



MAURO FELIPE GODOY LEWANDOVSKI

**BANCADA DE ENSAIO DE FADIGA PARA EIXOS
SUBMETIDOS À FLEXÃO**

Horizontina

2013

MAURO FELIPE GODOY LEWANDOVSKI

**BANCADA DE ENSAIO DE FADIGA PARA EIXOS SUBMETIDOS À
FLEXÃO**

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: Ricardo Ferreira Severo, Me. (in memorian)

CO- ORIENTADOR: Anderson Dal Molin, Me.

Horizontina

2013

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a monografia:

“BANCADA DE ENSAIO DE FADIGA PARA EIXOS SUBMETIDOS À FLEXÃO”

Elaborada por:

MAURO FELIPE GODOY LEWANDOVSKI

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

**Aprovado em: 05/12/2013
Pela Comissão Examinadora**

**Prof. Me. Anderson Dal Molin
Presidente da Comissão Examinadora – CO- Orientador**

**Prof. Dr. Richard Thomas Lermen
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Eng. Francine Centenaro
FAHOR – Faculdade Horizontina**

**Horizontina
2013**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família que sempre me apoiou.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho somente pôde ser concluído com a ajuda de diversas pessoas, às quais presto minha homenagem:

À minha família que me apoiou durante toda esta caminhada, em especial à minha esposa Diane e filha Gabrielle.

Aos professores que me ajudaram durante a graduação, em especial ao professor Ricardo Ferreira Severo (in memorian), pela orientação, oportunidade, e dedicação durante a realização do trabalho, e ao professor Rainer (in memorian) pelo incentivo e disposição em ajudar.

Aos meus colegas que me acompanharam ao longo dos anos de estudos

E a DEUS por me amparar nas horas de cansaço e necessidade espiritual.

“A maior recompensa do nosso trabalho não é o que nos pagam por ele, mas aquilo em que ele nos transforma”.

John Ruskin

RESUMO

A realização dos testes e ensaios em laboratório visam avaliar qual o material que tem um melhor desempenho, desta forma, o teste e a avaliação dos eixos através da bancada de ensaio tem como objetivo geral, simular as condições reais de utilização dos mesmos até que ocorra a fadiga. A fadiga ocorrida nos eixos durante sua vida útil caracteriza-se como um problema para a estabilidade do sistema durante o movimento. Assim, faz-se necessário analisar comparativamente os eixos durante a flexão. Dentro deste contexto, foram realizados testes em eixos de três diferentes materiais, através de uma bancada de ensaios projetada e construída para testar as amostras de eixos, submetidos a flexão, para assim avaliar qual amostra suporta melhor a fadiga. A análise dos eixos se deu através do comparativo do número de ciclos que cada eixo efetuou até a fadiga e a consequente ruptura. Os principais resultados obtidos indicam que as amostras de eixos aço SAE 1045 obtiveram um melhor desempenho frente as amostras de eixos SAE 1020 e aço INOX 304. Através da revisão bibliográfica e das análises realizadas foi possível verificar que a composição dos materiais teve grande influência nos resultados.

Palavras-chave: Bancada de Ensaio. Eixos na Flexão. Fadiga.

ABSTRACT

The testing and laboratory tests aimed assessing which material performs better in this way, the test and evaluation of the axes through bench testing aims to generally simulate the actual conditions of their use of the same to occur until fatigue. Fatigue occurred in shafts over their lifetime is characterized as a problem for the system stability during movement. Thus, it is necessary to analyze comparatively the axes during bending. In this context, which tests were carried out in strands of three different materials through a test bench designed and built to test the samples shafts, subjected to bending, to thereby evaluate which sample supports better fatigue. The analysis of the axes is given by comparing the number of cycles made up by each shaft and the resulting fatigue rupture. The main results indicate that samples of SAE 1045 steel shafts obtained a better performance front axle samples SAE 1020 and AISI 304 stainless steel. Though literature review and analysis conducted was possible to verify that the composition and impurities in the materials had great influence on the results.

Keywords: Bench trial. The Axis Bending. Fatigue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (a) Falha em material dúctil, (b) Falha em material frágil.....	15
Figura 2: Estrias de fadiga na superfície da ruptura de uma liga de alumínio.	18
Figura 3: Peças que falharam por fadiga.	19
Figura 4: Representações esquemáticas das superfícies de fratura de fadiga de diversas seções transversais com e sem entalhes submetida a diversas condições de carregamento e níveis de tensão.....	20
Figura 5: Fixação dos eixos.	23
Figura 6: Esquema de acionamento e controle de rotação do eixo.	24
Figura 7: Contador de ciclos.	25
Figura 8: Bancada de ensaio	25
Figura 9: Esquema da bancada de ensaio de fadiga para eixos na flexão.....	26
Figura 10: Esquema de controle de frequência.....	27
Figura 11: Estrutura Metálica	28
Figura 12: Estrutura do Componente	30
Figura 13: Gráfico dos eixos aço SAE 1020.....	31
Figura 14: Fratura Amostra 1- Eixo aço SAE 1020	32
Figura 15: Gráfico dos eixos aço SAE 1045	33
Figura 16: Imagem da amostra A1 do eixo aço SAE 1045	34
Figura 17: Gráfico dos eixos aço inoxidável AISI 304.	35
Figura 18: Imagem da amostra 1 do eixo aço inoxidável AISI 304.....	36
Figura 19: Amostra de materiais diferentes.....	37
Figura 20: Ruptura ocorrida em eixo.	38
Figura 21: Gráfico da média para cada material.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Eixos aço SAE 1020.....	31
Tabela 2 – Eixos aço SAE 1045.....	33
Tabela 3 – Eixos aço inoxidável AISI 304.....	35
Tabela 4 – Comparativo entre as amostras.....	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	DEFINIÇÃO DE ENSAIO	14
2.1.1	ENSAIO ACELERADO DE VIDA	14
2.1.2	ENSAIO DE FADIGA	14
2.1.3	ENSAIO DE FLEXÃO	15
2.2	DEFINIÇÃO DE FADIGA	15
2.2.1	FÁLHA POR FADIGA	16
2.2.1.1	INÍCIO DA TRINCA	17
2.2.1.2	PROPAGAÇÃO DA TRINCA	17
2.2.1.3	FRATURA	18
2.2.2	CORPOS DE PROVA	20
2.3	EQUAÇÃO PARA FLEXÃO	21
2.4	EIXOS	21
3	METODOLOGIA	23
3.1	MÉTODOS DE ENSAIO	23
3.1.1	MEDIÇÃO DE CICLOS ATÉ A FADIGA	25
3.2	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	26
3.2.1	BANCADA DE ENSAIO	26
3.2.2	CORPOS DE PROVA	28
3.2.3	ROLAMENTOS	28
3.2.4	ACOPLAMENTO FLEXÍVEL	29
2.1.1	ESTRUTURA DO EQUIPAMENTO	29
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	31
4.1	AMOSTRAS EIXOS AÇO SAE 1020	31
4.2	AMOSTRAS EIXOS AÇO SAE 1045	33
4.3	AMOSTRAS EIXOS AÇO INOXIDÁVEL AISI 304	34
4.4	COMPARATIVO DAS AMOSTRAS	36
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	41
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1 INTRODUÇÃO

Atualmente o mercado industrial está cada vez mais exigente para com os produtos e serviços e, para satisfazer estas, algumas indústrias costumam testar novos produtos ou até mesmo melhorar os já existentes. Uma das maneiras de buscar soluções é a utilização de testes simulados ou testes em laboratório. Dentro deste contexto, surge a necessidade de se testar, através de bancadas de teste, a fadiga de eixos na flexão.

Simulando as condições a que os eixos são expostos cotidianamente, há a possibilidade de se verificar e analisar dados coletados, para assim posteriormente buscar possíveis soluções de problemas existentes relacionados à fadiga dos eixos durante a flexão.

Para a realização de testes em laboratório, são construídas bancadas que simulam condições reais da utilização dos materiais a serem testados. No estudo em questão, este tipo de teste possibilita monitorar e analisar as fadigas ocorridas nos eixos durante a flexão, mas há a necessidade de se controlar os dados coletados, para que possíveis defeitos na bancada não sejam interpretados como falhas nos itens testados. A bancada de teste mostra-se como um método eficiente de simulação, porém, para sua realização é necessário haver investimentos em equipamentos, para coletar os dados.

No presente trabalho, temos como problema central a fadiga ocorrida em eixos durante a flexão e, pode-se destacar como problema de pesquisa a análise comparativa de fadiga nos eixos durante a flexão, através da bancada de teste, fazendo-se valer de uma metodologia adequada para a análise dos dados coletados.

Este trabalho se justifica pela grande carência de análises no que se refere a eixos durante a flexão. E principalmente por oportunizar ao acadêmico a possibilidade de colocar em prática os conhecimentos adquiridos na área de engenharia mecânica relacionadas a vibrações e construção mecânica, dentre outras.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo geral testar eixos em condições de flexão, por meio de testes em uma bancada para assim verificar o comportamento dos mesmos nas simulações e estimando sua fadiga e ruptura total. Para tanto, este trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- Pesquisar e fundamentar conceitualmente ensaio de fadiga, equações de flexão e eixos.
- Construir uma bancada de testes de fadiga para eixos na flexão;
- Testar amostras de eixos;
- Efetuar o comparativo dos eixos testados;
- Apresentar a análise dos dados coletados.

Desta forma, esta análise dos eixos submetidos à flexão, poderá solucionar diversos problemas, tais como vibração e posteriores avarias causados no sistema durante o movimento.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão bibliográfica consiste em uma breve descrição sobre os conceitos referentes a ensaio, ensaio acelerado de vida, fadiga, falha por fadiga, corpos de prova, equações de flexão e eixos.

2.1 DEFINIÇÃO DE ENSAIO

Para Mialhe (1996), ensaio é a parte que trata da mensuração de grandezas do comportamento de determinada espécie, para a obtenção de certos tipos de dados.

Conforme Mialhe apud Simon (2012), um método de ensaio estabelece um conjunto de fatores que possibilite a avaliação de aspectos particularizados do comportamento do componente. Esta caracterização constitui três modalidades distintas de condições de ensaios:

- Artificial ou laboratorial;
- Controlada;
- Determinada.

2.1.1 Ensaio acelerado de vida

Para Abackerli et al (2007), os ensaios acelerados consistem em colocar o produto em funcionamento a fim de avaliar a probabilidade de falha ao longo do tempo.

Para Pinto (2004), os testes acelerados acontecem através do ensaio de espécimes ou amostras sob condições mais severas do que o normal, falhando mais rapidamente.

Conforme Abackerli et al (2007), os testes acelerados podem ser executados por meio de uso contínuo ou da aceleração pela aplicação de estresses.

2.1.2 Ensaio de Fadiga

Para Santos (2008), os ensaios de fadiga têm como objetivo determinar o

quanto o equipamento sob ensaio é capaz de resistir a esforços repetitivos durante longos períodos.

