aço SAE 1060, Rocha (2010) analisou seu comportamento antes e depois do jateamento com esferas (*shot peening*). O trabalho abordou os ensaios com duas dimensões distintas de esferas

S110 e S280 e em três condições: cobertura superficial de 80%, 100% e 500%. Primeiramente, foi realizada uma análise metalográfica antes e depois do jateamento; em seguida, executou os ensaios de fadiga. O material apresentou uma tensão máxima de ruptura de 1400 MPa e limite de escoamento de 1200 MPa. Foi identificada, após o jateamento, a superfície deformada plasticamente do material. As curvas de fadiga do material foram realizadas em todas as condições descritas, os resultados de curvas S-N foram diferentes para cada situação analisada. O autor verificou que as esferas S280 não geraram resultados significativos para ganho de vida em fadiga. Nas esferas menores S110, com cobertura 80% e 500%, houve perda da vida em fadiga em decorrência da superfície apresentar pontos com e sem impacto das esferas, ou apresentar concentradores de tensões promovendo trincas. Os melhores resultados foram obtidos através da cobertura 100%, onde as tensões compreensivas atrasaram a aparição de trincas, resultando em um aumento da vida em fadiga significativo. Como conclusão, observou-se que o jateamento traz ganho efetivo, mas seus parâmetros devem ser selecionados de maneira adequada.

A incerteza do levantamento da medição quanto ao comportamento dos metais em fadiga à temperatura ambiente, empregando a curva S-N, foi relatada por Costa (2010). O autor considerou as incertezas das tensões aplicadas nas máquinas utilizadas para os ensaios, as quais forneceram a dispersão do número de ciclos por falha. Para a realização dos ensaios, utilizaram-se corpos de prova de um aço inoxidável AISI 316L e uma máquina servo hidráulica de capacidade 25KN. A calibragem e a avaliação do alinhamento foram efetuadas de acordo com a Norma ASTM E467. O trabalho foi dividido em 8 Capítulos. No Capítulo 5, ocorreram as avaliações do desalinhamento, calibrações dinâmicas, ensaios de fadiga com curva S-N e cálculos de incertezas. O autor concluiu que o comportamento do material influenciou nas curvas S-N e não na variação de incertezas. Considerou-se de grande importância a calibração mecânica para a máquina de ensaio a calibração dinâmica; afirmou que as estimativas de incertezas não podem ser desprezadas na obtenção dos resultados dos ensaios de fadiga, pois elas contribuíram com cerca de 9,5% dos valores das bandas de incerteza.

Sena (2010) realizou um estudo teórico e prático com o propósito de analisar o comportamento da fadiga de um aço bifásico DP-780 com estrutura composta por

ferrita e bainita, e comparar com a performance de aços bifásicos de alta resistência mecânica utilizados na indústria automotiva. O estudo verificou o comportamento do aço sobre fadiga com ensaios de controle de tensão, com levantamento da sua curva S-N e uma análise metalográfica para observar a microestrutura do material. Quanto à parte experimental, na análise metalográfica as amostras foram lixadas, polidas e atacadas com reagentes químicos, suas fases presentes foram caracterizadas através de microscópio óptico e eletrônico de varredura. O ensaio de tração utilizou três corpos de prova onde a deformação foi monitorada com velocidade de 5 mm/min, originando o limite de escoamento, limite de resistência, deformação total e redução da área. Quanto ao ensaio de fadiga, empregou um carregamento inicial com carga de 95% do limite de resistência, gerando assim a curva S-N. O autor concluiu que emprego do aço DP-780 na indústria automotiva é promissor, pois observou-se maior refino microestrutural, ganho de resistência mecânica, menor perda de ductibilidade e limite de fadiga superiores quando comparado aos outros materiais.

Maruta et al. (2013) investigaram e discutiram a resistência à fadiga dos amortecedores fabricados com componentes de chumbo que constitui os amortecedores de ligação em sistemas de isolamento sísmico, os quais são utilizados em tremores de terra. O estudo originou-se devido aos relatos de que as oscilações causadas por vento em torno dos edifícios afetavam significativamente a eficiência dos amortecedores. Para a realização dos testes foi utilizada uma mesa flexo rotativa para simular as pequenas oscilações, os testes de fadiga foram avaliados para vida em alto ciclo com temperatura em torno de 21°C. Os corpos de prova constituídos de chumbo alta pureza com seu limite de fadiga com cerca de 2 MPa são considerados baixos quando comparados a aços e ligas comerciais, com isso o diâmetro dos corpos de prova foi aumentado. Ainda foram revestidas algumas amostras com massa lubrificante e ensaiadas nas mesmas condições com o intuito de verificar se houve ganho significativo quando comparado ao material puro. Após a realização dos testes, os resultados experimentais foram investigados e discutidos. Os autores observaram que houve um aumento de 5 a 10 vezes na resistência à fadiga nas amostras com massa de revestimento quando comparadas a amostras de chumbo puro. Constataram que a massa de revestimento afeta diretamente o comportamento da propagação da fissura, retardando sua propagação na superfície. Com isso ficou

muito claro ao término do estudo que o material com revestimento demonstra grande ganho quando comparado ao chumbo de alta pureza.

Ickert (2014) realizou ensaios de fadiga em uma bancada rotativa em eixos produzidos de aço SAE 1020, SAE 1045 e aço inoxidável AISI 304. Objetivou empregar nos corpos de prova uma quantidade de ciclos até sua ruptura. Os dados obtidos através das curvas S-N foram analisados com a intenção de identificar o fator que mais influencia na resistência à fadiga. Para o experimento, adotaram-se três medidas de raio: 0,75mm, 1mm, e 1,5mm, para cada corpo de prova de cada material. Também, definiu-se a rotação do motor de 1300RPM e a força empregada de 220N. Para análise dos fatores de tensão em função do número de ciclos, foi possível gerar um gráfico através de um *software* onde comparou-se a média dos ciclos em relação aos fatores. Os resultados em relação à quantidade de ciclos obtidos foram apresentados associando-se o material e seu concentrador de tensão ao ciclo suportado até sua ruptura. O autor salientou que com ajuda do método fatorial completo é possível identificar o fator de maior influência sobre os corpos de prova até sua ruptura. Observou também que o tipo do material escolhido tem papel importante, mas a maior influência nos resultados, utilizando o mesmo material, foi provocada pelo tamanho do concentrador de tensão; logo, o corpo de prova que apresentou o menor concentrador de tensão igual 0,75mm, obteve maior resistência à fadiga. Ainda por meio de uma análise visual nos corpos de prova, observou que o aço SAE 1020 e SAE 1045 apresentaram maior escoamento em virtude de serem materiais mais dúcteis quando comparados ao aço inoxidável AISI 304. Desta maneira foi possível observar de forma mais clara a propagação da trinca. O aço que resistiu por mais tempo até sua ruptura foi o SAE 1045 com concentrador de tensão de raio igual a 0,75mm.

O crescimento na exploração de petróleo aumentou a exigência no conhecimento do comportamento dos materiais em ambientes mais agressivos. Silva, Duque e Oliveira (2014) apresentaram um comparativo entre o desempenho da liga AISI 8630M forjada na utilização em linhas de ancoragem, com meios hidrogenantes e meios livres de hidrogênio com carregamento cíclico. Realizaram ensaios de alto ciclo em 12 corpos de prova iniciando com 70% do limite de resistência e diminuindo consecutivamente até que não houvesse ruptura em número de ciclos superiores à

10⁶. Com o intuito de conhecer a microestrutura do material, foram realizados ensaios metalográficos nas condições hidrogenadas. Pelos resultados obtidos nos ensaios, consideraram satisfatório o emprego da liga em meios com hidrogênio, mesmo havendo uma diminuição na sua vida em fadiga por influência do meio. Os seus resultados encontraram-se acima do mínimo exigido pelas sociedades certificadoras. Ressaltaram a necessidade de haver um número maior de ensaios realizados para uma melhor caracterização do material.

Verran et al. (2015) apresentaram uma pesquisa sobre a liga A356, amplamente utilizada na indústria automotiva e aeroespacial. Investigaram o comportamento da liga em fadiga através de flexão rotativa em diferentes condições. Os ensaios foram realizadas com corpos de prova segundo a Norma ASTM, ambos com acabamento superficial polido, sendo um com o material bruto de fundição e outro com tratamento térmico T6 para aumentar a ductibilidade e resistência. Para obter a curva S-N nos ensaios, foram mantidas velocidade constante de 60Hz e variadas cargas. Os resultados foram demonstrados através do gráfico tensão x número de ciclos. Foram ligados os pontos obtidos dos ensaios de flexão rotativa e foi traçada a curva S-N, onde constatou-se que os corpos de prova com tratamento T6 tiveram valores maiores para tensão na região de baixos ciclos. Conclui-se que o material tratado com T6 tem maior vida à fadiga e melhor resistência.

Ragagnin (2015) fez uma análise de fadiga em uma haste de compressores alternativos. Para determinar os esforços atuantes na haste do compressor, foram aplicadas expressões analíticas da bibliografia de projeto de compressores. Ele demonstrou o equacionamento realizado para os esforços atuantes e expôs os resultados alcançados, os gráficos e os cálculos para o limite de resistência à fadiga utilizados, assim como os fatores de modificadores. Ressaltou que mesmo havendo mudança nas condições de operação do compressor não gerou sobrecarga considerável ocasionando surpresa pelo autor que esperava que a mudança de condições influenciariam. Salientou que a rosca é parte mais crítica da haste. Conseqüentemente, confirmou-se a tendência de que a haste do compressor é projetada para vida infinita.

Toso et al. (2016) realizaram um estudo comparativo empregando ensaios de fadiga em dois corpos de prova com geometrias diferentes, um com seção retangular

e outra cilíndrica, utilizados em molas de suspensão automotiva. No ensaio experimental, as condições de teste assemelham-se mais às condições reais de uso do componente, submetendo a esforços de flexão, enquanto que para o ensaio normalizado utilizou-se o método dos elementos finitos. Assim, são comparadas as curvas S-N geradas visando identificar as causas e consequências para as diferenças encontradas na vida em fadiga nos procedimentos realizados. Através dos resultados, observou-se que com o método numérico é possível determinar o limite de resistência à fadiga do material, mas não determinar a resistência à fadiga de um componente. Os autores concluíram que o ensaio numérico é útil para definir as curvas de fadiga do material, enquanto que o ensaio experimental prevê a vida em fadiga do componente.

2.2 Fadiga

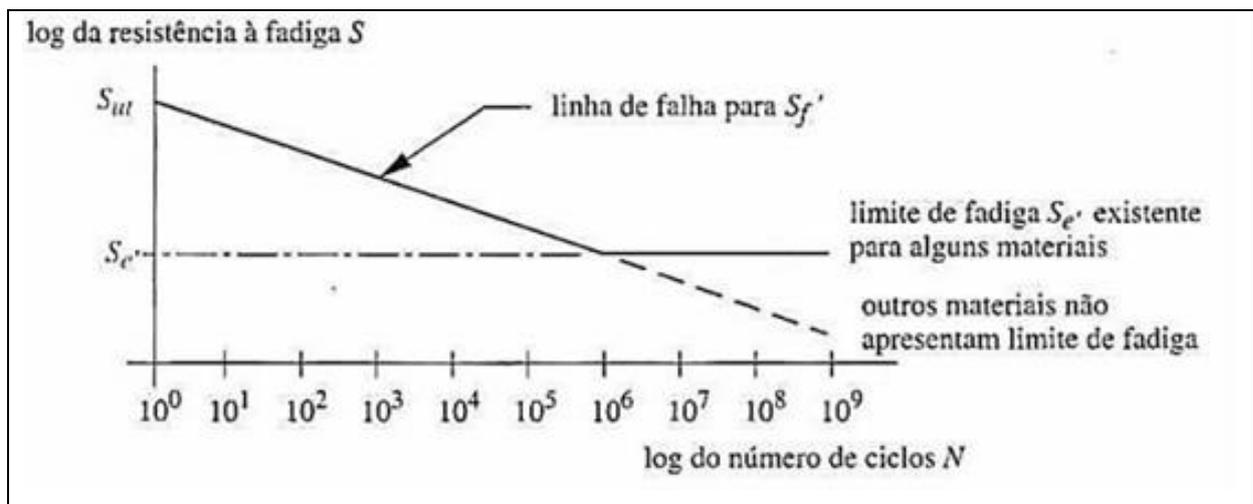
Segundo ASTM E 1823-96 (ASTM, 2002), o termo fadiga pode ser determinado como um fenômeno de ruptura que altera a estrutura do material de forma localizada, progressiva e irreversível, em virtude de variações de tensões dinâmicas e oscilantes, que podem resultar no aparecimento e propagação de trincas ou fraturas de maneira lenta e gradativa após um determinado número de ciclos, levando a ruptura ou colapso total do material.

Os primeiros relatos sobre o fenômeno da fadiga foram observados em meados de 1800, com a falha de eixos em vagões ferroviários após um pequeno período de esforço. Os eixos eram produzidos com material dúctil, entretanto, apresentavam aspecto de fraturas frágeis e súbitas. Rankine (1843 apud MITCHELL, 2001) afirmou que os munhões haviam sido projetados com todo conhecimento possível em engenharia que se possuía naquele tempo. Esse conhecimento baseava-se em experiências resultantes de estudos com cargas estáticas, porém, o fenômeno decorria de cargas dinâmicas. Logo, um novo modelo para época era necessário (MITCHELL, 2001).

O engenheiro alemão August Wohler foi pioneiro na investigação da falha por fadiga. Realizou durante um período de 12 anos, em laboratório, os primeiros estudos experimentais com carregamento alternado até a sua falha em eixos de trens que sofriam flexão rotativa, com o objetivo de definir em qual faixa de tensão não haveria falha do material. O pesquisador publicou, em 1870, resultados dos ensaios de fadiga os quais apontavam o número de ciclos de tensão variando no tempo como os responsáveis pela ruptura e, ainda, uma tensão limite de resistência à fadiga, o que corresponde ao nível de tensão que suportaria milhões de ciclos de uma tensão alternada. Identificou que materiais sujeitos a carregamentos cíclicos possuíam menor resistência mecânica quando comparados a carregamentos estáticos. Com o diagrama S-N, também chamado de Curva de Wohler, conseguiu representar com os dados obtidos nos ensaios o comportamento dos materiais através da tensão aplicada (S) e do número de ciclos (N) para o colapso (NORTON, 2013).

A curva S-N, onde é possível observar que a vida do material aumenta com a diminuição da tensão cíclica aplicada, é apresentada na Figura 1. Quando a tensão é reduzida a um determinado valor, a vida do material não é mais afetada.

Figura 1 – Diagrama S-N ou Curva de Wohler (resistência à fadiga x vida esperada)



Fonte: Norton (2013, p. 305).

2.3 Mecanismos da falha por fadiga

Todos os materiais possuem descontinuidades nas suas estruturas de grandeza micro até macroscópica. As trincas geralmente tem seu início na superfície do material, desenvolvendo-se através das irregularidades ou ainda por concentradores de tensão. Para o fenômeno de fadiga, as trincas sempre estão presentes, conseqüentemente estão contidas no material desde sua manufatura, ou ainda propagam-se através de deformações cíclicas em torno dos concentradores de tensões (HERTZBERG, 1996).

A falha por fadiga em um material tem aparência semelhante a uma falha frágil, contudo, as características de fratura da falha por fadiga são diferentes de uma fratura frágil estática, resultando no desenvolvimento de três estágios. O primeiro estágio corresponde ao início de uma ou mais microtrincas. O segundo estágio trata da propagação de micro a macrotrincas no material. Já o terceiro estágio corresponde a falha do componente de maneira instantânea e repentina (SHIGLEY; BUDYNAS; NISBETT, 2011).

2.3.1 Início da trinca

Marques e Arevalos (2011) citam o surgimento das trincas iniciando geralmente em concentradores de tensões, os entalhes. Como as tensões contidas nos entalhes variam, pode haver escoamento localizado devido aos concentradores de tensão, resultando, assim, em uma deformação plástica localizada, a qual provoca distorções e regiões com muita deformação devido aos movimentos cisalhantes. Mesmo que não haja o entalhe, ainda assim haverá o surgimento de trincas, desde que em alguma região se ultrapasse o limite de escoamento.

De acordo com Teixeira (2004), o início das trincas pode acontecer de forma natural devido a não homogeneidade da estrutura do material, havendo uma desorganização na sua microestrutura que resulta em pequenos vazios. Esses vazios, ou inclusões, funcionam como agentes intensificadores de tensão para a iniciação da

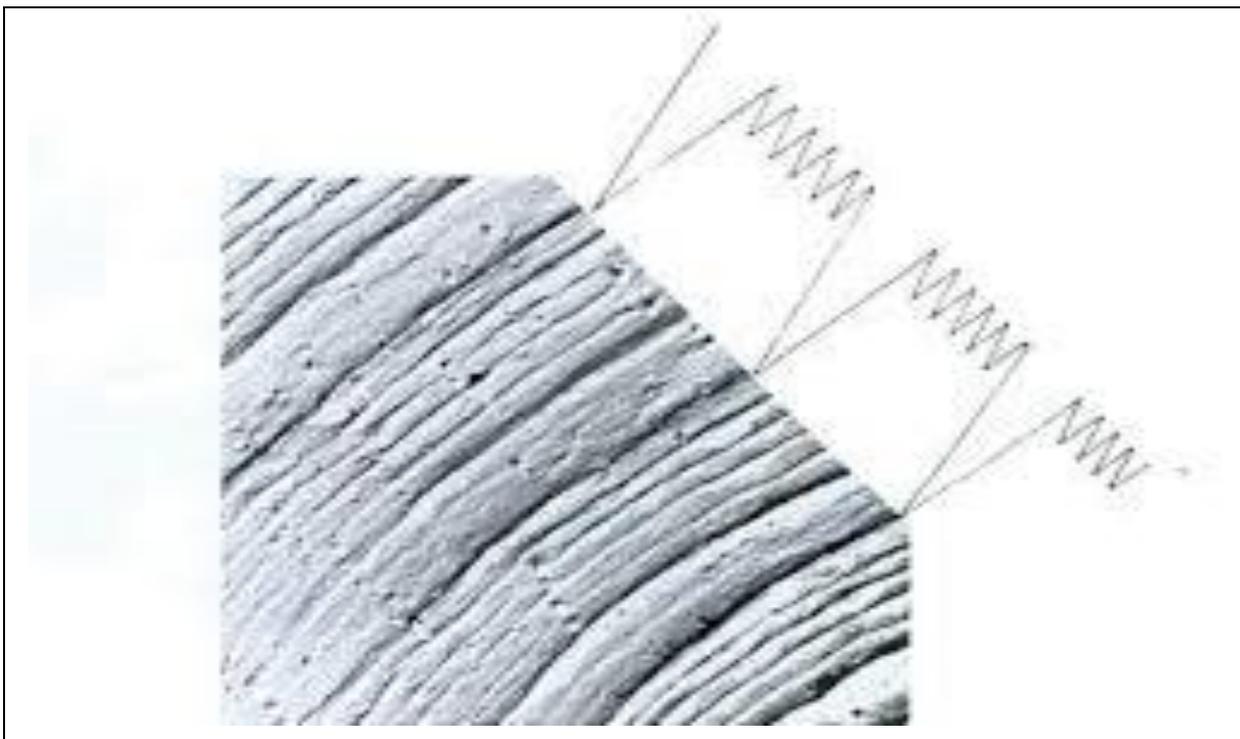
trinca. Os materiais com menor ductibilidade não apresentam a mesma facilidade para o escoamento e geralmente desenvolvem trincas mais rapidamente, havendo uma tendência a proceder diretamente para o estágio da propagação da trinca, sem passar pelo estágio inicial.

