

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL
Campus Ibirubá**

VOLMEI BALDUINO BORGHARDT

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE MÁQUINA DE ENSAIOS DE FADIGA POR
FLEXÃO ROTATIVA**

Ibirubá

2023

VOLMEI BALDUINO BORGHARDT

**PROJETO E FABRICAÇÃO DE MÁQUINA DE ENSAIOS DE FADIGA POR
FLEXÃO ROTATIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Metalurgia e Qualidade.

Orientador: Prof. Dr. Adão Felipe Oliveira Skonieski

Ibirubá

2023

BORGHARDT, Volmei Balduino.

Utilização de uma máquina de ensaio de fadiga/ Volmei Borghardt, 2023.

Orientador: Prof. Dr. Adão Felipe Oliveira Skonieski

88 páginas, il.

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Ibirubá. Engenharia Mecânica, Ibirubá, 2023.

1. Engenharia Mecânica. 2. Qualidade. 3. Metalurgia.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Ibirubá.

Engenharia Mecânica.

Máquina de ensaio de fadiga

Volmei Balduino Borghadt

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Ibirubá, 28 de agosto de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. (orientador) Dr. Adão Felipe Oliveira Skonieski

Instituição: IFRS Campus Ibirubá

Prof. Jefferson Moraes Gautério

Instituição: IFRS Campus Ibirubá

Prof. Flávio Roberto Andara

Instituição: IFRS Campus Ibirubá

Dedico este trabalho aos meus pais Ledecira e Alfeu, e à minha amada esposa Angélica, o meu mais profundo agradecimento por estarem sempre ao meu lado em todos os momentos, apoiando-me e incentivando-me a alcançar meus objetivos. Sem o amor e o apoio de vocês, essa conquista não seria possível. Vocês são minha força e inspiração.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder força e sabedoria durante toda minha jornada acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Adão, sou grato por sua orientação e apoio indispensáveis para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores que compartilharam seu conhecimento ao longo do curso, meu sincero agradecimento por sua dedicação e inspiração.

Por último, quero agradecer ao IFRS Campus Ibirubá, no qual me proporcionou uma formação acadêmica gratuita e de qualidade.

Minha eterna gratidão a todos que contribuíram para esta minha conquista.

“Há três caminhos para o fracasso: não ensinar o que se sabe, não praticar o que se ensina, não perguntar o que se ignora.”

São Beda

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo principal o projeto, a construção dos componentes e a montagem de uma máquina de fadiga por flexão rotativa, além disso investigar e apresentar uma abordagem detalhada sobre a máquina, trazendo e aplicando para a ciência de engenharia mecânica e a matéria prima utilizada nas indústrias. O propósito da máquina é a realização dos ensaios de fadiga no metal, utilizado em algum componente, nas suas condições de uso. A máquina de fadiga tem um custo elevado comercialmente, porém um engenheiro mecânico, com os conhecimentos adquiridos na graduação, além de todos os materiais necessários, tem a capacidade de projetar e desenvolver um sistema eficiente para a realização dos ensaios. Os ensaios são necessários para o entendimento da real resistência dos materiais e sua correta aplicabilidade. Os conceitos aplicados a fadiga, assim como os tipos de ensaios, o funcionamento da máquina do ensaio e aplicação dela nos testes, serão abordados nesta pesquisa. A metodologia é apresentada em seis, delimitadas para o atingimento do objetivo principal do trabalho: etapa 1, projeto da máquina; etapa 2, construção; etapa 3, análise dos resultados dos ensaios; etapa 4, melhorias no equipamento construído; etapa 5, adequação normativa da máquina; etapa 6, ensaios e análises de resultados dos corpos de provas submetidos na máquina. Com os conhecimentos adquiridos no curso, foi possível a entrega de uma máquina de fadiga rotativa, utilizando materiais de baixo custo e atendendo a norma NR 12. Como conclusão, a interpretação analítica dos resultados obtidos nos ensaios. Contribuir para o conhecimento e compreensão da máquina de ensaio fadiga for flexão rotativa como ferramenta essencial na análise de materiais e componentes, ressaltando sua importância na engenharia mecânica e oferecendo subsídios para o desenvolvimento de estratégias de projeto e manutenção mais eficientes.

Palavras chave: Fadiga; Ensaio; Máquina de fadiga por flexão rotativa.

ABSTRACT

The main objective of this work is the design, construction of components and assembly of a rotary bending fatigue machine, in addition to investigating and presenting a detailed approach to the machine, bringing and applying it to the science of mechanical engineering and the subject raw material used in industries. The purpose of the machine is to carry out fatigue tests on the metal, used on a component, under its conditions of use. The fatigue machine has a high commercial cost, but a mechanical engineer, with the knowledge acquired during graduation, in addition to all the necessary materials, has the ability to design and develop an efficient system for carrying out the tests. Tests are necessary to understand the real resistance of materials and their correct applicability. The concepts applied to fatigue, as well as the types of tests, the operation of the test machine and its application in tests, will be covered in this research. The methodology is presented in six, delimited to achieve the main objective of the work: stage 1, machine design; stage 2, construction; stage 3, analysis of test results; stage 4, improvements to the built equipment; step 5, regulatory adaptation of the machine; step 6, tests and analysis of results of the specimens submitted to the machine. With the knowledge acquired in the course, it was possible to deliver a rotary fatigue machine, using low-cost materials and complying with the NR 12 standard. As a conclusion, the analytical interpretation of the results obtained in the tests. Contribute to the knowledge and understanding of the rotary bending fatigue testing machine as an essential tool in the analysis of materials and components, highlighting its importance in mechanical engineering and providing support for the development of more efficient design and maintenance strategies.

Keywords: Fatigue; Tests; Rotary bending fatigue machine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estágios / Fases Fadiga	14
Figura 2: Nomenclatura ciclos de carregamento	18
Figura 3: Curva S-N.....	21
Figura 4: Desenho da Máquina de Fadiga Rotativa.....	22
Figura 5: Processo corte serra fita das massas	23
Figura 6: Usinagem do material	26
Figura 7: Processo de calibração de massas	27
Figura 8: Número de Ciclos.....	28
Figura 9: Tinkercad.....	29
Figura 10: Sensor de infravermelho	30
Figura 11: Máquina de fadiga rotativa.....	31
Figura 12: Corpo de prova.....	31
Figura 13: Proteção NR 12 máquina de fadiga rotativa	32
Figura 14: Circuito comando 24V	33
Figura 15: Botão acionamento de emergência.....	33
Figura 16: Chave de fim de curso.....	34
Figura 17: Esquema elétrico comando de força motor.....	35
Figura 18: Sistema segurança do teste.....	36
Figura 19: Sistema contagem ciclos	36
Figura 20: Display contagem de ciclos.....	37
Figura 21: Tacômetro	37
Figura 22: Amostragem software ABAQUS.....	38
Figura 23: Máquina de fadiga por flexão rotativa	39
Figura 24: Chaves de fim de curso na máquina de fadiga.....	40
Figura 25: Gráfico curva S-N	41
Figura 26: Resultado / contagem de ciclos	41
Figura 27: Gráfico resultado do teste de fadiga.....	42
Figura 28: Corpo de prova após o ensaio 1	43
Figura 29: Corpo de prova após o ensaio 2	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Rotação torno mecânico	25
Tabela 2: Tabela cálculo deformação máxima	28
Tabela 3: Resultado cálculo de deformação máxima no teste	40
Tabela 4: Resultados compilados dos testes	42

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Desenho técnico corpo de prova	48
Anexo 2: Código de contagem de ciclos do arduino	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA	12
1.2	OBJETIVO GERAL	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	HISTÓRIA DA FADIGA	15
2.2	TIPOS DE FADIGA	16
2.3	ENSAIOS MECÂNICOS PARA ANÁLISE DE FALHAS.....	16
2.4	NORMA PARA O ENSAIO DE FADIGA	17
2.5	CÁLCULOS RELACIONADOS À FADIGA	18
2.6	MÉTODO DA VIDA SOB DEFORMAÇÃO (ϵ -N)	19
2.7	MÉTODO DA VIDA SOB TENSÃO (S-N)	20
3	MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1	<i>METODOLOGIA DO PROJETO DE CONSTRUÇÃO DA MÁQUINA</i>	22
3.2	<i>CARACTERIZAÇÃO DA MÁQUINA</i>	22
3.3	<i>CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DA MÁQUINA DE FADIGA ROTATIVA</i>	23
3.4	<i>CÁLCULO MÁQUINA DE FADIGA ROTATIVA</i>	27
3.5	<i>CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE CONTAGEM DE CICLOS</i>	29
3.6	<i>PROTÓTIPO MÁQUINA DE FADIGA ROTATIVA</i>	30
3.7	<i>TESTES E VALIDAÇÃO DO PRODUTO</i>	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5	CONCLUSÕES	45
6	BIBLIOGRAFIA	46

1 INTRODUÇÃO

A fadiga é um fenômeno mecânico de grande importância para a engenharia, pois muitos materiais e componentes estão sujeitos a cargas cíclicas durante sua vida útil, umas como aplicações mais simples, e outras mais complexas. A compreensão e análise da falha são essenciais para garantir durabilidade, assim como segurança e a própria confiabilidade de sistemas mecânicos em diversos setores, incluindo-se os equipamentos agrícolas.