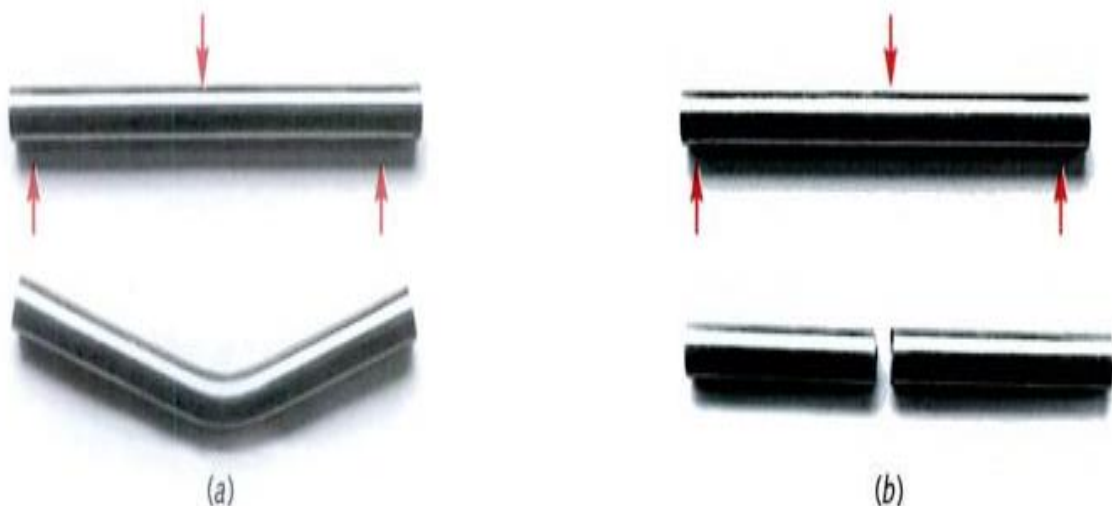
Para com Santos (2008), existem ensaios de fadiga torcional e flexional. São ensaios severos que solicitam bastante do equipamento sob ensaio com a intenção de ficar vibrando até quebrar ou sofrer algum dano em sua estrutura, que comprometa o seu funcionamento.

2.1.3 Ensaio de Flexão

De acordo com Norton (2004), no ensaio de flexão uma barra fina é simplesmente apoiada em cada extremidade como uma viga e carregada transversalmente no centro de seu comprimento até a falha ocorrer.

Ainda conforme Norton (2004), se o material for dúctil, a falha será por escoamento e, se o material for frágil a viga se romperá, conforme é possível visualizar na Figura 1.

Figura 1-(a) falha em material dúctil, (b) falha em material frágil.



Fonte: Norton, 2004, p. 61.

2.2 DEFINIÇÃO DE FADIGA

Conforme Suresh apud Marques (2011), o termo fadiga tem origem na expressão *fatigue* que significa cansar. O termo fadiga também se tornou uma

terminologia largamente aceita no vocabulário da engenharia para dano ou falha de materiais sob carregamento cíclico.

De acordo com Norton (2004), o termo fadiga foi aplicado à uma situação pela primeira vez por Poncelet em 1839. O mecanismo de falha ainda não compreendido e a aparência de uma fratura frágil na superfície de um material dúctil geraram especulações de que o material, de alguma maneira, apresentou cansaço e fragilizou-se devido às oscilações de carga aplicada.

Wohler apud Norton(2004), mais tarde, mostrou que cada metade dos eixos quebrados ainda continuava tão resistentes e dúcteis em ensaios de fadiga, quanto o material original. (NORTON, 2004)

Para Norton (2004), o termo fadiga é usado 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 carregamento estático; a este fenômeno se dá nome de fadiga. A ruptura por fadiga é sempre uma ruptura frágil, mesmo para materiais dúcteis.

2.2.1 Falha por fadiga

De acordo com Norton (2004), as falhas por fadiga sempre têm início com uma pequena trinca, que pode estar presente no material desde a sua manufatura ou desenvolveu-se ao longo do tempo devido às deformações cíclicas ao redor das concentrações de tensões.

Conforme Brandão (2013), devido às propriedades mecânicas dos materiais metálicos, que são compostos por um conjunto de grãos cristalinos, os níveis de tensão possuem distribuição não uniforme. Nas regiões onde são aplicados elevados níveis de tensão, encontram-se os pontos de maior probabilidade para o início da falha por fadiga.

Para Norton (2004), é fundamental que peças dinamicamente carregadas sejam projetadas para minimizar a concentração de tensões.

Conforme Norton (2004), existem três estágios por fadiga: início da trinca, propagação da trinca e ruptura repentina 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.

2.2.1.1 Início da Trinca

Para Norton (2004), um metal dúctil e, sendo manufaturado, não apresenta trincas, mas possui partículas e inclusões, etc., que são comuns em materiais de engenharia. Em escala microscópica, os metais não são homogêneos e isotrópicos, nestes, existem algumas regiões de concentração geométrica de tensão.

Conforme as tensões no entalhe oscilam, pode ocorrer escoamento local devido à concentração de tensão (Norton, 2004).

Para Brandão (2013), as trincas iniciam-se a partir de pequenas falhas nos planos cisalhantes localizados, geralmente, nas regiões de concentração de tensões ou em regiões de baixa resistência local.

À medida que os ciclos de tensão ocorrem, bandas de deslizamento adicionais aparecem e agrupam-se em trincas microscópicas. Mesmo na ausência de um entalhe este mecanismo ainda ocorrerá desde que exceda o limite de escoamento em alguma região do material (Norton, 2004).

Para Norton (2004), materiais menos dúcteis não apresentam a mesma habilidade para escoar, e tendem a desenvolver trincas mais rapidamente. Materiais frágeis que não escoam podem pular esse estágio inicial e proceder diretamente para a propagação da trinca em locais de existência de vazios ou inclusões, que atuam como trincas microscópicas.

2.2.1.2 Propagação da Trinca

Uma vez que uma trinca microscópica se estabelece (ou está presente desde o início), os mecanismos da mecânica da fratura entram em funcionamento. O crescimento da trinca se deve a tensões de tração e a trinca propaga-se ao longo de planos normais aos de tensão máxima de tração. (Norton, 2004)

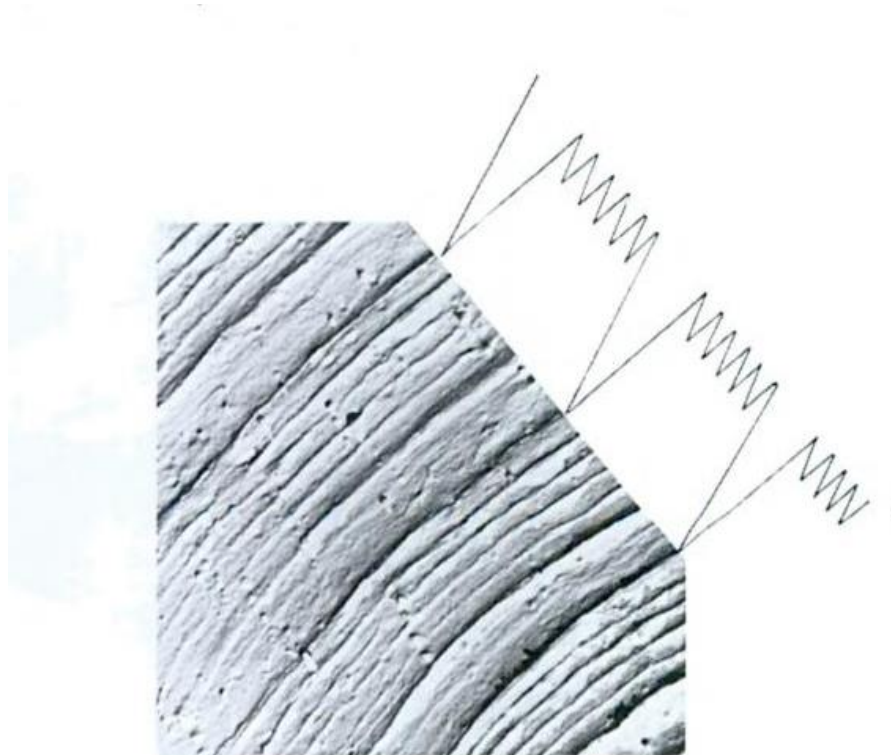
Para Brandão (2013), o carregamento tende a continuar atuando no material, o que acarretará no crescimento e propagação da trinca ao longo do plano cristalográfico dos contornos dos grãos.

Conforme Norton (2004), a taxa de crescimento ou propagação da trinca é muito pequena, da ordem de 10^{-8} até 10^{-4} in por ciclo, mas após um grande número de ciclos torna-se significativa.

De acordo com Norton (2004), os ocasionais ciclos de elevada tensão mostram estrias maiores do que aquelas mais frequentes de pequena amplitude, indicando que amplitudes de tensão maiores causam um maior crescimento da trinca por ciclo.

Na Figura 2 é possível visualizar as estrias causadas pelas trincas.

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



Fonte: Norton, 2004, p. 295.

2.2.1.3- Fratura

Com a constante aplicação das tensões, a trinca tenderá a se expandir. Consequentemente, o tamanho da trinca irá aumentar o fator de intensidade de tensão do material, até o estágio da fratura, onde irá ocorrer a ruptura total e repentina do material (Brandão, 2013).

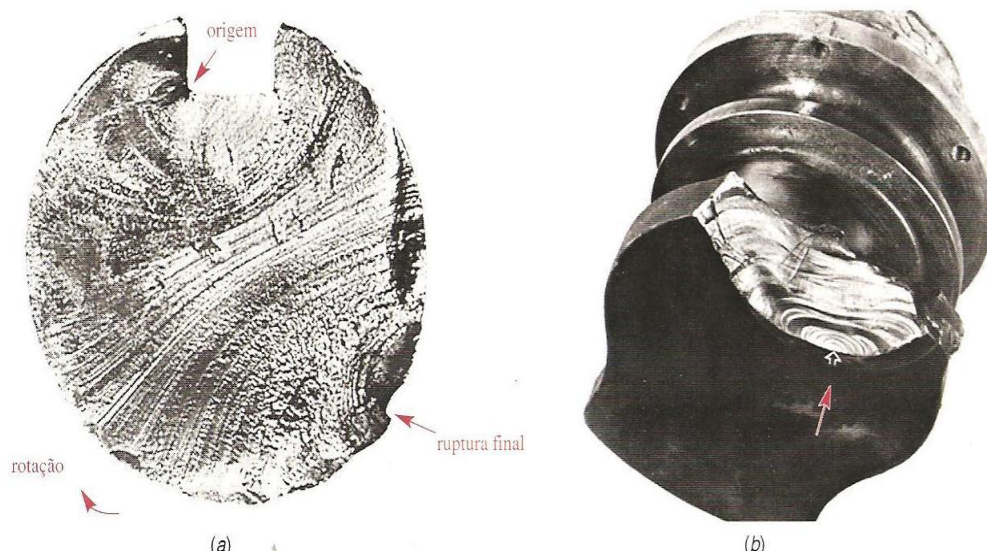
Conforme Norton (2004), a trinca continuará a crescer enquanto tensões de tração cíclica e/ou fatores de corrosão de servidade suficiente estiverem presentes. Em, um certo ponto, o tamanho da trinca torna-se grande o bastante para aumentar o fator de intensidade de tensão na extremidade da trinca, até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

De acordo com Brandão (2013), a falha por fadiga pode ser reconhecida pela análise da aparência da superfície de fratura do elemento.

O exame a olho nu de peças que falharam devido à fadiga exibem um padrão típico. Existe uma região proveniente do local da microtrinca original de aparência polida e uma região que tem aparência áspera, semelhante a uma fratura frágil (Norton, 2004).

De acordo com Norton (2004), a região de aparência polida em torno da trinca frequentemente exibe marcas de praia, assim chamadas porque as mesmas se assemelham às ondulações deixadas na areia, com o movimento cíclico das ondas na orla marítima. As marcas de praia surgem devido aos ciclos de início e parada do crescimento da trinca e circundam a origem da trinca, usualmente em um entalhe ou em outro intensificador de tensão interna, conforme é possível visualizar na Figura 3.

Figura 3- Peças que falharam por fadiga



Fonte: Norton, 2004, p. 296.

