

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO E FABRICAÇÃO DE MICROTRIBÔMETRO PARA ANÁLISE DE  
JUNTAS SOLDADAS

por

Germano Tagliari Postal

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Fevereiro de 2018

PROJETO E FABRICAÇÃO DE MICROTRIBÔMETRO PARA ANÁLISE DE  
JUNTAS SOLDADAS

por

Germano Tagliari Postal  
Engenheiro

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Aprovada por:

Prof. Dra. Célia de Fraga Malfatti ..... PPGE3M / UFRGS

Prof. Dra. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro ..... PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Kleber Eduardo Bianchi ..... PPMec / FURG

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler  
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 27 de Fevereiro de 2018

*Dedico à Fernanda Postal, minha esposa, e minha filha Valentina.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Engenheiro Ari Postal, meu pai, por participar incondicionalmente no desenvolvimento deste projeto, compartilhando sua experiência, ideias e trabalho.

À Fernanda Postal, minha esposa, pela compreensão das muitas vezes que faltei com minha presença, sempre me apoiando em todos os meus sonhos.

À Engenheira Bernadete Tagliari, minha mãe, companheira em mais este projeto.

Ao Engenheiro Gabriel Nardon, pelo trabalho que realizou no desenvolvimento eletrônico e software, as incontáveis aulas e ensinamentos que recebi.

Ao Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro, meu Orientador, por toda a confiança, apoio e ajuda depositados. Espero ter a oportunidade de realizar mais trabalhos ao seu lado.

À Prof. Dra. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro, pela idéia de construir um tribômetro, e pelos trabalhos que realizou com este, sempre disposta a compartilhar seu conhecimento.

Ao futuro Engenheiro Leonardo Medeiros, sempre disposto a ajudar e ensinar. Certamente terá grande futuro na profissão que escolheu.

À Engenheira Daniela Giarollo, por acreditar e trabalhar com este novo equipamento.

Aos meus irmãos, Alberto e Arita, pelo apoio e ajuda.

Aos meus colegas de curso, pessoas incríveis com as quais muito aprendi, em especial: Omar Bauernfeind, Hércio Alves, William Hackenhaar e Everton Polinski.

À Valentina, que é minha inspiração.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um microtribômetro linear, do tipo esfera sobre chapa, capaz de analisar o comportamento tribológico de materiais em linhas até 5 mm de comprimento, frequências de até 2 Hz e cargas até 10 N, com ou sem meio úmido, características que o tornam uma ótima ferramenta para observar o comportamento tribológico, ou a resistência ao desgaste de diferentes zonas de uma junta soldada. Durante o projeto do microtribômetro, houve a preocupação de desenvolver um equipamento seguro, fácil de operar e robusto, visando a utilização do mesmo por alunos de graduação e pós-graduação, e na indústria. O trabalho de desenvolvimento compreendeu todas as tecnologias usadas, ou seja, placa de leitura da célula de carga, célula de carga, aparato mecânico responsável pelo movimento da amostra e fixação da mesma, braço de suporte do conjunto célula de carga e esfera, carenagem protetora, sistema de segurança e placa de comando. Ensaios foram feitos para a validação do equipamento e demonstrar a capacidade de analisar o comportamento tribológico das diversas zonas de uma junta soldada.

Palavras-chave: Microtribômetro Linear; Junta Soldada; Zona Afetada pelo Calor; Coeficiente de Atrito; Desgaste.

## **ABSTRACT**

This work presents the development of a linear micro tribometer, sphere over sheet type, capable of analyzing the tribological behavior of materials in lines up to 5 mm in length, frequencies up to 2 Hz and loads up to 10 N, with or without moist environment, characteristics that makes it a great tool to observe the different regions of a welded joints. During the project there was the concern of developing a secure, easy to operate and robust, aiming its use by students of graduation, postgraduation and by industry. The development work comprised all the technologies used, reading board of load cell, load cell, mechanical device responsible for movement and fixation of the sample, support arm of the set load cell and sphere, protective cowling, safety system and board control. Tests have been done to validate the equipment and demonstrate the capacity of analyzing the tribological behavior of the various regions of a welded joint.

Keywords: Linear Micro Tribometer; Welded Joints; Heat-affected Zone; Coefficient of Friction; Wear.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo geral	2
1.1.2	Objetivos específicos	2
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>3</b>
2.1	Revisão Bibliográfica	3
2.2	Tribologia	6
2.3	Atrito de Coulomb	6
2.3.1	Mecanismos do atrito	7
2.3.2	Fenômeno <i>stick-slip</i>	8
2.4	Microtribômetro linear	8
2.5	Modelo do processo de projeto	9
2.6	Células de carga	11
2.7	HRN (Hazard Rating Number)	12
<b>3</b>	<b>PROCESSO DE PROJETO E FABRICAÇÃO</b>	<b>14</b>
3.1	Esclarecimento da tarefa	14
3.2	Concepção	15
3.3	Projeto	21
3.3.1	Carro Porta-amostra	23
3.3.2	Caneta	29
3.3.3	Antebraço	30
3.3.4	Braço	33
3.3.5	Célula de Carga	33
3.3.6	Alavanca	35
3.3.7	Carenagem	36
3.3.8	Segurança	38
3.3.9	Sistema elétrico/eletrônico	40

<b>4</b>	<b>CALIBRAÇÃO E DADOS</b> . . . . .	<b>46</b>
4.1	Calibração . . . . .	46
4.2	Dados . . . . .	48
<b>5</b>	<b>VALIDAÇÃO</b> . . . . .	<b>55</b>
5.1	Materiais e Métodos . . . . .	55
5.1.1	Materiais utilizados . . . . .	55
5.1.2	Procedimento experimental . . . . .	57
5.1.3	Resultados . . . . .	57
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DE UM JUNTA SOLDADA</b> . . . . .	<b>61</b>
6.1	Materiais e Métodos . . . . .	61
6.2	Resultados . . . . .	63
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>67</b>
7.1	Sugestões para Trabalho Futuros . . . . .	67
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> . . . . .	<b>67</b>
<b>ANEXO I</b>	<b>Código para Tratamento de Dados</b> . . . . .	<b>70</b>
<b>ANEXO II</b>	<b>Gráficos dos Ensaio</b> . . . . .	<b>72</b>
<b>ANEXO III</b>	<b>Vistas do tribômetro</b> . . . . .	<b>73</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema básico de um tribômetro <i>pin-on-disk</i> rotativo. . . . .	3
Figura 2.2	Esquema de um tribômetro rotativo mostrado por [Pradeep L. Menezes, 2013]. . . . .	5
Figura 2.3	Esquema básico de forças. . . . .	7
Figura 2.4	Esquema básico de um microtribômetro linear. . . . .	9
Figura 2.5	Observação de uma trilha de desgaste após o ensaio de tribo-corrosão de uma amostra de aço SAE 1010. Condições de teste: carga de 2 N, frequência de 1 Hz, esfera de alumina de diâmetro 4,762 mm, meio corrosivo NaCl 0,05 mol, 30 minutos em solução e 3 horas de ensaio. . . . .	9
Figura 2.6	Bloco esquemático da função global. . . . .	10
Figura 2.7	Estrutura da função. . . . .	10
Figura 2.8	Foto de um extensômetro. . . . .	11
Figura 3.1	Função global. . . . .	15
Figura 3.2	Diagrama de blocos da subdivisão da função global. . . . .	16
Figura 3.3	Diagrama esquemático similar ao mostrado na norma [ASTM G133-05, 2016]. . . . .	18
Figura 3.4	Diagrama esquemático do sistema com a esfera parada e amostra oscilando. . . . .	19
Figura 3.5	Gráfico da posição e velocidade do carro. A linha tracejada representa a velocidade (mm/s) e a linha contínua, a posição (mm). . . . .	20
Figura 3.6	Figura esquemática do funcionamento do tribômetro. . . . .	20
Figura 3.7	Figura esquemática do sistema com movimento linear. . . . .	21
Figura 3.8	Figura esquemática do sistema com braço articulado. . . . .	21
Figura 3.9	Subsistemas do tribômetro, faltando tampa e sistema eletrônico. Vista frontal e lateral esquerda no ANEXO III. . . . .	22
Figura 3.10	Foto do tribômetro desenvolvido. . . . .	23
Figura 3.11	Figura do carro porta-amostra que compreende porta-amostra, carro e biela-manivela. . . . .	24

Figura 3.12	Em (a) uma vista explodida do porta-amostra, e (b) a amostra fixa pelo porta amostra. . . . .	25
Figura 3.13	Superfície de contato entre a placa porta-amostra e o carro. . . . .	25
Figura 3.14	A figura (a) mostra a amostra fixa pelo garfo, em (b) o garfo está aberto (ângulo de abertura aumentado para facilitar o entendimento). . . . .	26
Figura 3.15	Vista explodida do porta-amostra para meio úmido. . . . .	26
Figura 3.16	Vista em corte do porta-amostra para meio úmido. . . . .	27
Figura 3.17	Conjunto da biela-manivela. . . . .	28
Figura 3.18	Direita curso em 5 mm e esquerda 2 mm de curso. Seta vermelha realçando o movimento do excêntrico regulável. . . . .	28
Figura 3.19	Em (a) a caneta com a esfera montada e (b) o desenho em corte com o pino roscado que veste a esfera. . . . .	29
Figura 3.20	Figura da ponteira em polímero. . . . .	30
Figura 3.21	Subsistema do antebraço. . . . .	31
Figura 3.22	Subsistema do antebraço com indicação do porta-amostras e caneta. . . . .	31
Figura 3.23	Vista superior do antebraço, com seu corpo em linhas vermelhas, e indicação do seu movimento. . . . .	32
Figura 3.24	Conjunto limitador da célula de carga. . . . .	32
Figura 3.25	Figura do braço. . . . .	33
Figura 3.26	Célula de carga de viga fina, em (a) vista frontal e (b) conjunto da célula de carga. . . . .	34
Figura 3.27	Na esquerda o sistema do antebraço sem esforços transversais, e na direita após sofrer deformação (a deformação foi drasticamente acentuada para melhor visualização). . . . .	34
Figura 3.28	Localização da Célula de carga de viga fina (elipse em vermelho). . . . .	35
Figura 3.29	Braço recuado por meio do acionamento da Alavanca. . . . .	35
Figura 3.30	Braço avançado. . . . .	36
Figura 3.31	Carenagem com a tampa aberta e fechada. . . . .	37
Figura 3.32	Diagrama esquemático do sistema elétrico/eletrônico. . . . .	44
Figura 4.1	Distância entre o centro das massas, mancal e caneta. . . . .	46
Figura 4.2	Dispositivo para calibração do sensor de força. . . . .	47

Figura 4.3	Gráfico (a) força sendo aplicada para esquerda e o (b) a força aplicada para o lado contrário. . . . .	48
Figura 4.4	Gráfico dos dados brutos. . . . .	49
Figura 4.5	Gráfico com os dados centrados no eixo das abscissas. . . . .	49
Figura 4.6	Módulo do gráfico da Figura 4.5. . . . .	50
Figura 4.7	Gráfico do coeficiente de atrito. . . . .	50
Figura 4.8	Parte do gráfico da Figura 4.7. . . . .	51
Figura 4.9	Gráfico do comportamento tipo 1, retirado do gráfico da Figura 4.7. . . . .	52
Figura 4.10	Gráfico do comportamento tipo 2, retirado do gráfico da Figura 4.7. . . . .	52
Figura 4.11	Gráfico da identificação das diferentes regiões em um meio ciclo do ensaio. . . . .	53
Figura 4.12	Gráfico do atrito dinâmico (linha verde) e estático (linha azul). . .	54
Figura 4.13	Gráfico do atrito dinâmico (linha azul) e estático (linha verde) suavizados. . . . .	54
Figura 5.1	Gráfico coeficiente de atrito no tempo do Hardox 500 revestido. . .	58
Figura 5.2	Gráfico do coeficiente de atrito no tempo do Hardox 500. . . . .	59
Figura 5.3	Gráfico do coeficiente de atrito no tempo do SAE 1010. . . . .	59
Figura 5.4	Gráfico do atrito no tempo da junta soldada de Hardox com Hardox.	60
Figura 6.1	Imagem da ponta da esfera desgastada com aumento de 200X, após ensaio no metal de base ((a) imagem original e (b) pós-processada). . . . .	62
Figura 6.2	Imagem da ponta da esfera desgastada com aumento de 200X, após ensaio no metal de solda ((a) imagem original e (b) pós-processada). . . . .	63
Figura 6.3	Superfície gerada pelo interferômetro do metal de solda. . . . .	63
Figura 6.4	Gráfico do coeficiente de atrito estático (linha azul) e dinâmico (linha verde) em função do tempo para o material de solda. . . .	65
Figura 6.5	Gráfico do coeficiente de atrito estático (linha azul) e dinâmico (linha verde) em função do tempo para o material de base. . . .	65

