



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA

GERHARD JAHN FERREIRA

**ANÁLISE DO TEMPO DE VIDA EM FADIGA DE HASTES DE
SISTEMAS DE FIXAÇÃO DE COLUNA VERTEBRAL - TEÓRICO E
EXPERIMENTAL**

FLORIANÓPOLIS, 2021



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA

GERHARD JAHN FERREIRA

**ANÁLISE DO TEMPO DE VIDA EM FADIGA DE HASTES DE
SISTEMAS DE FIXAÇÃO DE COLUNA VERTEBRAL - TEÓRICO E
EXPERIMENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de engenheiro mecatrônico.

Orientadora:
Profa. Dra. Daniela Águida Bento Dallacosta

FLORIANÓPOLIS, 2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Ferreira, Gerhard Jahn

ANÁLISE DO TEMPO DE VIDA EM FADIGA DE HASTES DE SISTEMAS DE FIXAÇÃO DE COLUNA VERTEBRAL - TEÓRICO E EXPERIMENTAL

/ Gerhard Jahn Ferreira ; orientação de Daniela Águida Bento Dallacosta. - Florianópolis, SC, 2021.

59 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Mecatrônica. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. Inclui Referências.

1. Biomecânica. 2. Fadiga. 3. Implantes. I. Dallacosta, Daniela Águida Bento. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. III. Título.

ANÁLISE DO TEMPO DE VIDA EM FADIGA DE HASTES DE SISTEMAS DE FIXAÇÃO DE COLUNA VERTEBRAL - TEÓRICO E EXPERIMENTAL

GERHARD JAHN FERREIRA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Mecatrônico e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 9 de abril, 2021.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Daniela Águida Bento Dallacosta - Orientadora

Prof. Dr. André Roberto de Sousa

Fábio Luiz Rodrigues da Silva, M. Eng.

Dedico este trabalho a Deus, que é o Senhor do Universo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Senhor Deus, Ele que é o princípio e o fim de todas as coisas, glória somente a Ele.

Aos meus pais, que nunca mediram esforços para expressar seu amor e cuidado, me permitindo realizar sonhos e descobrir o verdadeiro sentido da vida. Devo minha vida à minha família.

Ao meu irmão e sua esposa, que pela amizade e companheirismo me trouxeram conforto nos momentos difíceis.

A minha orientadora, seu suporte e incentivo me permitiram estruturar minha carreira profissional.

Aos meus colegas da SCiTec, que me auxiliaram no desenvolvimento deste projeto.

Agradeço aos meus colegas de graduação, que de alguma forma tornaram essa jornada mais leve, cooperando para a realização deste projeto.

E por fim agradeço ao IFSC e seu corpo docente, que por todos os ensinamentos me permitiram chegar até aqui.

RESUMO

Os sistemas de fixação da coluna são dispositivos ortopédicos utilizados para promover a estabilização e/ou alinhamento de determinados segmentos da coluna vertebral. Desta forma, estes componentes são submetidos ao carregamento mecânico proveniente dos esforços biomecânicos da região em que atuam. Embora estes dispositivos ortopédicos, assim como todos os demais implantes, sejam avaliados quanto à sua segurança e eficácia através de diversos ensaios e análises estabelecidos por normas técnicas, observa-se a ocorrência de falhas por deformação mecânica ou fratura por fadiga após sua inserção. O objetivo deste trabalho é avaliar o tempo de vida em fadiga (número de ciclos) das hastes de sustentação de sistemas de fixação da coluna através da comparação de resultados que serão obtidos por métodos experimentais e por métodos analíticos, baseados nas teorias de falha por fadiga em metais. Portanto, poderá ser verificado a variação da resistência mecânica à fadiga deste componente de acordo com a variação de diâmetro da haste. As condições de carregamento representarão os esforços biomecânicos das regiões de implantação (lombar e cervical) e, também, as cargas utilizadas em testes mecânicos estabelecidas pelas Normas Técnicas ASTM F2193 e ASTM F1717. Os resultados obtidos pelas teorias de falha serão comparados a resultados provenientes de ensaios mecânicos e com registros de falhas publicados em artigos.

Palavras-chave: Biomecânica. Fadiga. Implantes.

ABSTRACT

Spinal correction systems are orthopedic devices used to promote the stabilization and / or alignment of certain segments of the spine. In this way, these components are processed by the mechanic from the biomechanical efforts of the region in which they operate. Although these orthopedic devices, as well as all other implants, are taken for their safety and effectiveness through various tests and analyzes by technical standards, it is observed the occurrence of failures due to mechanical deformation or fatigue fracture after their insertion. The objective of the work is to evaluate the lifespan of this fatigue (number of cycles) of the accelerations of support of spine correction systems through the comparison of results that will be obtained by experimental methods and by analytical methods, based on fatigue failure theories. in metals. In this way, the variation in the mechanical resistance to fatigue of this component can be verified according to the variation in the diameter of the stem. The loading conditions represent the biomechanical efforts of the implantation regions (lumbar and cervical) and, also, the loads used in common mechanical tests by Technical Standards ASTM F2193 and ASTM F17171. The results obtained by the failure theories will be compared to results from mechanical tests and with failure records published in articles.

Keywords: Biomechanics. Fatigue. Implants.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Espaçador de coluna vertebral	2
Figura 2 - Prótese de ombro	3
Figura 3 - Sistema de fixação de coluna	4
Figura 4 - Diagrama S-N para materiais com vida infinita	8
Figura 5 - Superfície característica de uma fratura por fadiga	9
Figura 6 - Tensões cíclicas pulsante, variada e alternada	9
Figura 7 - Diagrama de fadiga para os critérios de falha	10
Figura 8 - Critérios de falha	11
Figura 9 - Máquina servo-hidráulica Brasválvulas	12
Figura 10 - Controle PID	14
Figura 11 - Configuração de montagem do dispositivo de ensaio	18
Figura 12 - Corpo de prova antes do ensaio	19
Figura 13 - Servo-controlador hidráulico ODIN1401	20
Figura 14 - Especificações do atuador hidráulico	21
Figura 15 - Configuração do critério de parada por número de ciclos	21
Figura 16 - Configuração do critério de parada por ruptura	22
Figura 17 - Ajuste PID da curva	24
Figura 18 - Aplicação da força em sistema de coluna	24
Figura 19 - Tensão variada	26
Figura 20 - Parâmetros para o fator de modificação de superfície	29
Figura 21 - Parâmetros para o fator de temperatura	30
Figura 22 - Parâmetros para o fator de confiabilidade	30
Figura 23 - Fração da resistência à tração	31
Figura 24 - Regressão linear dos dados de ensaio	34
Figura 25 - Corpo de prova 1 ruptura da haste	35
Figura 26 - Corpo de prova 2 número de ciclos	35
Figura 27 - Corpo de prova 3 ruptura da haste	36
Figura 28 - Corpo de prova 4 ruptura da haste	36
Figura 29 - Corpo de prova 5 número de ciclos	37
Figura 30 - Corpo de prova 6 número de ciclos	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação da amostra	17
Tabela 2 - Resultado da força no limite de resistência	19
Tabela 3 - Valores máximos e mínimos configurados	23
Tabela 4 - Resultados calculados	32
Tabela 5 - Resultados experimentais	34
Tabela 6 - Aplicação dos critérios de falha para $F=77,9N$	38
Tabela 7 - Aplicação dos critérios de falha para $F=97,4N$	38
Tabela 8 - Aplicação dos critérios de falha para $F=116,8N$	38
Tabela 9 - Relação dos resultados experimentais e teóricos	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IFSC - Instituto Federal de Santa Catarina

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

ANS - Agência Nacional de Saúde

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

NT - Norma Técnica

UHMWPE - *Ultra High Molecular Weight Polyethylene*

PID - Proporcional Integral Derivativo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização	1
1.1.1. A biomecânica	1
1.1.2. Sistema de fixação de coluna	3
1.1.3. Acreditação e normas técnicas	4
1.1.4. O laboratório	5
1.1.5. Definição do problema	5
1.2. Justificativa	6
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivo geral	6
1.3.2. Objetivo específico	6
2. DESENVOLVIMENTO	7
2.1. Fundamentação Teórica	7
2.1.1. Fadiga	7
2.1.2. Mecanismo da falha por fadiga	8
2.1.3. Carregamento cíclico	9
2.1.4. Critério de falha por fadiga	10
2.1.5. Ensaio mecânicos	11
2.1.6. Transdutor de força	12
2.1.7. Servo-controlador hidráulico - ODIN1401	13
2.1.8. Sistema de aquisição de dados - ATMP	13
2.1.9. Controle PID	14
2.2. Metodologia	15
2.2.1. Análise experimental	16
2.2.1.1. <i>Interpretação da norma técnica</i>	16

<i>2.2.1.2. Preparação dos corpos de prova</i>	16
<i>2.2.1.3. Procedimento de ensaio</i>	19
<i>2.2.1.4. Acionamento e controle do ensaio</i>	20
2.2.2. Análise teórica	24
<i>2.2.2.1. Aplicação dos critérios de falha</i>	32
2.2.3. Análise dos resultados	33
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
4. REFERÊNCIAS	42
APÊNDICES	45
APÊNDICE A - Propriedades mecânicas de algumas ligas de titânio	46

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

1.1.1. A biomecânica

A biomecânica é um campo de estudo, dentro da área da saúde e engenharias, que analisa os efeitos das forças atuantes sobre o corpo humano (PANJABI; WHITE, 2001). Assim como um componente mecânico industrial, os sistemas orgânicos, como articulações, também estão sujeitos a ação de carregamentos mecânicos, ou biomecânicos, podendo resultar na falha desses sistemas, limitando ou até impedindo o movimento realizado pelo corpo. Visando melhorar a qualidade de vida das pessoas, a área da Engenharia Biomecânica vem desenvolvendo produtos ortopédicos que tem por objetivo corrigir ou substituir os sistemas danificados do corpo, através da utilização de implantes e próteses.

Implantes podem ser entendidos como dispositivos ou tecidos inseridos dentro ou sobre a superfície do corpo humano, de modo a atuar como parte integrante do sistema orgânico. Implantes de coluna vertebral, como é o exemplo de espaçadores de coluna, possuem a função de unir as vértebras, com intuito de evitar o movimento entre elas quando o disco vertebral está danificado, sem que haja a necessidade de efetuar a substituição propriamente dita do elemento ósseo, como ilustra a Figura 1.

Figura 1 - Espaçador de coluna vertebral



Fonte: Medical Expo, 2021.

As próteses, no entanto, são dispositivos capazes de substituir, completa ou parcialmente, um sistema do corpo humano, como por exemplo as próteses de ombro, exemplificadas na Figura 2. A fabricação desses dispositivos se torna mais complexa se comparado a fabricação de implantes, por geralmente se tratar de elementos de maior dimensão, liberdade de movimento e sofrerem maior carregamento mecânico e concentração de tensões.