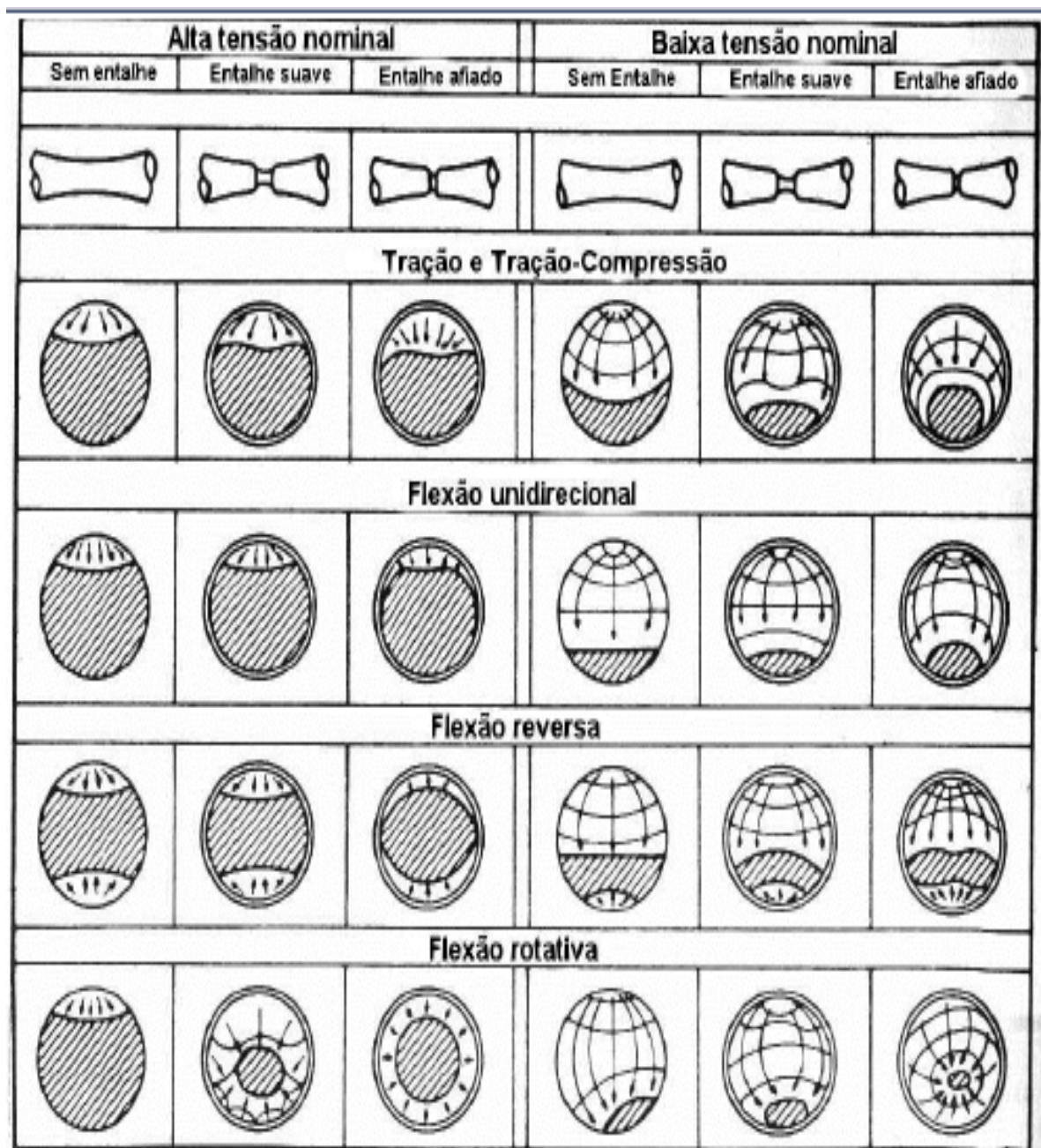
Conforme Norton (2004), às vezes, se ocorre muita fricção nas superfícies da trinca, as marcas de praia ficarão obscuras. A região da fratura frágil corresponde à porção que apresentou ruptura repentina quando a trinca atingiu o seu tamanho limite.

As marcas de praia podem ser vistas nas zonas de fratura. A zona de fratura frágil pode ser representada por uma pequena área que restou da seção transversal original da peça (Norton, 2004).

2.2.2 Corpos de Prova

Conforme Brandão (2013), os corpos de prova utilizados nos ensaios de fadiga variam de acordo com o objetivo do teste, do equipamento, da capacidade do equipamento e da forma na qual o equipamento está disponível. Isto sendo possível visualizar na Figura 4.

Figura 4- Representações esquemáticas das superfícies de fratura de fadiga de diversas seções transversais com e sem entalhes submetidas a diversas condições de carregamento e níveis de tensão.



Fonte: Shigley apud Brandão, 2013, p. 38.

2.3 EQUAÇÕES PARA FLEXÃO

Conforme Hibbeler (1997), as equações de flexão são utilizadas para determinar as tensões normais em elementos retilíneos, com seção transversal simétrica em relação a um eixo e com o momento fletor aplicado perpendicularmente a esse eixo.

De acordo com Hibbeler (1997), para expressar $\sigma_{m\acute{a}x}$ em sua forma geral:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{Mc}{I} \quad (1)$$

Onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = tensão normal máxima no elemento, ocorre no ponto mais afastado do eixo neutro da área da seção transversal.

M = momento interno resultante, determinado pelo método das seções junto com as equações de equilíbrio. É calculado em relação ao eixo neutro da seção transversal.

I = momento de inércia da área da seção transversal, calculado em relação ao eixo neutro.

c = distância perpendicular entre o eixo neutro e o ponto mais afastado do eixo neutro onde atua $\sigma_{m\acute{a}x}$.

Sendo $\sigma_{m\acute{a}x}/c = -\sigma/y$, a tensão normal atuante a uma distância y intermediária pode ser determinada a partir de:

$$\sigma = -\frac{My}{I} \quad (2)$$

Conforme Hibbeler (1997), o sinal negativo é necessário para que haja uma concordância com os eixos coordenados x , y e z previamente estabelecidos.

2.4 EIXOS

De acordo com Hibbeler, os eixos são frequentemente utilizados em muitos tipos de equipamentos mecânicos e máquinas. Conseqüentemente, eles estão em

geral, sujeitos às tensões cíclicas ou de fadiga, geradas pela combinação das cargas de flexão e torção que eles devem transmitir ou resistir.

Para Norton (2004), os eixos, são usados em praticamente todas as partes de máquinas rotativas para transmitir movimento de rotação e torque de uma posição para outra.

Conforme Norton (2004), a carga em eixos de transmissão de rotação é predominantemente uma de dois tipos: torção devido ao torque transmitido ou flexão devido às cargas transversais em engrenagens, polias e catracas.

Para Brandão (2013), após a determinação do sistema e da localização da aplicação das cargas, é possível iniciar o dimensionamento dos eixos, uma vez que se tem o seu tamanho estimado e os esforços resultantes, pode-se calcular as reações nos apoios e no momento fletor resultante.

3 METODOLOGIA

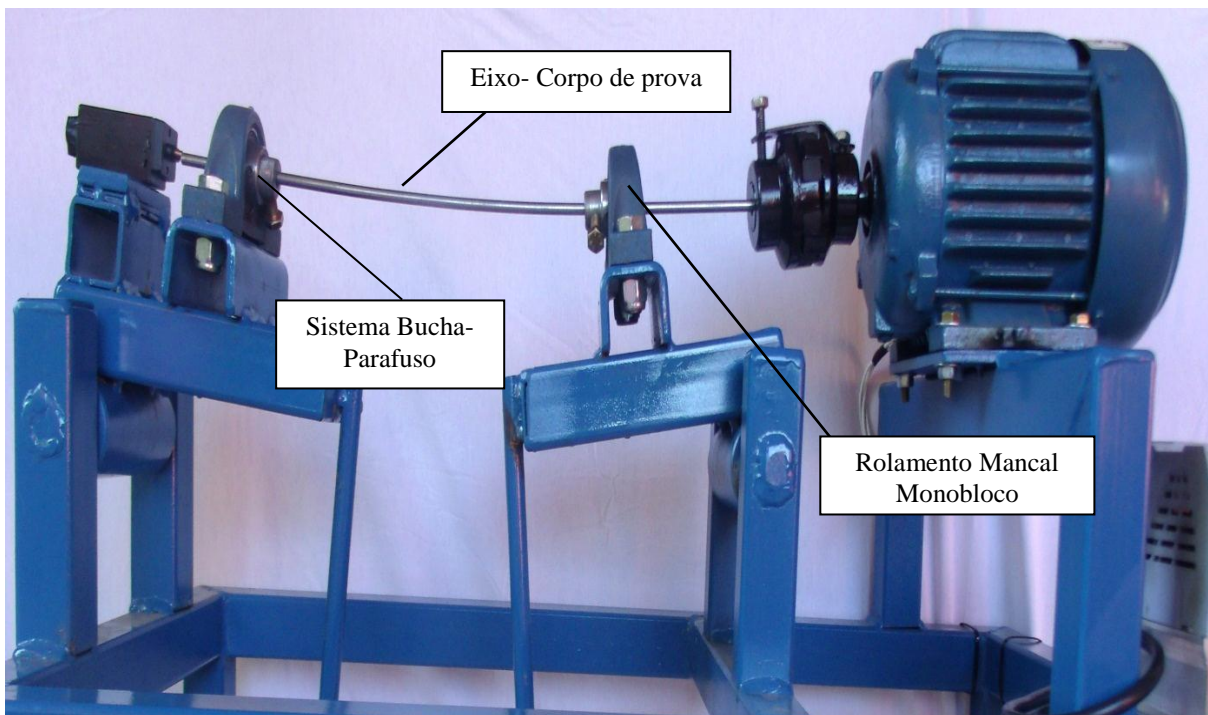
A metodologia nesta pesquisa será apresentada através de duas etapas, onde na primeira iremos descrever o método e as técnicas utilizadas e na segunda serão descritos os materiais e equipamentos que foram utilizados para a realização dos testes.

3.1 MÉTODOS DE ENSAIO

Para a realização dos testes foram utilizadas amostras de eixos de diferentes materiais, os quais foram dispostos um após o outro na bancada de ensaio. Estas amostras correspondem a eixos de aço SAE 1020 trefilado, aço SAE 1045 trefilado e, inoxidável AISI 304.

