

**CENTRO UNIVERSITÁRIO CAMPO LIMPO PAULISTA - UNIFACCAMP
ENGENHARIA MECÂNICA**

MÁQUINA DE ENSAIO DE FADIGA POR FLEXÃO-ROTATIVA

GUILHERME EMANOEL DA SILVA SANTOS

HENRIQUE SPOLI

JOYCE ROBERTA MATEUS CONCEIÇÃO

MIZAEEL TIMÓTEO FERREIRA

VICTOR NEVES ROCHA

WILLIAM DA SILVA ARAÚJO

**Campo Limpo Paulista - SP
Junho – 2021**

Guilherme Emanuel da Silva Santos

Henrique Spoli

Joyce Roberta Mateus Conceição

Mizael Timóteo Ferreira

Victor Neves Rocha

William da Silva Araújo

MÁQUINA DE ENSAIO DE FADIGA POR FLEXÃO-ROTATIVA

*Trabalho de conclusão apresentado ao Centro
Universitário Campo Limpo Paulista –
UNIFACCAMP, como requisito para a
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Mecânica.*

Orientador: Prof. Marcos Martins Mioni

Prof. Francisco Coelho de Oliveira

**Campo Limpo Paulista - SP
Junho - 2021**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO CAMPO LIMPO PAULISTA - UNIFACCAMP
ENGENHARIA MECÂNICA**

MÁQUINA DE ENSAIO DE FADIGA POR FLEXÃO-ROTATIVA

RA 29333 Guilherme Emanuel da Silva Santos

RA 26463 Henrique Spoli

RA 30020 Joyce Roberta Mateus Conceição

RA 27471 Mizael Timóteo Ferreira

RA 25877 Victor Neves Rocha

RA 27248 William da Silva Araújo

Orientador: Prof. Marcos Martins Mioni

Banca Examinadora:

**Prof.
Convidado**

**Prof. Marcos Martins Mioni
Orientador**

**Prof. Alexandre Capelli
Coordenador**

**Campo Limpo Paulista - SP
Junho – 2021**

DEDICATÓRIA

Dedicamos esse trabalho primeiramente a Deus, que nos concedeu a oportunidade de chegar até aqui através dos nossos esforços e dedicação.

E aos nossos familiares (pais, cônjuges, filhos, amigos, Unifaccamp, diretores, coordenadores, professores em que nos apoiaram, e em especial aos professores Arevaldo Amâncio, Sandro Pacheco, Marcos Mioni, Francisco Coelho nos auxiliaram de uma forma geral.

AGRADECIMENTO

Agradecemos a Deus que nos concedeu o dom da vida e por nos dar forças e sabedoria nos momentos mais difíceis das nossas vidas, e transformar tudo isso em conquistas profissionais e pessoais.

EPÍGRAFE

Êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas dificuldades que você superou no caminho.

Abraham Lincoln.

RESUMO

A fadiga é a forma mais comum de falha estrutural e, ao longo do tempo, tem sido um problema desafiador devido às solicitações impostas e ao tipo de carga aplicada. Conforme a revolução industrial e o aumento da produção, vê-se a necessidade de um projeto competitivo no mercado, um método acelerado de ensaio da fadiga se faz conveniente. Nesse trabalho é feito um estudo sobre os efeitos da fadiga e os tipos de ensaios para os estudos dos comportamentos dos materiais a serem utilizados durante o processo. Para isso será desenvolvida uma máquina de fadiga por flexão-rotativa convencional de simples fabricação, contendo todas as dimensões, especificações técnicas como: materiais do conjunto, métodos de operação e seus respectivos conjuntos de montagem e tipos de ensaios.

Palavras chaves: Máquina. Fadiga. Simples fabricação. Tipos ensaios.

Abstract

Fatigue is the most common form of structural failure and, over time, has been a challenging problem due to the demands imposed and the type of load applied. According to the Industrial Revolution and the increase in production, it sees the need, a competitive project on the market, an accelerated fatigue test method is convenient. In this work a study is done on the effects of fatigue and the types of tests for the studies of the behaviors of the materials to be used during the process. For this, a simple manufacturing conventional rotary flex fatigue machine will be developed, containing technical specifications such as: assembly materials, operating methods and their respective assembly sets and types of tests.

Key words: Machine. Fatigue. Simple manufacturing. Trial types.

LISTA DE SIGLAS

BDP - Banda deslizamento permanente

SAE - Sociedade dos Engenheiros Automotivos

CP - Corpo de prova

JIS - Japanese Industrial Standard

mm - Milímetro

rpm - Rotação por minuto

cv - Cavalos

kN - Quilonewton

kg - Quilograma

N - Newton

m - Metro

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicação de tensão em corpo de prova para ensaio de flexão.....	22
Figura 2 - Fratura em material dúctil	24
Figura 3 - Fratura em material frágil	26
Figura 4 - Carregamentos cíclicos (a) completamente alternado, (b) pulsativo e (c) aleatório	27
Figura 6 - Formação das bandas de deslizamento e direção de propagação das trincas.....	31
Figura 7 - Linhas de praia em uma fratura por fadiga	32
Figura 8 - Corpo de prova paralelo com dimensões.....	38
Figura 9 - Corpo de prova paralelo com dimensões.....	41
Figura 10 - Tipos de aplicação de momento fletor no corpo de prova.....	42
Figura 11 - Requisito de rotação necessária para a máquina	44
Figura 12 - Motor WEG 90S	44
Figura 13 - Mancal de rolamento UCP207	45
Figura 14 - Dados técnicos do rolamento UCP207	46
Figura 15 - Dados técnicos do rolamento UCP207	46
Figura 16 - Sensor de rotação magnético tipo <i>pick-up</i>	47
Figura 17 - Vibra-Stop VS 03	48
Figura 18 - Projeto 3D da estrutura da máquina	49
Figura 19 - Acoplamento elástico Acriflex AG	50
Figura 20 - Projeto 3D do Mancal Fixo.....	51
Figura 21 - Pinça ER25	52
Figura 22 - Projeto 3D do Eixo	52
Figura 23 - Projeto 3D do Mancal Móvel	54
Figura 24 - Projeto 3D do Mancal Móvel em corte	54
Figura 25 - Porcas KMT	55
Figura 26 - Grampo e sapatilha para cabo de aço	56
Figura 27 - Dimensões do gancho para suporte de carga.....	56

Figura 28 - Projeto 3D do sistema de aplicação de carga	57
Figura 29 - Projeto 3D do Mancal Móvel rotacionando	58
Figura 30 - Projeto 3D da máquina completa	59

LISTA DE TABELAS/GRÁFICOS

Gráfico 1 - Diagrama tensão-deformação de material dúctil	21
Gráfico 2 - Curva de Wöhle ou curva S-N	23
Gráfico 3 - Diagrama tensão-deformação de material frágil	25
Gráfico 4 - Classificações da fadiga quanto ao número de ciclos	29
Gráfico 5 - Curva σ -N para fadiga alto e giga ciclos	29
Gráfico 6 - Resultados do limite de resistência à fadiga para diferentes aços	33
Tabela 1 - Lista de peças para reposição.....	60

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_a - Tensão alternada

σ_m - Tensão média

$\sigma_{m\acute{a}x}$ - Tensão máxima

$\sigma_{m\acute{i}n}$ - Tensão mínima

σ_r - Variação das tensões

R - Razão das tensões

A - Razão das amplitudes

S'_e - Limite de resistência à fadiga ideal do material

S_{ut} - Limite de resistência à tração mínimo

S_e - Limite de resistência à fadiga real do componente

k_a - Fator de modificação de condição de superfície

k_b - Fator de modificação de tamanho

k_c - Fator de modificação de carga

k_d - Fator de modificação de temperatura

k_e - Fator de confiabilidade

k_f - Fator de modificação por efeitos variados

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
1.1.	Objetivo geral.....	18
1.2.	Problema.....	18
1.3.	Justificativa.....	18
1.4.	Metodologia.....	18
1.4.1.	Metodologia científica.....	18
1.4.2.	Metodologia do projeto.....	19
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1.	Ensaaios mecânicos	20
2.1.1.	Ensaaios destrutivos	20
2.1.2.	Ensaio de tração.....	20
2.1.3.	Ensaio de flexão.....	21
2.1.4.	Ensaio de fadiga.....	22
2.2.	Falha	23
2.2.1.	Trinca	23
2.2.2.	Fratura.....	24
2.2.3.	Fratura dúctil	24
2.2.4.	Fratura frágil	25
2.3.	Fadiga	26
2.3.1.	Carregamentos cíclicos	27
2.3.2.	Fadiga de baixo ciclo, alto ciclo e giga ciclo	28

2.3.3.	Causas de fadiga.....	30
2.3.4.	Nucleação e propagação de trincas	30
2.4.	Limite de resistência à fadiga dos materiais.....	32
2.5.	Limite de Resistência à Fadiga dos Componentes	33
2.6.	Métodos experimentais para determinação do limite de resistência à fadiga	34
2.6.1.	Método convencional pela curva σ -N	34
2.7.	Software de modelamento 3D - Autodesk Inventor.....	35
3.	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	36
3.1.	Funcionamento	37
3.1.1.	<i>Setup</i> da máquina	39
3.1.2.	Pré-Ensaio.....	39
3.1.3.	Ensaio	39
3.1.4.	Lógica de Programação	40
3.2.	Construção do projeto.....	40
3.2.1.	Corpo de prova.....	41
3.2.2.	Tipo de momento utilizado na máquina.....	42
3.2.3.	Considerações de rotação do ensaio	44
3.2.4.	Dimensionamento do motor elétrico	44
3.2.5.	Dimensionamento dos rolamentos	45
3.2.6.	Sistema de aplicação de carga	46
3.2.7.	Dimensionamento do sensor.....	47

3.2.8. Projeto da máquina e detalhamento.....	48
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
Anexo A: Norma de ensaio JIS Z 2274	65
Apêndice A: Cronograma - Gráfico de Gantt.....	77
Apêndice B: Desenhos do projeto	78

1. INTRODUÇÃO

A falha por fadiga representa boa parte das falhas de materiais resultando na indisponibilidade de máquinas e equipamentos e prejuízos que vão da parada da produção em uma indústria à vida de pessoas, operadores ou usuários desses equipamentos. Sabendo disso, desenvolvemos esse trabalho que busca melhor compreender o fenômeno da fadiga dos materiais e desenvolver um meio de determinar a vida útil destes por meio de ensaios.

Para a determinação da fadiga dos materiais projetamos uma máquina de fadiga por flexão-rotativa de simples fabricação. Um corpo de prova cujas propriedades se deseja estudar é preso à máquina que o rotaciona e ao mesmo tempo impõe um momento fletor. O ensaio é finalizado quando o corpo de prova falha, ou seja, rompe dividindo-se em duas partes.

Inicialmente foram feitas pesquisas bibliográficas sobre os temas ciências dos materiais e projeto de máquinas. Com as pesquisas pode-se entender melhor as características mecânicas dos materiais e seu comportamento quando submetidos à esforços estáticos, dinâmicos e cíclicos, além de compreender os ensaios destrutivos e os mecanismos de falha dos materiais ensaiados.

Definido o modelo da máquina de ensaio por meio de norma, passamos ao projeto de peças e seleção de equipamentos. Nesta etapa utilizamos *software* de modelamento 3D, onde pudemos simular montagens de conjunto e criar os desenhos do projeto.

Neste trabalho apresentamos as pesquisas bibliográficas realizadas, o desenvolvimento do projeto da máquina e as considerações finais com resultados e melhorias propostas.

1.1. Objetivo geral

A finalidade desse trabalho é desenvolver o projeto de uma máquina de ensaio de fadiga por flexão-rotativa de simples fabricação para ensaio de diferentes materiais comumente usados na engenharia que possibilite determinar a curva σ -N e o limite de resistência à fadiga desses materiais. A partir desse resultado busca-se melhor entender as características de resistência mecânica dos materiais tornando a escolha para suas aplicações mais assertiva.

1.2. Problema

A falha por fadiga é comum em máquinas e equipamentos e pode causar de prejuízos como parada em linhas de produção e acidentes que põem em risco a vida de operadores e usuários. Como reduzir esse problema de forma barata e com confiabilidade?

1.3. Justificativa

Mesmo com o desenvolvimento tecnológico de materiais visando a obtenção de melhores propriedades mecânicas e de métodos preventivos e preditivos de manutenção a falha por fadiga ainda representa uma parte importante dos problemas apresentados por máquinas e equipamentos na indústria. Buscando maneiras de aprimorar estudos e melhor compreender a falha por fadiga desenvolvemos o sistema apresentado neste trabalho.

1.4. Metodologia

1.4.1. Metodologia científica

O projeto se trata de um estudo de caso de caráter descritivo, pois tem como objetivo aprofundar conhecimentos em relação ao desenvolvimento e ao funcionamento da máquina de ensaio (GIL, 2012), além de ser um estudo qualitativo que visa compreender os significados dos resultados obtidos coletando dados e fazendo análises destes. (GODOY, 2005)

Para o desenvolvimento do projeto foram necessárias pesquisas em referenciais da literatura para embasamento teórico, para essa etapa têm-se a pesquisa bibliográfica exploratória do projeto. (GIL, 2012)

1.4.2. Metodologia do projeto

O desenvolvimento do projeto foi dividido em quatro etapas que no trabalho são apresentadas como capítulos.

O primeiro capítulo é uma breve introdução sobre a importância do estudo da fadiga dos materiais para a engenharia com a apresentação da justificativa e do objetivo do trabalho.

O segundo capítulo trata do embasamento teórico do trabalho onde o tema fadiga é abordado de maneira mais aprofundada e são apresentados os tipos de ensaios mecânicos e suas respectivas funções, tipos de falhas e como estas ocorrem.

No terceiro capítulo são apresentados o desenvolvimento do projeto da máquina, seu funcionamento e a descrição dos componentes do projeto.

Por fim, o quarto capítulo trata dos resultados obtidos, as considerações finais, sugestões de melhorias e as referências bibliográficas que serviram de embasamento para o projeto.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Ensaaios mecânicos

Ensaaios mecânicos são técnicas aplicadas a corpos de prova com objetivo de determinar as características mecânicas do material ensaiado. Determina-se o ensaio a ser realizado de acordo com a aplicação do material e a solicitação de esforços que o produto será submetido, além disso deve-se observar as especificações do produto e quais requisitos devem ser atingidos nos ensaios para conformidade com a aplicação deste produto. As técnicas utilizadas podem ou não resultar em danos irreversíveis ao corpo de prova, por esse motivo os ensaios são classificados como destrutivos ou não destrutivos. (SOUZA, 1982)

O engenheiro deve se atentar a resultados de testes para materiais, já que a maioria deles não reproduz com exatidão a aplicação e a composição do material utilizado no projeto. Quando possível, executar testes em protótipos em condições de trabalho é o mais seguro. Caso não seja possível deve-se adaptar os resultados de testes padronizados. (NORTON, 2013)

2.1.1. Ensaaios destrutivos

Ensaaios destrutivos são os mais comumente aplicados. Este tipo de ensaio normalmente resulta em fratura ou inutilização do corpo de prova ou produto. São classificados como destrutivos os ensaios de tração, compressão, torção, flexão, fadiga, impacto e dureza. O último é classificado como destrutivo pois resulta em dano superficial permanente apesar de, algumas vezes, não inutilizar o produto ou material. (SOUZA, 1982)

2.1.2. Ensaio de tração

O ensaio de tração consiste em aplicação lenta de tensão no sentido axial de um corpo de prova até sua ruptura. O corpo de prova, que tem dimensões padronizadas, é fixado pelas extremidades roscadas à máquina de ensaio que realiza e monitora um esforço controlado e o alongamento do material até a falha. Com os

valores resultantes do ensaio obtêm-se o diagrama tensão-deformação para esforços de tração do material. (NORTON, 2013)

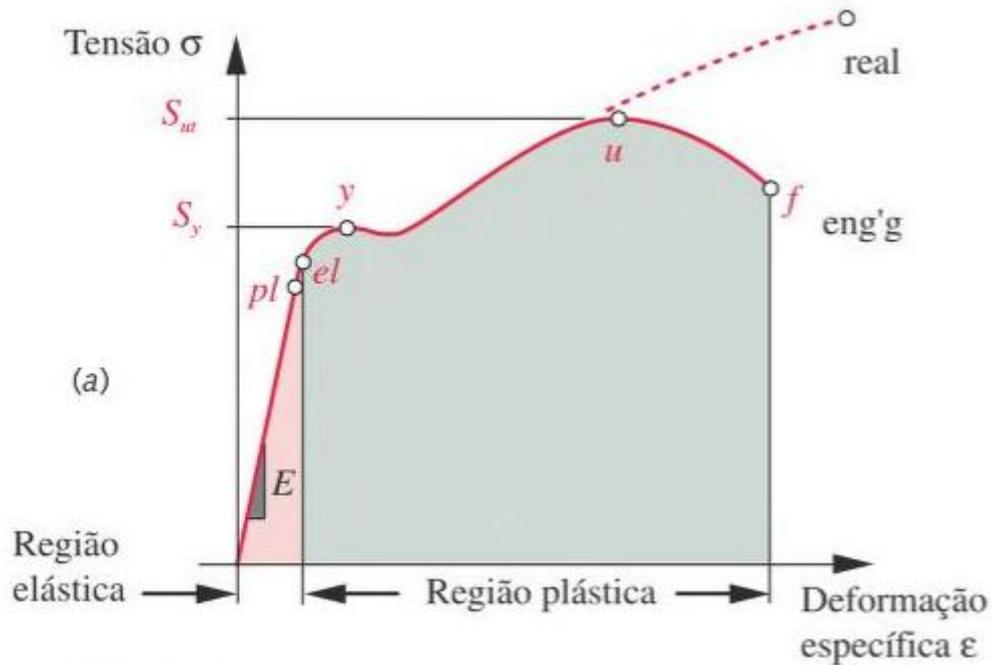


Gráfico 1 - Diagrama tensão-deformação de material dúctil
Fonte: (NORTON, 2013, p. 32)

2.1.3. Ensaio de flexão

O ensaio de flexão consiste em apoiar um corpo de prova por suas extremidades e aplicar um carregamento em seu centro no sentido transversal até que o corpo de prova se rompa. No ensaio de flexão ocorrem duas tensões simultâneas, tração na parte de baixo (lado convexo) e compressão na parte superior (lado côncavo). Por conta disso, pode-se usar o diagrama tensão-deformação do ensaio de tração para prever a falha na flexão. (NORTON, 2013)

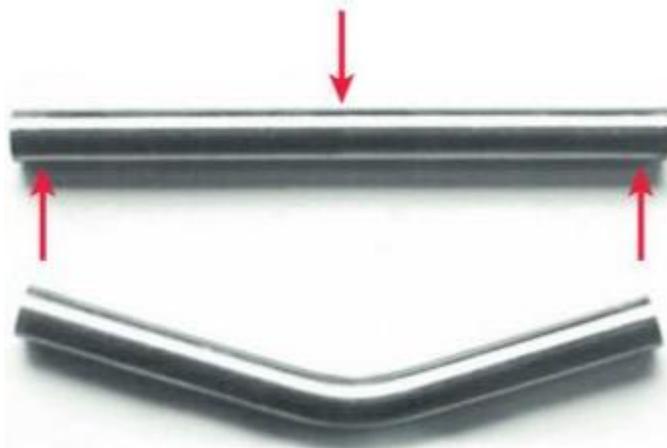


Figura 1 - Aplicação de tensão em corpo de prova para ensaio de flexão
Fonte: (NORTON, 2013, p. 36)

2.1.4. Ensaio de fadiga

O ensaio de resistência à fadiga busca melhor representar o comportamento do material e da estrutura sujeita a carregamentos cíclicos ou dinâmicos. Os ensaios de tração e flexão são realizados com acréscimo de carga lento, por isso são considerados estáticos. Dificilmente projeta-se uma estrutura sujeita apenas a cargas estáticas, a maioria sofre carregamento dinâmico que pode acarretar falha por fadiga (NORTON, 2013).

Em 1870 foram publicadas as descobertas do engenheiro alemão August Wöhler, que durante 12 anos realizou estudos com eixos sob carregamento alternado. Os estudos, que consistiam em aplicação de carga variante em eixos por um número de ciclos até a falha, mostraram que existe um limite para aplicação de tensão em ciclos alternados que foi chamado tensão *limite de resistência à fadiga* para aços. A partir dos estudos de Wöhler determinou-se a curva *S-N* (ou curva $\sigma-N$) que se tornou a forma padrão para determinar a resistência dos materiais sob cargas cíclicas. (NORTON, 2013)

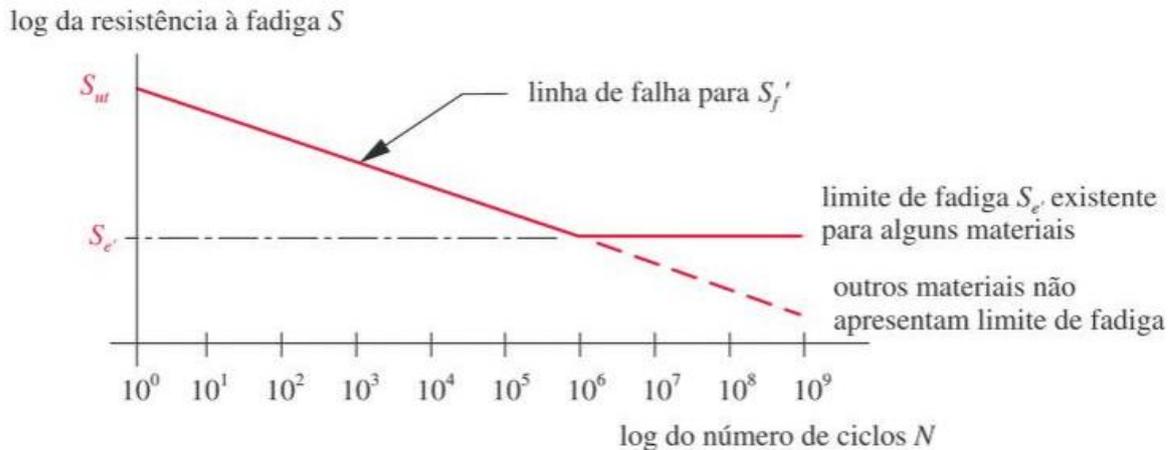


Gráfico 2 - Curva de Wöhle ou curva S-N
 Fonte: (NORTON, 2013, p. 305)

No trabalho apresentado busca-se realizar o ensaio de fadiga por flexão rotativa para metais utilizando o método da *Japanese Industrial Standard* descrito no documento JIS Z 2274 de 1978.

2.2. Falha

Falhas são eventos indesejáveis e de difícil determinação em projetos de engenharia que causam prejuízos financeiros e, na pior das hipóteses, perda de vidas humanas. Podem ser causados por dimensionamento incorreto de estruturas, má qualidade de materiais ou execução incorreta do projeto. A prevenção e correção de falhas é primordial em projetos de engenharia e cabe aos profissionais da área estudar e determinar formas para que sejam reduzidas ao mínimo possível as chances de ocorrência de falhas. (CALLISTER, 2002)

2.2.1. Trinca

Toda falha tem como início trincas. As trincas podem ter origem na manufatura do material, em forma de partículas ou inclusões, ou surgir em decorrência de tensões cíclicas por um determinado período em regiões de concentração de tensão. (NORTON, 2013)

A falha por fadiga passa por três estágios: início da trinca - estágio de pequena duração, propagação da trinca - estágio mais longo, ruptura repentina devido ao crescimento instável da trinca - estágio final e instantâneo. (NORTON, 2013)

2.2.2. Fratura

A fratura ocorre quando um segmento do material de um produto ou corpo de prova se rompe em duas partes devido a uma tensão aplicada, que pode ser de tração, torção, compressão ou flexão. O rompimento do material é resultado da propagação de trincas devido a essas tensões. Dependendo da maneira como as trincas se propagam classifica-se a fratura como dúctil ou frágil. De maneira geral, prefere-se a fratura dúctil à frágil já que a primeira tem propagação de trincas mais lenta, que proporciona um tempo de resposta maior antes da falha. Além disso, a ruptura de materiais dúcteis requer maior energia, pois são mais tenazes. (CALLISTER, 2002)

2.2.3. Fratura dúctil

Classifica-se como dúctil a fratura que apresenta deformação plástica importante na região de ruptura, característica que demonstra boa capacidade de absorção de energia do material ensaiado. (CALLISTER, 2002)

No diagrama tensão-deformação de um material que apresenta fratura dúctil nota-se uma região importante entre os pontos de escoamento y e o ponto de ruptura f (Gráfico 1). A região da fratura apresenta picos e vales, alongamento e redução da seção transversal. (NORTON, 2013)

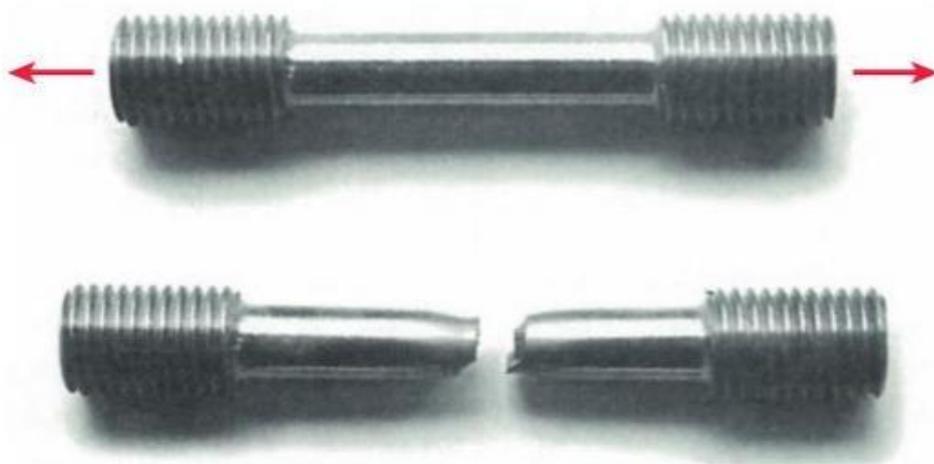


Figura 2 - Fratura em material dúctil
Fonte: (NORTON, 2013, p. 33)

Em fraturas dúcteis a propagação das trincas se dá de maneira lenta, com deformação plástica extensa até a ruptura. Neste caso a trinca é chamada *estável*. (CALLISTER, 2002)

2.2.4. Fratura frágil

Fraturas frágeis ocorrem em materiais com baixa capacidade de deformação plástica. A propagação de trincas ocorre de maneira abrupta sendo possível identificar sua origem observando padrões na superfície de ruptura. Por conta da rápida propagação as trincas de materiais frágeis são chamadas *instáveis*. (CALLISTER, 2002)

No diagrama tensão-deformação de materiais frágeis é difícil a determinação do ponto de escoamento y do material e a região de deformação plástica é notadamente menor que a de materiais dúcteis até o ponto de ruptura f . A fratura é mais uniforme que a dúctil com menor alongamento. (NORTON, 2013)

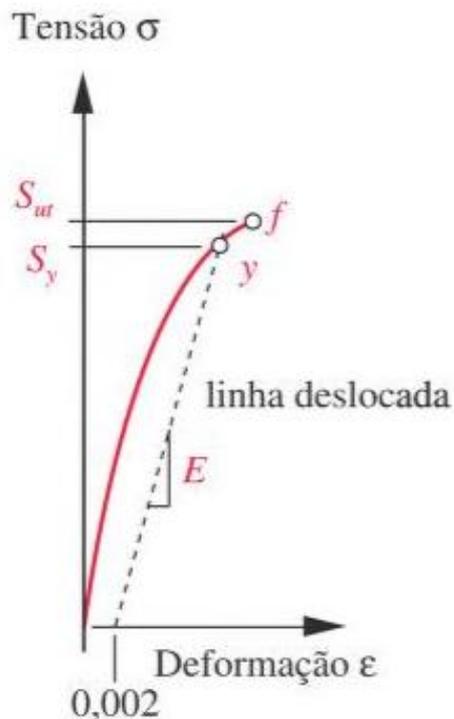


Gráfico 3 - Diagrama tensão-deformação de material frágil
Fonte: (NORTON, 2013, p. 34)



Figura 3 - Fratura em material frágil
Fonte: (NORTON, 2013, p. 34)

2.3. Fadiga

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, que cresce até atingir um tamanho crítico, suficiente para a ruptura final, em geral brusca, apresentando características macroscópicas de uma fratura frágil. (ROSA, 2002)

A fadiga é um fenômeno que pode ocorrer em estruturas onde tensões variáveis no tempo estão presentes. Alguns exemplos são pontes, aeronaves e componentes de máquinas. Nessas situações, a falha por fadiga ocorre em um nível de tensão bastante inferior ao limite de ruptura ou mesmo ao limite de escoamento para uma carga estática. Ela é a principal causa de falha individual nos metais, representando aproximadamente 90% dessas falhas. É catastrófica, podendo ocorrer repentinamente. (CALLISTER, 2002)

O fenômeno foi documentado pela primeira vez por volta de 1800, quando os eixos de um vagão ferroviário falharam após um período em serviço. O termo “fadiga” foi proposto por Poncelet em 1839, mesmo antes do mecanismo ser compreendido.