Figura II.1 Gráfico dos ensaios do capítulo ANÁLISE DE UMA JUNTA SOLDADA. . . . .	72
Figura III.1 Vista frontal do tribômetro. . . . .	73
Figura III.2 Vista lateral esquerda do tribômetro. . . . .	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Esquema classificador. . . . .	11
Tabela 2.2	Tabela resumida para cálculo do HRN. . . . .	13
Tabela 3.1	Esquema classificador. . . . .	17
Tabela 3.2	Estimativa de risco na troca da amostra, HRN de 0,066. . . . .	40
Tabela 3.3	Estimativa de risco na regulagem do curso, HRN de 0,04125. . . . .	40
Tabela 6.1	Volume desgastado médio na trilha e na esfera. . . . .	64
Tabela 6.2	Coeficiente de atrito estático e dinâmico nos 6 ensaios realizados (metal base e solda). Os gráficos de todos os ensaios podem ser encontrados no ANEXO II. . . . .	66

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

HRN	<i>Hazard Rating Number</i>
INPI	<i>Instituto Nacional da Propriedade Industrial</i>
LBS	<i>Least Significant Bit</i>
MB	Metal de Base
MS	Metal de Solda
RPM	Rotações por minuto
SD	<i>Secure Digital</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

## LISTA DE SÍMBOLOS



### Símbolos Latinos

$E$	Espessura da amostra, mm
$F$	Força, N
$Fa$	Força de atrito, N
$Fe$	Força crítica antes do deslizamento, N

### Símbolos Gregos

$\mu$	Coefficiente de atrito
-------	------------------------

## 1 INTRODUÇÃO

O mundo nunca esteve tão preocupado com a questão ambiental como nos dias de hoje, forçando as empresas a repensarem seus produtos e soluções para terem um menor impacto no ambiente. Neste contexto, o estudo da tribologia vem ganhando cada vez mais visibilidade, inclusive por apresentar grandes oportunidades para empresas e universidades obterem avanços tecnológicos e científicos. Seu melhor entendimento acarreta em melhorias, tanto na questão energética, por meio de equipamentos mais eficientes, como na economia de matéria-prima obtida com a diminuição de troca de componentes sujeitos ao desgaste. O desenvolvimento de instrumentos científicos para analisar os diversos aspectos da tribologia são de suma importância para a evolução desta ciência, e ocorrendo este desenvolvimento em proximidade com as Universidades, tem-se um ganho não só econômico, por meio da diminuição dos custos, como também no melhor atendimento às necessidades da academia.

Uma das grandes lacunas da tribologia está no estudo de zonas termicamente afetadas nos processos de soldagem e técnicas conexas, que são amplamente usados em componentes que sofrem desgaste, nas mais diversas aplicações. Para atender essa demanda foi desenvolvido e construído um tribômetro, mais especificamente um microtribômetro linear, que é a modelo de tribômetro mais adequada ao estudo de pequenas zonas, como é o caso da soldagem e suas zonas afetadas pelo calor. Com essa ferramenta, pretende-se estudar o efeito da soldagem no atrito e desgaste dos componentes fabricados com esse processo, podendo dessa forma encontrar melhores parâmetros de soldagem e materiais ou combinações de materiais que resistam mais aos requisitos a que serão submetidos nos mais diversos ambientes de trabalho, pois esta ferramenta contempla o uso de meios úmidos ou aquosos.

O desenvolvimento do microtribômetro compreendeu o projeto, montagem, calibração e uso. No projeto foi prestada especial atenção, além da funcionalidade e precisão, à ergonomia para que a operação não se torne um fardo para o usuário, e que as variações na operação, decorrentes do fator humano, influenciem pouco no resultado final do ensaio. O projeto englobou: aparato para fixação da amostra (porta amostra), sistema de movimentação do porta amostra (carro porta amostra), fixador da esfera (caneta), suporte e mancalização da célula de carga (antebraço), mancalização da força normal (braço), sis-

tema de posicionamento do braço (alavanca), carenagem de proteção e segurança, célula de carga e placa de aquisição e controle. Deu-se preferência ao desenvolvimento total dos subconjuntos não usando soluções prontas para que este primeiro equipamento sirva também como uma ferramenta de aprendizado, pois diversos equipamentos de ensaio possuem basicamente os mesmos sistemas de um microtribômetro. Pretende-se continuar o desenvolvimento de uma família de equipamentos para ensaio, além disso, não usar soluções prontas torna o produto mais adaptado a sua função. A contra-ponto, usar soluções prontas agiliza o projeto e montagem, desta forma, o equilíbrio deve ser encontrado para que se tenha sucesso.

Por fim, um estudo de caso testa as capacidades deste novo equipamento no ensaio de uma junta soldada.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Construir um equipamento para ensaiar e analisar o atrito e desgaste de amostras.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Levantar as características necessárias para atender as demandas;
- Projetar, fabricar e montar a primeira máquina;
- Calibrar o tribômetro;
- Validar os resultados obtidos;
- Analisar uma junta soldada demonstrando sua capacidade de revelar as diferenças tribológicas entre suas diferentes regiões.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Revisão Bibliográfica

Existem diversas espécies de tribômetros, porém o mais usado é o *pin-on-disk* recíproco (Figura 2.4) ou rotativo (Figura 2.1) [Pradeep L. Menezes, 2013]. Nesse trabalho foi desenvolvido um tribômetro *pin-on-disk* recíproco, que também pode ser chamado de tribômetro linear, e por ensaiar pequenas regiões pode ser denominado microtribômetro. Primeiro foi feita uma pesquisa de publicações, seguida por uma busca por patentes, principalmente em âmbito nacional, para não ser infringido durante o desenvolvimento a propriedade intelectual de terceiros, e por fim, são apresentados alguns modelos de tribômetros disponíveis no mercado internacional.

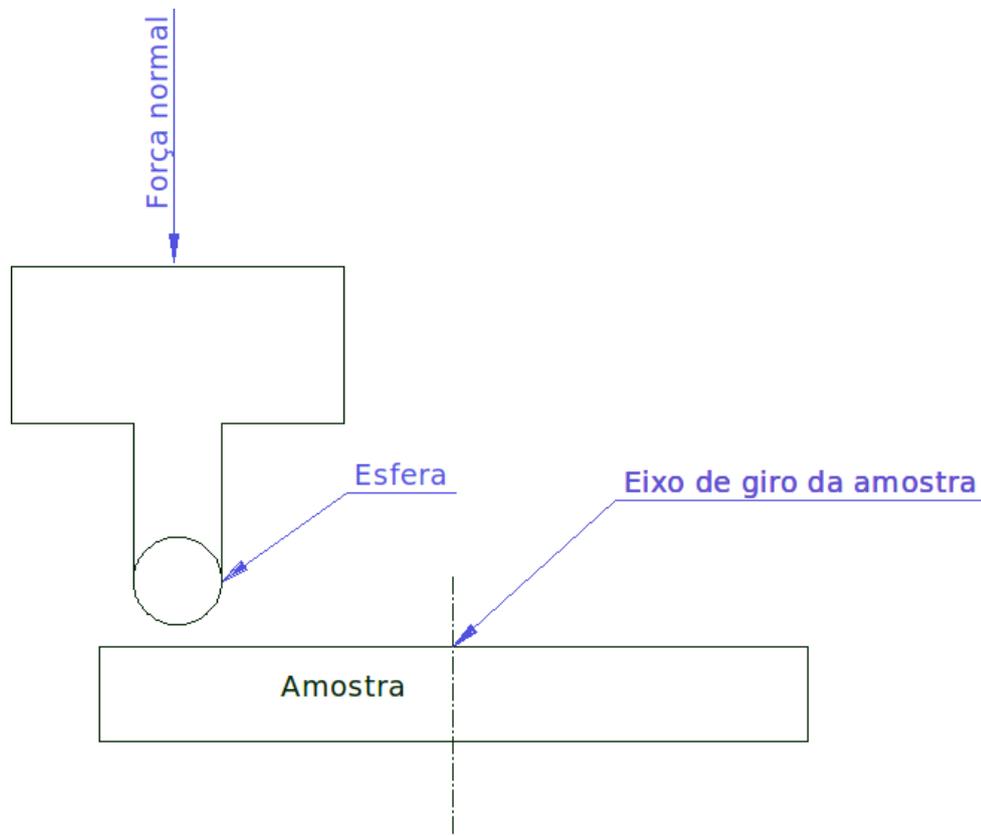


Figura 2.1 – Esquema básico de um tribômetro *pin-on-disk* rotativo.

O trabalho de Marjanovic [N. Marjanovic, 2006] que desenvolveu um tribômetro para ensaio de polímeros, tanto para ensaio rotativo como linear, apresenta, sem se aprofundar em detalhes, o funcionamento do tribômetro. Possui um sistema de acionamento por motor de corrente alternada e caixa de redução com alimentação por um variador de

frequência para controle da velocidade de deslocamento da amostra. Seu sistema linear é acionado por um sistema de biela-manivela. Para aplicar a força normal na amostra, foi escolhido um sistema com fuso acionado por motor e controlado por uma célula de carga.

Thorp [Thorp, 1981] desenvolveu um tribômetro de disco com 3 pinos para estudar o comportamento de lubrificante. O aspecto mais importante deste artigo para o presente trabalho, entretanto, foi a calibração do sistema de medição de torque, que usou massas conhecidas, porém não é relatado se alguma comparação com outro tribômetro foi realizada. O mesmo ocorre no trabalho de Castro et al. [Richard Castro, 2015]. Castro desenvolveu um tribômetro rotativo, sendo um dos pontos interessantes, a utilização de duas opções de aplicação da força normal, peso morto ou um atuador pneumático, ambos monitorados por célula de carga.

No livro de Menezes [Pradeep L. Menezes, 2013], é mostrado esquematicamente o funcionamento de um tribômetro para teste de pino sobre disco, porém o braço que suporta o pino e faz a leitura da força de atrito é acoplado a uma massa morta, para a geração da força normal, ao mesmo tempo que se deforma para medir a força de atrito (Figura 2.2). Com isso, a massa fará um atraso do sinal de leitura. Para um ensaio pino sobre disco à velocidade constante, isto não seria um problema, porém em situações onde pretende-se mostrar alterações rápidas na força de atrito, como o caso de um ensaio linear, este sistema não atenderia de forma ótima, deixando de mostrar variações rápidas no coeficiente de atrito.

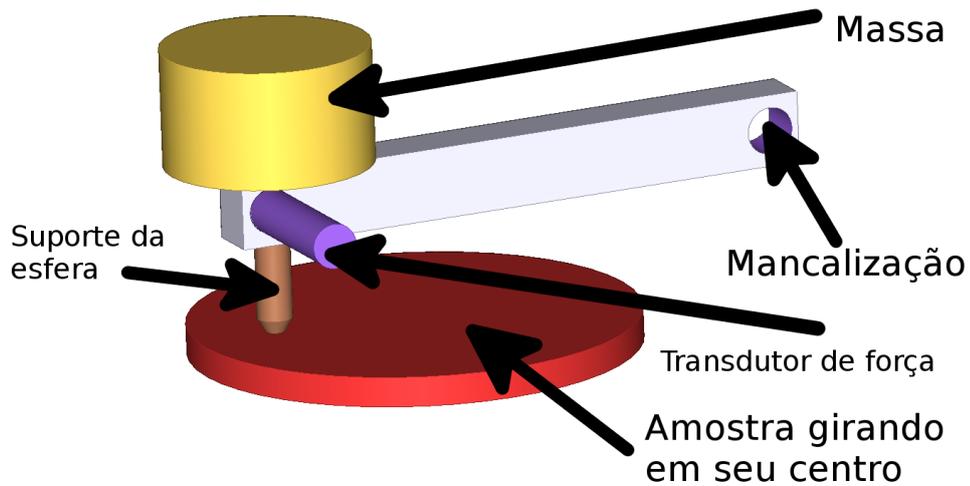


Figura 2.2 – Esquema de um tribômetro rotativo mostrado por [Pradeep L. Menezes, 2013].

Nas publicações do INPI, foram encontradas quatro patentes relacionadas a tribômetros: duas relacionadas a tribômetros para teste de pastilhas de freios veiculares [Soares M. R., 2012] e [Ferreira N. F., 2015], uma sobre ensaio de próteses ortopédicas [N., 2013] e uma de um modelo de suporte para esferas [Athayde J. N., 2017]. Essa última é a única que se deve uma especial atenção, pois nosso sistema terá um suporte para esferas e deve se tomar atenção para não infringi-la.

A Bruker<sup>®</sup>, empresa de instrumentos científicos, fabrica o UMT TriboLab<sup>®</sup>. Sua principal característica é realizar diversos ensaios em um mesmos equipamento. Possui um motor de acionamento principal que aciona módulos que podem ser trocados para realizar ensaios rotativos e lineares. Por meio de câmaras acopladas, é possível variar as condições ambientais para simular casos reais [Bruker, 2015]. Com a mesma ideia de realizar uma série de testes no mesmo equipamento, a Rtec<sup>®</sup> instrumentos incorpora também a medição do desgaste no próprio tribômetro [Rtec, 2018].