2.3.2 Propagação da trinca

Conforme Brandão (2013), a tensão por fadiga altera-se de um regime de tensão de compressão para um regime de tensão de tração, ao mesmo tempo em que a tensão local está oscilando com valores abaixo da tensão de escoamento para acima da tensão de escoamento, na parte pontiaguda da trinca. Uma vez que se estabelece a trinca microscópica no material, desencadeia-se o crescimento da trinca, assim, ocorrendo a propagação ao longo de planos normais com a tensão máxima de tração. A falha por fadiga se dá devido às tensões de tração, enquanto que as tensões cíclicas de compressão não contribuem para o crescimento da trinca, e sim para seu fechamento.

No entendimento de Norton (2013), a propagação da trinca possui uma taxa muito pequena, da ordem de $3,937 \times 10^{-8}$ até $3,973 \times 10^{-6}$ mm por ciclo, contudo, após um grande número de ciclos, este valor torna-se significativo. Na Figura 2 é apresentada a superfície de ruptura com estrias, devido a cada ciclo de tensão de um corpo de prova de alumínio. Os ciclos com maior tensão apresentam estrias maiores do que as de pequena amplitude e mais frequentes. Logo, as amplitudes de maiores tensões apresentam uma maior propagação da trinca. Outro mecanismo para a propagação das trincas é a corrosão. A associação de um meio corrosivo com uma solicitação cíclica resulta em uma propagação mais rápida da trinca, a isso se dá nome de fadiga de corrosão.

Figura 2 – Estrias de fadiga na superfície da ruptura de uma liga de alumínio

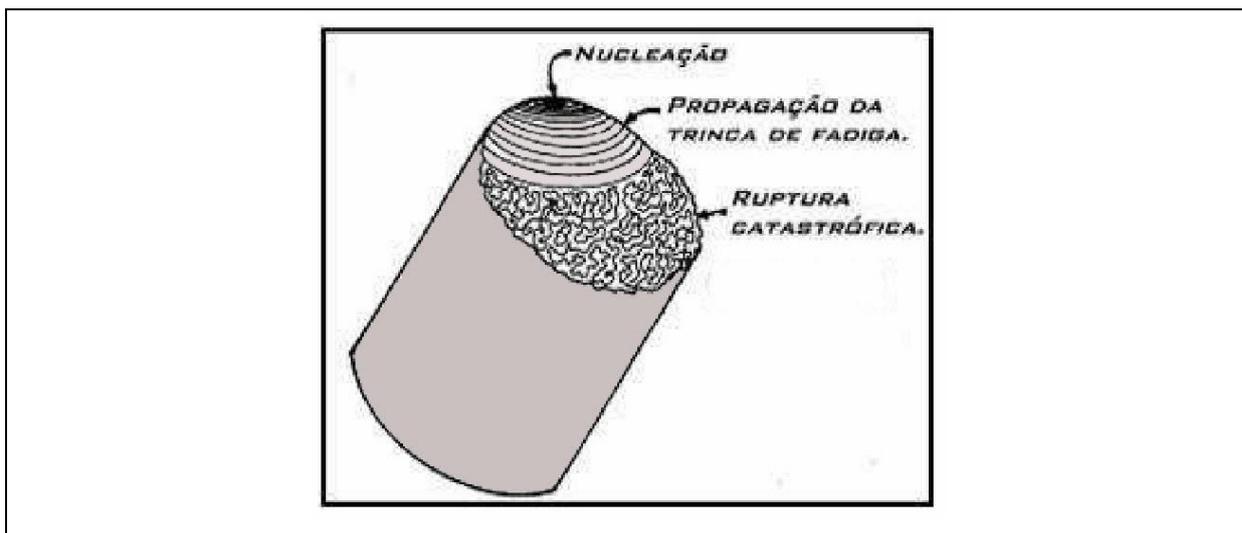


Fonte: Norton (2013, p. 309).

2.3.3 Fratura

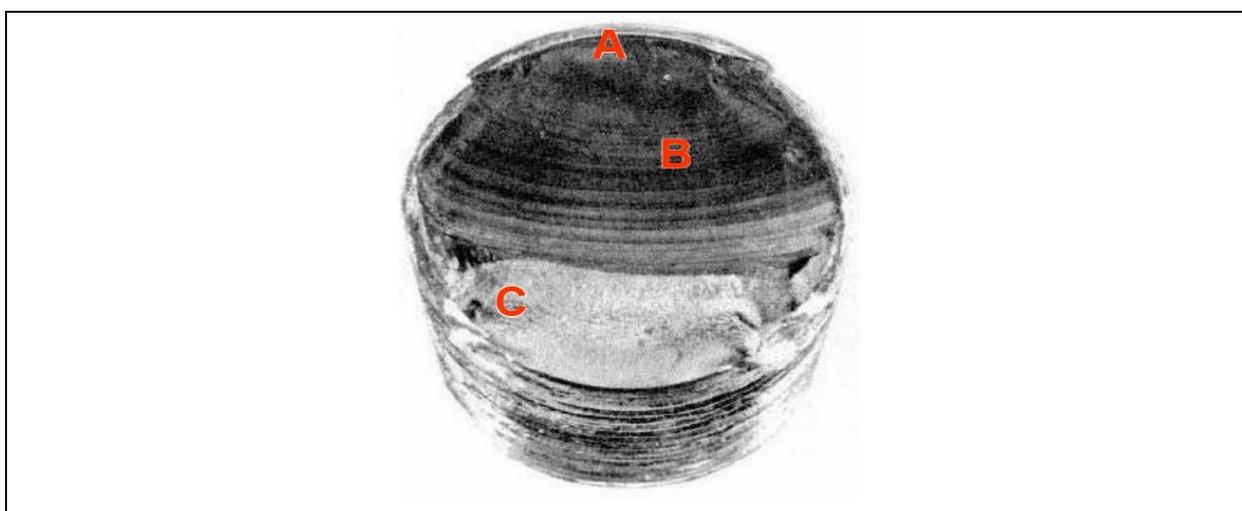
A trinca continuará a crescer enquanto houver aplicação de tensões de tração. Em consequência, devido a concentradores de tensão a trinca propagará até que ocorra a ruptura total e imediata do componente. Além disso, a falha por fadiga pode ser reconhecida pela observação da aparência da superfície de fratura do material. Geralmente possuem características diferentes as regiões da trinca, sendo uma região lisa, onde se inicia a falha, uma região próxima à trinca parecendo com marcas de praia, que representa a propagação da trinca, e outra região que representa a ruptura final do material. As superfícies características da falha por fadiga, mostrando o início da trinca (nucleação), propagação e trinca (marcas de praia) e a ruptura final, são representadas na Figura 3. Na Figura 4, a falha de um parafuso em razão de uma flexão unidirecional repetida é apresentada (BRANDÃO, 2013).

Figura 3 – Representação esquemática da superfície de fratura de um aço



Fonte: Inspeção de equipamentos... (2014, texto digital).

Figura 4 – Superfície do material após ruptura



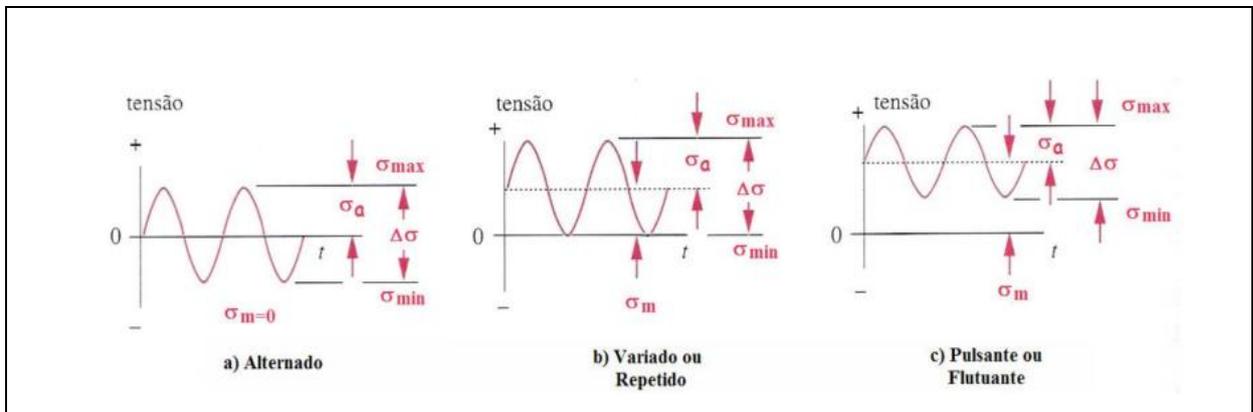
Fonte: Shigley, Budynas e Nisbett (2011, p. 285).

2.4 Carregamento cíclico

De acordo com Rocha (2010), definir qual o tipo de carregamento que atua no sistema é importante. Esses carregamentos são, geralmente, subdivididos em três tipos de tensões e seus valores oscilam no tempo. Na Figura 5 apresentam-se os três tipos de tensões em máquinas rotativas. No caso da tensão alternada, o valor da

tensão média é igual a zero, na tensão repetida a onda varia de um zero até um valor máximo, e a pulsante todas as componentes têm valores diferentes de zero.

Figura 5 – Tensões cíclicas alternadas, repetidas e pulsantes



Fonte: Oliveira, Ferreira e Araújo (2004, p. 21).

De acordo com Oliveira, Ferreira e Araújo (2004), a curva S-N se modifica notavelmente devido a tensão média, geralmente a tensão média em componentes mecânicos não possui valor nulo. As expressões que representam os gráficos de tensões são as seguintes:

- Variação de tensão, $\Delta\sigma$ é a diferença entre os valores máximos e mínimos de tensão empregada:

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (1)$$

- Tensão média é representada pela expressão a seguir:

$$\sigma = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2)$$

- Amplitude de tensão ou atenção alternada, um dado muito importante em diagrama S-N, segue na seguinte expressão:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (3)$$

- Tensões máximas e mínimas equivalem a soma ou diminuição da tensão alternada da tensão média.

$$\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a \quad (4)$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a \quad (5)$$

- Razão de tensão representa o tipo de carregamento, é expressada pela seguinte equação:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (6)$$

2.5 Métodos de previsão de vida em fadiga

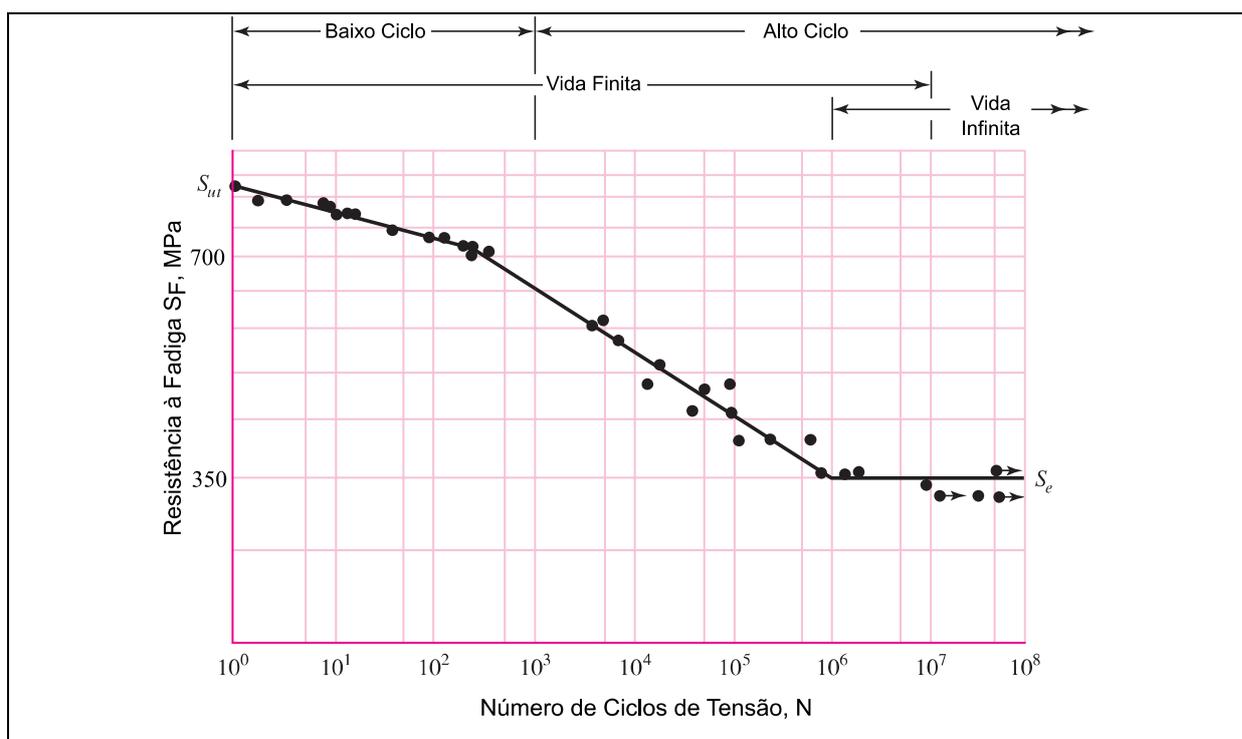
Suresh (1998) cita que o processo de fadiga é analisado através três métodos para estimar a falha. As abordagens usadas são: modelo tensão x número de ciclos (S-N), modelo deformação x número de ciclos (ϵ -N) e o modelo da mecânica da fratura. Os métodos da tensão (S-N) e da deformação (ϵ -N) são as duas abordagens mais clássicas, partem do pressuposto de que o material não tem trinca. Tais métodos controlam a amplitude por tensão ou deformação, visando prever a vida em números de ciclos N com um carregamento específico até a ocorrência da falha. O método da mecânica da fratura considera inicialmente que os componentes contenham falhas, sendo determinadas por líquidos penetrantes, raio-X, entre outros. Define-se através do número de ciclos à vida em fadiga para a propagação da trinca, tendo origem em um tamanho inicial até uma grandeza crítica.

2.5.1 Abordagem tensão-vida

Segundo Shigley, Budynas e Nisbett (2011), através do levantamento das curvas S-N, pode-se demonstrar o comportamento do material quanto a sua resistência à fadiga. A curva refere-se a um gráfico que correlaciona o número de ciclos da ruptura do corpo de prova no eixo x, com a amplitude da tensão aplicada no eixo y. Para a geração desse gráfico, diversos testes são realizados em corpos de prova com diferentes níveis de tensão.

Quanto ao número de ciclos, classifica-se a fadiga em: fadiga de baixo ciclo (FBC) com número de até 10^3 ciclos, ou ainda fadiga de alto ciclo (FAC), que corresponde a números de ciclos superiores a 10^3 ciclos. Na Figura 6 pode-se observar o traçado com base nos resultados do ensaio de fadiga de um aço e as duas regiões de tensões bem distintas, a de baixo ciclo e de alto ciclo (SHIGLEY; BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Figura 6 – Diagrama S-N

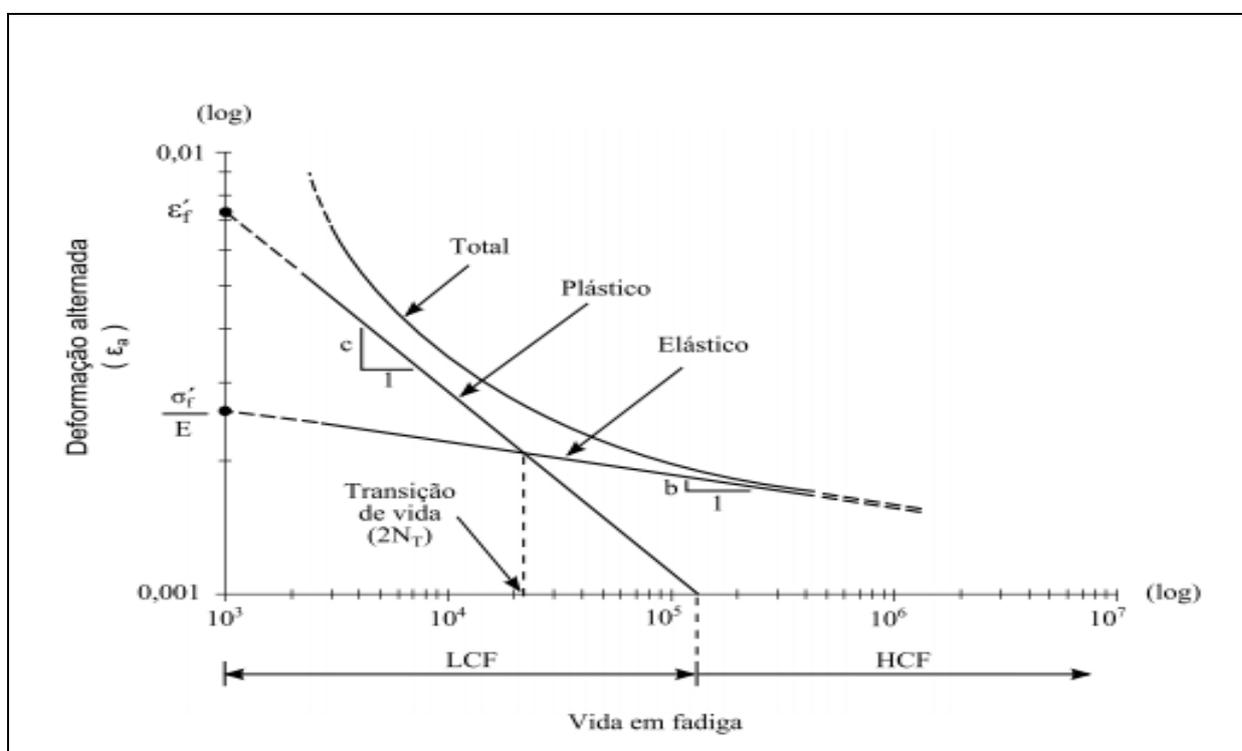


Fonte: Shigley, Budynas e Nisbett (2011, p. 292).