No artigo “As Causas da Ruptura Inesperada de Munhões de Eixos Ferroviários”, apresentado por Rankine em 1843, a teoria foi que o material havia se “cristalizado”, ocasionando uma fratura frágil devido às tensões variáveis no tempo. (NORTON, 2013)

Apenas após a metade do século XIX, a primeira investigação científica a respeito foi feita pelo engenheiro alemão Wöhler (1870). Seus estudos possibilitaram a determinação da curva S-N ou curva de Wöhler. (ROSA, 2002)

2.3.1. Carregamentos cíclicos

Há três fatores básicos necessários para o fenômeno da fadiga estar presente: uma tensão máxima de valor consideravelmente elevado, uma grande oscilação entre tensões mínima e máxima, e um número de ciclos alto (CAMPBELL, 2008).

Os carregamentos cíclicos podem ter muitas configurações diferentes, e as mais comuns são mostradas na Figura 4.

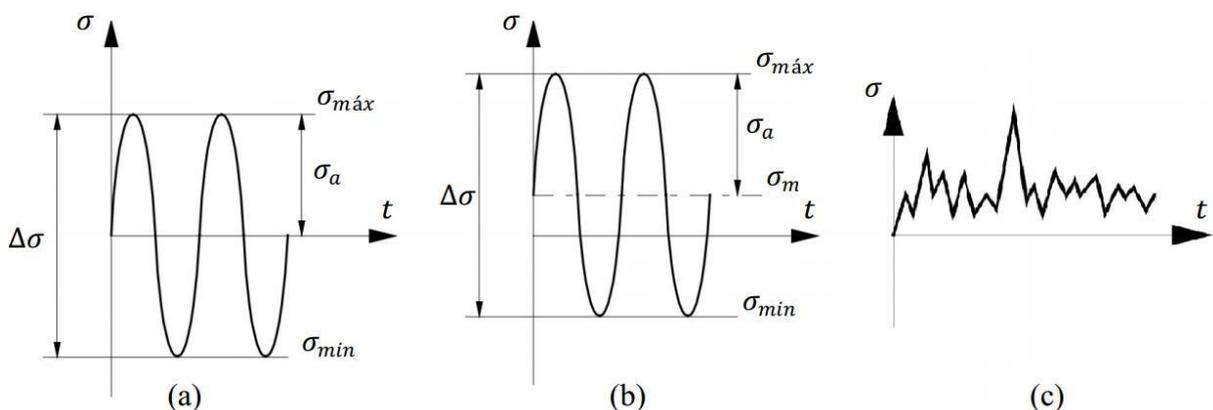


Figura 4 - Carregamentos cíclicos (a) completamente alternado, (b) pulsativo e (c) aleatório

Fonte: adaptada de (ROSA, 2002, p. 250)

O carregamento completamente alternado possui as tensões mínima e máxima de módulos iguais, e a tensão média nula. Já o carregamento pulsativo possui a tensão média diferente de zero, e as tensões mínima e máxima são diferentes. Há, ainda, o carregamento aleatório ou irregular, cujo perfil é imprevisível.

Um carregamento cíclico é composto de dois componentes: uma tensão média, σ_m , e uma tensão alternada, σ_a .

A variação das tensões, σ_r , é a diferença entre as tensões máxima e mínima:

$$\sigma_r = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad (1)$$

A tens\~ao alternada \u00e9 metade dessa varia\~ao:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (2)$$

A tens\~ao m\u00e9dia \u00e9, matematicamente, a m\u00e9dia aritm\u00e9tica entre as tens\~oes m\u00e1xima e m\u00ednima:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad (3)$$

Duas raz\~oes comumente utilizadas em casos de fadiga s\~ao a raz\~ao entre as tens\~oes, R , e a amplitude, A , onde:

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (4)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1 - R}{1 + R} \quad (5)$$

2.3.2. Fadiga de baixo ciclo, alto ciclo e giga ciclo

Na literatura, a fadiga pode ser classificada quanto \u00e0 quantidade de ciclos que levam o material \u00e0 falha. Para Budynas; Nisbett (2011), quando as falhas ocorrem abaixo de 10^3 ciclos, \u00e9 dito que a fadiga \u00e9 de baixo ciclo. Acima disso, a fadiga \u00e9 considerada de alto ciclo. No entanto, para Campbell (2008), a divis\~ao \u00e9 feita em 105 ciclos. O primeiro tamb\u00e9m define que, a partir de 106 ciclos, o material possui vida infinita, na qual n\~ao ocorrer\u00e1 falha para uma tens\~ao abaixo do limite de resist\u00eancia \u00e0 fadiga, independentemente do n\u00famero de ciclos. O Gr\u00e1fico 4 mostra as classifica\~oes numa curva σ - N .

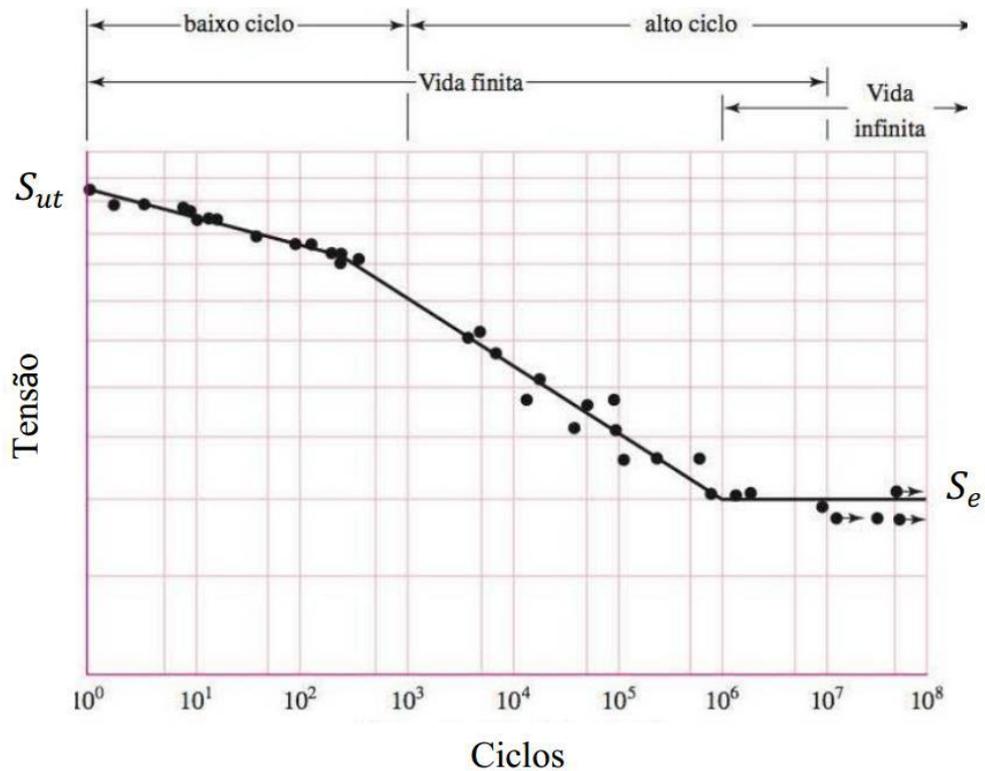


Gráfico 4 - Classificações da fadiga quanto ao número de ciclos
 Fonte: adaptada de (BUDYNAS; NISBETT, 2011, p. 310)

Mais recentemente, foi introduzida por NICHOLAS (2006) uma nova classificação:

Fadiga de giga ciclo. Nela, alguns materiais podem falhar quando submetidos a uma tensão abaixo do limite de resistência à fadiga devido ao surgimento de trincas internas após um número de ciclos muito grande. A Gráfico 5 mostra a curva σ -N para a classificação de giga ciclo.

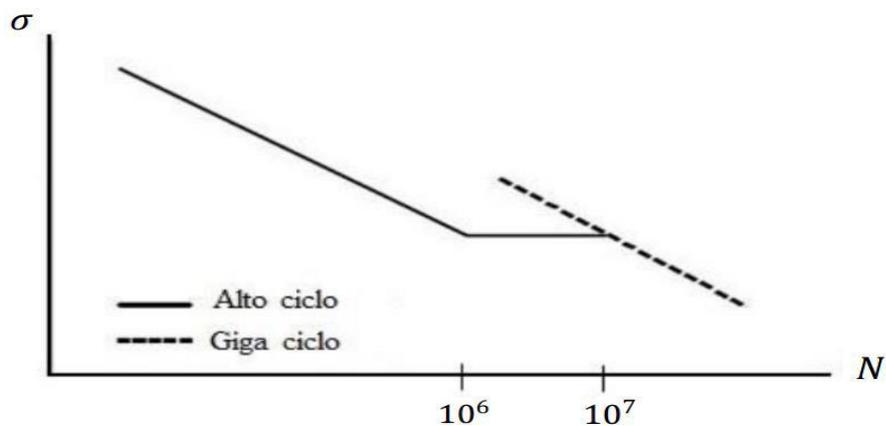


Gráfico 5 - Curva σ -N para fadiga alto e giga ciclos
 Fonte: adaptada de (NICHOLAS, 2006, p. 28)

2.3.3. Causas de fadiga

São causas comuns de fadiga do material: superfícies mal-acabadas, vibração, torção e temperaturas irregulares para o processo.

Em muitos casos a trinca, que leva à falha, não passa pelo período de nucleação, pois a peça possui trincas previamente existentes, na forma de defeitos oriundos do processo de fabricação, ou mesmo pelo uso do equipamento. Estes defeitos podem ser, por exemplo, provenientes do processo fabricação, como soldagem, fundição, forjamento, retífica, laminação, extrusão, estiramento ou devidos a um tratamento térmico inadequado, muito severo, ou ainda devido um ataque do meio ambiente agressivo, que leva a uma corrosão na superfície do material. (ROSA, 2002)

Surgem descontinuidades microscópicas e submicroscópicas superficiais e subsuperficiais, tais como inclusões de material estranho, segregação de liga, vazios, partículas duras precipitadas e descontinuidades cristalinas.

2.3.4. Nucleação e propagação de trincas

Alguns autores classificam a nucleação de trincas de fadiga em dois estágios. Outros, como CAMPBELL (2008) e BUDYNAS; NISBETT (2011), definem três, sendo estes:

- I. É correspondente à iniciação de uma ou mais micro trincas, geralmente a partir de um entalhe ou descontinuidade superficial. Contudo, mesmo não havendo defeitos superficiais, a iniciação de trincas se dará devido à formação de bandas de deslizamento persistente (BDP's). O movimento dessas bandas leva à formação de intrusões e extrusões na superfície, que eventualmente irão gerar as trincas.

Inicialmente, a propagação ocorre devido às tensões cisalhantes, e seguem as bandas de deslizamento a 45° da direção da tensão principal. A velocidade da propagação é bastante lenta, na ordem de 1 nm por ciclo, e a trinca é imperceptível a olho nu. Quando ela atinge um tamanho suficiente para o campo de tensão em sua extremidade se tornar

dominante, a propagação muda de plano e passa a seguir a direção normal à tensão principal. Nesse momento, inicia-se o estágio 2. A Figura 6 ilustra as BDP's e a direção de propagação da trinca.

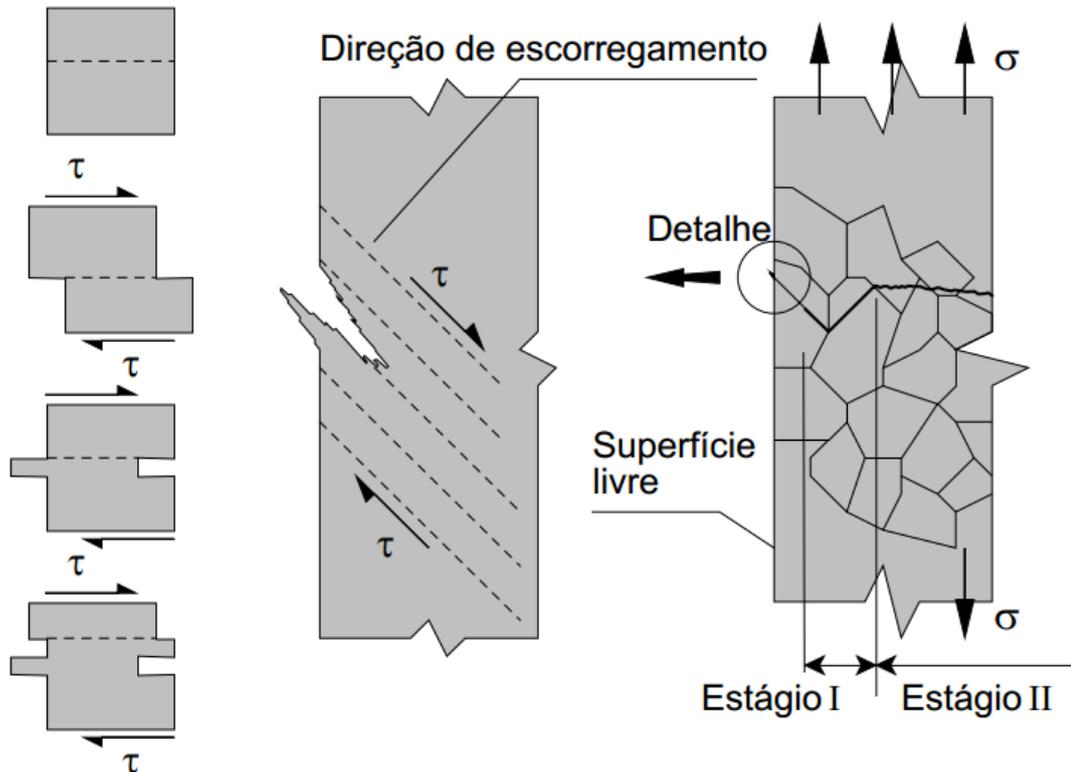


Figura 5 - Formação das bandas de deslizamento e direção de propagação das trincas
 Fonte: adaptada de ROSA (2002, p. 227)

II. Nesse estágio, as propriedades médias do material são mais relevantes do que as diferenças a nível metalúrgico, opostamente ao estágio I. A propagação continua perpendicularmente às tensões normais, e a trinca passa da escala micro para macro devido à formação de estrias, que levam ao aumento da trinca a cada ciclo. Para a propagação nesse estágio, é necessário que haja tensões trativas no extremo da trinca. Caso haja reduções ou paradas dessa carga, como em um eixo rotativo iniciando e parando, serão criadas marcas pelas sucessivas posições da frente de crescimento da trinca, que são chamadas de linhas de praia, mostradas na Figura 7.

Cada uma dessas linhas pode conter milhares ou até dezenas de milhares de ciclos de fadiga. No caso de ensaios de fadiga, como a tensão não cessa, as linhas de repouso praticamente não aparecerem.

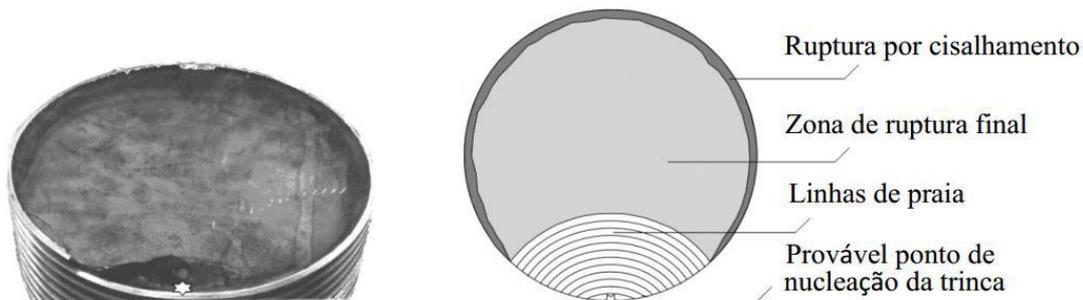


Figura 6 - Linhas de praia em uma fratura por fadiga
 Fonte: adaptada de ROSA (2002, p. 229)

- III. Quando a trinca se torna grande o suficiente para a seção remanescente não suportar a carga, ocorre a fratura por fadiga, sendo de maneira repentina com caráter frágil.

2.4. Limite de resistência à fadiga dos materiais

Em qualquer projeto, é fundamental conhecer o limite de resistência à fadiga dos materiais que estarão sujeitos a cargas cíclicas, seja para ter uma vida infinita ou para alcançar o número de ciclos desejado. Para isso, pode-se realizar ensaios de fadiga em laboratório ou utilizar-se da literatura, que contém grande quantidade de dados sobre resultados de ensaios e estimativas para esse limite. O Gráfico 3 representa os resultados de ensaios realizados para diferentes aços. Nele, é possível notar que, para limites de resistência à tração de até 1450 MPa, os resultados de resistência à fadiga variam entre cerca de 40% e 60% desse valor. Acima disso os resultados tendem a permanecer constantes. Com isso, BUDYNAS; NISBETT (2011) define a estimativa para o limite de resistência à fadiga dos aços como:

$$S'_e = \begin{cases} 0,5 S_{ut} & S_{ut} \leq 1450 \text{ MPa} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1450 \text{ MPa} \end{cases} \quad (6)$$

Onde:

S'_e é o limite de resistência à fadiga para o material, e o apóstrofo representa que o limite é para um corpo de prova padronizado.

S_{ut} é o limite de resistência à tração mínimo.

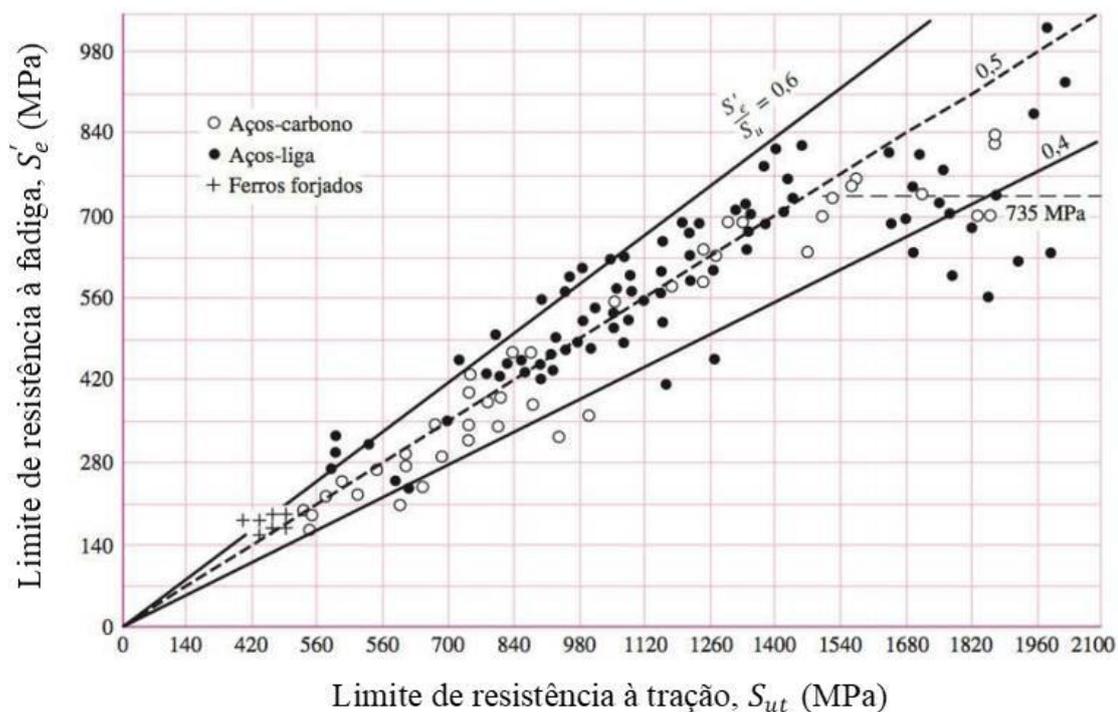


Gráfico 6 - Resultados do limite de resistência à fadiga para diferentes aços
 Fonte: adaptada de BUDYNAS; NISBETT (2011, p. 318)

Ainda assim, como o desvio padrão percebido no Gráfico 6 é grande, recomenda-se compensá-lo com um fator de segurança maior do que os empregados em projetos estáticos.

Além disso, a composição química e a microestrutura do aço também interferem nos resultados, portanto, deve-se utilizar curvas específicas para a composição e microestrutura em questão quando forem conhecidas.

2.5. Limite de Resistência à Fadiga dos Componentes

O limite de resistência à fadiga de um componente mecânico ou estrutural dificilmente será o mesmo determinado em ensaios ou pela Equação 6. Isso porque eles consideram um corpo de prova cuidadosamente preparado e padronizado, ensaiado sob condições controladas.

Entretanto, MARIN (1962) relacionou o limite real ao ideal por meio de fatores que ficaram conhecidos pelo seu nome, conforme a Equação 7.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (7)$$

Onde:

S_e é o limite de resistência à fadiga real do componente;

k_a é o fator de modificação de condição de superfície;

k_b é o fator de modificação de tamanho;

k_c é o fator de modificação de carga;

k_d é o fator de modificação de temperatura;

k_e é o fator de confiabilidade;

k_f é o fator de modificação por efeitos variados;

S'_e é o limite de resistência à fadiga ideal do material.

2.6. Métodos experimentais para determinação do limite de resistência à fadiga

O limite de resistência à fadiga pode, muitas vezes, não estar disponível para o material em questão. Nesse caso, deve-se realizar ensaios de fadiga em laboratório.

Existem diferentes métodos para determinação dessa propriedade de maneira experimental. Um deles é o método convencional pela curva σ -N. Como os métodos experimentais são realizados com corpos de prova padronizados, o resultado encontrado é equivalente ao limite de resistência à fadiga do material.

2.6.1. Método convencional pela curva σ -N

Neste método, proposto por A. Wöhler, a carga utilizada é constante durante cada teste. Com isso, as tensões mínimas e máxima não variam ao longo do tempo, sendo a tensão média nula. Para cada corpo de prova, anotam-se a tensão utilizada e o número de ciclos até a falha.

Os dados obtidos são então dispostos num gráfico semelhante ao Gráfico 7 de onde se obtém a curva σ -N para o material ensaiado e seu limite de resistência à fadiga.

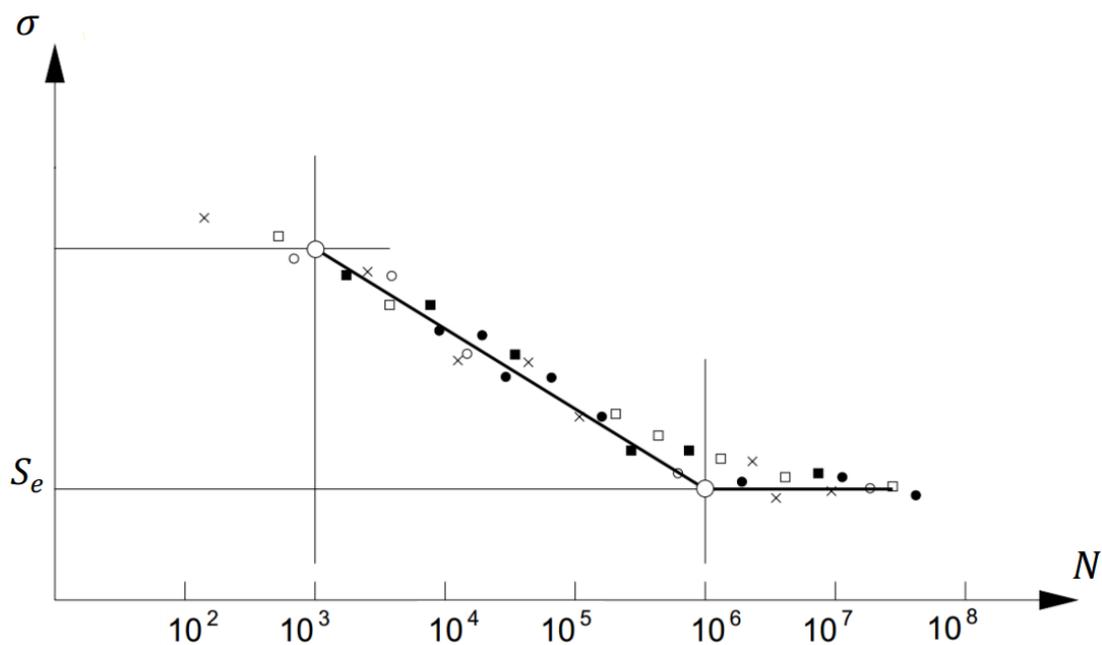


Gráfico 7 - Curva σ -N para material ensaiado
 Fonte: adaptada de ROSA (2002).

Nesse método, contudo, é preciso um grande número de corpos de prova para obter uma curva σ -N confiável, e normalmente o desvio padrão é grande. Além disso, cada teste demora um período consideravelmente grande de tempo, e um limite de ciclos precisa ser arbitrado para constituir o limite de resistência à fadiga (D'HUY, 1964).