Nanovea<sup>®</sup> fabricante de tribômetros, entre as principais características, possui modelos com integração do tribômetro e sistema de medição do desgaste (interferometria), e um sistema geração da força de contato entre as superfícies baseado em dois princípios. O primeiro, pneumático, imprime uma força constante, enquanto que o segundo, eletromagnético, faz variações rápidas da força, podendo chegar à 150 Hz [Nanovea, 2015].

## 2.2 Tribologia

O ramo da ciência que estuda a interação entre superfícies com movimento relativo é denominada tribologia [Hutchings e Shipway, 2017], que é uma termo derivado das palavras gregas *tribo* e *logos* (atrito e estudo, traduzindo), ou seja, em tradução livre, ciência que estuda o atrito. Contudo, a tribologia é uma ciência interdisciplinar que faz uso de diversas áreas do conhecimento, da mecânica à química.

## 2.3 Atrito de Coulomb

Supondo-se uma massa em repouso sobre uma superfície plana, como mostrado na Figura 2.3, a força-peso é contrabalançada pela força normal de contato. Aplicando uma força horizontal ( $F$ ) a este corpo, em uma condição não ideal, só teremos movimento quando  $F$  atingir um valor crítico ( $F_e$ ) que supere a força de atrito ( $F_a$ ) que o equilibra. Quando  $F_a$  supera o valor de  $F_e$  temos o movimento do bloco e geralmente uma diminuição em  $F_e$ . A razão entre a força de atrito e a força normal de contato resulta no coeficiente de atrito ( $\mu$ ) [Nussenzvig, 2002].

O coeficiente de atrito estático é a razão da força normal de contato com a  $F_e$ , enquanto que o coeficiente de atrito dinâmico é a razão da força normal de contato com a força necessária para manter o corpo em movimento. Para a maioria dos casos, o coeficiente de atrito estático é maior que o dinâmico. Segundo Menezes [Pradeep L. Menezes, 2013] isto ocorre porque surge o efeito de adesão (*stick*) entre as superfícies quando não há movimento relativo.

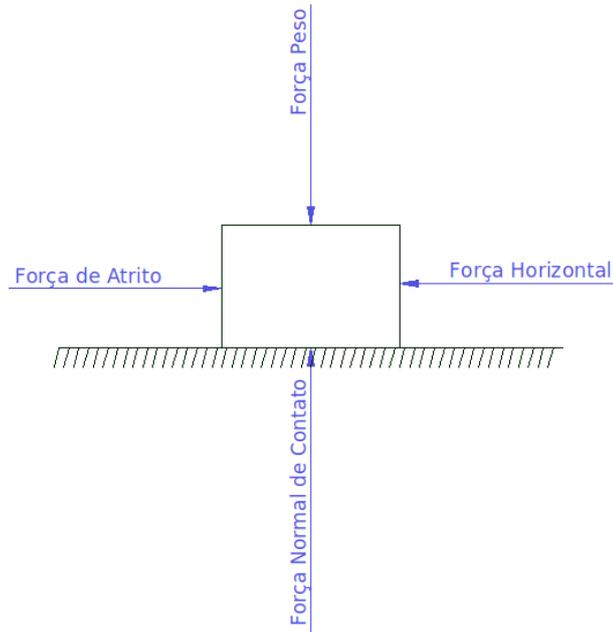


Figura 2.3 – Esquema básico de forças.

O coeficiente de atrito não pode ser obtido por cálculos, pois é um parâmetro empírico que só pode ser determinado por meio de experimentos, variando desde 0,001 até 10, geralmente entre 0,1 à 1 [Pradeep L. Menezes, 2013].

Foram formuladas 3 leis do atrito: a força de atrito é proporcional à força normal de contato, a força de atrito é independente da área aparente de contato e a força de atrito é independente da velocidade de deslizamento [Sinatora, 2007]. Porém estas leis são apenas um guia possuindo notáveis exceções [Pradeep L. Menezes, 2013], sendo o fenômeno do atrito muito complexo e dependente de diversos fatores [Nussenzvig, 2002]. Segundo Menezes [Pradeep L. Menezes, 2013], o atrito não é uma propriedade do material e sim uma propriedade do sistema tribológico, que contempla ao menos os dois corpos envolvidos, o ambiente e a interface.

### 2.3.1 Mecanismos do atrito

Pode-se dividir o fenômeno do atrito em alguns mecanismos básicos. O primeiro seria o efeito adesivo. onde no contato de duas superfícies metálicas limpas, somente as pontas das asperezas se tocam. Com a aplicação da força normal de contato produz-se uma pressão nestas áreas, que por serem pequenas são submetidas à grandes pressões, tão grandes que causam deformação plástica, a qual aumenta a área real de contato e equili-

bra as pressões [Pradeep L. Menezes, 2013]. Dependendo das características superficiais pode ocorrer a adesão (*stick*) destas áreas, e para ocorrer o movimento se faz necessário forças suficientes para romper estas ligações. Outro mecanismo de atrito é o que ocorre quando as asperezas de uma superfície mais dura penetram na de menor dureza durante a ocorrência de movimento, deformando plasticamente a superfície mais dúctil. Este é um importante fator de atrito, quando o mecanismo de adesão é pequeno e o principal componente durante o processo de abrasão [Pradeep L. Menezes, 2013]. Também tem-se o mecanismo resultante do travamento das asperezas de ambas as superfícies, provocando um aumento na força necessária para que ocorra o movimento, forçando as asperezas, das duas superfícies, umas contra as outras.

### 2.3.2 Fenômeno *stick-slip*

O fenômeno do *stick-slip* (prender-escorregar) ocorre durante o movimento e contato de duas superfícies e gera uma variação na força de atrito. Esta variação ocorre pela ocorrência dos fenômenos de deslizamento e adesão alternadamente. Durante a adesão a força de atrito sobe até atingir um valor crítico e romper esta ligação, ocorrendo deslizamento com valores de força de atrito mais baixos [Pradeep L. Menezes, 2013]. Este fenômeno é facilmente visto em freios automotivos, dobradiças de portas e até quando arrastamos objetos.

## 2.4 Microtribômetro linear

Na Figura 2.4 é mostrado o funcionamento básico de um microtribômetro linear. Dois corpos, geralmente uma esfera (normalmente cerâmica) e a amostra que pretende-se ensaiar, são postos em contato sob uma força normal, sendo aplicado um movimento relativo e recíproco entre as mesmas. Durante o ensaio é feita a medição contínua da força necessária para realizar o deslocamento relativo.

O tribômetro visa principalmente testar, sob condições controladas, o desempenho de um par de corpos sob o ponto de vista do coeficiente de atrito e desgaste, gerando um gráfico de força de atrito e o desgaste impresso nos dois corpos (como mostra a Figura 2.5 da trilha deixada em uma amostra de aço SAE 1010).

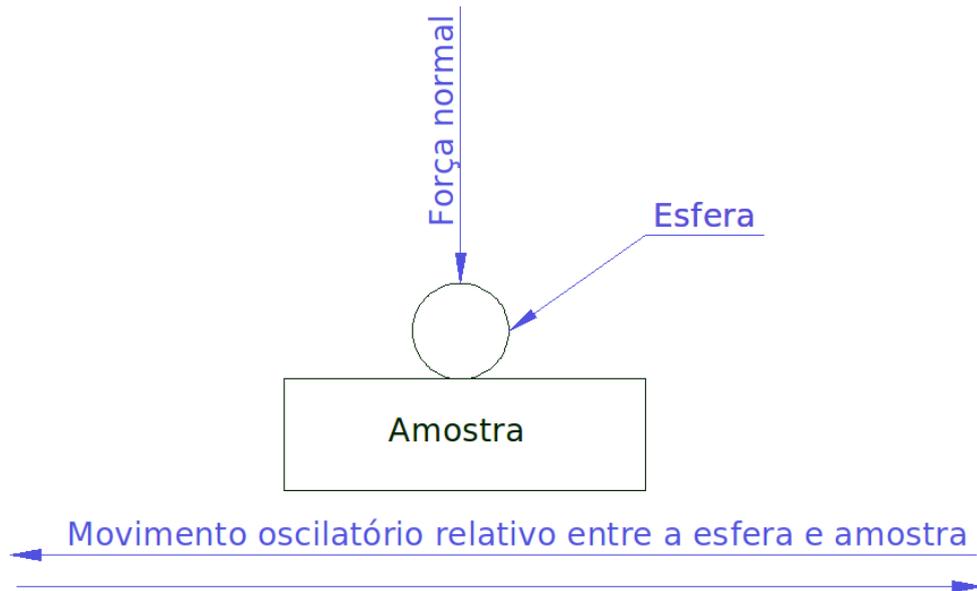


Figura 2.4 – Esquema básico de um microtribômetro linear.

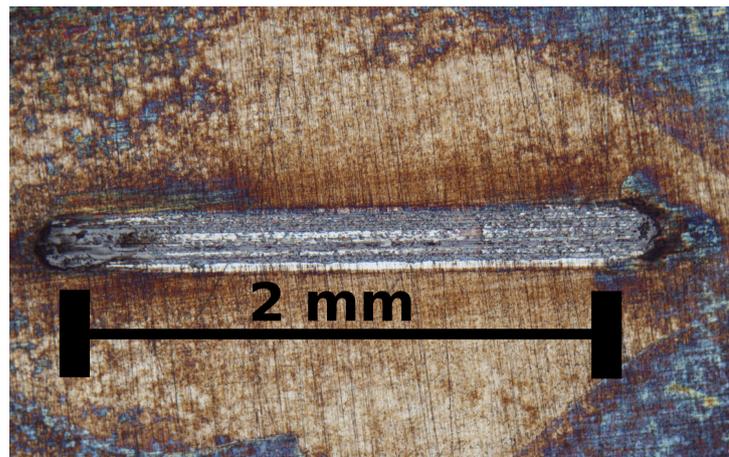


Figura 2.5 – Observação de uma trilha de desgaste após o ensaio de tribocorrosão de uma amostra de aço SAE 1010. Condições de teste: carga de 2 N, frequência de 1 Hz, esfera de alumina de diâmetro 4,762 mm, meio corrosivo NaCl 0,05 mol, 30 minutos em solução e 3 horas de ensaio.

## 2.5 Modelo do processo de projeto

O modelo de processo de projeto eleito neste trabalho foi o proposto por Pahl e Beitz [Pahl e Beitz, 2007]. As fases do processo de projeto são apresentadas a baixo:

- Esclarecer a tarefa;
- Conceber;

- Projetar;
- Detalhar.

No esclarecimento da tarefa é feita a lista de requisitos, baseada em um planejamento de produto ou pedido de cliente. Após essa fase é feita a concepção que gera princípios de solução para atender as especificações definidas anteriormente. Com a escolha de um dos princípios de solução levantados na concepção, é feito o projeto que define os componentes, dimensões e materiais, leiaute das montagens e formas. A última fase é o detalhamento, onde é definido as dimensões, tolerâncias e demais dados necessários para fabricação do produto.

O concepção tem grande influência nas fases seguintes do processo de projeto, dessa forma são usadas ferramentas para auxiliar no entendimento do problema e escolha das soluções. O primeiro passo é fazer uma abstração extraíndo o que é essencial e formulando uma representação do problema não tendenciosa. Com esta abstração e a relação entre entradas e saídas do produto é formulado a função global (Figura 2.6), que é o fluxo material, sinal e energia.



Figura 2.6 – Bloco esquemático da função global.

A função global pode ser expandida em subfunções que resulta na estrutura da função como é visto na Figura 2.7.

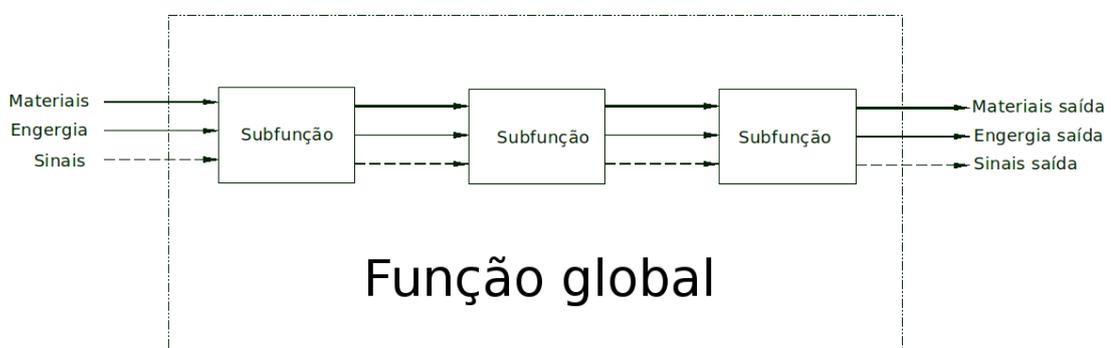


Figura 2.7 – Estrutura da função.

