



Fernando Ickert

**ENSAIO DE FADIGA POR FLEXÃO PARA EIXOS
DESENVOLVIDOS COM DIFERENTES MATERIAIS**

Horizontina

2014

Fernando Ickert

**ENSAIO DE FADIGA POR FLEXÃO PARA EIXOS DESENVOLVIDOS
COM DIFERENTES MATERIAIS**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina.

ORIENTADOR: Richard Thomas Lermen, Dr.

Horizontina

2014

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

**“Ensaio de fadiga por flexão para eixos desenvolvidos com diferentes
materiais”**

Elaborado por:

Fernando Ickert

como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

**Aprovado em: 09/10/2014
Pela Comissão Examinadora**

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador**

**Prof. Me. Anderson Dal Molin
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Prof. Dr. Fabiano Cassol
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Horizontina
2014**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família e a todas as pessoas que sempre me apoiaram e me ajudaram.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e familiares pela dedicação, apoio e incentivo incondicional aos meus estudos.

A minha namorada que esteve sempre ao meu lado, me apoiando e auxiliando nos momentos bons e ruins.

Ao meu orientador, professor Richard, por todo o auxílio e dedicação.

Aos professores pelos conhecimentos transmitidos.

Aos meus colegas e amigos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível”.

Charles Chaplin

RESUMO

O método de ensaio de fadiga por flexão em laboratório apresenta características vantajosas, principalmente para as empresas fabricantes de eixos, automóveis e equipamentos de movimentação, pois através deste método de ensaio é possível determinar o limite de resistência à fadiga dos materiais, permitindo que os resultados possam ser avaliados antes mesmo da fabricação dos equipamentos, evitando a ocorrência de problemas para o cliente. O presente trabalho visa analisar o comportamento de eixos metálicos quando submetidos a carregamentos cíclicos até sua ruptura por fadiga. Através da pesquisa bibliográfica é possível compreender os principais problemas que os eixos metálicos apresentam quando submetidos à fadiga. O objetivo deste trabalho é realizar ensaios de fadiga por flexão em eixos fabricados de aço SAE 1020, aço SAE 1045 e aço inoxidável AISI 304. Para atingir estes objetivos foram realizados ensaios utilizando uma bancada rotativa de ensaios de fadiga no laboratório da Faculdade Horizontina, permitindo verificar a quantidade de ciclos que os corpos de prova se submeteram até o momento da sua ruptura. Desta forma, visando estabelecer um padrão nos ensaios definiu-se a rotação do motor em 1300 rpm e a força de flexão aplicada sobre os corpos de prova de 220 N. Visando estabelecer alguns critérios de avaliação, optou-se pela inserção de concentradores de tensão nos corpos de prova, sendo que estes possuem raios de 0,75 mm, 1 mm e 1,5 mm. O projeto de experimento e a análise estatística dos resultados fundamentaram-se no método fatorial completo, visando avaliar a resposta e a variabilidade de acordo com a combinação de fatores utilizados. Com a análise dos resultados foi possível identificar o fator de maior influência referente a resistência à fadiga que foi o concentrador de tensão e também foi possível determinar a melhor combinação entre material e concentrador de tensão que apresentou maior vida útil quando submetido aos ensaios de fadiga, que foi o aço SAE 1045 utilizando concentrador de tensão de raio de entalhe de 0,75 mm.

Palavras-chave: Fadiga; Máquina Rotativa de Ensaio; Eixos Metálicos.

ABSTRACT

The trial method of bending fatigue in laboratory has advantageous characteristics, primarily for manufacturers of axles, cars and handling equipment, because through this test method can determine the limit of fatigue strength of the materials, allowing the results to be evaluated even before they are manufactured and problems will occur on the client. The present work analyzes the behavior of metallic axles when subjected to cyclic loading to failure by fatigue. Through the literature search it's possible understand the main problems that the metal axles have when subjected to fatigue. The objective of this study is to perform fatigue assays on axles manufactured in steel SAE 1020, SAE 1045 steel and AISI 304 stainless steel. To achieve these goals assays were performed using a rotating bench fatigue tests in the laboratory of Horizontina College allowing you to check the number of cycles that the samples were submitted to the moment of rupture. Thus, to establish a standard assays defined the engine speed at 1300 rpm and the bending force applied on the samples of 220 N. To establish some evaluation criteria, we opted for the inclusion of stress concentrators in the samples, and these have radius of 0.75 mm, 1 mm and 1.5 mm. The design of experiment and statistical analysis of result were based on the complete factorial method to evaluate the response and variability according to the combination of factors used. With the analysis of the results was possible to identify the most influential factor related to fatigue resistance which was the stress concentrator and it was also possible to determine the best combination of materials and stress concentrator which showed longer life when subjected to fatigue tests, which was SAE 1045 steel using stress concentrator notch radius of 0,75 mm.

Keywords: Fatigue. Rotary Testing Machine. Axles Metal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de Carregamento	17
Figura 2 – Estrias de fadiga na superfície da ruptura de uma liga de alumínio.....	19
Figura 3 – (a) Representação das superfícies características da falha por fadiga. (b) Superfície de um material após a ruptura.....	20
Figura 4 – Carregamento que varia com o tempo	21
Figura 5 – Diagrama S-N	21
Figura 6 – Princípio do ensaio de fadiga por flexão rotativa	22
Figura 7 – Corpos de prova para flexão após a falha. (a) aço dúctil e (b) ferro fundido frágil.	23
Figura 8 – Corpos de prova submetidos aos diferentes tipos de ensaios de fadiga	26
Figura 9 – Experimento fatorial de dois fatores, caso geral.....	29
sendo que,.....	29
Figura 10 – Componentes da Bancada de Ensaios de Fadiga por Flexão	32
Figura 11 – (a) Inversor de frequência WEG modelo CFW10. (b) – Contador ciclos H – 100 Marberg. (c) – Carga de flexão.....	33
Figura 12 – Corpo de Prova.....	34
Figura 13 – Análise dos fatores em função do número de ciclos	37
Figura 14 – Número de ciclos em função dos fatores	39
Figura 15 – Interação do número de ciclos em função dos fatores	40
Figura 16 – Ruptura do corpo de prova de aço SAE 1045	41
Figura 17 – Ruptura do corpo de prova de aço SAE 1020	41
Figura 18 – Ruptura do corpo de prova de aço inox AISI 304	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores e seus respectivos níveis nos corpos de prova	30
Tabela 2 – Matriz experimental com a ordem de realização dos corpos de prova e seus respectivos níveis.....	31
Tabela 3 – Número de ciclos dos corpos de prova ensaiados	36
Tabela 4 – Análise de variância	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. JUSTIFICATIVA.....	13
1.2. OBJETIVOS.....	14
2. REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1. FADIGA.....	15
2.1.1. FALHA POR FADIGA	16
2.1.1.1. INÍCIO DA TRINCA	17
2.1.1.2. PROPAGAÇÃO DA TRINCA	18
2.1.1.3. RUPTURA REPENTINA.....	19
2.1.2. FATORES MODIFICADORES	20
2.2. RESISTÊNCIA À FADIGA E LIMITE DE RESISTÊNCIA À FADIGA	20
2.3. DUCTILIDADE E FRAGILIDADE	22
2.4. ENSAIO À FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA	22
2.4.1. ENSAIO DE FLEXÃO	23
2.4.2. ENSAIO ACELERADO DA VIDA DE UM MATERIAL À FADIGA.....	23
2.5. CORPOS DE PROVA	24
2.6. EIXOS	26
2.7. CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES PARA OS TESTES DE FADIGA	27
2.8. METODOLOGIA FATORIAL COMPLETA.....	27
2.9. EQUAÇÕES UTILIZADAS PELO SOFTWARE PARA ANÁLISE FATORIAL.....	28
3. METODOLOGIA	30
3.1. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS	30
3.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	32
3.2.1. BANCADA DE ENSAIOS.....	32
3.2.2. DESCRIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	34
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	36
4.1. ANÁLISE DOS FATORES	37
4.2. COMPARATIVO ENTRE OS CORPOS DE PROVA	38
4.3. ANÁLISE DA FRATURA	40
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	43

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

1. INTRODUÇÃO

O ser humano enfrenta problemas de fadiga em suas ferramentas de trabalho, onde na atualidade os problemas se agravam pela necessidade de se dar alto desempenho às estruturas e componentes mecânicos, pois se ocorrer alguma falha, em muitos casos, pode representar sérias consequências. Com o aumento da complexidade tecnológica foi possível diminuir os riscos potenciais relacionados ao mecanismo de falha por fratura.

O termo fadiga começou a ser utilizado na revolução industrial do século XIX. Nesta época, os relatos literários citam um grande número de falhas nos eixos e rodas das máquinas a vapor e locomotivas e foi a partir destes acontecimentos que iniciou-se o estudo deste fenômeno.

A fadiga do material significa o desgaste prematuro de um material até sua ruptura, quando submetido a ciclos repetidos de carregamento e descarregamento. Essas mudanças de carregamento causam falhas inesperadas e prematuras sob níveis de tensão abaixo do especificado no projeto. A ruptura do material ocorre a partir do crescimento instável das trincas e é chamada de fratura frágil.

O aparecimento das trincas acontece nas regiões de concentrações de tensões decorrentes de furos e entalhes. Para um completo entendimento dos mecanismos da fratura por fadiga é necessária uma abordagem micro estrutural dos materiais com a finalidade de compreender o período no qual a trinca se forma até assumir dimensões macroscópicas.

O problema central deste trabalho está relacionado a fratura frágil de eixos metálicos, ou seja, ensaiar eixos metálicos fabricados de aço SAE 1020, aço SAE 1045 e aço inoxidável AISI 304, utilizando uma bancada rotativa de testes de fadiga por flexão, até sua ruptura e analisar os resultados obtidos através da análise fatorial completa.

1.1. JUSTIFICATIVA

No mundo contemporâneo, as empresas buscam cada vez mais a melhoria contínua de seus produtos e processos, uma vez que precisam garantir satisfação aos clientes na hora de adquirir seus produtos. Assim, justifica-se a importância

deste trabalho de pesquisa, pois o mesmo contribui com informações que possibilitam às empresas fornecer peças e/ou produtos testados e de qualidade.