2.7. Software de modelamento 3D - Autodesk Inventor

O Autodesk Inventor é um *software* desenvolvido pela companhia Autodesk que permite criar protótipos virtuais tridimensionais. Os modelos 3D gerados também são funcionais, ou seja, eles simulam o funcionamento no mundo real. O Autodesk Inventor também contempla a parte de engenharia, não apenas modelando as peças, como também permitindo que o seu comportamento mecânico seja avaliado, ultrapassando assim, o escopo de ferramentas CAD.

O Inventor foi utilizado para criar os desenhos de projeto e fabricação das peças e equipamentos, além do conjunto completo e simulação do projeto. Foi utilizada a versão 2018 do *software*.

3. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

A realização dos testes e ensaios em laboratório visam avaliar qual material tem melhor desempenho, desta forma, o teste e a avaliação dos eixos com a bancada de ensaio têm como objetivo geral simular as condições reais de utilização destes até que ocorra a falha por fadiga. A fadiga ocorrida nos eixos durante sua vida útil caracteriza-se como um problema para a estabilidade do sistema durante o movimento. Assim, faz-se necessário analisar comparativamente os eixos durante a flexão. Dentro deste contexto, é necessária a construção de uma máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa para realizar testes em eixos de diferentes materiais, para então avaliar qual amostra suporta melhor a fadiga.

O projeto consiste em desenvolver uma máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa, utilizando os conhecimentos adquiridos no curso de engenharia mecânica. A máquina será desenvolvida por meio da seleção do motor, eixos, rolamentos, sistema de aplicação de carga e os componentes estruturais, respeitando os requisitos pré-determinados no início do projeto. São eles:

- Rotação aplicada ao sistema.
- Carga aplicada ao sistema.
- Número de ciclos.

Com base nos estudos desenvolvidos durante a graduação de engenharia mecânica, verificou-se que a realização do projeto da máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa seria uma oportunidade de pôr em prática os conhecimentos adquiridos durante o curso em disciplinas como: resistência dos materiais, elementos de máquinas, processos de fabricação, materiais de construção mecânica, desenho técnico, entre outras.

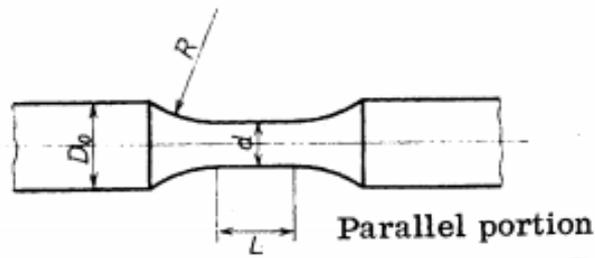
3.1. Funcionamento

O ensaio consiste em submeter um corpo de prova a solicitações de flexão, enquanto é girado em torno de um eixo, por um sistema motriz, em uma rotação específica e constante.

O ensaio é iniciado sob um determinado nível de tensão até a ocorrência da falha, sendo registrados o número de ciclos e o nível de tensão até a ruptura. O ensaio é executado com diferentes corpos de prova de mesmo material, alterando-se apenas a tensão aplicada. Os dados coletados são representados no diagrama S-N.

O equipamento utilizado para a execução dos ensaios de fadiga por flexão rotativa é composto por um contador de rotação, um motor, um dispositivo aplicador de carga e suportes para o corpo de prova. O contador de rotação registra o número de ciclos até a ruptura do corpo de prova. O motor gera a rotação necessária para a realização dos testes. Para ocorrer a flexão, são necessários dispositivos capazes de aplicar uma determinada carga ao corpo de prova, isto é feito pelos dispositivos aplicadores de carga. A fixação e o suporte do corpo de prova são feitos através de mandris e pinças.

O ensaio deve ser realizado utilizando um corpo de prova normativo conforme a Figura 8, onde o corpo de prova deverá ter a sua extremidade de $\varnothing 12$ mm fixado nas pinças de aperto rápido ER25, mantendo a simetria entre os diâmetros fixados, deve-se assegurar que o centro do corpo de prova fique no centro dos mancais.



Symbol	d mm	R	L
1- 6	6		
1- 8	8	3 d or more	2 d or more
1-10	10		
1-12	12		

D_0 shall, as a rule, be 8, 12, or 15 mm.

Figura 7 - Corpo de prova paralelo com dimensões
Fonte: JIS Z 2274 (1978, p. 2)

O motor modelo WEG 90S é responsável pela rotação do corpo de prova. O conjunto é unido por um acoplamento elástico Acriflex AG, que possui cubos simétricos e um elemento de borracha interno que absorve possíveis vibrações e desalinhamentos do sistema Mancal-Motor. O acoplamento elástico transmitirá a rotação ao Eixo Fixo que estará ligado ao Mancal de Pedestal e que garante a rotação linear e livre de batimentos.

A carga de trabalho deve ser imposta parcialmente. Conforme início do pré ensaio adiciona-se uma anilha (carga) por vez, atingindo-se a carga de trabalho necessária para realização do ensaio deve-se zerar o contador de ciclos e iniciar o ensaio.

Tendo a rotação controlada e conhecida, será mensurada a contagem de ciclos com um contador de ciclos magnético que ficará posicionado no Eixo Fixo do Mancal Móvel. O contador irá travar a contagem quando o eixo para de rodar, no caso após o corpo de prova falhar ocorrendo a fratura.

3.1.1. Setup da máquina

O operador deve verificar como estão os itens gerais da máquina, iniciando pela transmissão, analisando o motor, o acoplamento e sua borracha, os eixos e as pinças. Depois deve analisar o sistema de rotação do Mancal Móvel e se os rolamentos estão girando sem ruído e em perfeito estado. Também deve analisar o sistema de carga, verificar se os itens estão alinhados, se as porcas estão fixas e se o cabo de aço está conservado.

Após as verificações o operador deve rotacionar o Mancal Móvel no mínimo 45° para inserir o corpo de prova na pinça do Mancal Móvel, deve-se ter o cuidado de não riscar a porção útil do corpo de prova e segurar apenas nas extremidades de Ø12 mm. Depois de inserir o corpo de prova quase por completo, rotacionar o Mancal Móvel e posicioná-lo alinhado com o Mancal Fixo, puxar o corpo de prova e encaixar na pinça do Mancal Fixo, posicioná-lo simetricamente e apertar com chave de unha na pinça e uma chave fixa de 32 mm no eixo até que o corpo de prova esteja fixo.

Com o corpo de prova apertado, deve-se posicionar o parafuso M12 ao lado do Mancal Móvel e apertar as duas porcas. O parafuso impede o giro do mancal caso o corpo de prova se rompa durante o ensaio.

3.1.2. Pré-Ensaio

Concluído o *setup* da máquina, o operador deve abaixar a tampa de policarbonato de segurança, ligar o motor elétrico e o *display* do sensor de rotação e verificar se estão funcionando corretamente, se sim, com o corpo de prova em rotação, deve-se acrescentar as anilhas de peso no suporte de anilhas.

Deve-se iniciar o incremento de carga a partir da anilha mais pesada, uma anilha por vez, com um intervalo de 30 segundos entre uma adição de carga e outra.

3.1.3. Ensaio

Com o motor na rotação desejada, carga de ensaio adicionada, deve-se zerar o *display* de rotação do sensor e iniciar o ensaio a partir desse momento.

O ensaio deve funcionar até atingir um limite máximo de ciclos pré-determinado com base no material e carga através de cálculo, ou até o corpo de prova se romper.

Caso o corpo de prova se rompa, a transmissão de rotação até o Eixo do Mancal Móvel também cessará, uma vez que o corpo de prova não transmite mais movimento. O Eixo, então, irá parar de girar e o sensor de rotação irá parar a contagem dos ciclos.

3.1.4. Lógica de Programação

O sistema elétrico e de automação da máquina será terceirizado a uma indústria de automação.

A lógica de funcionamento deve garantir a qualidade e segurança do ensaio, devendo conter:

- I. Inversor de frequência para controle da rotação do motor elétrico;
- II. Sistema de segurança que desligue o motor elétrico caso a tampa de policarbonato seja aberta durante o ensaio e somente permita partida do motor com a tampa abaixada;
- III. *Display* e comunicação do sensor de rotação para facilitar o *start* e pausa da contagem de ciclos.
- IV. Após ruptura do corpo de prova, o Eixo irá parar de girar e o contador de ciclos deve interromper a rotação do motor, impedindo que o motor permaneça acionado mesmo com o ensaio encerrado. Isso deve garantir economia e autonomia para funcionamento do ensaio sem a necessidade de verificação do operador a todo momento.

3.2. Construção do projeto

Para construir a máquina utilizamos a norma Japonesa JIS Z 002274 do ano de 1978, que trata do tema '*Method of Rotating Bending Fatigue Testing of Metals*'. A norma define as condições de ensaio e do corpo de prova.

Foi decidido seguir o passo a passo da norma para construção da máquina de ensaio dividindo-a em tópicos para estudo e projeto, iniciando por:

- I. Corpo de Prova
- II. Tipo de Momento utilizado na máquina
- III. Considerações de Rotação do Ensaio

Após a conclusão dos itens acima que são citados na norma, projetamos e dimensionamos a máquina, iniciando por:

- IV. Dimensionamento do Motor Elétrico
- V. Dimensionamento dos Rolamentos
- VI. Sistema de Aplicação de Carga
- VII. Dimensionamento dos sensores

Com estas informações, com um esboço da máquina e alguns itens comerciais pré-definidos, projetamos a estrutura, os eixos, as bases de mancais e as peças gerais.

3.2.1. Corpo de prova

A norma nos dá a possibilidade de trabalhar com diferentes modelos de corpo de prova, o escolhido foi um modelo simples, de fácil construção e manuseio. A norma fornece algumas dimensões iniciais e o restante deve ser calculado conforme a inicial escolhida, conforme a Figura 9:

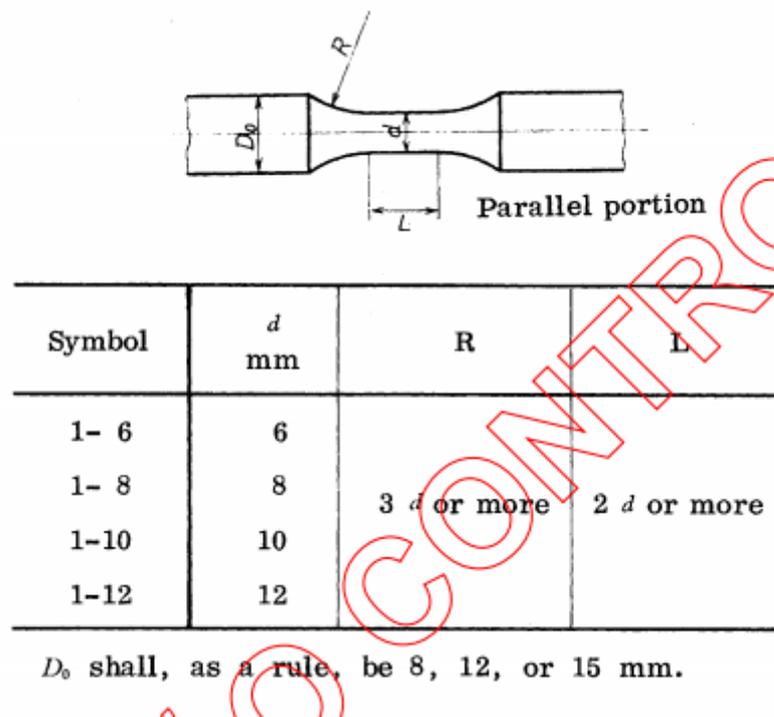


Figura 8 - Corpo de prova paralelo com dimensões
Fonte: JIS Z 2274 (1978, p. 2)

De maneira a utilizar uma menor carga de trabalho para fratura, o $\varnothing d$ foi definido como 6 mm, e o restante por meio de cálculo será:

d (diâmetro da seção paralela) = 6 mm.

L (comprimento da porção paralela) = 12 mm no mínimo.

R (raio de concordância) = 18 mm no mínimo.

D_o (diâmetro externo) = como regra utilizar 8, 12 ou 15 mm.

Na construção do corpo de prova, especialmente na usinagem, deve se tomar alguns cuidados como não riscar e garantir uma tolerância para as medidas nominais de $\pm 0,05$ mm, e tolerância para excentricidade de no máximo $\pm 0,02$ mm.

3.2.2. Tipo de momento utilizado na máquina

A norma cita três principais modelos de máquina, cada um deles utiliza uma maneira de aplicar o momento ao corpo de prova e uma distribuição do momento na estrutura.

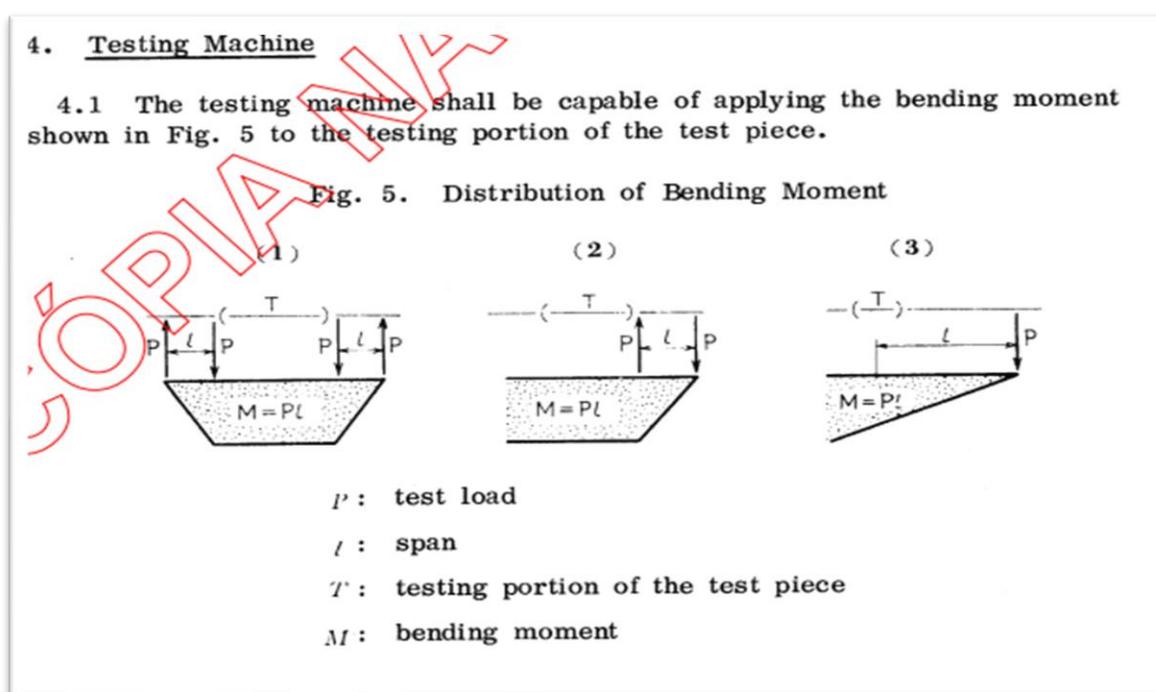


Figura 9 - Tipos de aplicação de momento fletor no corpo de prova

Fonte: JIS Z 2274 (1978, p. 4)

A Figura 10 explica quais as formas corretas de construção da máquina e a distribuição do momento atuante, onde:

P é a carga aplicada

L é a distância entre extremidades do mancal

T é a porção válida para aplicação de carga do corpo de prova

M é o momento fletor

O modelo 1 é o mais comum. Possui dois mancais fixos, a carga é aplicada simultaneamente nos dois mancais e eles giram em seu próprio eixo, aplicando um momento máximo no centro do corpo de prova.

O modelo 2 é aparentemente o mais simples, pois possui um mancal fixo que mantém a estrutura rígida e travada, e do outro lado do corpo de prova existe um mancal móvel, que gira em seu próprio eixo acionado pelo sistema de carga, e aplica um momento fletor em todo o comprimento do corpo de prova.

O modelo 3 é o mais complicado de construir, também possui um mancal fixo e um mancal móvel, porém o mancal móvel deve utilizar o centro do corpo de prova como eixo central para aplicar o momento e não o próprio eixo, criando um sistema de aplicação de carga bastante interessante, porém que ocupa mais espaço e é mais difícil de ser construído.

O modelo 2 foi escolhido para o desenvolvimento deste projeto, por ser o modelo de mais simples construção. Utilizando somente um mancal móvel, reduz a quantidade de rolamentos e mecanismos de aplicação de carga, barateando a máquina e garantindo uma manutenção mais simples.

Com base no modelo escolhido e nas informações de cálculo de momento fletor explicado pela norma, deve se utilizar o seguinte cálculo para descobrir o momento aplicado a porção útil do corpo de prova:

P = carga aplicada no sistema [N].

$$L = 71,7 \times 2 = 143,4 \text{ mm}$$

$$M = P \times 0.1434 = 0,1434P \text{ N.m}$$

3.2.3. Considerações de rotação do ensaio

Um dos fatores para realizar o ensaio é a rotação imposta pelo motor elétrico ao corpo de prova. Pode-se usar um inversor de frequência para variar a rotação e assim fixar um valor desejado, mas também pode-se usar somente uma rotação fixa. Neste caso a norma cita que o valor determinado deve estar entre 1000 rpm e 5000 rpm.

Importante considerar que todos os ensaios referentes a uma situação estudada devem ser reproduzidos com o mesmo rpm.

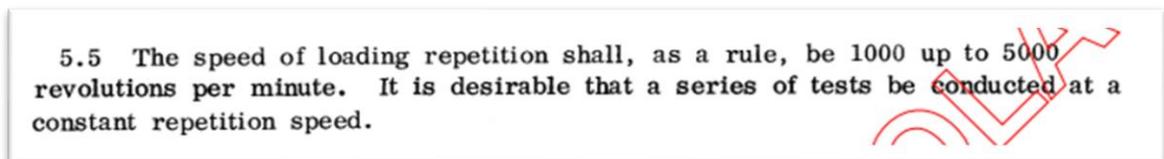


Figura 10 - Requisito de rotação necessária para a máquina
Fonte: JIS Z 2274 (1978, p. 6)

3.2.4. Dimensionamento do motor elétrico

O motor foi dimensionado a partir das informações descritas anteriormente na norma do ensaio com foco no requisito principal: rotação.

Com isso em mente, o motor WEG 90S foi selecionado. O modelo possui rotação de 1800 rpm e 1 cv. A fixação pode ser por flange frontal ou por base inferior.



Figura 11 - Motor WEG 90S
Fonte: (<https://www.weg.net/catalog/weg/> acesso 07/10/2020)

3.2.5. Dimensionamento dos rolamentos

Os rolamentos do projeto foram dimensionados tendo em vista as solicitações de carregamento.

O Mancal de Rolamento UCP207 foi escolhido por possuir robusta construção, com diâmetro interno de 35 mm, limite de carga dinâmica radial de 25,5 kN e limite de rotação de 4300 rpm. Os rolamentos são do tipo rígido de esferas de uma carreira. Não há aplicação de carga axial no sistema motor-corpo de prova.

Foram usados dois mancais, um em ligação com o motor, chamado de Mancal Fixo, e outro em ligação com o rolamento axial, chamado de Mancal Móvel.

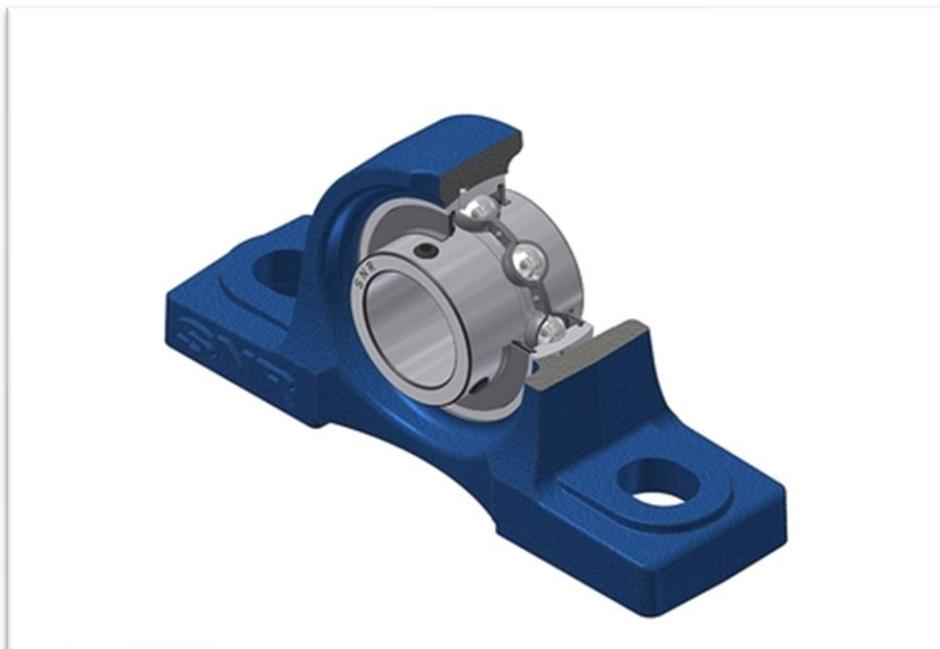


Figura 12 - Mancal de rolamento UCP207
Fonte: (<https://www.skf.com/br/> acesso em 07/10/2020)

DADOS DE CÁLCULO		
Classificação de carga dinâmica básica	C	25.5 kN
Classificação de carga estática básica	C ₀	15.3 kN
Limite de carga de fadiga	P _u	0.655 kN
Velocidade-limite com tolerância do eixo h6		4 300 r/min

Figura 13 - Dados técnicos do rolamento UCP207
 Fonte: (<https://www.skf.com/br/>) acesso em 07/10/2020.

No Mancal Móvel, além da rotação, será transmitido o momento fletor para o corpo de prova, para isso ele precisa rotacionar no seu próprio eixo. O rolamento axial de esferas 51205 será usado, pois não terá uma solicitação de carga alta uma vez que serve apenas para promover o giro do mancal e suporta uma solicitação de carga estática confortável, para a qual tem limite de 50 kN.

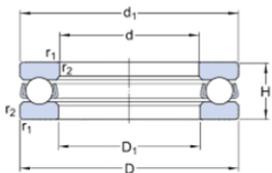
Especificações técnicas	
<input checked="" type="radio"/> Metric <input type="radio"/> Imperial	
	
DIMENSÕES	
d	25 mm
D	47 mm
H	15 mm
d ₁	≈ 47 mm
D ₁	≈ 27 mm
r _{1,2}	min. 0.6 mm

Figura 14 - Dados técnicos do rolamento UCP207
 Fonte: (<https://www.skf.com/br/>) acesso em 07/10/2020.

3.2.6. Sistema de aplicação de carga

O sistema de aplicação de carga foi pensado para ser simples possível. A aplicação da carga é feita por um conjunto de anilhas acopladas a estrutura do equipamento. Este conjunto é responsável pela aplicação da carga de tração e

compressão atuante no corpo de prova, simulando os esforços aplicados sobre o material em situação real.

3.2.7. Dimensionamento do sensor

Planejou-se terceirizar o sistema elétrico da máquina. Os responsáveis deverão esquematizar e realizar as ligações necessárias e lógicas de funcionamento para que todo o sistema funcione de maneira adequada e segura.

O contador de ciclos, porém, deve ser dimensionado de acordo com sua localização que segue a lógica de funcionamento da máquina: o contador deve parar a contagem de ciclos assim que o corpo de prova falhar.

Parte-se da ideia de que o corpo de prova rompido não possui capacidade de transmitir rotação ao mancal móvel, desse modo o eixo fixado no mancal móvel ficaria estável. Se posicionado de modo a contar os ciclos nesse eixo, assim que rompido o corpo de prova o contador interromperia também a contagem.

Utilizando o raciocínio acima, foi definido que o contador deve obter os dados de rotação fixado no mancal móvel. O sensor definido para a contagem de ciclos foi o sensor magnético tipo *pick-up*.



Figura 15 - Sensor de rotação magnético tipo pick-up
Fonte: (<https://www.mte-thomson.com.br/> acesso em 08/10/2020)

3.2.8. Projeto da máquina e detalhamento

A máquina pode ser dividida em algumas partes, sendo:

- I. Estrutura
- II. Mancal Fixo
- III. Mancal Móvel
- IV. Aplicação de Carga

I. Estrutura

Para se iniciar o projeto da estrutura da máquina utilizamos como referência o tamanho do motor e dos mancais de rolamentos. A estrutura foi projetada utilizando tubo de aço com secção quadrada de 30 mm e uma chapa de Aço de 14 mm usinada como base para os itens da máquina.

Um sistema de amortecimento de Vibra-Stop, modelo VS 03, no qual suporta 40kgs por pé e também será usado para absorver os impactos e vibrações, e manter a máquina estável.



Figura 16 - Vibra-Stop VS 03

Fonte: (<https://www.vibra-stop.com.br/> acesso em 08/10/2020)

Para garantir a segurança da operação e do operador, na região da máquina determinada para o ensaio foi projetado um sistema de abrir e fechar com placas de policarbonato de 3/8" que servirá como anteparo caso o corpo de prova projete alguma parte de material no momento da ruptura.



Figura 17 - Projeto 3D da estrutura da máquina

II. Mancal Fixo

O conjunto Mancal Fixo é composto basicamente pelo eixo que transmitirá a rotação ao corpo de prova, o mancal de rolamento, e a base do mancal, porém entre o mancal fixo e o motor elétrico temos um acoplamento de borracha.

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

Para a realização dos testes nesta bancada de ensaio foi selecionando o acoplamento elástico de garra Acriflex – AG 050.

O acoplamento é composto por dois cubos simétricos de ferro fundido, possuindo um elemento elástico, feito de borracha sintética de alta resistência a abrasão, que está localizada entre os dois cubos. A escolha deste material se deu em virtude da fácil montagem, sem a necessidade de ferramentas especiais, sem precisar de manutenção preventiva e nem de lubrificação. Este material tem como finalidade

absorver choques e vibrações. O material possui um baixo peso gerando assim um momento de inércia baixo.



Figura 18 - Acoplamento elástico Acriflex AG
Fonte: (<https://www.aciobras.com.br/> acesso em 10/10/2020)

Após a definição do acoplamento pudemos projetar a base do mancal de rolamento com base na altura do motor, também projetar o eixo central que deve transmitir a rotação do eixo ao corpo de prova e transmitir os esforços mecânicos aos rolamentos de esferas.

