



**INSTITUTO FEDERAL**  
Minas Gerais  
Campus Avançado Arcos

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS - *CAMPUS* ARCOS  
ENGENHARIA MECÂNICA

Biatriz Silveira  
Felipe Lopes  
Marcos Gonçalves  
Maria Luiza de Souza  
Mariana Lopes  
Vinícius Fonseca

## **Trabalho Acadêmico Integrador III**

### **Máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa**

Arcos-MG

Dezembro/2017

Biatriz Silveira  
Felipe Lopes  
Marcos Gonçalves  
Maria Luiza de Souza  
Mariana Lopes  
Vinícius Fonseca

## **Trabalho Acadêmico Integrador III**

### **Máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa**

Relatório apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG), referente ao Trabalho Acadêmico Integrador, como requisito parcial para aprovação em todas as disciplinas ministradas no 3º período do Curso de Engenharia Mecânica.

Instituto Federal de Minas Gerais

Campus Arcos

Engenharia Mecânica

Orientador: Me. Márcio Resende Santos

Coorientador: Me. Firmino Geraldo de Oliveira Júnior

Arcos-MG

Dezembro/2017

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,  
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

# AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus pela saúde e inteligência para vencer os desafios, superar os obstáculos e alcançar os louros da vitória.

Também aos Professores pelo apoio e orientações fornecidas durante as circunstâncias mais complexas.

E a nós, os membros do grupo, por todo empenho e comprometimento apresentados durante todo o período.

# RESUMO

Esse trabalho tem como finalidade o desenvolvimento parcial de uma máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa de baixo custo. A partir da observação de que, a fadiga em elementos de máquina representa de 70% à 90% dos custos decorrentes das falhas em elementos de máquinas e da necessidade de se ter uma máquina de ensaio, para estudos mais aprofundados, a cerca das causas e efeitos das falhas de fadiga, verificou-se a necessidade de se construir tal máquina. Para tanto seguiu-se o modelo desenvolvido por R.R. Moore, o mais comumente empregado para a realização de tais ensaios. Os resultados obtidos demonstram que as falhas ocorridas por fadiga são comuns na indústria e que o desenvolvimento de máquinas de ensaio de baixo custo é de grande utilidade para os graduandos em engenharia mecânica. Com isso conclui-se que o planejamento, desenvolvimento e construção de uma máquina de fadiga de flexão rotativa será fundamental para o correto aprendizado das disciplinas de ciência dos materiais, resistência dos materiais entre outras.

**Palavras-chave:** Falha. Fadiga. Máquina de Ensaio. Baixo custo.

# ABSTRACT

This work aims to partial development of a low cost rotation flexion fatigue testing machine. From the observation that fatigue in machine parts represents 70 % to 90 % of costs due to failures in machine parts and the need to have a test machine for further study, of the causes and effects of fatigue failures, it was verified the need to build such a machine. This was followed by the model developed by R. R. Moore, the most commonly used for the accomplishment of such tests. The results show that fatigue failures are common in the industry and that the development of low cost test machines is very useful for undergraduates in mechanical engineering. With this, we conclude that the planning,development and construction of a rotating flexing fatigue machine is key to the correct learning of materials science, materials resistance and other disciplines.

**Key words:** Failure. Fatigue. Testing Machine. Low Cost

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fratura frágil. . . . .	16
Figura 2 – Etapas da fratura dúctil . . . . .	17
Figura 3 – Fratura dúctil . . . . .	17
Figura 4 – Propagação da falha por fadiga . . . . .	19
Figura 5 – Máquina de ensaio de tensão . . . . .	21
Figura 6 – Diagrama esquemático de um equipamento para ensaio de fadiga . . . . .	22
Figura 7 – Exemplo de ciclos . . . . .	25
Figura 8 – Variação da tensão com o tempo . . . . .	25
Figura 9 – Representação do modelo ideal de R R Moore . . . . .	26
Figura 10 – Curva senoidal com variação de cargas . . . . .	26
Figura 11 – Exemplo pratico de gráfico S-N . . . . .	28
Figura 12 – Máquina de fadiga rotativa de R. R. Moore . . . . .	28
Figura 13 – Gráfico log-log da composição de curva $S - N$ . . . . .	29
Figura 14 – Esboço inicial da máquina . . . . .	30
Figura 15 – Vista lateral . . . . .	30
Figura 16 – Cronograma . . . . .	31
Figura 17 – Organograma . . . . .	31
Figura 18 – Custos . . . . .	31
Figura 19 – Suporte . . . . .	32
Figura 20 – Bancada construída . . . . .	32
Figura 21 – Representação do sistema . . . . .	34
Figura 22 – Diagrama de Corpo Livre . . . . .	34
Figura 23 – Diagrama de Corpo Livre . . . . .	35
Figura 24 – Diagrama de Momento fletor . . . . .	37
Figura 25 – Diagrama de Força cortante . . . . .	37
Figura 26 – Corpo de prova . . . . .	38
Figura 27 – Perfil do corpo de prova . . . . .	39
Figura 28 – Tensão em função de $y$ . . . . .	40
Figura 29 – Distribuição da tensão pelo perfil seccionado em A . . . . .	40
Figura 30 – Representação . . . . .	41
Figura 31 – $r$ em função de $x$ . . . . .	43
Figura 32 – $I$ em função de $x$ . . . . .	43
Figura 33 – Tensão em função de $x$ . . . . .	44
Figura 34 – Vista superior do sistema . . . . .	44
Figura 35 – Distribuição de massas sobre a bancada . . . . .	45

Figura 36 – Fragmentação da bancada . . . . .	46
Figura 37 – Distribuição da massa da bancada . . . . .	46



# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	- Alumínio
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
Fe <sub>3</sub> C	- Carbetto de Ferro
C	- Carbono
CAD	- <i>Computer Aided Manufacturing</i>
NaCl	- Cloreto de Sódio
Cu	- Cobre
S	- Enxofre
FAC	- Fadiga de alto ciclo
P	- Fosforo
Mg	- Magnésio
Mn	- Manganês
MFEP	- Mecânica da Fratura Elasto-Plástica
MFLE	- Mecânica da Fratura Linear Elástica
Ni	- Níquel
PIB	- Produto Interno Bruto
Rpm	- Rotações por minuto
Si	- Silício
Ti	- Titânio

# LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma_a =$	Amplitude de tensão
$L =$	Comprimento do corpo de prova
$\bar{X} =$	Coordenada x do centro de massa
$\bar{Y} =$	Coordenada y do centro de massa
$\rho =$	Densidade do material
$D =$	Diâmetro do corpo de prova
$V =$	Força cortante
$\Delta\sigma =$	Intervalo de tensão
$c =$	Maior distancia onde a tensão máxima atua
$M =$	Massa do motor
$P_{M_1} =$	Peso do primeiro mancal
$P_{M_2} =$	Peso do segundo mancal somado com metade do peso da carga aplicada
$P_{M_3} =$	Peso do primeiro mandril
$P_{M_4} =$	Peso do segundo mandril
$P_{M_5} =$	Peso do terceiro mancal somado com metade do peso da carga aplicada
$P_{M_6} =$	Peso do quarto mancal
$k =$	Metade da carga aplicada
$I =$	Momento de inércia de área da seção transversal
$J_o =$	Momento de inércia em relação a origem do sistema
$\tau_f =$	Momento fletor
$P =$	Soma das massas dos elementos compreendidos entre $M_1$ e $M_6$
$r =$	Raio da área da seção transversal circular do corpo de prova
$R =$	Raio da circunferência do corpo de prova

$A =$	Razão das amplitudes
$R =$	Razão das Tensões
$R_{M_1} =$	Reação exercida pela bancada
$R_{M_6} =$	Reação exercida pela bancada
$\sigma_f =$	Tensão de flexão
$\sigma_{m\acute{a}x} =$	Tensão máxima
$\sigma_m =$	Tensão média
$\sigma_{m\acute{i}n} =$	Tensão mínima
$x =$	Variação da distância horizontal
$y =$	Variação da distância vertical
$t =$	Variável vetorial

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	<b>13</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo geral</b>	<b>14</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Estudo das Fraturas</b>	<b>15</b>
2.1.1	Fratura frágil	15
2.1.2	Fratura semi-frágil	16
2.1.3	Dúctil	16
2.1.4	Princípio da Mecânica da Fratura	17
<b>2.2</b>	<b>Fadiga</b>	<b>18</b>
2.2.1	Critérios de medição da falha por fadiga	19
<b>2.3</b>	<b>Ensaio Mecânicos</b>	<b>19</b>
2.3.1	Ensaio destrutivos	20
2.3.2	Máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa	21
<b>2.4</b>	<b>Ligas metálicas</b>	<b>22</b>
2.4.1	Tipos de Aço	23
2.4.2	Influência dos elementos em ligas de aço	23
<b>2.5</b>	<b>Oscilações</b>	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>Métodos e técnicas utilizadas</b>	<b>30</b>
<b>3.2</b>	<b>Materiais e equipamentos</b>	<b>32</b>
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>34</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise Estática</b>	<b>34</b>
4.1.1	Corpo de Prova	37
4.1.2	Centro de Massa	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>48</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>49</b>

<b>APÊNDICES</b>	<b>51</b>
<b>APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DO SUPORTE . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>APÊNDICE B – DESENHO TÉCNICO DA BANCADA . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>APÊNDICE C – LISTA DE PEÇAS . . . . .</b>	<b>54</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O estudo da fadiga por flexão rotativa se originou da observação de que alguns componentes mecânicos apresentavam uma resistência diferente quando expostos à cargas estáticas e quando sujeitos à rotação, falhando em tensões consideravelmente menores e de forma repentina, assim para reduzir a ocorrência de falhas, se fez necessária a realização de ensaios dinâmicos que simulam as condições de operação destes componentes.

Porém, máquinas comerciais que executam tais ensaios tem um custo muito elevado. Neste contexto é proposto a elaboração do projeto de uma máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa, construída com orçamento reduzido para uso acadêmico e em pesquisa.

O presente relatório se propõe a discorrer a cerca dos fundamentos da fadiga, os diferentes tipos de fraturas e a grande variabilidade dos tipos de ensaio. Ainda será versado sobre a análise estática da estrutura que engloba a bancada construída e o corpo de prova que será ensaiado.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Os componentes mecânicos e diversas estruturas estão sob carregamentos dinâmicos constantemente, o que pode provocar em sua estrutura alterações macroscópicas e gerar trincas comprometendo a integridade estrutural levando a estrutura ou componente a ruptura, sendo esse processo conhecido como fadiga. Estudos indicam que, em países medianamente industrializados, os efeitos econômicos advindos das falhas são da ordem de 4% anual do PIB (Produto Interno Bruto), sendo que os custos atribuídos as falhas por fadiga estão em torno de 70% a 90%. (MARQUES FABRÍCIO C. S.; AREVOLOS, 2011)

Um grande número das falhas que ocorrem em componentes mecânicos ou estruturas são devido a cargas que variam ao longo do tempo e não as vindas de esforços estáticos. Geralmente, essas falhas ocorrem em níveis de tensão significativamente inferiores aos valores da resistência ao escoamento dos materiais. (NORTON, 2013)

A falha em materiais é algo indesejável por inúmeras razões, entre elas a possibilidade de perda de vidas humanas ou simplesmente colocando-as em risco, perdas econômicas, paralisação de processos, indisponibilidade de serviços ou produtos e uma série de outras razões. Mesmo que sejam conhecidas as causas das falhas e o comportamento dos materiais a prevenção de falhas é difícil, embora as causas mais comuns sejam a escolha inadequada de materiais ou dos processos, projetos inadequados e mal uso do componente. As falhas inesperadas ocorrem, por essa razão é de responsabilidade dos engenheiros conhecerem a fundo os materiais empregados em seus projetos. (CALLISTER, 2016)

A importância do estudo da falha por fadiga, se dá ao fato de que, ao se conhecer bem seu material e suas propriedades mecânicas o estudante de engenharia mecânica irá projetar estruturas, máquinas ou equipamentos mais seguros. Destes fatos que surge a necessidade de se construir uma máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e construir uma máquina que realize ensaios de fadiga, para entendimento da importância do limite de fadiga dos materiais.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender as propriedades mecânicas dos materiais.
- Estudar a teoria e entender os conceitos sobre fadiga.
- Planejar de atividades, gerir os recursos, organizar os processos.
- Executar a construção da máquina.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A falha em equipamentos de engenharia, por ser uma ocorrência indesejada, traz perdas principalmente materiais e econômicas, tem se tornado um tema de essencial estudo. Compreender a mecânica dos vários tipos de falha, ou seja, fadiga, fluência, fratura é de total importância, pois pode ser empregados para prevenir falhas durante o serviço. (CALLISTER, 2016)

### 2.1 ESTUDO DAS FRATURAS

O estudo da fratura se dá de uma ramificação de diversas áreas, sendo algumas delas: Ciência dos Materiais, Física do Estado Sólido, Mecânica do Meio Contínuo, entre outras. O estudo da fratura, e as novas descobertas, são de relevante importância já que é um grande problema para componentes mecânicos e diversas estruturas. Avanços sobre esse estudo principalmente nas causas e propagação da fratura têm ajudado no controle da diminuição destas falhas catastróficas.