Segundo Silva (2004), as falhas decorrentes da fadiga podem ser imprevisíveis, gerando uma fratura frágil e sem deformações aparentes na peça. Esse tipo de solicitação pode levar a falhas progressivas e catastróficas, eventualmente à ruptura, mesmo quando as cargas aplicadas estão abaixo dos limites de resistência estática. Elas podem ser oriundas de projetos inadequados, processo de fabricação, manutenção, defeitos microestruturais e entre outros.

O presente trabalho, irá apresentar o desenvolvimento e construção de uma máquina de fadiga por flexão rotativa, com o objetivo de realização de ensaios de fadiga, além de uma pesquisa descritiva com os conceitos da falha, o entendimento mecânico da máquina e os métodos de ensaio de fadiga. O trabalho também irá apresentar o desenvolvimento de melhorias no sistema para a contagem de ciclos, e para finalizar, a adequação de segurança da máquina dentro da NR 12.

O estudo tem uma relevante importância no âmbito da engenharia mecânica, uma vez que a fadiga é umas das principais falhas presentes em materiais e componentes, ocasionando problemas na vida útil dos equipamentos, custos e segurança das pessoas. O entendimento do funcionamento da máquina de fadiga por flexão rotativa é necessário para a avaliação do comportamento à falha de fadiga nos mais diversos tipos de matéria prima, é essencial para a otimização de recursos projetos, além da segurança na utilização dos produtos.

1.1 JUSTIFICATIVA

A turma de Gerenciamento de Projetos do curso de engenharia do Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS) – Campus Ibirubá, realizou o planejamento do projeto de uma máquina de fadiga por flexão rotativa. Este tipo de equipamento, comercialmente tem um custo elevado no mercado, e um Engenheiro Mecânico, consegue projetar e estruturar esse modelo, de acordo com os conhecimentos adquiridos durante o curso. Com isso foi possível a otimização de recursos financeiros, reutilização de materiais além da possível aplicação de todos os

conceitos técnicos e teóricos adquiridos ao longo da graduação de engenharia mecânica. A fadiga prejudica a estrutura dos produtos, por isso é importante o estudo da mesma, formas de prevenção e análise de resultados.

1.2 OBJETIVO GERAL

Construir e estruturar uma máquina de fadiga por flexão rotativa.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o alcançar o objetivo principal, são necessários alguns objetivos específicos:

- Conceitos teóricos sobre a falha de fadiga;
- Conhecer e aprofundar teoricamente sobre a máquina de fadiga por flexão rotativa;
- Avaliar os resultados e cálculos sobre o material testado, após utilização da máquina de fadiga rotativa;
- Apresentação da evolução e melhorias da máquina construída.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

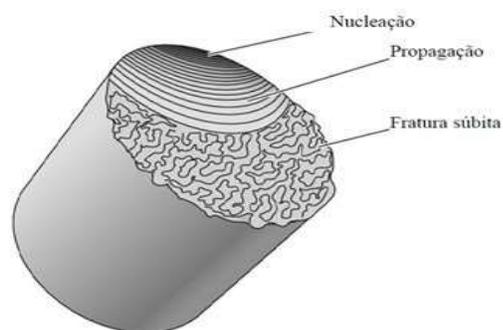
De acordo com Ellwanger (2009), a fadiga está relacionada a redução parcial da capacidade de elementos estruturais, em conseguir suportar determinadas cargas cíclicas. A fadiga resulta-se de ciclos em repetição de tensões.

Para Rosa (2002), a fadiga, como consequência, reduz a capacidade de carga de componentes estruturais do material, gerados pela ruptura do material e o avanço da trinca em cada ciclo novo de carga. A mesma acontece lentamente e de acordo com cada ciclo que o material é submetido.

Conforme Norton (2013), existem estágios/fases da fadiga. A figura 1, Estágios/Fases Fadiga, mostra a diferença entre cada um:

- Estágio/Fase 1: Início da trinca/ Nucleação- As tensões variadas geram deformações no material e assim bandas de deslizamento ao longo do mesmo. As bandas agrupam-se com o tempo, e geram as trincas visíveis apenas em microscópicos.
- Estágio/Fase 2: Propagação da trinca – Crescimento e propagação das trincas, que estão de acordo com os números de ciclos e os níveis de tensão.
- Estágio/Fase 3: Fratura súbita – É o estágio resultante do crescimento da trinca, as tensões nominais já ultrapassam o limite da própria resistência do material.

Figura 1: Estágios / Fases Fadiga



Fonte: Norton (2013)

2.1 História da Fadiga

Norton (2013) descreve a história da fadiga e o estudo e efeito nos materiais. O início do estudo dos efeitos da fadiga, foi datado em 1837, quando um engenheiro alemão, chamado de William Albert, de uma mineradora, constatou e estudou algumas falhas em correntes transportadoras de mineração. Em 1874, H.Gerver, também engenheiro alemão, desenvolveu e executou métodos para avaliar a ocorrência de solitação cíclica, contribuindo de forma relevante para as formas de calcular a vida e resistência à fadiga em diferentes níveis de tensão. No século XIX, após grandes números de falhas em eixos de vagões ferroviários, é que o estudo de fadiga na resistência dos materiais foi intensificado. Em 1842, a pesquisa foi aprofundada após um acidente em trilhos de trem na França. Anos depois do acidente, em 1860, August Wohler, engenheiro alemão, identificou que o material apresentou tensões cíclicas, que ocasionaram a ruptura dos trilhos. Após vários testes e ensaios nos eixos, alocando cargas cíclicas alternadas até o produto gerar uma falha. Com isso, foi possível executar e apresentar cálculo de fadiga, a tensão (S) e o número de ciclos (N). Mais tarde foi chamado de curva de Wohler (σ -N).

Segundo Callister (2008), é importante destacar outros avanços importantes, como:

- 1886- Bauschinger desenvolveu e construiu um extensômetro com espelho de sensibilidade e assim, realizou o estudo sobre a tensão-deformação inelástica, resultando no limite natural de não propensão à fadiga;
- 1903- Ewing e Humfrey descobriram linhas de deslizamento, trinca de fadiga e o crescimento até a sua ruptura;
- 1910- Basquin apresenta a lei exponencial para testes de fadiga (lei de Basquin);
- 1921- Griffith determinou o critério de falha, relacionando a fadiga ao crescimento da trinca;
- 1961- Paris divulga a lei da mecânica da fratura de Paris, para o crescimento de trincas em seu processo de fadiga;
- 1990- Ellyin e El Kadi demonstraram mais um critério de fadiga, a origem da densidade energética;
- 2004- Kawai divulga o modelo de previsão da vida em fadiga em condições de níveis positivos e negativos de stress e de direções arbitrárias.

2.2 Tipos de Fadiga

Segundo Schon (2009), existem alguns tipos de fadigas, que são descritos abaixo:

- Fadiga mecânica: Problema gerado pela resistência material, defeitos de fabricação, soldas erradas ou mesmo, erros em projetos;
- Creep-fadiga: Oriunda de tensões cíclicas e/ou térmicas que se acumulam e deformam o material em uma linha de tempo, até que a resistência do material fique prejudicada;
- Fadiga termomecânica: Combinação de fadigas mecânicas, fluência e corrosão. São ocasionadas por temperaturas externas, assim como fatores ambientais que geram a corrosão. Com isso, com carregamentos cíclicos repetitivos, os materiais ficam mais propensos a danos e fissuras.
- Fadiga de corrosão: Oxidação do material gerada pela corrosão, assim o mesmo fica mais propenso a rachaduras após a tensões cíclicas.
- Fretting-fadiga: A fricção de materiais em superfícies distintas pode gerar este tipo de fadiga. Ela é o desgaste que ocorre peça fricção em mais de uma superfície, deixando o material propenso aos danos.

2.3 Ensaios mecânicos para análise de falhas

Para a análise e estudo das falhas, são necessários ensaios padronizados e normatizados para determinar as propriedades dos materiais. Existem ensaios destrutivos e ensaios não destrutivos. O ensaio é realizado em uma amostra do material, denominado corpo de prova. (CALLISTER, 2008)

- Ensaio não destrutivo: A peça sai ileso, sem nenhuma marca, e ela está apta para o uso, esse é um ensaio do tipo não destrutivo. Normalmente são realizadas em peças acabadas. Exemplos do ensaio, como inspeção visual, ultrassom, radiografia e partículas magnéticas.

- Ensaio destrutivo: Um ensaio destrutivo impede o uso da peça. É realizado em apenas uma amostra do material. É determinante para a análise da propriedade do material. Existem os ensaios de tração, ductilidade, flexão, tenacidade à fratura e resistência à fadiga.

