

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

BRUNO FERREIRA COUTO

PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE DE UM ABRASÔMETRO PINO-LIXA  
SEGUNDO A ASTM G132

GOIÂNIA  
2019



---

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR  
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES  
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: [ ] Dissertação [ ] Tese [x] Monografia

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

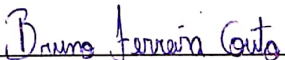
Nome completo do autor: Bruno Ferreira Couto

Título do trabalho: PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE DE UM ABRASÔMETRO PINO-LIXA SEGUNDO A ASTM G132

3. Informações de acesso ao documento:

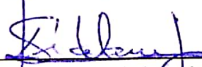
Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [ ] NÃO<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.



Assinatura do(a) autor(a)<sup>2</sup>

Ciente e de acordo:

  
Assinatura do(a) orientador(a)<sup>2</sup>

Data: 23 / 07 / 2019

*Prof. Sigeo Kitatani Júnior*  
Vice-Coordenador do Curso de Engenharia de Mecânica da EMC/UFG

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

<sup>2</sup> A assinatura deve ser escaneada.

BRUNO FERREIRA COUTO

PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE DE UM ABRASÔMETRO  
PINO-LIXA SEGUNDO A ASTM G132

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Goiás, como exigência parcial para obtenção de título de bacharel de Engenharia Mecânica.

Áreas de concentração: Cinemática e Dinâmica de Mecanismos, Elementos de Máquinas, Eletrônica de Potência, Máquinas Elétricas, Projetos Mecânicos, Sistemas de Controle e Tribologia.

Orientador: Prof. Dr. Sigeo Kitatani Júnior.

Goiânia  
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Couto, Bruno Ferreira  
Projeto do Sistema de Controle de um Abrasômetro Pino-Lixa Segundo a ASTM G132 [manuscrito] / Bruno Ferreira Couto. - 2019.  
105 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Sigeo Kitatani Júnior.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2019.

Bibliografia. Apêndice.

Inclui siglas, fotografias, abreviaturas, gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Abrasômetro. 2. Arduino. 3. Controle. 4. Desgaste. 5. Tribologia.  
I. Kitatani Júnior, Sigeo, orient. II. Título.

CDU 621.03

BRUNO FERREIRA COUTO

PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE DE UM ABRASÔMETRO  
PINO-LIXA SEGUNDO A ASTM G132

Projeto Final de curso, apresentado à  
Universidade Federal de Goiás, como  
parte das exigências para a obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia  
Mecânica.

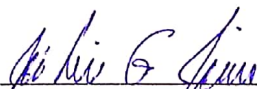
Goiânia, 15 de julho de 2019

BANCA EXAMINADORA



---

Prof. Dr. Sigeo Kitatani Júnior  
Universidade Federal de Goiás



---

Prof. Dr. José Lúcio Gonçalves Júnior  
Universidade Federal de Goiás



---

Prof. Dr. João Paulo da Silva Fonseca  
Universidade Federal de Goiás

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos aqueles que contribuíram para que eu conseguisse vencer essa longa jornada, - aos meus pais -, e àqueles que encontraram na Engenharia uma fonte de fascínio, prazer e realização pessoal.

## AGRADECIMENTOS

Da Universidade Federal de Goiás: engenheiros.

Instituto de Física Escola de Engenharia Civil e Ambiental

Professor Leandro Félix de Sousa Bufaiçal - pela didática suave e dedicação aos alunos. Meu primeiro professor na Universidade (2011/1); Professor Ademir Aparecido Do Prado - por sua simpatia e camaradagem;

Professor Nilson Mendes Borges - por uma didática impecável e por sua preocupação com o aprendizado dos alunos (2011/2); Professor Orlando Ferreira Gomes (amigo metaleiro) - pelo carisma e por algumas das histórias que contarei aos meus netos (2014/2).

Professor Antônio Carlos De Faria - por sua simpatia e por uma aula inesquecível sobre tipos de inteligência (2011/2). Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação

Instituto de Química Professor Emilson Rocha de Oliveira - Pela praticidade e objetividade inspiradora;

Professora Karla Ferreira Dias Cassiano - pela paciência e entrega a uma turma em formação, que poucas vezes colaborou (2011/1). Engenheiro Ademyr Gonçalves de Oliveira - por ser a minha maior inspiração tanto como estudante quanto como profissional, e por ter me feito começar o curso;

Faculdade de Artes Visuais Professor Felipe Pamplona Mariano - por ter me feito terminar o curso;

Professora Daura Rios Pedroso Hamu - pelo carisma, dedicação e carinho materno para com os seus alunos (2011/1). Professor João Paulo da Silva Fonseca - por ter me apresentado os fundamentos da automação, área pela qual nutro admiração especial;

Instituto de Matemática e Estatística Professor José Lúcio Gonçalves Júnior - pela camaradagem e por ter me apresentado o objeto deste trabalho;

Professor Maxwell Lizete Da Silva - me proporcionou dias difíceis, mas de aprendizado intenso e marcante (2011/2); Professor Sigeo Kitatani Júnior - por ter despertado em mim o gosto pela editoração, e por ter ressuscitado o meu gosto pela eletrônica;

Professor Mário Jose De Souza - por sua atenção e didática, e por uma resposta sagaz sobre a utilidade dos espaços vetoriais; Professor Rhander Viana - agradeço pelo engajamento em mostrar à turma os aspectos práticos da Engenharia; e pela cordialidade para com os alunos.

Professor Leandro Da Fonseca Prudente - por sua coerência incrível no ensino de métodos numéricos na engenharia: coerência poucas vezes vistas nos próprios

Agradeço, especialmente, aos meus companheiros e companheiras:

Eng. Almério José Venâncio Pains Soares Pamplona

Eng. Carlos Augusto Paes Lemes

Eng. Cecílio Rocha Ferreira da Silva

Eng. Diogo Appel Colvero

Elton Cavalcante Vaz (in memorian)

Ester Figueiredo Picanço

Felipe Arantes Lobo

Fleide Wilian Rodrigues Alves

Eng. Glauber Pereira Pinto

Eng. Geovanne Silva Faria

João Bosco da Cunha

João Bosco Carvalho de Souza

João Paulo Benfica

Eng. Johnathan Batista dos Santos

José Francisco Costa

Juliana Rocha Vieira

Katileen Rodrigues Couto

Kelvin Rodrigues Couto

Eng. Klebber de Araújo Ottoboni

Lucas Lobão de Aquino

Luiz Carlos Do Vale Filho

Márcio Amorim Ivo De Assis

Eng. Mário Silva Neto

Miguel Leonardo De Araújo Almeida

Murilo Cândido de Oliveira

Eng. Pedro Augusto Dias Rodrigues

Eng. Raphael Jonas França

Eng. Renata de Fátima Vieira Ribeiro

Ronaldo Antonio Dos Santos Filho

Salomão Guedes Fagundes Vieira

Talitha Oliveira de Souza

Vitor Rafael Gonçalves Rodrigues

Yuri Luiz Almeida De Souza

Da Engemil Engenharia, Empreendimentos, Manutenção e Instalações Ltda

Engenheiro Eduardo Carlos de Oliveira e Silva Júnior

Engenheiro Iure Araújo Santiago

Vos agradeço pela oportunidade de conhecer, a nível prático e intenso, a Engenharia como ela é de verdade.

"Eu acredito em Deus como a fonte de toda a energia que criou e mantém o equilíbrio do universo.

Vejo Deus na flor e na abelha que lhe suga o néctar para produzir o mel;  
e no pássaro que devora a abelha;  
e no homem que devora o pássaro...e no verme que devora o homem.

Eu vejo Deus em cada estrela no céu, nas minhas noites nas pousadas, e nos olhos tristes de cada boi, ruminando na envernada...

Só não consigo ver Deus no homem que devora o homem, e por isso acredito que ainda tenho muito o que aprender nesses caminhos da vida..."

BARBOSA, B. R.

## RESUMO

Este trabalho objetiva o projeto do sistema de controle de um abrasômetro pino-lixo que atenda às especificações da ASTM G-132. Para tal, foi ensaiado um modelo em escala do sistema de controle do abrasômetro, com o auxílio de um controlador do tipo Arduino Uno, um drive ponte H L298N e diversos motores de corrente contínua de ímã permanente. Dos ensaios com o modelo, foi observado que o controle por modulação de largura de pulso para a velocidade de rotação de motores de corrente contínua, feito através de drives do tipo ponte H, pode não garantir o torque nominal do motor quando se usa baixas frequências de chaveamento do sinal de alimentação dos motores; o que deve ser compensado com a correta seleção da relação de transmissão dos motores. É destacado, também, que após a construção do abrasômetro, o mesmo deve ser testado sob condições conhecidas, de modo a validar as indicações de força de atrito e desgaste da amostra e garantir a confiabilidade dos resultados obtidos do uso do abrasômetro.

Palavras Chave : Abrasômetro, Arduino, Controle, Desgaste, Tribologia.

## ABSTRACT

This project aims to design a control system for an pin-on-disk tribometer that complies to the ASTM G-132 specifications. For this, a model was tested in scale to the control system of the abrasometer, with assistance of a Arduino Uno, a bridge drive H L298N and several permanent magnet direct cut motors. From the tests with the model, it was observed that the control by pulse width modulation to speed of rotation of direct corrente motors, done by drives of the H type, could not ensure the nominal torque when low frequencies of motor power signal switching were used; which must be compensated by the adequate selection of gear ratio of the motors. It's also highlighted that after the construction of the abrasometer, it should be tested under known conditions, in order to validade the indications of frictional force and wear of the sample and ensure the reliability of the results obtained by it's use.

Key Words : Arduino, Control, Pin-on-disk tribometer, Tribology, Wear.

## Lista de Ilustrações

Figura 1.1.1 - O Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás atingiu conceito máximo no Enade MEC em suas duas primeiras avaliações	17
Figura 1.1.2 - Bancada didática para a visualização da influência de lubrificantes em rolamentos de esferas criada por Silvestre (2016)	17
Figura 1.1.3 - Bancada didática para experimentos de força em superfícies hidrostáticas desenvolvida por Vieira (2016)	17
Figura 1.1.4 - Bancada didática para ensaio de turbocompressores e seus sistemas de lubrificação apresentada por Silva Neto (2016)	18
Figura 1.1.5 - Bancada hidráulica para a determinação das curvas de perdas de carga para válvulas de pé projetada por Faria (2015)	18
Figura 1.3.1 - Conceitos de tribômetros simétricos e assimétricos	20
Figura 1.3.2 - Abrasômetro pino-lixo (pin-on-disk tribometer)	21
Figura 2.1.1 - Trajetória da cicloide	23
Figura 2.2.1 - Movimento circular genérico	23
Figura 2.3.1 - Velocidade no movimento em trajetória espiral	25
Figura 2.4.1 - Duas rodas dentadas acopladas diretamente (esquerda) e indiretamente (direita)	26
Figura 2.5.1 - Diagrama de forças no elemento flexível de uma roda dentada	26
Figura 2.6.1 - Corte esquemático de um motor DC	27
Figura 2.7.1 - Esquema conceitual do funcionamento de um CLP	29
Figura 2.8.1 - Exemplo de tensão DC modulada através da largura de pulso	30
Figura 2.8.2 - Exemplo de um sistema de controle de velocidade em malha fechada	31
Figura 2.8.3 - Relação entre a tensão de alimentação e o ciclo de trabalho PWM	31
Figura 2.9.1 - Sistema de controle de malha aberta	32
Figura 2.9.2 - Sistema de controle de malha fechada	32
Figura 3.1.1 - Representação da trajetória da trilha de desgaste	34
Figura 3.2.1 - Esboço conceitual das partes do abrasômetro pino-lixo	36
Figura 3.2.2 - Esboço conceitual do abrasômetro pino-lixo no início (esquerda) e final do ensaio (direita)	37
Figura 4.1.1 - Curvas da velocidade angular do disco em função do tempo para cada faixa de velocidade linear	40
Figura 5.1.1 - Principais geometrias de rosca para parafusos de potência	42

Figura 5.1.2 - Geometria da rosca ACME 7/8" - 6 (dimensões em milímetros)	43
Figura 5.1.3 - Diagrama de forças na rosca de um fuso	43
Figura 5.2.1 - Diagrama de momento torçor no pino	45
Figura 5.3.1 - Variáveis envolvidas na rotação do disco	46
Figura 5.4.1 - Datasheet do motor DKM 9DCP-90-30	47
Figura 6.1.1 - Controlador Arduino Mega 2560	49
Figura 6.1.4 - Drive controlador PWM 10 a 60 V DC e corrente máxima de 20 A	50
Figura 6.1.2 - Drive ponte H com dois canais PWM	50
Figura 7.0 - Diagrama de blocos do sistema de controle do motor do disco	51
Figura 7.1.1 - Velocidade angular do do motor do disco em rad/s e bit, para $V = 10$ cm/s	53
Figura 7.2.1 - Diagrama de blocos do algoritmo de controle	55
Figura 7.3.1 - Interface homem máquina	57
Figura 7.3.2 - Execução do ensaio	57
Figura 7.3.3 - Painel de controle do abrasômetro	58
Figura 8.1.1 - Comparação ilustrativa entre a rampa ideal para o motor do disco (esquerda) e a rampa gerada pelo controle proporcional puro (direita)	61
Figura 8.1.2 - Comparação ilustrativa entre o <i>setpoint</i> e a resposta do sistema para a velocidade do fuso com controle proporcional puro	61
Figura 8.2.1 - Correto posicionamento das cunhas de suspensão do pino	62
Figura 8.2.2 - Braços de alavanca na leitura da componente: (A) radial (vista lateral) e (B) tangencial (vista superior) da força de atrito	62
Figura 8.2.3 - Comparação entre diferentes frequências de sinal PWM	64

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1.1 - Velocidade angular e diâmetro do pino e do disco	35
Tabela 3.1.2 - Parâmetros gerais do abrasômetro pino/lixa	35
Tabela 4.1 - Coeficientes <b>a</b> e <b>b</b> para as equações 4.5 e 4.6	41

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
CC	- Corrente Contínua
CLP	- Controlador Lógico Programável
CPU	- <i>Central Processing Unit</i>
DC	- <i>Direct Current</i>
GDL	- Grau de Liberdade
IHM	- Interface Homem-Máquina
LCD	- <i>Liquid Crystal Display</i>
NEMA	- <i>National Electrical Manufacturers Association</i>
PWM	- <i>Pulse Width Modulation</i>
UFG	- Universidade Federal de Goiás

# SUMÁRIO

## PARTE I - INTRODUÇÃO

CAPÍTULO I - Apresentação	20
1.1 A contribuição do uso das bancadas didáticas	20
1.2 Tribologia: a ciência do desgaste	22
1.3 Os tribômetros e a sua importância	23
CAPÍTULO II - Fundamentação Teórica	26
2.1 Análise de mobilidade da trilha de desgaste	26
2.2 O movimento circular de corpos rígidos	27
2.3 O movimento complexo em trajetória de espiral	28
2.4 A lei fundamental do engrenamento	29
2.5 Torque e potência	30
2.6 Motores elétricos de corrente contínua	31
2.7 CLP e microcontroladores	32
2.8 Controle da velocidade por modulação da largura de pulso	33
2.9 Concepção do sistema de controle	35
CAPÍTULO III - Memorial Descritivo	37
3.1 Definição do ensaio e parâmetros: a ASTM G132-96	37
3.2 Esboço conceitual do abrasômetro pino-lixo	39

## PARTE II - MODELAGEM E DIMENSIONAMENTO

CAPÍTULO IV - Da Análise de Velocidades	43
4.1 Análise de velocidades	43
CAPÍTULO V - Propulsão e Transmissão de Potência	46
5.1 Movimento radial do pino	46
5.2 Movimento rotacional do pino	49
5.3 Movimento rotacional do disco	50
5.4 Propulsão e transmissão de movimento	51
CAPÍTULO VI - Acionamento dos Motores e Sistema de Controle	52
6.1 Da seleção do controlador e dos seus periféricos	52

## PARTE III - ALGORITMO DE CONTROLE E ASPECTOS OPERACIONAIS

CAPÍTULO VII - Algoritmo do Sistema de Controle	56
7.1 Diagrama de blocos do sistema de controle	56

7.1.1 Bloco 1: <i>setpoint</i>	56
7.1.2 Bloco 2: conversão da entrada de rad/s para bit	56
7.1.3 Bloco 3: controlador proporcional	57
7.1.4 Bloco 4: drive ponte H	57
7.1.5 Bloco 5: motor	58
7.1.6 Bloco 6: encoder	58
7.1.7 Bloco 7: leitura da velocidade do encoder	58
7.2 Algoritmo de controle	58
7.3 Operação e interface homem-máquina	60

#### PARTE IV - CONCLUSÃO

CAPÍTULO VIII - Considerações Sobre o do Sistema de Controle	64
8.1 Do controle proporcional e do sistema de controle	64
8.2 Da Operação e Construção	65
8.3 Do Acionamento e Propulsão	67
8.4 Considerações Finais	68
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
APÊNDICE A - Diagrama de Ligações do Controlador	71
APÊNDICE B - Algoritmo de Controle	72
APÊNDICE C - Desenhos Técnicos	82
APÊNDICE D - Plano de Trabalho	105

# PARTE I

## INTRODUÇÃO

A primeira parte deste trabalho tem como objetivo apresentar a motivação e a fundamentação teórica para a realização do mesmo. Nela, aspectos relativos à necessidade de construção do abrasômetro e os conceitos teóricos fundamentais ao projeto são apresentados.

O Capítulo I trata do emprego de bancadas didáticas na complementação do ensino, sobre a Tribologia, sobre o tribômetros e sobre os objetivos almejados neste trabalho.

O Capítulo II aborda a fundamentação teórica do projeto, com foco no movimento complexo plano e em sua cinemática, assim como na dinâmica do movimento complexo.

O Capítulo III discorre sobre questões relativas às exigências de desempenho e construção do abrasômetro pino-lixo, baseado nas determinações da norma ASTM G-132. Contitui, portanto, o memorial descritivo do projeto.

No Capítulo IV é apresentada a modelagem matemática para a determinação das relações cinemáticas da geração da trilha de desgaste.

No Capítulo V tem-se a especificação e seleção do sistema de propulsão e transmissão de potência para a movimentação do pino.

O Capítulo VI trata da seleção dos componentes do sistema de controle e dos seus periféricos.

A lógica de programação é mostrada no Capítulo VII, com observações sobre algumas características peculiares à plataforma Arduino.

No Capítulo VIII há a conclusão do trabalho, com foco nos problemas encontrados na prototipagem e sugestões para futuras melhorias no projeto.

---

## CAPÍTULO I

### Apresentação

Este trabalho objetiva o projeto e a futura construção de um equipamento que irá compor uma bancada didática, atendendo à uma necessidade específica da instituição. Essa pretensão está intimamente ligada a percepção do autor de que teoria e prática são indissociáveis; de que o aprendizado flui melhor com a observação presencial do fenômeno físico e suas implicações. Quanto mais abstrata é uma ciência, mais necessária se faz a observação dos seus fenômenos; e, observando-os, mais tangível se torna a sua assimilação. Tal afirmação está muito clara dentro do contexto da Tribologia.

Posto essa breve introdução sobre o objetivo deste trabalho, as demais seções tratam dos aspectos técnicos e construtivos do primeiro projeto de abrasômetro pino/lixa da Universidade Federal de Goiás (UFG).

#### 1.1 A contribuição do uso das bancadas didáticas

As bancadas didáticas têm uma contribuição especial na visualização e na fixação da teoria apresentada em sala de aula. Através delas, os teoremas, hipóteses e leis físicas podem ser reproduzidas de maneira rápida e portátil, trazendo ao estudante uma noção real da teoria abordada. Esse benefício se traduz no desempenho das turmas em disciplinas cujo conteúdo é melhor abraçado pela infraestrutura da instituição; ou seja, quanto mais bem equipado o laboratório de determinada disciplina é, melhor o desempenho dos discentes, maior o interesse por iniciação científica e extensão naquela área (e em outras afins) e maior o interesse em pós-graduação e aperfeiçoamento. De fato, bons resultados têm sido alcançados pelo curso, como a obtenção do conceito máximo no Enade por duas avaliações consecutivas, mostrada na figura 1.1.1.

No bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás, diversos recursos didáticos, na forma de bancadas, têm sido apresentados nos últimos anos, nas mais diversas áreas de conhecimento da Engenharia Mecânica. A título de exemplo, na figura 1.1.2 é mostrada a bancada didática para visualização da influência de lubrificantes em rolamentos de esferas, criada por Silvestre (2016); na figura 1.1.3 é possível ver a bancada didática para experimentos de força em superfícies hidrostáticas desenvolvida por Vieira (2016); na figura 1.1.4, têm-se a bancada didática para ensaios de turbocompressores e seus sistemas de lubrificação (parcialmente acabada) apresentada por Silva Neto (2016). Já na figura 1.1.5 é apresentada a bancada hidráulica para a determinação das curvas de perdas de carga para válvulas de pé, projetada por Faria (2015).

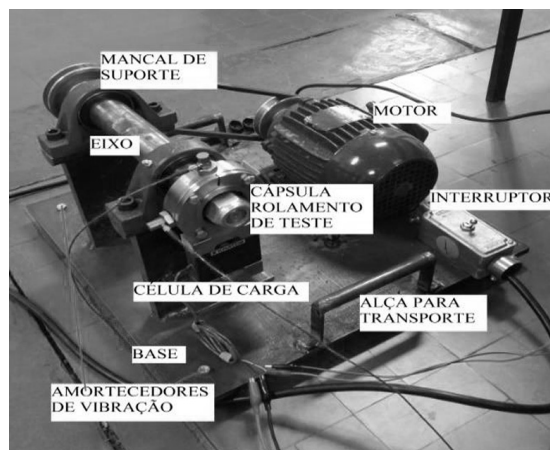
---

Figura 1.1.1 - O Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Goiás atingiu conceito máximo no Enade MEC em suas duas primeiras avaliações



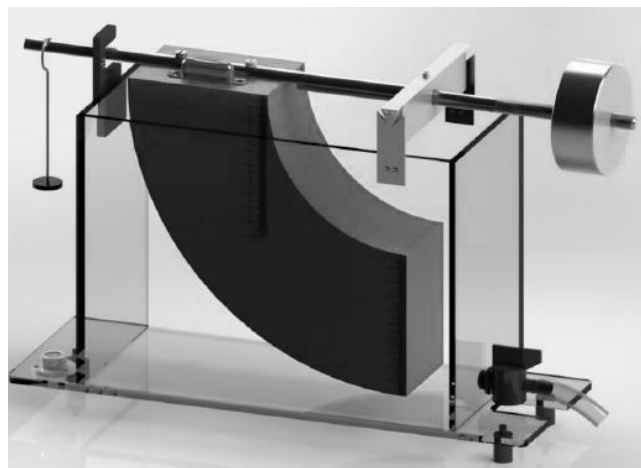
Fonte: (EMC, 2019).

Figura 1.1.2 - Bancada didática para a visualização da influência de lubrificantes em rolamentos de esferas criada por Silvestre (2016)



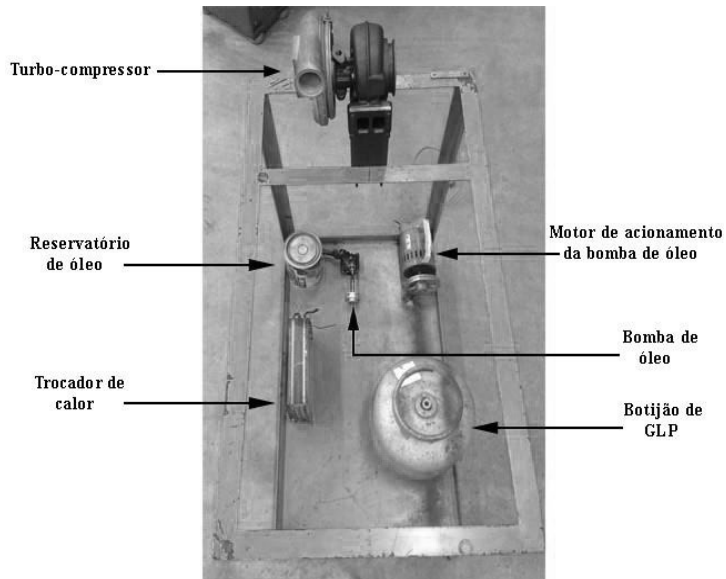
Fonte: (SILVESTRE, 2016).

Figura 1.1.3 - Bancada didática para experimentos de força em superfícies hidrostáticas desenvolvida por Vieira (2016)



Fonte: (VIEIRA, 2016).

Figura 1.1.4 - Bancada didática para ensaio de turbocompressores e seus sistemas de lubrificação apresentada por Silva Neto (2016)



Fonte: (SILVA NETO, 2016).

Figura 1.1.5 - Bancada hidráulica para a determinação das curvas de perdas de carga para válvulas de pé projetada por Faria (2015)



Fonte: (FARIA, 2015).

## 1.2 Tribologia: a ciência do desgaste

Em 9 de março de 1966, na Inglaterra, foi enunciado pela primeira vez o conceito de Tribologia: um dos mais recentes campos de estudo dentro da Engenharia Mecânica. Derivada do grego "*tribo*", que significa esfregar ou atritar, e "*logos*", que significa estudo, a Tribologia tem como objeto o estudo das interações entre superfícies com foco no desgaste; mais amplamente, na remoção ou perda de material. Foi definida por seu criador, Peter Jost,

como "a ciência e a tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo - e das práticas e conteúdos relacionados" (JOST, 1990).

Possui campo largo, envolvendo desde a interação ferramenta/material nos processos de usinagem, passando pela erosão em pás de turbinas, na abordagem complexa da lubrificação nos mais diversos sistemas mecânicos e nas relações de mancal. A tribologia pode ser observada até mesmo em situações mais inusitadas, exteriores ao universo da Engenharia Mecânica, como nas próteses ortopédicas que substituem ossos e cartilagens. No entanto, de maneira contraditória, a sua amplitude foi também a sua limitação: a vastidão da Tribologia, bem como as suas dificuldades intrínsecas, a atrasaram quanto ao reconhecimento como ciência e o seu desenvolvimento. Enquanto Coulomb já estudava o atrito em meados do século XVIII, a Tribologia só veio a ter reconhecimento em meados do século XX (HUTCHINGS, 1992).

Conforme apresentado por Jost (1990), um estudo baseado em vinte e três anos de observação dos prejuízos na indústria, causados por falhas e ineficiências, mostrou que cerca de vinte e oito milhões de libras poderiam ser economizadas somente através de tecnologias que reduzam o atrito nos maquinários industriais. Isso equivalia de 1,3% a 1,6% do PIB inglês (valores de 1965).

O que se pode concluir dessa introdução é que a Tribologia é de vital importância para uma maior produtividade e eficiência na indústria, em especial quando se deseja reduzir custos que oneram desnecessariamente a atividade produtiva. Dessa forma, é preciso que as pesquisas avancem e que novos métodos, materiais e lubrificantes estejam à disposição da indústria. De fato, a Tribologia tem um longo e promissor caminho pela frente. Nesse contexto, canais são abertos para o desenvolvimento das ferramentas que auxiliam o trabalho dos pesquisadores no campo da Tribologia: essas ferramentas são conhecidas, de maneira usual, como tribômetros.

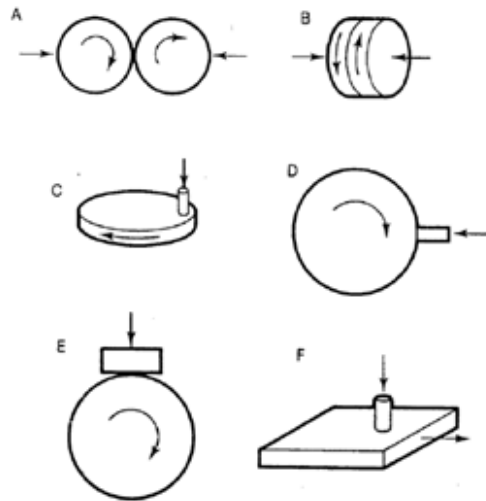
### 1.3 Os tribômetros e a sua importância

Para que pesquisas possam ser realizadas no campo da Tribologia, equipamentos que simulam determinados mecanismos de desgaste, ou até mesmo condições reais de uso do objeto de estudo, são necessários. Tais equipamentos são chamados, de uma maneira ampla e genérica, de tribômetros (tradução da palavra inglesa "*tribometers*"). Nesses equipamentos, o controle e a aferição das variáveis relacionadas ao desgaste é crucial para que os ensaios sejam representativos como simulação ou condições reais de uso (HUTCHINGS, 1992).

Os tribômetros, tais como os exemplos mostrados na figura 1.3.1, podem ser classificados de duas formas: simétricos e assimétricos. Os tribômetros simétricos são aqueles nas quais duas superfícies de contato, feitas do mesmo material, experimentarão a mesma taxa de desgaste (figura 1.3.1 A e B); e os assimétricos (figura 1.3.1 C, D, E e F) são aqueles onde as duas superfícies, ainda que do mesmo material, provavelmente experimentarão taxas de desgaste diferentes. O segundo conceito de tribômetro apresentado é o mais comumente utilizado e o que terá atenção especial nesse trabalho, pois é o tipo de tribômetro projetado.

---

Figura 1.3.1 - Conceitos de tribômetros simétricos e assimétricos



Fonte: (HUTCHINGS, 1992).

Conceitos de tribômetros assimétricos mais empregados envolvem um pino pressionado contra um disco rotativo, na face plana (figura 1.3.1 C). Normalmente, um dos objetos em contato é tratado como amostra, ou seja, objeto em torno do qual se medem as variáveis de interesse; o outro objeto em contato é denominado contraface. Para que se obtenham valores de pressão (ou tensão) de contato necessárias ao desgaste, é comum manter a amostra carregada por meio da aplicação de pesos mortos, ou algum outro mecanismo de aplicação de carga (HUTCHINGS, 1992).

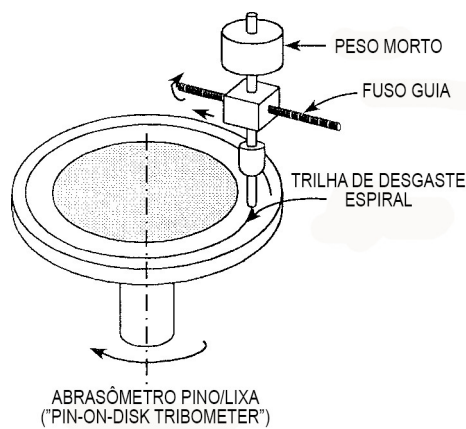
Os parâmetros de ajuste em ensaios com tribômetros assimétricos são a força de atrito, a perda de material e, em alguns casos, o comprimento da trajetória (ou trilha) de desgaste; a primeira é medida através de células de carga, enquanto a segunda é medida pela diferença de peso da amostra antes e depois do ensaio. Já os parâmetros de ensaio incluem a carga normal (aplicada pelos pesos mortos), a velocidade com que a amostra ou a trilha de desgaste se desloca (por exemplo, rotação no disco) e, em alguns casos, a temperatura da amostra.

O tipo de tribômetro no qual esse trabalho foca, também conhecido mais especificamente como abrasômetro pino-lixo (*pin-on-disk tribometer*, em inglês), é mostrado na figura 1.3.1 C e em maiores detalhes na figura 1.3.2. Esse abrasômetro é constituído por um pino (amostra), que pode ou não rotacionar em torno do seu próprio eixo e que é deslocado radialmente, da borda em direção ao centro do disco, cuja superfície está encoberta de material abrasivo e rotacionando em torno do próprio eixo. Dessa forma, é notável que a trilha de desgaste produzida pelo abrasômetro pino-lixo é uma espiral. Também é possível, conforme interesse do usuário, realizar o ensaio com um filme de lubrificante adicionado sobre o abrasivo no disco. Isso é obtido pela construção de um pequeno reservatório, estanque, de modo a reter o lubrificante sobre o disco, evitando que este escape sob a ação da aceleração centrífuga.

De maneira geral os tribômetros de série, isto é, produzidos por fa-

bricantes especializados, possuem como vantagens uma excelente precisão no controle dos parâmetros de ensaio, além de grande exatidão na obtenção dos parâmetros de interesse; design atrativo e interface homem-máquina melhor projetada para facilitar o trabalho do usuário. Como desvantagens têm-se o alto custo de aquisição destes equipamentos e a dificuldade de manutenção dos mesmos, sendo na maioria dos casos necessária mão de obra estrangeira. São construídos com materiais leves e de elevada resistência à corrosão, próprios para uso em ambiente de laboratório. Via de regra controlados totalmente por software próprio do fabricante, instrumentados com diversos sensores (de força, temperatura, velocidade e etc.) e movidos através de motores de passo, com elevada precisão.

Figura 1.3.2 - Abrasômetro pino-lixo (pin-on-disk tribometer)



Fonte: (ASTM G132-96, 2013).

## CAPÍTULO II

### Fundamentação Teórica

Este capítulo traz a fundamentação teórica necessária ao projeto do abrasômetro pelo ponto de vista da cinemática de mecanismos, dos elementos de máquinas, da propulsão, da eletrônica de potência e dos sistemas de controle e seus periféricos, respaldada nas exigências da norma técnica ASTM G132-96.