De acordo com Souza (1982), fratura é o modo de separação ou fragmentação de um corpo em duas ou mais partes sob a ação de tensões. Ela ocorre quando o corpo se encontra em estado sólido, que macroscopicamente tem características como volume e forma bem definidos e microscopicamente seus átomos ou moléculas estão relativamente próximos ou rígidos. As fraturas são classificadas de acordo com suas características e nomeadas como fratura frágil, fratura dúctil, fratura semi-frágil.

#### 2.1.1 FRATURA FRÁGIL

Michél (1998) diz que a fratura frágil ocorre sem deformação plástica. Sendo deformação plástica, regime que ocorre mudança permanente nas suas dimensões decorrente do deslocamento de átomos ou moléculas para novas posições no reticulado que ocorre quando excedem os limites de deformação elástica. Ela acontece de maneira catastrófica pelo rompimento das ligações interatômicas, ao longo dos planos cristalográficos específicos no caso de materiais que possuem um padrão de repetição dos seus átomos, ou seja, sólidos cristalinos.

Os sólidos não cristalinos conhecidos como materiais amorfos, como o vidro comercial alcalino e materiais com estruturas semelhantes à do diamante, silicato, alumina, mica, carbetos e nitretos, apresentam deformação plástica insignificantes, concluindo, um material frágil possui seus átomos e moléculas praticamente imóveis até o momento da fratura.



A ação de um corpo ao fraturar-se de maneira frágil é maior com o aumento da taxa de deformação ou a ocorrência da deformação em baixas temperaturas como na fratura de aços em baixa temperatura por exemplo. Esta baixa temperatura está relacionada à temperatura de transição que é aquela em que ocorre a mudança no caráter da ruptura do material, neste caso passando de dúctil a frágil Mikowshi (2003). A Figura 1 apresenta os aspectos da fratura frágil.

Figura 1 – Fratura frágil.



Fonte: (CALLISTER, 2016)

### 2.1.2 FRATURA SEMI-FRÁGIL

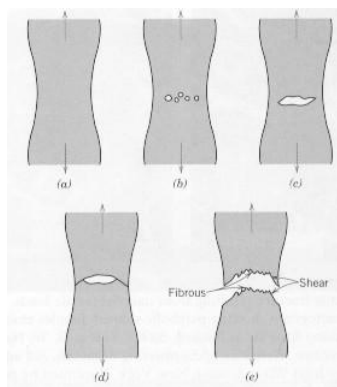
Esse tipo de fratura ocorre tanto pelo rompimento de ligações interatômicas como pela mobilidade de discordâncias. Sendo mobilidade de discordâncias imperfeições em uma estrutura cristalina na qual uma linha de átomos se difere das outras, porém a quantidade de planos de deslizamento é limitada. Há uma tendência para que ocasione uma pequena flexibilidade inicial e a fratura ocorra em planos cristalográficos bem definidos. Este é o caso de materiais, formado por íons negativos e positivos, quando isso ocorre se trata de um material conhecido como cristal iônico, metais como (titânio, magnésio, zinco e zircônio), possuem arranjo de seis átomos associados a uma célula unitária chamado empacotamento hexagonal. Descrita pelas obras dos escritores Meyers e Chawla (1982) e Serbena (1995)

### 2.1.3 DÚCTIL

Acontece quando o material se deforma plasticamente. Devido à grande facilidade da ocorrência de deformação plástica não existe nenhuma restrição ao movimento das discordâncias e assim elas podem mover-se em um número elevado de sistemas de deslizamentos combinado, ocorre com a intersecção de diversos planos cristalográficos. Este é o caso de metais cúbicos de face centrada, que são materiais com arranjo de quatro átomos associados a uma célula unitária sendo alguns desses metais níquel, alumínio, ouro, cobre, prata e platina.

A figura 2 mostra em etapas como um metal se rompe em uma fratura dúctil. A fratura tipo cone acontecem conforme os seguintes estágios: (a) empescoçamento; (b) criação de microtrincas; (c) coalescimento das cavidades; (d) propagação da trinca; (e) fratura final com ângulo de 45°. A figura 3 apresenta uma deformação dúctil.

Figura 2 – Etapas da fratura dúctil



Fonte: (CALLISTER, 2016)

Figura 3 – Fratura dúctil



Fonte: (CALLISTER, 2016)

#### 2.1.4 PRINCÍPIO DA MECÂNICA DA FRATURA

Princípio da mecânica da fratura consiste em quantificar as relações entre as propriedades dos materiais, os níveis de tensões, a presença de defeitos geradores de trincas e os mecanismos de propagação de trinca.

As primeiras descobertas sobre a mecânica da fratura aconteceram durante a primeira guerra mundial, mais precisamente no ano de 1918, quando Alan Arnold Griffith desenvolveu um modelo de relação entre a resistência e o tamanho de uma falha em um vidro, porém essa primeira formulação precisaria ser melhorada já que era válida apenas para materiais cerâmicos ou materiais frágeis.

Tal aperfeiçoamento aconteceu graças ao cientista George Rankine Irwin, que durante a segunda guerra mundial desenvolveu uma formulação que relacionava todos os outros tipos de materiais.

A tenacidade à fratura é uma propriedade que mede a resistência de um material à fratura frágil, considerada uma especificidade do material e por isso é independente das suas características físicas. A medição confiável da tenacidade por meio dos princípios da mecânica da fratura se torna um pré requisito para componentes de um projeto (FORTES, 2003) (CALLISTER, 2016).

A mecânica da fratura observa que um corpo que possui uma trinca tem sua resistência comprometida. Quando a trinca começa a se propagar pelo componente essa resistência é reduzida proporcionalmente. Controlar os efeitos dessa trinca no corpo, ou seja, controlar a fratura é garantir que essa resistência fique dentro de padrões pré determinados.

Strohaecker (2007), diz que a mecânica da fratura fornece tanto conceitos como equações para determinar informações sobre a propagação e os efeitos das trincas.

Mesmo a mecânica da fratura sendo um estudo detalhado ela pode ser aplicada em casos bem simples como um martelo, em que deve ser escolhido um aço com tenacidade apropriada, até situações de alta complexidade tecnológica como um navio.

## 2.2 FADIGA

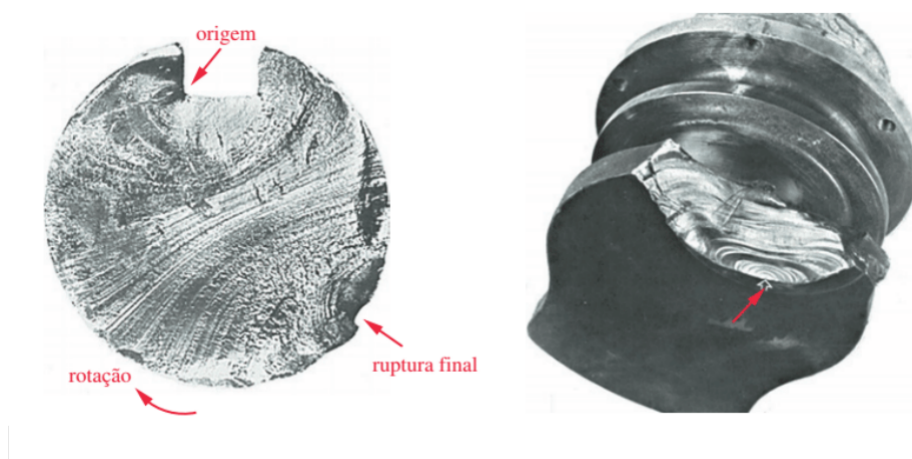
Fadiga é um termo normalmente empregado para definir cansaço físico ou mental em humanos, embora no vocabulário da engenharia o termo seja utilizado para nominar falhas ocorridas sob tensões cíclicas. O termo fadiga foi empregado pela primeira vez por Poncelet em 1839, ele afirmava que o material fadigava, ficava cansado, e rompia. (MARQUES FABRÍCIO C. S.; AREVOLOS, 2011) (NORTON, 2013)

A ASTM define fadiga como sendo o processo de alteração permanente, progressivo e localizado que ocorre num material sujeito a tensões e deformações em um determinado ponto ou em vários que pode ocasionar trincas e posteriormente em fratura completa do componente após determinado número de ciclos de solicitações de esforços.

Os metais quando submetidos a tensões dinâmicas, variáveis e repetitivas rompem-se sob um nível de tensão consideravelmente inferior ao limite de resistência à tração ou ao limite de escoamento para carga estática, essa falha ocorre após determinado tempo de serviço do componente mecânico. A falha por fadiga representa a maior causadora de falhas em metais, cerca de 90%. Os polímeros e cerâmicos, com exceção do vidro, também são suscetíveis a esse tipo de falha. (MARQUES FABRÍCIO C. S.; AREVOLOS, 2011) (CALLISTER, 2016)

As falhas por fadiga, normalmente, se iniciam na superfície das peças nos pontos onde há concentração de tensões. Iniciando com o surgimento de uma fissura não detectável a olho nu, ou em testes não destrutivos, como raio-X ou partículas magnéticas. Tendo surgido a fissura, a concentração de tensões torna-se maior e a fissura progride com mais rapidez. A área tensionada diminui de tamanho a medida que a fissura aumenta levando a um crescimento da intensidade da tensão até, subitamente, a peça romper. Assim a falha por fadiga se caracteriza em duas áreas diferentes de fratura, uma que é a propagação da fissura, marcas de praia, e a segunda a fratura súbita que se assemelha muito a uma fratura de um material frágil como pode ser visto na figura 4. (SANTOS, ) (NORTON, 2013)

Figura 4 – Propagação da falha por fadiga



Fonte: (NORTON, 2013)

Enquanto as falhas estáticas são de fácil visualização e dão sinais iminentes de falha, uma vez que a tensão ultrapasse o limite de escoamento do material, sendo possível a substituição do material antes que ocorra a falha. Já as falhas por fadiga, não dão aviso, ocorrem de forma súbita ocasionando a perda total da peça, portanto são muitíssimo perigosas. (SANTOS, )

### 2.2.1 CRITÉRIOS DE MEDIÇÃO DA FALHA POR FADIGA

Ao longo dos anos foram desenvolvidas diversas técnicas de ensaios experimentais que tem como propósito realizar medição do comportamento dos materiais com relação a tensões e deformações que variam ao longo do tempo, Wöhler submeteu um eixo giratório em balanço a um carregamento de flexão para obter variações de tensão ao longo do tempo. R. R. Moore adaptou a técnica de Wöhler para um eixo bi-apoiado causando uma flexão pura alternada (sem cisalhamento) por meio de pesos. A maior parte das informações disponíveis sobre resistência a fadiga são obtidas através dos ensaios em eixos giratórios sujeitos a tensões alternadas, com isso há pouca informação vinda de ensaios de força normal e força de torção. Por simplificação deste trabalho será feito apenas uma análise dos ensaios de tensões alternadas ou flexão rotativa, ficando para trabalhos futuros a análise dos demais ensaios. (NORTON, 2013) (CALLISTER, 2016)

## 2.3 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos dos materiais são métodos padronizados estabelecidos através de normas técnicas, amplamente utilizadas na análise de falhas ou para determinar as propriedades mecânicas do material ensaiado. Realizar um ensaio consiste em submeter

um material que será processado industrialmente à situações que simulam os esforços tais quais sofrerão em condições reais de uso.

Para que o resultado tenha maior confiabilidade, o ideal seria realizar o ensaio na própria peça, porém por motivos técnicos e econômicos o ensaio é realizado em apenas uma amostra do material com dimensões e formas determinadas, através de normas técnicas, tal amostra que recebe o nome de corpo de prova, ou protótipo que é uma versão preliminar do produto utilizado durante a fase de testes. (CALLISTER, 2016)

Há dois tipos de ensaios, os não destrutivos e os destrutivos. Os não destrutivos são aqueles que após sua realização não deixam nenhuma marca ou sinal, não inutilizando a peça ou corpo de prova. Por essa razão, podem ser usados para detectar falhas em produtos acabados e semiacabados. E os tipos mais usados são inspeção visual, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, ultrassom, radiografia, emissão acústicas e correntes parasitas.

### 2.3.1 ENSAIO DESTRUTIVOS

Os ensaios destrutivos, são aqueles que deixam algum sinal na peça ou corpo de prova submetido ao ensaio, mesmo que estes não fiquem inutilizados. É neste tipo de ensaio que se verifica se os materiais possuem as propriedades requeridas. Os ensaios mais utilizados são os de tração, ductilidade e fragilidade, flexão, torção, resistência ao impacto, tenacidade à fratura e resistência à fadiga. (CALLISTER, 2016)

O ensaio de tração consiste em aplicar uma força axial no material, alongando-o até sua ruptura, permitindo conhecer como os materiais reagem ao esforço de tração, quais os limites de tração que suportam e a partir de que momento se rompe. Os corpos de prova neste ensaio são em formatos retangulares ou circulares, e são fixados pelas extremidades nas garras de fixação da máquina como visto na figura 5. Sendo assim, submete-se o corpo de prova a um esforço, aplicando uma carga e registrando cada valor de força que corresponde a um tipo de alongamento do material, tal alongamento medido por um sensor capaz de medir as deformações do material, chamado de extensômetro.