Para a falha de fadiga, existem alguns tipos de ensaios:

- Ensaio de fadiga por flexão rotativa: A amostra/protótipo é colocada como uma viga em flexão, e forças cíclicas de magnitude apontada são submetidas no material. O momento fletor gera tração em um lado da viga e compressão no outro lado. A rotação permite que a superfície da amostra, saia de compressão para tração cíclica, assim os ciclos são contados até o rompimento do material da amostra. (BUDYNAS; NISBET, 2011)
- Ensaio de fadiga por força normal: As amostras são submetidas a tensões axiais cíclicas, em máquinas que combinam as tensões médias e alternadas. (NORTON, 2013)
- Ensaio de flexão em vigas engastadas: Um corpo de prova engastado é submetido a tensões de flexão variantes, em um tempo determinado e em um carregamento concentrado e oscilante em suas extremidades. Com esse ensaio, é possível combinar tensões médias e alternadas. É um ensaio que não é muito utilizado. (NORTON, 2013)
- Ensaio de fadiga sob torção: As amostras são submetidas a torques alternados, e assim geram tensões de cisalhamento. São utilizados em protótipos cilíndricos para a determinação do limite de resistência. (MARQUES E AREVALOS, 2011)

Conforme (Dowling, 2007), várias amostras são analisadas, em níveis de tensão (S) diferentes e seus números de ciclos (N). O número de ciclos (N) varia de acordo com o nível de tensão (S).

2.4 Norma para o ensaio de fadiga

A norma ASTM E466-15 (*Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*) determina fatores importantes

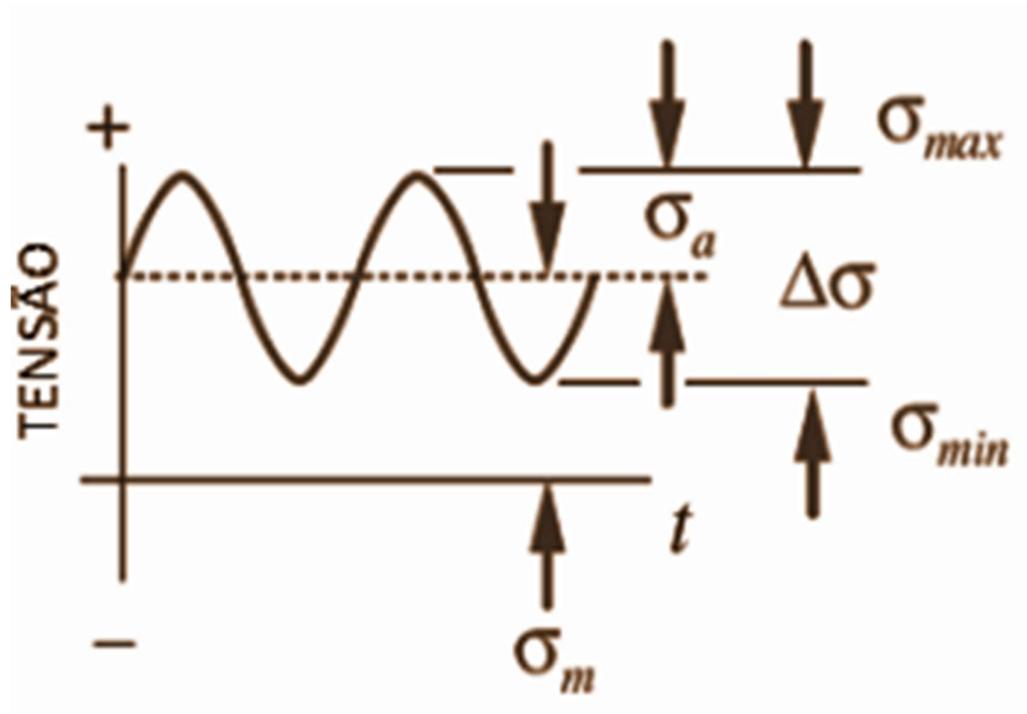
para a realização dos ensaios, assim como as delimitações técnicas para a confecção do corpo de prova. Ele deve estar em uma faixa de 5 mm a 25 mm, e o raio do corpo de prova não deve ser inferior a 8 vezes o diâmetro do corpo de prova, e o comprimento útil deve ser pelo menos 3 vezes o diâmetro menor.

2.5 Cálculos Relacionados à Fadiga

A análise numérica da fadiga é realizada por alguns métodos e cálculos, e os principais são, o método da vida sob deformação (ϵ -N) e o método da vida sob tensão (S-N).

De acordo com Norton (2013), alguns fatores determinantes são utilizados para a avaliação de carregamento cíclicos em um material, para assim realizar os ensaios de fadiga. A amplitude, valor médio da onda tensão-tempo e o total de ciclos de tensão são os fatores utilizados. Conforme figura 2, Nomenclatura ciclos de carregamento, identifica-se os termos.

Figura 2: Nomenclatura ciclos de carregamento



Fonte: Norton (2013)

Os sinais temporais são determinados pelas equações:

$$\text{Equação 1: } A = \frac{\sigma a}{\sigma m}$$

$$\text{Equação 2: } R = \frac{\sigma min}{\sigma max}$$

$$\text{Equação 3: } \sigma m = \frac{\sigma max + \sigma min}{2}$$

$$\text{Equação 4: } \sigma a = \left| \frac{\sigma max - \sigma min}{2} \right|$$

Os componentes das equações são:

σa = Amplitude da tensão;

A = Razão da amplitude;

R = Razão da tensão;

σmax = Tensão máxima;

σmin = Tensão mínima;

σm = Tensão média.

2.6 Método da vida sob deformação (\mathcal{E} -N)

O método da vida sob deformação (\mathcal{E} -N) possibilita o detalhamento do escoamento localizado. O início da trinca de fadiga pode ser decorrente de deformação plástica que iniciou em regiões de concentrações de tensões. As deformações plásticas acontecem pelo comportamento de fadiga de baixo ciclo e concentradores de tensão. Com essa análise, relaciona-se a amplitude de deformações e número de ciclos reversos (STEPHENS et al. 2001).

A equação da relação de amplitude com os ciclos é descrita abaixo:

$$\frac{\Delta \mathcal{E}}{2} \varepsilon a = \frac{\Delta \mathcal{E} e}{2} + \frac{\Delta \mathcal{E} p}{2} = \frac{\sigma f'}{E} (2Nf)^B + \varepsilon' f (2nf)^c$$

$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2}$ = Amplitude de deformação plástica

$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2}$ = Amplitude de deformação plástica

$\frac{\Delta \varepsilon}{2} \varepsilon_a$ = Amplitude total de deformação

$\varepsilon' f$ = Coeficiente de ductilidade à fadiga

c = Expoente de ductilidade à fadiga

b = Expoente de resistência à fadiga

E = Módulo de elasticidade

$2nf$ = Ciclos reversos da falha

$\sigma f'$ = Coeficiente de resistência à fadiga

A fórmula de deformação máxima, é descrita abaixo, onde podemos variar o diâmetro do corpo de prova ou o momento fletor:

$$\sigma_{max} = \left| \frac{Mx * y}{IX} \right|$$

σ_{max} = Deformação máxima

Mx = Momento fletor em x

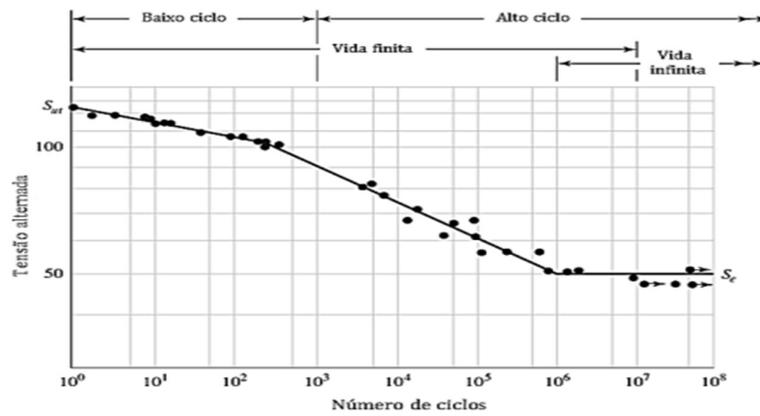
y = Raio do corpo de prova

Ix = Inércia em x

2.7 Método da vida sob tensão (S-N)

O método da vida sob tensão (S-N) tem como base as tensões nominais ajustadas pelos concentradores de tensão. Após várias tensões cíclicas um corpo de prova irá falhar. O nível de tensão (S) é que irá influenciar o número de ciclos. Isso gera a curva S-N que sempre é apresentada em formato de gráfico. A figura 3, Curva S-N, exemplifica o modelo. (DOWLING, 2007)

Figura 3: Curva S-N



Fonte: Dowling (2007)

Com isso, a seguinte equação é utilizada para as análises numéricas. Sf é o resultado da equação sobre a resistência à fadiga.

$$Sf = a.N^b$$

Sf = Resistência à fadiga;

a = Coeficiente de Sf para um ciclo;

N = Número de ciclos até a falha.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho realizou-se a construção e posteriores melhorias de uma máquina de fadiga por flexão rotativa, assim como ensaio e análise de resultados com um software computacional. A etapa 1, foi o desenho do projeto da máquina; a etapa 2, a construção da mesma; etapa 3, análise dos resultados dos ensaios; etapa 4, melhorias no equipamento construído; etapa 5, adequação normativa da máquina; e por fim, a etapa 6, ensaios e análises de resultados dos corpos de provas submetidos na máquina.