2.5.2 Abordagem deformação-vida

Esse método é conhecido como Método ϵ -N, o qual utiliza a deformação local em um componente como parâmetro de fadiga, fornece uma visão precisa do estágio de iniciação da trinca. O método é mais utilizado em regimes de baixo ciclo, em análises de componentes de vida finita. Esse método gera uma curva ϵ -N, oriunda de um deslocamento axial cíclico ao longo do tempo em um componente, buscando produzir um nível de deformação cíclica elevado. Na Figura 7 pode-se observar a curva de deformação total, que é a soma da deformação elástica com a deformação plástica (SHIGLEY; BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Figura 7 – Diagrama ϵ -N



Fonte: Takahashi (2014, p. 41).

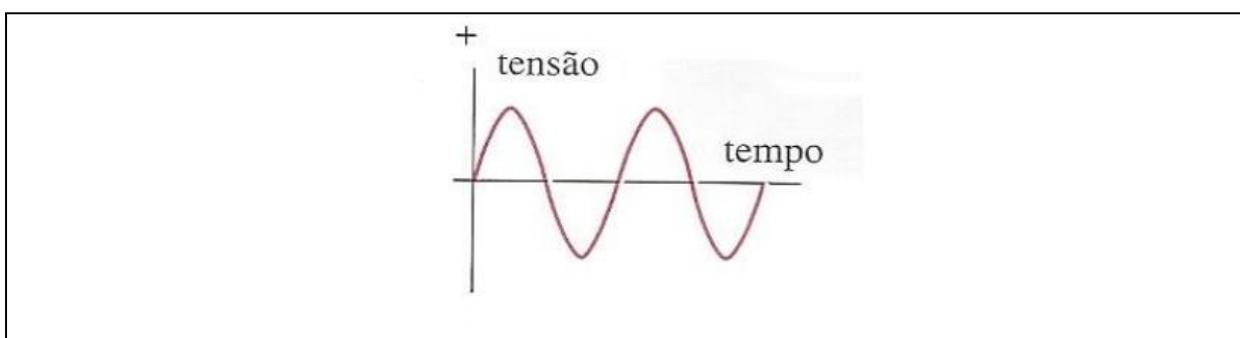
2.5.3 Abordagem da mecânica da fratura

De acordo com Norton (2013), essa teoria é a ideal para ser aplicada no estágio de propagação da trinca, utilizada para prever a vida restante em componentes trincados durante operação. Esta abordagem é aplicada em regimes de baixo ciclos e com vida finita, utilizada em conjunto com ensaios não destrutivos. Há uma estimativa do tamanho da trinca inicial para o processamento computacional do método e, com a ausência de uma trinca, assume-se a presença de uma para início dos cálculos e análises a serem realizadas.

2.6 Resistência à fadiga e limite de resistência a fadiga

Norton (2004) observa que para definir a resistência à fadiga de um material deve-se realizar testes com corpos de prova, com forças repetidas e de diversas intensidades. Em seguida, conta-se o número de ciclos ou de tensões até que haja a ruptura catastrófica do material. Um dos ensaios mais utilizados é o teste de flexão rotativa, de R.R. Moore, onde ocorre o carregamento de um corpo de prova com uma viga em flexão pura através de pesos e um motor faz a rotação desse corpo. Em virtude da rotação do eixo, qualquer ponto na superfície passa da tensão de compressão para tração. Com essa oscilação no ciclo, cria-se uma curva de tensão x tempo. Na Figura 8, a curva do carregamento da tensão versus tempo é ilustrada.

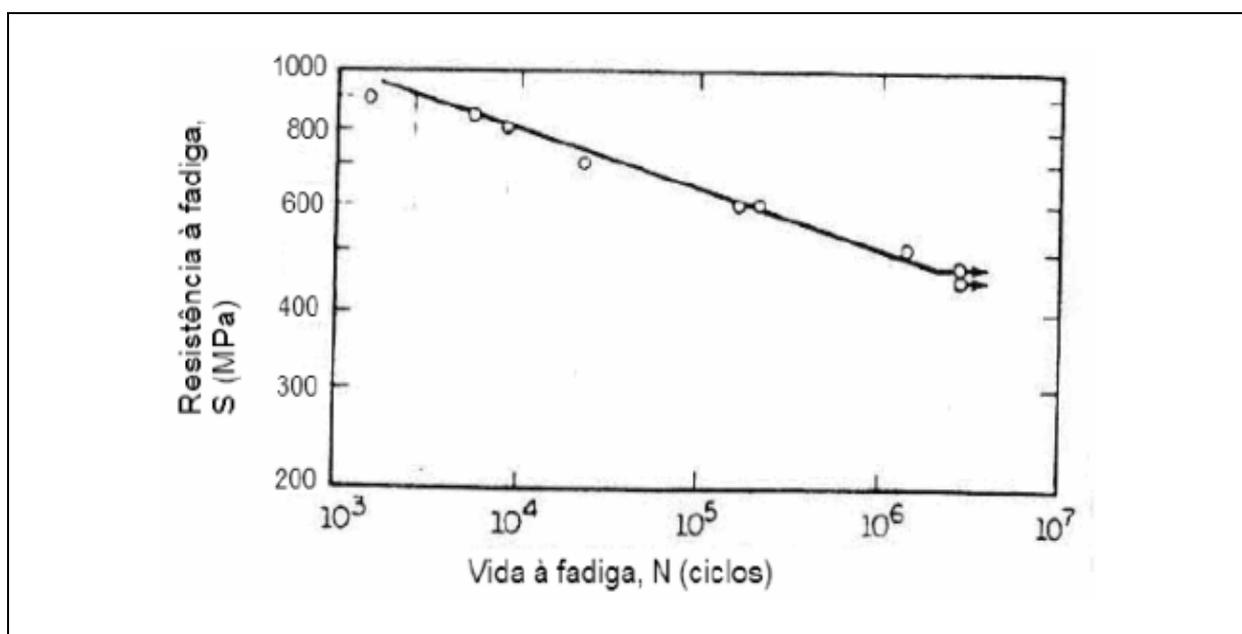
Figura 8 – Tensão x tempo



Fonte: Norton (2004, p. 313).

Para Santos (2008), é indispensável um elevado número de testes para determinar o limite de resistência à fadiga de um material. Em um ensaio flexo-rotativo, a flexão constante é empregada no eixo e observa-se o número de ciclos que serão necessários para ruptura do corpo de prova. No teste inicial, a tensão solicitante é inferior ao limite de resistência do material. Subsequente, realiza-se o teste com uma tensão inferior ao limite de resistência do material. Com a obtenção desses dados consegue-se obter um gráfico como o diagrama S-N, onde as tensões alternadas que os corpos de prova estão sujeitos relacionam-se com o número de ciclos do material até sua falha, isto pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 – Diagrama S-N



Fonte: Santos (2008, p. 10).

Quanto maior a intensidade da amplitude de tensão empregada ao corpo de prova, menor será a quantidade de ciclos que o material conseguirá suportar até sua fratura. O limite de fadiga do material representa o valor mais elevado de amplitude de tensão, o que não acarreta na fratura do material, mesmo considerando uma quantidade de ciclos infinito (MACHADO, 2005).

Conforme Shigley, Budynas e Nisbett (2011), existe uma variação do limite de resistência à fadiga (S_e) e do limite de resistência à tração (S_{ut}) na ordem de 40% a 60% para aços que possuem cerca de 1400 MPa. Para valores de resistência à tração

maiores de 1400 MPa, o limite de resistência à fadiga fica em torno de 700 MPa. Com uma grande quantidade de dados encontrados na literatura, foram estabelecidas relações para previsões do limite de resistência à fadiga quando os corpos de prova estiverem submetidos aos testes rotativos, dados por:

$$S'_e = 0,5 S_{ut}, \quad S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa} \quad (7)$$

$$S'_e = 700 \text{ MPa}, \quad S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \quad (8)$$

2.7 Método S-N

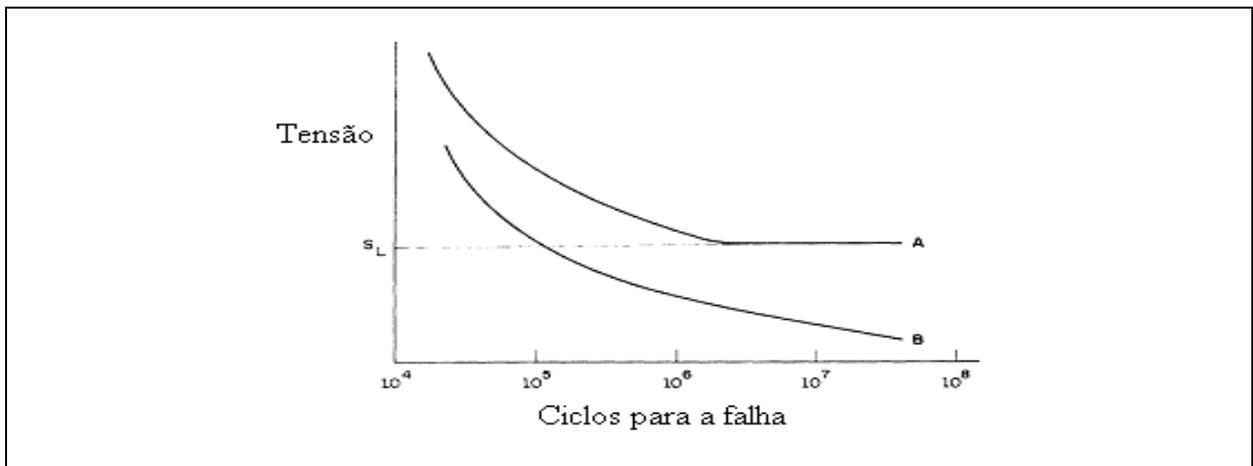
De acordo com Velloso (2009), esse método relaciona a tensão aplicada com o número de ciclos até que ocorra a fratura catastrófica. Com isso, Wholer concluiu que limitando-se a amplitude da tensão até um certo valor máximo, virtualmente a vida em fadiga seria infinita, sendo $N \geq 10^6$ ciclos.

Segundo Souza (2011), deve ser ensaiado mais de um corpo de prova para cada nível de tensão. Esse número, com uma maior quantidade de amostras para cada amplitude de tensão, é chamado de reciclagem de dados. Há necessidade de replicar esse número de testes para conseguir a distribuição estatística da vida por fadiga, portanto, essa distribuição dos valores gerados pelos testes deve ser considerada para a construção da curva S-N.

Bannantine, Comer e Handrock (1990) citam três maneiras para a construção das curvas S-N, com uma variação nos eixos das abcissas e ordenadas, sendo eles: S-N, S-logN e logS-logN. Dessa maneira, a escala logarítmica acaba facilitando a comparação entre os dados colhidos e propiciando curvas para diferentes materiais de forma parecida e com uma escala menor. Na Figura 10 observa-se que quando o valor da tensão for menor, o número de ciclos tende a ser maior. Na curva A, os aços possuem um nível idêntico ao limite de resistência à fadiga do material, sendo esse

limite o maior valor da amplitude de tensão alternada, o qual não acarretará na falha do material mesmo para um número infinito de ciclos. Na curva B, em uma liga de alumínio (material não-ferroso), nota-se que dependendo o valor de tensão aplicada não há um limite de resistência à fadiga, ocorrendo a falha em um determinado número de ciclos no material.

Figura 10 – Curvas S-N ou curvas de Wohler



Fonte: Salerno (2003, p. 7).

2.8 Fatores modificadores

Conforme Shigley, Budynas e Nisbett (2011), não é correto pensar que ensaios realizados em laboratório sob condições controladas e tomados todos os cuidados necessários com os corpos de prova, se tenham resultados iguais de limite de resistência à fadiga de matérias que estão sujeitas a fatores modificadores como:

Material: variabilidade, base de falha, estrutura;

Ambiente: temperatura, corrosão, estado de tensão;

Projeto: escoriação, forma, tamanho, concentração de tensão, velocidade;

Manufatura: condição de superfície, método, tratamento térmico, concentração de tensão.

2.8.1 Fatores modificadores das curvas S-N

Bannantine, Comer e Handrock (1990), citam a utilização de variáveis como a superfície de um corpo de prova, temperatura, carregamento, tamanho, confiabilidade e efeitos diversos como fatores que influenciam diretamente no ensaio de fadiga. Essas variáveis são utilizadas para alterar e simular as condições reais do material utilizado. A expressão de Marin (EQUAÇÃO 9) ajusta o limite de resistência à fadiga considerando os efeitos modificadores:

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S'_e \quad (9)$$

Onde:

K_a = fator de modificação da condição de superfície;

K_b = fator de tamanho;

K_c = fator de carregamento;

K_d = fator de temperatura;

K_e = fator de confiabilidade;

K_f = fator de modificação por efeitos variados;

S'_e = resistência à fadiga corrigida;

S_e = limite de resistência à fadiga no local crítico de uma peça.

Quando não há os ensaios de fadiga de peças, são realizadas estimativas utilizando os fatores modificadores de Marin, onde cada K representa a seguinte condição:

- Fator de superfície K_a .

A qualidade da superfície é muito importante para a vida em fadiga de um material, e é praticamente na superfície do material onde ocorre o início da trinca (SHIGLEY; BUDYNAS; NISBETT, 2011). Por esse motivo, esse fator considera o acabamento do corpo de prova. A expressão utilizadas para quantificar o fator K é a seguinte:

$$K_a = aS_{ut}^b \quad (10)$$

Onde S_{ut} é a resistência de tração mínima, enquanto que a e b são encontrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Fator de acabamento superficial

Acabamento superficial	Fator a S_{ut} MPa	Expoente b
Retificado	1,58	-0,085
Usinado ou Laminado a frio	4,51	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Shigley, Budynas e Nisbett (2011).

➤ Fator de tamanho K_b .

Conforme Norton (2013), peças maiores tendem a falhar com tensões baixas, em virtude de haver maior probabilidade de existir algum defeito na área sobre tensão. A geometria do corpo de prova influencia o fator K_b , isso pode ser observado na Tabela 2 através das condições e expressões apresentadas.

Tabela 2 – Fator devido ao tamanho de peças cilíndricas

Tamanho	K_b
$d \leq 8$ mm	1,00
$8\text{mm} < d \leq 250$ mm	$1,189d^{-0,097}$

Fonte: Norton (2013, p. 331).

➤ Fator de carregamento K_c .

De acordo com Shigley, Budynas e Nisbett (2011), o valor do fator de carregamento K_c é diferente para cada tipo de carregamento. Na Tabela 3 os diferentes carregamentos com seus respectivos valores para K_c .

Tabela 3 – Fator de carregamento devido à diferentes ensaios

Carregamento	K_c
Flexão	1
Axial	0,85
Torção	0,59

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Shigley, Budynas e Nisbett (2011).

➤ Fator de temperatura K_d .

A temperatura influencia a resistência à fadiga do corpo de prova nos ensaios de fadiga. Quando existirem temperaturas muito maiores do que a temperatura ambiente, a resistência ao escoamento diminuiu de maneira contínua, podendo acarretar no aceleração da fratura do material. Na Tabela 4 são observados os critérios considerados para a relação da temperatura com o fator de temperatura K_d para que haja a redução no limite de fadiga (NORTON, 2013).

Tabela 4 – Fator de temperatura variando com faixas de temperatura

Temperatura	K_d
para $T \leq 450 \text{ }^\circ\text{C}$ (840 $^\circ\text{F}$)	1,0
para $450 \text{ }^\circ\text{C} < T \leq 550 \text{ }^\circ\text{C}$	$1 - 0,0058 (T - 450)$

Fonte: Adaptado pelo autor com base em Norton (2013).

➤ Fator de confiabilidade K_e .

Esse fator está associado com a confiança no limite de resistência à fadiga do material. Na Tabela 5 os respectivos valores do fator de confiabilidade relacionados com o valor em percentual da confiabilidade (NORTON, 2013).

Tabela 5 – Fatores de confiabilidade correspondente a 8% de padrão de resistência à fadiga

Confiabilidade, %	Fator de confiabilidade K_e
50	1,000
90	0,897
95	0,868
99	0,814
99,9	0,753
99,99	0,702
99,999	0,659
99,9999	0,620

Fonte: Shigley (2011, p. 311).

- Fator de modificação por efeitos variados, K_f .

Esse fator leva em consideração efeitos não considerados nos demais fatores para redução ou aumento da resistência à fadiga do material. A utilização do fator é empregado, por exemplo, quando um corpo de prova demonstra a presença de tensões residuais na sua superfície, ocasionando a diminuição do limite de resistência à fadiga no caso da tração ou aumento desse limite quando sujeito à compressão. Outro exemplo perceptível ocorre nos materiais expostos à atmosfera corrosiva, pois espera-se que seu limite de resistência à fadiga também seja afetado (SHIGLEY; BUDYNAS; NISBETT, 2011).

2.9 Ductibilidade e fragilidade

Segundo Norton (2013), a medição da ductibilidade do material ocorre através do valor percentual do seu alongamento até a fratura. Os materiais dúcteis demonstram mais de 5% de alongamento na fratura. Materiais frágeis não apresentam valor definido de escoamento.

O material frágil apresenta uma deformação reduzida antes da fratura, ao contrário do material dúctil, que exibe uma deformação maior antes da sua fratura (NASH, 2001).

Ainda segundo Norton (2013), a falta de uma deformação antes da ruptura do material refere-se a um material de característica frágil, enquanto que o material dúctil apresenta uma deformação significativa antes da sua fratura.

2.10 Concentradores de tensão e entalhes

Segundo Young e Bdynas (2002), os concentradores de tensão são definidos como um grande gradiente de tensão em uma região pequena da estrutura.

Pilkey e Pilkey (1997) observam que com a existência de rasgos, entalhes, furos ou outros elementos, a distribuição de tensão acaba sendo modificada. A descontinuidade na área do material aumenta o nível de tensão, provocando assim, um aumento localizado nessas áreas de tensões, podendo provocar até um escoamento localizado.