#### 2.1 Análise de mobilidade da trilha de desgaste

Segundo Norton (2010), graus de liberdade (de maneira abreviada, GDL) podem ser compreendidos como o número mínimo de parâmetros ou variáveis, independentes entre si, necessários para definir uma, e somente uma, posição no espaço em qualquer instante de tempo. Como de costume nas análises e modelagens físicas, é interessante que os graus de liberdade sejam baseados em algum tipo de sistema de referência, como coordenadas cartesianas ou polares. Quanto maior o número de graus de liberdade de um sistema, maior será a sua mobilidade.

Da interpretação do conceito de graus de liberdade, doravante GDL, é possível inferir que, por exemplo, uma entidade que descreva algum tipo de movimento que esteja contido em um plano possui ao menos dois GDL; isso é válido tanto no sistema cartesiano, quando o movimento é descrito por coordenadas no eixo das abscissas e no eixo das ordenadas, como no sistema polar, quando o movimento é descrito por um ângulo e um comprimento em relação à origem.

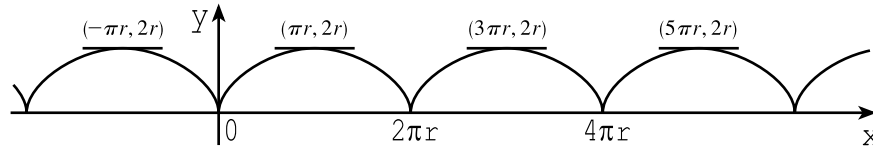
Movimento, sob o prisma da Mecânica e da Física, é definido como uma alteração da posição de uma partícula em função do tempo, corpo rígido ou sistema físico em um dado sistema referencial. O movimento é usualmente dividido em três classes: rotação, translação e a combinação dos dois anteriores, denominado de movimento complexo. Na rotação, todas as partículas do corpo descrevem trajetórias circulares ao redor de um ponto relativamente fixo, com a mesma velocidade ou frequência angular; já na translação, todas as partículas do corpo descrevem trajetórias retílineas (ou curvilíneas), paralelas entre si e com a mesma velocidade linear. Quando as partículas de um corpo realizam movimento com características tanto rotativas quanto translacionais, o movimento é, então, dito complexo (NORTON, 2010).

Em um sistema de referencial cartesiano, o movimento complexo plano pode ser representado por três parâmetros: uma coordenada abscissa e uma coordenada ordenada, representando o movimento de translação; e uma coordenada angular, representando o movimento de rotação. Nesse caso o movimento apresenta três GDL, como na figura 2.1.1, onde há a representação da traje-

---

tória que um ponto qualquer, pertencente à roda de um veículo, descreve durante o movimento complexo ao qual está sujeito. Essa trajetória, ou curva, é conhecida popularmente como cicloide (STEWART, 2007).

Figura 2.1.1 - Trajetória da cicloide



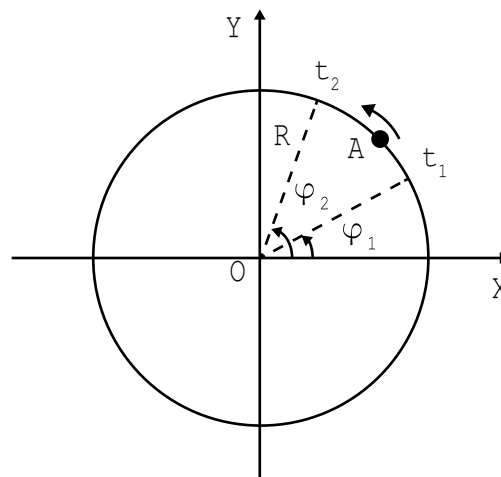
Fonte: (STEWART, 2007).

## 2.2 O movimento circular de corpos rígidos

Uma vez definido o movimento rotativo (ou circular), convém que sejam apresentadas as características algébricas dessa classe de movimento. Primeiramente, têm-se como corpo rígido um conjunto finito de partículas, intrinsicamente agregadas, cuja geometria é indeformável e imutável (YOUNG et al., 2008). Obviamente, essa é uma definição idealizada de modo a simplificar a abordagem analítica do fenômeno físico.

Seja  $O$  um eixo fixo, ou seja, que permanece em repouso em relação a algum referencial inercial, posicionado perpendicularmente ao plano horizontal (plano da folha); e  $A$  algum corpo rígido descrevendo uma trajetória circular ao redor de  $O$ , à uma distância  $R$  do mesmo, como mostrado na figura 2.2.1. No instante de tempo  $t_1$ ,  $A$  está na posição  $\varphi_1$  e se deslocando para a posição  $\varphi_2$ , a qual será atingida no instante de tempo  $t_2$ . Aplicando o conceito elementar de velocidade média como a variação do espaço num dado intervalo de tempo, define-se a grandeza velocidade angular média, representada pela letra grega  $\omega_0$  (ômega zero), mostrada na equação 2.1. A velocidade angular instantânea, aqui representada apenas por  $\omega$ , é resultado da aplicação do limite quando o tempo do deslocamento se aproxima de zero, equação 2.2 (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

Figura 2.2.1 - Movimento circular genérico



Fonte: autoria própria.

Vale ressaltar que a velocidade é uma grandeza vetorial: possui módulo, direção e sentido. O módulo é o valor numérico obtido da aplicação das equações 2.1 e 2.2; a direção é o eixo em torno do qual o corpo rígido rotaciona, como o eixo 0 da figura 2.3.1, e o sentido indica se o corpo rígido rotaciona de modo horário (convencionado como negativo) ou anti-horário (convencionado como positivo). Em todo caso, o vetor velocidade angular pode ser representado como na equação 2.3, em que o sinal positivo indica rotação anti-horária, já mencionada, e  $\mathbf{k}$  é o vetor unitário que representa a direção do movimento de rotação.

$$\omega_0 = \frac{\theta_1 - \theta_2}{t_1 - t_2} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (2.1)$$

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.2)$$

$$\vec{\omega} = |\omega| \mathbf{k} \quad (2.3)$$

Dado um corpo rígido qualquer em movimento rotativo, pontos diferentes desse corpo se moverão percorrendo arcos de comprimentos diferentes e, obviamente, percorrendo distâncias diferentes. Contudo, todos os pontos rotacionam com a mesma medida angular e no mesmo instante. Portanto, todos os pontos de um corpo rígido em rotação possuem a mesma velocidade angular num dado instante de tempo (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

O módulo da velocidade linear na rotação de um corpo rígido (velocidade tangencial), tratado como  $\mathbf{V}_T$ , é a velocidade com que o corpo rígido percorre, linearmente, a trajetória circular a que está sujeito. É obtida facilmente da relação entre o ângulo,  $\varphi$ , o raio  $\mathbf{R}$  e o comprimento do arco  $\mathbf{S}$ , equação 2.4, e derivando-a em relação ao tempo  $\mathbf{t}$ . O resultado é a equação 2.5.

$$S = R\theta \quad (2.4)$$

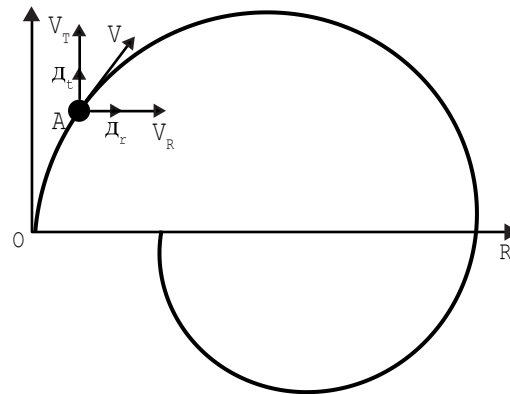
$$V_T = \omega R \quad (2.5)$$

### 2.3 O movimento complexo em trajetória de espiral

Posto que, como definido na seção 2.1, o movimento plano envolve dois graus de liberdade: o que implica duas dimensões para definir sua posição e velocidade, convém que agora sejam definidas expressões para a posição e a velocidade de um deslocamento em espiral.

Considere o corpo rígido  $\mathbf{A}$  se deslocando segundo uma trajetória de espiral à velocidade linear,  $\mathbf{V}$ , constante (figura 2.3.1). Em qualquer ponto do deslocamento, o vetor  $\mathbf{V}$  é tangente à trajetória. Tomando  $\mathbf{D}_r$  e  $\mathbf{D}_t$  (letra cirílica "De") como vetores unitários orientados nas direções radial e tangencial, respectivamente, e as componentes radial e tangencial do vetor velocidade linear apontando para a mesma direção de cada vetor unitário, o vetor velocidade linear pode ser escrito em termos de suas componentes como na equação 2.6. Substituindo a equação 2.5 na equação 2.6, obtém-se a expressão para a velocidade resultante (velocidade linear) em função do raio da espiral e da velocidade angular em cada ponto, equação 2.7. Note que o vetor unitário do termo velocidade tangencial é substituído pelo vetor unitário  $\mathbf{D}_z$ , que

Figura 2.3.1 - Velocidade no movimento em trajetória espiral



Fonte: autoria própria.

sinaliza a rotação em torno do eixo  $Z$ , perpendicular ao plano do movimento, orientado no sentido positivo (antihorário).

O módulo do vetor velocidade é a raiz quadrada da soma dos seus componentes ao quadrado, visto na equação 2.8.

$$\vec{V} = V_r \mathbb{D}_r + V_t \mathbb{D}_t \quad (2.6)$$

$$\vec{V} = V_r \mathbb{D}_r + (\omega r) \mathbb{D}_z \quad (2.7)$$

$$|\vec{V}| = v = \sqrt{V_r^2 + (\omega r)^2} \quad (2.8)$$

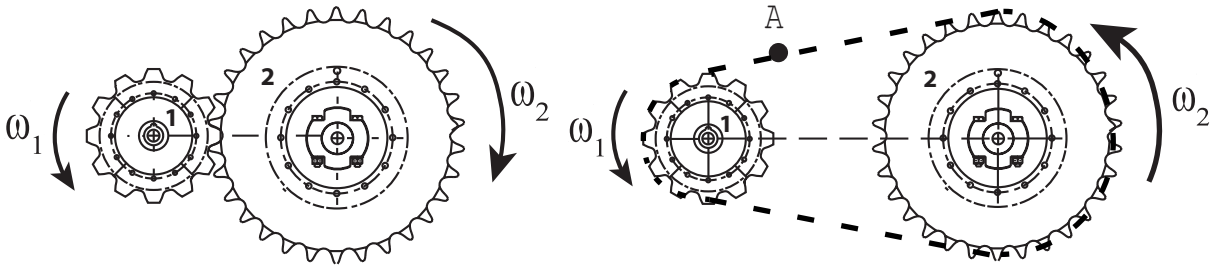
## 2.4 A lei fundamental do engrenamento

Suponha duas rodas dentadas acopladas, com velocidades angulares  $\omega_1$  e  $\omega_2$  distintas, e raios primitivos  $R_1$  e  $R_2$  (raio no perímetro de contato) como mostrado na figura 2.4.1. Se o atrito ou a geometria de acoplamento na interface entre ambas não permitir deslizamentos, então a velocidade linear periférica com que ambas rotacionam é igual. Dessa forma, a aplicação da equação 2.5 tanto para a roda dentada 1 quanto para a roda dentada 2 da figura 2.4.1 resulta na equação 2.11 (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Esse princípio também é válido para acoplamentos em que as rodas dentadas não estão em contato direto, mas sim através de elementos flexíveis, como é o caso da transmissão de potência por correias dentadas e correntes de roletes. Nota-se que, de maneira análoga às rodas dentadas em contato direto, se não houver escorregamento entre as rodas dentadas 1 e 2 e o elemento flexível, a velocidade linear periférica permanecerá a mesma para ambas, e o ponto  $A$  também se deslocará com velocidade constante. Nesse caso, a equação 2.11 também é aplicável. Portanto, à equação 2.11, dá-se o nome de lei fundamental do engrenamento e os seus termos são conhecidos como relação de transmissão (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.11)$$

Figura 2.4.1 - Duas rodas dentadas acopladas diretamente (esquerda) e indiretamente (direita)



Fonte: autoria própria.

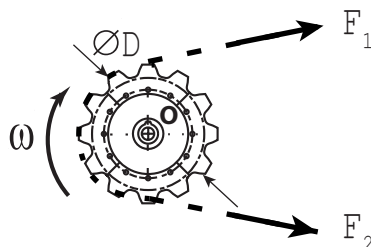
A título de exemplo, uma relação de transmissão de 1:3 implica que uma roda dentada tem o diâmetro primitivo três vezes maior que o seu par. Dessa forma, ela rotacionará a uma velocidade angular três vezes menor que a roda dentada de menor diâmetro.

## 2.5 Torque e potência

Seja a roda dentada de diâmetro  $D$  e velocidade angular  $\omega$ , da figura 2.5.1, rotacionada por elemento flexível. Assumindo que o acoplamento obedece à lei fundamental do engrenamento, então ela estará sujeita às forças  $F_1$  e  $F_2$  constantes, bem como a velocidade angular também se manterá constante. Assim, o torque transmitido,  $T$ , é obtido da análise de equilíbrio estático em relação ao mancal  $O$ , mostrado na equação 2.12.

Segundo Young et al. (2008) a potência,  $P$ , pode ser definida como o quão rápido um trabalho é realizado; isto é, o quão rápido uma força produz um determinado deslocamento. Logo, a potência em uma relação de engrenamento é calculada como na equação 2.13 e é válida tanto para transmissões com elementos flexíveis quanto para transmissões com elementos em contato direto. Vale ressaltar que a potência real da transmissão será ligeiramente menor que a potência nominal, devido à perdas de rendimento causadas por efeitos como, por exemplo, a ação poligonal em correntes de roletes.

Figura 2.5.1 - Diagrama de forças no elemento flexível de uma roda dentada



Fonte: autoria própria.

$$F_1 - F_2 = \frac{2T}{D} \quad (2.12)$$

$$P = (F_1 - F_2)V = T\omega \quad (2.13)$$

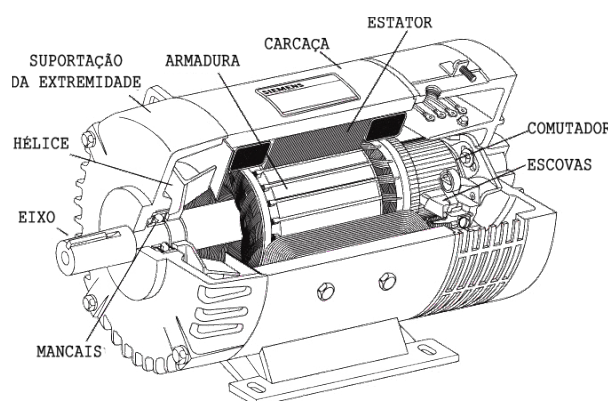
## 2.6 Motores elétricos de corrente contínua

Segundo Petruzella (2013), um motor elétrico é um dispositivo cuja finalidade é converter energia elétrica em energia mecânica através da interação entre campos magnéticos. Constituem, de modo prático, máquinas motrizes que convertem energia elétrica em trabalho de eixo.

Os motores elétricos que recebem atenção neste trabalho são aqueles que funcionam com corrente contínua, também conhecidos como motores CC ou DC (*direct current*). Um exemplo é mostrado na figura 2.6.1. As principais vantagens características dos motores DC são (PETRUZELLA, 2013):

- Torque preciso;
- Acionamento de precisão;
- Melhor controle da velocidade de rotação;
- Maior estabilidade da velocidade de rotação, tanto com carga quanto sem carga;
- Elevado torque de partida.

Figura 2.6.1 - Corte esquemático de um motor DC



Fonte: (PETRUZELLA, 2013).

Um motor DC é composto de um elemento móvel, chamado armadura, que gira suportado por mancais dentro de um elemento fixo chamado estator. Elementos de atrito denominados escovas fazem o contato elétrico entre a alimentação do motor e o comutador, acoplado à armadura. Em alguns casos uma hélice, que rotaciona conjuntamente com a armadura, produz a ventilação necessária ao resfriamento do motor.

As principais desvantagens dos motores DC são (PETRUZELLA, 2013):

- Maior complexidade técnica no projeto e na fabricação;
- Maior custo quando comparados aos motores de corrente alternada de mesma potência;
- Manutenção mais dispendiosa, especialmente pela substituição das escovas desgastadas e o comutador;
- Em alguns casos, necessidade de drives e/ou fontes específicas de alimentação (motores brushless e de passo).

## 2.7 CLP e microcontroladores

A NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) define os CLPs como sendo:

Um equipamento eletrônico que funciona digitalmente e que utiliza uma memória programável para o armazenamento interno de instruções para implementar funções específicas, tais como lógica, sequenciamento, registro e controle de tempos, contadores e operações aritméticas para controlar, através de módulos de entrada/saída digitais (LIGA/DESLIGA) ou analógicos (1-5 Vcc, 4-20 mA etc.), vários tipos de máquinas ou processos. (FRANCHI, 2008, p. 24)

Em todo caso, os CLPs são computadores robustos, de arquitetura simples, construídos para o trabalho em ambientes hostis, tais como a indústria. Possuem interface homem-máquina amigável e facilidade na programação e alteração dos comandos (FRANCHI, 2008, p. 24).

Os CLPs trabalham com entradas e saídas digitais, isto é, entradas do tipo "ligado" e "desligado". Alguns CLPs também trabalham com entradas e saídas analógicas, para processos específicos de controle.

Segundo Franchi (2008) o funcionamento de um CLP pode ser dividido em três partes (figura 2.7.1):

- Sensores/transdutores, que convertem condições físicas tais como fenômenos elétricos, mecânicos, térmicos e químicos em sinais elétricos que posteriormente serão lidos através das entradas do CLP;
- Atuadores, que convertem o sinal elétrico de saída processado no CLP em algum efeito, como por exemplo acionamento de motores, solenoides, chaveamentos, etc.;
- Controladores, que processam os sinais de entrada, conforme o algoritmo programado e armazenado na memória do CLP, e geram os sinais de saída desejados.

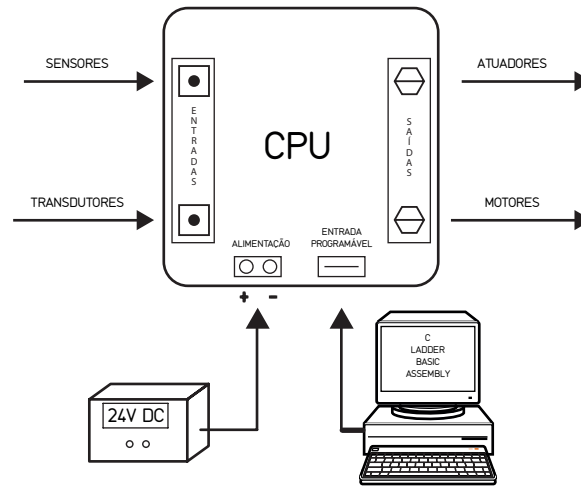
A operação de um CLP (figura 2.7.1) envolve uma fase inicial de programação, em que um algoritmo relaciona os sinais de entrada e determina como os mesmos devem ser processados para que então o CLP gere os sinais de saída desejados. A programação pode ser feita na própria interface do CLP, quando existente, ou através de portas e conexões para computadores ou outros CLPs externos. Não é necessário que a entrada programável esteja sempre conectada a um computador; os CLPs mais simples já contém memória interna fixa para o armazenamento do algoritmo programado.

O principal componente de um CLP é o microcontrolador. Através dele, o algoritmo armazenado na memória interna do CLP é processado, em função dos sinais adquiridos nas portas de entrada do CLP, para então serem executadas as ações de interesse que serão enviadas aos atuadores através das portas de saída. Para Floyd (2007) um microcontrolador pode ser compreendido como um circuito integrado digital programável, capaz de executar uma série de operações sobre dados, como operações lógicas, aritméticas, transferência de dados e tomada de decisões.

---

A operação de um microcontrolador envolve três passos básicos (FLOYD, 2007):

Figura 2.7.1 - Esquema conceitual do funcionamento de um CLP



Fonte: autoria própria.

1. Busca da instrução (algoritmo) na memória interna e transferência para a CPU;
2. Decodificação da instrução, de modo a reunir todas as informações necesserárias à execução da instrução e os passos seguintes à instrução;
3. Execução da instrução, com posterior envio dos dados processados à memória e/ou às saídas da CPU.

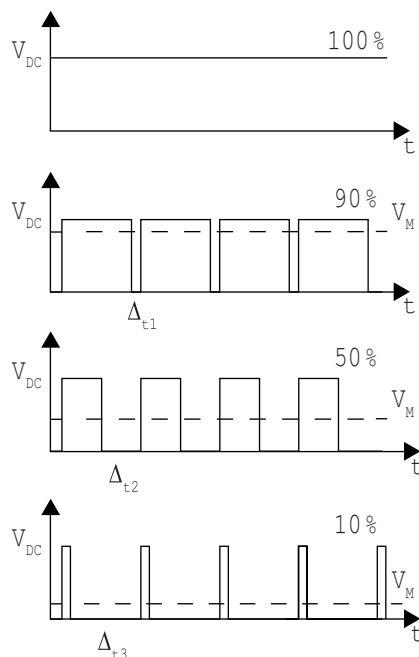
Um microcontrolador reúne, como vantagens, a habilidade em controlar a partida, parada, seleção e regulação da velocidade de rotação e torque de motores, bem como prover proteção contra sobrecargas e falhas. São, assim, muito úteis em aplicações de controle de velocidade de motores de corrente alternada, através da inversão de frequência, e contínua (PETRUZELLA, 2013).

## 2.8 Controle da velocidade por modulação da largura de pulso

O método de controle por modulação da largura de pulso, do inglês *pulse width modulation*, (PWM) é o método mais comumente empregado no controle da velocidade de motores DC. Trata-se de um método onde é provocado um chaveamento (ou comutação) da tensão de alimentação do motor, ligando-a e desligando-a a uma dada frequência de interesse, com variação do tempo liga/desliga (*on/off*). A relação entre esses tempos é chamada de ciclo de trabalho ou *duty cycle*, em inglês (PETRUZELLA, 2013).

Como exemplo, têm-se a figura 2.8.1, onde uma tensão contínua  $V_{DC}$  é chaveada para diversos ciclos de trabalho, de 100% a 10%, com diferentes variações de tempo *on/off*,  $\Delta t$ , obtendo assim diferentes velocidades de rotação para um dado motor DC.

Figura 2.8.1 - Exemplo de tensão DC modulada através da largura de pulso



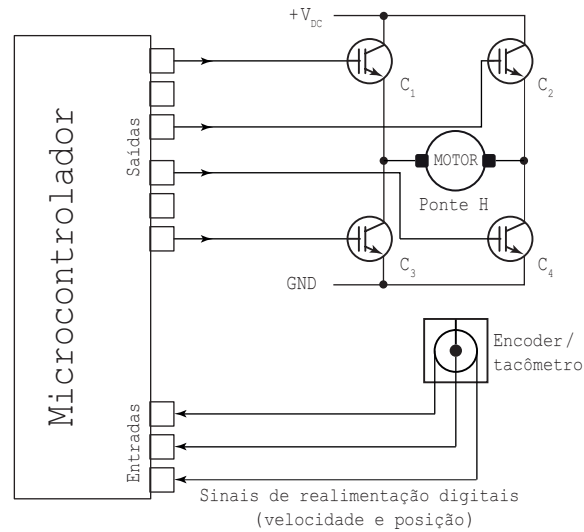
Fonte: autoria própria.

Nos sistemas de controle de velocidade de motores DC mais atuais, a frequência de chaveamento PWM é gerada com o auxílio de microcontroladores, programados de modo a gerar frequências que proporcionem velocidades de rotação precisas dos motores. O chaveamento é feito através de um circuito inversor do tipo ponte H completa, também conhecido simplesmente como ponte H ou drive ponte H (figura 2.8.2), onde as chaves  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$  são abertas e fechadas de modo sincronizado, conforme a frequência de interesse para o ciclo de trabalho. Quanto maior for o ciclo de trabalho gerado pelo microcontrolador, maior será a velocidade de rotação do motor.

O chaveamento da tensão nominal altera a tensão média,  $V_M$ , de alimentação do motor (figura 2.8.1), que é função do tempo em que a tensão de alimentação permanece desligada: quanto menor o ciclo de trabalho, menor a tensão média será. Entretanto, o controle PWM não altera o valor da tensão de pico  $V_{DC}$ , o que também implica na constância da corrente de alimentação. Assim, o conjugado (torque) do motor não sofre queda e permanece constante (para determinadas frequências de chaveamento), como ilustrado na figura 2.8.3 (UMANS, 2014).

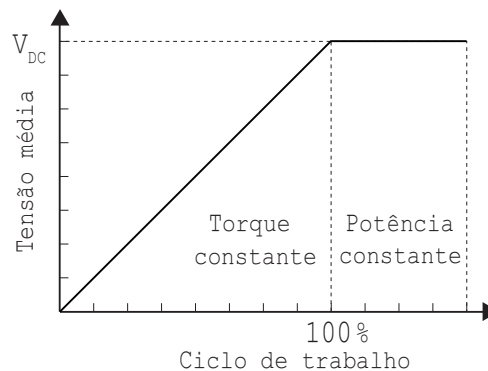
É prática comum no controle de um motor que a velocidade de rotação seja lida em tempo real, através de transdutores do tipo tacômetro ou encoder, que enviam um sinal de resposta às entradas do microcontrolador; este, por sua vez, é capaz de aplicar correções precisas caso a velocidade real do motor não esteja de acordo com a velocidade programada (figura 2.8.2). A este tipo de arranjo dá-se o nome de sistema de controle da velocidade do motor em malha fechada (PETRUZELLA, 2013). Caso o sistema não tenha leitura em tempo real da velocidade de rotação, não há garantia de que nas condições de plena carga do motor ou rotação em vazio (sem carga), a velocidade determinada pelo ciclo de trabalho seja, de fato, a velocidade de rotação real do motor.

Figura 2.8.2 - Exemplo de um sistema de controle de velocidade em malha fechada



Fonte: autoria própria.

Figura 2.8.3 - Relação entre a tensão de alimentação e o ciclo de trabalho PWM



Fonte: (PETRUZELLA, 2013).

## 2.9 Concepção do sistema de controle

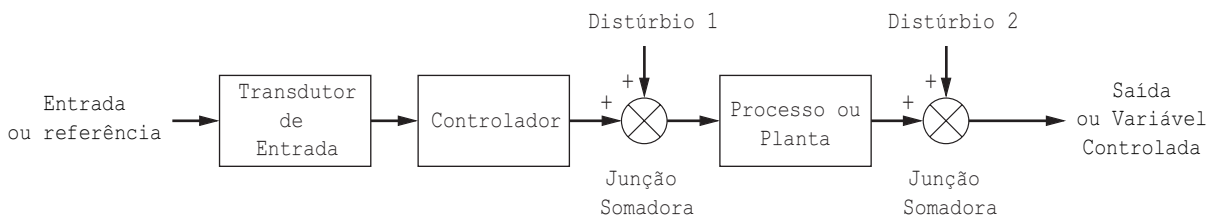
Para Nise (2002) um sistema de controle é composto de diversos subsistemas cujo propósito é controlar as saídas (ou repostas) de um processo. Os sistemas de controle têm como vantagens a capacidade de controlar, por exemplo, a posição de corpos rígidos, sua velocidade e aceleração. Além disso, também têm a habilidade de corrigir eventuais desvios e perturbações que possam ocorrer durante o processo, de maneira autônoma. Permitem, ainda, a automatização de processos, dispensando ou minimizando a interferência humana.

Quando um sistema de controle não é capaz de medir o sinal de saída, diz-se que o sistema é de malha aberta. Tais sistemas de controle são mais baratos e fáceis de serem implementados, entretanto, são menos precisos e necessitam de calibrações e ajustes frequentes. Já quando o sistema de controle é capaz de medir o sinal de saída, comparar com o sinal de entrada e aplicar eventuais correções para atenuar ou anular os efeitos de distúrbios no sistema, diz-se que o sistema é de malha fechada. Este, por sua vez, garante maior precisão no processo, porém é de maior custo e complexidade de implementação (NISE, 2002).

Dois exemplos de sistemas de controle são mostrados nas figuras 2.9.1 e 2.9.2. O primeiro consiste em um sistema de controle de malha aberta; o segundo, malha fechada. Na figura 2.9.2 é destacado que, para que o sistema possa medir o sinal de saída, é necessário um sensor ou transdutor. Tal processo é conhecido como retroação ou *feedback*.

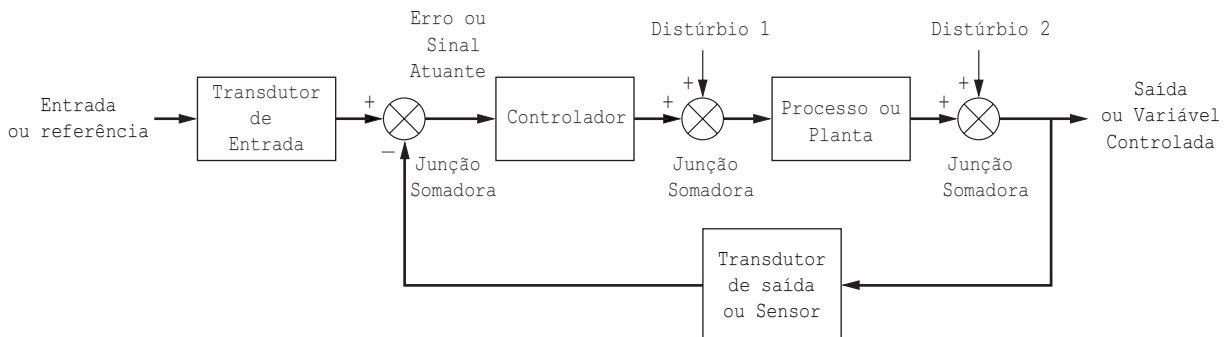
A técnica de controle mais simples e básica existente, aplicada a sistemas de malha fechada é o controle proporcional. Bottura (1982) define controle proporcional como a alteração do ganho em malha aberta, de modo proporcional à diferença entre o sinal de referência e o sinal de realimentação, com o intuito de corrigir a dispersão entre ambos. O ganho é compensado pela adição ou subtração (*offset*) do módulo da diferença entre o sinal de referência (*setpoint*) e o sinal de realimentação (*feedback*).

Figura 2.9.1 - Sistema de controle de malha aberta



Fonte: (NISE, 2002).

Figura 2.9.2 - Sistema de controle de malha fechada



Fonte: (NISE, 2002).

---

## CAPÍTULO III

### Memorial Descritivo

Este capítulo apresenta as especificações e exigências da ASTM G132-96 para o projeto, construção e operação dos abrasômetros pino-lixo. Considerações sobre o funcionamento, sobre o ambiente de uso e sobre os requisitos de desempenho do equipamento são relatadas. As variáveis de projeto e de interesse também são identificadas e relacionadas.

#### 3.1 Definição do ensaio e parâmetros: a ASTM G132-96

A classe específica de tribômetro tratada neste trabalho, conhecida como abrasômetros de pino-lixo ou abrasômetros de pino deslizante, possui uma norma técnica que determina parâmetros como pressão de contato, diâmetro da amostra, velocidades de deslocamento, entre outros. Essa norma técnica é a *American Society for Testing and Materials G132-96* (de maneira resumida, ASTM G132-96), com vigência atual da versão editada no ano de 2013.

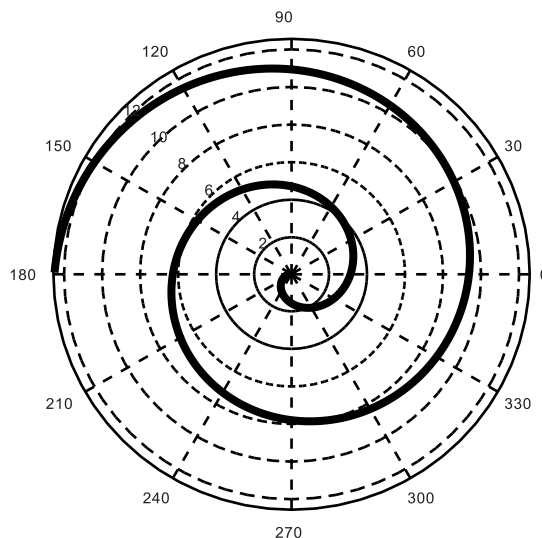
O ensaio é definido como um pino, com diâmetro e material especificados, rotacionando ou não em torno do seu próprio eixo a uma velocidade angular determinada, que é deslocado linearmente na direção radial, da borda ao centro do disco; este, cuja superfície está encoberta por material abrasivo adequado, também rotaciona a uma velocidade angular definida. Pesos mortos são colocados no suporte do pino, de modo a produzirem uma pressão de contato suficiente entre o pino e o disco, induzindo desgaste e perda de material no pino.

Durante o deslocamento do pino sobre o disco, figura 1.3.1 (C), uma célula de carga ou instrumento semelhante deve ler o sinal proporcional à força de atrito recebida pelo pino. O pino tem sua massa mensurada antes e após o ensaio e, dessa forma, é possível quantificar a massa perdida pelo desgaste sofrido.

