

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**BRUNO BARIONI RIBEIRO ROSA**

**PROJETO DE UM TRIBÔMETRO PARA ENSAIO DE ATRITO E DESGASTE  
ROTATIVO OU LINEAR RECÍPROCO**

São Carlos - SP

2025

**BRUNO BARIONI RIBEIRO ROSA**

**PROJETO DE UM TRIBÔMETRO PARA ENSAIO DE ATRITO E DESGASTE  
ROTATIVO OU LINEAR RECÍPROCO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Flávio Yukio Watanabe

São Carlos - SP

2025

Rosa, Bruno Barioni Ribeiro

Projeto de um tribômetro para ensaio de atrito e desgaste rotativo ou linear recíproco / Bruno Barioni Ribeiro Rosa -- 2025.  
95f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos  
Orientador (a): Flávio Yukio Watanabe  
Banca Examinadora: Alexandre Tácito Malavolta, Flávio Yukio Watanabe, Roberto Eiki Oshiro  
Bibliografia

1. Projeto de tribômetro. 2. Tribologia. 3. Atrito e desgaste. I. Rosa, Bruno Barioni Ribeiro. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática  
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

---

### Folha de Aprovação

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Bruno Barioni Ribeiro Rosa, realizada em 30/01/2025.

#### Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Alexandre Tácito Malavolta (UFSCar)

Prof. Dr. Flávio Yukio Watanabe (UFSCar)

Prof. Dr. Roberto Eiki Oshiro (EESC/USP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Flávio, pela orientação precisa, pelo suporte constante, pela confiança depositada, pela motivação incansável e pela paciência e auxílio ao longo deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo essencial apoio no fomento e financiamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSCar, bem como na promoção do desenvolvimento acadêmico e científico no país.

## RESUMO

No cenário competitivo das indústrias, a busca por soluções inovadoras que proporcionem qualidade, eficiência e durabilidade às máquinas e equipamentos tem demandado o investimento em pesquisas e testes de novos materiais, componentes ou lubrificantes, antes da construção de protótipos. Neste contexto, os tribômetros, equipamentos para ensaios de atrito, desgaste, lubrificantes e regimes de lubrificação, são essenciais para se analisar de forma preliminar e comparativa as diferentes alternativas tribológicas, sob diferentes condições de carregamento, tipo de movimento, rotação/velocidade, lubrificação e temperatura. O presente trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um projeto de tribômetro do tipo pino-disco de baixo custo e voltado à aplicação acadêmica, tendo diferencial de que seja capaz de realizar os testes estabelecidos nas normas ASTM G99-17 e ASTM G133-22. O tribômetro projetado possui dois módulos intercambiáveis que possibilitam a realização de ensaios rotativos ou lineares recíprocos entre os elementos testados, variando-se carga, rotação e condição de lubrificação. Os desenhos e especificações de todos os componentes que integram o tribômetro projetado são apresentados ao final do trabalho e a expectativa é que a construção e aplicação do tribômetro proposto possibilite o desenvolvimento de atividades de ensino e pesquisa em Instituições de Ensino Superior, contribuindo com o aprimoramento da formação de estudantes de graduação e pós-graduação da área de engenharia, bem como com o desenvolvimento de soluções tecnológicas que podem trazer benefícios econômicos para a indústria e para a sociedade em geral.

**Palavras-chave:** tribologia; atrito; desgaste; lubrificação; manutenção.

## **ABSTRACT**

In the competitive industrial scenario, the search for innovative solutions that provide quality, efficiency, and durability to machines and equipment has demanded investment in research and testing of new materials, components, or lubricants before prototype construction. In this context, tribometers, equipment for testing friction, wear, lubricants, and lubrication regimes, are essential for preliminarily and comparatively analyzing different tribological alternatives under various loading conditions, types of motion, rotation/speed, lubrication, and temperature. The main objective of this work is the development of a low-cost pin-disc type tribometer design aimed at academic applications, with the unique feature of being capable of performing the tests established in ASTM G99-17 and ASTM G133-22 standards. The designed tribometer has two interchangeable modules that allow for performing either rotary or reciprocating linear tests between the tested elements, varying load, rotation, and lubrication condition.

The designs and specifications of all components that make up the designed tribometer are presented at the end of the work and the expectation is that the construction and application of the tribometer will enable the development of teaching and research activities in Higher Education Institutions, contributing to the improvement of the training of undergraduate and graduate students in the field of engineering, as well as the development of technological solutions that can bring economic benefits to the industry and society in general.

**Keywords:** tribology; friction; wear; lubrication; maintenance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Economia por meio da tribologia em milhões de libras (valores de 1965) ...	12
Figura 1.2 - Princípio de funcionamento de um tribômetro pino-disco .....	14
Figura 2.1 - Representação gráfica das áreas de conhecimento da tribologia .....	16
Figura 2.2 - Curva de Stribeck e regimes de lubrificação por filme fluido .....	18
Figura 2.3 - Estágios típicos de desgaste em contatos deslizantes.....	20
Figura 2.4 - Representação dos fenômenos de desgaste .....	20
Figura 2.5 - Diagrama de desgaste .....	21
Figura 2.6 - Diagrama esquemático do ensaio rotativo pino-disco .....	24
Figura 2.7 - Diagrama esquemático do ensaio linear recíproco pino-plano.....	26
Figura 2.8 - Mecanismos (a) garfo escocês e (b) biela manivela .....	27
Figura 3.1 - Tribômetro Pino-Disco POD - 4.0.....	29
Figura 3.2 - Módulos de ensaio Nanovea.....	32
Figura 3.3 - Tribômetro Anton Paar - modelo TRB <sup>3</sup> .....	32
Figura 3.4 - Tribômetro Nanovea - modelo T50 .....	33
Figura 3.5 - Tribômetro Bruker - modelo UMT TriboLab .....	33
Figura 3.6 - Tribômetro pino-disco (USJT/Santana et al.) .....	35
Figura 3.7 - Tribômetro pino-disco (UFRJ/Iglesias) .....	36
Figura 3.8 - Tribômetro pino-disco (ISEP/Silva) .....	36
Figura 3.9 - Tribômetro pino-disco (ISEP/Martins).....	37
Figura 3.10 - Tribômetro pino-disc (Ulbra/Accadrolli e de Verney) .....	38
Figura 4.1 - Tribômetro projetado com dimensões adotadas.....	41
Figura 4.2 - Tribômetro projetado – módulo rotativo.....	42
Figura 4.3 - Tribômetro projetado – módulo linear recíproco .....	42
Figura 4.4 - Módulo linear recíproco.....	43
Figura 4.5 - Módulo de acionamento rotativo.....	43
Figura 4.6 - Componentes do módulo de acionamento rotativo .....	44
Figura 4.7 - Conjunto de suporte do tubo cilíndrico .....	45
Figura 4.8 - Componentes do conjunto de suporte do tubo cilíndrico.....	46
Figura 4.9 - Conjunto de suporte do elemento de teste .....	46
Figura 4.10 - Conjunto de suporte do pino ou esfera .....	47
Figura 4.11 - Montagem da célula de carga.....	47
Figura 4.12 - Esquema de Ligação entre Arduino, Módulo HX711 e Célula de carga. ...	48

Figura A.1 - Representação esquemática do eixo com força normal .....	55
Figura A.2 - Representação esquemática do eixo com força de atrito .....	56
Figura B.1 - Dados do rolamento .....	59
Figura B.2 – Dimensões do rolamento.....	60
Figura B.3 - Fatores de cálculo para rolamentos rígidos de esfera.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Coeficientes de atrito para algumas combinações de materiais .....	17
Tabela 2.2 - Testes de atrito e desgaste indicados pela norma ASTM G115-10 .....	23
Tabela 3.1 - Parâmetros de teste indicados na norma ASTM G99-17 .....	31
Tabela 3.2 - Parâmetros de ensaio de tribômetros comerciais .....	34
Tabela 4.1 - Parâmetros básicos de projeto .....	39
Tabela C.1 – Componentes com estimativa de custo .....	62

## **LISTA DE SIGLAS**

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

DIN - *Deutsches Institut für Normung*

PIB - Produto Interno Bruto

RMN - Ressonância Magnética Nuclear

## LISTA DE SÍMBOLOS

$d$	Diâmetro do pino ou da esfera
$D$	Diâmetro do disco
$F$	Força normal no pino
$h$	Espessura (camada do lubrificante)
$R$	Raio da pista de desgaste
$W$	Velocidade de rotação do disco
$\eta$	<i>Viscosidade do lubrificante</i>
$N$	Velocidade de deslizamento
$P$	Carga normal
$Fat$	Força de atrito
$CS$	Coeficiente de Segurança
$\pi$	Relação entre o diâmetro e o perímetro de uma circunferência
$E$	Módulo de Elasticidade
$Sy$	Tensão de Escoamento
$Sut$	Tensão Última
$M$	Momento
$L_{na}$	Vida nominal ajustada em milhões de revoluções (o sub-índice $n$ representa a diferença entre 100% e a confiabilidade requerida)
$a_1$	fator de ajuste de vida, para confiabilidade
$a_2$	fator de ajuste de vida, para material
$a_3$	fator de ajuste de vida, para condições de funcionamento Rolamento escolhido, SKF designação 6004
$C$	Classificação de carga básica dinâmica
$C_0$	Classificação de carga básica estática
$e$	Fator de cálculo para rolamento rígido de esferas
$X$	Fator de cálculo para rolamento rígido de esferas
$Y$	Fator de cálculo para rolamento rígido de esferas

## SUMÁRIO

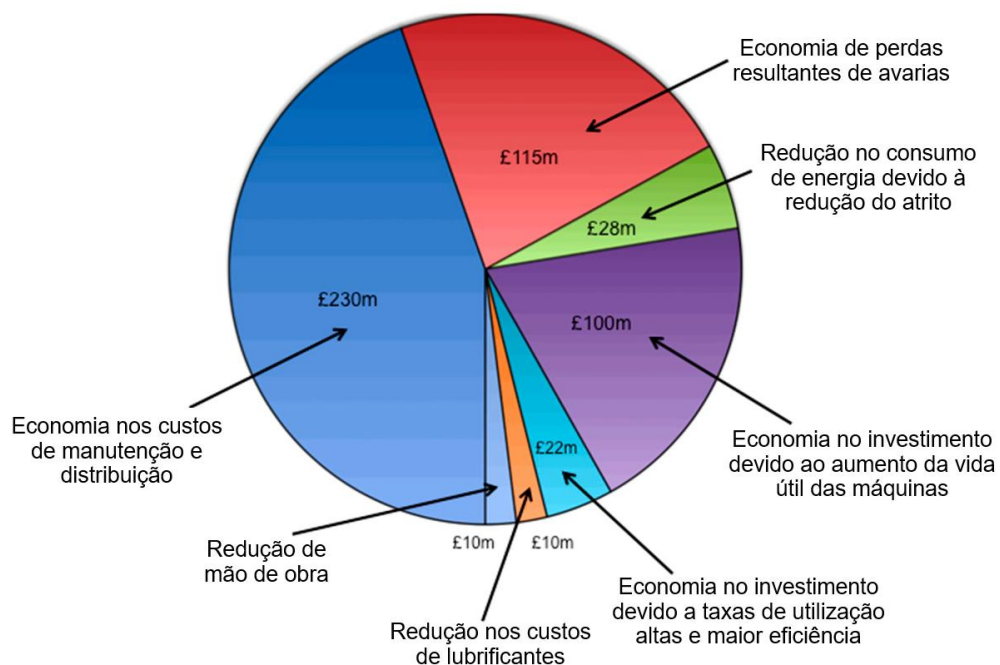
1 - INTRODUÇÃO	12
2 - FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES DA TRIBOLOGIA	16
2.1 - ATRITO	16
2.2 - DESGASTE	19
2.3 - ENSAIOS TRIBOLÓGICOS	21
2.3.1 - ENSAIO ROTATIVO PINO-DISCO	24
2.3.1 - ENSAIO LINEAR RECÍPROCO PINO-PLACA	26
3 - TRIBÔMETROS DO TIPO PINO-DISCO	29
3.1 -TRIBÔMETROS COMERCIAIS	31
3.2 -TRIBÔMETROS ACADÊMICOS	34
4 - DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	39
4.1 - PARÂMETROS DE PROJETO	39
4.2 - TRIBÔMETRO PROJETADO	40
4.2.1 - MÓDULO ROTATIVO	41
4.2.1 - MÓDULO LINEAR RECÍPROCO	42
5 - CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
APÊNDICE A – Dimensionamento do Eixo do Disco	55
APÊNDICE B – Seleção dos Rolamentos do Eixo do Disco	59
APÊNDICE C – Estimativa de Custo do Tribômetro	62
APÊNDICE D – Desenhos Técnicos	67

## 1 - INTRODUÇÃO

Os fenômenos relacionados ao atrito e desgaste entre superfícies em contato são usualmente associados a falhas e perdas financeiras, devido à perda de eficiência energética, aumento de custos de manutenção e redução da vida útil de componentes mecânicos; muito embora, o atrito e o desgaste também possam estar associados positivamente a alguns processos produtivos. Por outro lado, investimentos em pesquisa e educação relacionados a estes fenômenos podem resultar em economia significativa de recursos financeiros, conforme foi evidenciado em 1966 por um grupo de trabalho instituído pelo Ministério da Educação e Ciência da Inglaterra e chefiado por Peter Jost.

O relatório apresentado por este grupo de trabalho demonstrou que, apenas no Reino Unido, havia um desperdício de 515 milhões de libras por ano (valores de 1965) que poderiam ser poupados, caso fosse dada maior atenção às questões relacionadas à tribologia, valores estes distribuídos conforme ilustrado na Figura 1.1 (Jost, 1990).

Figura 1.1 - Economia por meio da tribologia em milhões de libras (valores de 1965)



Fonte: Jost (1990) (adaptado)

O grupo de trabalho chefiado por Jost foi responsável também pela atual definição do termo “Tribologia”, entendida como sendo “a ciência e a tecnologia da

interação entre superfícies com movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionadas” (Jost, 1990).

Atribui-se o reconhecimento mundial da tribologia mais aos efeitos da economia do que à lógica ou às necessidades, indicando a influência significativa de fatores econômicos na visibilidade e desenvolvimento dessa disciplina para o reconhecimento mundial da tribologia. A expectativa do grupo de trabalho chefiado por Jost foi de que a devida atenção à tribologia, especialmente na educação, pesquisa e aplicação, poderia levar a economias na ordem de 1,3% e 1,6% do PIB (Produto Interno Bruto), e ainda, que os primeiros 20% dessas economias podem ser normalmente obtidos com baixos investimentos (Jost, 1990).

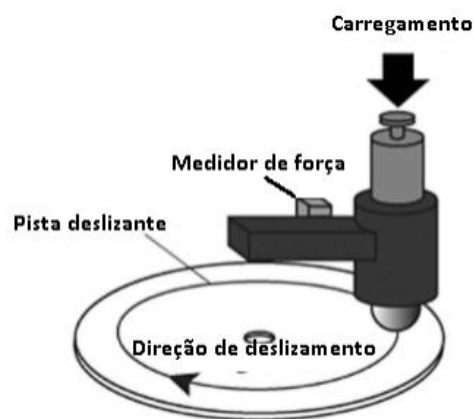
Mais recentemente, Holmberg e Erdemir (2017) apresentaram os impactos do atrito e do desgaste no consumo de energia, nos gastos econômicos e nas emissões de CO<sub>2</sub> em uma escala global, considerando quatro principais setores consumidores de energia: transporte, manufatura, geração de energia e residencial. Segundo as estimativas dos autores, cerca de 23% do consumo total de energia mundial estão associados aos contatos tribológicos; sendo 20% usados para superar o atrito e 3% usados para remanufaturar peças desgastadas e reparar equipamentos que apresentam falhas relacionadas ao desgaste.

Algumas alternativas tecnológicas que possibilitam a redução do atrito e do desgaste podem ser implementadas diretamente em máquinas existentes por meio do processo *retrofit* de máquinas, mas nem sempre isso é possível e novas máquinas, mais avançadas, devem ser desenvolvidas para a implementação de novas tecnologias (Holmberg; Erdemir, 2017). Dentre as novas alternativas tecnológicas indicadas pelos autores, destacam-se: lubrificantes e aditivos, novos materiais, tratamentos e revestimentos superficiais, ou ainda, projeto de componentes com superfícies texturizadas.

No entanto, no cenário competitivo mundial das indústrias de máquinas, a construção de novos protótipos para testar novos materiais, componentes ou lubrificantes é usualmente precedida por ensaios destes elementos em condições laboratoriais controladas para se verificar a eficácia da solução apresentada. Neste sentido, os tribômetros, equipamentos para ensaios de atrito, desgaste, lubrificantes e regimes de lubrificação, são essenciais para se analisar de forma preliminar e comparativa as diferentes alternativas tribológicas avaliadas sob diferentes condições de carregamento, tipo movimento, rotação/velocidade, lubrificação e temperatura.

Os ensaios tribológicos seguem normas específicas e os tribômetros são desenvolvidos para atender as condições estabelecidas para os ensaios, podendo realizar um único tipo de ensaio ou diferentes tipos de ensaio, dependendo da complexidade e dos recursos de cada equipamento. Um dos tribômetros mais comuns é o do tipo pino-disco, ou pino-sobre-disco (*pin-on-disc*), cujo princípio de funcionamento é ilustrado na Figura 1.2, sendo que as características dos ensaios são definidas pela norma ASTM G99 (ASTM International, 2017).

Figura 1.2 - Princípio de funcionamento de um tribômetro pino-disco



Fonte: Nakamura (2012) (traduzido)

No tribômetro pino-disco, um pino (ou esfera) é forçado contra um disco rotativo por meio de um carregamento estático, definindo uma pista deslizante sobre o disco. Ambos os materiais, do pino e do disco, podem ser avaliados quanto ao desgaste por meio de medições das superfícies desgastadas e o atrito entre eles pode ser medido indiretamente, por meio de um sensor de força acoplado ao braço de fixação do pino que é articulado.

Um outro tipo de ensaio tribológico usualmente realizado no mesmo tipo de tribômetro pino-disco é o definido pela norma ASTM G133-22 (ASTM International, 2022), no qual, com o auxílio de um mecanismo auxiliar que transforma o movimento rotativo em movimento de translação alternada, um pino com extremidade esférica desliza sobre uma superfície plana com movimento de translação linear recíproco.

Tribômetros comerciais possuem valor muito elevado, inviabilizando a aquisição e o uso de forma generalizada e, usualmente, estão disponíveis apenas em laboratórios de pesquisa de universidades e empresas especializadas. Projetos

alternativos de tribômetros são desenvolvidos e construídos por pesquisadores em universidades, especialmente para o desenvolvimento de pesquisas acadêmicas.

Frente ao exposto e considerando a importância de se investigar diferentes aspectos tribológicos de superfícies deslizantes em contato, com ou sem lubrificantes, define-se como objetivo principal do presente trabalho o desenvolvimento de projeto de um tribômetro que possibilite a realização dos ensaios estabelecidos nas normas ASTM G99-17 e ASTM G133-22, variando-se as condições de carregamento, rotação/velocidade e lubrificação das superfícies deslizantes.

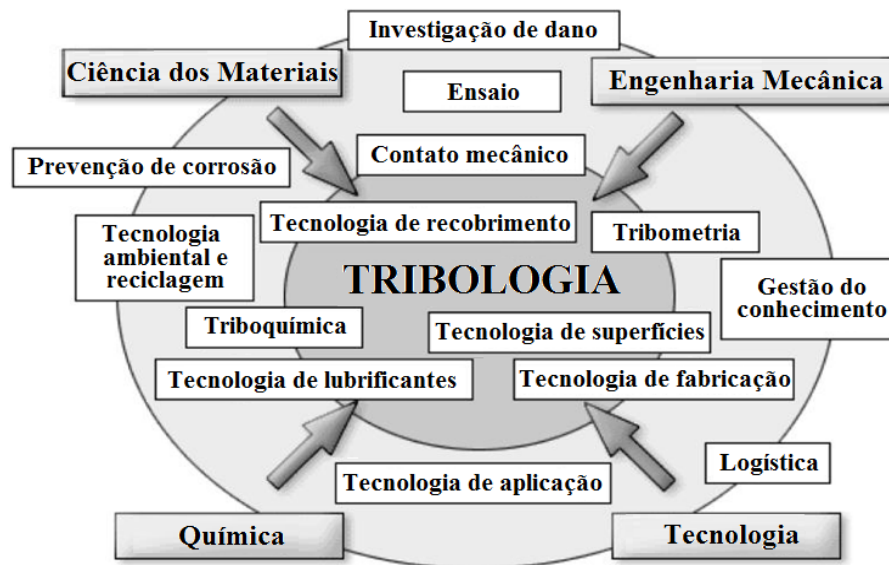
Como objetivos específicos do trabalho, busca-se:

- Desenvolver um projeto de baixo custo e voltado à aplicação acadêmica, empregando elementos mecânicos e componentes eletroeletrônicos comerciais;
- Projetar um sistema auxiliar de medição indireta da força de atrito entre as superfícies deslizantes em movimento rotativo ou de translação linear recíproco;
- Possibilitar o ensaio de lubrificantes e a caracterização dos regimes de lubrificação entre os elementos deslizantes.

## 2 - FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES DA TRIBOLOGIA

A tribologia apresenta uma natureza multidisciplinar e interdependente, abrangendo diferentes áreas básicas de conhecimento como química, materiais, engenharia, tecnologia (Dašić *et al.*; 2003), conforme ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Representação gráfica das áreas de conhecimento da tribologia



Fonte: Dašić *et al.* (2003) (traduzido)

Segundo Kato (2001), é improvável que a aquisição de novos conhecimentos tribológicos por si só gere novas tecnologias. Entretanto, a ausência do conhecimento necessário de tribologia pode ocasionar um grave problema, atuando como fator prejudicial ao desenvolvimento de novas tecnologias. Em uma era de desenvolvimento tecnológico rápido e mundial, a tribologia pode ser considerada como uma tecnologia capacitadora e estratégica de suma importância.

Neste sentido, neste capítulo serão apresentados alguns conceitos relacionados à tribologia, bem como aspectos tecnológicos que possibilitam a identificação das características tribológicas de superfícies deslizantes.

### 2.1 - ATRITO

O atrito é um fenômeno associado à resistência ao movimento deslizante entre elementos sólidos ou fluidos em movimento relativo. No caso de elementos sólidos, o atrito decorre das interações entre as asperezas superficiais em contato e

que, dependendo dos esforços aplicados, podem levar à conformação e ruptura dos picos superficiais em contato entre si. De um modo geral, o atrito depende principalmente dos seguintes fatores: rugosidade superficial, área efetiva de contato, força de contato, velocidade relativa, propriedades dos materiais e presença de elementos lubrificantes ou de resíduos sólidos na interface superficial (Norton, 2013).

Além disso, o atrito entre superfícies sólidas pode ser diferenciado em estático e dinâmico (ou cinético). O atrito estático corresponde à resistência ao movimento antes deste ocorrer e a força de atrito associada atinge um valor máximo na iminência do movimento. Com o início do movimento, a força de atrito diminui levemente, caracterizando a condição de atrito dinâmico. Deste modo, coeficientes de atrito estático e dinâmico são estabelecidos, associados às condições de iminência de movimento e movimento efetivo, respectivamente. Valores de referência de coeficientes de atrito estático e dinâmico apresentados por Norton (2013) são reproduzidos na Tabela 2.1; entretanto, ensaios específicos são necessários para a determinação do coeficiente de atrito entre diferentes materiais em condições específicas de trabalho.