De acordo com Pilkey e Pilkey (1997), o fator de concentração de tensão em fadiga é estabelecido através da equação:

$$K_f = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \quad (11)$$

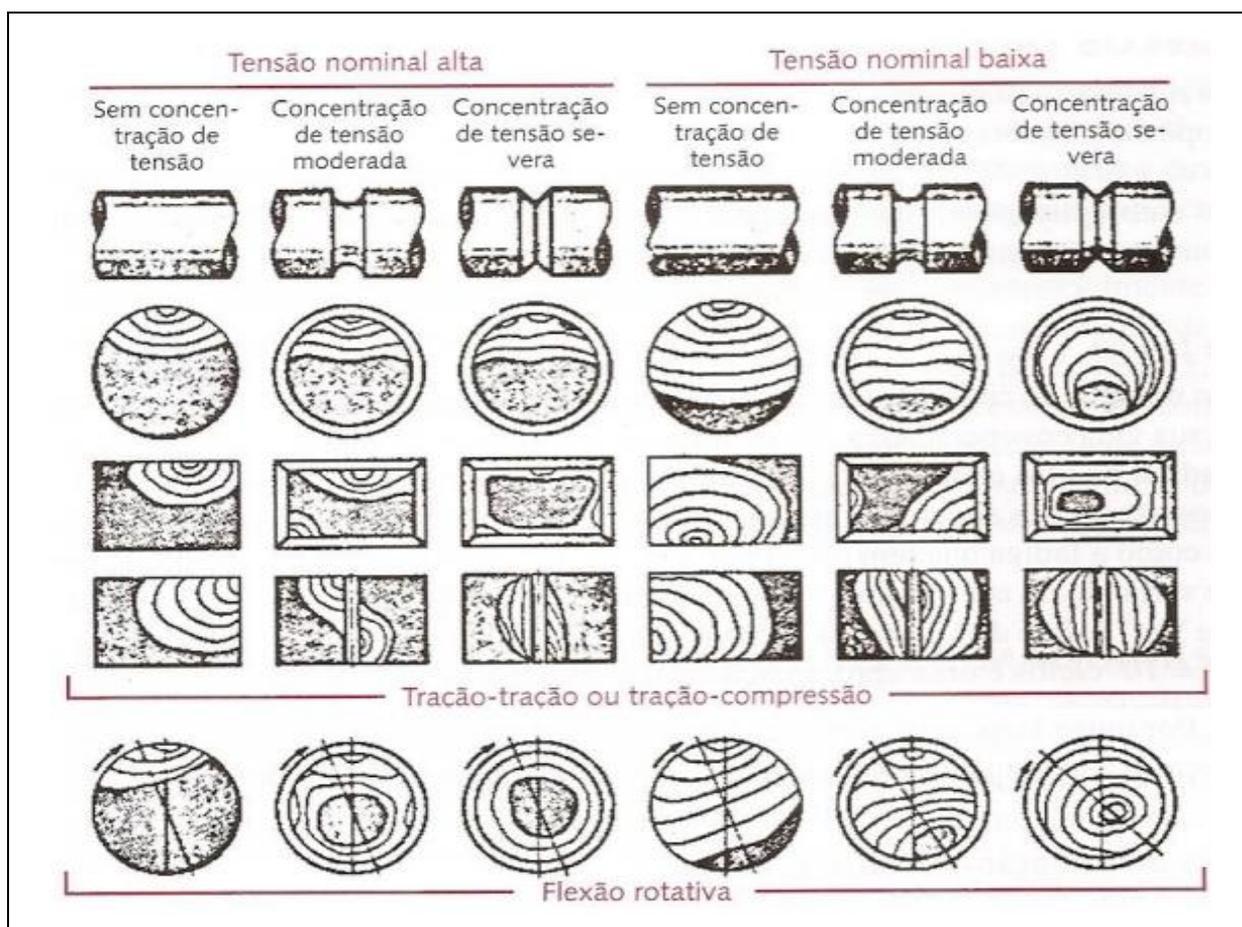
Onde, K_f é o fator de concentração de tensão de fadiga, σ_{\max} , tensão máxima do corpo de prova e σ_0 , tensão no corpo de prova com entalhe.

De maneira geral, os materiais possuem sensibilidade ao entalhe e concentradores de tensões diferentes. No qual, os materiais mais dúcteis possuem menor sensibilidade ao entalhe, enquanto que os materiais frágeis são geralmente mais sensíveis aos entalhes. Logo, os materiais que possuem baixa resistência e baixa dureza, normalmente apresentam uma menor sensibilidade quando comparados aos materiais de alta resistência e alta dureza. Outro fator de influencia na sensibilidade do entalhe, é o raio de arredondamento, que mede as

descontinuidades, assim quanto mais a sua medida tender a zero, menor será a sensibilidade do material ao entalhe (NORTON, 2013).

Na Figura 11, superfícies com fratura por fadiga em componentes com e sem concentradores de tensão, com seções transversais retangulares e circulares submetidas a várias condições de carregamento, são observadas.

Figura 11 – Representação esquemática das superfícies de fratura de fadiga



Fonte: Norton (2013, p. 310).

2.11 Ensaios de fadiga

Este tipo de ensaio exige muito do equipamento para a realização do teste. O principal objetivo do ensaio por fadiga é demonstrar quanto o material resiste antes

da fratura sendo submetido a tensões repetitivas, durante um número elevado de ciclos (SANTOS, 2008).

Conforme Marques e Arevalos (2011), os ensaios de fadiga baseiam-se na utilização de uma série de corpos de prova de acordo as diferentes solicitações dos ensaios de fadiga realizados, onde os corpos de prova são submetidos a cargas cíclicas, tensões máximas e mínimas e a um determinado número de ciclos até que ocorra sua fratura. Assim, através dos ensaios são definidos o limite de tensão e tempo de uso de um determinado material.

Geralmente obtêm-se resultados mais satisfatórios quando o ensaio é realizado utilizando a própria peça produzida em condições normais de produção, como: rodas de automóveis, pontas de eixo, molas entre outros. Contudo, muitas vezes se torna impossível ensaiar os produtos, assim, é necessário a utilização de corpos de prova padronizados. Os equipamentos utilizados para os ensaios de fadiga são compostos por sistemas de solicitação de cargas, que permitem a modificação da intensidade e o sentido do esforço. Conseqüentemente, o ensaio é finalizado quando há ruptura do corpo de prova (MARQUES; AREVALOS, 2011).

2.11.1 Tipos de ensaios

Segundo Souza (1995), os ensaios mecânicos de fadiga mais comuns são: torção, tração-compressão (axial) e flexo rotativa. Cada ensaio possui diferentes tipos de solicitação de carregamento. Com isso, o limite de resistência à fadiga relaciona-se com cada tipo de carregamento. Estes testes são relacionados de acordo com as solicitações desejadas.

2.11.1.1 Ensaio de fadiga axial

Conforme Marques e Arevalos (2011), o ensaio de fadiga axial é utilizado para estabelecer o efeito da variação em diferentes materiais, geometrias, níveis de tensão,

acabamentos superficiais, entre outros fatores, quando sujeitos a solicitações diretas e a um elevado número de ciclos. Os resultados apresentados podem servir de guia para a escolha e utilização do material adequado, quando o mesmo está submetido a oscilações e níveis de tensão.

De acordo com Brandão (2013), as solicitações impostas nesse ensaio são exclusivamente de tração e compressão. Deste modo, os testes são praticados com máquinas de tração com cargas cíclicas. Esses equipamentos são controlados por programas específicos, os quais controlam a frequência e a carga de tração e compressão até que ocorra a fratura catastrófica no corpo de prova.

De uma maneira resumida, Marques e Arevalos (2011) relatam uma sequência de passos para um ensaio de fadiga por tensões uniaxiais (tração e compressão):

- a) O corpo de prova é submetido a um ciclo alternado de tensões, com um amplitude máxima de tensão com cerca de $2/3$ do limite de resistência a tração do material;
- b) É realizada a contagem do número de ciclos até que o ocorra a ruptura do material;
- c) O mesmo processo é realizado com um número maior de corpos de prova para que haja confiabilidade e garanta uma quantidade significativa de testes;
- d) Em seguida, realiza-se o mesmo procedimento em novos corpos de prova, tendo uma amplitude de tensão máxima gradativamente menor.
- e) Correlaciona-se então os dados colhidos para cada corpo de prova, gerando assim uma relação tensão x número de ciclos até a falha.

2.11.1.2 Ensaio de torção

O ensaio de torção é empregado em corpos de prova cilíndricos, os quais são submetidos a solicitações de torção alternada. O equipamento utilizado é muito similar

ao ensaio de fadiga por tração-compressão, diferencia-se unicamente pelo esforço aplicado. Ainda segundo Marques e Arevalos (2011), para um material dúctil o número de ciclos esperado para o limite de fadiga sob torção é cerca de 58% do número de ciclos obtidos através do ensaio sob flexão.

2.11.1.3 Ensaio de flexão rotativa

Ávila (2005) cita que em máquinas de ensaio de flexão rotativa, todo o corpo de prova está submetido a tensões alternadas puras. Salienta que para esse tipo de ensaio a tensão média é nula e a amplitude da tensão é igual a máxima solicitação aplicada.

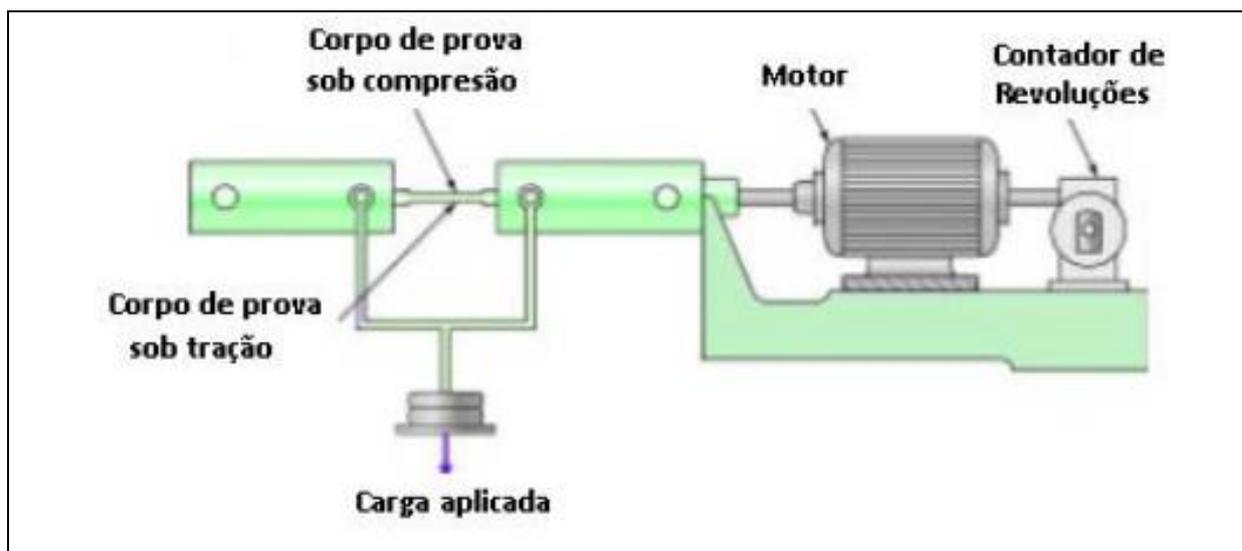
Segundo Padilha (2004), a região em rotação entre as partes sob flexão está submetida a um momento fletor em seu comprimento. Com isso, qualquer área da superfície do corpo de prova está sujeita a uma reversão de tensão completa. Quando o corpo de prova está com uma compressão máxima na parte superior, a inferior estará com uma tração máxima.

De acordo com Marques e Arevalos (2011), o teste inicia com um certo nível de tensão até que ocorra a fratura do corpo de prova. Em seguida, registra-se o nível tensão aplicado e o número de ciclos suportados. Após, são ensaiados um número maior de corpos de prova, com níveis de tensão diferentes. Posteriormente, registra-se os dados que são plotados como resistência à fadiga em função do número de ciclos. Os dados coletados são apresentados em uma curva S-N.

O equipamento para o ensaio flexo-rotativo é constituído por um contador de giros que registra o número de ciclos até a fratura do corpo de prova, um motor responsável pela geração da rotação, um aplicador de carga que aplica a tensão requerida para cada teste e suportes para o corpo de prova, onde eles são fixados para os testes (MARQUES; AREVALOS, 2011).

Na Figura 12, o esquema de um equipamento para o teste de fadiga por flexão rotativa é representado.

Figura 12 – Esquema de uma máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa



Fonte: Udomphol (2012, apud BRANDÃO, 2013, p. 28).

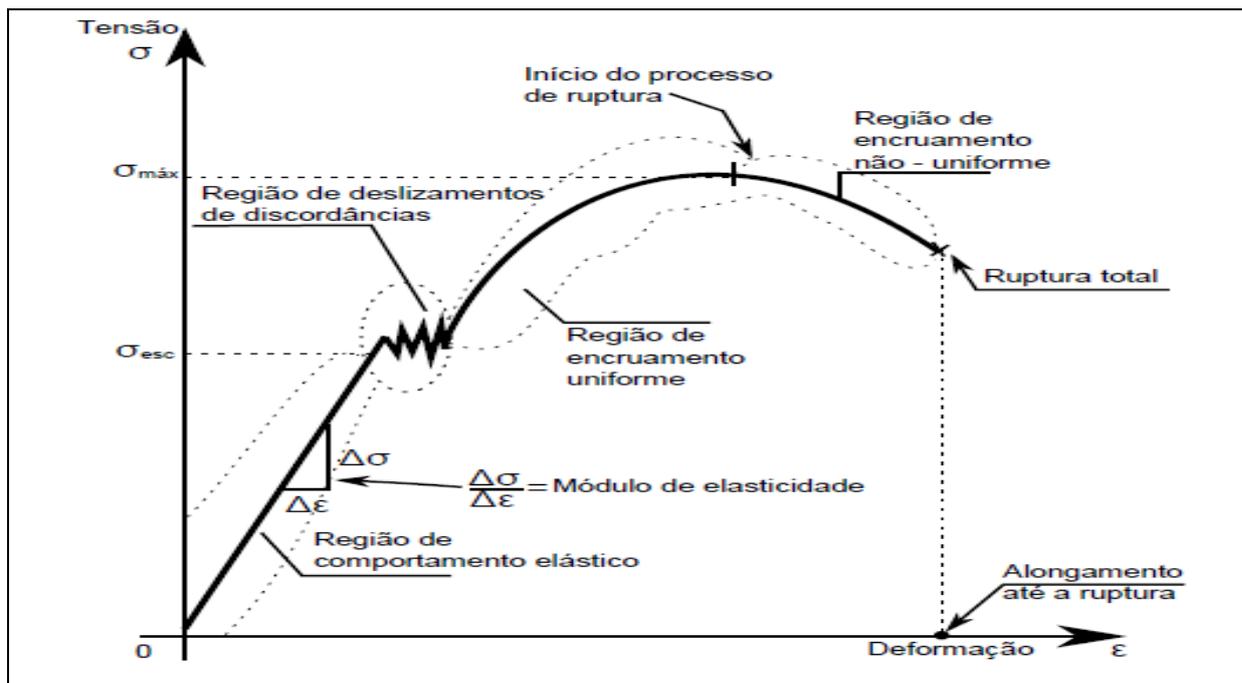
2.12 Ensaio de tração

Segundo Bluhm e Morrisey (1965, apud BRANDÃO, 2013), na engenharia, com o ensaio de tração, tem-se maior facilidade para realizar e reproduzir resultados para determinar as propriedades mecânicas de um material.

Trata-se de um ensaio destrutivo, que é realizado aplicando-se uma sollicitação de tração uniaxial em um material. As deformações acontecem ao longo do corpo de prova até sua ruptura. Quando se alcança a tensão máxima suportada pelo material, o corpo de prova não sofre mais deformação. A partir desse ponto ocorre o fenômeno da estrição, ou seja, diminuição da secção do corpo de prova (SOUZA, 1982).

O resultado desse ensaio geralmente é plotado em uma curva tensão x deformação, conforme a Figura 13, onde observa-se o comportamento de um material metálico até sua ruptura (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2008).

Figura 13 – Curva tensão x deformação



Fonte: Garcia, Spim e Santos (2008, p. 35).

Através desse ensaio pode-se determinar algumas propriedades do material, como: módulo de elasticidade, tensão de escoamento, deformação e porcentagem de alongamento.

➤ Módulo de elasticidade

Segundo Callister Jr. (2008), o nível em que uma estrutura se deforma ou se alonga depende diretamente da solicitação empregada. Geralmente nos metais sob uma tensão de tração baixa, a deformação e a tensão são equivalentes entre si, de acordo com a relação:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (12)$$

Onde, σ é a tensão aplicada, E é o módulo de elasticidade e ϵ é a deformação específica.

➤ **Tensão de escoamento**

O fenômeno do escoamento ocorre onde o nível de tensão dá início a deformação plástica (CALLISTER JR., 2008).

De acordo com Callister Jr. (2008), quando não existir um ponto bem definido para a curva tensão deformação, ou seja, o fim da deformação elástica e o início da deformação plástica, o ponto de escoamento a ser considerado define-se pelo ponto onde inicia o afastamento da linearidade da curva tensão-deformação. Assim o escoamento é definido pelo ponto onde uma linha reta paralela está a porção elástica, passando pela deformação de 0,2% da deformação total.

Através da equação pode-se obter o valor da deformação do material.

$$\lambda = \left(\frac{L_f - L_i}{L_i} \right) \times 100 \quad (13)$$

Onde,

λ = Deformação do material

L_f = Comprimento final

L_i = Comprimento inicial

Segundo Callister Jr. (2008), antes do início do ensaio, o corpo de prova é marcado e com as deformações decorrentes do ensaio de tração são calculados os valores de estricção e alongamento, de acordo com a equação.

$$\varphi = \left(\frac{A_i - A_f}{A_f} \right) \times 100 \quad (14)$$

Onde,

φ = estrição do material

A_i = área da secção inicial

A_f = área da secção final

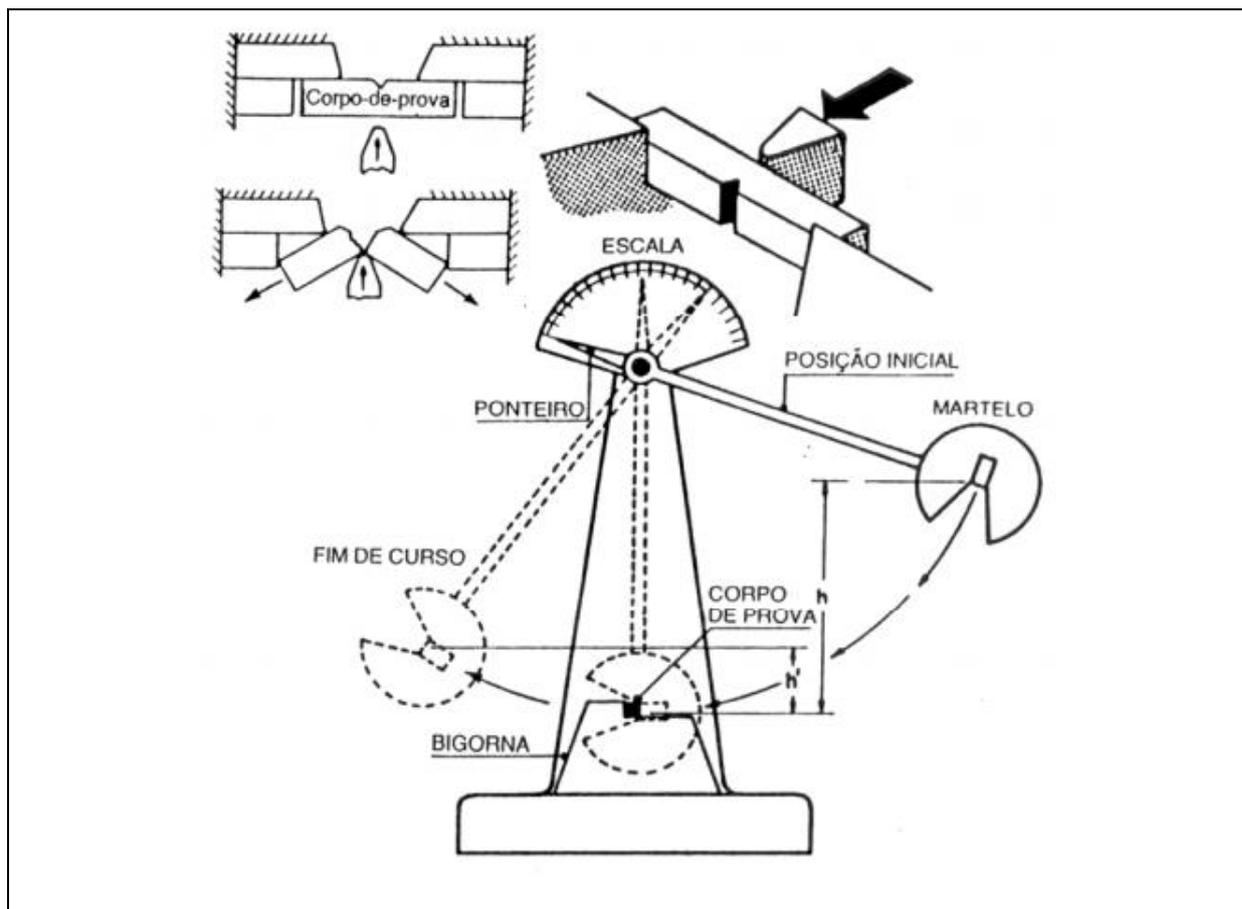
2.13 Ensaio de dureza

A dureza trata da medida da resistência que um material possui à deformação permanente (plástica). Ela é quantificada empregando uma ponta de penetração na superfície do corpo de prova. Esse penetrador, ou ponta de penetração, em sua maioria no formato de esfera ou cone, é constituído de um material mais duro do que a amostra. Os ensaios são frequentemente realizados aplicando uma determinada carga no penetrador, perpendicular à superfície da amostra. Em seguida, é retirado o penetrador da superfície. Assim, pela diferença de profundidade empregada pelo penetrador o número da dureza é calculado de maneira empírica, ou observa-se um valor em um mostrador (CALLISTER JR., 2008).