Com as subfunções e o uso de esquema classificador (Tabela 2.1), construído a partir

das subfunções e análise de possíveis princípios de solução, é feito a seleção de combinações destes princípios, onde ocorrerá a seleção da estrutura de funcionamento mais promissora, que passará para etapa de projeto.

Subfunções \ soluções	1	2	n
Subfunção 1	Princípio de solução 1	Princípio de solução 2	Princípio de solução n
Subfunção 2	Princípio de solução 1	Princípio de solução 2	Princípio de solução n
Subfunção n	Princípio de solução 1	Princípio de solução 2	Princípio de solução n

Tabela 2.1 – Esquema classificador.

A lista de requisitos é realimentada durante todas as fases e deve estar sempre atualizada. Muitas vezes é necessário realizar vários projetos simultaneamente até que, em determinado momento, um seja escolhido.

## 2.6 Células de carga

Células de carga são transdutores usados para medir força. Podem ser divididos em duas partes, a primeira é seu corpo estrutural (Figuras 3.26, 3.27 e 3.28), que será submetido à esforços que o deformarão. Neste corpo são fixados os extensômetros, responsáveis por transformar sua deformação em variação de resistência elétrica. São formados por uma folha fina em formato de grade (Figura 2.8), maximizando a variação de resistência em uma direção. Pode-se medir tanto compressão quanto tração usando este tipo de transdutor.

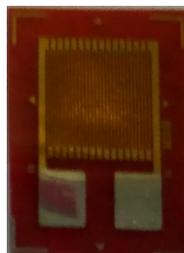


Figura 2.8 – Foto de um extensômetro.

A medição da variação de resistência elétrica no extensômetro é realizada colocando os extensômetros em uma configuração de Ponte de Wheatstone. É necessário uma série

de circuitos para a excitação da Ponte de Wheatstone, amplificação e condicionamento do sinal.

## **2.7 HRN (Hazard Rating Number)**

Um dos métodos mais usados para estimar o risco, desde sua publicação em 1990 por Steel [Steel, 1990], é o HRN (Hazard Rating Number). Em seu breve artigo, Steel expõe seu método que envolve estimar o risco quantificando por meio da multiplicação de 4 fatores: probabilidade de exposição ao perigo, frequência da exposição ao perigo, número de pessoas expostas ao perigo e perda provável máxima. Para cada fator é dado um valor numérico e a multiplicação de todos resulta no HRN, sendo cada faixa de HRN relativa a uma urgência em sanar o risco. Na Tabela 2.2 tem-se os fatores e faixas de HRN.

Probabilidade de exposição ao perigo		Frequência de exposição ao perigo	
0	Impossível	0,1	Raramente
1	Improvável	0,2	Anualmente
2	Possível	1	Mensalmente
5	Alguma chance	1,5	Semanalmente
8	Provável	2,5	Diariamente
10	Muito provável	4	Em termos de horas
15	Certeza	5	Constantemente
Perda provável máxima		Número de pessoas expostas ao perigo	
0,1	Arranhão/ Escoriação	1	1 -2 pessoas
0,5	Laceração	2	3 -7 pessoas
1	Quebrar um pequeno osso/ doença leve	4	8 - 15 pessoas
2	Quebrar um osso maior/ doença leve permanente	8	16 - 50 pessoas
4	Perder um membro/olhos ou doença séria temporariamente	12	+ 50 pessoas
8	Perder dois membros/olhos ou doença séria permanente		
15	Fatal		
Risco	HRN		
Negligenciável	0-1		
Muito baixo	1-5		
Baixo	5-10		
Significante	10-50		
Alto	50-100		
Muito Alto	100-500		
Extremo	500-1000		
Inaceitável	+ 1000		

Tabela 2.2 – Tabela resumida para cálculo do HRN.

### 3 PROCESSO DE PROJETO E FABRICAÇÃO

Foi usado o modelo do processo de projeto proposto por Pahl e Beitz [Pahl e Beitz, 2007]. Interações entre etapas do projeto foram suprimidas para o melhor entendimento do equipamento desenvolvido.

#### 3.1 Esclarecimento da tarefa

O ponto inicial de qualquer projeto é entender qual o problema que se pretende resolver. Sendo assim, algumas características foram levantadas relativas às necessidades para construir um microtribômetro que atendesse às demandas relacionadas ao estudo das zonas de uma junta soldada. No decorrer desse levantamento foi visto que atendendo à necessidade principal, atende-se também, a outros propósitos como o estudo de materiais diversos como ligas metálicas das mais variadas, materiais cerâmicos, polímeros e outros. Abaixo seguem as especificações definidas *a priori* desse projeto:

- Ensaiar pistas de até 5 mm de comprimento. Para analisar uma junta soldada é necessário ser capaz de ensaiar zonas suficientemente pequenas para que possamos permanecer com a pista de desgaste dentro de uma mesma isoterma, ou seja, analisando em todo o percurso a mesma microestrutura. Também faz parte do tamanho dessa pista, o diâmetro da esfera que irá realizar o desgaste na amostra. Esse diâmetro influencia mais a variação da microestrutura analisada do que o comprimento da pista, considerando que o movimento do tribômetro esteja paralelo às isotermas. Como o suporte da esfera é um sistema acessório, e é possível fabricar vários modelos com diferentes características, o primeiro a ser desenvolvido será para esferas de diâmetro 3/16" (4,76 mm) que será usado na validação do equipamento. Não é obrigatório o uso de esferas, como no caso de ensaiar o comportamento de um componente em condições análogas às reais.

- Frequência de até 2 Hz.

- Força normal de até 10 N.

- Comportar amostras de até 50 mm X 50 mm e espessura até 40 mm.

- Ser capaz de realizar ensaios de tribocorrosão por meio da utilização de meios úmidos. Esta característica faz com que o equipamento possa simular com mais realismo o comportamento tribológico de um determinado par, pois é possível inserir condições ambientais e ou contaminantes.

- Deve ser de fácil operação, para que novos usuários tenham uma curva de aprendizado rápida.
- Possuir sistema de segurança que impossibilite um acidente.
- Grande parte das amostras e esferas precisam ser examinadas no microscópio após o ensaio, dessa forma, a máquina deve possuir um sistema que possibilite a rápida fixação e remoção das mesmas, além de poderem ir diretamente para o microscópio.
- Ter um sistema de aquisição para gerar os gráficos do atrito versus tempo.
- Ergonomia, para não tornar-se um fardo para usuários e não atrapalhar o ambiente do laboratório.
- Possuir um custo de aquisição compatível com os recursos das Universidades Brasileiras.
- Dentro do possível, desenvolver a maior parte da tecnologia usada no tribômetro.

### 3.2 Concepção

A forma abstraída dos requisitos de projeto, ou seja, a formulação do problema mais ampla possível é: esfera, amostra, movimentos e forças que devem ser exercidos sobre as mesmas, e o sistema que mede a força perpendicular à normal (Figura 2.4 mais o sistema que mede a força). O restante é acessório, para poder realizar os movimentos e esforços, sendo assim, é necessário pensar de maneira simples e lógica sempre tendo em mente o problema e não a solução. As ferramentas disponíveis para fabricação e a facilidade de produzir o produto em séries maiores, também entram na balança das escolhas tomadas no projeto. Projetar é como resolver um sistema de equações com mais variáveis que equações, e para resolvê-lo é necessário usar arte apoiada por ciência.

Com a abstração e análise das especificações definidas *a priori* é apresentado função global (Figura 3.1) e suas subdivisões (Figura 3.2).



Figura 3.1 – Função global.

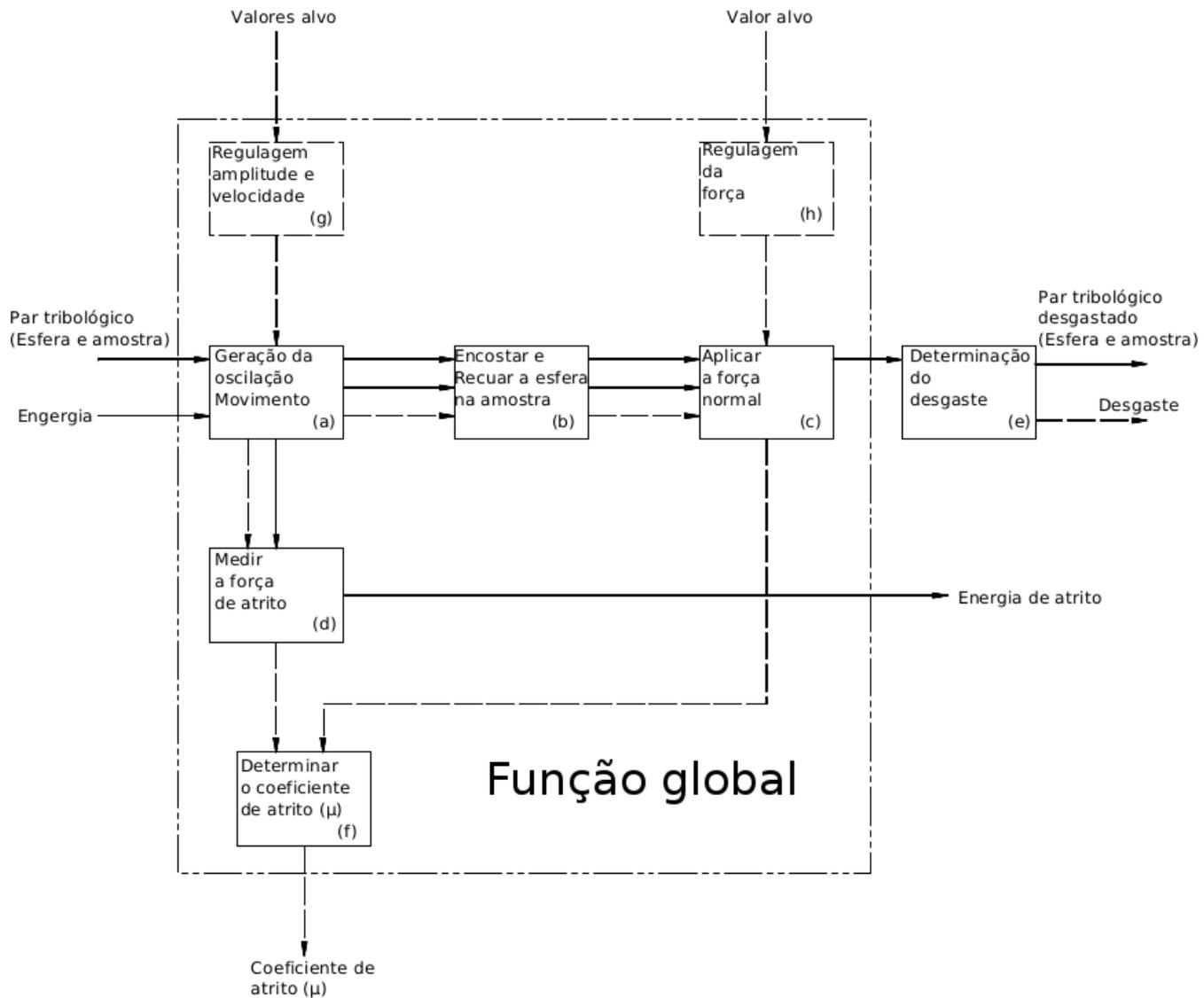


Figura 3.2 – Diagrama de blocos da subdivisão da função global.

Compilando os princípios técnicos economicamente favoráveis para solução levantada na subdivisão da função global, é montado o esquema classificador (Tabela 3.1).

Subfunções \ Soluções	1	2	3	4
Geração da oscilação Mecanismo de acionamento (a)	Fuso de esferas	Biela manivela	Scotch Yoke	
Geração da oscilação Quem se movimenta? (a)	Esfera	Amostra		
Encostar e Recuar a esfera na amostra (b)	Carro guiado por sistema linear	Braço mancalizado		
Aplicar a força normal (c)	Massa	Atuador elétrico	Atuador pneumático	Atuador eletromagnético

Tabela 3.1 – Esquema classificador.

A primeira decisão tomada na concepção foi escolher como seria aplicada a força normal entre a esfera e a amostra. Para esta subfunção foram levantadas três possibilidades, e cada uma delas atende melhor uma faixa de forças considerando aspectos funcionais e de custos. Como foi visto nas especificações definidas *a priori*, a faixa de força normal é de até 10 N, sendo assim, foi escolhido usar uma massa para gerar esta força normal. Aumentando esta faixa, a massa necessária para gerar a força normal seria aumentada, chegando a um valor que ficaria difícil de acomodar no equipamento, o que tornaria o uso de atuadores elétricos (opção adotada pela Bruker [Bruker, 2015]) ou pneumáticos uma escolha assertiva. Por outro lado, se fosse uma especificação definida *a priori* a rápida variação da força normal, a escolha que atenderia melhor seria um atuador eletromagnético, e se ao mesmo tempo fosse exigido uma força normal alta, a combinação do atuador elétrico ou pneumático com o atuador eletromagnético (como adotado pela Nanovea [Nanovea, 2015]) seria a escolha ideal.

