

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUIZ FERNANDO TRONCO

**DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTO PARA A REALIZAÇÃO DE
ENSAIO DE FADIGA POR FLEXÃO-ROTATIVA E OBTENÇÃO DA VIDA
EM FADIGA DA LIGA AA6063-T6**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2016

LUIZ FERNANDO TRONCO

**DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTO PARA A REALIZAÇÃO
DE ENSAIO DE FADIGA POR FLEXÃO-ROTATIVA E OBTENÇÃO DA
VIDA EM FADIGA DA LIGA AA6063-T6**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Prof. Ma. Silvana Patricia Verona

PATO BRANCO

2016

TERMO DE APROVAÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

DESENVOLVIMENTO DE PROCEDIMENTO PARA A REALIZAÇÃO DE ENSAIO DE FADIGA POR FLEXÃO-ROTATIVA E OBTENÇÃO DA VIDA EM FADIGA DA LIGA AA6063-T6

Luiz Fernando Tronco

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 17/06/2016 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Dalmarino Setti
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Profa. Ma. Silvana Patrícia Verona
(UTFPR – Departamento de Mecânica)
Orientadora

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, Luiz Carlos Tronco (em memória), e a minha mãe, Mercedes Antunes Macedo Tronco que sempre me disseram que a única coisa que não podem roubar de você é o conhecimento e por isso agradeço-os por ter me dado o privilégio, suporte e apoio para estudar.

AGRADECIMENTOS

A professora Ma. Silvana Patricia Verona, pela orientação, amizade, conhecimento, discernimento e direcionamento deste trabalho.

Ao técnico do laboratório de usinagem Vitor Baldin, pela colaboração na fabricação dos corpos de prova, paciência, empenho e sabedoria nas realizações.

Ao professor Dr. Dalmarino Setti, pelo conhecimento, co-orientação e direcionamento na realização dos ensaios e apresentação de resultados.

Ao professor Dr. Sérgio Luiz Ribas Pessa, pela indicação do tema a ser pesquisado, direcionamento e orientação.

Aos demais professores, Dr. Robson Gonçalves Trentin, Dr. Rodrigo Villaca, Me. Joviano Janjar Casarin e Dr. Fábio de Freitas Lima que, de forma indireta, tiveram participação no desenvolvimento do trabalho.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – campus Pato Branco, pela possibilidade de realizar tanto a fabricação dos corpos de prova quanto os ensaios, disponibilizando materiais e equipamentos necessários para tal.

A todos os familiares e amigos, em especial Mercedes Antunes Macedo Tronco, Ana Carolina Tronco Lanfredi, Gelson Lanfredi, Samuel Tronco Lanfredi e Luiz Carlos Tronco (em memória).

EPÍGRAFE

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”. (DA VINCI, Leonardo).

RESUMO

TRONCO, Luiz Fernando. Desenvolvimento de um procedimento para realização de ensaio de fadiga por flexão-rotativa e obtenção da vida em fadiga da liga AA6063-T6. 2016 95 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um procedimento para ensaios na máquina de testes de fadiga de vigas rotativas em alta velocidade modelo R.R. Moore disponibilizada no laboratório de Ensaios Mecânicos – H005 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná concedendo um procedimento de ensaio para fins didáticos. Apresenta a origem do termo fadiga, estágios da falha por fadiga, a obtenção das propriedades de resistência à fadiga, fatores que afetam a resistência à fadiga em projetos de engenharia, bem como as consequências da falha por fadiga. Apresenta as formas de ensaio focando no ensaio de flexão-rotativa e a apresentação de resultados segundo norma ISO. O estudo verificou o comportamento da liga AA6063-T6 quando aplicado uma tensão alternante de 215,80 Mpa em vários corpos de prova, próximos aos seus 90% de tensão de ruptura e com tensões variáveis para apresentação da curva de Wöhler.

Palavras-chave: Fadiga. Flexão-rotativa. AA6063-T6. R.R. Moore. Curva de Wöhler.

ABSTRACT

TRONCO, Luiz Fernando. Development of a procedure for carrying out the fatigue test by rotating bending and getting the fatigue life of the AA6063-T6 alloy. 2016 95 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Course of Mechanical Engineering, Technical University Federal of Parana. Pato Branco, 2016.

This work presents the development of a procedure for trials in a fatigue testing machine of high-speed rotating beams R.R. Moore model available in Mechanical Testing Laboratory - H005 at Federal Technological University of Paraná granting a procedure test for teaching purposes. Shows the origin of the term fatigue, fatigue failure stages, obtaining the fatigue resistance properties, factors affecting the fatigue strength in engineering projects, as well as the fatigue failure consequences. Presents ways to test focusing on rotating bending trial and the presentation of results according to ISO standard. The study verified the AA6063-T6 alloy behavior when applied an alternating stress of 215.80 Mpa in various samples, close to their 90% of yield strength and variable stresses for presentation of the Wöhler curve.

Keywords: Fatigue. Rotating beams. AA6063-T6. R.R. Moore. Wöhler curve.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Tensão X Número de ciclos	76
Gráfico 02 – Tensão X Número de ciclos em escala científica	77
Gráfico 03 - Curva de Wöhler para a liga AA6063-T6	79
Gráfico 04 – Linha de tendência AA6063-T6	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais propriedades cíclicas	16
Quadro 2 - Cronologia das principais realizações e eventos de pesquisa sobre falha por fadiga	17
Quadro 3 - Principais elementos de liga e impurezas por grupo	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores de confiabilidade para $S_d = 0,08\mu$	39
Tabela 2 - Composição química liga 6063	52
Tabela 3 - Composição química liga 6063	53
Tabela 4 – Propriedades mecânicas da liga 6063	71
Tabela 5 - Cargas, tensão alternante aplicada e vida em fadiga do material AA6063-T6	77
Tabela 6 - Dureza dos corpos de prova após ensaio de fadiga	78
Tabela 7 - Linha de tendência a partir dos ensaios de fadiga.	80
Tabela 8 – Cargas, níveis de tensão aplicada e vida em fadiga do material AL 6063-T6	81
Tabela 9 – Dureza dos corpos de prova após ensaio de fadiga curva de Wöhler	82

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Máquina de flexão rotativa utilizada no ensaio de fadiga	20
Figura 2- Superfície de fratura por fadiga de um tender de locomotiva	22

Figura 3 - Elementos de nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços cíclicos.	23
Figura 4 - Superfície de fratura de uma falha por fadiga que teve início num canto vivo de um rasgo de chaveta de um eixo.	24
Figura 5 - Formação das bandas de deslizamento pela sollicitação cíclica e seu aspecto. Estágios de propagação de uma trinca de fadiga.	25
Figura 6 – Curva de Wöhler	28
Figura 7 - Diagrama S-N ou Curva de Wöhler (resistência à fadiga versus vida esperada).	29
Figura 8 - Resultados obtidos pelo ensaio de fadiga para diferentes materiais.	30
Figura 9 - Valores das componentes alternada, média e o intervalo de variação de tensões cíclicas alternadas, repetidas e pulsantes.	33
Figura 10 – Gráfico de tensões.	34
Figura 11 - Valores para fator de superfície.	38
Figura 12 - Ensaio de fadiga por flexão rotativa.	41
Figura 13 – Andamento da tensão no ponto P na variação tempo.	43
Figura 14 – Momento fletor do ensaio flexão-rotativa	43
Figura 15 - Bandas de curvas S-N para ligas de alumínio.	44
Figura 16 - Resistência à fadiga em 5×10^8 ciclos para ligas de alumínio forjadas.	45
Figura 17 - Apresentação de resultados por meio de curva de probabilidade.	46
Figura 18 - Esboço da apresentação de resultados conforme ASTM E468.	47
Figura 19 – Representação de possíveis comportamentos cíclicos.	48
Figura 20 – Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio	54
Figura 21- Conjunto de ferramentas.	58
Figura 22- Corpo de prova conforme Manual de instruções R.R. Moore	59
Figura 23- Dois aros RRM-C1C	60
Figura 24- Duas caixas de rolamento.	60
Figura 25- Barras de tração e parafuso extrato	60
Figura 26 - Chave fixa 11/16	61
Figura 27 - Chave Allen.	61
Figura 28 - Corpo de prova inserido nos dois aros.	61
Figura 29 - Montagem do conjunto.	62
Figura 30 - Aperto da barra de tração no aro.	62
Figura 31 - Conjunto montado.	63

Figura 32 - Conjunto na máquina de ensaios.....	63
Figura 33 - Aperto do parafuso.....	64
Figura 34 – Pratos de pesos.	65
Figura 35 - Botoeira máquina de fadiga.	66
Figura 36 - Ruptura do material.....	66
Figura 37- Ensaio de Tração - Curva Carga x Deslocamento	69
Figura 38 - Ensaio de Tração - Ruptura do material	70
Figura 39 – Máquina de ensaio Rockwell B	71
Figura 40 – EMCO PC TURN 55.....	72
Figura 41 - Corpo de prova semiacabado.	72
Figura 42 - Corpos de prova acabados.	72
Figura 43 - Máquina de ensaios de fadiga por flexão-rotativa.....	73
Figura 44 - Ruptura do corpo de prova	75
Figura 45 - Contador de ciclos.	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	PROBLEMA	18
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	JUSTIFICATIVA.....	20
4	REFERENCIAL TEÓRICO	21
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE FADIGA.....	21
4.1.1	O fenômeno da fadiga	22
4.1.1.1	Primeiro estágio – Nucleação da trinca.....	23
4.1.1.2	Segundo estágio – Crescimento da trinca em bandas de deslizamento com alta tensão de cisalhamento.....	25
4.1.1.3	Terceiro estágio – Crescimento da trinca na direção perpendicular à tensão máxima de tração.....	26
4.1.1.4	Quarto estágio – Ruptura do material.....	27
4.1.2	Modelos de falha por fadiga	27
4.1.3	Métodos de ensaio de fadiga	31
4.1.3.1	Método de estimativa de curva.....	31
4.1.3.2	Método de tensão constante	32
4.1.3.3	Método da sobrevivência.....	32
4.1.3.4	Método Staircase	32
4.1.4	Ciclo de tensões.....	33
4.1.5	Fatores que afetam a resistência à fadiga.....	35
4.1.5.1	Fator de carregamento	37
4.1.5.2	Fator de tamanho	37
4.1.5.3	Fator de superfície	38
4.1.5.4	Fator de temperatura.....	38

4.1.5.5 Fator de confiabilidade	39
4.1.5.6 Fator de ambiente	40
4.1.6 Considerações sobre a projetos de componentes	40
4.2 ENSAIO DE FADIGA.....	41
4.2.1 Ensaio de flexão rotativa	42
4.2.2 Desenho do diagrama S-N	45
4.2.2 Comportamento de carregamentos cíclicos	47
4.3 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS	49
4.3.1 Ligas 6xxx	51
4.3.2 Liga AA6063.....	51
4.4 TRATAMENTO TÉRMICO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO	53
4.4.1 Tratamento T6.....	56
5 METODOLOGIA	57
5.1 MÉTODOS E TÉCNICAS.....	57
5.1.1 Procedimento de ensaio.....	58
5.1.2 Cálculo da tensão alternante.....	64
5.1.3 Frequência dos ciclos de tensão	65
5.1.4 Término do ensaio.....	66
5.1.5 Apresentação dos resultados	67
5.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	69
5.2.1 Máquina de ensaios	73
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
6.1 DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE FADIGA	74
6.2 CARACTERIZAÇÃO DA LIGA 6063 ATRAVÉS DA TENSÃO CONSTANTE	76
6.3 CARACTERIZAÇÃO DA LIGA 6063 ATRAVÉS DA CURVACURVA DE WÖHLER.....	78
7 CONCLUSÕES.....	83

REFERÊNCIAS.....	85
APÊNDICE A.....	89
APÊNDICE B.....	90
ANEXO A	95
ANEXO B	96

1 INTRODUÇÃO

A fadiga tem sido uma das principais causas de falhas de componentes mecânicos. É uma forma de falha que ocorre em estruturas sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes, tais como, pontes, aeronaves e componentes de máquinas. Sob essas circunstâncias, é possível que uma falha ocorra em um nível de tensão consideravelmente menor do que o limite de resistência à tração ou o limite de escoamento para uma carga estática. O termo “fadiga” é usado porque a falha ocorre normalmente após um longo período de tensões repetidas ou ciclos de deformação (CALLISTER, 2008). Dentre os diferentes modos de falha, a falha por fadiga representa aproximadamente entre 50 a 90 % de todas as falhas dos materiais metálicos (HENKE, 2014). O estudo da fadiga tornou-se progressivamente importante à medida que a tecnologia desenvolveu um número maior de equipamentos, como automóveis, aviões, compressores, bombas, turbinas, entre outros, sujeitos a carregamento repetido e a vibração (DIETER, 1981).

A determinação da vida de componentes submetidos a fadiga é uma etapa essencial no dimensionamento de projetos. Em 1985, um avião voo JAL-123 colidiu em uma montanha após perder a cauda, ao total foram 520 vítimas fatais. Segundo relatório, a inspeção falhou ao não detectar a fadiga mecânica dos rebites usado para unir as placas da cauda, as quais foram substituídas 7 anos antes do acidente. Até hoje, este é considerado o segundo pior acidente da história da aviação civil (INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS, 2014).

Segundo Fonseca Jr (2003, p. 1), “as propriedades mecânicas refletem o comportamento de um material submetido à esforços que podem ser expressos em função de tensões e/ou deformações. As propriedades mecânicas monotônicas são obtidas a partir de ensaios de tração, que consiste na aplicação de uma carga de tração uniaxial crescente em corpos de prova padronizados até a sua ruptura, é um ensaio amplamente utilizado na indústria, pois é de fácil execução e garante reprodutibilidade de resultados. As propriedades mecânicas cíclicas são obtidas por meio dos ensaios de fadiga, que consistem na aplicação de cargas cíclicas no material, no entanto, diferentemente do ensaio de tração, podem apresentar uma dispersão dos resultados, fazendo-se necessário a utilização de técnicas estatísticas para a determinação das propriedades de fadiga”. As propriedades de fadiga são

aquelas associadas aos três enfoques dados ao seu estudo, como mostra o Quadro 1.

ENFOQUE	CARACTERÍSTICAS DO ENSAIO
1. Fadiga de alto ciclo	Número de ciclos > 10^3 a 10^4 ciclos Tensão nominal < Limite de escoamento do material
2. Fadiga de baixo ciclo	Número de ciclos < 10^3 a 10^4 ciclos Tensão nominal > Limite de escoamento do material
3. Propagação de trincas por fadiga	Utilização da metodologia da mecânica da fratura

Quadro 1 - Principais propriedades cíclicas

Fonte: Adaptado de Fonseca Jr (2003).

Os primeiros estudos documentados realizados para a ruptura de um material devido a cargas cíclicas surgiram apenas em 1829 por Albert, porém o termo fadiga foi introduzido apenas em 1839 pelo matemático Jean Victor Poncelet (UTC, 2010).

O Quadro 2 apresenta estudos de maior relevância em relação à fadiga de forma cronológica.

Ano	Pesquisador	Evento ou realização
1829	Albert	Primeiro a documentar uma falha devido a cargas repetidas.
1839	Poncelet	Primeiro a utilizar o termo fadiga.
1837	Rankine	Discutiu a teoria da cristalização.
1849	Stephenson	Discutiu a responsabilidade do produto associado as falhas por fadiga em eixos ferroviários.
1850	Braithwaite	Primeiro a utilizar o termo fadiga em publicação de língua inglesa e também discutiu a teoria da cristalização da fadiga.
1864	Fairbairn	Relatou os primeiros experimentos com cargas repetidas.
1871	Wöhler	Publicou os resultados de 20 anos de pesquisas sobre falhas em eixos, desenvolveu os ensaios de flexão rotativa e o diagrama S-N e definiu o limite de fadiga.
1871	Bauschinger	Desenvolveu um extensômetro com espelho com uma sensibilidade igual a 10^{-6} e estudou a tensão-deformação inelástica.
1886	Bauschinger	Propôs um "limite elástico natural" cíclico abaixo do qual nunca iria ocorrer fadiga
1903	Ewing/Humfrey	Descobriram linhas de deslizamento, trincas de fadiga e o crescimento da trinca até a falha, mostrando os erros da teoria da cristalização da fadiga.
1910	Bairstow	Verificou a teoria do limite elástico natural de Bauschinger e o limite de fadiga de Wöhler.
1910	Basquin	Desenvolveu a lei exponencial para testes de fadiga (a equação de Basquin).
1915	Smith/Wedgewood	Separaram a componente cíclica de deformação plástica da deformação plástica total.
1921	Griffith	Desenvolveu um critério de falha e relacionou a fadiga ao crescimento da trinca.
1927	Moore/Kommers	Quantificaram os dados de fadiga de alto-ciclo para diversos materiais em "A Fadiga dos Metais"
1930	Goodman/Soderberg	Determinaram, de forma independente, a influência das tensões médias na fadiga.
1937	Neuber	Publicou a equação de Neuber sobre concentração de tensão em entalhes (tradução inglesa em 1946).
1953	Peterson	Publicou "Fatores da Concentração de Tensão para Projeto", fornecendo uma abordagem para considerar os entalhes.
1955	Coffin/Manson	Publicaram, de forma independente, a lei da fadiga de baixo-ciclo baseada na deformação específica (lei de Coffin-Manson)
1961	Paris	Publicou a lei da mecânica da fratura de Paris para o crescimento de trincas na fadiga.

Quadro 2 - Cronologia das principais realizações e eventos de pesquisa sobre falha por fadiga

Fonte: Union College, 1992 (apud NORTON, 2004, p.306).

É importante no projeto de máquinas e equipamentos levar em consideração se o componente irá sofrer cargas cíclicas que variam com o tempo. As falhas decorrentes dessas cargas ocorrem em níveis de tensões inferiores à tensão de escoamento dos materiais. Portanto, quando envolvidos carregamentos dinâmicos,

os cálculos baseados em carregamentos estáticos levam a um projeto sem segurança. Para alcançar a confiabilidade desejada, pode-se avaliar o comportamento em fadiga do material, com objetivo de levantar as curvas tensão-número de ciclos.

O termo falha por fadiga está relacionado diretamente com os materiais metálicos. No entanto, materiais poliméricos e cerâmicos também estão sujeitos a fadiga. Nos materiais cerâmicos a falha ocorre devido a sua baixa tenacidade à fratura, assim não são caracterizados em respeito a falha sob condições de fadiga. Em relação aos materiais poliméricos, os mecanismos de fratura ainda não são bem conhecidos (GARCIA, 2012).

Para caracterização dos materiais metálicos em relação a vida em fadiga, as propriedades cíclicas podem ser obtidas experimentalmente. A fim de padronizá-los, foram estabelecidas normas internacionais que compreendem diferentes condições de carregamento e deformação. Podem-se destacar aquelas elaboradas pela ASTM (E1823, E1150, E466, E467, E468 ou suas variações E647, E739, E740 e E812) e as normas ISO para o ensaio em questão (ISO 1143:2010 E ISO 12107:2012), onde uma refere-se ao procedimento de ensaio enquanto a outra complementa especificando os padrões para cada tipo de ensaio e forma de apresentação de resultados.

Para a elaboração deste trabalho foi realizado uma pesquisa bibliográfica para o referencial teórico, juntamente com a elaboração do programa para usinagem do corpo de prova, instalação da máquina para o ensaio de fadiga, testes na máquina, reprodução das práticas e levantamento da curva tensão-vida em fadiga conforme normas ISO.

1.1 PROBLEMA

O curso de Engenharia Mecânica apresenta como uma das suas grandes áreas de conhecimento a Ciência dos Materiais. Esta disciplina estuda as propriedades e o comportamento dos materiais e a relação dessas propriedades com a aplicação e o desempenho. Neste contexto é importante o estudo do comportamento dos materiais quando sofrem carregamentos cíclicos ao longo do tempo, ou seja, o estudo da fadiga.

Com esta visão, a Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *campus* Pato Branco adquiriu uma máquina para ensaios de fadiga, porém é necessário que se desenvolva um procedimento para a fabricação dos corpos de prova e operação da máquina de teste localizada no Laboratório de Materiais da UTFPR-PB.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um procedimento para a realização de ensaios de fadiga por flexão-rotativa, para uso da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *campus* Pato Branco, e caracterizar a liga de alumínio AA6063-T6 quanto a sua vida em fadiga para um ciclo de tensão alternante e para uma tensão constante com o propósito de dar reprodutibilidade na realização dos ensaios.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Desenhar o corpo de prova em um software CAD;
- 2) Elaborar o programa CAM para usinagem dos corpos de prova;
- 3) Usinar os corpos de prova;
- 4) Montar o equipamento;
- 5) Colocar em operação a máquina para testes de fadiga de vigas rotativas modelo R.R. Moore;
- 6) Criar um procedimento de ensaio de fadiga;
- 7) Caracterizar a liga metálica AA6063-T6 obtendo curva tensão-número de ciclos.

3 JUSTIFICATIVA

A determinação do tema foi motivada pela impossibilidade de realização de aulas práticas, considerando que a máquina para testes de vigas rotativas em alta velocidade modelo R.R. Moore, recentemente adquirida pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *campus* Pato Branco, encontra-se devidamente instalada no Laboratório de Materiais, sala H005, entretanto não entrou em funcionamento devido a indisponibilidade de um procedimento de operação e realização do corpo de prova para realizar o ensaio.

O equipamento tem como intuito proporcionar aos acadêmicos e docentes do curso de engenharia mecânica ensaios em corpos de prova para fins didáticos. Um esquema simplificado da máquina é mostrado na Figura 1.