2.14 Ensaio de impacto (*charpy*)

O ensaio de *Charpy* trata-se de um ensaio de impacto, mais utilizado para mensurar a quantidade de energia que um material consegue absorver durante a fratura (CHIAVERINI, 1986).

Segundo Souza (1982), o ensaio inicialmente conta com o pêndulo a uma determinada altura, tendo o corpo de prova preso em um suporte na base do equipamento, em seguida o martelo do pêndulo é liberado, e com o impacto o corpo de prova é rompido. A altura da elevação do martelo após o contato com o corpo de prova comparada com a posição inicial do pêndulo fornece o resultado do ensaio, a quantidade de energia absorvida pelo corpo de prova. O esquema da realização do ensaio de impacto pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 – Máquina de ensaio *Charpy*

Fonte: Callister Jr. (2002, p. 165).

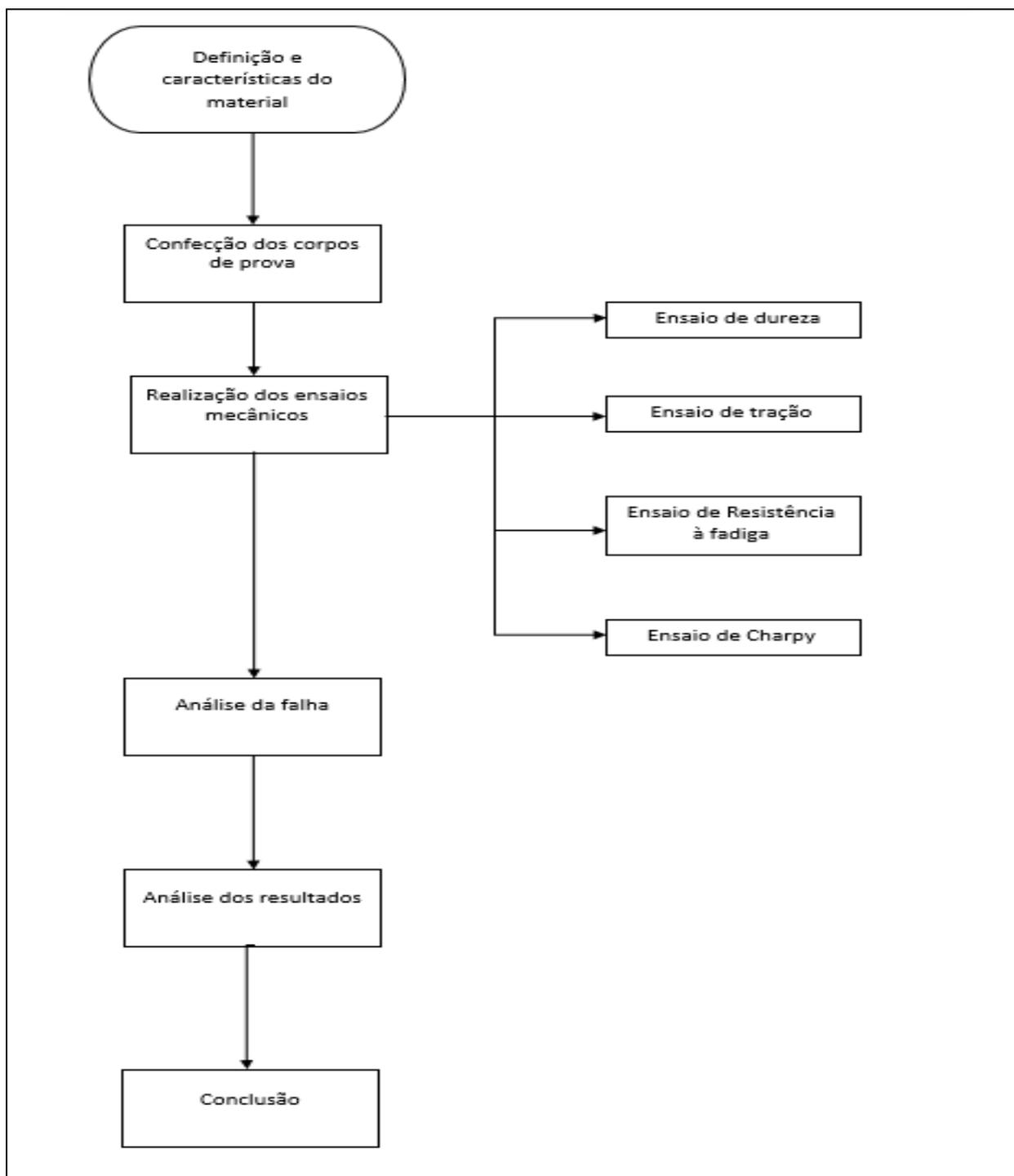
3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve de forma breve as propriedades do material utilizado para os testes, assim como os processos envolvidos nas etapas de execução dos experimentos. Detalha as geometrias e dimensões dos corpos de prova utilizados em cada ensaio proposto para descrever o fenômeno fadiga.

3.1 Fluxograma

As etapas desenvolvidas nesse trabalho é apresentada pelo fluxograma da Figura 15.

Figura 15 – Fluxograma representando a metodologia utilizada no trabalho



Fonte: Do autor (2016).

3.2 Materiais

O material utilizado para a realização dos ensaios foi o aço SAE 4140, muito utilizado na fabricação de componentes mecânicos. Conforme Chiaverini (2005), trata-se de um aço de médio carbono e baixa liga, composto por Cr e Mo o que proporciona ao aço uma boa resistência com um custo relativamente baixo para os componentes. Os valores para a sua composição química são especificados pela Norma NBR NM 87 (ABNT, 2000) e estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição química do aço SAE 4140

Aço	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al
4140	0,38 – 0,43	0,15 – 0,30	0,75 – 0,90	0,025 máx.	0,025 máx.	0,25 máx.	0,90 – 1,10	0,15 – 0,25	0,05 máx.	0,02 – 0,08

Fonte: Norma NBR NM 87 (ABNT, 2000, p. 9).

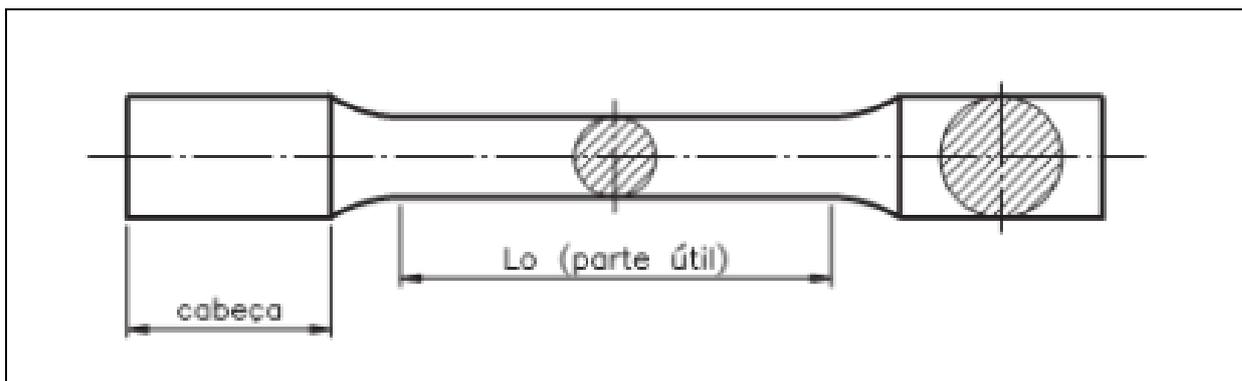
3.3 Métodos

O trabalho envolveu as seguintes metodologias experimentais: confecção de corpos de prova, ensaios mecânicos propostos e análise da falha por fadiga.

3.3.1 Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados no ensaio de tração foram usinados e confeccionados de acordo com a ilustração demonstrada na Figura 16, seguindo as especificações da Norma NBR 6892 (ABNT, 2002).

Figura 16 – Representação do corpo de prova



Fonte: Dalcin (2007, p. 19).

De acordo com Dalcin (2007) (FIGURA 16), a parte útil (L_0) é a região onde realiza-se as medições das propriedades e as regiões extremas (cabeça) servem para fixação do corpo de prova na máquina.

O corpo de prova para o ensaio de impacto *Charpy* segue as especificações da Norma ASTM E23 (ASTM, 2002). Na Figura 17 observa-se um modelo do corpo de prova para o ensaio de impacto.

Figura 17 – Modelo do corpo de prova para ensaio de impacto



Fonte: Do autor, através do Laboratório de Engenharia Mecânica UNIVATES (2016).

3.3.2 Ensaio de dureza

Com o propósito de analisar a dureza do material, foram realizados testes de dureza na escala Rockwell (HRC), com o durômetro PANTEC, modelo RASH-RB, com penetrador de diamante e capacidade de carga de 150Kg.

3.3.3 Ensaio de tração

Com o objetivo de estabelecer as propriedades mecânicas do material, os ensaios de tração foram executados no laboratório da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em uma Máquina Universal de Ensaio Mecânicos, seguindo as especificações da NBR 6892 (ABNT, 2002). Esse equipamento é da marca SHIMADZU, modelo AG-X, com capacidade de empregar forças de 250 KN. Na Figura 18 pode-se visualizar o equipamento utilizado.

Figura 18 – Máquina universal de ensaios mecânicos



Fonte: Do autor através do Laboratório da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2017).

Para obter os valores para deslocamento do corpo de prova foi utilizado um extensômetro da marca SHIMADZU. Na Figura 19 pode ser observado o equipamento.

Figura 19 – Extensômetro



Fonte: Do autor, Laboratório da URGs (2017).

3.3.4 Ensaio de resistência à fadiga

O equipamento utilizado para os testes de fadiga é suíço da marca RUMUL, modelo TESTRONIC 250 KN, que trabalha na frequência de ressonância do material. O equipamento pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 – Máquina para ensaio de fadiga



Fonte: Empresa Metalmecânica (2017, [arquivo particular]).

Dentro do objetivo do presente trabalho, o ensaio que foi aplicado é chamado de *Staircase*. Esse método ensaia o componente a 10 milhões de ciclos. Não havendo a fratura do material, a carga de oscilação é aumentada, porém, se houver a ruptura, a sollicitação é reduzida, repetindo o ensaio com uma nova carga e um novo componente. O método de ensaio de fadiga segue as Normas ASTM E739 (ASTM, 2015) e ABNT ISO 12107 (ISO, 2012).

3.3.5 Ensaio de impacto (*Charpy*)

O ensaio de impacto foi realizado com a máquina de *Charpy*, localizada no laboratório de engenharia mecânica da UNIVATES. O equipamento é o PANTEC, modelo FIT-300, ilustrado na Figura 21. A Norma a ser seguida é ASTM E23 (ASTM, 2002).

Figura 21 – Máquina de Charpy



Fonte: Do autor, através do Laboratório de Engenharia Mecânica UNIVATES (2017).

3.3.6 Análise das superfícies de fratura

Após a realização dos ensaios de fadiga, os corpos de prova foram submetidos à análise de falha. Foi observado o aspecto visual da fratura dos corpos de prova, tendo em vista a identificação dos três estágios da fratura por fadiga, conforme descrito no Capítulo 2.3. Para isso, foi utilizado um microscópio manual da marca DINO-LITE, modelo AM4013 MT, ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Microscópio manual



Fonte: Do autor, através do Laboratório de Engenharia Mecânica UNIVATES (2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados a seguir são discutidos conforme estabelecem as normas para cada ensaio mecânico. O material utilizado chega à empresa recozido e normalizado. Após o processo de fabricação dos parafusos, eles recebem tratamento térmico de austenitização e revenimento, para que se obtenha valores de propriedades mecânicas necessárias para o produto acabado. Ressalta-se que os ensaios foram realizados com o material no seu primeiro estado, provido do fornecedor. E no ensaio de fadiga, com o produto acabado.

4.1 Elaboração dos corpos de prova

Para confecção dos corpos de prova foi utilizado um aço SAE 4140, cujo material foi retirado de uma barra de aço trefilada, normalizada e recozida com diâmetro de 25,40mm, como mostra a Figura 23.

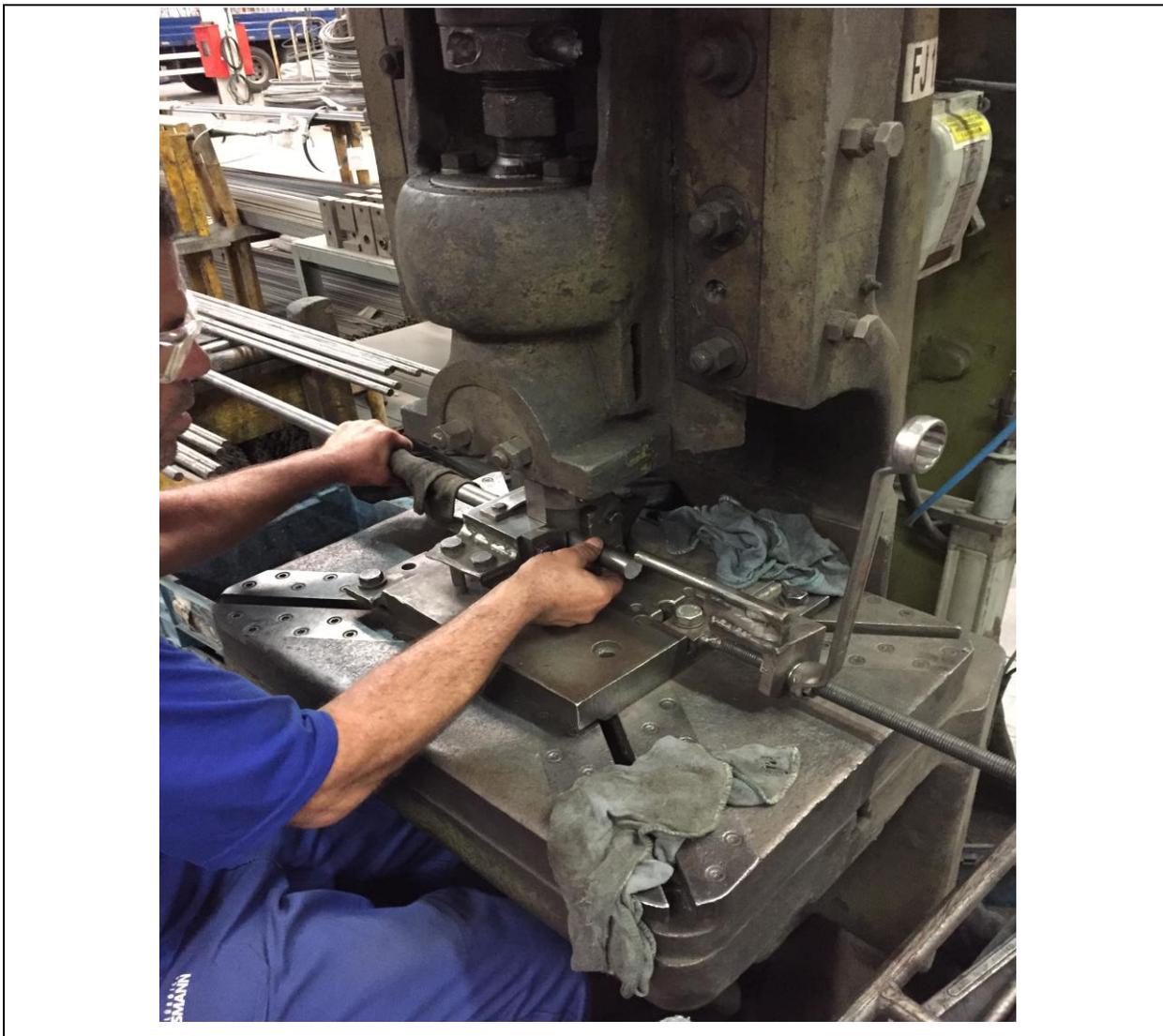
Figura 23 – Barras de aço SAE 4140



Fonte: Do autor, através da empresa Metalmecânica (2017).

Seguindo dimensões finais da Norma ASTM A370-07^a, para padrões pequenos de corpos de prova, a barra passa por uma prensa hidráulica, conforme demonstrado na Figura 24.

Figura 24 – Prensa hidráulica para corte



Fonte: Do autor, através da empresa Metalmecânica (2017).

Já em formato de tarugos, são necessários os acabamentos para os ensaios. Para o ensaio de tração, o corpo de prova precisa ser usinado para que suas geometrias sigam as dimensões impostas pelas Norma NBR 6892 (ABNT, 2002). Para o processo de usinagem, utilizou-se um torno CNC, marca TRAVIS e modelo TR-1 XP. Na Figura 25 observa-se o início da usinagem do corpo de prova.