Em complemento a esta questão, destaca-se a segurança que os eixos, produzidos e ensaiados em uma máquina de ensaios de fadiga, apresentam. Pois através dos ensaios é possível mensurar e definir inúmeros fatores dentre os quais sem avaliações e ensaios é impossível prever, pois para a fabricação dos eixos de automóveis, caminhões e outros meios de transporte necessitam de máxima segurança e confiabilidade, prevenindo assim que falhas por fadiga possam vir a ocorrer e posteriormente causar algum tipo de acidente.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho está relacionado com a proposta do tema em análise, ou seja, realizar testes de fadiga por flexão em corpos de prova de diferentes materiais. Podendo assim analisar o comportamento destas amostras. Para atendimento ao objetivo geral deste trabalho, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar conceitualmente o termo fadiga, ensaios de fadiga;
- Ensaiar as amostras de eixos fabricados de aço SAE 1020, aço SAE 1045 e aço inoxidável AISI 304;
- Analisar o tipo de ruptura apresentada pela amostra;
- Identificar e comparar a vida útil dos corpos de prova ensaiados;
- Efetuar comparativos entre os eixos testados;
- Apresentar a análise de dados obtidos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Na revisão da literatura são apresentadas as teorias e os conceitos pertinentes à resistência dos materiais relacionados à fadiga por flexão, os quais foram estudados ao longo do curso de Engenharia Mecânica, e irão proporcionar o embasamento teórico para a realização do presente trabalho.

2.1. FADIGA

De acordo com Suresh apud Marques e Arevalos (2011), a palavra fadiga tem origem da expressão latina *FATIGARE* que significa cansar. Embora associada ao cansaço físico e mental em humanos, o termo “fadiga” também tornou-se uma denominação largamente aceita na linguagem da engenharia para o dano e falha de materiais sob carregamento cíclico.

Segundo Norton (2004), o fenômeno foi observado pela primeira vez em meados de 1800, quando os eixos de um vagão ferroviário começaram a apresentar falhas após um pequeno período de esforços. Os eixos foram fabricados de material dúctil, porém os mesmos exibiam características de fraturas frágeis e repentinas. Naquela época, os engenheiros desconheciam as cargas dinâmicas e produziram os componentes utilizando os conhecimentos que possuíam, os quais baseavam-se em experiências decorrentes de estudos com estruturas carregadas estaticamente.

August Wöhler foi pioneiro na investigação (durante um período de 12 anos) sobre o que estavam chamando na época de falha por fadiga. Ele publicou em 1870 suas descobertas, as quais mostravam o número de ciclos de tensão variantes no tempo, como os motivadores do colapso e também a descoberta da existência de uma tensão limite de resistência à fadiga, ensaiando, em laboratório, eixos até a falha sob carregamento alternado (NORTON, 2004).

Conforme Britner apud Marques e Arevalos (2011), a ASTM (1972) definiu clara e objetivamente a fadiga como um processo de alteração permanente, progressivo e localizado que ocorre num material sujeito a condições que produzem tensões e deformações num ponto ou em vários pontos, e que podem culminar em trincas ou em fratura completa do componente, após um número suficiente de ciclos de solicitações.

2.1.1. Falha por fadiga

Conforme Brandão (2013), a grande maioria dos casos de falhas que acontecem nos equipamentos e máquinas ocorrem devido a um conjunto de cargas que variam no tempo. Grande parte das falhas geradas nos componentes mecânicos ocorre devido à fadiga, entre 80% e 90%.

A fadiga é um tipo de falha mecânica causada pela aplicação repetida e localizada de carregamentos (tensões ou deformações) variáveis, sendo que sua característica principal é a propagação lenta e gradual de trincas, levando o material ao desgaste e ruptura repentina, após um determinado número de ciclos (BRANDÃO, 2013).

Em complemento, Norton (2004) relata que, o termo fadiga é utilizado para descrever qualquer falha devido a cargas variantes no tempo.

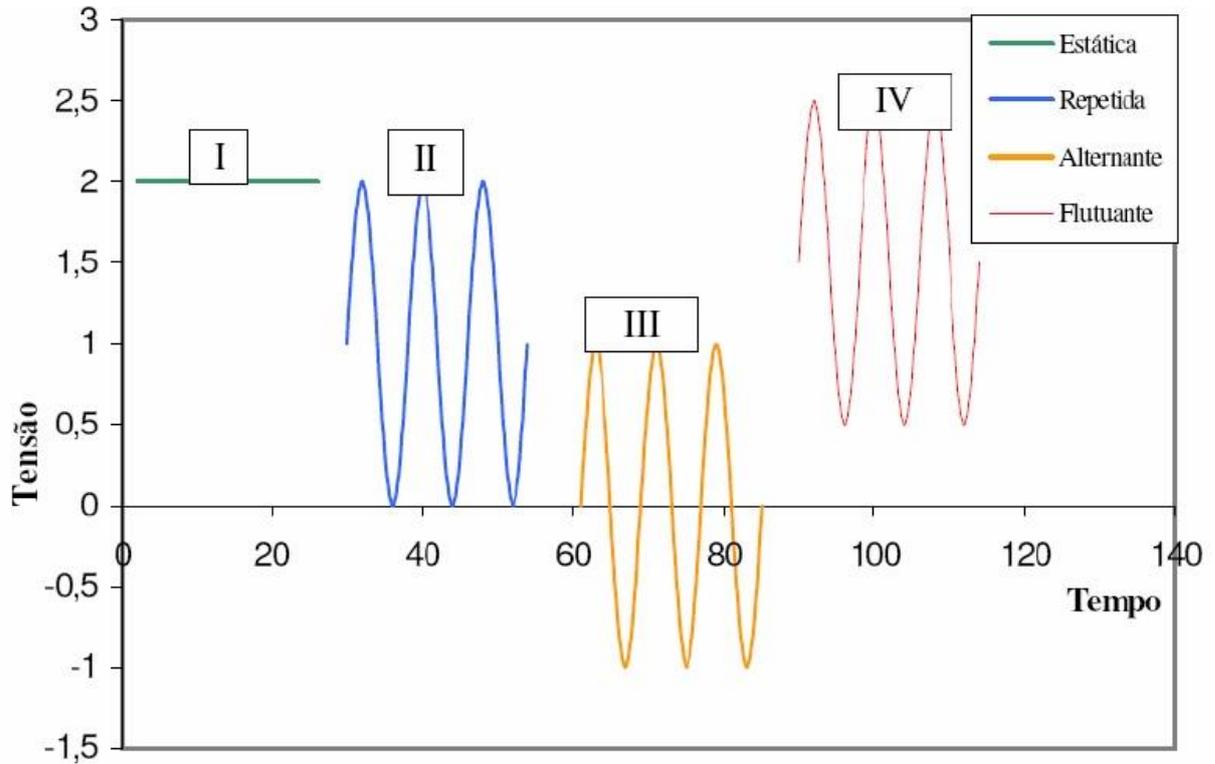
De acordo com Beer (1995), para um carregamento da ordem de milhares ou milhões de vezes, a ruptura se dá a uma tensão bem abaixo da tensão de ruptura obtida com o carregamento estático, a este fenômeno dá-se o nome de fadiga. A ruptura por fadiga é sempre uma ruptura frágil, mesmo para materiais dúcteis.

A resistência à fadiga de um material depende de diversos fatores como as propriedades mecânicas (dureza e composição química), acabamento superficial, a maneira com o qual o carregamento é aplicado, a temperatura de operação, umidade do ambiente e defeitos de fabricação deste material (BRANDÃO, 2013).

Para Dutra (2009), é importante definir os diferentes tipos de cargas que podem estar atuando em um sistema e geralmente são divididos em três subgrupos, como são descritas abaixo, e os perfis destes esforços podem ser observados na Figura 1:

- I. Carga estática: possui valor constante ao longo do tempo ou apresenta variação tão lenta que o efeito de massa pode ser considerado desprezível;
- II. Carga repetida: seu valor varia periodicamente entre um máximo e zero. A tensão média é igual a amplitude de tensão e a metade da tensão máxima;
- III. Carga alternante: cujo valor varia periodicamente entre valores máximos simétricos, positivo e negativo, em relação ao eixo do tempo, neste caso, a tensão média é nula.

Figura 1 – Tipos de Carregamento



Fonte: Dutra, 2009.

Segundo Norton (2004), a falha por fadiga pode ser dividida em três estágios: início da trinca, propagação da trinca e ruptura repentina do material devido ao crescimento instável da trinca. O primeiro estágio pode ter uma pequena duração, o segundo estágio envolve o menor tempo da vida das peças e o terceiro e último estágio é instantâneo.

2.1.1.1. Início da trinca

Para Fischer e Yen apud Marques e Arevalos (2011), as trincas iniciam-se em planos cisalhantes localizados, em áreas de alta concentração de tensão ou em áreas de baixa resistência local. Praticamente todas as regiões de uma estrutura contêm descontinuidades, variando de microscópicas até macroscópicas, introduzidas nos processos de fabricação ou de manufatura.

Além disso, as trincas também podem surgir naturalmente devido a não homogeneidade na estrutura granular e cristalina dos metais. Partículas com composição química, diferente da composição do metal, ou vazios, são inevitáveis

no processo de fabricação. O resultado dessa não homogeneidade é uma distribuição de tensões de maneira não uniforme. Usualmente as regiões onde as tensões são muito severas são os pontos onde os danos por fadiga começam (TEIXEIRA, 2004).

De acordo com Norton (2004), os materiais que apresentam menor índice de ductilidade não possuem a mesma facilidade para escoar, e tendem a desenvolver trincas mais rapidamente. Já os materiais frágeis que não apresentam escoamento tendem a pular esse estágio inicial e proceder diretamente para o estágio da propagação da trinca em determinados locais de existência de vazios ou inclusões, que atuam como trincas microscópicas.

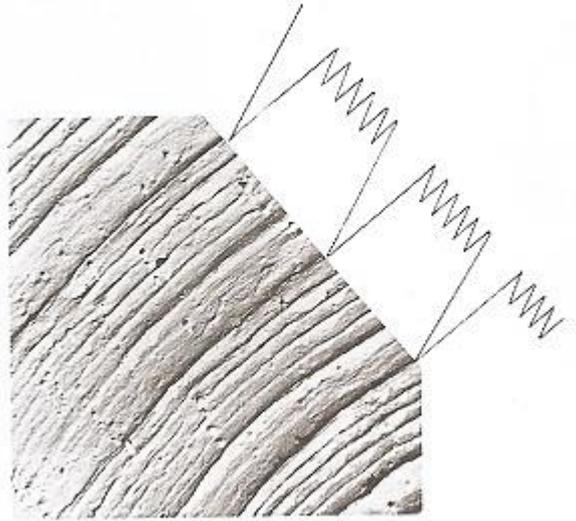
2.1.1.2. Propagação da trinca

A tensão por fadiga quando em ciclo, ora passa por um regime de tensão de compressão e ora passa por um regime de tensão de tração. Esse processo continua enquanto a tensão local está alternando de valores abaixo da tensão de escoamento para outros acima da tensão de escoamento, na ponta da trinca. Com isso o crescimento da trinca ocorre devido a tensões de tração e a trinca propaga-se ao longo de planos normais quando em tensão máxima de tração (NORTON, 2004).