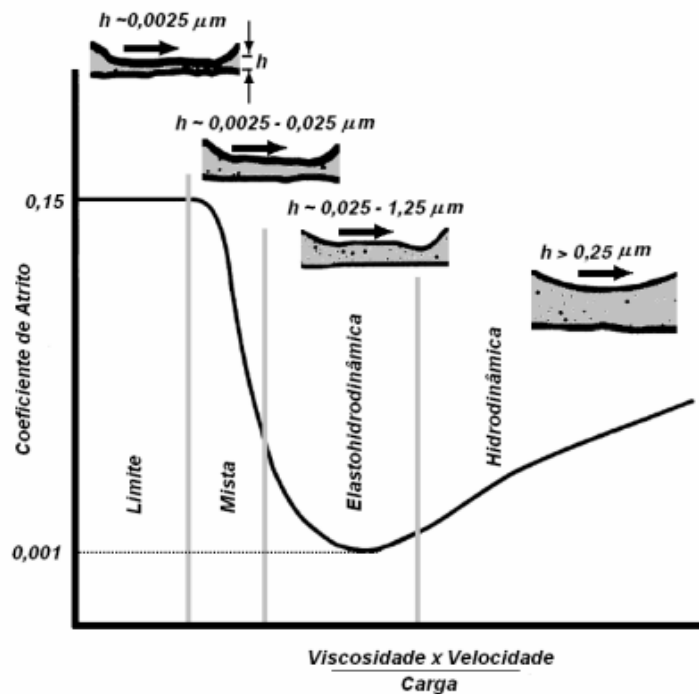
Tabela 2. 1 - Coeficientes de atrito para algumas combinações de materiais

Material 1	Material 2	Estático		Dinâmico	
		Seco	Lubrificado	Seco	Lubrificado
aço doce	aço doce	0,74		0,57	0,09
aço doce	ferro fundido		0,183	0,23	0,133
aço doce	alumínio	0,61		0,47	
aço doce	latão	0,51		0,44	
aço duro	aço duro	0,78	0,11-0,23	0,42	0,03-0,19
aço duro	metal branco ( <i>babbitt</i> )	0,42-0,70	0,08-0,25	0,34	0,06-0,16
Teflon	Teflon	0,04			0,04
aço	Teflon	0,04			0,04
ferro fundido	ferro fundido	1,10		0,15	0,07
ferro fundido	bronze			0,22	0,077
alumínio	alumínio	1,05		1,4	

Fonte: Norton (2013)

Por sua vez, o atrito fluídico ou viscoso pode ser caracterizado pela resistência ao cisalhamento de um filme lubrificante formado entre duas superfícies sólidas. No entanto, antes se formar o filme de fluido característico do regime de lubrificação hidrodinâmica, as superfícies em contato passam por regimes intermediários de lubrificação de que são usualmente identificados por meio da curva de Stribeck, ilustrada na Figura 2.2, e que possibilita a compreensão da relação entre o coeficiente de atrito, a velocidade de deslizamento, a carga normal aplicada e a viscosidade do lubrificante (Jacobson, 2003).

Figura 2.2 - Curva de Stribeck e regimes de lubrificação por filme fluido



Fonte: Couto (2006)

A relação adimensional de entre viscosidade do lubrificante, velocidade de deslizamento e carga normal é conhecida como número de Hersey e o coeficiente de atrito é medido usualmente utilizando-se células de carga. A curva de Stribeck é levantada variando-se as condições de ensaio (velocidade, carga e lubrificante) e estimando-se o coeficiente de atrito a partir da relação entre a força de atrito medida e da carga normal aplicada.

A curva de Stribeck permite diferenciar quatro regimes de lubrificação: limite, mista, elastohidrodinâmica e hidrodinâmica, para os quais as espessuras típicas de

filme de lubrificante são progressivamente maiores e cujas características básicas são descritas na sequência.

- **Lubrificação limite** - condição na qual a superfície de contato é contínua e extensiva, devido à geometria da interface, asperezas superficiais, carga elevada, baixa velocidade ou falta de lubrificante, resultando em um coeficiente de atrito elevado e desgaste acentuado das superfícies em contato.

- **Lubrificação mista** - regime de lubrificação no qual ocorre um equilíbrio relativo entre as lubrificações limite e hidrodinâmica, resultando em uma mistura de regime de contato direto e filme lubrificante, com conseqüente redução do atrito em comparação com a lubrificação limite.

- **Lubrificação elastohidrodinâmica** - regime caracterizado por pressões localizadas elevadas que resultam em variações na viscosidade do lubrificante e deformações elásticas das superfícies.

- **Lubrificação hidrodinâmica** - condição na qual o filme de lubrificante é suficientemente espesso para evitar o contato direto entre as superfícies, eliminado o atrito sólido entre as superfícies, passando a atuar exclusivamente o atrito viscoso.

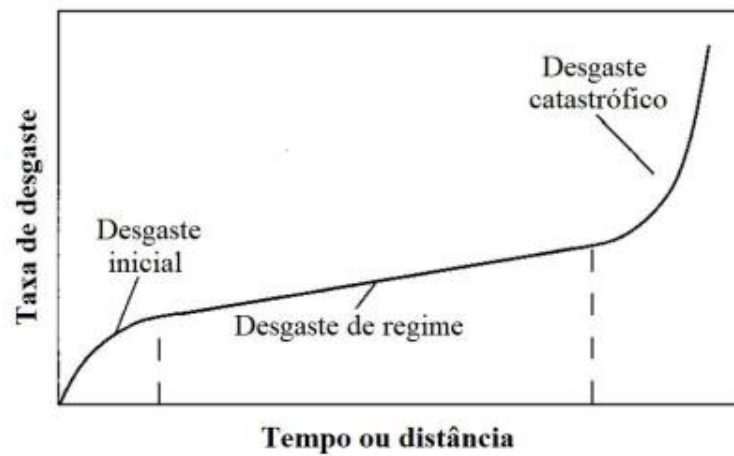
O levantamento experimental da curva de Stribeck utilizando tribômetros permite prever o comportamento do atrito entre elementos deslizantes lubrificadas, sujeitos a diferentes de condições de funcionamento e é utilizado na concepção de sistemas mecânicos e na seleção de lubrificantes.

## 2.2 - DESGASTE

O desgaste é um processo que ocorre quando duas superfícies em contato e movimento relativo sofrem perda progressiva de material. Esse fenômeno pode resultar em danos irreversíveis aos componentes mecânicos e, conseqüentemente, em falhas prematuras. A Figura 2.3 ilustra a taxa de desgaste em contatos deslizantes ao longo do tempo ou da distância, com seus estágios característicos.

No estágio inicial ocorre um desgaste acentuado devido ao processo de ajustagem das superfícies em contato e melhor distribuição da carga; após esta etapa, o desgaste entra em condição de regime, no qual a taxa de desgaste é relativamente estável, mas que acabam alterando as folgas ou as propriedades das superfícies em contato e que acabam levando a um estágio final de desgaste acentuado e catastrófico com graves danos superficiais.

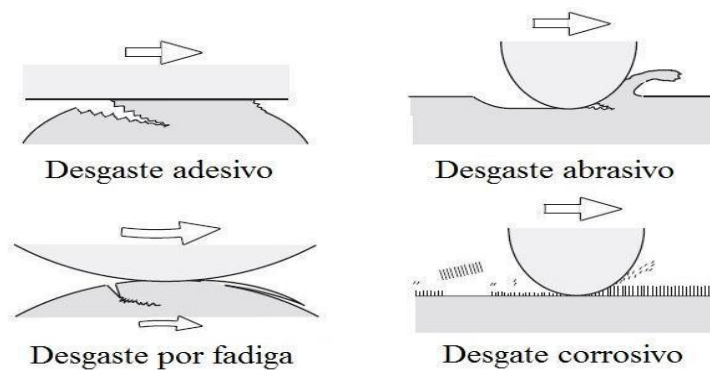
Figura 2.3 - Estágios típicos de desgaste em contatos deslizantes



Fonte: Axén, Hogmark e Jacobson (2000) (traduzido)

Os fenômenos básicos de desgaste podem ser diferenciados em adesivo, abrasivo, por fadiga superficial e corrosivo, ilustrados na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Representação dos fenômenos de desgaste



Fonte: Kato (2001) (traduzido)

- **Desgaste adesivo** - é causado pela forte adesão entre as superfícies, que impede o deslizamento; essa adesão cria uma fratura na área de contato, resultando na remoção de material ou transferência de material entre as superfícies.

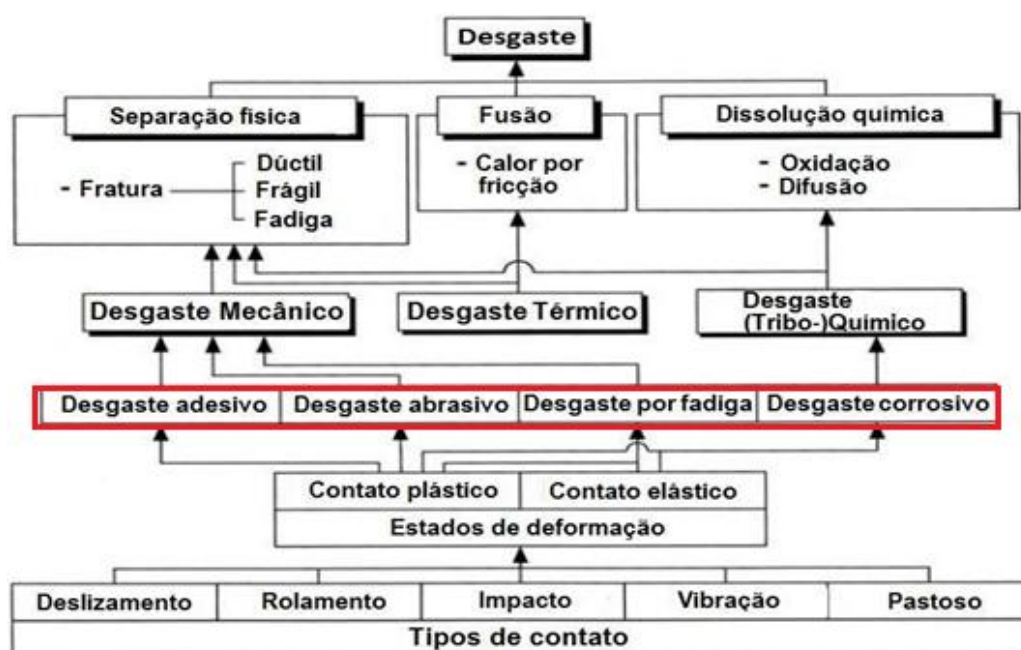
- **Desgaste abrasivo** - é caracterizado pela remoção de material da superfície; esse tipo de desgaste é influenciado pelo formato e pela dureza dos materiais em contato.

- **Desgaste por fadiga** – ocorre devido ao movimento repetitivo de rolamento e/ou deslizamento entre os elementos em contato, o que pode gerar trincas superficiais ou subsuperficiais, com conseqüente remoção de materiais.

- **Desgaste corrosivo** – ocorre quando os materiais estão em contato com meios corrosivos, líquidos ou gasosos, com conseqüentes interações químicas e eletroquímicas entre o material e o meio corrosivo resultando na formação de camadas superficiais de óxidos que são removidos pelo atrito.

Na prática, nas regiões de contato, as asperezas dos materiais dos componentes são submetidas a condições localizadas de elevadas tensões de contato e cisalhamento, temperatura e taxas de deformação, fazendo com que os diferentes tipos de desgaste ocorrem muitas vezes de forma interrelacionada e associados a outros fatores como os tipos de contato e forma de aplicação da carga, os estados de deformação dos materiais e os fatores térmicos, físicos e químicos associados, conforme ilustrado na Figura 2.5 (Kato e Adachi, 2001).

Figura 2.5 - Diagrama de desgaste



Fonte: Kato; Adachi (2001) (traduzido)

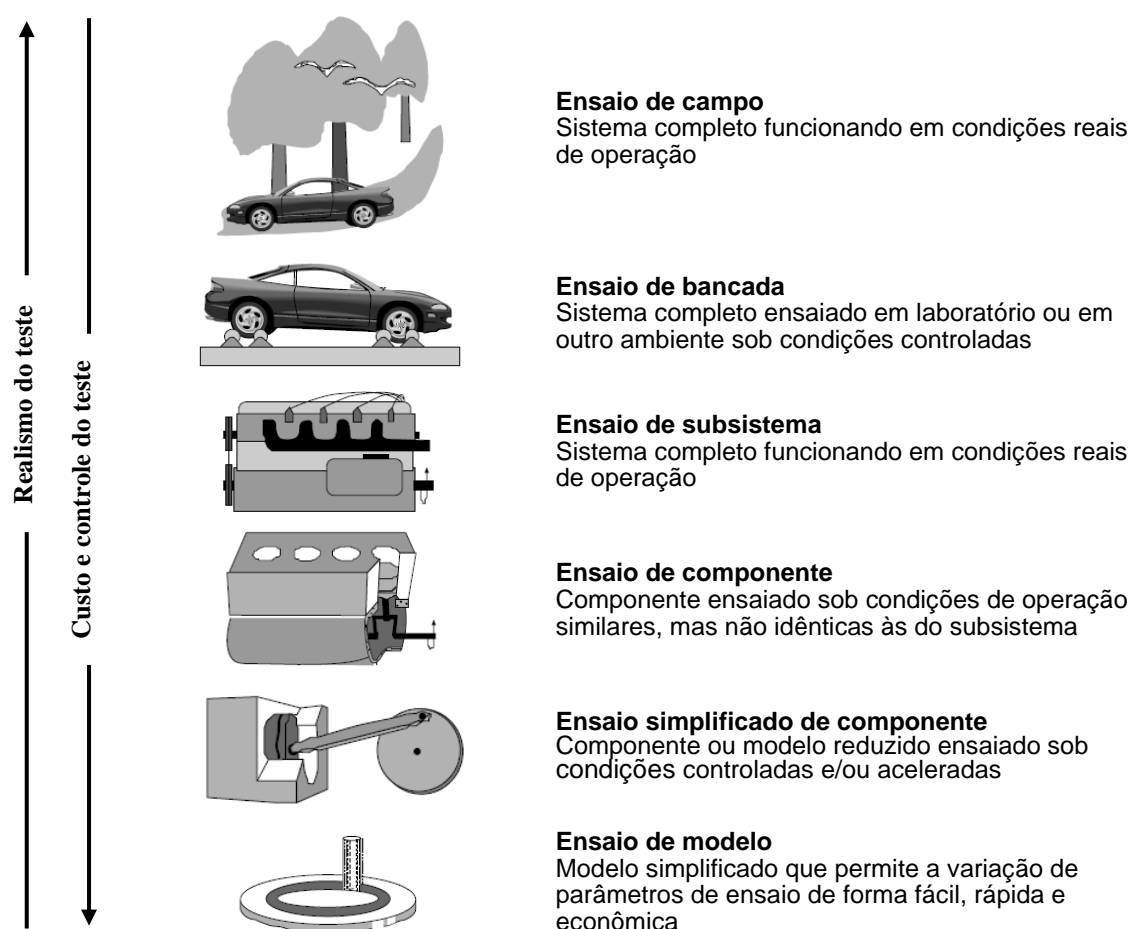
### 2.3 - ENSAIOS TRIBOLÓGICOS

O correto entendimento e a análise dos fenômenos relacionados ao atrito e desgaste requerem a realização de ensaios tribológicos diversificados que

possibilitem a verificação da influência dos parâmetros envolvidos, bem como a adoção de ações de controle do atrito e desgaste.

Entretanto, os ensaios tribológicos podem ser realizados de inúmeras maneiras, mas considerando o desejo frequente de avaliar novos materiais ou projetos para um ou dois componentes de máquinas novas ou já existentes, pode-se considerar a classificação ilustrada na Figura 2.6, pela qual os ensaios são diferenciados como base no realismo do teste (Axén *et al.*, 2000).

Figura 2.6 - Classificação dos ensaios tribológicos



Fonte: Axén *et al.* (2000) (traduzido)

Embora o ensaio de uma máquina completa em condições reais de operação apresente um realismo elevado, os custos elevados e o tempo necessário para se realizar os testes, muitas vezes inviabilizam a realização de um ensaio de campo ou até mesmo de ensaios de bancada ou de subsistemas.

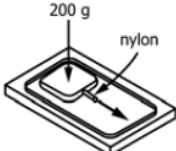
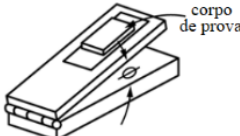
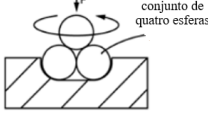
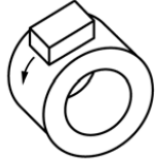
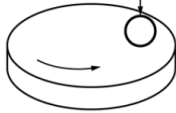
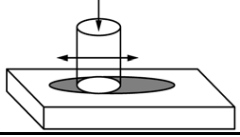
Ensaio de componentes são mais viáveis, mesmo assim apresentam um custo relativamente elevados quando comparado com os ensaios de modelo

realizados em tribômetros. Embora os ensaios de modelo apresentem realismo baixo, possibilitam realizar testes de materiais e lubrificantes sob condições controladas de cargas, velocidades, temperatura e condições ambientais de forma controlada, garantindo a reprodutibilidade e a confiabilidade dos ensaios e resultados.

O primeiro passo para se desenvolver um ensaio tribológico é definir qual o tipo de ensaio a ser realizado e as normas ASTM G190-06 (ASTM International, 2006) e G115-10 (ASTM International, 2010) fornecem informações gerais sobre os diferentes tipos de ensaios que auxiliam na seleção do método para se medir as propriedades de atrito e desgaste dos materiais.

Na Tabela 2.2 são apresentados alguns dos métodos de ensaios tribológicos indicados pela ASTM G115-10 com suas respectivas normas ASTM e configurações esquemáticas de ensaio.

Tabela 2. 2 - Testes de atrito e desgaste indicados pela norma ASTM G115-10

Norma ASTM	Configuração
D1894 - Método de teste para coeficientes de atrito estático e cinético de filmes e coberturas plásticas	
D4918 - Método de teste para coeficiente de atrito estático de papel de escrita e impressão não revestido pelo uso do método do plano inclinado	
D5183 - Método de teste para determinação do coeficiente de atrito de lubrificantes usando a máquina de teste de desgaste de quatro esferas	
G77 - Método de teste para classificação da resistência de materiais ao desgaste deslizante entre bloco e anel	
G99 - Método de teste de desgaste em um aparelho pino-disco	
G133 - Método de teste de desgaste deslizante linearmente recíproco de pino sobre placa plana	

Fonte: ASTM International (2010) (traduzido)

A medição do desgaste em tribômetros é realizada por meio da análise da perda de material das superfícies em contato durante os testes de atrito. Esse desgaste pode ser quantificado por meio da avaliação da perda de massa ou variação dimensional do corpo de prova, ou da variação da geometria e dimensão da superfície desgastada.

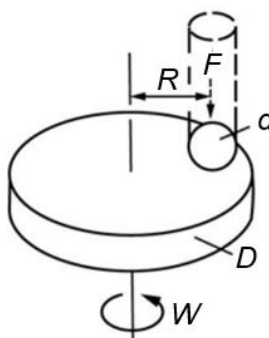
Cada tipo de ensaio tribológico requer a construção de uma bancada de testes dedicada ou a utilização de tribômetros disponíveis. No entanto, o investimento financeiro para se adquirir um tribômetro comercial pode variar significativamente dependendo do modelo, complexidade, acessórios e possibilidade controle de parâmetros de ensaio. Além do investimento inicial, devem ser considerados também os custos, calibração, operação e manutenção do equipamento.

Como alternativa, pesquisadores de diferentes instituições têm desenvolvido projetos de tribômetros, especialmente do tipo pino-disco, para o desenvolvimento de pesquisas relacionadas aos aspectos tribológicos de atrito, desgaste e lubrificação de diferentes materiais.

### 2.3.1 - ENSAIO ROTATIVO PINO-DISCO

De acordo com a norma ASTM G99-17 (ASTM International, 2017), o ensaio pino-disco é uma técnica padronizada para avaliar as propriedades tribológicas de atrito e desgaste entre superfícies em contato e movimento deslizante. A norma descreve o ensaio como sendo realizado utilizando um pino cilíndrico ou uma esfera de aço pressionada contra uma superfície plana em rotação, conforme ilustrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Diagrama esquemático do ensaio rotativo pino-disco



Fonte: ASTM International (2017)

sendo:

- $F$  - força normal no pino
- $d$  - diâmetro do pino ou da esfera
- $D$  - diâmetro do disco
- $R$  - raio da pista de desgaste
- $W$  - velocidade angular do disco

Na ASTM G99-17 é especificada uma sequência de procedimentos para a realização de testes:

- Seleção dos materiais do pino e do disco a serem testados;
- Determinação da força normal aplicada entre o pino e o disco;
- Definição da velocidade rotacional do disco;
- Determinação do número de ciclos de teste a serem realizados;
- Medição do desgaste do material do disco e do pino após o teste.

Em síntese, o objetivo da norma é fornecer um procedimento para avaliar o desempenho de diferentes materiais em relação à resistência ao desgaste, permitindo que os resultados sejam comparáveis entre diferentes estudos e aplicações industriais, fornecendo informações valiosas para a seleção e desenvolvimento de materiais para uma ampla gama de aplicações na indústria.

Na ASTM G99-17 é indicado que, mesmo que os valores de parâmetros adotados em experimentos forem diferentes dos especificados na norma, padrão estimulado para melhorar a metodologia de teste de desgaste, é necessário mencionar que o procedimento experimental adotado seguiu os procedimentos da ASTM G99-17.

Para realizar o ensaio de desgaste pino sobre disco, é necessário dispor de dois corpos de prova: um pino com ponta cilíndrica ou esférica, que é colocado perpendicularmente a outro corpo de prova, geralmente um disco circular plano. Em muitos casos, uma esfera fixa é utilizada como corpo de prova no lugar do pino. Durante o ensaio, a máquina de teste provoca a rotação do corpo de prova do disco ou do pino em torno do centro do disco. Em ambos os casos, o trajeto de deslizamento é um círculo que ocorre na superfície do disco. O plano do disco pode ser horizontal ou vertical, dependendo da necessidade do teste.

Os resultados do ensaio de desgaste são apresentados como a perda de volume, em milímetros cúbicos, tanto para o pino quanto para o disco individualmente.

Quando dois materiais distintos são submetidos ao teste, é recomendado que cada material seja testado nas posições do pino e do disco.

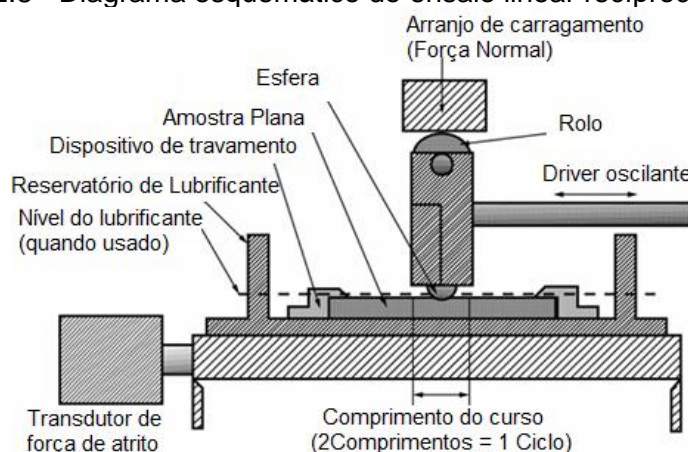
O desgaste é determinado medindo as dimensões apropriadas de ambas as amostras, ou pesando ambas, nos dois casos realizando o procedimento antes e depois do ensaio. No caso de medição das dimensões de medidas lineares, o desgaste é convertido em volume de desgaste (em milímetros cúbicos) usando relações geométricas apropriadas nas medidas avaliadas.

O desgaste dependerá dos parâmetros utilizados no sistema, como carga aplicada, características do tribômetro, velocidade de deslizamento, distância de deslizamento, ambiente e propriedades do material. O ensaio baseia-se em prever taxas de desgaste de diferentes combinações de materiais, entretanto não há garantias que os valores medidos serão os mesmos que ocorrerão na prática, tendo em vista que diferentes condições de interação entre os materiais podem ocorrer durante a operação do equipamento, decorrentes das condições de lubrificação, carga aplicada, presença de detritos de desgaste e até mesmo de um ambiente corrosivo.

### 2.3.1 - ENSAIO LINEAR RECÍPROCO PINO-PLACA

A norma ASTM G133-22 (ASTM International, 2022) estabelece um método de ensaio que utiliza duas amostras: uma plana e outra esférica, está última podendo ser uma esfera simples ou um pino com extremidade esférica. Essas amostras deslizam uma sobre a outra em um movimento linear recíproco, ou seja, em movimento de translação linear alternada, para frente e para trás, seguindo condições predeterminadas, conforme ilustrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Diagrama esquemático do ensaio linear recíproco pino-plano



Fonte: ASTM International (2022) (traduzido)

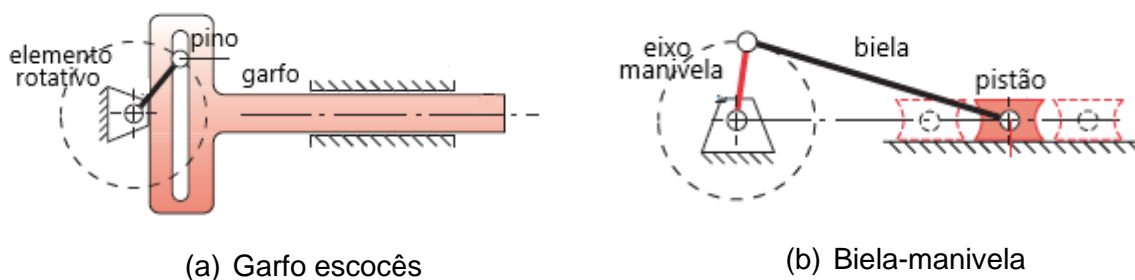
Durante o teste, uma carga é aplicada verticalmente à amostra esférica, que pressiona contra a amostra plana, montada horizontalmente. Variáveis como carga normal, comprimento do curso, frequência e tipo de oscilação, temperatura, lubrificante (se aplicável), duração do teste e condições ambientais são ajustadas.