Figura 5 – Máquina de ensaio de tensão



Fonte: EMIC

No ensaio de compressão, o material deve ter boa resistência à compressão, assegurando boa precisão dimensional quando solicitado por esforços de compressão e não se deformar facilmente. É o mais indicado para materiais frágeis, recomendado para produtos acabados e o menos indicado para metais. Bem parecido com o ensaio de tração, este ensaio recebe uma força axial para dentro que tende a encurtar o corpo de prova. Estes corpos de prova também sofrem deformação elástica seguido da deformação plástica.

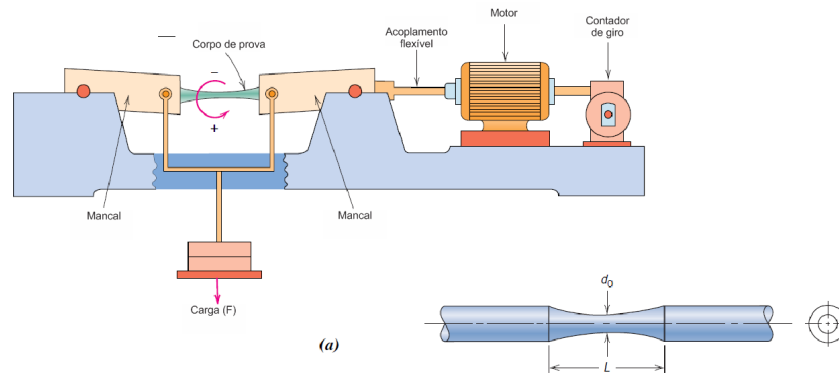
O ensaio de cisalhamento, diferente dos ensaios de tração e compressão, a força é aplicada na direção perpendicular ao eixo longitudinal do corpo de prova, resultando numa força cortante sobre a seção transversal. O material desenvolve em cada um dos pontos da seção transversal uma reação denominada resistência ao cisalhamento, que confere uma resposta ao esforço cortante.

O ensaio por flexão é realizado tanto em materiais frágeis quanto em resistentes, como em ferros, aços e em materiais que o principal esforço obtido é o de flexão. Ele resulta em giros em torno de um eixo, em uma rotação específica e constante.

### 2.3.2 MÁQUINA DE ENSAIO DE FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA

Os equipamentos que realizam esse tipo de ensaio são baseados no modelo de R.R. Moore de 1919, conforme visto na figura 6, onde o corpo de prova é carregado como uma viga em flexão sujeito a forças cíclicas de magnitude determinada, lembrando que o momento fletor causa tração de um lado da viga e compressão do outro, enquanto a rotação faz com que um ponto qualquer da superfície do corpo de prova passe de compressão para tração a cada ciclo e esses ciclos são contados até o rompimento do corpo de prova. (BUDYNAS; NISBETT, 2011) (NORTON, 2013)

Figura 6 – Diagrama esquemático de um equipamento para ensaio de fadiga



Fonte:(CALLISTER, 2016)

O funcionamento desse tipo de máquina é simples, tendo um motor elétrico conectado a um eixo de transmissão através de um acoplamento flexível que se liga a um mandril, que prende o corpo de prova em um segundo mandril.

O ensaio de fadiga requer um alto número de corpos de prova de mesmo material ensaiados, em níveis de tensão  $S$  diferentes e anotado o número de ciclos em que o corpo de prova se rompe sendo, que número de ciclos  $N$  varia de acordo com o nível de tensão  $S$ .

## 2.4 LIGAS METÁLICAS

Ligas metálicas são materiais que possuem propriedades metálicas, compostos por dois ou mais elementos, sendo o maior constituinte deles, um metal. As ligas são desenvolvidas para modificar, combinar ou acrescentar as propriedades mecânicas dos elementos que formam a liga. (CALLISTER, 2016)

Nos metais, as soluções sólidas são formadas devido a ligação metálica interatômica primária, onde os elétrons de valência são compartilhados mutuamente por todos os átomos presentes no sólido metálico formando assim a "nuvem de elétrons". O tamanho e a estrutura dos átomos dos elementos de liga devem ser parecidos e terem as propriedades eletroquímicas parecidas. Os átomos de carbono, por serem relativamente pequenos, dissolvem-se intersticialmente, ou seja, ocupando espaços vazios entre os átomos do ferro. Por isso, a liga metálica mais comum e utilizada é o aço-carbono. No aço, o carbono se junta ao ferro e forma o composto chamado carbeto de ferro ou cementita ( $Fe_3C$ ), uma substância muito dura. (CALLISTER, 2016)

Ligas ferrosas são aquelas que têm o ferro como constituinte principal, devido ao fato de que os compostos, contendo ferro, existem em maior abundância na crosta terrestre e por serem extremamente versáteis, ou seja, podem ser fabricadas com uma ampla variedade de propriedades físicas, mecânicas e por serem produzidos de forma

econômica. Como características físicas as ligas ferrosas tem massa específica relativamente alta, condutividade elétrica comparativamente baixa e apresenta alta susceptibilidade à corrosão em ambientes comuns. (CALLISTER, 2016)

Ligas não ferrosas não apresenta o ferro como constituinte principal, em geral mais caras que as ligas ferrosas são usadas para aplicações específicas, como por exemplo, que exijam alta resistência à corrosão ( $Cu, Ni$ ), alta condutividade ( $Cu, Al$ ), baixa densidade ( $Al, Mg, Ti$ ), resistência à altas temperaturas ( $Ni$ ). Este tipo de liga é caracterizado por uma baixa densidade, e alta condutividade térmica e elétrica além de uma maior resistência à corrosão do que as ligas metálicas ferrosas. (CALLISTER, 2016).

### 2.4.1 TIPOS DE AÇO

Os aços são ligas de ferro-carbono e podem conter concentrações de outros elementos de liga, as propriedades mecânicas são sensíveis ao teor de carbono sendo assim classificados de acordo com a concentração de carbono. As ligas de ferro-carbono são constituídas basicamente  $Fe$  e  $C$ , porém apresentam resíduos de impureza como manganês e/ou enxofre. Na composição dos aços podem ser adicionados outros elementos de liga. (CALLISTER, 2016).

As ligas de aço podem ser divididas de acordo com a concentração de carbono presente em sua composição ou de acordo com a presença ou não de elementos de liga.

Aços com baixo teor de carbono apresentam menos de  $0,25\%pC$  e possuem grande ductilidade, ou seja, apresentam boa soldagem e são indicados para trabalhos mecânicos como a construção de pontes, edifícios, navios, caldeiras e peças de grandes dimensões. São aços que não admitem têmpera, são produzidos em maior quantidade e apresentam baixa dureza, baixa resistência, alta tenacidade e tem uma produção barata.

Aços com médio teor de carbono tem concentração aproximadamente entre  $0,25 - 0,60\%pC$  e são aços utilizados em engrenagens, bielas, cilindros e outras peças mecânicas. Apresenta baixa temperabilidade, podem ser termicamente tratados.

Aços com alto teor de carbono apresentam concentração maior que  $0,6\%pC$  são aços de elevada dureza e resistência após à têmpera porém menos dúcteis entre os aços-carbono, são especialmente resistentes ao desgaste e são comumente utilizados em molas, componentes agrícolas sujeitos ao desgaste, ferramentas, pinos, entre outros acessórios de máquinas.

### 2.4.2 INFLUÊNCIA DOS ELEMENTOS EM LIGAS DE AÇO

É através da adição de elementos de ligas que podemos obter melhorias de algumas propriedades como diminuição ou aumento do ponto de fusão, aumento da dureza, aumento



da resistência mecânica. Características desejadas de acordo com o uso ou das condições a qual o material será exposto. (CALLISTER, 2016)

Manganês ( $Mn$ ): É um elemento que auxilia na desoxidação do metal líquido e para neutralizar o efeito nocivo do enxofre. O aumento do seu teor melhora a resistência mecânica.

Silício ( $Si$ ): É acrescentado no metal líquido e favorece a resistência mecânica e a resistência à corrosão, porém reduz a sua soldabilidade.

Enxofre ( $S$ ): É extremamente prejudicial ao aço pois é difícil de ser eliminado, prejudicando a ductilidade, reduzindo a soldabilidade e a tenacidade.

Fósforo ( $P$ ): Aumenta o limite de resistência, favorece a corrosão e dureza, prejudica a ductilidade e sua soldabilidade. Quando ultrapassam certos valores o fósforo torna o aço quebradiço.

Cobre ( $Cu$ ): Aumenta a resistência atmosférica dos aços.

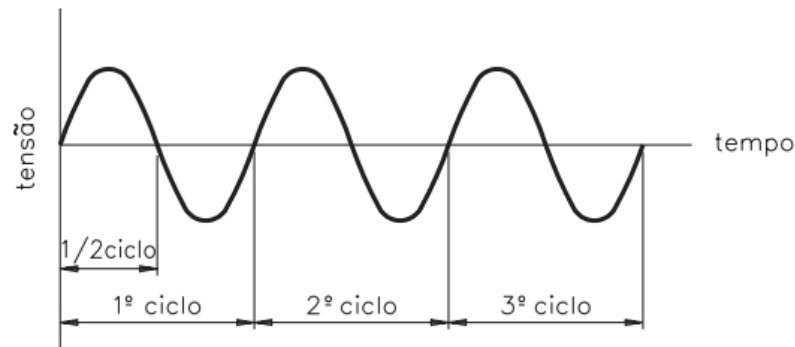
Níquel ( $Ni$ ): Aumenta a resistência mecânica, a tenacidade e a resistência à corrosão, porém reduz a sua soldabilidade. A adição desse elemento permite aumentar o limite de escoamento e a resistência da liga.

Titânio ( $Ti$ ): Aumenta o limite de resistência, abrasão e melhora o seu desempenho em temperaturas elevadas.

## 2.5 OSCILAÇÕES

Oscilações são movimentos que se repete ao longo do tempo, de forma regular ou não, sendo medidas através da quantidade de ciclos realizados. O intuito de um ensaio de fadiga por tensões cíclicas, é conhecer o limite de resistência à fadiga do material ensaiado, através de oscilações repetidas. A tensão cíclica aplicada é definida por uma função senoidal, no eixo das ordenadas, são marcados os valores de tensão aplicada e no eixo das abscissas estão a quantidade de ciclos. Um ciclo de tensão corresponde a um conjunto de valores de tensão aplicada que se repetem com o tempo como visto a figura 7.

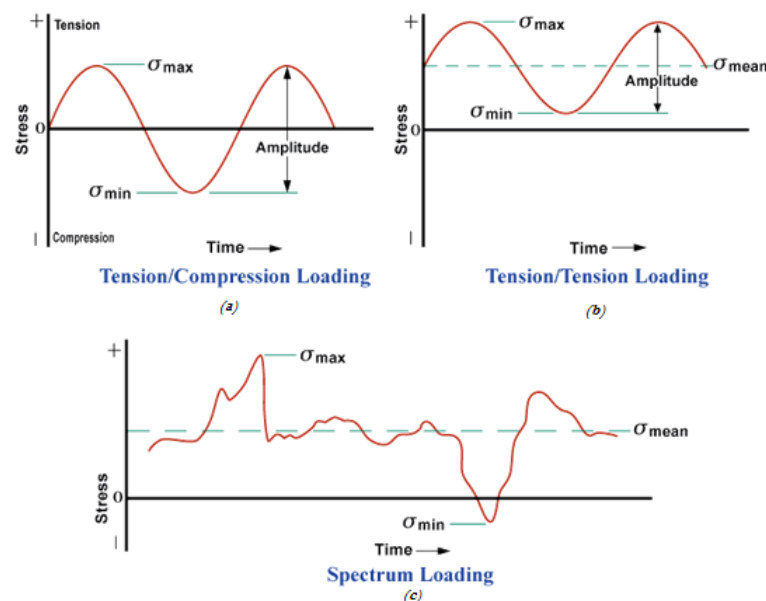
Figura 7 – Exemplo de ciclos



Fonte: (FUNDAÇÃO ROBERTO MARINHO, )

Na figura 8 se vê alguns carregamentos que podem iniciar uma fissura por fadiga. Na figura 8.a se vê um carregamento senoidal onde os esforços de tração e compressão são aplicados no componente. Para esse tipo de carregamento as tensões máxima e mínima são iguais, onde o estresse de tração é considerado positivo e a compressão é negativa. A figura 8.b demonstra um carregamento senoidal com tensões mínima e máxima, porém ambas com tração. A figura 8.c mostra o carregamento de amplitude variável que pode ocorrer em uma ponte, asa de avião ou qualquer outro componente que tenha mudança nos padrões de carregamento, embora, apenas os ciclos que ultrapassem algum limiar de pico contribua para o desenvolvimento de fissuras por fadiga.