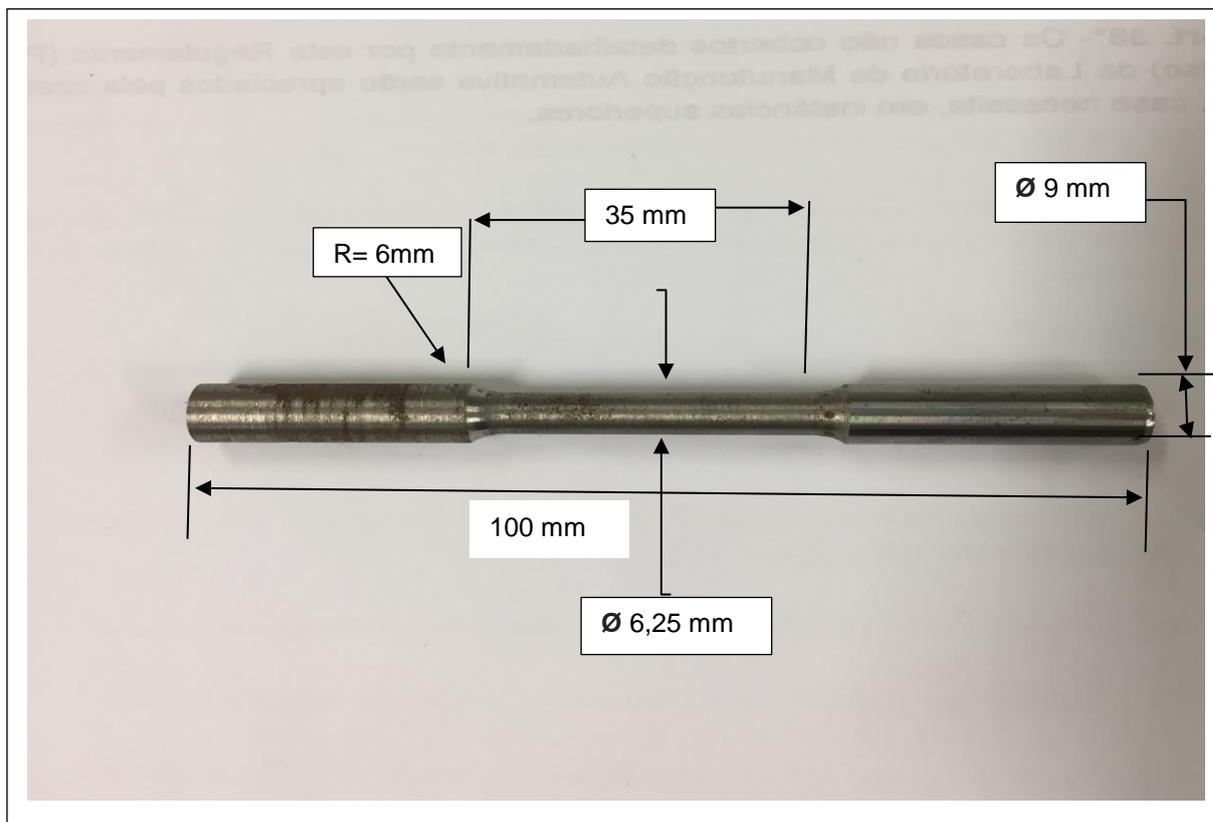
Figura 25 – Usinagem dos corpos de prova de tração



Fonte: Do autor, através do Laboratório de Engenharia Mecânica UNIVATES (2017).

Assim, após a usinagem, o corpo de prova já está no padrão requerido pela Norma para o ensaio de tração. Na Figura 26 observa-se o corpo de prova acabado após o processo de usinagem e suas dimensões.

Figura 26 – Corpos de prova para ensaio de tração



Fonte: Do autor, através do Laboratório de Engenharia Mecânica UNIVATES (2017).

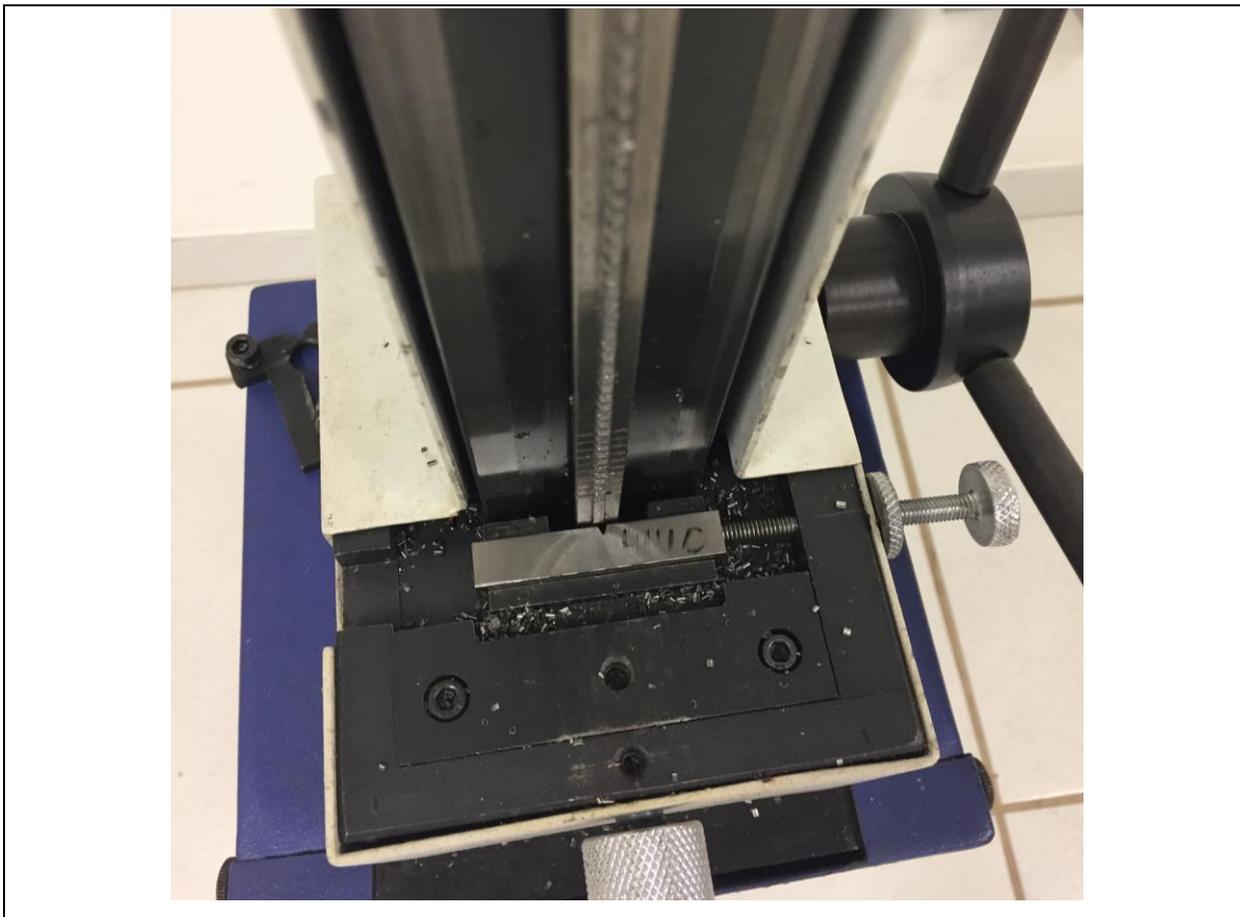
Da mesma forma, para a obtenção das dimensões necessárias na confecção dos corpos de prova para ensaio de *Charpy*, foi necessária a utilização de uma fresadora, marca DIPLOMAT e modelo FVF 2500, observada na Figura 27, e de uma brochadeira, marca PANTEC, para a realização do entalhe no corpo de prova, vista na Figura 28.

Figura 27 – Fresadora



Fonte: Do autor, através do Laboratório de Engenharia Mecânica UNIVATES (2017).

Figura 28 – Brochadeira



Fonte: Do autor, através do Laboratório de Engenharia Mecânica UNIVATES (2017).

Após a realização do entalhe, tem-se o corpo de prova com as dimensões estabelecidas pela Norma ASTM E23 (ASTM, 2002), o qual pode ser observado na Figura 29 e duas dimensões na Tabela 7.

Figura 29 – Corpo de prova para ensaio de *Charpy*



Fonte: Do autor, através do Laboratório de Engenharia Mecânica UNIVATES (2017).

Tabela 7 – Dimensões do corpo de prova para ensaio de impacto

Largura (mm)	10
Altura (mm)	10
Comprimento (mm)	55
Entalhe	Ângulo de 45° e 2 mm de profundidade

Fonte: Do autor (2017).

Para o ensaio de fadiga foi utilizado um componente, um parafuso M8. Portanto, não foi necessário a confecção dos corpos de prova. Na Figura 30 observa-se o modelo do parafuso.

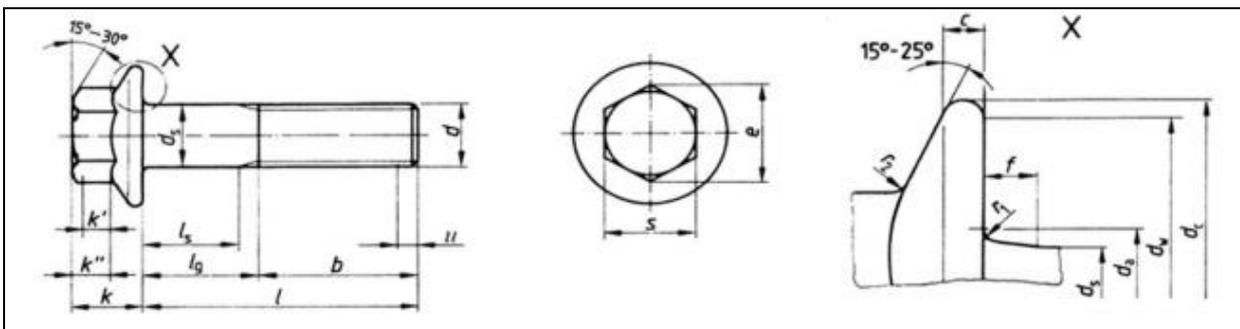
Figura 30 – Parafuso M8 utilizado no ensaio de fadiga



Fonte: Do autor (2017).

A geometria do parafuso pode ser visualizada na Figura 31 assim como seus valores na Tabela 8.

Figura 31 – Geometria do parafuso



Fonte: Adaptado pelo autor da Norma DIN EN 1665 (EUROPEAN STANDARD, 1998).

Tabela 8 – Dimensões do parafuso

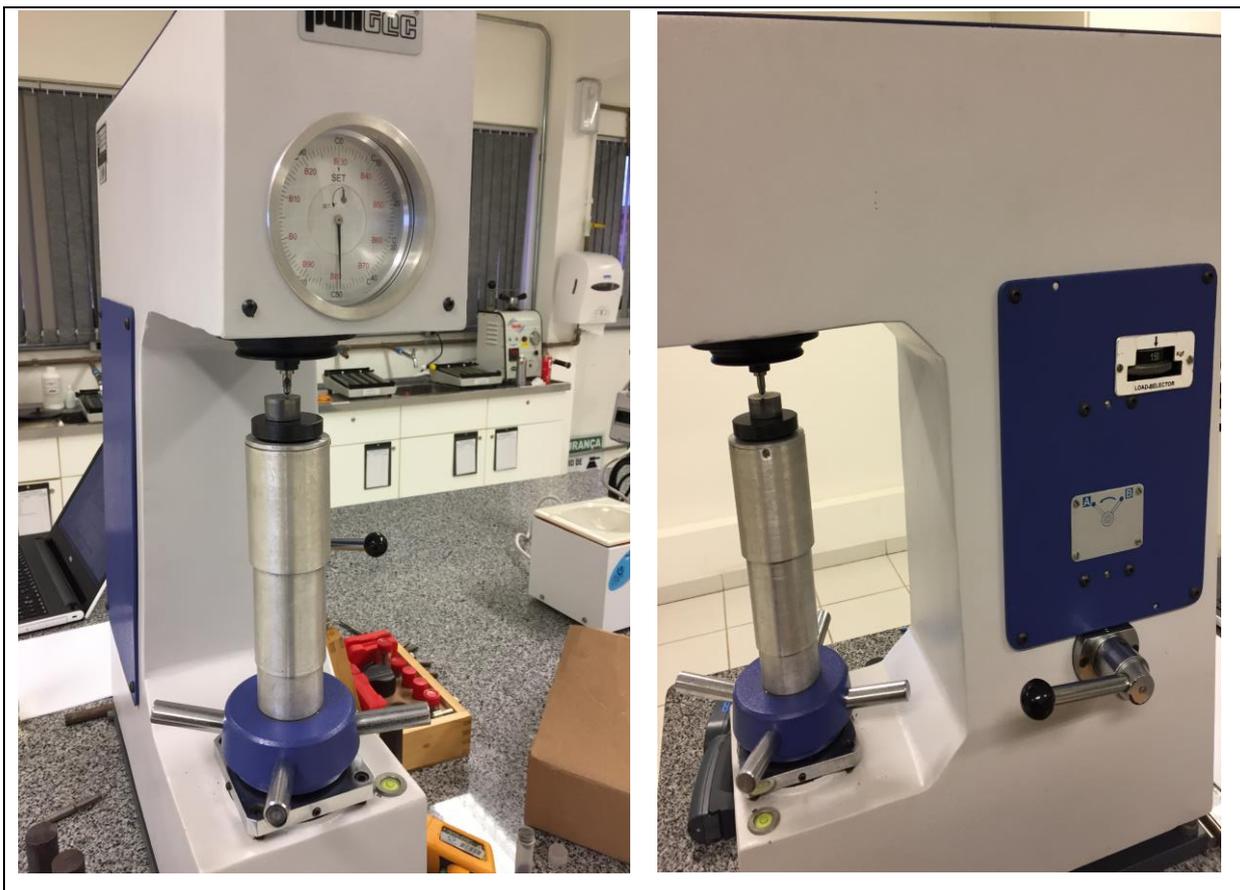
	mm
P	1,25
b min (1)	22
bmin(2)	28
b min (3)	41
c	1,2
dc	17,9
dw	15,8
k	8,1
k'	3,9
k''	4,1
r1	0,4
r2	0,5
s (min)	12,73
s (max)	13
e (min)	14,26
e (max)	15,01
da	9,2
ds (min)	7,8
ds (max)	8
f	2
u (min)	1,88
u (max)	2,5

Fonte: Adaptado pelo autor da Norma DIN EN 1665 (EUROPEAN STANDARD, 1998).

4.2 Ensaio de dureza

Para a realização do ensaio de dureza foram realizadas cinco medições em quatro diferentes amostras. Na Figura 32 observa-se o durômetro utilizado já posicionado com a ponta de diamante encostada na superfície do corpo de prova para início do ensaio.

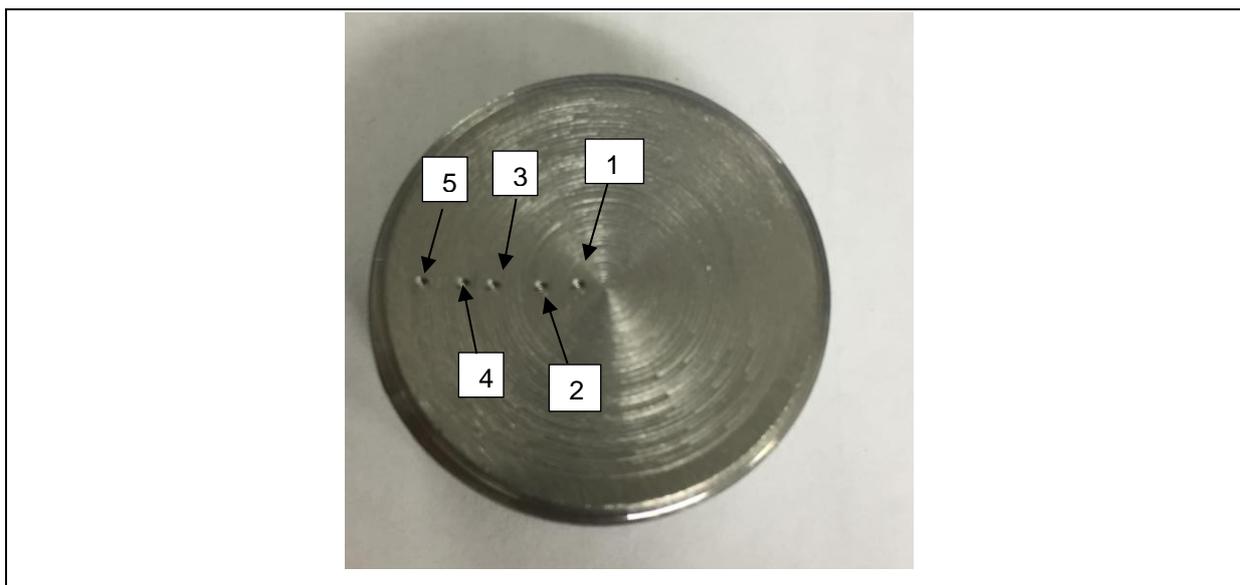
Figura 32 – Durômetro



Fonte: Do autor, através do Laboratório de Engenharia Mecânica UNIVATES (2017).

Para uma maior confiabilidade, cada amostra foi ensaiada cinco vezes em diferentes locais de sua superfície, iniciando do núcleo até próximo da sua superfície, como pode ser observado na amostra representada na Figura 33.

Figura 33 – Amostra ensaiada no durômetro



Fonte: Do autor, através do Laboratório de Engenharia Mecânica UNIVATES (2017).

Após a realização dos ensaios, os resultados encontrados estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores médios de dureza de núcleo

Dureza de Núcleo Encontrada (Rockwell)							
Amostras	Nº do ensaio					Valor médio (HRc)	Desvio padrão
	1	2	3	4	5		
1	27	28	27	28	27	27,4	0,49
2	27	31	28	26	28	28	1,67
3	26	26	27	27	28	26,8	0,75
4	27	28	29	30	29	28,6	1,02

Fonte: Do autor (2017).

Percebe-se que os resultados obtidos para o aço SAE 4140 encontram-se nas faixas de dureza estabelecidas pela norma DIN 10083 (EUROPEAN STANDARD, 2006) para temperatura 25°C, os quais são 26 à 42HRc.

4.3 Ensaio de tração

O ensaio inicia-se com o acoplamento do corpo de prova nas garras da máquina e com o posicionamento do extensômetro no corpo de prova. Na Figura 34 observamos o início do ensaio.

Figura 34 – Máquina de ensaio de fadiga (corpo de prova acoplado com extensômetro)



Fonte: Do autor, através do Laboratório da UFRGS (2017).

Este ensaio foi realizado em quatro amostras do material, obtendo um valor médio de resistência à tração e escoamento do material, conforme a Tabela 10 para o aço 4140.