Como o teste envolve deslizamento alternado, ocorrem variações na velocidade e na direção do movimento, o que impede a manutenção de uma velocidade constante. A variação da velocidade ao longo do tempo depende do tipo de mecanismo que movimenta a esfera ou a amostra plana.

As alterações dimensionais das amostras esféricas e planas são utilizadas para calcular volumes e taxas de desgaste. Também é possível medir as forças de atrito durante o ensaio, o que permite avaliar mudanças nas condições de contato ou no coeficiente de atrito cinético ao longo do tempo. Este método de ensaio foi elaborado para replicar a geometria e os movimentos encontrados em muitos componentes que operam com atrito e que apresentam reversões periódicas na direção do deslizamento. O desgaste gerado por esse tipo de movimento pode diferir daquele observado em materiais que deslizam continuamente em uma única direção (como no ensaio rotativo pino-disco), mesmo quando o tempo de contato é semelhante. Isso é especialmente relevante em testes com lubrificação líquida, onde a reversão do movimento reduz a velocidade de arrasto a zero.

O movimento de translação alternativa em tribômetros é obtido usualmente utilizando-se algum mecanismo acessório do tipo garfo escocês ou biela-manivela, representados na Figura 2.9, para transformar o movimento rotativo do eixo de acionamento em movimento linear recíproco.

Figura 2.9 - Mecanismos (a) garfo escocês e (b) biela manivela



Fonte: Norton (2020) (adaptado)

O garfo escocês (Figura 2.9a), é um mecanismo composto basicamente por um elemento rotativo com um pino excêntrico e outro elemento (garfo) com uma

ranhura reta, suportado por uma guia de translação. Com o movimento de rotação, o pino desliza ao longo da ranhura do garfo, impulsionando o garfo para frente e para trás, alternadamente.

O mecanismo biela-manivela (Figura 2.9b), é composto por três elementos principais: pistão, biela e manivela, e é amplamente utilizado em motores de combustão interna e compressores alternativos. O eixo manivela gira ao redor de um eixo fixo, enquanto a biela conecta a manivela ao pistão. Conforme a manivela realiza um movimento circular, a biela converte esse movimento em um deslocamento linear do pistão, que se move para frente e para trás.

### 3 - TRIBÔMETROS DO TIPO PINO-DISCO

Um tribômetro do tipo pino-disco que possibilita realizar os ensaios estabelecidos pela norma ASTM G99-17 consiste basicamente em um eixo rotativo com um disco fixado em sua extremidade, um dispositivo para fixar a amostra no disco e um conjunto para servir de alavanca para manter o pino forçado contra a amostra do disco giratório com carga controlada, conforme ilustrado na Figura 3.1. O aparelho pode conter um sistema de medição indireta da força de atrito, como um sensor de torque ou uma célula de carga, que permitem determinar o coeficiente de atrito.

Figura 3. 1 - Tribômetro Pino-Disco POD - 4.0



Fonte: Ducom Instruments (<https://www.ducom.com/>)

A norma ASTM G99-17 estabelece também alguns requisitos de projeto e operação do equipamento:

- **Acionamento do motor** - Na escolha do motor, é necessário selecionar um com velocidade variável, sendo capaz de manter uma velocidade constante ( $\pm 1\%$  da velocidade nominal do motor a plena carga). O motor precisa ser montado de maneira que vibração não interfira no teste, o que pode ser feito utilizando coxins e acoplamentos flexíveis, por exemplo. Velocidade típica de rotação está na faixa de 0,3 a 3 rad/s (60 a 600 rpm).

- **Contador de giros** - O equipamento deve contar com um contador de giros ou equivalente, a fim de registrar o número de rotações do disco, bem como um

sistema capaz de desligar o motor quando ele realizar o número de voltas pré-estabelecido.

- **Porta-amostra com pino e braço de alavanca** - Em um sistema típico, o porta-amostra é preso a um braço de alavanca que tem um pivô. A adição de pesos, como uma opção de carregamento, produz uma força de teste proporcional à massa dos pesos aplicados, sendo que o suporte do pino e o braço devem ser de construção robusta, reduzindo folgas na montagem e fixando corretamente o contrapeso do braço mecânico para estabilidade.

- **Sistemas de Medição de Desgaste** - Os instrumentos para obter medidas lineares de desgaste devem ter uma sensibilidade de 2,5  $\mu\text{m}$  ou melhor, já no caso de balanças usadas para medir a perda de massa do corpo de prova deve ter uma sensibilidade de 0,1 mg ou melhor, lembrando que em algumas situações de baixo desgaste, pode ser necessária uma maior sensibilidade.

- **Materiais** - O método de teste pode ser aplicado em uma grande variedade de materiais. Os corpos de prova descritos na norma ASTM G99-17 tratam da dimensão de esferas ou pinos com ponta esférica de 10 mm de diâmetro, entretanto caso o corpo de prova for diferente tem-se que o requisito é que os corpos de prova com as dimensões especificadas possam ser preparados e que eles suportem as tensões impostas durante o ensaio sem falha ou deflexão excessiva. Os materiais que estão sendo testados devem ser descritos por dimensões, acabamento superficial, tipo de material, forma, composição, microestrutura, tratamentos e dureza de indentação.

- **Amostras de teste** - A amostra é tipicamente cilíndrica ou esférica, o diâmetro de pinos cilíndricos ou esféricos variam entre 2 a 10 mm. Já os diâmetros de amostras de disco variam de 30 a 100 mm e sua espessura estão entre 2 e 10 mm.

- **Acabamento da superfície** - Uma rugosidade média da superfície retificada de 0,8  $\mu\text{m}$  (32  $\mu\text{in}$ ) ou menos é tipicamente recomendada.

Os ensaios também podem ser realizados utilizando diferentes condições de lubrificação. A norma ASTM G99-17 também descreve os procedimentos para coleta de dados e análise de resultados, incluindo a medição da força de atrito e do desgaste das superfícies envolvidas.

N Tabela 3.1, são sintetizados os principais parâmetros de ensaio estabelecidos pela norma ASTM G99-17.

Tabela 3.1 - Parâmetros de teste indicados na norma ASTM G99-17

Parâmetros de testes interlaboratoriais	
Força normal	10 N
Velocidade de deslizamento	0,1 m/s
Distância de deslizamento	1.000 m
Diâmetro do pino	10 mm
Ambiente	Ar
Umidade relativa	23%
Diâmetro da pista	25 - 35 mm

Fonte: ASTM International (2017)

Com base nas informações básicas apresentadas na norma ASTM G99-17, os fabricantes de máquinas de ensaio desenvolvem diferentes modelos de tribômetros pino-disco que possibilitam uma ampla variação de parâmetros de ensaio, como carga, velocidade de deslizamento, temperatura de ensaio, lubrificação.

### 3.1 - TRIBÔMETROS COMERCIAIS

Comercialmente, há no mercado algumas empresas que atuam na produção de tribômetros com diversos modelos e utilidades, entre as mais conhecidas estão as empresas Anton Paar, Nanovea, Bruker, Ducom e Thelkin. Estas empresas desenvolveram diferentes modelos de tribômetros dedicados tanto para a realização de ensaios padronizados, como também para aplicações específicas como ensaios de desgaste em escala nanométrica, condições de temperatura baixas ou elevadas e atmosfera controlada.

Neste trabalho serão apresentados alguns modelos de tribômetros que realizam ensaios convencionais do tipo pino-disco, mas que podem realizar outros tipos de ensaio, dependendo do tipo de acessório empregado para alteração do tipo de movimento relativo (rotativo contínuo, rotativo alternado e linear recíproco) entre as superfícies dos elementos testados.

Na Figura 3.2 são apresentados os módulos da Nanovea empregados nos ensaios pino-disco (rotativo ou alternado), linear recíproco e bloco-disco.

Figura 3.2 - Módulos de ensaio Nanovea



Pino-disco

Linear recíproco

Bloco-disco

Fonte: Nanovea (<https://nanovea.com/pt/>)

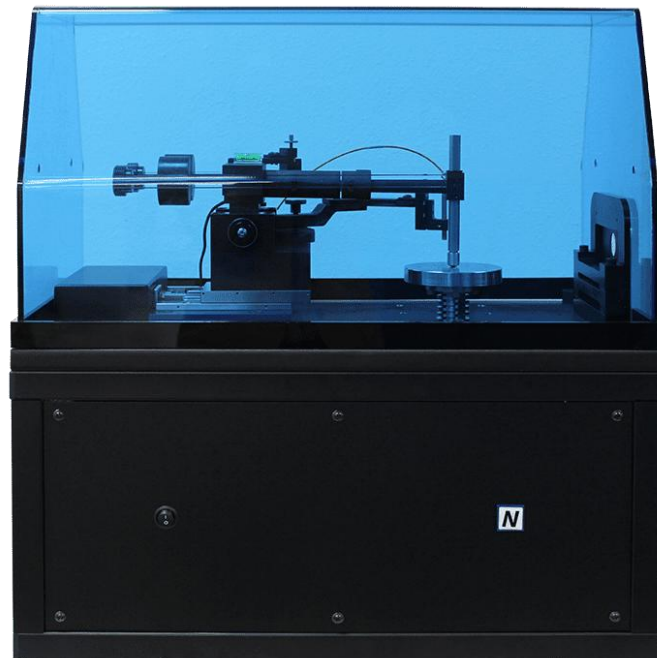
Nas Figuras 3.3, 3.4 e 3.5 são apresentados, respectivamente, os tribômetros do tipo pino-disco das empresas Anton Paar (modelo TRB<sup>3</sup>), Nanovea (modelo T50) e Bruker (modelo UMT TriboLab). Além disso, na Tabela 3.2 é apresentada uma síntese comparativa de algumas características gerais e parâmetros de ensaio que podem ser realizados nestes modelos de tribômetro.

Figura 3.3 - Tribômetro Anton Paar - modelo TRB<sup>3</sup>



Fonte: Anton Paar (<https://www.anton-paar.com/br-pt>)

Figura 3.4 - Tribômetro Nanovea - modelo T50



Fonte: Nanovea (<https://nanovea.com/pt/>)

Figura 3.5 - Tribômetro Bruker - modelo UMT TriboLab



Fonte: Bruker (<https://www.bruker.com/en/>)

Tabela 3.2 - Parâmetros de ensaio de tribômetros comerciais

Parâmetro	Tribômetro		
	Anton Paar TRB <sup>3</sup>	Nanovea T50	Bruker UMT TriboLab
Carga	máx. 60 N	máx. 60 N	1 mN até 2.000 N
Força de atrito	máx. 20 N	máx. 20 N	---
<b>Movimento Rotativo</b>			
Rotação	0,2 rpm a 2.000 rpm	0,01 a 10.000 rpm	até 5.000 rpm
Raio	até 40 mm	---	---
Torque	máx. 450 mN·m	máx. 4,4 N·m	5 N·m a 100 rpm 2,5 N·m a 5.000 rpm
<b>Movimento Linear Recíproco</b>			
Curso	máx. 60 mm	máx. 25 mm	---
Frequência	0,01 Hz a 10 Hz	máx. 60 Hz	---
<b>Movimento Rotativo Alternado</b>			
Amplitude	±5° a ±150°	---	---
Frequência	0,01 Hz a 7 Hz	---	---
<b>Controle de Temperatura</b>			
Temperatura	até 450 °C (seco) e até 150 °C (úmido)	---	-25 °C a 1.000 °C

Fontes: Anton Paar (<https://www.anton-paar.com/br-pt>), Nanovea (<https://nanovea.com/pt/>) e Bruker (<https://www.bruker.com/en/>)

Embora a configuração padrão desses tribômetros seja para a realização do ensaio pino-disco, eles são considerados universais por permitirem a realização de diferentes tipos de ensaio. Entretanto, por se tratar de produtos comerciais, as informações técnicas disponíveis destes tribômetros, limitam-se a características gerais e valores ou faixas de parâmetros controláveis nos testes, não sendo possível identificar detalhes de projeto, acionamento ou instrumentação.

Além dos recursos convencionais dos tribômetros apresentados, as empresas fabricantes desenvolveram dispositivos com recursos avançados como o que permite a aplicação de cargas por meio de um sistema pneumático controlado e a medição ótica 3D da superfície desgastada diretamente no equipamento.

### 3.2 - TRIBÔMETROS ACADÊMICOS

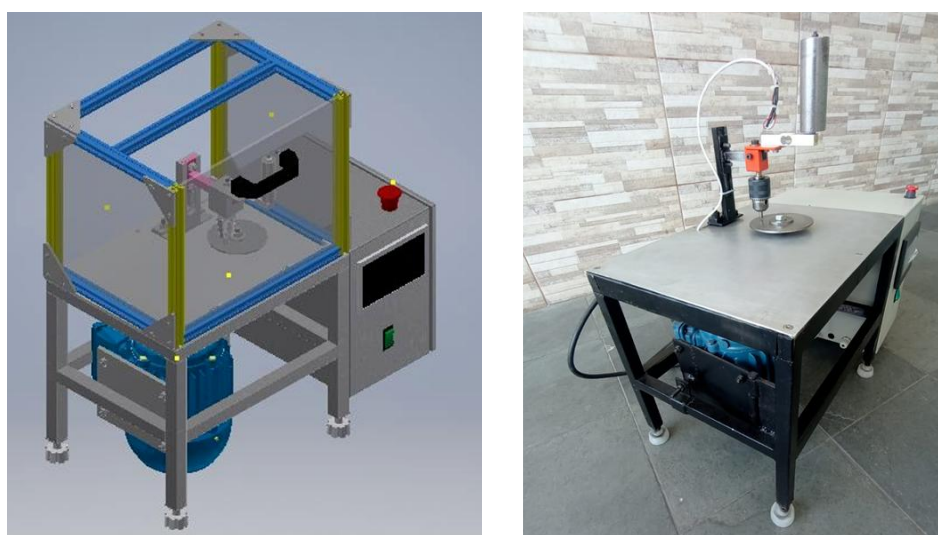
Conforme indicado anteriormente, os tribômetros comerciais são de custo elevado, tendo modelos iniciais preços como o Nanovea T50 que se iniciam a partir

de US\$ 50.000,00 e por este motivo, nem sempre são acessíveis no ambiente acadêmico para fins educacionais ou para a realização de pesquisas básicas, ficando restritos a empresas ou laboratórios especializados.

Sendo assim, estudantes e pesquisadores em diversas instituições acadêmicas têm desenvolvido projetos de tribômetros de diferentes tipos que, além de ser uma maneira mais econômica de se obter equipamentos para ensaios tribológicos, possibilitam a construção de equipamentos personalizados, com maior flexibilidade na concepção e configuração do tribômetro para atender as necessidades específicas do projeto ou do ensaio planejado.

Alguns exemplos de projetos acadêmicos são apresentados neste trabalho, como o tribômetro pino-disco de concepção relativamente simples (Figura 3.6) desenvolvido na Universidade São Judas Tadeu (USJT) como tema de Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação e que teve como objetivo principal uma construção de baixo custo, mas que possibilitasse a realização de ensaios de atrito e desgaste com cargas de até 50 N e rotação de 47 a 1660 rpm (Santana *et al.*, 2022). Os autores indicam que os ensaios realizados permitem estimar indiretamente o coeficiente de atrito, considerando as características do sistema elétrico de acionamento e as condições de ensaio.

Figura 3.6 - Tribômetro pino-disco (USJT/Santana *et al.*)

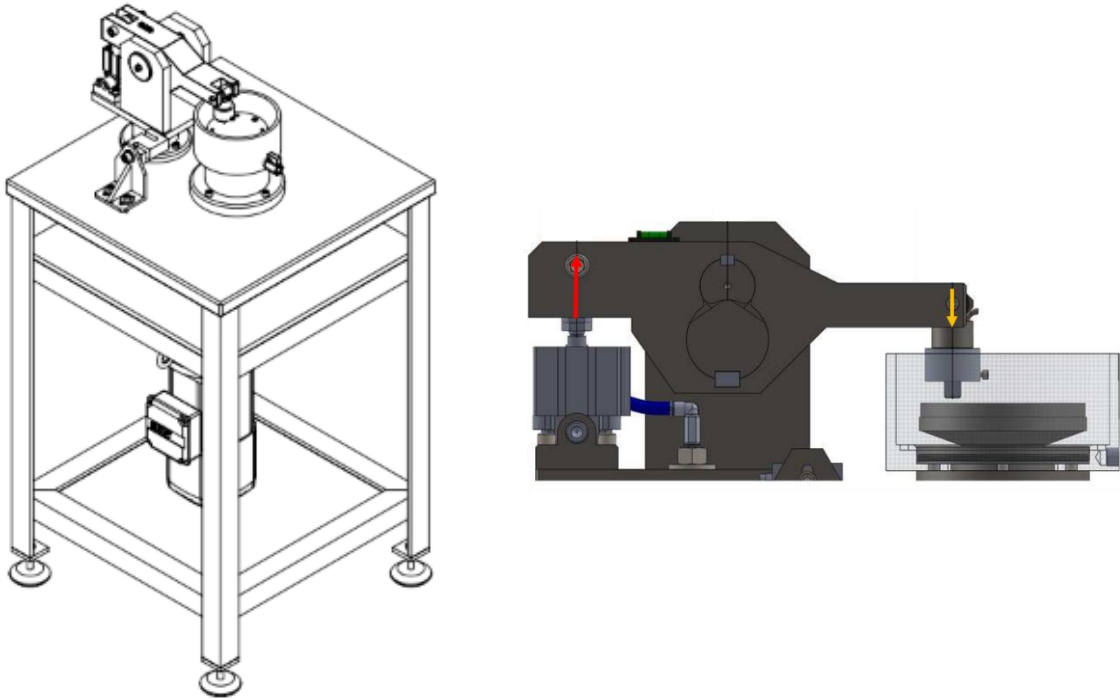


Fonte: Santana *et al.* (2022)

Um tribômetro pino-disco com um cilindro pneumático e um sistema de alavanca para a aplicação de carga, ilustrado na Figura 3.7, foi adotado por Iglesias

(2014) em seu Projeto de Graduação na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), possibilitando a aplicação de cargas de até 500 N.

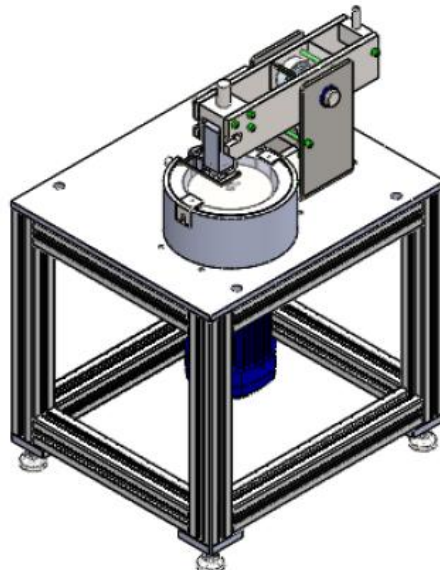
Figura 3.7 - Tribômetro pino-disco (UFRJ/Iglesias)



Fonte: Iglesias (2014)

Silva (2018), desenvolveu como tema de mestrado no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) o projeto mecânico do tribômetro pino-disco apresentado na Figura 3.8.

Figura 3.8 - Tribômetro pino-disco (ISEP/Silva)



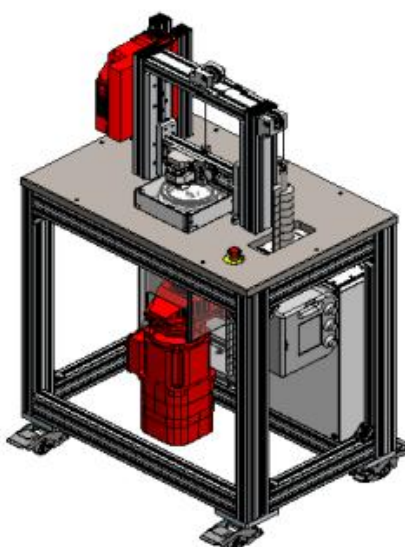
Fonte: Silva (2018)

O tribômetro de Silva (2018) visou a aplicação em ensaios didáticos de atrito e desgaste com um recipiente para o uso de lubrificantes e um sistema elétrico auxiliar de aquecimento. Como requisitos de projeto foram assumidos: carga máxima de 50 N, rotação de 500 rpm, velocidade tangencial máxima de 3 m/s e temperatura de até 100 °C. Os componentes mecânicos foram projetados e resistência mecânica verificada com o auxílio do Solidworks SimulationXpress.

O projeto do tribômetro pino-disco desenvolvido por Martins (2016), também como trabalho de mestrado no ISEP e ilustrado na Figura 3.9, apresenta em detalhes os elementos mecânicos e eletroeletrônicos adotados, e possui uma concepção diferente na forma de aplicação de carga, empregando um sistema de massas, polias cabos e guias lineares. O tribômetro foi projetado para suportar cargas de até 200 N, velocidades até 3 m/s e torques de até 45 N·m.

O projeto prevê um conjunto de sensores integrados que permitem medir o torque aplicado pelo motor, a carga aplicada sobre o disco e a rotação disco. O tribômetro permite ainda a realização de ensaios com lubrificantes e o aquecimento até 100 °C por meio de um sistema elétrico auxiliar. Os componentes mecânicos foram projetados e a resistência mecânica verificada com o auxílio do Solidworks SimulationXpress.

Figura 3.9 - Tribômetro pino-disco (ISEP/Martins)

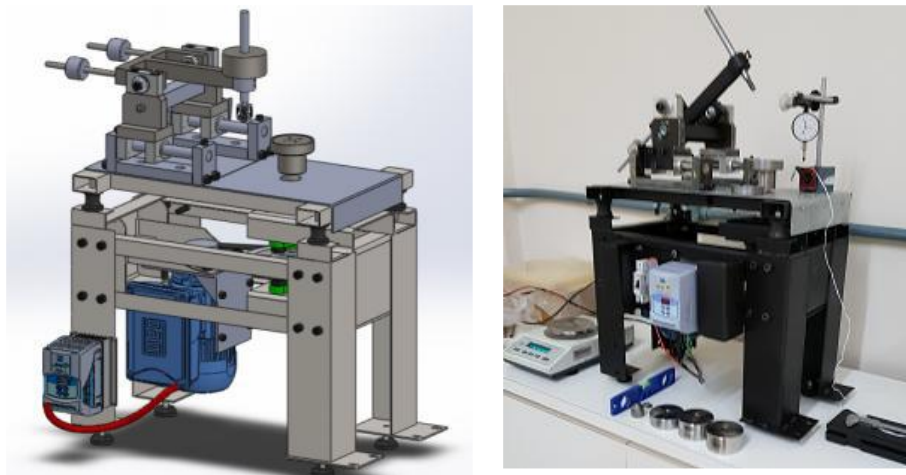


Fonte: Martins (2016)

Accadrolli e de Verney (2017) projetaram e construíram na Universidade Luterana do Brasil (Ulbra) o tribômetro pino-disco apresentado na Figura 3.10, seguindo os parâmetros de ensaio estabelecidos na norma ASTM G99-17. Além

disso, o tribômetro foi testado sob as condições determinadas pela norma de referência e os resultados comparados com os apresentados pela tabela comparativa da norma dos mesmos componentes realizados em laboratórios com equipamentos diferentes a fim de validar os testes. Segundo os autores, os resultados de desgastes observados nos materiais ensaiados evidenciaram a reprodutibilidade em relação à norma, confirmando o potencial do dispositivo em ser utilizado em outros testes.

Figura 3.10 - Tribômetro pino-disc (Ulbra/Accadrolli e de Verney)



Fonte: Accadrolli e de Verney (2017)

Com uma gama muito abrangente de projetos até o presente momento foram encontradas 2.180 patentes relacionadas a tribômetros através do buscador de patentes Espacenet (<https://worldwide.espacenet.com/>), já através do buscador do INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial) (<https://www.gov.br/inpi/pt-br>) foram encontrados somente 5 patentes registradas.