Após a escolha do uso de massa como gerador da força normal, deve-se escolher quem irá realizar os movimentos oscilatórios: a esfera ou a amostra. Escolhendo a esfera, é preciso colocar um sistema que transmita a força para ela em movimento, pois ao movimentar a massa é necessário acelerar e desacelerar até 1 kg. A norma [ASTM G133-05, 2016] mostra como diagrama esquemático de um tribômetro comercial, o sistema da Figura 3.3 (diagrama similar ao apresentando na norma).

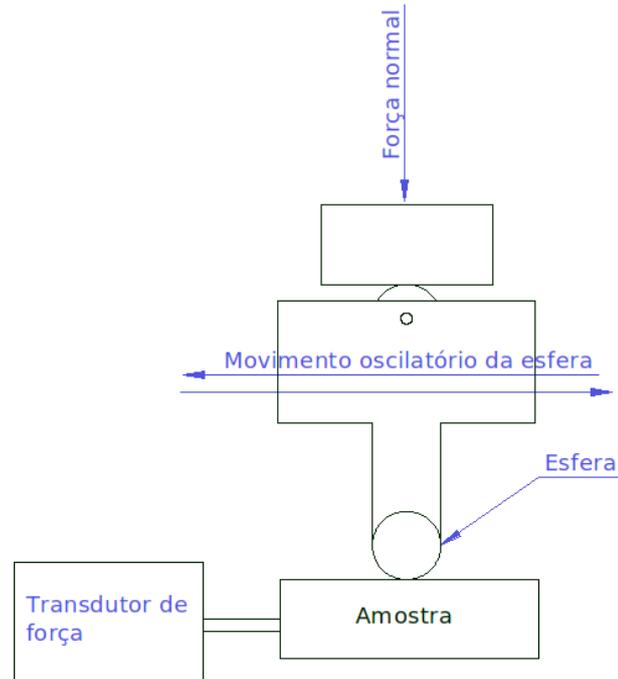


Figura 3.3 – Diagrama esquemático similar ao mostrado na norma [ASTM G133-05, 2016].

Neste sistema a esfera faz o movimento oscilatório e um rolo transmite a força para ela, sem transmitir a inércia da massa. A norma não obriga a fazer dessa forma, só cita que esse é um modelo de tribômetro. Outra implicação em movimentar a esfera é que o sensor de força de atrito ficaria preferivelmente na amostra. Por outro lado, ao movimentar a amostra é possível colocar diretamente a massa sobre a esfera e o sistema de medição da força de atrito ficaria alojado no conjunto da esfera, como mostra a Figura 3.4.

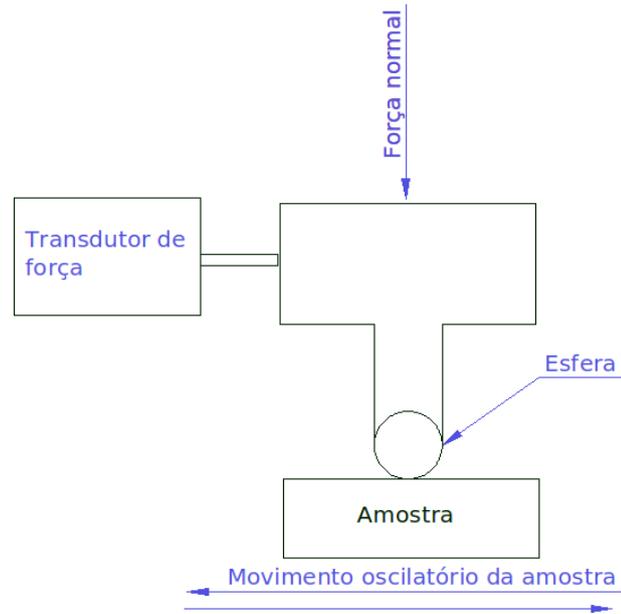


Figura 3.4 – Diagrama esquemático do sistema com a esfera parada e amostra oscilando.

Considerando principalmente questão de facilidade de fabricação e montagem, foi escolhido movimentar a amostra. Esse é um dos divisores de água neste projeto, e decidir movimentar a esfera não estaria errado, cada um dos sistemas tem vantagens e desvantagens.

Com a amostra realizando o movimento de oscilação, é preferível que o sistema de medição da força de atrito não esteja solidário à amostra, pois as acelerações gerariam falsas medidas no sensor de força. Este problema pode ser minimizado colocando o sensor próximo do local onde é gerada a força de atrito.

Neste ponto, foi estabelecido que o sistema deverá ter a esfera parada, com um grau de liberdade para imprimir a força de contato com a amostra, que o sistema de medição da força de atrito esteja no lado da esfera, que está parada, e a amostra deverá fazer o movimento de oscilação. O próximo passo, foi selecionar o sistema para realizar o movimento de oscilação da amostra.

Como a oscilação deve ser de até 5 mm em frequências até 2 Hz, o melhor sistema encontrado foi o biela-manivela que é simples de fabricar, robusto e preciso. O único inconveniente é que a velocidade varia em todo o percurso. No gráfico da Figura 3.5 é mostrada a variação da velocidade e do curso em relação ao tempo, considerando uma rotação de 60 rpm no motor de acionamento em um curso de 2 mm. É possível observar que a velocidade é zero nas posições 1 e -1, que representam as posições extremas do

curso do carro neste caso. Cada combinação de frequência e curso resulta em uma curva de velocidade diferente.

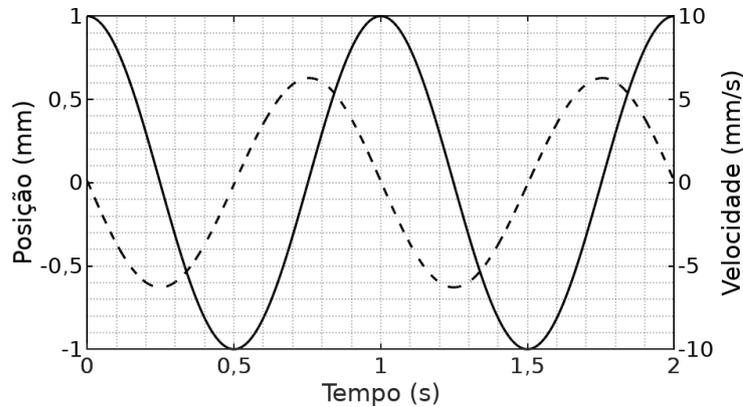


Figura 3.5 – Gráfico da posição e velocidade do carro. A linha tracejada representa a velocidade (mm/s) e a linha contínua, a posição (mm).

A norma [ASTM G133-05, 2016] diz que a velocidade depende do tipo de mecanismo usado para fazer o movimento oscilatório e cita, como exemplo, o mecanismo Scotch Yoke, que tem a curva de velocidade parecida com a da biela-manivela, porém possui uma fabricação e montagem mais complexos considerando as ferramentas disponíveis.

A Figura 3.6 mostra esquematicamente o funcionamento do tribômetro neste ponto do desenvolvimento. Por meio da rotação da manivela é gerado um movimento linear alternativo, que aciona o movimento da amostra. Com apenas um grau de liberdade, a esfera é colocada em contato com a amostra com uma força de contato.

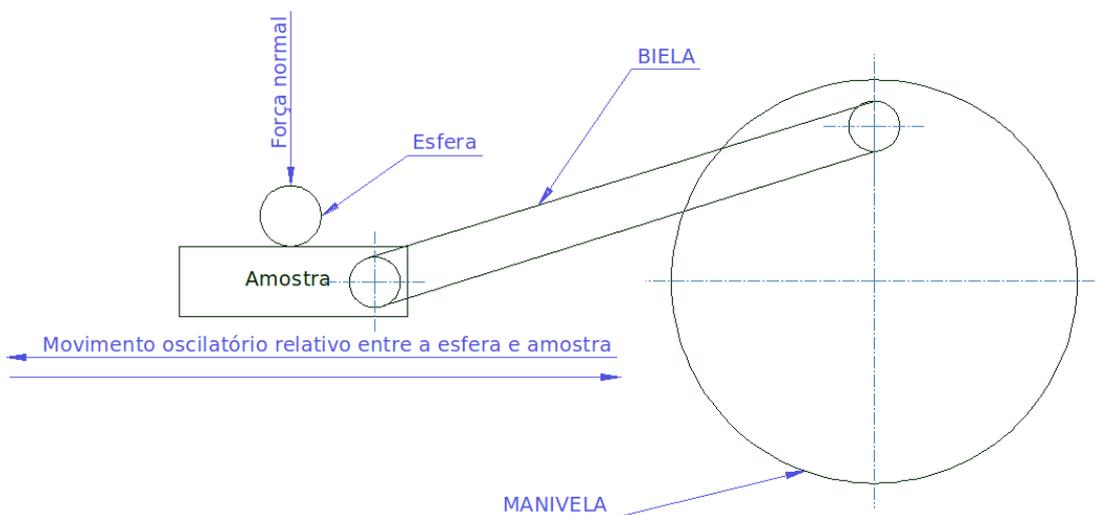


Figura 3.6 – Figura esquemática do funcionamento do tribômetro.

Na subfunção responsável por encostar e recuar a esfera na amostra, duas soluções foram levantadas. A primeira, seria usar um carro com movimento linear e vertical (Figura 3.7), porém comparado a um sistema de braço mancalizado (Figura 3.8), possui um custo de fabricação maior e necessitaria de uma estrutura para apoiá-lo, enquanto que o braço articulado já é sua própria estrutura.

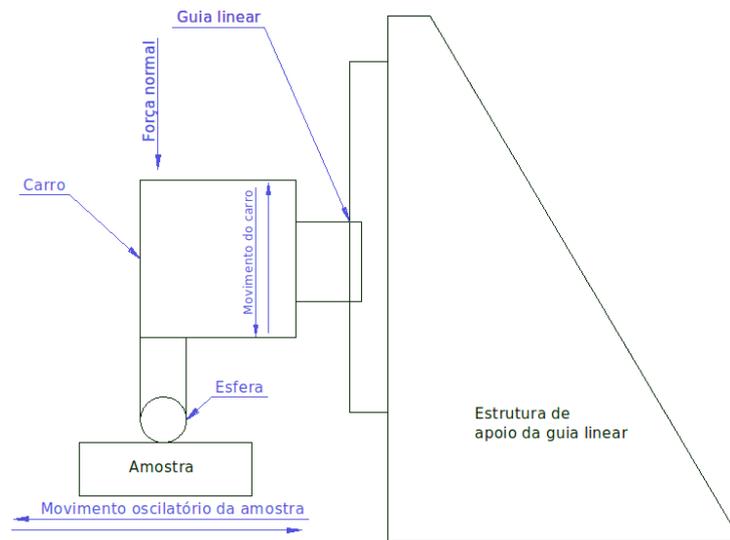


Figura 3.7 – Figura esquemática do sistema com movimento linear.

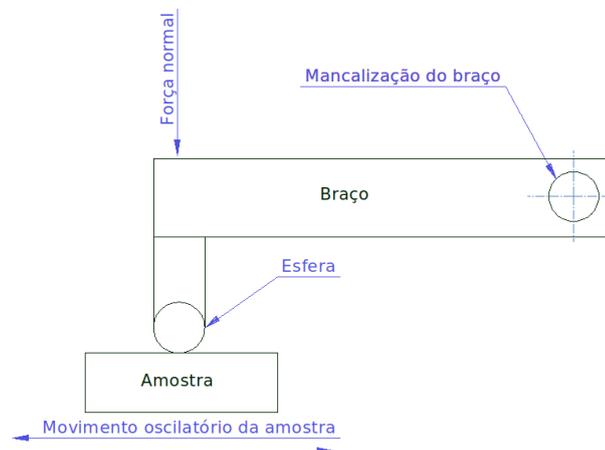


Figura 3.8 – Figura esquemática do sistema com braço articulado.

### 3.3 Projeto

Escolhido conceitualmente como seria o tribômetro, é chegado o momento de realizar o projeto e detalhamento, que neste caso, foram colocados em uma mesma etapa para facilitar o entendimento do desenvolvimento.