A máquina tem por objetivo determinar a vida em fadiga do material, sob tensões compressivas e trativas de iguais intensidades. As revoluções são dadas a partir de um motor de operação contínua que possibilita a alteração de velocidades entre 500 e 10.000 RPM

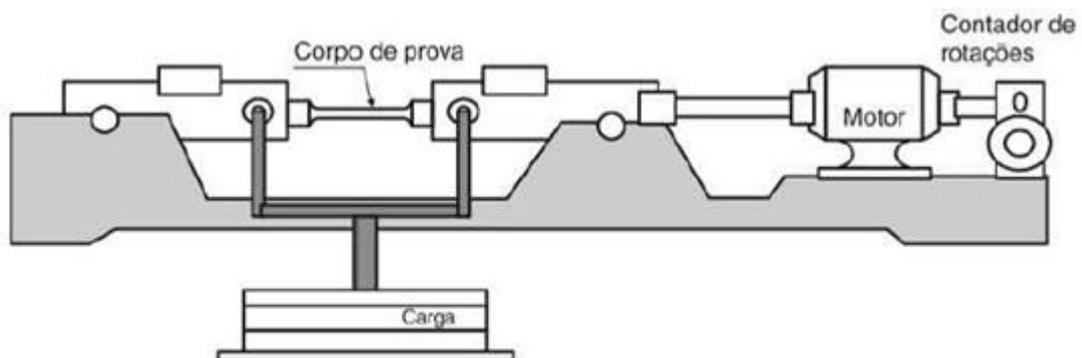


Figura 1 - Máquina de flexão rotativa utilizada no ensaio de fadiga.
Fonte: GARCIA (2012).

Para a construção de um procedimento para a realização de ensaios de fadiga na máquina para testes de vigas rotativas em alta velocidade modelo R.R. Moore, foi constatado que o equipamento CNC EMCO PC TURN 55, localizado no laboratório H006A, encontrava-se em desuso e mal funcionamento.

Os ensaios de análise de fadiga são importantes devido a ocorrência das falhas de componentes de máquinas em serviço serem na maioria das vezes causados pela fadiga.

A abordagem deste projeto engloba várias áreas do conhecimento pertencentes à engenharia mecânica, tais como Ciência e Ensaio dos Materiais, Mecânica dos Sólidos C, Projeto de Componentes Mecânicos, Tratamentos Térmicos e Usinagem e tem como principal objetivo a disponibilização de um procedimento de ensaio que possa oferecer aulas práticas para as disciplinas que envolvam o estudo de fadiga.

Desta maneira, o trabalho contribui não somente para a comunidade acadêmica do *campus* Pato Branco, mas também oferece uma opção de envolvimento entre a teoria e a prática.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE FADIGA

A palavra fadiga tem origem da palavra latina *FATIGARE* que significa cansar. Este tipo de falha ocorre repentinamente em peças que tem funcionamento satisfatório durante um período de tempo e em algum momento, o material torna-se simplesmente “cansado” de transportar cargas repetidas (SOBOYEJO, 2003).

Segundo Fonseca Jr (2003, p.12), “Fadiga é o processo de alteração estrutural progressivo, localizado e permanente que ocorre em um material em condições que produzem variações de tensões e deformações em um ou mais pontos do material e que podem culminar em trincas ou fratura completa após um número suficiente de ciclos de carregamento”.

Segundo Dieter (1981, p. 344), “A fadiga dá origem a uma fratura de aparência frágil, sem existência de deformação macroscópica na fratura. A superfície de fratura, em escala macroscópica, é quase sempre normal à direção da tensão principal de tração”.

As fraturas por fadiga representam cerca de 90% das falhas em serviço relacionados com causas mecânicas. Para ocorrência do fenômeno da fadiga, é necessária a ocorrência simultânea de:

- Carregamentos cíclicos (ou variáveis);
- Deformações plásticas (macro ou microscópicas);
- Tensões normais de tração durante o carregamento cíclico.

Se qualquer um desses três fatores não existir, não ocorre o fenômeno da fadiga (FONSECA Jr, 2003).

Uma falha por fadiga pode ser reconhecida, geralmente, a partir do aspecto da superfície de fratura, a qual apresenta uma região lisa decorrente da fricção que se verifica entre as superfícies durante a propagação da trinca através da seção transversal do material. A Figura 2 ilustra uma zona onde a trinca iniciou e progrediu lentamente, que é a região lisa e uma zona fibrosa onde ocorreu a fratura brusca. Podendo-se notar uma região fortemente deformada (SENGMEC 2002).

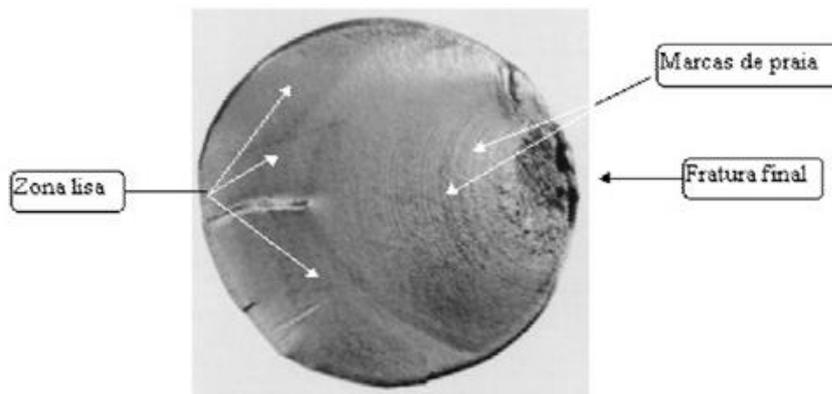


Figura 2- Superfície de fratura por fadiga de um tender de locomotiva.
Fonte: SENGMEC (2002).

4.1.1 O fenômeno da fadiga

Segundo Fonseca, Jr (2003, p.12), “O fenômeno da fadiga pode ser dividido em quatro etapas ou estágios distintos”:

4.1.1.1 Primeiro estágio – Nucleação da trinca.

Segundo Fonseca Jr (2003, p.12), “As trincas por fadiga são encontradas na maioria das vezes em superfícies livres. Nas raras vezes onde as trincas por fadiga ocorrem no interior do material, existe sempre uma interface envolvida”.

Para Garcia (2012, p.229), “As trincas têm início em regiões de alta concentração de tensão ou em regiões de baixa resistência local. Defeitos de superfície como ranhuras, pequenas trincas de usinagem, mau acabamento superficial ou pontos que sofreram deformação localizada e, principalmente formas que compõem cantos em ângulos retos ou entalhes correspondem aos principais fatores para a nucleação de trincas”.

A Figura 3 apresenta alguns modos de nucleação de uma trinca em um componente sujeito a esforços cíclicos.

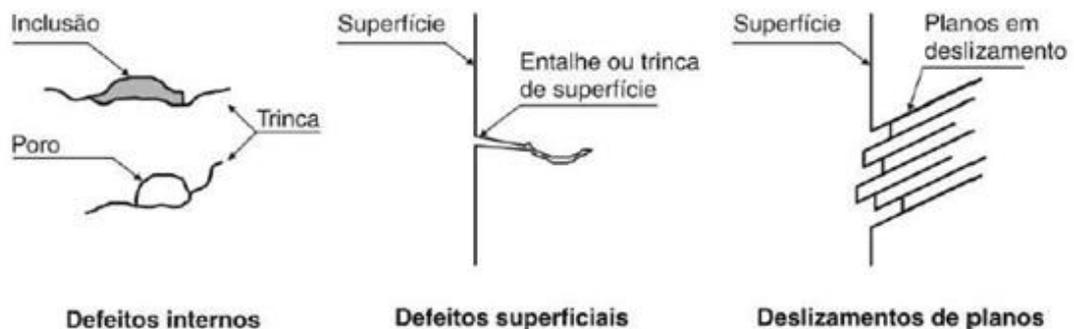


Figura 3 - Elementos de nucleação de trincas em componentes sujeitos a esforços cíclicos.
Fonte: GARCIA (2012).

Em materiais isentos de defeitos, o processo de nucleação de trincas de fadiga irá acontecer nos pontos de elevado nível de tensão quando existentes, na presença de deformação plástica (FREDEL, 2015).

A Figura 4 ilustra uma falha por fadiga que teve início em um canto vivo, ponto de concentração de tensão, propagando-se através da seção do material.

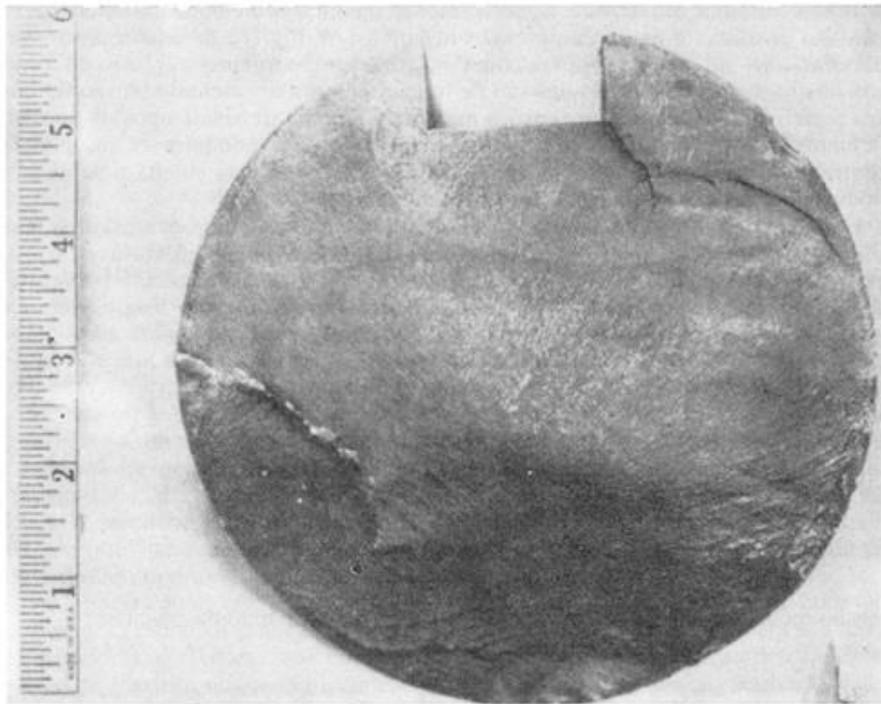


Figura 4 - Superfície de fratura de uma falha por fadiga que teve início num canto vivo de um rasgo de chaveta de um eixo.
Fonte: DIETER (1981).

A falha por fadiga está, na maioria das vezes, associada a deformações plásticas e estas associadas com tensões cisalhantes. Em materiais cristalinos, a deformação plástica ocorre pelo movimento das discordâncias pela ação de tensões cisalhantes, sendo a direção principal a de máxima tensão de cisalhamento (ROSA, 2012).

Para materiais dúcteis, a nucleação de fissuras ocorre pela formação de planos de deslizamento, provenientes da deformação plástica no grão menos orientado. Os deslizamentos cíclicos ocasionam na superfície da peça reentrâncias na forma de pequenas intrusões e saliências (ROSA, 2012).

O modelo representado na Figura 5 mostra a sequência de movimentos de deslizamento responsáveis pela formação de uma intrusão e de uma extrusão (ROSA, 2012).

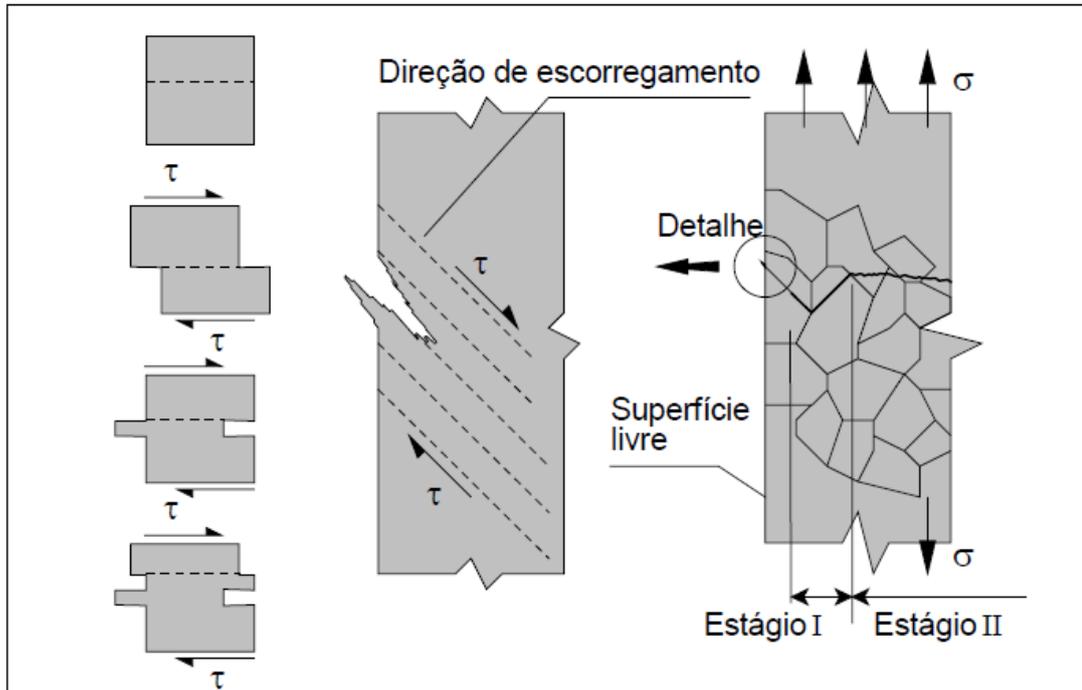


Figura 5 - Formação das bandas de deslizamento pela sollicitação cíclica e seu aspecto. Estágios de propagação de uma trinca de fadiga.
 Fonte: ROSA (2012).

4.1.1.2 Segundo estágio – Crescimento da trinca em bandas de deslizamento com alta tensão de cisalhamento

Também conhecido como sendo o 1º estágio da propagação da trinca por fadiga. As trincas por fadiga são predominantemente transgranulares, compreendendo de 2 a 5 vezes o tamanho do grão e não visíveis a olho nu. A compreensão de como a trinca se propaga na superfície do material é importante para a descrição do processo de fadiga (FONSECA Jr, 2003).

As microtrincas seguem crescendo até que atinjam um certo tamanho que passam a se propagar de forma perpendicular às tensões de tração agentes no material. No primeiro estágio de propagação, as tensões cisalhantes é que são importantes, enquanto que no estágio II as tensões de tração é que controlam o crescimento até atingir a ruptura final (ROSA, 2012).

. Em componentes lisos como corpos de prova, mais de 70% da vida é usada para a nucleação e para a propagação no estágio I, restando os 30% da vida para a propagação no estágio II (ROSA, 2012).

A relação proporcional de cada estágio com o total de número de ciclos até a falha está ligada com as condições que o componente está sendo submetido e as propriedades do material (GOMES, 2011).

4.1.1.3 Terceiro estágio – Crescimento da trinca na direção perpendicular à tensão máxima de tração

Neste segundo estágio de crescimento, a trinca atinge tamanho suficiente para crescer perpendicularmente ao eixo da máxima tensão de tração, verificando-se na superfície de fratura, a presença de estrias produzidas pelo carregamento cíclico e a presença de marcas de praia devido às variações da frequência, amplitude da carga durante o carregamento ou por paradas no crescimento da trinca, as quais podem ser vistas na Figura 2 (FONSECA Jr, 2003).

As estrias apresentadas na Figura 2 são formadas por paradas no crescimento da trinca, seja por uma redução da carga ou por uma parada do equipamento. Quando a carga que provoca a falha por fadiga é de amplitude constante, as linhas de repouso praticamente não aparecem, como é o caso da falha em corpos de prova de fadiga (ROSA, 2012).

No caso de materiais frágeis ou duros, como as ligas de alta resistência de alumínio e os aços tratados de alta dureza, a nucleação das trincas inicia na interface entre a matriz e as inclusões existentes, já que a matriz não chega a ser deformada plasticamente. Desta forma não surgem as bandas de deslizamento na superfície livre, com a nucleação iniciando mais no interior do material (ROSA, 2012).

No regime de baixo número de ciclos para a falha, a nucleação e a propagação da trinca de fadiga ocorrem acompanhadas por um escoamento generalizado na superfície da peça, resultando em geral numa superfície corrugada, pelo elevado grau de deformação plástica (ROSA, 2012).

No regime a alto número de ciclos para a falha, a deformação elástica é predominante, sendo a nucleação de trincas um fenômeno muito raro, ocorrendo em zonas bastante localizadas. A maior parte da superfície permanece sem alteração, ocorrendo a formação de poucas microtrincas, e a propagação de uma delas é suficiente para provocar a ruptura (ROSA, 2012).

4.1.1.4 Quarto estágio – Ruptura do material

A trinca continuará a crescer enquanto tensões de tração cíclicas e/ou fatores de corrosão estiverem presentes. Em um certo ponto, o tamanho da trinca torna-se grande o bastante para aumentar o fator de intensidade de tensão “K” na extremidade da trinca, até o nível da tenacidade à fratura do material “K_c” quando ocorre, de maneira instantânea, uma falha repentina e catastrófica no próximo ciclo de tensão de tração (NORTON, 2004).

Segundo Fonseca Jr (2003, p.18), com o estudo da superfície da fratura de fadiga pode-se determinar:

- Os pontos de nucleação;
- Direção de crescimento da trinca;
- Tamanho da trinca de fadiga antes da ruptura final;
- Intensidade do esforço que foi submetido o material;
- Direção de carregamento.

4.1.2 Modelos de falha por fadiga

Segundo Norton (2004, p.309), “Existem três modelos de falha por fadiga em uso e cada um possui uma área de aplicação e um propósito. As abordagens são: o modelo tensão-número de ciclos (S-N), o modelo deformação-número de ciclos (ϵ -N) e o modelo da mecânica da fratura linear-elástica (MFLE)”. Cada método tem sua particularidade cabendo ao responsável pelo projeto escolher o mais apropriado para a situação definida.

A abordagem tensão-número de ciclos, ou seja, a curva de Wöhler é usualmente utilizada para caracterização de materiais em aplicações que envolvem fadiga de alto-ciclo, que relaciona a vida do material (número de ciclos) pelo limite de fadiga onde o material é solicitado por tensões cíclicas menores que o limite de escoamento, obtendo número de ciclos maiores que 10^3 a 10^4 . Esta tornou-se a forma padrão para caracterizar o comportamento dos materiais submetidos a tensões cíclicas. (NORTON, 2004). A Figura 6 apresenta a curva de Wöhler e suas zonas de fadiga de baixo e alto ciclo, transição e projeção a vida infinita, onde σ_R é a tensão de

fadiga a baixo ciclo, σ_S é a tensão de zona de transição e σ_{LF} é a tensão de projeção para vida infinita.

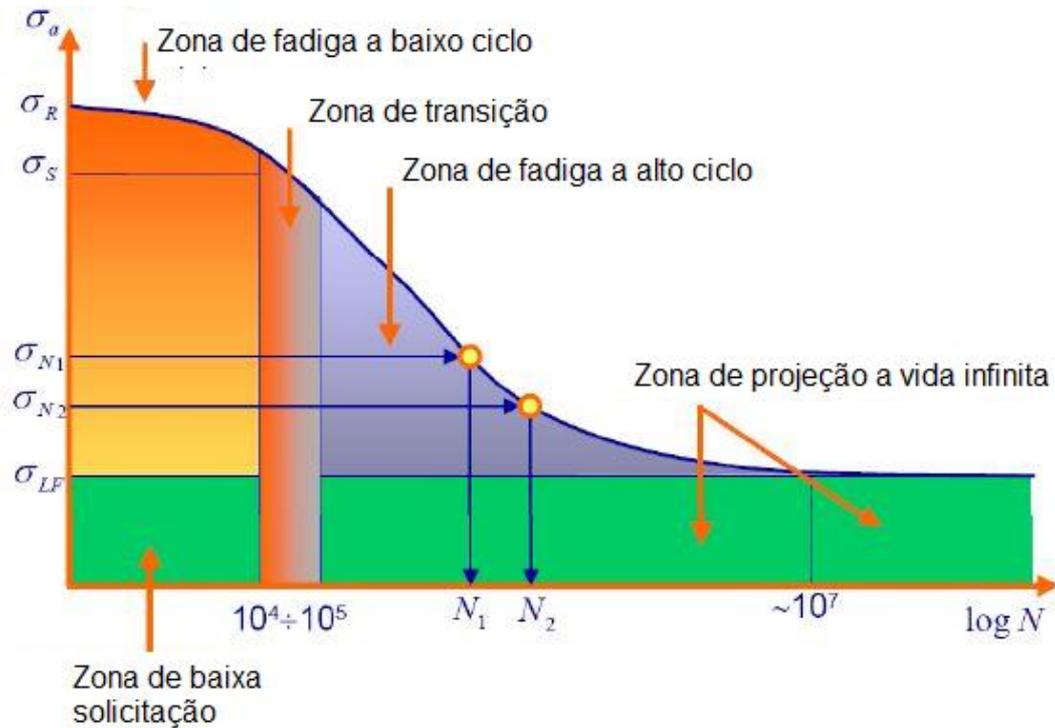


Figura 6 – Curva de Wöhler
Fonte: Adaptado de CDMUNICAS (2016).

Dois tipos de curvas Tensão-Número de ciclos são encontrados usualmente. Uma para materiais ferrosos onde verifica-se um ponto de tensão cujo à partir deste ponto o material pode apresentar o fenômeno da fadiga e abaixo deste o material pode suportar um número infinito de ciclos sem ocorrer ruptura. Outra para a maioria dos materiais não-ferrosos, que com o decréscimo de tensão, encontra-se um número de ciclos maiores, porém finitos, para a ruptura do material. Observa-se no diagrama da Figura 7 que esses materiais não apresentam limite de fadiga.

Usualmente, emprega-se uma escala log para a resistência à fadiga. (FONSECA Jr, 2003).