Ainda de acordo com Norton (2004), a taxa de crescimento de uma trinca é muito pequena, da ordem de 10×10^{-7} a 10×10^{-3} mm por ciclos, mas depois de um grande número de ciclos este valor torna-se significativo. A Figura 2 mostra as estrias de uma superfície de ruptura para cada ciclo de tensão de um corpo de prova de alumínio. Os ciclos de maior tensão mostram estrias maiores do que aquelas mais frequentes de pequena amplitude, isso indica que quando as tensões forem maiores acabam causando um maior crescimento da trinca por ciclo.

Norton (2004) comenta que a corrosão também é um fator na propagação das trincas. Quando uma peça que contém uma trinca estiver em um ambiente corrosivo, a trinca irá crescer submetida a tensões estáticas.

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



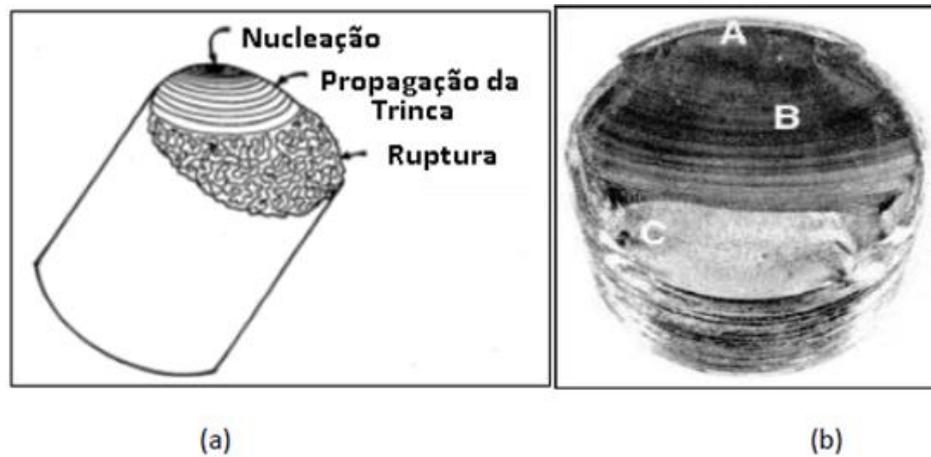
Fonte: Norton, 2004.

2.1.1.3. Ruptura repentina

Norton (2004) relata que a trinca continuará a crescer enquanto as tensões de tração cíclicas e/ou fatores de corrosão estiverem presentes. Em um certo momento, o tamanho da trinca torna-se grande o suficiente para que ocorra a falha repentina e catastrófica sem nenhum aviso.

Conforme Brandão (2013), a trinca tenderá a se expandir com a constante aplicação das tensões e, conseqüentemente, o tamanho da trinca irá aumentar até o estágio da fratura, onde irá ocorrer a ruptura total e repentina do material. A falha por fadiga pode ser reconhecida pela aparência da superfície de fratura do elemento. Geralmente, possui uma região lisa, correspondente ao estágio de propagação da trinca, e uma região áspera, que corresponde à ruptura do material. A Figura 3 representa os estágios de propagação da trinca por fadiga.

Figura 3 – (a) Representação das superfícies características da falha por fadiga. (b) Superfície de um material após a ruptura.



Fonte: Adaptado de Brandão, 2013.

2.1.2. Fatores modificadores

De acordo com Budynas e Nisbett (2011), os corpos de prova ensaiados em laboratório para determinar os limites de resistência são preparados com muito cuidado e ensaiados sob condições controladas. É irrealista pensar que o limite de resistência de uma peça mecânica ou estrutural tenha os mesmos valores obtidos em laboratório. Algumas diferenças incluem:

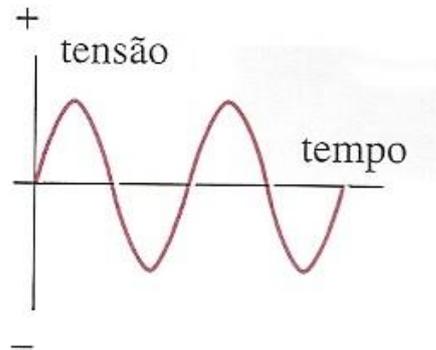
- a) Material: composição, base de falha, variabilidade;
- b) Ambiente: corrosão, temperatura, estado de tensão, tempo de relaxação;
- c) Projeto: tamanho, forma, vida, estado de tensão, concentração de tensão, velocidade, micro abrasão, escoriação;
- d) Manufatura: método, tratamento térmico, corrosão por micro abrasão, condição de superfície, concentração de tensão.

2.2. RESISTÊNCIA À FADIGA E LIMITE DE RESISTÊNCIA À FADIGA

Segundo Norton (2004), a maioria das peças que compõem uma máquina irá sofrer forças e tensões que variam com o tempo. Um ensaio de resistência à fadiga é o tipo de ensaio de eixo girante de R.R. Moore, no qual um corpo de prova é carregado como uma viga em flexão pura enquanto é girado por um motor. Essa rotação do eixo faz com que um ponto qualquer da superfície passe de compressão

para tração e novamente para compressão em cada ciclo. Isso cria uma curva de tensão versus tempo, como ilustrada na Figura 4.

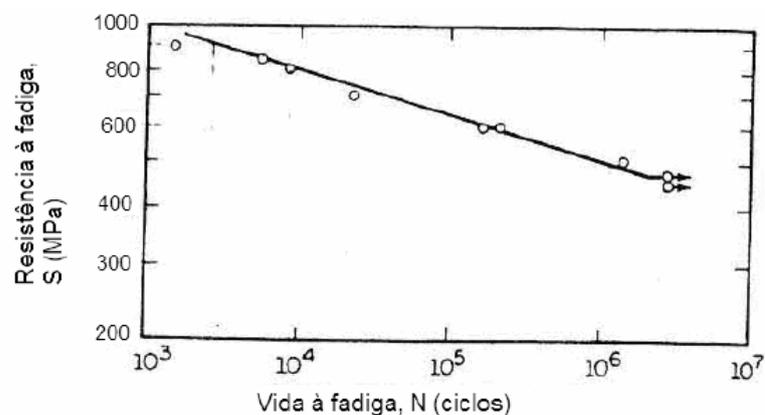
Figura 4 – Carregamento que varia com o tempo



Fonte: Norton, 2004.

Conforme Santos (2008), para se estabelecer o limite de resistência à fadiga de um material é necessário um grande número de testes. Para o teste rotativo, aplica-se no eixo uma flexão constante e registra-se o número de revoluções necessário para a falha do corpo de prova. O primeiro ensaio faz-se com uma tensão solicitante um pouco inferior do que o limite de resistência do material. No segundo teste aplica-se uma tensão inferior à utilizada no primeiro ensaio. Desta maneira, pode-se obter um gráfico, como o diagrama S-N apresentado na Figura 5, das tensões alternadas aplicadas nos corpos de prova versus o número de ciclos até que a falha ocorra.

Figura 5 – Diagrama S-N



Fonte: Santos, 2008.

2.3. DUCTILIDADE E FRAGILIDADE

Segundo Norton (2004), uma medida de ductilidade acontece quando um material deforma-se significativamente antes de sua ruptura. A ausência de deformação significativa antes da ruptura é chamada de fragilidade.

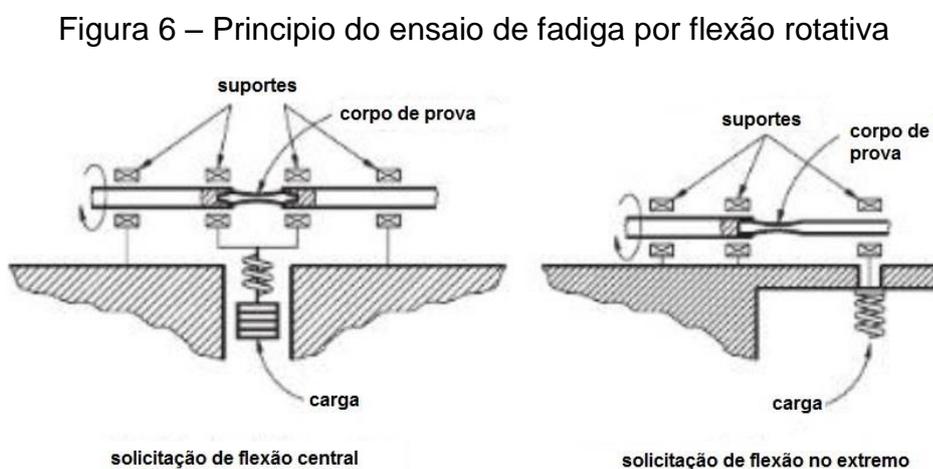
Conforme Nash (2001), o material dúctil apresenta apreciável deformação antes de atingir a ruptura, e contrariamente para um material frágil a ruptura é precedida de uma deformação reduzida.

A ductilidade de um material é medida através do percentual de seu alongamento até a ruptura. Os materiais que apresentarem mais de 5% de alongamento na ruptura são considerados dúcteis. Já os materiais frágeis não exibem um ponto definido de escoamento (NORTON, 2004).

2.4. ENSAIO À FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA

O principal objetivo dos ensaios por fadiga é estimar o quanto o material sob ensaio é capaz de suportar a esforços repetitivos durante longos períodos. Este tipo de ensaio é severo e solicita bastante do equipamento nos ensaios (SANTOS, 2008).

Para Marques e Arevalos (2011), o ensaio de fadiga tem por objetivo submeter um corpo de prova a solicitações de flexão, enquanto o mesmo é rotacionado em torno de um eixo através de um sistema motriz com contador de ciclos, numa rotação determinada e constante, conforme Figura 6.



Fonte: Marques e Arevalos, 2011.

Para Brandão (2013), os ensaios de fadiga definem-se pela utilização de uma carga cíclica em um determinado corpo de prova, apropriado e padronizado segundo o tipo de ensaio a ser realizado. Os corpos de provas são submetidos a tensões máximas e mínimas, levando o mesmo a ruptura após um determinado número de ciclos. Utilizando este tipo de ensaio é possível detectar o limite de tensão e o tempo de uso de um determinado componente.