## 4 - DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Conforme estabelecido anteriormente, o objetivo principal do presente trabalho é o desenvolvimento do projeto de um tribômetro que possibilite a realização dos ensaios estabelecidos pelas normas ASTM G99-17 e ASTM G133-22. Para tanto, procedeu-se inicialmente com uma abordagem sistemática buscando entender e identificar os problemas e as necessidades da área de ensaios tribológicos, bem como conhecer as principais características de tribômetros comerciais e acadêmicos.

### 4.1 - PARÂMETROS DE PROJETO

Baseado nos parâmetros de ensaio indicados na norma ASTM G99-17, bem como a proposta de desenvolver um projeto de baixo custo, mas que permita variar as condições de carregamento, rotação e lubrificação das superfícies deslizantes, foram definidos os parâmetros básicos de projeto, apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4. 1 - Parâmetros básicos de projeto

Parâmetro	Símbolo/Relação	Valor	Observação
Força normal* (máx.)	$N$	100 N	ASTM G99-17: 10 N. Adotado 100 N para testes com maior carga
Velocidade de deslizamento* (máx.)	$v$	0,1 m/s	ASTM G99-17: 0,1 m/s
Distância de deslizamento*	$l$	1.000 m	ASTM G99-17: 1.000 m
Raio da trilha* (máx.)	$R$	0,03 m	ASTM G99-17: faixa de 25 a 35 mm
Velocidade angular** (máx.)	$\omega = v/R$	2,5 rad/s	
Rotação **	$n = 60\omega/2\pi$	31,8 rpm	
Diâmetro do pino***	$d$	10 mm	ASTM G99-17: 10 mm
Diâmetro do disco***	$D$	100 mm	Dimensão adotada no projeto
Espessura do disco***	$t$	10 mm	Dimensão adotada no projeto
Coeficiente de atrito* (máx.)	$\mu$	1,0	Dimensão adotado no projeto
Força de atrito** (máx.)	$F_a = \mu N$	100 N	
Torque de atrito** (máx.)	$T_a = F_a R$	3 N·m	
Potência do motor** (min.)	$P = T_a \omega = F_a v$	10 W	

\*parâmetro adotado; \*\*parâmetro calculado; \*\*\*parâmetro fixo

Fonte: Autoria própria

O coeficiente de atrito  $\mu$  foi adotado como sendo igual a 1,0, considerando o fato deste valor ser superior à maioria dos valores apresentados na Tabela 2.1, reproduzida de Norton (2013), entretanto a medição de coeficientes de atrito extremamente baixos, como 0,05, em tribômetros caseiros é desafiadora devido à baixa sensibilidade das células de carga de baixo custo, dificuldades no controle preciso da força normal e na estabilização do sistema contra vibrações. Além disso, a precisão na medição da velocidade de deslizamento e o controle da rugosidade e lubrificação das superfícies são cruciais para obter resultados confiáveis. Para minimizar erros, é essencial utilizar sensores de alta precisão, motores com controle de velocidade, suportes antivibração e calibração rigorosa do equipamento.

A etapa seguinte de desenvolvimento do projeto foi a elaboração de um projeto conceitual simplificado que estabelece a geometria básica do equipamento, o sistema de acionamento e a instrumentação para a medição da força de atrito e da rotação, tendo como referências os tribômetros apresentados anteriormente.

A partir deste projeto preliminar, os subsistemas que compõem o tribômetro projetado foram detalhados, englobando informações de materiais adotados, dimensões críticas das peças mais solicitadas, além da indicação de itens comerciais. Os cálculos necessários foram estruturados em uma planilha Excel, possibilitando a alteração de dados de entrada e a atualização automática dos parâmetros decorrentes.

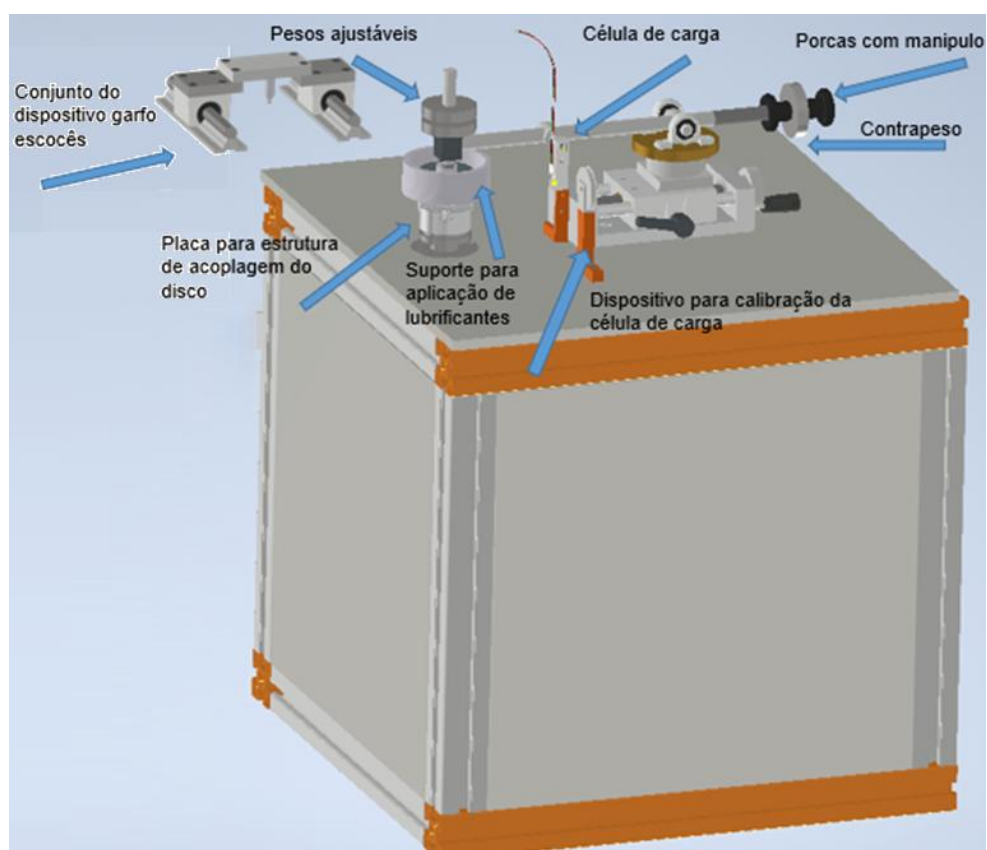
Ao final do trabalho busca-se contemplar os desenhos e as especificações técnicas de todos os componentes de modo a viabilizar a fabricação, aquisição, montagem e o correto funcionamento do tribômetro.

## **4.2 - TRIBÔMETRO PROJETADO**

O tribômetro foi projetado de modo a possibilitar a realização dos ensaios pino-disco rotativo e pino-placa com movimento linear recíproco, utilizando dois módulos intercambiáveis que são acoplados ao sistema de acionamento rotativo do equipamento, conforme ilustrado na visão geral 3D utilizando o software CAD 3D Autodesk Inventor, apresentada na Figura 4.1. O sistema montado no tribômetro permite a realização do ensaio pino-disco com o uso de lubrificantes e o dispositivo com o mecanismo garfo escocês possibilita transformar o movimento rotativo em linear recíproco.

Um tubo cilíndrico horizontal é utilizado para a fixação do suporte do pino em uma das extremidades e ajuste da carga aplicada por meio de massas e contrapesos ajustáveis. O tubo é apoiado em um ponto intermediário sobre uma base articulada que permite movimentos angulares no plano vertical e horizontal. Este conjunto é fixado em uma mesa linear que permite o ajuste da posição do pino sobre o disco ou placa. A força de atrito é medida de forma indireta, utilizando uma célula de carga posicionada lateralmente ao tubo e que deve ser calibrada previamente utilizando um dispositivo auxiliar.

Figura 4.1 – Visão geral do tribômetro projetado

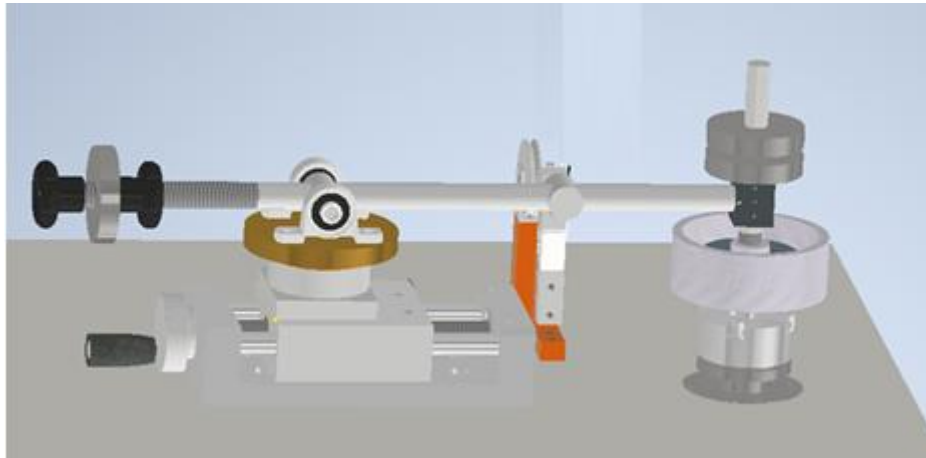


Fonte: Autoria própria

#### 4.2.1 - MÓDULO ROTATIVO

Na Figura 4.2 é detalhada a montagem do tribômetro com o módulo rotativo, cuja base é uma placa com três castanhas que possibilita fixar diretamente um disco ou amostra ou ainda um reservatório de lubrificante com a amostra.

Figura 4.2 - Tribômetro projetado – módulo rotativo

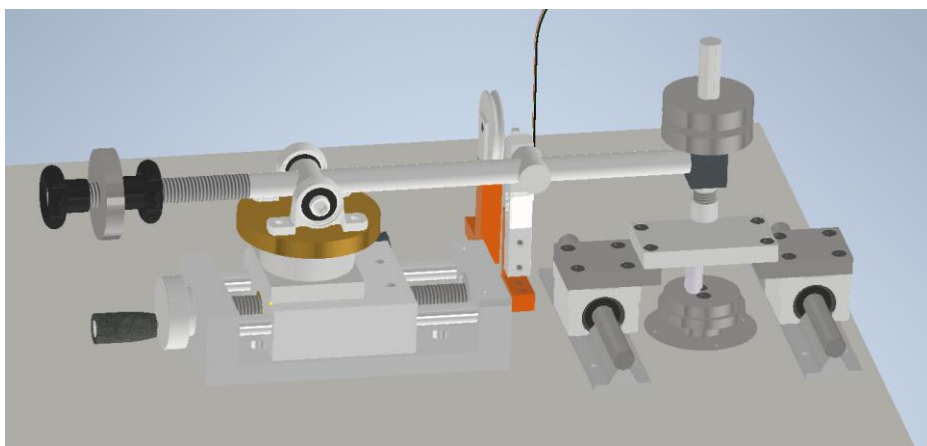


Fonte: Autoria própria

#### 4.2.1 - MÓDULO LINEAR RECÍPROCO

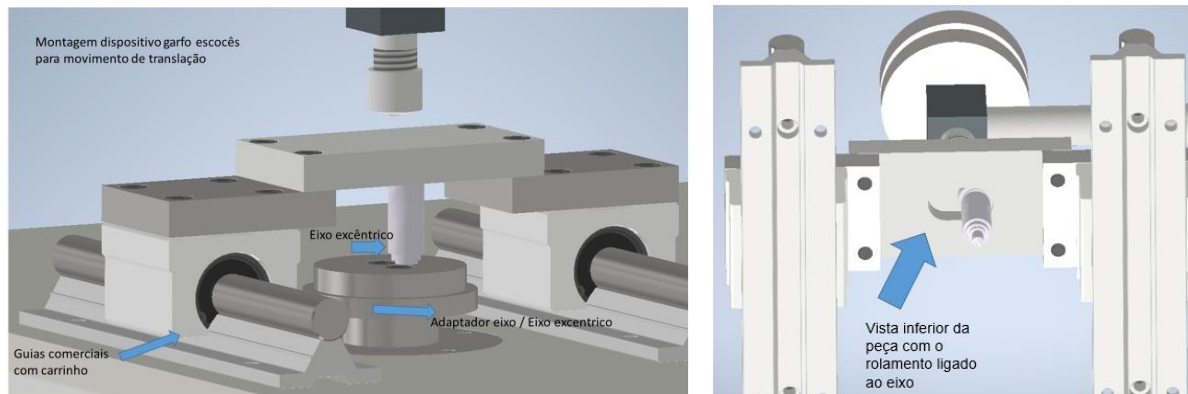
A montagem do módulo linear recíproco é ilustrada na Figura 4.3. Este módulo emprega um mecanismo do tipo garfo escocês, detalhado na Figura 4.4 e consiste em um eixo excêntrico com um rolamento em sua extremidade e que desliza em uma ranhura inferior de uma base apoiada em duas guias lineares, transformando o movimento rotativo do eixo em translação linear alternada da base, na qual é fixado o corpo de prova. O curso de translação foi estabelecido em 10 mm e corresponde ao dobro da excentricidade do eixo.

Figura 4.3 - Tribômetro projetado – módulo linear recíproco



Fonte: Autoria própria

Figura 4.4 - Módulo linear recíproco

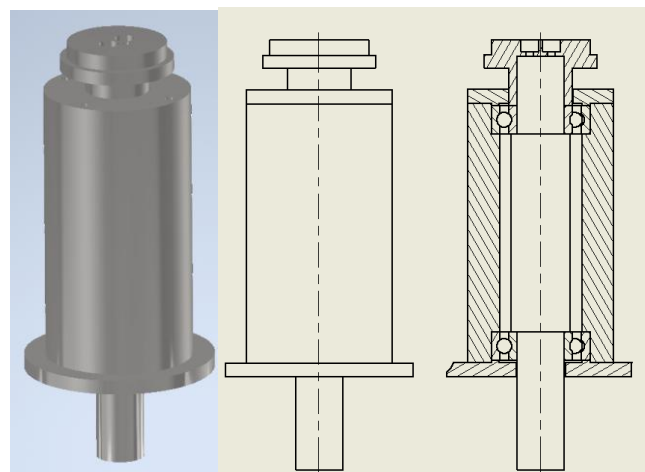


Fonte: Autoria própria

O dispositivo de garfo escocês representado na Figura 4.4, mecanismo composto por elemento rotativo com um pino excêntrico e outro elemento com uma ranhura reta, suportado por uma guia de translação, permite o deslocamento do pino ao longo da ranhura, com o movimento de rotação do eixo, impulsionado o dispositivo para frente e para trás, alternadamente. No projeto foi adotado um deslocamento total de 10 mm, resultante de uma excentricidade de 5 mm do pino.

O eixo do módulo de acionamento rotativo do tribômetro, ilustrado na Figura 4.5, foi projetado considerando a carga excêntrica máxima aplicada e os mancais de rolamentos foram selecionados com base nos esforços atuantes. Detalhes desses processos de dimensionamento e seleção são apresentados nos Apêndices A e B, respectivamente.

Figura 4.5 - Módulo de acionamento rotativo

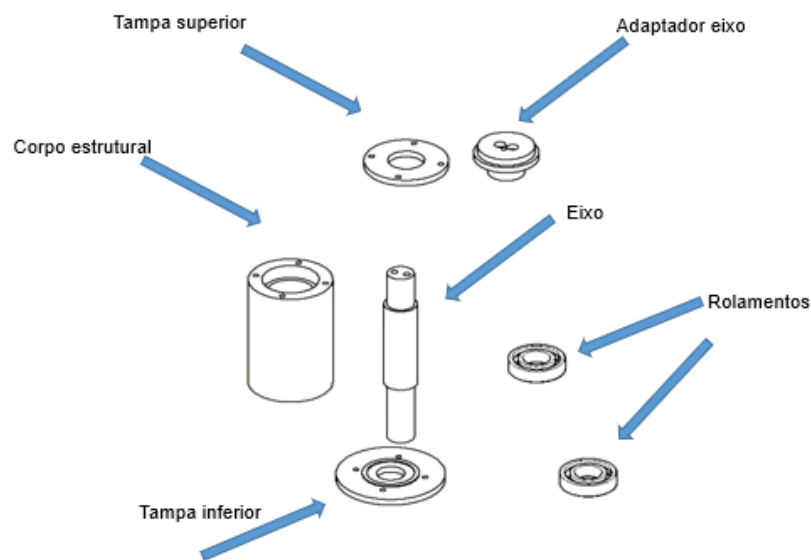


Fonte: Autoria própria

No projeto desenvolvido, recomenda-se utilização de um acoplamento flexível para a transmissão de movimento. Essa escolha oferece diversas vantagens, como a redução de vibrações no sistema, o que minimiza interferências nas medições de atrito, além de proporcionar um movimento mais suave e uniforme. Outra vantagem é a capacidade de absorver desalinhamentos entre os eixos, evitando esforços indesejados nos componentes.

Uma vista explodida dos componentes do módulo de acionamento rotativo é apresentada na Figura 4.6. Na extremidade superior, um adaptador permite a fixação tanto da placa de castanhas para a fixação do disco, quanto do eixo excêntrico do módulo de linear recíproco, componentes são fixados com parafusos em suas devidas furações.

Figura 4.6 - Componentes do módulo de acionamento rotativo



Fonte: Autoria própria

Conforme indicado na Tabela 4.1, devido ao carregamento relativamente baixo, a potência mínima do motor elétrico de acionamento do módulo rotativo é de aproximadamente 10 W (0,013 hp). No entanto a rotação deve ser cerca de 25 rpm, o que exige a adoção de um sistema de redução de velocidades.

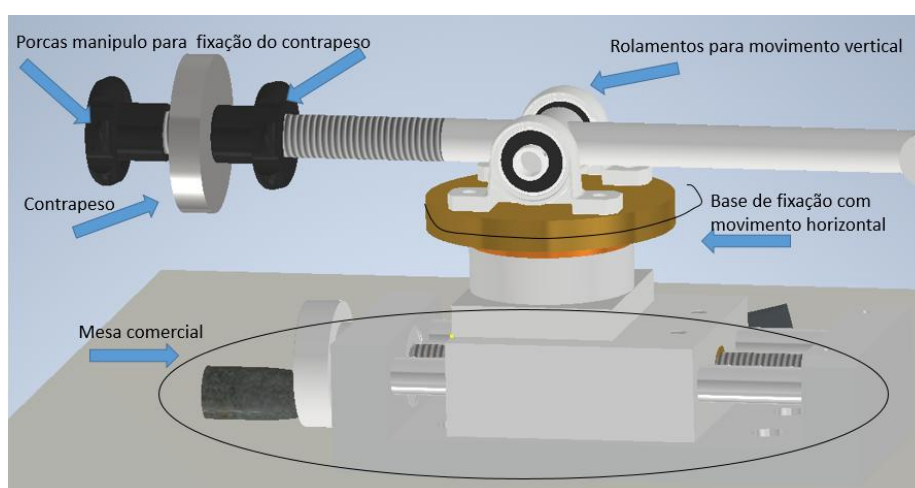
Conforme indicado anteriormente, as empresas fabricantes de tribômetros não disponibilizam informações técnicas sobre o sistema de acionamento. Entretanto, nos projetos acadêmicos de tribômetros foi possível identificar a adoção de moto-

redutores acoplados (Iglesias, 2014; Martins, 2017; Silva, 2018). Além disso, como os ensaios preveem uma distância de deslizamento ou número de ciclos a uma rotação constante, recomenda-se também o uso de *encoders* e inversores de frequência para se garantir as condições ideais de ensaio (Martins, 2017).

No presente trabalho, não foram especificados os elementos eletroeletrônicos de acionamento rotativo, entretanto a utilização dos dispositivos citados assegura a estabilidade e precisão sendo fundamentais para o funcionamento do mesmo de maneira correta, devendo ser compatíveis com o motor selecionado.

Na Figura 4.7 é apresentado um detalhe do conjunto de suporte do tubo cilíndrico. O tubo é montado sobre uma base rotativa, que por sua vez é fixada sobre uma mesa linear comercial e de acionamento manual. Esta mesa permite a regulagem da posição do pino sobre a superfície do disco ou da placa.

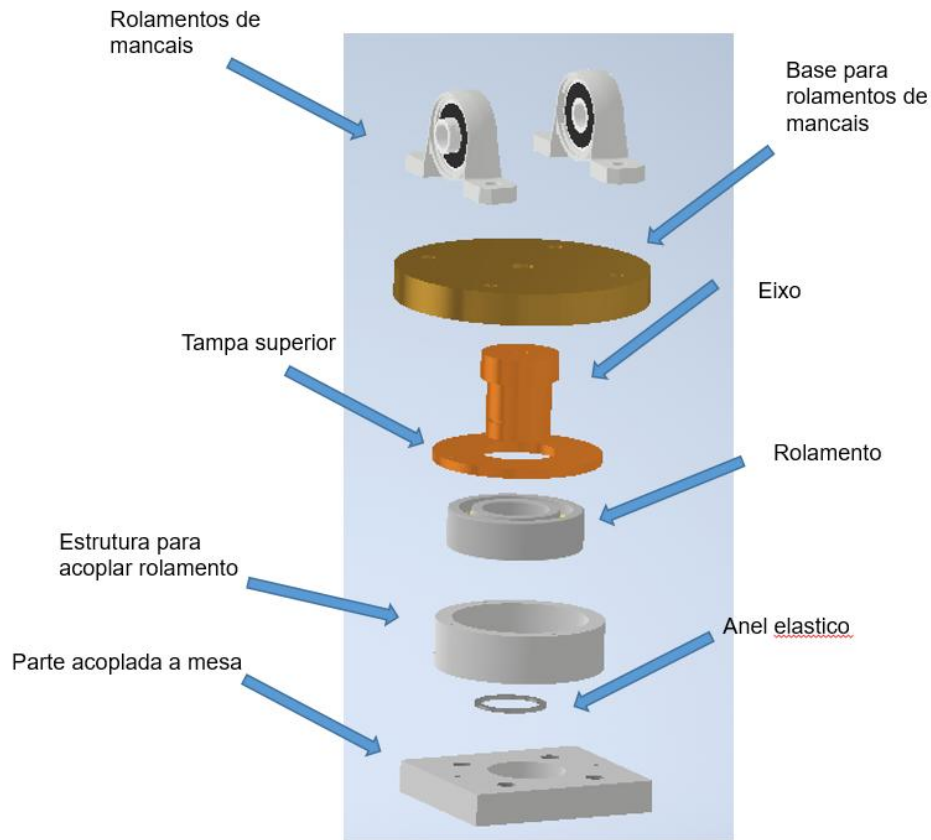
Figura 4.7 - Conjunto de suporte do tubo cilíndrico



Fonte: Autoria própria

A base possui um eixo rotativo vertical que pode ser visualizado na vista explodida da Figura 4.8, e que é apoiado em um mancal de rolamento que permite o movimento de rotação do tubo no plano horizontal. Na parte superior do suporte são fixados dois mancais de rolamento que suportam um eixo transversal soldado ao tubo, permitindo o movimento rotativo do tubo em torno de um eixo horizontal.

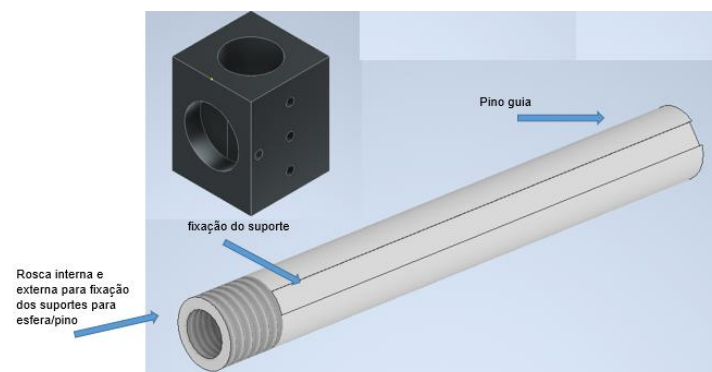
Figura 4.8 - Componentes do conjunto de suporte do tubo cilíndrico



Fonte: Autoria própria

No projeto, um conjunto de suporte acoplado à extremidade do elemento tubular do tribômetro permite a fixação de pinos cilíndricos ou de esferas e é constituído basicamente dos elementos apresentados na Figura 4.9. O elemento prismático possui um furo principal que permite a fixação na extremidade do elemento tubular do tribômetro e outro furo passante no qual um pino guia ranhurado pode ter sua posição ajustada.