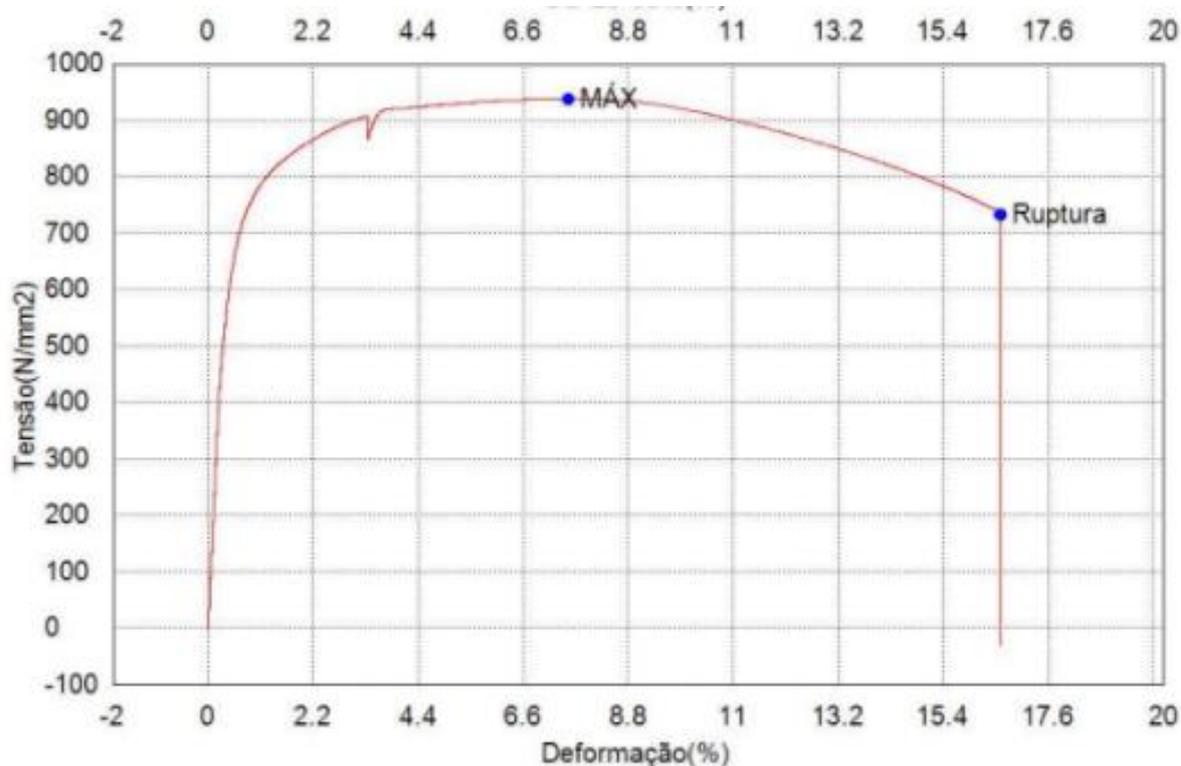
Tabela 10 – Valores de resistência à tração e de escoamento para o aço 4140.

Resistência à tração e escoamento do aço 4140 (Mpa)						
Nº do ensaio						
Amostras	1	2	3	4	Valor médio	Desvio padrão
Resistência à tração	937,91	944,73	934,18	918,17	933,748	11,266
Resistência ao escoamento	661,34	658,43	661,63	664,91	661,576	2,6499
Área do corpo de prova (mm ²)	31,172	31,172	31,172	30,484	31	0,344

Fonte: Do autor (2017).

O comportamento da amostra 1 pode ser observado no gráfico curva de tensão *versus* deformação em área, obtido no ensaio de tração pelo equipamento no Gráfico 1.

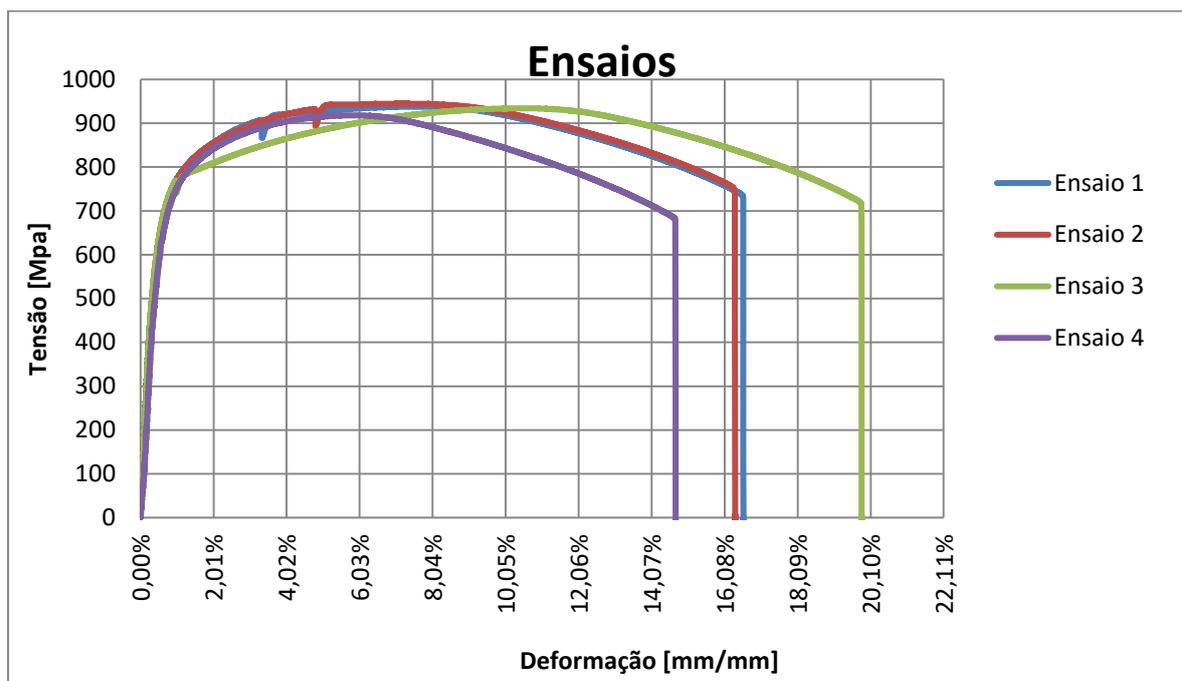
Gráfico 1 – Gráfico tensão x deformação para o aço 4140 (amostra 1)



Fonte: Do autor, através do Laboratório da UFRGS (2017).

Com os ensaios realizados pode-se construir um único gráfico tensão *versus* deformação, observado no Gráfico 2, com os resultados das quatro amostras para comparar o comportamento das curvas.

Gráfico 2 – Gráfico tensão x deformação para o aço 4140 (todas amostras)



Fonte: Do autor (2017).

De acordo com os dados disponibilizados pelo fornecedor Arcelormittal Brasil (2017) para o limite de resistência à tração e limite de escoamento, os resultados encontram-se dentro dos parâmetros, ficando acima dos valores especificados para limite de resistência à tração de 862 MPa e semelhante ao limite de escoamento de 690 Mpa.

De acordo com outros fornecedores pesquisados, como Gerdau (2017), o valor mínimo para resistência à tração é de aproximadamente 758 MPa para aços normalizados, tendo um limite de escoamento com valor de aproximadamente 655 MPa.

Tonieto (2011) obteve um valor de 833,96 MPa para resistência à tração. Confrontando com os resultados obtidos, percebe-se que o valor da resistência à tração ficou superior a essa medição, satisfazendo assim as condições necessárias.

De acordo com as especificações da Norma para o ensaio de tração, obteve-se a resistência ao escoamento com um valor médio de 661,576 MPa, ficando muito próximo aos valores disponibilizados por dois diferentes fornecedores.

4.3.1 Alongamento

Para o cálculo do alongamento foi utilizada a Equação 13, após o término dos ensaios dos corpos de prova na máquina de tração. Desta forma, os resultados obtidos para o aço 4140 estão dispostos na Tabela 11.

Tabela 11 – Alongamento para o aço 4140

Alongamento do aço 4140						
Amostras	Nº do ensaio				Valor Médio	Desvio Padrão
	1	2	3	4		
Li (mm)	25	25	25	25	25	0
Lf (mm)	29,15	29,09	29,96	29,058	29,3145	0,3741
Lf - Li (mm)	4,15	4,09	4,96	4,058	4,3145	0,3741
Alongamento (%)	16,6	16,36	19,84	16,232	17,258	1,4966

Fonte: Do autor (2017).

Os valores encontrados podem ser comparados com os valores de deformação gerados pelo equipamento e demonstrados no gráfico de tensão x deformação do Gráfico 2. Apresentando valores semelhantes aos obtidos pela máquina.

4.3.2 Estricção

A estricção foi calculada através da Equação 14, após o ensaio dos corpos de prova na máquina de tração. Os resultados para o aço ASTM 4140 (2013) estão expressos na Tabela 12.

Tabela 12 – Estricção para o aço ASTM 4140

Estricção do aço 4140						
Amostras	Nº do ensaio				Valor Médio	Desvio Padrão
	1	2	3	4		
Di (mm)	6,3	6,3	6,3	6,23	6,283	0
Df (mm)	4,51	4,36	4,39	4,35	4,403	0,064
Ai (mm)	31,172	31,172	31,172	30,484	31,000	0,298
Af (mm)	15,975	14,930	15,136	14,862	15,226	0,444
Estricção (%)	49	52	51	51	51	1,273

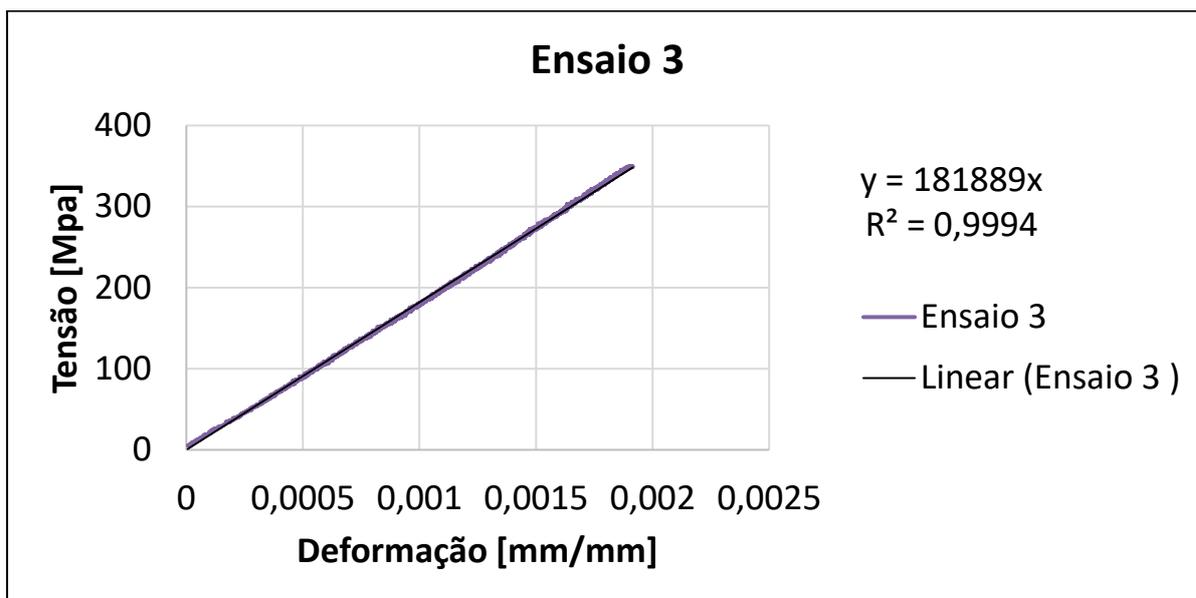
Fonte: Do autor, através do Laboratório de Engenharia Mecânica UNIVATES (2017).

Catálogos concedidos pelos fornecedores Arcelormittal Brasil (2017) e Gerdau (2017) apresentam dois valores para limites de estricção com tratamentos térmicos diferentes. Para um material recozido, o valor é de até 57% de redução de área e, para um material normalizado, o valor máximo é de 47% de redução. O material ensaiado, que é normalizado e recozido, apresentou uma estricção menor do que apresentado pelos fornecedores, que pode ser devido aos tratamentos utilizados ou devido a uma metodologia diferente de cálculo.

4.3.3 Módulo de elasticidade

O Módulo de Elasticidade, ou Módulo de Young, foi obtido através da inclinação da parte linear das curvas de carregamento. Pode ser observado através da linha de tendência no Gráfico 3, gerado pela amostra 3.

Gráfico 3 – Linha de tendência para Módulo de Elasticidade amostra 3



Fonte: Do autor, através do Laboratório de Engenharia Mecânica UNIVATES (2017).

Através dos resultados obtidos do módulo de elasticidade para as cinco amostras, foi gerada a Tabela 13 para a apresentação dos valores dos módulos de elasticidade, da média e do desvio padrão.

Tabela 13 – Valores dos Módulos de Elasticidade para as quatro amostras

Amostras	Número de Ensaio				Média	Desvio Padrão
	1	2	3	4		
Ajuste Linear (Mpa)	183537	177662	181889	188047	182784	4293

Fonte: Do autor (2017).

De acordo com Callister Jr. e Rethwisch (2013), o módulo pode ser relacionado com a rigidez do material ou com uma resistência do material à deformação elástica. Quanto maior o valor do módulo de elasticidade, menor a capacidade de deformação do material.

Conforme Rocha (2004), os valores do módulo de elasticidade para o aço 4140 encontram-se na faixa 190 a 210 GPa, a uma temperatura de 25°C. A média do módulo de elasticidade é de aproximadamente 183 GPa, ou seja, 3,8% abaixo do limite mínimo estabelecido por Rocha (2004).

4.4 Ensaio de impacto (*charpy*)

Foram utilizadas quatro amostras para o ensaio de impacto do aço SAE 4140 e seus resultados podem, ser vistos através da Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados do ensaio de impacto do aço SAE 4140

Corpo de prova	Resultados obtidos em Joules
CP1	20
CP2	18
CP3	18
CP4	18

Fonte: Do autor, através do Laboratório de Engenharia Mecânica UNIVATES (2017).

Os resultados foram obtidos conforme as especificações da Norma ASTM E23 (ASTM, 2002) para o Ensaio de *Charpy*. Seu valor médio para energia absorvida ficou em 18,5 Joules.

Conforme catálogo de fornecedores Arcelormittal Brasil (2017) e Gerdau (2017), os valores de impacto seriam de 23J para um material normalizado e 54J para um material recozido. O material ensaiado, antes de chegar à empresa, recebe os dois tratamentos térmicos, normalizado e recozido.

4.5 Ensaio de resistência à fadiga

Para a realização do ensaio de fadiga utilizou-se um componente, um parafuso flangeado M8 X 1,25 X 90. De acordo com o ensaio de fadiga pelo método *staircase*, foram gerados quadros para a visualização dos resultados. Assim, na Tabela 15, podem-se verificar os resultados obtidos para o aço 4140.

Tabela 15 – Resultados *staircase* para o aço 4140

1	2										3	4	5	6	7	8	
σ_A (MPa)	x Falha					o Não Falha					x	o	z	f	zf	z ² f	
105,00											x	1	0	3	1	3	9
100,00					x					o		1	1	2	1	2	4
95,00		x		o		x		o				2	2	1	2	2	2
90,00	o		o				o					0	3	0	0	0	0
Amostra N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10							
Somatório das colunas 3, 4, 6, 7 e 8											4	6	-	4	7	15	
														C	A	E	

Fonte: Adaptado pelo autor de ISO 380 (1964).

Onde:

Coluna 1 – Amplitude da carga dinâmica aplicada;

Coluna 2 – Indicador dos eventos (falha “x”, não falha “o”);

Coluna 3 – Número de falhas por carga dinâmica;

Coluna 4 – Número de não falhas por carga dinâmica;

Coluna 5 – Ordinal “z”, iniciando com 0 no menor valor de carga dinâmica;

Coluna 6 – Repetição dos valores da coluna (3 ou 4) de menor soma;

Coluna 7 – Produto da coluna 5 e 6 (zf);

Coluna 8 – Produto da coluna 5 e 6 (z²f);

Esse método de análise calcula a carga dinâmica para 50% de probabilidade de sobrevivência do componente através da Equação 15.

$$F_{A50} = F_{ao} + \Delta F_{all} \left(\frac{A}{C} \pm x \right) \quad (15)$$

O desvio padrão de carga média de resistência é calculado através da Equação 16.

$$S(F_A) = 1,62\Delta F_{all} \left(\frac{CE-A^2}{c^2} + 0,029 \right) \quad (16)$$

F_{A50} = Carga dinâmica média para 50% de probabilidade de sobrevivência do componente

F_{a0} = menor carga dinâmica nas colunas 3 e 6 com um número menor de eventos

ΔF_{all} = variação da carga entre dois níveis subsequentes de carregamento

$S(F_A)$ = desvio padrão

C = resultado do somatório da coluna 6

A = resultado do somatório da coluna 7

E = resultado do somatório da coluna 8

$$\left[\begin{array}{l} x = \text{quando a coluna 6} = \text{coluna 4 (valor de + 0,5)} \\ \text{quando a coluna 6} = \text{coluna 3 (valor de - 0,5)} \end{array} \right.$$

Logo através das Equações 15 e 16 chegou-se aos seguintes resultados para F_{A50} e $S(F_A)$:

$$\sigma_{A50} = 90 + 5 * \left(\frac{7}{4} + 0,5 \right)$$

$$\sigma_{A50} = 96,25 \text{ MPa}$$

$$S(F_A) = 1,62 * 5 * \left(\frac{4 * 15 - 7^2}{4^2} + 0,029 \right)$$

$$S(F_A) = 5,80 \text{ MPa}$$

Os dados para carga dinâmica de 50% de probabilidade de sobrevivência do componente podem ser observados na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados para 50% de probabilidade para que o componente sobreviva à carga dinâmica

Material	F _{ao} (MPa)	ΔF _{all} (MPa)	A	C	E	S(F _A) (MPa)	F _{A50} (MPa)
Aço 4140	90	5	7	4	15	5,8	96,25

Fonte: Do autor (2017).