Figura 2 - Prótese de ombro

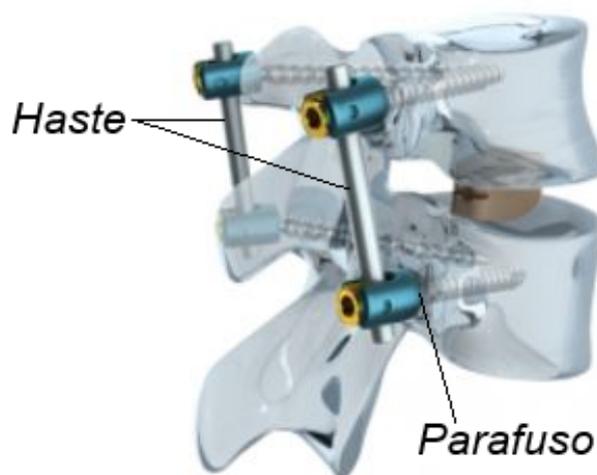


Fonte: Márcio Schiefer, 2021.

1.1.2. Sistema de fixação de coluna

Para realizar a estabilização ou alinhamento de segmentos da coluna vertebral, onde há falha, são utilizados sistemas de fixação de coluna, ou simplesmente implantes de coluna. Uma das opções de implantes para aplicações na coluna lombar é um conjunto de sistema de coluna bilateral. O conjunto, ilustrado na Figura 3, é geralmente composto de duas hastes prismáticas, quatro parafusos pediculares poliaxiais ou fixos, quatro contra-parafusos com anel e, em alguns casos, um *crosslink*, componente utilizado para aumentar a rigidez do conjunto. O material de fabricação do implante consiste em uma liga titânio Ti 6Al-4V, com suas propriedades devidamente descritas na norma técnica ASTM F136.

Figura 3 - Sistema de fixação de coluna



Fonte: Adaptado de Cirurgia da Coluna, 2020.

A inserção do implante consiste em fixar os parafusos nos segmentos vertebrais, considerando as restrições estruturais de cada indivíduo. A utilização de parafusos pediculares poliaxiais tende a facilitar o aperto e ajuste durante os procedimentos cirúrgicos, pelos graus de liberdade que ele proporciona. Apesar dos parafusos sofrerem concentrações de tensão, as hastes são responsáveis por receber quase que a totalidade do carregamento por meio da flexão do sistema, como será melhor discutido nos resultados experimentais.

1.1.3. Acreditação e normas técnicas

A fim de entregar um desempenho muito semelhante aos elementos orgânicos naturais, os dispositivos atuantes nessas correções do corpo humano são submetidos a testes, análises e ensaios. A garantia da confiabilidade e eficácia dos produtos a serem comercializados se dá por meio da validação e certificação dos mesmos, por meio de ensaios definidos por normas técnicas, realizados por laboratórios acreditados por um órgão oficial reconhecido nacional e internacionalmente, como o órgão nacional INMETRO. Essa acreditação (credenciamento) é o reconhecimento formal de que o laboratório está operando com sistema de qualidade documentado e tecnicamente competente segundo critérios estabelecidos por normas internacionais (INMETRO, 2012).

Uma norma técnica é um documento que estabelece diretrizes, regras e/ou características de um determinado material, produto, processo ou serviço. Estes documentos são produzidos por um órgão oficial acreditado, sendo que para este projeto foram utilizadas as normas ASTM F1717, ASTM F2193 e ASTM F136. As normas F1717 e F2193 definem padrões para certificação de sistemas de fixação de coluna, sendo a norma F1717 voltada para o sistema como um todo, enquanto que a norma F2193 lida com os componentes isolados do implante. A norma F136 estabelece as características da liga de titânio Ti 6Al-4VO, com parâmetros como tensão de escoamento e limite de tensão, utilizados em cálculos para análise do comportamento do material mediante aplicação de uma carga conhecida.

1.1.4. O laboratório

Dentro deste contexto, atua o laboratório SCiTec, parceiro deste projeto. Há mais de 20 anos atuando na área, o laboratório SCiTec, localizado em Palhoça, Santa Catarina, realiza ensaios, testes e certificações de produtos dos mais diversos tipos. Com essa parceria foi possível realizar o estudo experimental do projeto, contando com o acesso a dispositivos de ensaio, maquinário, normas técnicas e corpo técnico, que auxiliaram na manutenção e preparação das máquinas.

A etapa experimental deste trabalho foi realizada fazendo uso da infraestrutura do laboratório, e tendo em vista os termos de sigilo comercial, parte dos resultados e imagens não foram divulgadas no presente trabalho, para respeitar o termo assinado.

1.1.5. Definição do problema

Os implantes de coluna, quando fixados na região em que irão atuar, são submetidos a esforços biomecânicos capazes de gerar estados de tensão e deformações capazes de promover falhas estáticas ou por fadiga. O objetivo deste trabalho é verificar o comportamento de falha por fadiga nas hastes destes sistemas, através de uma comparação entre resultados obtidos em ensaios normalizados e da análise através da aplicação de teorias de falhas por fadiga.

1.2. Justificativa

Para este projeto tem-se como proposta complementar os estudos experimentais e contribuir para um melhor entendimento do comportamento mecânico de sistemas de fixação de coluna, em diferentes condições de carregamento: carregamento biomecânico e carregamento utilizados em ensaios mecânicos orientados por normas técnicas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Verificar os resultados de predição do tempo em fadiga de hastes de sustentação de sistemas de coluna, através da comparação dos resultados da aplicação da teorias de falha por fadiga com resultados experimentais das normas técnicas ASTM F2193 e ASTM F1717.

1.3.2. Objetivo específico

Descrever e representar o carregamento mecânico sofrido pela haste de acordo com o carregamento biológico e com as normas técnicas utilizadas em ensaios experimentais.

Acompanhar procedimentos de ensaios em sistemas de fixação de coluna através da NT ASTM F1717.

Calcular a vida em fadiga de acordo com as teorias de falha selecionadas, variando o tipo de carregamento e o diâmetro da haste.

Comparar resultados obtidos com resultados experimentais provenientes de relatórios técnicos e casos de falhas relatados na literatura técnica, através de gráficos e planilhas.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Fundamentação Teórica

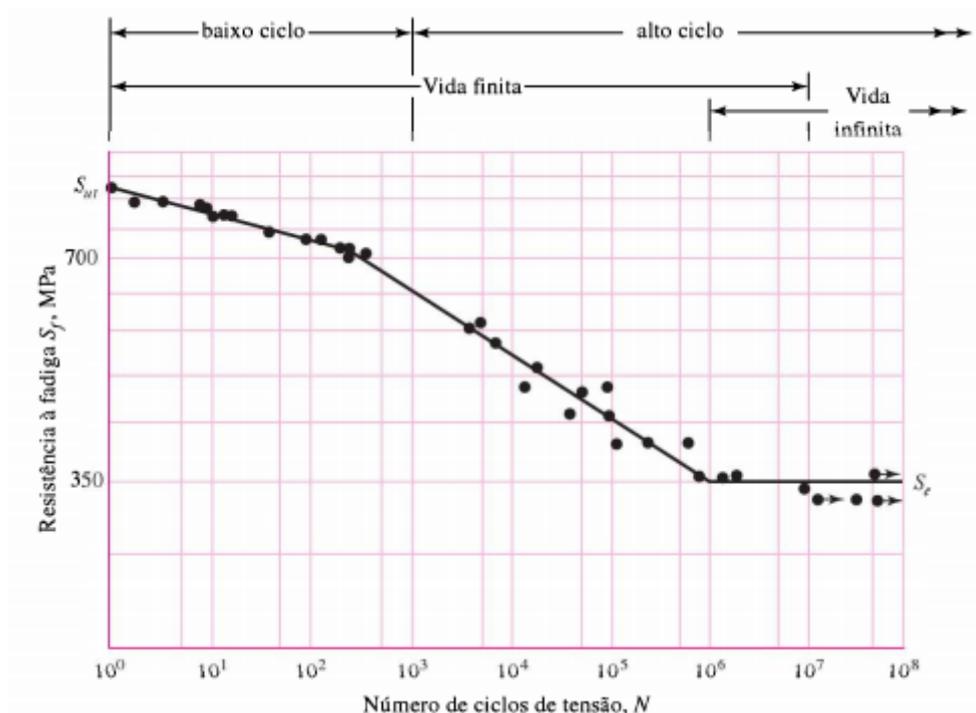
2.1.1. Fadiga

O termo fadiga pode ser definido como um fenômeno de ruptura que altera a estrutura do material de forma localizada, progressiva e irreversível, por consequência de um carregamento cíclico, que pode gerar a formação e propagação de trincas ou fissuras, levando a ruptura do material após determinado número de ciclos. Segundo Edison da Rosa (2002), este fenômeno pode ser definido da seguinte forma:

A fadiga é uma redução gradual da capacidade de carga do componente, pela ruptura lenta do material, consequência do avanço quase infinitesimal das fissuras que se formam no seu interior. Este crescimento ocorre para cada flutuação do estado de tensões. As cargas variáveis, sejam cíclicas ou não, fazem com que, ao menos em alguns pontos, tenhamos deformações plásticas também variáveis com o tempo. Estas deformações levam o material a uma deterioração progressiva, dando origem à trinca, a qual cresce até atingir um tamanho crítico, suficiente para a ruptura final, em geral brusca, apresentando características macroscópicas de uma fratura frágil.

A Figura 4 ilustra o diagrama S-N, ele representa a variação de resistência mecânica (S) em função do número de ciclos (N). Este diagrama é típico de muitos aços-liga e de baixo carbono, alguns aços inoxidáveis, ferros, ligas de molibdênio, ligas de titânio e alguns polímeros. Observe que a resistência à fadiga S decai contínua e linearmente (em coordenadas log-log) em função de N, até atingir uma inflexão por volta do intervalo entre 10^6 e 10^7 ciclos. Essa inflexão define o limite de fadiga (S_e) para o material (SHIGLEY, 2011).

Figura 4 - Diagrama S-N para materiais com vida infinita

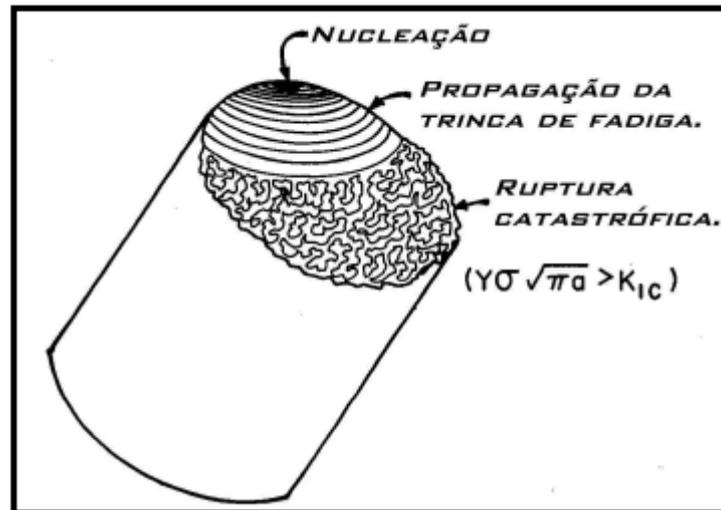


Fonte: Shigley, 2011.