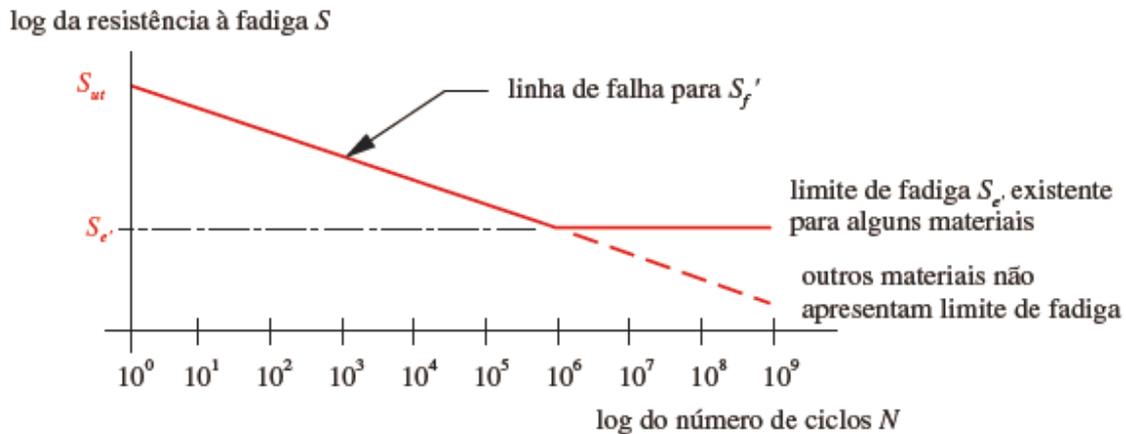


Figura 7 - Diagrama S-N ou Curva de Wöhler (resistência à fadiga versus vida esperada).
 Fonte: NORTON (2004).

Na fadiga de baixo ciclo onde a sollicitação do material ser de tensões superiores ao limite de escoamento e vida inferior a 10^4 ciclos, o material pode suportar elevadas deformações. Correlaciona-se a amplitude da deformação com número de ciclos, através da curva Deformação-Número de ciclos (GARCIA, 2012).

Quando o número de carregamento necessário para causar dano por fadiga é menor que 10^4 ciclos, a fadiga é denominada de baixo ciclo. Ela caracteriza-se pela aplicação de tensões acima do limite de escoamento do material, o que provoca um número reduzido de ciclos até a fratura. Sendo que as propriedades cíclicas relacionadas a este tipo de fadiga podem ser obtidas experimentalmente com o auxílio de normas regulamentadoras de ensaio e apresentação de resultados. (FONSECA, 2003).

No entanto, é válido mencionar que não existe uma linha divisória bem definida entre os dois regimes. Segundo Norton (2004, apud Dowling, 1993, p.347), "A fadiga de alto-ciclo tem início por volta de 10^2 até 10^4 ciclos". Norton (2004, apud Juvinal 1967, p.117) ainda cita que este valor inicial possa ser de 10^3 ciclos. Enquanto, se o número de ciclos supera esta faixa, a fadiga é denominada de alto ciclo (GARCIA, 2012).

Para criação da Curva de Wöhler, ensaios de fadiga são realizados em corpos de prova com diferentes tensões aplicadas e totalmente reversas. Essa curva fornece dados de fadiga para uma determinada geometria, condição de carregamento, ambiente de ensaio e parâmetros de fabricação (GOMES, 2011).

A obtenção destas propriedades de resistência à fadiga é feita através de ensaios com vários corpos de prova de condições idênticas de acabamento, dimensões e tratamentos recebido (GARCIA, 2012).

Em geral, a curva S-N de materiais ferrosos e ligas de titânio apresenta um limite de tensão tal que, para valores abaixo desse limite, o corpo de prova nunca sofrerá ruptura por fadiga. Esse limite de tensão é conhecido como limite de resistência à fadiga. Para os aços, o limite de resistência à fadiga está compreendido na faixa de 35% a 65% do limite de resistência à tração (GARCIA, 2012).

A maioria das ligas não ferrosas (alumínio, cobre, magnésio etc.) não apresenta limite de resistência à fadiga, já que a tensão decresce continuamente com o número de ciclos de aplicação de carga. Para esses materiais, a fadiga é caracterizada pela resistência à fadiga (T_f), que é a tensão na qual ocorre ruptura para um número arbitrário de ciclos de aplicação de carga (GARCIA, 2012).

A Figura 8 apresenta resultados de ensaios de fadiga para alguns materiais em condições de flexão rotativa.

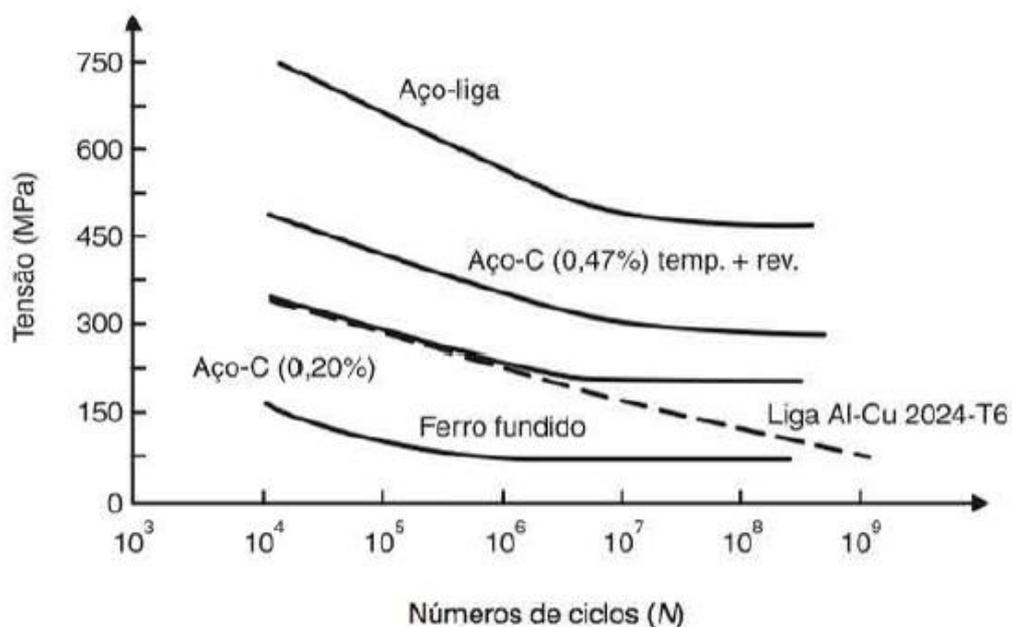


Figura 8 - Resultados obtidos pelo ensaio de fadiga para diferentes materiais.
Fonte: GARCIA (2012).

O número de ciclos que define a vida total de um componente submetido a cargas cíclicas é a combinação entre o número de ciclos necessário à nucleação da trinca e o número correspondente a propagação da trinca até a falha final. Em alguns casos, onde há concentrações de tensão ou defeitos de superfície, o tempo de nucleação é muito curto e a trinca é formada logo no começo da vida total (ARAÚJO, 2005 apud BANNANTINE et al., 1990).

4.1.3 Métodos de ensaio de fadiga

A curva de Wöhler é de fundamental importância na caracterização de um elemento em relação à fadiga, quando se trata da abordagem tensão-número de ciclos. Algumas variáveis como limite de resistência à fadiga, vida (número de ciclos até a falha) e sobrevida (número de ciclos que o componente pode ser submetido a uma determinada tensão sem ocasionar falha) são características essenciais que devem ser consideradas na execução de projetos (GOMES, 2011).

Para isso, alguns métodos podem ser escolhidos conforme o objetivo do ensaio. Alguns métodos são apresentados abaixo:

4.1.3.1 Método de estimativa de curva

Este método é utilizado quando procura-se estimar toda a curva S-N. Deve-se utilizar um mínimo de dez corpos de prova recomendado pela norma ISO 12107:2012 conforme necessidade (GOMES, 2011). Realiza-se os ensaios de fadiga em diferentes níveis de tensão, acrescentando níveis de tensão iguais a cada novo ensaio (ISO 12107:2012).

Os dados são plotados em um gráfico Tensão x Número de ciclos e uma curva média é traçada através dos pontos obtidos.

4.1.3.2 Método de tensão constante

Este método baseia-se na determinação da vida em fadiga em um nível de tensão definido para aplicação do componente. A norma ISO 12107:2012 define que a quantidade de corpos de prova mínima seja sete corpos de prova. Experiências têm indicado que este método é mais eficiente para os níveis de tensões maiores que a tensão de escoamento do material (GOMES, 2011).

Os dados obtidos são plotados em um gráfico a fim de verificar a distribuição e determinar a média e o desvio-padrão.

4.1.3.3 Método da sobrevivência

Este método é usado para determinar a média e o desvio-padrão do limite de resistência à fadiga para uma vida prescrita. São ensaiados corpos de prova em faixas estreitas de tensão, limitadas entre dois desvio-padrão acima e abaixo do limite de resistência à fadiga estimado empiricamente. Determinando assim o limite médio de resistência à fadiga e seu desvio-padrão (GOMES, 2011).

4.1.3.4 Método Staircase

Este método é muito utilizado na determinação da média e desvio-padrão da resistência à fadiga em uma tensão definida, assumindo que não haverá falhas posteriores a esta. O nível de tensão escolhido para cada corpo de prova é baseado no resultado do teste realizado anteriormente. Se o corpo de prova anterior não falhou para o número de ciclos pré-determinado, o próximo teste é executado com um nível de tensão maior. No entanto, se este corpo de prova falhar antes de atingir a vida prescrita, o nível de tensão é reduzido no próximo passo (GOMES, 2011).

4.1.4 Ciclo de tensões

Segundo Robert L. Norton (2004), qualquer carga que varie no tempo pode potencialmente provocar uma falha devido à fadiga. O comportamento desse tipo de carga varia substancialmente de uma aplicação para outra.

A forma da onda da carga em função do tempo parece não ter nenhum efeito significativo na falha por fadiga na ausência de corrosão. Além disso, a presença ou ausência de períodos de inatividade no histórico da carga não é tão significativa em um ambiente não corrosivo. A corrosão irá provocar um crescimento contínuo da trinca mesmo na ausência de quaisquer flutuações na carga. Os fatores significativos são a amplitude e o valor médio da onda de tensão-tempo e o número total de ciclos de tensão/deformação que a peça é submetida (NORTON, 2004).

Existem três variações de tensões cíclicas no tempo: tensão alternada, tensão repetida e tensão pulsante, representadas abaixo na Figura 9.

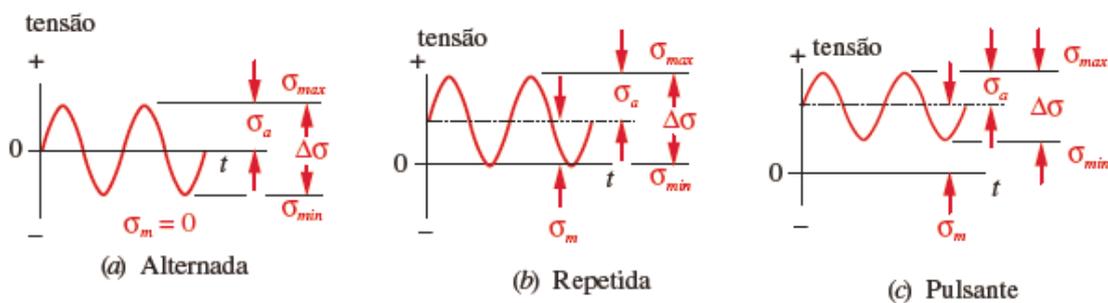


Figura 9 - Valores das componentes alternada, média e o intervalo de variação de tensões cíclicas alternadas, repetidas e pulsantes.

Fonte: NORTON (2004).

Para Fonseca Jr, (2003, p. 25), um carregamento controlado por tensões cíclicas pode ser descrito como uma função harmônica e os diversos parâmetros que caracterizam este ciclo são apresentados na Figura 10.

Para a tensão alternada, o valor médio de tensão é zero. Neste caso existem tensões de tração e compressão, passando pelo ponto de tração máxima e de compressão máxima. Esta é uma situação ideal produzida através de ensaios rotativos. Para a tensão repetida o valor médio varia de zero ao valor máximo de tensão com um valor médio igual a componente. Enquanto a tensão pulsante

representa o caso mais geral, no qual todas as componentes têm valor diferente de zero (NORTON, 2004). Nestes dois exemplos, existem apenas tensões de tração, passando pelo ponto de tração máxima e mínima.

Qualquer um dos tipos de onda citados pode ser caracterizado por meio de parâmetros de componentes média e alternada, valores máximo e mínimo ou por meio da razão desses valores (NORTON, 2004).

Algumas terminologias são definidas a partir de valores aferidos:

- $\Delta\sigma = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}$: Faixa de tensão;
- $\sigma_a = (\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}})/2$: Amplitude de tensão;
- $\sigma_m = (\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}})/2$: Tensão média;
- $R = \sigma_{\text{mín}} / \sigma_{\text{máx}}$: Razão da tensão;
- $A_r = \sigma_a / \sigma_m$: Razão da amplitude.

A Figura 10, representa graficamente os valores de tensão aferidos para melhor compreensão.

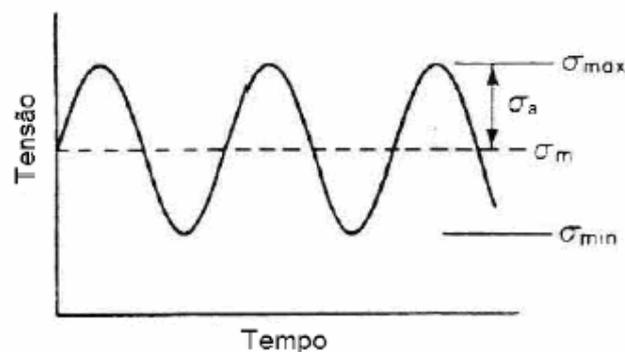


Figura 10 – Gráfico de tensões.
Fonte: GARCIA (2012).

Para um ciclo de tensões alternadas, o valor de R é igual a -1, uma vez que as tensões de tração são positivas e as tensões de compressão são negativas (FONSECA Jr, 2003).

Quando o valor da tensão média for igual a zero, deve-se utilizar o valor de amplitude de tensão para plotar a curva Tensão-Vida (S-N). No caso em que a tensão média é diferente de zero, devemos encontrar uma amplitude de tensão alternada equivalente. Para encontrá-la existem quatro formulações mais utilizadas apresentadas nas equações a seguir (SANTOS, 2008):

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{aeq}} + \frac{\sigma_m}{S_y} = 1 \quad \text{por Soderberg (USA, 1930)} \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{aeq}} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \quad \text{por Goodman (England, 1889)} \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{aeq}} + \left(\frac{\sigma_m}{S_u}\right)^2 = 1 \quad \text{por Gerber (Germany, 1874)} \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{aeq}} + \frac{\sigma_m}{S_r} = 1 \quad \text{por Morrow (USA, 1960s)} \quad (4)$$

Onde: S_u corresponde ao limite de resistência à tração;

S_y corresponde ao limite de resistência ao escoamento;

S_r corresponde ao limite de resistência à ruptura.

Testes práticos tendem a apresentar resultados mais condizentes entre as formulações de Goodman e Gerber (BANNATINE, 1990).

4.1.5 Fatores que afetam a resistência à fadiga

Essenciais para a análise de fadiga em projetos mecânicos, as propriedades de fadiga em um material, como as curvas tensão-vida e deformação-vida podem ser obtidas experimentalmente. Como nem sempre as propriedades de fadiga dos materiais estão disponíveis na literatura e o ensaio para a sua obtenção requer muito tempo e esforço, vários pesquisadores têm escolhido diferentes caminhos para o desenvolvimento de métodos para a determinação da previsão da vida em fadiga (FONSECA, 2003).

A melhor informação a respeito da resistência à fadiga de um material para uma vida finita, ou seu limite de resistência à fadiga para uma vida infinita, provém de

ensaios com montagens reais ou com os protótipos dos dispositivos de um projeto real. Nos casos em que essa alternativa não é possível, a próxima melhor informação provém dos ensaios de fadiga em corpos de prova retirados do mesmo material com o qual a peça será fabricada (NORTON, 2004).

Se não existirem dados disponíveis de resistência à fadiga, valores aproximados de S_f (Resistência à fadiga não corrigida) ou $S_{e'}$ (Limite de fadiga não corrigido) podem ser estimados a partir de valores de resistência à tração do material (NORTON, 2004). As equações a seguir estimam o valor de resistência à fadiga não corrigido para aços, ferros fundidos, alumínio e ligas de cobre, onde S_{ut} é o limite de ruptura do material (NORTON, 2004).

$$\text{Aços: } S_{e'} = 0.5 S_{ut} \quad \text{para } S_{ut} < 1400 \text{ MPa} \quad (5)$$

$$S_{e'} = 700 \text{ Mpa} \quad \text{para } S_{ut} \geq 1400 \text{ MPa} \quad (6)$$

$$\text{Ferros: } S_{e'} = 0.4 S_{ut} \quad \text{para } S_{ut} < 400 \text{ MPa} \quad (7)$$

$$S_{e'} = 160 \text{ Mpa} \quad \text{para } S_{ut} \geq 400 \text{ MPa} \quad (8)$$

$$\text{Alumínios: } S_{f@5E8} = 0.4 S_{ut} \quad \text{para } S_{ut} < 330 \text{ MPa} \quad (9)$$

$$S_{f@5E8} = 130 \text{ Mpa} \quad \text{para } S_{ut} \geq 330 \text{ MPa} \quad (10)$$

$$\text{Ligas de Cobre: } S_{f@5E8} = 0.4 S_{ut} \quad \text{para } S_{ut} < 280 \text{ MPa} \quad (11)$$

$$S_{f@5E8} = 100 \text{ Mpa} \quad \text{para } S_{ut} \geq 280 \text{ MPa} \quad (12)$$

Os resultados de flexão rotativa de R.R. Moore são obtidos ensaiando corpos de provas extremamente polidos, com diferentes diâmetros e com cargas de flexão senoidal e reversas (tensão média igual a zero). Porém, quando se trata de projetos mecânicos, algumas variáveis afetam o limite de resistência à fadiga do material aferido experimentalmente, como tamanho, acabamento superficial, questões de ambiente e temperatura, os quais modificam a resistência do material entre os corpos de prova e o produto a ser projetado (SANTOS, 2008 apud BANNATINE, 1990).

Estes fatores, incorporados na equação da resistência à fadiga corrigida (S_f) e do limite de fadiga corrigido (S_e) demonstrados a seguir, nas equações 13 e 14 (NORTON, 2004):

$$S_e = C_{\text{carreg}} * C_{\text{tamanho}} * C_{\text{superf}} * C_{\text{temp}} * C_{\text{conf}} * S_e' \quad (14)$$

$$S_f = C_{\text{carreg}} * C_{\text{tamanho}} * C_{\text{superf}} * C_{\text{temp}} * C_{\text{conf}} * S_f' \quad (15)$$

Os fatores de redução de resistência, utilizados nas equações acima, são definidos a seguir.

4.1.5.1 Fator de carregamento

Sabendo-se que os ensaios de fadiga realizados são sob flexão rotativa, assim, um fator de redução a resistência para solicitação devido a força normal deve ser aplicado. É definido então, C_{carreg} , pelas equações 16 e 17:

$$\text{Flexão:} \quad C_{\text{carreg}} = 1 \quad (16)$$

$$\text{Força normal:} \quad C_{\text{carreg}} = 0.70 \quad (17)$$

Sabe-se que os ensaios de fadiga sob torção apresentam uma resistência que é 0.577 vezes a resistência à fadiga sob flexão rotativa (NORTON, 2004).

4.1.5.2 Fator de tamanho

Os corpos de prova submetidos a ensaios são de pequenas dimensões comparados ao produto final de projeto. Então, quando a peça for de diâmetro maior que a do corpo de prova, deve-se aplicar o fator de tamanho (C_{tamanho}). Já que peças maiores falham sob tensões menores, devido a maior probabilidade de um defeito estar presente. Para isso, temos uma equação simples, apresentada nas equações 18 e 19, considerada bastante conservadora (NORTON, 2004).

$$\text{Para } d \leq 8 \text{ mm:} \quad C_{\text{tamanho}} = 1 \quad (18)$$

$$\text{Para } 8 \text{ mm} < d \leq 250 \text{ mm:} \quad C_{\text{tamanho}} = 1.189d^{-0.097} \quad (19)$$

Para tamanhos maiores que 250 mm, é recomendado utilizar $C_{\text{tamanho}} = 0,6$. Vale ressaltar que estas equações foram estabelecidas a partir de ensaios em aços, para materiais não-ferrosos ela é questionável (NORTON, 2004).

4.1.5.3 Fator de superfície

Falhas por fadiga geralmente iniciam-se na superfície do componente. Sendo as condições superficiais determinantes na vida em fadiga. Assim, esse fator leva em consideração o acabamento da superfície, conforme exemplo na Figura 11, que orienta na seleção do fator de superfície para diversos acabamentos comuns no aço, sendo também utilizados para ligas de alumínio e outros metais dúcteis. Enquanto que para ferros fundidos deve-se adotar $C_{\text{superf}} = 1$, já que suas descontinuidades internas diminuem os efeitos de uma superfície rugosa (NORTON, 2004).

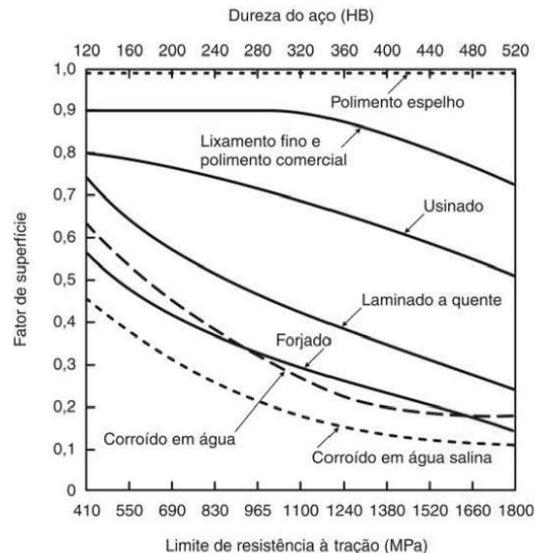


Figura 11 - Valores para fator de superfície.
Fonte: GARCIA (2012).