Figura 8 – Variação da tensão com o tempo

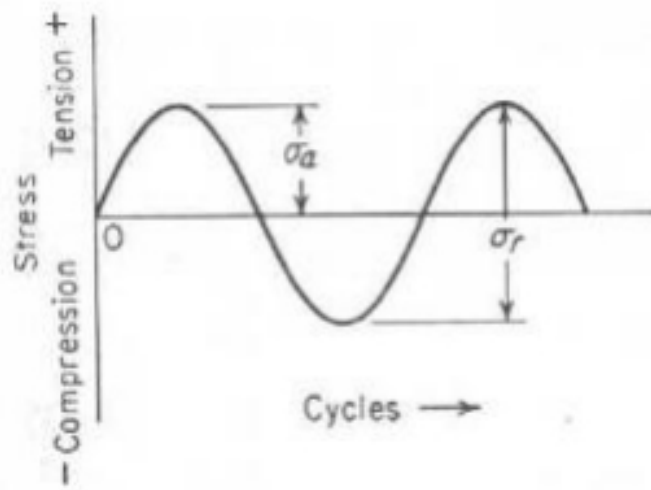


Fonte: (NDT, 2009)

A figura 9 representa o modelo de ensaio de fadiga idealizado por R. R. Moore,

em que o eixo de operação da máquina de fadiga opera com reversão de cargas, com isso as tensões máximas e mínimas apresentam valores onde a tração é um valor positivo e a compressão negativo.

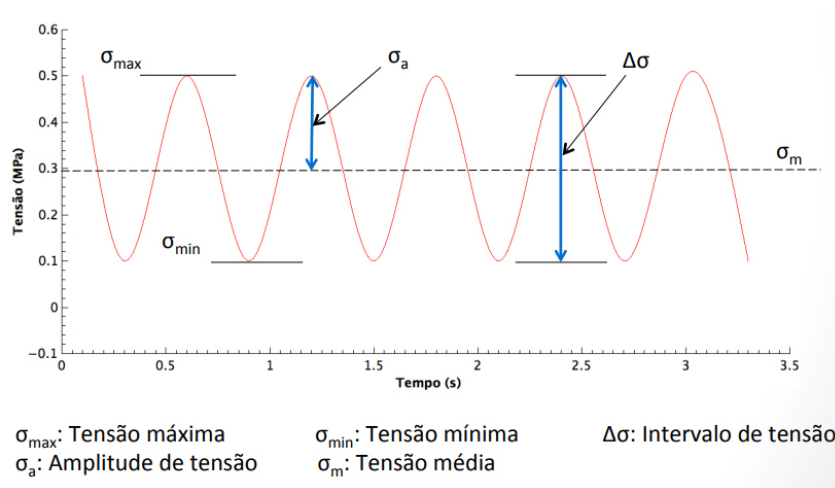
Figura 9 – Representação do modelo ideal de R R Moore



Fonte: (DIETER, 1961, p. 298)

A figura 10, por sua vez, apresenta um modelo de gráfico em que as cargas aplicadas são variáveis, podendo aumentar ou diminuir com o tempo, dessa forma alteram a amplitude da função senoidal.

Figura 10 – Curva senoidal com variação de cargas



Fonte: (RUCHERT, 2014)

Existem algumas formulas para calcular os parâmetros relacionados aos ciclos de fadiga. Para determinar a amplitude da tensão:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \tag{2.1}$$

Para a tensão média:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.2)$$

Para o intervalo de tensão:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (2.3)$$

A razão das amplitudes e a razão das tensões são dadas respectivamente por:

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (2.4)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.5)$$

Para os carregamentos completamente reversos, como os propostos por R. R. Moore, alguns parâmetros apresentam resultados característicos, a tensão média  $\sigma_m = 0$ , a razão das tensões  $R = -1$  e a razão das amplitudes  $A = \infty$ .

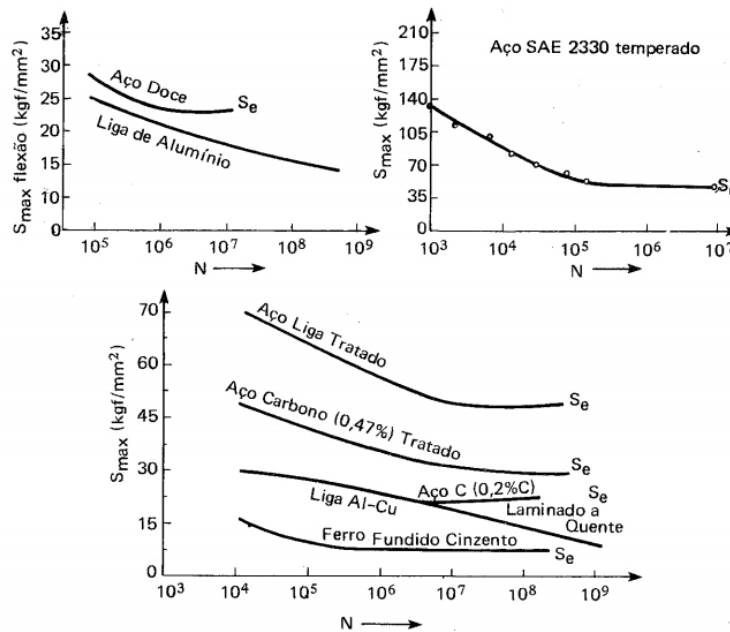
Em carregamentos que são majoritariamente de tração, a razão das tensões  $R = 0$  e a razão das amplitudes  $A = 1$ . E para carregamentos de compressão,  $R = \infty$  e  $A = 1$  (RUCHERT, 2014).

A curva S-N, ou curva de Wöhler, é um gráfico que relaciona a tensão a qual a peça está submetida durante o ensaio de fadiga, e o número de ciclos suportados até o momento da ruptura.

Com variação de tensões  $\sigma$ , a quantidade de ciclos que um corpo de prova suporta até romper é alterada. Para cada corpo de prova ensaiado, a relação entre a tensão e o número de ciclos suportados até o rompimento, um ponto é gerado no diagrama  $\sigma \times \text{ciclos}$ , a curva S-N é traçada ao se aproximar esses pontos.

Pela figura 11, é possível observar que quanto menor a tensão aplicada mais ciclos o material ensaiado pode suportar. Limite de fadiga do material é a tensão máxima que a peça pode sofrer e não se romper em um número infinito de ciclos, também conhecido como vida infinita da fadiga da peça.

Figura 11 – Exemplo pratico de gráfico S-N

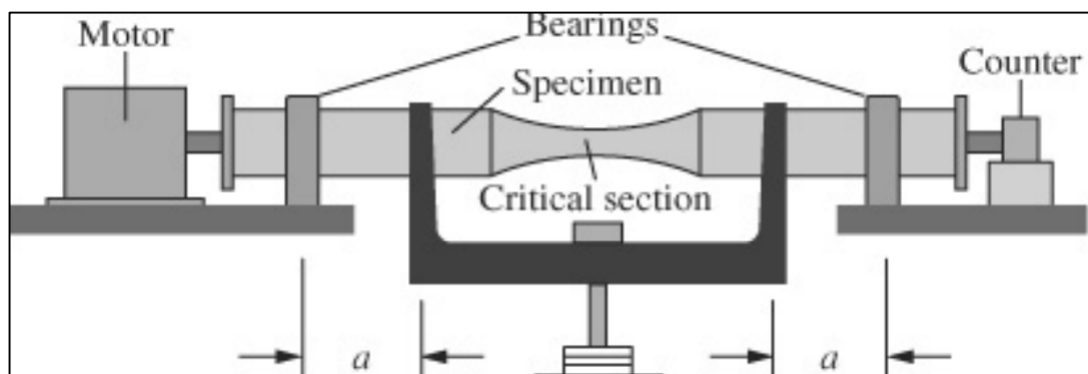


Fonte: (SOUZA, 1982, pag. 176)

A relação entre a quantidade de tensão aplicada e a quantidade de ciclos até a peça romper, também define qual o regime de fadiga que a estrutura estará sujeita. Existem dois tipos de regime de fadiga, os de baixos ciclos e os de altos ciclos. De acordo com Norton (2013), o regime de fadiga de baixo ciclo se dá com um número próximo a 10<sup>3</sup> ciclos. Norton considera essa quantidade uma aproximação razoável para diferenciar o regime de fadiga de baixo ciclos, de um regime de alto ciclos.

O ensaio consiste em submeter um corpo de prova, girando em torno do próprio eixo a 1725 rpm ou mais, a uma flexão rotativa que permite aplicar um momento fletor de magnitude constante. Esse sistema desenvolvido por R. R. Moore, figura 12 gera tensões alternadas de flexão, alternando entre tração e compressão.

Figura 12 – Máquina de fadiga rotativa de R. R. Moore

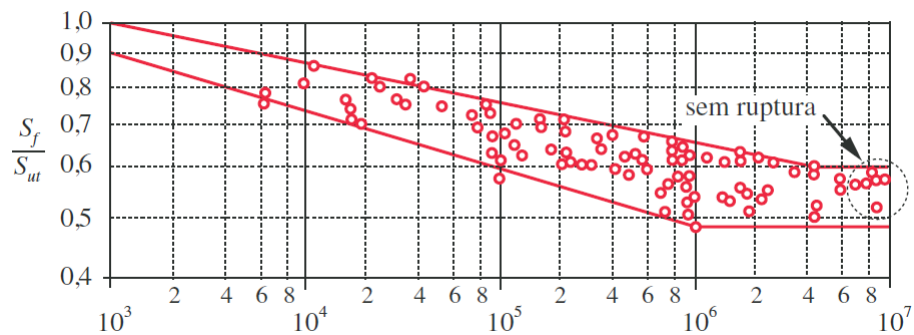


Fonte:

O ensaio começa com um nível de tensão determinado e se desenvolve até o corpo de prova falhar, então o número de ciclos até a ruptura e o nível de tensão são registrados. O ensaio é aplicado em diversos corpos de prova de mesmo material, porém com níveis de tensões diferentes. Os dados obtidos são usados para plotar um gráfico de resistência à fadiga normalizada  $S_f/S_{ut}$  em função do número de ciclos,  $N$  (usualmente em coordenadas logarítmicas, log-log) com isso se obtém o diagrama  $S - N$ . (NORTON, 2013)

Os resultados obtidos são demonstrados na figura 13. Como se pode observar alguns corpos de prova não apresentaram ruptura com níveis de tensão menores, antes do ensaio ser interrompido em um número próximo de  $10^7$  ciclos (NORTON, 2013).

Figura 13 – Gráfico log-log da composição de curva  $S - N$



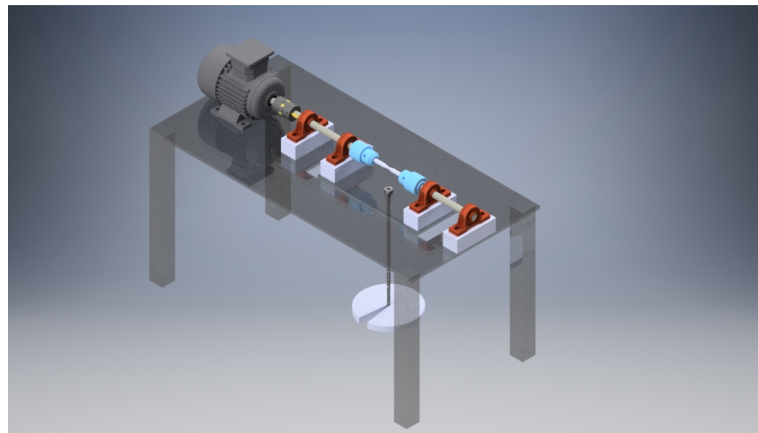
Fonte: (NORTON, 2013, p. 317)

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS

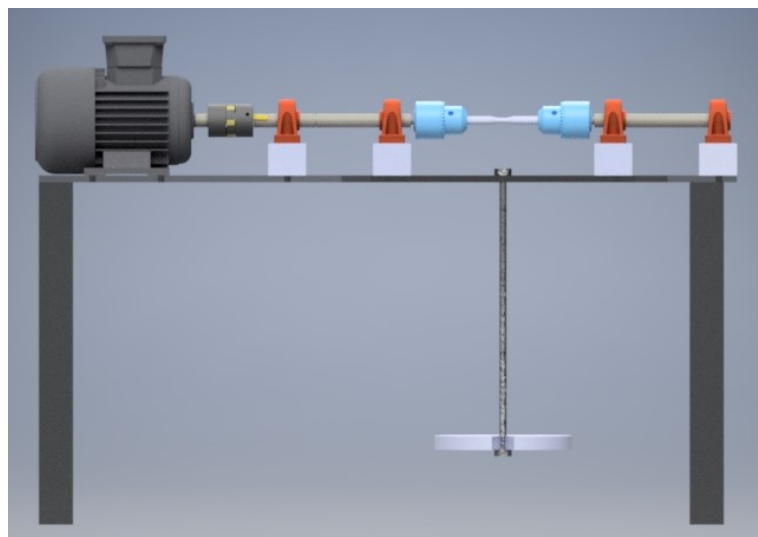
Após extensa revisão bibliográfica e com base no modelo de R.R. Moore foi elaborado um primeiro esboço da máquina, utilizando *software* CAD, conforme as figuras 14 e 15.