2.1.2. Mecanismo da falha por fadiga

A Figura 5 ilustra a análise superficial da fratura de um componente que falhou pelo fenômeno da fadiga. A falha por fadiga tem uma aparência muito semelhante a uma fratura frágil, considerando que as superfícies, onde ocorreu a falha, são planas e perpendiculares ao eixo de tensão. No entanto, o processo de falha por fadiga se difere em muito de uma falha frágil por carregamento estático, pela sequência de estágios em que ela ocorre. O primeiro estágio da falha por fadiga é o surgimento de uma ou mais microtrincas em um determinado ponto, fruto da deformação plástica. O segundo estágio é o ponto de progressão das microtrincas formadas no primeiro estágio, essa região é comumente chamada de “marcas de praia”, em virtude do aspecto ondulado da propagação. É no terceiro estágio que o material remanescente não consegue suportar as cargas, resultando numa fratura rápida e repentina.

Figura 5 - Superfície característica de uma fratura por fadiga

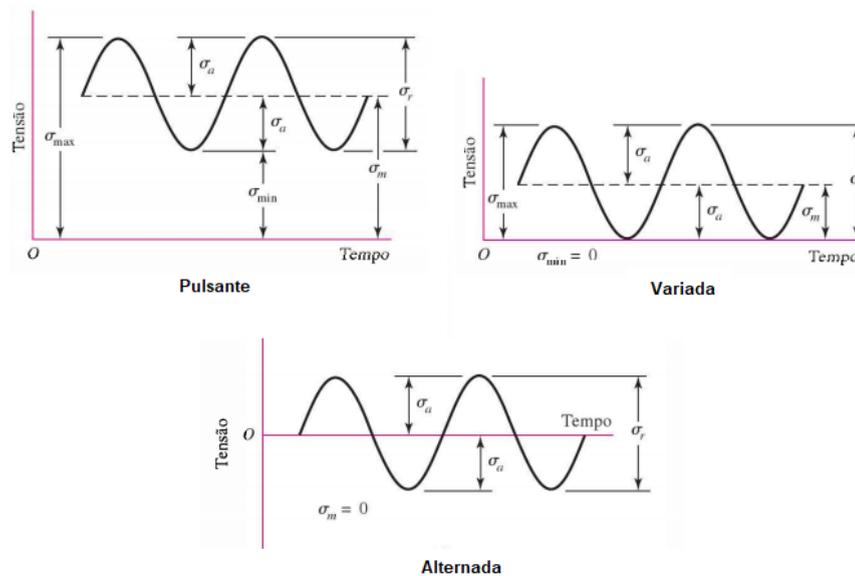


Fonte: Laboratório de Materiais do Centro Universitário da FEI, 2001.

2.1.3. Carregamento cíclico

Segundo Shigley (2011) as tensões flutuantes em máquinas rotativas frequentemente assumem a forma de um padrão senoidal. Na Figura 6 é apresentada três tipos de tensões em máquinas rotativas: pulsante, variada e alternada.

Figura 6 - Tensões cíclicas pulsante, variada e alternada



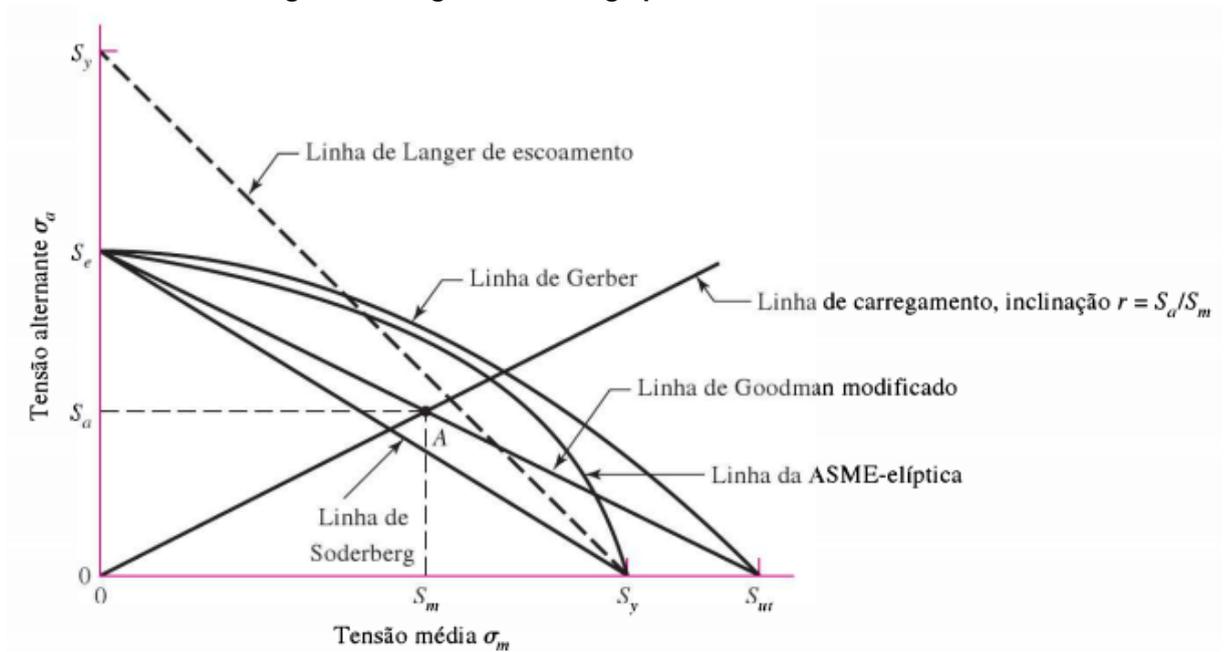
Fonte: Shigley, 2011.

Para tensões pulsantes todas as componentes possuem valor diferente de zero, na tensão variada o valor varia de zero até um valor de tensão máxima, e para tensões alternadas o valor da tensão média é igual a zero.

2.1.4. Critério de falha por fadiga

Para fins de análise e projeto pode-se levar em consideração o diagrama mostrado na Figura 7, onde é estabelecida uma relação de quatro teorias visando determinar a resistência à fadiga, indicando pontos da falha: Soderberg, Goodman modificada, Gerber e ASME-elíptica.

Figura 7 - Diagrama de fadiga para os critérios de falha



Fonte: Shigley, 2011.

As quatro teorias são expressas segundo as equações mostradas na Figura 8, obtendo o fator de segurança a partir da relação de tensões conhecidas: σ_a = tensão alternante; σ_m = tensão média; S_y = tensão limite de escoamento; S_e = tensão limite de resistência à fadiga; S_{ut} = tensão limite de resistência à tração; n = fator de segurança.

Figura 8 - Critérios de falha

Soderberg	$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n}$
Goodman modificada	$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$
Gerber	$\frac{n\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{n\sigma_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1$
ASME-elíptica	$\left(\frac{n\sigma_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{n\sigma_m}{S_y}\right)^2 = 1$

Fonte: Shigley, 2011.

2.1.5. Ensaio mecânicos

Os ensaios mecânicos são ferramentas importantes para o estudo das características dos materiais, eles permitem colher informações sobre o comportamento de materiais e/ou componentes quando submetidos a carregamentos mecânicos. A execução de ensaios mecânicos é realizada através da utilização de dispositivos específicos. Para ensaios de impacto, por exemplo, geralmente são utilizados sistemas de pêndulo, a fim de obter a resistência ao impacto de um componente ou material. Ensaio de tração, compressão, flexão e cisalhamento são comumente executados utilizando máquinas servo-hidráulicas, como mostrada na Figura 9. O princípio de funcionamento dessas máquinas servo-hidráulicas consiste na utilização de atuadores hidráulicos, sistemas capazes de multiplicar forças com um controle preciso de posicionamento ao longo do seu curso de atuação.

Figura 9 - Máquina servo-hidráulica Brasválvulas



Fonte: Brasválvulas, 2020.

Um ensaio de vida em fadiga consiste em aplicar uma carga cíclica sobre um corpo de prova, considerando uma taxa do valor de ruptura do carregamento estático. Como resultado, espera-se obter o número de ciclos em que o produto avaliado suportou sob ação da carga aplicada. Através do número de ciclos em que houve a falha é possível determinar se o material possui ou não vida em fadiga infinita, considerando o valor estabelecido pela norma relacionada ao produto ensaiado.

2.1.6. Transdutor de força

Um transdutor de força é um tipo de sensor capaz de medir as forças de tração e compressão atuantes sobre ele, de forma que é gerado um sinal elétrico proporcional à magnitude da carga mecânica. Segundo a Mecânica Industrial, um transdutor de força pode ser definido como:

Um transdutor de força converte as forças medidas que representam a força, o peso e a pressão em sinais de saída transmitidos. Estes sinais podem ser enviados para indicadores, controladores, ou um sistema de aquisição de dados conectados a computadores. A maioria dos transdutores

de força tem saídas eletrônicas, analógicas, digitais, pneumáticas, ou saídas hidráulicas, dependendo das necessidades da aplicação. Um transdutor de força pode ser tão pequeno quanto a cabeça de um alfinete, medindo apenas um grama de força (1/28th de uma onça) ou tão grande quanto uma coluna de ponte, medindo centenas de toneladas (1 tonelada equivale a 2000 libras ou 909 kg). (MECÂNICA INDUSTRIAL, 2021).

2.1.7. Servo-controlador hidráulico - ODIN1401

O acionamento de máquinas pode ser realizado pelos mais diversos meios, como pela simples utilização de botoeiras analógicas ou com a utilização de controladores específicos, como Controladores Lógico Programáveis (CLPs), servo-controladores hidráulicos e Comando Numérico Computadorizado (CNC). Um servo-controlador hidráulico permite operar uma máquina hidráulica, geralmente fazendo uso de uma interface homem-máquina (IHM) ou um *software* específico para tal operação, em conexão com atuadores e sensores. De maneira objetiva a fabricante Lynx define as funções gerais de um servo-controlador, onde pode-se destacar ligar e desligar a máquina e/ou bomba hidráulica, determinar a velocidade do atuador, o curso percorrido e a força aplicada pelo mesmo.