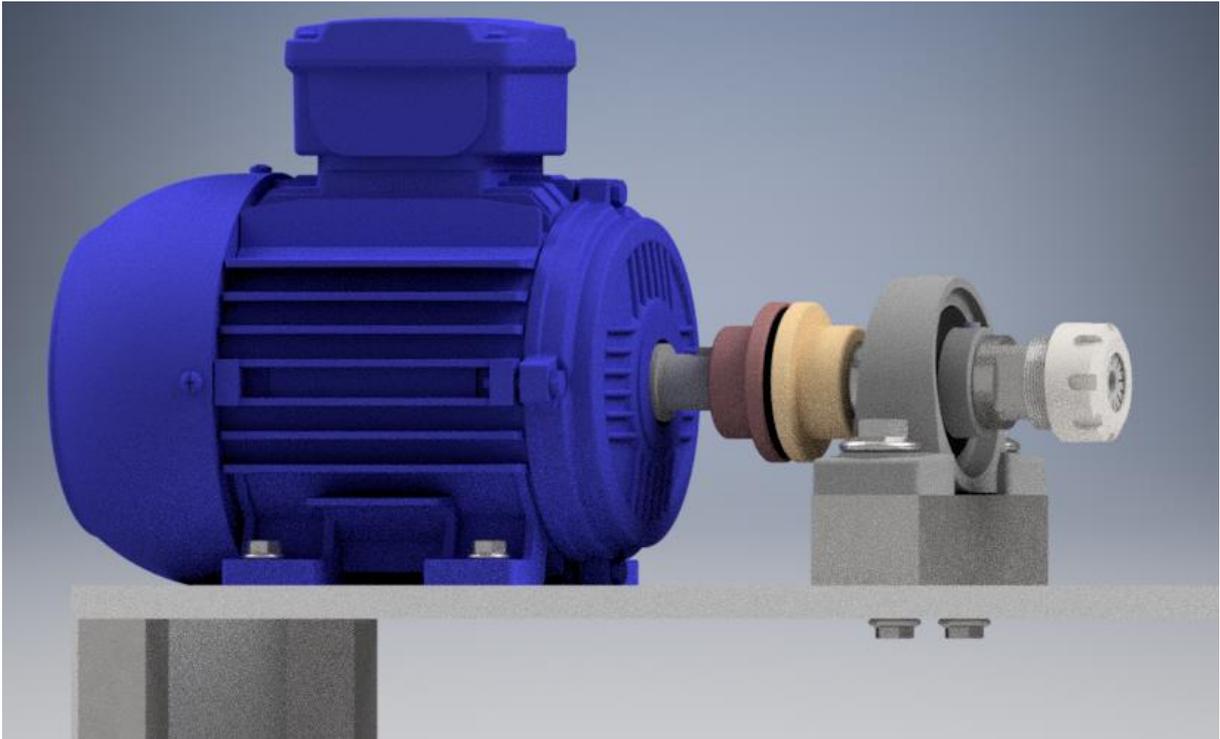


Figura 19 - Projeto 3D do Mancal Fixo

Para fixação do corpo de prova no eixo fixo o ideal é que todo o comprimento com $\varnothing 12$ mm do corpo de prova sofra a pressão de fixação e a melhor maneira de fazê-lo é usando um sistema de pinça. O eixo então, possui um cone interno para receber a pinça e ao sofrer o aperto deve pressionar e fixar o corpo de prova, mantendo alinhamento com ótima concentricidade.

O conjunto de pinças é feito para garantir o perfeito alinhamento e fixação de qualquer peça fixadas a elas e garantem um aperto uniforme em toda a área de contato.



Figura 20 - Pinça ER25

Fonte: (<https://www.pivetaferramentas.com.br> acesso em 07/09/2020)

O Eixo foi projetado em aço 4340 que é um material com ótima resistência mecânica, boa usinabilidade e termicamente tratável. O material receberá têmpera e revenimento para garantir dureza e resistência mecânica ainda maiores.

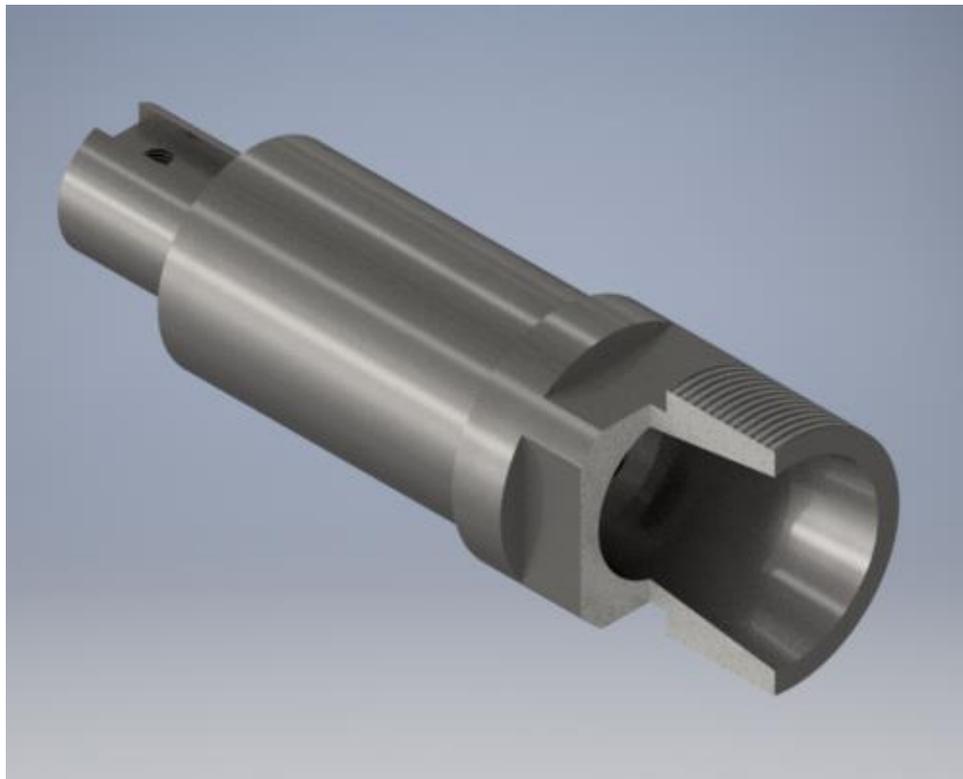


Figura 21 - Projeto 3D do Eixo

III. Mancal Móvel

O Mancal Móvel é semelhante ao Mancal Fixo nos itens como Eixo, Pinça e Mancal de rolamento, porém esse mancal além de permitir o perfeito alinhamento entre o Mancal Fixo e o Eixo deve permitir uma rotação em torno do seu próprio eixo central, e a melhor maneira de projetar um mecanismo de rotação é utilizando um rolamento.

Para essa função foi selecionado um rolamento axial de esfera, pois a única carga que esse rolamento sofrerá é a força peso do mancal atuando sobre seu sentido axial.

O mecanismo foi projetado com uma parte do rolamento sendo fixado na base e a outra parte ligada ao mancal de rolamento através de um eixo e fixado com uma arruela e uma porca KMT.

As porcas KMT são utilizadas para fixar rolamentos em máquinas e equipamentos que exijam extrema precisão, tais como: tornos, retíficas e fresas. Para o travamento no eixo, essas porcas possuem três pinos angularmente distribuídos, que são pressionados contra o eixo por parafusos. Os pinos têm inclinação igual ao ângulo da rosca, fazendo com que a porca não fique sujeita a cargas axiais, possibilitando o travamento da porca na exata posição do aperto.

A porca será a Nº 5, que são usadas em eixos com rosca M25.

O mesmo eixo de fixação do rolamento axial também servirá de base para o mancal de rolamento.

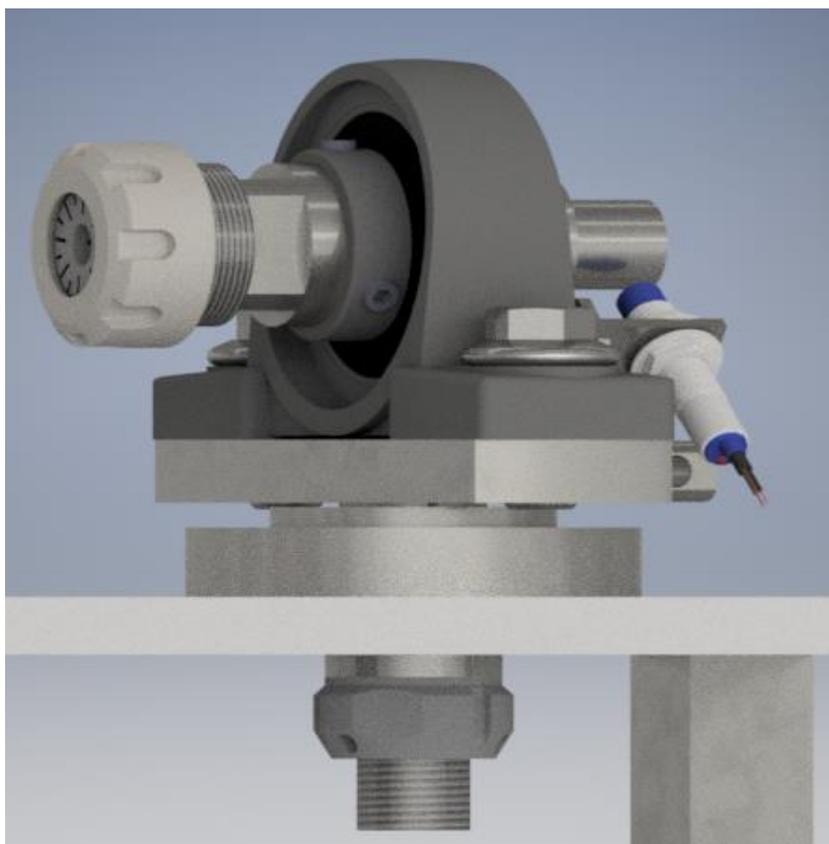


Figura 22 - Projeto 3D do Mancal Móvel

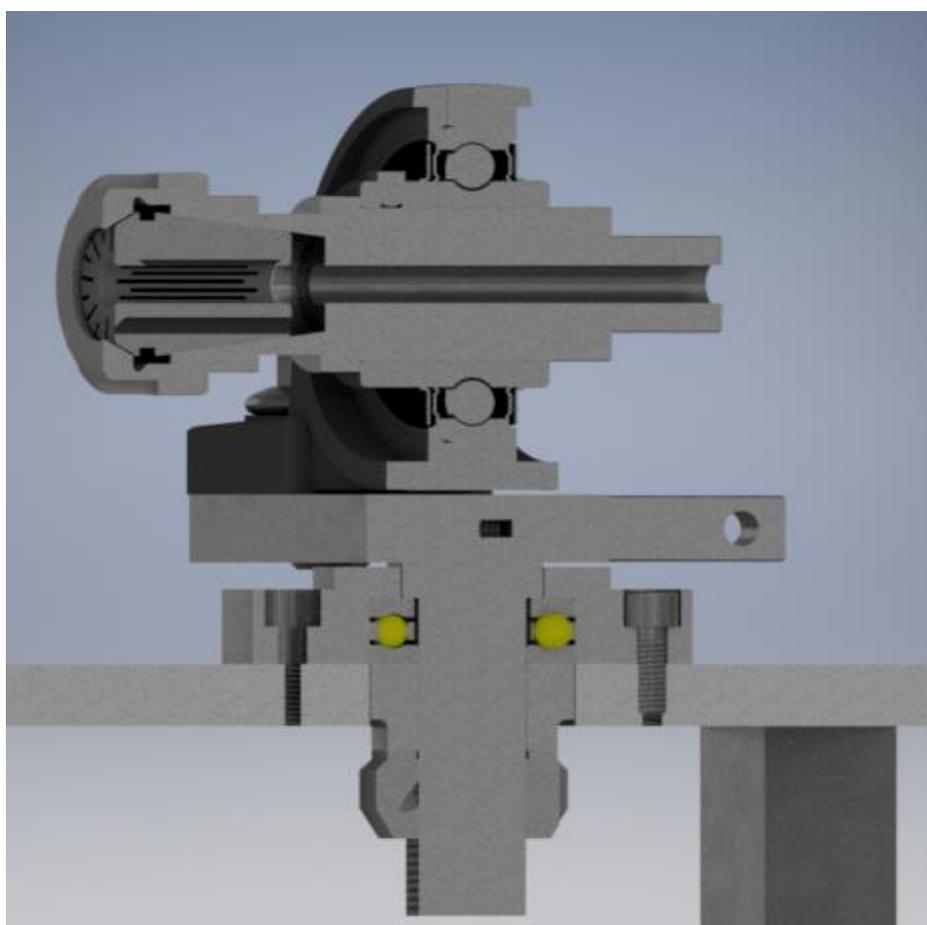


Figura 23 - Projeto 3D do Mancal Móvel em corte



Figura 24 - Porcas KMT

Fonte: (https://bgl.com.br/catalogo_eletronico/ acesso em 07/09/2020)

IV. Aplicação de Carga

O sistema de aplicação de carga será acoplado e apoiado em dois lugares. O primeiro é no mancal móvel, pois deve provocar um momento quando o mancal gira em seu próprio eixo. O segundo é na extremidade da base de apoio. O sistema é composto por cabo de aço e polia com rolamento. Abaixo têm-se a descrição dos demais itens que compõem o sistema:

Cabo de aço de 1/4": cabo de aço simples que suporta a carga aplicada ao sistema ao mancal móvel.

Grampo e sapatilha: as sapatilhas são utilizadas para proteger olhais feitos de cabo de aço e cordas. A sapatilha para cabo de aço tem resistência a atrito e desgaste, quando o material é submetido a condições severas de uso. Os grampos para cabo de aço são também conhecidos como *clips* e têm utilização prática e eficaz na fixação de cabos de aço de diversos diâmetros. É usado na confecção de laços de cabo de aço, podendo ser ajustado no comprimento conforme a necessidade.



Figura 25 - - Grampo e sapatilha para cabo de aço

Fonte: (<http://www.cabema.com.br/sapatilha-cabo-aco> acesso em 28/10/2020)

Gancho de aço: o gancho de aço serve para transferência de carga, é um item robusto e de fácil instalação, será ligado a peças usinadas que devem ter rosca para fixação do gancho.

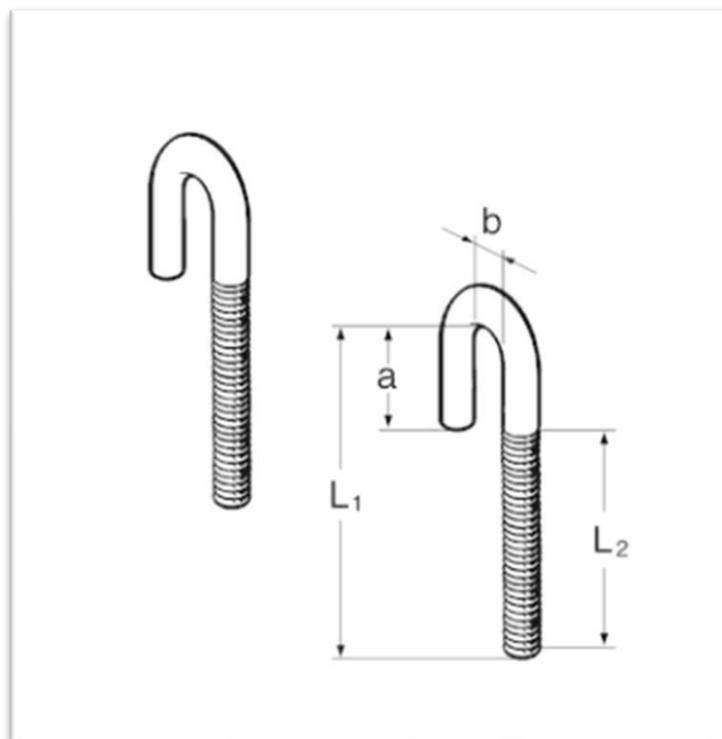


Figura 26 - Dimensões do gancho para suporte de carga

Fonte: (<http://www.cabema.com.br/grampo-cabo-aco> acesso em 28/10/2020)

Polia com rolamento: será usada uma roldana com rolamento 6201, apenas para transferência de carga.

A Figura 28 mostra o funcionamento do sistema onde o cabo de aço de $\frac{1}{4}$ " une a flange que recebe as anilhas ao mancal móvel, a carga é posta sobre a flange e exerce uma força no sentido vertical, e a polia transforma e redireciona a força horizontalmente.



Figura 27 - Projeto 3D do sistema de aplicação de carga

A aplicação de carga na extremidade do mancal móvel permite a rotação deste em seu próprio eixo, conforme mostra a Figura 29.

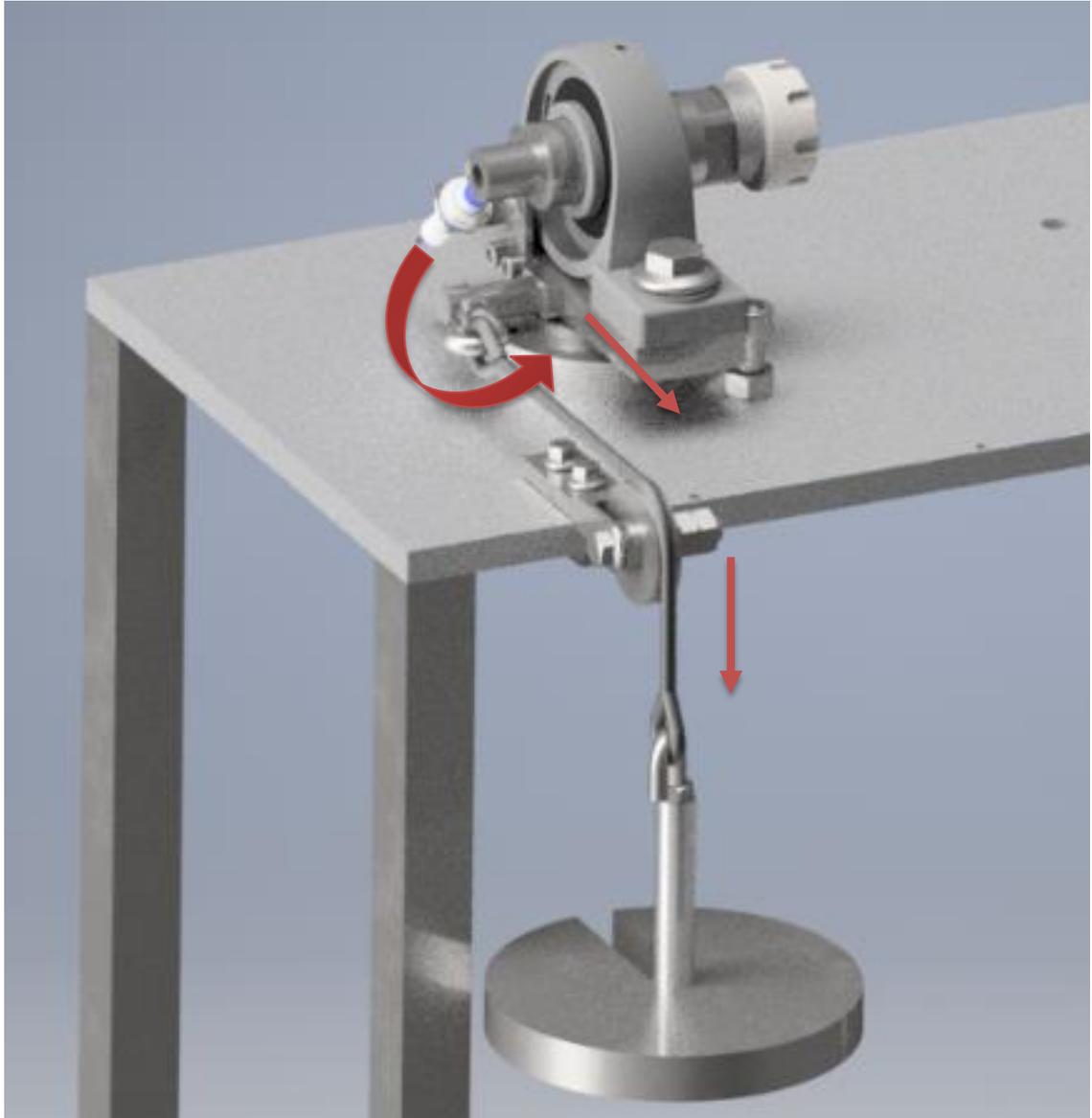


Figura 28 - Projeto 3D do Mancal Móvel rotacionando

A Figura 30 ilustra o sistema completo do conjunto descrito no projeto.

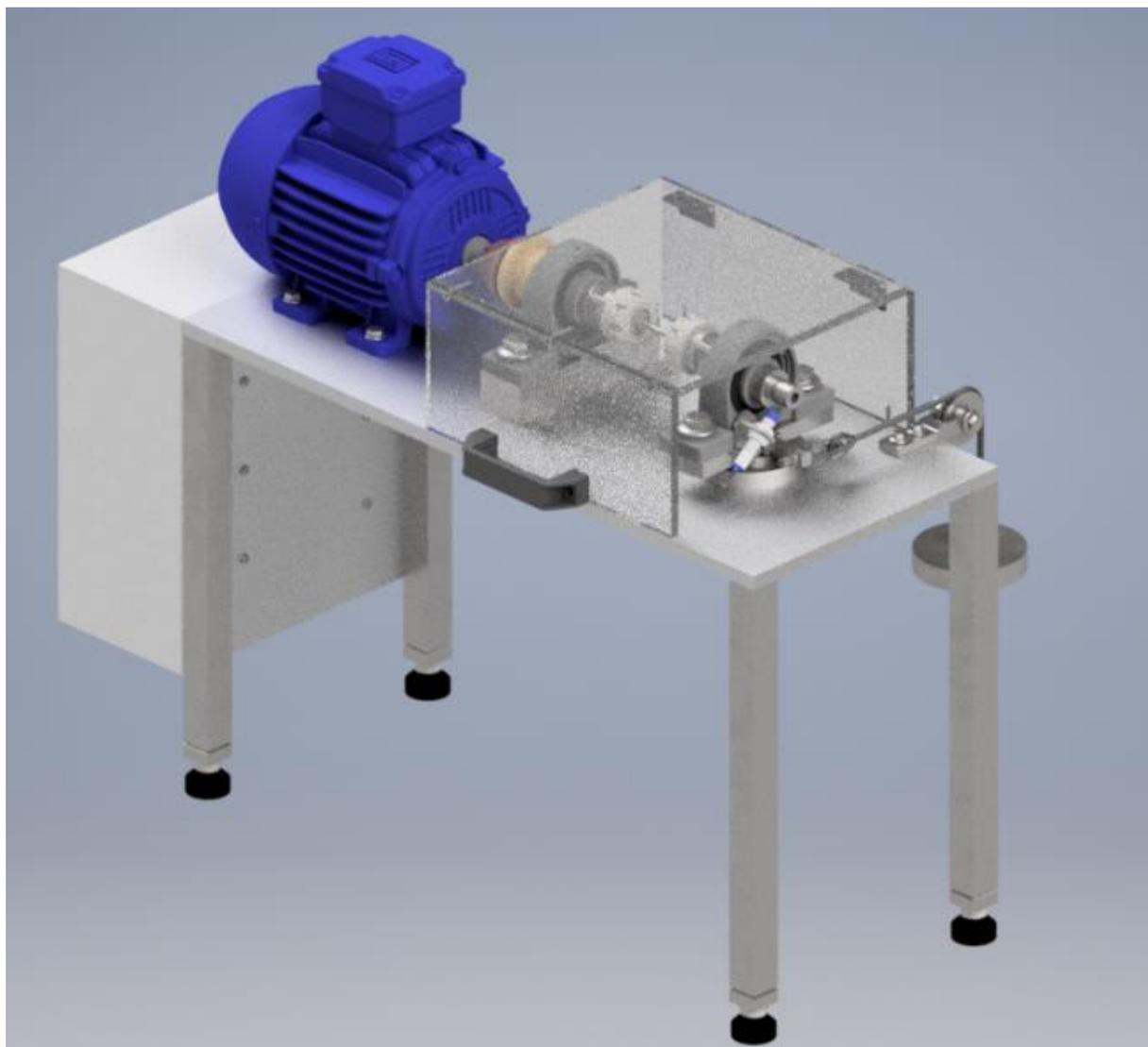


Figura 29 - Projeto 3D da máquina completa

A Tabela 1 mostra as peças comerciais a serem repostas numa eventual manutenção.

ITEM (Conforme Desenho de Montagem)	QUANTIDADE	DESCRIÇÃO
19	4	Vibra Stop
20	1	Acoplamento AG-050
21	1	Sensor de Rotação Magnético LJ12A3-4-Z
23	1	Cabo de Aço 1/4"
24	2	Mancal de Rolamento UCP207
25	1	Rolamento Axial 51205
26	2	Pinça ER25 Ø12mm
27	2	Porta Pinça
28	1	Porca KMT 5
29	2	Gancho M8 SIKLA
30	4	Dobradiça
32	1	Puxador
34	1	Motor WEG 90S - 1720RPM 1CV
35	2	Parafuso Sext. Com Flange - DIN 6921 - M10 x 35
36	2	Parafuso Sext. Com Flange - DIN 6921 - M16 x 45
37	2	Parafuso Sext. Com Flange - DIN 6921 - M16 x 35
38	4	Parafuso Sext. Com Flange - DIN 6921 - M8 x 25
39	2	Parafuso Allen - ISO 4162 - M8 x 35
40	3	Parafuso Allen - ISO 4762 - M5 x 30
41	4	Parafuso Allen - ISO 4762 - M8 x 20
42	2	Parafuso Allen - ISO 4762 - M6 x 20
43	3	Parafuso Cabeça Escareada - CNS 4558 - M5 x 25
44	4	Parafuso Cabeça Escareada - CNS 4558 - M5 x 8
45	4	Parafuso Cabeça Escareada - CNS 4558 - M5 x 12
46	6	Parafuso Cab. Cilíndrica ANSI B18.3 - M5 x 0.8 x 10
47	3	Porca Sextavada - DIN 555-5 - M8
48	2	Porca Sextavada Maior - CNS 3130 - M 8
49	2	Arruela - CNS 5052 - 10
50	1	Parafuso Allen - ISO 4762 - M12 x 50
51	2	Porca Sextavada Maior - CNS 3130 - M 12

Tabela 1 - Lista de peças para reposição

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do trabalho possibilitou a conclusão do projeto da máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa conforme planejado inicialmente.

No projeto foram dimensionados todos os equipamentos e materiais necessários para a construção da máquina de ensaios além dos corpos de prova utilizando a norma JIS Z 2274 como referência. Para tanto, aprofundamos conhecimentos em ensaios mecânicos, ciências dos materiais e projetos de máquinas e dispositivos, além de busca e interpretação de *sites* e catálogos técnicos de fabricantes.

Para embasamento teórico foram estudados temas de ciências dos materiais relacionados a ensaios mecânicos destrutivos, composição e comportamento dos materiais quando sujeitos a esforços estáticos, dinâmicos e cíclicos e a importância desse conhecimento para o dimensionamento de estruturas, assunto de muita relevância na engenharia mecânica.

Durante todo o desenvolvimento do projeto foram fundamentais conhecimentos em desenho técnico mecânico, tanto para a elaboração dos desenhos de projeto e fabricação, quanto para escolha de itens comerciais para a máquina. Todo o projeto foi desenvolvido em *software* de modelamento 3D, que nos permite verificar interferências e realizar ajustes no decorrer do projeto, o que nos dá certo nível de segurança em relação ao funcionamento da máquina mesmo sem um protótipo físico tendo sido possível no período do desenvolvimento do trabalho.

Como melhorias propostas para o projeto podem ser consideradas a fabricação do projeto e a realização de ensaios com diferentes corpos de prova de diferentes materiais. Comparando os resultados obtidos nos ensaios com os da literatura pode-se validar o projeto.