2.4.1. Ensaio de flexão

De acordo com Norton (2004), uma barra fina, como representada na Figura 7, é simplesmente apoiada em cada extremidade e carregada transversalmente no centro de seu comprimento até a falha ocorrer. Se o material for dúctil, a falha será por escoamento. Já se o material for frágil, a viga se romperá. Na Figura 7 pode-se observar dois corpos de prova submetidos à flexão, sendo o material (a) dúctil e o material (b) frágil.

Figura 7 – Corpos de prova para flexão após a falha. (a) aço dúctil e (b) ferro fundido frágil.



Fonte: Norton, 2004.

2.4.2. Ensaio acelerado da vida de um material à fadiga

Para Rodrigues (2009), os ensaios acelerados da vida são testes de alta sollicitação que têm como função prever a confiabilidade de um dado componente no menor período de tempo possível. Através deste tipo de ensaio são adquiridos

dados que posteriormente são extrapolados para as condições normais de utilização, através do modelo mais apropriado.

Através dos ensaios acelerados é possível detectar de forma rápida as prováveis falhas, com isso as empresas oferecem produtos mais complexos e níveis de confiança elevados junto de seus consumidores (RODRIGUES, 2009).

Ainda segundo Rodrigues (2009), existem duas razões para a utilização dos ensaios acelerados:

1. Para realizar estimativa de vida;
2. Para identificação, prevenção e confirmação de problemas.

Já para Abackerli *et al.* (2007), o ensaio de vida acelerado tem por finalidade avaliar a probabilidade de falha de uma amostra quando submetido a funcionamento ao longo do tempo.

Para Pinto (2004), os testes acelerados são ensaios que acontecem sob condições mais severas do que o normal, com isso ocorrendo a falha mais rapidamente. Este tipo de ensaio acelerado é a maneira mais eficaz e rápida para se obter informações a respeito da vida dos materiais ou produtos, onde ainda é possível prever a sua confiabilidade.

Conforme Mialhe (1996), os ensaios acelerados de durabilidade de componentes têm como resultado produtos de melhor qualidade em comparação aos ensaios de campo. Porém, a efetividade destes ensaios depende do estabelecimento de correlações confiáveis entre os dados coletados em campo e os resultados obtidos nos ensaios acelerados.

2.5. CORPOS DE PROVA

Para Brandão (2013), os corpos de prova são definidos de acordo com o equipamento, capacidade do equipamento, forma na qual o material está disponível e objetivo do teste.

Nos ensaios de fadiga geralmente utiliza-se corpos de prova cilíndricos com seção de teste de perfil reto ou cilíndrico e definida por um raio de concordância (BRANDÃO, 2013).

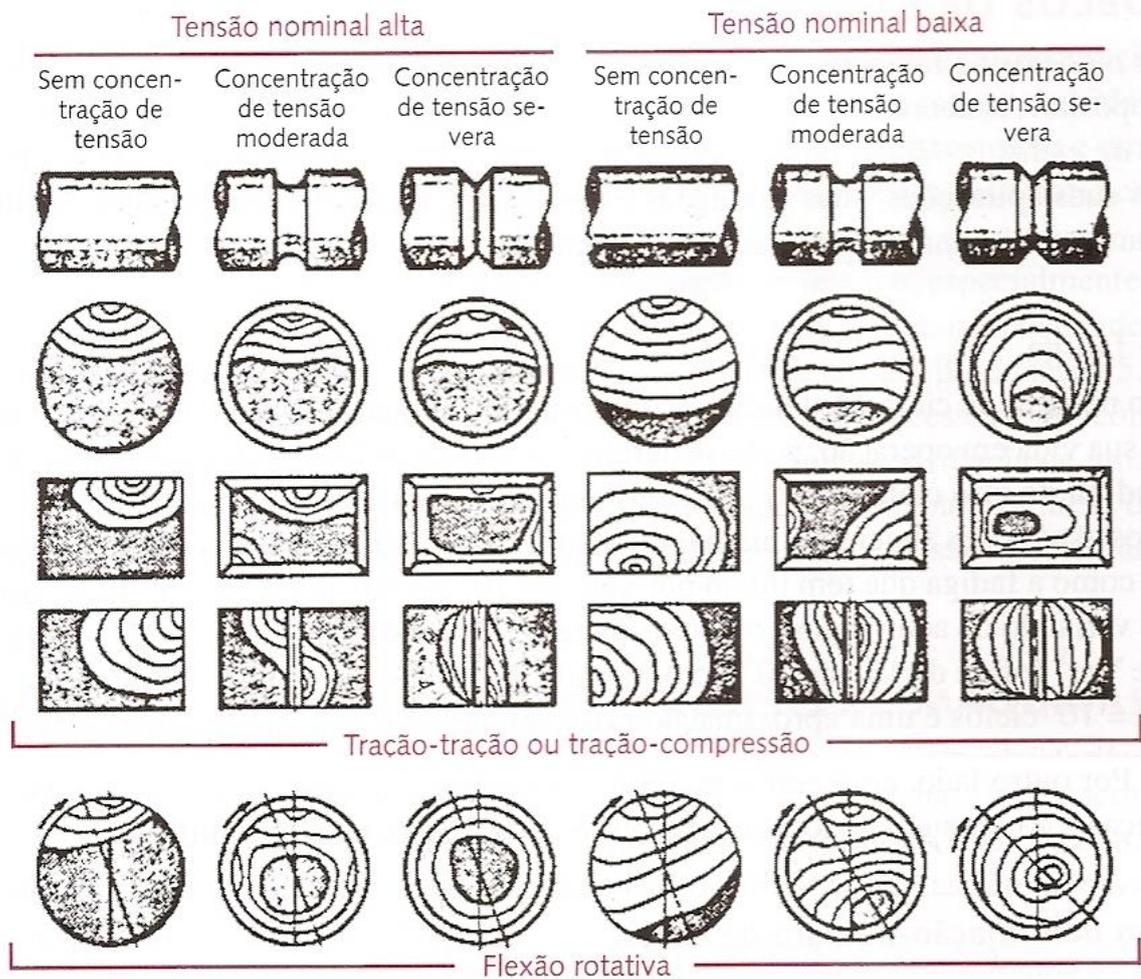
Conforme Souza (1982), os ensaios de fadiga podem ser realizados com três espécies diferentes de corpos de prova, conforme descritos a seguir:

- 1) A própria peça, um protótipo ou modelo podem ser utilizados como corpos de prova para determinar a vida da peça a uma determinada tensão ou a um determinado número de ciclos, em máquina apropriada.
- 2) Produtos acabados, como por exemplo, tubos, chapas, barras, arames etc., que podem ser utilizados diretamente em máquinas de ensaio apropriadas;
- 3) Corpos de prova usinados para ensaio, que podem ser lisos ou com entalhe.

O formato do corpo de prova liso usinado varia muito de acordo com o tipo de solicitação e com as variadas normas propostas para o ensaio de fadiga. Geralmente os corpos de prova são de seção circular ou retangular, dependendo do produto, composto por um raio grande e contínuo, ficando o centro dessa parte útil com uma dimensão mínima. O raio usado evita a concentração de tensões pela ausência de mudança brusca de seção. A tensão aplicada ao corpo de prova deve ser sempre calculada pela dimensão mínima. Também podem ser usinados corpos de prova igualmente já normalizados, que não possuem conicidade, ficando a parte útil paralela como no ensaio de tração.

A Figura 8 ilustra representações das superfícies de falha de uma variedade de peças (diversas geometrias) carregadas de diversas maneiras e em diferentes níveis de tensão. Podem ser observadas marcas de praia nas zonas de fratura, e a zona frágil pode ser representada por uma pequena área que restou da seção transversal original da peça (NORTON, 2004).

Figura 8 – Corpos de prova submetidos aos diferentes tipos de ensaios de fadiga



Fonte: Adaptado de Norton, 2004.

2.6. EIXOS

Conforme Budynas e Nisbett (2011), o eixo é um componente rotativo, geralmente de secção transversal circular, usado para transmitir potência ou movimento. Ele auxilia na rotação, ou oscilação, de elementos tais como engrenagens, polias, volantes, manivelas, rodas dentadas e similares, e controla a geometria de seus movimentos.

Segundo Hibbeler (2000), os eixos fabricados de secção transversal circular são frequentemente utilizados em diversos tipos de equipamentos mecânicos e máquinas. Conseqüentemente, eles estão geralmente sujeitos às tensões cíclicas ou de fadiga, geradas pela combinação das cargas de flexão e torção que eles devem transmitir ou resistir.

A carga imposta nos eixos de transmissão de rotação é dividida em dois tipos: de torção, devido ao torque transmitido, ou de flexão, devido às cargas transversais em engrenagens, polias e catracas (NORTON, 2004).

Para Brandão (2013), depois de se determinar a solução do sistema e da posição da aplicação das cargas, é possível iniciar o dimensionamento dos eixos, uma vez definido o seu tamanho estimado e os esforços resultantes, com isso pode-se calcular as reações nos apoios e o momento fletor resultante.

2.7. CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES PARA OS TESTES DE FADIGA

A partir do catálogo técnico da Gerdau (2014), foi possível identificar algumas características peculiares referente a cada tipo de material utilizado na fabricação dos corpos de prova apresentados neste trabalho.

As amostras fabricadas de aço SAE 1020 apresentam baixa temperabilidade, excelente forjabilidade e soldabilidade, porém sua usinabilidade é relativamente pobre. É utilizado em parafusos, eixos, componentes forjados sem maiores exigências, tubos soldados (GERDAU, 2014).

Já os corpos de prova fabricados de aço SAE 1045 possuem ótima forjabilidade, boa soldabilidade e má usinabilidade. É principalmente aplicado na fabricação de eixos, peças forjadas, engrenagens comuns, componentes estruturais e de máquinas, virabrequim (GERDAU, 2014).

E, por fim, as amostras de aço inoxidável AISI 304 possuem as seguintes características: O aço AISI 304 é um aço cromo-níquel, inoxidável austenítico, não temperável. Mantém boa ductilidade mesmo em baixas temperaturas. Esse aço possui boa conformabilidade ao frio e a resistência à oxidação é de até 850°C (GERDAU, 2014).

2.8. METODOLOGIA FATORIAL COMPLETA

A Análise Fatorial é composta por um conjunto de técnicas estatísticas, e tem como objetivo a redução do número de variáveis iniciais com a menor perda possível de informação. Ou seja, pode-se afirmar que a Análise Fatorial é aplicada à busca

de identificação de fatores num conjunto de medidas realizadas, sendo que esses fatores identificados pela Análise Fatorial são uma descoberta realizada pelo pesquisador (VICINI, 2011).