2.1.8. Sistema de aquisição de dados - ATMP

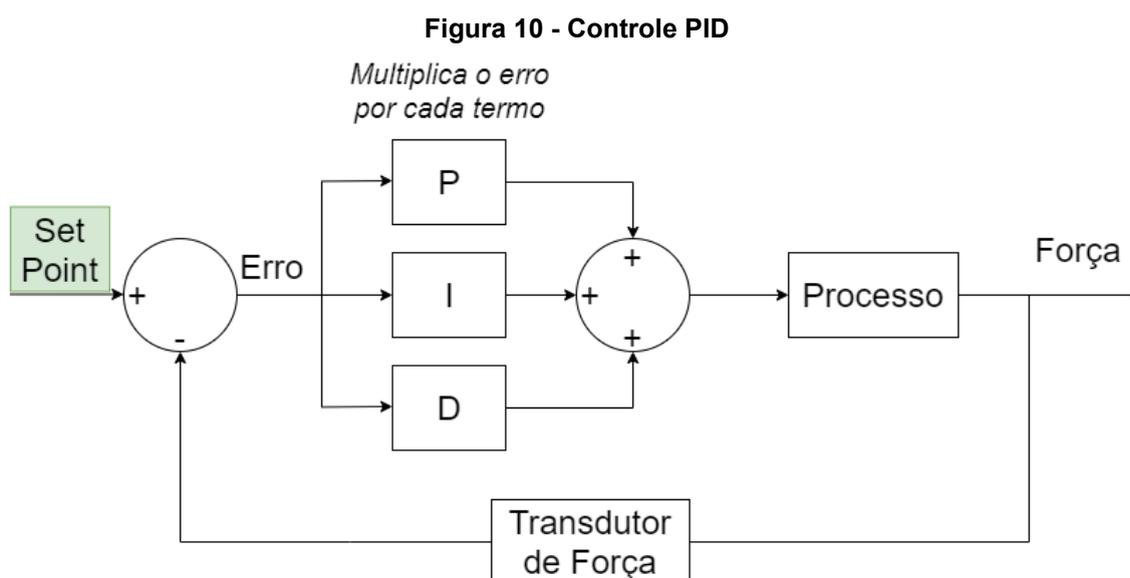
A aquisição de dados pode ser entendida como o processo de medir os fenômenos físicos de um sistema ou máquina, registrar estas medições em um computador e então possibilitar sua análise. Essas informações são comumente extraídas com a utilização de sensores, conversores de sinais, conversores analógicos-digitais e *softwares* específicos para leitura e manipulação de dados. Dentre as variedades de dados que podem ser recolhidos, pode-se destacar valores de pressão, deslocamento, frequência, peso, temperatura e deformação.

Neste trabalho foi utilizado o *software* ATMP, um programa de gerenciamento de testes com atuadores hidráulicos (LYNX, 2021). O *software* se comunica com o servo-controlador hidráulico ODIN1401, discutido na seção anterior, e permite realizar o controle completo da máquina hidráulica. De acordo com a fabricante

Lynx, as características gerais do ATMP são: acionamento e controle da máquina; configuração do driver para servo-válvula; controle PID; visualização gráfica dos sinais; gerador de onda senoidal, triangular, retangular e duplo seno; acionamento e controle da unidade hidráulica.

2.1.9. Controle PID

A empresa norte-americana de instrumentação, National Instruments, define, de forma objetiva, que a idéia básica por trás de um controlador PID é ler um sensor, calcular a resposta de saída do atuador através do cálculo proporcional, integral e derivativo e então somar os três componentes para calcular a saída (NATIONAL INSTRUMENTS, 2020). Dentre as técnicas aplicadas a controle de processos, o uso de um Controlador Proporcional Integral Derivativo, ou simplesmente PID, é o mais utilizado na indústria. Esta técnica visa unir as três ações de controle, com o objetivo de minimizar o erro de um processo, diminuindo o tempo de resposta do sistema a fim de melhorar a estabilidade do mesmo. Dentre as aplicações comuns de um controle PID, destaca-se, para fins explicativos, o controle de uma máquina hidráulica, conforme ilustra a Figura 10.



Fonte: Diagrama autoral, 2021.

De maneira geral, a aplicação de controle em acionamento de máquinas consiste em garantir que os valores inseridos no sistema sejam de fato executados durante o processo. Através do uso de um servo-controlador e um *software* de controle é possível fazer os ajustes destes ganhos manualmente, de forma a ajustar o comportamento da curva do respectivo processo, até que esta fique semelhante à uma curva de referência. Para ensaios de avaliação de produtos é fundamental a garantia da precisão e confiabilidade durante a execução de um teste, um meio eficaz de executar o ensaio conforme exigido por norma é aplicando controle PID, como, por exemplo, ajustando os picos de força máxima aplicados pelo pistão durante um ensaio de vida em fadiga. A West Control Solutions resume o funcionamento do controle PID da seguinte forma:

O controle proporcional é utilizado para minimizar a característica de oscilação do controle de ligar/desligar. O Controle PID vai um pouco além para reduzir erros e fornecer precisão e estabilidade em um processo. Ele faz isso usando a ação integral e ações derivativas. Dessa forma elimina erros de desvio de controle e para gerenciar movimentos rápidos do processo. Todos os três termos PID precisam ser ajustados adequadamente com os requisitos da aplicação para alcançar o melhor controle. Para um alto nível de controle, os controladores digitais PID são frequentemente usados. Estes normalmente vêm na forma de Controladores de Temperatura PID ou Controladores de Processo PID e podem ser instrumentos simples, duplos ou multi-loop. (WEST CS, 2012).

2.2. Metodologia

A metodologia para a realização deste trabalho foi dividida em duas partes: experimental e analítica. A parte experimental foi realizada, primeiramente, com a interpretação da norma técnica F1717, seguido da preparação dos corpos de prova, procedimento de ensaio, acionamento e controle do ensaio e, por fim, os resultados experimentais obtidos. A etapa de desenvolvimento analítico foi realizada sem a necessidade de recursos materiais, através dos estudos e aplicações das teorias de falhas para os casos semelhantes ao ensaio mecânico experimental.

2.2.1. Análise experimental

2.2.1.1. *Interpretação da norma técnica*

Por se tratar de um sistema de coluna bilateral, foi utilizado a norma técnica F1717 como diretriz para realização do ensaio. Esta norma é dividida em dez tópicos, entretanto, para este trabalho, foram seguidas as diretrizes diretamente associadas à realização do ensaio, como distâncias relativas à montagem do corpo de prova, características do dispositivo de ensaio, procedimento de ensaio e, por fim, os parâmetros que devem ser apresentados no relatório técnico. Os parâmetros associados a essas diretrizes serão detalhados nas próximas seções deste trabalho.

2.2.1.2. *Preparação dos corpos de prova*

Foram separados seis corpos de prova para execução do ensaio, identificados conforme a Tabela 1. Após a separação da amostra, foi realizada a verificação dimensional do produto, utilizando um paquímetro digital Insize, modelo IN-1250, com 150mm de curso, devidamente calibrado conforme os registros internos do laboratório.

Tabela 1 - Identificação da amostra

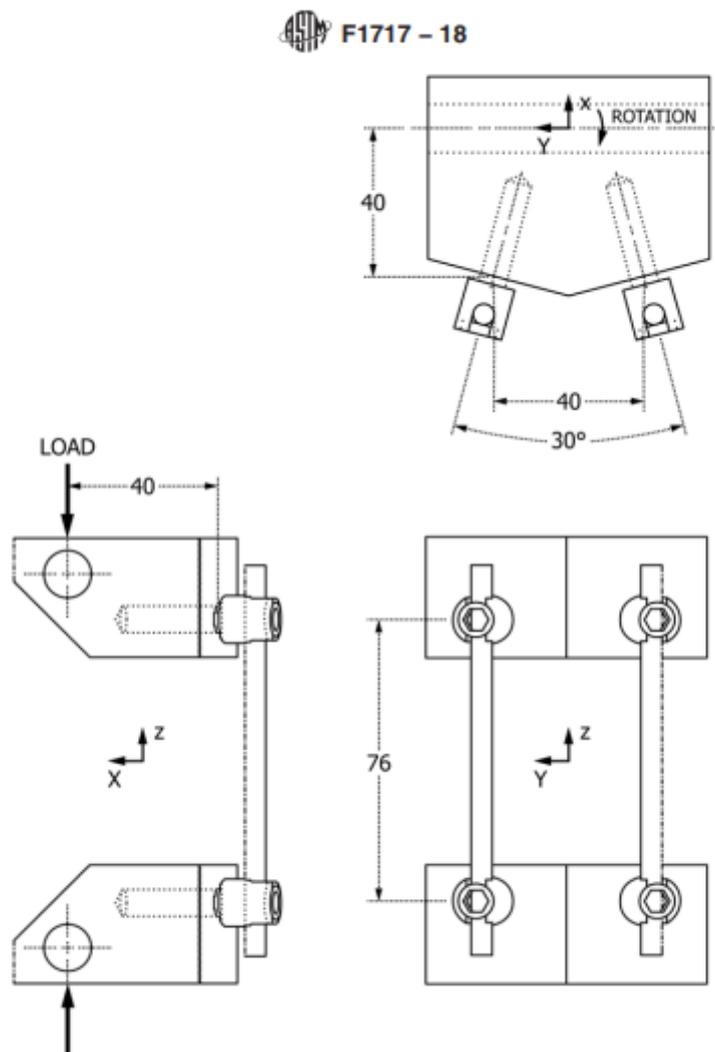
C.P.	Quantidade	Peça	Material
1	2	Haste Ø5,0x100mm	Ti 6Al-4V
	4	Parafuso Pedicular Poliaxial Ø5,5x30mm	Ti 6Al-4V
	4	Contra Parafuso com Anel	Ti 6Al-4V
2	2	Haste Ø5,0x100mm	Ti 6Al-4V
	4	Parafuso Pedicular Poliaxial Ø5,5x30mm	Ti 6Al-4V
	4	Contra Parafuso com Anel	Ti 6Al-4V
3	2	Haste Ø5,0x100mm	Ti 6Al-4V
	4	Parafuso Pedicular Poliaxial Ø5,5x30mm	Ti 6Al-4V
	4	Contra Parafuso com Anel	Ti 6Al-4V
4	2	Haste Ø5,0x100mm	Ti 6Al-4V
	4	Parafuso Pedicular Poliaxial Ø5,5x30mm	Ti 6Al-4V
	4	Contra Parafuso com Anel	Ti 6Al-4V
5	2	Haste Ø5,0x100mm	Ti 6Al-4V
	4	Parafuso Pedicular Poliaxial Ø5,5x30mm	Ti 6Al-4V
	4	Contra Parafuso com Anel	Ti 6Al-4V
6	2	Haste Ø5,0x100mm	Ti 6Al-4V
	4	Parafuso Pedicular Poliaxial Ø5,5x30mm	Ti 6Al-4V
	4	Contra Parafuso com Anel	Ti 6Al-4V

Fonte: Laboratório SCiTec (2020).