4.1.5.4 Fator de temperatura

Ensaio de fadiga são usualmente realizados a temperatura ambiente, todavia, quando a peça é projetada para trabalhar em temperaturas mais elevadas é

necessário a correção na resistência à fadiga. Para isto, NORTON (2004 apud SHIGLEY E MITCHELL, 1983), sugerem os seguintes fatores:

$$\text{Para } T \leq 450^{\circ}\text{C} \quad C_{\text{temp}} = 1 \quad (20)$$

$$\text{Para } 450^{\circ}\text{C} < T \leq 550^{\circ}\text{C}: \quad C_{\text{temp}} = 1 - 0.0058(T-450) \quad (21)$$

No entanto, estes fatores foram estabelecidos para aços onde temperaturas acima de 50% da temperatura de fusão absoluta do material, a fluência passa a ser um fator significativo para o comportamento do mesmo. Assim, eles não devem ser utilizados para outros metais como alumínio, magnésio e ligas de cobre (NORTON, 2004).

4.1.5.5 Fator de confiabilidade

Este fator expressa a confiança esperada no limite de resistência à fadiga estimado por valores tabelados. Existe uma considerável dispersão nos ensaios realizados com o mesmo material sob condições semelhantes de ensaio. HAUGEN e WIRSCHING (1975) relatam que um desvio-padrão das resistências à fadiga de aços raramente excede 8% de seus valores médios. A Tabela 1 apresenta os fatores de confiabilidade assumindo um desvio-padrão de 8% da média (NORTON, 2004).

Tabela 1 - Fatores de confiabilidade para $S_d = 0,08\mu$.

CONFIABILIDADE %	$C_{\text{CONF.}}$
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: NORTON (2004).

Por exemplo, desejando que 99,99% das peças igualem ou superem o valor de resistência assumido, é necessário multiplicar o valor da resistência média por 0,702 (NORTON, 2004)

4.1.5.6 Fator de ambiente

O ambiente pode ter efeitos significativos na resistência à fadiga, que é evidenciado pelas curvas de superfícies corroídas na Figura 11 apresentada anteriormente, mostrando o efeito da água pura e corrosiva.

Um dos fatores importantes é se a peça está em meio corrosivo e qual a influência deste meio sobre o material. Ambientes corrosivos influenciam negativamente na resistência à fadiga. Para isso, a especificação de materiais que resistem mais à corrosão, a aplicação de camadas superficiais protetoras e a diminuição da intensidade corrosiva do ambiente reduzem a taxa de corrosão da peça e melhoram a resistência à fadiga do material (DIETER, 1981).

4.1.6 Considerações sobre a projetos de componentes

Existem alguns modelos de falha por fadiga que dependendo do projeto podem ser adotadas. Cita-se a abordagem tensão-número de ciclos e deformação número de ciclos como uma das principais. A escolha do modelo, para fins de projeto, depende do tipo de componente ou máquina que será projetada e sua aplicação. Usualmente, utiliza-se o modelo tensão-número de ciclos (S-N), pois a vida requerida de projeto está na escala do regime de alto-ciclo (NORTON, 2004).

Máquinas que trabalham em regime de baixo-ciclo são aquelas de transporte ou serviço como por exemplo a estrutura de um avião, o casco de um navio, a carcaça de um veículo, pois eles têm um histórico de carregamento variável devido a condições de ambiente no qual irá operar. Sendo assim, o número total de ciclos é menos previsível para estes tipos de componentes (NORTON, 2004).

4.2 ENSAIO DE FADIGA

O ensaio de fadiga consiste na aplicação de carga cíclica em um determinado corpo de prova apropriado e padronizado por normas segundo o tipo de ensaio a ser realizado (GARCIA, 2012).

Capaz de fornecer dados quantitativos relativos às características de um material ou componente, o ensaio de fadiga é realizado em um conjunto de amostras e vários níveis de tensão para gerar uma relação de vida em fadiga em função da tensão (ISO 12107:2012). Seus principais resultados normalmente obtidos através de gráficos Tensão-Número de ciclos, são: limite de resistência à fadiga, resistência à fadiga e a vida em fadiga (GARCIA, 2012).

Segundo Garcia (2012, p. 216), os estudos em fadiga são realizados em materiais íntegros em níveis de tensões abaixo da ruptura do material e para um número significativo de ciclos, ou seja, maiores que 10^2 ciclos. Ensaio envolvendo a preexistência de uma trinca ou defeito superficial não são abordados puros e simplesmente como fadiga, mas sim de uma forma mais complexa, envolvendo a mecânica da fratura e a tenacidade da fratura em condições cíclicas.

Os tipos de ensaio de fadiga são o ensaio por flexão rotativa, por tração-compressão, por torção e por flexão (GARCIA, 2012). Entretanto o ensaio por flexão rotativa segue sendo o ensaio mais usual pois realiza testes em alta frequência, diminuindo o tempo necessário aos testes e assim viabilizar sua execução em larga escala (NOGUERIA, 2014). O ensaio é apresentado na Figura 12.

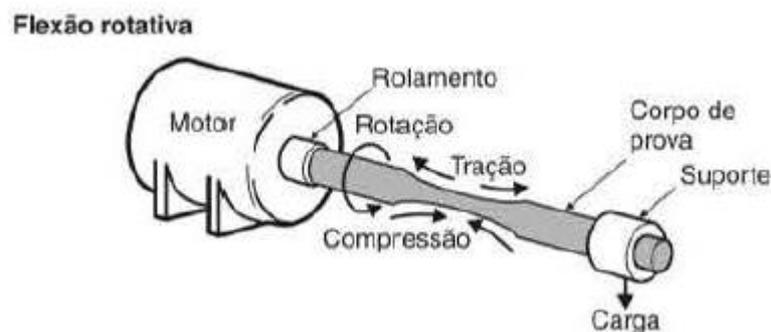


Figura 12 - Ensaio de fadiga por flexão rotativa.
Fonte: GARCIA (2012).

Segundo Garcia (2012, p. 218), os ensaios de fadiga podem ser distinguidos conforme categoria:

- Fratura de fadiga: O ensaio é realizado com a existência de pré-trinca e tem como objetivo controlar o crescimento da trinca. São realizadas em componentes de grande porte, como estruturas de pontes, navios, aviões, etc;
- Fadiga de desgaste: O ensaio é realizado sem a existência de pré-trinca e tem como objetivo controlar a nucleação de trincas. Neste ensaio estão incluídos as fadigas de alto e baixo ciclo. A fadiga de alto ciclo é aquela com baixas tensões cíclicas e número elevado de ciclos para ocorrer a fratura, enquanto a fadiga de baixo ciclo com altas tensões e baixo número de ciclos.

4.2.1 Ensaio de flexão rotativa

Os dados existentes sobre a resistência à fadiga sob tensões alternadas devem-se, essencialmente, ao ensaio de flexão rotativa de R.R. Moore, que consiste em submeter corpos de provas extremamente polidos e de aproximadamente 10 mm de diâmetro em um eixo bi apoiado giratório a níveis diferentes de tensão, montado em um suporte de fixação causando flexão pura de amplitude constante, à rotação constante (NORTON, 2004).

A máquina para testes de fadiga R.R. Moore utiliza um motor que proporciona a força rotativa que é transmitida para o corpo de prova por meio de duas caixas de rolamento. O corpo de prova é montado no fuso de cada caixa com o auxílio de aros. Durante o ensaio, o corpo de prova funciona como uma simples viga que é simetricamente carregada por dois pontos. Quando giradas por meia revolução, as tensões compressivas nas fibras acima do eixo neutro do corpo de prova são invertidas para tensões de tração de igual intensidade. Ao concluir a revolução, as tensões são invertidas novamente, de modo que durante uma revolução completa o corpo de prova passa por um ciclo completo de tensão de flexão (tração e compressão) (INSTRON, 2008).

A Figura 13 demonstra o andamento da tensão aplicada no ponto P ao longo de uma revolução, passando pela tensão de tração e compressão.

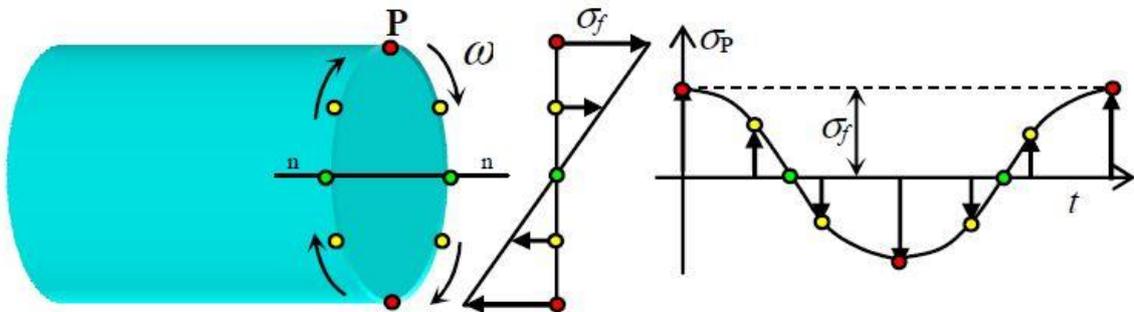


Figura 13 – Andamento da tensão no ponto P na variação tempo.
Fonte: (UNIPA, 2016).

A Figura 14 mostra a representação esquemática da máquina para testes de fadiga de vigas rotativas em alta velocidade modelo R.R. Moore e seu respectivo diagrama de momento fletor.

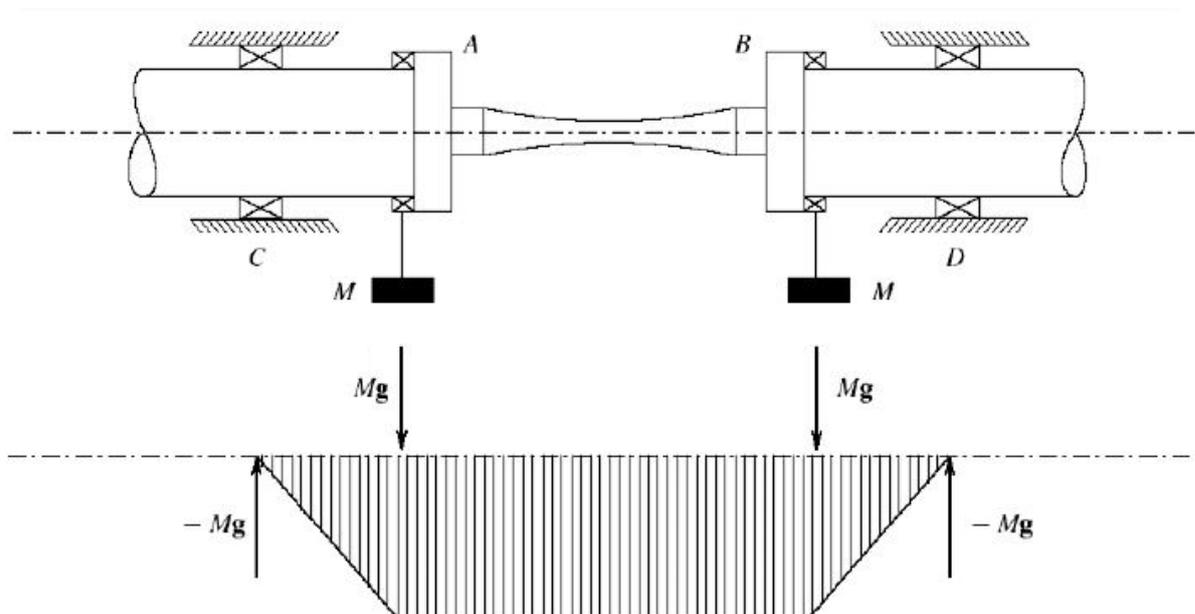


Figura 14 – Momento fletor do ensaio flexão-rotativa
Fonte: Adaptado de CDMUNICAS (2016).

Dependendo da rotação, um ensaio onde espera-se uma vida de 10^8 ciclos pode durar aproximadamente 40 dias. Posteriormente os dados são plotados em um gráfico de resistência à fadiga normalizada, S_f / S_{ut} em função do número de ciclos, N (NORTON, 2004).

A Figura 15 mostra as faixas de dispersão resultantes de ensaios realizados em alumínio de diversos tipos, incluindo ligas forjadas (com $S_{ut} > 48\text{kpsi} = 330\text{ Mpa}$), fundidas em molde permanente e em areia (NORTON, 2004).

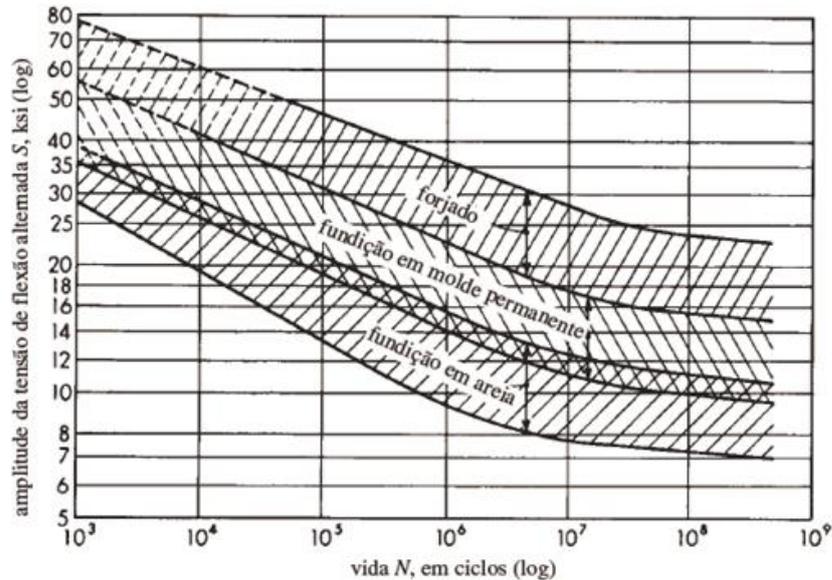


Figura 15 - Bandas de curvas S-N para ligas de alumínio.
 Fonte: NORTON (2004, apud JUVINALL, R. C., 1967).

Nota-se que o alumínio não possui um limite de fadiga, pois então a resistência à fadiga, S_f , é usualmente tomada como sendo o valor médio da tensão de falha em $N = 5E8$ ciclos (NORTON, 2004).

A Figura 16 mostra a tendência de vida em fadiga para um número de ligas de alumínio com resistência à tração estática variável. A resistência à fadiga se dá pela equação (24). No entanto, observa-se que para ligas de alumínio com tensão de ruptura, S_{ut} , maior que 330 MPa, a resistência à fadiga estabiliza-se para um valor de 130 MPa, por consequência segue-se a equação (25). Caso semelhante ocorre para os aços, onde a limite de fadiga se dá pela equação (22) com tensão de ruptura, S_{ut} , menores que 1378 Mpa e para aços com tensão de ruptura superiores à 700 MPa o limite à fadiga estabiliza-se para um valor de 700 MPa (NORTON, 2004).

$$\text{Aços:} \quad S_{e'} = 0.5 S_{ut} \quad \text{para } S_{ut} < 1400 \text{ MPa} \quad (22)$$

$$S_{e'} = 700 \text{ Mpa} \quad \text{para } S_{ut} \geq 1400 \text{ MPa} \quad (23)$$

$$\text{Alumínios: } S_{f@5E8} = 0.4 S_{ut} \quad \text{para } S_{ut} < 330 \text{ MPa} \quad (24)$$

$$S_{f@5E8} = 130 \text{ Mpa} \quad \text{para } S_{ut} \geq 330 \text{ MPa} \quad (25)$$

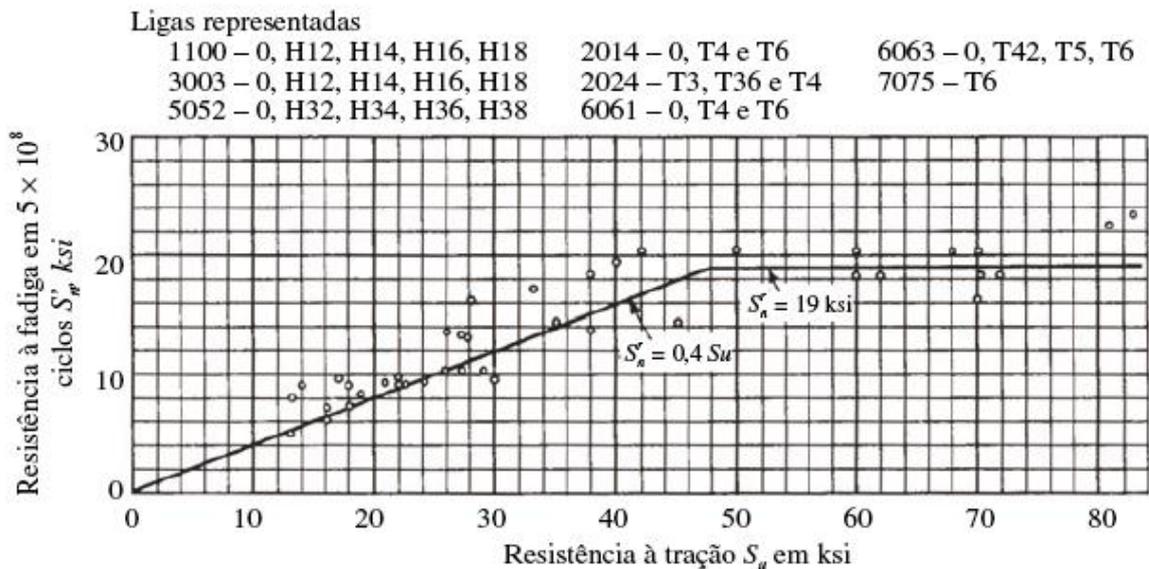


Figura 16 - Resistência à fadiga em 5×10^8 ciclos para ligas de alumínio forjadas. Fonte: NORTON (2004, apud JUVINALL, R.C., 1967).

4.2.2 Desenho do diagrama S-N

As equações de resistência à fadiga e limite de resistência a fadiga corrigidas trazem informações a respeito dos materiais na região de alto-ciclo da curva S-N. Com a adição de informações da região de baixo-ciclo podemos estimar o diagrama para materiais e aplicações particulares desejadas (NORTON, 2004).

Porém se tratando de um experimento existem algumas técnicas estatísticas para uma elaboração mais precisa de vida em fadiga ou à resistência em fadiga dos componentes mecânicos.

A primeira técnica, chamada de Probabilidade à fratura, consiste em adotar uma série de curvas de probabilidade constante para um tal número de ciclos, aonde espera-se que com uma certa tensão o material venha a falhar. No entanto está técnica requer um número elevado de corpos de prova, cerca de 30 para cada nível

de tensão. Verifica-se, na Figura 17, que para o número de ciclos N_2 , 50% dos corpos de prova sofreram fratura para uma tensão cíclica σ_1 (GARCIA, 2012).

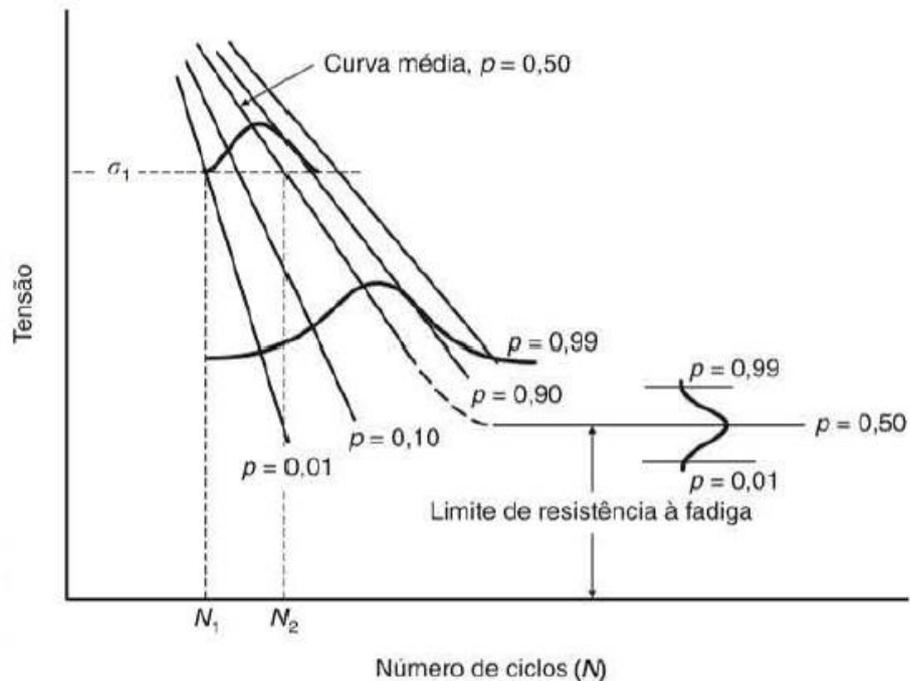


Figura 17 - Apresentação de resultados por meio de curva de probabilidade.
 Fonte: (GARCIA, 2012).

A segunda técnica, chamada de Tensões Limites, onde de acordo com a norma ASTM E468, estabelece um método de apresentação dos resultados de ensaio na forma de um gráfico, devendo o mesmo ser apresentado na forma de duas linhas, uma para a varredura de Tensão máxima e outra para a de Tensão mínima. Além de todos os pontos obtidos no ensaio. A Figura 18 apresenta um esboço de como deve ser apresentado os resultados em um ensaio de flexão rotativa (GARCIA, 2012).

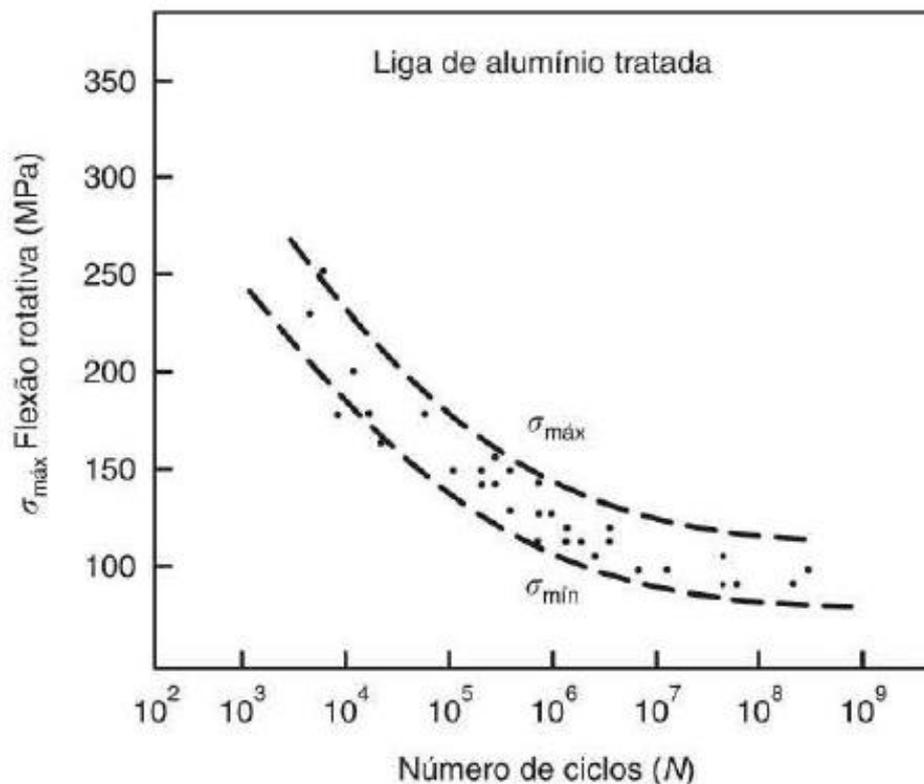


Figura 18 - Esboço da apresentação de resultados conforme ASTM E468.
Fonte: (GARCIA, 2012).