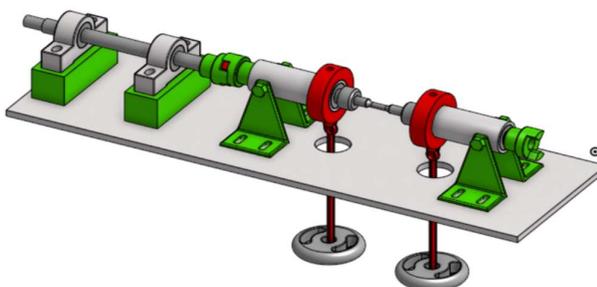
3.1 Metodologia do Projeto de Construção da Máquina

A metodologia do projeto de construção da máquina de fadiga rotativa seguiu as etapas propostas acima, iniciando com o conceito adquirido no curso de engenharia mecânica, com posterior desenho experimental da máquina e estudo de utilização dos materiais recicláveis em sua construção.

3.2 Caracterização da máquina

A máquina de fadiga rotativa é apresentada no desenho computacional da figura 4, Desenho da máquina de fadiga rotativa.

Figura 4: Desenho da Máquina de Fadiga Rotativa



Fonte: O autor

3.3 Caracterização dos componentes da máquina de fadiga rotativa

- **Dimensionamento das massas para a máquina de fadiga**

As massas utilizadas na máquina de fadiga para realizar os testes foram calculados a partir da densidade do aço 1020 é aproximadamente 7,85 gramas por centímetro cúbico (g/cm^3) ou 7850 quilogramas por metro cúbico (kg/m^3), e a matéria primas utilizada foi uma barra de aço de 156 mm de diâmetros. A fórmula utilizada foi de:

$$P=A*\rho$$

Onde:

P= Peso

A= Área do material

ρ = Densidade do aço

- **Corte serra fita das massas**

O corte utilizando uma serra fita manual é um processo de usinagem ou corte de materiais que envolve o uso de uma serra de fita, operada manualmente pelo operador. Essa ferramenta é adequada para cortar metais, plásticos e até mesmo madeira, dependendo do tipo de lâmina da serra. A figura 5, Processo corte serra fita das massas, mostra o processo.

Figura 5: Processo corte serra fita das massas



Fonte: O autor

- **Usinagem**

O processo de usinagem foi utilizado para a confecção das massas da máquina de fadiga, é um processo de fabricação que envolve a remoção de material da superfície externa da peça para criar uma forma desejada ou obter dimensões específicas. O torno é uma máquina-ferramenta rotativa que realiza esse processo por meio do movimento de corte da ferramenta de corte em relação à peça giratória. O resultado é a obtenção de peças com acabamento preciso e diâmetros controlados.

O torno convencional é de controle manual e ajustável pelo operador. Ele ajusta a velocidade de rotação da peça, a taxa de avanço da ferramenta de corte e a posição da ferramenta para realizar a usinagem. O operador é o guiador da ferramenta de corte com precisão ao longo da peça, removendo o material excessivo até obter as dimensões e o acabamento desejado. Para o cálculo da velocidade e rotação da máquina, a seguinte fórmula foi utilizada:

$$Vc = \frac{\pi * d * n}{1000} [m/min]$$

d = diâmetro da peça (mm)

n = rotação (rpm)

Para a definição da rotação de usinagem foi utilizada a tabela do torno mecânico, conforme a tabela 1, Rotação torno mecânico.

Tabela 1: Rotação torno mecânico

Tabelas Relativas à Velocidade de Corte no Torno					
Tabelas como as que se seguem, permite determinar a velocidade de corte para cada caso, conhecidos os fatores vistos anteriormente.					
Conhecida a velocidade de corte, pode-se encontrar a rotação por minuto (rpm), por cálculos ou em tabelas					
Tabela de Velocidade de Corte (Vc) para o torno (em metros por minuto)					
Materiais	Ferramenta de Aço Rápido			Ferramentas de Carboneto Metálico	
	Desbaste	Acabamento	Roscar e Recartilhar	Desbaste	Acabamento
1020 - 1030 Aço Carbono Macio	25	30	10	200	300
1045 - 1050 Aço Carbono Duro	15	20	8	120	160
1060 - 1070 Aço Carbono Extraduro	12	16	6	40	60
Ferro Fundido Maleável	20	25	8	70	85
Ferro Fundido Cinzento	15	20	8	65	95
Ferro Fundido Duro	10	15	6	30	50
Bronze	30	40	10 a 25	300	380
Latão e Bronze	40	50	10 a 25	350	400
Alumínio	60	90	15 a 35	500	700
Fibra e Ebonite	25	40	10 a 20	120	150

Fonte: Medeiros (2013)

Com o corte do material, o item foi para o setor da usinagem para usinar as peças e deixar na massa estipulada, conforme a figura 6, Usinagem do material.

Figura 6: Usinagem do material

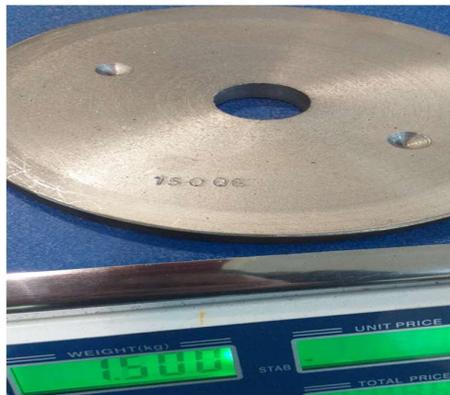


Fonte: O autor

- **Calibração das massas**

Após o processo de usinagem realizado o processo de calibração da massa este processo consiste em retirar pequenas quantidade de massas com uma furadeira de bancada, para pesar utilizado uma balança modelo, de acordo com a figura 7, Processo de Calibração de massas.

Figura 7: Processo de calibração de massas



Fonte: O autor

Após a parte estrutural da máquina, iniciou-se o processo de construção do sistema de contagem de ciclos.

3.4 *Cálculo Máquina de fadiga rotativa*

A fórmula de deformação máxima foi utilizada para a projeção da máquina de fadiga por flexão rotativa, onde o diâmetro do corpo de prova ou o momento fletor, podem ter variação, conforme tabela 2.

$$\sigma_{max} = \frac{Mx * y}{Ix}$$

Mx = Momento fletor em x

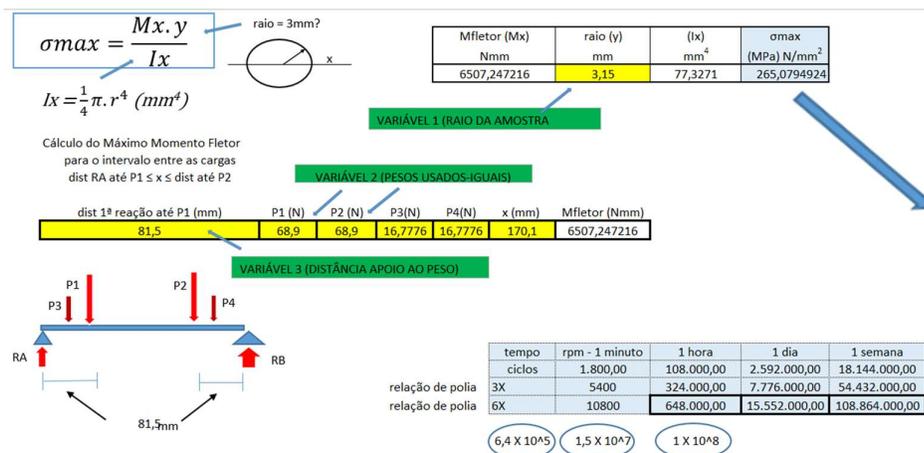
y = Raio do corpo de prova

Ix = Inércia em x

σ_{max} = Deformação máxima

Com isso, os resultados da fórmula de deformação máxima são explanados abaixo, onde resultou em σ_{max} de 265,0794924. Para o corpo de prova dos testes, foi estipulado um raio (y) mm de 6,3 mm. A tabela 2, apresenta o resultado.

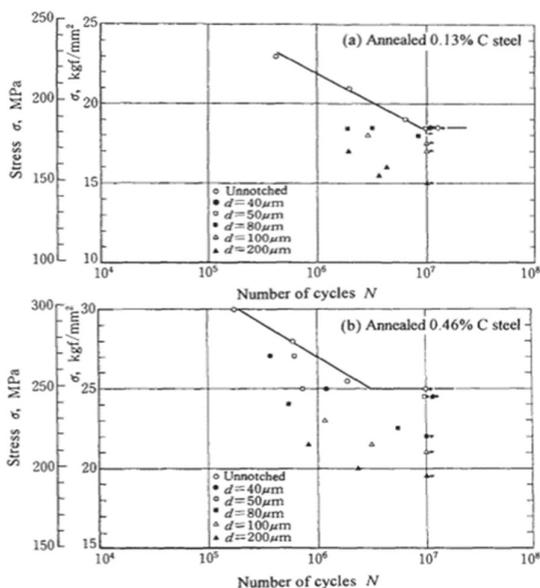
Tabela 2: Tabela cálculo deformação máxima



Fonte: O autor

Os números de ciclos (N) foram calculados com base na curva de número de ciclos, da figura 8, apresentada abaixo. Para fazer o teste de fadiga, é necessário primeiro calcular a deformação máxima. O tempo é estimado de acordo com as variações das massas, assim, quanto maior a massa, maior será a força e o momento fletor gerado, e por consequência menor será o tempo.