A partir dos dados extraídos da norma F1717 foi realizada a montagem do corpo de prova no dispositivo de ensaio, respeitando as distâncias e ângulo conforme ilustra a Figura 11. Os parafusos pediculares foram rosqueados em um inserto de polietileno (UHMWPE) que por sua vez foram fixados por pressão em um conjunto de blocos metálicos, conforme a Figura 12. Tanto o inserto quanto a peça metálica do dispositivo foram fabricadas junto ao laboratório parceiro, com

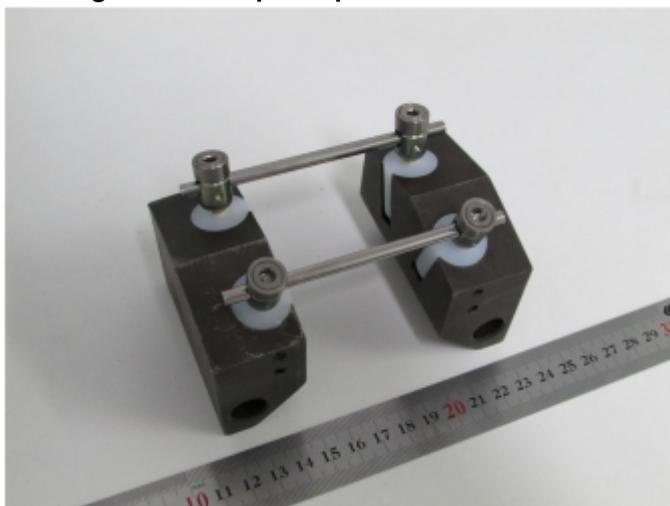
dimensões e materiais determinados por norma. O conjunto foi fixado em uma máquina de ensaios servo-hidráulica, do fabricante Brasválvulas, fixando um dos blocos metálicos à base da máquina, enquanto que o outro bloco foi fixado ao atuador hidráulico, responsável por aplicar a carga ao conjunto.

Figura 11 - Configuração de montagem do dispositivo de ensaio



Fonte: Norma Técnica ASTM F1717 (2018).

Figura 12 - Corpo de prova antes do ensaio



Fonte: Imagem autoral (2020).

2.2.1.3. Procedimento de ensaio

Para dar sequência ao ensaio de vida em fadiga do produto, fez-se necessário a obtenção do valor médio de força no limite de resistência do conjunto. O valor foi obtido através de um ensaio estático, utilizando uma máquina universal de ensaios EMiC. Considerando o objetivo principal deste trabalho, a realização do ensaio estático foi executada pelo corpo técnico do laboratório, mais especificamente, o setor de ensaios estáticos de mobilidade e saúde. A Tabela 2 apresenta os valores obtidos através do ensaio estático.

Tabela 2 - Resultado da força no limite de resistência

Valor médio (N)	Desvio padrão (N)	Incerteza - U (N)
194,8	3,8	4,7

Fonte: Laboratório SCiTec (2020).

Além dos parâmetros de montagem, foram levantados outros parâmetros para execução do ensaio, também normalizados segundo a F1717. A norma determina que o valor para frequência de atuação da força seja de 5 Hz, e o número de ciclos, para que o produto seja validado, seja de 5000000 (cinco milhões). Para garantir a aplicação de carga correta foi utilizado um transdutor de força de 1000 N, do

fabricante HBM, modelo S40AC3/100kg, posicionado sobre o cabeçote superior do conjunto de ensaio, onde a carga é aplicada pelo atuador. A execução do ensaio consiste em aplicar pelo menos três diferentes níveis de carregamento, sendo que para este caso esses níveis representam uma taxa de 40%, 50% e 60% do valor da força apresentada na Tabela 2, estabelecendo dois critérios de parada da máquina: por ruptura e por número de ciclos. Para controle de acionamento e coleta dos resultados foi utilizado um servo-controlador hidráulico ODIN1401, da fabricante Lynx, conforme mostra a Figura 13.

Figura 13 - Servo-controlador hidráulico ODIN1401



Fonte: Imagem autoral (2020).

2.2.1.4. Acionamento e controle do ensaio

A configuração de acionamento e controle da máquina foi realizada utilizando o *software* ATMP, concedido pelo próprio fabricante do servo-controlador. Na aba de *setup* do programa foram estabelecidos os critérios de parada, conforme determinados no procedimento de ensaio. Para o critério de parada por limite de ciclos foi então inserido o valor de 5×10^6 ciclos, na aba de *cycle limits setup*,

enquanto que para o critério de parada por ruptura foi determinado um valor de 60 mm de curso no canal 4 do módulo, sendo este valor o curso máximo que o atuador consegue atingir, conforme mostra a Figura 14. As Figuras 15 e 16 mostram as telas onde os critérios de paradas são parametrizados.

Figura 14 - Especificações do atuador hidráulico



Fonte: Imagem autoral, 2020.

Figura 15 - Configuração do critério de parada por número de ciclos

Cycle Limits Setup								✕
Loop	Tag	ALL Loops	Pump Off	Pres Off	Hyd Low	Test Stop	N. Cycles Limit	
0	Servo loop 0	<input type="checkbox"/>	1000000					
1	Servo loop 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	5000000	
2	Servo loop 2	<input type="checkbox"/>	0					
3	Servo loop 3	<input type="checkbox"/>	0					

Fonte: Captura da tela de setup ATMP (2020).

Figura 16 - Configuração do critério de parada por ruptura

Channel	Signal Name	Inp Range		ALL	Test	Upper	Pump	Pres	Hyd	Test
		Low	High							
0	Channel 0 (mm)	-205,3	205,3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9,9994	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1	Torque (Nm)	-53,889	50,664	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	none (-)	-53,889	50,664	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9,9994	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Channel 3 (-)	-10	10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9,9997	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
>> 4	Curso (mm)	-16,137	151,31	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	60	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Carga (N)	981,3	-981,27	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	90	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	()	0	-50,018	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	,00076322	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Channel 7 (mm)	1101,3	-1089,2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9,9985	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Channel 8 (-)	-10	10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9,9997	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Channel 9 (-)	-10	10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9,9997	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	Channel 10 (-)	-10	10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9,9997	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	Channel 11 (-)	-10	10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9,9997	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	Channel 12 (mm)	659,59	-177,42	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10,005	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	Channel 13 (N)	30645	-30632	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10,006	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	Channel 14 (N)	30645	-30632	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10,006	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	Channel 15 (N)	-52727	52721	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9,6494	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	Ângulo (graus)	-2949,1	2949,1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	30,006	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
17	Channel 17 (graus)	-581,45	581,45	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10,008	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fonte: Captura da tela de setup ATMP (2020).

O programa também conta com uma tela de controle do ensaio, onde foram configurados os valores de *offset* e amplitude da força de atuação, bem como a frequência, o controle PID e também utilizada para monitoramento do funcionamento da própria máquina servo hidráulica. Para determinação do *offset* e amplitude da força foram realizados dois cálculos, conforme instrução da norma F1717 na seção *procedure*, indicados nas Equações 2 e 3. A norma determina que o teste de fadiga aplique um carregamento senoidal sobre o corpo de prova. A carga deve ser mantida via controle da amplitude do carregamento senoidal constante, determinando uma razão (R) para todos os testes, o qual deve ser maior ou igual a 10, conforme a Equação 1:

$$R = \frac{\text{carga mínima}}{\text{carga máxima}} \geq 10 \quad (1)$$

$$Offset = \frac{valor\ máximo + 10\% \text{ do } valor\ máximo}{2} \quad (2)$$

$$Amplitude = Valor\ máximo - Offset \quad (3)$$

Onde:

Valor máximo = Produto do valor médio da força de resistência pela taxa (N);

Valor mínimo = 10% do Valor Máximo (N).

Considerando o valor médio da força no limite de resistência de 194,8 N e as taxas de 40%, 50% e 60%, foram encontrados os valores máximos e mínimos conforme a Tabela 3. Os valores calculados foram inseridos no programa ao início de cada ensaio, para cada corpo de prova separado para teste.

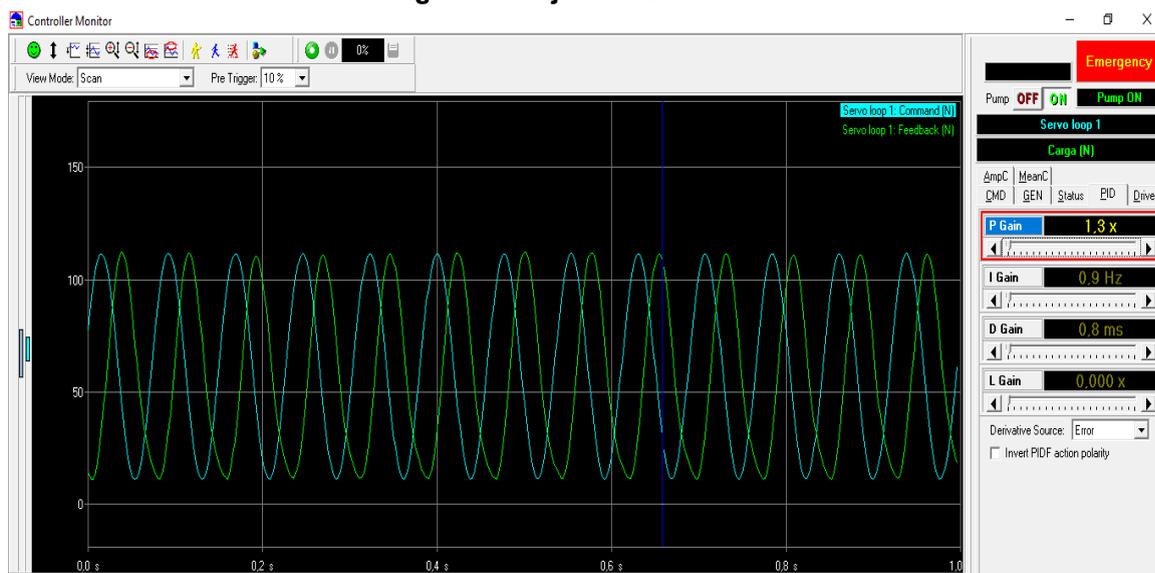
Tabela 3 - Valores máximos e mínimos configurados

Taxa (%)	Valor máx. (N)	Valor mín. (N)
40	77,9	7,79
50	97,4	9,74
60	116,8	11,68

Fonte: Tabela autoral (2020).

O ajuste de controle PID foi realizado manualmente, alterando os valores do ganho proporcional (P) até que a curva de execução obtivesse um comportamento semelhante ao da curva de referência em azul (pico à esquerda), conforme ilustrado na Figura 17.

Figura 17 - Ajuste PID da curva

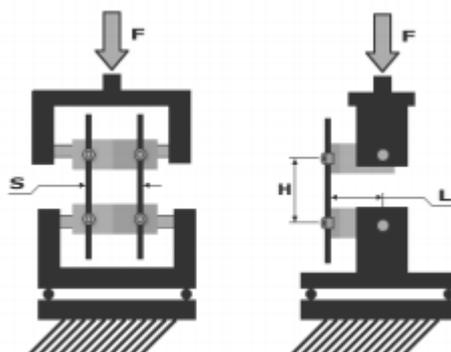


Fonte: Captura da tela de setup ATMP (2020).