Esses eixos foram fixados em um rolamento mancal monobloco, através de um colar excêntrico, o sistema funciona através do aperto manual de um sistema bucha- parafuso M6. Conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5- Fixação dos eixos



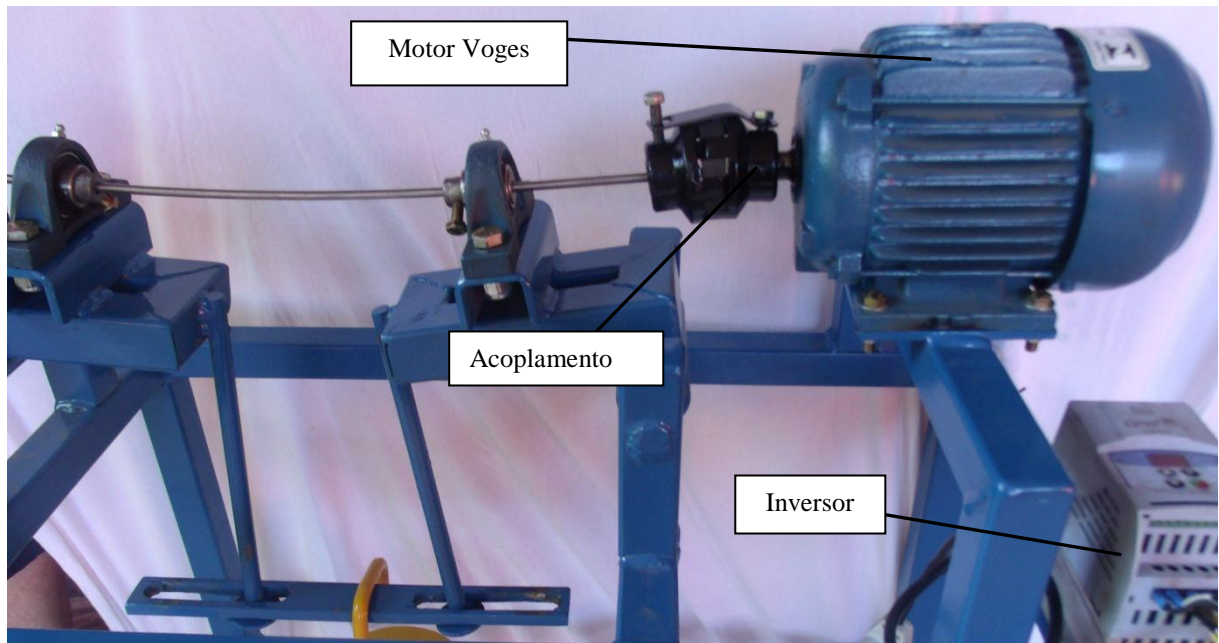
O eixo recebe a rotação através de um motor Voges com potência de 1CV, frequência de 60 Hertz, tensão de 380V e rotação máxima 3415 rpm. Esse motor foi

fixado em cima de uma base de chapa aço carbono, SAE 1020 com espessura de 6.35mm, através de parafusos sextavados com polca autotravante.

Para que haja rotação foi utilizado um acoplamento Acriflex AG, este possui dois cubos simétricos de ferro fundido e um elemento cinzento alojado entre eles, por ser de forma construtiva simples, dispensa cuidados e ferramentas especiais para sua montagem, desta forma, este acoplamento foi disposto entre o motor e o eixo, o qual foi acoplado com sistema de bucha e parafuso.

Para controlar o nível de rotações do eixo, foi utilizado um inversor de frequência WEG modelo CFW10, que possui uma alta tecnologia para variação da velocidade em motores de indução trifásicos. Esse inversor está acoplado antes do motor elétrico, onde recebe uma tensão elétrica e após passa esta tensão para o motor, assim podendo aumentar ou diminuir a velocidade de rotação (rpm), conforme apresenta a Figura 6.

Figura 6- Esquema de acionamento e controle de rotação do eixo



Utilizou-se para nível de controle de número de ciclos, um contador com 5 algarismos H- 100 Marberg, o qual foi parafusado na base do lado oposto do motor e, acoplado ao eixo corpo de prova.

Este contador de ciclos possibilitou o controle dos dados das amostras, para posterior análise de dados, conforme é possível visualizar na Figura 7, uma imagem do contador de ciclos.

Figura 7- Contador de ciclos

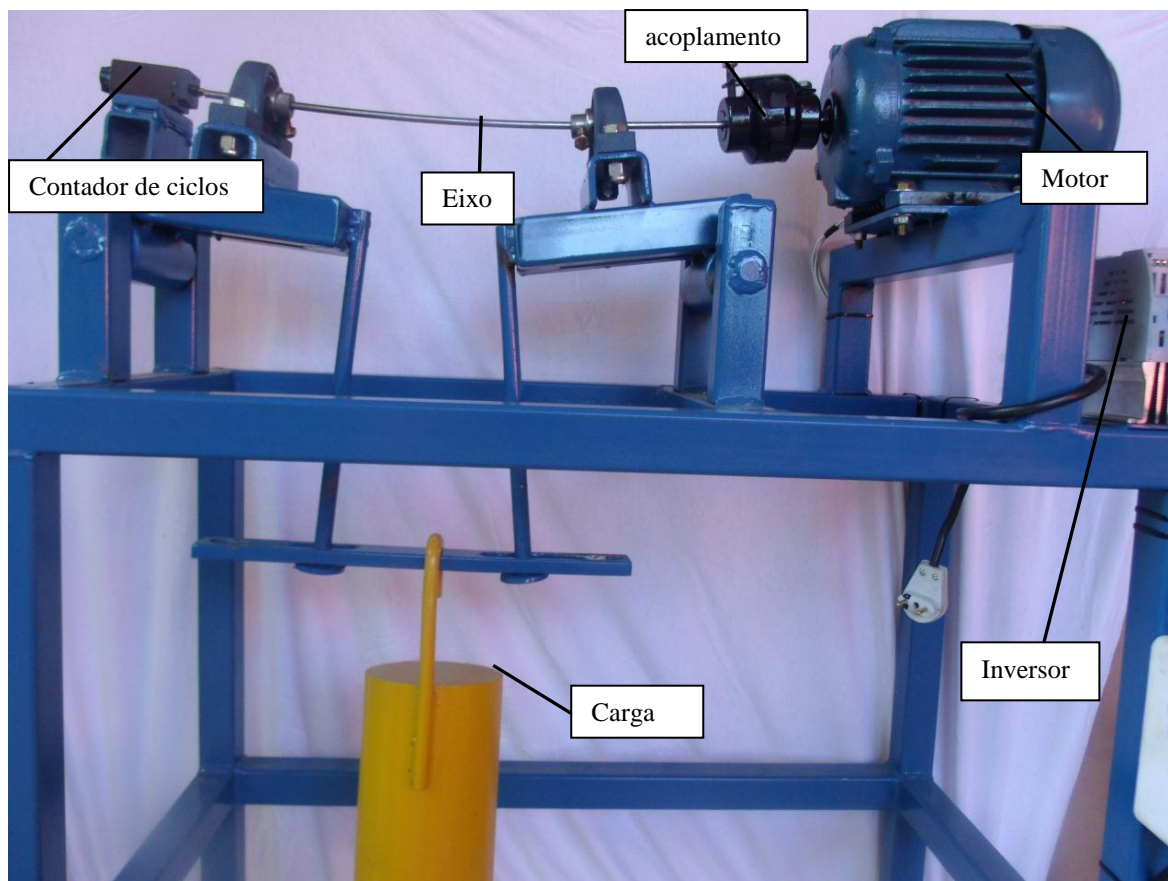


3.1.1 Medição de ciclos até a fadiga

Para fazer um comparativo foi escolhido um ponto para análise, sendo que para o ensaio de flexão rotativa, este ponto foi de uma inspeção individual dos eixos e análise dos ciclos de cada material, para uma compreensão do comportamento de cada material durante os ciclos desenvolvidos até que ocorresse a fadiga.

O procedimento para medir quantos ciclos cada eixo deve suportar numa rotação de 890 rpm e com uma carga de 22kg conta com o auxílio de uma bancada de ensaio como mostrado na Figura 8.

Figura 8- Bancada de ensaio



Conforme a Figura 8, puderam ser observados os itens necessários para a realização do procedimento de medição de ciclos suportados para eixos de diferentes materiais e a eles aplicados a carga de 22 kg.

Após ser testado o primeiro eixo, o processo se repetiu para o próximo eixo e assim sucessivamente até que todos os eixos tenham sido testados.

O detalhamento da bancada de ensaio é apresentado em Materiais e Equipamentos.

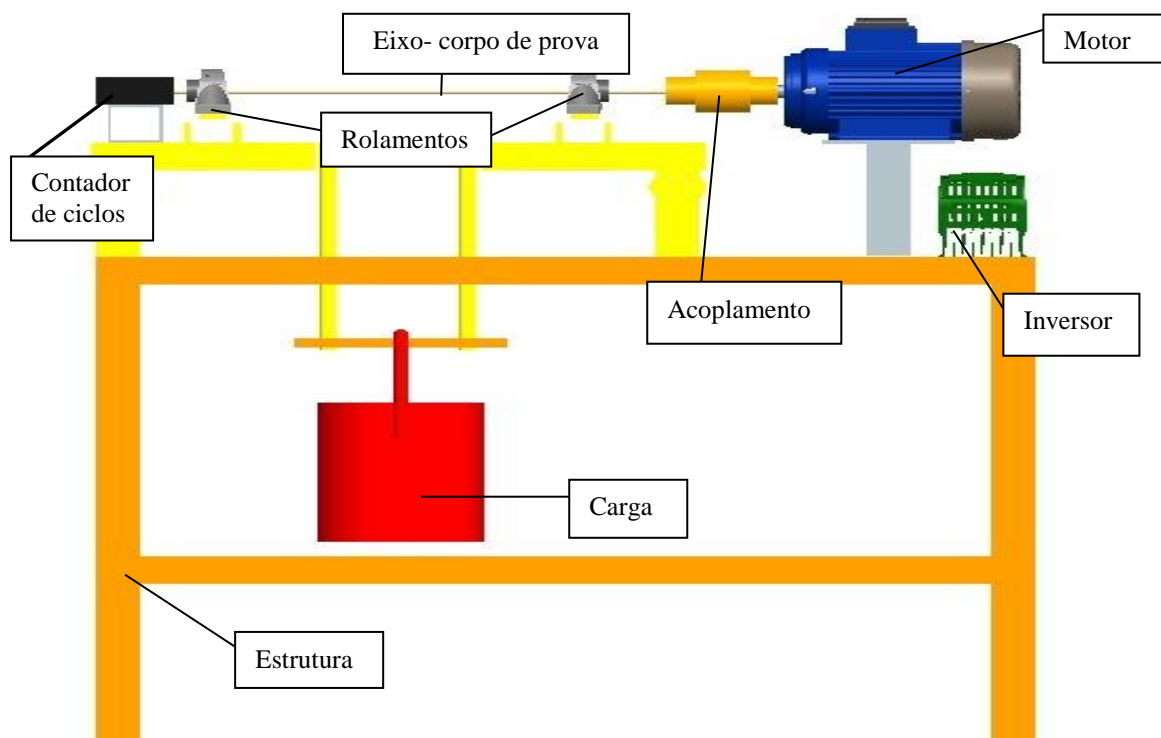
3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.2.1 Bancada de ensaio

A bancada de ensaio de fadiga para eixos na flexão foi escolhida, levando-se em conta os requisitos estabelecidos para verificação do material adequado ao problema encontrado e o número de ciclos até que ocorra a fadiga e a ruptura.

Com base nestes dados, torna-se possível criar uma projeção em três dimensões de como é a disposição dos componentes que estão presentes na bancada de testes, bem como a quantidade de componentes. Esta projeção está representada na Figura 9.