O ensaio começa com o pino e o disco já sob contato e com a pressão de contato imprimida pelos pesos mortos já aplicada. Uma exigência crucial da ASTM G-132 neste tipo de tribômetro é que, para que a velocidade linear se mantenha constante, ou seja, a velocidade com que o pino gera a trajetória em espiral, a velocidade de rotação do disco deve variar inversamente com a distância radial do pino ao centro do disco. O pino deve ter comprimento exposto (fora do suporte) máximo de 4 mm, para que se evite a flambagem do mesmo sob o carregamento dos pesos mortos. Eventualmente, o pino pode ter seção transversal diferente da circular, de acordo com o interesse do usuário do abrasômetro. A leitura da força, através da célula de carga, deve ser realizada simultaneamente e de maneira contínua durante todo o ensaio.

---

Figura 3.1.1 - Representação da trajetória da trilha de desgaste



Fonte: próprio autor.

Da leitura e interpretação da ASTM G132-96, extrai-se os parâmetros mostrados nas tabelas 3.1.1 e 3.1.2. Nelas, são mostrados valores de pressão nominal de contato entre o pino e o disco, diâmetros e velocidades de rotação para o pino e o disco, faixa de velocidade linear admitida, tolerâncias para o desalinhamento máximo entre o pino e o disco e tolerância para variação de velocidade do motor. Alguns parâmetros, como destacados nas tabelas 3.1.1 e 3.1.2, são obtidos por indicação da ASTM G132-96; outros, da norma técnica ASTM G99-95, cujo foco é outro tipo de tribômetro e não será tratada neste trabalho.

Há, ainda, como especificações da norma técnica, a recomendação de que o abrasômetro pino-lixo deve possuir características construtivas que evitem, ou controlem, a vibração produzida durante o ensaio. Os mancais também devem suportar carregamentos maiores do que o carregamento nominal máximo a que o abrasômetro possa ser exposto. Além disso, o abrasômetro deve ser montado, ou suportado, por uma superfície firme, estável e nivelada.

O carregamento pode, também, ser aplicado ao pino por meio de servomecanismos pneumáticos ou hidráulicos, em detrimento de pesos mortos. Contudo, a ASTM G132-96 recomenda que pesos mortos sejam usados, de modo a se evitar eventuais flutuações de aplicação da carga que podem ocorrer nestes mecanismos. Vale ressaltar que, como mostrado na tabela 2.1.2, a pressão de contato entre o pino e o disco deve variar entre 1 à 2,5 MPa, tendo 2 MPa como ponto ótimo; essa recomendação é justificada, pela ASTM G132-96, como sendo a faixa onde o desgaste é proporcional ao carregamento aplicado.

Com relação ao abrasivo, é recomendado que este possua partículas de tamanho médio variando entre 65 a 175  $\mu\text{m}$  e que seja colado, com resina sintética ou orgânica, à papel, tecido ou plástico (filme de poliéster, por exemplo). O abrasivo deve cobrir entre 50 a 70% da área de superfície do disco e ser uniformemente distribuído sobre ela. Salienta-se que, dadas as condições do abrasivo e sua fixação, normalmente não uniforme sobre o disco,

as variações de abrasividade são toleráveis para  $\pm 20\%$  da abrasividade média do material; isso implica que diferentes pinos do mesmo material, ensaiados com o mesmo abrasivo, podem apresentar resultados diferentes. Há, por isso, a necessidade de se realizar vários ensaios e, com os dados coletados, realizar um tratamento estatístico. A temperatura ambiente durante a realização do ensaio deve estar entre 20 e 25°C.

Tabela 3.1.1 - Velocidade angular e diâmetro do pino e do disco

	Velocidade de rotação (rpm)	Diâmetro (mm)
Pino	15 a 50	2 a 10
Disco	60 a 600	30 a 100

Fonte: ASTM G132-96 e ASTM G99-95.

Tabela 3.1.2 - Parâmetros gerais do abrasômetro pino/lixa

Pressão nominal de contato entre o pino e o disco	1 a 2,5 MPa (ideal: 2 MPa)	ASTM G132-96: seção 8.1
Velocidade linear	1 a 10 cm/s	ASTM G132-96: seção 8.2
Comprimento máximo exposto do pino	4 mm	ASTM G132-96: seção 9.6
Desalinhamento máximo entre pino e disco	+/- 1°	ASTM G99-95: seção 6.2
Varição máxima da veloc. nominal do motor	+/- 1%	ASTM G99-95: seção 5.2

Fonte: ASTM G132-96 e ASTM G99-95.

### 3.2 Esboço conceitual do abrasômetro pino-lixo

Um modelo eficiente para abrasômetros pino-lixo é mostrado na figura 3.2.1, baseado no abrasômetro desenvolvido pelo Laboratório de Tribologia e Materiais da Universidade Federal de Uberlândia. Basicamente consiste de um braço (parte superior) onde são acoplados o motor de rotação do pino e os pesos mortos ao lado direito; a célula de carga para a medição do esforço de atrito radial no centro do braço; o contrapeso para anular o peso da estrutura do braço no lado esquerdo. A estrutura do braço é pivotada nos pontos C e D, configurando, assim, um mecanismo de quatro barras do tipo paralelogramo; dessa forma é garantido que quando a roldana (ponto B) atinja a cunha de suspensão do pino no lado direito, ao final do ensaio, o pino permaneça na posição perpendicular em relação à superfície do disco. A cunha de suspensão do lado esquerdo tem por finalidade garantir margem de tempo para que os três motores entrem em regime permanente de funcionamento antes que o pino toque o disco, no início do ensaio. Já a cunha de suspensão do lado direito tem por objetivo elevar o pino, quando este atinge o centro do disco, evitando a sobreposição da trilha de desgaste gerada.

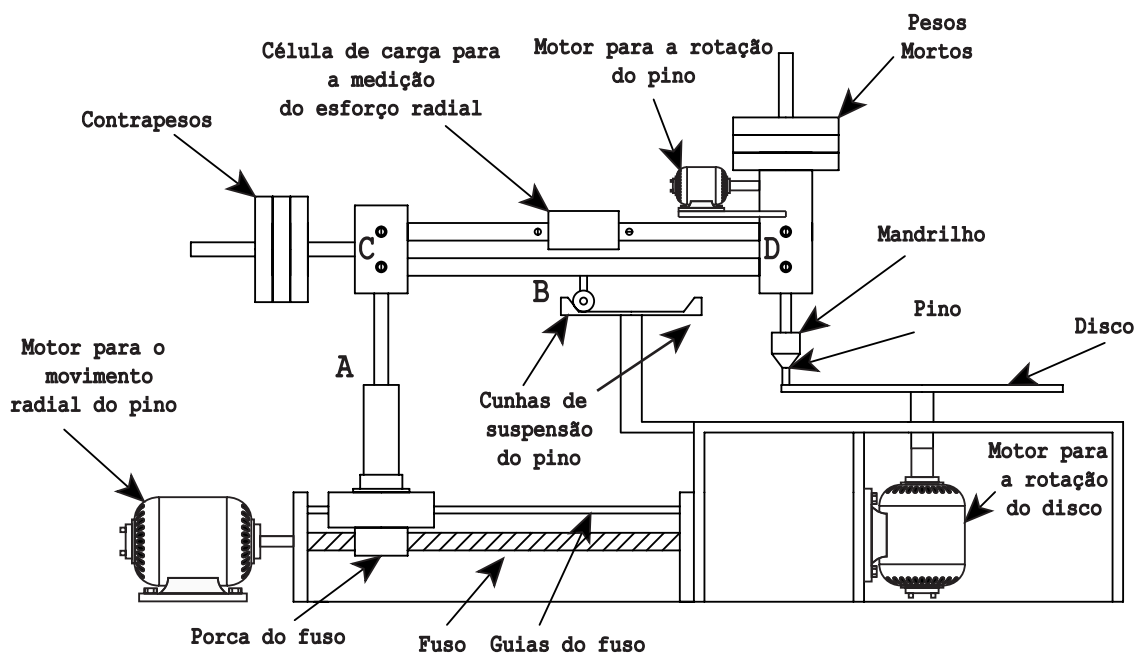
Na parte inferior do abrasômetro ficam alojados os mecanismos para o movimento linear do pino e rotacional do disco. O movimento linear do pino é realizado por meio de um parafuso de potência movido por um motor elétrico, que desloca o braço por meio de uma porca acoplada à parte inferior do mesmo. Guias de apoio contribuem para a estabilidade do sistema.

Na figura 3.2.2 é possível ver a disposição do abrasômetro no início e no final do ensaio. É notável que o mecanismo de quatro barras na parte superior do abrasômetro garante o paralelismo entre os elos C e D. O movimento rotacional do disco também é obtido de um motor elétrico, com velocidade controlada, de modo a garantir que a seja velocidade linear constante.

A construção do abrasômetro segundo o conceito apresentado na figura 3.2.1 apresenta algumas dificuldades. Com relação à fabricação, deve se garantir as mais apertadas faixas de tolerâncias possíveis para obter uma montagem precisa dos componentes estruturais; não devem haver folgas ou desalinhamentos entre os componentes. Deve-se, também, empregar materiais leves, como o alumínio, para que se reduza ao máximo a inércia de massa do conjunto e melhore a partida e entrada em regime permanente dos motores. Os materiais devem, também, ser resistentes à corrosão, para que não se degradem em ambientes como um laboratório.

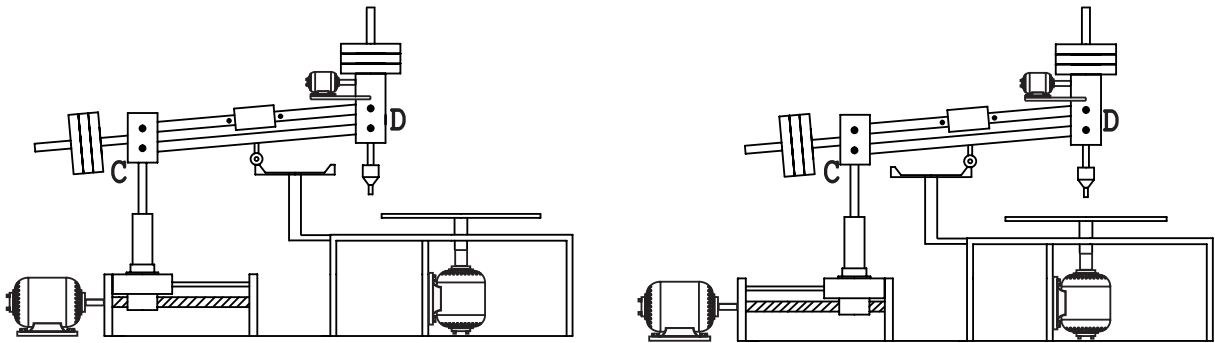
Do ponto de vista do sistema de controle, há que se trabalhar no sincronismo dos motores para que a exigência de velocidade linear constante da trilha de desgaste seja atendida; isso implica numa condição cinemática e de controle relativamente complexa, envolvendo ampla compreensão da cinemática de mecanismos, da dinâmica e de lógica de programação. Há, também, a necessidade de entendimento do funcionamento e acionamento de motores elétricos.

Figura 3.2.1 - Esboço conceitual das partes do abrasômetro pino-lixo



Fonte: autoria própria.

Figura 3.2.2 - Esboço conceitual do abrasômetro pino-lixo no início (esquerda) e final do ensaio (direita)



Fonte: autoria própria.

Deve-se, na medida do possível, empregar materiais leves, como plástico e alumínio, para que se reduza ao máximo a inércia de massa do conjunto e melhore a partida e entrada em regime permanente dos motores; dessa forma, é facilitado o controle das velocidades envolvidas no ensaio. Os materiais devem, também, ser resistentes à corrosão, para que não se degradem em ambientes como o de um laboratório.

O Apêndice C traz os desenhos técnicos do projeto mecânico do abrasômetro pino-lixo.

## PARTE II

### MODELAGEM E DIMENSIONAMENTO

A segunda parte deste trabalho objetiva dimensionar os parâmetros cinemáticos e dinâmicos básicos do abrasômetro pino-lixo.

O Capítulo IV trata da análise de velocidades do deslocamento do pino sobre o disco. Trata, também, da síntese e análise gráfica da posição do pino e da trajetória da trilha de desgaste. Convém destacar que as expressões analíticas obtidas nesse capítulo constituem a essência do projeto do abrasômetro: a partir delas, todos os demais aspectos construtivos e de controle do equipamento são definidos.

No Capítulo V destaca-se o dimensionamento dos motores e seleção da transmissão para o movimento radial e rotacional do pino, e para a rotação do disco.

O Capítulo VI define as características do sistema de controle e seus periféricos, a nível de hardware.

---

---

## CAPÍTULO IV

### Da Análise de Velocidades

Este capítulo abrange o trato analítico relativo aos mecanismos envolvidos na produção do movimento característico do abrasômetro pino-lixia. Nele o leitor encontra o equacionamento para as velocidades envolvidas; posteriormente o equacionamento analítico da trajetória descrita pela trilha de desgaste e das forças envolvidas no movimento.

#### 4.1 Análise de velocidades

A trajetória descrita pela trilha de desgaste é função de duas componentes de velocidade: a velocidade radial e a velocidade tangencial (que está relacionada à velocidade angular do disco); assim, a trajetória só pode ser analiticamente equacionada após o conhecimento da relação entre as velocidades.

Como estipulado pela ASTM G132-96 e mostrado na seção 3.1, a velocidade linear da trilha de desgaste durante o ensaio deve ser fixa, e estar situada na faixa entre 1 a 10 cm/s. Logo, a velocidade linear é a resultante vetorial da velocidade radial e da velocidade tangencial, como apresentado na equação 2.6. Entretanto, há uma ressalva: se a velocidade tangencial é função da velocidade angular do disco e da distância radial (equação 2.5), para uma dada velocidade angular fixa no disco a velocidade tangencial não será constante à medida em que o pino se deslocar e, portanto, a distância radial diminuir. Ou seja, deverá haver alguma relação entre a velocidade angular do disco e a distância radial, para que a velocidade linear se mantenha constante.

Por uma questão de simplicidade construtiva e facilidade no controle do sistema motriz, é assumido neste projeto que a velocidade radial,  $V_R$ , seja constante, e variando somente a velocidade angular do disco,  $\omega$ ; variação esta que também manterá a velocidade tangencial,  $V_T$ , constante. Dada essa premissa, fica claro que  $\omega$  não é uma função explícita do tempo, como  $V_R$ , mas sim uma função explícita do raio e implícita do tempo, pois o comprimento radial é uma função do tempo, apresentado na equação 4.1. Assim sendo,  $V_T$  assume a forma da equação 4.2.

Uma vez mantido  $V_R$  constante, a posição radial do pino em função do tempo,  $R(t)$ , é apresentada na equação 4.3. Note que se trata de uma aplicação simples do movimento retilíneo uniforme, sendo  $R_0$  o raio inicial (borda do disco) e  $V_R$  negativo contrário ao referencial adotado para  $R(t)$ . Substituindo a equação 4.3 na equação 4.2, têm-se a equação 4.4.

Assumindo  $V_R$  como 1 cm/s e considerando que o disco possui 10 cm de raio, conclui-se, pela equação 4.3 que o ensaio terá o tempo total de dez segundos (desprezando a aceleração inicial). Dessa forma, valores de  $V_T$  são

---

estipulados de modo a obter valores de velocidade linear entre 2 a 10 cm/s, baseado na equação 2.8.

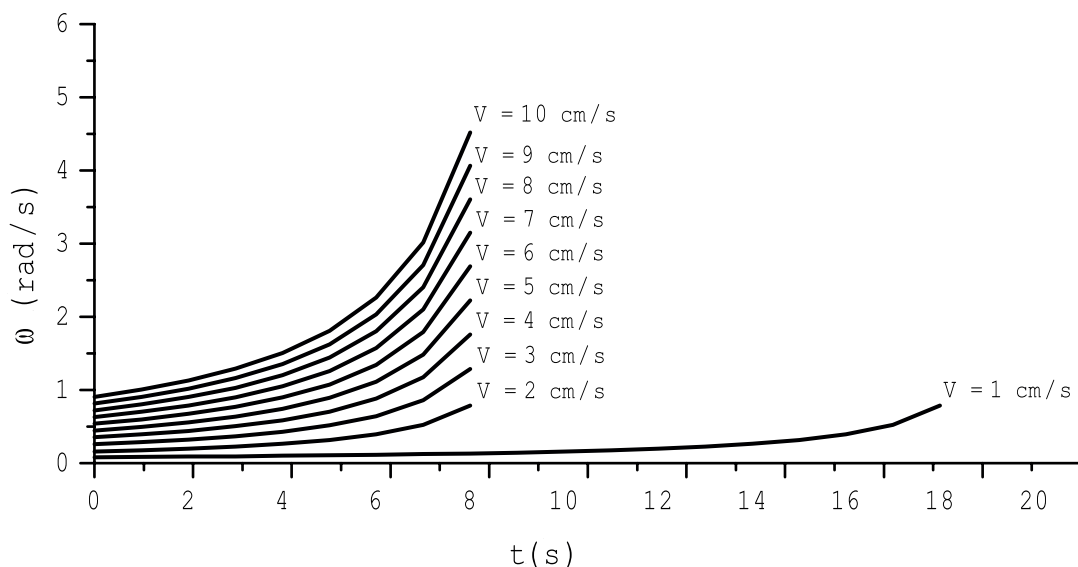
$$\omega = f(R, t) \Rightarrow \omega = \omega(R(t)) \quad (4.1)$$

$$V_T = \omega(R(t))R(t) \quad (4.2)$$

$$R(t) = R_0 - V_R t \quad (4.3)$$

$$V_T = \omega(R(t))(R_0 - V_R t) \quad (4.4)$$

Figura 4.1.1 - Curvas da velocidade angular do disco em função do tempo para cada faixa de velocidade linear



Fonte: autoria própria.

Com base na escolha fixa de  $V_T$  e  $V_R$  para cada faixa de velocidade linear, isola-se a velocidade angular na equação 4.4. Em seguida, plota-se as curvas da velocidade angular em função do tempo para cada valor de  $V$ , mostrado na figura 4.1.1. O leitor deve reparar na figura 4.1.1 que para a velocidade linear de 1 cm/s, é necessário reduzir o valor de  $V_R$ ; no caso, adotado como 0,5 cm/s. Assim, o tempo nominal do ensaio é de vinte segundos, baseado no tempo levado pelo pino para se deslocar da borda ao centro do disco em movimento retilíneo uniforme. Outra observação importante acerca da figura 4.1.1 é que o ponto final de cada curva, equivalente ao último segundo do ensaio, foi removido. De fato, quando o último segundo do ensaio é atingido, o pino alcança a posição de raio igual a zero, onde o produto  $V_R t$  passa a ser igual à  $R_0$ , causando um pico em cada curva. Isso é evitado durante o ensaio elevando o pino sobre a lixa na posição central do disco.

Uma vez que o comportamento da velocidade angular em relação ao tempo é conhecido, pode-se então realizar uma regressão linear para cada curva da figura 4.1.1, de modo a encontrar a expressão que mantém  $V_T$  constante para a variação da posição radial. Para qualquer uma das curvas da figura 4.1.1, a equação que exprimi a variação de  $\omega(R(t))$  em relação ao tempo tem a forma da

equação 4.5, variando apenas os coeficientes **a** e **b** para cada faixa de velocidade. Os valores para os coeficientes **a** e **b** são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Coeficientes **a** e **b** para as equações 4.5 e 4.6

V (cm/s)	Vr (cm/s)	Vt (cm/s)	a	b
1	0,5	0,87	11,54701	-0,57735
2	1	1,73	5,7735	-0,57735
3	1	2,83	3,53553	-0,35355
4	1	3,87	2,58199	-0,2582
5	1	4,90	2,04124	-0,20412
6	1	5,92	1,69031	-0,16903
7	1	6,93	1,44338	-0,14434
8	1	7,94	1,25988	-0,12599
9	1	8,94	1,11803	-0,1118
10	1	9,95	1,00504	-0,1005

Fonte: autoria própria.

$$\omega(t) = \frac{1}{a + bt} \quad (4.5)$$

$$V = \sqrt{V_R^2 + \left( \frac{R_0 - V_R t}{a + bt} \right)^2} \quad (4.6)$$

Substituindo a equação 4.5 na equação 4.4 e, em seguida, substituindo na equação 2.8, têm-se uma nova expressão para a velocidade linear (equação 4.6); desse modo, apenas em função do tempo e não do raio.

Vale destacar que, como mostrado na equação 4.5, a curva que melhor se ajustou à variação da velocidade angular do disco, na regressão linear, tem a forma de uma função polinomial racional.

A velocidade linear da trilha de desgaste é de livre escolha pelo usuário do abrasômetro, devendo apenas estar entre 1 e 10 cm/s. As faixas de velocidades exibidas na figura 4.1.1 e na tabela 4.1 são sugeridas com o intuito de simplificar a elaboração do sistema de controle do abrasômetro. Logo, para velocidades lineares diferentes daquelas mostradas na tabela 4.1, o usuário deve realizar nova regressão linear para a obtenção dos parâmetros **a** e **b** para a velocidade linear desejada.

## CAPÍTULO V

## Propulsão e Transmissão de Potência

Uma vez que os parâmetros cinemáticos do abrasômetro foram definidos no Capítulo IV, os elementos de máquinas podem ser dimensionados e selecionados.

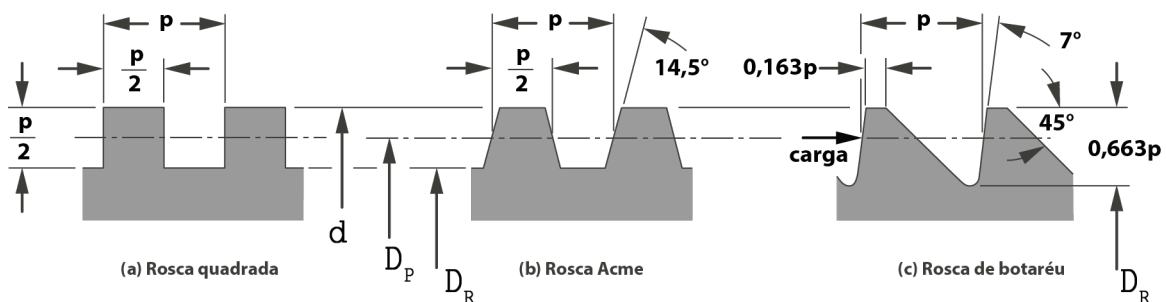
Neste capítulo são feitas análises de modo a determinar os requisitos básicos dos sistemas de propulsão do abrasômetro, bem como os mecanismo de transmissão de potência e movimento ao pino.

## 5.1 Movimento radial do pino

Uma configuração prática e simplificada para a transmissão de movimento linear é aquela que ocorre por intermédio de um parafuso de potência, também conhecido como fuso ou parafuso de avanço.

Para Norton (2013) um parafuso de potência (figura 5.1.1) é definido como um elemento de máquina em que movimento rotativo é convertido em movimento linear, em máquinas e equipamentos em geral, com o benefício do ganho mecânico, favorecendo a movimentação de grandes cargas. Dessa forma, é prático que o movimento do pino seja propulsionado através do auxílio de um fuso, que por sua vez pode ser rotacionado por um motor elétrico.

Figura 5.1.1 - Principais geometrias de rosca para parafusos de potência



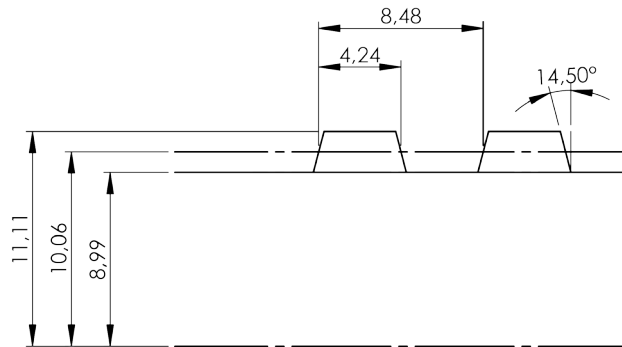
Fonte: (NORTON, 2013).

Um modelo eficiente de parafuso de potência é o fuso de rosca trapezoidal (ACME) com diâmetro maior,  $d$ , de  $7/8''$ ; diâmetro primitivo,  $D_p$ , de 10,06 mm; diâmetro de raiz,  $D_R$ , de 8,99 mm; passo de seis fios por polegada ( $0,167''$ ) e ângulo de avanço de  $14,5^\circ$ , cuja geometria de rosca é mostrada na figura 6.1.2.

Para que o pino possa transladar com a velocidade radial especificada, uma relação algébrica entre a velocidade radial do pino e o passo do fuso deve ser determinada. Assim, a frequência com que o fuso rotaciona pode ser obtida.

Por definição o passo de um fuso ( $P_{AS}$ ) de rosca simples como os mos-

Figura 5.1.2 - Geometria da rosca ACME 7/8" - 6 (dimensões em milímetros)



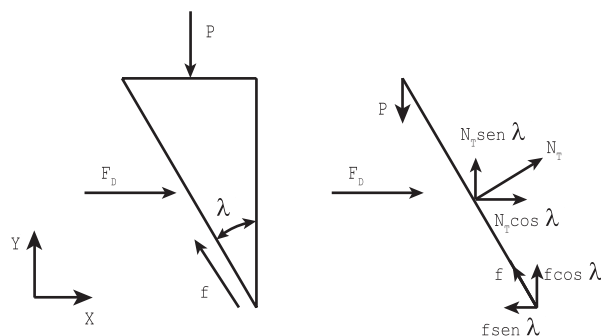
Fonte: autoria própria.

trados nas figuras 5.1.1 e 5.2.2 é o deslocamento que o fuso provoca em sua porca (atuador) a cada rotação completa (NORTON, 2013). Logo, para que o pino, acoplado ao atuador, translade com determinada velocidade radial  $V_R$ , um número específico de rotações do fuso em torno do seu próprio eixo,  $\omega_f$ , deve ser executado. A equação 5.1 mostra a relação entre a velocidade angular do fuso e a velocidade radial do pino para um fuso ACME 7/8" - 6, onde  $V_R$  é dada em cm/s e  $\omega_f$  tem como unidade Hz.

$$V_R = \omega_f P_{as} \text{ (cm)} \tag{5.1}$$

Com relação ao torque a ser aplicado pelo fuso, o mesmo é modelado como o torque necessário para avançar ou recuar uma carga no sentido horizontal, estando o peso, portanto, atuando na direção perpendicular ao fuso. Para uma simples demonstração, considera-se a figura 5.1.3, onde uma volta completa da rosca do fuso é planificada. Seja  $P$  o peso suportado transversalmente sobre o fuso,  $F_D$  a força necessária para avançar o peso,  $f$  a força de atrito e  $\lambda$  o ângulo de avanço da rosca. Aplica-se a análise de equilíbrio estático na direção X e na direção Y, onde  $N_T$  é a força de reação normal ao peso total e  $\mu_{ROS}$  é o coeficiente de atrito estático na face da rosca. Como a força  $F_D$  é o objeto de interesse no deslocamento da carga e, portanto, determina o torque, isola-se  $N_T$  no somatório de forças na direção Y e o substitui no somatório de forças na direção X para se obter a equação 5.2. O torque necessário para

Figura 5.1.3 - Diagrama de forças na rosca de um fuso



Fonte: autoria própria.

deslocar a carga é apresentado na equação 5.3. A potência necessária para deslocar a carga a uma dada velocidade é mostrada na equação 5.4.

$$F_D = \frac{P(\mu_{ROS} \text{sen}\lambda - \text{cos}\lambda)}{\text{sen}\lambda + \mu_{ROS} \text{cos}\lambda} \quad (5.2)$$

$$T_D = \frac{F_D d}{2} \quad (5.3)$$

$$P_{\text{radial}} = \omega_f T_{\text{Total}} \quad (5.4)$$

Para a seleção do motor que produzirá o movimento radial do pino, adota-se uma massa total,  $M_T$ , de 30 kg composta por:

- 16 kg: pesos mortos (pressão ideal de contato, tabela 3.1.2);
- 1 kg: motor para a rotação do pino;
- 1 kg: células de carga radial e transversal;
- 8 kg: peso estimado dos componentes estruturais;
- 4 kg: contra peso dos componentes estruturais.

Assim, a força necessária para deslocar a carga é de

$$F_D = \frac{P(\mu_{ROS} \text{sen}\lambda - \text{cos}\lambda)}{\text{sen}\lambda + \mu_{ROS} \text{cos}\lambda} = \frac{30.9,81(0,15 \text{sen}14,5^\circ - \text{cos}14,5^\circ)}{\text{sen}14,5^\circ + 0,15 \text{cos}14,5^\circ} \left[ \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = 692 \text{ N}$$

onde  $\mu_{ROS}$  é o coeficiente de atrito estático entre fusos de aço e porcas de bronze, igual a 0,15 (NORTON, 2013).

O torque mínimo que o motor deve fornecer para que o pino translade com a velocidade necessária é a soma do torque para deslocar a carga,  $T_D$ ; mais o torque necessário para vencer as perdas nos mancais de rolamento do fuso (duas unidades),  $T_{ROL}$ ; mais o torque necessário para vencer as perdas nos mancais de deslizamento das guias (duas unidades),  $T_{DESL}$  mais o torque devido à força de atrito entre o pino e a lixa,  $T_{ATR}$ . Dessa forma,  $\mu_{ROL}$  é o coeficiente de atrito estático para rolamentos de esferas simples, igual a 0,0013 (NORTON, 2013);  $\mu_{DESL}$  é o coeficiente de atrito estático entre as guias de aço e as buchas de bronze e  $N_{PIN}$  é a força de reação normal ao pino, aplicada pelos pesos

$$T_D = \frac{F_D d_{FUS}}{2} = 692.0,01006 \text{ [N.m]} = 6,96 \text{ N.m}$$

$$T_{ROL} = 2\mu_{ROL} P_{R_{FUS}} = 2.0,0013.30.9,81.0,01006 \left[ \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} \right] = 0,0078 \text{ N.m}$$

$$T_{DESL} = 2\mu_{DESL} N_{T R_{FUS}} = 2.0,15.30.9,81.0,01006 \left[ \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} \right] = 0,905 \text{ N.m}$$

$$T_{ATR} = \frac{\mu_{EST} N_{PIN} d_{FUS}}{2} = 1.16.9,81.0,01006 \left[ \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} \right] = 0,789 \text{ N.m}$$

mortos. Da equação 5.4, a potência do motor é calculada com o somatório dos torques multiplicado pela velocidade angular do fuso, obtida da equação 5.1.

$$\omega_f = \frac{V_R}{P_{as}(\text{cm})} = \frac{1}{0,167 \cdot 0,0254} \left[ \frac{\frac{\text{cm}}{\text{s}}}{\text{pol} \frac{\text{cm}}{\text{pol}}} \right] = 2,36 \text{ Hz}$$

$$P_{\text{radial}} = \omega_f T_{\text{Total}} = 2,357 \cdot (6,96 + 0,0078 + 0,905 + 0,789) \left[ \frac{1}{\text{s}} \cdot \text{N.m} \right] = 20,4 \text{ W}$$

Portanto, é necessário que o motor forneça um torque mínimo de 9,33 N.m a uma potência de 20,4 W.

Para a transmissão de potência entre o motor e o fuso, um conjunto de polias e correia dentada é recomendado. Vale ressaltar que esse tipo de transmissão, usualmente composta por polias de alumínio e correia de borracha tem baixa inércia de massa, ótimo amortecimento de vibrações e sincronismo, sendo empregada em pequenas máquinas de precisão como minitornos, impressoras 3D e aplicações de automação em geral. Uma vez que as polias e a correia são dentadas, elas garantem a aplicabilidade da lei fundamental do engrenamento.

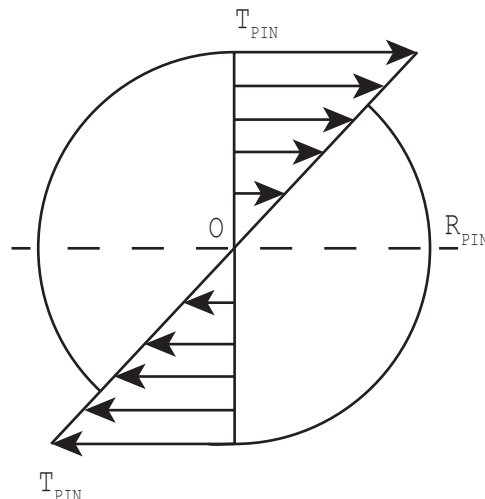
Como observação, destaca-se a alta eficiência das transmissões por correia dentada, estando a mesma na casa dos 98%; muito próximo da eficiência da transmissão por engrenagens (BUDYNAS et al., 2011).

## 5.2 Movimento rotacional do pino

Conforme relatado no Capítulo III, o pino pode rotacionar em torno do seu próprio eixo com velocidade constante, sob a ação de um carregamento estático normal à lixa e aplicado por pesos mortos.