Figura 14 – Esboço inicial da máquina



Fonte: Próprios Autores

Figura 15 – Vista lateral



Fonte: Próprios Autores

Em seguida um plano de projeto foi desenvolvido, no qual foram definidos além de outros, o cronograma, o organograma e o orçamento do projeto conforme as figuras 16 17 e 18.

Figura 16 – Cronograma

Atividade	Mês											
	1º mês	2º mês	3º mês	4º mês	5º mês	6º mês	7º mês	8º mês	9º mês	10º mês	11º mês	12º mês
Revisão bibliográfica	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Discussão teórica em função da determinação dos objetivos	X											
Projeto da máquina de ensaio		X	X	X			X	X				
Aquisição dos itens para montagem da máquina de ensaio					X							
Montagem da máquina de ensaio					X	X						
Definição e aquisição de matéria-prima para fabricação de corpos de prova					X							
Serviço de fabricação de corpo de prova						X	X					
Determinação da metodologia de ensaios							X					
Realização de ensaios mecânicos							X	X				
Análise de resultados dos ensaios mecânicos								X	X			
Desenvolvimento de relatório			X	X						X	X	X

Fonte: Próprios Autores

Figura 17 – Organograma



Fonte: Próprios Autores

Figura 18 – Custos

Custos			
Descrição	QTD.	Valor total	Natureza
Serviço de fabricação de bancada	1	R\$ 1.500,00	Custo
Motor elétrico	1	R\$ 1.200,00	Custo
Mancais	4	R\$ 300,00	Custo
Parafusos diversos		R\$ 100,00	Custo
Materiais diversos para construção da máquina		R\$ 500,00	Custo
Custos de elaboração do projeto		R\$30,00	Despesa
<b>Total</b>		<b>R\$ 3.630,00</b>	

Fonte: Próprios Autores



Como estipulado pelo plano de projeto a montagem foi dividida em duas etapas, sendo a primeira a construção da bancada. Foram produzidos desenhos técnicos, disponíveis nos apêndices A e B, a partir dos quais foram executadas as ações necessárias para a confecção da bancada e o resultado final pode ser visto nas figuras 20 e 19.

Figura 19 – Suporte



Fonte: Próprios Autores

Figura 20 – Bancada construída



Fonte: Próprios Autores

## 3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Para a confecção da bancada foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- 6 barras quadradas de 4cm por 4cm, de material reaproveitado
- 1 painel de pinus de 300cm de comprimento, 25cm de largura e 2,5cm espessura

Os *Softwares* utilizados foram:

- *Matlab*
- *Inventor*
- *AutoCAD*
- *Solid Works*

E também:

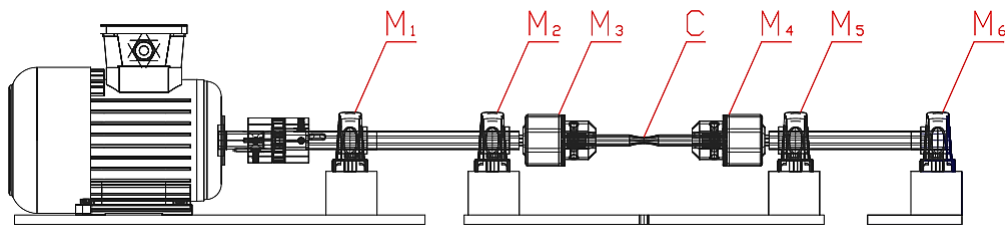
- Máquina de Solda
- Esmerilhadeira
- Serra circular
- Ferramentaria diversa

## 4 DESENVOLVIMENTO

### 4.1 ANÁLISE ESTÁTICA

A estrutura da máquina de fadiga está constantemente sob a ação de forças. Os efeitos provocados por estas forças são objeto de estudo desta seção, os esforços e os pontos críticos da estrutura são representados pela figura 21:

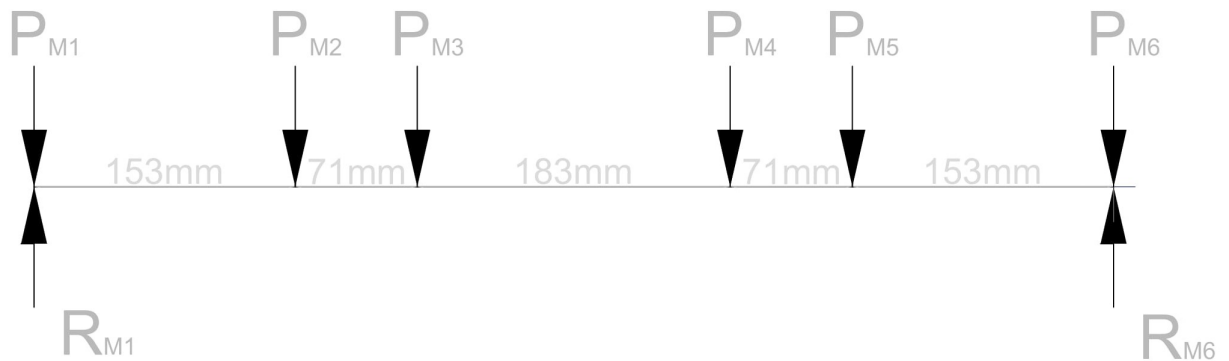
Figura 21 – Representação do sistema



Fonte: Próprios Autores

Para simplificar a análise é feito o diagrama de corpo livre do sistema, onde são representadas apenas as forças externas atuantes no eixo conforme figura a 22.

Figura 22 – Diagrama de Corpo Livre



Fonte: Próprios Autores

Onde  $P_{M1}$  e  $P_{M6}$  são os pesos decorrentes dos mancais,  $P_{M3}$  e  $P_{M4}$  decorrentes dos mandris, e  $P_{M2}$  e  $P_{M5}$  do peso dos mancais e da carga aplicada, que é dividida igualmente entre ambos.  $R_{M1}$  e  $R_{M6}$  são as reações exercidas pela bancada sobre os mancais.

Se tratando de uma máquina de fadiga por flexão rotativa é imprescindível que seja feita também uma análise das forças internas ao sistema. Considerando a massa de um

mancal como sendo 0,6 Kg e a massa de um mandril sendo 0,25 Kg é possível determinar a intensidade das forças externas em função da carga aplicada:

$$P_{M1} = (-9,81 \cdot 0,6)N \quad (4.1)$$

$$P_{M2} = (-9,81 \cdot (k + 0,6))N \quad (4.2)$$

$$P_{M3} = (-9,81 \cdot 0,25)N \quad (4.3)$$

$$P_{M4} = (-9,81 \cdot 0,25)N \quad (4.4)$$

$$P_{M5} = (-9,81 \cdot (k + 0,6))N \quad (4.5)$$

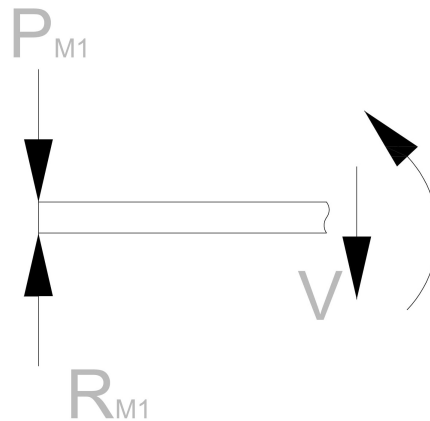
$$P_{M6} = (-9,81 \cdot 0,6)N \quad (4.6)$$

$$R_{M1} = \left( \frac{P_{M1} + P_{M2} + P_{M3} + P_{M4} + P_{M5} + P_{M6}}{2} \right) N \quad (4.7)$$

$$R_{M6} = (R_{M1})N \quad (4.8)$$

Onde  $k$  equivale à metade da carga aplicada. Sendo  $x$  a distância até o mancal  $M_1$ , é possível determinar a força cortante e o momento fletor que em intervalos entre os pontos de aplicação das forças. A figura 23 representa as forças e momentos atuantes para  $x$  variando de 0 à 153mm.

Figura 23 – Diagrama de Corpo Livre



Fonte: Próprios Autores

A força cortante  $V$  para  $0 \leq x < 0,153$ , pode ser definida por:

$$\sum F_y = 0 \quad (4.9)$$

$$\sum F_y = R_{M1} + P_{M1} - V \quad (4.10)$$

Logo:

$$V = R_{M1} + P_{M1} \quad (4.11)$$

$$V = (9,81k + 8,3385)N \quad (4.12)$$

O momento fletor  $\tau_f$  para o mesmo intervalo é definido por:

$$\sum \tau_{M1} = 0 \quad (4.13)$$

$$\sum \tau_{M1} = -V \cdot x + \tau_f \quad (4.14)$$

$$\tau_f = V \cdot x \quad (4.15)$$

$$\tau_f = (9,81kx + 8,3385x)N \cdot m \quad (4.16)$$

De forma análoga é possível obter a força cortante e o momento fletor para qualquer intervalo, conforme a tabela 1.

Tabela 1 – Forças Internas

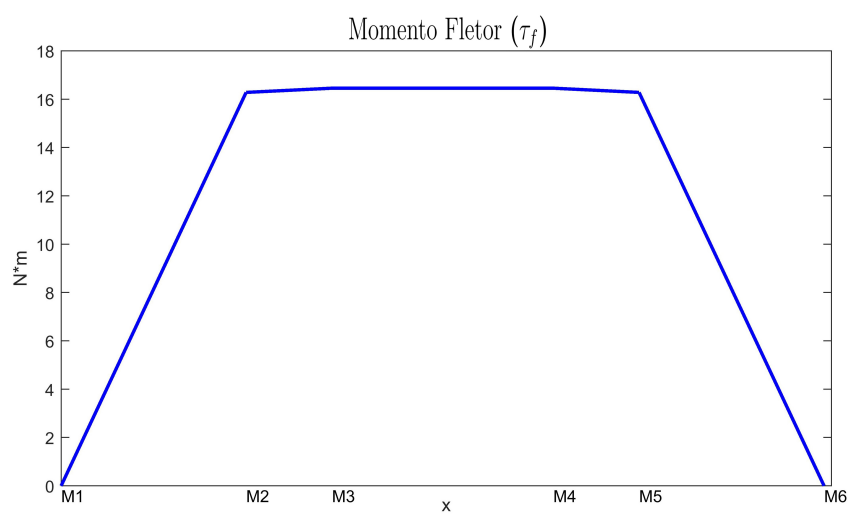
Intervalo (mm)	Força Cortante V (N)	Momento Fletor $\tau_f$ (N · m)
$0 \leq x < 0,153$	$(9,81k + 8,3385)$	$(9,81kx + 8,3385x)$
$0,153 \leq x < 0,224$	2,4525	$(2,4525x + 1,5009k + 1,2758)$
$0,224 \leq x < 0,407$	0	$(1,5009k + 1,4499)$
$0,407 \leq x < 0,478$	-2,4525	$(1,5009k - 2,4525x + 1,4499)$
$0,478 \leq x < 0,631$	$(-9,81k - 8,3385)$	$(1,5009k - 9,81kx - 8,3385x + 1,2758)$

Fonte: Próprios Autores

Sabe-se que o ponto de máximo de uma função se dá quando a sua derivada equivale à 0, como  $\frac{d\tau_f}{dx} = V$ , o momento fletor máximo ocorre quando  $V = 0$ , pela tabela 1 isto acontece no intervalo  $0,224 \leq x < 0,407$ , exatamente onde é inserido o corpo de prova C, de acordo com a figura 21.

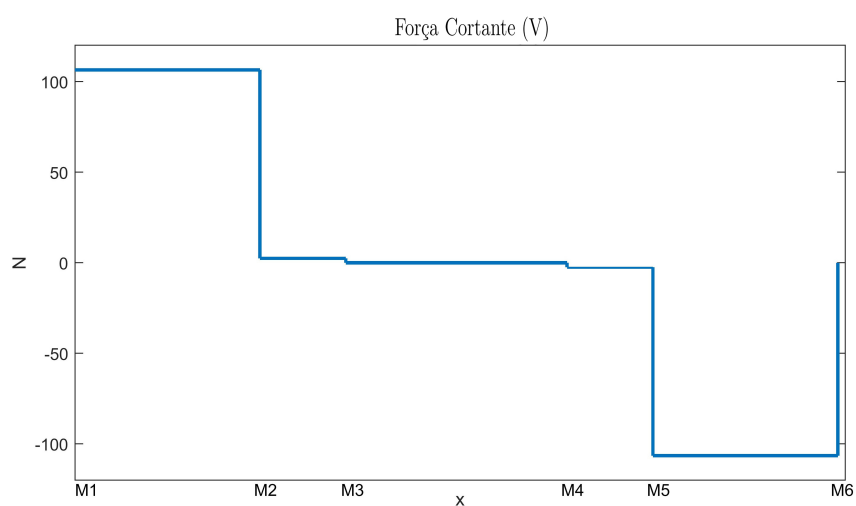
Um algoritmo para determinar e plotar as forças cortantes e os momentos fletores em função da carga aplicada foi desenvolvido, e resultado para uma carga de 20 Kg é representado pelas figuras 24 e 25.