Para Vicini (2011), a Análise Fatorial não se refere apenas a uma técnica estatística, mas a um conjunto de técnicas relacionadas que permite tornar os dados observados mais claros para a interpretação. Isso é realizado analisando-se os inter-relacionamentos entre as variáveis, de tal modo que essas possam ser descritas convenientemente por um grupo de categorias básicas, em um número menor que as variáveis originais, chamado fatores.

A técnica de Análise Fatorial tem por objetivo decifrar a estrutura fatorial subjacente a um conjunto de dados correlacionados. É portanto, uma técnica de redução de dados, já que a informação contida no conjunto de variáveis observadas pode ser expressa por um número menor de dimensões representadas por tais fatores (LEÓN, 2011).

León (2011) comenta que a Análise Fatorial pode ser dividida em dois tipos, exploratório ou confirmatório. Onde a Análise Fatorial Exploratória é utilizada pelos pesquisadores para determinar apropriadamente o número de fatores comuns e para descobrir quais variáveis mensuradas são indicadores razoáveis de várias dimensões latentes. Já a Análise Fatorial Confirmatória é um procedimento cujo propósito se centra no estudo de modelos para instrumentos de medida, ou seja, em analisar as relações entre um conjunto de indicadores ou variáveis observadas em uma ou mais variáveis latentes ou fatores.

2.9. EQUAÇÕES UTILIZADAS PELO SOFTWARE PARA ANALISE FATORIAL

Através deste tópico é possível analisar os cálculos utilizados pelo software minitab para realizar a análise fatorial completa, com isso sendo possível compreender de uma maneira clara e objetiva os dados apresentados pelo minitab.

De acordo com Montgomery apud Galdámez (2002), para ilustrar o procedimento da técnica da análise fatorial, considera-se um experimento com dois fatores (A e B), cada um desses parâmetros serão testados com “a” níveis para o fator A e “b” níveis para o fator B. Portanto, neste experimento existem “ab” combinações de teste. A matriz de planejamento para este experimento fatorial é representada pela Figura 9.

Figura 9 – Experimento fatorial de dois fatores, caso geral.

		Fator B			
		Níveis	1	2
Fator A	1	$Y_{111}, Y_{112}, \dots, Y_{11n}$	$Y_{121}, Y_{122}, \dots, Y_{12n}$	$Y_{1b1}, Y_{1b2}, \dots, Y_{1bn}$
	2	$Y_{211}, Y_{212}, \dots, Y_{21n}$	$Y_{221}, Y_{222}, \dots, Y_{22n}$	$Y_{2b1}, Y_{2b2}, \dots, Y_{2bn}$
	:	:	:	:	:
	a	$Y_{a11}, Y_{a12}, \dots, Y_{a1n}$	$Y_{a21}, Y_{a22}, \dots, Y_{a2n}$	$Y_{ab1}, Y_{ab2}, \dots, Y_{abn}$

Fonte: Adaptado de Montgomery apud Galdámez, 2002.

Segundo Montgomery apud Goldámez (2002), com o experimento organizado dessa forma é possível verificar se:

- a resposta é alterada significativamente quando muda o nível do fator A;
- a resposta é alterada significativamente quando muda o nível do fator B;
- a interação dos fatores (coluna x linha) altera significativamente a resposta.

O autor Montgomery apud Goldámez (2002), também define que o modelo estatístico do planejamento fatorial é dado pela eq. (2.1).

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\sigma\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2.1)$$

sendo que,

μ é a média dos resultados;

τ_i é o efeito principal do fator A;

β_j é o efeito principal do fator B;

$(\sigma\beta)_{ij}$ é o efeito da interação dos fatores A e B;

ε_{ijk} é o erro experimental.

3. METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho foi dividida em duas etapas, sendo que na primeira foram descritos os métodos e técnicas utilizados e na segunda foram descritos os materiais e equipamentos utilizados para a realização dos ensaios.

3.1. MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADOS

Para a realização da análise estatística fatorial completa foi utilizado o software Minitab, ferramenta pela qual identifica-se o fator de maior influência e a melhor combinação entre as variáveis para a determinação do material que apresenta melhor vida útil (ciclos) através dos fatores apresentados.

Através do embasamento teórico foram definidos os fatores de fabricação dos eixos: tipo de material e concentrador de tensão aplicado nos corpos de prova.

Três níveis foram determinados para cada parâmetro (fator). Os níveis foram estabelecidos previamente através da análise dos tipos de materiais que poderiam ser utilizados para a fabricação dos eixos e a definição dos raios de entalhes através de ensaios.

A Tabela 1 apresenta as variáveis de entrada (fatores), com seus respectivos níveis, utilizadas na fabricação dos corpos de prova.

Tabela 1 – Fatores e seus respectivos níveis nos corpos de prova

Nº	Fator	Nível	Valor
1	Material	1	SAE 1020
		2	SAE 1045
		3	AISI 304
2	Concentrador de Tensão	1	r = 0,75mm
		2	r = 1,0mm
		3	r = 1,5mm

A matriz experimental foi definida pelo número de fatores, seus respectivos níveis e pela quantidade de réplicas. Ficou definido que para cada ensaio foram realizadas 3 réplicas, ou seja, tem-se 3 materiais, 3 raios concentradores de tensão

e 3 réplicas, totalizando 27 ensaios. Através destes dados foi gerada a matriz experimental pelo software minitab, onde nesta tabela a ordem dos ensaios é gerada de maneira aleatória proporcionando a interação entre os fatores e os seus respectivos níveis, permitindo uma análise consistente dos critérios, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Matriz experimental com a ordem de realização dos corpos de prova e seus respectivos níveis.

Ordem	Ordem dos Ensaos	Material	Concentrador de Tensão (mm)
1	17	AISI 304	1
2	7	AISI 304	0,75
3	24	SAE 1045	1,5
4	5	SAE 1045	1
5	27	AISI 304	1,5
6	10	SAE 1020	0,75
7	13	SAE 1045	0,75
8	23	SAE 1045	1
9	15	SAE 1045	1,5
10	18	AISI 304	1,5
11	20	SAE 1020	1
12	12	SAE 1020	1,5
13	3	SAE 1020	1,5
14	6	SAE 1045	1,5
15	21	SAE 1020	1,5
16	9	AISI 304	1,5
17	4	SAE 1045	0,75
18	25	AISI 304	0,75
19	2	SAE 1020	1
20	26	AISI 304	1
21	19	SAE 1020	0,75
22	22	SAE 1045	0,75
23	1	SAE 1020	0,75
24	16	AISI 304	0,75
25	8	AISI 304	1
26	11	SAE 1020	1
27	14	SAE 1045	1

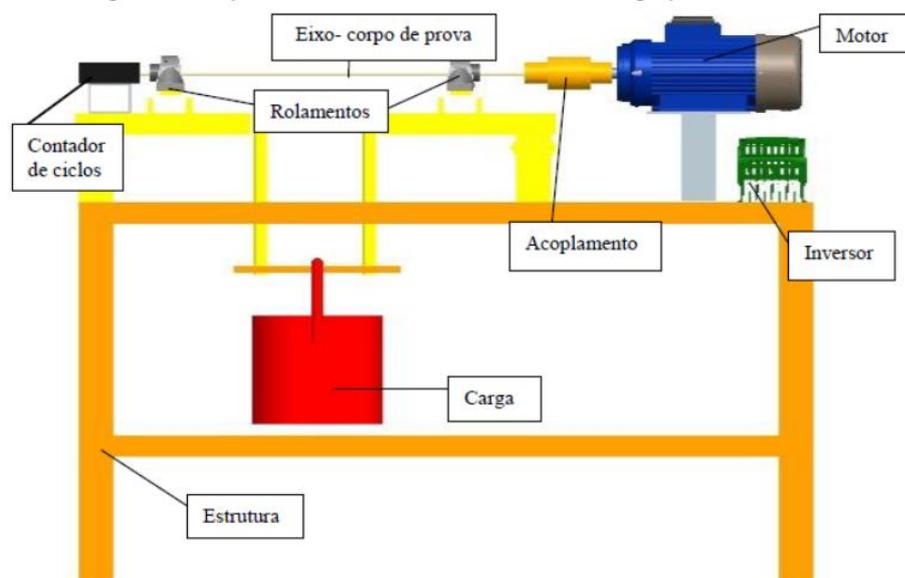
3.2. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.2.1. Bancada de ensaios

A realização dos ensaios de fadiga por flexão deu-se através de uma bancada de ensaios no laboratório da Faculdade Horizontina – FAHOR. Através desta bancada foi possível realizar todos os ensaios das amostras e verificar a quantidade de ciclos que os corpos de prova resistiram até sua ruptura.

A bancada de ensaios é composta de diversos componentes, sendo possível identificar a disposição dos principais componentes que a compõem, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Componentes da Bancada de Ensaio de Fadiga por Flexão



Fonte: Lewandovski, 2013.

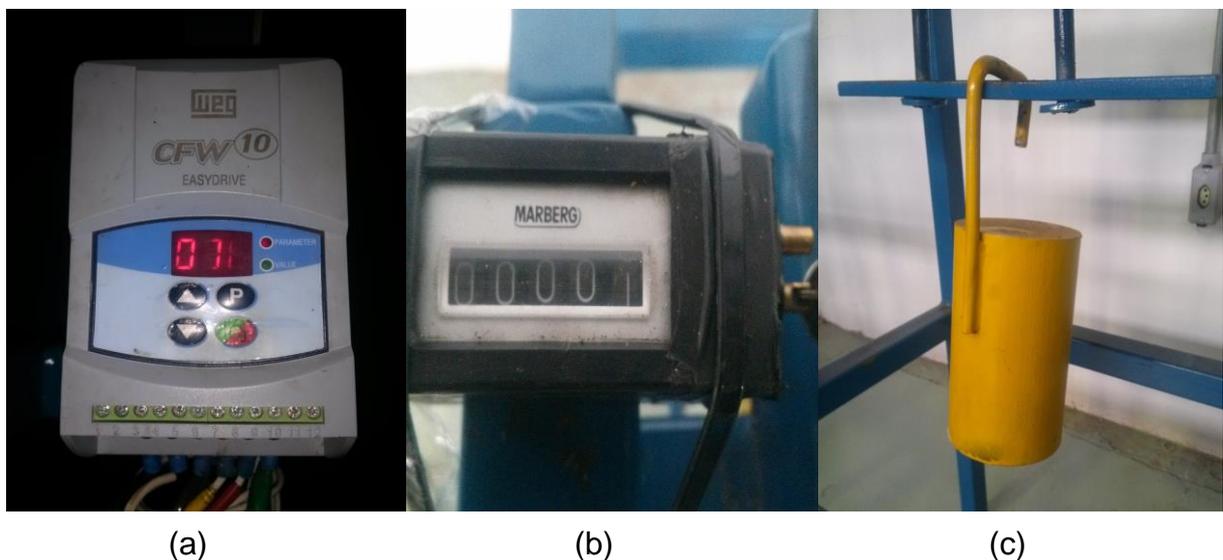
É possível verificar, na Figura 9, o corpo de prova fixado a dois mancais de rolamentos e ao acoplamento, onde os mesmos têm a função de absorver as vibrações sofridas pelo sistema, não interferindo nos ensaios.