Tomando como base a figura 5.2.1, que representa o diagrama de momento torsor na área de seção transversal do pino de raio  $R_{\text{PIN}}$  e diâmetro  $d_{\text{PIN}}$ . Seja o esforço normal no pino,  $N_{\text{PIN}}$ , e  $\mu_{\text{EST}}$  o coeficiente de atrito estático entre o pino e a lixa. Da análise de equilíbrio estático, o torque necessário para rotacionar o pino em torno do seu próprio eixo,  $T_{\text{PIN}}$ , tem a forma da equação 5.5 e a potência,  $P_{\text{PIN}}$ , a forma da equação 5.6, sendo  $\omega_{\text{PIN}}$  a frequência angular do pino.

Figura 5.2.1 - Diagrama de momento torçor no pino



Fonte: autoria própria.

$$T_{PIN} = F_{AT} d_{PIN} = \mu_{EST} N_{PIN} d_{PIN} \quad (5.5)$$

$$P_{PIN} = \omega_{PIN} T_{PIN} \quad (5.6)$$

Da tabela 3.1.1, têm-se que o pino deve rotacionar a uma velocidade angular  $\omega_{PIN}$  entre 15 rpm e 50 rpm. Logo:

$$\omega_{PIN}^{MAX} = 50 \text{ rpm} = 0,833 \text{ Hz} \quad \omega_{PIN}^{MIN} = 15 \text{ rpm} = 0,250 \text{ Hz}$$

Aplicando a equação 5.5 para encontrar o máximo torque para o maior diâmetro de pino ( $d_{PIN} = 10 \text{ mm}$ ), e então a equação 5.6, para a máxima rotação, encontra-se a potência máxima exigida do motor que aciona a rotação do pino, portanto:

$$T_{PIN} = F_{AT} d_{PIN} = \mu_{EST} N_{PIN} d_{PIN} = 1.16.9,81.0,01 \left[ \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} \right] = 1,57 \text{ N.m}$$

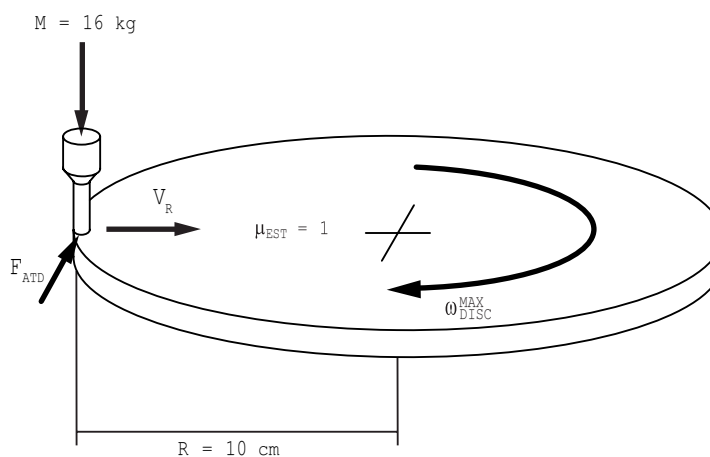
$$P_{PIN} = \omega_{PIN}^{MAX} T_{PIN} = 0,833.1,570 \text{ [N.m.s}^{-1}] = 1,31 \text{ W}$$

Assim, para que o pino possa rotacionar em torno do seu próprio eixo com velocidade constante e sob a ação do carregamento estático imposto e sua consequente força de atrito,  $F_{AT}$ , é necessário que o motor forneça, pelo menos, um torque de 1,57 N.m a uma potência de 1,31 W.

### 5.3 Movimento rotacional do disco

O movimento rotacional do disco envolve uma rampa de aceleração, de modo que a rotação é menor quando o pino está na borda externa do disco e cresce à medida em que o pino se desloca em direção ao centro do disco. O máximo torque é obtido no início do ensaio, quando o pino está na borda do disco (figura 5.3.1); a máxima rotação, igual a 95 rpm, é atingida no instante final do ensaio, quando o pino se aproxima do centro do disco para a velocidade linear máxima permitida no ensaio (10 cm/s). O coeficiente de atrito estático máximo,  $\mu_{EST}$ , é considerado igual a unidade.

Figura 5.3.1 - Variáveis envolvidas na rotação do disco



Fonte: autoria própria.

A potência é superdimensionada assumindo que a maior rotação é obtida em conjunto com o maior torque demandado. Destaca-se que o torque a ser vencido pelo motor do disco tem caráter reativo, isto é, existe pela reação da força de atrito tangencial impressa pela lixa quando da rotação do disco.

Logo:

$$T_{\text{DISC}} = F_{\text{ATD}} R_{\text{DISC}} = \mu_{\text{EST}} N_{\text{PIN}} R_{\text{DISC}} = 1.16.9,81.0,1 \left[ \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} \right] = 15,7 \text{ N.m}$$

$$\omega_{\text{DISC}}^{\text{MAX}} = 95 \text{ rpm} = 1,58 \text{ Hz}$$

$$P_{\text{DISC}} = \omega_{\text{DISC}}^{\text{MAX}} T_{\text{DISC}} = 1,58.15,7 \text{ [N.m.s}^{-1}\text{]} = 24,8 \text{ W}$$

Portanto, para que o disco gire com a frequência angular necessária (figura 4.1.1, em rpm), sob a ação do torque imposto pela força de atrito  $F_{\text{ATD}}$ , um motor com torque  $T_{\text{DISC}}$  de 15,7 N.m e potência  $P_{\text{DISC}}$  de 24,8 W é necessário.

## 5.4 Propulsão e transmissão de movimento

A propulsão tanto do movimento radial, quanto o movimento rotacional do disco e do pino é feita com motores DC. O motor especificado (DKM 9DCP-90-30) é mostrado na figura 5.4.1. A propulsão do pino demanda um motor com menores dimensões.

Destaca-se que a relação de transmissão entre as polias do fuso deve ser apropriada de modo a garantir a frequência nominal de rotação do fuso (2,36 Hz). Para a rotação do pino, a relação de transmissão entre o motor e o eixo do mandrilho também deve ser cuidadosamente analisada. É especificado uma transmissão cônica, de engrenagens do tipo coroa e pinhão, empregadas em esmerilhadeiras angulares. A transmissão entre o motor do disco e o disco é direta (figura 5.3.1), sendo especificado apenas um acoplamento flexível para o amortecimento das vibrações. Todos os motores devem ser suportados sobre elementos isoladores de vibrações mecânicas (coxins), para que seu funcionamento não interfira nos resultados do ensaio.

Figura 5.4.1 - Datasheet do motor DKM 9DCP-90-30

Tensão nom.	$U_N$	24 V
Potência nom.	$P_N$	90 W
Rotação nom.	$n_N$	240 rpm
Corrente nom.	$I_N$	25 A
Corrente máx.	$I_{\text{MAX}}$	50 A
Torque nom.	$M_N$	19,6 Nm
Torque máx.	$M_A$	29 Nm
IP	--	
Massa		2 kg



Fonte: (DKM MOTOR COMPANY, 2019).

## CAPÍTULO VI

## Acionamento dos Motores e Sistema de Controle

Uma vez apresentadas as características dos motores e das transmissões, o sistema de acionamento e controle dos mesmos pode ser projetado. Objetiva-se um sistema automático, onde a velocidade dos motores é controlada por software, através da programação de um controlador.

Com o intuito de se obter a precisão de velocidade linear exigida pela ASTM G-136, é adotado um sistema de controle em malha fechada para o motor do fuso e do disco, onde a realimentação é realizada por transdutores de leitura da velocidade de rotação dos motores (encoders); dessa forma, é possível garantir a conformidade entre as velocidades programadas via software e as velocidades efetivas de rotação dos motores durante o ensaio.

## 6.1 Da seleção do controlador e dos seus periféricos

Controladores lógico programáveis, como aqueles discutidos no Capítulo II, são de custo elevado. Atualmente, a função dos CLPs pode ser realizada, em aplicações mais simples, por controladores da família Arduino. Trata-se de controladores de código aberto, de fácil programação e manipulação e que podem ser facilmente utilizados mesmo por aqueles com pouco conhecimento em eletrônica.

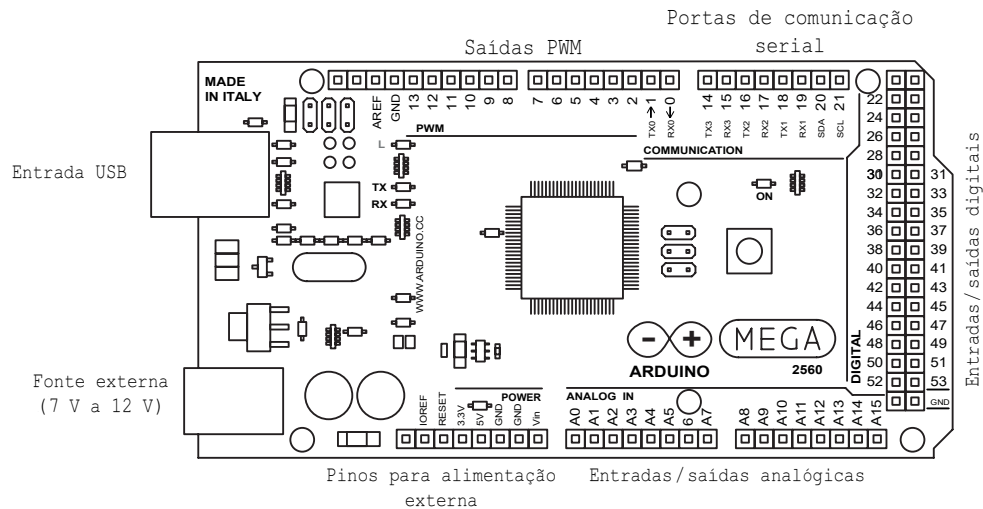
Para o controle dos motores do abrasômetro, a plataforma de prototipagem selecionada é o Arduino Mega 2560 (figura 6.1.1), cujas características técnicas são:

- Microprocessador: ATmega2560;
- Tensão de operação: 5 V;
- Tensão de alimentação (recomendada): 7-12V;
- Tensão de alimentação (limite): 6-20V;
- Entradas e saídas digitais: 54;
- Saídas PWM: 15;
- Entradas analógicas: 16;
- Corrente contínua por pino de I/O: 40 mA;
- Memória flash: 256 KB dos quais 8KB são usados pelo bootloader;
- Memória SRAM: 8 KB;
- Velocidade do clock: 16 MHz.

Na figura 6.1.1 é mostrada a localização das entradas e saídas da plataforma. O Arduino é programado com linguagem própria, através de um computador conectado em sua entrada USB. O comportamento das portas enquanto entradas ou saídas é definido via software.

---

Figura 6.1.1 - Controlador Arduino Mega 2560



Fonte: (GRABCAD, 2019).

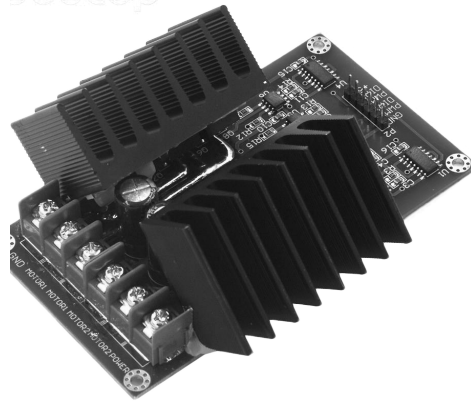
Para o chaveamento da tensão de alimentação dos motores por meio do princípio PWM, uma placa (*drive*) do tipo ponte H é necessária. O *drive* pode ser do tipo com dois canais (duas saídas PWM independentes); um canal para o motor do fuso e outro para o motor do disco. O drive ponte H selecionado é mostrado na figura 6.1.2. Ele possui as seguintes características:

- Dois bornes de alimentação DC entre 3 V e 36 V (*POWER* e *GND*);
- Quatro bornes de saída, dois positivos e dois negativos, para os terminais dos motores ( $M_1+$ ,  $M_1-$ ,  $M_2+$ ,  $M_2-$ );
- Uma porta de alimentação do circuito (+5 V e *GND*);
- Duas portas PWM (*PWM1* e *PWM2*);
- Quatro portas lógicas para reversão e frenagem da rotação ( $DIR_1$  e  $DIR_2$ );
- Corrente nominal de 30 A com pico de 110 A.

A leitura da velocidade de rotação dos motores é feita através de sensores denominados encoders. Encoders são definidos, segundo Petruzella (2013), como sensores capazes de converter movimento rotativo ou linear em um sinal digital binário, na forma de pulsos. A forma de construção mais simples de um encoder é aquela que envolve um disco ranhurado, com faixas opacas intercaladas com faixas transparentes, onde uma fonte luminosa ilumina através de um feixe permanentemente o disco; um sensor óptico posicionado do lado oposto do disco capta as interrupções do feixe da fonte luminosa ao passar das ranhuras transparentes para as opacas, quando da rotação do disco. A figura 6.1.3 mostra o modelo de encoder selecionado para este projeto. Trata-se de um encoder cuja resolução é de 500 pulsos por revolução, com dois canais para a leitura da velocidade e deslocamento, e um terceiro canal para a medição da posição; alimentação de 5 a 24 V e rotação máxima de 5000 rpm (figura 6.1.3).

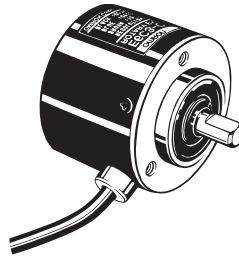
O posicionamento inicial e final do ensaio é obtido com o uso de sensores de proximidade, do tipo capacitivo ou chaves mecânicas de final de curso, fornecendo uma resposta *on/off*.

Figura 6.1.2 - Drive ponte H com dois canais PWM



Fonte: (ALIEXPRESS, 2019).

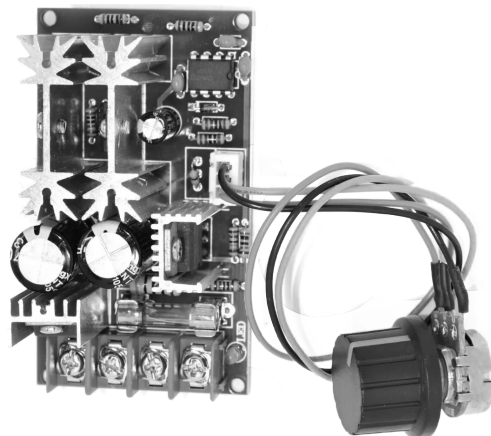
Figura 6.1.3 - Encoder Omron E6C3-CWZ3EH 500 pulsos por rotação



Fonte: (OMRON, 2019).

Para o controle da velocidade de rotação do pino é proposto um sistema em malha aberta, com um *drive* controlador PWM com ajuste manual de velocidade por meio de um potenciômetro, mostrado na figura 6.1.4. Nesse drive, o *duty cycle* do sinal é ajustado pelo ganho gerado da rotação do potenciômetro, para tensões de alimentação entre 10 e 60V com corrente máxima de 20 A.

Figura 6.1.4 - Drive controlador PWM 10 a 60 V DC e corrente máxima de 20 A



Fonte: (MERCADO LIVRE, 2019).

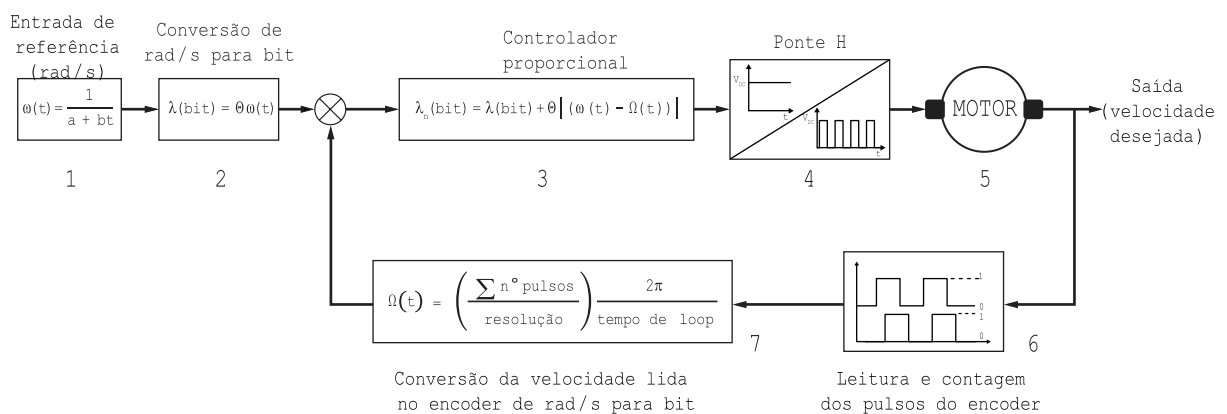
## PARTE III

### ALGORITMO DE CONTROLE E ASPECTOS OPERACIONAIS

Para que os requisitos de desempenho do ensaio sejam atendidos, o sistema de controle deve responder de forma apropriada. O sistema de controle projetado possui uma estrutura de malha fechada (figura 7.0), onde o sinal de realimentação (*feedback*) é provido por um transdutor denominado encoder, cujo sinal de resposta é digital.

O controle da velocidade do disco envolve uma entrada de referência (*setpoint*) do tipo rampa, uma vez que se trata de um movimento com velocidade variável. O controle da velocidade do fuso envolve uma entrada de referência do tipo degrau, por se tratar de um processo executado à velocidade constante; em todo caso, também se faz necessário o uso de um encoder para a leitura da velocidade.

Figura 7.0 - Diagrama de blocos do sistema de controle do motor do disco



Fonte: autoria própria.

## CAPÍTULO VII

## Algoritmo do Sistema de Controle

Após a seleção do controlador adequado, faz-se necessário programá-lo para que seja possível obter as respostas desejadas do abrasômetro com apreciável grau de confiabilidade, exatidão e precisão.

A plataforma Arduino opera com microcontroladores baseados em uma linguagem de programação própria, porém muito semelhante a linguagem C, já consagrada em diversas aplicações envolvendo microcontroladores.

## 7.1 Diagrama de blocos do sistema de controle

Seja o modelo de sistema de controle ideal para os motores do abrasômetro pino-lixa mostrado na figura 7.0. Trata-se de um sistema de controle em malha fechada, onde o sinal de chaveamento é enviado do controlador para o drive ponte H, de modo a provocar a modulação via largura de pulso do sinal que alimenta os motores; estes, por sua vez, responderão com determinada velocidade. Em seguida, o encoder acoplado ao eixo do motor converte a velocidade de rotação do motor em um sinal que é enviado ao controlador. O controlador, por sua vez, compara o sinal gerado pelo encoder (*feedback*) com o sinal de referência (*setpoint*), atuando, em caso de diferença entre ambos, para que a velocidade lida pelo encoder seja suficientemente próxima à velocidade especificada para o ensaio.

Tomando como exemplo o controle da velocidade do motor do disco, os blocos 1, 2, 3 e 7 apresentados na figura 7.0 são executados pelo controlador; o bloco 6 é executado pelo encoder acoplado ao motor e o bloco 4, pelo drive ponte H. Os blocos de controle são explicados nas subseções 7.1.1 à 7.1.7.

7.1.1 Bloco 1: *setpoint*

O *setpoint* compreende a função que relaciona a velocidade de rotação do disco, em rad/s, com o deslocamento radial do pino, apresentada na equação 4.5. Os coeficientes **a** e **b** da equação 4.5 variam conforme a velocidade linear desejada e são mostrados na tabela 4.1.

## 7.1.2 Bloco 2: conversão da entrada de rad/s para bit

Uma vez que a plataforma Arduino trabalha, nas saídas digitais PWM, com bits, é necessária a conversão do *setpoint* de rad/s para bit. De posse da informação de que as saídas PWM trabalham de 0 a 255 bit, sendo 0 bit o desligamento do motor e 255 bit a rotação máxima do motor, é assumida uma re-

---

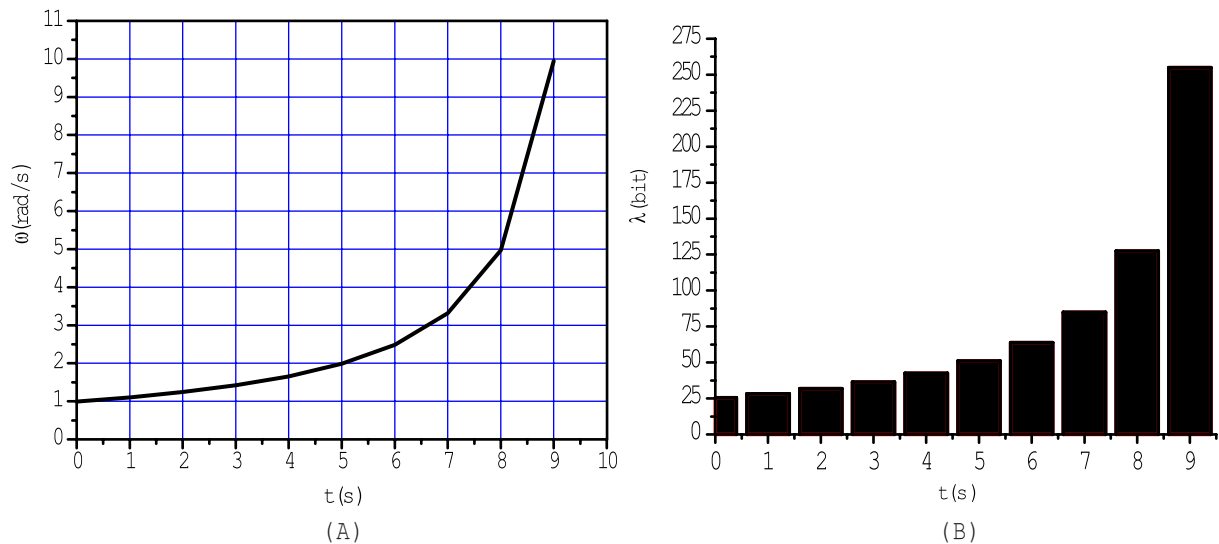
lação de proporcionalidade entre a quantidade de bits enviada à saída digital e a velocidade de rotação do disco. Essa relação é representada pelo fator  $\theta$  na equação 7.1.1, em que  $\omega_{MAX}$  é a máxima velocidade do motor. A equação 7.1.2 mostra a conversão de rad/s para bit da entrada de referência,  $\lambda(\text{bit})$ .

As figuras 7.1.1(a) e 7.1.1(b) mostram gráficos de comparação entre a curva da velocidade angular do motor do disco e a curva gerada da conversão de rad/s para bit do setpoint, respectivamente, para a velocidade linear de 10 cm/s, onde é notável que a característica das curvas permanece inalterada.

$$\theta = \frac{255}{\omega_{MAX}} \left( \frac{\text{bit}}{\text{rad/s}} \right) \tag{7.1.1}$$

$$\lambda(\text{bit}) = \theta \omega(t) = \theta \left( \frac{1}{a + bt} \right) \tag{7.1.2}$$

Figura 7.1.1 - Velocidade angular do do motor do disco em rad/s e bit, para V = 10 cm/s



Fonte: autoria própria.

### 7.1.3 Bloco 3: controlador proporcional

Nessa etapa há a comparação entre o *setpoint*,  $\omega(t)$ , e o *feedback*,  $\Omega(t)$ , ambas em rad/s. O módulo da diferença entre as mesmas é convertido de rad/s para bit e acrescido ou subtraído de  $\lambda(\text{bit})$  caso a  $\Omega(t)$  seja menor ou maior que  $\omega(t)$  (*offset*), respectivamente, com ganho unitário. O *setpoint* corrigido,  $\lambda_n(\text{bit})$ , é mostrado na equação 7.1.3.

$$\lambda_n(\text{bit}) = \lambda(\text{bit}) \pm \theta |\omega(t) - \Omega(t)| \tag{7.1.3}$$

### 7.1.4 Bloco 4: drive ponte H

Após o processamento do *setpoint* corrigido pelo controlador, um sinal PWM é gerado e enviado da saída digital do controlador para a entrada do drive ponte H; em seguida, a tensão de alimentação do motor é chaveada conforme o *duty cycle* equivalente ao número de bits enviado, e a frequência com que o

controlador é capaz de gerar o sinal; no caso do Arduino Mega, entre 490 Hz e 1000 Hz.

### 7.1.5 Bloco 5: motor

O sinal de tensão gerado do chaveamento no drive ponte H alimenta o motor, que por sua vez responde com uma certa velocidade.

### 7.1.6 Bloco 6: encoder

A rotação exibida pelo motor é lida pelo encoder na forma de pulsos, de forma digital, pela transição de um nível lógico baixo para um nível lógico alto. Quanto maior for a resolução do encoder, isto é, quanto maior for a quantidade de pulsos gerados a cada rotação, mais precisa será a leitura da velocidade de rotação do motor.

### 7.1.7 Bloco 7: leitura da velocidade do encoder

Os pulsos lidos pelo encoder, durante um certo intervalo de tempo denominado tempo de *loop*, são convertidos para rad/s, como mostrado na equação 7.1.4 onde  $\Omega(t)$  é a velocidade angular do motor lida pelo encoder. A velocidade  $\Omega(t)$  é processada pelo controlador no bloco 3, configurando, assim, o controle em malha fechada.

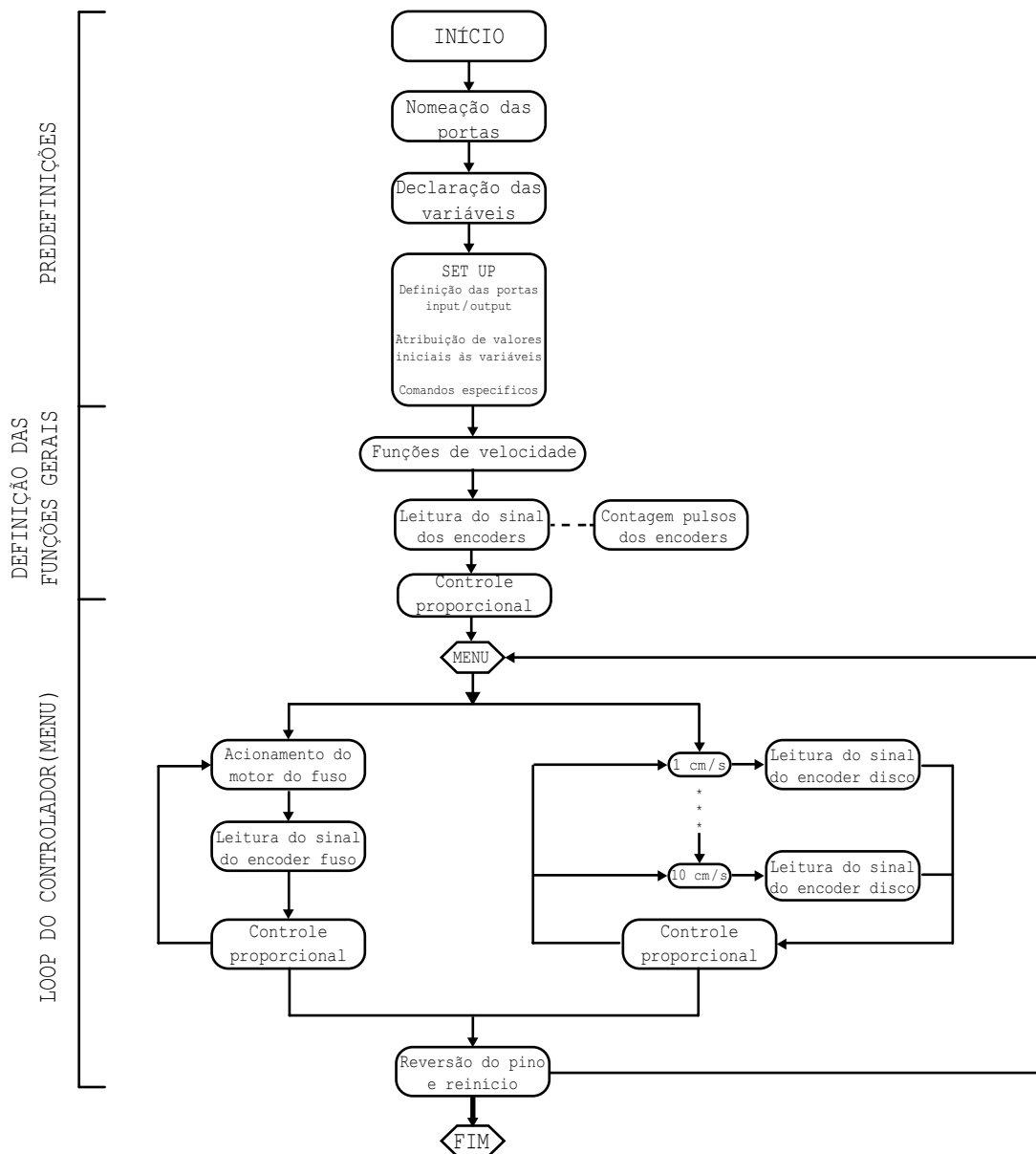
$$\Omega(t) = \left( \frac{\sum n^\circ \text{pulsos}}{\text{resolução}} \right) \frac{2\pi}{\text{tempo de loop}} \text{ (rad/s)} \quad (7.1.4)$$

## 7.2 Algoritmo de controle

Tendo em vista a simplicidade e a objetividade na operação do abrasômetro, é adotada uma estrutura de menu onde a velocidade linear do ensaio é selecionada pelo usuário. O fluxograma mostrado na figura 7.2.1 representa a lógica de programação implementada para a execução do diagrama de blocos da figura 7.0. O algoritmo completo na linguagem do Arduino é apresentado no Apêndice B.

Da figura 7.2.1 é possível observar que o algoritmo se inicia com a nomeação das portas que serão utilizadas no controlador. Em seguida, as variáveis são declaradas (como inteiros, pontos flutuantes, bytes, string etc.). Posteriormente, as portas nomeadas são definidas (*set up*) como entradas (*input*) ou saídas (*output*); as variáveis declaradas no passo anterior recebem comandos de atribuição de valores. Comandos ou funções específicas do microcontrolador são acionadas. O passo seguinte consiste na declaração dos blocos de comando das funções gerais do algoritmo: rampa de aceleração (no caso do disco) e leitura do sinal do encoder. A partir daí, a estrutura de menu se encarrega de acionar cada bloco de comando de acordo com a seleção do usuário.

Figura 7.2.1 - Diagrama de blocos do algoritmo de controle



Fonte: autoria própria.

A lógica de programação na linguagem Arduino envolve dois laços principais: void setup() e void loop(). O laço void setup() tem como objetivo a definição das diversas portas do controlador como entradas ou saídas; também atribui valores para variáveis globais e configura funções específicas do microcontrolador. Já o laço void loop() se encarrega de repetir, indefinidamente, os blocos de comando; é neste laço onde o algoritmo de controle é efetivamente lido e executado.

A velocidade de referência e a sua respectiva conversão de rad/s para bit (bloco 1 da figura 7.0) são expressas em funções denominadas setPointFuso() e setPointDisco(). Paralelamente à execução das funções de setpoint, as funções contadorFuso() e contadorDisco() contam os pulsos lidos pelos encoders durante intervalos de tempo de 100 milissegundos. O recurso de interrupção da leitura do sinal nas portas de entrada dos encoders no controlador é

empregado, de modo a evitar que um mesmo nível lógico alto seja contado duas vezes pelo controlador no mesmo *loop*.

Uma vez contados os pulsos, as velocidades angulares dos motores lida pelos encoders podem ser estimada, através das funções `leituraEncoderFuso()` e `leituraEncoderDisco()`. A função `millis()` conta o tempo, em milissegundos, desde quando o algoritmo foi iniciado.

De posse das velocidades de referência e das velocidade reais de rotação do motores, lidas pelos encoders, o controlador pode então aplicar o controle proporcional, por meio das funções `controleProporcionalDisco()` e `controleProporcionalFuso()`. Nelas, o módulo da diferença entre as velocidades de referência e as velocidades reais de rotação dos motores é acrescido ou subtraído das velocidades de referência, para compor as velocidades de referência corrigidas. Após a correção das velocidades de referência, novos comandos são enviados às saídas PWM.

Aplicado o controle proporcional, resta à conclusão do *loop* o incremento das variáveis de tempo. As funções representativas dos blocos de comando são definidas previamente, e chamadas na execução do loop principal.

Cada faixa de velocidade do abrasômetro está atrelada aos coeficientes **a** e **b** da equação 4.5 (relacionados na tabela 4.1), de modo que é possível alterar a velocidade linear do ensaio apenas com a definição desses parâmetros nos blocos de controle da velocidade. Assim, uma estrutura do tipo `switch/case`, comum à linguagem C, Java etc, pode ser utilizada como estrutura operacional; isto é, um parâmetro de seleção é inserido pelo usuário, de forma que o seu valor aciona cada case da estrutura. Paralelamente, cada case representa uma velocidade linear, ou seja, cada case abriga os blocos de controle para aquela velocidade selecionada.

### 7.3 Operação e interface homem-máquina

A operação do abrasômetro pode ser mais facilmente compreendida após a síntese do algoritmo operacional. Os sensores de posição (começo e final de curso) são adicionados à estrutura de controle para determinar o começo e o final do ensaio. O usuário define a velocidade do ensaio, o início do ensaio e a reversão (retorno do mecanismo de quatro barras à posição inicial) através de comandos na interface homem-máquina (IHM), mostrada na figura 7.3.1. Trata-se de um display lcd de 16 colunas e 2 linhas, onde são exibidas informações ao usuário.