Figura 24 – Diagrama de Momento fletor



Fonte: Próprios Autores

Figura 25 – Diagrama de Força cortante

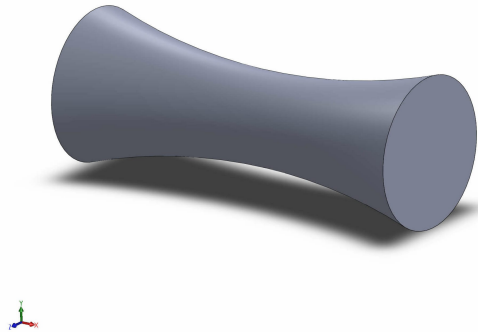


Fonte: Próprios Autores

### 4.1.1 CORPO DE PROVA

O corpo de prova utilizado para os ensaios consiste em um comprimento útil com o formato conforme a figura 26 ligado aos mandris por extensões cilíndricas nas extremidades do comprimento útil.

Figura 26 – Corpo de prova



Fonte: Próprios Autores

O estudo da tensão de flexão atuante sobre o corpo de prova é relevante ao projeto por determinar as condições sob as quais o mesmo é ensaiado. A tensão de flexão ( $\sigma_f$ ) é dada pela equação:

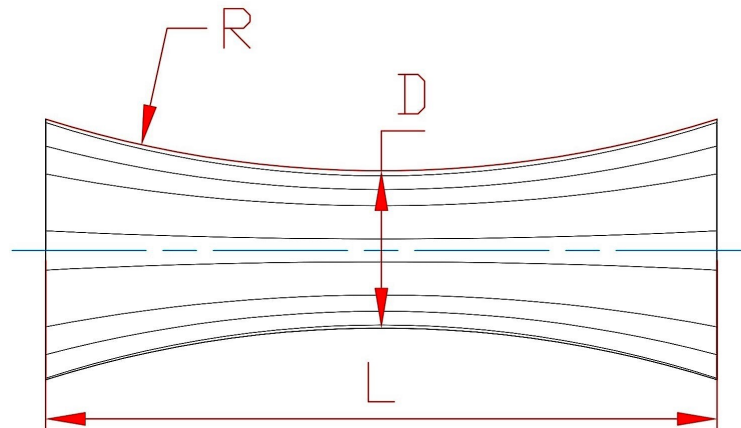
$$\sigma_f = -\frac{\tau_f \cdot y}{I} \quad 4.17$$

Onde  $M$  é o momento fletor,  $I$  é o momento de inércia de área da seção transversal e  $y$  é a posição relativa ao eixo neutro. De forma similar, a tensão máxima ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) é dada pela equação:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{\tau_f \cdot c}{I} \quad 4.18$$

Onde  $c$  é a maior distância onde  $\sigma_{m\acute{a}x}$  atua, tomada perpendicularmente em relação ao eixo neutro. Em conformidade com a ASTM E466-15, o corpo de prova utilizado para o projeto possui o perfil representado pela figura 27.

Figura 27 – Perfil do corpo de prova



Fonte: Próprios Autores

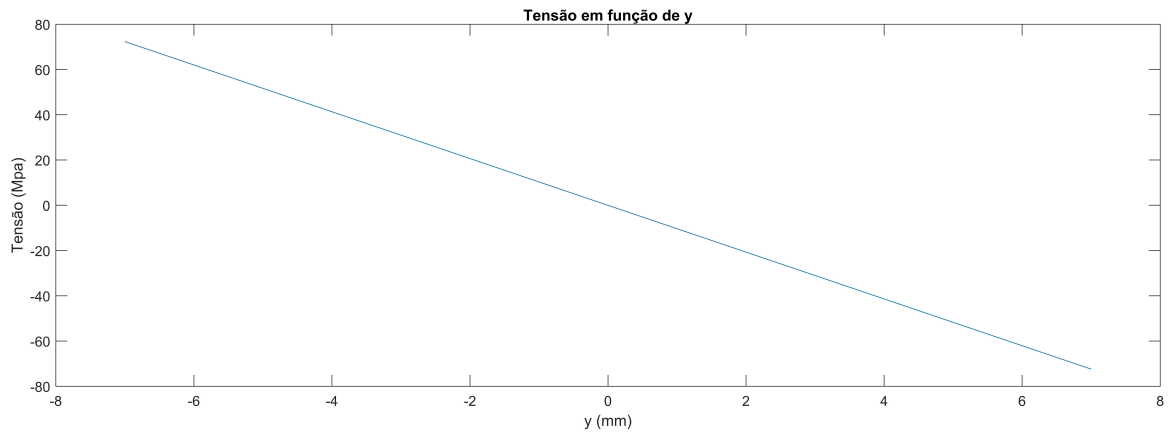
Onde  $R$  é o raio,  $D$  o diâmetro mínimo e  $L$  o comprimento útil. De acordo com a ASTM E466-15 é recomendável que o diâmetro mínimo esteja entre 5 mm e 25 mm, para o perfil utilizado o raio não deve ser inferior à oito vezes o diâmetro mínimo e o comprimento útil deve ser maior ou igual à três vezes o diâmetro mínimo. Para simplificação dos cálculos será tomado:  $R = 8 \cdot D$  ;  $L = 3 \cdot D$ .

A área da seção transversal do corpo de prova corresponde à um círculo para qualquer ponto em que seja seccionado, variando somente o raio. O momento de inércia de área para uma seção transversal circular em relação ao centro é dado por:

$$J_o = \frac{1}{2} \pi r^4 \quad 4.19$$

A partir da equação 4.17 é possível analisar o comportamento da tensão ao longo do perfil do corpo de prova, utilizando um algoritmo para plotar a tensão variando  $y$  de uma extremidade à outra do perfil obtém-se:

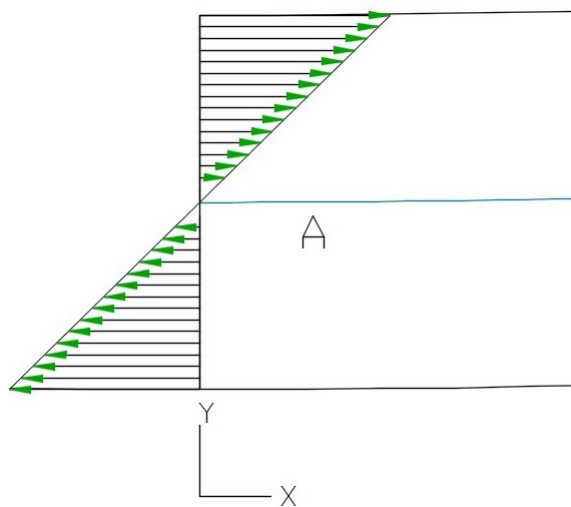


Figura 28 – Tensão em função de  $y$ 

Fonte: Próprios Autores

A tensão ser positiva para  $y < 0$  e negativa para  $y > 0$  implica que o corpo de prova sofre compressão acima do eixo neutro e tração abaixo do eixo neutro, conforme a figura 29.

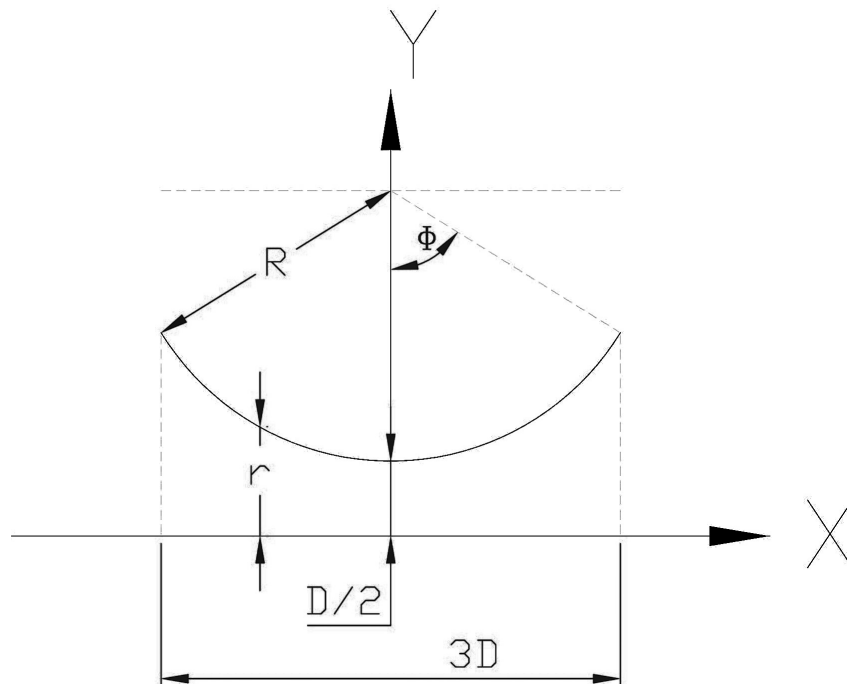
Figura 29 – Distribuição da tensão pelo perfil seccionado em A



Fonte: Próprios Autores

A partir da equação 4.18 é possível analisar o comportamento da tensão ao longo do comprimento, a distância  $c$  equivale ao raio da seção transversal, o processo para definir a variação do raio ao longo do comprimento se baseia na figura 30, e utilizou-se do método de parametrização.

Figura 30 – Representação



Fonte: Próprios Autores

Parametrizar uma curva é o processo de descrevê-la através de uma função vetorial. Da forma que cada coordenada  $(x, y)$  seja representada em função de outra variável  $t$  expressa em um intervalo fechado do tipo  $t \in [0, \alpha]$ .

Uma das formas mais usadas para se parametrizar uma circunferência é através das coordenadas polares, por exemplo:

$$\begin{cases} x = a \cos(t) \\ y = a \sin(t) \\ t \in [0, 2\pi] \end{cases} \quad 4.20$$

Por se tratar de um círculo deslocado da origem em  $y$  por uma altura  $\frac{D}{2}$  é possível perceber que a parametrização da coordenada  $x$  depende apenas do raio  $R$  e da variável  $t$ , porém a parametrização da coordenada  $y$ , depende do raio do corpo de prova  $\frac{D}{2}$  somado com o Raio do círculo maior mais a parametrização padrão da coordenada  $y = R \sin(t)$

$$\begin{cases} x = R \cos(t) \\ y = R + \frac{D}{2} + R \sin(t) \end{cases} \quad 4.21$$

Agora é necessário encontrar o intervalo no qual  $t$  estará contido. Podemos observar pela imagem, colocar numero da imagem, que a variação de ângulo se dá por toda a

extensão do corpo de prova, desde  $(-\frac{\pi}{2} + \phi)$  ate  $(-\frac{\pi}{2} + \phi)$ , portanto  $t$  estará contido nesse intervalo. Pelo teorema de Pitágoras:

$$\sin \phi = \frac{3D}{2} \cdot \frac{1}{R} \quad 4.22$$

$$\sin \phi = \frac{3D}{2R} \quad 4.23$$

aplicando a função inversa de seno dos dois lados da igualdade:

$$\phi = \arcsin\left(\frac{3D}{2R}\right) \quad 4.24$$

Dessa forma,

$$\left(-\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{3D}{2R}\right)\right) \leq t \leq \left(-\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{3D}{2R}\right)\right) \quad 4.25$$

Logo, a parametrização completa para a curva do corpo de prova é

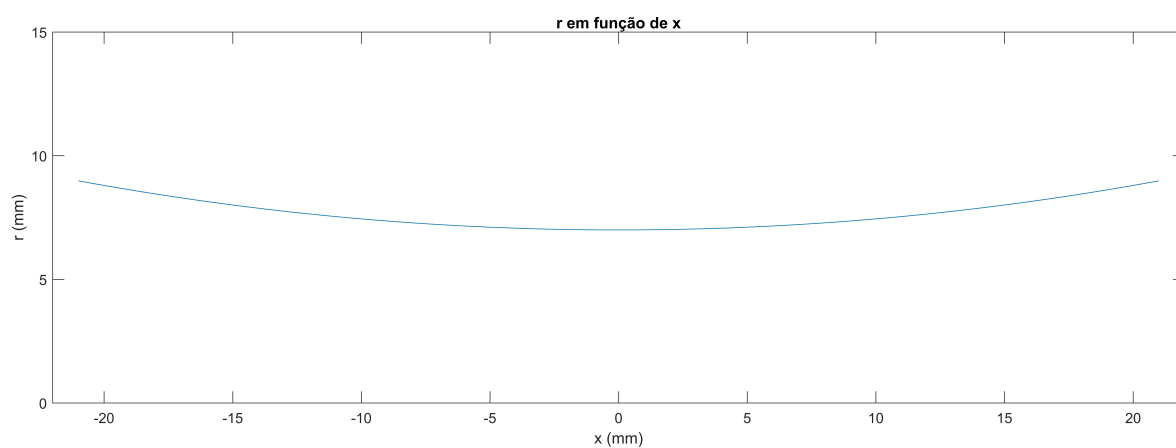
$$\begin{cases} x = R \cos(t) \\ y = R + \frac{D}{2} + R \sin(t) \\ t \in \left[-\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{3D}{2R}\right), -\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{3D}{2R}\right)\right] \end{cases} \quad 4.26$$

A parametrização é um processo eficiente, pois facilita realizar o traçado de curvas que seriam complexas ou impossíveis de descrever apenas em coordenadas cartesianas.