Figura 8: Número de Ciclos



Fonte: Dowling (2007)

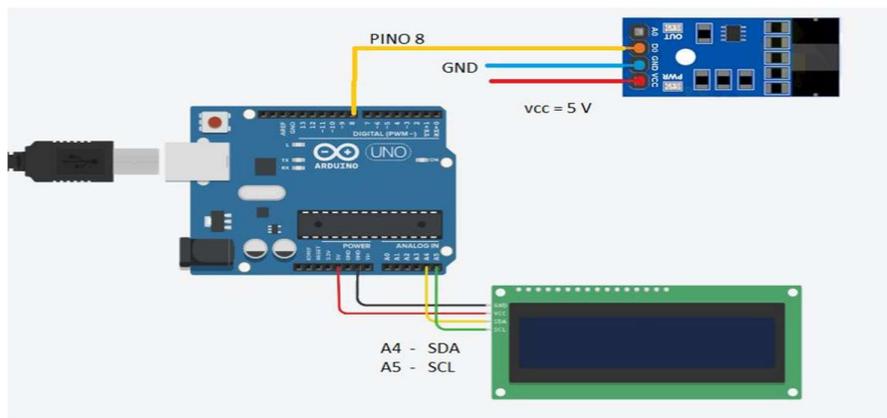
3.5 Construção do Sistema de Contagem de Ciclos

O sistema de contagem de ciclos é necessário para o funcionamento dos ensaios de fadiga. Para a contagem de ciclos da máquina de ensaio de fadiga envolve a utilização do Arduino.

- **Arduino**

O Arduino, plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto, foi utilizado para controlar e automatizar o processo de ensaio de fadiga em materiais ou componentes de fácil aplicação em projetos de pesquisa. Para a escritura do código do Arduino um tinkercad foi utilizado, conforme figura 09, Modelo Tinkercad. O anexo 2, apresenta o código do Arduino para a contagem de ciclos.

Figura 9: Tinkercad



Fonte: O autor

- **Sensor de linha infravermelho**

Os sensores de linha infravermelho geralmente são compostos por um emissor e outro receptor de infravermelho, posicionados de forma oposta em ambos os lados da máquina de ensaio de fadiga. Quando um objeto passa entre o emissor e o receptor, a luz infravermelha é interrompida, e o sensor detecta essa mudança, registrando a passagem do objeto. Nesse caso,

o objeto a ser detectado e conta um ciclo. A figura 10, Sensor de infravermelho, exemplifica o item.

Figura 10: Sensor de infravermelho



Fonte: O autor

Os sensores de linha infravermelho podem ser conectados aos pinos de entrada do Arduino, que será responsável por receber os dados dos sensores e armazenar os dados. Desenvolver o código do Arduino para ler os sinais dos sensores e contar os ciclos à medida que os marcadores passam pelo sensor. O código também pode incluir lógica para controlar outros aspectos do ensaio, e verificar se a contagem de ciclos foi atingida.

3.6 *Protótipo máquina de fadiga rotativa*

- **Bancada protótipo máquina de fadiga rotativa**

Após as etapas de concepção da estrutura da máquina, ela foi projetada e construída, em uma bancada conforme figura 11, Máquina de fadiga rotativa.

Figura 11: Máquina de fadiga rotativa

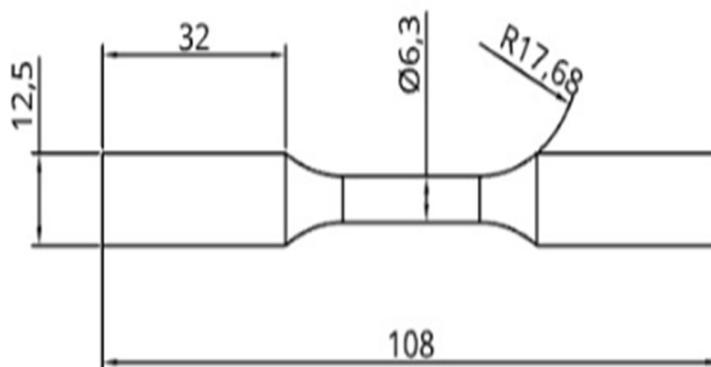


Fonte: O autor

- **Confecção do corpo de prova**

A confecção do corpo de prova, de acordo com a norma ASTM E466-15, é apresentada na figura 12 e no anexo 1 do trabalho, Desenho técnico do corpo de prova. A rugosidade da superfície do corpo de prova de ensaio de fadiga, desempenha um papel significativo no resultado do ensaio, conforme a norma ASTM E606/E606M. A rugosidade da superfície pode afetar a concentração de tensões, e assim prejudicar a vida útil do material em serviço.

Figura 12: Corpo de prova

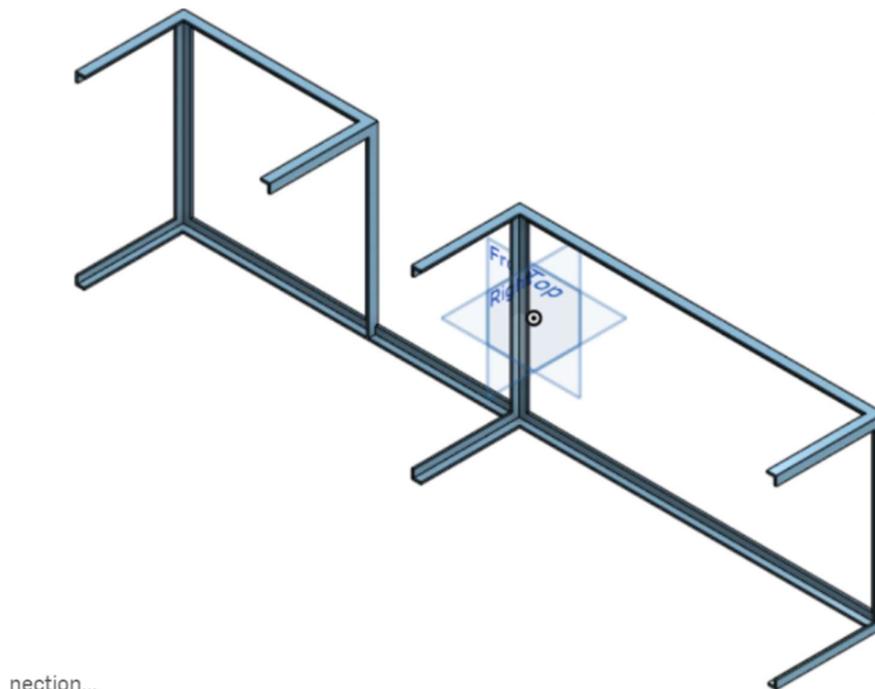


Fonte: O autor

- **Proteção da máquina de fadiga**

Para adequação de NR 12, as barras protetoras foram adicionadas na máquina de fadiga rotativa, conforme figura 13.

Figura 13: Proteção NR 12 máquina de fadiga rotativa



Fonte: O autor

- **Circuito elétrico de comando 24V**

O circuito elétrico, com um comando de 24V, onde foi utilizada uma fonte chaveada e um sistema de comando elétrico de motor de partida direta, que é apresentado na figura 14. Interessante destacar, que esse modelo contribui para uma eficiência e confiabilidade maior do sistema elétrico. Para o atendimento da NR 10 e NR 12 é necessário o comando de 24V. A fonte chaveada serve para permitir a baixa da tensão, de 380V CA para 24V CA.

Figura 14: Circuito comando 24V



Fonte: O autor

Para o acionamento do motor no modelo de partida direta, é necessária a utilização de botões (acionamentos) de emergência, contador, ligar e desligar e proteção de chave de gim de curso. Para o funcionamento de um motor trifásico de até 7CV, a partida direta é um bom recurso. O botão de emergência também é um requisito da NR 12, e serve para interromper a máquina imediatamente. A figura 15, mostra o botão de acionamento de emergência.

Figura 15: Botão acionamento de emergência



Fonte: O autor

Para proteção da máquina de fadiga, com o intuito de identificar quando a máquina de fadiga é aberta (interrompendo o teste), é utilizada a chave de fim de curso. Ela desativa o circuito elétrico instantaneamente. A figura 16, mostra o exemplo da chave de fim de curso.