Figura 9- Esquema da bancada de ensaio de fadiga para eixos na flexão

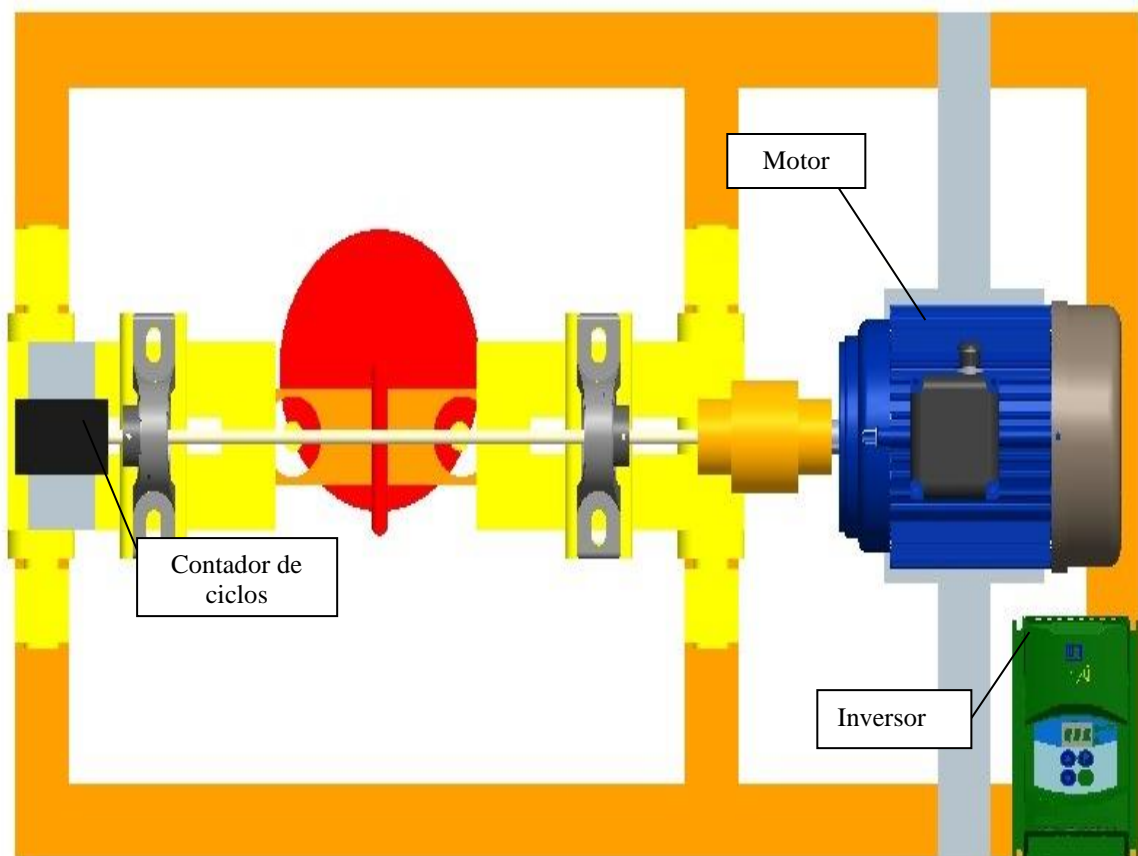


Através do esquema verificamos que há um eixo, responsável pela sustentação dos componentes do sistema, que também é responsável pela transmissão do movimento de rotação, gerado por um motor elétrico.

Podemos ver a presença de dois rolamentos e, também de um acoplamento flexível, que são responsáveis pela absorção das vibrações sofridas pelo sistema, desta forma estes não interferiram nos ensaios realizados.

Na Figura 10, é possível visualizar a presença de um inversor de frequência, responsável por controlar o número de rotação, que é transmitido ao motor elétrico. No lado oposto do motor há um contador de ciclos que é responsável por contar os ciclos do corpo de prova até que ocorra a fadiga.

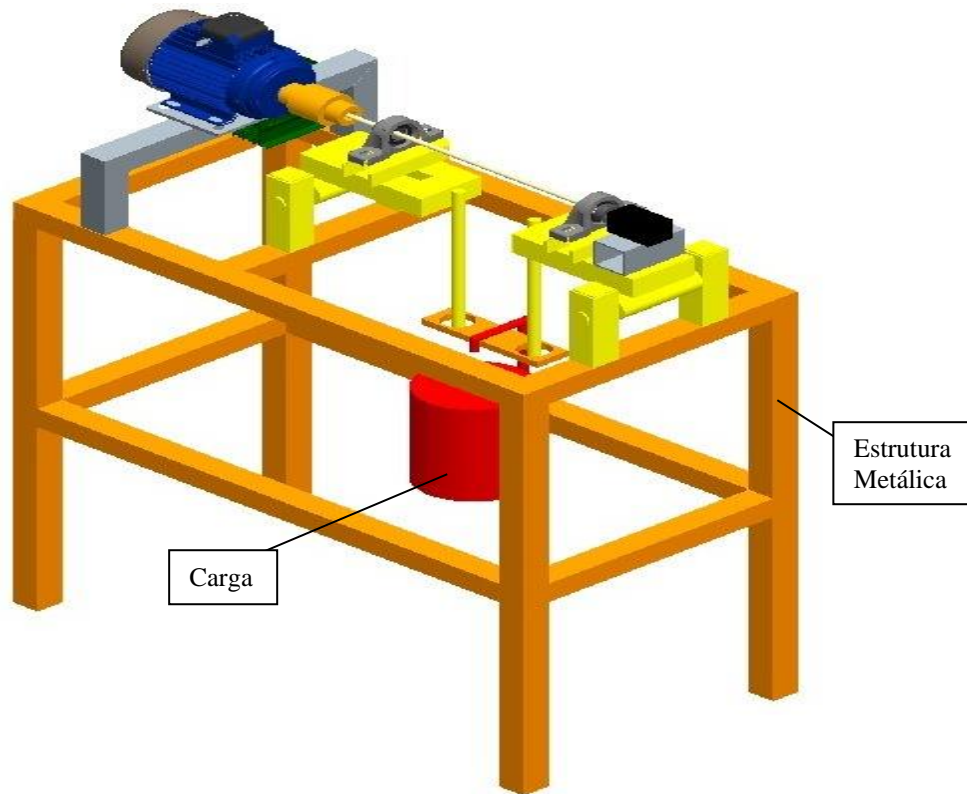
Figura 10- Esquema de controle de frequência



Na Figura 11, pode-se visualizar que a carga aplicada é feita através de um eixo maciço com diâmetro de 150 mm, com massa de 22kg e força 220N. Esta carga é responsável pela simulação dos esforços aplicados sobre os eixos em situações reais. Para a sustentação dos componentes da bancada de ensaio, pode-se

visualizar uma estrutura metálica com tubos metálicos, eixos maciços e tubo mecânico.

Figura 11- Estrutura Metálica



3.2.2 Corpos de Prova

Os eixos utilizados para a bancada de ensaio foram o aço SAE 1020 trefilado, aço SAE 1045 trefilado e, inox AISI 304, considerando diâmetro de 8mm e comprimento aproximado de 80cm, em barra maciça. A escolha destes três distintos materiais para corpo de prova, deu-se em virtude de se obter diversos resultados e conseqüentemente com base nos resultados obtidos, verificar o material com melhor comportamento para a solução do problema.

3.2.3 Rolamentos

Para esta bancada de ensaio foram selecionados rolamentos rígidos de esferas de uma carreira e esta seleção ocorreu em virtude de estes tipos de rolamentos suportarem maiores deflexões dos eixos.

Em virtude da bancada de ensaio de fadiga trabalhar com a maior rotação possível, para assim se analisar a fadiga e a ruptura, os rolamentos escolhidos são os que melhor se adaptarão a esta situação e também se levando em conta um trabalho por um período aproximado de 5000 horas.

3.2.4 Acoplamento Flexível

A finalidade do acoplamento é a função de amortecer as vibrações provenientes do funcionamento do equipamento e, também absorver as deflexões causadas pelas variações do sistema.

Para a realização dos testes nesta bancada de ensaio, foi selecionando o acoplamento elástico de garra Acriflex. Esta seleção ocorreu em virtude de este ser composto por dois cubos simétricos de ferro fundido, possuindo um elemento elástico, feito de borracha sintética de alta resistência a abrasão, que está localizada entre os dois cubos.

A escolha deste material se deu em virtude de o mesmo ser de fácil montagem, sem a necessidade de ferramentas especiais, sem precisar de manutenção preventiva e nem de lubrificação. Este material tem como finalidade absorver choques e vibrações. O material possui um baixo peso gerando assim um momento de inércia baixo.

Para a seleção deste material levou-se em conta o torque máximo que é gerado pelo motor elétrico, também a máxima rotação e principalmente o diâmetro dos eixos selecionados.

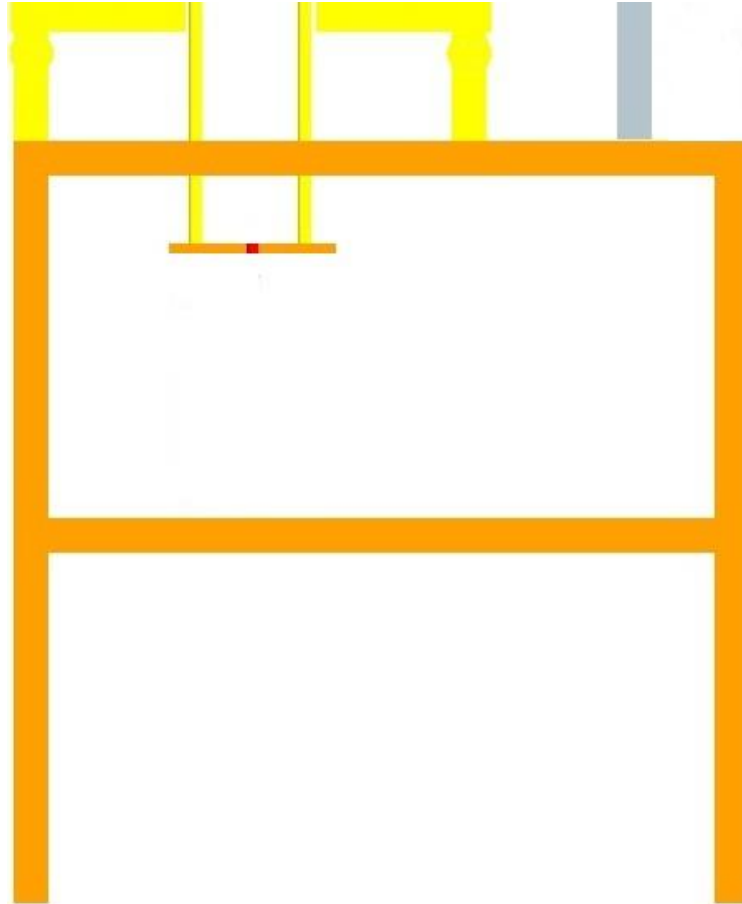
Levando-se em conta o tipo de ensaio a ser realizado, os desalinhamentos permitidos devido às deflexões sofridas que variam conforme o esforço a ser executado.

3.2.5 Estrutura do Equipamento

A estrutura do equipamento tem como função acomodar e também suportar todos os componentes que estão presentes na máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa. Foi construída através de tubos metalon SAE 1020, 40x40x3mm, barras redondas maciças SAE 1020, diâmetro 22.22mm e diâmetro 12.7mm e, tubo mecânico SAE 1020, diâmetros externo 50mm e interno 26mm.

Também tem- se presente na estrutura do equipamento chapa de aço SAE 1020, com espessura de 6.35mm, esta com a função de acomodar o motor elétrico, conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12- Estrutura do componente



4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 AMOSTRAS EIXOS AÇO SAE 1020

As amostras apresentadas nos resultados, são as que foram julgadas válidas para as análises comparativas e posterior resultado.