Um algoritmo foi desenvolvido para plotar os gráficos de  $r$ ,  $I$  e  $\sigma_f$ , em função de  $X$ , a partir dos valores do diâmetro mínimo  $D$  e do momento fletor  $M$ . O código fonte se encontra disponível no apêndice A. Conforme (BORJA; CALLE, 2017) o sistema de pesos é utilizado em máquinas de ensaio de fadiga por flexão rotativa para cargas de até  $50Kg$ , para cargas maiores são utilizados pistões hidráulicos, a partir da tabela 4.1 e considerando uma carga de  $50Kg$  o momento fletor atuante sobre o corpo de prova será de  $39N \cdot m$  ou  $39 \times 10^3 N \cdot mm$ .

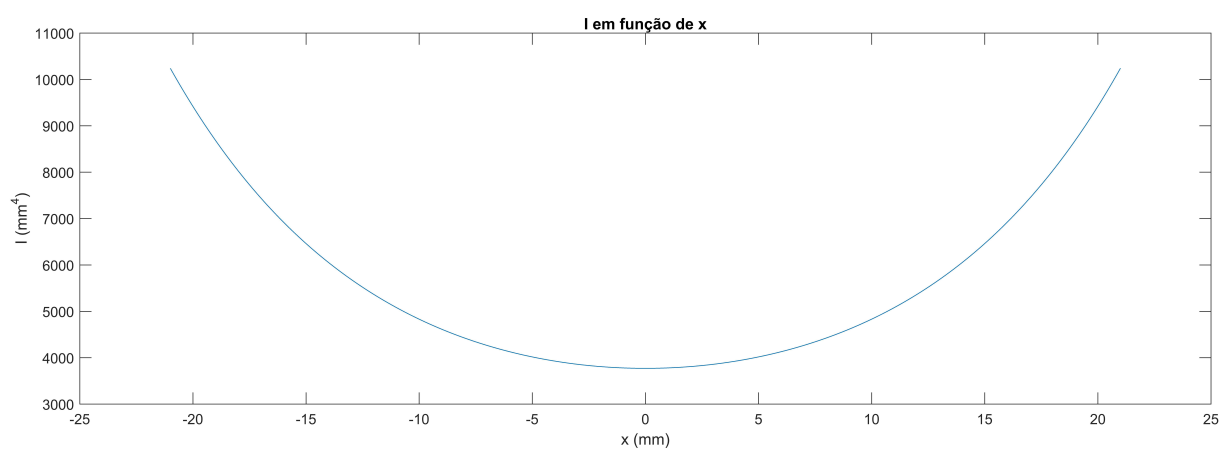
Os gráficos gerados pelo algoritmo para um momento fletor de  $39 \times 10^3 N \cdot mm$  e um diâmetro mínimo de 14mm, são exibidos nas figuras 31, 32 e 33.

Figura 31 – r em função de x



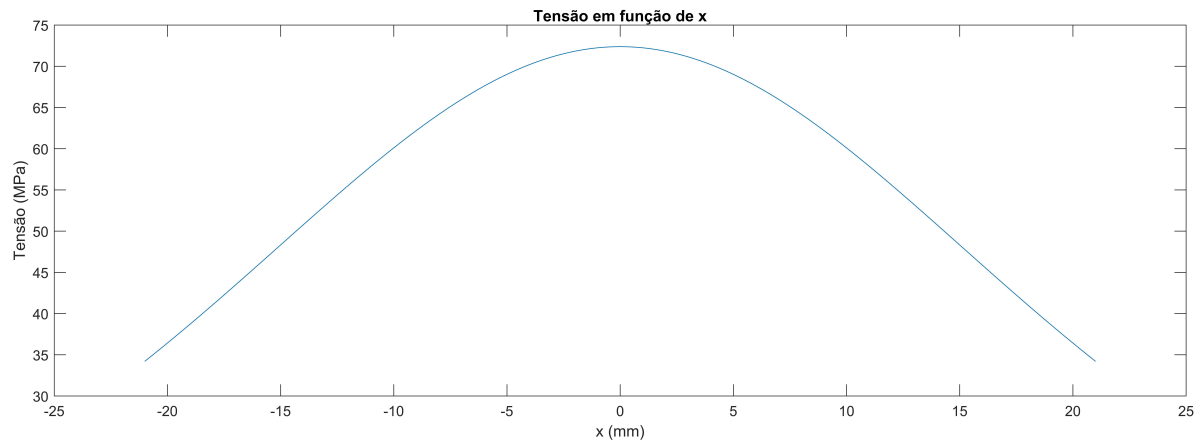
Fonte: Próprios Autores

Figura 32 – I em função de x



Fonte: Próprios Autores

Figura 33 – Tensão em função de x



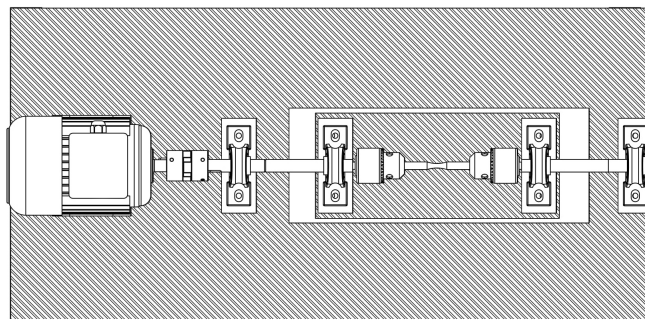
Fonte: Próprios Autores

O momento de inércia de área é mínimo quando  $X = 0$ , como a tensão é inversamente proporcional ao momento de inércia, a tensão é máxima em  $X = 0$ , o que significa que o perfil concentra a tensão no centro de corpo de prova, exatamente o local em que se espera que ocorra fratura.

#### 4.1.2 CENTRO DE MASSA

Tanto a bancada quanto a estrutura abaixo dela são projetadas para que a máquina se mantenha estável quando em funcionamento, o conhecimento da distribuição das cargas possibilita identificar pontos críticos que devem ser reforçados na estrutura e também são úteis para o dimensionamento da bancada. Um primeiro esboço da bancada e da distribuição dos elementos sobre ela podem ser vistos na figura 34.

Figura 34 – Vista superior do sistema

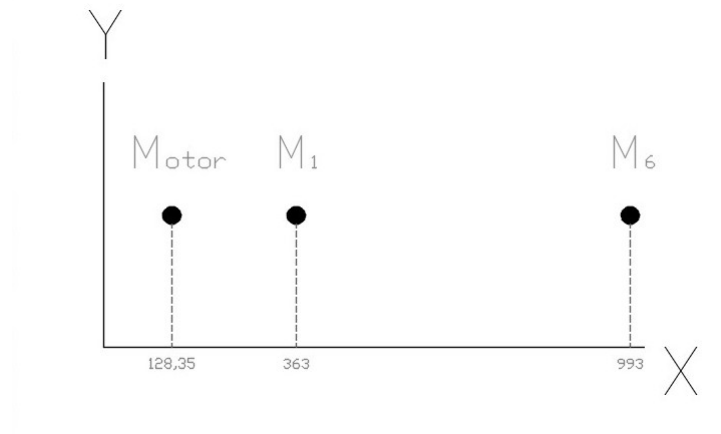


Fonte: Próprios Autores

As massas aplicadas sobre a bancada são distribuídas entre o motor e os mancais  $M_1$  e  $M_6$ , para simplificar os cálculos é considera-se que as massas são aplicadas pontualmente

no centro geométrico do apoio sobre a bancada, a distribuição pontual dessas massas é representada pela figura 35.

Figura 35 – Distribuição de massas sobre a bancada



Fonte: Próprios Autores

Devido à simetria do sistema a coordenada  $y$  do centro de massa é exatamente a metade da largura da bancada, a coordenada  $x$  do centro de massa é obtida por:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad 4.27$$

Tomando o motor como origem:

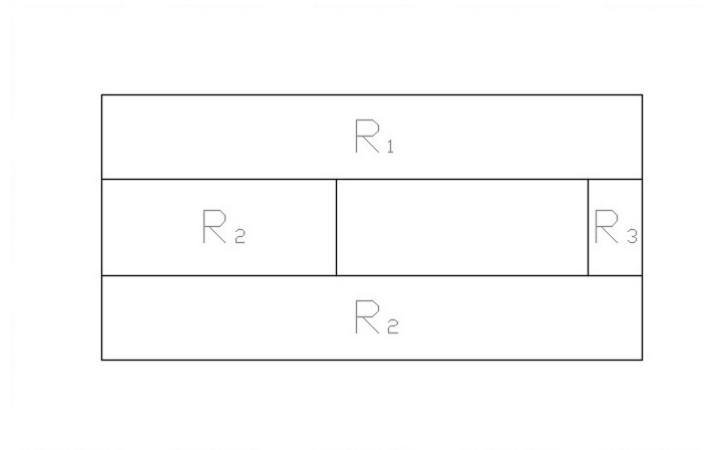
$$\bar{x} = \frac{(P/2) \cdot 245,65 + (P/2) \cdot 864,65}{(P/2) + (P/2) + M} = \frac{544,65P}{P + M} \quad 4.28$$

Onde  $M$  é a massa do motor e  $P$  é a soma das massas dos mancais, mandris, eixos e todo o sistema compreendido entre  $M_1$  e  $M_6$ . Considerando que a massa dos mancais e mandris juntamente com os elementos da máquina compreendidos entre  $M_1$  e  $M_6$  como sendo  $1Kg$ , a massa do motor sendo  $2Kg$  e a carga máxima de  $50Kg$  especificada anteriormente, a coordenada  $x$  do centro de massa do sistema será:

$$\bar{x} = \frac{544,65 \cdot 51}{51 + 2} = 524mm \quad 4.29$$

Também é possível definir o centro de massa da bancada, por ser simétrica, a coordenada  $y$  do centro de massa é exatamente a metade da largura da bancada, a coordenada  $x$  do centro de massa é obtida fragmentando a bancada em retângulos conforme a figura 36.

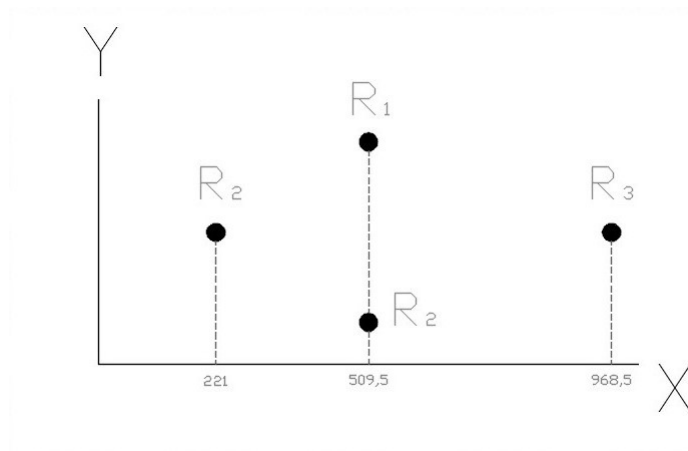
Figura 36 – Fragmentação da bancada



Fonte: Próprios Autores

Considerando que a densidade é constante em toda a bancada e considerando a atuação das massas como pontual a distribuição da massa da bancada é representada pela figura 37.

Figura 37 – Distribuição da massa da bancada



Fonte: Próprios Autores

A partir da equação 4.27:

$$\bar{x} = \frac{221 \cdot 80002\rho + 509,5 \cdot 325061\rho + 968,5 \cdot 18281\rho}{423344\rho} = 474,8mm \quad 4.30$$

Onde  $\rho$  é a densidade do material, que não influencia na posição do centro de massa, assim como a espessura da bancada. Uma observação importante sobre a dimensão  $y$  da mesa, é que qualquer valor acima de  $181mm$  desloca o centro de massa da bancada no sentido positivo de  $x$ , e representa um gasto maior de material.