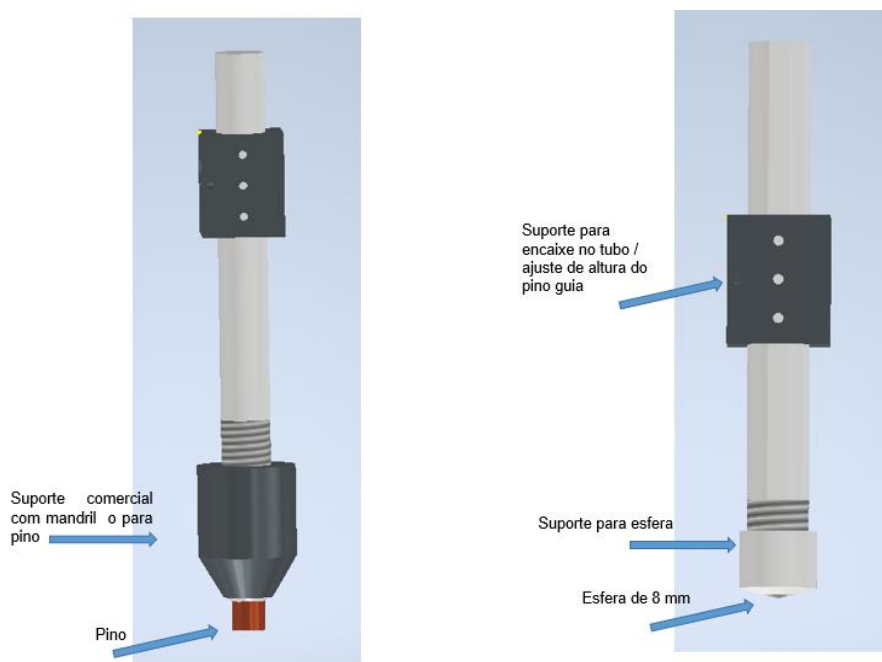
Figura 4.9 - Conjunto de suporte do elemento de teste



Fonte: Autoria própria

Uma das extremidades do pino guia possui uma rosca externa que permite a fixação de pinos cilíndricos, com o auxílio de um mandril comercial (Figura 4.10a), e uma rosca interna que permite a fixação de esferas, com o auxílio de um dispositivo projetado para esta finalidade (Figura 4.10b). As cargas de teste são aplicadas por meio de massas posicionadas no mesmo eixo vertical do pino guia e apoiadas na face superior do elemento prismático.

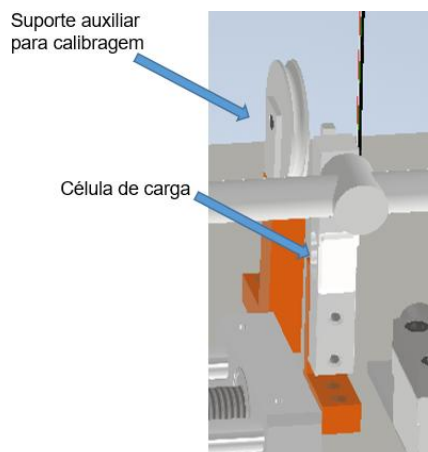
Figura 4.10 - Conjunto de suporte do pino ou esfera



Fonte: Autoria própria

Uma célula de carga em formato de viga é acoplada lateralmente ao elemento tubular do tribômetro, conforme ilustrado na Figura 4.11.

Figura 4.11 - Montagem da célula de carga

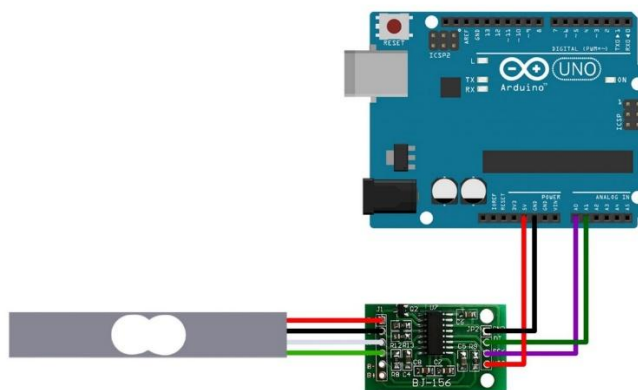


Fonte: Autoria própria

Este tipo de célula de carga só mede deformações em um sentido e necessita ser calibrada antes de seu uso. Sendo assim um conjunto composto por suporte, polia, gancho e cabo permite a aplicação de cargas laterais para a calibração do sensor.

Um modelo sugerido de célula de carga é a de bloco alumínio PE130.30 M6 IP66 para 10 kg, que alguns componentes para os processos de calibração e aplicação: módulo conversor-amplificador HX711 (amplificador de sinal para célula de carga), Arduino (Uno, Mega ou equivalente), software Arduino IDE, polia, cabo e conjunto de massas conhecidas. A Figura 4.12 ilustra o esquema de Ligação Entre Arduino, Módulo HX711 e Célula de carga.

Figura 4.2 - Esquema de Ligação Entre Arduino, Módulo HX711 e Célula de carga.



Fonte: [www.usinainfo.com.br](http://www.usinainfo.com.br)

A calibração da célula de carga permite a determinação do fator de conversão entre a força aplicada e o sinal de saída do sensor, relacionado à deformação da célula de carga. Para tanto, aplicando-se cargas conhecidas sucessivamente maiores e respeitando o limite especificado pelo fabricante, obtém-se uma curva de calibração. O sistema de polia e cabo serve para converter a força peso em força lateral na célula de carga.

No Apêndice C é apresentado uma estimativa de custos dos componentes comerciais adotados no projeto e dos materiais brutos necessários para a fabricação dos demais elementos. Custos de fabricação não foram incluídos no levantamento.

No Apêndice D são apresentados os desenhos técnicos do tribômetro projetado e dos elementos não comerciais que o compõem, especificando os materiais e as dimensões adotadas.

## 5 - CONCLUSÕES

Os ensaios tribológicos são de extrema importância para se entender os fenômenos relacionados ao atrito, desgaste e falha de componentes mecânicos. O conhecimento advindo desses ensaios possibilita a adoção de soluções de projeto com combinações mais eficientes de materiais e lubrificantes, reduzindo custos e aumentando a vida útil de máquinas e equipamentos.

Considerando os custos elevados de tribômetros comerciais, no presente trabalho buscou-se desenvolver o projeto de um tribômetro do tipo pino-disco rotativo de custo mais baixo, mas que permitisse realizar também o ensaio pino-placa com movimento linear recíproco, seguindo as orientações básicas estabelecidas nas normas ASTM G99-17 e ASTM G133-22. O projeto prevê também a possibilidade de variar as condições de carregamento, rotação e lubrificação entre as superfícies deslizantes em contato, permitindo inclusive o levantamento das características do regime de lubrificação ao qual os elementos são submetidos.

As soluções construtivas adotadas no projeto basearam-se em informações encontradas na literatura ou disponibilizadas por empresas fabricantes de tribômetros e combinaram componentes comerciais e outros elementos que precisam ser manufaturados. Os desenhos técnicos dos elementos não comerciais são apresentados ao final do trabalho, possibilitando a fabricação e montagem de um protótipo de tribômetro, mas que precisaria passar por uma série de testes para a verificação de seu correto funcionamento e a identificação de possíveis pontos de melhoria e ajustes no projeto.

A construção do tribômetro acadêmico proposto, viabilizaria o desenvolvimento de atividades de ensino e pesquisa em Instituições de Ensino Superior, contribuindo no aprimoramento da formação de estudantes de graduação e pós-graduação da área de engenharia, bem como no desenvolvimento de soluções tecnológicas que podem trazer benefícios econômicos para a indústria e para a sociedade em geral.

Como sugestão para trabalhos futuros, indica-se a necessidade de se especificar os elementos eletro-eletrônicos que compõem o sistema de acionamento rotativo, bem como a instrumentação e o sistema de controle necessários para se controlar adequadamente as condições de rotação e duração dos ensaios.

Os desenhos dos componentes do tribômetro projetado, apresentados no Apêndice D, estão disponíveis em sua íntegra em arquivos CAD para que seja possível que estudantes e pesquisadores possam se basear no projeto mecânico, e terem um ponto inicial para realização de ajustes e melhorias do projeto e eventualmente sua construção a fim de tornar mais democrático o acesso a novas tecnologias.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCADROLI, G.; VERNEY, J. C. K. **Desenvolvimento de um dispositivo para ensaios tribológicos do tipo pino-sobre-disco**. In: 6º Seminário de Inovação e Tecnologia do IFSul, Sapucaia do Sul, 7-9 nov. 2017. IFSul, 2017.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM G99: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM G133-22: Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2022.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM G190-06: Standard Guide for Developing and Selecting Wear Tests. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2006.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM G115-10: Standard Guide for Measuring and Reporting Friction Coefficients. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010.

ARSLAN, A.; MASJUK, I H. H.; KALAM, M. A.; VARMAN M.; MUFTI, R. A.; MOSAROF M. H.; KHUONG L. S.; QUAZI, M. M. Surface texture manufacturing techniques and tribological effect of surface texturing on cutting tool performance: a review. **Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences**, v. 41, n. 6, p. 447-481, 2016.

AXÉN, N.; HOGMARK, S.; JACOBSON, S. Friction and Wear Measurement Techniques. In: BHUSHAN, B. **Modern tribology handbook**. Boca Raton: CRC, 2000. p. 493-510.

BADO, Philippe; CLARK, William; SAID, Ali. Ultrafast laser micromachining handbook. 2007.

BRUZZONE, A. A. G.; COSTA, H. L., LONARDO, P. M.;LUCCA, D. A.,“Advances in Engineered Surfaces for Functional Performance,”CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 57, No. 2, pp. 750-769, 2008.

COUTO, P. R. C., **Análise de mancais radiais hidrodinâmicos com aplicação em compressores herméticos de refrigeração**. Tese, Universidade Federal de Santa Catarina. 2006.

CORDOVA, E.B **Método para fabricação de microcavidades em centro de usinagem com ferramenta adaptada**. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São Carlos, 2016.

DAŠIĆ, P.; FRANEK F.; ASSENOVA E.; RADOVANOVIĆ M International standardization and organizations in the field of tribology. **Industrial Lubrication and Tribology**, 2003.

DEKKERS, H. F. W.; DUERINCKX, F.; SZLUFCIK, J.; NIJS, J. Silicon Surface Texturing by Reactive Ion Etching, *Opto-Electronics Review*, Vol. 8, No. 4, pp. 311-316, 2000.

DONG, Changsheng *et al.* Fabrication of superhydrophobic Cu surfaces with tunable regular micro and random nano-scale structures by hybrid laser texture and chemical etching. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 211, n. 7, p. 1234-1240, 2011.

Etsion, I., "State of the Art in Laser Surface Texturing," **Journal of Tribology**, Vol. 127, No. 1, pp. 248-253, 2005

GRECO, A.; RAPHAELSON, S.; EHMANN, K.; WANG, Q. J.; LIN, C. **Surface texturing of tribological interfaces using the vibromechanical texturing method**. *Journal of manufacturing science and engineering*, v. 131, n. 6, 2009.

HOLMBERG, K; ERDEMIR, Ali. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. **Friction**, v. 5, n. 3, p. 263-284, 2017.

HSU, S. M.; YANG, J.; DIANN, H.; HUAN, Z. Friction reduction using discrete surface textures: principle and design. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 47, n. 33, p. 335307, 2014.

IBATAN, T.; UDDIN, M. S.; CHOWDHURY, M. A. K. Recent development on surface texturing in enhancing tribological performance of bearing sliders. **Surface and Coatings Technology**, v. 272, p. 102-120, 2015.

IGLESIAS, M. H. A. **Projeto mecânico de uma máquina pino-disco para obtenção do coeficiente de atrito entre diferentes materiais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023.

JACOBSON, B. The Stribeck memorial lecture. **Tribology International**, v. 36, n. 11, p. 781-789, 2003.

- JOST, H. P. Tribology - origin and future. **Wear**, v. 136, n. 1, p. 1-17, 1990.
- KATO, K.; ADACHI, K. Modern tribology handbook. **CRC Press LLC**, v. 2, 2001.
- KOVALCHENKO, A.; AJAYI, O.; ERDEMIR, A.; FENSKE, G.; ETSION, I. The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact. **Tribology International**, v. 38, n. 3, p. 219-225, 2005.
- MARTINS, J. P. P. **Projeto de um tribômetro do tipo pino-disco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, 2017.
- NAKAMURA, Y.; MUTO, J.; NAGAHAMA, H.; SHIMIZU, I.; MIURA, T.; ARAKAWA, I. Amorphization of quartz by friction: Implication to silica-gel lubrication of fault surfaces. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 21, 2012.
- NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**. bookman editora, 2013.
- Radi, P.A.; Santos, L. V.; Bonetti, L. F.; Trava-Airoldi V. J. Tribologia, conceitos e aplicações. **ANAIS DO 13º ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA (XIII ENCITA)**. XIII., São José dos Campos. Anais [...]. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2007.
- ROBINSON, J.; W.; ZHOU, Y.; BHATTACHARYA, P.; ERCK, R.; QU, J.; BAYS, J. T.; COSIMBESCU, L. Probing the molecular design of hyper-branched aryl polyesters towards lubricant applications. **Scientific reports**, v. 6, n. 1, p. 1-10, 2016.
- SANTANA, A. W.; GIBIN L.; SILVA L. M.; CARDOSO, R. M.; TEIXEIRA, V. I.; **Desenvolvimento de um tribômetro com configuração mecânica "pin-on-disc" acessível, para implementação em laboratórios de universidades e centros educacionais**. 2022.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R..G. **Projeto de engenharia mecânica**, 7. ed., Porto Alegre: Bookman, 2005.
- DA SILVA, A. M. M.. **Projeto de um tribômetro pino disco**. 2018. Dissertação de Mestrado. Instituto Politecnico do Porto (Portugal).
- VIEIRA, A.; SAMA, R. E.; JÚNIOR, N. D. V.; ROSSI, W. **Redução do atrito por meio da texturização a laser com pulsos ultracurtos do aço DIN 16MnCr5**. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 10., 2018, Salvador – Bahia

WANG, S.; HU, Y.; WANG W.; WANG, H. Effects of surface roughness on sliding friction in lubricated-point contacts: experimental and numerical studies. **Journal of Tribology**, v. 129, n. 4 p. 809-817, 2007.

XU, S.; AN, S. O. J.; ATSUSHI, D.; CASTAGNE, S. Development of low-cost deformation-based micro surface texturing system for friction reduction. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 17, n. 8, p. 1059-1065, 2016.

YU, H.; DENG, H.; HUANG, W.; WANG, X. The effect of dimple shapes on friction of parallel surfaces. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology**, v. 225, n. 8, p. 693-703, 2011.

ZAKI, M. I. B.; SAPTAJI, K.; RAMDAN, R. D.; KURNIAWAN, T.;. Fabrication of Micro Dimples Pattern Using Ball End Mill. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP

## APÊNDICE A – Dimensionamento do Eixo do Disco

Tabela A.1 – Variáveis de projeto

Variáveis utilizadas	
Força máxima	100 N
Distância do pino ao centro do eixo	30 mm
Distância da superfície até o rolamento A	64,75 mm
Distância entre Rolamentos	78,13 mm
Peso da Estrutura (Disco, eixo, parafusos e pinos)	30 N

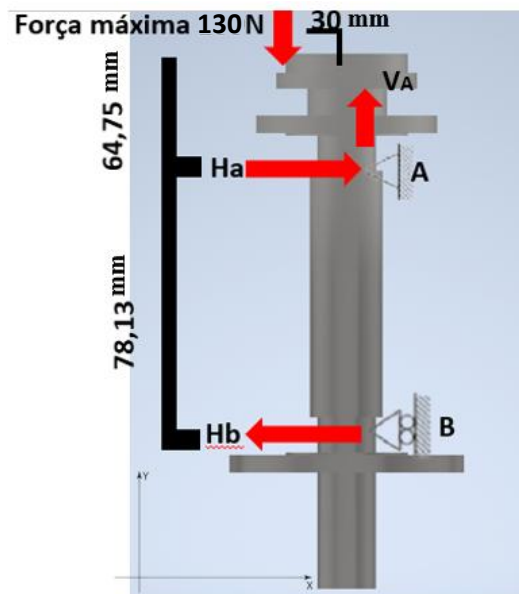
Fonte: Autoria própria

Como a força normal máxima é dada 100 N (força aplicada pelo peso sobre o pino), utilizando o coeficiente de 1, o qual é superior a abrangência de materiais considerando os materiais que serão combinados, obtém-se a força de atrito máxima

### Cálculo do diâmetro mínimo da seção do eixo do disco

É importante mencionar que a força normal foi incrementada em 30 N para levar em consideração o peso da estrutura, além do próprio disco, eixo, parafusos e pinos utilizados na montagem, a representação das forças é representada na figura 4.1. e figura 4.2.

Figura A.1 - Representação esquemática do eixo com força normal



Fonte: Autoria própria

$$\sum MA = 0$$

$$130N \times 30mm - H_b \times 78,13 = 0$$

$$H_b = 49,917N$$

$$\sum \text{Forças em } X = 0$$

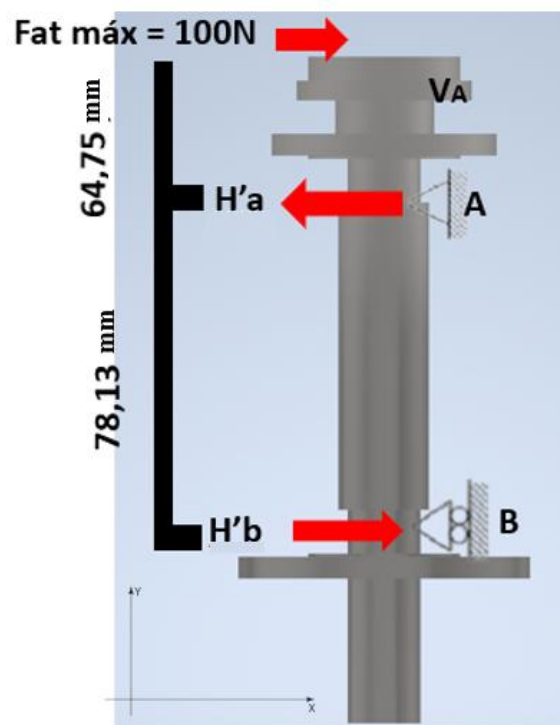
$$H_a - H_b = 0$$

$$H_a = H_b = 49,971N$$

$$\sum \text{Forças em } Y = 0$$

$$V_a = 130N$$

Figura A.2 - Representação esquemática do eixo com força de atrito



Fonte: Autoria própria

$$\sum MA = 0$$

$$100N \times 64,75mm = H'b \times 78,13mm$$

$$H'b = 82,875N$$

$$\sum \text{Forças em } Z = 0$$

$$H'a = H'b + 100$$

$$H'a = 183N$$

Resultantes

$$Fa = \sqrt{(Ha^2 + H'a^2)} = 189,564 N$$

$$Fb = \sqrt{(Hb^2 + H'b^2)} = 96,745 N$$

Momento fletor absoluto de:

$$Ma = 10,312Nm$$

### **Cálculo do diâmetro mínimo da seção do eixo do disco:**

Análise estática:

Todas as análises foram feitas com as entradas abaixo:

- Fat = 100 N;
- 64,5 mm distância até o primeiro rolamento, seção mais crítica
- Momento 10,312 Nm
- Torque= 3 Nm
- Coeficiente de Segurança (CS) mínimo = 1,5
- Material do Eixo: Liga inoxidável 304

Seleção de equações para dimensionamentos com auxílio da literatura Elementos de Máquinas, Shigley (2005) e Projeto de Máquinas uma abordagem integrada, Norton (2013).

Material selecionado devido a disponibilidade no mercado nacional e a sua resistência à oxidação, o que garante maior durabilidade e resistência à corrosão, tornando ideal para aplicações em que a integridade do material precisa ser mantida ao longo do tempo, sem perda de qualidade ou funcionalidade e além de atender às propriedades mecânicas necessárias para o projeto.

E (Módulo de Elasticidade) 193 GPa

Sy (Tensão de Escoamento) = 240 Mpa

Sut (Tensão Última) = 530 Mpa

### **Máximas Tensões Cisalhantes**

$$d_{\min 2} = \left[ \frac{32 \times CS}{\pi \times sy} \times (M^2 + T_0^2)^{0,5} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$CS = 1,5$$

$$S_y = 240 \text{ MPa}$$

$$M = 10,312 \text{ Nm}$$

$$T_o = 3 \text{ Nm}$$

$$\mathbf{D_{min2} = 8,809mm}$$

### Máxima Energia de Distorção

$$d_{\min 3} = \left\{ \frac{32 \times CS}{\pi \times S_y} \times \left[ M^2 + \left( \frac{3}{4} \times T_o \right)^2 \right]^{0,5} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$CS = 1,5$$

$$S_y = 240 \text{ MPa}$$

$$M = 10,312 \text{ Nm}$$

$$T_o = 3 \text{ Nm}$$

$$\mathbf{D_{min3} = 8,698mm}$$

Adotado eixo de 25 mm devido a facilidade em disponibilidade comercial.

## APÊNDICE B – Seleção dos Rolamentos do Eixo do Disco

Os dois rolamentos no eixo são idênticos, porém o rolamento superior é mais exigido porque suporta todo o esforço gerado pelo pino no disco. Como a força resultante aplicada no rolamento superior é maior, a correta dimensão do primeiro rolamento garante o dimensionamento adequado para o segundo.

O dado de entrada para esse cálculo foi o diâmetro interno do rolamento, 20mm. Os esforços no rolamento, força axial ( $F_a$ ) de 130N e força radial ( $F_r$ ) de 189,564N. E para que esse rolamento dure pelo menos 10 anos, funcionando 10 horas por dia, 300 dias por ano a vida desejada  $V_d$  é:

$$V_d = 600 \text{ RPM} \times 60 \text{ min} \times \frac{10h}{\text{dia}} \times 300 \frac{\text{dias}}{\text{ano}} \times 10 \text{ anos}$$

$$V_d = 10080 \times 10^6 \text{ revoluções}$$

Fórmula da vida nominal ajustada:

$$L_{na} = a_1 \times a_2 \times a_3 \times \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

$L_{na}$  = vida nominal ajustada em milhões de revoluções (o sub-índice n representa a diferença entre 100% e a confiabilidade requerida)

$a_1$  = fator de ajuste de vida, para confiabilidade

$a_2$  = fator de ajuste de vida, para material

$a_3$  = fator de ajuste de vida, para condições de funcionamento

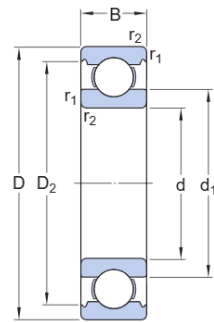
Rolamento escolhido, SKF designação 6004

Figura B.1 - Dados do rolamento

Designação	Dimensões principais			Classificações de carga básica		Classificações de velocidade	
				dinâmica	estática	Velocidade de referência	Velocidade-limite
	$d$ [mm]	$D$ [mm]	$B$ [mm]	$C$ [kN]	$C_0$ [kN]	[r/min]	[r/min]
■ 16004	20	42	8	7.28	4.05	38 000	24 000
■ 6004	20	42	12	9.95	5	38 000	24 000

Fonte: Site SKF ([www.skf.com](http://www.skf.com))

Figura B.2 – Dimensões do rolamento



## Dimensões

d	20 mm	Diâmetro do furo
D	42 mm	Diâmetro externo
B	12 mm	Largura
d <sub>1</sub>	≈ 27.2 mm	Diâmetro do ressalto
D <sub>2</sub>	≈ 37.19 mm	Diâmetro do rebaixo
r <sub>1,2</sub>	min. 0.6 mm	Dimensão de chanfro

Fonte: Site SKF (www.skf.com)

Pelo catálogo da SKF, tem-se:

$p = 3$  (rolamento de esferas)

$a_1 = 0,62$  (para confiabilidade de 95%);  $a_2 = 1$  e  $a_3 = 2$

$$\frac{F_a}{F_r} = 0,69$$

$$\text{Se } e \geq \frac{F_a}{F_r} \rightarrow P = F_r; e < \frac{F_a}{F_r} \rightarrow P = xF_r + yF_a$$

Figura B.3 - Fatores de cálculo para rolamentos rígidos de esfera

Tabela 8

Fatores de cálculo para rolamentos rígidos de esferas

$f_0 F_a / C_0$	Rolamentos de uma e de duas carreiras Folga normal			Rolamentos de uma carreira Folga C3			Folga C4		
	e	X	Y	e	X	Y	e	X	Y
<b>0,172</b>	0,19	0,56	2,3	0,29	0,46	1,88	0,38	0,44	1,47
<b>0,345</b>	0,22	0,56	1,99	0,32	0,46	1,71	0,4	0,44	1,4
<b>0,689</b>	0,26	0,56	1,71	0,36	0,46	1,52	0,43	0,44	1,3
<b>1,03</b>	0,28	0,56	1,55	0,38	0,46	1,41	0,46	0,44	1,23
<b>1,38</b>	0,3	0,56	1,45	0,4	0,46	1,34	0,47	0,44	1,19
<b>2,07</b>	0,34	0,56	1,31	0,44	0,46	1,23	0,5	0,44	1,12
<b>3,45</b>	0,38	0,56	1,15	0,49	0,46	1,1	0,55	0,44	1,02
<b>5,17</b>	0,42	0,56	1,04	0,54	0,46	1,01	0,56	0,44	1
<b>6,89</b>	0,44	0,56	1	0,54	0,46	1	0,56	0,44	1

Os fatores de cálculo devem ser selecionados de acordo com a folga operacional no rolamento, que pode ser diferente da folga interna antes da montagem. Para obter mais informações ou para fatores de cálculo para outras classes de folga, entre em contato com o serviço de engenharia de aplicação SKF.  
Os valores intermediários podem ser obtidos através da interpolação linear.