Tomando como exemplo o ensaio realizado à velocidade de 10 cm/s, na posição inicial o sensor de começo de curso deve estar ativado e o sensor de final de curso, desativado (figura 7.3.2 (a)). O usuário deve ajustar, através dos botões **MIN.** e **MAX.**, a velocidade até o display exibir 10 cm/s. Uma vez preparados os pesos mortos e o pino no mandrilho, o usuário inicia o ensaio apertando o botão **INICIAR**. Nesse instante, o motor do fuso desloca o mecanismo de quatro barras sobre a cunha até que o pino toque o disco, já em rotação; a mensagem "ENSAIO A 10 CM/S" é exibida no display (figura 7.3.2 (b)). A velocidade de rotação do motor do fuso é predefinida nos blocos de velocidade, e a velocidade do motor do pino é controlada por um potenciômetro

---

(em malha aberta).

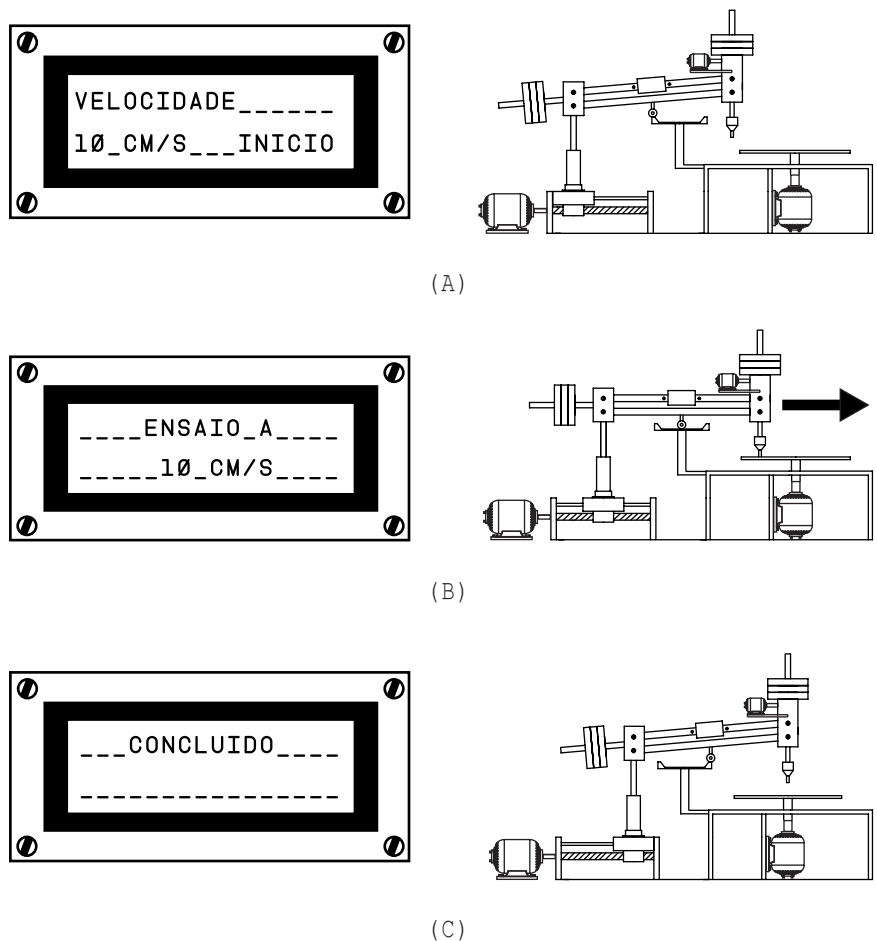
Ao final do ensaio, o sensor de final de curso é acionado, desligando os motores e exibindo no display a mensagem "ENSAIO FINALIZADO" (figura 7.3.2 (c)). Nesse momento o usuário pode apertar o botão **REVERSÃO**, invertendo o sentido de rotação do motor do fuso e retornando o mecanismo de quatro barras até a posição inicial do ensaio, quando o sensor de começo de curso é novamente acionado. O usuário então pode selecionar uma nova velocidade, apertar o botão **INICIAR** e repetir o processo.

Figura 7.3.1 - Interface homem máquina



Fonte: autoria própria.

Figura 7.3.2 - Execução do ensaio

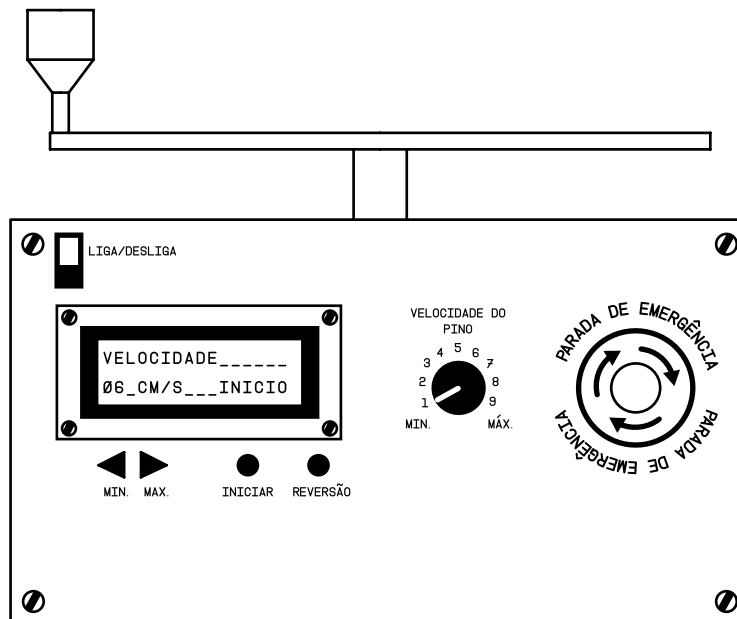


Fonte: autoria própria.

A nível da lógica de programação, há a adição das condições de sensores de posição ativados e desativados, a configuração das portas de freio e reversão no drive ponte H e a adição de um bloco de reversão na estrutura *switch/case*.

Os sensores de posição determinam o acionamento do sentido de giro dos motores, baseado nos comandos do drive ponte H apresentado no Capítulo VI, bem como as mensagens exibidas na IHM. Por questões de segurança, os motores permanecem na configuração de frenagem do drive ponte H tanto na posição inicial do ensaio quanto na posição final.

Figura 7.3.3 - Painel de controle do abrasômetro



Fonte: autoria própria.

O painel de controle proposto tem o viés apresentado na figura 7.3.3. Nele são observados a IHM, um interruptor para ligar e desligar o equipamento; um botão de parada de emergência, que corta a alimentação elétrica na ocorrência de algum sinistro.

No Apêndice A é mostrado o diagrama das conexões elétricas do controlador, da IHM e do painel de controle. O Apêndice B traz o algoritmo de controle em linguagem Arduino.

## PARTE IV

### CONCLUSÃO

O projeto do abrasômetro pino-lixo, como mostrado ao longo deste trabalho, envolve elementos de cinemática, dinâmica, sistemas de controle, lógica de programação e eletrônica de potência. O êxito do projeto está fundamentalmente relacionado ao correto casamento entre esses elementos.

O Capítulo VIII tem a finalidade de relatar o que é esperado da construção do abrasômetro, os possíveis desvios entre o projeto e a execução e as limitações do sistema de controle.

Este Capítulo relata, também, as observações feitas a partir de ensaios com um modelo, em escala, do sistema de controle do abrasômetro, destacando falhas e melhorias a serem aplicadas na construção do aparelho.

---

---

## CAPÍTULO VIII

### Considerações Sobre o do Sistema de Controle

O algoritmo do sistema de controle foi ensaiado com o auxílio de um Arduino modelo Uno, com um drive ponte H do tipo L298N e um mini motor DC (imã permanente) com encoder acoplado, rotacionando sem carga. Alguns desvios entre projeto e execução foram detectados.

Este Capítulo tem por objetivo mencionar os problemas encontrados e propor melhorias para a construção do aparelho.

#### 8.1 Do controle proporcional e do sistema de controle

O controle da velocidade do disco envolve uma rampa de aceleração. Um certo tempo é demandado desde o cálculo do *setpoint*, até a geração do sinal PWM e o seu respectivo chaveamento pelo drive ponte H. Entretanto, a forma de controle por *offset* (proporcional) não tem a capacidade de atuar de modo a melhorar a resposta em regime permanente e nem a resposta transitória do sistema. De fato, por se tratar de uma rampa de aceleração, não há a ocorrência de um regime permanente propriamente dito; contudo, entre cada loop do controlador, há um respectivo tempo de subida do sinal (até atingir o novo *setpoint*) e um tempo para que o sinal estabilize no *setpoint* desejado, compondo assim a resposta transitória do sistema.

O controlador ideal deve ser capaz de estabilizar o sinal no *setpoint* no tempo de estabilização desejado e com a menor ultrapassagem possível entre do sinal enviado e o *setpoint* (*overshoot*). Assim sendo, configura-se uma forma de controle conhecida como proporcional e derivativo; a ação derivativa se encarrega de atenuar ou amplificar o ganho do sinal de modo a atender os requisitos transitórios do sistema (BOTTURA, 1982).

Uma forma de controle proporcional pura gera uma resposta que oscila muito, pois o sinal de *feedback* gerado pelo encoder tende a somar ou subtrair o *offset* para o *loop* seguinte, sem atuar preventivamente na resposta transitória a cada *loop*. Logo, espera-se que a resposta real da velocidade do disco tenha a forma mostrada na figura 8.1.1, que ilustra a instabilidade do controlador pela busca do *setpoint*.

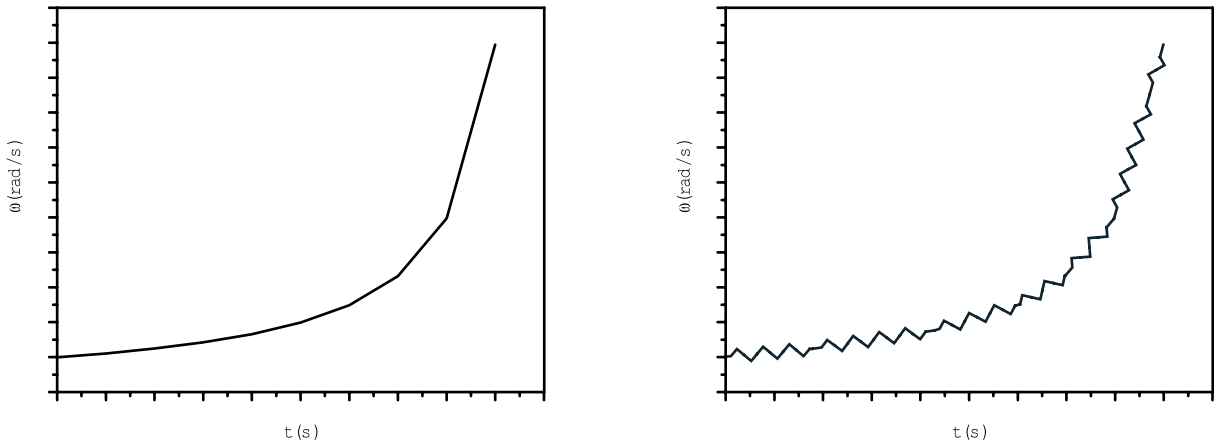
Com relação ao fuso, que opera a velocidade constante, o controle proporcional ocasiona menor oscilação na velocidade do que no controle da velocidade do disco: dessa forma não há preocupação com a resposta transitória do sistema; mas sim com a resposta em regime permanente. Contudo, o acréscimo ou decréscimo do *offset* a cada *loop* dificulta a estabilização do sinal no *setpoint* desejado, causando um erro em regime permanente caracterizado pela diferença entre o sinal enviado e o *setpoint* (figura 8.1.2).

A redução ou eliminação do erro de regime permanente é feita através

---

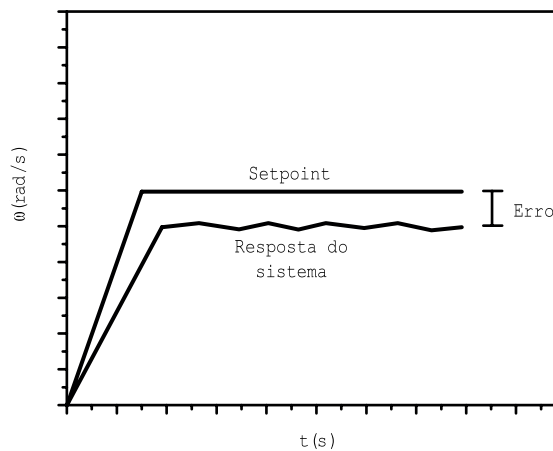
do controle proporcional com ação integral, que se caracteriza pela maior exatidão na resposta em regime permanente, sem alterar significativamente a resposta transitória.

Figura 8.1.1 - Comparação ilustrativa entre a rampa ideal para o motor do disco (esquerda) e a rampa gerada pelo controle proporcional puro (direita)



Fonte: autoria própria.

Figura 8.1.2 - Comparação ilustrativa entre o *setpoint* e a resposta do sistema para a velocidade do fuso com controle proporcional puro



Fonte: autoria própria.

Para o pino, que possui controle em malha aberta, a precisão e a exatidão na velocidade de rotação estão intimamente ligadas à calibração do sistema. É recomendável ajustar o potenciômetro em uma dada posição e, em seguida, medir a velocidade de rotação do pino, com o auxílio de um tacômetro ou algum outro sensor de velocidade angular semelhante. Uma vez que a velocidade é conhecida, a posição do potenciômetro pode ser demarcada com a velocidade correspondente.

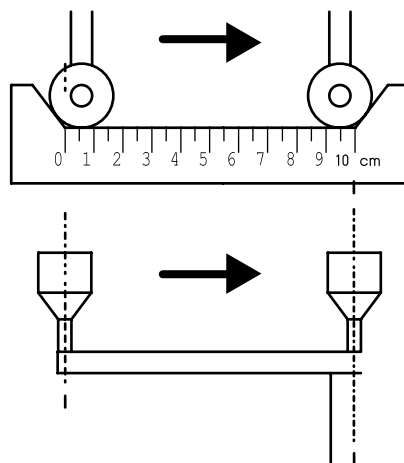
## 8.2 Da Operação e Construção

A operação do abrasômetro pino-lixas, tal como projetado, envolve cer-

tos ajustes que estão relacionados aos desvios na fabricação e montagem dos componentes. Constituem, pois, comprimentos de elos, folgas, interferências, entre outros. Do ponto de vista do projeto, a primeira ressalva a ser feita é o correto posicionamento das cunhas de suspensão de início e final de ensaio, figura 8.2.1. A disposição das mesmas deve garantir que o deslocamento radial do pino seja exatamente 10 cm, suspendendo o pino quando este estiver na posição central do disco, evitando que o pino sobreponha trechos de abrasivo da lixa já desgastados no começo do ensaio.

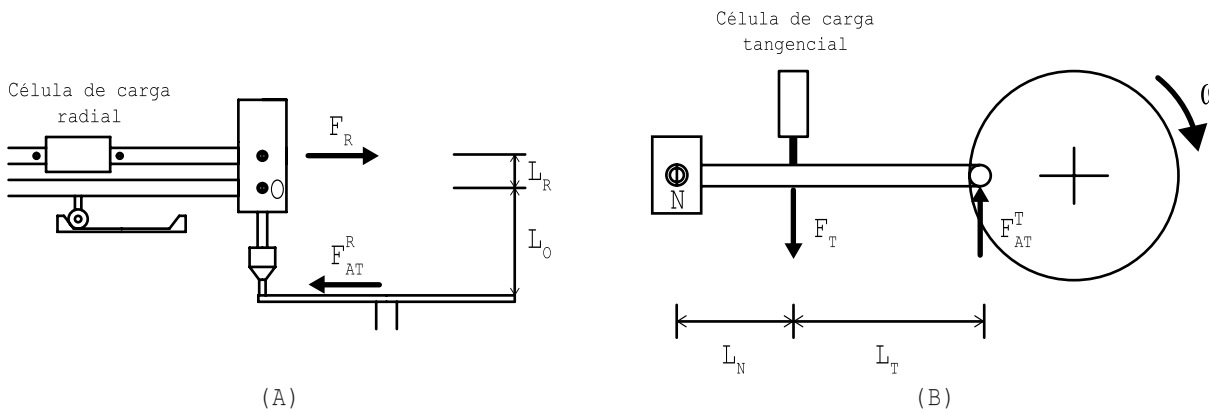
É destacável, também, a leitura das componentes radial e tangencial da força de atrito pelas células de carga. O posicionamento das células de carga no mecanismo de quatro barras do braço, em relação ao posicionamento do pino, gera braços de alavanca que devem ser compensados para a correta aquisição dos dados do ensaio. Para o caso da componente radial da força de atrito,  $F_{AT}^R$ , seu módulo é obtido da aplicação do equilíbrio estático de momento em relação ao ponto  $O$ , que está pivotado em um elo de rigidez alta (figura 8.2.2 (A)) e leva à equação 8.1, onde  $F_R$  é a força de atrito lida pela célula de carga radial.

Figura 8.2.1 - Correto posicionamento das cunhas de suspensão do pino



Fonte: autoria própria.

Figura 8.2.2 - Braços de alavanca na leitura da componente: (A) radial (vista lateral) e (B) tangencial (vista superior) da força de atrito



Fonte: autoria própria.

A componente tangencial é obtida da mesma forma, aplicando o equilíbrio estático de momento em relação ao ponto  $\mathbf{H}$ , pivotado no sentido paralelo à superfície do disco (figura 8.2.2 (B)); o resultado é a equação 8.2, em que  $\mathbf{F}_{AT}^T$  é a força de atrito tangencial e  $\mathbf{F}_T$  é a força de atrito lida pela célula de carga tangencial.

$$F_{AT}^R = F_R \frac{L_R}{L_0} \quad (8.1)$$

$$F_{AT}^T = F_T \frac{L_H}{L_H + L_T} \quad (8.2)$$

### 8.3 Do Acionamento e Propulsão

A partir de ensaios realizados com um modelo de drive ponte H (L298N), uma placa Arduino modelo Uno R3 e diferentes motores DC de ímã permanente, todos rotacionando sem carga e com menores proporções que aquele apresentado no Capítulo VI, notou-se que os motores não conseguem vencer a inércia com uma taxa de bits na saída PWM menor do que aproximadamente 70 bits.

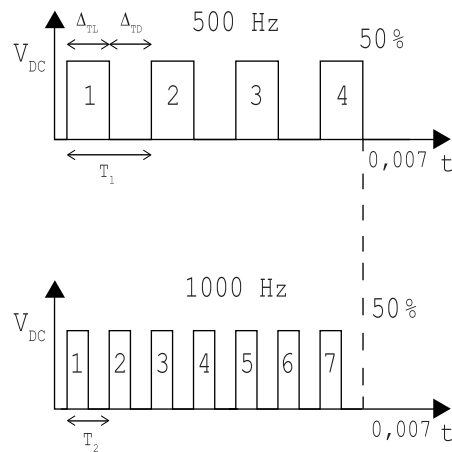
Como posto por UMANS (2014), o controle de conjugado de motores DC através de técnicas PWM produz um valor de corrente média na armadura do motor que está entre a corrente máxima (aplicação da tensão máxima) e a corrente nula (quando a tensão é desligada pelo chaveamento); no entanto, no momento da aplicação da tensão máxima pelo chaveamento, também se atinge nas espiras da armadura a magnitude de corrente máxima. Esta, por sua vez, tende a se manter durante um certo período de tempo devido ao efeito de indutância das espiras da armadura. O tempo em que a magnitude da corrente permanece mais elevada na armadura está intimamente ligado à largura do pulso e também à frequência com que o sinal PWM é gerado: quanto maior a frequência, mais pulsos são gerados pelo chaveamento.

Quando a frequência do sinal PWM é relativamente baixa, menos pulsos são gerados e maior é o período entre os pulsos. Com um período relativamente maior entre pulsos, é esperado que o efeito da indutância nas espiras da armadura não consiga sustentar a magnitude da corrente até o próximo pulso, fazendo com que a mesma decaia e reduza a força eletromotriz. Dessa forma, compromete-se a magnitude do torque do motor. No entanto, para larguras de pulso maiores, ainda que com baixa frequência de chaveamento, aumenta-se o tempo de aplicação da tensão máxima e diminui-se o tempo de tensão nula; logo, o efeito indutivo das espiras da armadura pode restabelecer a constância da corrente e da força eletromotriz, restaurando o torque nominal (ou aproximadamente nominal) do motor.

A figura 8.2.3 mostra uma comparação entre dois sinais PWM com o mesmo duty cycle, porém com frequências de chaveamento diferentes. Para a frequência de 500 Hz, têm-se um certo período de sinal ligado,  $\Delta_{TL}$ , e um certo período de sinal desligado,  $\Delta_{TD}$ , para um período de onda  $T_1$  igual a 0,002 s; já para a frequência de 1000 Hz, todas essas variáveis são reduzidas à metade, em especial o período de sinal desligado. É notável que num mesmo intervalo de tempo, igual a 0,007 s, o sinal PWM de 1000 Hz produz mais pulsos do que o

sinal PWM de 500 Hz; como consequência o sinal PWM de maior frequência tem a largura de pulso menor do que o sinal de menor frequência, para que o mesmo duty cycle seja mantido. Como no sinal de 1000 Hz o período de sinal desligado é menor, é esperado que este seja melhor para conservar o torque do motor em rotações mais baixas ajustadas pelo drive ponte H.

Figura 8.2.3 - Comparação entre diferentes frequências de sinal PWM



Fonte: autoria própria.

#### 8.4 Considerações Finais

A partir do projeto e dos ensaios do protótipo do sistema de controle do abrasômetro pino-lixas, é concluído que:

1. A confiabilidade dos resultados dos ensaios está intimamente relacionada à qualidade e à precisão da fabricação dos componentes estruturais, exigindo tolerâncias tão apertadas quanto possível;
2. É de extrema necessidade, quando da construção do abrasômetro, que os motores e drives adquiridos sejam testados, em especial com relação à resposta ao sinal PWM. A velocidade dos motores deve ser medida em função do sinal dos drives; caso a velocidade linear esteja fora da faixa e/ou o torque seja insuficiente, deve-se adotar relações de transmissão apropriadas entre os motores e o fuso, disco e pino;
3. Após a construção do abrasômetro, o mesmo seja submetido a um processo de validação, onde são reproduzidos ensaios com materiais (pinos e lixas) conhecidos, para verificar se os resultados de perda de massa do pino e de força de atrito são suficientemente precisos e confiáveis;
4. É recomendado, para futuros trabalhos, que o controle proporcional, integral e derivativo seja implementado ao algoritmo de programação, para que se obtenha controle mais preciso das velocidades envolvidas no ensaio.

---

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIEXPRESS. Disponível em: < [https://pt.aliexpress.com/item/33028870661.html?spm=a2g03.search0104.3.139.1d9418e93HnLgh&ws\\_ab\\_test=searchweb0\\_0%2C-searchweb201602\\_2\\_10065\\_10068\\_10](https://pt.aliexpress.com/item/33028870661.html?spm=a2g03.search0104.3.139.1d9418e93HnLgh&ws_ab_test=searchweb0_0%2C-searchweb201602_2_10065_10068_10) >. Acesso em mar. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **G99 Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus**. Filadélfia, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **G132 Standard Test Method for Pin Abrasion Testing**. Filadélfia, 1996.

BOTTURA, C. P. **Princípios de Controle e Servomecanismos**. 1 ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A., 1982. cap. 3.

BUDYNAS, R.; NISBETT, K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 8 ed. Porto Alegre: Editora Mc Graw Hill, 2011. cap. 7.

DKM MOTOR COMPANY. **DC Motors**. Disponível em: < [https://www.raveo.cz/sites/default/files/dkm/katalogy/motory/DC%20MOTOR%20\(15W~120W\).pdf](https://www.raveo.cz/sites/default/files/dkm/katalogy/motory/DC%20MOTOR%20(15W~120W).pdf) >. Acesso em mar. 2019.

EMC - ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO. Disponível em: <<https://www2.emc.ufg.br/p/4477-engenharia-mecanica>>. Acesso em fev. 2019.

FARIA, G. S. **PROJETO DE UM SISTEMA HIDRÁULICO PARA A DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE PERDA DE CARGA EM VÁLVULAS DE PÉ**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

FLOYD, T. **Sistemas Digitais Fundamentos e Aplicações**. 9 ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2007. cap. 12.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos Elétricos**. 4 ed. São Paulo: Editora Érica, 2008. cap. 6.

GRABCAD COMMUNITY. Disponível em: < <https://grabcad.com/library/arduino-mega-2560-r3> >. Acesso em mar. 2019.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology Friction and Wear of Engineering Materials**. Londres: Editora Arnold, 1992. cap. 5.

JOST, H. P.. **Tribology - Origin and Future**. Netherlands: Editora Elsevier Sequoia, 1990.

MERCADO LIVRE. Disponível em: < <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB->

---

-1040261481-controlador-pwm-20a-10v-60v-dc-controle-de-rotaco-motor-dc-\_JM?quantity=1 >. Acesso em mar. 2019.

NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 3 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2002. cap. 1 e 9.

NORTON, R. L. **Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos**. 1. ed. Porto Alegre: Editora Mc Graw Hill, 2010. p. 534 a 539.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas Uma Abordagem Integrada**. 4 ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2013. cap. 10.

OMRON ROTARY ENCODER. Disponível em: < [https://www.ia.omron.com/data\\_pdf/cat/e6b2-c\\_ds\\_e\\_6\\_1\\_csm491.pdf?id=487](https://www.ia.omron.com/data_pdf/cat/e6b2-c_ds_e_6_1_csm491.pdf?id=487) >. Acesso em mar. 2019.

PETRUZELLA, F. D. **Motores Elétricos e Acionamento**. 1. ed. Porto Alegre: Editora AMGH, 2013. cap. 5, 9 e 10.

SILVA NETO, M. **PROJETO DO SISTEMA DE LUBRIFICAÇÃO E LEIAUTE ESTRUTURAL DE UMA BANCADA PARA UM TURBO-COMPRESSOR**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017. p. 63.

SILVESTRE, A. J. **APLICAÇÃO DA TÉCNICA DO ENVELOPE E ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO LUBRIFICANTE EM ROLAMENTOS DO TIPO ESFERA SIMPLES**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016. p. 45.

STEWART, J. **Cálculo Volume II**. 5 ed. São Paulo: Editora Thomson Learning, 2007. cap. 13.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7 ed. Porto Alegre: Editora AMGH, 2014. cap. 7 e 10.

VIEIRA, M. S. **PROJETO DE UMA BANCADA DIDÁTICA DE HIDROSTÁTICA**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física I Mecânica**. 12 ed. São Paulo: Editora Pearson, 2008. cap. 2, 3, 9 e 10.

---



## APÊNDICE B - Algoritmo de Controle

```
//ALGORITMO DE CONTROLE DO ABRASÔMETRO PINO-LIXA
//PROJETISTA: BRUNO FERREIRA COUTO - ENGENHARIA MECÂNICA - UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
//GOIANIA, 21 DE JUNHO DE 2019

#include <LiquidCrystal.h> // Adiciona a função que ativa o display lcd 16x2

#define PWM2          12
#define PWM1          13
#define encoderFuso   19
#define encoderDisco  20
#define SCC           27
#define SFC           29
#define BMIN          31
#define BMAX          33 // Endereçamento dos pinos do Arduino
#define BREV          35
#define BINC          37
#define EN1           47
#define EN2           49
#define DIR1          51
#define DIR2          53

//Definição das variáveis

volatile int pulsosDisco;
volatile int pulsosFuso;
unsigned long timerEnsaio;
unsigned long timerSetpoint;
int resoluçãoEncoderDisco = 400; //Resolução do encoder do motor do disco e do motor
int resoluçãoEncoderFuso = 400; //do fuso, em pulsos por revolução
int seletor;
float omegaMaxDisco = 25.133; //Velocidade máxima nominal do motor do disco e do
float omegaMaxFuso = 25.133; //do fuso, em rad/s
float omegaSetpointDisco;
float omegaSetpointFuso;
float setpointDisco;
float setpointFuso;
float omegaEncoderDisco;
float omegaEncoderFuso;

LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7); // Pinagem do lcd 16x2

void setup()
{

lcd.begin(16, 2); // Inicia o lcd de 16x2

pinMode(PWM1, OUTPUT); //Define o pino PWM1 como uma saída
pinMode(PWM2, OUTPUT); //Define o pino PWM2 como uma saída
pinMode(encoderFuso, INPUT); //Define o pino encoderFuso como uma entrada
pinMode(encoderDisco, INPUT); //Define o pino encoderDisco como uma entrada
pinMode(SCC, INPUT_PULLDOWN); //Define o pino SCC como uma entrada
pinMode(SFC, INPUT_PULLDOWN); //Define o pino SFC como uma entrada
pinMode(BMIN, INPUT_PULLDOWN); //Define o pino BMIN como uma entrada
pinMode(BMAX, INPUT_PULLDOWN); //Define o pino BMAX como uma entrada
pinMode(BREV, INPUT_PULLDOWN); //Define o pino BREV como uma entrada
pinMode(BINC, INPUT_PULLDOWN); //Define o pino BINC como uma entrada
pinMode(EN1, OUTPUT); //Define o pino IN1 como uma saída
pinMode(EN2, OUTPUT); //Define o pino IN2 como uma saída
pinMode(DIR1, OUTPUT); //Define o pino IN01 como uma saída
pinMode(DIR2, OUTPUT); //Define o pino IN02 como uma saída

// Função de interrupção da leitura do pino na transição do nível lógico baixo para alto
```

```

attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(encoderFuso), contadorFuso, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(encoderDisco), contadorDisco, RISING);

timerEnsaio = 0; //Zera a contagem do tempo de ensaio, que dura 10 s (contados de 0 a 9 s)
timerSetpoint = 0; //Zera o timer que representa o domínio da função da velocidade de ref.
pulsosFuso = 0; //Zera a função contadorFuso()
pulsosDisco = 0; //Zera a função contadorDisco()
tempoVelho = 0; //Zera o timer auxiliar da função leituraEncoderDisco e leituraEncoderFuso
}

//BLOCOS 1 E 2 - ENTRADA DE REFERÊNCIA E CONVERSÃO DE rad/s PARA bit

void setPointDisco()
{
omegaSetpointDisco = 1/(a + b * timerSetpoint); //Velocidade de referência em rad/s
setpointDisco = (255/omegaMaxDisco) * omegaSetpointDisco; //Conversão de rad/s para bit

if(setpointDisco > 255){ setpointDisco = 255;}

analogWrite(PWM1,setpointDisco); //Envia à saída PWM1 o valor de setpointDisco
}

void setPointFuso()
{
omegaSetpointFuso = 14.809; //Velocidade de referência para 1 cm/s em rad/s
setpointFuso = (255/omegaMaxFuso) * omegaSetpointFuso; //Conversão de rad/s para bit

if(setpointFuso > 255){ setpointFuso = 255;}

analogWrite(PWM2,setpointFuso); //Envia à saída PWM2 o valor de setpointFuso
}

//BLOCOS 6 E 7 - LEITURA E CONTAGEM DOS PULSOS DO ENCODER E CONVERSÃO DA VELOCIDADE

void contadorDisco()
{
//Realiza a contagem dos pulsos a cada interrupção na entrada digital do encoder do disco
pulsosDisco++;
}

void contadorFuso()
{
//Realiza a contagem dos pulsos a cada interrupção na entrada digital do encoder do fuso
pulsosFuso++;
}

void leituraEncoderDisco()
{
if (millis() - tempoVelho >= 100) //Tempo de loop
{
//Cálculo da velocidade angular real do motor em rad/s
omegaEncoderDisco = pulsosDisco * (2 * 3.14 * 1000 / resoluçãoEncoderDisco) / (millis() - tempoV-
elho);
}
}

void leituraEncoderFuso()

```

```
{
    if (millis() - tempoVelho >= 100)          //Tempo de loop
    {

        //Cálculo da velocidade angular real do motor em rad/s
        omegaEncoderFuso = pulsosFuso * (2 * 3.14 * 1000 / resoluçãoEncoderFuso ) / (millis() - tempoVelho);
    }
}

//BLOCO 3 - CONTROLE PROPORCIONAL (GANHO UNITÁRIO)

void controleProporcionalDisco()
{

//Aplica o controle proporcional somente quando o motor está em rotação
if(omegaEncoderDisco != 0)
{

    //Acelera o motor se a velocidade de rotação for menor que a de referência
    if(omegaEncoderDisco < omegaSetpointDisco)
    {
        setPointDisco = setPointDisco + (255/omegaMaxDisco)*(omegaSetpointDisco - omegaEncoderDisco);
    }
    if(setPointDisco > 255){ setPointDisco = 255;}
    analogWrite(PWM1,setPointDisco);
}
//Desacelera o motor se a velocidade de rotação for maior que a de referência
else (omegaEncoderDisco > omegaSetpointDisco);
{
    setPointDisco = setPointDisco - (255/omegaMaxDisco)*(omegaEncoderDisco - omegaSetpointDisco);
}
if(setPointDisco < 0){ setPointDisco = 0;}
analogWrite(PWM1,setPointDisco);
}
}

void controleProporcionalFuso()
{

//Aplica o controle proporcional somente quando o motor está em rotação
if(omegaEncoderFuso != 0)
{

    //Acelera o motor se a velocidade de rotação for menor que a de referência
    if(omegaEncoderFuso < omegaSetpointFuso)
    {
        setPointFuso = setPointFuso + (255/omegaMaxFuso)*(omegaSetpointFuso - omegaEncoderFuso);
        if(setPointFuso > 255){ setPointFuso = 255;}
        analogWrite(PWM2,setPointFuso);
    }
    //Desacelera o motor se a velocidade de rotação for maior que a de referência
    else (omegaEncoderFuso > omegaSetpointFuso);
    {
        setPointFuso = setPointFuso - (255/omegaMaxFuso)*(omegaEncoderFuso - omegaSetpointFuso);
        if(setPointFuso < 0){ setPointFuso = 0;}
        analogWrite(PWM2,setPointFuso);
    }
}
}

void loop()
{
```