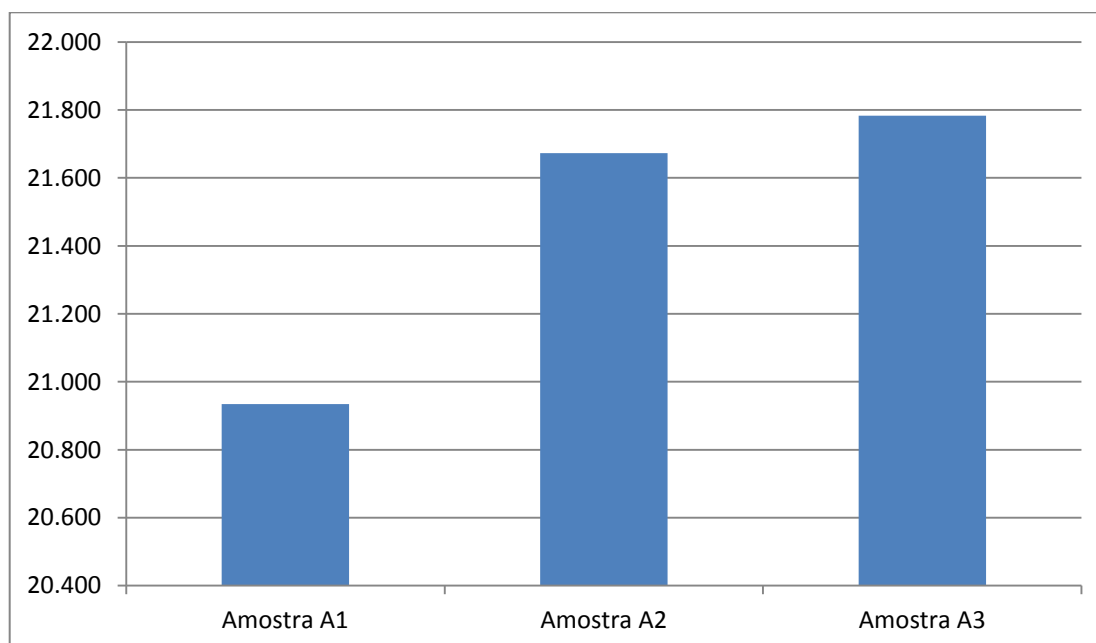
Na Tabela 1 estão demonstrados os valores de ciclos até a fadiga, nos eixos aço SAE 1020, sendo que foi utilizada, para o teste dos corpos de prova uma força de 220N carregada transversalmente no centro de seu comprimento.

Tabela 1- Eixos aço SAE 1020

<i>Amostra</i>	<i>Ciclos até a fadiga</i>
A1	20.934
A2	21.673
A3	21.783

As três amostras apresentaram-se com comportamentos diferentes, a primeira amostra mostrou-se com menos resistência à fadiga que as amostras A2 e A3, a amostra A3 mostrou-se mais resistente, conforme gráfico exposto na Figura 13.

Figura 13- Gráfico dos eixos aço SAE 1020

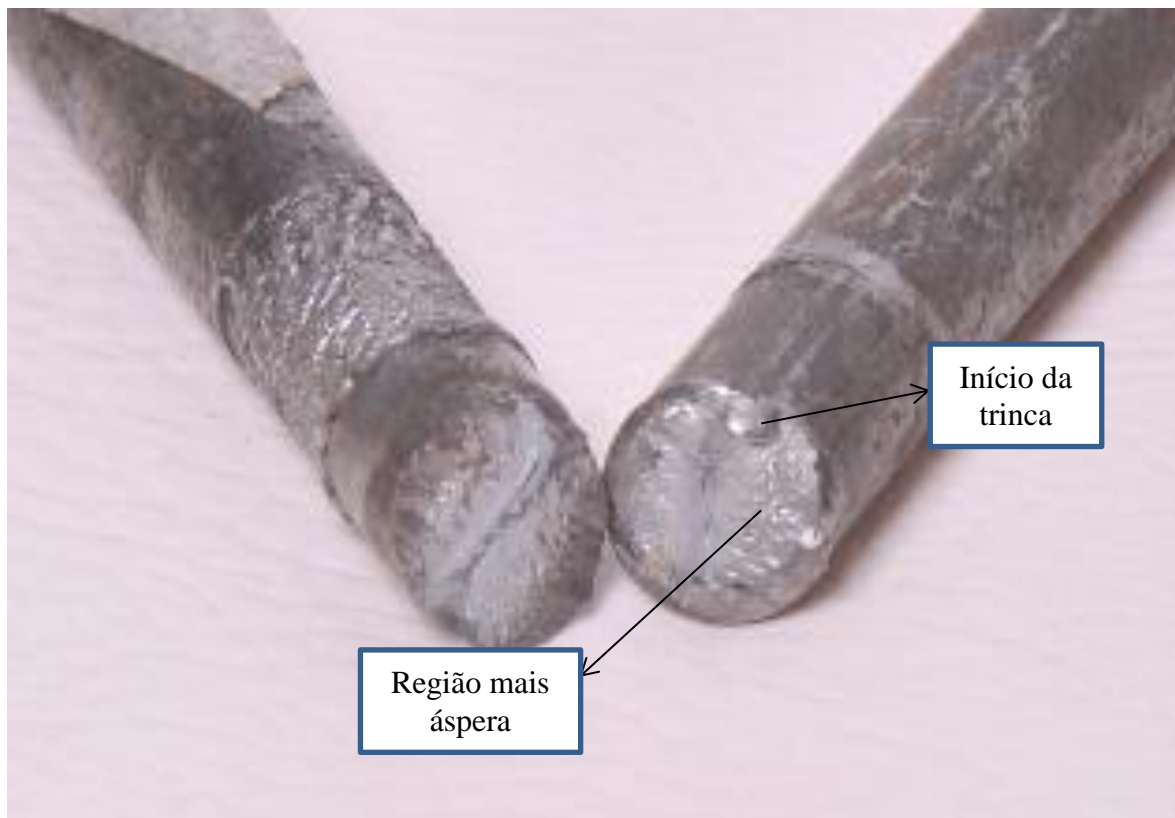


Este comportamento diferenciado nas três amostras de eixos de mesmo material, pode ser devido as propriedades mecânicas dos materiais metálicos, que são compostos por um conjunto de grãos cristalinos, podendo então ocasionar uma diferença na resistência a fadiga, conforme a bibliografia consultada.

Estas impurezas nos materiais são as principais responsáveis pelo início da trinca nos eixos, pois conforme se aumentam os ciclos de tensão, ocorre escoamento local a partir destas falhas, originando então as trincas microscópicas.

Na Figura 14, é possível visualizar a fratura ocorrida no ensaio de fadiga na amostra 1, eixo SAE 1020.

Figura 14- Fratura Amostra 1 Eixo aço SAE 1020



Através da Figura 14, visualiza-se que a fratura ocorreu de forma transversal e, o exame a olho nu nos possibilita perceber o padrão típico da ruptura, onde há uma região de aparência polida, que é o local da microtrinca e por fim uma região de aparência áspera.

Este exame a olho nu também possibilita visualizar o escoamento ocorrido logo então o início da trinca. Nas amostras de eixo aço SAE 1020, foi possível perceber melhor o processo desde o início da trinca até à ruptura.

4.2 AMOSTRAS EIXO AÇO SAE 1045

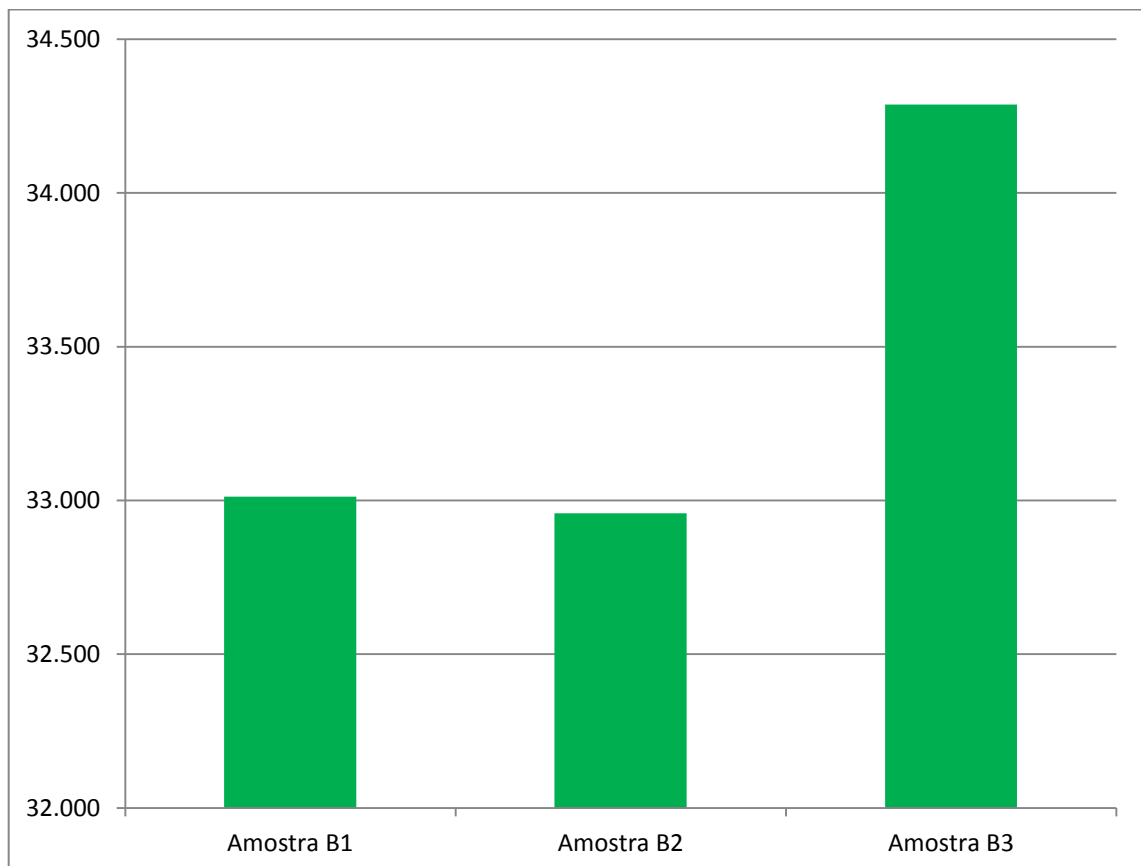
Nas amostras de eixos aço SAE 1045, foi aplicada a mesma força de 220N, transversalmente no centro de seu comprimento, até a fadiga. Os valores obtidos nos ensaios são demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2- Eixos aço SAE 1045

<i>Amostra</i>	<i>Ciclos até a fadiga</i>
B1	33.013
B2	32.958
B3	34.287

As amostras B1 e B2, apresentaram um comportamento semelhante durante os ensaios. O que diferiu dos ensaios realizados nas amostras de eixos aço SAE 1020. O comportamento dos eixos aço SAE 1045 está demonstrado no gráfico da Figura 15.