Fonte: Catálogo SKF

Valores de e, X e Y retirados do catálogo SKF através de interpolação dos valores fornecidos:

$$e = 0,22$$

$$X = 0,56$$

$$Y = 1,97$$

$$P = 0,56 \times 189,56 + 1,97 \times 130$$

$$P = 362,256 \text{ N}$$

$$L_{na} = a_1 \times a_2 \times a_3 \times \left(\frac{c}{p}\right)^p$$

L5= 25694,666 milhões de revoluções

Vida desejada menor que a vida nominal, atendendo aos requisitos.

## APÊNDICE C – Estimativa de Custo do Tribômetro

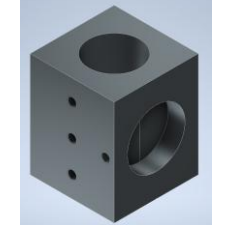

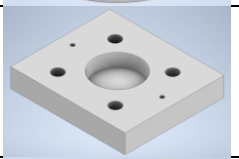
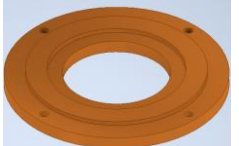
A estimativa de custos contempla os componentes comerciais adotados no projeto e dos materiais brutos necessários para a fabricação dos demais elementos. Custos de fabricação não foram incluídos no levantamento.

Tabela C 1 – Componentes com estimativa de custo

Componente	Qtd.	Valor unitário	Valor total	Site consultado	Imagem
Mesa deslizante 80x170x41,5 mm	1	R\$ 498,00	R\$ 498,00	<a href="https://pt.aliexpress.com/">https://pt.aliexpress.com/</a> 16/11/2024	
Mini placa de torno com 3 castanhas 48 mm	1	R\$ 295,00	R\$ 295,00	<a href="http://www.mercadolivre.com.br">www.mercadolivre.com.br</a> 28/10/2024	
Gancho	1	R\$ 20,60	R\$ 20,60	<a href="https://pt.aliexpress.com/">https://pt.aliexpress.com/</a> 28/10/2024	
Roldana plástica 4cm	1	R\$ 5,58	R\$ 5,58	<a href="http://www.angueraferramentas.com.br">www.angueraferramentas.com.br</a> 28/10/2024	
Guia comercial com carrinho	2	R\$ 123,29	R\$ 246,58	<a href="https://pt.aliexpress.com/">https://pt.aliexpress.com/</a> 28/10/2024	
Célula de carga bloco Pe130.30	1	R\$ 60,90	R\$ 60,90	<a href="http://www.mercadolivre.com.br">www.mercadolivre.com.br</a> 28/10/2024	
Rolamento KP08 diâmetro interno 8mm	2	R\$ 13,75	R\$ 27,50	<a href="http://www.impactocnc.com">www.impactocnc.com</a> 30/06/2024	
Anilha 0,5 kg	3	R\$ 10,79	R\$ 32,37	<a href="http://www.anilhasecia.com.br">www.anilhasecia.com.br</a> 28/10/2024	
Tubo inox 1/4"	1	R\$ 111,76	R\$ 111,76	<a href="http://www.mercadolivre.com.br">www.mercadolivre.com.br</a> 30/06/2024	

Barra roscada 1/4"	1	R\$ 25,79	R\$ 25,79	<a href="http://www.mercadolivre.com.br">www.mercadolivre.com.br</a> 09/12/2024	
Manipulo Fêmea Com Rosca De 1/4 Polegada	2	R\$ 9,00	R\$ 18,00	<a href="http://www.mercadolivre.com.br">www.mercadolivre.com.br</a> 17/11/2024	
Mini Mandril 8mm adaptador parafusadeira	1	R\$ 38,00	R\$ 38,00	<a href="http://www.mercadolivre.com.br">www.mercadolivre.com.br</a> 17/11/2024	
Chapa de aço 200x1000x8 mm	5	R\$ 135,00	R\$ 675 ,00	<a href="http://www.mercadolivre.com.br">www.mercadolivre.com.br</a> 17/11/2024	
Perfil estrutural alumínio 30x30 mm	5	R\$ 92,30	R\$ 461,53	<a href="http://www.mercadolivre.com.br">www.mercadolivre.com.br</a> 17/11/2024	
Suporte roldana calibrador Material: Inox 304	1	R\$ 94,49	R\$ 94,49	<a href="https://cemporcentometais.com/">https://cemporcentometais.com/</a> 08/12/2024	
Suporte célula de carga Material: Inox 304	1	R\$ 94,49	R\$ 94,49	<a href="https://cemporcentometais.com/">https://cemporcentometais.com/</a> 08/12/2024	
Apoio lateral suporte linear Material: Inox 304	2	R\$ 15,10	R\$ 30,20	<a href="https://cemporcentometais.com/">https://cemporcentometais.com/</a> 08/12/2024	
Apoio superior suporte linear Material: Inox 304	1	R\$ 30,20	R\$ 30,20	<a href="https://cemporcentometais.com/">https://cemporcentometais.com/</a> 08/12/2024	
Tampa inferior Material: Inox 304	1	R\$ 83,63	R\$ 83,63	<a href="https://cemporcentometais.com/">https://cemporcentometais.com/</a> 08/12/2024	

Suporte rolamentos Material: Inox 304	1	R\$ 141,83	R\$ 141,83	<a href="https://cemporcentometais.com/08/12/2024">https://cemporcentometais.com/08/12/2024</a>	
Tampa superior Material: Inox 304	1	R\$ 22,72	R\$ 22,72	<a href="https://cemporcentometais.com/08/12/2024">https://cemporcentometais.com/08/12/2024</a>	
Suporte placa base Material: Inox 304	1	R\$ 92,76	R\$ 92,76	<a href="https://cemporcentometais.com/08/12/2024">https://cemporcentometais.com/08/12/2024</a>	
Rolamento SKF 6004	3	R\$ 25,59	R\$ 76,77	<a href="https://shopee.com.br/19/11/2024">https://shopee.com.br/19/11/2024</a>	
Eixo Material: Inox 304	1	R\$ 60,72	R\$ 60,72	<a href="https://cemporcentometais.com/08/12/2024">https://cemporcentometais.com/08/12/2024</a>	
Eixo excêntrico Material: Inox 304	1	R\$ 9,67	R\$ 9,67	<a href="https://cemporcentometais.com/08/12/2024">https://cemporcentometais.com/08/12/2024</a>	

Reservatório de lubrificante Material: Inox 304	1	R\$ 79,00	R\$ 79,00	<a href="https://cemporcentometais.com/08/12/2024">https://cemporcentometais.com/08/12/2024</a>	
Suporte tubo rolamento mancal Material: Inox 304	1	R\$ 17,74	R\$ 17,74	<a href="https://cemporcentometais.com/08/12/2024">https://cemporcentometais.com/08/12/2024</a>	
Rolamento SKF 6004 2Z Material: Inox 304	1	R\$ 15,88	R\$ 15,88	<a href="https://shopee.com.br/19/11/2024">https://shopee.com.br/19/11/2024</a>	
Encaixe para suporte do pino Material: Inox 304	1	R\$ 31,25	R\$31,25	<a href="https://cemporcentometais.com/08/12/2024">https://cemporcentometais.com/08/12/2024</a>	
Suporte Pino Material: Inox 304	1	R\$ 10,99	R\$ 10,99	<a href="https://cemporcentometais.com/08/12/2024">https://cemporcentometais.com/08/12/2024</a>	
Ponta encaixe para esfera Material: Inox 304	1	R\$ 14,00	R\$ 14,00	<a href="https://cemporcentometais.com/08/12/2024">https://cemporcentometais.com/08/12/2024</a>	
Suporte para célula de carga e tubo Material: Inox 304	1	R\$ 17,74	R\$ 17,74	<a href="https://cemporcentometais.com/08/12/2024">https://cemporcentometais.com/08/12/2024</a>	
Suporte rolamentos - base rotativa acoplada a mesa Material: Inox 304	1	R\$ 29,90	R\$ 29,90	<a href="https://cemporcentometais.com/08/12/2024">https://cemporcentometais.com/08/12/2024</a>	
Base rotativa acoplada a mesa Material: Inox 304	1	R\$ 74,34	R\$ 74,34	<a href="https://cemporcentometais.com/08/12/2024">https://cemporcentometais.com/08/12/2024</a>	
Tampa rolamento - base rotativa acoplada a mesa Material: Inox 304	1	R\$ 18,61	R\$ 18,61	<a href="https://cemporcentometais.com/08/12/2024">https://cemporcentometais.com/08/12/2024</a>	

Suporte rolamento mancal Material: Inox 304	1	R\$ 83,63	R\$ 83,63	<a href="https://cemporcentometais.com/">https://cemporcentometais.com/</a> 08/12/2024	
Eixo - base rotativa acoplada a mesa Material: Inox 304	1	R\$ 27,29	R\$ 27,29	<a href="https://cemporcentometais.com/">https://cemporcentometais.com/</a> 08/12/2024	
Arduino Placa Mega 2560 chip 16U2 + Cabo	1	R\$ 247,50	R\$ 247,50	<a href="http://www.arducore.com.br">www.arducore.com.br</a> 17/11/2024	

**Total: R\$3.246,96**

Total Componentes: R\$ 2.181,76

Total Matéria-prima para usinagem: R\$ 1065,20

Total Usinagem: Utilização da estrutura da Universidade ou cotação de hora-máquina para usinagem.

Total Geral: R\$ 3.246,96

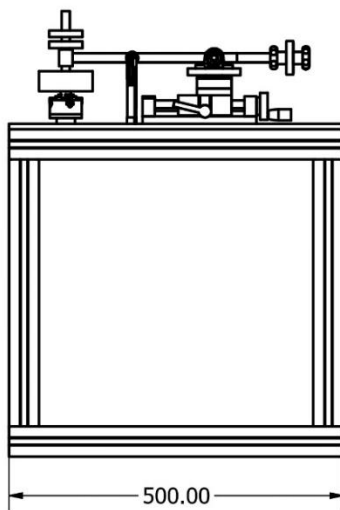
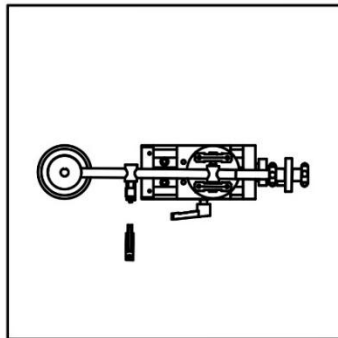
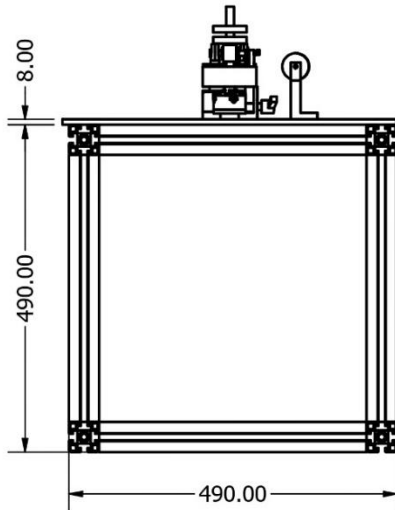
Embora não esteja com todos os componentes como o motor, custo de usinagem e sistema de acionamento o custo os valores não passariam de R\$10.000,00 estimando à valores de mercado no cenário atual, ou seja é muito inferior à tribômetros comerciais convencionais onde os modelos iniciais e simples custam a partir de US\$ 50.000,00.

## APÊNDICE D – Desenhos Técnicos

Disponíveis em:

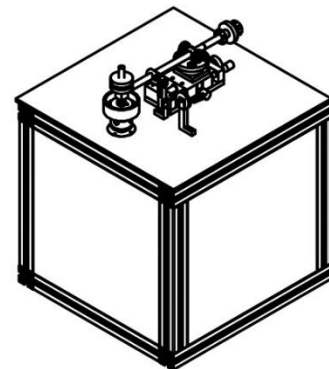
[drive.google.com/drive/folders/11l\\_XrOK5wncZuQnencrAgHQmwVf\\_c59O?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/11l_XrOK5wncZuQnencrAgHQmwVf_c59O?usp=sharing)

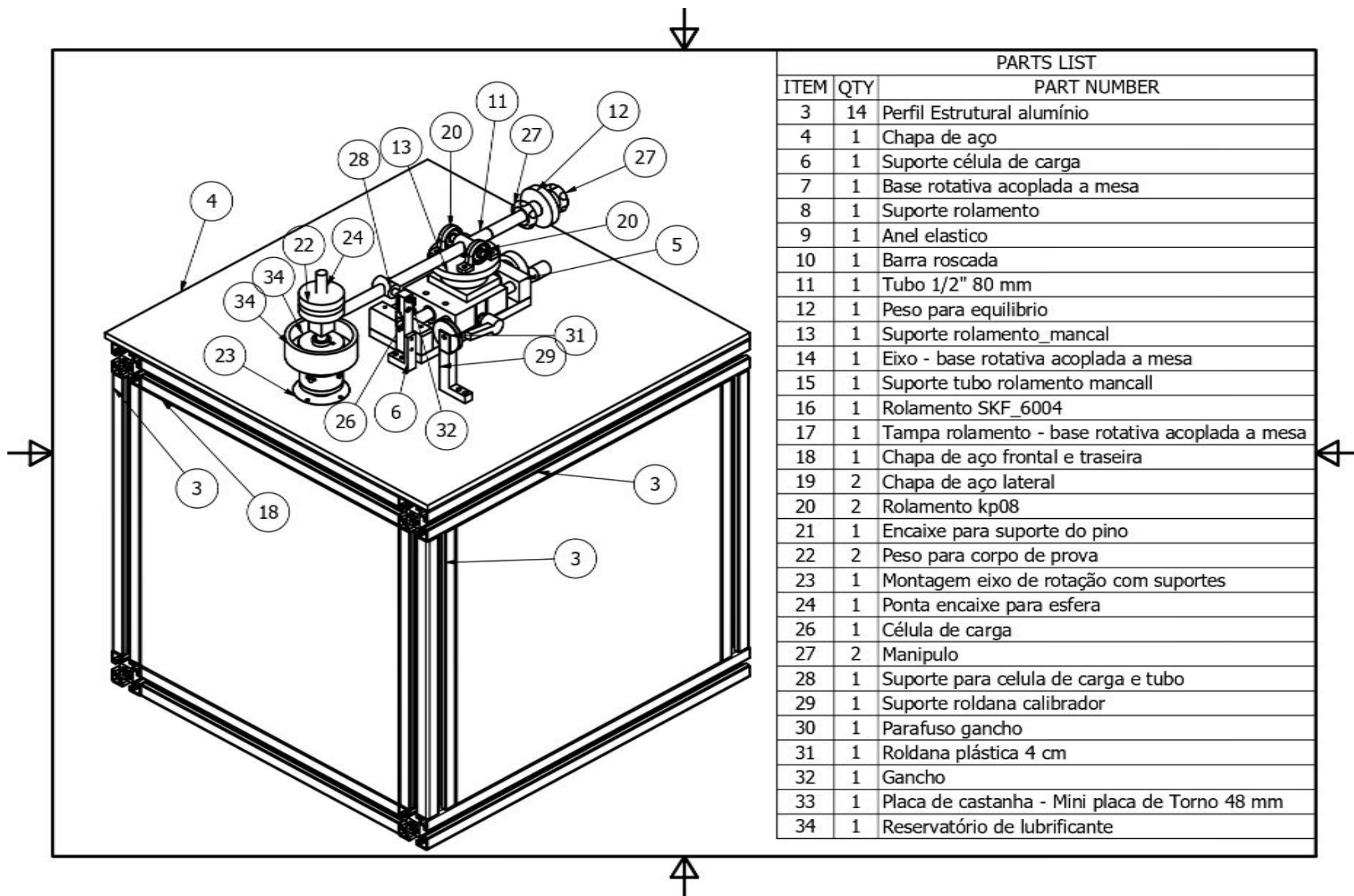
Tribômetro



ESC: 1:8

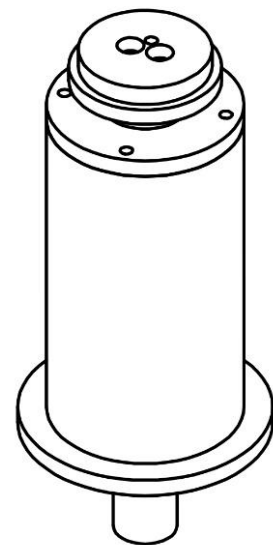
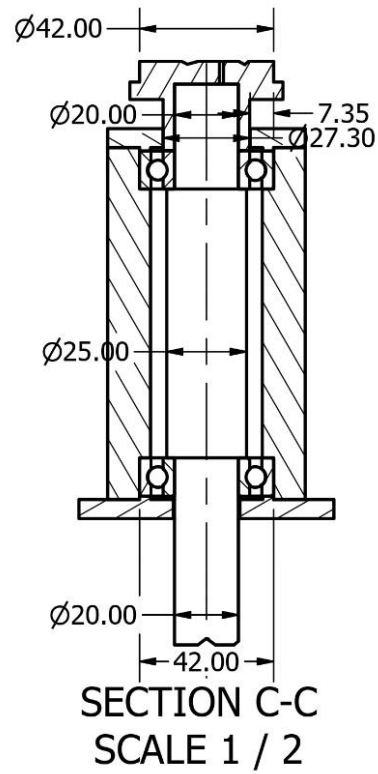
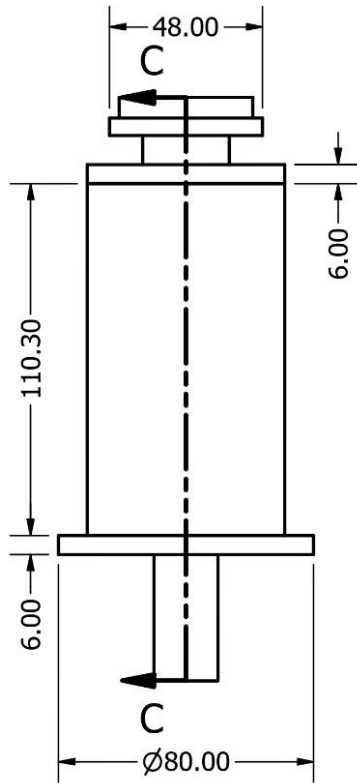
PARTS LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER
3	14	Perfil estrutural alumínio
4	1	Chapa de aço
5	1	Montagem mesa deslizante
6	1	Suporte célula de carga
7	1	Base rotativa acoplada a mesa
8	1	Suporte rolamento
9	1	Anel elastico
10	1	Barra roscada
11	1	Tubo meia 80 mm
12	1	Peso para equilibrio
13	1	Suporte rolamento mancal
14	1	Eixo - base rotativa acoplada a mesa
15	1	Suporte tubo rolamento mancal
16	1	Rolamento SKF_6004
17	1	Tampa rolamento - base rotativa acoplada a mesa
18	1	Chapa de aço frontal e traseira
19	2	Chapa de aço lateral
20	2	Rolamento kp08
21	1	Encaixe para suporte do pino
22	2	Peso para corpo de prova
23	1	Montagem eixo de rotação com suportes
24	1	Ponta encaixe para esfera
26	1	Célula de carga
27	2	Manipulo
28	1	Suporte para celula de carga e tubo
29	1	Suporte roldana calibrador
30	1	PARAFUSO Gancho
31	1	Roldana Plástica 4 cm
32	1	Gancho
33	1	Placa de castanha - Mini placa De Torno 48 mm
34	1	Reservatório de lubrificante





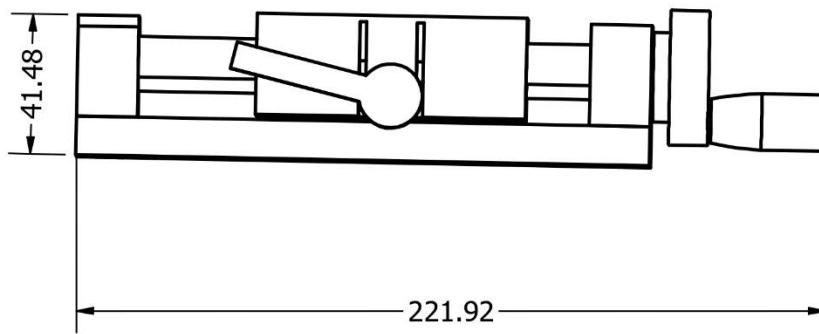
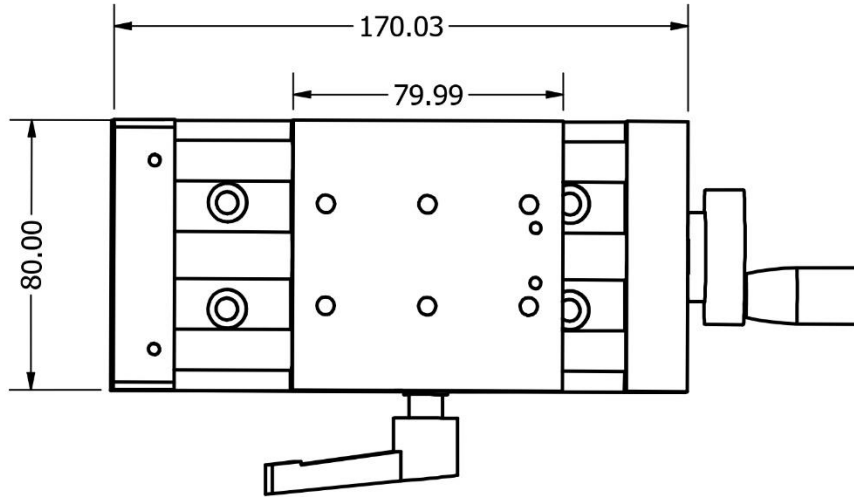
PARTS LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER
3	14	Perfil Estrutural alumínio
4	1	Chapa de aço
6	1	Suporte célula de carga
7	1	Base rotativa acoplada a mesa
8	1	Suporte rolamento
9	1	Anel elástico
10	1	Barra roscada
11	1	Tubo 1/2" 80 mm
12	1	Peso para equilíbrio
13	1	Suporte rolamento_mancal
14	1	Eixo - base rotativa acoplada a mesa
15	1	Suporte tubo rolamento mancill
16	1	Rolamento SKF_6004
17	1	Tampa rolamento - base rotativa acoplada a mesa
18	1	Chapa de aço frontal e traseira
19	2	Chapa de aço lateral
20	2	Rolamento kp08
21	1	Encaixe para suporte do pino
22	2	Peso para corpo de prova
23	1	Montagem eixo de rotação com suportes
24	1	Ponta encaixe para esfera
26	1	Célula de carga
27	2	Manipulo
28	1	Suporte para celula de carga e tubo
29	1	Suporte roldana calibrador
30	1	Parafuso gancho
31	1	Roldana plástica 4 cm
32	1	Gancho
33	1	Placa de castanha - Mini placa de Torno 48 mm
34	1	Reservatório de lubrificante