Como a coordenada  $x$  de ambos centros de massa são relativamente próximas entre si e próximas também da margem do vão da bancada ( $442mm$ ), um reforço estrutural posicionado na margem atende satisfatoriamente as necessidades do projeto.



## 5 CONCLUSÃO

O projeto teve como objetivo principal, a elaboração de uma máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa. Além de ser um projeto de baixo custo, traz uma contribuição para o meio acadêmico já que a máquina será utilizada principalmente pelos graduandos do curso de engenharia mecânica.

Após a definição do tipo de máquina que seria desenvolvida no projeto observou-se a necessidade de um estudo sobre as causas e os efeitos da fadiga, já que a mesma é a principal responsável por falhas em elementos de máquinas. O estudo da falha por fadiga é importante pois conhecendo melhor seu material e suas propriedades mecânicas o graduando irá projetar estruturas, máquinas ou equipamentos mais seguros. A junção deste estudo com a compreensão das disciplinas ministradas durante o período cursado foram fundamentais para o desenvolvimento do projeto.

A dificuldade identificada foi a decisão a ser tomada no decorrer da concepção do projeto em relação a aquisição dos materiais, que para minimizar os custos teve como solução usar peças reaproveitadas. Um bom planejamento evitou que houvessem outras dificuldades.

Em suma o projeto atendeu ao objetivo proposto, onde foi possível conceituar ensaios e falhas por fadiga e por conseguinte projetar e construir a bancada de apoio da máquina de ensaio, para a próxima etapa será finalizada a construção da máquina.

# REFERÊNCIAS

- BORJA, C. D. B.; CALLE, A. A. T. *Automatización de la máquina de ensayos de fatiga para el laboratorio de mecánica de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*. 2017. Disponível em: <<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/12649>>. Acesso em: 24 de outubro de 2017. Citado na página 42.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. *Elementos de Máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica*. 8. ed. [S.l.]: AMGH Editora, 2011. Citado na página 21.
- CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 9. ed. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2016. Citado 10 vezes nas páginas 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23 e 24.
- DIETER, J. G. E. *Mechanical Metallurgy*. Philadelphia: McGraw-Hill Book, 1961. Citado na página 26.
- FORTES, C. Mecânica da fratura. *Assistência Técnica Consumíveis-ESAB BR*, 2003. Citado na página 17.
- FUNDAÇÃO ROBERTO MARINHO. *Curso profissionalizante mecânica: ensaios de materiais. Aula 15: Ensaio de Fadiga*. Disponível em: <<http://essel.com.br/cursos/material/01/EnsaioMateriais/ensa15.pdf>>. Acesso em: 09 de outubro de 2017. Citado na página 25.
- MARQUES FABRÍCIO C. S.; AREVOLOS, R. M. *Modernização da máquina de fadiga por flexão rotativa do laboratório de ensaios de materiais*. 2011. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 18.
- MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. *Princípios de metalurgia mecânica*. [S.l.]: Editora E. Blücher, 1982. 1–57 p. Citado na página 16.
- MICHÉL, M. D. *Efeito da Temperatura em Propriedades Mecânicas de vidros e Fractografia de Trincas Geradas por Ponta Vickers*. 108 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998. Citado na página 15.
- MIKOWSHI, A. *Estudo da Dinâmica da zona plástica ao redor da ponta da trinca sob diferentes modos de carregamento*. 122 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003. Citado na página 16.
- NDT. *Factors Affecting Fatigue Life*. 2009. Disponível em: <<http://www.test.org/doe/>>. Acesso em: 14 de outubro de 2017. Citado na página 25.
- NORTON, R. L. *Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada*. 4. ed. [S.l.]: Bookman Editora, 2013. Citado 6 vezes nas páginas 13, 18, 19, 21, 28 e 29.
- RUCHERT, C. *MECÂNICA DA FRATURA E FADIGA DOS MATERIAIS*. 2014. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/241323/mod\\_resource/content/2/AULA%20DE%20FADIGA%20E%20FRATURA2.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/241323/mod_resource/content/2/AULA%20DE%20FADIGA%20E%20FRATURA2.pdf)>. Acesso em: 10 de outubro de 2017. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

SANTOS, L. V. d. *Análise de falha por fadiga em eixo de motores para sistemas de arrefecimento*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

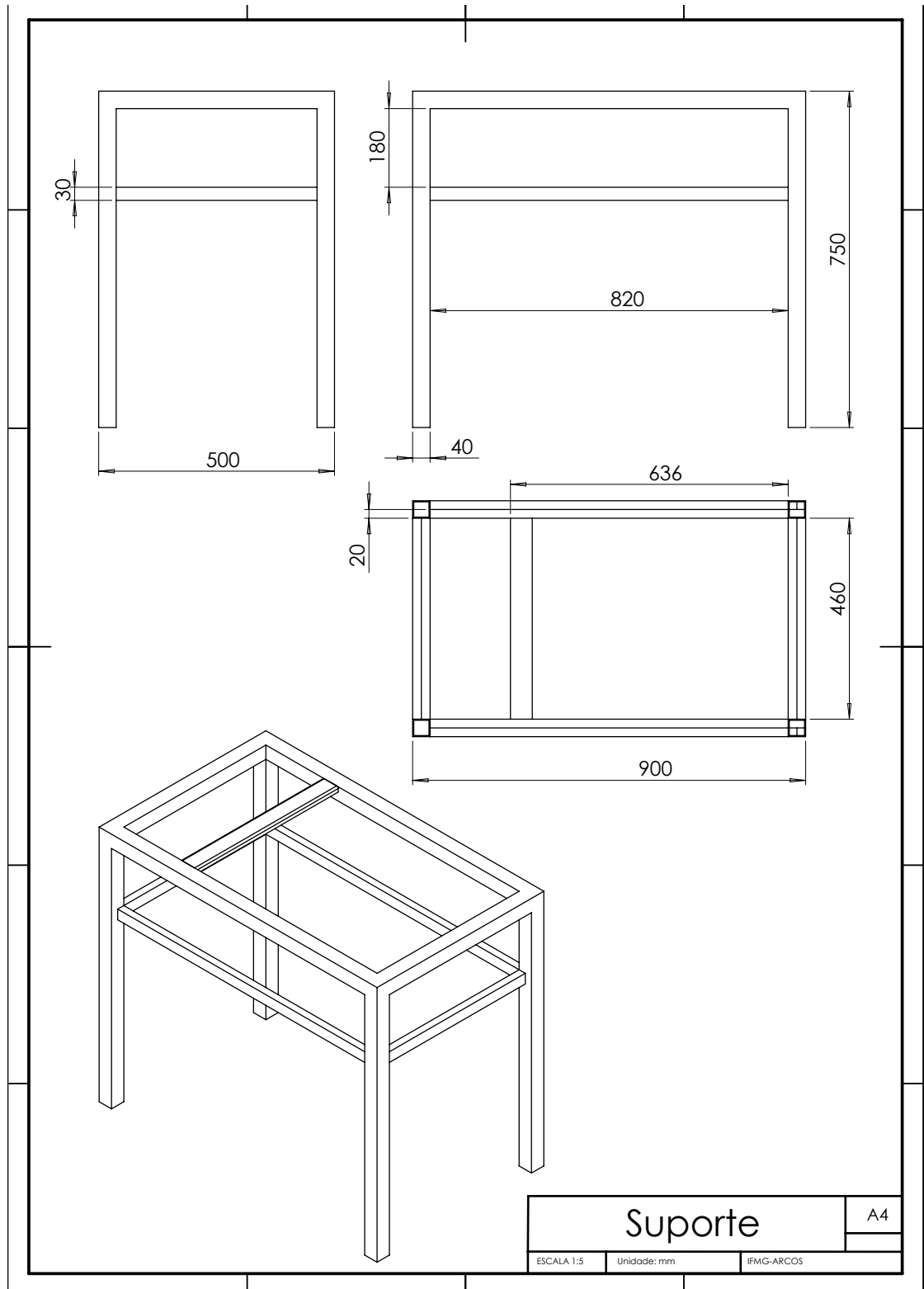
SERBENA, F. C. *The brittle-ductile transition of NiAl single crystals*. 133 p. Tese (Doutorado) — University of Oxford, London, 1995. Citado na página 16.

SOUZA, S. A. de. *Ensaio mecânicos de materiais metálicos. Fundamentos teóricos e práticos*. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 28.

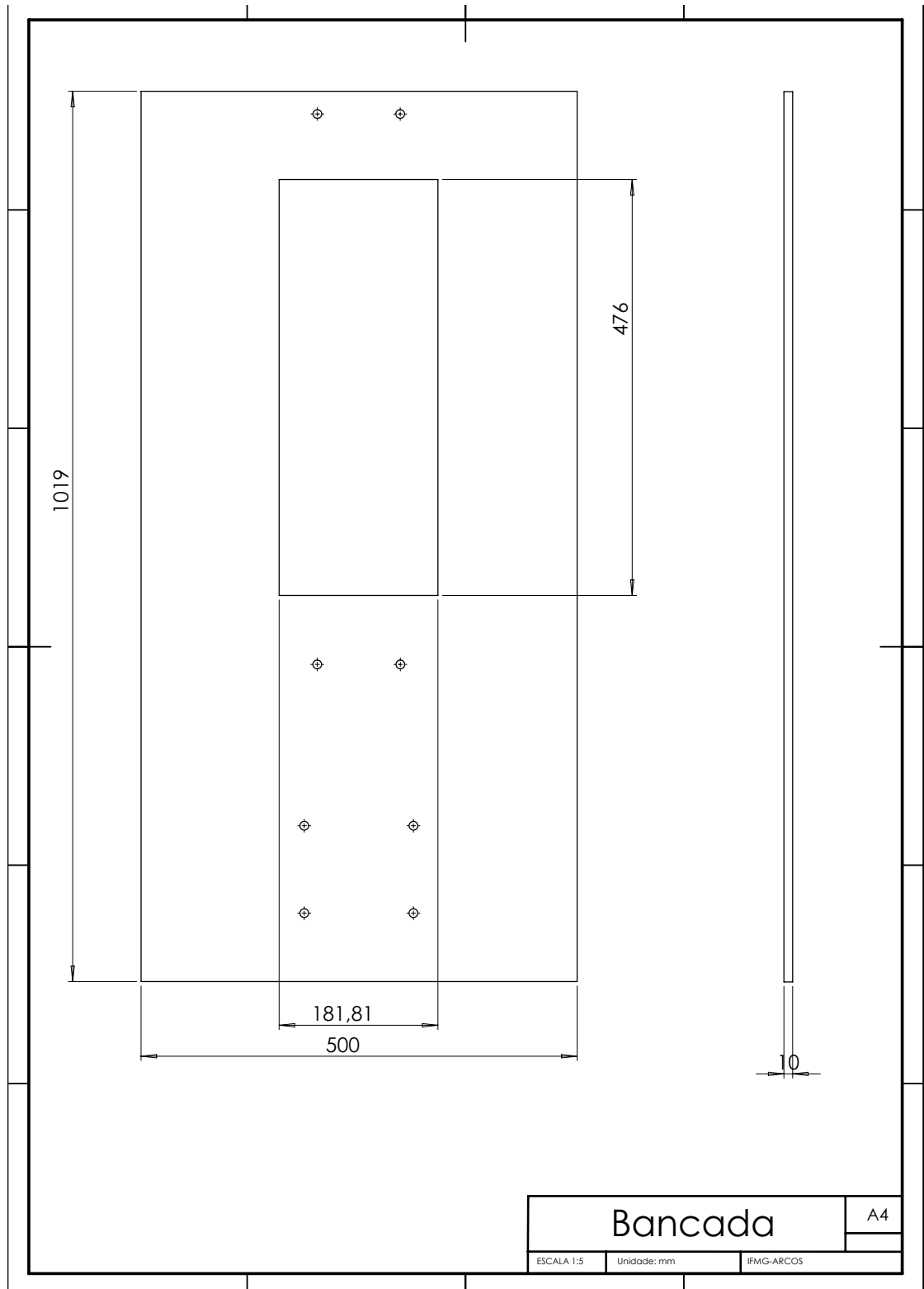
STROHAECKER, T. R. Mecânica da fratura. *Laboratório de Metalurgia Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil*. 99p, 2007. Citado na página 18.

# Apêndices

# APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DO SUPORTE



# APÊNDICE B – DESENHO TÉCNICO DA BANCADA



# APÊNDICE C – LISTA DE PEÇAS

Nº DO ITEM	DESCRIÇÃO	QTD.
1	Mesa	1
2	Suporte móvel	1
3	Haste	1
4	Motor	1
5	Eixo Motor/Acoplamento	1
6	Acoplamento	1
7	Base para massas	1
8	Eixo primário	1
9	Parafuso	12
10	Mandril	2
11	Corpo de prova	1
12	Mancal	4
13	Eixo secundário	1
14	Base para o mancal	4
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> <p>Máquina de Fadiga</p> </div>		A4
<small>ESCALA 1:20</small>		<small>IFMG-ARCOS</small>