Através dados obtidos e utilizando um método estatístico, foi possível calcular a carga de oscilação para que o componente tenha 99% de probabilidade de sobrevivência. Para esse cálculo, utilizou-se a Equação 17.

$$F_{A99} = F_{A50} - t \cdot S(F_A) \quad (17)$$

Onde,

F_{A99} = carga dinâmica para 99% de probabilidade de sobrevivência do componente;

F_{A50} = carga dinâmica média para 50% de probabilidade de sobrevivência do componente;

t = constante de *student*;

S(F_A) = desvio padrão;

Tabela 17 – Distribuição da constante “t” *student*

df	0.600	0.700	0.800	0.900	0.950	0.975	0.990	0.995
1	0.325	0.727	1.376	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	0.289	0.617	1.061	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	0.277	0.584	0.978	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	0.271	0.569	0.941	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	0.267	0.559	0.920	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	0.265	0.553	0.906	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	0.263	0.549	0.896	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	0.262	0.546	0.889	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	0.261	0.543	0.883	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	0.260	0.542	0.879	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	0.260	0.540	0.876	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	0.259	0.539	0.873	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	0.259	0.538	0.870	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	0.258	0.537	0.868	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	0.258	0.536	0.866	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947

Fonte: Adaptado pelo autor de Pizzio (2005).

Para definir o valor da constante de *student* (t), é necessário cruzar o valor para probabilidade de sobrevivência desejada com o número de ensaios realizados diminuindo um ensaio do número total realizado. Nesse caso, a probabilidade de sobrevivência que se deseja é de 99% do componente e foram ensaiados 10 parafusos. O valor de ‘t’ é de 2,821, pois relaciona-se 0.990 com o valor de df da tabela como sendo 9.

Com todos os dados disponíveis, pode-se então calcular utilizando a Equação 17 para a carga dinâmica para 99% de sobrevivência do componente. Os dados e o valor para a carga dinâmica podem ser observados na Tabela 18.

Tabela 18 – Resultados para 99% de probabilidade para que o componente sobreviva a carga dinâmica

Material	F _{A50} (MPa)	T	S(F _A) (MPa)	F _{A99} (MPa)
Aço 4140	96,25	2,821	5,8	79,89

Fonte: Do autor (2017).

De acordo com Kloos e Thomala (1979), os parafusos produzidos com aço 4140 devem romper no primeiro filete de rosca, condição mais esperada devido à distribuição dos esforços do teste e efeitos de concentração de tensão neste ponto. Na Figura 35 percebe-se que realmente essa condição acontece nos parafusos ensaiados.

Figura 35 – Falha por fadiga no parafuso de aço 4140



Fonte: Do autor (2017).

Utilizando a Equação 9 ajusta-se o limite de resistência à fadiga considerando os efeitos modificadores.

$$S_e' = 0,5 S_{ut} \quad (18)$$

$$S_e' = 466,874 \text{ Mpa} \quad (19)$$

Realizando a correção para o parafuso:

➤ K_a (forjado)

$$K_a = a S_{ut}^b \quad (20)$$

$$K_a = 0,272 \times 933,748^{-0,995}$$

$$K_a = 0,3014$$

➤ $K_b = 1$

➤ $K_c \rightarrow$ Axial

$$K_c = 1$$

➤ $K_d = 1$ (temperatura ambiente)

➤ $K_e = 0,814$ (confiabilidade de 99%)

➤ $K_f = 0$ (sem acabamento)

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S_e' \quad (21)$$

$$S_e = (0,3014) \times (1) \times (0,85) \times (1) \times (0,814) \times (466,874)$$

$$S_e = 97,36 \text{ MPa}$$

Logo o valor 97,36 MPa refere-se a vida infinita do parafuso, sendo calculadas as correções percebe-se que o valor está um pouco acima da faixa de 90 a 95 MPa gerado pela máquina.

4.6 Análise de fratura

Através da análise visual da fratura é possível observar as marcas de praia características da fratura presente no material. A Figura 36 apresenta a superfície do material onde ocorreu a fratura.

Figura 36 – Fotografia obtida por microscópio manual



Fonte: Do autor, através do Laboratório de Engenharia Mecânica UNIVATES (2017).

Na Figura 36 observa-se a falha por fadiga em um parafuso após o ensaio de fadiga visualizando o início da trinca (A), as marcas de praia característica da propagação da trinca (B) e a ruptura total do parafuso (C).

4.7 Resumo dos resultados

Os resultados dos ensaios mecânicos do aço 4140 realizados em laboratório estão dispostos resumidamente na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultados gerais para o aço 4140

Condições	T(°C) = 25° C		Referência
	Normalizado e Recozido		
Propriedades	Valores médios		
Dureza (HRC)	27,7	Atende	26 a 42
Resistência à Tração (Mpa)	933,748	Atende	862 Arcelormittal 758 Gerdau
Resistencia ao Escoamento (Mpa)	661,576	Atende	690 Arcelormittal 655 Gerdau
Alongamento (%)	17,258	Atende	18 a 26% Normalizado e Recozido (Shigley)
Estricção (%)	51	Atende	47% Normalizado 57% Recozido
Módulo de Elasticidade (Mpa)	182784	Não atende	190000 a 210000
Resistência ao Impacto (J)	18,5	-	23 Normalizado 54 Recozido
Resistencia à fadiga (MPa)	vida infinita (Ensaio 99% probabilidade igual a 79,89 Mpa)	-	Calculado igual a 97,36 MPa

Fonte: Do autor (2017).

5 CONCLUSÃO

Através da realização padronizada dos ensaios mecânicos no aço 4140, é possível simular solicitações que serão aplicadas nos componentes. A escolha do material para cada aplicação deve ser feita após a realização adequada desses ensaios, evitando o emprego impróprio ou ainda o desperdício de material. Com os resultados obtidos dos ensaios, pode-se obter a previsão da vida em fadiga dos componentes, evitando consequências mais graves. Além disso, utilizar as propriedades mecânicas obtidas através de ensaios para o material de interesse é melhor do que apenas seguir as propriedades indicativas em tabelas, já que o tratamento térmico pode alterar de modo significativo os valores utilizados como referência. Por exemplo, o módulo de elasticidade é usualmente adotado como 200GPa para aços em geral e, neste caso, apresentou valores próximos a 180GPa.

Apesar de alguns parâmetros apresentarem variações de magnitude quando comparados com os valores de outros pesquisadores, de uma forma geral, os resultados obtidos neste trabalho são valores consistentes, situados dentro de limites aceitáveis, por exemplo, quanto aos limites de resistência à tração e ao escoamento. Tratando-se de mensurações experimentais, tem-se presente diversos fatores que afetam as medições: incertezas sistemáticas e aleatórias, não linearidades, incertezas nos equipamentos utilizados, falha do operador, entre outros. Estes são alguns dos parâmetros que podem ser citados, gerando desvios nos valores das propriedades mecânicas avaliadas experimentalmente.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Aço ABNT/AISI 4340**: aço estrutural para construção mecânica. Rio de Janeiro: ABNT, [S.d.].

_____. **NBR 6157**: Materiais metálicos – Determinação da resistência ao impacto em corpos de prova entalhados e simplesmente apoiados. Rio de Janeiro: ABNT, 1980.

_____. **NBR ISO 148-1**: Materiais metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR ISO 6892**. Materiais metálicos- Ensaio de tração à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

_____. **NBR ISO 6892**: Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperature ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR NM 87**: Aço carbono e ligados para construção mecânica – Designação e composição química. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ABRAHÃO, R.R.R. et al. Fadiga de materiais: uma revisão bibliográfica. In: ENCONTRO INTERNO, 8; SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12, **Anais...** Uberlândia: UFU, 2008. Disponível em: <<https://ssl4799.websiteseuro.com/swge5/seg/cd2008/PDF/IC2008-0165.PDF>>. Acesso em: 20 ago. 2016.

AFZAL, A.; FATEMI, A. A Comparative Study of Fatigue Behavior and Life Predictions of Forged Steel and PM Connecting Rods. **SAE Technical Paper**, v. 1, n. 1529, 2004. Disponível em: <<http://papers.sae.org/2004-01-1529/>>. Acesso em: 20 ago. 2016.

ALVARENGA JÚNIOR, Álvaro; MANSUR, Tanius R.; PALMA, Ernani S. Influência da refrigeração e da sequência de aplicação de cargas em ensaios de fadiga flexo-rotativos nas propriedades mecânicas do aço SAE 8620. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2, **Anais...** João Pessoa, 2002.

ARCELORMITTAL. **Companhia Siderúrgica Arcelormittal Brasil S.A.** 2017. Disponível em: <<http://brasil.arcelormittal.com.br/>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM A370 – 07a**: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products: ASTM, 2007.

_____. **ASTM E 1823-96**: Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing. [S.I.]: ATSM, 2002.

_____. **ASTM E23**: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Material. ASTM, 2002.

_____. **E 1823-96**: Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture testing. [S.I.]: ASTM, 1996.

_____. **E739 – 10**: Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress – Life (S–N) and Strain – Life (ϵ -N) Fatigue Data. [S.I.]: ASTM, 2015.

_____. **ASTM 4140**: Hot Rolled High Tensile Steel Bar. [S.I.]: ATSM, 2013.

ÁVILA, G Gabriela. **Cálculo de fadiga de risers rígidos através da mecânica da fratura**. Rio de Janeiro, 2005.

BANNANTINE, J. A.; COMER, J.; HANDROCK, J. **Fundamentals of fatigue analysis**. New Jersey: Prentice Hall, 1990.

BRANDÃO, Rodrigo P. **Projeto mecânico de uma máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa**. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

CALLISTER JR, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

_____. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CASTRO, Carlos A.C. **Estudo do comportamento à fadiga de metais dentro e fora da água na presença da pressão hidrostática**. 2007. 160f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em:
<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/MDAD-7DHHLP/tese_carlos_vers_o_final.pdf?sequence=1>. Acesso em: 20 ago. 2016.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 2005.

_____. **Tecnologia mecânica**. São Paulo: ABM, 1986.

DALCIN, Gabrieli B. **Ensaio de materiais**. 2007. 41f. Monografia (Graduação em Engenharia Industrial Mecânica) – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo, 2007. Disponível em:
<http://www.urisan.tche.br/~lemm/arquivos/ensaios_mecanicos.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2016.

DOWLING, Norman E. **Mechanical behavior of materials**. 2. ed. New Jersey: McGraw- Hill, 1999.

EMPRESA METALMECÂNICA. **Acervo de fotos**. Imigrante, 2017. [Arquivo particular].

_____. **Catálogo técnico de produtos**. Imigrante, 2012. [Arquivo particular].

EUROPEAN STANDARD. **Norma DIN 10083: Steels for quenching and tempering part 2: Technical delivery conditions for non alloy steels**. Deutsche: European Standard, 2006.

_____. **Norma DIN EN 1665**: Sechskantschrauben mit Flansch schwere Reihe Deutsche Fassung. Deutsche: European Standard, 1998.

FERREIRA, Wallace Gusmão. **Desenvolvimento de ferramentas computacionais para análise estrutural em fadiga e geração de malhas de elementos finitos**. 2002. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000250737>>. Acesso em: 21 ago. 2016.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio de materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

GERDAU. **Empresa siderúrgica brasileira GERDAU S.A.** Porto Alegre, 2017. Disponível em: <<https://www.gerdau.com/br/pt>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

GRIZA, Sandro. **Efeito do torque na vida em fadiga de uniões parafusadas**. 2000. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/14382>>. Acesso em: 20 ago. 2016.

HERTZBER, Richard W. **Deformation and fracture mechanics of engineering materials**. 4. ed. Nova York/EUA: John Wiley & Son, 1996.

HERTZBERG, B. S. Epididymal leiomyoma: sonographic features. **Ultrasound**, v. 15, n. 11, p. 797-799, 1996

ICKERT, Fernando. **Ensaio de fadiga por flexão para eixos desenvolvidos com diferentes materiais**. Trabalho (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade Horizontina, 2014. Disponível em: <http://www.fahor.com.br/publicacoes/TFC/EngMec/2014/Fernando_Ickert.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2016.

INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS: estudo de caso. **Inspeção Equipto**, 2014. Disponível em: <http://inspecaoequipto.blogspot.com.br/2014_02_01_archive.html>. Acesso em: 20 ago. 2016.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 12107**: Metallic materials – Fatigue testing – Statistical planning and analysis of data. [S.l.]: ISO, 2012.

_____. **ISO 380**: Sports and other recreational facilities and equipment. [S.I.]: ISO, 1964.

KLOOS, K. H., THOMALA, W. Spannungsverteilung im Schraubengewinde. **VDIZ**, v. 121, n. 12, 1979.

LABORATÓRIO DA UFRGS. **Análises laboratoriais**. Porto Alegre: UFRGS, 2017. [arquivo particular].

LABORATÓRIO DE ENGENHARIA MECÂNICA UNIVATES. **Análises laboratoriais**. Lajeado: Univates, 2017. [arquivo particular].

MACHADO, Fabiano A. **Influência do grau de deformação e do tratamento bake hardening na propagação de trinca por fadiga em dois aços bifásicos usados em rodas automobilísticas**. 2005. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

MARQUES, Fabricio C S.; AREVALOS Rodrigo M. **Modernização da máquina de fadiga por flexão rotativa do laboratório de ensaios de materiais**. 2011. 66f. Projeto (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

MARUTA, S. et al. A Study on High Cycle Fatigue Behavior in Lead. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE & STRENGTH OF SOLIDS, 9. **Anais...** Korea, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281594176_A_Study_on_High_Cycle_Fatigue_Behavior_in_Lead>. Acesso em: 31 ago. 2016.

MATLOCK, David K. et al. Surface processing to improve the fatigue resistance of advanced bar steels for automotive applications. **Mat. Res.**, v. 8, n. 4, p. 453-459, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392005000400017>. Acesso em: 20 ago. 2016.

MITCHELL, M R. **Fatigue analysis for desing**. In: Seminário Internacional de fadiga, 1, **Anais...** São Bernardo do Campo, 2001.

NASH, W A. **Resistência dos materiais**. 4. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2001.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**. São Paulo: Bookman, 2004.

_____. **Projeto de máquinas**. São Paulo: Bookman, 2013.

OLIVEIRA, F D.; FERREIRA J L.; ARAÚJO, J A.; **Identificação das condições de falha por fadiga em materiais usados na fabricação de pás de turbinas hidráulicas - Determinação da resistência à fadiga do aço ASTM A743 – CA 6NM**. 2004. 98f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, 2004.

PADILHA, Rodolfo de Queiroz. **Influência na vida em fadiga da espessura das camadas de níquel e cromo duro em aço ABNT 4340**. 2004. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2004. Disponível em: <<http://repositorio.unesp.br/handle/11449/105370?locale-attribute=es>>. Acesso em: 30 ago. 2016.

PILKEY, Walter D.; PILKEY, Deborah D. **Peterson's stress concentration factors**. Canada: John Wiley e Sons, 1997.

PIZZIO, Éverton. **Avaliação de vida em fadiga de uniões parafusadas**: Estudo de caso. 2005. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

POSSAMAI, Eslovam Renato Flores. **Estudo do comportamento em fadiga do aço SAE 5160 aplicado em feixes de molas automotivas**. 2005. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

PUFF, Rinaldo. **Influência do processo de corte e acabamento superficial na fadiga de aço para molas planas**. 2002. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2002. Disponível em: <http://www.tede.udesc.br/tde_arquivos/11/TDE-2006-02-23T065733Z-74/Publico/Rinaldo%20Puff.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2016.

RAGAGNIN, Luido Tolfo. **Avaliação de fadiga em haste de compressor alternativo**. 2015. 27f. Trabalho de Conclusão (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/131313>>. Acesso em: 20 ago. 2016.

ROCHA, Cláudia L. F. **Desempenho em fadiga de arames submetidos ao processo shot peening**. 2010. 108f. Trabalho (Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/27260/000764033.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 21 ago. 2016.

ROCHA, M. A. C. **Análise das propriedades Mecânicas do aço SAE 4140 com estrutura bifásica**. 2004. 10f. Artigo (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2004.

ROCHA, Paulo C. F. **Estudo dos efeitos no comportamento em fadiga das camadas de níquel eletrolítico, processo sulfamato, em aços de alta resistência**. 2005. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.

SALERNO, Gigliola. **Influência da deformação média na previsão de vida em fadiga de baixo ciclo da liga AA7175-T1**. 2003. 37f. Projeto de Iniciação Científica. UniFEI, Itajubá, 2003.

SANTOS, Luciano V. **Análise de falha por fadiga em eixo de motores para sistemas de arrefecimento**. 2008. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SENA, Betânia M. **Avaliação da resistência a fadiga de um aço DP-780 de aplicação automotiva por intermédio de ensaios com controle de tensão**. 2010. 65f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <<http://www.em.ufop.br/demet/download/monografias/AVALIACAODARESISTENCIAAFADIGADEUMACODP780DEAPLICACAOAUTOMOTIVAPORINTERMEDIODEENSAIOSCOMCONTROLEDETENSAO.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2016.

SHIGLEY, Joseph E.; BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J Keith. **Elementos de máquina de Shigley**. 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2011.

SILVA, Douglas G; DUQUE, Marlon N. A.; OLIVEIRA, Rafael S.S. **Análise da Vida em Fadiga da Liga AISI 8630M Forjada, em Meios Hidrogenantes**. 2014. 85f. Projeto (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.cefet-rj.br/attachments/article/2943/An%C3%A1lise_Vida_Fadiga_Liga_AISI_8630M_Forjada_em_Meios_Hidrogenantes.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2016.

SMITH, William F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2012.

SOUZA, Erick D. **Análise do efeito da tensão média sobre a resistência à fadiga do aço ASTM A473 CA6NM**. 2011. 64f. Projeto (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, 2011. Disponível em: <http://bdm.unb.br/bitstream/10483/2829/1/Erich_0581267_PG2.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2016.

SOUZA, Sergio A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos, fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.

_____. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1995.

SURESH, S. **Fatigue of Materials**: Cambridge solid state Science series. New York: Cambridge University Press, 1998.

TAKAHASHI, Bruno X. **Metodologia moderna para análise de fadiga baseada em elementos finitos de componentes sujeitos a fadiga uni e multiaxial**. 2014. 374f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, 2014.

TEIXEIRA, Ricardo S. **Metodologia de análise de fadiga em componentes estruturais de aço baseada na mecânica da fratura**. 2004. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

TONIETO, Gilmar. Ensaio de tração com extensômetro: Aço SAE 4140. Caxias do Sul: UCS, 2011. Disponível em: <<http://docslide.com.br/documents/ensaio-de-tracao-com-extensometro-material-4140-comprimento-50mm-diametro.html#>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

TOSO, Marcelo A. et al. Ensaio de fadiga: um comparativo entre dois corpos de provas distintos para aplicação em molas de suspensão automotiva. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 9, **Anais...** Fortaleza: ABCM, ago. 2016.

VELLOSO, I. P. **Metodologia de ensaio de fadiga para a região I da curva dA/dN**. 2009. 69f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

VERRAN, Guilherme Ourique et al. Comportamento à fadiga em ligas de alumínio de fundição sob diferentes condições de processamento. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 26, **Anais...** Santa Catarina, UDESC, 2015. Disponível em: <http://www1.udesc.br/arquivos/id_submenu/2551/38.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2016.

YOUNG, Warren C; BDYNAS, Richard G. **Roark's Formulas for Stress and Strain**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2002.



UNIVATES

R. Avelino Tallini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95900.000 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09