Figura 15- Gráfico dos eixos aço SAE 1045

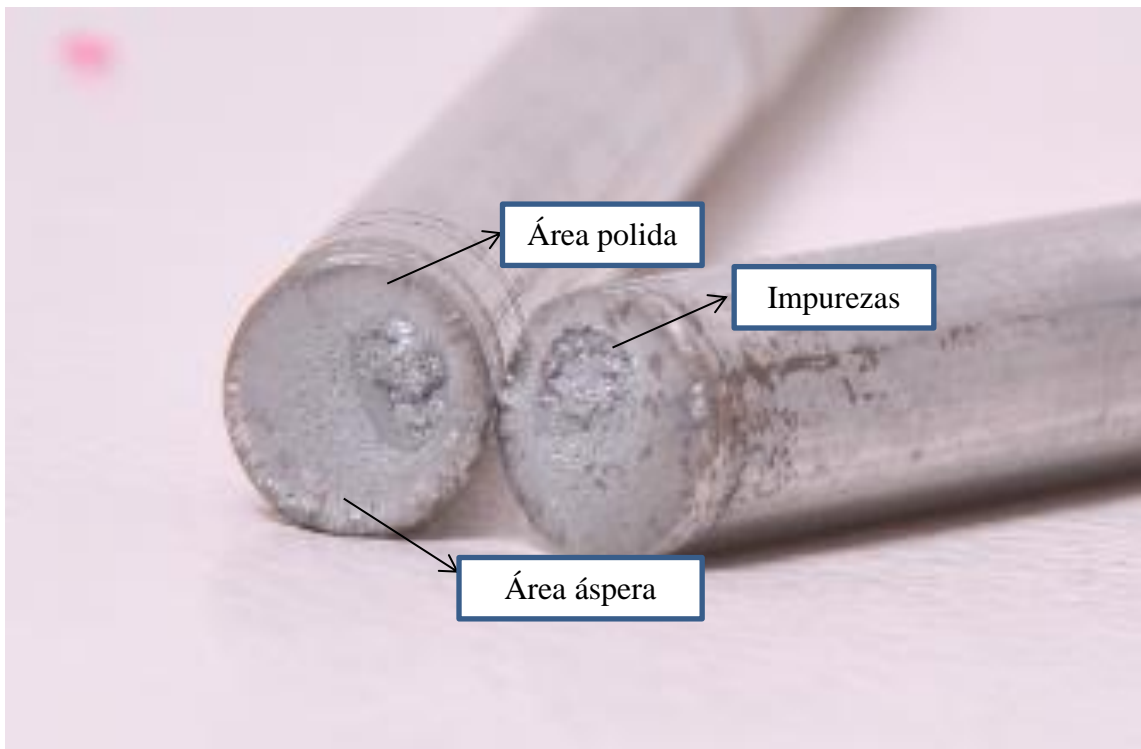


Conforme visualizado no gráfico, os eixos de aço SAE 1045, obtiveram um melhor desempenho durante os testes, em comparação aos eixos aço SAE 1020. Isto ocorre devido ao eixo aço SAE 1045 ter mais carbono na sua composição química, assim obtendo uma maior resistência à fadiga.

A amostra B3 obteve um melhor desempenho frente às amostras B1 e B2, apresentando uma maior resistência à fadiga que as outras duas amostras e, assim desenvolvendo mais ciclos de rotação até que ocorresse a ruptura do eixo.

Na Figura 16, tem-se uma imagem da fratura ocorrida na amostra de número 1, pois na lateral pode-se perceber novamente o comportamento típico da ruptura, onde observa-se uma parte mais polida e após uma parte mais áspera. Através do exame a olho nu é possível visualizar na lateral uma parte escura que demonstra a presença de impurezas no material e, neste ponto então tendo como início a microtrinca.

Figura 16- Imagem da amostra B1 do eixo aço SAE 1045



4.3 AMOSTRAS EIXO AÇO INOXIDÁVEL AISI 304

Para finalizar os testes, foram testadas 3 amostras de eixos inoxidável AISI 304, que também foram testadas até a ocorrência de fadiga, com uma carga

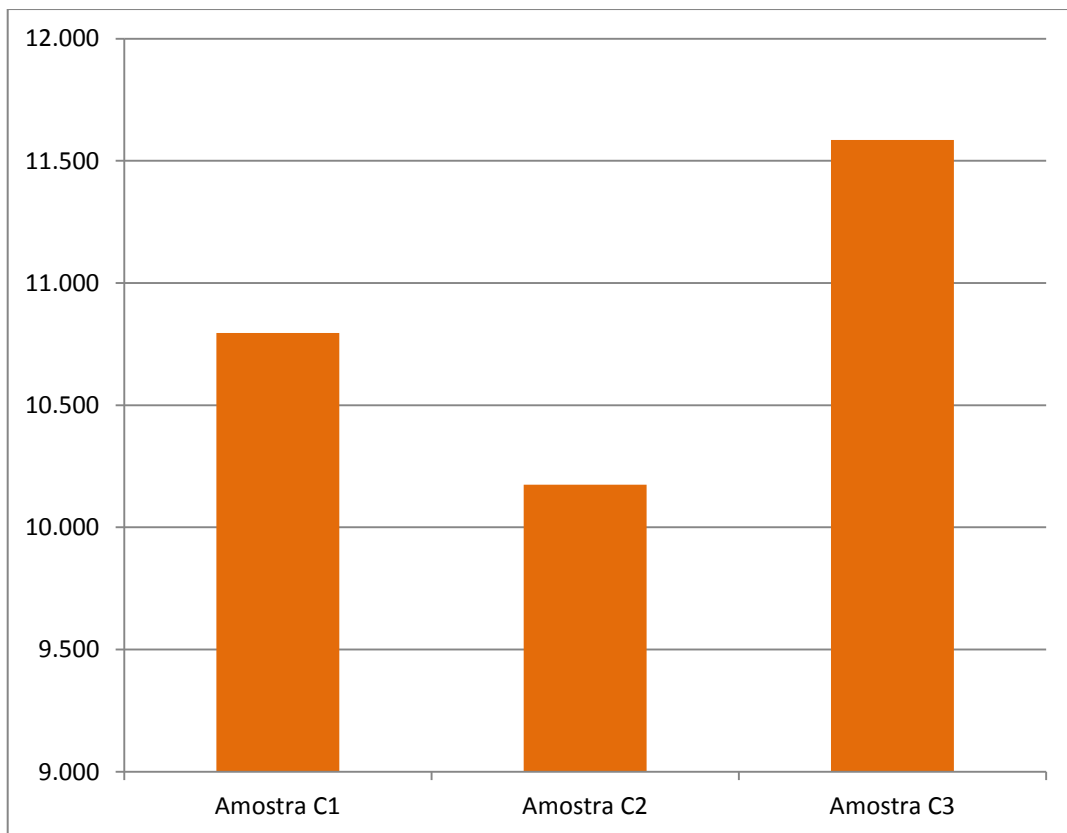
aplicada de 220N, novamente carregada transversalmente no centro de seu comprimento. Os dados destes testes são apresentados na tabela 3.

Tabela 3- Eixos Aço Inoxidável AISI 304

<i>Amostra</i>	<i>Ciclos até a fadiga</i>
C1	10.796
C2	10.175
C3	11.585

Os ensaios realizados nos eixos inoxidável AISI 304 foram os que apresentaram um comportamento bastante diferenciado entre a amostra que mais suportou a fadiga e a que menos suportou, pois a diferença nos ciclos de rotação até a ruptura total entre uma amostra e outra foi de mais de 1400 rotações, conforme é possível visualizar no gráfico da Figura 17.

Figura 17- Gráfico dos eixos aço inoxidável AISI 304

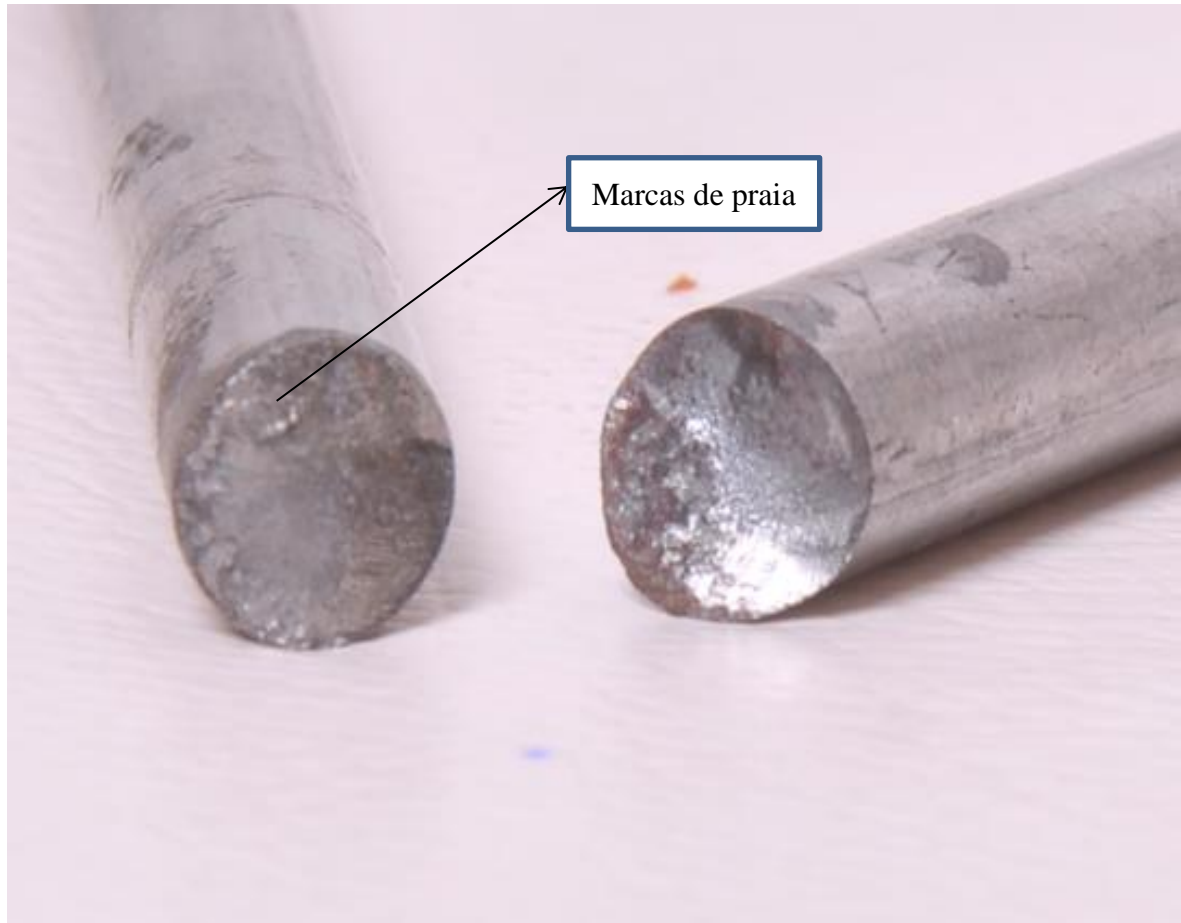


Nos ensaios realizados com os eixos aço inoxidável AISI 304, foi possível perceber na visualização a olho nu da amostra 1, as marcas de praia que circulam a

origem da trinca e que surgiram devido aos ciclos de início e parada do crescimento da trinca. Estas marcas estão situadas mais nas laterais do eixo.

A Figura 18 mostra a fratura ocorrida na amostra 1 do eixo inoxidável AISI 304.

Figura 18- Imagem da Amostra 1 do eixo aço inoxidável AISI 304



4.4 COMPARATIVO ENTRE AS AMOSTRAS

A partir das análises realizadas nas amostras e através dos dados coletados, é possível obter-se alguns resultados acerca dos ensaios realizados. Dentre as observações feitas, foi possível perceber que todos os eixos tiveram um desempenho diferente, mesmo os eixos compostos de mesmo material.