O tribômetro (Figura 3.10 mostra uma foto do equipamento finalizado) pode ser dividido em subsistemas que compreendem uma ou mais subdivisões da função global. A correspondência entre os subsistemas da figura 3.9 e os mecanismos esquemáticos da Figura 3.6 são apresentados abaixo:

- Carro porta-amostra: Contempla o mecanismo biela-manivela e a amostra, sendo assim, é responsável por fixar e movimentar a amostra em relação a esfera.
- Caneta: Tem a função de fixar a esfera, evitando que gire, servindo de ligação com o antebraço.
- Antebraço: Mancelizado no seu centro pelo braço, tem a função transferir e isolar a força de atrito gerada entre a esfera e a amostra para a célula de carga.
- Braço: Responsável pela restrição dos graus de liberdade da esfera, e pela transferência da força normal gerada pelo peso morto para o antebraço, que transmite para a caneta e por fim para a esfera.
- Célula de carga: Transforma a força de atrito em variações de resistência elétrica que no final são transformados em dados de coeficiente de atrito.
- Alavanca: Mantém a esfera recuada da amostra, para o preparo do tribômetro, ou em contato com a amostra, para realização do ensaio.

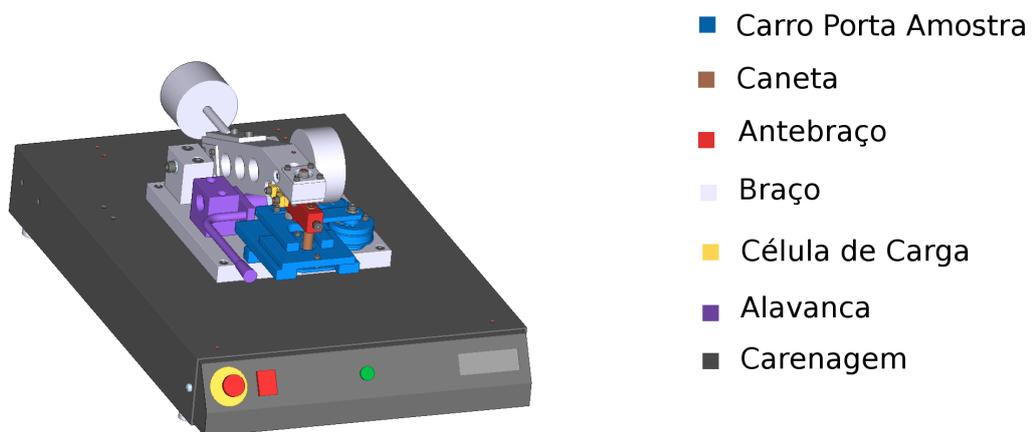


Figura 3.9 – Subsistemas do tribômetro, faltando tampa e sistema eletrônico. Vista frontal e lateral esquerda no ANEXO III.



Figura 3.10 – Foto do tribômetro desenvolvido.

A seguir é apresentado em tópicos os subsistemas do tribômetro com maior detalhe.

### 3.3.1 Carro Porta-amostra

O carro porta-amostra (Figura 3.11) é o subsistema responsável por fixar e movimentar a amostra. Deve ser de fácil operação, ou seja, propiciar de forma simples a fixação da amostra e com a menor interferência possível das variações na execução da tarefa de fixação pelo usuário no resultado do ensaio. Também deve oscilar a amostra com movimentos precisos.

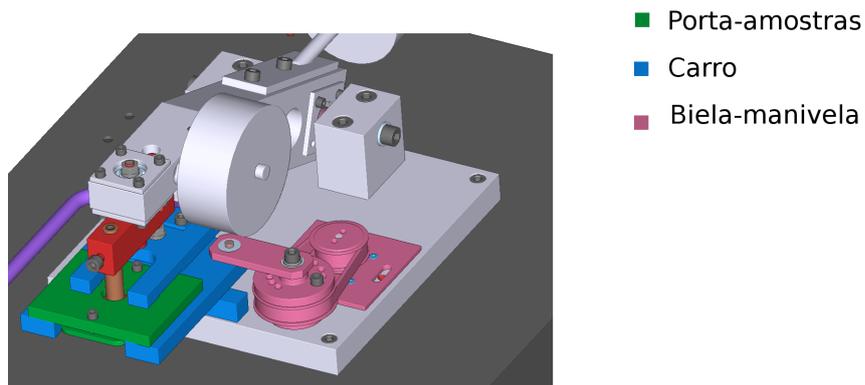


Figura 3.11 – Figura do carro porta-amostra que compreende porta-amostra, carro e biela-manivela.

Pode-se dividir o carro porta amostra em duas partes: porta-amostra e carro.

### 3.3.1.1 Porta-amostra

O subsistema porta-amostras é apresentado na Figura 3.12, sendo composto pelas peças: placa porta-amostra, parafuso, amostra, placa de fixação e rebite porca. A fixação da amostra é efetuada por meio da prensagem da amostra entre a placa porta-amostra e a placa de fixação, com isso a superfície da amostra que será ensaiada fica paralela a superfície inferior da placa porta-amostra que é fixada no carro (Figura 3.13), tornando a superfície da amostra perpendicular à esfera e paralela ao movimento de oscilação. O não paralelismo da superfície da amostra, com o movimento de oscilação, causa uma aceleração da massa morta variando a força normal e o coeficiente de atrito.

Outra característica importante do porta-amostra é aceitar uma grande variação de dimensões na amostra, e separar a tarefa de fixação da amostra no porta-amostra, da fixação do porta-amostra no carro, tornado o processo mais ergonômico e rápido.

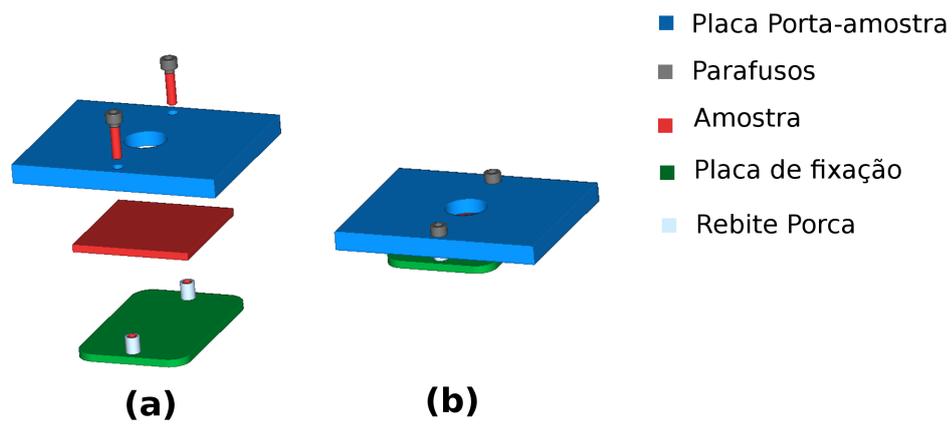


Figura 3.12 – Em (a) uma vista explodida do porta-amostra, e (b) a amostra fixa pelo porta amostra.

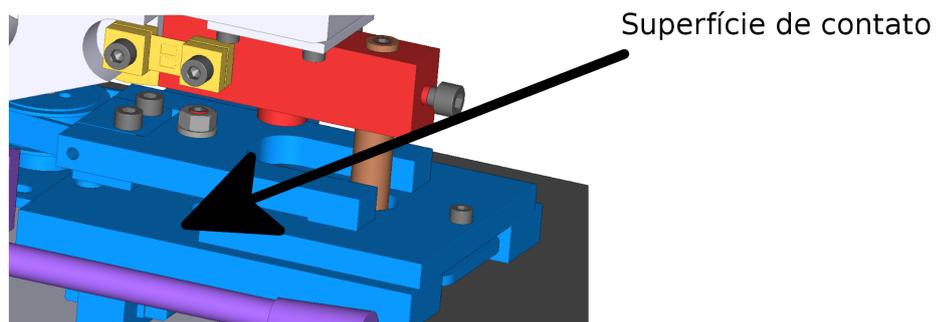


Figura 3.13 – Superfície de contato entre a placa porta-amostra e o carro.

Na Figura 3.14 é apresentado o movimento que o garfo faz para fixar o porta-amostra no carro.

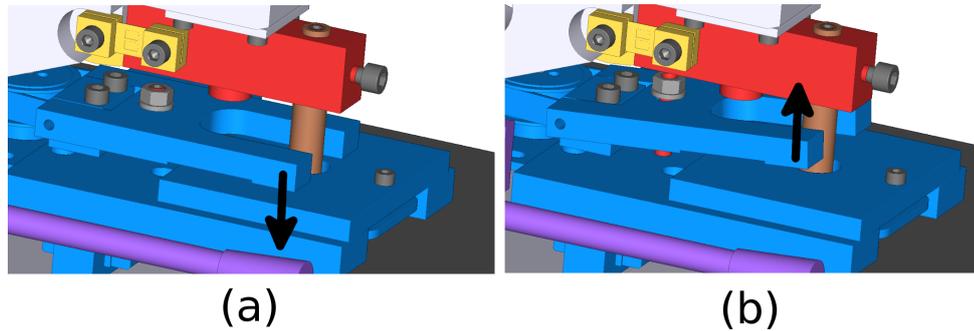


Figura 3.14 – A figura (a) mostra o porta-amostra fixo pelo garfo, em (b) o garfo está aberto (ângulo de abertura aumentado para facilitar o entendimento).

Duas opções de porta-amostra foram desenvolvidas: uma para meio seco e outra para meio úmido. A principal diferença é que a para meio úmido é fabricada em polímero e possui um anel de vedação que evita o vazamento do fluido (Figura 3.15 e 3.16).



Figura 3.15 – Vista explodida do porta-amostra para meio úmido.

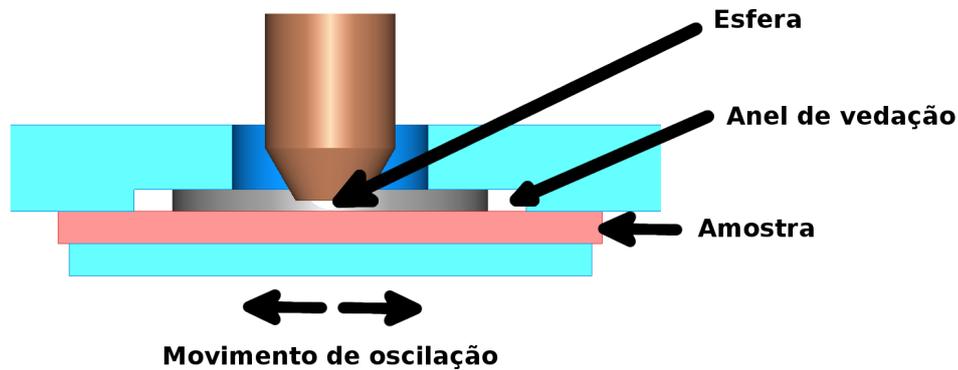


Figura 3.16 – Vista em corte do porta-amostra para meio úmido.

### 3.3.1.2 Carro

O subsistema carro compreende o carro e o mecanismo biela-manivela (Figura 3.11). A frequência do carro é controlada pela rotação da manivela e, como foi abordado no projeto conceitual, possui velocidade variável em todo o curso. O motor de acionamento da manivela neste primeiro modelo é um motor de passo, especialmente desenvolvido para micropassos. Existe a opção, caso seja necessário, pela troca por um servo motor (motor síncrono de ímãs permanentes com malha fechada). Nesse ponto surge uma questão que deve ser estudada em um outro trabalho, qual a influência do motor de acionamento na medida do atrito, pois todos os motores possuem variações na velocidade angular durante seu funcionamento, mas pode-se diminuir isso para valores muito baixos. Tipicamente motores de passo possuem variações na velocidade angular devido aos passos, mas a norma [ASTM G133-05, 2016] indica o uso desses motores para o acionamento suave e preciso.

É possível programar o comando eletrônico para variar a velocidade do motor de acionamento da biela-manivela a fim de fazer a curva de velocidade constante em quase todo o percurso, exceto nas mudanças de direção, onde teremos acelerações e desacelerações. Também é possível programar a curva de velocidade para simular uma situação específica de uma aplicação real, simulando em laboratório um caso particular de um problema tribológico. O desenho final do carro é mostrado na figura 3.17.

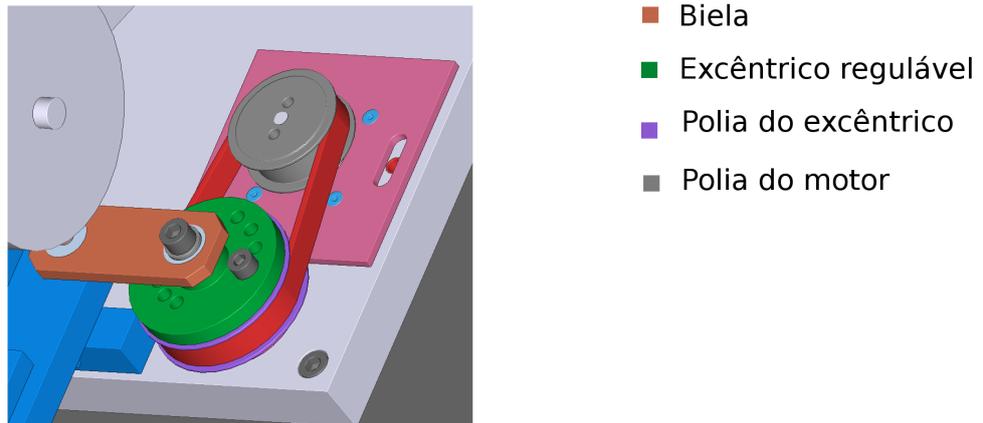


Figura 3.17 – Conjunto da biela-manivela.