O terceiro método, chamado Método Escada, ao contrário dos anteriores não exige um número elevado de corpos de prova, aproximadamente de 25. Este método consiste em perseguir o valor do número de ciclos em que mais provavelmente irá acontecer a fratura, ensaiando-o para um valor de tensão próximo ao valor estimado da resistência à fadiga para que o corpo de prova não venha a romper anteriormente a um número de ciclos $N=10E7$. Após encontrado este ponto, eleva-se a tensão do ensaio, até atingir uma tensão que rompa o corpo de prova. Reverte-se novamente o procedimento, até que todos os corpos de prova tenham sido ensaiados (GARCIA, 2012).

4.2.2 Comportamento de carregamentos cíclicos

Segundo NASCIMENTO (2015, p.62) a resistência do material a deformação pode aumentar durante um carregamento cíclico, tomando assim a deformação cada vez menor sob o mesmo nível de tensão aplicada pois o limite de

escoamento cíclico é superior ao monotônico, encontrado em ensaios de tração-deformação. Este fenômeno é conhecido como endurecimento cíclico. Outro fenômeno que pode ocorrer é o amolecimento cíclico, neste caso ocorrerá um aumento na deformação durante o carregamento.

Quando um material apresenta relação entre 1,2 e 1,4 entre a tensão máxima e a tensão de escoamento, espera-se um comportamento que possa endurecer ou amolecer o material, conseqüentemente se ocorrer um dos dois fenômenos a amplitude de tensões durante o ensaio não traduzirá a verdadeira situação real de sollicitação do material (NASCIMENTO, 2015).

Na Figura 19 são apresentados possíveis comportamentos cíclicos, os do lado esquerdo têm como variável dependente a deformação, onde a tensão nominal de aplicação é superior ao limite de escoamento (fadiga de baixo ciclo), enquanto os comportamentos do lado direito têm como variável dependente a tensão, cuja tensão nominal de aplicação é inferior ao limite de escoamento (fadiga de alto ciclo) (NASCIMENTO, 2015).

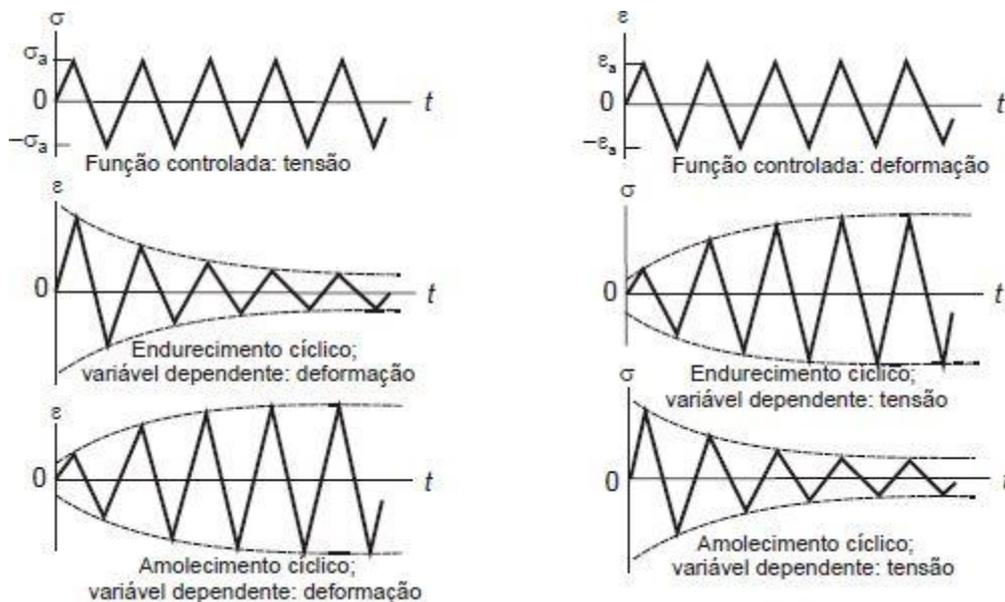


Figura 19 – Representação de possíveis comportamentos cíclicos
Fonte: (NASCIMENTO, 2015)

O gráfico Tensão-número de ciclos também pode ser obtido por meio de um ensaio de fadiga sob força normal. A principal diferença, com relação ao ensaio

de flexão rotativa, refere-se ao fato de que em tensão normal toda a seção transversal é solicitada (uniformemente) em tração ou compressão axial, em vez de ter-se uma distribuição linear ao longo do diâmetro do corpo de prova, sendo que a tensão é máxima nas fibras mais externas e nula no centro da seção, podendo assim explicar o elevado número de ciclos gerados nos ensaios (NORTON, 2004).

Um dos resultados dos ensaios sob flexão rotativa é que a resistência à fadiga apresenta valores superiores aos obtidos nos ensaios sob força normal. Acredita-se que esse fato esteja ligado à maior probabilidade de uma microtrinca estar presente na área maior sujeita a altas tensões em um corpo de prova sob tensão uniforme do que em uma menor área sujeita a altas tensões do corpo de prova sob flexão rotativa (NORTON, 2004).

Convém ressaltar que a dificuldade em se criar um carregamento axial sem nenhuma excentricidade pode também ser uma causa para os baixos valores de resistência, visto que carregamentos excêntricos proporcionam uma sobreposição de momentos fletores nas cargas axiais (NORTON, 2004).

4.3 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio é um dos elementos metálicos mais abundante na crosta terrestre. Aparecendo principalmente em forma de óxidos, silicatos e algumas vezes fluoretos. Tendo como principal característica a sua baixa densidade e relação massa da estrutura/resistência do material favorável (FONSECA, 2003). O alumínio, apesar de sua abundância na crosta terrestre, é o metal mais jovem utilizado em escala industrial e começou a ser produzido comercialmente há cerca de 150 anos (ABAL, 2016).

A necessidade da redução de peso na indústria de transporte fez com que o homem buscasse materiais mais leves na substituição do aço. Assim, o alumínio passou a ser considerado um desses materiais como alternativa em componentes e máquinas rotativas. Todavia, estudos mostram que o crescimento da trinca devido à fadiga é mais sensível no alumínio do que em aços, portanto, estudos sobre o material devem ser realizados anteriormente a qualquer aplicação (FONTE, 2015).

A formação de ligas leva ao aumento da resistência mecânica do alumínio, que puro (99,99%) tem baixa resistência, apenas 60 MPa em média. As impurezas contidas nele, principalmente ferro, silício e cobre, contribuem para um aumento de resistência em mais de 50%. Por meio da introdução de liga, trabalho a frio ou tratamento térmico, pode-se alcançar uma resistência à tração de 600 MPa. (FONSECA, 2003).

As ligas de alumínio são utilizadas então como materiais estruturais devido a sua baixa densidade (2700 kg/m^3), facilidade de reciclagem, propriedades físicas e mecânicas como boa relação densidade / tensão limite de escoamento, bem como boas características de superfície. Entretanto, sua aplicação tende a ser limitada a baixos ciclos devido ao alumínio não possuir um limite de resistência à fadiga, com curvas continuamente decrescentes em relação ao aumento do número de ciclos (NAKAMURA, 2010).

Nascimento (2015 apud ALUMINUM ASSOCIATION, 2000) compartilha que devido à grande variedade de ligas de alumínio e tratamentos térmicos existentes, uma classificação se faz necessária, sendo que a mais adotada é da ALUMINUM ASSOCIATION (AA). Assim, as ligas podem ser classificadas conforme seu processo de fabricação, composição química ou tratamento térmico que recebem. O Quadro 3, mostrado abaixo, mostra os principais elementos de liga por divisão de grupo.

DESIGNAÇÃO	GRUPO – PRINCIPAIS ELEMENTOS DE LIGA	PRINCIPAIS IMPUREZAS	COMPOSIÇÃO
1xxx	Alumínio (mín 99,00% de pureza)	Fe, Si	Al – Fe – Si
2xxx	Cobre	Mg	Al – Cu – Mg
3xxx	Manganês		Al – Mn
4xxx	Silício		Al – Si
5xxx	Magnésio		Al – Mg
6xxx	Magnésio e Silício		Al – Mg – Si
7xxx	Zinco	Mg, Cu, Cr	Al – Zn – Mg – Cu- Cr
8xxx	Outros elementos	-	-

Quadro 3 - Principais elementos de liga e impurezas por grupo.

Fonte: Aluminum Matter (2011) apud Nascimento (2015)

Ainda segundo Nascimento (2015 apud ALUMINUM ASSOCIATION, 2000), “As propriedades das ligas são determinadas pelos seus elementos ligantes. Cada grupo de liga tem seu principal elemento ligante podendo contar com aditivos”.

4.3.1 Ligas 6xxx

As ligas ternárias que tem como base Al-Si-Mg (série 6xxx) representam uma nova geração de ligas de alumínio que vem sendo desenvolvida nos últimos anos (NASCIMENTO, 2015).

As ligas alumínio-magnésio-silício são utilizadas em estruturas que necessitam de boa resistência mecânica acompanhada de boa resistência à corrosão, como carrocerias de veículos para transporte rodoviário e ferroviário. A adição de magnésio em solução sólida aumenta notadamente a resistência mecânica do alumínio, sem indevidamente decrescer a ductilidade. Tem boa resistência à corrosão, soldabilidade e conformabilidade (FONSECA, 2003).

O silício é utilizado com o magnésio para produzir um composto intermetálico (Mg_2Si), que é uma fase endurecedora que não afeta a resistência à corrosão e que por sua vez origina um sistema quase-binário, Al- Mg_2Si (FONSECA Jr, 2003).

O magnésio precipita preferencialmente em contorno de grão como uma fase altamente anódica (Mg_5Al_8 ou Mg_5Al_3), produzindo susceptibilidade à fratura intergranular e à corrosão sob tensão. Pequenas adições de magnésio em ligas que contém silício tornam a liga termicamente tratável (FONSECA, 2003).

4.3.2 Liga AA6063

A liga de alumínio AA6063 é uma das ligas mais populares da série 6XXX, oferecendo alta qualidade de acabamento superficial e uma boa extrudabilidade, especialmente em aplicações voltadas ao mercado de construção civil como portas, esquadrias, calhas, etc. Também usada em uma grande variedade de aplicações arquitetônicas, perfis para móveis, pisos de implementos rodoviários, sistema de irrigação e em construção mecânica como trocadores de calor, indústria automotiva e

aeroespacial devido à combinação de baixo peso e resistência adequada (NASCIMENTO, 2015).

No setor automotivo e de transportes, a liga 6063 pode ser aplicada em estruturas de carrocerias para ônibus e caminhões, vagões ferroviários e veículos em geral, componentes do chassi, sistemas de absorção de impacto, trilhos de banco, longarinas de teto, etc (ABAL, 2016).

Em condições de tratamento térmico ela oferece boa resistência à corrosão. Com tratamentos T5, T52 ou T6 é geralmente utilizada em aplicações elétricas, devido a sua boa condutividade térmica. Sendo também considerada boa para usinagem quando recebida tratamento T5 e T6 (ALCOA, 2010).

Tem como principais ligantes o Magnésio (Mg) e o Silício (Si), que não ultrapassam 1,5% de quantidade, balanceados quase que proporcionalmente. O Magnésio aumenta as propriedades mecânicas, melhora a resistência à corrosão e soldabilidade, enquanto o Silício, melhora a fusibilidade das ligas (NASCIMENTO, 2015). A liga tem a seguinte composição química, indicada em porcentagem em massa expressos em intervalos, Tabela 2:

Tabela 2 - Composição química liga 6063

ELEMENTO	% EM MASSA
Mn (Manganês)	0.0 – 0.10
Fe (Ferro)	0.0 – 0.35
Mg (Magnésio)	0.45 – 0.90
Si (Silício)	0.20 – 0.60
Zn (Zinco)	0.0 – 0.10
Ti (Titânio)	0.0 – 0.10
Cr (Cromo)	0.0 – 0.10
Cu (Cobre)	0.0 – 0.10
Al (Alumínio)	Balanço

Fonte: Aluminum Alloy 6063 - ThyssenKrupp Materials (2013)

As suas propriedades físicas e mecânicas, mostradas abaixo na Tabela 6, a tornam atraentes para diminuição de custos e peso em componentes na engenharia (XIAOSHAN, 2009).

Tabela 3 - Composição química liga 6063

TÊMPERA	σ_r (Mpa)	σ_e (Mpa)	HB	Elongação (%)	S_f' (Mpa) @5x10 ⁸ ciclos
T6	241	214	73	12	69

Fonte: HANDBOOK 3 - ASM (1990)

4.4 TRATAMENTO TÉRMICO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

Tratamento térmico refere-se ao aquecimento e resfriamento que são realizados com o objetivo de alterar as propriedades mecânicas, a estrutura metalúrgica ou o estado de tensão residual de um metal. Para o alumínio, o uso da técnica está restrito à apenas algumas ligas chamadas de “ligas tratáveis termicamente”, pois existem aquelas onde nenhum esforço de melhora das propriedades significativo pode ser alcançado através do aquecimento e resfriamento da mesma (HANDBOOK 2, 1991).

Assim o termo que designa um alumínio tratado termicamente é a letra T, que deve ser seguida por um ou mais dígitos que indicam a sequência dos processos realizados: tratamento térmico ou deformações plásticas (NBR 6835, 2000).

Os principais elementos de uma liga de alumínio são o Cobre (Cu), Magnésio (Mg), Silício (Si), Manganês (Mn) e o Zinco (Zn), mostrados a seguir na Figura 20, que também representa suas combinações para ligas tratáveis termicamente e ligas não tratáveis.

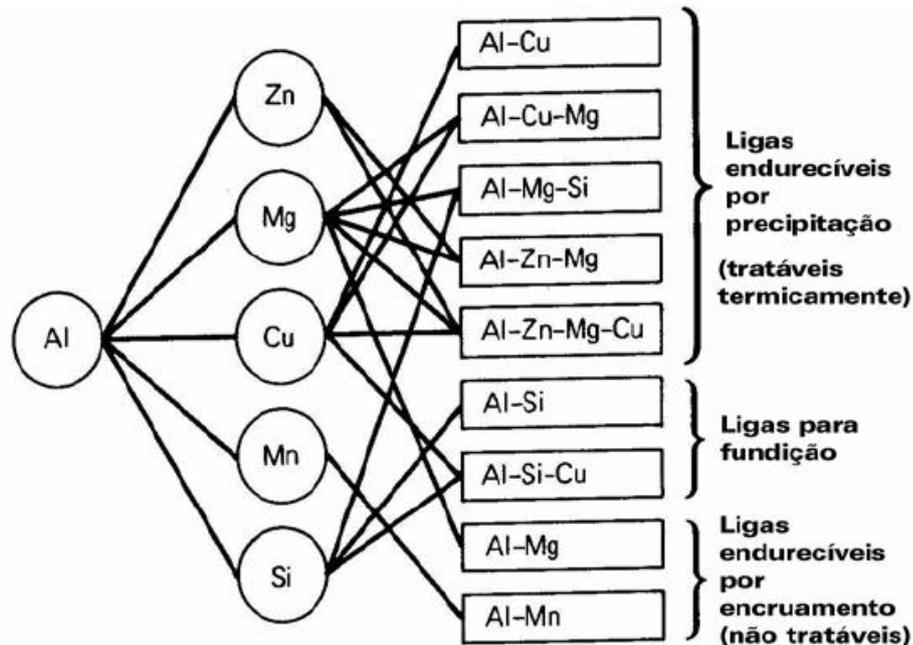


Figura 20 – Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio
 Fonte: (MELLO et al., 2009)

As ligas de alumínio que são classificadas como tratáveis termicamente, respondem aos seguintes tratamentos:

Homogeneização: Realizado a alta temperatura, por tempo prolongado, a fim de eliminar ou reduzir segregações por difusão, produzindo estruturas estáveis e controlando certas características metalúrgicas.

Solubilização/Envelhecimento: Constitui de um aquecimento para fazer entrar em solução sólida um ou vários componentes da liga, seguido de um resfriamento rápido para manter os mesmos em solução sólida supersaturada. Gradualmente as fases constituintes precipitam-se de uma maneira extremamente fina alcançando o máximo efeito de endurecimento (envelhecimento). Em algumas ligas isto ocorre espontaneamente, em outras requerem-se um reaquecimento por algumas horas.

Recozimento pleno: Tem como intuito amolecer o material para eliminação total de tensões resultantes de deformações plásticas a frio ou dos efeitos de tratamentos térmicos anteriores.

Recozimento parcial: Redução da resistência mecânica de um material deformado a frio a um nível controlado.

Estabilização: Executado para promover a estabilidade dimensional e das propriedades mecânicas, especialmente em ligas de alumínio-magnésio encruadas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000).

Nascimento (2015 apud ASM, 1990) também compartilha que de acordo com as especificações da ANSI H35.1 deve-se inicialmente diferenciar as ligas termicamente tratáveis das séries 2xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx e a maioria da série 8xxx, das não tratáveis, das séries 1xxx, 3xxx, 4xxx e 5xxx. A designação das ligas de alumínio tratáveis termicamente consiste de uma letra maiúscula individual e subdivisões principais de têmperas básicas que são indicados por um ou mais dígitos após a letra. A designação da têmpera inclui as letras “O”, “W”, “T”, “F” e “H”, conforme Quadro 4.

TÊMPERA	DESIGNAÇÃO
O	Material recozido.
W	Material em condição instável – solubilizado.
T	Material tratado termicamente, para produzir uma têmpera estável e diferente de W
F	Material como fabricado.
H	Material endurecido por deformação.

Quadro 4 - Designação básica da têmpera

Fonte: NASCIMENTO (2013 Apud ASM,1990)

Ainda segundo Nascimento (2015 apud GUIA, 2003), a designação para as ligas tratáveis termicamente definida pela letra “T”, seguida de um número de 1 a 10, define a sequência de tratamentos térmicos sofridos pela liga, conforme mostrado abaixo:

T1 – Resfriado de uma temperatura elevada em um processo de conformação e envelhecimento natural até uma condição substancialmente estável.

T2 – Resfriado de uma temperatura elevada em um processo de conformação, seguido de deformação plástica a frio e envelhecimento natural até uma condição substancialmente estável.

T3 – Solubilizado, deformado plasticamente a frio e envelhecido naturalmente até uma condição estável.

T4 – Solubilizado e envelhecido naturalmente até uma condição estável.

- T5 – Resfriado de uma temperatura elevada e envelhecido artificialmente.
- T6 – Solubilizado e envelhecido artificialmente.
- T7 – Solubilizado e estabilizado (superenvelhecimento).
- T8 – Solubilizado, deformado plasticamente a frio e então envelhecimento artificial.
- T9 – Solubilizado, envelhecido artificialmente, seguido de deformação plástica a frio.
- T10 – Resfriado de uma temperatura elevada em um processo de conformação, deformada plasticamente a frio e então envelhecido artificialmente.

4.4.1 Tratamento T6

O tratamento térmico T6 se dá pela solubilização e então envelhecimento artificial do material à temperatura de 180 °C por um intervalo de tempo de 8 horas (NASCIMENTO, 2015). A solubilização consiste em elevar o material a uma temperatura próxima ao ponto de fusão, mantendo-o a essa temperatura por um período suficiente para permitir que um ou vários constituintes da liga entrem em solução sólida seguido de um resfriamento brusco para manter os mesmos em solução sólida supersaturada (NBR 6835, 2000).

A temperatura de solubilização é determinada a partir do diagrama de fase da liga. Para solubilização do alumínio, esta temperatura está em torno de 500°C e varia conforme composição da liga (DA SILVA, 2013);

Após solubilizado o material passa pelo processo de envelhecimento artificial que consiste em elevar um pouco a temperatura em relação a temperatura ambiente para precipitar constituintes em solução sólida supersaturada (NBR 6835, 2000).

5 METODOLOGIA

A metodologia da presente pesquisa é dividida em duas partes, sendo que na primeira são apresentados os métodos e as técnicas utilizadas e na segunda são apresentados os materiais e os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios.

5.1 MÉTODOS E TÉCNICAS

Para a realização dos ensaios foi necessário a fabricação dos corpos de prova projetados com base no manual de pré-instalação da máquina para testes de fadiga de vigas rotativas em alta velocidade modelo R.R. Moore.

A primeira etapa foi a programação de um conjunto de comandos de usinagem CNC.

Segundo a norma ISO 1143:2010, a condição da superfície das amostras tem um efeito significativo sobre os resultados do teste. Este efeito é geralmente associado com um ou mais dos seguintes fatores:

- A rugosidade da superfície da amostra;
- A presença de tensões residuais;
- Alteração da microestrutura do material;
- A introdução de contaminantes.

O processo de usinagem pode produzir tensões residuais na superfície do corpo de prova afetando os resultados do ensaio. Estas tensões podem ser induzidas por gradientes de calor na fase de usinagem ou podem ser associados com a deformação do material ou alterações macroestruturais (ISO 1143, 2010).