---

---

```

if(digitalRead(BMAX) == HIGH)                                //Acresce o seletor de velocidade
{
seletor++;
if(seletor > 10){seletor = 10; }
}

if(digitalRead(BMIN) == HIGH)                                //Decresce o seletor de velocidade
{
seletor--;
if(seletor < 0){ seletor = 0; }
}

lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("VELOCIDADE");                                     //Imprime mensagens na IHM
lcd.setCursor(3, 1);
lcd.print(" CM/S");
lcd.print(seletor);
lcd.setCursor(11, 1); /lcd.print("INICIO");

digitalWrite(EN1, HIGH);                                     //Freia o motor do fuso
digitalWrite(EN2, HIGH);                                     //Freia o motor do disco

//Comando de início do ensaio
if(digitalRead(BINC) == HIGH && digitalRead(SCC) == HIGH)
{
    switch(seletor)                                         //Estrutura do menu
    {
        case 1:                                             //Velocidade de 1 cm/s

            a= 11,54701;
            b= -0,57735;

            lcd.clear();
            lcd.setCursor(5, 0);
            lcd.print("ENSAIO A");
            lcd.setCursor(6, 1);
            lcd.print("01 CM/S");

            //Ativa os dois canais do drive ponte H para a rotação do fuso e disco
            digitalWrite(DIR1, HIGH);
            digitalWrite(DIR2, HIGH);
            digitalWrite(EN1, HIGH);
            digitalWrite(EN2, HIGH);

            while(timerEnsaio < 19000 || digitalRead(SFC) == LOW)
            {
                omegaSetpointFuso = 14.809/2;
                setpointFuso = (255/omegaMaxFuso) * omegaSetpointFuso;
                if(setpointFuso > 255){ setpointFuso = 255;}
                analogWrite(PWM2,setpointFuso);

                void setPointDisco();
                void contadorDisco();
                void contadorFuso();
                void leituraEncoderDisco();                               //Blocos de funções
                void leituraEncoderFuso();
                void controleProporcionalDisco();
                void controleProporcionalFuso();

                tempoVelho = millis();
                timerSetpoint = timerSetpoint + millis();
                timerEnsaio = timerEnsaio + 100;
            }
        seletor = 0; //Zera o seletor para um novo ensaio posterior
    }
}

```

---

```
        break;

        case 2:                //Velocidade de 2 cm/s

            a= 5,7735;
            b= -0,57735;

            lcd.clear();
            lcd.setCursor(5, 0);
            lcd.print("ENSAIO A");
            lcd.setCursor(6, 1);
            lcd.print("02 CM/S");

            //Ativa os dois canais do drive ponte H para a rotação do fuso e disco
            digitalWrite(DIR1, HIGH);
            digitalWrite(DIR2, HIGH);
            digitalWrite(EN1, HIGH);
            digitalWrite(EN2, HIGH);

            while(timerEnsaio < 9000 || digitalRead(SFC) == LOW)
            {
                void setPointFuso();
                void setPointDisco();
                void contadorDisco();
                void contadorFuso();
                void leituraEncoderDisco();                //Blocos de funções
                void leituraEncoderFuso();
                void controleProporcionalDisco();
                void controleProporcionalFuso();

                tempoVelho = millis();
                timerSetpoint = timerSetpoint + millis();
                timerEnsaio = timerEnsaio + 100;
            }
            seletor = 0; //Zera o seletor para um novo ensaio posterior
            break;

            case 3:                //Velocidade de 3 cm/s

                a= 3,53553;
                b= -0,35355;

                lcd.clear();
                lcd.setCursor(5, 0);
                lcd.print("ENSAIO A");
                lcd.setCursor(6, 1);
                lcd.print("03 CM/S");

                //Ativa os dois canais do drive ponte H para a rotação do fuso e disco
                digitalWrite(DIR1, HIGH);
                digitalWrite(DIR2, HIGH);
                digitalWrite(EN1, HIGH);
                digitalWrite(EN2, HIGH);

                while(timerEnsaio < 9000 || digitalRead(SFC) == LOW)
                {
                    void setPointFuso();
                    void setPointDisco();
                    void contadorDisco();
                    void contadorFuso();
                    void leituraEncoderDisco();                //Blocos de funções
                    void leituraEncoderFuso();
                    void controleProporcionalDisco();
                    void controleProporcionalFuso();
                    tempoVelho = millis();
```

---

```
        timerSetpoint = timerSetpoint + millis();
        timerEnsaio = timerEnsaio + 100;
    }
    seletor = 0; //Zera o seletor para um novo ensaio posterior
    break;

    case 4:                //Velocidade de 4 cm/s

    a= 2,58199;
    b= -0,2582;

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(5, 0);
    lcd.print("ENSAIO A");
    lcd.setCursor(6, 1);
    lcd.print("04 CM/S");

    //Ativa os dois canais do drive ponte H para a rotação do fuso e disco
    digitalWrite(DIR1, HIGH);
    digitalWrite(DIR2, HIGH);
    digitalWrite(EN1, HIGH);
    digitalWrite(EN2, HIGH);

    while(timerEnsaio < 9000 || digitalRead(SFC) == LOW)
    {
        void setPointFuso();
        void setPointDisco();
        void contadorDisco();
        void contadorFuso();
        void leituraEncoderDisco();           //Blocos de funções
        void leituraEncoderFuso();
        void controleProporcionalDisco();
        void controleProporcionalFuso();

        tempoVelho = millis();
        timerSetpoint = timerSetpoint + millis();
        timerEnsaio = timerEnsaio + 100;
    }
    seletor = 0; //Zera o seletor para um novo ensaio posterior
    break;

    case 5:                //Velocidade de 5 cm/s

    a= 2,04124;
    b= -0,20412;

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(5, 0);
    lcd.print("ENSAIO A");
    lcd.setCursor(6, 1);
    lcd.print("05 CM/S");

    //Ativa os dois canais do drive ponte H para a rotação do fuso e disco
    digitalWrite(DIR1, HIGH);
    digitalWrite(DIR2, HIGH);
    digitalWrite(EN1, HIGH);
    digitalWrite(EN2, HIGH);

    while(timerEnsaio < 9000 || digitalRead(SFC) == LOW)
    {
        void setPointFuso();
        void setPointDisco();
        void contadorDisco();
        void contadorFuso();
        void leituraEncoderDisco();           //Blocos de funções
```

```
        void leituraEncoderFuso();
        void controleProporcionalDisco();
        void controleProporcionalFuso();

        tempoVelho = millis();
        timerSetpoint = timerSetpoint + millis();
        timerEnsaio = timerEnsaio + 100;
    }
    seletor = 0; //Zera o seletor para um novo ensaio posterior
    break;

    case 6:                //Velocidade de 6 cm/s

        a= 1,69031;
        b= -0,16903;

        lcd.clear();
        lcd.setCursor(5, 0);
        lcd.print("ENSAIO A");
        lcd.setCursor(6, 1);
        lcd.print("06 CM/S");

        //Ativa os dois canais do drive ponte H para a rotação do fuso e disco
        digitalWrite(DIR1, HIGH);
        digitalWrite(DIR2, HIGH);
        digitalWrite(EN1, HIGH);
        digitalWrite(EN2, HIGH);

        while(timerEnsaio < 9000 || digitalRead(SFC) == LOW)
        {
            void setPointFuso();
            void setPointDisco();
            void contadorDisco();
            void contadorFuso();
            void leituraEncoderDisco();           //Blocos de funções
            void leituraEncoderFuso();
            void controleProporcionalDisco();
            void controleProporcionalFuso();

            tempoVelho = millis();
            timerSetpoint = timerSetpoint + millis();
            timerEnsaio = timerEnsaio + 100;
        }
        seletor = 0; //Zera o seletor para um novo ensaio posterior
        break;

    case 7:                //Velocidade de 7 cm/s

        a= 1,44338;
        b= -0,14434;

        lcd.clear();
        lcd.setCursor(5, 0);
        lcd.print("ENSAIO A");
        lcd.setCursor(6, 1);
        lcd.print("07 CM/S");

        //Ativa os dois canais do drive ponte H para a rotação do fuso e disco
        digitalWrite(DIR1, HIGH);
        digitalWrite(DIR2, HIGH);
        digitalWrite(EN1, HIGH);
        digitalWrite(EN2, HIGH);

        while(timerEnsaio < 9000 || digitalRead(SFC) == LOW)
        {
```

---

```
void setPointFuso();
void setPointDisco();
void contadorDisco();
void contadorFuso();
void leituraEncoderDisco();           //Blocos de funções
void leituraEncoderFuso();
void controleProporcionalDisco();
void controleProporcionalFuso();

tempoVelho = millis();
timerSetpoint = timerSetpoint + millis();
timerEnsaio = timerEnsaio + 100;
}
seletor = 0; //Zera o seletor para um novo ensaio posterior
break;

case 8:           //Velocidade de 8 cm/s

a= 1,25988;
b= -0,12599;

lcd.clear();
lcd.setCursor(5, 0);
lcd.print("ENSAIO A");
lcd.setCursor(6, 1);
lcd.print("08 CM/S");

//Ativa os dois canais do drive ponte H para a rotação do fuso e disco
digitalWrite(DIR1, HIGH);
digitalWrite(DIR2, HIGH);
digitalWrite(EN1, HIGH);
digitalWrite(EN2, HIGH);

while(timerEnsaio < 9000 || digitalRead(SFC) == LOW)
{
void setPointFuso();
void setPointDisco();
void contadorDisco();
void contadorFuso();
void leituraEncoderDisco();           //Blocos de funções
void leituraEncoderFuso();
void controleProporcionalDisco();
void controleProporcionalFuso();

tempoVelho = millis();
timerSetpoint = timerSetpoint + millis();
timerEnsaio = timerEnsaio + 100;
}
seletor = 0; //Zera o seletor para um novo ensaio posterior
break;

case 9:           //Velocidade de 9 cm/s

a= 1,11803;
b= -0,1118;

lcd.clear();
lcd.setCursor(5, 0);
lcd.print("ENSAIO A");
lcd.setCursor(6, 1);
lcd.print("09 CM/S");

//Ativa os dois canais do drive ponte H para a rotação do fuso e disco
digitalWrite(DIR1, HIGH);
digitalWrite(DIR2, HIGH);
```

---

```

digitalWrite(EN1, HIGH);
digitalWrite(EN2, HIGH);

while(timerEnsaio < 9000 || digitalRead(SFC) == LOW)
{
    void setPointFuso();
    void setPointDisco();
    void contadorDisco();
    void contadorFuso();
    void leituraEncoderDisco();           //Blocos de funções
    void leituraEncoderFuso();
    void controleProporcionalDisco();
    void controleProporcionalFuso();

    tempoVelho = millis();
    timerSetpoint = timerSetpoint + millis();
    timerEnsaio = timerEnsaio + 100;
}
seletor = 0; //Zera o seletor para um novo ensaio posterior
break;

case 10:           //Velocidade de 10 cm/s

a= 1,00504;
b= -0,1005;

lcd.clear();
lcd.setCursor(5, 0);
lcd.print("ENSAIO A");
lcd.setCursor(6, 1);
lcd.print("10 CM/S");

//Ativa os dois canais do drive ponte H para a rotação do fuso e disco
digitalWrite(DIR1, HIGH);
digitalWrite(DIR2, HIGH);
digitalWrite(EN1, HIGH);
digitalWrite(EN2, HIGH);

while(timerEnsaio < 9000 || digitalRead(SFC) == LOW)
{
    void setPointFuso();
    void setPointDisco();
    void contadorDisco();
    void contadorFuso();
    void leituraEncoderDisco();           //Blocos de funções
    void leituraEncoderFuso();
    void controleProporcionalDisco();
    void controleProporcionalFuso();

    tempoVelho = millis();
    timerSetpoint = timerSetpoint + millis();
    timerEnsaio = timerEnsaio + 100;
}
seletor = 0; //Zera o seletor para um novo ensaio posterior
break;

if(digitalRead(finalDeCurso) == HIGH)
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(4, 0);
    lcd.print("CONCLUÍDO");
    digitalWrite(EN1, LOW);           //Freia o motor do fuso
    digitalWrite(EN2, LOW);           //Freia o motor do disco
}

```

---

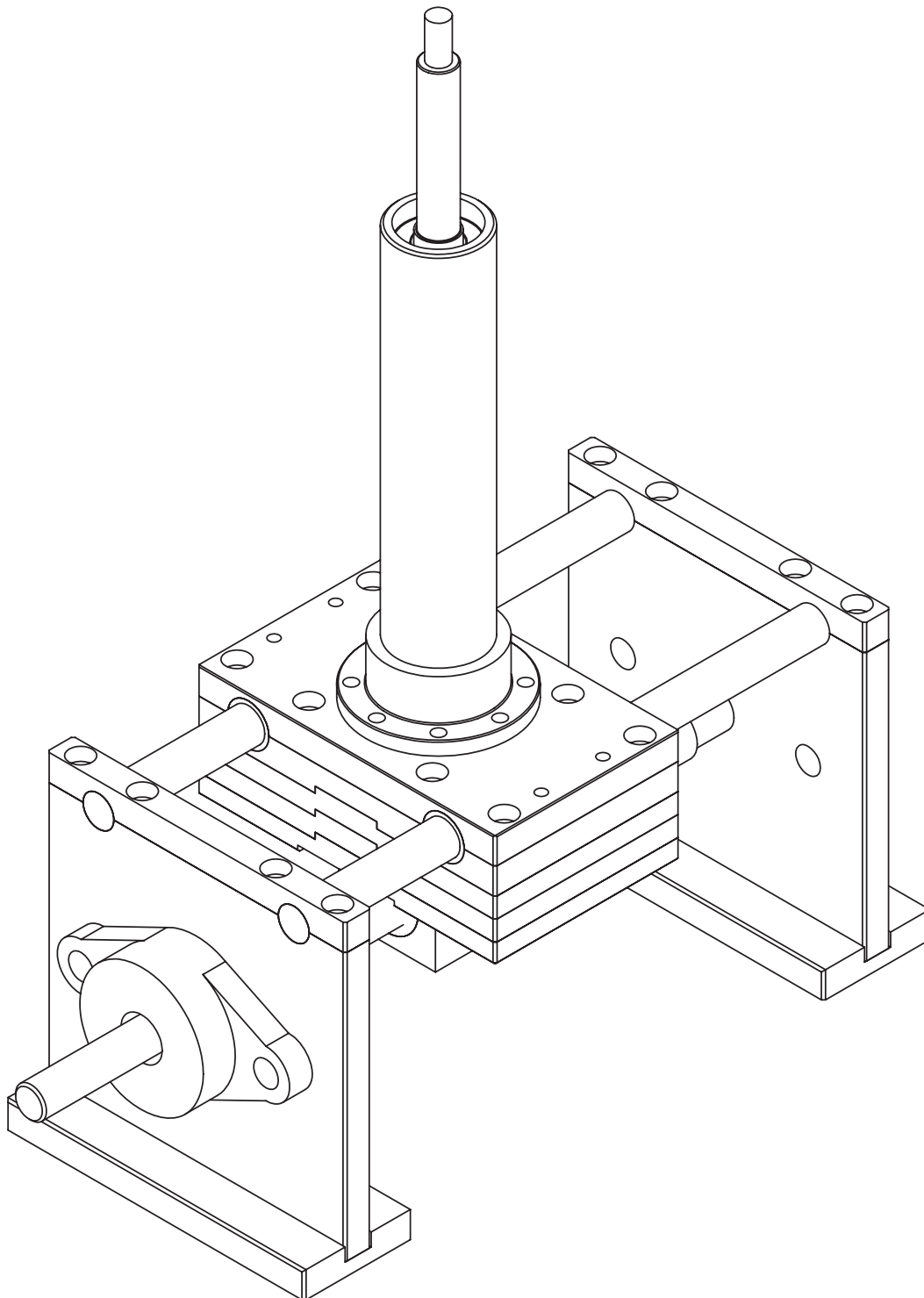
---

```
        //Botão "REVERSÃO" acionado ao final do ensaio
if(digitalRead(finalDeCurso) == HIGH && digitalRead(reversao) == HIGH)
{
    //Enquanto o sensor de começo de curso estiver desativado
    while(digitalRead(inicioDeCurso) == LOW)
    {
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(4, 0);
        lcd.print("REVERSAO");

        //Comandos para inverter a rotação do motor do fuso no drive ponte H
        digitalWrite(EN1, HIGH);
        digitalWrite(DIR1, LOW);
        analogWrite(pwmFuso, 150); //Aciona o motor do fuso
    }
}
}
```

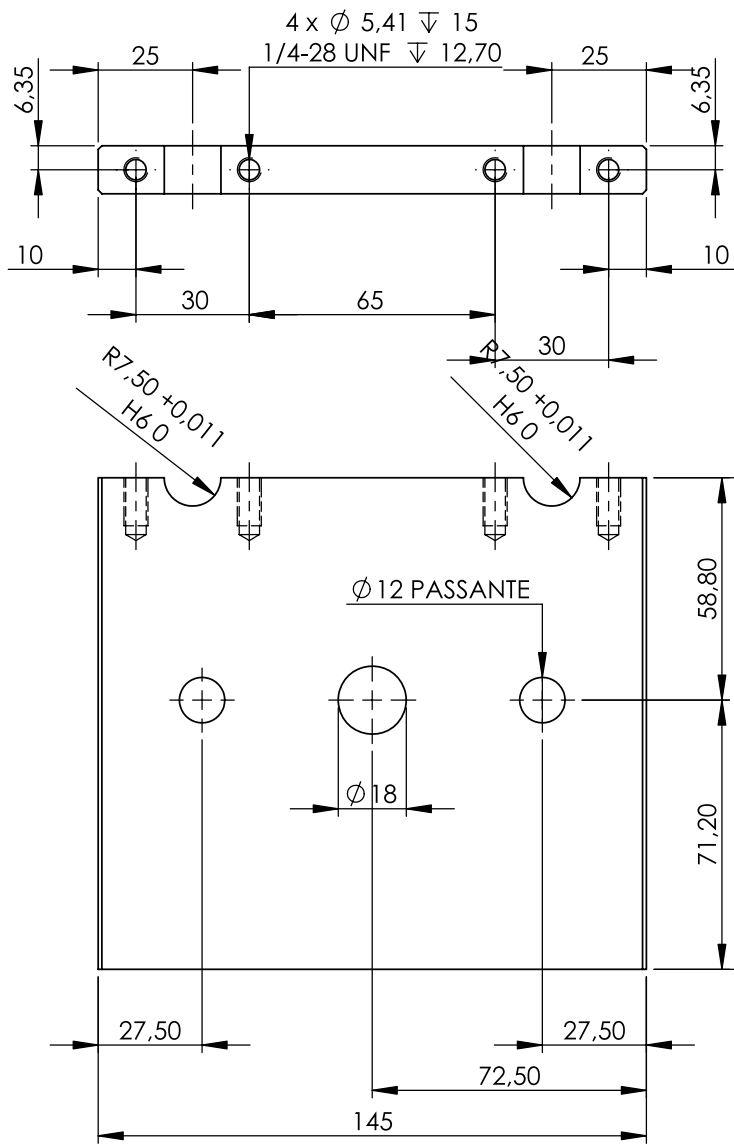
---

## APÊNDICE C - Desenhos Técnicos

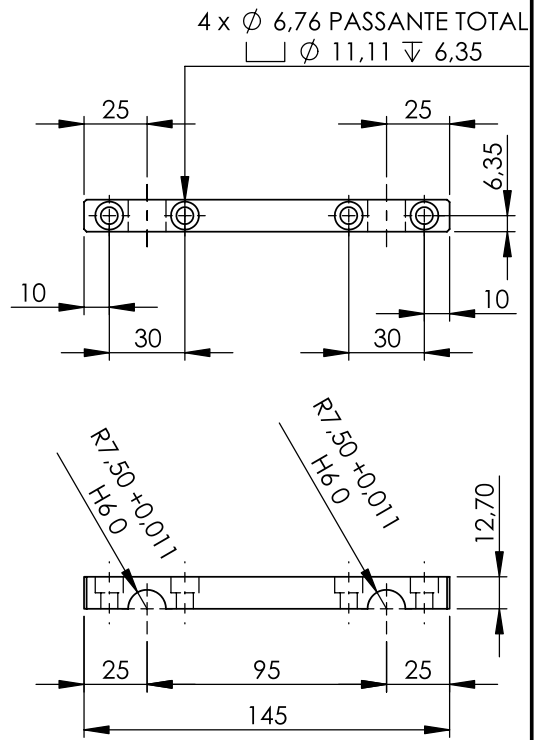


**ABRASÔMETRO PINO-LIXA  
MÓDULO 1:  
FABRICAÇÃO E MONTAGEM DA BASE**

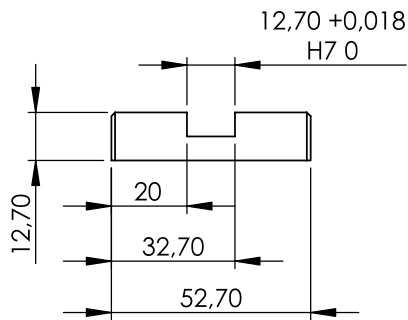
**PROJETISTA: BRUNO F. COUD  
ORIENTADOR: PROF. DR. SIGEO KITATANI JR.**



**SUPORTE DAS GUIAS  
(1:2)**



**TAMPA DO SUPORTE  
(1:3)**



**BASE DO SUPORTE  
(1:2)**

**OBSERVAÇÕES:**

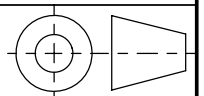
- FABRICAR DUAS PEÇAS DE CADA;**

**ESPECIFICAÇÕES**

MATERIAL	CHAPA DE AÇO 1020 1/2"
ACABAMENTO	USINADO



**TÍTULO: SUPORTE DAS GUIAS E FUSO**

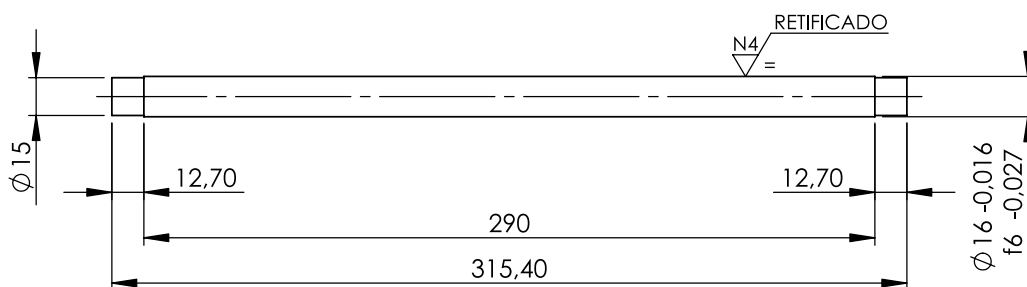


**PROPRIETÁRIO** ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG

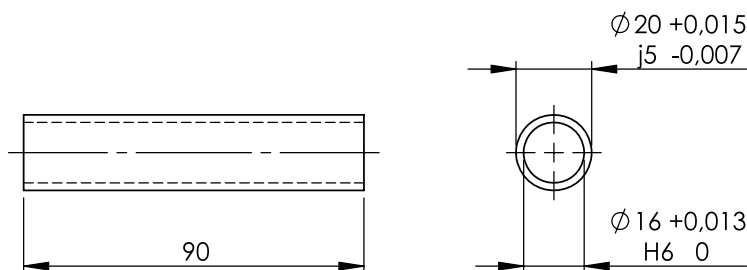
**PROJETISTA** ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

**REVISÃO CRÍTICA**

DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO	TAM	1
09/2018	JOÃO	SEM ALTERAÇÕES	<b>A4</b>	
09/2018	SIGEO	ALTERAÇÃO DO SISTEMA DE FIXAÇÃO DO SUPORTE À ESTRUTURA DA MÁQUINA DE PARAFUSADO PARA SOLDADO	ESCALA INDICADA	



**GUIA DO FUSO**  
ESCALA 1:3



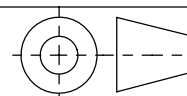
**BUCHA DA GUIA**  
ESCALA 1:2

GUIA DO FUSO	
MATERIAL	TARUGO DE AÇO DE 3/4"
ACABAMENTO	USINADO/RETIFICADO
BUCHA DA GUIA	
MATERIAL	TARUGO DE BRONZE 5/8"
ACABAMENTO	USINADO

**OBSERVAÇÃO: FABRICAR DUAS PEÇAS DE CADA.**



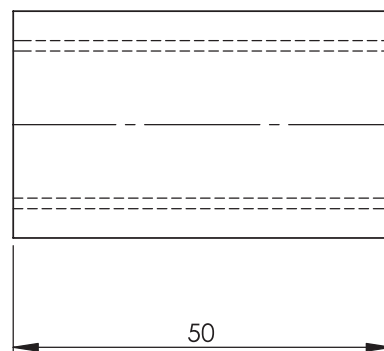
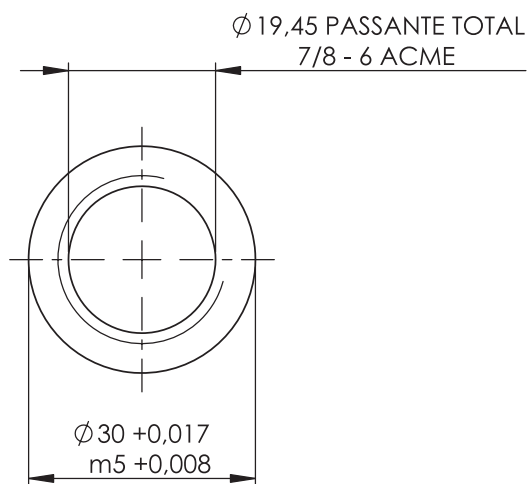
**TÍTULO: GUIA E BUCHA DO FUSO**



<b>PROPRIETÁRIO</b>	ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG
<b>PROJETISTA</b>	ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

**REVISÃO CRÍTICA**

DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO	TAM	
08/2018	SIGEO	AUMENTO DA BITOLA DA GUIA DE 1/2" PARA 5/8".	<b>A4</b>	<b>2</b>
09/2018	JOÃO	INCREMENTO DA ESPESSURA DAS BUCHAS DE 1 mm PARA 2 mm	ESCALA INDICADA	UNIDADE: mm



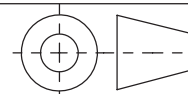
<b>PORCA</b>	
MATERIAL	TARUGO DE BRONZE 1 1/2"
ACABAMENTO	USINADO

**OBSERVAÇÃO:**

1. GEOMETRIA DA ROSCA NA PRANCHA 8;



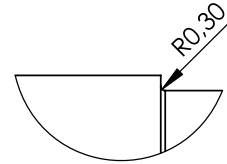
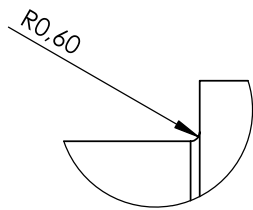
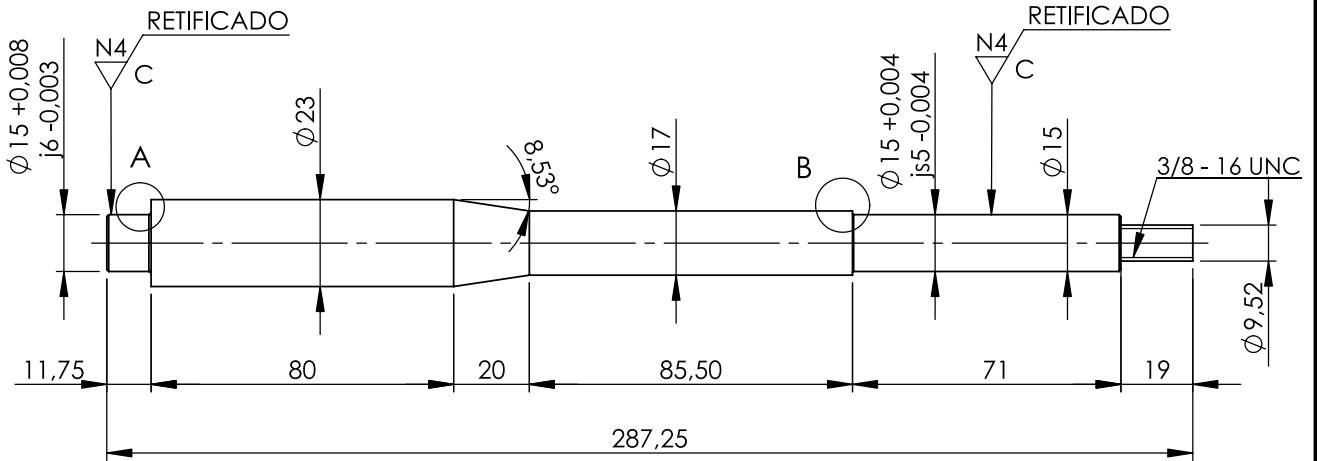
**TÍTULO: PORCA**



<b>PROPRIETÁRIO</b>	ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG
<b>PROJETISTA</b>	ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

**REVISÃO CRÍTICA**

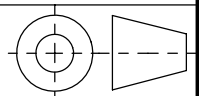
DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO	TAM	
09/2018	JOÃO	ADEQUAÇÃO DO MATERIAL DA PORCA (DE AÇO PARA BRONZE)	<b>A4</b>	<b>3</b>
09/2018	SIGEO	ALTERAÇÃO DA FIXAÇÃO DA PORCA À BASE	ESCALA 1:1	UNIDADE: mm



EIXO VERTICAL DO BRAÇO	
MATERIAL	TARUGO DE AÇO 1"
ACABAMENTO	USINADO



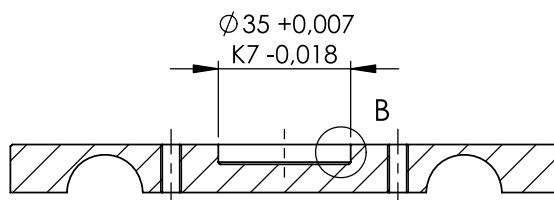
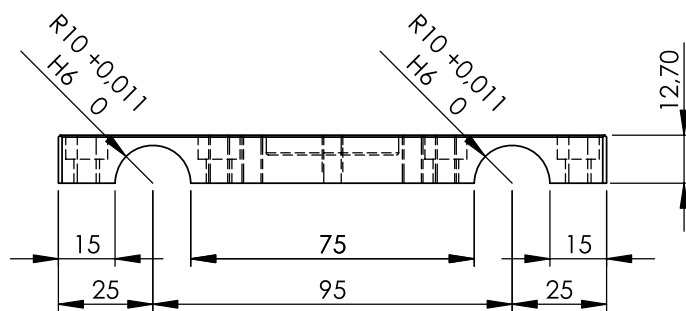
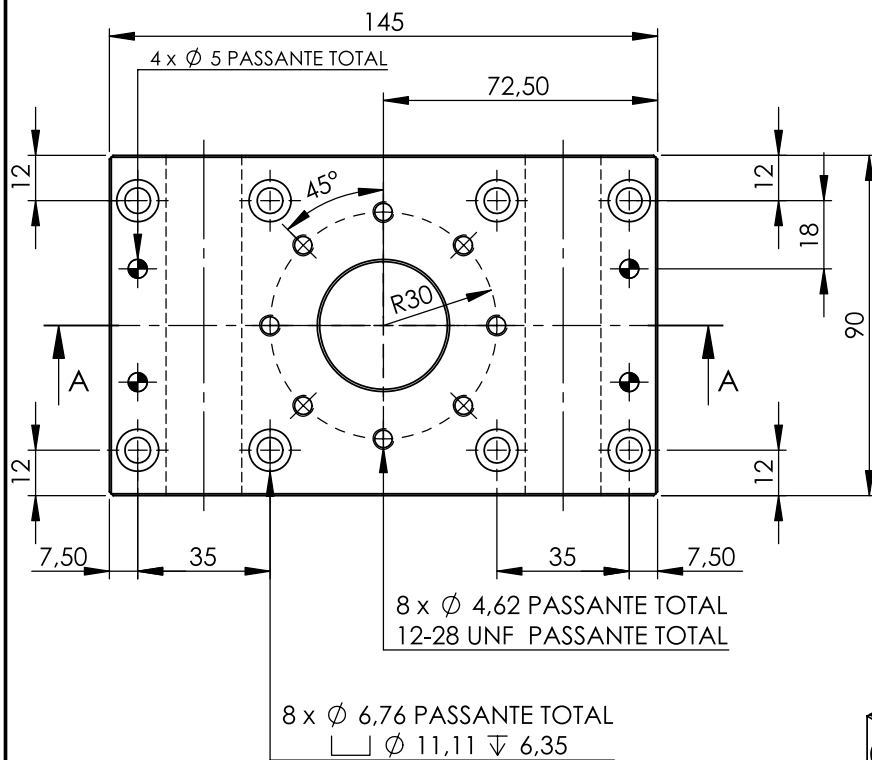
TÍTULO: EIXO VERTICAL BRAÇO