## Montagem eixo de rotação com suportes



Item: Montagem eixo de rotação com suportes  
Esc: 1/2  
Material: INOX 304

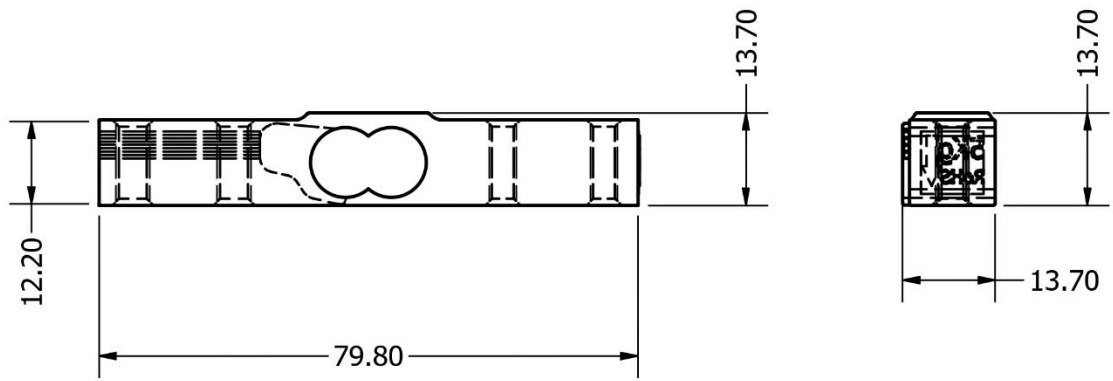
Mesa deslizante



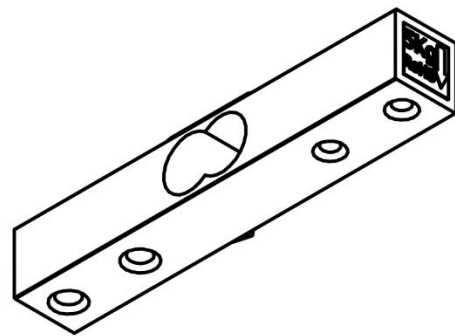
Esc: 1:1



Célula de carga

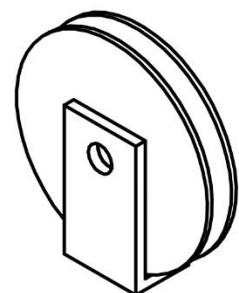
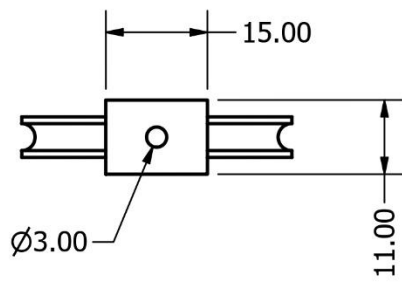
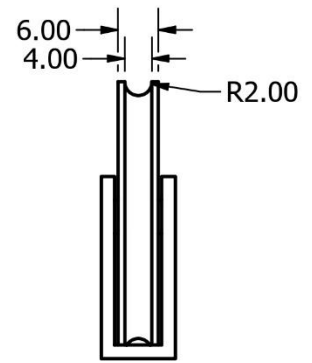
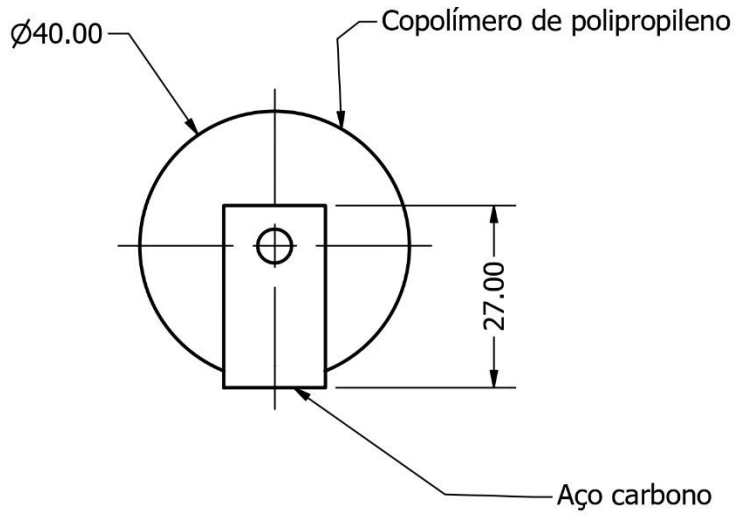


Esc: 1:1





Roldana comercial

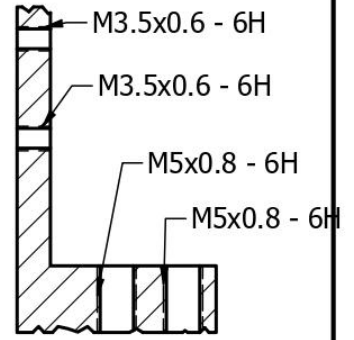
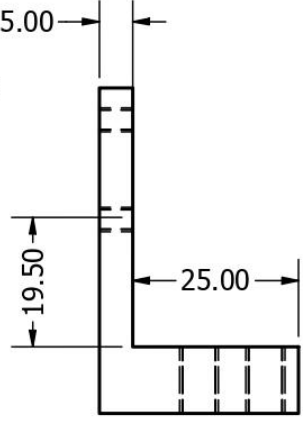
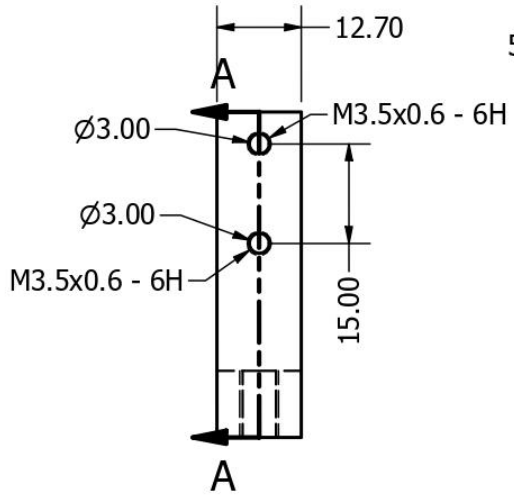


Esc: 1:1

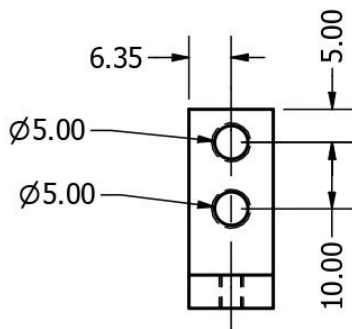




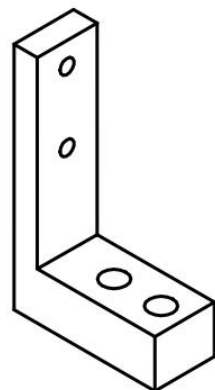
Suporte célula de carga



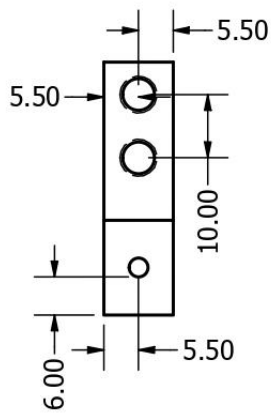
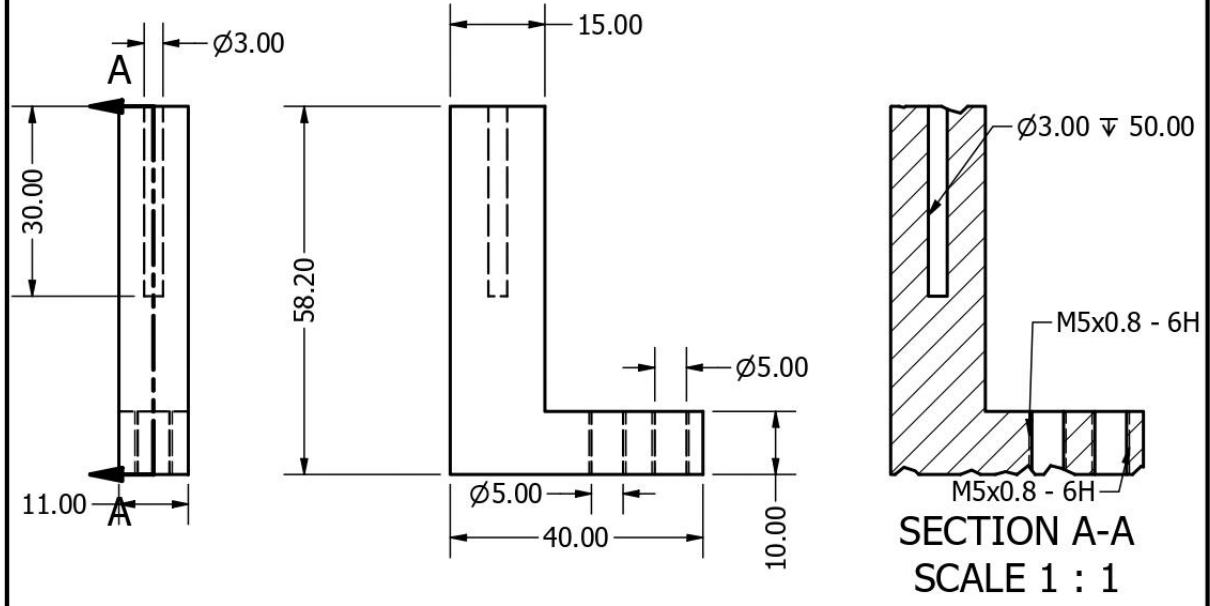
SECTION A-A  
SCALE 1 : 1



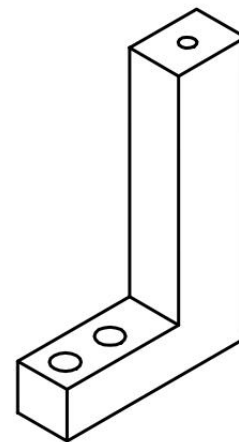
Esc: 1:1  
Material: INOX 304



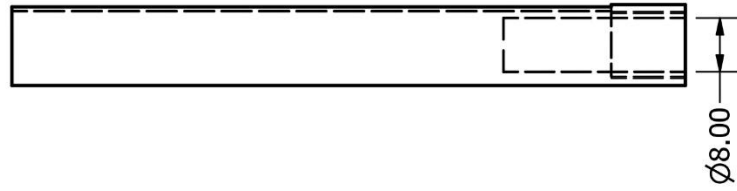
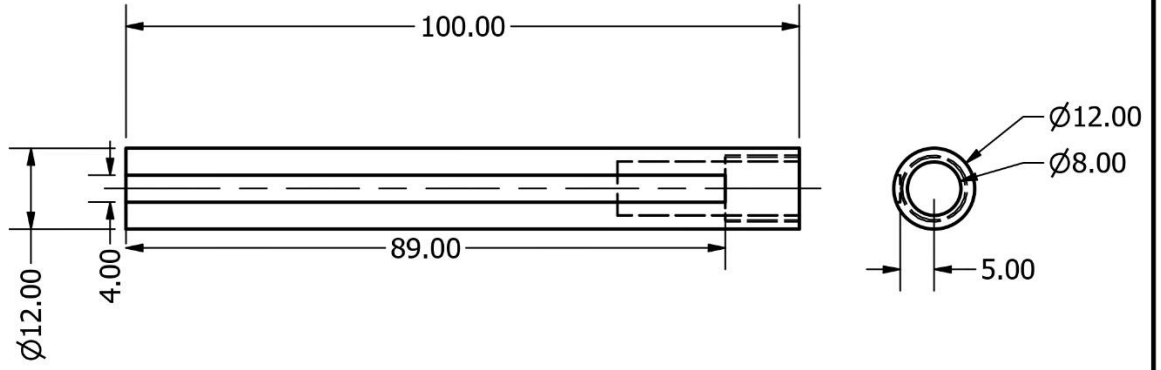
Suporte Roldana Calibrador



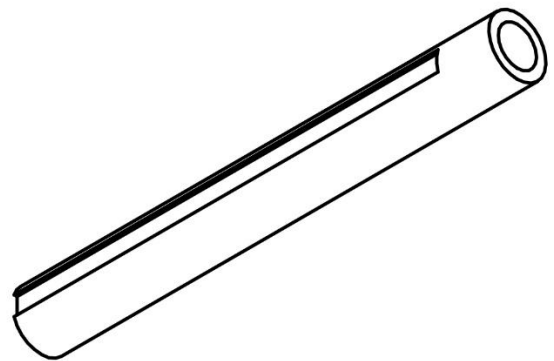
Esc: 1:1  
Material: INOX 304



Suporte do pino

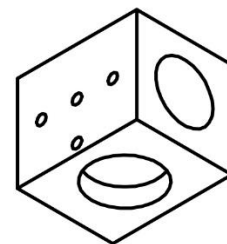
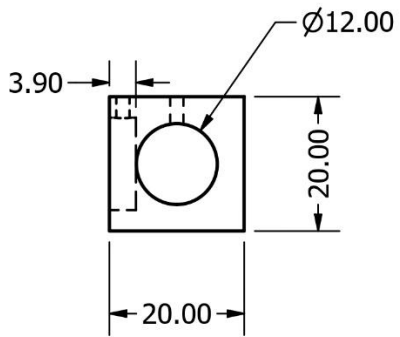
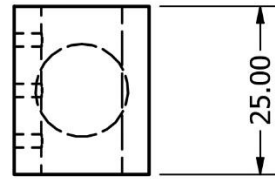
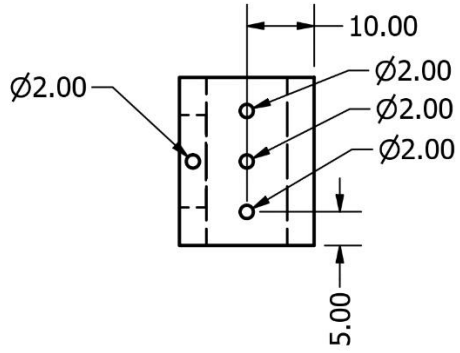


Esc: 1:1  
Material: INOX 304





Encaixe para suporte do pino

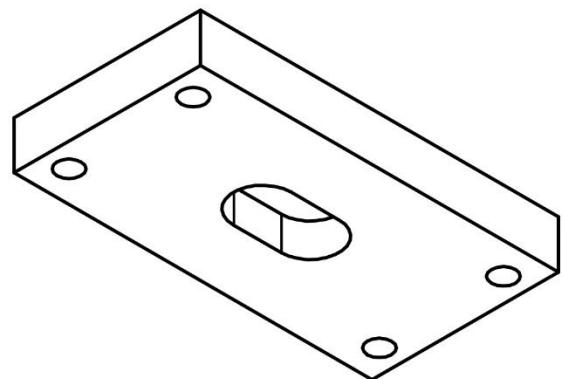
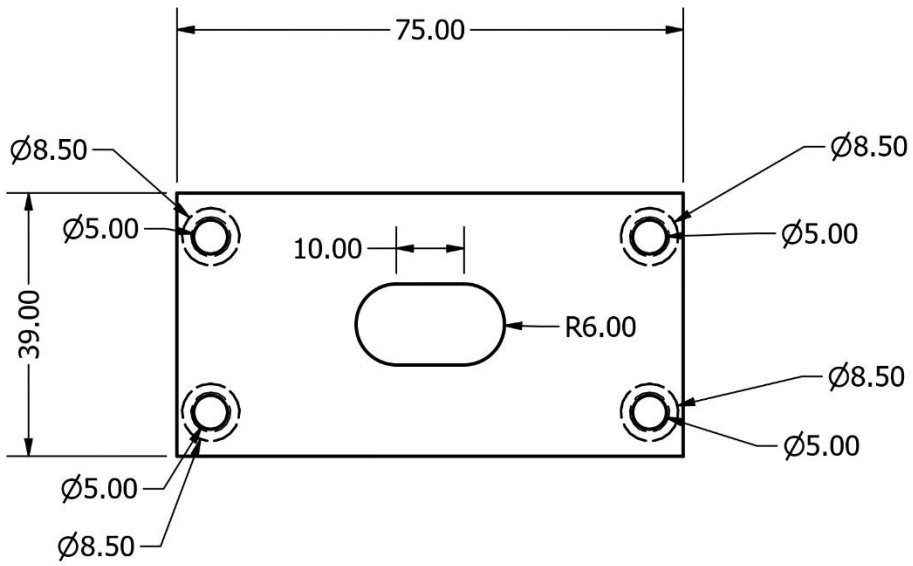
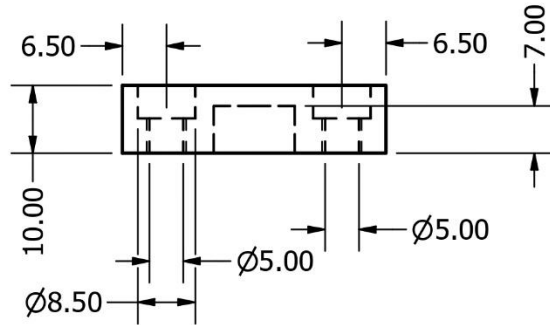
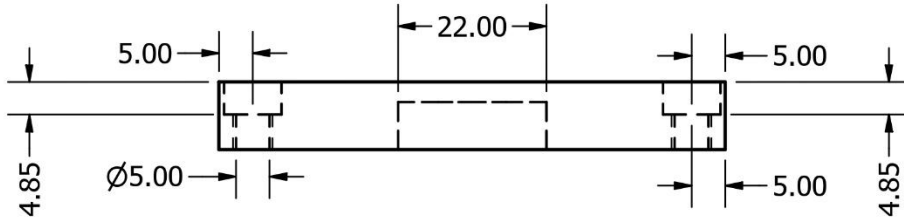


Esc: 1:1  
Material: INOX 304





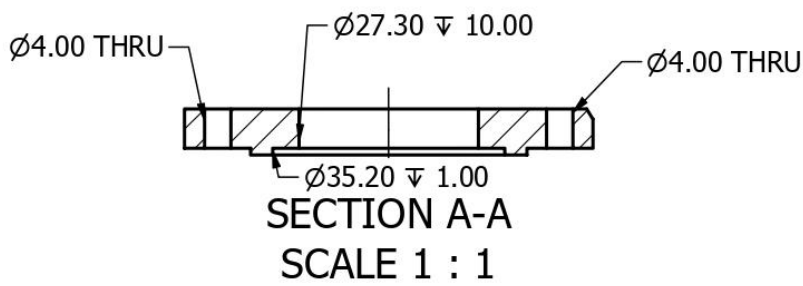
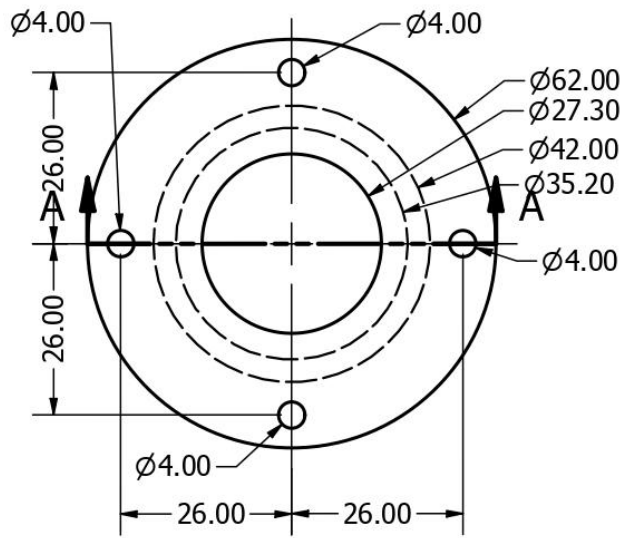
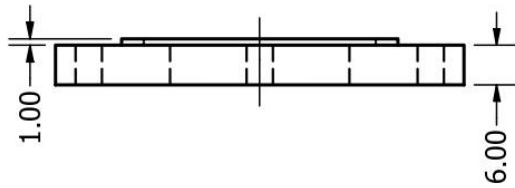
Apoio superior\_suporte linear



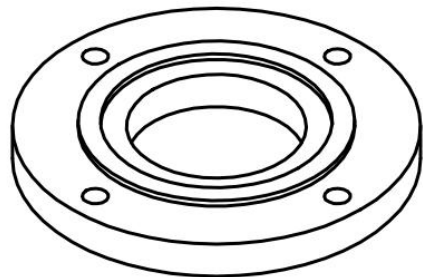
Escala: 1:1  
Material: Inox 304



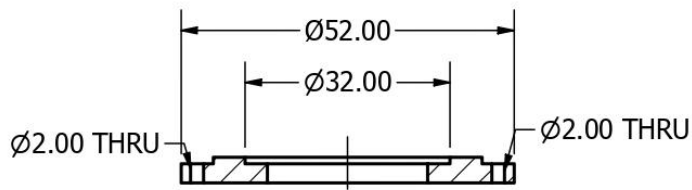
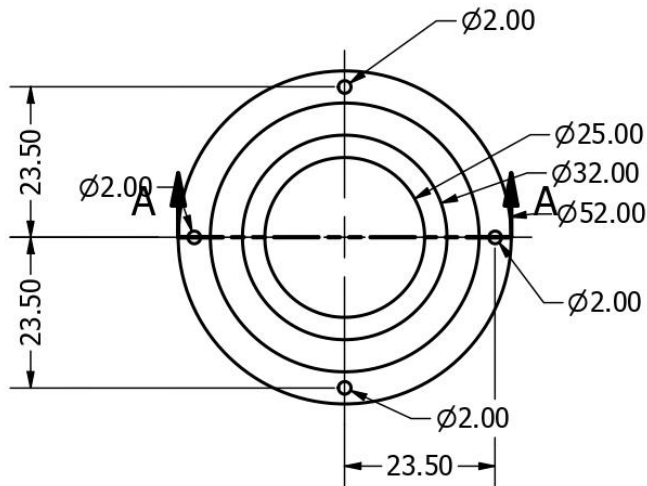
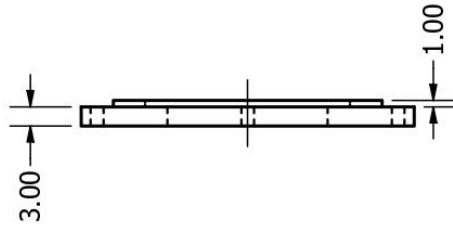
Tampa superior