Com o propósito de reduzi-las, a superfície do corpo de prova deve estar isenta de arranhões e com acabamento que garanta uma superfície lisa (INSTRON, 2008). Para isto, na programação CNC, uma etapa subsequente a de desbaste foi inserida, com a finalidade de dar precisão dimensional e bom acabamento superficial.

Após a conclusão de cada usinagem, é desejável que ambas as extremidades de cada amostra contenham uma marcação de forma única, de modo que após a falha do mesmo, cada metade possa ser identificada (ISO 1143, 2010).

5.1.1 Procedimento de ensaio

Os corpos de prova devem ser encaixados, auxiliados por adaptadores referentes ao diâmetro do corpo de prova, no conjunto de caixa de rolamentos.

Na Figura 21 estão mostrados o conjunto de componentes necessários para a montagem do corpo de prova na máquina para testes de vigas rotativas RR Moore.

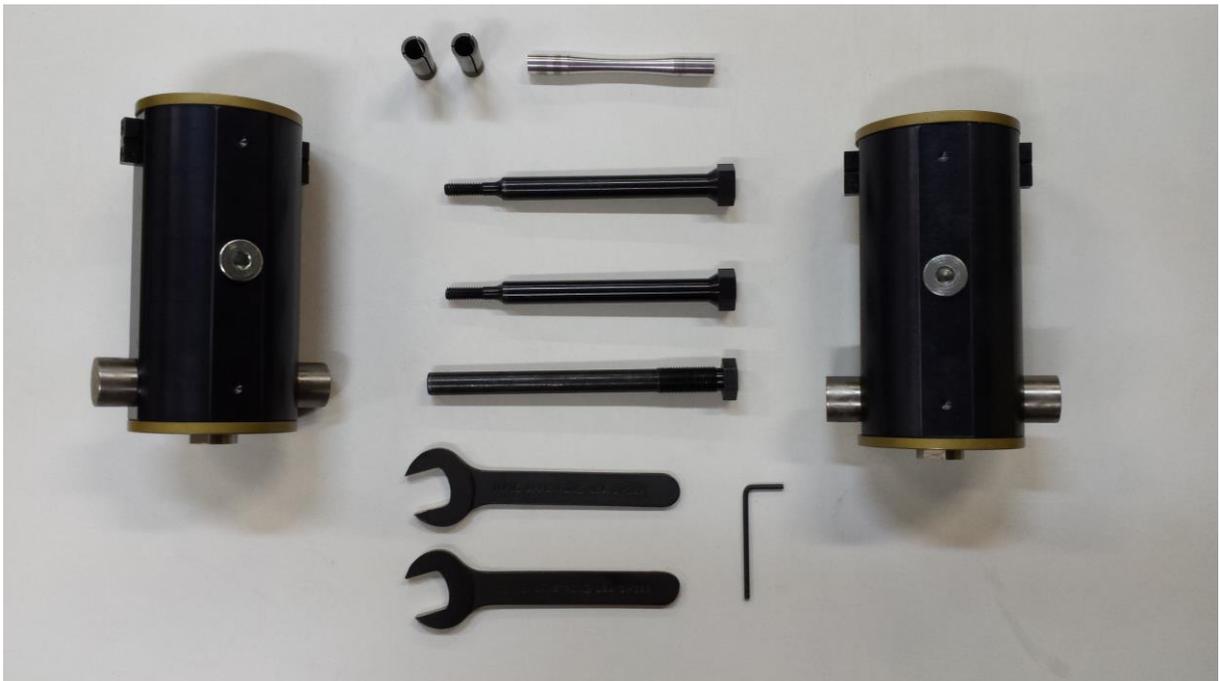


Figura 21- Conjunto de componentes
Fonte: O Autor.

O conjunto de componentes é composto por:

- a) Corpo de prova com dimensões conforme manual de pré-instalações INSTRON (Figura 22);

- b) Conjunto de dois aros RRM-C1C (Figura 23), para corpos de prova de 9,3mm de diâmetro que auxiliam no encaixe do corpo de prova nas caixas de rolamentos;
- c) Duas caixas de rolamento (Figura 24), que permitem que o corpo de prova gire;
- d) Uma barra de tração com extremidade com acoplamento para parafusar no eixo do motor e uma barra de tração com extremidade sólida que serve para conter os aros dentro da caixa de rolamentos e um parafuso extrator de corpos de prova que serve para retirar o corpo de prova da montagem após término do ensaio (Figura 25);
- e) Duas chaves fixas 11/16 Armstrong, que serve para fixação das barras de tração nos aros RRM-C1C (Figura 26);
- f) Chave Allen, que serve para fixar a barra de tração ao acoplamento do motor (Figura 27).



Figura 22- Corpo de prova conforme Manual de instruções R.R. Moore
Fonte: O Autor.



Figura 23- Dois aros RRM-C1C
Fonte: O Autor.



Figura 24- Duas caixas de rolamento
Fonte: O Autor.



Figura 25- Barras de tração e parafuso extrator
Fonte: O Autor.



Figura 26 - Chave fixa 11/16
Fonte: O Autor.



Figura 27 - Chave Allen
Fonte: O Autor.

Após a verificação dos componentes necessários, montar o corpo de prova no conjunto inserindo primeiramente o corpo de prova nos dois aros RRM-C1C conforme Figura 28.



Figura 28 - Corpo de prova inserido nos dois aros
Fonte: O Autor.

Na sequência, inserir um lado do corpo de prova em uma das caixas de rolamento, como mostra a Figura 29, parafusando a barra de tração no aro RRM-C1C.



Figura 29 - Montagem do conjunto
Fonte: O Autor.

Verificar o aperto das barras de tração para corpos de prova com o auxílio das chaves fixa 11/16 Armstrong, como mostra a Figura 30. Não forçar o aperto, pois pode torcer a barra de tração.

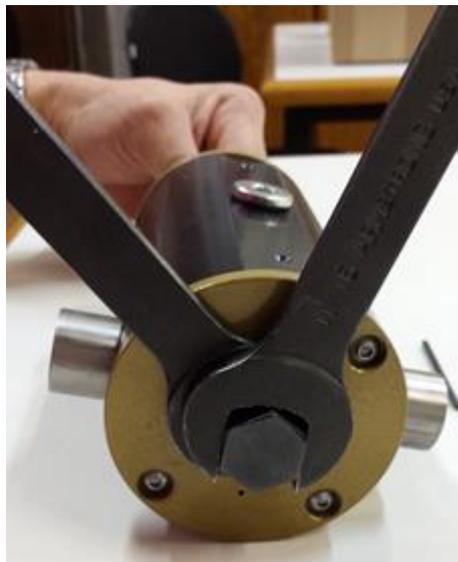


Figura 30 - Aperto da barra de tração no aro.
Fonte: O Autor.

Realizar as operações anteriores para o outro lado do corpo de prova, completando a montagem do conjunto como mostra a Figura 31.

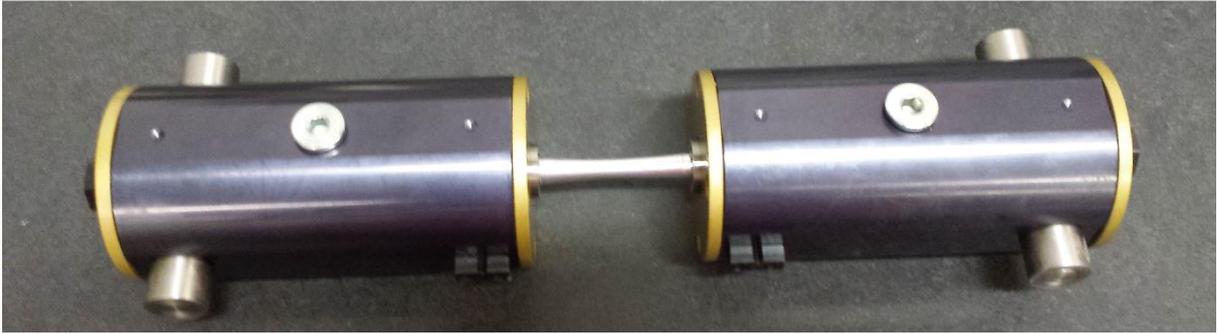


Figura 31 - Conjunto completo
Fonte: O Autor.

Após a montagem do conjunto, inseri-lo na máquina para testes de fadiga de vigas rotativas em alta velocidade modelo R.R. Moore, conforme Figura 32. Apoiar os dois conjuntos de rolamento na máquina com uma mão em cada caixa de rolamento para impedir a deformação do corpo de prova. As caixas são suportadas por rolos-guias que permitem a deflexão das mesmas em um plano vertical quando a carga é aplicada.

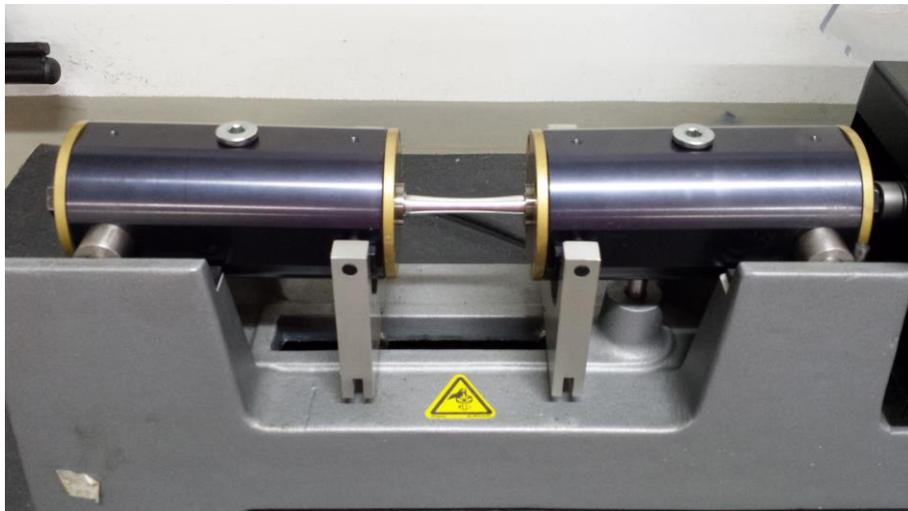


Figura 32 - Conjunto na máquina de ensaios
Fonte: O Autor.

Em seguida, apoiar o sistema de carregamento nos conjuntos de rolamento, deslizando o conjunto em direção ao motor e inserir a extremidade livre do acoplamento no furo da barra de tração. Apertar o parafuso de ajuste com ajuda da chave Allen no acoplamento flexível que fica entre a barra de tração e o motor, para garantir a rotação do sistema como um todo, como mostra Figura 33.

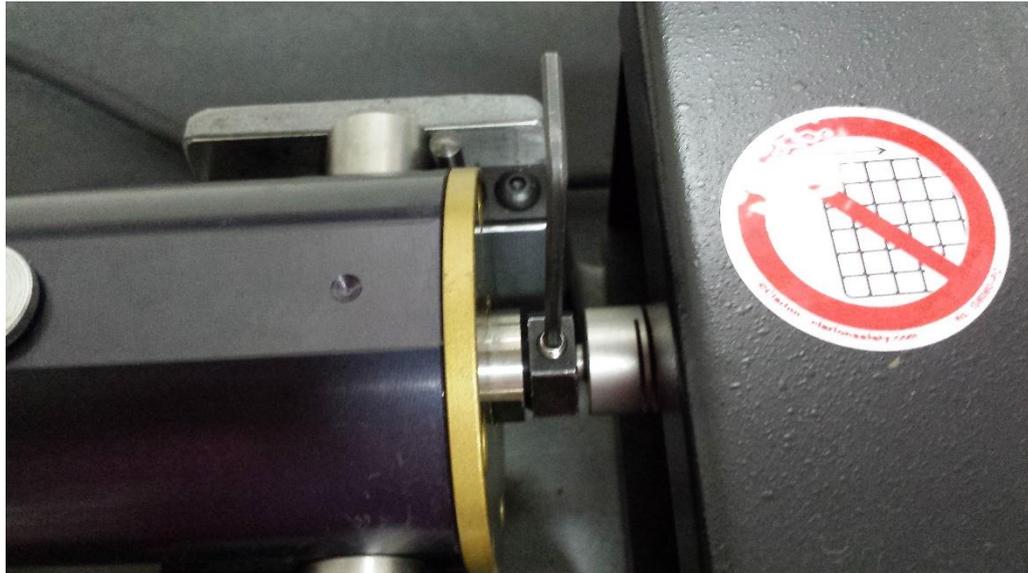


Figura 33 - Aperto do parafuso
Fonte: O Autor.

Ligar o equipamento a uma fonte adequada e zerar o contador de ciclos a cada novo procedimento. Para iniciar o ensaio, ligar a máquina usando o interruptor liga/desliga localizado no módulo de entrada de alimentação.

5.1.2 Cálculo da tensão alternante

Para o cálculo da força aplicada para obtenção d a tensão necessária, o diâmetro mínimo de cada corpo de prova deve ser medido com uma precisão de 0,01mm (ISO 1143, 2010). O cálculo de tensão alternante é dado pela equação a seguir, retirado e adaptado do manual de pré-instalação da máquina de flexão rotativa INSTRON (2008):

$$\sigma_a = \frac{16*W*101,6*9,81}{\pi*d^3} \quad (26)$$

Onde:

σ_a = (tensão alternante) em Mpa;

W = (peso a ser adicionado) em kg;

d = (diâmetro mínimo do corpo de prova) em mm;

101,6 é a distância entre o suporte na extremidade e o ponto de carga.

Deve-se levar em consideração o peso efetivo das caixas de rolamento e arreios para carregamento de pratos de pesos, que totalizam 5 kg. Ou seja, posteriormente ao cálculo do peso para uma devida tensão alternante, subtrair 5 kg do peso a ser adicionado. O carregamento dos pesos nos pratos é mostrado na Figura 34.

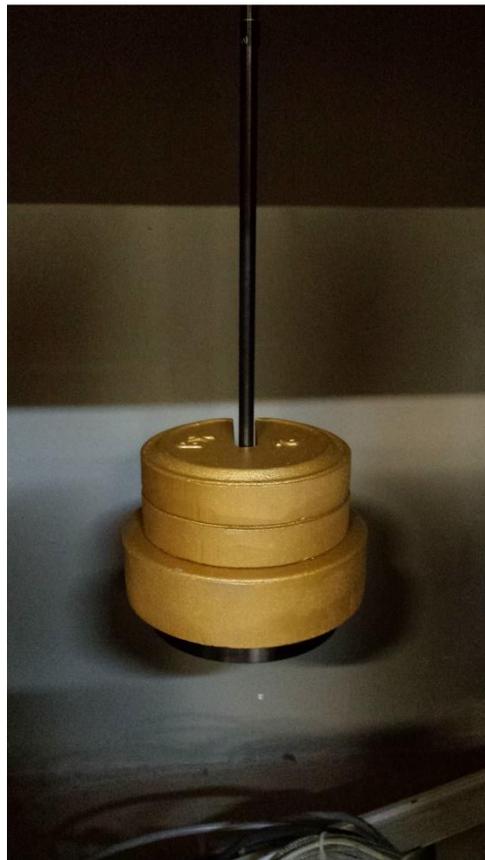


Figura 34 – Pratos de pesos.
Fonte: O Autor.

5.1.3 Frequência dos ciclos de tensão

Os ensaios são normalmente realizados a uma frequência de rotação entre 15 e 200 Hz, ou seja, 900 e 12000 rpm. Vale notar que para certos materiais, a combinação entre alta tensão aplicada e alta rotação pode causar o aquecimento excessivo do corpo de prova, afetando a vida em fadiga resultante (ISO 1143, 2010).

Segundo a ASM INTERNATIONAL (2008), a rotação usual de ensaio é de 62,5Hz, ou seja, 3750 rpm. Porém, para maior comodidade, devido a marcação no

sistema de controle do motor, apresentado na Figura 35, os ensaios de flexão rotativa foram realizados a 3600 rotações por minuto (rpm), com diferentes cargas, proporcionando diferentes níveis de tensões.



Figura 35 - Botoeira máquina de fadiga.
Fonte: O Autor.

5.1.4 Término do ensaio

O ensaio finaliza com a falha do corpo de prova, como mostrado na Figura 36. A máquina é equipada com um interruptor de Falha do Corpo de Prova, localizado próximo ao motor, onde com a ruptura do corpo de prova faz cair a caixa de rolamento e pressiona o interruptor que por sua vez cessa imediatamente a alimentação do motor, finalizando a contagem de revoluções mostradas no visor da máquina (INSTRON, 2008).

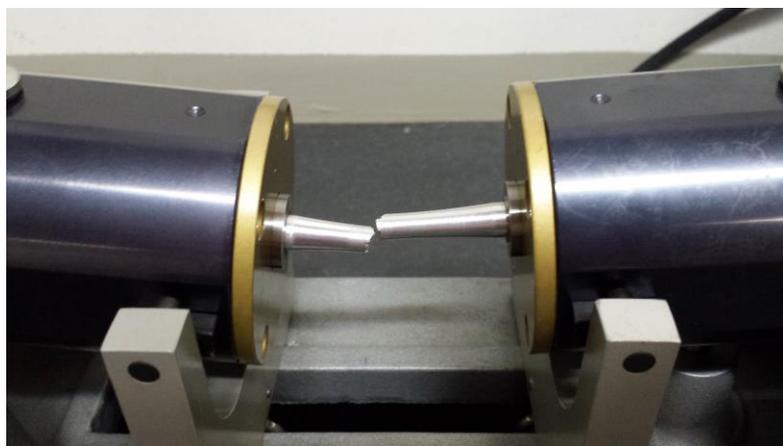


Figura 36 - Ruptura do material
Fonte: O Autor.

Caso o material venha a quebrar em uma região fora do comprimento útil, o resultado do teste é considerado inválido (ISO 12107:2012). Para remover o corpo de prova deve-se primeiramente registrar todos os dados necessários e desligar a máquina, desconectando-a da fonte de alimentação. Remover todos os pesos, abrir o compartimento do espaço de teste, afrouxar o parafuso de ajuste na barra de tração próxima ao motor, Figura 33, e deslizar a caixa de rolamento para longe do acoplamento.

Em seguida levantar os gumes da faca, indicados na Figura 37, removendo-os de seus encaixes e apoiar as forquilhas de articulação na base da máquina.

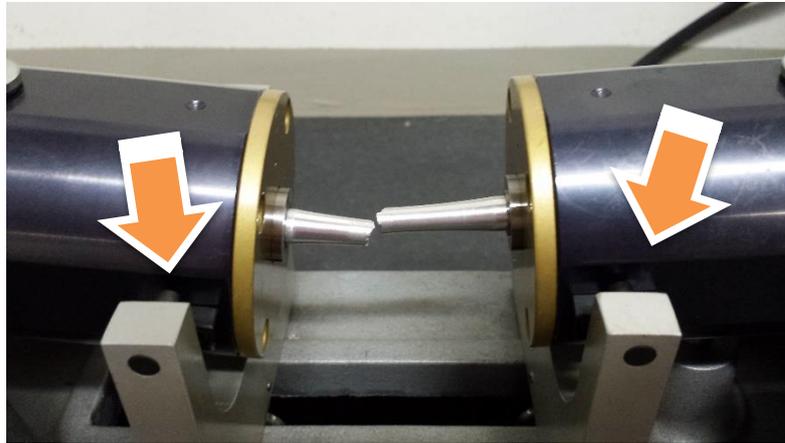


Figura 37 – Gumes da faca
Fonte: O Autor.

Erguer as caixas de rolamento e colocar em uma superfície plana onde possam ser firmemente seguras. Remover as barras de tração com as chaves 11/16 Armstrong (Figura 22) e retirar o corpo de prova da caixa de rolamento com o auxílio do Parafuso extrator (Figura 25) apertando o com as chaves 11/16 Armstrong para forçar a remoção do corpo de prova.

5.1.5 Apresentação dos resultados

As propriedades de fadiga dos materiais metálicos são determinadas por meio de testes de um conjunto de amostras a vários níveis de tensão para gerar uma relação de vida fadiga como uma função da tensão. Os resultados são geralmente

expressos como uma curva tensão-número de ciclos que se ajusta aos dados experimentais plotados em coordenadas apropriadas (ISO 12107:2012).

Os resultados dos testes de fadiga normalmente apresentam dispersão significativa, mesmo quando os testes são cuidadosamente conduzidos a fim de minimizar o erro. Um elemento desta variação se deve as desigualdades relacionadas com a composição química ou aquecimento das amostras. Porém outro elemento está relacionado com o processo de fadiga, que seria a iniciação e o crescimento de pequenas fissuras sob variações do ambiente (ISO 12107:2012).

Segundo a norma ISO 12107:2012, a resistência à fadiga de uma dada vida de fadiga, N ou número de ciclos, é considerada como uma variável aleatória. É importante que os corpos de prova sejam selecionados de modo a representarem a família do material que se destina descrever.

Para a apresentação de resultados a norma ISO 12107:2012 recomenda um mínimo de 7 corpos de prova para fins de trabalho exploratório, enquanto 28 corpos de prova são recomendados quando se deseja uma curva pretendida para projeto ou para buscas fiéis para o desenvolvimento de curvas tensão-número de ciclos em uma determinada tensão.

Para obtenção de vida em fadiga, ou curva de Wöhler, um mínimo de 10 corpos de prova é necessário para fins de trabalho exploratório, enquanto 30 é o número correspondente quando se deseja uma curva pretendida para projeto ou para buscas fiéis. Neste caso, a norma indica fazer incrementos iguais de tensão para definir claramente se a resposta é linear ou curvilínea. A réplica de resultados não é necessária.

Na apresentação de dados de fadiga, as condições de ensaio devem ser definidas de forma clara e o relatório de ensaio deve incluir detalhes sobre os seguintes itens:

- a) material ensaiado e as suas características metalúrgicas;
- b) método de tensão e do tipo de máquina utilizada;
- c) tipo, dimensões e condições da superfície da amostra e os pontos de aplicação de carga;
- d) frequência dos ciclos de tensão;
- e) temperaturas de teste e a temperatura da amostra, quando ocorre o aquecimento do corpo de prova (maior do que 35 °C);
- f) valores mínimos de temperatura do ar e umidade relativa máxima diária;

- g) critério para o final do ensaio, sua duração, ou falha completa da amostra;
- h) quaisquer desvios em relação às condições exigidas durante o ensaio;
- i) resultado do teste.