2.2.2. Análise teórica

Para a análise de falha por fadiga foi considerado o método tensão-vida e os critérios de falha para carregamento flutuante: Goodman, Gerber, Soderberg, ASME-elíptico. Neste estudo foi considerada a falha localizada na haste, sob a hipótese de que este componente estará submetido somente a flexão pura durante a aplicação da carga cíclica, o que configura a condição ideal de ensaio. A Figura 18 ilustra o esquemático considerado no cálculo teórico de vida em fadiga, partindo do cálculo do momento da força sobre a haste.

Figura 18 - Aplicação da força em sistema de coluna



Fonte: Laboratório SCiTec, 2020.

O momento fletor atuante na haste, descrito na Equação 4, é o produto vetorial entre a força aplicada pelo pistão e a distância da linha de ação desta força e o eixo longitudinal da haste. O valor de L é obtido através da Figura 11, sendo $L = 40 \text{ mm}$, e para o valor da força F são consideradas as taxas de 40%, 50% e 60% da força descrita na Tabela 2, onde temos $F_{40\%} = 77,9 \text{ N}$, $F_{50\%} = 97,4 \text{ N}$ e $F_{60\%} = 116,8 \text{ N}$.

$$M = F \times L \quad (4)$$

Onde:

M = Momento fletor na haste;

F = Força do atuador servo-hidráulico;

L = Distância entre a linha de força e a haste.

A tensão máxima é calculada segundo a Equação 5, a partir do cálculo da flexão para esta condição específica de carregamento.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{Mc}{I} \quad (5)$$

Onde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = Tensão máxima;

M = Momento fletor;

c = Distância da linha da linha neutra até o ponto de máxima tensão;

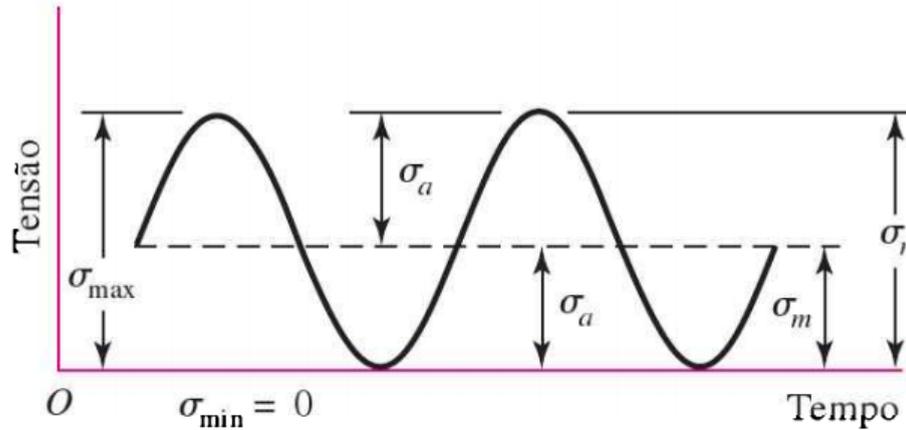
I = Momento de inércia.

Com base no diâmetro conhecido da haste e aplicando a Equação 5 temos que $\sigma_{m\acute{a}x\ 40\%} = 253,9 \text{ MPa}$, $\sigma_{m\acute{a}x\ 50\%} = 317,4 \text{ MPa}$ e $\sigma_{m\acute{a}x\ 60\%} = 380,7 \text{ MPa}$.

Considerando que a haste está sujeita ao carregamento de flexão cíclica flutuante e que, desta forma, possui a forma senoidal variada, temos que a tensão

varia de zero até um valor de tensão máxima, como demonstrada na Figura 19.

Figura 19 - Tensão variada



Fonte: Shigley, 2011.

As tensões alternantes podem ser encontradas segundo a Equação 6.

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \right| \quad (6)$$

Onde:

σ_a = tensão alternante;

σ_{\max} = tensão máxima;

σ_{\min} = tensão mínima.

As tensões médias são calculadas a partir da Equação 7.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (7)$$

Onde:

σ_m = tensão média;

Para tensão mínima igual à zero tem-se que a tensão alternante corresponde à tensão média, sendo estas tensões igual a metade da tensão máxima, conforme apresentado na Equação 8.

$$\sigma_a = \sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{2} \quad (8)$$

Aplicando a Equação 8 obtemos os valores de $\sigma_{a\ 40\%} = 127,0\ MPa$, $\sigma_{a\ 50\%} = 158,7\ MPa$ e $\sigma_{a\ 60\%} = 190,4\ MPa$.

A aplicação do método tensão-vida leva em consideração o diagrama S-N, apresentado anteriormente na Figura 4, a fim de determinar o limite de resistência à fadiga do material, conforme a Equação 9, e por consequência encontrar o número de ciclos através da aplicação dos quatro critérios de falhas.

$$S_e = a \cdot N^{1/b} \quad (9)$$

Onde:

S_e = limite de resistência à fadiga;

a = constante da reta;

b = constante da reta;

N = número de ciclos.

Para encontrar os valores das constantes a e b segue-se primeiramente um procedimento a partir da Equação 10, onde são considerados alguns valores

tabelados e outros calculados, como por exemplo os fatores modificadores de fadiga k_a à k_e .

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot Se' \quad (10)$$

Onde:

k_a = fator de modificação da condição de superfície;

k_b = fator de tamanho;

k_c = fator de carregamento;

k_d = fator de temperatura;

k_e = fator de confiabilidade;

Se' = resistência à fadiga corrigida;

Se = limite de resistência à fadiga do material.

Com base no material e algumas características da haste é possível encontrar o valor de cada fator modificador de fadiga. Para os valores do limite de resistência à tração e limite de escoamento do material em questão, apresentados no APÊNDICE A - Propriedades de algumas ligas de titânio, podemos utilizar a Equação 11 para determinar o limite de resistência à fadiga do material.

$$Se' = 0,5 \cdot Sut \quad , \quad Sut \leq 1400 \text{ MPa} \quad (11)$$

Ao extrair o valor de $Sut = 900 \text{ MPa}$, temos que $Se' = 450 \text{ MPa}$.

O fator de modificação da condição de superfície é calculado através da Equação 12, conforme valores destacados na Figura 20, considerando um acabamento superficial usinado para essas hastes.

$$k_a = a \cdot S_{ut}^b \quad (12)$$

Onde:

S_{ut} = limite de resistência à tração.

Figura 20 - Parâmetros para o fator de modificação de superfície

Acabamento superficial	Fator a S_{utr} MPa	Expoente b
Retificado	1,58	-0,085
Usinado ou laminado a frio	4,51	-0,265
Laminado a quente	57,7	-0,718
Forjado	272	-0,995

Fonte: Shigley, 2011.

Para um diâmetro da haste conhecido de 5,0 mm temos k_b calculado pela Equação 13. O valor de k_c pode ser obtido a partir da Equação 14, considerando que a haste sofre flexão.

$$k_b = 1,24 \cdot d^{-0,107}, \quad 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \quad (13)$$

$$k_c = 1 \text{ para flexão} \quad (14)$$

Onde:

d = diâmetro da haste;

Os valores de k_d e k_e são tabelados e extraídos conforme destacado nas Figuras 21 e 22, respectivamente.

Figura 21 - Parâmetros para o fator de temperatura

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}
20	1,000
50	1,010
100	1,020
150	1,025
200	1,020
250	1,000
300	0,975
350	0,943
400	0,900
450	0,843
500	0,768
550	0,672
600	0,549

Fonte: Shigley, 2011.

Figura 22 - Parâmetros para o fator de confiabilidade

Confiabilidade, %	Variante de transformação z_a	Fator de confiabilidade k_a
50	0	1,000
90	1,288	0,897
95	1,645	0,868
99	2,326	0,814
99,9	3,091	0,753
99,99	3,719	0,702
99,999	4,265	0,659
99,9999	4,753	0,620

Fonte: Shigley, 2011.

Aplicando todos os fatores modificadores e o valor de resistência à fadiga corrigida, tem-se que $S_e = 303,141 MPa$. A partir deste valor encontrado e do valor tabelado para o limite de resistência à tração do material, é possível calcular o valor das constantes a e b através das Equações 15 e 16.

$$a = \left(\frac{f.S_{ut}}{S_e} \right)^2 \quad (15)$$

$$b = -\frac{1}{3} \log\left(\frac{f \cdot S_{ut}}{S_e}\right) \quad (16)$$

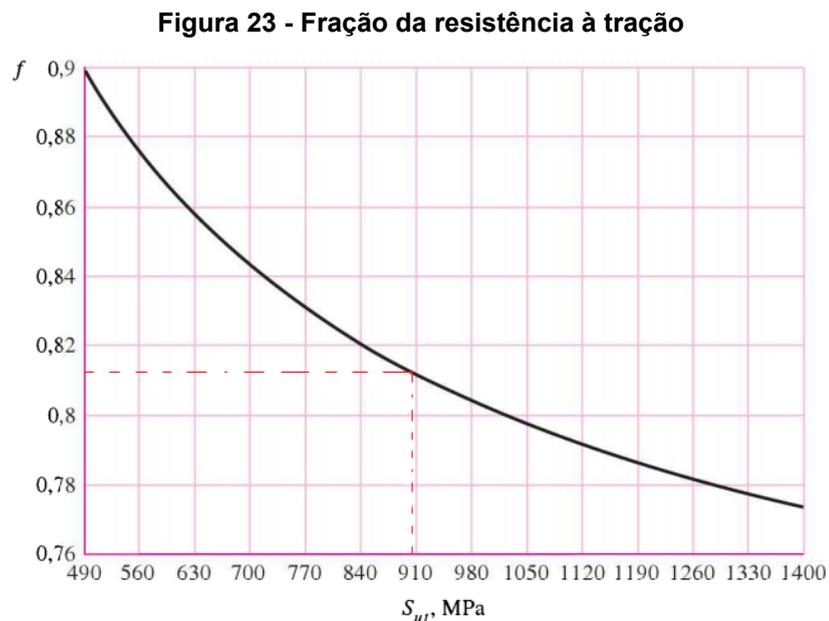
Onde:

S_{ut} = limite de resistência à tração;

S_e = limite de resistência à fadiga;

f = fração da resistência à tração do material.

O valor de f pode ser obtido através da Figura 23, em relação ao valor conhecido de S_{ut} .



Fonte: Shigley, 2011.

Para o valor tabelado do limite de resistência à fadiga, $S_{ut} = 900 \text{ MPa}$, é possível obter o valor aproximado de $f = 0,81$. Com base nos valores conhecidos de S_{ut} , S_e e f , tem-se então que $a = 1753,1$ e $b = -0,127$, sendo estes valores as constantes que permitem o cálculo do número de ciclos através da Equação 9.