Esc: 1:1  
Material: INOX 304

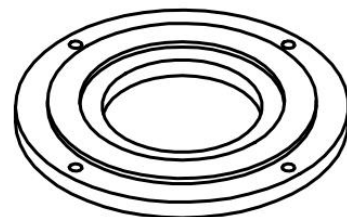


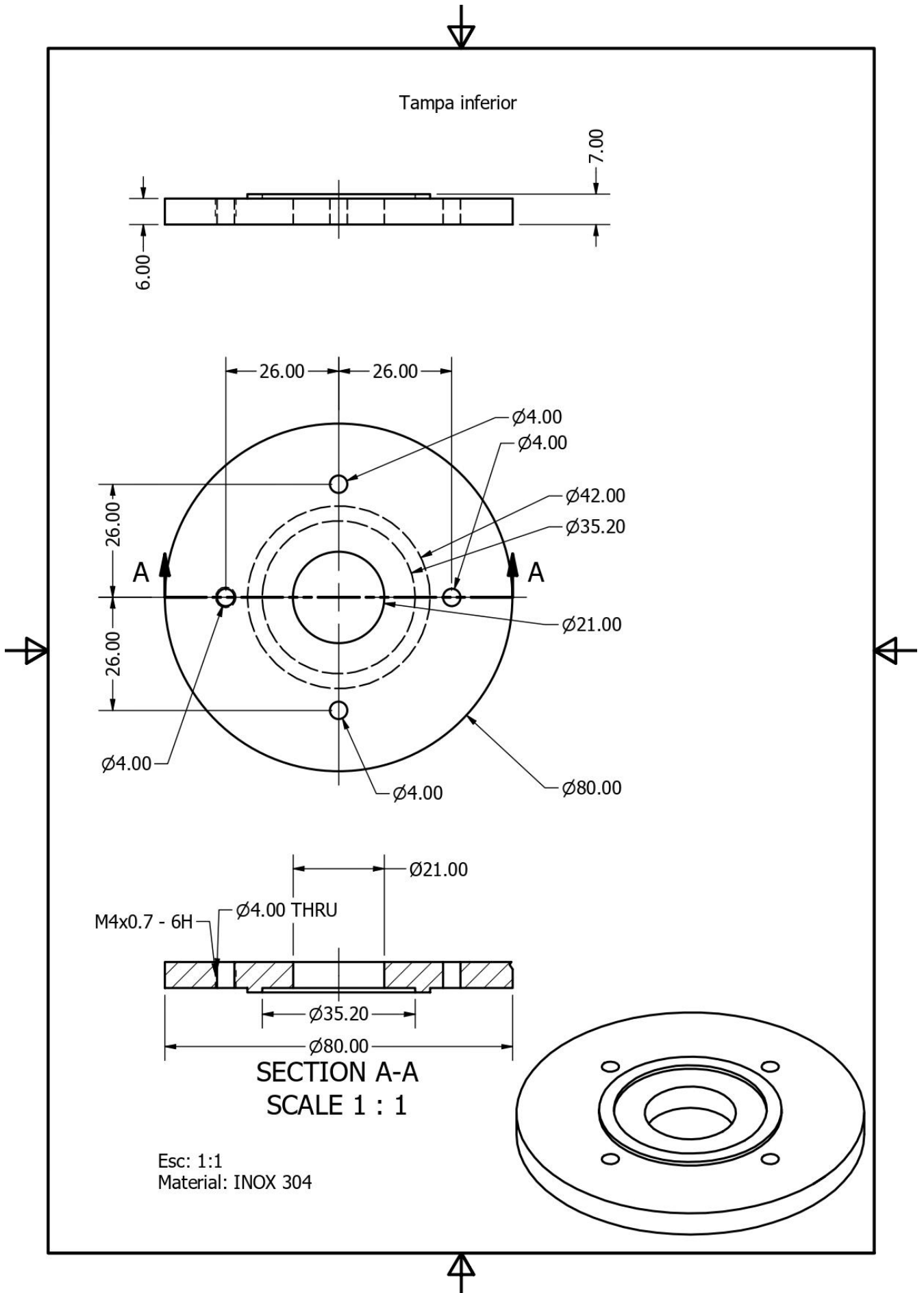
Tampa rolamento base rotativa



SECTION A-A  
SCALE 1 : 1

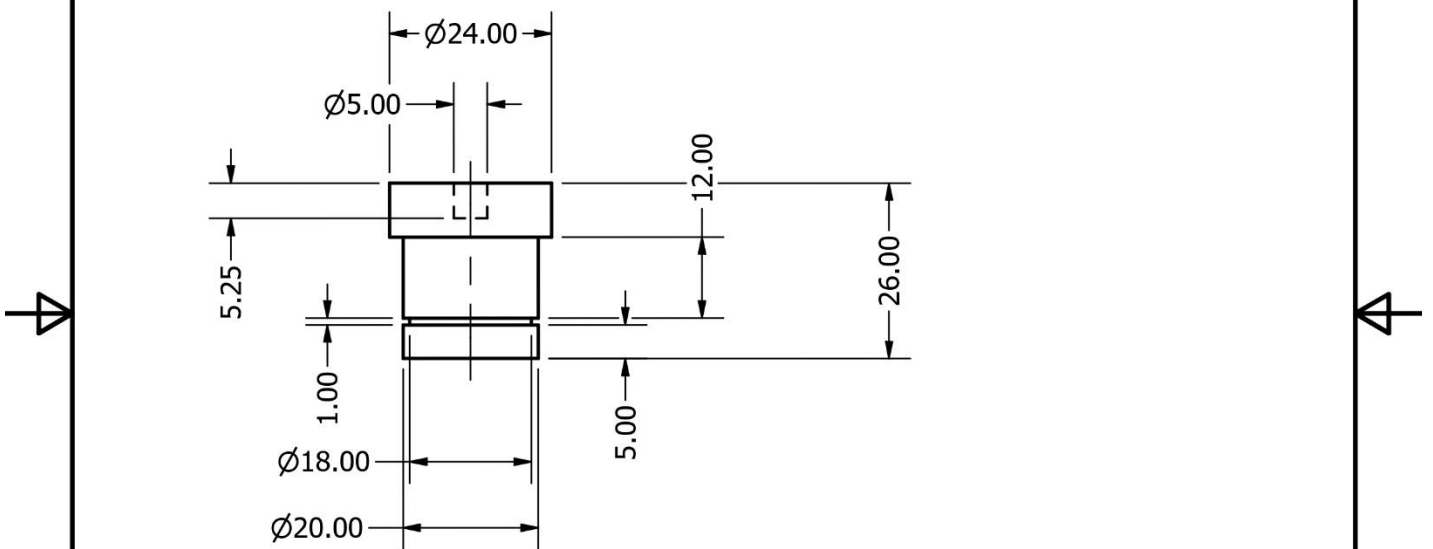
Esc: 1:1  
Material: INOX 304



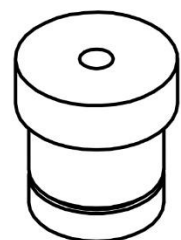




Suporte placa para anel elástico

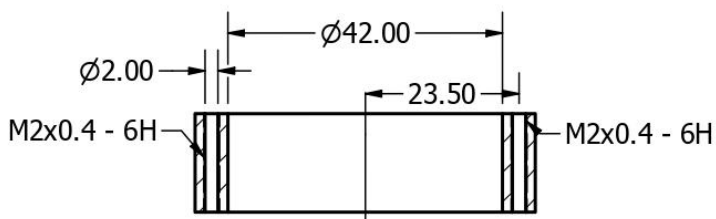
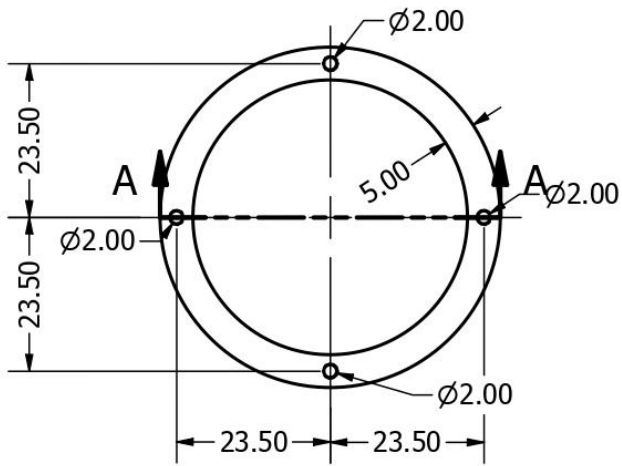
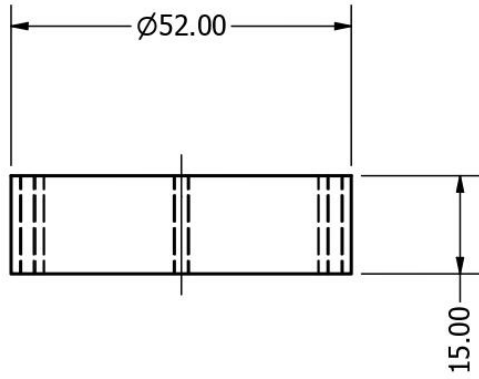


Esc: 1:1  
Material: INOX 304

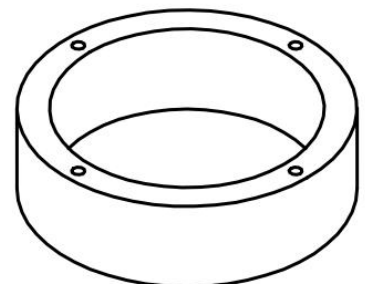




Suporte rolamento base rotativa



SECTION A-A  
SCALE 1 : 1

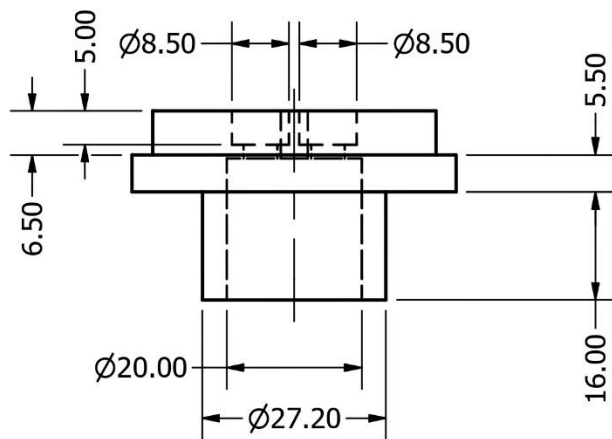
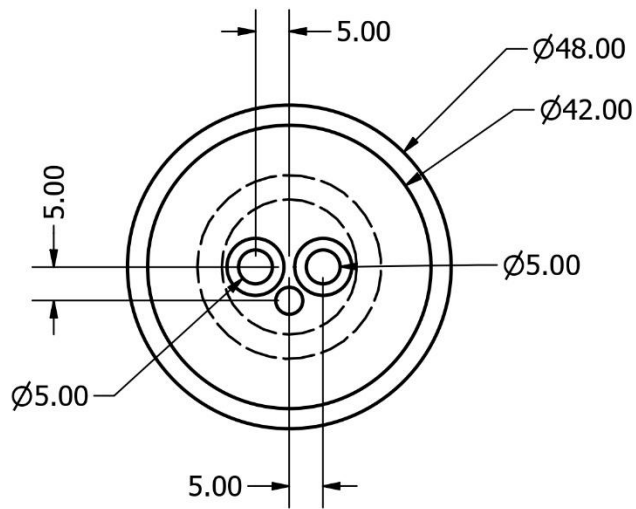


Esc: 1:1  
Material: INOX 304

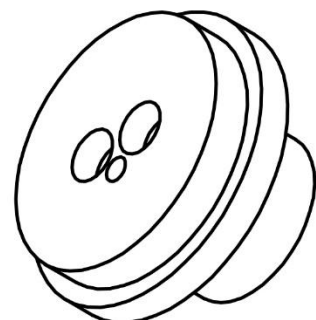




Suporte Placa

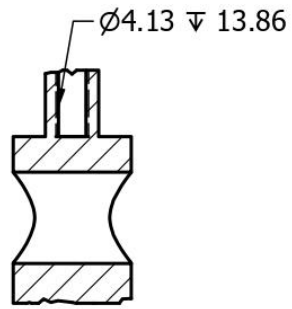
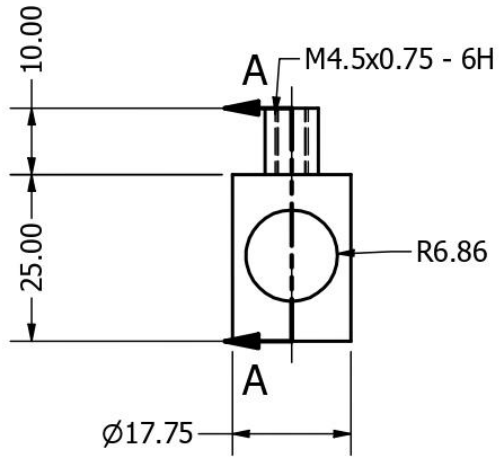


Esc: 1:1  
Material: INOX 304

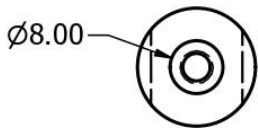




Suporte célula de carga/tubo



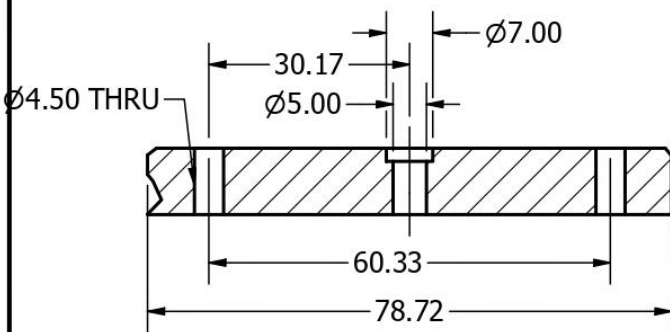
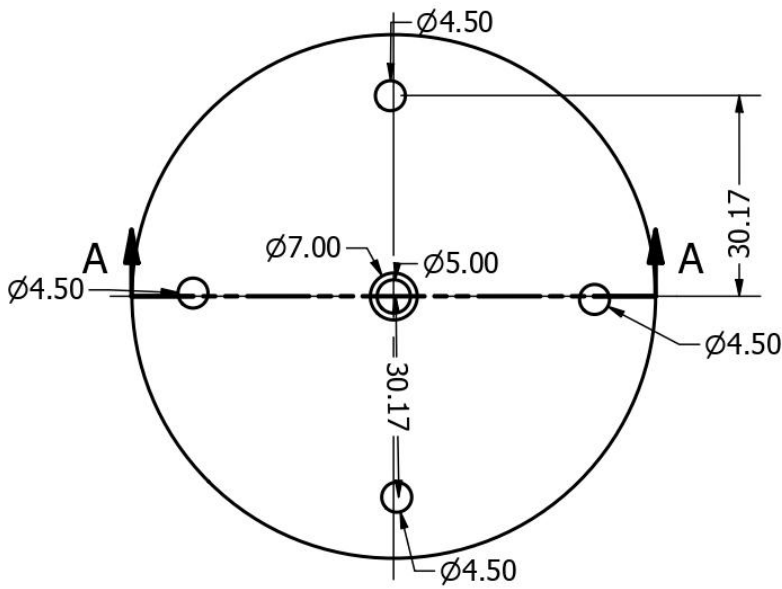
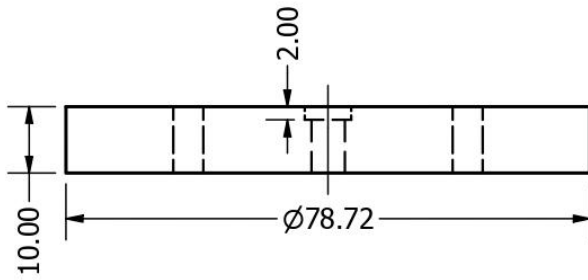
SECTION A-A  
SCALE 1 : 1



Esc: 1:1  
Material: INOX 304

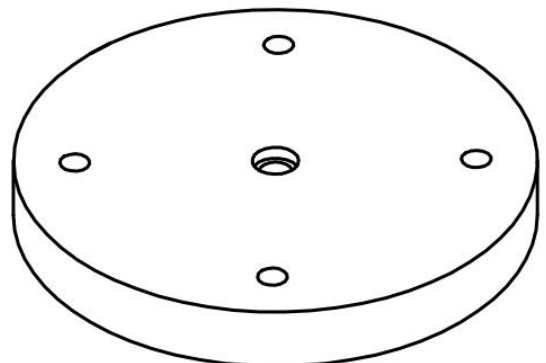


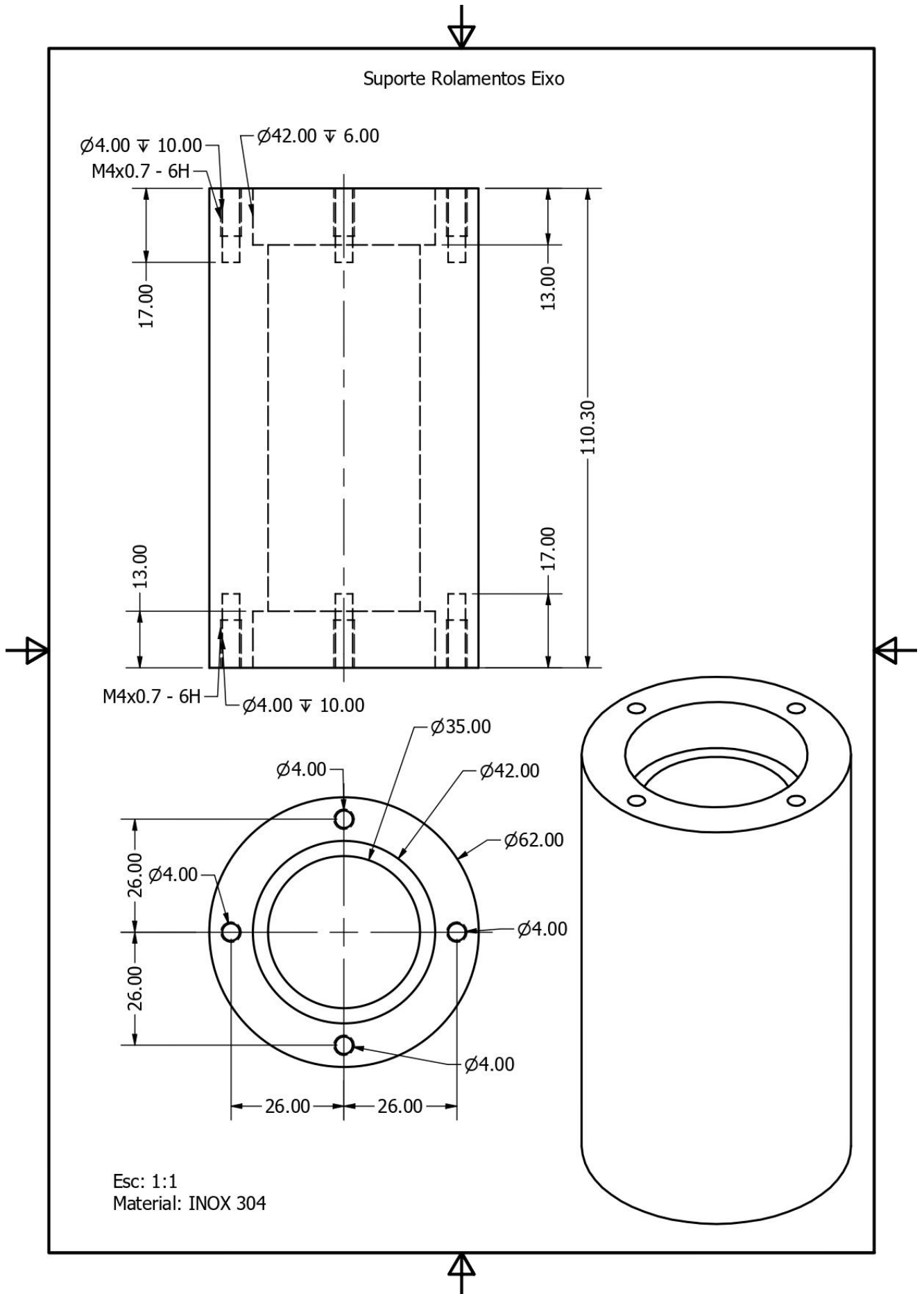
Base rolamento mancal



SECTION A-A  
SCALE 1 : 1

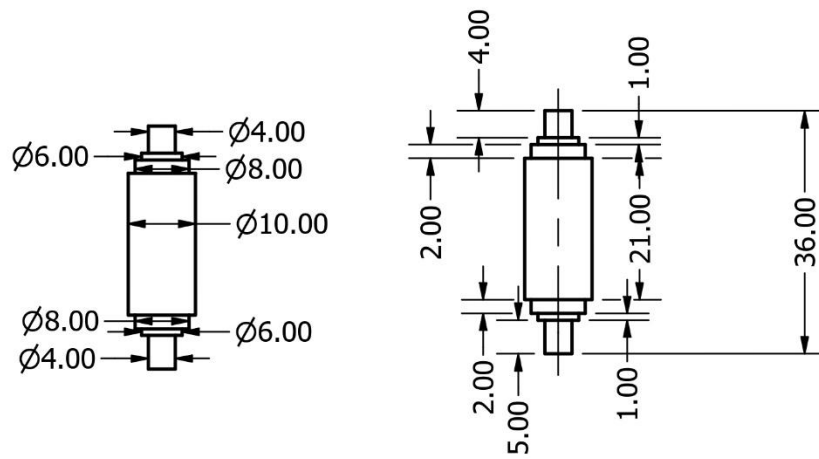
Esc: 1:1  
Material: INOX 304







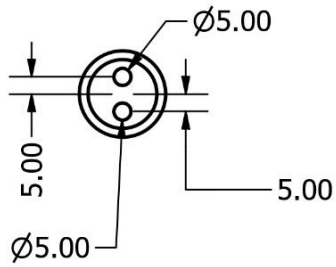
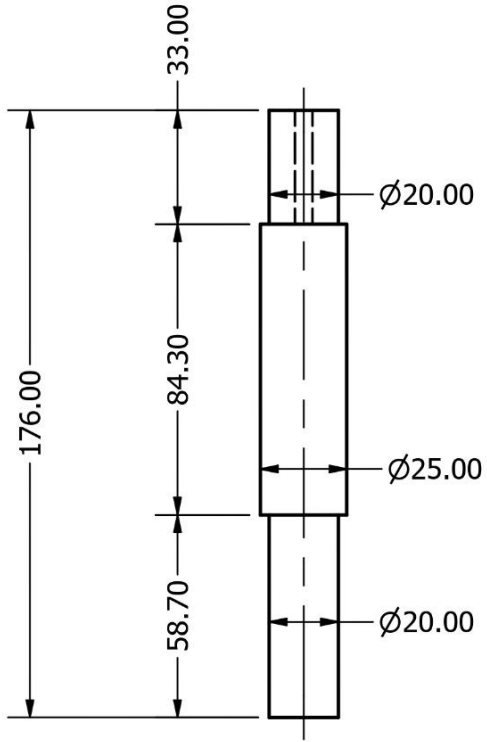
Eixo suporte garfo escocês



Esc: 1:1  
Material: INOX 304

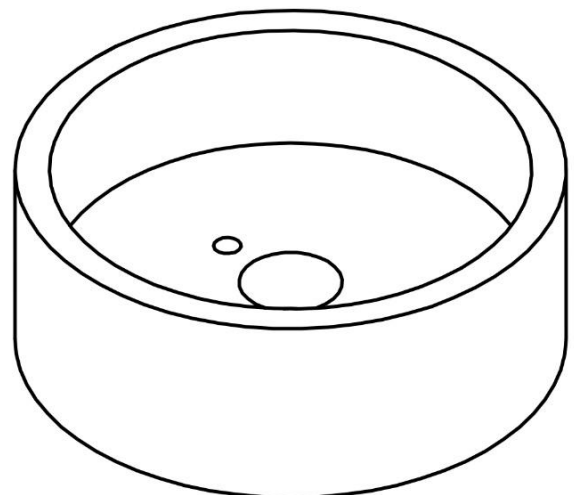
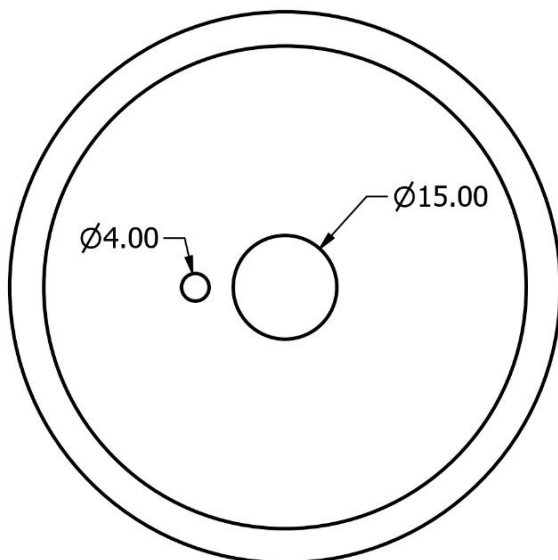
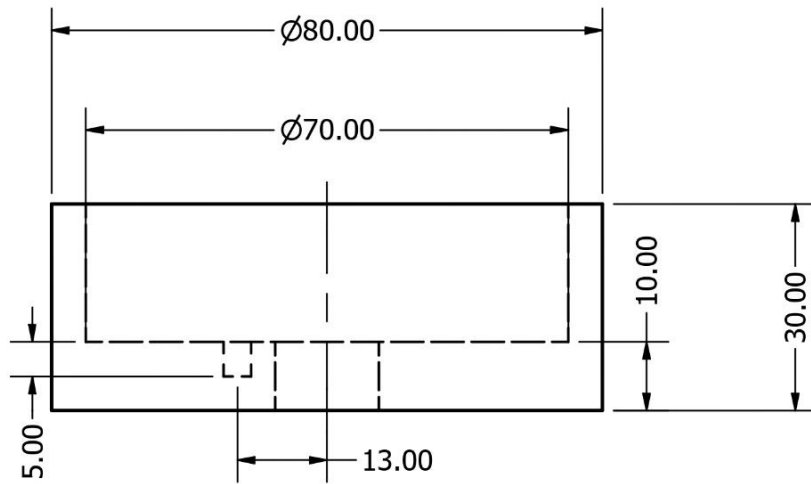


Eixo



Esc: 1:2  
Material: INOX 304

## Reservatório de lubrificante

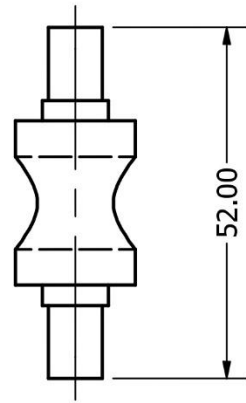
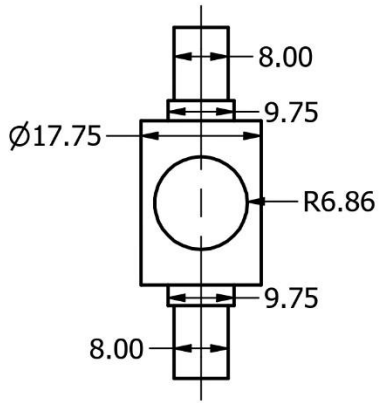


Esc: 1:1  
Material: INOX 304





Suporte tubo rolamento mancal



Esc: 1:1  
Material: INOX 304