O desenvolvimento do projeto nos permitiu pôr em prática conhecimentos adquiridos durante a graduação principalmente relacionados à projetos de máquinas, desenho técnico mecânico e ciências dos materiais, todos muito importantes na atuação de engenheiros mecânicos, contribuindo para nossa formação profissional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GIL, Antônio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social / Antônio Carlos Gil. 6. Ed. – 5. Reimpr. - São Paulo: Atlas, 2012.

GODOY, ARILDA S.; Refletindo Sobre Critérios de Qualidade da Pesquisa Qualitativa. Gestão.Org, v. 3, n. 2, p. 10. Mai. / Ago. 2005. Disponível em: <<http://www.revista.ufpe.br>>. Acesso em: 06 Junho 2021. ISSN 1679-1827

CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5. Ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2002.

NORTON, R. L. Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada. 4. Ed. - São Paulo: Bookman, 2013.

SOUZA, S. A. Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos. 5. Ed. - São Paulo: Blucher, 1982.

DA ROSA, E. Análise de resistência mecânica: mecânica da fratura e fadiga. Santa Catarina: UFSC, 2002.

CAMPBELL, F. C. Elements of Metallurgy and Engineering Alloys. Ohio: ASM International, 2008.

BUDYNAS, R. G., **NISBETT** J. K. Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica. 8. Ed. - São Paulo: Bookman, 2011.

MARIN, J. Mechanical behavior of engineering materials. Prentice-Hall, 1962.

NICHOLAS, T. High cycle fatigue – A mechanics of materials perspective. 1. Ed. - Great Britain: Elsevier, 2006.

D'HUY, G. J. Fatigue tests of fillet welded tees in bending, Dissertação de M.Sc., Universidade de Lehigh, Bethlehem, PA, Estados Unidos, 1964.

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. JIS Z 2274: Method of Rotating Bendig Fatigue Testing of Metals .1978.

MANCAL DE ROLAMENTO UCP207. Disponível em: <<https://eshop.ntn-snr.com/pt/UCP-207-2249657.html>>. Acesso em 06/10/2020.

MOTOR WEG 90S 1CV. Disponível em <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-El%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Atmosferas-Explosivas/%C3%80-Prova-de-Explos%C3%A3o-%28Ex-db%29/W21Xdb-IR1/W21-Explos%C3%A3o-IR1-1-cv-4P-90S-3F-220-380-V-60-Hz-IC411---TFVE---B34D/p/10371655>>. Acesso em 07/10/2020.

ROLAMENTO UC207. Disponível em <https://medias.schaeffler.com/medias/pt!hp.ec.br.pr/UC*UC207>. Acesso em 06/10/2020.

ACOPLAMENTO ELASTICO DE GARRA. Disponível em <<https://www.aciobras.com.br/acoplamento-garra>>. Acesso em 10/10/2020.

ROLAMENTO AXIAL DE ESFERA 51205. Disponível em <<https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/ball-bearings/thrust-ball-bearings/productid-51205>>. Acesso em 15/10/2020.

PINÇA ER25. Disponível em <<https://www.pivetaferramentas.com.br/porta-pinca-er/pinca-er25-08-mm>>. Acesso em 07/09/2020.

PORCA DE PRECISÃO KMT 5. Disponível em <https://bgl.com.br/catalogo_eletronico/ptbr/porcapre/kmt_5.html>. Acesso em 07/09/2020.

SENSOR DE ROTAÇÃO MAGNETICO. Disponível em <<https://www.mte-thomson.com.br/produtosmte/sensor-de-rotacao/>>. Acesso em 08/10/2020.

GANCHO ROSCADO. Disponível em <<https://www.sikla.pt/pgina-inicial-142918/produtos-142944/catlogo-eletrnico-142920/siconnect-371465/produtos-de-fixao-para-vigas-e-telhados-376454/gancho-roscado-gh-376474>>. Acesso em 08/10/2020.

ROLDANA COM SUPORTE. Disponível em
<https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1379839981-roldana-canal-v-76-mm-3-pol-com-suporte-fechado-c-parafuso-_JM>. Acesso em 28/10/2020.

SAPATILHA PARA CABE DE AÇO. Disponível em
<<http://www.cabema.com.br/sapatilha-cabo-aco>>. Acesso em 28/10/2020.

GRAMPO PARA CABO DE AÇO. Disponível em
<<http://www.cabema.com.br/grampo-cabo-aco>>. Acesso em 28/10/2020.

Anexo A: Norma de ensaio JIS Z 2274

JIS

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD

Method of Rotating Bending
Fatigue Testing of Metals

JIS Z 2234 -1978

Translated and Published

by

Japanese Standards Association

Printed in Japan

7 S

PROTECTED
BY COPYRIGHT

CÓPIA NÃO CONTROLADA

JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD

J I S

Method of Rotating Bending Fatigue
Testing of MetalsZ 2274-1978
(Reaffirmed: 1994)1. Scope

This Japanese Industrial Standard specifies the method of rotating bending fatigue testing of metals by the use of standard test pieces to be carried out at room temperature, in air, covering the fatigue life at the number of stress cycles not less than 10^4 . The rotating bending herein signifies a loading method in such a manner that the repeated stress is applied to the test piece, while the test piece having the axis in the bending moment plane rotates relatively to the plane of the bending moment.

2. Definitions

The definitions of the main terms used in this standard shall be in accordance with 2. of JIS Z 2273.

Applicable Standards:

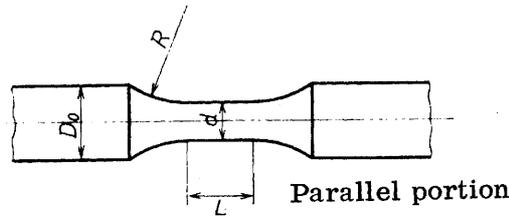
JIS Z 2273-General Rules for Fatigue Testing of Metals

JIS Z 8401-Rules for Rounding Off of Numerical Values

3. Test Pieces

3.1 The standard test pieces are classified into No. 1 to No. 3 test pieces depending on their shape, and their standard dimensions shall be as shown in Figs. 1 to 3.

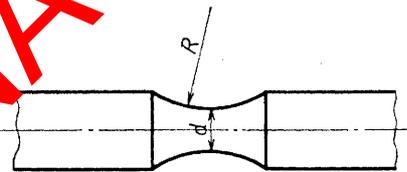
Fig. 1. No. 1 Test Piece



Symbol	d mm	R	L
1- 6	6	3 d or more	2 d or more
1- 8	8		
1-10	10		
1-12	12		

D_0 shall, as a rule, be 8, 12, or 15 mm.

Fig. 2. No. 2 Test Piece

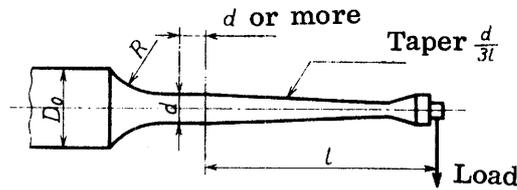


Symbol	d mm	R
2- 6	6	5 d or more
2- 8	8	
2-10	10	
2-12	12	

D_0 shall, as a rule, be 8, 12, or 15 mm.

CÓPIA NÃO CONTROLADA

Fig. 3. No. 3 Test Piece

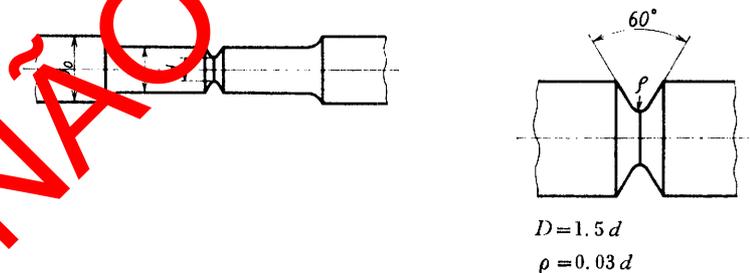


Symbol	d mm	R	l
3- 6	6	3 d or more	5 d or more
3- 8	8		
3-10	10		
3-12	12		

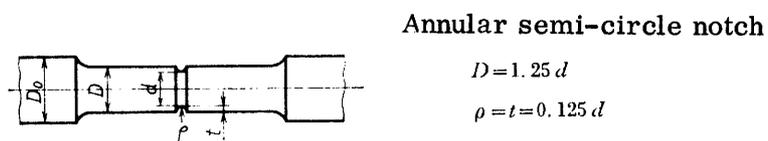
Remark: The shape and dimensions shown in Fig. 4 are desirable for notched test pieces.

Fig. 4. Notched Test Pieces

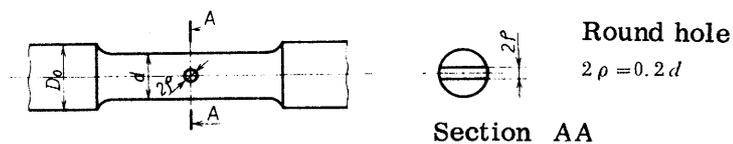
(1) Annular V-Notched Test Piece



(2) Annular Semi-circle Notched Test Piece



(3) Round Holed Test Piece



3.2 In preparing test pieces by machining through cutting or grinding, precautions should be taken to ensure that the process does not cause on the test piece tearings and appreciable work strains, and also that the test pieces are not heated. The machined test pieces shall be polished by means of abrasive papers or cloths of successively finer grain size and finally of finer than No. 320 in order to eliminate streaks caused by cutting or grinding.

3.3 The errors for the finished dimension of d in diameter of the test piece referring to the nominal dimension shall be ± 0.05 mm. In No. 1 test piece, the deviation on the finished dimensions of the parallel portion (the difference between the maximum and minimum diameters in the parallel portion) shall be within 0.04 mm. Further, the test piece shall be so finished that there are no bends nor eccentricities not less than 0.02 mm.

3.4 The test pieces shall be so handled with sufficient care that they will not be rusted or damaged after being finished.

3.5 The diameter of the test piece shall be measured with an accuracy at least better than 0.5 %.

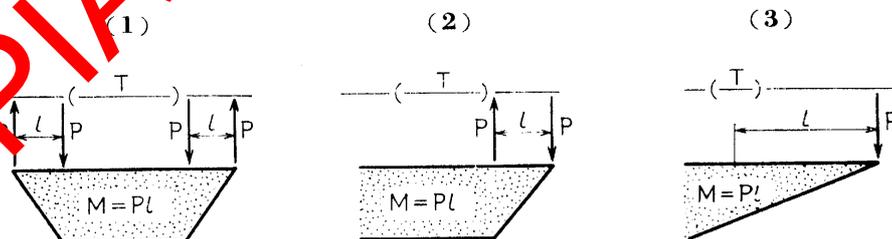
3.6 The diameter of a test piece shall be measured in two directions at right angles to each other in the same section and the arithmetic mean value shall be taken as the diameter of the section.

3.7 When a test piece has a parallel portion and the parallel portion is applied with uniform stress, the diameter shall, as a rule, be measured at several places of the parallel portion in accordance with the specification in 3.6 and the smallest value shall be taken as the diameter of the test piece.

4. Testing Machine

4.1 The testing machine shall be capable of applying the bending moment shown in Fig. 5 to the testing portion of the test piece.

Fig. 5. Distribution of Bending Moment



P : test load

l : span

T : testing portion of the test piece

M : bending moment

4.2 The testing machine shall be of such a structure that no load in its axial direction, nor twisting moment be exerted to the test piece. The testing machine shall, also, be equipped with a device enabling the determination of the number of cycles to failure of the test piece, and with a mechanism to prevent restarting so that the machine will not automatically restart after stopping due to interruption of service or other reasons.

4.3 The testing machine shall be capable of amply withstanding over a long period the utilization up to its rated capacity, and of maintaining the accuracy specified in 4.4 to 4.6.

4.4 The errors on the nominal bending moment referring to the bending moment M to be obtained from actually measured values of the span l of the testing machine and of the load P shall be within $\pm 1\%$ in a range of the rated capacity and $1/10$ thereof.

4.5 The testing machine to be employed in the distribution of bending moment in Fig. 5 (1) and (2) shall be so adjusted that the axes of the test pieces on both sides will align at a bending load of $P = 0$, when the No. 1 (or No. 2) test piece cut at right angles to the axis at the centre of the parallel length (or R portion) of the diameter d is mounted.

4.6 The sensitivity of the loading mechanism of a testing machine to be employed in the bending moment distribution shown in Fig. 5 (1) and (2) shall be such that the deviation of the cut edge of the test pieces shall be clearly identifiable visually when a bending moment corresponding to $\frac{1}{1000}$ of the rated capacity is applied referring to the state of bending load $P = 0$ given in 4.5.

5. Test Method

5.1 The test piece shall be mounted to the testing machine with avoiding eccentricity and firmly without fear of loosening during the test; and when the mounted test piece is rotated slowly, the runout of its core shall be within 0.05 mm at the centre of No. 1 and No. 2 test pieces, and at the loaded position on the opposite side of the mounted position in the case of No. 3 test piece. At the time of mounting the test piece, care shall be taken to ensure that no appreciable stress will be given to the test part of the test pieces and no damage be caused to the part with tools or the like.

5.2 In the case of a testing machine in which the bending moment is given by the static load of a weight or a spring, the load shall be given quickly without shock after the testing machine has reached the designated operating speed. When the test is to be suspended, the operation shall be stopped after having removed the load.

5.3 The bending moment during the test shall be so adjusted as to be as constant as possible. At this time, the stress being adjusted shall not exceed the specified range between the maximum and the minimum stresses.

5.4 Where the test is to be conducted at several stress stages in order to obtain the $S-N$ curve, it is desirable that the stress stages of equal interval be selected in such a manner that the ratio of adjacent stresses falls between 1.05 and 1.5 at the inclined portion of the $S-N$ curve, and between 1.02 and 1.05 in the vicinity of the fatigue limit. Further, where the test is conducted over several stress stages in the vicinity of the endurance limit in order to obtain the endurance limit in accordance with the method described in 6.11 (2), it is desirable that stress stages of equal interval be selected in such a manner that the ratio of the adjacent stresses falls between 1.02 and 1.05.

5.5 The speed of loading repetition shall, as a rule, be 1000 up to 5000 revolutions per minute. It is desirable that a series of tests be conducted at a constant repetition speed.

5.6 The tests shall, as a rule, be conducted without intermission from the beginning to the end for one test piece. Where the test is suspended, records shall be kept regarding the number of stress cycles till the suspension and the period of time of suspension.

5.7 Unless otherwise specified, the test may be terminated if the test piece remains unbroken up to the number of stress cycles $> 10^7$.

5.8 The test pieces which have not been broken through the test shall not be employed again.

6. Test Results

6.1 A value obtained by dividing the bending moment at a cross section generating the maximum stress by modulus of section shall be used as the nominal stress.

6.2 Whenever there is a fear of doubt as to the stress, the method of calculation shall be shown clearly.

6.3 The unit of stress shall be kgf/mm^2 or N/mm^2 , and the value of stress shall, as a rule, be rounded off to three significant figures in accordance with JIS Z 8401.

6.4 The number of stress cycles shall be, as a rule, counted from the time when the load applied to the test piece has reached the specified test load.

6.5 Fatigue life or endurance shall, as a rule, take the number of stress cycles to failure.

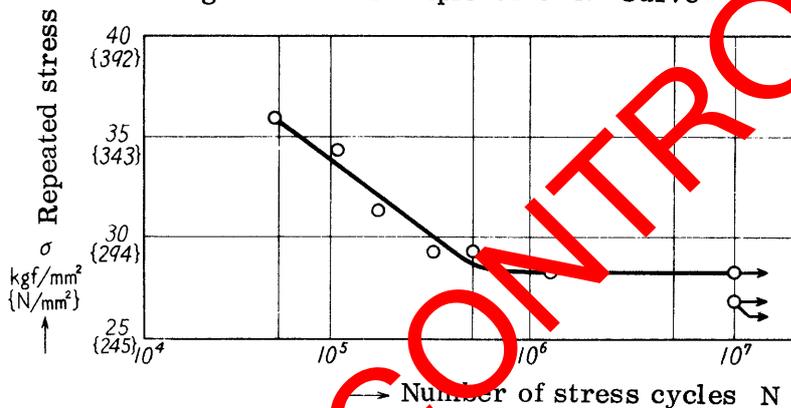
6.6 In the case of other than 6.5, the method of determining the number of stress cycles to failure shall be added to the report of the test results.

6.7 The number of stress cycles in the test results shall be stated as multiples of 10^n , for example, 2.34×10^6 , and the value shall be rounded off to three significant figures.

6.8 The $S-N$ curve shall be drawn by plotting the values of stress amplitude as ordinate and the number of stress cycles as abscissa. The scale of abscissa shall be a logarithmic scale, and the scale of ordinate, a logarithmic scale or linear equal interval scale.

6.9 A rightward arrow mark shall be placed at the point denoting the test results for the unbroken test piece in the $S-N$ curve (Fig. 6).

Fig. 6. An Example of $S-N$ Curve



Remark: In this standard, the units and numerical values in { } are in accordance with the International System of Units (SI) and are given for reference, where $1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa}$.

6.10 The number of stress cycles in the case of obtaining the endurance limit shall, as a rule, be designated to either one of the following numbers:

$10^4, 2 \times 10^4, 5 \times 10^4, 10^5, 2 \times 10^5, 5 \times 10^5, 10^6, 2 \times 10^6, 5 \times 10^6, 10^7, 2 \times 10^7$

6.11 The determination of the endurance limit shall be made in accordance with either one of the following two methods:

(1) The Method to Determine the Endurance Limit by the $S-N$ Curve

The $S-N$ curve shall be drawn at an approximately central area of the points denoting the test results, and the stress corresponding to the designated number of stress cycles shall be obtained on the $S-N$ curve to determine the endurance limit. However, the $S-N$ curve shall not be drawn by extrapolation. Thus obtained endurance limit shall be indicated with a symbol A attached as for instance $\sigma(A 10^5) = 28.0 \text{ kgf/mm}^2$ { 274.6 N/mm^2 }. Also, the used $S-N$ curve shall be indicated clearly on the test result report.

- (2) The Method to Determine the Endurance Limit without the $S-N$ Curve
 The endurance limit shall be determined as the stress obtained through one of the following matters, on the basis of the results obtained from testing not less than two test pieces for each of stress stages which have been so established that the number of stress cycles to failure falls in the vicinity of the designated number of stress cycles (refer to 5.4).
- (a) The highest stress of the stress stages when not less than half of the test pieces at each stress stage has remained unbroken at the designated number of stress cycles.
 Provided that the number of the test pieces which have remained unbroken at the designated number of stress cycles shall assume a majority at the lower stress stages thereto.
- (b) In the case where the test pieces at the stress stages at which the endurance limit has been obtained in the above (a) have not broken at all at the designated number of stress cycles, the mean stress of the stress at the stress stage and the stress at the stage immediately above. However, there shall be no broken test piece at the stress stage lower than the said stress stage up to the designated number of stress cycles.

If necessary, the endurance limit shall be obtained by statistical procedure, the number of test pieces at each stress stage being determined by agreement between the parties concerned. The endurance limit based on this method shall be expressed by a symbol B attached as for example $\sigma(B 10^5) = 28.0 \text{ kgf/mm}^2$ $\{274.6 \text{ N/mm}^2\}$. Further, where the endurance limit has been determined by this method, it is desirable that the interval of the stress stages tested be added clearly to the test result report.

6.12 Where the $S-N$ curve becomes horizontal, the stress expressed by the horizontal line shall be taken as the fatigue limit, provided that the stress expressed by the horizontal line shall be the stress which has been obtained by either one of the following items based on the results obtained from testing not less than two test pieces for each stress stage shown in 5.4.

- (1) The highest stress of the stress stages where not less than half of the test pieces at each stress stage has remained unbroken, provided that the number of unbroken test pieces shall assume a majority at stress stages lower than the stage.
- (2) Where all the test pieces at the stress stage at which the stress representing the horizontal line is to be obtained by (1) have remained unbroken, the mean stress of the stress at the stress stage and the stress at the stress stage immediately above, provided that there shall be no broken test piece at stress stage lower than the said stress stage.

The fatigue limit shall be obtained by statistical procedure, the number of test pieces at each stress stage being determined by agreement between the parties concerned, if necessary.

6.13 Where it is merely required to guarantee that the fatigue strength is not inferior to the designated value, three test pieces shall be tested at the designated repeated stress and show that all the test pieces have remained unbroken at the designated number of stress cycles.

7. Report of Test Results

It is desirable that details of the following items be added to the report of the test results:

- (1) The name of the manufacturer of the material
- (2) Type, name, melt number and history of the material
- (3) Chemical composition
- (4) Preparing conditions of test pieces from the raw material
- (5) Heat treatment conditions
- (6) Tensile strength, yield point or proof stress, elongation and contraction of area
- (7) Mechanical properties such as truck breaking strength, hardness and impact value
- (8) Shape, dimensions and finishing conditions of the test piece
- (9) Name, type and rated capacity of the testing machine
- (10) Test conditions such as type of stress and repeating speed
- (11) Environmental test conditions such as temperature, humidity and so on
- (12) Date of tests, place of tests and names of persons in charge of the tests
- (13) Table of test results
- (14) $S-N$ curves, fatigue limit or endurance limit
- (15) Others

Z 2274-1978
Edition 3

Japanese Text

Established by Minister of International Trade and Industry

Date of Establishment: 1974-05-01

Date of Revision: 1978-07-01

Date of Reaffirmation: 1994-06-01

Date of Public Notice in Official Gazette: 1994-06-07

Investigated by: Japanese Industrial Standards Committee

Divisional Council on Iron and Steel

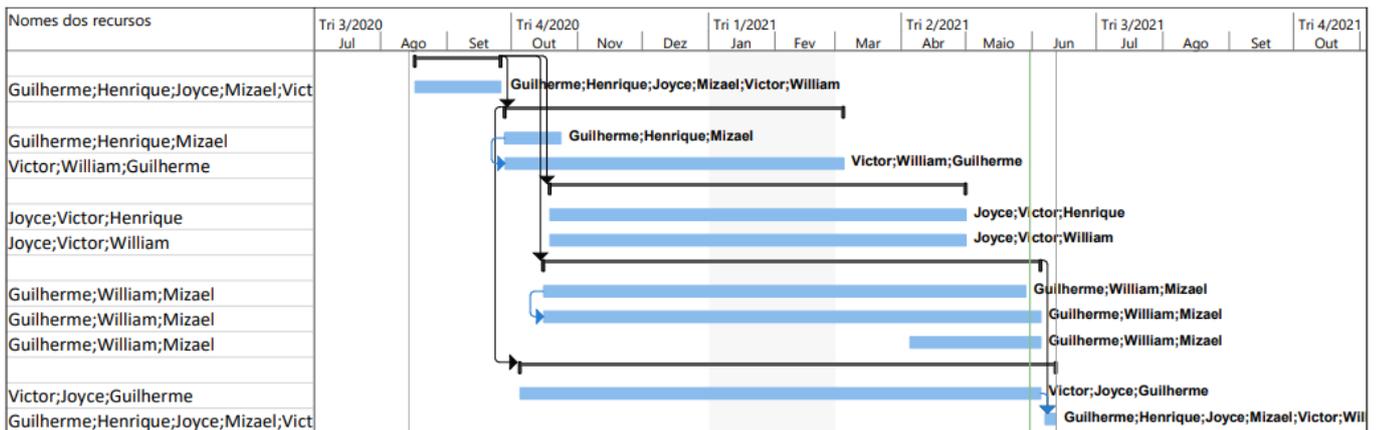
Technical Committee on Method of Fatigue
Testing

This English translation is published by:
Japanese Standards Association
1-24, Akasaka 4, Minato-ku,
Tokyo 107 Japan
© JSA, 1980

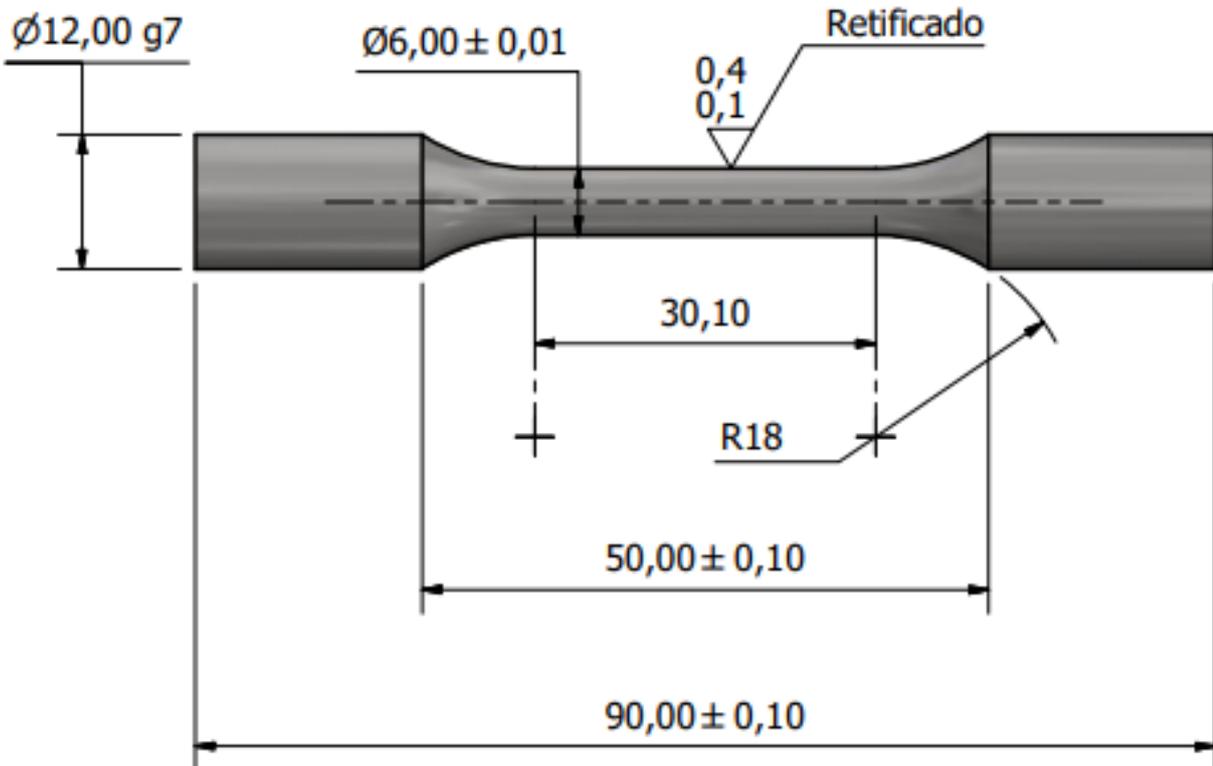
Printed in Tokyo by
Hohbunsha Co., Ltd.