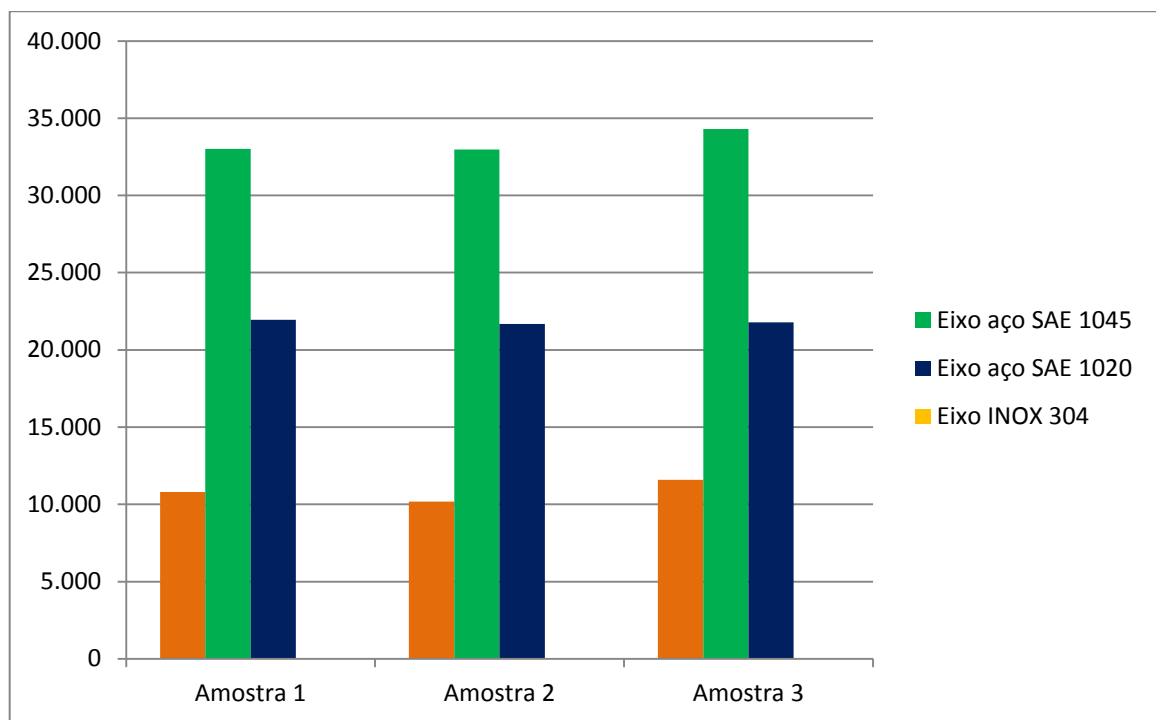
Ao se comparar as três amostras de material é possível perceber que as amostras de eixos em aço ao carbono SAE 1020 e 1045, foram as que obtiveram um melhor desempenho frente às amostras de eixos aço inoxidável AISI 304, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4- Comparativo entre as amostras

Amostra aço SAE 1045	Ciclos	Amostra aço SAE 1020	Ciclos	Amostra aço inoxidável AISI 304	Ciclos
B1	33.013	A1	20.934	C1	10.796
B2	32.958	A2	21.673	C2	10.175
B3	34.287	A3	21.783	C3	11.585

Os corpos de provas de de materiais diferentes apresentaram comportamentos diferentes, conforme à análise comparativa realizada nas amostras. Os resultados obtidos nas três amostras, nos três materiais, estão demonstrados no gráfico da Figura 19.

Figura 19- AMOSTRAS DE MATERIAIS DIFERENTES



Foi possível observar a olho nu, nas amostras, que os materiais mais dúcteis tendem a escoar com mais facilidade e a partir daí formar microtrincas, pois conforme aumenta a tensão estas trincas vão se propagando até então ocorrer a ruptura total. Em algumas das amostras foi possível também visualizar a presença das marcas de praia em volta da região da microtrinca.

Outro fato importante a se observar é que foi possível visualizar nas amostras de eixos testadas, a olho nu, as marcas de aparência mais pólidas, que representam

o local proveniente da micro trinca e após então uma região de aparência mais áspera que representa a propagação da trinca. Na Figura 20, pode-se visualizar a ruptura ocorrida em uma das amostras.

Figura 20- Ruptura em eixo

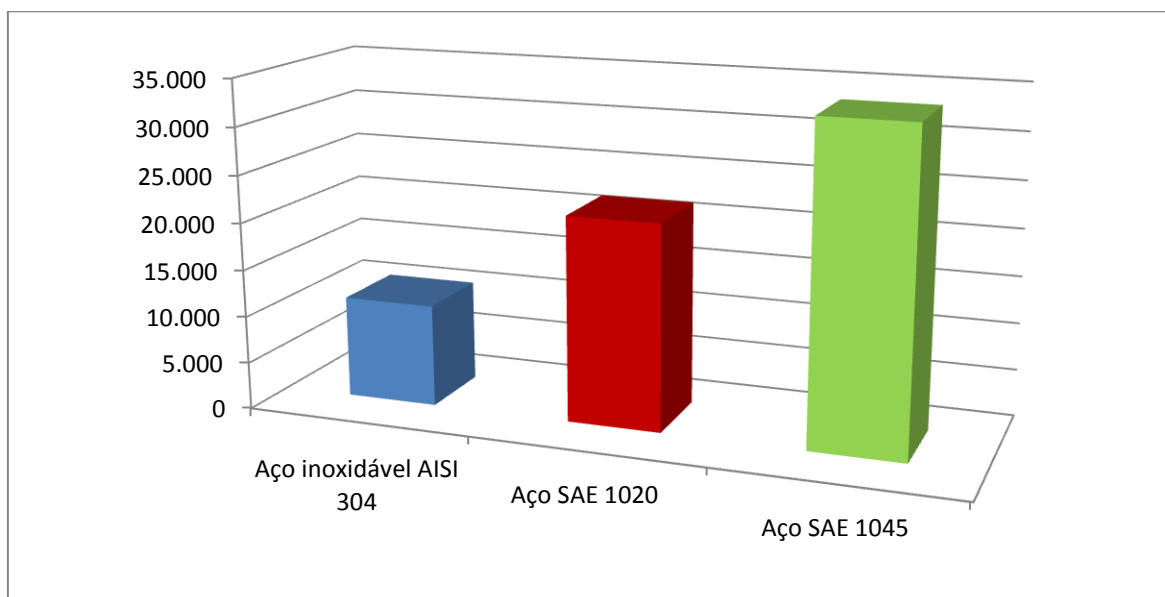


Os testes nos corpos de prova tiveram a finalidade de verificar o desempenho de alguns materiais durante a flexão e, assim poder analisar qual o material mais adequado e resistente à fadiga.

Conforme as observações e testes realizados o corpo de prova que obteve um melhor desempenho foi o eixo aço SAE 1045, amostra B3, e o corpo com menos resistência foi o eixo aço inoxidável 304, amostra C2.

No gráfico da Figura 21 é possível visualizar uma média para cada material.

Figura 21- Gráfico de média para cada material



5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da pesquisa que compõem a revisão bibliográfica, foi possível identificar as condições necessárias para o projeto e posterior desenvolvimento da bancada de ensaio, para então realizar os testes nas amostras de eixos de diferentes materiais.

Quanto ao comportamento dos corpos de prova dos eixos aço SAE 1020, pode-se afirmar que:

- A amostra de eixo A1 apresentou um comportamento diferenciado quanto à resistência e à fadiga em comparação às amostras A2 e A3. A amostra A1 apresentou menor resistência à fadiga, fato que ocasionou uma ruptura em menos ciclos de rotação. A amostra A3 foi a que manifestou maior resistência à fadiga, pois a mesma desenvolveu mais rotações até a ruptura.

No que se refere aos corpos de prova dos eixos aço inoxidáveis AISI 304, pode se afirmar que:

- As amostras deste material foram as que ofereceram menor resistência à fadiga de todas as amostras testadas e, que conseqüentemente desenvolveram o menor número de rotações até a ruptura total do eixo testado. A amostra que ofereceu a menor resistência à fadiga foi à amostra C2.

Quanto ao comportamento dos corpos de prova dos eixos aço SAE 1045, pode se afirmar que:

- As amostras deste material foram as que ofereceram uma maior resistência à fadiga de todas as amostras testadas e, como conseqüência desenvolveram um maior ciclo de rotações até a ocorrência da ruptura total do eixo. De todas as amostras testadas a que ofereceu maior resistência à fadiga foi à amostra B3.

Realizando uma análise geral dos testes realizados, foi possível verificar que a composição do material teve grande influência nos resultados obtidos, pois o material com uma concentração maior de carbono na composição foi o que demonstrou uma maior resistência à fadiga, desenvolvendo um numero maior de ciclos até a ocorrência da fadiga e posterior ruptura.

Quanto às falhas, as três amostras do montante desenvolveram ciclos muito menores que os demais até a ocorrência da ruptura, o que foi

considerado como amostras inválidas em virtude dos ajustes na bancada de ensaio.

No geral, o trabalho realizado atendeu aos objetivos propostos, onde foi possível conceituar ensaio e fadiga e desenvolver uma bancada de testes, foi possível testar as amostras de eixos de materiais diferentes, durante a flexão até a fadiga e ruptura total, possibilitando então fazer um comparativo do comportamento dos eixos de mesmo material e de materiais diferentes e posteriormente a análise dos dados coletados.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se a continuidade dos testes, realizando testes em um maior número de eixos de materiais diferentes. Destaca-se ainda a possibilidade de melhoramento da bancada de testes, no que se refere ao contador de ciclos, para assim inferir uma maior confiabilidade ao teste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABACKERLI, Alvaro J., et al. **Análise da incerteza experimental na determinação da vida usando ensaio acelerado**. Gest. Prod. São Carlos. 2007. 14p. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/gp/v14n1/06.pdf>>. Acesso em: 07 set. 2013.

BEER, Ferdinando P., JOHNSTON, E. Russel Jr.. **Resistência dos Materiais**. 3 ed. São Paulo. 1995. 1255 p.

BRANDÃO, Rodrigo P. **Projeto Mecânico de uma Máquina de Ensaio de Fadiga por Flexão Rotativa**. Monografia (Bacharelado- Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2013. 76p. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007760.pdf>>. Acessado em: 7 de set. 2013.

HIBBELER, E. C.. **Resistência dos Materiais**. Rio de Janeiro. 3 ed. 2000. 701 p.

HIBBELER, E. C.. **Dinâmica- Mecânica para engenharia**. São Paulo. 12 ed. 2012. 591 p.

MARQUES, Fabricio C. S., AREVALOS, Rodrigo M. **Modernização da Máquina de Fadiga por flexão Rotativa do Laboratório de Ensaio de Materiais**. Relatório Conclusão de Curso (Bacharelado- Engenharia Mecânica) Universidade de Brasília. Brasília, 2011. 66 pg. Disponível em: <http://bdm.bce.unb.br/bitstream/10483/3421/1/2011_FabricioMarques_RodrigoArevalos.pdf>. Acessado em: 07 de et. 2013.

MIALHE, Luis Geraldo. **Máquinas Agrícolas: Ensaio & Certificação**. Fundação de Estudos agrários Luiz de Queiroz- CNPQ- PADCT / TIB-FEALQ, 1996. 722 p.

NORTON, Robert L.. **Projeto de Máquinas**. Porto Alegre. 2 ed. 2004. 931 p. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023 (NB 66): Informação e documentação: referências de elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

PINTO, João M. A.. **Modelagem de Testes Acelerados com Esforço Aplicado em Níveis em um Estudo de Fadiga Mecânica**. Tese (Doutorado em Ciências agrárias/ Tecnologia Nuclear- Reatores) IPEN- Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo. 2004. 134 p. Disponível em: <<http://www.ipen.br/biblioteca/teses/23027.pdf>>. Acessado em: 08 set. 2013.

SANTOS, Luciano V. dos, **Análise de Falha por Fadiga em Eixo de Motores para Sistema de Arrefecimento**. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia) Escola Politécnica da Universidade São Paulo. São Paulo. 2008. 122p. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/...10112008.../dissertacao_fadiga_final> Acessado em: 08 set. 2013.

SIMON, Fabiana C. **Teste Acelerado de Durabilidade em Rolamentos**. Trabalho Final de Curso (Bacharelado- Engenharia Mecânica) FAHOR- Faculdade Horizontina. Horizontina. 2012. 57p. Disponível em: <http://www.fahor.com.br/publicacoes/TFC/EngMec/2012/Fabiana_Camila_Simon.pdf> . Acessado em: 07 set. 2013.