O equipamento é dotado de um motor Voges com potência de 1CV, frequência de 60 Hz, tensão de 380 V e rotação máxima de 3415 rpm. Também dispõe de um acoplamento Acriflex AG disposto entre o motor e o eixo, o qual foi

acoplado com um sistema de bucha e parafuso. O acoplamento tem a função de unir o motor elétrico com o corpo de prova.

Para realizar o controle do nível de rotações do corpo de prova, o equipamento contempla um inversor de frequência WEG modelo CFW10. O inversor tem a função de controlar a rotação do motor elétrico, ou seja, ao alterar a frequência do inversor conseqüentemente a rotação do motor é alterada conforme a necessidade dos ensaios. Na Figura 11(a) é possível verificar o inversor utilizado.

Figura 11 – (a) Inversor de frequência WEG modelo CFW10. (b) – Contador ciclos H – 100 Marberg. (c) – Carga de flexão.



Este equipamento de ensaios também utiliza para controle do número de ciclos do corpo de prova um contador mecânico com 5 algarismos modelo H-100 Marberg, conforme ilustrado na Figura 11(b), instalado na base oposta do motor elétrico e, acoplado ao eixo a ser ensaiado. Este contador de ciclos tem função primordial nos ensaios, pois possibilita mensurar o número de ciclos que o corpo de prova realizou até sua ruptura.

A carga de flexão aplicada nas amostras ensaiadas está localizada na parte central inferior da bancada de ensaios, de acordo com a Figura 11(c), e tem por objetivo simular os esforços aplicados sobre os eixos em situações reais.

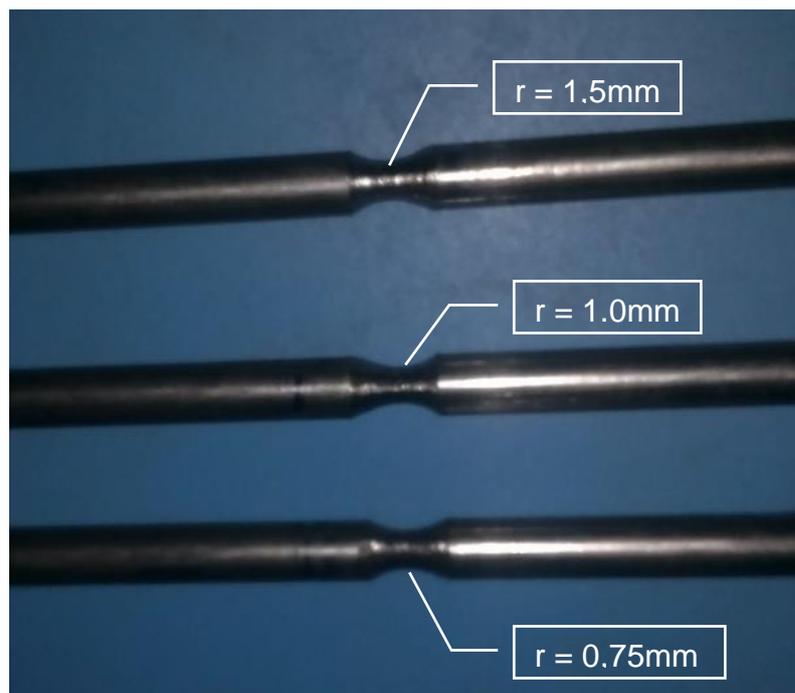
3.2.2. Descrição dos corpos de prova

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram produzidos na Faculdade Horizontina, a qual disponibilizou os materiais e equipamentos necessários para a realização deste trabalho.

Os materiais escolhidos para a produção das amostras são de aço SAE 1020, aço SAE 1045 e aço inoxidável AISI 304.

Os corpos de prova foram produzidos com 500 mm de comprimento e raio de entalhe ou concentrador de tensão distante 290 mm de uma das extremidades do corpo de prova. O raio de entalhe também tem variação quanto as suas dimensões, ou seja, para cada material definiu-se 3 amostras de raio de entalhe de 0,75 mm, 3 amostras de 1 mm de raio de entalhe e 3 amostras de 1,5 mm de raio de entalhe, totalizando 9 ensaios por material. Os concentradores de tensão foram definidos antes de realizar os ensaios para auxiliar na ruptura do material por fadiga, pois para a força aplicada nos ensaios sem a utilização de concentradores de tensão o corpo de prova não rompeu. A partir da Figura 12 é possível observar os 3 tipos de concentradores de tensão presentes nas amostras.

Figura 12 – Corpo de Prova



Alguns fatores foram mantidos constantes nos experimentos, ou seja, a rotação do motor e a carga de flexão aplicadas nos corpos de prova não se alteraram em nenhum ensaio. A rotação ficou definida em 1300 rpm, onde, com a utilização de um tacômetro foi possível verificar a rotação real apresentada no motor e ajustar a mesma pelo inversor, alterando sua frequência. E a carga de flexão aplicada nos ensaios foi de 22 Kg, e através de uma balança de pesagem foi possível mensurar sua carga real.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 3 apresenta as variáveis de saída (ciclos) encontradas experimentalmente até a ruptura dos eixos.

Tabela 3 – Número de ciclos dos corpos de prova ensaiados

Nº	Material	Concentrador de Tensão (mm)	Ciclos
1	SAE 1020	0,75	16841
2	SAE 1020	0,75	15632
3	SAE 1020	0,75	13056
4	SAE 1020	1	9264
5	SAE 1020	1	6110
6	SAE 1020	1	7689
7	SAE 1020	1,5	8
8	SAE 1020	1,5	11
9	SAE 1020	1,5	14
10	SAE 1045	0,75	30789
11	SAE 1045	0,75	28435
12	SAE 1045	0,75	34120
13	SAE 1045	1	7045
14	SAE 1045	1	12076
15	SAE 1045	1	9762
16	SAE 1045	1,5	28
17	SAE 1045	1,5	23
18	SAE 1045	1,5	32
19	AISI 304	0,75	27788
20	AISI 304	0,75	32930
21	AISI 304	0,75	31698
22	AISI 304	1	1259
23	AISI 304	1	1215
24	AISI 304	1	814
25	AISI 304	1,5	431
26	AISI 304	1,5	362
27	AISI 304	1,5	456

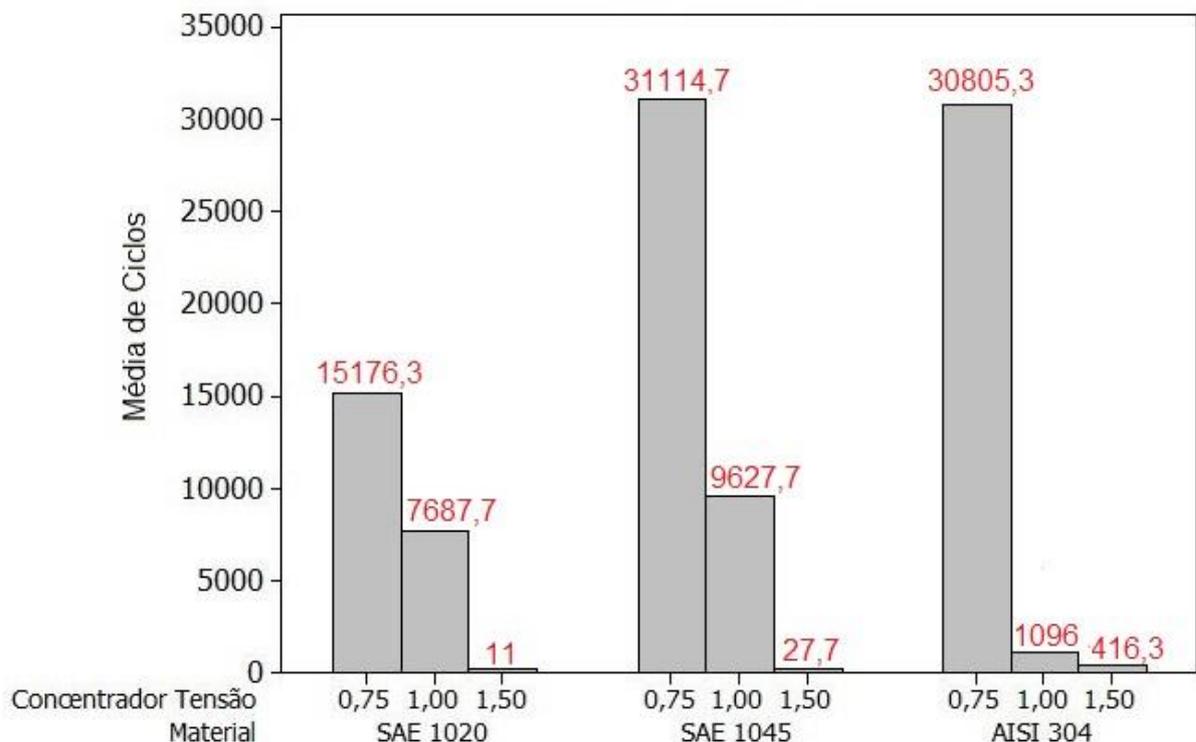
Foi possível perceber que todos os eixos apresentaram desempenho diferente nos ensaios, mesmo os eixos compostos de mesmo material. Quando se tratando de mesmo material, esta diferença pode estar relacionada à composição

química do material, ao processo de fabricação que o eixo recebeu e até pelo tipo de acabamento.