Apêndice A: Cronograma - Gráfico de Gantt

Id	EDT	Nome da tarefa	Duração	Início	Término	Predece
1	1	Escolha do Projeto	30 dias	Seg 17/08/20	Sex 25/09/20	
2	1.1	Discussão e definição	30 dias	Seg 17/08/20	Sex 25/09/20	
3	2	Etapa 1: Modelo da máquina	60 dias	Seg 28/09/20	Qui 04/03/21	1
4	2.1	Pesquisa: Normas de ensaio	20 dias	Seg 28/09/20	Sex 23/10/20	
5	2.2	Pesquisa: Materiais e equipamentos para o projeto	60 dias	Seg 28/09/20	Qui 04/03/21	4II
6	3	Etapa 2: Referencial teórico	86 dias	Seg 19/10/20	Sex 30/04/21	1
7	3.1	Pesquisa: Projeto de máquinas	86 dias	Seg 19/10/20	Sex 30/04/21	
8	3.2	Pesquisa: Engenharia de materiais	86 dias	Seg 19/10/20	Sex 30/04/21	
9	4	Etapa 3: Modelar projeto (Autodesk Inventor)	112 dias	Sex 16/10/20	Sex 04/06/21	1
10	4.1	Modelar peças e equipamentos	107 dias	Sex 16/10/20	Sex 28/05/21	
11	4.2	Montar conjunto e verificar funcionamento e ajustes	112 dias	Sex 16/10/20	Sex 04/06/21	10II
12	4.3	Criar desenhos de projeto e fabricação	45 dias	Seg 05/04/21	Sex 04/06/21	
13	5	Etapa 4: Documentação	126 dias	Seg 05/10/20	Sex 11/06/21	3II
14	5.1	Elaborar e formatar monografia	121 dias	Seg 05/10/20	Sex 04/06/21	
15	5.2	Revisar	5 dias	Seg 07/06/21	Sex 11/06/21	14;9

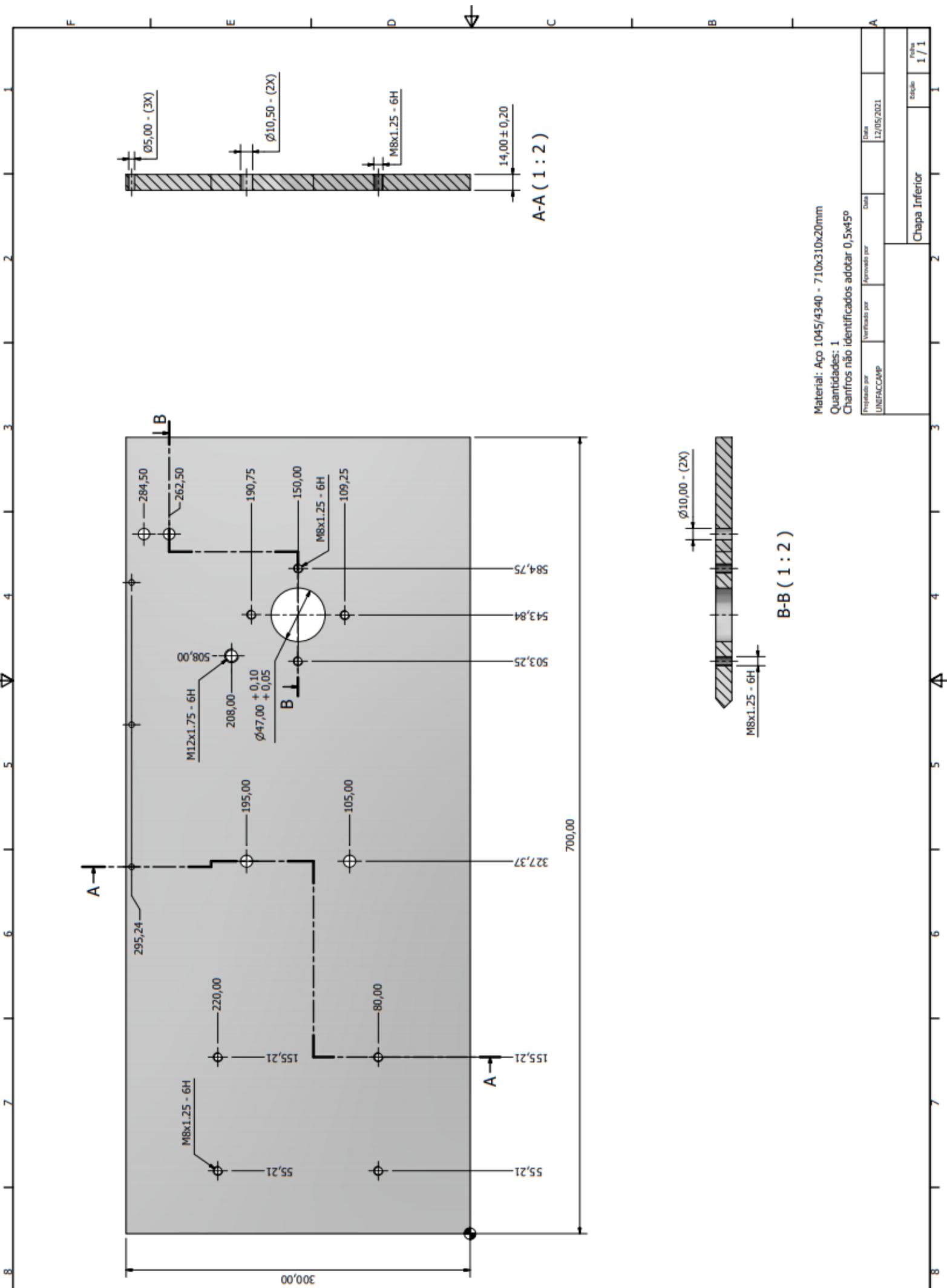


Apêndice B: Desenhos do projeto



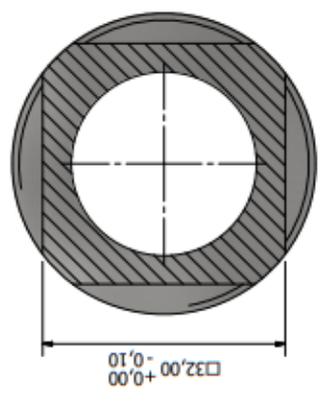
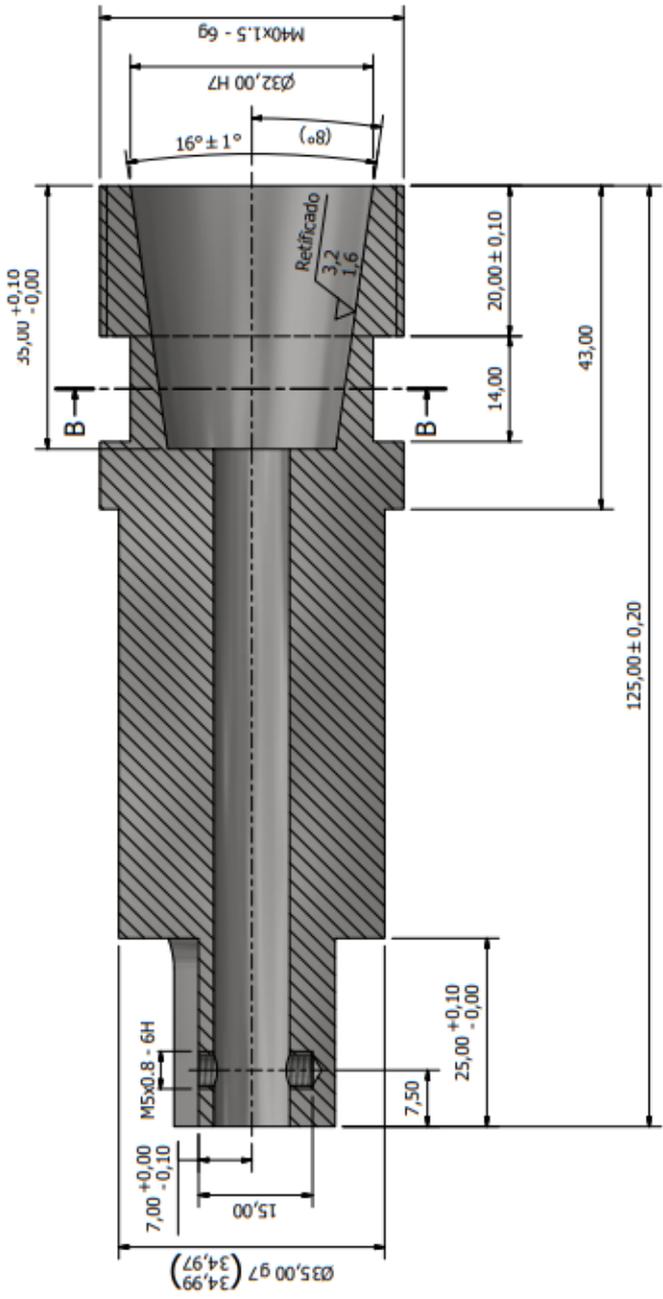
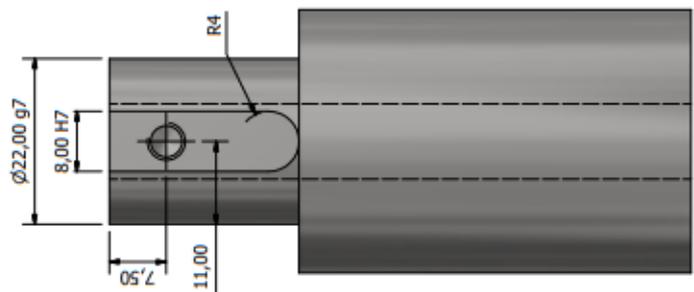
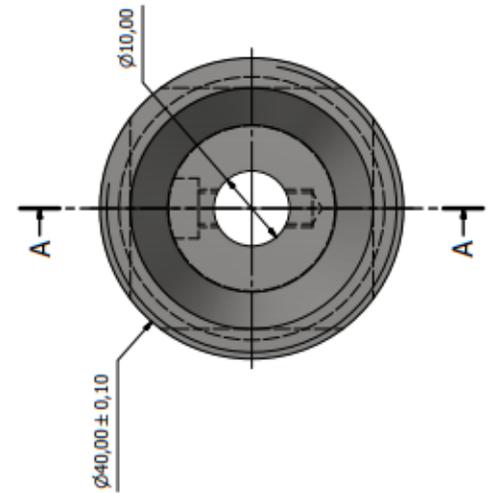
Material: Conforme Amostra
Quantidades: 1 por ensaio

Projetado por UNIFACCAMP	Verificado por	Aprovado por	Data	Data 12/05/2021	
			Corpo de Prova		
			Edição	Folha 1 / 1	



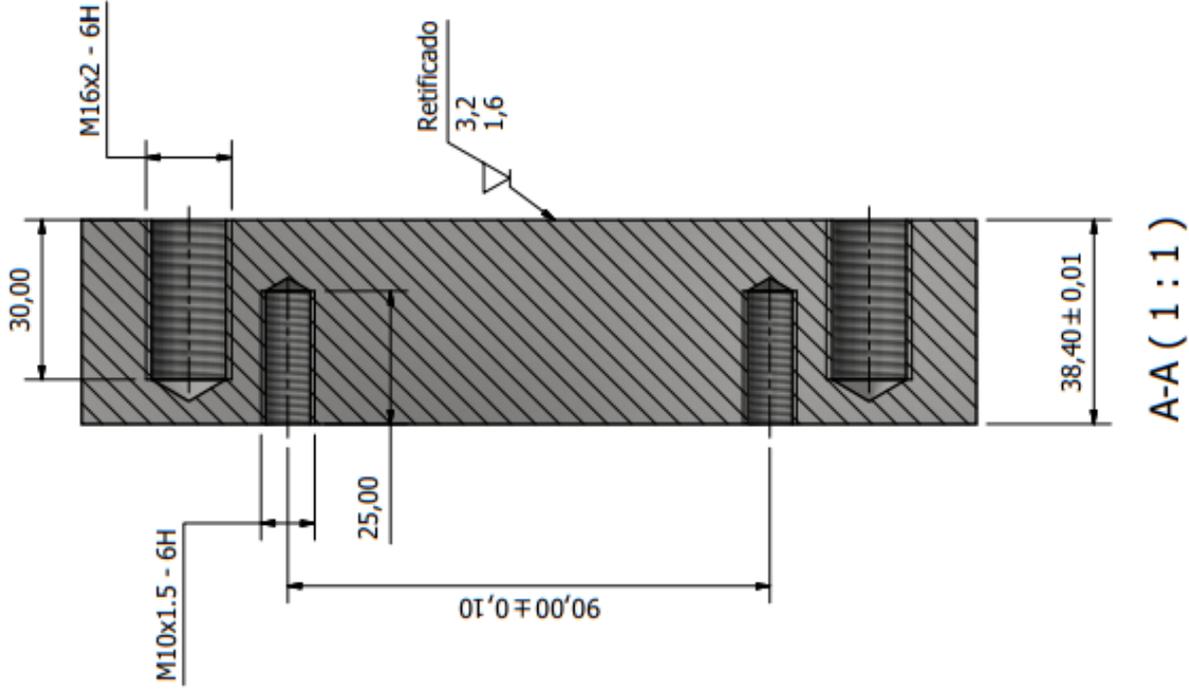
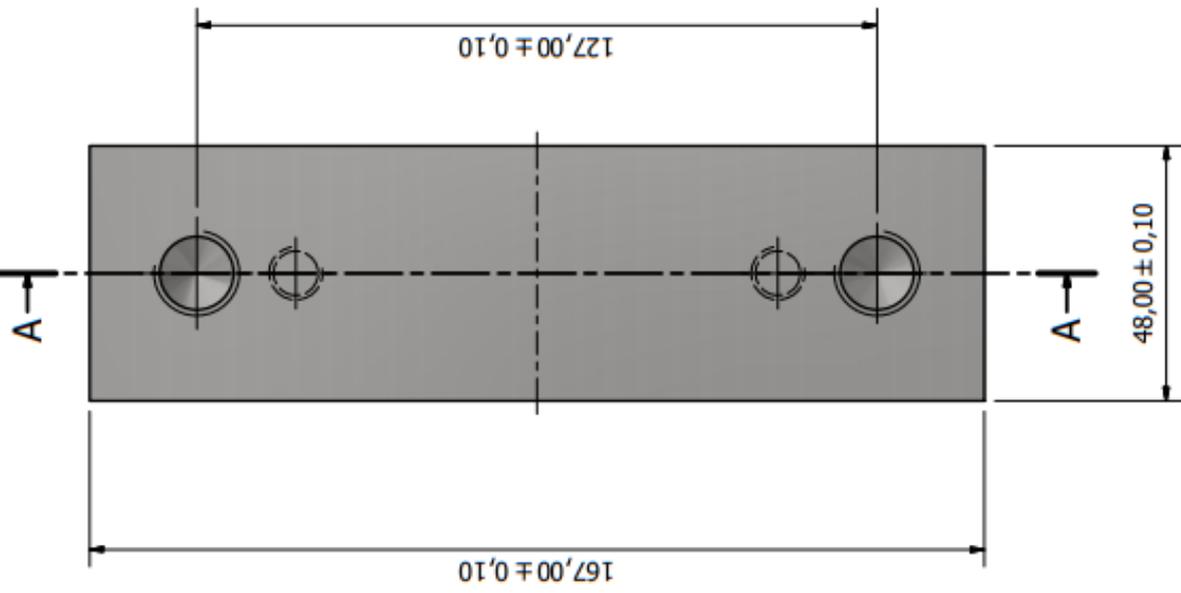
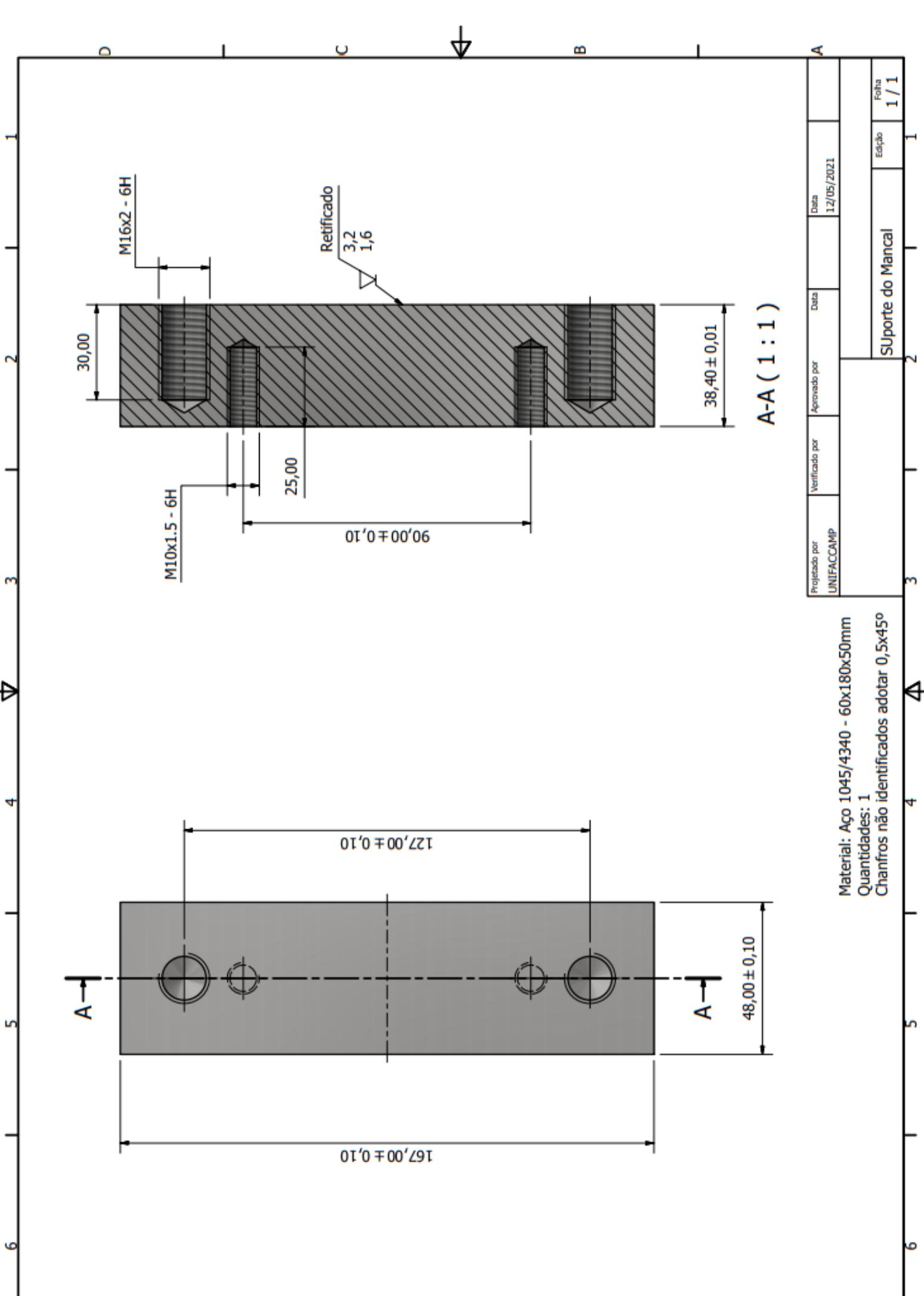
Material: Aço 1045/4340 - 710x310x20mm
 Quantidades: 1
 Chanfros não identificados adotar 0,5x45º

Projeto por	Verificado por	Aprovado por	Data
UNEFACCAMP			12/05/2021
Chapa Inferior			Folha 1 / 1



Material: Aço 1045/4340 - $\varnothing 50 \times 135 \text{ mm}$
 Temperar e Revenir
 Quantidades: 2
 Chanfros não identificados adotar $0,5 \times 45^\circ$

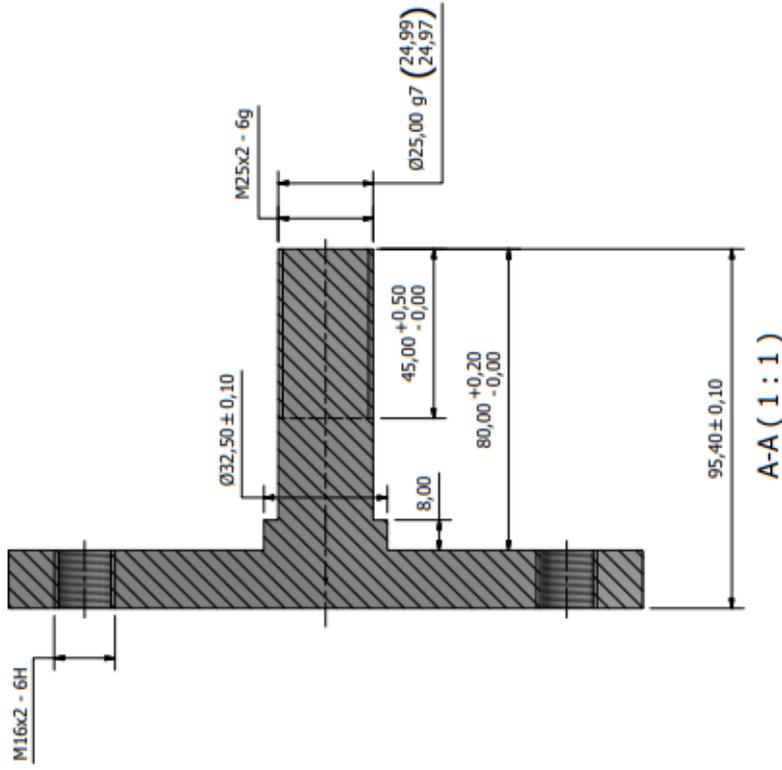
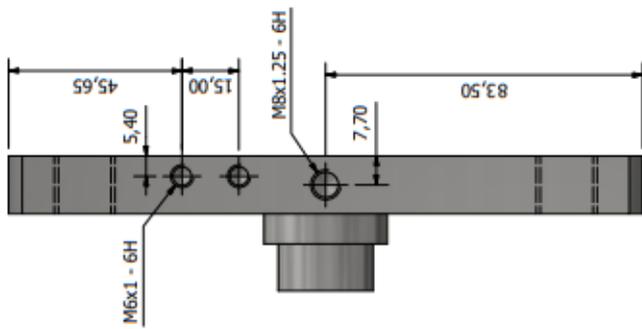
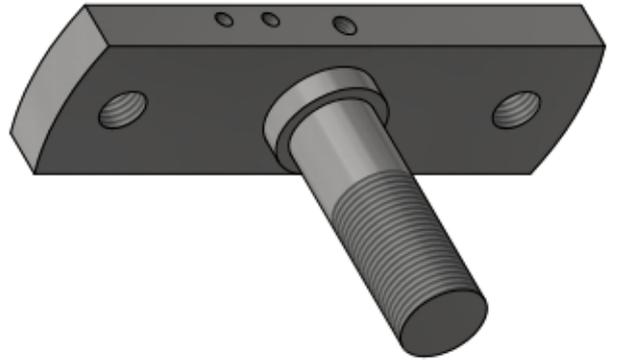
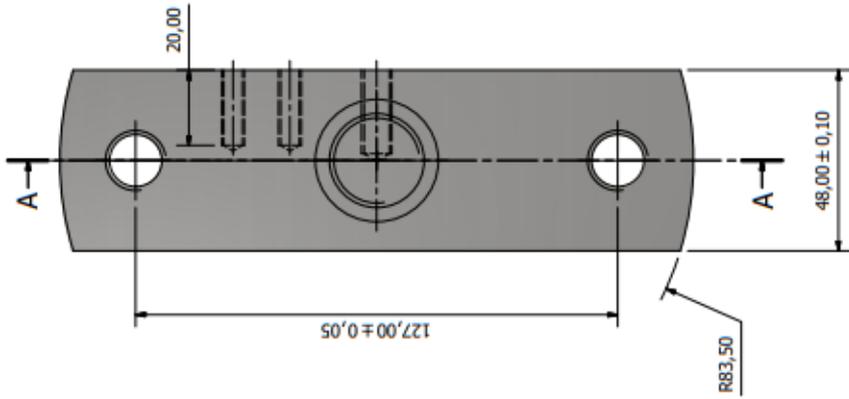
Projeto por	Verificado por	Aprovado por	Data
LINEACAMP			12/05/2021
Eixo de Fixação			Folha
			1 / 1



A-A (1 : 1)

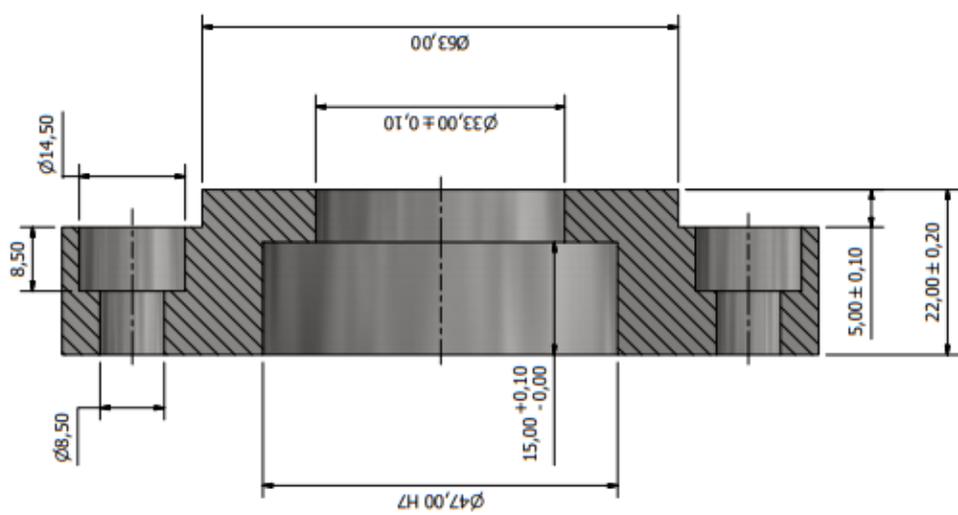
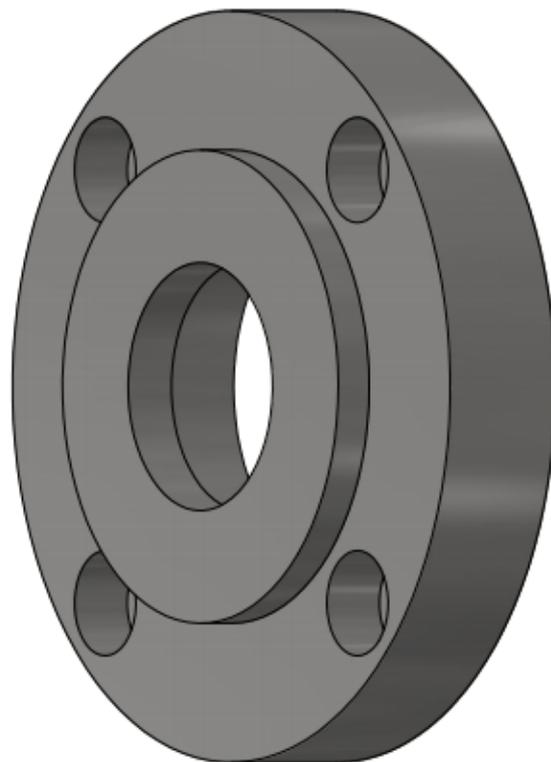
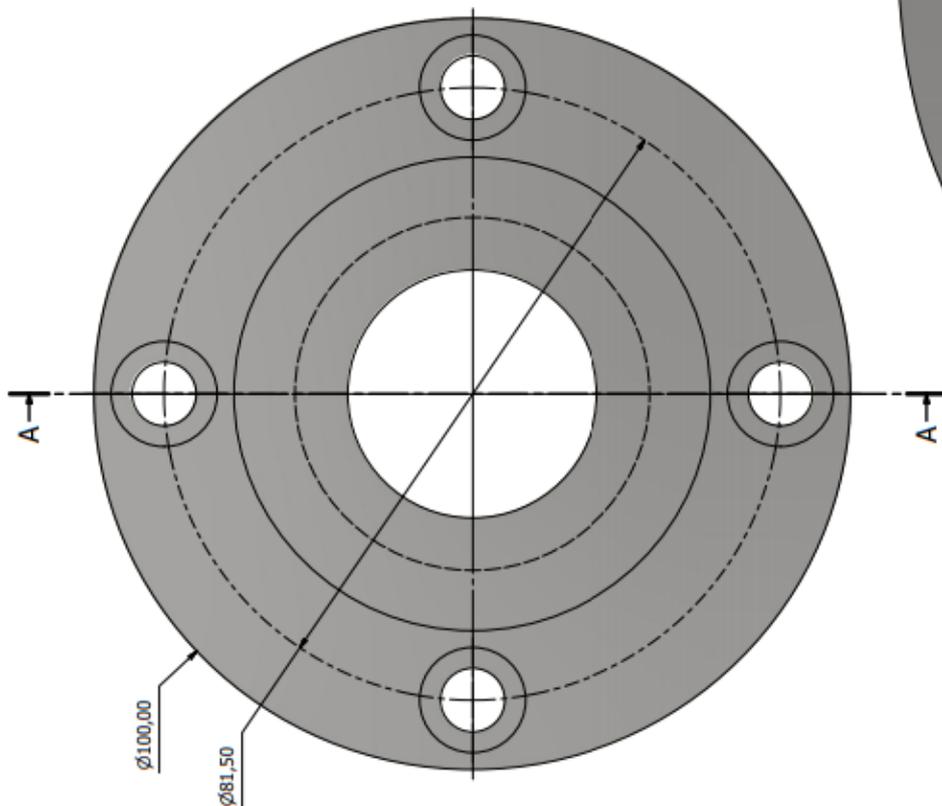
Material: Aço 1045/4340 - 60x180x50mm
 Quantidades: 1
 Chanfros não identificados adotar 0,5x45°