Para as forças de 116,8 N, 97,4 N e 77,9 N foram obtidos os resultados teóricos conforme mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados calculados

Variáveis	Força do Atuador (116,8 N)	Força do Atuador (97,4 N)	Força do Atuador (77,9 N)
M (N.mm)	4672	3896	3116
$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	380,7	317,4	253,9
σ_m (MPa)	190,3	158,7	126,9
σ_a (MPa)	190,3	158,7	126,9
Se' (MPa)	450,0	450,0	450,0
Se (MPa)	303,1	303,1	303,1
a	1753,1	1753,1	1753,1
b	-0,127	-0,127	-0,127

Fonte: Tabela autoral, 2021.

2.2.2.1. Aplicação dos critérios de falha

Conforme discutido no capítulo de critério de falha por fadiga, são aplicados quatro critérios de falhas a fim de encontrar novos limites de resistência à fadiga e também seus respectivos números de ciclos. Isolando o limite de resistência à fadiga (Se) nas equações apresentadas na Figura 8 e considerando um fator de segurança $n = 1$ para todos critérios, são obtidas as Equações 17, 18, 19 e 20 para aplicação dos critérios de falha.

$$\text{Soderberg: } Se = \sigma_a / 1 - (\sigma_m / S_y) \quad (17)$$

$$\text{Goodman modificada: } Se = \sigma_a / 1 - (\sigma_m / S_{ut}) \quad (18)$$

$$\text{Gerber: } Se = \sigma_a / 1 - (\sigma_m / S_{ut})^2 \quad (19)$$

$$\text{ASME-elíptica: } Se = \sigma_a / (1 - (\sigma_m / S_y)^2)^{1/2} \quad (20)$$

Onde:

S_{ut} = limite de resistência à tração;

S_y = limite de escoamento;

σ_a = tensão alternante;

σ_m = tensão média;

S_e = limite de resistência à fadiga.

Manipulando a Equação 9 é possível encontrar o número de ciclos, conforme descrito na Equação 21, para cada valor encontrado pela aplicação dos critérios de falha.

$$N = \left(\frac{S_e}{a}\right)^{1/b} \quad (21)$$

Onde:

S_e = limite de resistência à fadiga pelos critérios de falha;

a = constante da reta;

b = constante da reta;

N = número de ciclos.

2.2.3. Análise dos resultados

O resultado de cada corpo de prova ensaiado foi extraído da própria tela de controle, as diferentes taxas de força aplicadas levaram a resultados distintos, onde com apenas 50% da força no limite de resistência levou à ruptura do conjunto. A Tabela 5 apresenta os resultados de acordo com cada corpo de prova ensaiado, por esta tabela é possível observar a realização do ensaio com os três níveis de carregamento propostos e a repetição de ensaio para o carregamento em que foi atingido o limite de número de ciclos proposto pela norma.

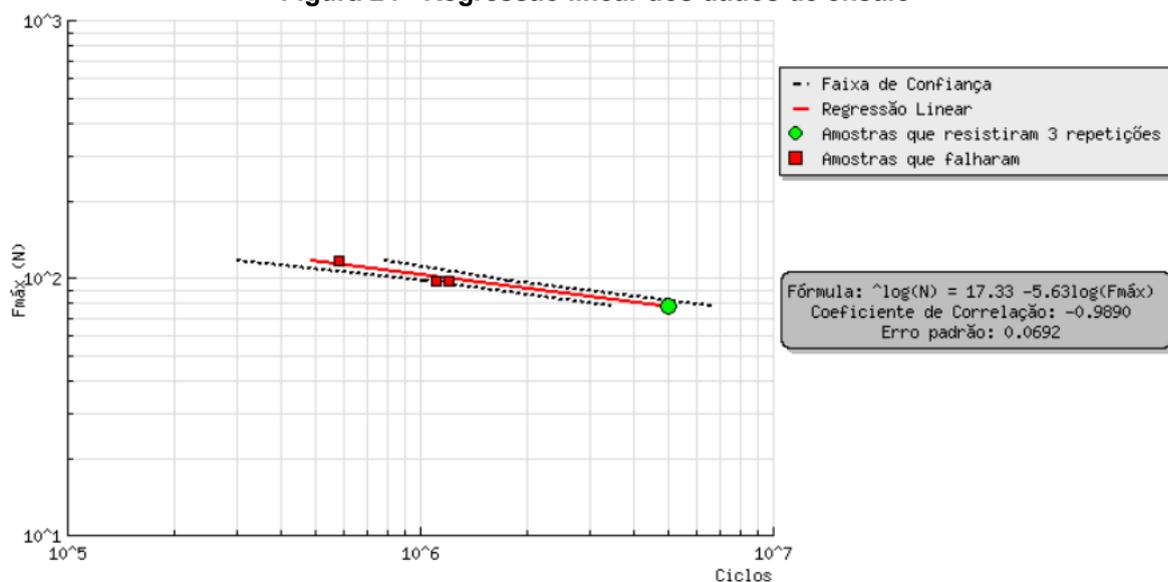
Tabela 5 - Resultados experimentais

Força Máx. (N)	C.P.	U (N)	Crit. de Parada	Nº de Ciclos
77,9	2	2,3	Nº de ciclos	5.000.000
77,9	5	2,3	Nº de ciclos	5.000.000
77,9	6	2,3	Nº de ciclos	5.000.000
97,4	1	2,3	Ruptura	1.097.032
97,4	4	2,3	Ruptura	1.195.304
116,9	3	2,3	Ruptura	583.472

Fonte: Tabela autoral (2020)

A Figura 24 mostra a regressão linear para os resultados de ensaio com faixa de confiança de 95%, onde à medida que a força (N) vai diminuindo o números de ciclos que o conjunto resiste antes da falha aumenta.

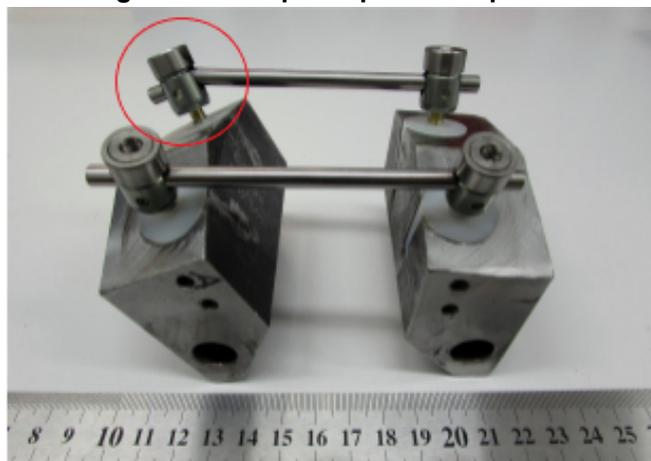
Figura 24 - Regressão linear dos dados de ensaio



Fonte: Gráfico autoral, 2020.

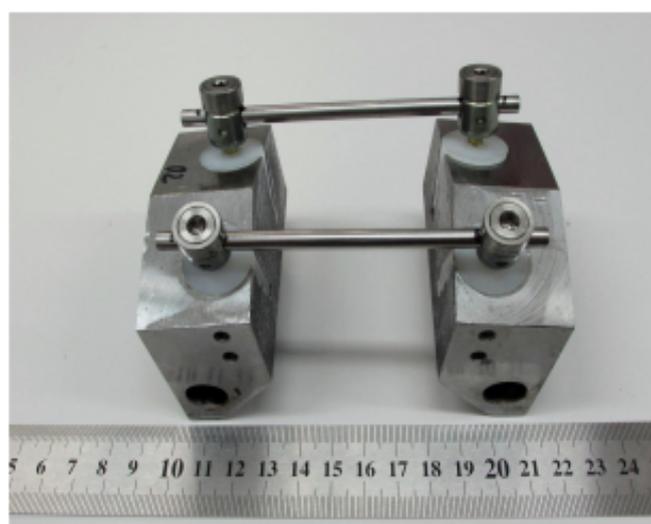
Em comparação com a Figura 12, podemos analisar o estado final de cada corpo de prova ensaiado, segundo as Figuras 25, 26, 27, 28, 29 e 30.

Figura 25 - Corpo de prova 1 ruptura da haste



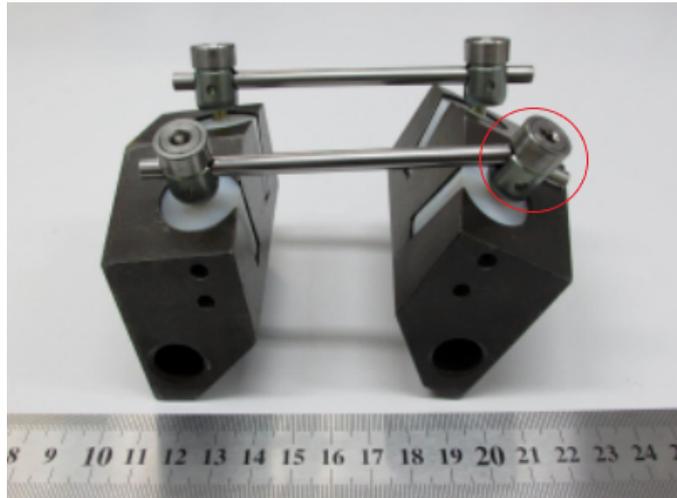
Fonte: Imagem autoral (2020).

Figura 26 - Corpo de prova 2 número de ciclos



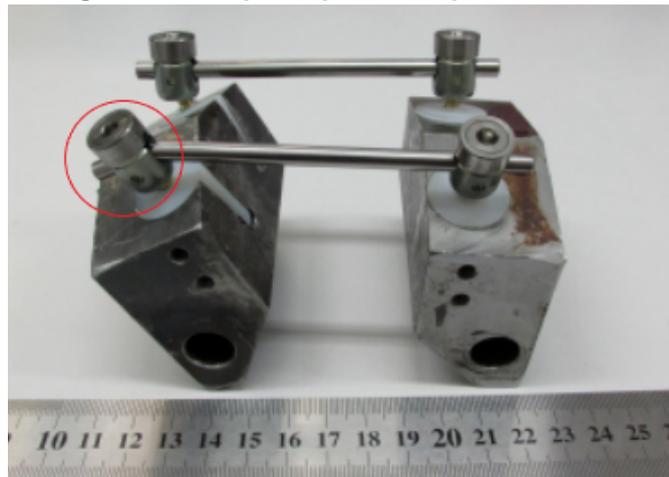
Fonte: Imagem autoral (2020).

Figura 27 - Corpo de prova 3 ruptura da haste



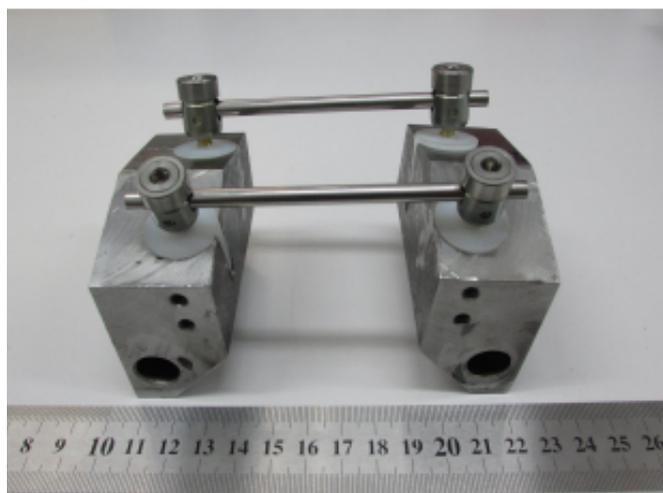
Fonte: Imagem autoral (2020).