4.1. ANÁLISE DOS FATORES

Através dos resultados obtidos nos ensaios foi possível constatar que o corpo de prova que apresenta menor concentrador de tensão possui maior vida útil, ou seja, comparando os raios de entalhe de 0,75 mm, 1,0 mm e 1,5 mm, os corpos de prova com maior área de secção transversal no concentrador de tensão apresentaram melhores resultados quanto à resistência à fadiga, conforme ilustrado na Figura 13. Utilizando a análise estatística pelo método fatorial completo do software Minitab, foi possível criar o gráfico da Figura 13 e verificar a média dos ciclos em função dos fatores.

Figura 13 – Análise dos fatores em função do número de ciclos



Observando a Figura 13, ao analisar o tipo de material, percebe-se, que a influência quanto ao material utilizado para a fabricação de eixos também é importante, pois é possível observar que o aço SAE 1045 apresentou maior

resistência à fadiga que os outros materiais ensaiados, utilizando concentrador de tensão de 0,75 mm e 1,0 mm Já para utilização de um concentrador de tensão de raio 1,5 mm o eixo fabricado de aço inoxidável AISI 304 obteve melhores resultados referente à resistência à fadiga, apresentando mais ciclos antes da ruptura que os outros dois materiais ensaiados.

4.2. COMPARATIVO ENTRE OS CORPOS DE PROVA

Com nível de confiabilidade superior a 99%, pode-se dizer que os fatores analisados possuem influência significativa sobre os corpos de prova ensaiados, pois, o valor de probabilidade “P” foi menor que 0,01. Esta confiabilidade é apresentada nos resultados obtidos pelo software minitab. Da mesma forma, o fator que teve maior influência quanto à resistência à fadiga dos corpos de prova é determinado pelo valor de “F”, ou seja, quanto maior o valor de “F” maior será a influência do mesmo. Assim, o fator de maior influência em relação a resistência à fadiga dos corpos de prova, foi o concentrador de tensão e em seguida o material utilizado. Na Tabela 4 é possível verificar a análise de variância onde os valores de “F” e de “P” são apresentados para cada fator.

Tabela 4 – Análise de variância

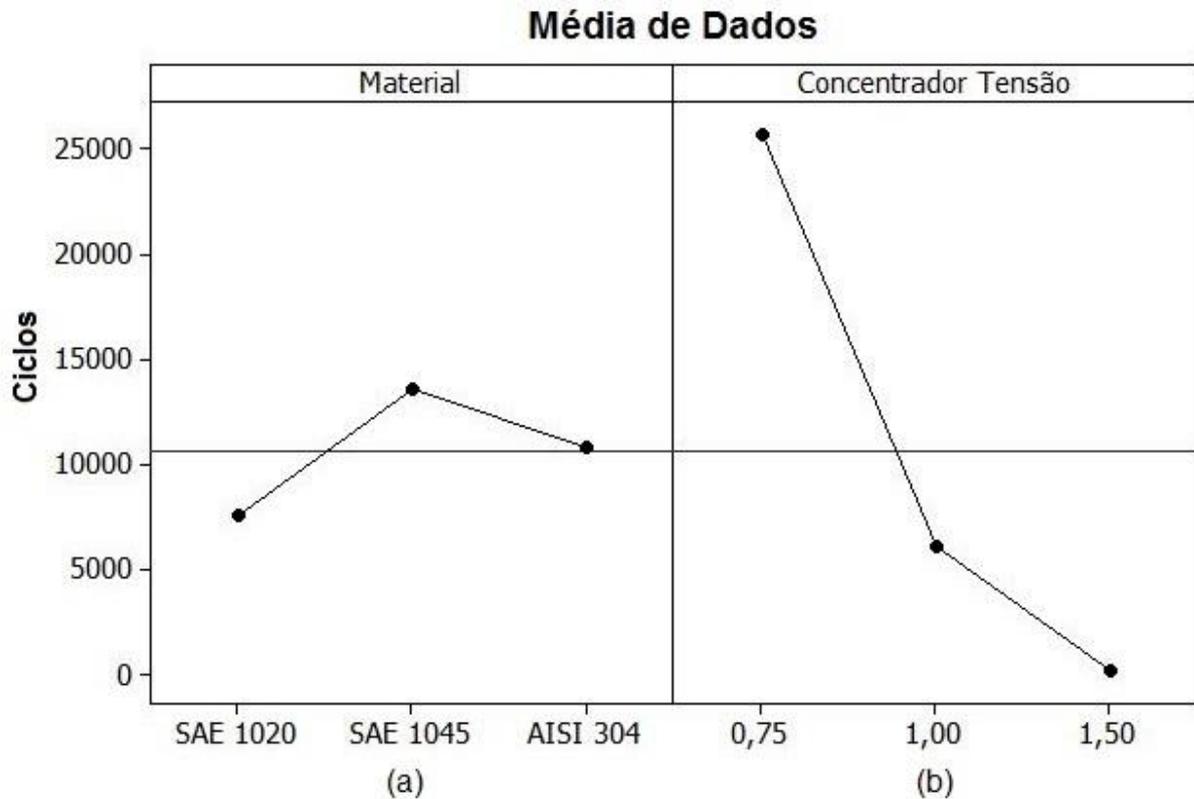
Fonte	Grau de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	Valor de F	Valor de P
Material	2	160278973	80139486	25,76	0,000
Concentrador de Tensão	2	3213417702	1606708851	516,53	0,000

Para uma melhor análise dos efeitos dos parâmetros sobre a quantidade de ciclos obtidos, foram plotados gráficos, os quais permitem visualizar a influência destes fatores sobre o efeito do número de ciclos.

A Figura 14 apresenta dois gráficos, um representa o material em função do número de ciclos e o outro gráfico representa o concentrador de tensão em função do número de ciclos. Analisando a Figura 14(a), o material em função do ciclo, pode-se concluir que os ensaios apresentaram maior resistência a fadiga referente a quantidade de ciclos, quando utilizando corpos de prova de aço SAE 1045. Observando a Figura 14(b) é possível verificar que o menor raio de concentrador de

tensão apresenta maior resistência à fadiga referente à quantidade de ciclos, quando comparado com os outros raios de entalhes analisados.

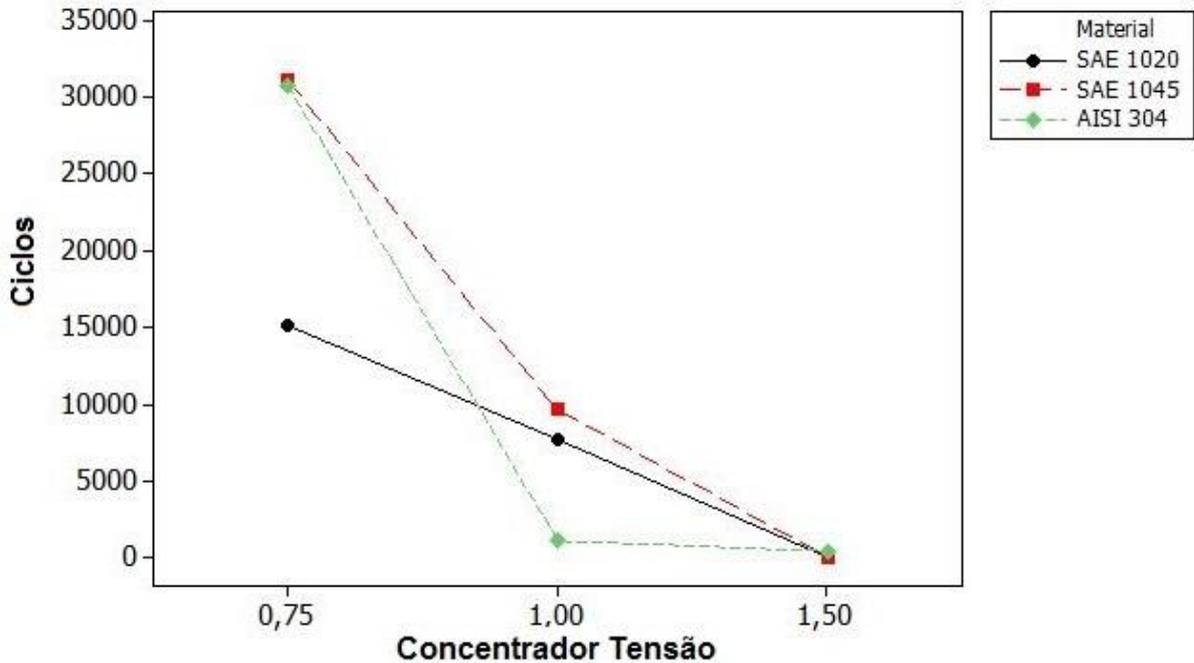
Figura 14 – Número de ciclos em função dos fatores



Para uma melhor análise dos efeitos das variáveis, a partir da Figura 15 é possível verificar a interação dos fatores (material e concentrador de tensão) com o número de ciclos. Com a plotagem dos fatores no mesmo gráfico fica fácil analisar o corpo de prova que apresenta maior resistência à fadiga, ou seja, maior número de ciclos até sua ruptura.

Utilizando como material para fabricação dos eixos o aço SAE 1045 e um concentrador de tensão de raio igual a 0,75 mm, é possível fabricar um eixo que apresente maior resistência à fadiga que eixos fabricados de aço SAE 1020 e aço inoxidável AISI 304 e também concentradores de tensão de 1,0 mm e 1,5 mm.