Projetado por UNIFACAMP	Verificado por	Aprovado por	Data 12/05/2021
SUporte do Mancal			Edição 1 / 1



Material: Aço 1045/4340 - Ø180x120mm
 Quantidades: 1
 Chantros não identificados adotar 0,5x45°

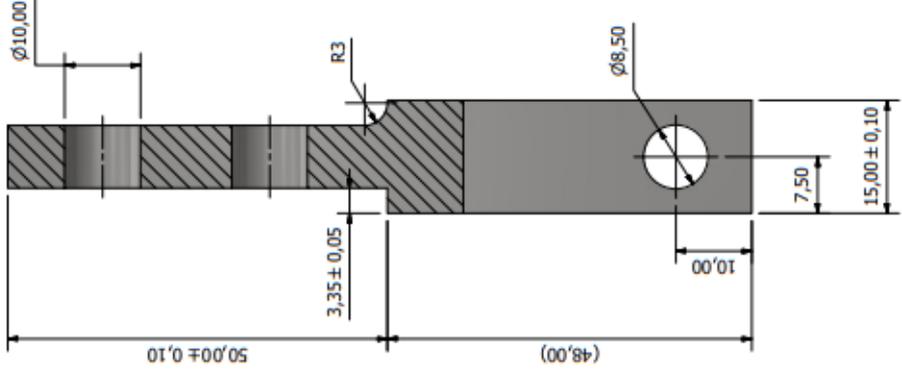
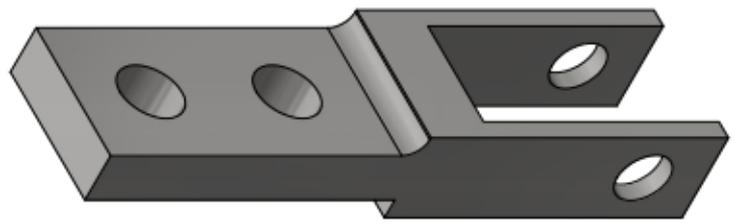
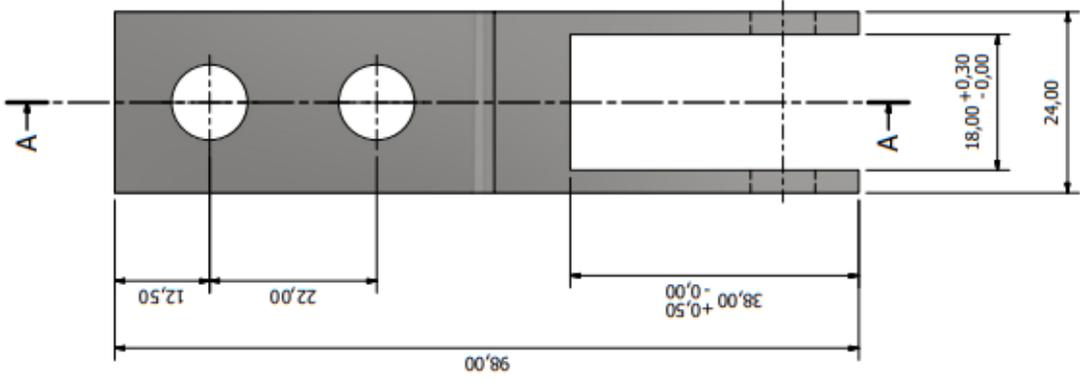
Projeto por	Verificado por	Aprovado por	Data
UNEPCCAMP			12/05/2021
Eixo do Rolamento Axial			Folha
			1 / 1



A-A (2:1)

Material: Aço 1045/4340 - $\varnothing 110 \times 35 \text{mm}$
 Quantidades: 1
 Chantros não identificados adotar 0,5x45°

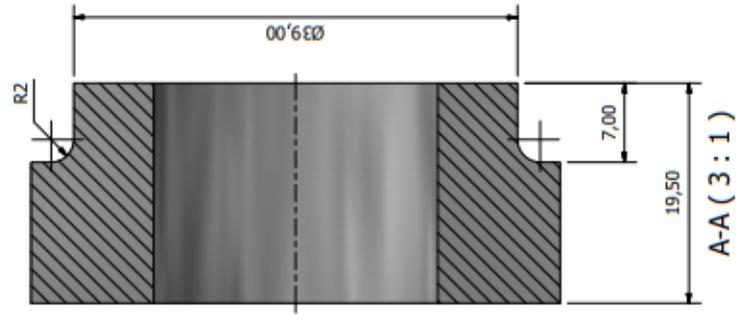
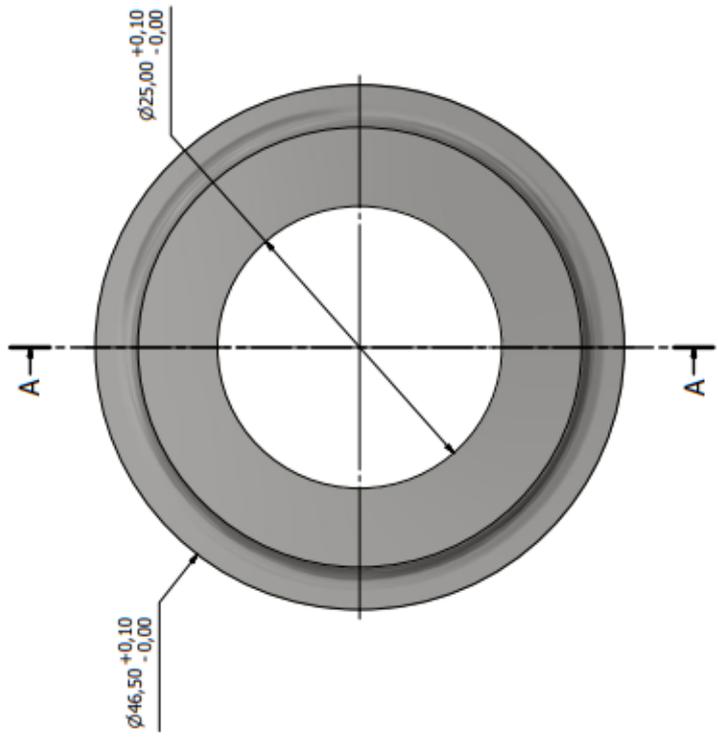
Projeto por	Verificado por	Aprovado por	Data
LINEACAMP			12/05/2021
Base do Rolamento Axial			Folha
			1 / 1



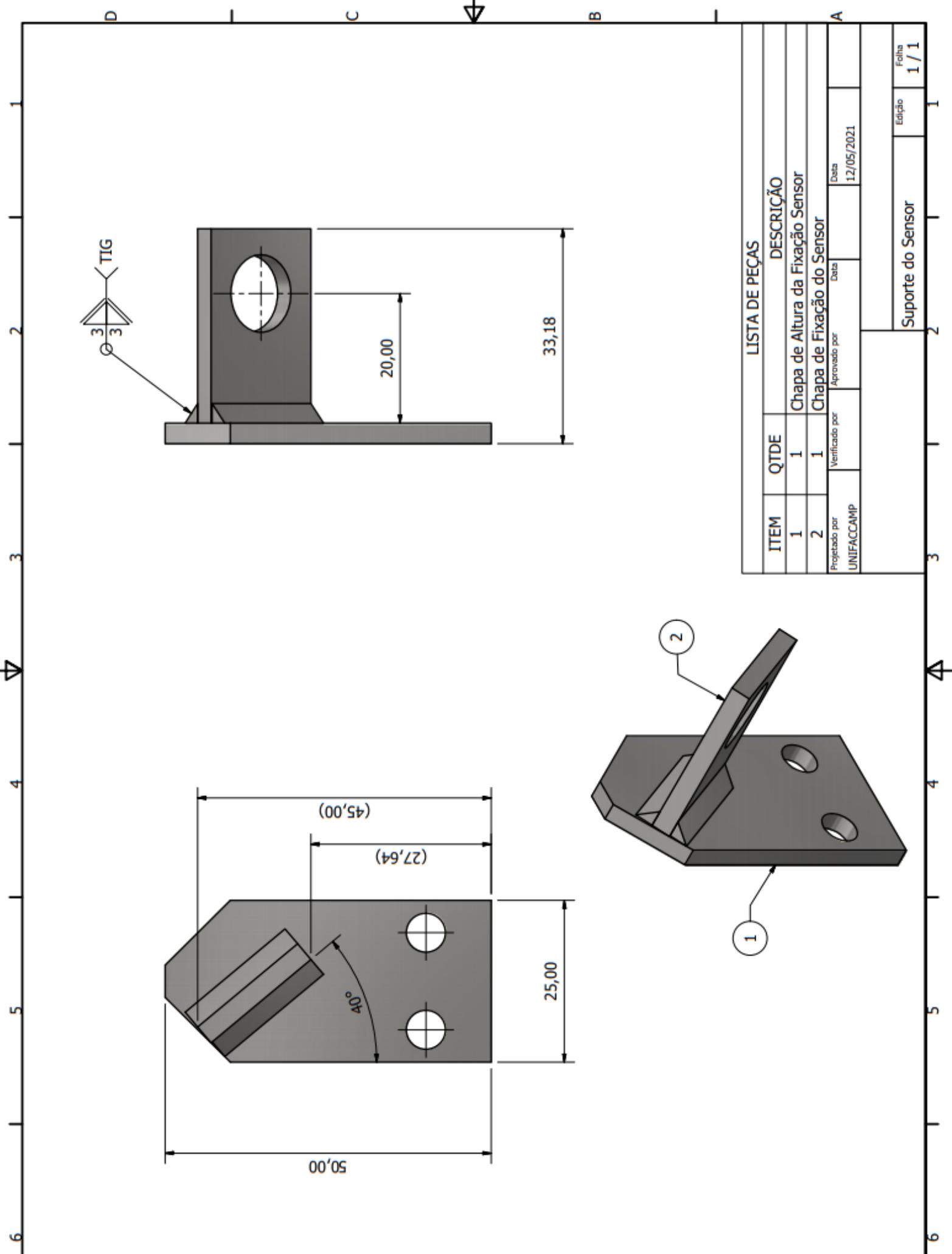
A-A (2 : 1)

Material: Aço 1045/4340 - 35x110x20
 Quantidades: 1
 Chanfros não identificados adotar 0,5x45º

Projeto por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	Edição	Folha
UNIFACCAMP			12/05/2021			1 / 1
Suporte da Roldana						



Projeto por LINEACAMP	Verificado por	Aprovado por	Data 12/05/2021	Revista 1 / 1
Arruela de Ap do Rolamento				Assinatura



ITEM		QTDE	DESCRIÇÃO
1	1	1	Chapa de Altura da Fixação Sensor
2	1	1	Chapa de Fixação do Sensor

Projeto por UNIFACCAMP	Verificado por	Aprovado por	Data	Data
			12/05/2021	

Suporte do Sensor		Edição	Folha
		1 / 1	1 / 1

LISTA DE PEÇAS

DESCRÇÃO

Chapa de Altura da Fixação Sensor

Chapa de Fixação do Sensor

Projeto por UNIFACCAMP

Verificado por

Aprovado por

Data

Data

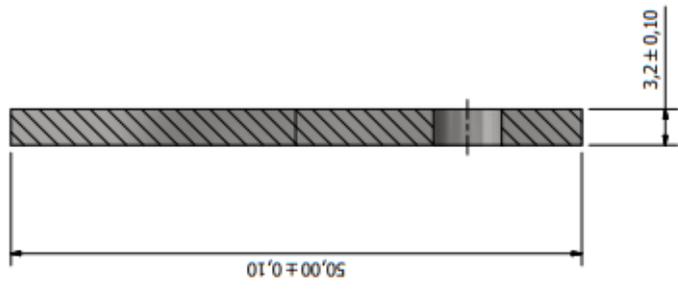
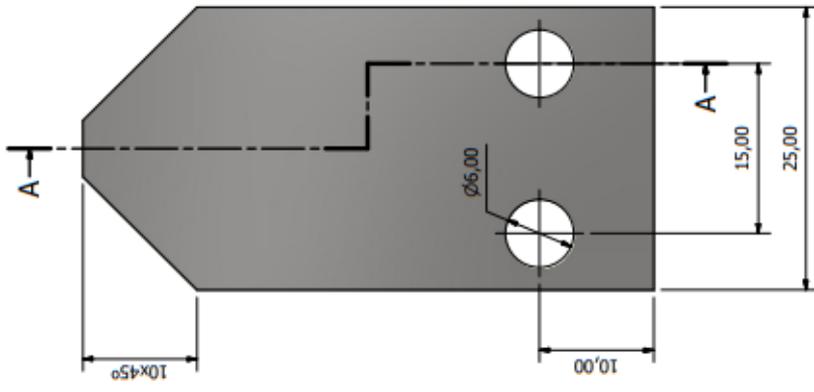
12/05/2021

Suporte do Sensor

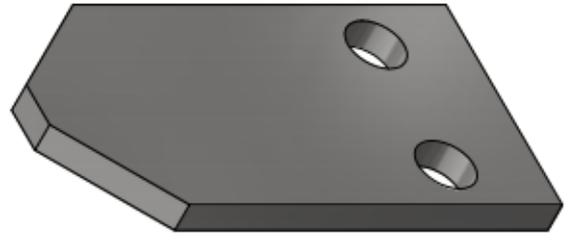
Edição

Folha

1 / 1

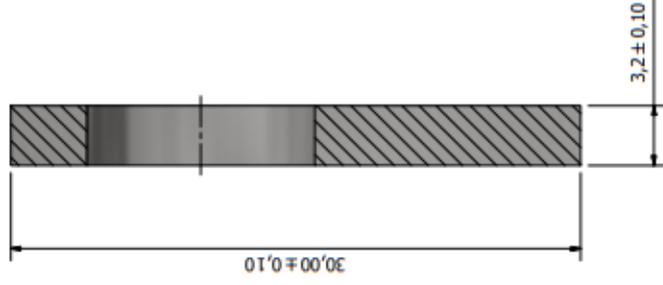
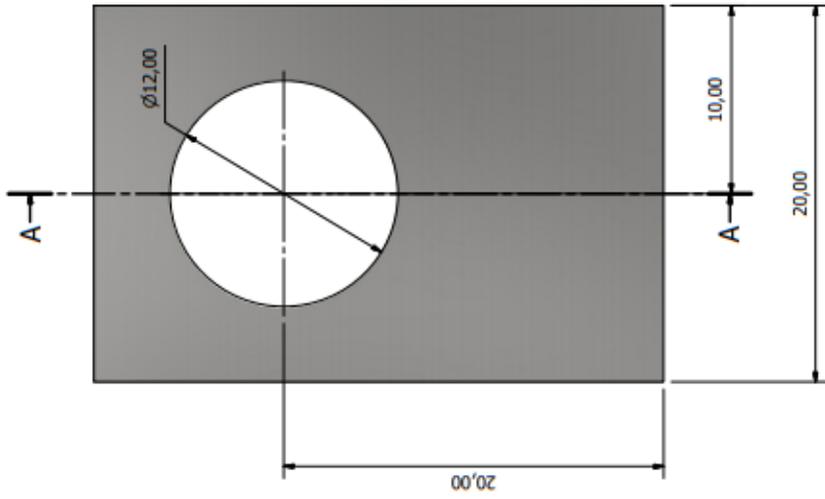


A-A (3 : 1)



Material: Aço 1045/4340 - 35x60x10mm
 Quantidades: 1
 Chanfros não identificados adotar 0,5x45°

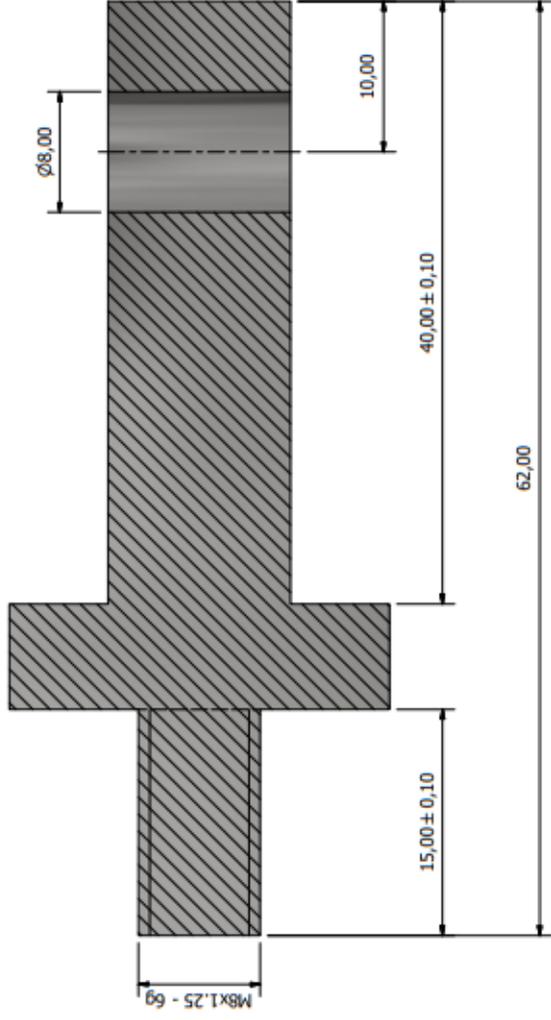
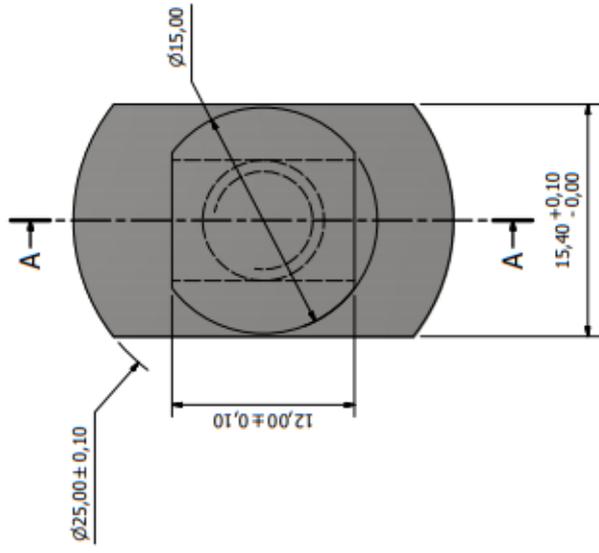
Projeto por UNIFACCAMP	Verificado por	Aprovado por	Data 12/05/2021
Chapa de Altura da Fixação			Folha 1 / 1



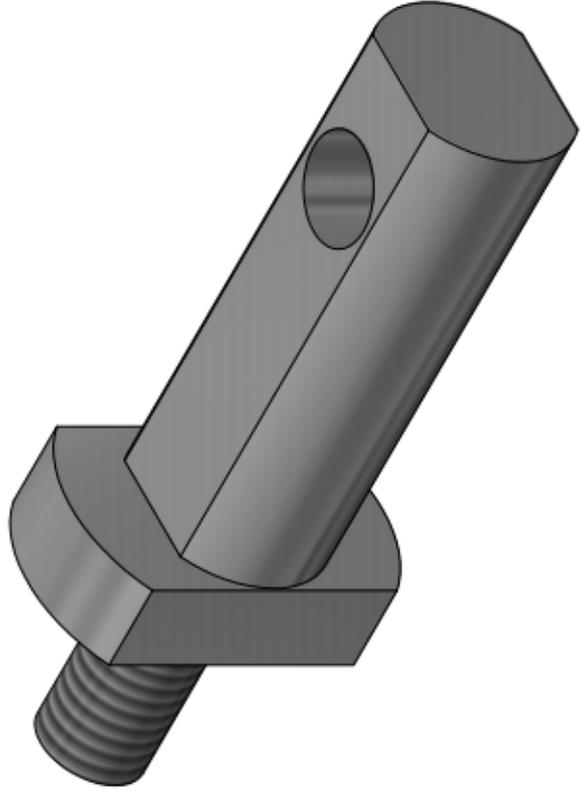
A-A (5 : 1)

Material: Aço 1045/4340 - 25x35x10mm
 Quantidades: 1
 Chanfros não identificados adotar 0,5x45°

Projeto por LUIZACAMP	Verificado por	Aprovado por	Data 12/05/2021	1
Chapa de Fixação do Sensor			1 / 1	1

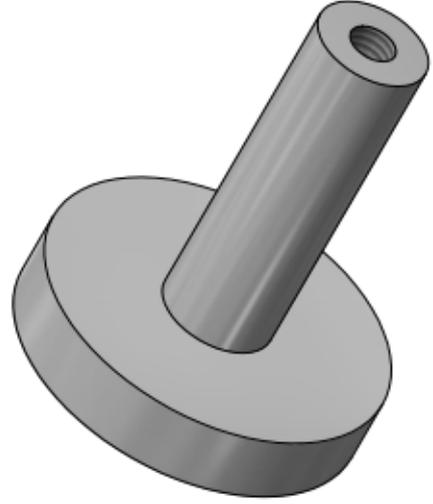
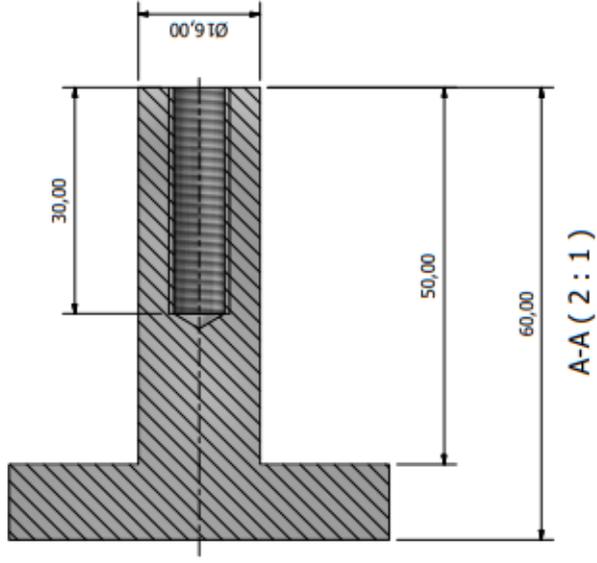
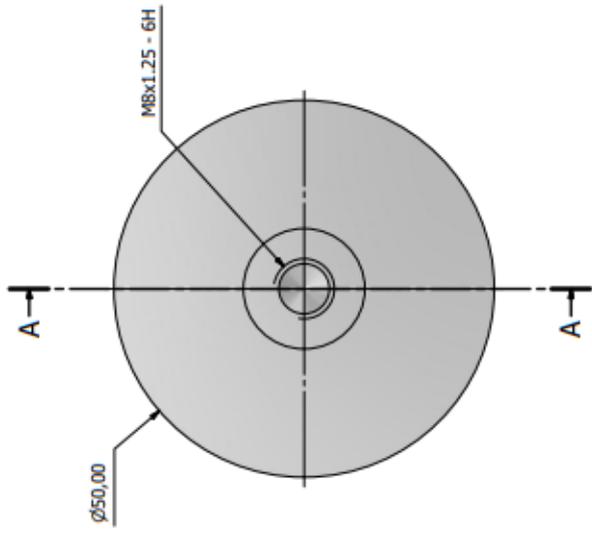


A-A (4 : 1)



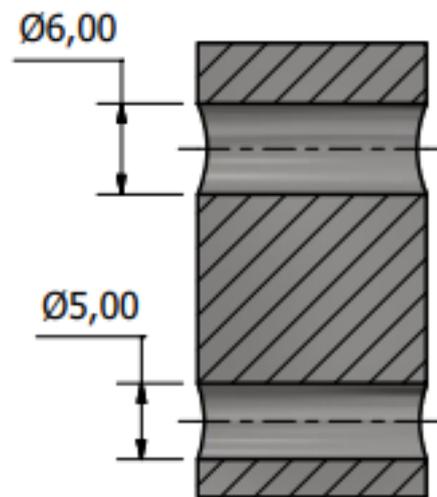
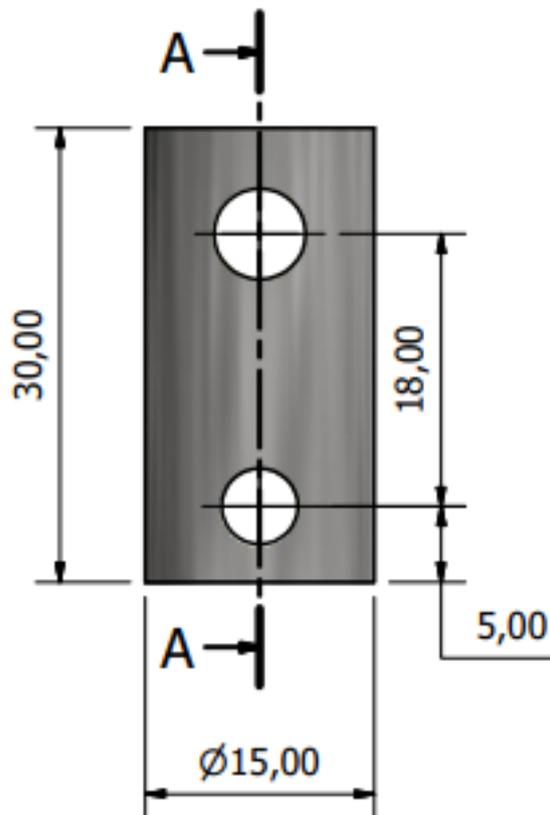
Material: Aço 1045/4340 - $\varnothing 35 \times 80 \text{mm}$
 Quantidades: 1
 Chantros não identificados adotar 0,5x45°