5.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os corpos de prova idênticos da liga AA6063-T6, foram obtidas através da usinagem de barras de ½ in de diâmetro disponíveis no laboratório de usinagem H006 da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *campus* Pato Branco.

Através de ensaio de tração realizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos verifica-se a força máxima suportada pelo mesmo corpo de prova utilizado para os ensaios de fadiga, calculada a tensão máxima (*Ultimate Tensile Strength*), conforme equação 27, abaixo:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F}{\pi \cdot d^2 / 4} = \frac{8,913KN}{\pi \cdot (6,9mm)^2 / 4} = 238MPa \quad (27)$$

A Figura 38 apresenta o resultado do ensaio de tração pela curva Carga x Deslocamento.

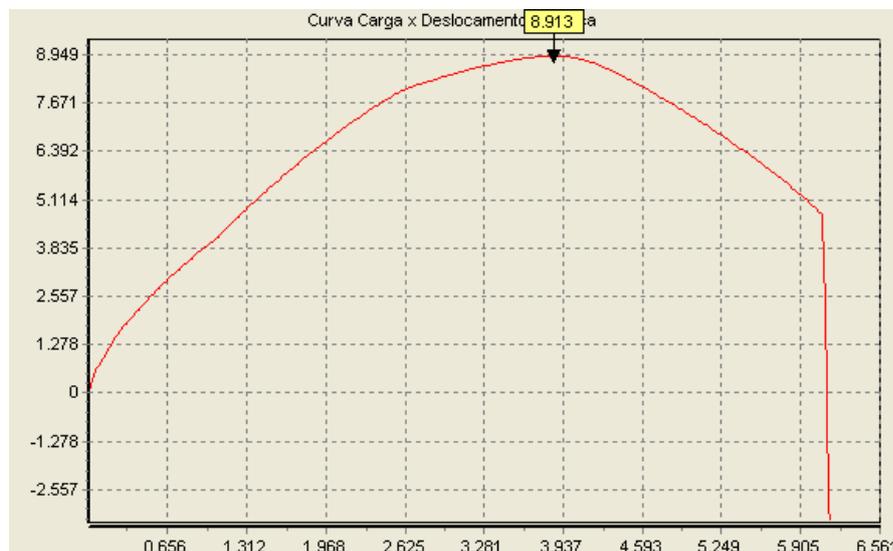


Figura 38- Ensaio de Tração - Curva Carga x Deslocamento
 Fonte: O Autor.

A figura 39 apresenta uma imagem ilustrativa da máquina de ensaio de tração disponibilizada no campus.



Figura 39 – Máquina de Ensaio de Tração
Fonte: O Autor.

O tratamento térmico da liga utilizada foi comprovado através de ensaio de dureza Rockwell B, no equipamento mostrado na Figura 40, em diversos pontos obtendo HRB40, posteriormente equivalendo à dureza Brinell (HB), chegando a dureza de 74HB. Comprovando então após ensaio de tração e de dureza as propriedades mecânicas da liga AA6063 mostradas na literatura especializada “Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials – ASM HANDBOOK” conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas da liga 6063

TÊMPERA	TENSÃO MÁXIMA (MPa)	TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)	ELONGAÇÃO (%)	DUREZA (HB)	LIMITE DE FADIGA (MPa)
O	90	48	...	25	55
T1	152	90	20	42	62
T4	172	90	22
T5	186	145	12	60	69
T6	241	214	12	73	69
T83	255	241	9	82	...
T831	207	186	10	70	...

Fonte: Adaptado de HANDBOOK 3 (1990).



Figura 40 – Máquina de ensaio Rockwell B
Fonte: O Autor.

O desenho do corpo de prova e os comandos por usinagem se encontram no apêndice A e B, respectivamente. O corpo de prova foi usinado no equipamento CNC EMCO PC TURN 55, apresentado na Figura 41, com ferramenta de ponta neutra e posteriormente foram retiradas as rebarbas em torno convencional.



Figura 41 – EMCO PC TURN 55.
Fonte: O Autor.

O corpo de prova antecedente a retirada das rebarbas e o corpo de prova acabado são apresentados nas Figura 42 e Figura 43 respectivamente.



Figura 42 - Corpo de prova semiacabado.
Fonte: O Autor.



Figura 43 - Corpos de prova acabados.
Fonte: O Autor.

5.2.1 Máquina de ensaios

A realização dos ensaios de fadiga por flexão-rotativa se deu através da máquina para testes de fadiga de vigas rotativas em alta velocidade modelo R.R. Moore disponibilizada no Laboratório de Ensaios Mecânicos – H005 da Universidade.

A máquina, apresentada na Figura 44, conta com um sistema de carregamento vertical com pesos disponibilizados pelo fabricante para variação da tensão. Um motor proporciona a força rotativa que é transmitida para o corpo de prova por meio de duas caixas de rolamento (INSTRON, 2008).



Figura 44 - Máquina de ensaios de fadiga por flexão-rotativa
Fonte: O Autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos foram sumarizados em duas seções: O desenvolvimento do procedimento de ensaio de fadiga e em seguida a caracterização da liga 6063 através da obtenção da Fadiga em Tensão constante e Tensão x vida (curva de Wöhler).

6.1 DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE FADIGA

O desenho do corpo de prova foi elaborado no programa Autodesk Fusion 360, baseado no manual de pré-instalação INSTRON da máquina de ensaios de fadiga modelo R.R. Moore. O modelo escolhido foi o R211333-1C por se tratar de um corpo de prova com maior diâmetro de haste e pela disponibilidade dos aros no laboratório. Também foi optado pelo raio de curvatura máximo, 25,4mm, conforme APÊNDICE A, com a intenção de proporcionar ao ensaio uma variabilidade maior de tensão aplicada, pois se tivéssemos um diâmetro mínimo do corpo de prova menor, qualquer carga aplicada poderia ultrapassar facilmente a tensão de ruptura do material.

Este mesmo programa auxiliou na programação CNC construindo os pontos a serem seguidos. O detalhamento sobre a usinagem dos corpos de prova está no APÊNDICE B. Tendo como parâmetros de acabamento velocidade de corte (V_c) constante em 200 m/min, velocidade de avanço (f) em 0.01 mm/revolução e profundidade de corte (a_p) de 0,1mm deixando o corpo de prova com acabamento liso.

Após manutenção e *setup* do equipamento de usinagem EMCO PC TURN 55, definindo parâmetros de referência, foi possível realizar o primeiro ensaio. Foram adicionados 9 kg de pratos extras, totalizando 14 kg, em um corpo de prova de diâmetro mínimo de 6.9 mm, gerando uma tensão alternante de 215,80 MPa. A expectativa era para que o corpo de prova rompesse a um número inferior de 10000 ciclos conforme literatura, pois este valor corresponde a aproximadamente 90% da tensão máxima da liga AA6063-T6 (241 MPa). Porém a ruptura do material aconteceu

a 76163 ciclos, conforme as Figuras 45 e 46, o corpo de prova rompido e a contagem de ciclos respectivamente.

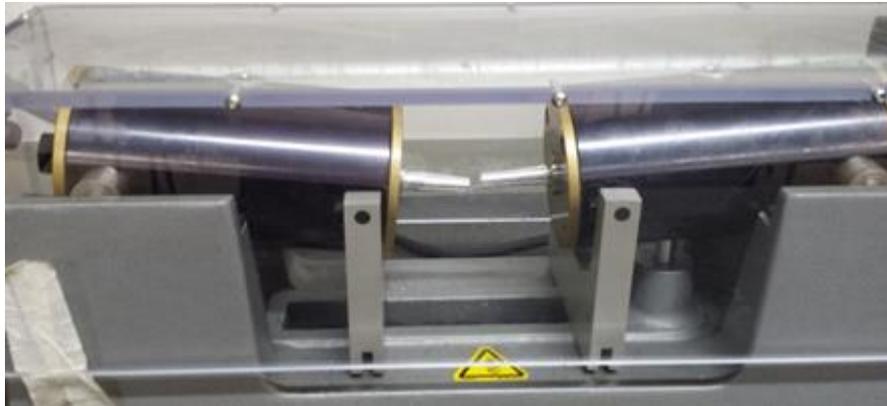


Figura 45 - Ruptura do corpo de prova
Fonte: O Autor.



Figura 46 - Contador de ciclos.
Fonte: O Autor.

O segundo ensaio foi realizado com tensão de 231,21 MPa gerados pelo acréscimo de 10 kg de pratos. A ruptura aconteceu a 59720 ciclos. Estes ensaios foram realizados à temperatura ambiente e à frequência de 60 Hz.

A partir destes primeiros ensaios, o procedimento de ensaio de fadiga foi criado conforme item 5.1 deste trabalho para na sequência, após confeccionados o restante dos corpos de prova, realizar o desenvolvimento das curvas tensão-número de ciclos para diferentes níveis de tensões e tensão-vida para uma determinada tensão para conceder a verificação da repetitividade de realização do ensaio.

6.2 CARACTERIZAÇÃO DA LIGA 6063 ATRAVÉS DA TENSÃO CONSTANTE

Após ensaiar 8 corpos de prova idênticos do material AA6063-T6 com diâmetro mínimo de 6,9 mm, aplicando uma tensão alternante de 215,80 MPa, conforme equação 26. Foram coletados os seguintes resultados mostrados no Gráfico 01.

Para a construção do gráfico foi descartado o ensaio com o corpo de prova número 26 o qual elevado número de ciclos (220306 ciclos). Conforme norma ISO 12107:2012 o número de corpos de prova é suficiente para uma apresentação de trabalho exploratório.

Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente, a uma frequência de 60Hz. Os dados foram coletados após o rompimento total do corpo de prova. Nenhum dos corpos de prova teve rompimento fora desta área.

O Gráfico 01 mostra os valores coletados no contador de revoluções da máquina de ensaios de fadiga após ruptura do material, evidenciando dispersões nos resultados.

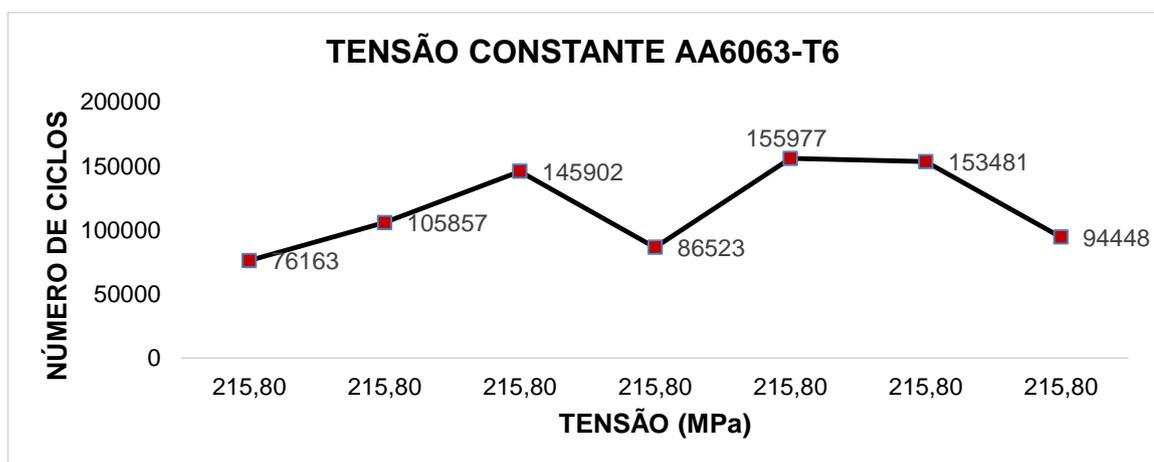


Gráfico 01 – Número de ciclos x Tensão
Fonte: O Autor.

No Gráfico 02 é demonstrado que os resultados obtidos, apesar da dispersão, se mantiveram na faixa de 10^5 ciclos, dando confiabilidade a fabricação dos corpos de prova, ao dimensional e ao procedimento de ensaio.

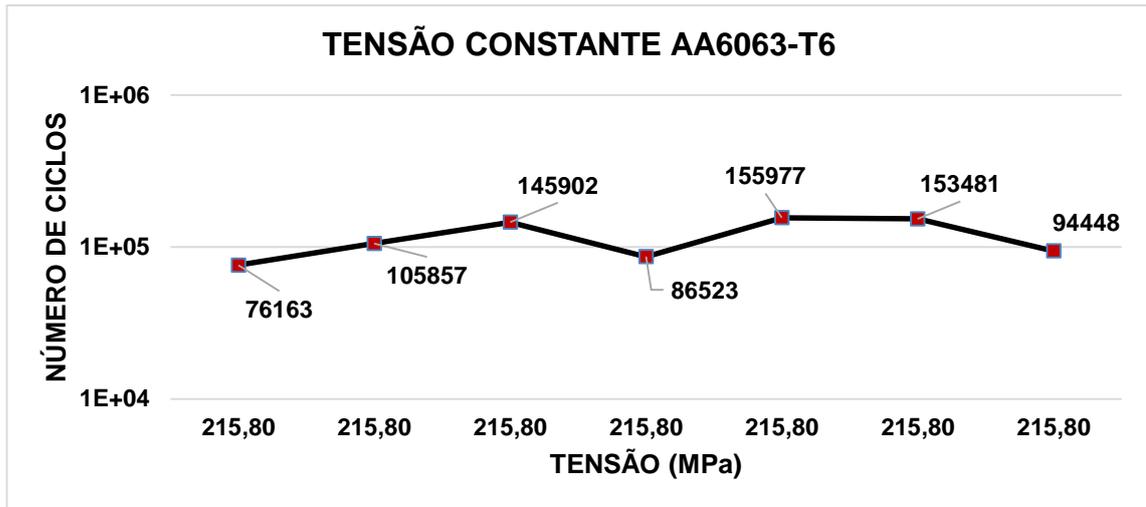


Gráfico 02 – Tensão X Número de ciclos em escala científica
 Fonte: O Autor.

A partir do programa Microsoft Excel 2013, com os resultados obtidos no ensaio, foi possível calcular o desvio padrão de 33947 ciclos para mais ou para menos e o valor médio de 116907 ciclos.

A Tabela 5 apresenta o número de ciclos para uma tensão alternante de 215,8 MPa.

Tabela 5 - Cargas, tensão alternante aplicada e vida em fadiga do material AA6063-T6

CORPO DE PROVA	TENSÃO (MPa)	CICLOS
1	215,80	76163
20	215,80	105857
21	215,80	145902
22	215,80	86523
23	215,80	155977
24	215,80	153481
25	215,80	94448
26	215,80	220306

Fonte: O Autor.

As propriedades de fadiga da liga AA6063-T6 para o nível de tensão 215,80 MPa, determinadas experimentalmente são diferentes dos valores estimados em literatura.

Segundo resultados de Da Silva (2013, p.99) em flexão-rotativa, com tensão máxima de 212 MPa, obteve um número de ciclos de 568000; 102800; 79100; 75700 e 43300, como mostrado em ANEXO A, apresentando dispersões dos resultados. O autor ainda evidencia que devido a quantidade menor de elementos de liga Manganês e Cromo, a liga AA6063-T6 apresenta comportamento ruim em fadiga no que se refere à dispersão de resultados.

Os ensaios em apresentados na Tabela 4, por serem aplicadas tensões acima do limite de escoamento do material AA6063-T6, almejando um ensaio de fadiga de baixo ciclo, controlado por deformações cíclicas, sofreu endurecimento cíclico, elevando o seu limite de escoamento. Assim, a tensão requisitada para alcançar a deformação aumenta a cada reversão.

Em ensaio de dureza realizado no material antes do ensaio de fadiga, obteve-se dureza 40HRB. Após o ensaio, os valores de dureza encontrados próximos a zona de ruptura são apresentados na tabela 6, constatando endurecimento no material ao final do teste.

Tabela 6 - Dureza dos corpos de prova após ensaio de fadiga

CORPO DE PROVA	DUREZA HRB APÓS ENSAIO DE FADIGA
1	16
20	31
21	89
22	91
23	90
24	97
25	94

Fonte: O Autor.

6.3 CARACTERIZAÇÃO DA LIGA 6063 ATRAVÉS DA CURVA DE WÖHLER

A fim de caracterizar um material em relação a vida em fadiga, a curva de Wöhler se tornou a forma padrão para demonstração de resultados.

Após ensaiar 10 corpos de prova idênticos do material AA6063-T6 foram coletados os seguintes resultados mostrados no Gráfico 03. Conforme norma ISO 12107:2012 o número de corpos de prova é suficiente para uma apresentação de trabalho exploratório. Conforme literatura o alumínio não possui limite de vida em fadiga.

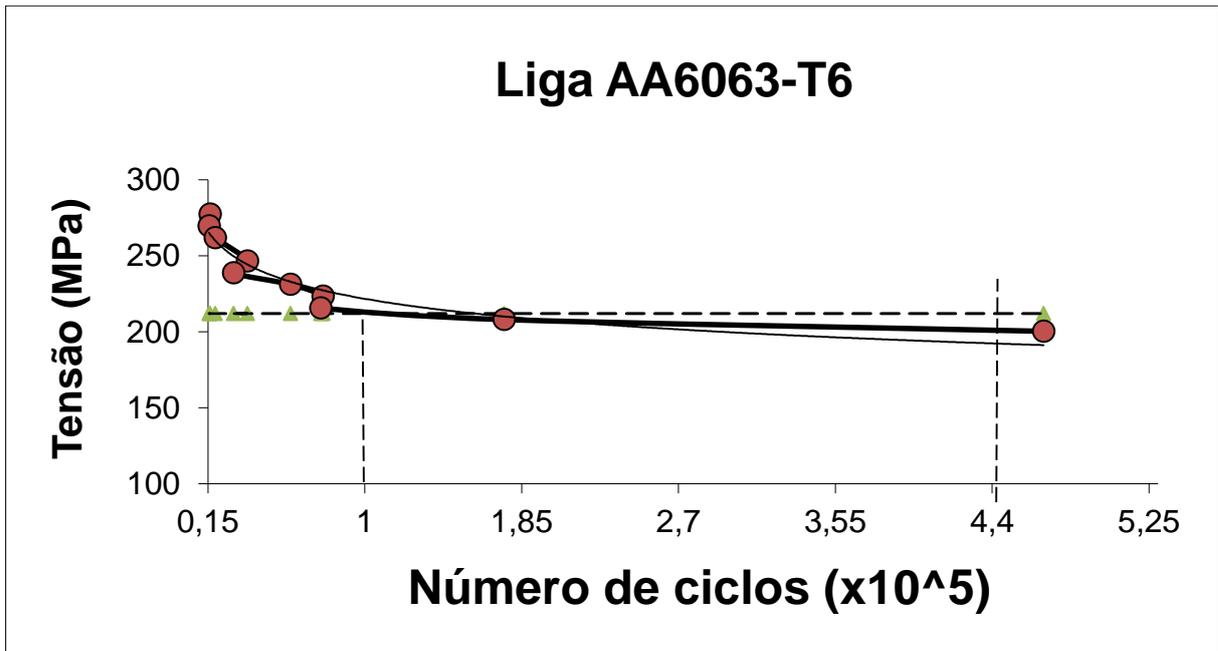


Gráfico 03 - Curva de Wöhler para a liga AA6063-T6
Fonte: O Autor.

Após plotar os resultados obtidos através dos ensaios de fadiga, chegamos a uma linha de tendência da curva, criada através do programa Microsoft Excel 2013, definida pela equação 28, lembrando que o número de ciclos está em potência 10⁵.

$$\sigma_a = 221,7 * (\text{Número de ciclos})^{-0,096} \quad (28)$$

Consequentemente, se aplicarmos esta equação chegamos a tais valores para cada potência 10, mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Linha de tendência a partir dos ensaios de fadiga.

TENSÃO (MPa)	CICLOS
277	10 ⁴
222	10 ⁵
178	10 ⁶
142	10 ⁷
114	10 ⁸
92	10 ⁹
73	10 ¹⁰

Fonte: O Autor.

Após aplicação da equação a linha de tendência, mostrada no Gráfico 4, mostra que a liga não tem limite de resistência à fadiga conforme literatura.

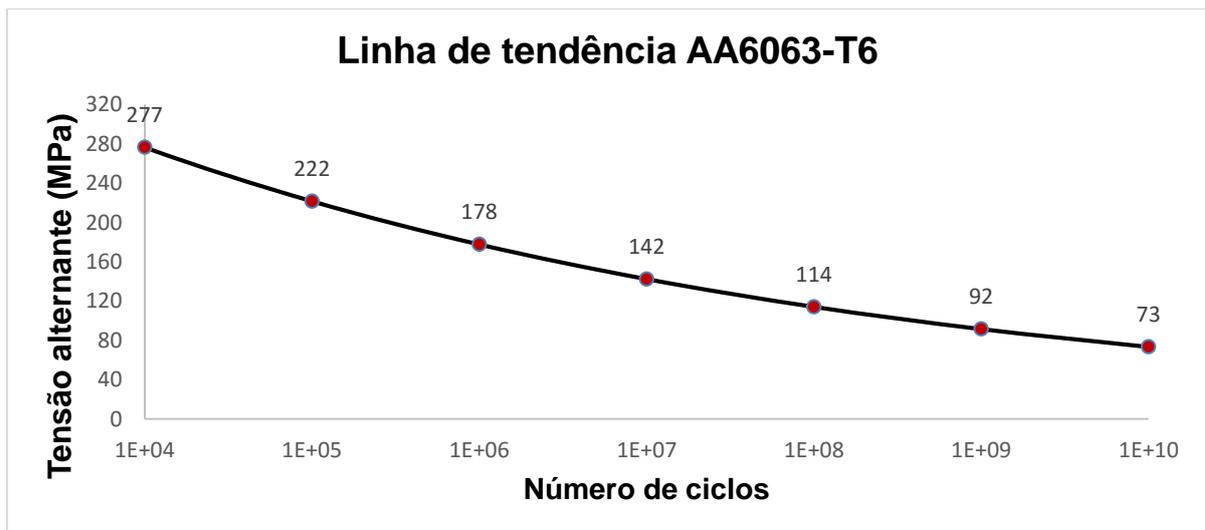


Gráfico 04 – Linha de tendência AA6063-T6

Fonte: O Autor.