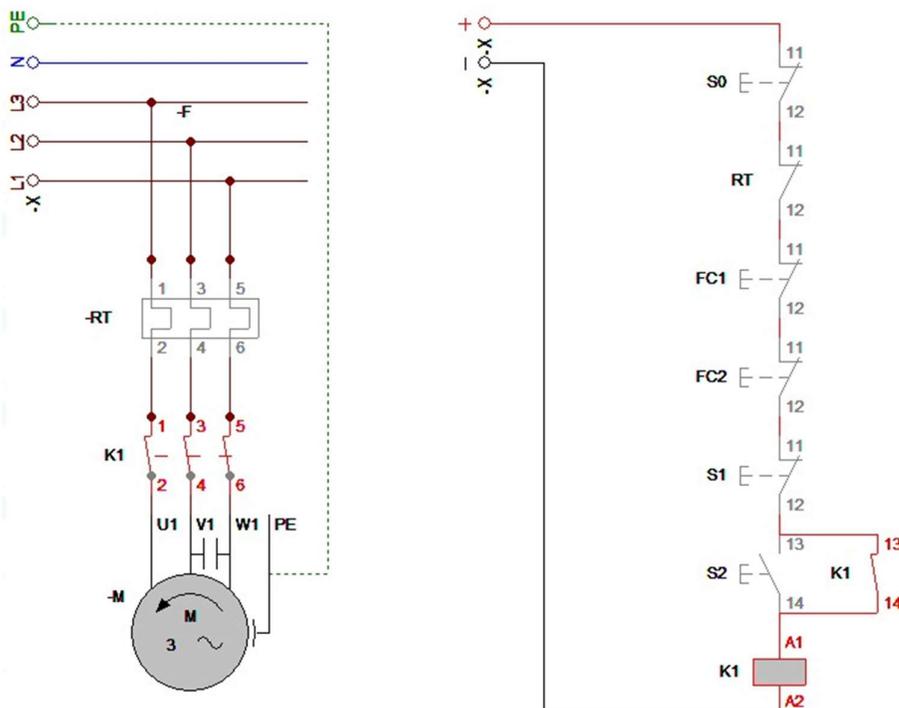
Figura 16: Chave de fim de curso



Fonte: O autor

O acionamento de desligar e ligar um motor elétrico, com segurança e controle, é feito também pelo comando de força. Geralmente utilizado para motores que exigem uma força de até 3CV. A figura 17, representa o esquema elétrico de um motor com o comando de força.

Figura 17: Esquema elétrico comando de força motor



Fonte: O autor

Os componentes do comando e força são:

B0 = Botão de emergência;

RT = Relé térmico;

FC1 = Chave fim de curso do corpo de prova;

FC2 = Chave fim de curso da tampa;

B1 = Botão desliga;

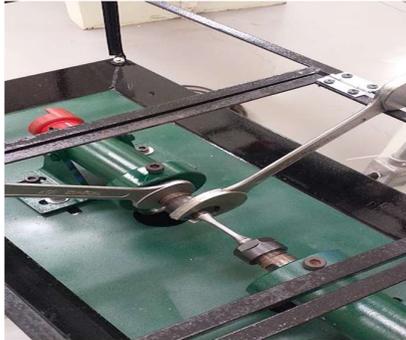
B2 = Botão liga;

K1 = Contadora.

- **Segurança do teste**

O sistema de segurança, que evita acidentes na máquina de fadiga, é apresentado na figura 18. Foi necessário realizar o aperto das pinças para fixar o corpo de prova na máquina de fadiga.

Figura 18: Sistema segurança do teste

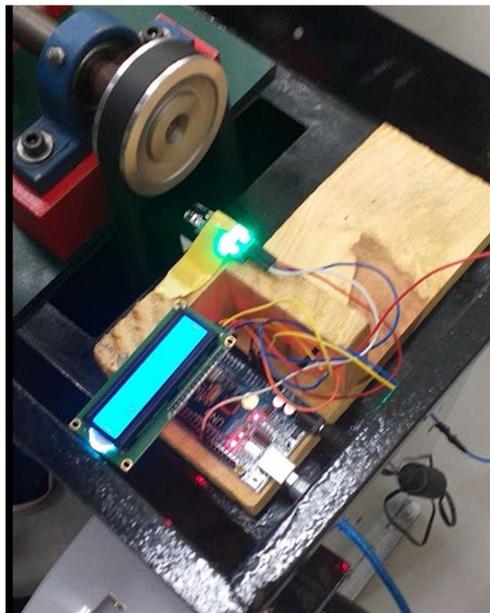


Fonte: O autor

- **Contagem dos ciclos**

O sistema automático de contagem de ciclos, figura 19, foi montado com o auxílio de um Arduino com sensor, que permite a contagem dos ciclos para a realização dos testes. Além disso, a contagem de ciclos é necessária para coleta de dados.

Figura 19: Sistema contagem ciclos



Fonte: O autor

O display foi conectado no Arduino, permitindo a exibição de informações visuais na contagem de ciclos, conforme a figura 20.

Figura 20: Display contagem de ciclos



Fonte: O autor

Um tacômetro foi instalado para a validação e calibração da contagem dos ciclos. Com o tacômetro, conforme figura 21, o sistema de contagem de ciclos resultou em 3443 rpm (em um teste), e o tacômetro apresentou o mesmo resultado, validando as especificações do equipamento.

Figura 21: Tacômetro



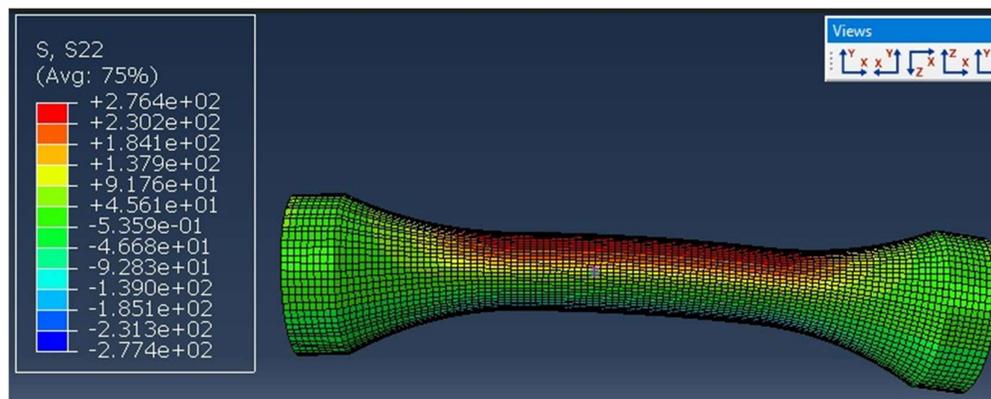
Fonte: O autor

3.7 Testes e Validação do Produto

O software ABAQUS foi utilizado para a simulação dos ensaios. A utilização correta dos elementos infinitos exige um conhecimento sólido de elementos finitos, propagação de malhas e das teorias de modelagem específicas para cada tipo de problema. Portanto, é recomendado que os usuários que desejem aplicar elementos infinitos em suas simulações no ABAQUS tenham experiência e compreensão adequada das técnicas de modelagem e das limitações associadas a essa abordagem.

Os resultados calculados foram comparados com o ABAQUS e os valores ficaram bem próximos. A figura 22, Amostragem software ABAQUS, demonstra alguns números obtidos.

Figura 22: Amostragem software ABAQUS



Fonte: O autor

Para a validação do projeto, foi utilizado o software ABAQUS com elementos infinitos, e os resultados foram comparados com cálculos realizados em uma planilha. O valor calculado no ABAQUS, com as mesmas condições de contorno da planilha, foi de 276,4 MPa, enquanto os cálculos da planilha resultaram em 265,7 MPa. Os valores obtidos estão bastante próximos, com uma diferença de apenas 10,7 MPa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após os testes e validações, o equipamento finalizado foi entregue conforme representação da figura 23, Máquina de fadiga por flexão rotativa.

Figura 23: Máquina de fadiga por flexão rotativa



Fonte: O autor

Para segurança, e permitir o desligamento automático, foram instalados sistemas de proteção de fim de curso na máquina de teste. Duas situações são possíveis para o desligamento automático, quando a tampa de acesso é aberta e quando o corpo de prova se rompe.

A instalação de um dos sistemas foi realizada na tampa de acesso e a segunda, diretamente no corpo de prova. Com isso, quando tem o rompimento do corpo de prova, automaticamente a máquina é desligada. Essa configuração e sistema de segurança operacional, consegue eliminar a necessidade de monitorar constantemente o equipamento. A figura 24, mostra as chaves de fim de curso instaladas na máquina.