Projeto por	Verificado por	Aprovado por	Data
UNEPACAMP			12/05/2021
Alavanca			Folha
			1 / 1



Material: Aço 1045/4340 - $\varnothing 60 \times 70 \text{mm}$
 Quantidades: 1
 Chantros não identificados adotar $0,5 \times 45^\circ$

Projeto por UNIFACCOMP	Verificado por	Aprovado por	Data 12/05/2021	Outra folha 1 / 1
Suporte da Anilha			Escala	



A-A (2 : 1)

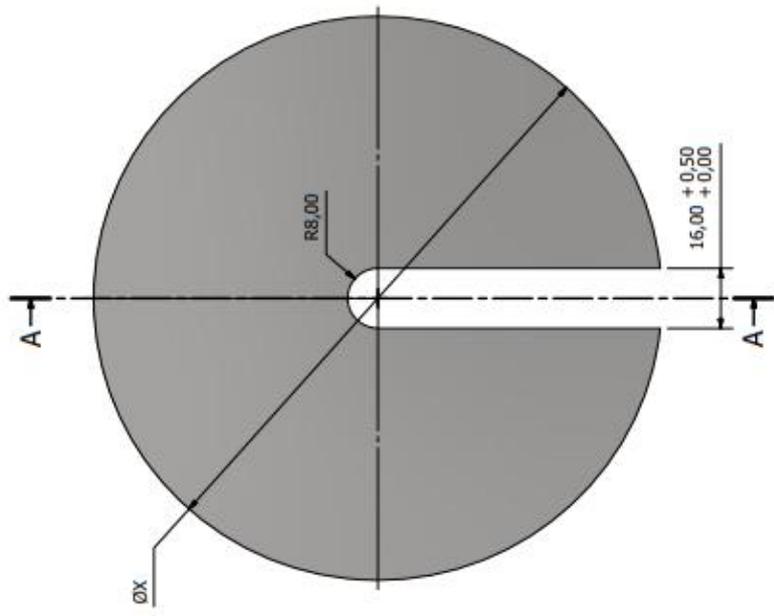


Material: Aço 1045/4340 - $\varnothing 20 \times 35 \text{mm}$

Quantidades: 1

Chanfros não identificados adotar $0,5 \times 45^\circ$

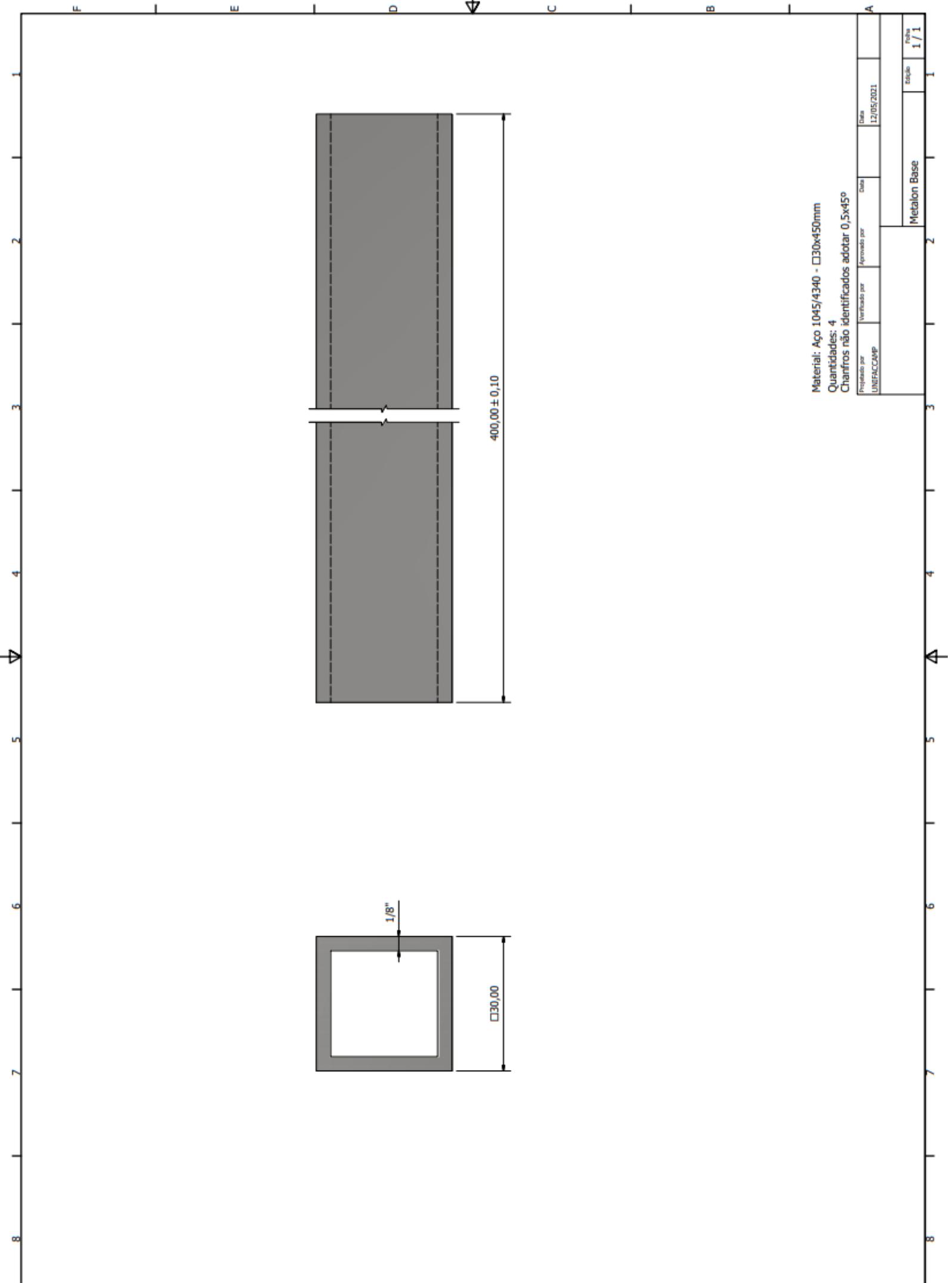
Projetado por UNIFACCAMP	Verificado por	Aprovado por	Data	Data 12/05/2021	
			Suporte de Carga		Edição
					Folha 1 / 1



A-A (1:1)

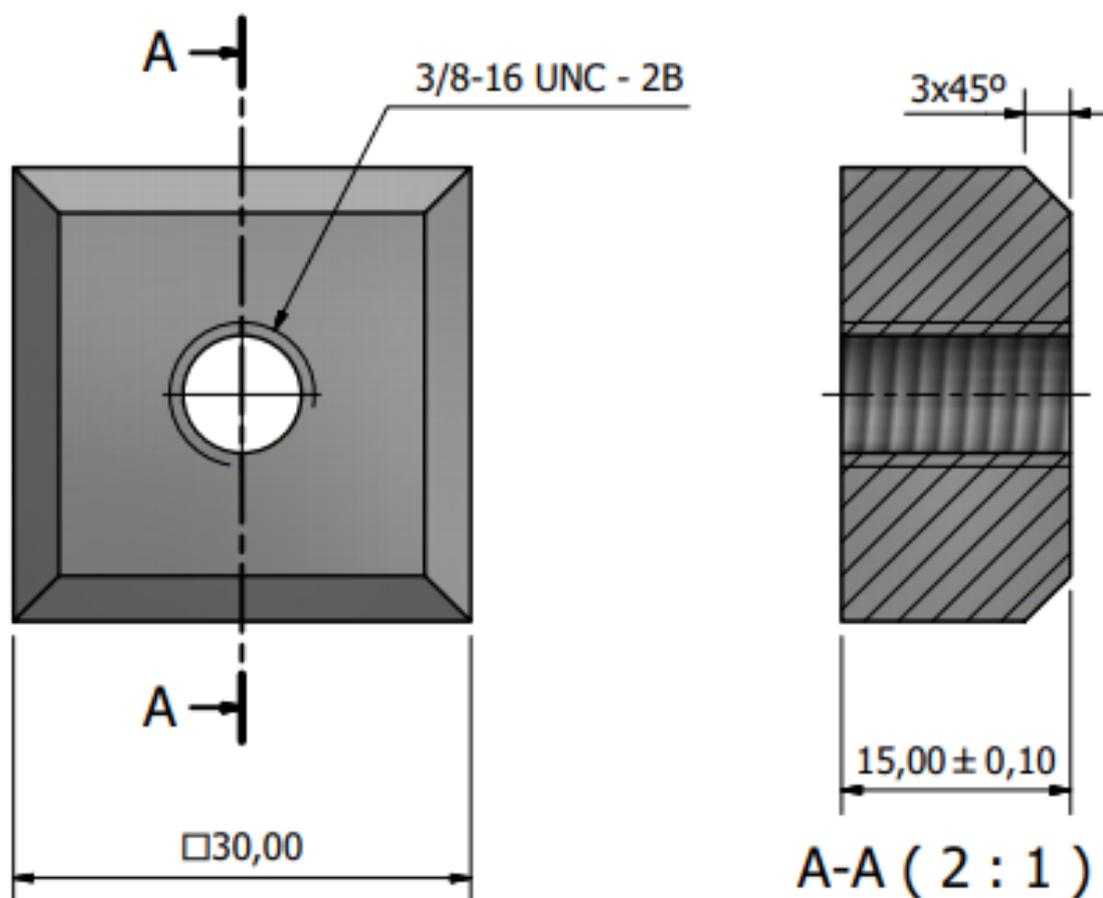
Material: Aço Inoxidável 304
 Quantidades: Conforme Necessidade
 Chanfros não identificados adotar $0,5 \times 45^\circ$
 As cotas X e Y devem ser calculadas de modo a fornecer a massa desejada.

Projeto por UNIFACCAMP	Verificado por	Aprovado por	Data 12/05/2021	1
Anilha			1 / 1	1



Material: Aço 1045/4340 - □30x450mm
 Quantidades: 4
 Chanfros não identificados adotar 0,5x45°

Projeto por UNIFACAMP	Verificado por	Aprovado por	Data 12/05/2021
Metalon Base			folha 1 / 1

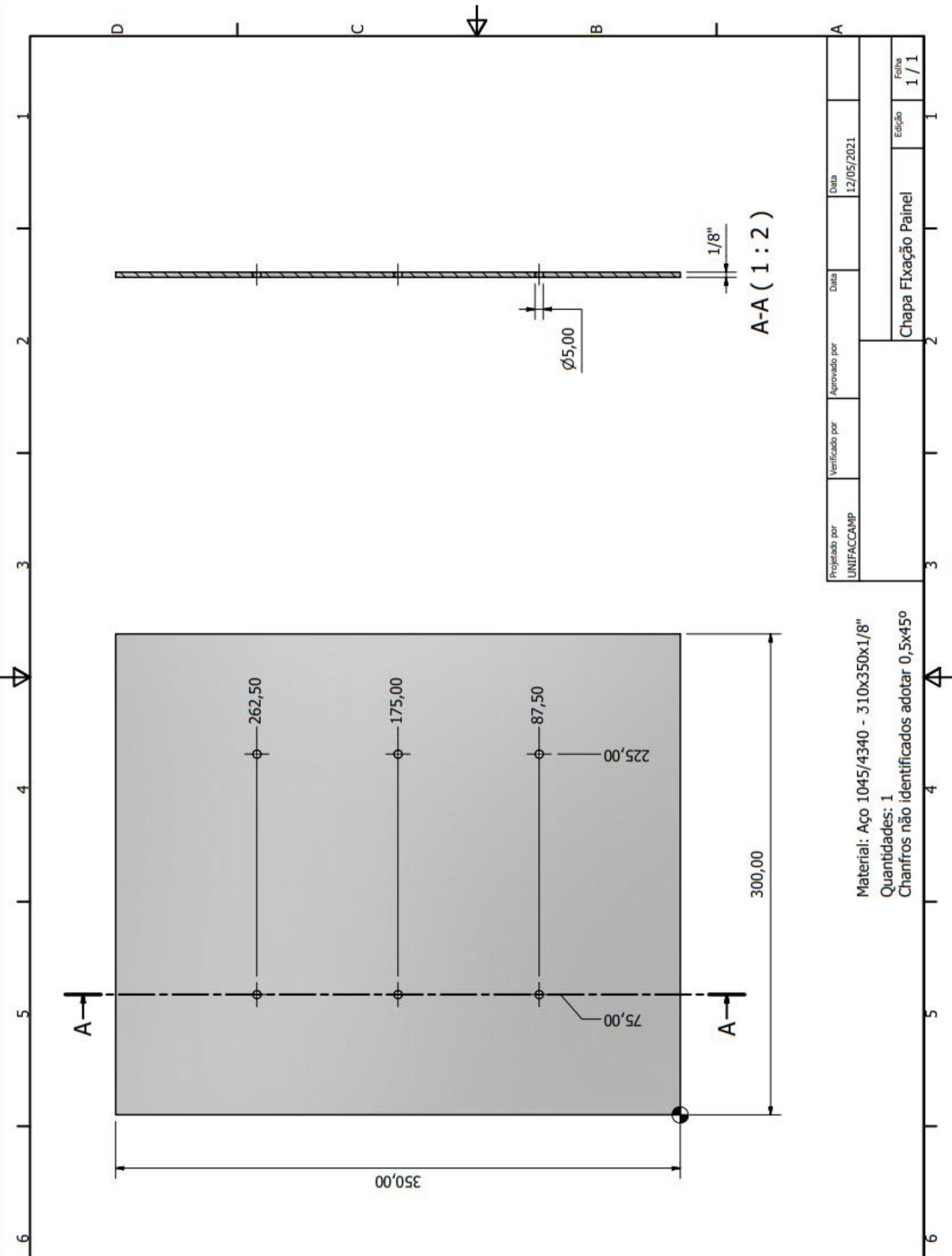


Material: Aço 1045/4340 - □30x20mm

Quantidades: 4

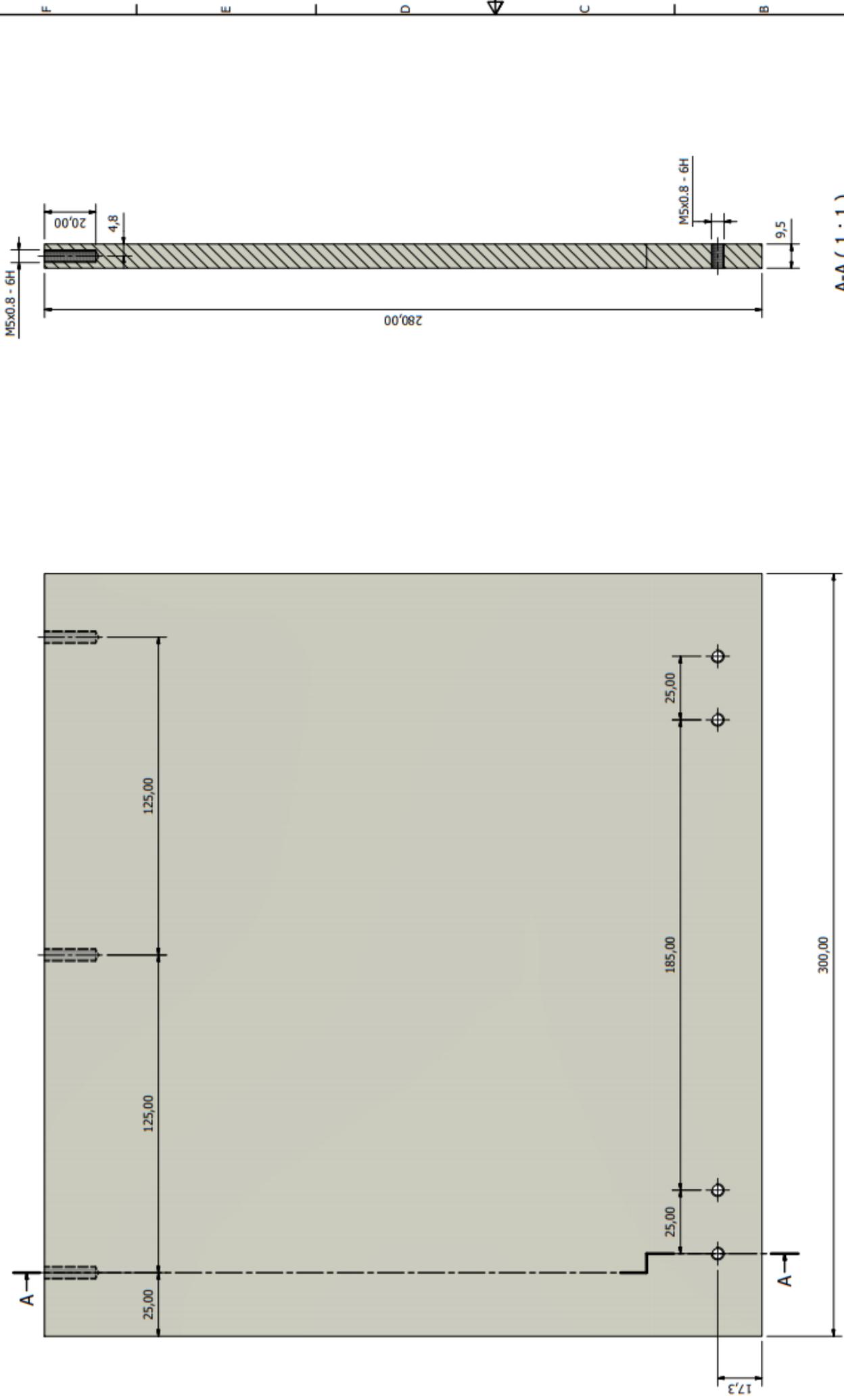
Chanfros não identificados adotar 0,5x45°

Projetado por UNIFACCAMP	Verificado por	Aprovado por	Data	Data 12/05/2021	
			Tampa do Metalon		



Projetoado por UNIFACCAMP	Verificado por	Aprovado por	Data 12/05/2021	Folha 1 / 1
Chapa Fixação Painel			Edição 1 / 1	

Material: Aço 1045/4340 - 310x350x1/8"
 Quantidades: 1
 Chanfros não identificados adotar 0,5x45°



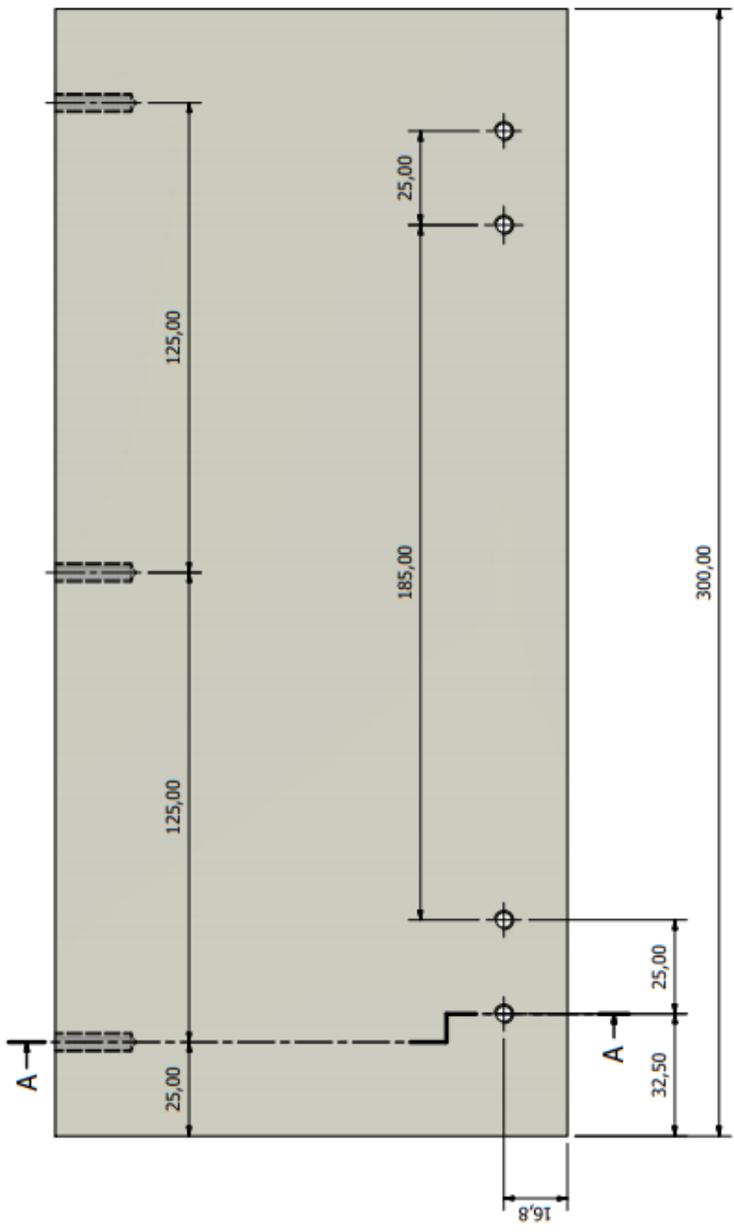
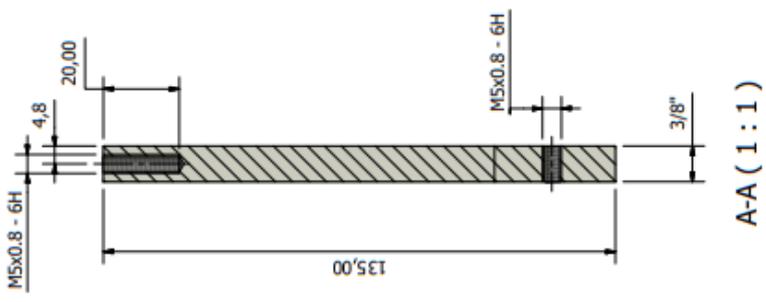
A-A (1 : 1)

Material: Policarbonato Transparente - 300x280x3/8"

Quantidades: 1

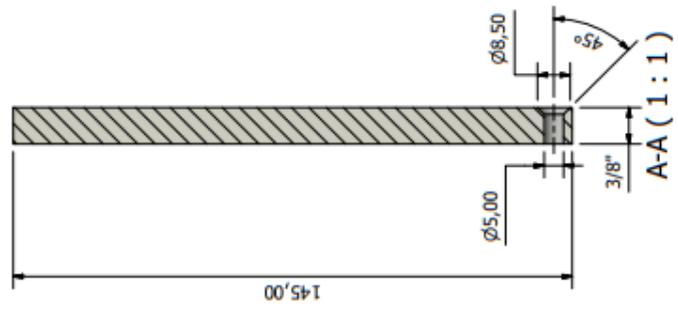
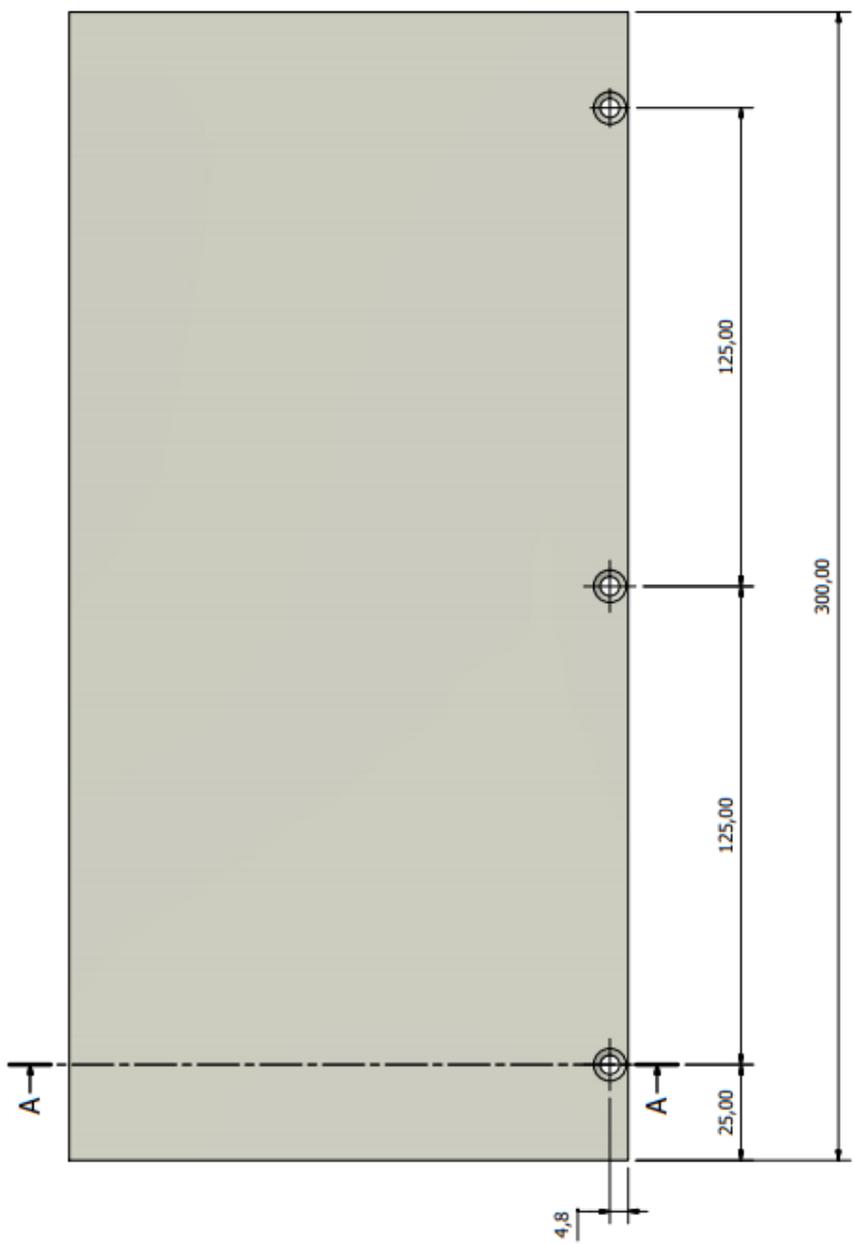
Chantfros não identificados adotar 0,5x45°

Projeto por	Verificado por	Aprovado por	Data
UNIFACAMP			12/05/2021
Chapa de Policarbonato Superior			1



Material: Policarbonato Transparente - 300x135x3/8"
 Quantidades: 1
 Chafros não identificados adotar 0,5x45°

Projeto por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	Nota
LUNIFACAMP			12/05/2021		1 / 1
Chapa de Policarbonato Fixa					1 / 1



Material: Policarbonato Transparente - 300x145x3/8"
 Quantidades: 1
 Charnifos não identificados adotar 0,5x45°

Projeto por UNIFACCAMP	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	Edição
			12/05/2021		1 / 1
Chapa de Policarbonato Moyel					1 / 1