Figura 28 - Corpo de prova 4 ruptura da haste



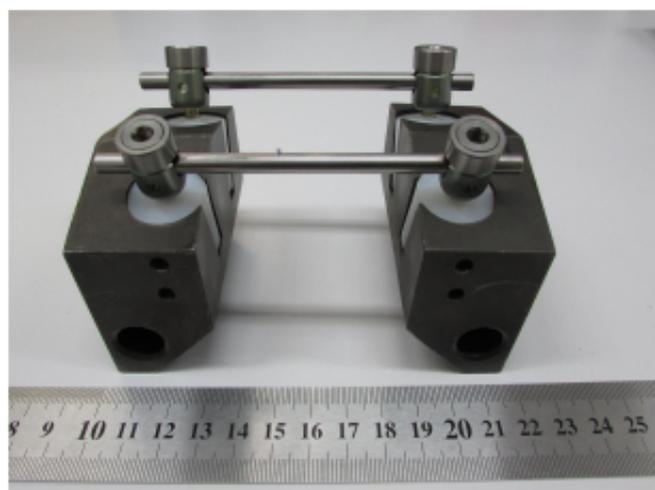
Fonte: Imagem autoral (2020).

Figura 29 - Corpo de prova 5 número de ciclos



Fonte: Imagem autoral (2020).

Figura 30 - Corpo de prova 6 número de ciclos



Fonte: Imagem autoral (2020).

Conforme indica a literatura clássica de engenharia, espera-se que os resultados da aplicação dos critérios de falha de Soderberg e Goodman Modificada apresentem valores mais conservativos quanto aos seus resultados, enquanto que para Gerber e ASME-elíptica se espera resultados mais precisos quanto aos valores encontrados experimentalmente. Como resultado da aplicação dos critérios de falha, e considerando os valores referente à uma força de 77,9 N (40%) da Tabela 6, são encontrados os valores conforme dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Aplicação dos critérios de falha para F=77,9N

Critério	S_e (MPa)	Nº de Ciclos
<i>Soderberg</i>	149,9	255.896.933
<i>Goodman modificada</i>	147,8	285.594.913
<i>Gerber</i>	126,9	946.597.800
<i>ASME-elíptica</i>	128,5	861.307.834

Fonte: Tabela autoral (2021).

Para uma força de 97,4 N (50%) e 116,8 N (60%), é possível obter novos valores para limite de resistência à fadiga e número de ciclos com aplicação dos critérios de falha, como mostram as Tabelas 7 e 8 respectivamente.

Tabela 7 - Aplicação dos critérios de falha para F=97,4N

Critério	S_e (MPa)	Nº de Ciclos
<i>Soderberg</i>	196,3	30.629.074
<i>Goodman modificada</i>	192,7	35.354.513
<i>Gerber</i>	158,7	163.123.649
<i>ASME-elíptica</i>	161,7	140.653.023

Fonte: Tabela autoral (2021).

Tabela 8 - Aplicação dos critérios de falha para F=116,8N

Critério	S_e (MPa)	Nº de Ciclos
<i>Soderberg</i>	247,0	5.014.029
<i>Goodman modificada</i>	241,4	6.003.705
<i>Gerber</i>	190,3	39.052.828
<i>ASME-elíptica</i>	195,6	31.512.602

Fonte: Tabela autoral (2021).

Relacionando alguns dos resultados encontrados pela abordagem experimental e teórica, é possível observar uma diferença expressiva quanto aos valores para o número de ciclos, conforme indicado na Tabela 9.

Tabela 9 - Relação dos resultados experimentais e teóricos

Força (N)	Experimental	Soderberg	Goodman modificada	Gerber	ASME-elíptica
77,9	5.000.000 (C.P. 2)	255.896.933	285.594.913	946.597.800	861.307.834
97,4	1.097.032 (C.P. 1)	30.629.074	35.354.513	163.123.649	140.653.023
116,9	583.472 (C.P.3)	5.014.029	6.003.705	39.052.828	31.512.602

Fonte: Tabela autoral (2020)

A diferença expressiva entre os resultados experimentais e teóricos se dá pela redução à um estado ideal em que foi realizada a análise teórica. Não só pela questão de isolar completamente a haste como objeto de análise, mas também por atribuir uma condição de carregamento que se aproxime de flexão pura. Algumas condições foram descartadas para simplificar a análise e atingir o objetivo proposto, e apesar de tendenciosos os resultados teóricos não são determinísticos. Para fins de projeto, se mostra relevante considerar os resultados pela aplicação dos critérios de falha de Gerber e ASME-elíptica, onde são extraídos valores menos conservativos.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após avaliar os resultados obtidos pelas duas abordagens, experimental e teórica, compreende-se a importância das duas análises para avaliação do comportamento de um sistema de fixação de coluna enquanto submetido a carregamento cíclico. Sabe-se, entretanto, que somente situações reais podem determinar o verdadeiro desempenho de um produto.

As pesquisas foram fundamentais para conhecer profundamente sobre ensaios mecânicos de produtos ortopédicos, mas vale destacar que através da rotina vivida no laboratório SCiTec pôde-se realmente compreender o valor e importância da certificação e homologação de produtos.

O resultado deste Trabalho de Conclusão de Curso gerou a percepção da importância da multidisciplinaridade como pilar do curso de Engenharia Mecatrônica. Dentre as diversas áreas estudadas, pode-se citar, especialmente, as disciplinas de sistemas hidráulicos e pneumáticos, eletrônica digital, eletrônica analógica, controle, mecânica dos sólidos e elementos de máquina.

Os objetivos definidos para este trabalho foram alcançados com a análise teórica e experimental, possibilitando a interpretação e relação dos dados obtidos durante o desenvolvimento deste projeto.

Com relação à metodologia de trabalho utilizada, foi possível desenvolver o projeto de forma a atingir os objetivos propostos inicialmente, com isso percebe-se que foi adequada. No entanto, é importante ressaltar que para esta questão é fundamental o acesso a maquinários, equipamentos de metrologia e principalmente normas técnicas, que o laboratório SCiTec não mediu esforços para fornecer o acesso.

Para um melhor resultado sugere-se aplicar no primeiro módulo do ensaio uma taxa de 50% do valor da força no limite de resistência, conforme discutido anteriormente, a fim de verificar se o conjunto sofre a ruptura antes de atingir o número de ciclos adequado. A partir deste resultado recomenda-se avaliar a necessidade de aplicar forças maiores caso haja a falha para esta taxa de 50%. Para um resultado teórico completo podem ser considerados fatores além dos discutidos neste trabalho, como concentrações de tensão nas regiões do parafuso pedicular, torque de aperto do parafuso e temperatura de ensaio. Apesar disso, entende-se que é possível chegar a um resultado muito próximo de situações reais, avaliando apenas os esforços submetidos e não as variáveis como as peculiaridades

do indivíduo que possui o implante ou procedimentos cirúrgicos para inserção do dispositivo.

REFERÊNCIAS

FORT WAYNE METALS. **Ti 6Al-4V ELI**. Disponível em: <https://fwmetals.com.br/services/resource-library/ti-6al-4v-eli/> . Acesso em: 20 fev. 2021.

CIRURGIA DA COLUNA. **Artrodese**. Disponível em: <https://www.cirurgiadacoluna.com.br/artrodese>. Acesso em: 23 fev. 2021.

MECÂNICA INDUSTRIAL. **Transdutor da força**. Disponível em: <https://www.mecanicaindustrial.com.br/124-que-e-um-transdutor-da-forca/>. Acesso em: 07 mar. 2021.

LYNX. **ATMP**. Disponível em: https://www.lynxtec.com.br/prod_prog_ATMP.htm. Acesso em: 18 mar. 2021.

WEST CONTROL SOLUTIONS. **O que é controle PID**. Disponível em: <https://www.west-cs.com.br/blog/o-que-e-controle-pid/>. Acesso em: 22 mar. 2021.

CITISYSTEMS. **Controle PID**. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/controle-pid/>. Acesso em: 22 mar. 2021.

MEDICAL EXPO. **Máquina**. Disponível em:
<https://www.medicalexpo.com/pt/prod/depuy-synthes/product-79814-498550.html>.

Acesso em: 23 mar. 2021.

BRASVÁLVULAS. **Máquinas para ensaios dinâmicos**. Disponível em:
http://www.brasvalvulas.com.br/bras_chrome/bras_ch.html. Acesso em: 24 mar. 2021.

INMETRO. **Laboratórios Credenciados**. Disponível em:
[http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/labCredenciados.asp#:~:text=Essa%20acredita%20\(credenciamento\)%20é%20o,critérios%20estabelecidos%20por%20normas%20internacionais](http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/labCredenciados.asp#:~:text=Essa%20acredita%20(credenciamento)%20é%20o,critérios%20estabelecidos%20por%20normas%20internacionais). Acesso em: 24 mar. 2021.

ESPECIALISTA OMBRO. **Artroplastia Reversa**. Disponível em:
<http://especialistaombro.com.br/procedimentos/artroplastia-reversa/>. Acesso em: 24 mar. 2021.

ROSA, Edison da. **Análise de resistência mecânica (mecânica da fratura e fadiga)**. Florianópolis: UFSC, 2002.

CALLISTER JR, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 8ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

PANJABI, Manohar M.; WHITE, Augustus A. **Biomechanics in the Musculoskeletal System**. 1^a ed. Londres: Churchill Livingstone, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Propriedades mecânicas de algumas ligas de titânio

Liga de titânio	Condição	Escoamento, $S_{y,0.2}$ (0,2% de desvio de deformação) MPa (kpsi)	Resistência à tração, S_{ut} MPa (kpsi)	Alongamento em 2 in, %	Dureza (Brinell ou Rockwell)
Ti-35A [†]	Recozido	210 (30)	275 (40)	30	135 HB
Ti-50A [†]	Recozido	310 (45)	380 (55)	25	215 HB
Ti-0,2 Pd	Recozido	280 (40)	340 (50)	28	200 HB
Ti-5 Al-2,5 Sn	Recozido	760 (110)	790 (115)	16	36 HRC
Ti-8 Al-1 Mo-1 V	Recozido	900 (130)	965 (140)	15	39 HRC
Ti-6 Al-6 V-2 Sn	Recozido	970 (140)	1030 (150)	14	38 HRC
Ti-6Al-4V	Recozido	830 (120)	900 (130)	14	36 HRC
Ti-13 V-11 Cr-3 Al	Solução + envelhecimento	1207 (175)	1276 (185)	8	40 HRC

[†] Titânio Alfa comercialmente puro.