Como guia para o movimento linear, foi usado um conjunto patins e trilho linear com pré-carga, ele dá uma grande precisão sem folgas, além disso, neste caso particular, a lubrificação inicial durará a vida da máquina, dispensando novas lubrificações. O sistema de regulagem do curso está embutido na manivela, como mostra a Figura 3.18; para mudar o curso basta soltar os parafusos indicados e mudar para próxima posição do excêntrico regulável.

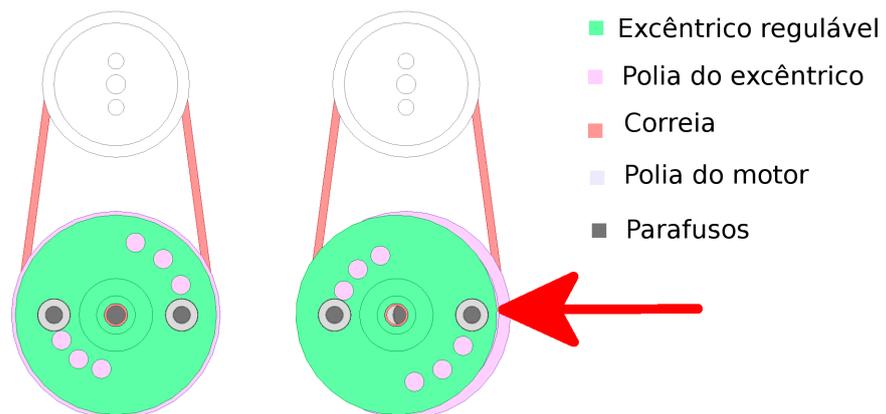


Figura 3.18 – Direita curso em 5 mm e esquerda 2 mm de curso. Seta vermelha realçando o movimento do excêntrico regulável.

### 3.3.2 Caneta

"Caneta" foi o nome dado para o conjunto responsável pela fixação da esfera, que geralmente é usada como contra-amostra, porém em alguns casos é necessário usar como contra-amostra uma peça que represente melhor a geometria do par que se pretende simular no ensaio, sendo assim, nem sempre é usado esferas como contra-amostra.

Existem diversas formas de fabricar a caneta, mas levando em consideração as ferramentas disponíveis e os requisitos para que a esfera ficasse fixa e rígida em relação ao resto do braço, o desenho ficou como mostrado na Figura reffig:caneta.

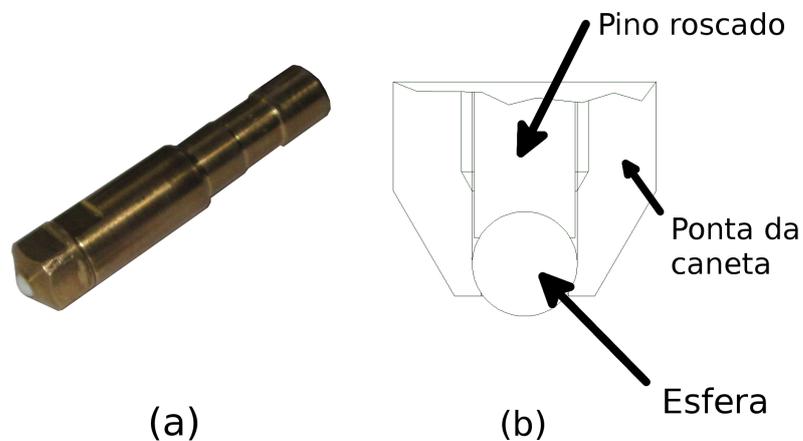


Figura 3.19 – Em (a) a caneta com a esfera montada e (b) o desenho em corte com o pino roscado que veste a esfera.

Esse desenho proporciona outra vantagem: poder usar ponteiros de polímero (Figura 3.20) sem perder a rigidez do conjunto, pois a ponteira é apoiada totalmente pela meia esfera usinada na ponta do eixo roscado em metal, transmitindo por meio dela os esforços. Este sistema possibilita também usar uma mesma caneta em uma infinidade de pontas diferentes metálicas ou em polímero.



Figura 3.20 – Figura da ponteira em polímero.

Outro ponto levado em consideração é que geralmente após um ensaio, é necessário fazer um exame no microscópio do desgaste na esfera. Fazer isso sem desmontar a esfera da caneta, se mostrou uma operação muito complicada e arriscada (pode-se perder a posição da esfera onde foi feito o desgaste). Poder levar a ponta da caneta diretamente para o microscópio facilita muito o trabalho, para isso a ponta da caneta foi projetada com uma altura compatível com as dimensões para entrada em diversos microscópios.

### **3.3.3 Antebraço**

Antebraço (Figura 3.21, 3.22 e 3.23) é o subsistema responsável por mancalizar a caneta, transferindo a força de atrito para célula de carga e evitando que a força normal seja transferida para mesma, interferindo nas medidas. Atua também diminuindo a massa a ser acelerada para deformar a célula de carga, em comparação com sistemas que a massa morta se movimentava junto com o sistema de medição da força de atrito, isso aumenta a velocidade de resposta do sistema tornando o equipamento apto a captar variações rápidas na força de atrito, sendo mais um diferencial em relação aos demais tribômetros do mercado.

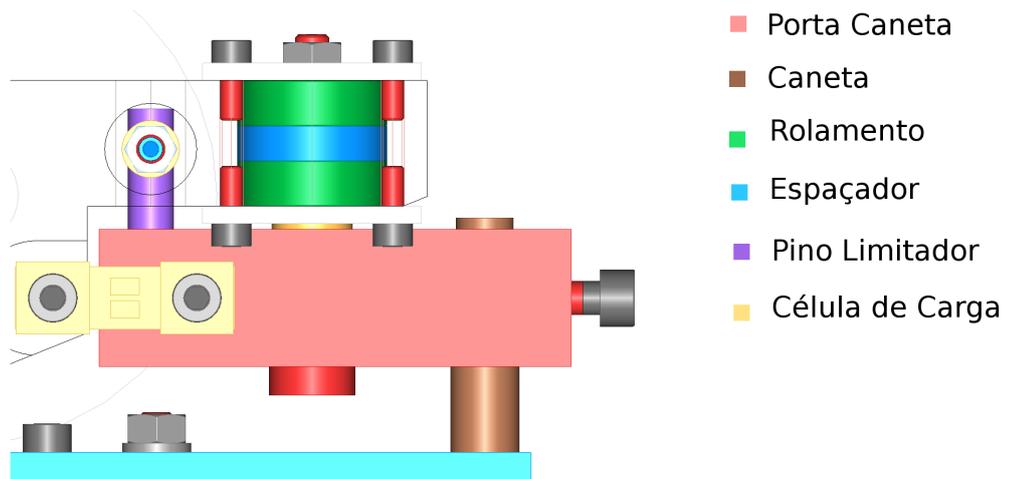


Figura 3.21 – Subsistema do antebraço.

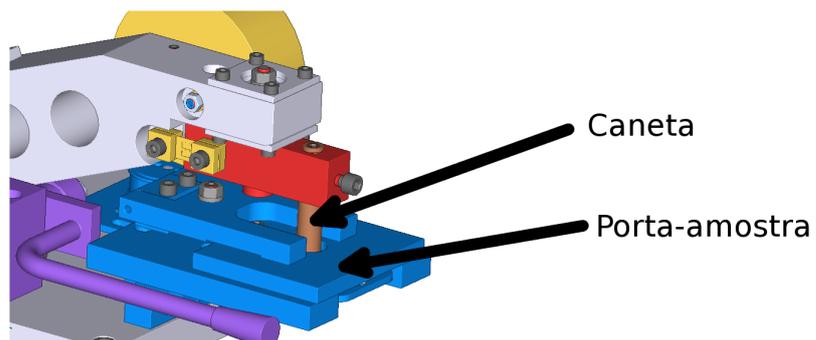


Figura 3.22 – Subsistema do antebraço com indicação do porta-amostras e caneta.

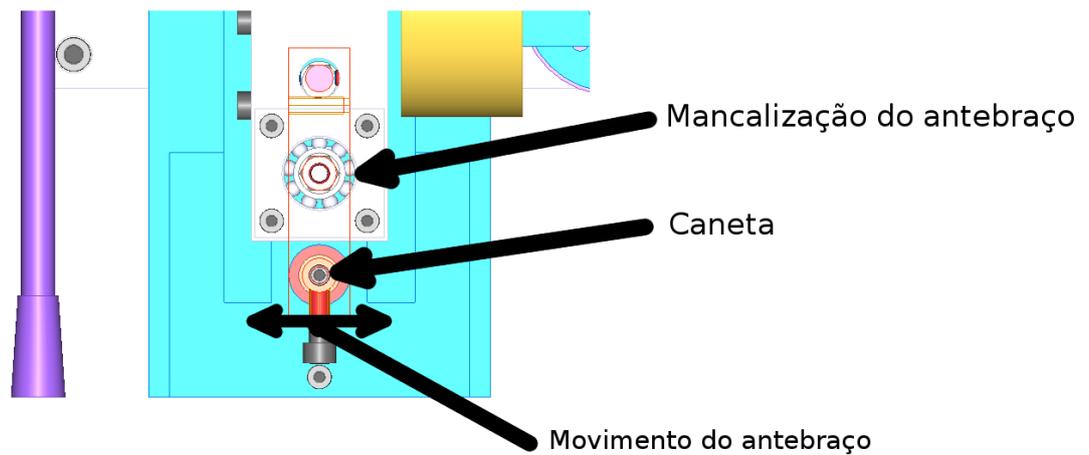


Figura 3.23 – Vista superior do antebraço, com seu corpo em linhas vermelhas, e indicação do seu movimento.

A Figura 3.24 apresenta o mecanismo que limita a deformação da célula de carga protegendo de deformações plásticas acidentais, restringindo o movimento do pino limitador entre a regulagem de dois parafusos perpendiculares. A mancalização utiliza rolamentos pré-carregados e sem folgas projetados para a vida útil do equipamento.

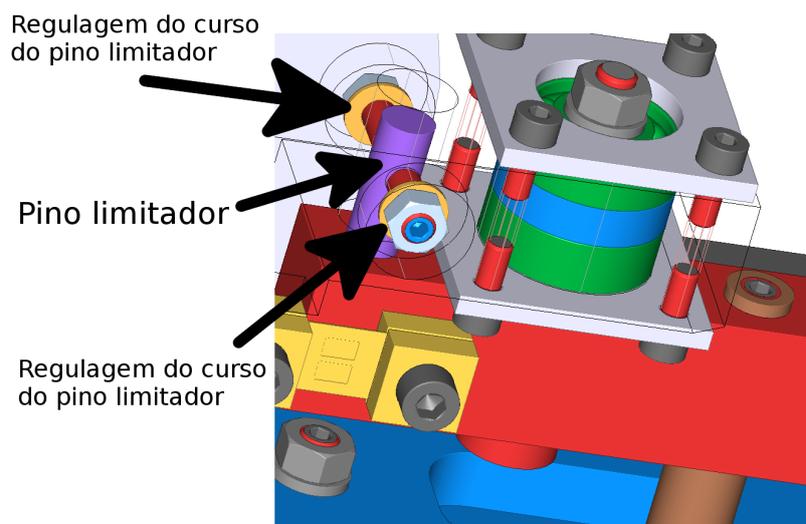


Figura 3.24 – Conjunto limitador da célula de carga.

### 3.3.4 Braço

Uma das peças mais complexas do tribômetro é o braço (Figura 3.25), responsável por mancalizar o antebraço possibilitando que ele imprima a força normal na Caneta.

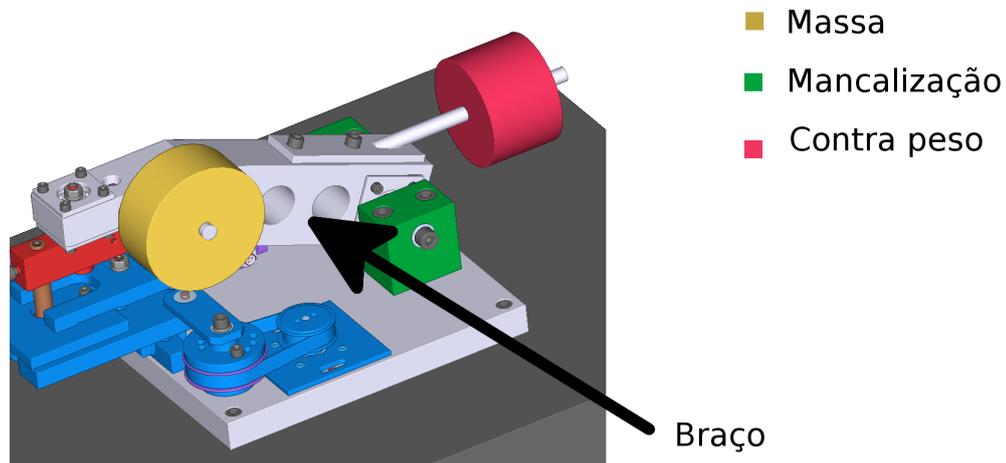


Figura 3.25 – Figura do braço.