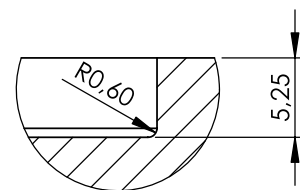
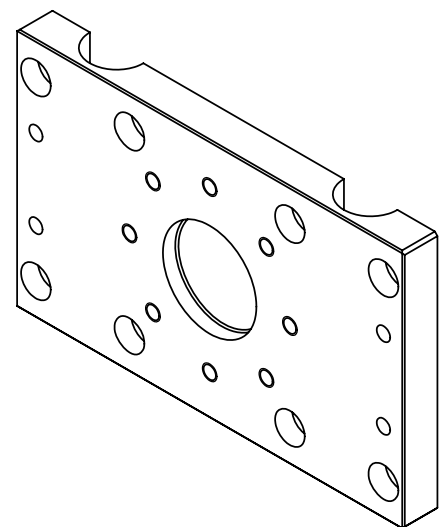
PROPRIETÁRIO	ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG
PROJETISTA	ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

REVISÃO CRÍTICA

DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO	TAM	
09/2018	JOÃO	SEM ALTERAÇÕES	A4	4
09/2018	SIGEO	ACABAMENTO SUPERFICIAL PARA O ENCAIXE DOS ROLAMENTOS	ESCALA 1:2	UNIDADE: mm



CORTE A-A (1 : 2)



DETALHE B (2 : 1)

**BASE DO EIXO VERTICAL**

MATERIAL

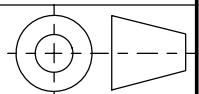
CHAPA DE AÇO 2 1/2"

ACABAMENTO

USINADO



TÍTULO: **BASE DO EIXO VERTICAL**



PROPRIETÁRIO

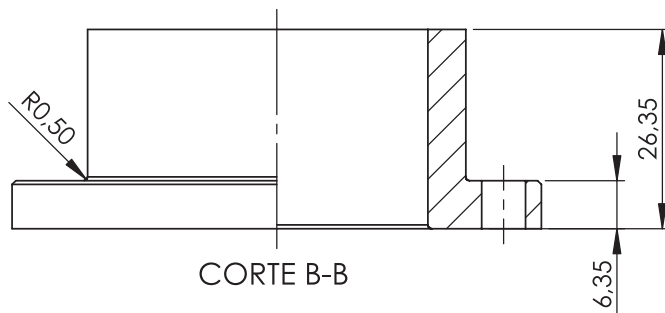
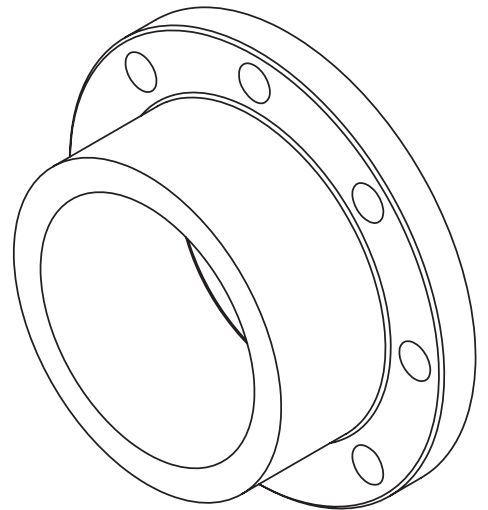
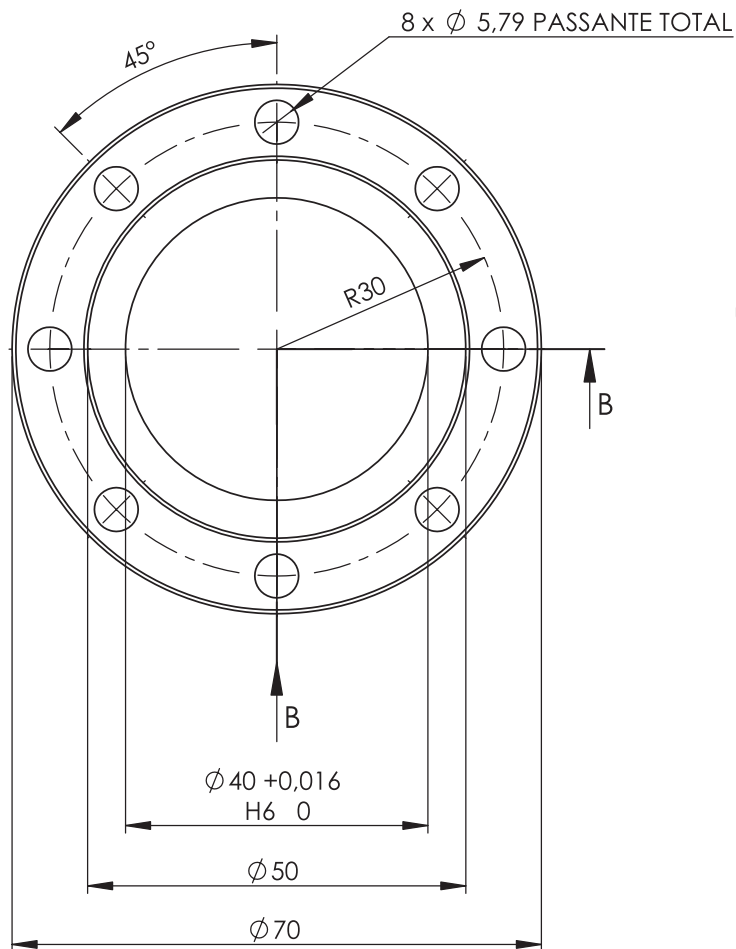
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG

PROJETISTA

ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

**REVISÃO CRÍTICA**

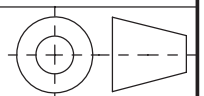
DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO	TAM	
09/2018	JOÃO	SEM ALTERAÇÕES	<b>A4</b>	<b>5</b>
09/2018	SIGEO	ADEQUAÇÃO DA FIXAÇÃO DAS BUCHAS À BASE E ACOPLAMENTO DAS CHAPAS	ESCALA 1:2	UNIDADE: mm



<b>PORCA</b>	
MATERIAL	TARUGO DE AÇO 3"
ACABAMENTO	USINADO



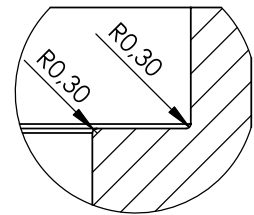
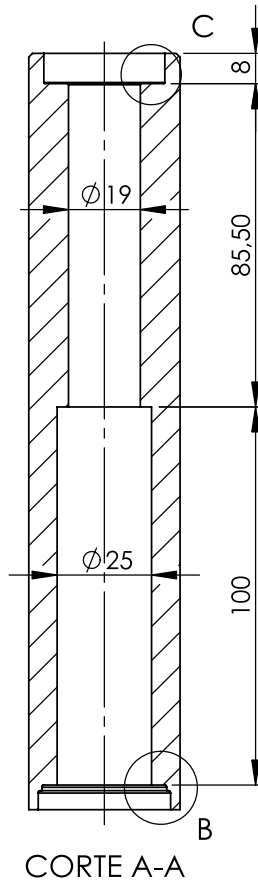
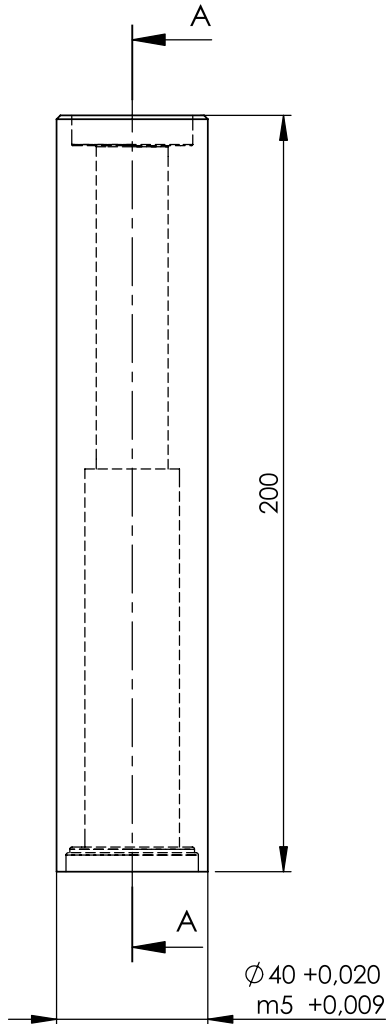
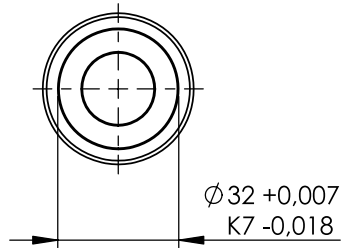
**TÍTULO: FLANGE DO EIXO VERTICAL**



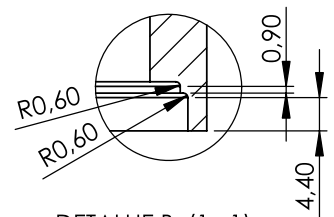
<b>PROPRIETÁRIO</b>	ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG
<b>PROJETISTA</b>	ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

**REVISÃO CRÍTICA**

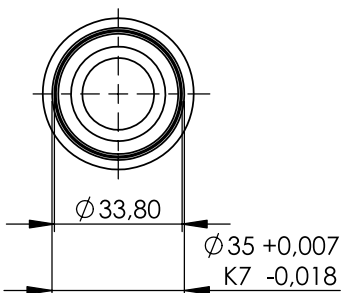
DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO	TAM	
09/2018	JOÃO	SEM ALTERAÇÕES	<b>A4</b>	<b>6</b>
09/2018	SIGEO	ADEQUAÇÃO DA QUANTIDADE DE FUROS DA FLANGE	ESCALA 1:1	UNIDADE: mm



DETALHE C (2 : 1)



DETALHE B (1 : 1)



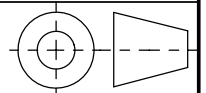
**OBSERVAÇÕES:**

1. ROLAMENTO RADIAL DE REFERÊNCIA: NSK16002 (15x32x8);
2. ROLAMENTO CÔNICO DE REFERÊNCIA: NSK 30202 (15x35x11,75);

TUBO DO EIXO VERTICAL	
MATERIAL	TARUGO DE AÇO 2"
ACABAMENTO	USINADO



**TÍTULO: TUBO DO EIXO VERTICAL**

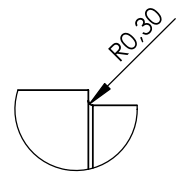
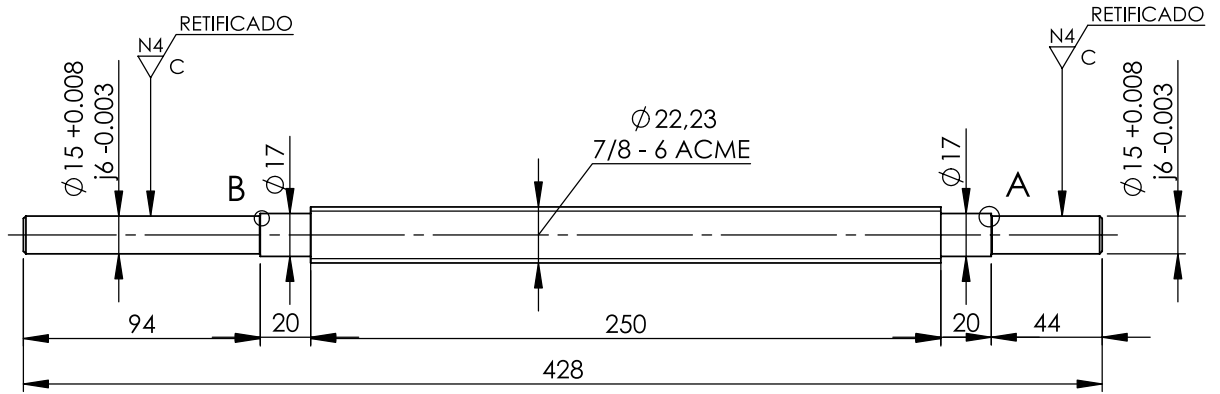


**PROPRIETÁRIO** ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG

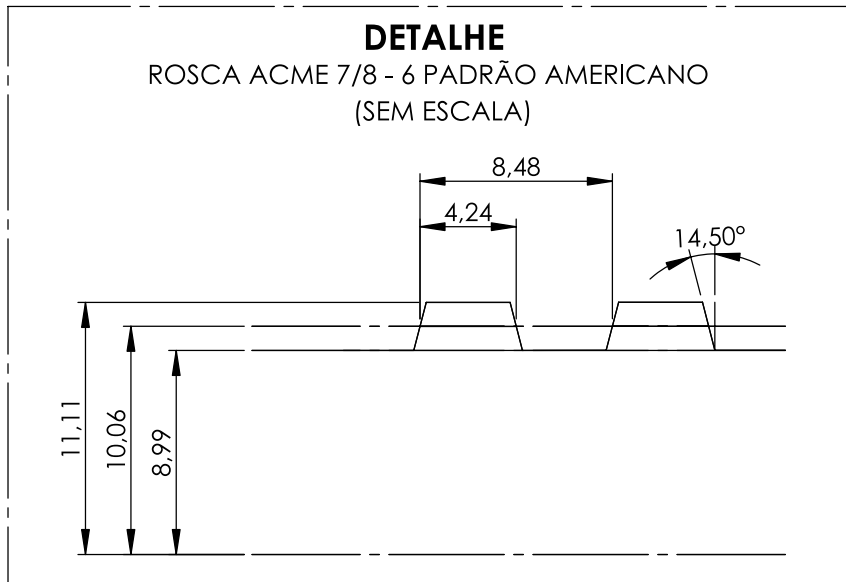
**PROJETISTA** ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

**REVISÃO CRÍTICA**

DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO	TAM	
09/2018	JOÃO	SEM ALTERAÇÕES	<b>A4</b>	<b>7</b>
			ESCALA 1:2	UNIDADE: mm



DETALHE A (2 : 1)

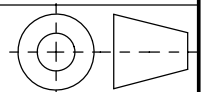


DETALHE B (2 : 1)

FUSO	
MATERIAL	TARUGO DE AÇO 1"
ACABAMENTO	USINADO



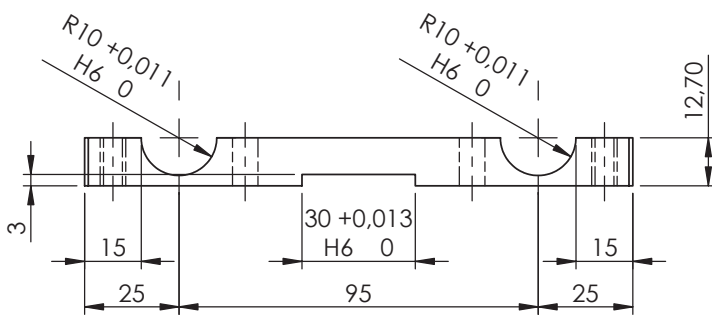
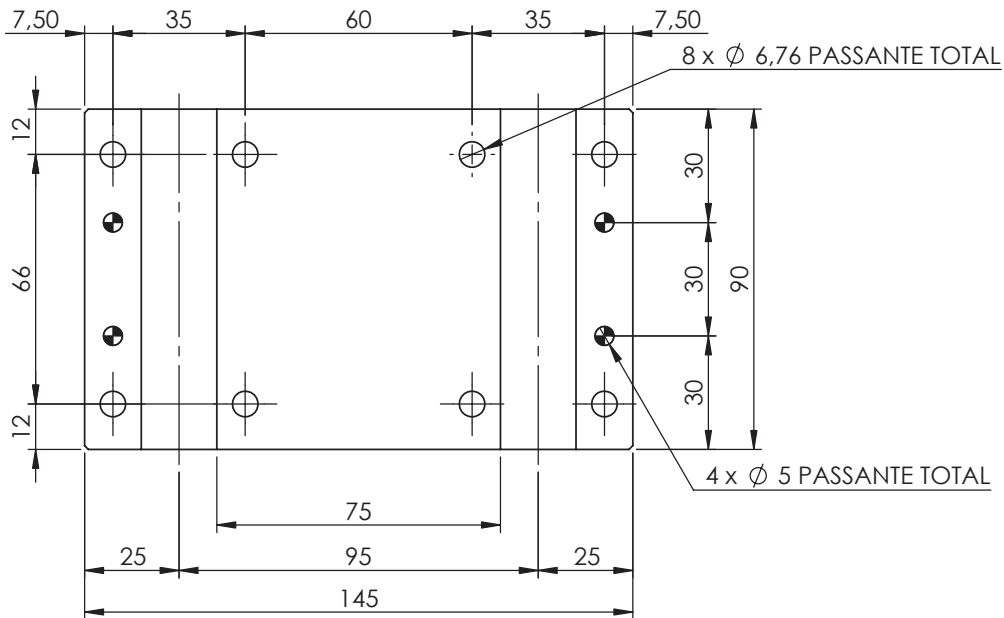
TÍTULO: FUSO



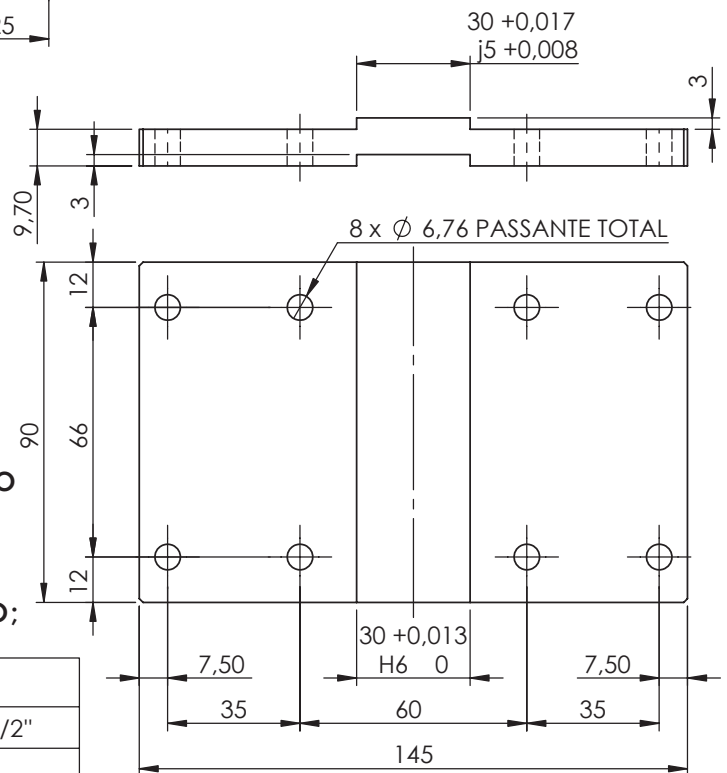
PROPRIETÁRIO ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG

PROJETISTA ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

REVISÃO CRÍTICA				TAM	8
DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO		A4	
09/2018	JOÃO	SEM ALTERAÇÕES			
09/2018	SIGEO	SEM ALTERAÇÕES			ESCALA 1:3 UNIDADE: mm



**BASE DA PORCA**



**ENCHIMENTO**

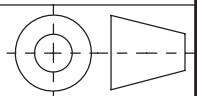
**OBSERVAÇÃO:**

- FABRICAR DUAS PEÇAS DE ENCHIMENTO;**

BASE DA PORCA E ENCHIMENTO	
MATERIAL	CHAPA DE AÇO 1/2"
ACABAMENTO	USINADO



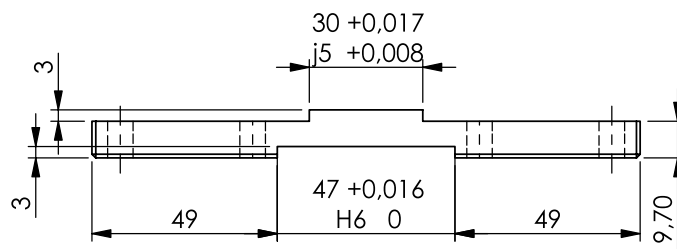
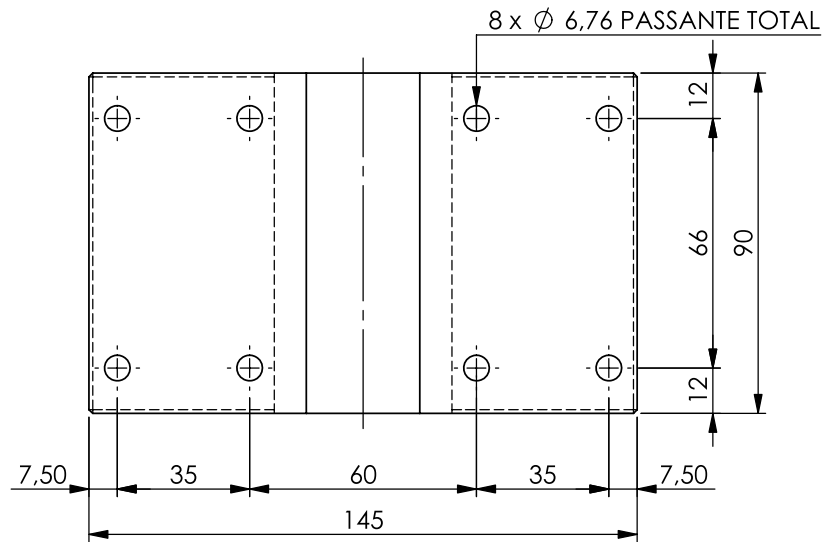
**TÍTULO: BASE DA PORCA E ENCHIMENTO**



<b>PROPRIETÁRIO</b>	ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG
<b>PROJETISTA</b>	ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

**REVISÃO CRÍTICA**

DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO	TAM	
09/2018	JOÃO	ADEQUAÇÃO DO MATERIAL DA PORCA (DE AÇO PARA BRONZE) E ALTERAÇÃO DA FIXAÇÃO NO SUPORTE DE SOLDADA PARA PARAFUSADA	<b>A4</b>	<b>9</b>
09/2018	SIGEO	ADEQUAÇÃO DA FIXAÇÃO DAS BUCHAS À BASE E ACOPLAMENTO DAS CHAPAS	ESCALA 1:2	UNIDADE: mm



### SUPORE DA PORCA

MATERIAL

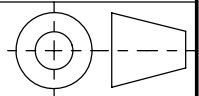
CHAPA DE AÇO 2 1/2"

ACABAMENTO

USINADO



TÍTULO: SUPORTE DA PORCA



PROPRIETÁRIO

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG

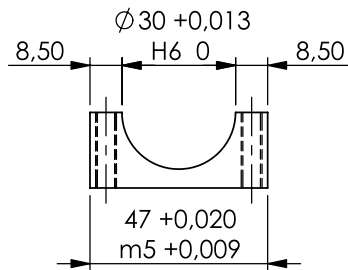
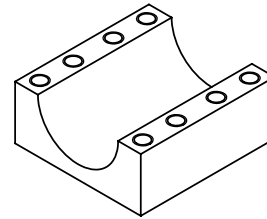
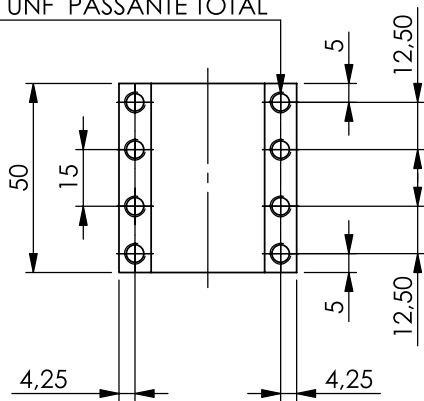
PROJETISTA

ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

### REVISÃO CRÍTICA

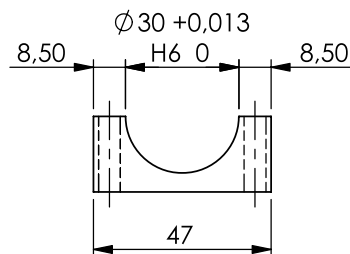
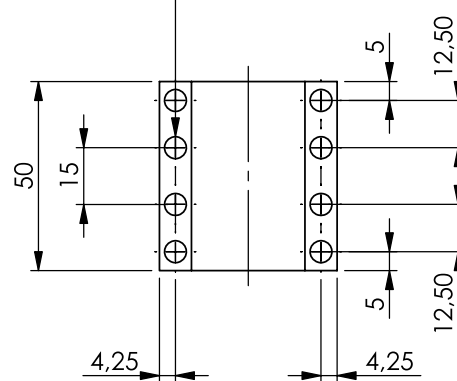
DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO	TAM	
09/2018	JOÃO	ADEQUAÇÃO DO MATERIAL DA PORCA. (DE AÇO PARA BRONZE)	<b>A4</b>	<b>10</b>
09/2018	SIGEO	ALTERAÇÃO DOS SUPORTES DE FIXAÇÃO DA PORCA	ESCALA 1:2	UNIDADE: mm

8 x  $\varnothing$  4,62 PASSANTE TOTAL  
 12-28 UNF PASSANTE TOTAL



**FIXADOR SUPERIOR DA PORCA**

8 x  $\varnothing$  5,79 PASSANTE TOTAL



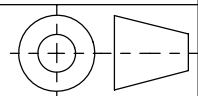
**FIXADOR INFERIOR DA PORCA**

**SUPORE DA PORCA**

MATERIAL	CHAPA DE AÇO 2 1/2"
ACABAMENTO	USINADO



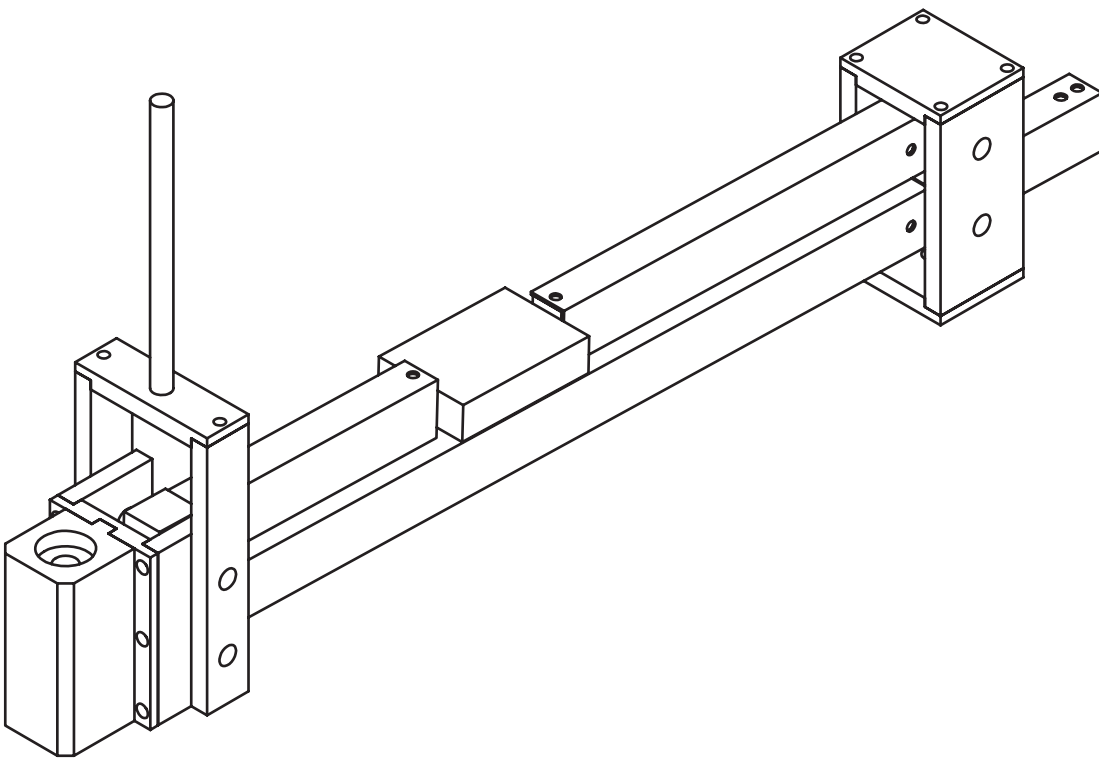
**TÍTULO: FIXADORES DA PORCA**



<b>PROPRIETÁRIO</b>	ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG
<b>PROJETISTA</b>	ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

**REVISÃO CRÍTICA**

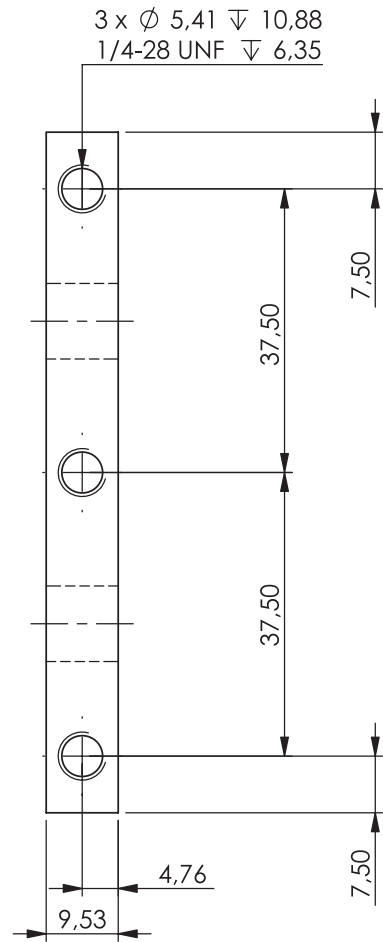
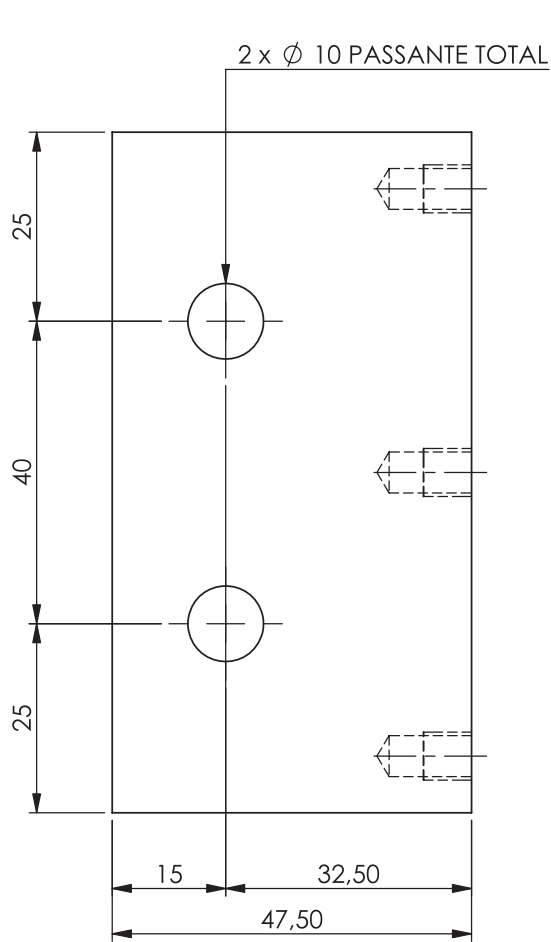
DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO	TAM	11
09/2018	JOÃO	ADEQUAÇÃO DO MATERIAL DA PORCA (DE AÇO PARA BRONZE)	<b>A4</b>	
09/2018	SIGEO	ALTERAÇÃO DOS SUPORTES DE FIXAÇÃO DA PORCA	ESCALA 1:2	