A Tabela 8 apresenta a tensão alternante aplicada e o número de ciclos obtidos até a ruptura do corpo de prova.

Tabela 8 – Cargas, níveis de tensão aplicada e vida em fadiga do material AL 6063-T6

CORPO DE PROVA	TENSÃO (MPa)	NÚMERO DE CICLOS
15	200,38	467905
16	208,09	175527
1	215,80	76164
4	223,51	77215
2	231,21	59720
5	238,92	28777
18	246,63	36322
11	262,04	18939
12	269,75	15524
13	277,46	16178

Fonte: O Autor.

As propriedades de fadiga determinadas experimentalmente são diferentes dos valores estimados em literatura. Pois eram esperados valores de número de ciclos inferiores aos obtidos a partir dos ensaios de fadiga por flexão-rotativa.

Se tratando de um ensaio de fadiga controlado por deformações cíclicas, aonde na grande maioria dos ensaios as solicitações dos corpos de prova foram por tensões nominais superiores ao limite de escoamento do material AA6063-T6, foi constatado a ocorrência do fenômeno de endurecimento cíclico, cujo a cada reversão a tensão requisitada para alcançar a deformação imposta ciclicamente aumenta, melhorando a resistência à fadiga, conseqüentemente prolongando a vida do material.

No ensaio de dureza realizado no material antes do ensaio de fadiga, foi encontrada dureza 40HRB. Após o ensaio de fadiga, os valores de dureza encontrados próximos a zona de ruptura são apresentados na tabela 9 constatando endurecimento no material ao final do teste na maioria dos corpos de prova, afetando diretamente na vida do material.

Tabela 9 – Dureza dos corpos de prova após ensaio de fadiga curva de Wöhler

CORPO DE PROVA	DUREZA HRB APÓS ENSAIO DE FADIGA
15	91
16	29
1	16
4	26
2	21
5	92
18	90
11	92
12	97
13	90

Fonte: O Autor.

Da Silva (2013, p. 102) apresenta o gráfico plotado com seus valores obtidos em ensaio de flexão-rotativa da liga AA6063-T6, mostrado em ANEXO B, apresentando dispersões de resultados da liga.

Identificou-se dispersões de resultados nos dois métodos de ensaio de fadiga apresentados, segundo Da Silva (2013) “A liga AA6063-T6 apresenta uma menor quantidade de partículas ricas em Manganês e Cromo, fazendo que o avanço da trinca tenha grandes desvios da sua direção de crescimento, o que melhora as propriedades de fadiga, associado ao tipo de fratura intragranular que contribui para um mal comportamento em fadiga da liga quanto à dispersão dos resultados”.

7 CONCLUSÕES

O desenho foi elaborado na ferramenta Autodesk Fusion 360, programa de licença livre para estudantes a partir das normas do manual de pré-instalação INSTRON da máquina de ensaios de fadiga, optado pelo modelo R211333-1C por se tratar de um corpo de prova com maior diâmetro de haste e pela disponibilidade dos aros no laboratório. Também foi optado pelo raio de curvatura máximo, 25,4mm, com a intenção de proporcionar ao ensaio uma variabilidade maior de tensão aplicada, pois se tivéssemos um diâmetro mínimo do corpo de prova menor, qualquer carga aplicada de prato de pesos poderia ultrapassar facilmente a tensão de ruptura do material.

A princípio foi elaborado uma programação pensando em realizar a usinagem em duas etapas, primeiramente usinar um dos lados e em sequência virar o corpo de prova e finalizar a usinagem, porém após discussões com professores e técnicos do laboratório, foi decidido pelo desbaste e acabamento em apenas uma etapa com o intuito de otimizar a produção, para finalmente realizando o faceamento dos corpos de prova em torno convencional ROMI Tormax 20, também localizado no laboratório de usinagem do *campus*, não danificando o acabamento em sua área útil.

Os corpos de prova foram obtidos através de uma barra de alumínio 6063-T6 disponibilizada no laboratório de usinagem, para verificação de material foram realizados ensaio de tração e ensaio de dureza Rockwell B verificando com as propriedades fornecidas no Handbook - Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, volume 2.

Seguinte a usinagem dos corpos de prova, a montagem do equipamento de ensaio de fadiga de vigas rotativas foi realizada a partir das instruções no Manual de pré-instalação INSTRON da mesma.

Após a montagem do corpo de prova no equipamento foi dado o *startup* do ensaio. Em um primeiro momento foi verificado que o corpo de prova se desprendia do aro, verificou-se então as dimensões do mesmo e foi constatado que havia uma variação no diâmetro de fixação da haste, corrigida posteriormente ao realizar novamente o *setup* do equipamento CNC EMCO PC TURN 55, no qual foi alterado a referência "x" para compensar o raio da ferramenta. Assim que usinado outro corpo de prova, conforme dimensões estabelecidas e verificadas com a ajuda de um

paquímetro e um micrômetro, foi possível a realização do ensaio de fadiga na máquina com rotação fixa em 3600 por minuto.

A partir deste ensaio foi possível a fabricação dos outros corpos de prova e a realização dos ensaios para caracterização da liga AA6063-T6 seguindo as normas ISO 1143:2010 que especifica realização de ensaio por flexão-rotativa e 12107:2012 que determina a apresentação de resultados conforme objetivo do ensaio.

Como proposto inicialmente, os objetivos gerais e específicos foram alcançados concedendo a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *campus* Pato Branco um procedimento de ensaio descrito no item 5.1 deste trabalho, a concepção dos corpos de prova pelo programa apresentado em APÊNDICES A e B.

Como sugestão para sequência deste trabalho está a análise caracterização microestrutural, ensaio com diferentes materiais, análise do fator de superfície (realizar ensaios com diferentes acabamentos), temperatura e tratamentos térmicos, análise do ponto de endurecimento e amolecimento cíclico, ensaiar corpos de prova com entalhe, realizar o ensaio pelo método Staircase e propor um modelo de previsão da curva tensão-vida para alto-ciclo.

REFERÊNCIAS

ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. Introdução. Disponível em <<http://www.abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio>>. Acesso em: 14 de maio 2016.

ALCOA. **Catálogo Ligas e têmperas de extrusão**. São Paulo: ALCOA, 2010. 52p.

ARAÚJO Jr, Pedro E. **Influência de solicitações térmicas na resistência à fadiga do aço AISI 304L**. 2005. 108f. Dissertação (Mestrado em engenharia automotiva) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

ASM INTERNATIONAL. **FATIGUE. Elements of Metallurgy and Engineering Alloys**, 2008 Disponível em <http://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05224G_Chapter14.pdf> . Acesso em: 20 de out. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6835**: Alumínio e suas ligas – Classificação das têmperas. Rio de Janeiro, 2000.

BANNATINE, Julie A.; COMER, Jess J. HANDROCK, James I. "**Fundamentals of metal fatigue analysis**". EUA, Pretince Hall, 1990.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 7ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CDMUNICAS. Contruzione di Macchine. Fatica 2p. Disponível em <<http://www.cdmunicas.it/notes/PEM/2016/L9%20-%20fatica%20parte%202.pdf>>. Acesso em: 08 de junho 2016.

DA SILVA, Ana Márcia Barbosa. **Estudo do comportamento em fadiga de alto ciclo das ligas de alumínio AA6065-T6, AA6063-T6 e AA6351-T6**. 2013, 157f. Dissertação de Mestrado em engenharia de Materiais na área de concentração: Materiais Metálicos, Cerâmicos e Poliméricos – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, Lorena, 2013.

DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981.

FONSECA Jr, Taylor Mac Intyer. **Métodos de previsão dar curva deformação-vida em fadiga para as ligas de alumínio AA6261-T6 e AA6351-T6**. 2003. 120f. Dissertação de Mestrado em engenharia Mecânica na área de concentração:

Materiais e Processos de Fabricação - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

FONTE, M. da. **Fatigue crack growth under rotating bending loading on aluminium alloy 7075-T6 and the effect of a steady torsion.** Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2015. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167844215201747>>. Acesso em: 05 de out. 2015.

FREDEL, Márcio C. **Propriedades mecânicas: ensaios fundamentais – vol 1.** Florianópolis, 2015.

GARCIA, Amauri; SPIN, Jaime A.; SANTOS, Carlos A. dos. **Ensaio dos materiais.** 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GOMES, Daniel Januário Cordeiro. **Determinação de resistência à fadiga em aços ABNT 4140 em vidas super longas (giga ciclos).** 2011. 126f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Pontifícia Universidade de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

GONZÁLEZ, Rodrigo. Fatigue of an aluminium cast alloy used in the manufacture of automotive engine blocks. **International Journal of Fatigue**, 2012. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112313000972>>. Acesso em: 13 de out. 2015

HANDBOOK. **Fatigue and fracture.** 19. ed. Ohio: ASM International, 1996.

HANDBOOK 2. **Heat treating**, vol. 4. ed. Ohio: ASM International, 1991.

HANDBOOK 3. **Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.** vol 2. ed: Ohio: ASM International, 1990.

HENKE, Sérgio L. Microestrutura e resistência à fadiga de um aço inoxidável martensítico macio refundido por tocha plasma. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, Vol. 19, n. 01, p. 051-057, jan/mar 2014.

INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS: ESTUDOS DE CASO. **Caso 073: Fadiga Mecânica – Voo JAL-123 (1985)**, 2014. Disponível em <<http://inspecaoequipto.blogspot.com.br/2014/05/caso-073-fadiga-mecanica-voo-jal-123.html>>. Acesso em: 21 de out. 2015.

INSTRON. **Manual de pré-instalação.** Grove City: Instron, 2008. 43p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: **ISO 1143:2010**: Metallic materials – Rotating bar bending fatigue testing. Genebra, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: **ISO 12107:2012**: Metallic materials — Fatigue testing — Statistical planning and analysis of data. Genebra, 2012.

MELLO, Sérgio Ricardo C. de et al. **SELEÇÃO DOS MATERIAIS: Alumínio e suas ligas**. Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2009.

NAKAMURA, Yuki. Effect of alumite surface treatments on long-life fatigue behavior of a cast aluminum in rotating. *International Journal of Fatigue*, 2010. Disponível em < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112309002953>>. Acesso em: 05 de out. 2015.

NASCIMENTO, Denise Ferreira Laurito. **Estudo do comportamento em fadiga de baixo ciclo e fadiga sob cargas multiaxiais das ligas de alumínio AA6005, AA6063 e AA6351**. 2015. 207f. Tese de doutorado – Ciências do Programa de Pós-graduação em Engenharia dos Materiais na área de concentração: Materiais metálicos, Cerâmicos e Poliméricos. Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, Lorena, 2015.

NOGUEIRA, Rodrigo de Moura. **Máquina de testes de fadiga mecânica por flexão rotativa**. 2014. 29f. Projeto de Graduação – Curso Superior de Engenharia Mecânica. Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

NORTON, R.L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman (Grupo A), 2004.

ROSA, Edison da. **Análise de resistência mecânica – mecânica da fratura e fadiga**. Florianópolis: UFSC, 2012

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

SCHWERDT, D. Microstructure investigations on two different aluminum wrought alloys after very high cycle fatigue. *International Journal of Fatigue*, 2012. Disponível em < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112313000182>>. Acesso em: 12 de out. 2015.

SOBOYEJO, Wolé. **Mechanical Properties of Engineered Materials**. New York: Marcel Deeker, Inc., 2003.

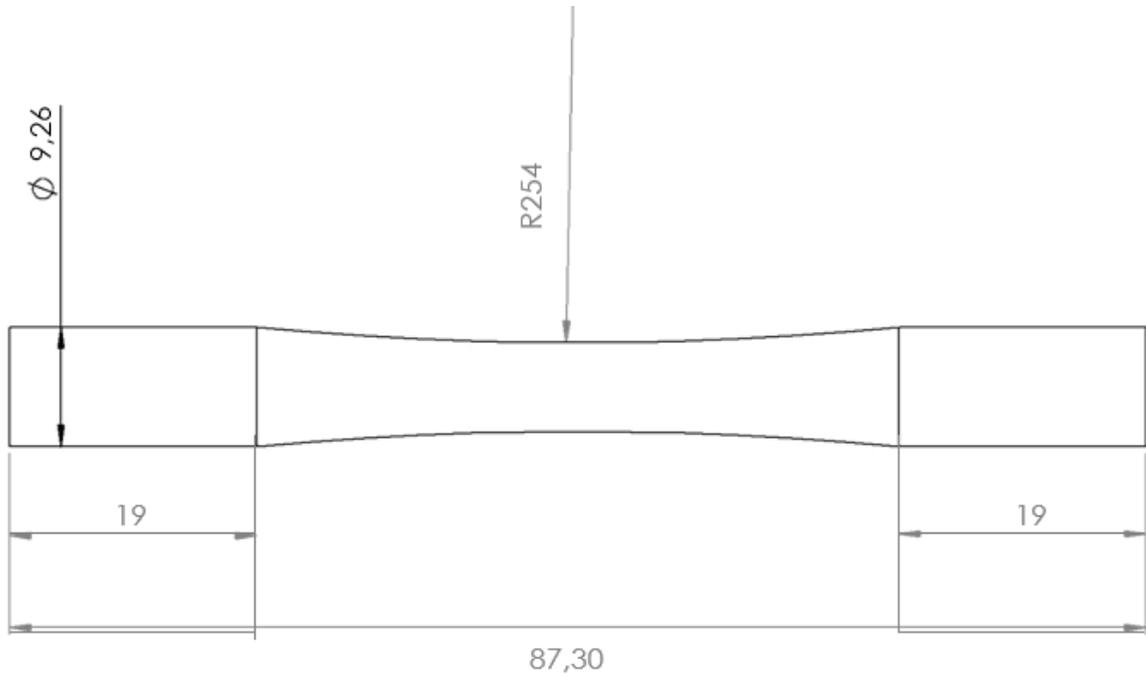
THYSSENKRUPP. **Material Data Sheet – Aluminum Alloy 6063**. Reino Unido, 2013. 2 p.

UNIPA. La Resistenza a Fatica: Fondamenti 10p. Disponível em <<http://www1.unipa.it/giovanni.petrucci/Disp/Fatica1.pdf>>. Acesso em: 08 de junho 2016.

UTC. Les Hommes des unités. **Jean Victor Poncelet**, 2010. Disponível em: <<http://www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/Hommes/pon/Poncelet.pdf>>. Acesso em: 11 Out. 2015, 20:11.

XIAOSHAN, Liu. Fatigue behavior and dislocation substructures for 6063 aluminum alloy under nonproportional loading. **International Journal of Fatigue**, 2009. Disponível em <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112308002806>>. Acesso em: 23 de abr. 2016

APÊNDICE A



APÊNDICE B

O0013

N5 (CORPO DE PROVA 1)

N10 G00 X50 Z0

N14 T0606

N15 G96 S150 F0.05 M03

N16 G92 S2500

N17 G00 X15 Z0

N19 G0 X32.7 Z0

N20 G0 Z-3.751

N21 X15.157

N22 G1 X15.128

N23 X12.3 Z-5.165

N24 Z-92.8

N25 X12.68

N26 X15.508 Z-91.386

N27 G0 Z-3.696

N28 X14.728

N29 G1 X11.9 Z-5.11

N30 Z-92.8

N31 X12.3

N32 X15.128 Z-91.386

N33 G0 Z-3.696

N34 X14.328

N35 G1 X11.5 Z-5.11

N36 Z-92.8

N37 X11.9

N38 X14.728 Z-91.386

N39 G0 Z-3.696

N40 X14.26

N41 G1 X13.928

N42 X11.1 Z-5.11

N43 Z-92.8
N44 X11.5
N45 X14.328 Z-91.386
N46 G0 Z-3.696
N47 X14.26
N48 G1 X13.528
N49 X10.7 Z-5.11
N50 Z-92.8
N51 X11.1
N52 X13.928 Z-91.386
N53 G0 Z-3.696
N54 G1 X13.128
N55 X10.3 Z-5.11
N56 Z-92.8
N57 X10.7
N58 X13.528 Z-91.386
N59 G0 Z-3.696
N60 G1 X13.088
N61 X10.26 Z-5.11
N62 Z-24.5
N63 G18 G3 X10.252 Z-24.587 R0.9
N64 G2 X9.9 Z-26.462 R253.1
N65 G1 Z-71.838
N66 G2 X10.252 Z-73.713 R253.1
N67 G3 X10.26 Z-73.8 R0.9
N68 G1 Z-92.8
N69 X10.3
N70 X13.128 Z-91.386
N71 G0 Z-25.048
N72 G1 X12.728
N73 X9.9 Z-26.462
N74 G2 X9.5 Z-28.806 R253.1
N75 G1 Z-69.494
N76 G2 X10.1 Z-72.923 R253.1

N77 G1 X12.928 Z-71.509
N78 G0 Z-27.392
N79 G1 X12.328
N80 X9.5 Z-28.806
N81 G2 X9.1 Z-31.461 R253.1
N82 G1 Z-66.84
N83 G2 X9.7 Z-70.698 R253.1
N84 G1 X12.528 Z-69.284
N85 G0 Z-30.046
N86 G1 X11.928
N87 X9.1 Z-31.461
N88 G2 X8.7 Z-34.594 R253.1
N89 G1 Z-63.706
N90 G2 X9.3 Z-68.213 R253.1
N91 G1 X12.128 Z-66.799
N92 G0 Z-33.18
N93 G1 X11.528
N94 X8.7 Z-34.594
N95 G2 X8.3 Z-38.625 R253.1
N96 G1 Z-59.675
N97 G2 X8.9 Z-65.349 R253.1
N98 G1 X11.728 Z-63.935
N99 G0 Z-37.211
N100 G1 X11.128
N101 X8.3 Z-38.625
N102 G2 X8.081 Z-41.707 R253.1
N103 G1 Z-56.593
N104 G2 X8.5 Z-61.852 R253.1
N105 G1 X11.328 Z-60.438
N106 G0 Z-40.293
N107 G1 X10.909
N108 X8.081 Z-41.707
N109 G2 X8.281 Z-59.445 R253.1
N110 G1 X11.109 Z-58.031

N111 X12.178
N112 G0 X32.7
N113 Z0
N114 G0 X32.7 Z5.4
N115 Z-3.686
N116 X16.68
N117 G1 X12.688
N118 X9.86 Z-5.1
N119 Z-24.5
N120 Z-24.513
N121 X9.858 Z-24.526
N122 X9.856 Z-24.539
N123 G2 Z-73.761 R253.6
N124 G3 X9.86 Z-73.8 R0.4
N125 G1 Z-92.8
N126 X12.088 Z-91.386
N127 X13.26
N128 G0 X32.7
N129 Z-3.696
N130 X16.68
N131 G1 X12.288
N132 X9.26 Z-5.1
N133 Z-24.5
N134 Z-24.513
N135 X9.458 Z-24.526
N136 X9.456 Z-24.539
N137 G2 Z-73.761 R253.6
N138 G3 X9.46 Z-73.8 R0.4
N139 G1 Z-92.8
N140 X12.088 Z-91.386
N141 X13.26
N142 G0 X32.7
N143 G97 S200 F0.01
N144 G92 S3000

N145 G0 X32.7 Z5.4

N146 Z-3.686

N147 X16.68

N148 G1 X12.088

N149 X9.26 Z-5.1

N150 Z-24.5

N151 Z-24.513

N152 X9.258 Z-24.526

N153 X9.256 Z-24.539

N154 G2 Z-73.761 R253.6

N155 G3 X9.26 Z-73.8 R0.4

N156 G1 Z-92.8

N157 X12.088 Z-91.386

N158 X13.26

N159 G0 X32.7

N160 Z0

N161 G00 Z0

N162 M05

N163 M30

ANEXO A

Tabela 9 - Resultados experimentais dos ensaios de fadiga dos corpos-de-prova não entalhados.

AA 6005		AA 6351		AA 6063	
Vida (ciclos)	Tensão máxima(MPa)	Vida (ciclos)	Tensão máxima(MPa)	Vida (ciclos)	Tensão máxima(MPa)
43300	265	166500	247	568000	212
242000	247	55100	247	102800	212
72600	247	146800	247	79100	212
115300	247	485200	212	75700	212
130600	212	300000	212	43300	212
266600	212	765800	212	241400	194
179500	212	473900	194	2484800	194
554100	177	412000	194	832700	194
328200	177	912500	194	102400	194
479900	177	546700	177	219800	177
1142100	159	10000000	177	269900	177
1389200	159	4334200	177	1029600	177
2404300	141	10000000	168	147100	177
4404400	141	10000000	159	562400	159
				1071000	159
				263700	159
				942400	141
				4444300	141
				3033100	141
				3581100	124
				4135800	124
				6286300	124

ANEXO B

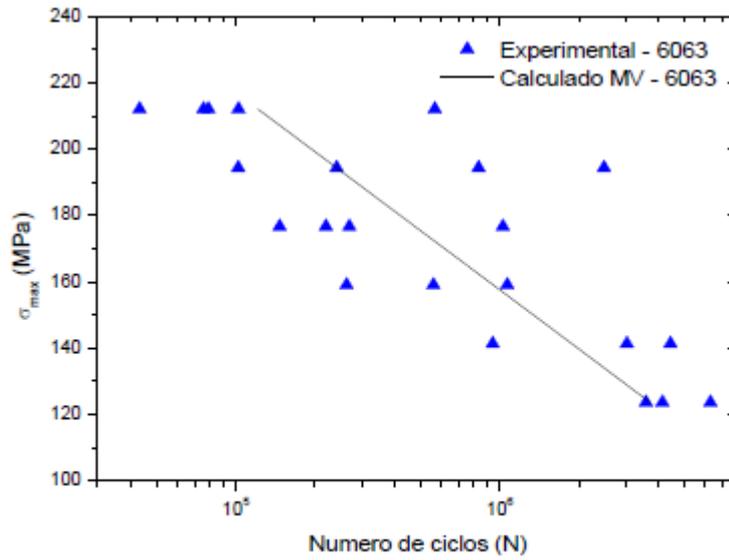


Figura 38 - Ajuste do modelo utilizando o Método da Máxima Verossimilhança - liga AA 6063.