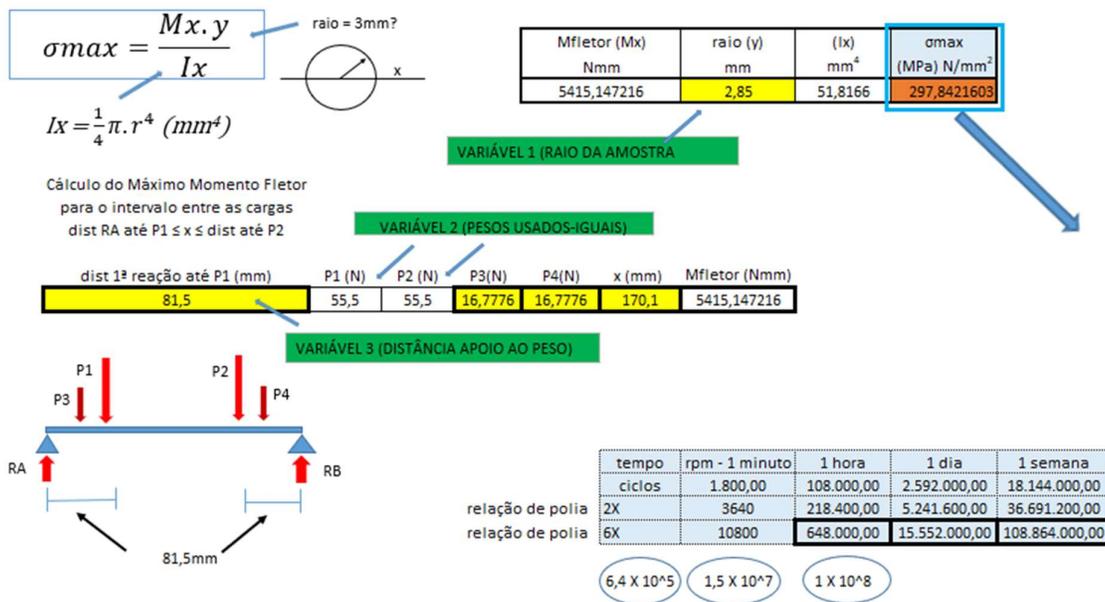
Figura 24: Chaves de fim de curso na máquina de fadiga



Fonte: O autor

Foram realizados testes em corpos de prova submetidos a vários tipos de carregamento. Na tabela 3, um carregamento de 55,5 N foi aplicado em dois pontos, totalizando 111 N, resultando em uma tensão de escoamento de 297,84 MPa.

Tabela 3: Resultado cálculo de deformação máxima no teste

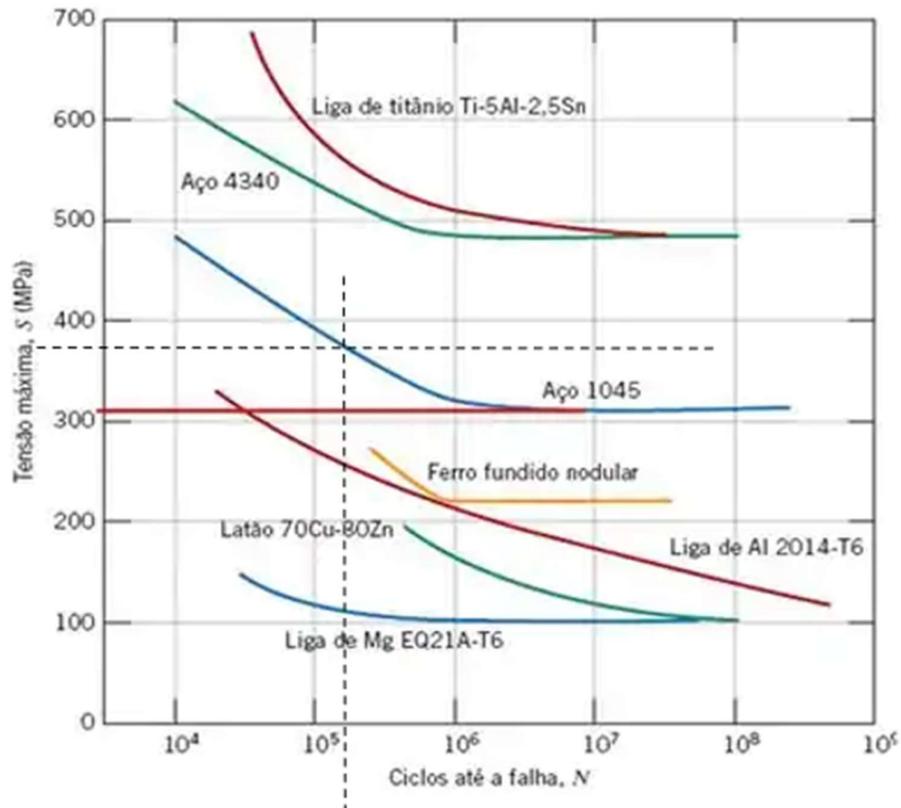


Fonte: O autor

Após os cálculos realizados e os resultados foram comparados com o gráfico da curva S-N, a máquina foi configurada corretamente. No gráfico da figura 25, os limites mínimos e

máximos estão destacados na coloração, e a linha tracejada demonstra os resultados obtidos pela máquina de fadiga.

Figura 25: Gráfico curva S-N



Fonte: Callister (2002)

Após o teste de fadiga por flexão rotativas, o resultado obtido foi de 197,282 ciclos, e assim, ele encontra-se nos limites aceitáveis da curva média de ciclos. A figura 26, mostra a contagem dos ciclos.

Figura 26: Resultado / contagem de ciclos



Fonte: O autor

Com os testes, os resultados foram compilados na tabela 4, e o aço utilizado nos testes, foi o trafilado SAE 1045.

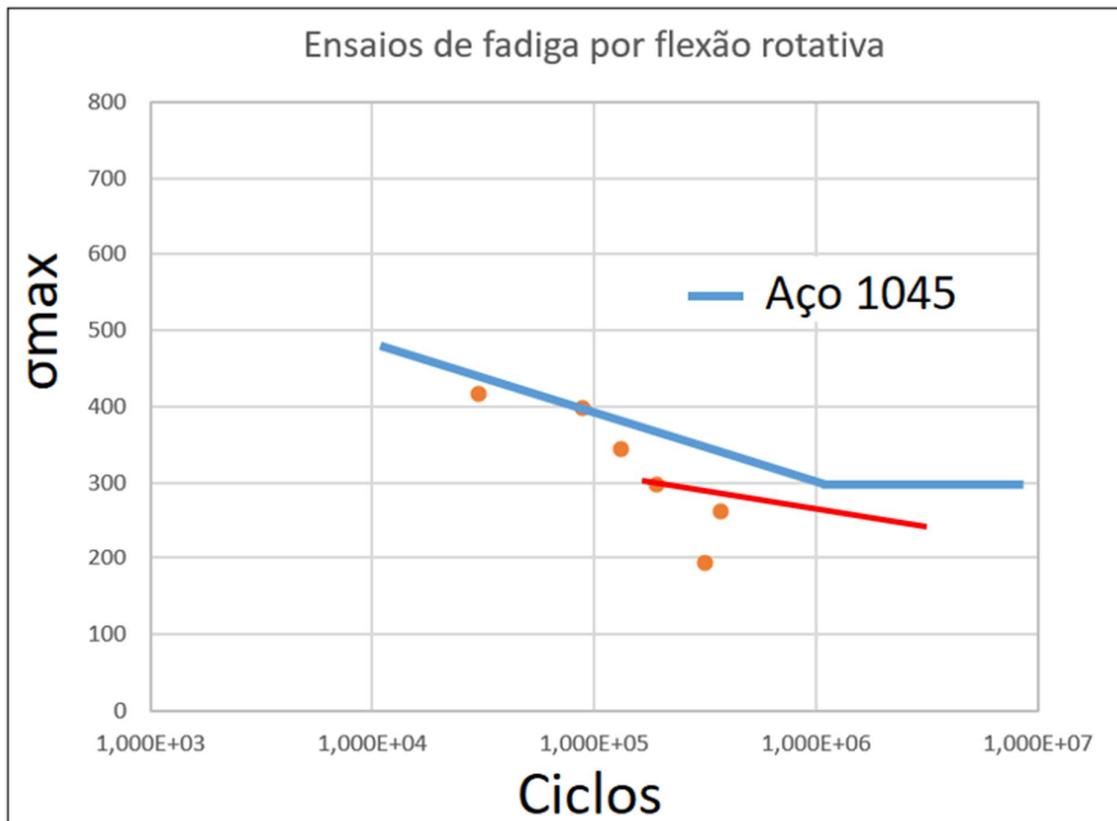
Tabela 4: Resultados compilados dos testes

Testes	Ciclos	Tempo	Carga	σ_{max}
		minutos	N	Mpa
1°	314480	93,41 + &	68,66	192,627
2°	197282	55	110,64	297,87
3°	132029	37,27	140,2	344,819

Fonte: O autor

O gráfico da figura 27. Apresenta o resultado dos testes de ensaio de fadiga por flexão rotativa.

Figura 27: Gráfico resultado do teste de fadiga



Fonte: O autor

Com o gráfico acima, foi possível concluir que a fadiga ocorre no corpo de prova em alto ciclos acima de 10.000 ciclos.

Após o ensaio de fadiga, o resultado de como o corpo de prova ficou, são apresentados nas figuras 28 e 29.

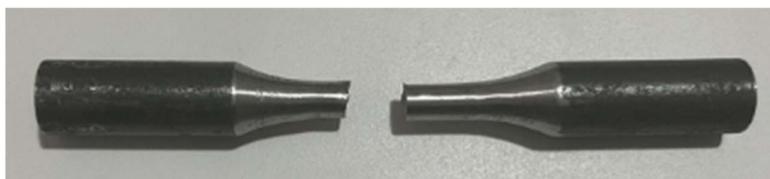
A vida infinita de fadiga, também conhecida como resistência à fadiga infinita, é um conceito teórico na engenharia de materiais e estruturas que se refere ao número infinito de ciclos de carregamento que um material pode suportar sem falhar devido à fadiga. Para o aço SAE 1045 vida infinita do material para a fadiga deve ficar abaixo de 300Mpa conforme o gráfico.