Figura 15 – Interação do número de ciclos em função dos fatores



4.3. ANÁLISE DA FRATURA

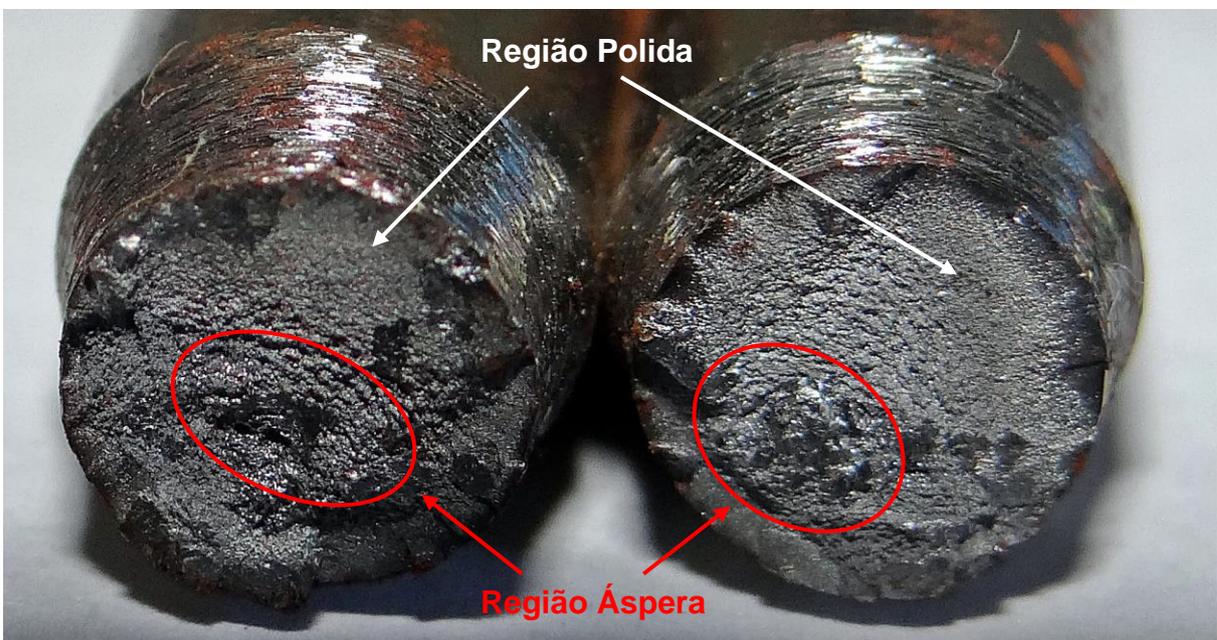
Através da análise visual das amostras foi possível observar que os materiais que possuem maior ductilidade (aço SAE 1020 e aço SAE 1045), apresentaram escoamento com maior facilidade em relação aos materiais menos dúcteis (aço inoxidável AISI 304). A partir disto, foi possível verificar com maior clareza a propagação da trinca devido à compressão e tração do corpo de prova, ao longo do ensaio até sua ruptura por fadiga, pois as amostras de aço SAE 1020 e aço SAE 1045 apresentaram apreciável deformação antes de atingir a ruptura, ao contrário do que aconteceu com um material dúctil-frágil no caso do aço inoxidável AISI 304, que não apresentou uma variação visível em sua deformação e acabou rompendo de maneira inesperada.

. Também foi possível verificar em algumas amostras de eixos após os ensaios a presença de marcas mais polidas (regiões lisas), que representam o local proveniente da propagação da trinca e após então uma região de aparência mais áspera que representa a ruptura do material. A partir da Figura 16 e Figura 17, pode-se visualizar a ruptura ocorrida nas amostras de aço SAE 1045 e aço SAE 1020 respectivamente.

Figura 16 – Ruptura do corpo de prova de aço SAE 1045



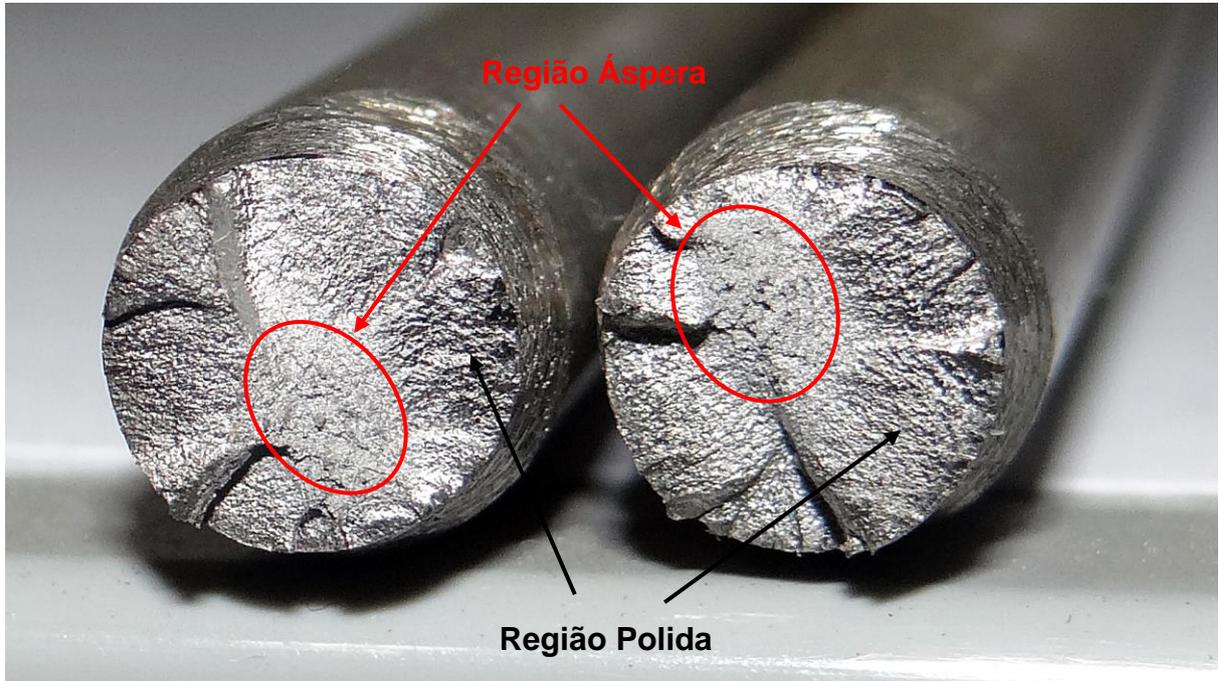
Figura 17 – Ruptura do corpo de prova de aço SAE 1020



Nos ensaios realizados em corpos de prova considerados menos dúcteis, fabricados de aço inoxidável AISI 304, as amostras apresentaram as mesmas características que nos materiais que possuem maior ductilidade, ou seja, a área considerada polida representando a propagação da trinca e em seguida a região

áspera considerada a ruptura do material. A partir da Figura 18 é possível analisar a ruptura ocorrida pelas amostras de aço inox AISI 304.

Figura 18 – Ruptura do corpo de prova de aço inox AISI 304



Portanto, referente à análise visual da fratura dos corpos de prova foi possível identificar facilmente nos três tipos de materiais ensaiados as regiões onde aconteceu a propagação da trinca e a área onde ocorreu a ruptura do material.

Podendo assim afirmar que nos ensaios realizados as amostras dos três tipos de materiais acabaram rompendo exatamente pela característica de ruptura por fadiga do material.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos ensaios realizados na bancada de testes de fadiga e da análise fatorial foi possível determinar os melhores critérios de fabricação dos eixos, ou seja, o material que melhor se portou perante os ensaios, resistindo por mais tempo até sua ruptura foi o aço SAE 1045 com concentrador de tensão de raio 0,75 mm.

A utilização da análise estatística pelo método fatorial completo mostrou-se uma ferramenta importante para a análise dos resultados do experimento. Foi possível identificar o fator de maior influência sobre o número de ciclos das amostras até sua ruptura, ou seja, qualquer modificação nos fatores de entrada (alteração de material de fabricação e variação do raio do concentrador de tensão) geram consideráveis alterações nos resultados finais das amostras quanto ao número de ciclos.

Os dois fatores para fabricação (material e concentrador de tensão) apresentaram influência significativa, com intervalo de confiança de 99% sobre os resultados obtidos.

No que se refere aos corpos de prova fabricados de aço SAE 1020, pode-se verificar através dos resultados obtidos pelo número de ciclos, que sua resistência à fadiga aumentou conforme diminuiu-se o raio de entalhe. Quanto ao comportamento das amostras de aço SAE 1045, foram estas as que apresentaram maior resistência à fadiga utilizando concentrador de tensão de raio 0,75 mm, 1,0 mm e 1,5 mm, e conseqüentemente desenvolveram o maior número de rotações até a ruptura total do eixo testado.

Já os corpos de prova de aço inoxidável AISI 304 quando ensaiados com concentrador de tensão de raio de 1,5 mm apresentaram resistência à fadiga semelhante aos outros materiais ensaiados. Porém quando foi utilizado concentrador de tensão de 1 mm de raio, sua resistência à fadiga foi inferior, resistindo menos ciclos do que os outros materiais ensaiados. Quando utilizado 0,75 mm de raio, sua resistência à fadiga aumentou consideravelmente, obtendo número de ciclos muito próximos aos eixos fabricados de aço SAE 1045.

Por fim, com base no que foi pesquisado e testado, pode-se verificar que o concentrador de tensão teve maior influência, sobre os corpos de prova ensaiados, que o material fabricado.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se analisar e aplicar diferentes fatores que alteram a resistência à fadiga dos materiais nos ensaios. Por exemplo aumentar a quantidade de materiais na fabricação dos corpos de prova e alterar os raios dos concentradores de tensão, com isso sendo possível avaliar e analisar os resultados com a presença de um maior número de variáveis. Também é interessante implementar a substituição do contador mecânico de ciclos de 5 algarismos por um contador digital com 7 ou 8 algarismos, sendo assim possível ensaiar corpos de prova que possuem maior resistência à fadiga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABACKERLI, A. J. *et al.* Análise da incerteza experimental na determinação da vida usando ensaio acelerado. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 14, n. 1, p. 69-81, jan.-abr. 2007.

BEER, F. P.; JOHNSTON JR, E. R. **Resistência dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Makron, 1995.

BRANDÃO, R. P. **Projeto mecânico de uma máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa**. 2013. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley**: projeto de engenharia mecânica. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

DUTRA, C. R. A. **Máquinas para ensaios de fadiga em arames de tubulações flexíveis**. 2009. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GALDÁMEZ, E. V. C. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

GERDAU. **Catálogo técnico de produtos**. Disponível em: <https://www.comercialgerdau.com.br/produtos/acos_especiais_aocarbono.asp>. Acesso em: 15 jun. 2014.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

LEÓN, D. A. D. **Análise fatorial confirmatória através dos softwares R e Mplus**. 2011. Monografia (Bacharelado em Estatística) - Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

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

MIALHE, L. G. **Máquinas Agrícolas: Ensaio & Certificação**. Fundação de Estudos agrários Luís de Queiroz – CNPQ – PADCT / TIB-FEALQ, 1996.

NASH, W. A. **Resistência dos Materiais**. 4. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2001.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

PINTO, J. M. A. **Modelagem de testes acelerados com esforço aplicado em níveis em um estudo de fadiga mecânica**. 2004. Tese (Doutorado em Ciências agrárias / Tecnologia Nuclear – Reatores) – IPEN- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2004.

RODRIGUES, P. J. L. **Metodologia básica de ensaios e execução de ensaios acelerados de vida na área de fiabilidade**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2009.

SANTOS, L. V. **Análise de falha por fadiga em eixo de motores para sistema de arrefecimento**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

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

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. 2011. Monografia de Especialização - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.