**ABRASÔMETRO PINO-LIXA  
MÓDULO 2:  
FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO BRAÇO**

**PROJETISTA: BRUNO F. COUTO  
ORIENTADOR: PROF. DR. SIGEO KITATANI JR.**

---



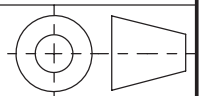
**OBSERVAÇÃO:**

1. FABRICAR DUAS PEÇAS

MATERIAL	CHAPA DE ALUMÍNIO 3/8"
ACABAMENTO	USINADO



**TÍTULO:** TAMPA LATERAL PESO

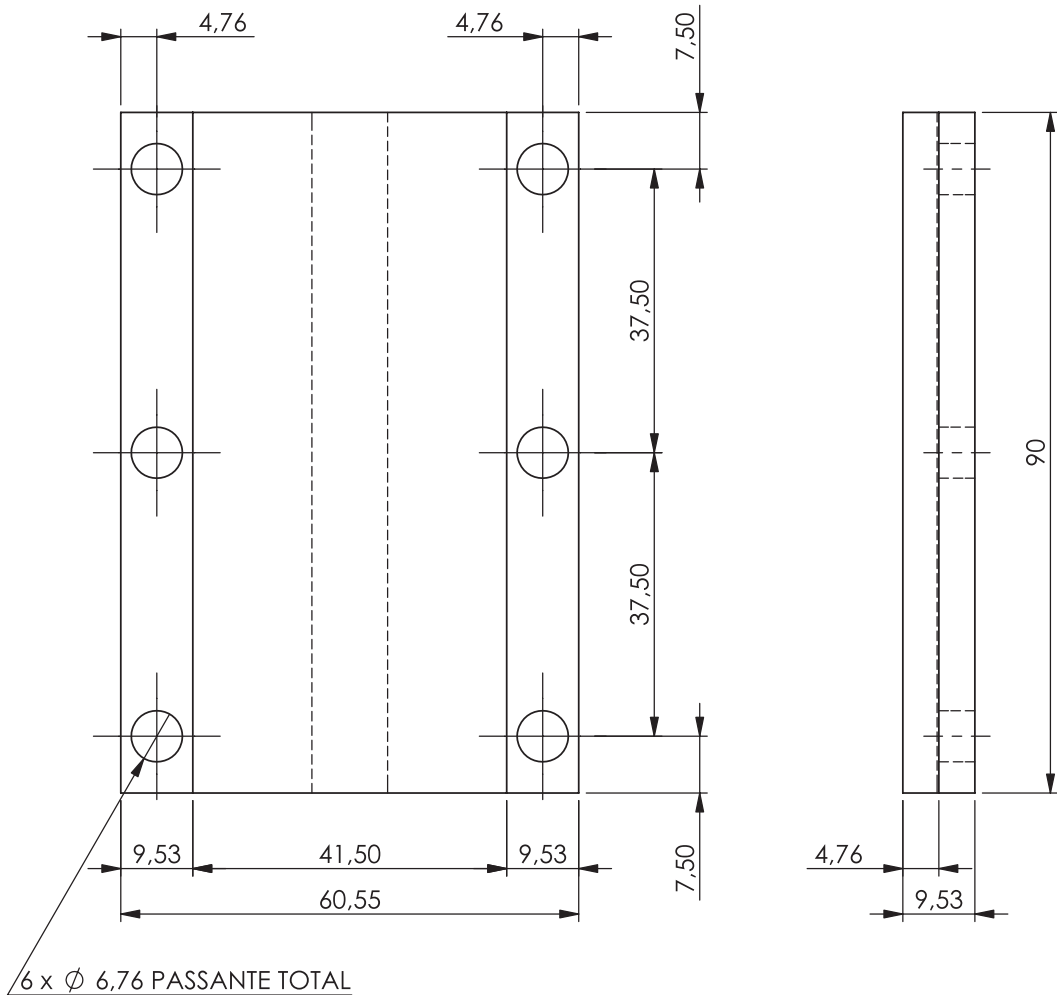


**PROPRIETÁRIO:** ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG

**PROJETISTA:** ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

**REVISÃO CRÍTICA**

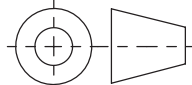
DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO	TAM	
			<b>A4</b>	<b>12</b>
			ESCALA 1:1	UNIDADE: mm



MATERIAL	CHAPA DE ALUMÍNIO 3/8"
ACABAMENTO	USINADO

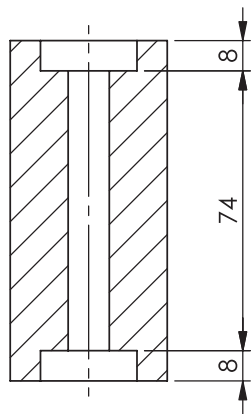
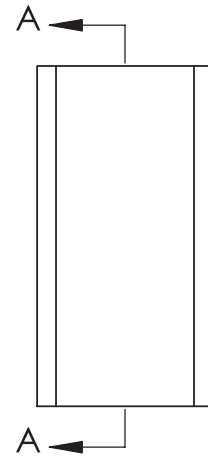
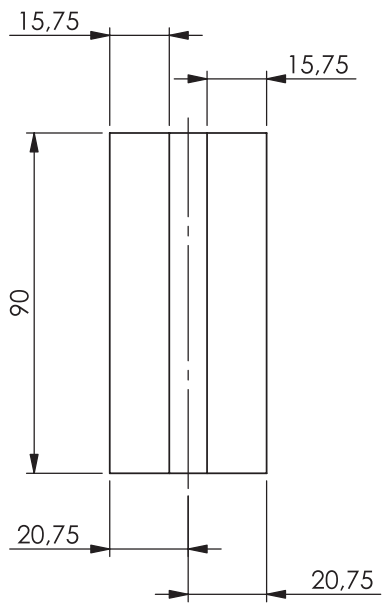


**TÍTULO:** TAMPA FRONTAL PESO

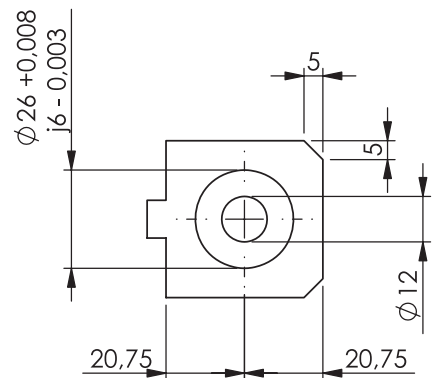


<b>PROPRIETÁRIO</b>	ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG
<b>PROJETISTA</b>	ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

<b>REVISÃO CRÍTICA</b>			<b>TAM</b> <b>A4</b>	<b>13</b>
DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO		
			ESCALA 1:1	UNIDADE: mm



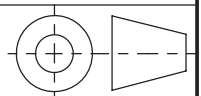
CORTE A-A (1 : 2)



MATERIAL	TARUGO DE ALUMÍNIO
ACABAMENTO	USINADO



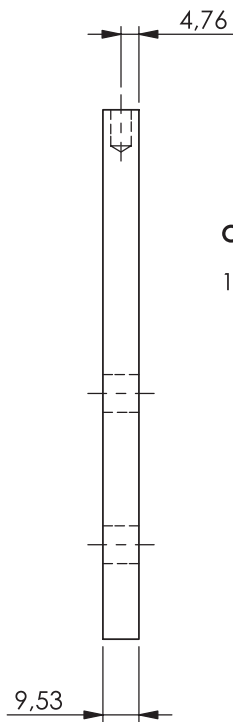
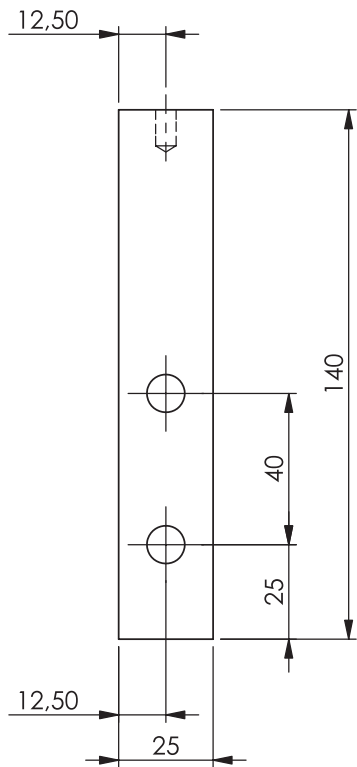
TÍTULO: **MANCAL DO MANDRILHO**



PROPRIETÁRIO	ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG
PROJETISTA	ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

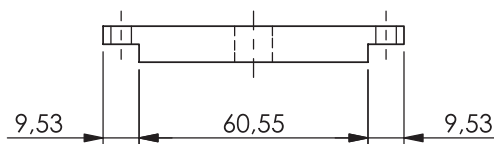
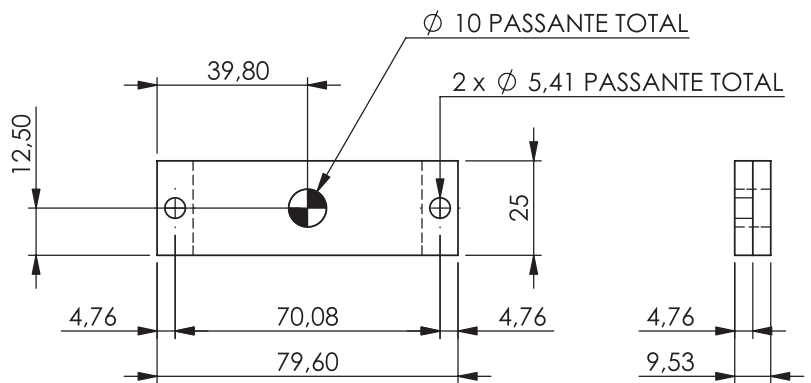
**REVISÃO CRÍTICA**

DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO	TAM <b>A4</b>	<b>14</b>
			ESCALA 1:1	UNIDADE: mm



**OBSERVAÇÃO:**

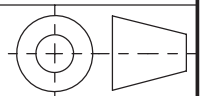
- FABRICAR DUAS PEÇAS



MATERIAL	CHAPA DE ALUMÍNIO 3/8"
ACABAMENTO	USINADO



**TÍTULO:** BASE DO PESO MORTO



**PROPRIETÁRIO:** ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG

**PROJETISTA:** ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

**REVISÃO CRÍTICA**

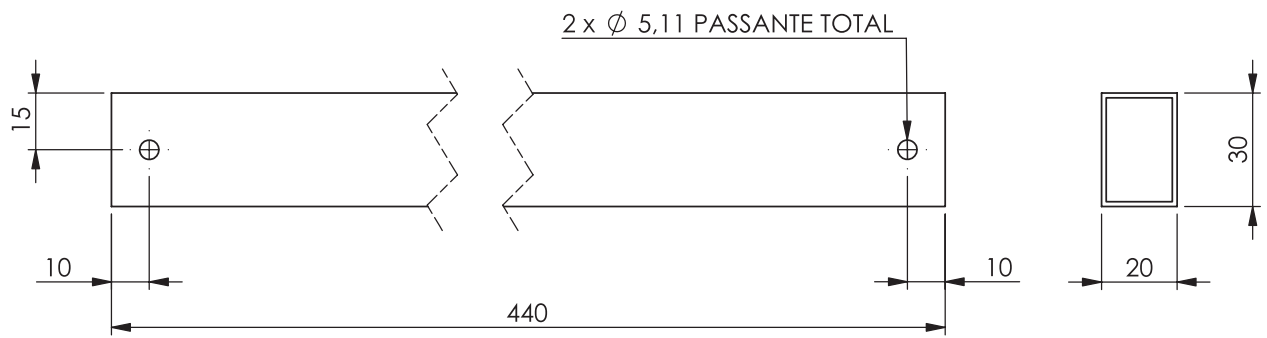
DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO

TAM  
**A4**

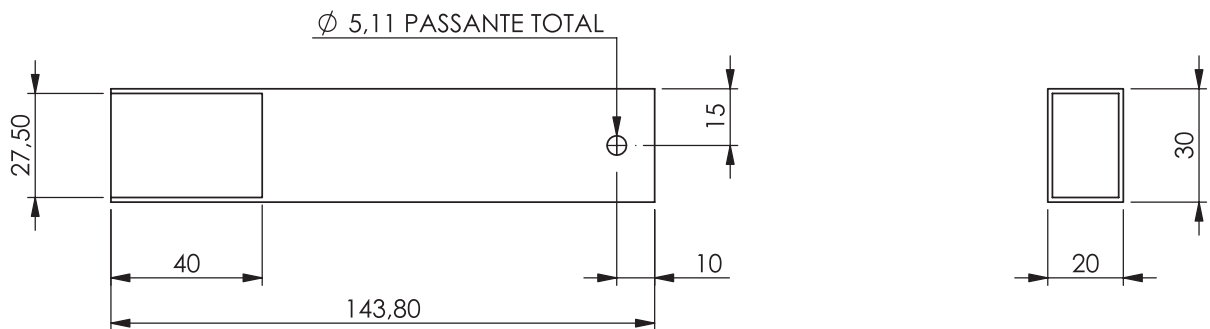
**15**

ESCALA 1:1

UNIDADE: mm



**ESTRUTURA INFERIOR**

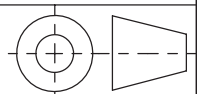


**ESTRUTURA SUPERIOR**  
(FABRICAR DUAS PEÇAS)

MATERIAL		METALON 20x30x1,25
ACABAMENTO		USINADO

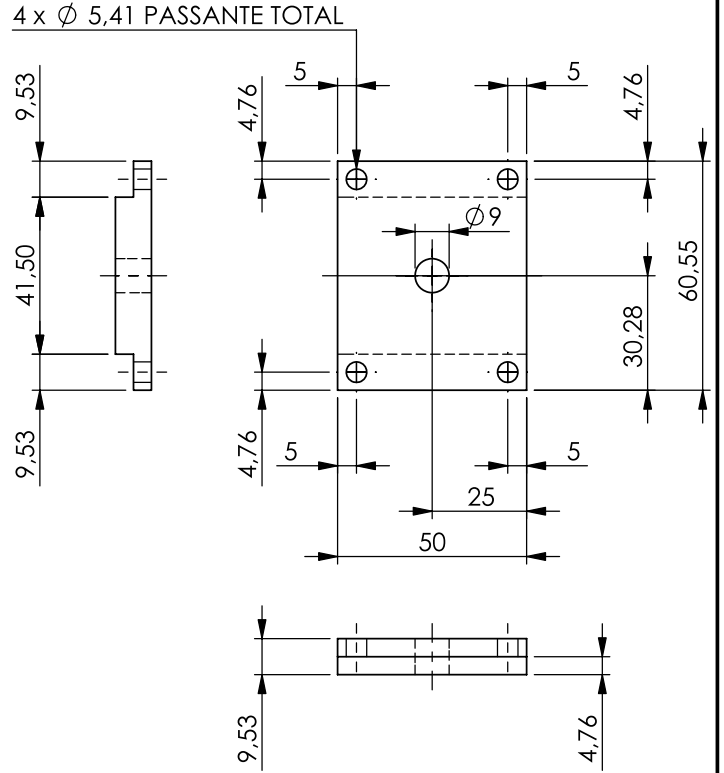
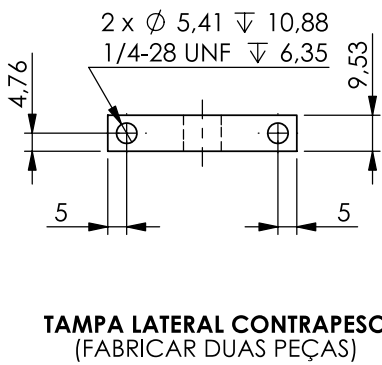
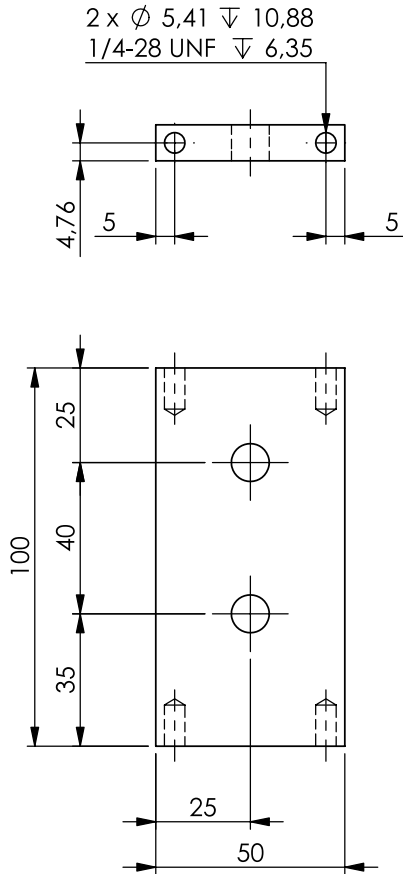


**TÍTULO:** ESTRUTURAS CÉLULA DE CARGA

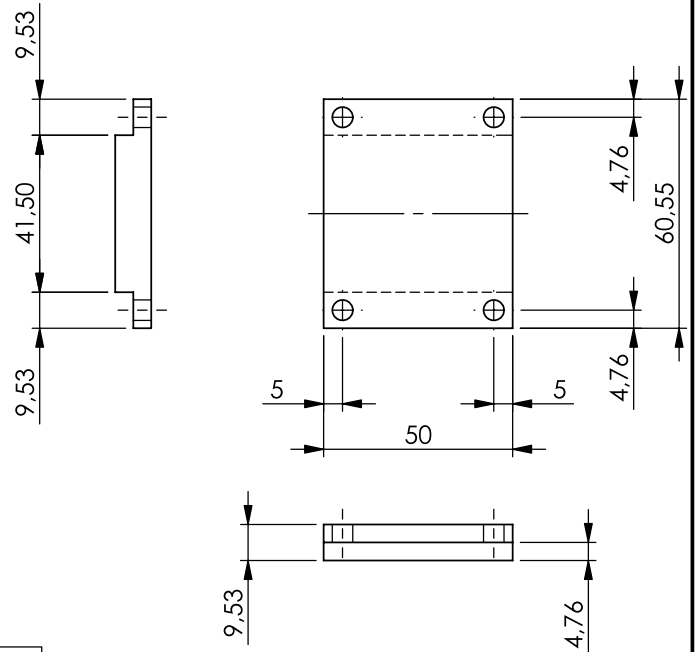


<b>PROPRIETÁRIO</b>	ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG
<b>PROJETISTA</b>	ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

<b>REVISÃO CRÍTICA</b>			<b>TAM</b> <b>A4</b>	<b>16</b>
DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO		
			ESCALA 1:5	UNIDADE: mm



**TAMPA INFERIOR**



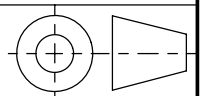
**TAMPA SUPERIOR**

MATERIAL	CHAPA DE ALUMÍNIO 3/8"
ACABAMENTO	USINADO



TÍTULO:

**TAMPAS CONTRAPESO**



PROPRIETÁRIO

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG

PROJETISTA

ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

REVISÃO CRÍTICA

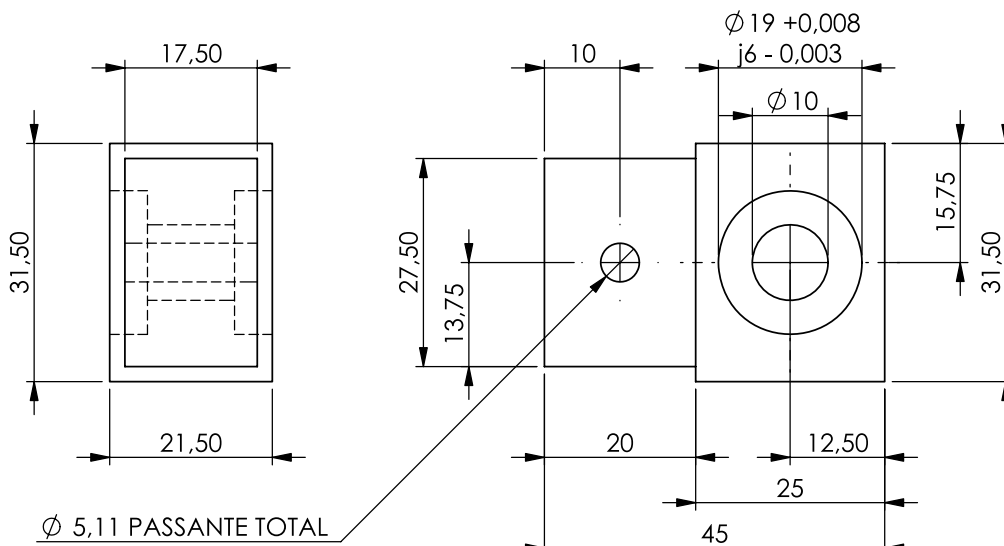
DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO

TAM  
**A4**

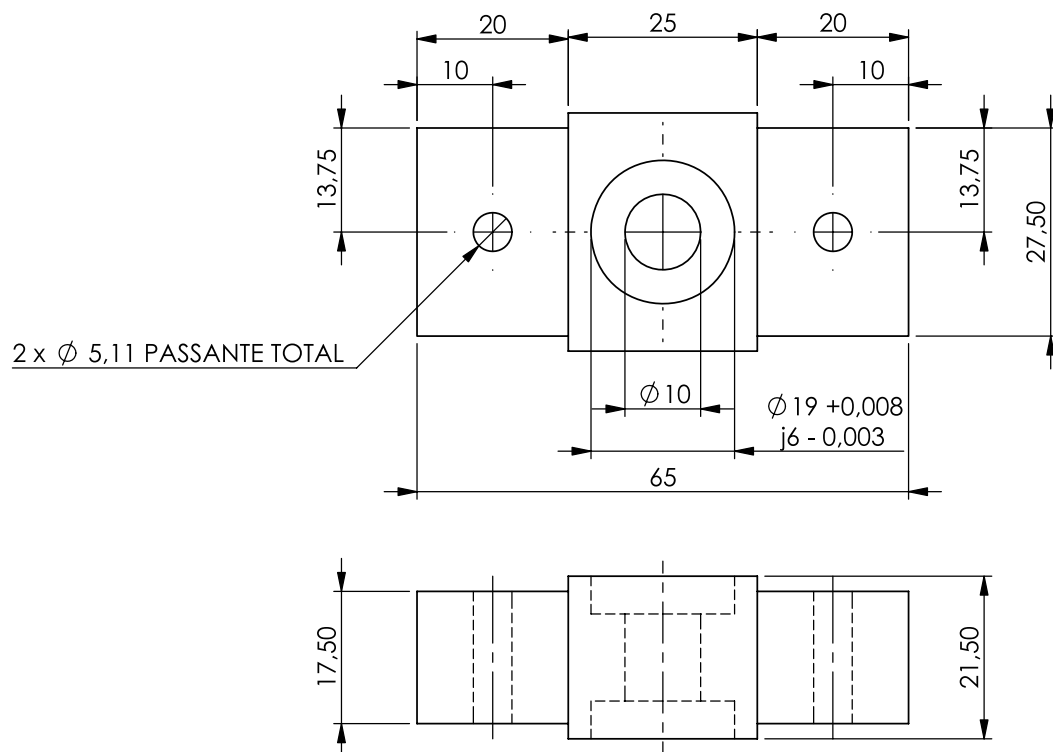
**17**

ESCALA 1:5

UNIDADE: mm



**PORTA ROLAMENTO SUPERIOR**  
(FABRICAR DUAS PEÇAS)

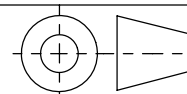


**PORTA ROLAMENTO CONTRAPESO**

MATERIAL	TARUGO DE ALUMÍNIO
ACABAMENTO	USINADO



**TÍTULO: PORTA ROLAMENTOS**

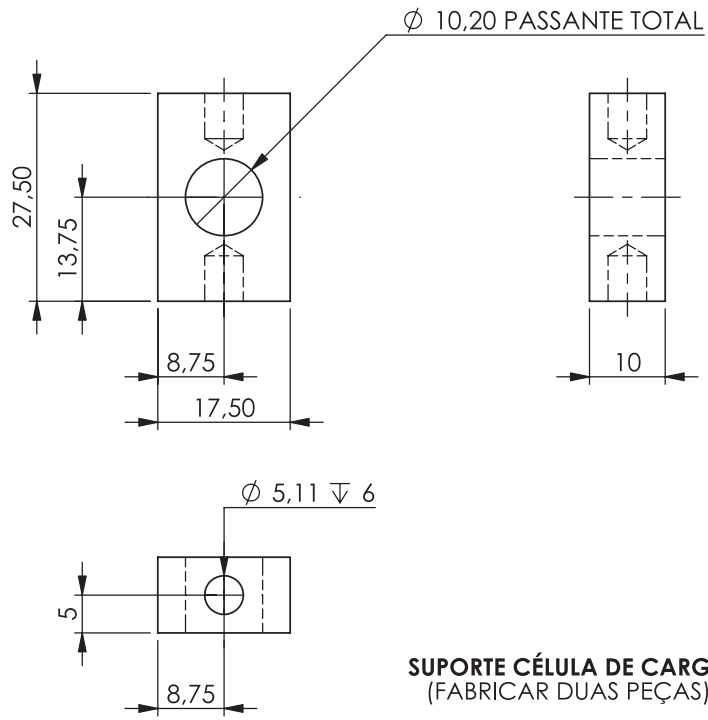


**PROPRIETÁRIO** ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG

**PROJETISTA** ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

**REVISÃO CRÍTICA**

DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO	TAM <b>A4</b>	<b>18</b>
			ESCALA 1:1	UNIDADE: mm

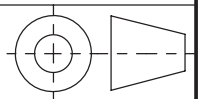


**SUPORE CÉLULA DE CARGA**  
(FABRICAR DUAS PEÇAS)

MATERIAL		TARUGO DE ALUMÍNIO
ACABAMENTO		USINADO



**TÍTULO:** SUPORTES DAS CÉLULAS DE CARGA



**PROPRIETÁRIO:** ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG

**PROJETISTA:** ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

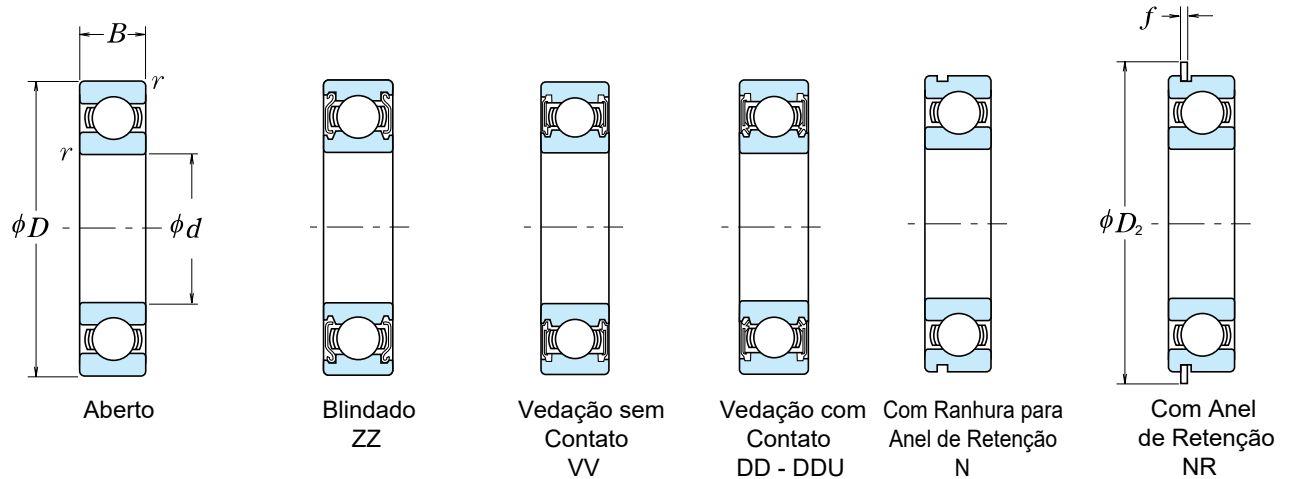
**UFG**

**REVISÃO CRÍTICA**

DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO	TAM	19
			<b>A4</b>	
			ESCALA 1:1	UNIDADE: mm

## ROLAMENTOS FIXOS DE UMA CARREIRA DE ESFERAS

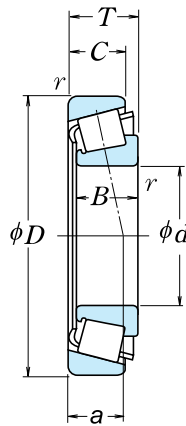
Diâmetro do Furo 10 – 22 mm



Dimensões (mm)			Capacidade de Carga Básica (N)				Fator	<b>NSK16002 (15x32x8)</b>
d	D	B r mín.	C <sub>r</sub>	C <sub>0r</sub>	C <sub>r</sub>	C <sub>0r</sub>	f <sub>0</sub>	
15	32	8 0,35	600	280	570	289	13,9	

## ROLAMENTOS DE UMA CARREIRA DE ROLOS CÔNICOS

Diâmetro do Furo 15 – 28 mm



**NSK 30202 (15x35x11,75)**

Dimensões (mm)					Capacidade de Carga Básica (N)				Limite de Rotação (rpm)					
d	D	T	B	C	Cone r mín.		Capa		C <sub>r</sub>	C <sub>0r</sub>	C <sub>r</sub>	C <sub>0r</sub>	Graxa	Óleo
15	35	1,75	11	0	0,6	0,6	14 800	1 3200	1510	1350	1 000	15 000		
	42	4,25	13	11	1	2	3 600	21 100	2 400	2 160	500	3 000		



TÍTULO: **MANCAIS**

PROPRIETÁRIO: ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG

PROJETISTA: ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

REVISÃO CRÍTICA

DATA REVISOR

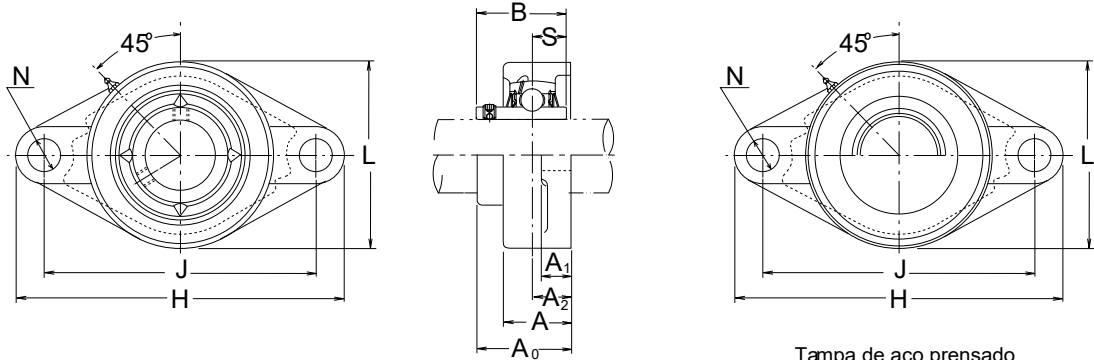
ALTERAÇÃO

TAM  
**A4**

ESCALA -:- UNIDADE: mm

# UCFL 2

Unidades de Rolamentos Tipo Flange de Ferro Fundido  
Com Parafuso de Trava



Tampa de aço prensado  
Lado aberto ZUCFL...D1  
Lado fechado ZM-UCFL...D1

Diâmetro do Eixo mm pol.	Número da Unidade)	Dimensões										Parafuso Fixação	Número do Rolamento
		H	J	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A	N	L	A <sub>0</sub>	AS			
15	UCFL202D 1 1	13 9	0	15 1	1	25,5	12 6	0	33,3	31 1	2,7	M10	UC202D 1
9/16	UCFL202-009D1	47/16	335/64	19/32	7/16	1	15/32	1 23/8	1 5/16	,2205	0,500	3/8	UC202-0 09D1
5/8	UCFL202-010D1											U	C202-0 10D1



TÍTULO: **MANCAIS**

PROPRIETÁRIO: ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO - UFG

PROJETISTA: ENG. BRUNO FERREIRA COUTO

**REVISÃO CRÍTICA**

DATA	REVISOR	ALTERAÇÃO	TAM	ESCALA	UNIDADE: mm
			<b>A4</b>	-:-	

## APÊNDICE D - Plano de Trabalho



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO



## PLANO DE TRABALHO DO PROJETO FINAL

Título: Projeto de um Abrasômetro Pino/Lixa Conforme a ASTM G-132

Dados	Nome Bruno Ferreira Couto	Nome
Nº de Matrícula	201100273	
Telefones	62 9 92440713	
E-mail	brunofcouth@gmail.com	
Orientador(a):	Sigeo Kitatani Jr.	
Curso:	Eng. Elétrica ( )    Eng. de Computação ( )    Eng. Mecânica ( X )	
Certif. Estudos	Não ( )    Sim ( )	

**Resumo**

O projeto consiste no dimensionamento de um abrasômetro pino/lixa, na forma de uma bancada didática, seguindo as determinações da norma ASTM G-132.

**I. Objetivos.**

Os objetivos deste projeto são:

- Desenvolver as modelagens matemáticas para a cinemática e a dinâmica dos mecanismos, bem como especificar e selecionar os elementos de máquinas e demais componentes necessários à construção do equipamento;
- Desenvolver os desenhos técnicos dos componentes da bancada;
- Projetar um sistema de controle para a velocidade de deslocamento do pino;
- Prever, a nível de projeto, o isolamento das vibrações dos componentes internos do abrasômetro durante o ensaio.

**II. Metodologia (atividades a serem desenvolvidas).**

A metodologia utilizada neste projeto será:

- Desenvolvimento da teoria e da análise dos modelos matemáticos via estudo dirigido;
- Testes em laboratório com um modelo em escala para aferir a validade dos algoritmos de controle;
- Reuniões regulares com o orientador.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO



### III. Cronograma.

O cronograma das atividades a serem realizadas é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Primeiro Semestre Letivo de 2019.

	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO
Introdução	X				
Fundamentação Teórica		X			
Memorial Descritivo		X			
Modelagem e Dimensionamento			X		
Desenhos Técnicos			X	X	
Teste do modelo em escala				X	
Conclusão				X	
Apresentação					X

Goiânia, 12 de março de 2019.

*Beuno Ferreira Couto*  
Assinatura do aluno  
Matrícula: 20110273

*Prof. Sigeo Kitahara Junior*  
Vice-Coordenador do Curso de  
Engenharia Mecânica da EMC/UFG  
Assinatura do aluno  
Matrícula:

Assinatura do(a) Prof.(a) Orientador(a):