Figura 28: Corpo de prova após o ensaio 1



Fonte: O autor

Figura 29: Corpo de prova após o ensaio 2



Fonte: O autor

Conforme as figuras 28 e 29, observa-se que o mecanismo físico de fratura do corpo de prova no ensaio, no primeiro foi a nucleação da trinca e a concentração de tensões e depois ocorreu a propagação da trinca. Com isso, é possível visualizar as camadas das marcas, e por fim analisar a região catastrófica da falha do corpo de prova.

5 CONCLUSÕES

O propósito do presente trabalho, do desenvolvimento de uma máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa, foi entregue, e resultou em um custo baixo de produção, além da utilização dos conhecimentos adquiridos no curso de Engenharia Mecânica.

A própria definição da máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa, ressalta a necessidade fundamental de estudar os efeitos da fadiga nos materiais. O estudo da fadiga é importante e relevante, com o conhecimento das propriedades mecânicas, e o uso no desenvolvimento de novos projetos, escolhendo os materiais adequados e conforme a sua aplicação, capacita-nos a projetar equipamentos com maior segurança e otimização dos custos do projeto. Com a realização dos testes, é possível elaborar gráficos de curva S-N, possibilitando uma maior durabilidade dos equipamentos.

Com os materiais e os processos disponíveis no instituto, foi possível o desenvolvimento, planejamento e a construção da máquina de ensaio de fadiga. Ao longo do projeto, ajustes foram realizados nos equipamentos, de acordo com as normas vigentes. Os ensaios realizados no dispositivo, atendem os requisitos das normas, ficando nos parâmetros aceitáveis e estabelecidos no gráfico S-N. O equipamento foi projetado para realizar os ensaios de altos ciclos, permitindo a contagem de ciclos. Outro ponto importante, o equipamento entregue atendeu normas de segurança, como a NR 12, com o desligamento automático, quando o corpo de prova quebra ou com a abertura da tampa de acesso ao corpo de prova.

Algumas dificuldades foram identificadas para o desenvolvimento da máquina de fadiga, como a própria reutilização de materiais disponíveis no IFRS, com o objetivo de reduzir o custo. Outra dificuldade, foi a usinagem dos corpos de prova em uma máquina fresadora CNC, utilizando poucos recursos de materiais eletrônicos para fazer a contagem dos ciclos.

Para finalizar, como sugestão de trabalhos futuros e modernas máquinas de ensaio de fadiga rotativa, os equipamentos podem ser aprimorados com contagem de ciclos por indução, câmbio CVT para variar a rotação método mecânico, acoplação do motor diretamente no eixo do teste e inversor de frequência para variar a rotação pelo corrente verso frequência.

6 BIBLIOGRAFIA

ASTM E466-15 **Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials**. Disponível em: <https://www.astm.org/e0466-15.html>.

ASTM E606/606M **Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing**. Disp. em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/109343/ec335cb372c94867aa5db35c45578b2c/ASTM-E606-E606M-21.pdf>

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. 8. ed. [S.l.]: São Paulo, AMGH Editora, 2011.

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

DOWLING, N. E. **Mechanical behavior of materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue**. 3.ed. New Jersey: Prentice Hall, 2007.

ELLWANGER, G.B. **Tecnologias de materiais**. Coppe. UFRJ, Rio de Janeiro, 2009. –

MARQUES, F.C.S; AREVALOS, R.M. **Modernização da máquina de fadiga por flexão rotativa do laboratório de ensaio de materiais**. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 2011.

NORTON, R.L. **Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre, Bookman, 2013

ROSA, E. **Análise de Resistência mecânica**. 1st ed. UFSC, Santa Catarina, 2002. Artigo

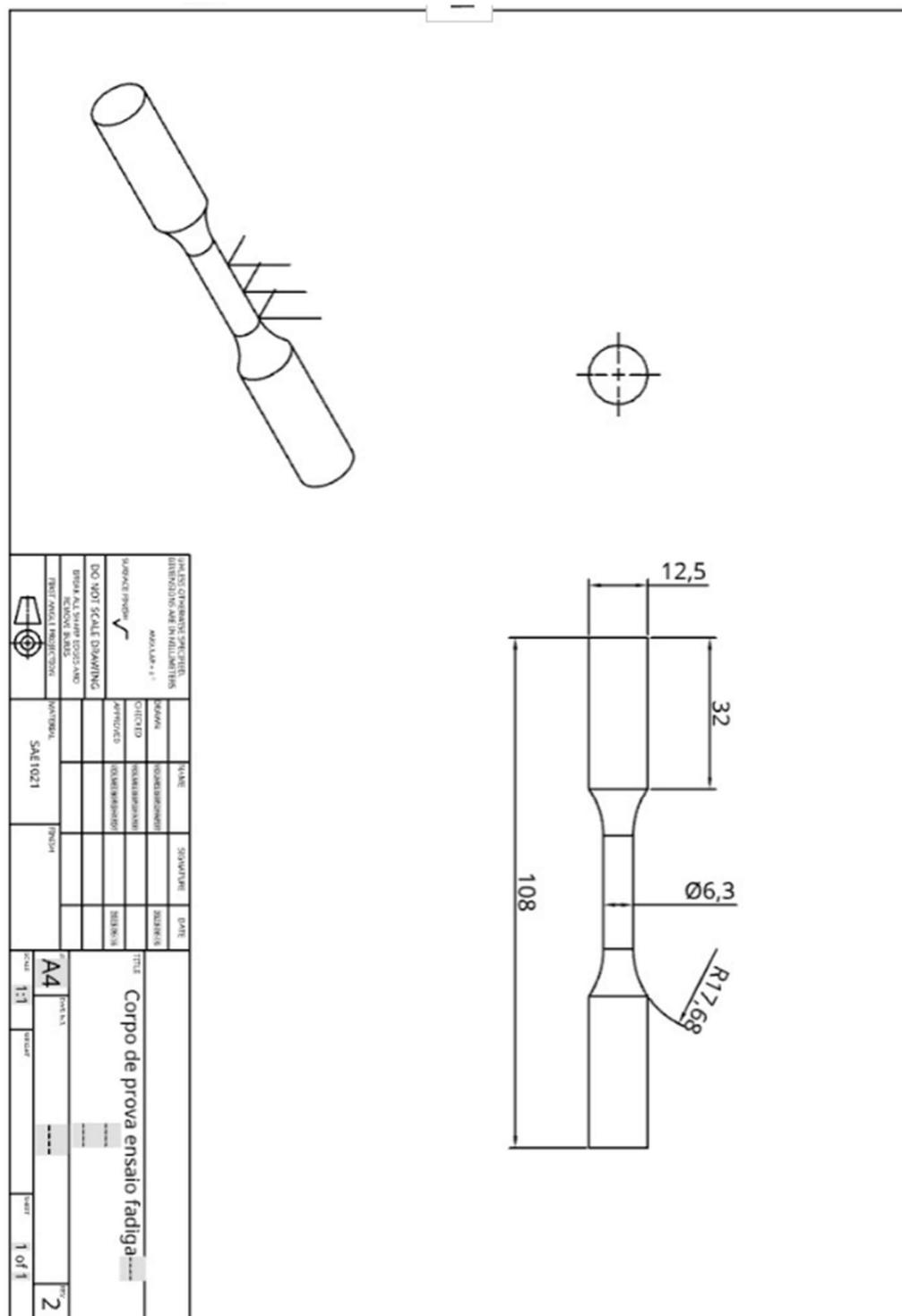
SCHON, C.G. **Mecânica dos materiais**. USP, São Paulo, 2009.

SILVA, José Almir. **Efeito de dano acumulado sobre propagação de trincas em alumínio.** Al T3. 2004. 94f. Dissertação de mestrado profissional – Universidade de Taubaté, Taubaté.

STEPHENS, R. I. et al. **Metal Fatigue in Engineering.** 2. ed. United States of America: Wiley-Interscience, 2001.

Yetim, A., Kovacı, H., Uzun, Y., Tekdir, H., & Çelik, A. (2023). **A comprehensive study on the fatigue properties of duplex surface treated.** Surfafe and Coatings Technology, 2023.

Anexo 1: Desenho técnico corpo de prova



Fonte: O autor

Anexo 2: Código de contagem de ciclos do arduino

```

#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Wire.h>
#define sensor 9
unsigned long ciclo = 0;
bool L_sensor = 1;
bool LA_sensor = 1;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
void setup() {
  pinMode(sensor, INPUT);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Pronto para começar");
}
void loop() {
  L_sensor = digitalRead(sensor);
  if (L_sensor == 1 && LA_sensor == 1) {
    Serial.println("voltas: " + String(ciclo++));
    LA_sensor = 0;
    ciclo++;
    lcd.setCursor(1, 0);
    lcd.print("Maquina fadiga");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("ciclos:");
    lcd.print(ciclo++);
  }
  if (L_sensor == 0 && LA_sensor == 0) {
    LA_sensor = 1;
  }
  delayMicroseconds(15);
}

```

Fonte: O autor