A massa foi colocada para trás da caneta, com o objetivo de melhorar a ergonomia da máquina, proporcionando melhor acessibilidade ao sistema da caneta. As mancalizações do braço possuem rolamentos sem folga axial ou radial, ou seja, um leve aperto proporciona maior rigidez e, como as velocidades de rotação são muito baixas, esse aperto não trará problemas na vida dos rolamentos. No braço, no lado oposto à caneta, foi posicionado o contra peso responsável por anular a massa do braço, deixando somente a massa da força normal atuando na caneta. Para regulagem basta tirar a massa morta e fazer com que o braço fique em equilíbrio com o contra peso, tendo uma rosca que permite a precisa regulagem do contra peso.

### 3.3.5 Célula de Carga

Foi usada uma célula de carga tipo viga fina (Figura 3.26), que é simplesmente um chapa fina, neste caso com 1 mm de espessura e em alumínio, com dois furos para fixação por calços fabricados em metal duro.

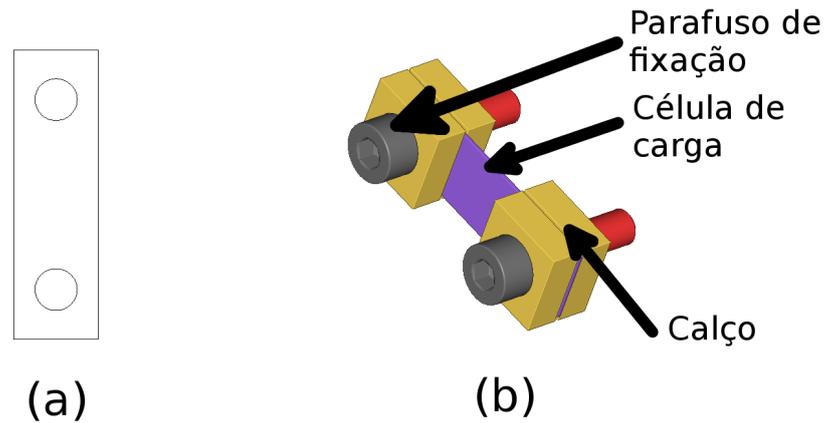


Figura 3.26 – Célula de carga de viga fina, em (a) vista frontal e (b) conjunto da célula de carga.

Os extensômetros são fixados nos centros das curvas que são formadas com o movimento do antebraço (Figura 3.27). A configuração dos extensômetros escolhida foi de ponte inteira, sendo todos fixados na mesma curva e em lados opostos da viga fina (na Figura 3.28 é mostrada a localização da célula de carga).

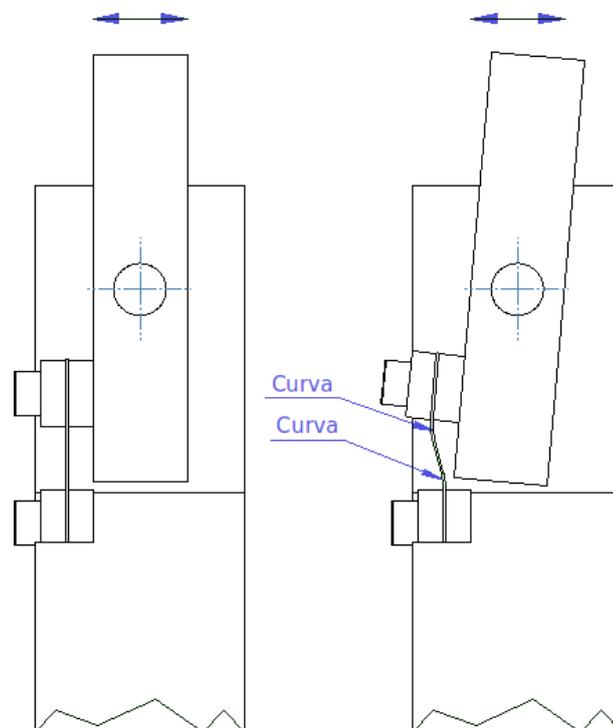


Figura 3.27 – Na esquerda o sistema do antebraço sem esforços transversais, e na direita após sofrer deformação (a deformação foi drasticamente acentuada para melhor visualização).

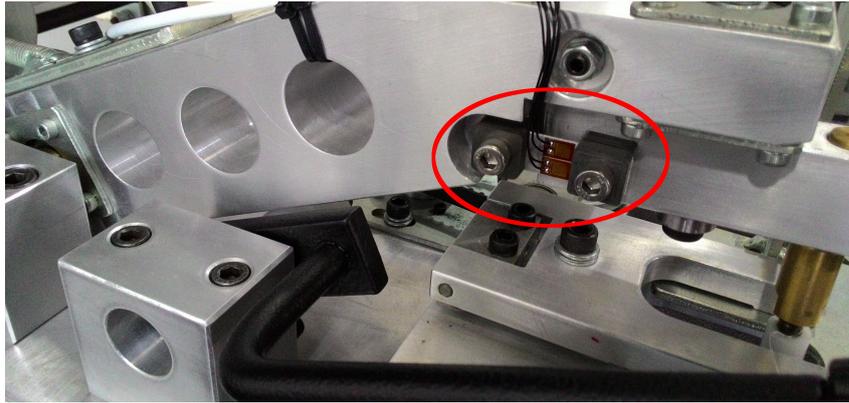


Figura 3.28 – Localização da Célula de carga de viga fina (elipse em vermelho).

Com a configuração (ponte completa) e posição escolhidas para os extensômetros, existe compensação do efeito térmico, que caso não fosse compensado acarretaria na variação da resistência elétrica do extensômetro com a temperatura, ocasionando alterações nas medidas. Por meio dessa configuração, também é alcançada alta sensibilidade a deformações por flexão.

### 3.3.6 Alavanca

Na lateral do braço há uma alavanca que serve para deixar o braço levantado quando é feita a manipulação do porta-amostra. Essa alavanca é constituída de um sistema com roldana para torna-lá ergonômica e segura, evitando que o braço colida na amostra, o que certamente traria danos para amostra e esfera. Observa-se nas Figuras 3.29 e 3.30 a alavanca posicionando o braço na posição recuado e avançado.

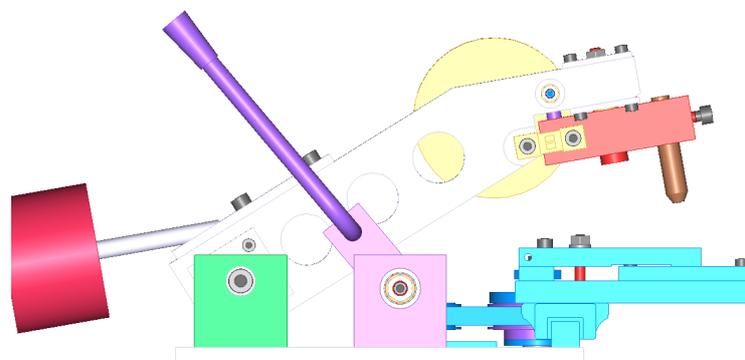


Figura 3.29 – Braço recuado por meio do acionamento da Alavanca.

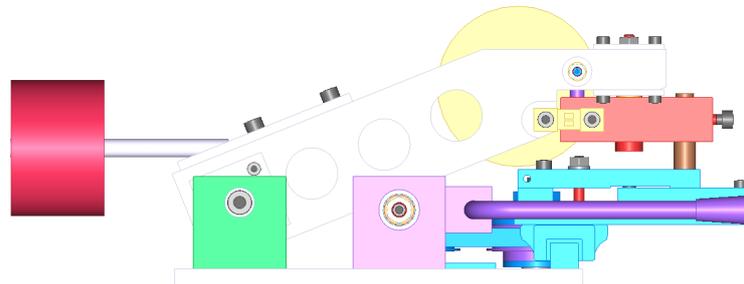


Figura 3.30 – Braço avançado.

### 3.3.7 Carenagem

A carenagem é necessária para proporcionar maior segurança e diminuir o impacto no ambiente de trabalho, principalmente em relação ao ruído (orientação da norma [NBR 12100, 2013]), além de melhorar a estética geral do equipamento. É possível dividir a carenagem em duas partes (ver na Figura 3.31). A primeira é a saia, que serve como suporte da placa base e acomoda a gaveta, que é responsável por fixar todo o sistema elétrico, possuindo a característica de deslizar para fora da saia expondo todo o sistema elétrico como uma verdadeira gaveta. Por fim a tampa, que bascula em uma articulação localizada na traseira do tribômetro e é suportada por um sistema de amortecedor e mola, que praticamente anula seu peso, e nos finais do curso mantém a tampa aberta ou fechada de forma segura, atendendo à norma [NBR NM 272, 2002].

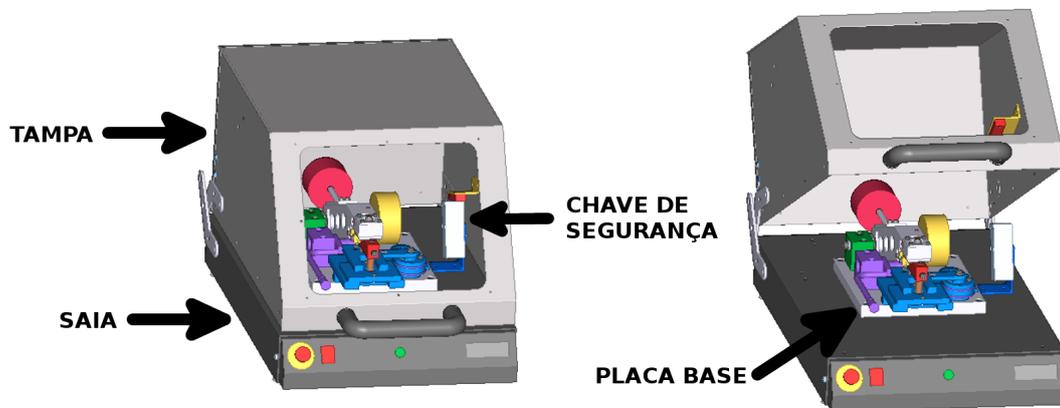


Figura 3.31 – Carenagem com a tampa aberta e fechada.

O conjunto formado pela saia e gaveta formam uma proteção fixa de enclausuramento, impedindo o acesso à zona de perigo, ou seja, o comando elétrico. Dois parafusos fazem o fechamento da gaveta em relação à saia, requisito da norma [NBR NM 272, 2002].

A tampa é definida como uma proteção móvel de comando, que por ser dotada de uma chave de segurança com ruptura positiva, só deixa a máquina funcionar se a mesma estiver fechada. Caso haja uma abertura da tampa durante seu funcionamento, as funções perigosas são paradas, no entanto, o fechamento da tampa por si só, não reinicia a operação [NR12, 2015]. Outros pontos importantes atendidos das normas [NBR NM 272, 2002] e [NBR 12100, 2013] na tampa são: visibilidade através de um visor construído de acrílico transparente e iluminação embutida, força de operação reduzida, integridade das uniões, rigidez e resistência à corrosão.

O sistema de carro porta-amostra e biela-manivela ficam expostos na abertura da tampa, isto atende a mais um requisito da norma [NBR NM 272, 2002] e [NBR 12100, 2013]. Este requisito indica a desobstrução de acesso às áreas que necessitam ser acessadas em uma operação normal, não podendo ser construído uma proteção fixa que exigiria sua desmontagem para acesso, expondo o usuário a um perigo sem supervisão, assunto que será aprofundado no decorrer deste trabalho.

### 3.3.8 Segurança

No Brasil, a norma que define os critérios de segurança necessários em máquinas e equipamentos é a [NR12, 2015] - Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos. Dentro dela é definido quais requisitos mínimos precisam ser atendidos. Para poder atingir estes requisitos, é necessário consultar diversas outras normas que definem como devem ser implementados os diversos aspectos da [NR12, 2015]. Dessas normas auxiliares temos a [NBR 12100, 2013] que define, dentre outros aspectos, a hierarquia entre as normas, sendo divididas em três tipos: as normas tipo A, que abrangem os conceitos e princípios básicos para o projeto de todos os tipos de máquinas; as normas do tipo B, que dizem respeito a exigências técnicas (mais especificamente do tipo B1) ou dispositivos de segurança (tipo B2); e do tipo C, específicas para cada família de máquinas, como por exemplo prensas hidráulicas. Não existe entretanto uma norma tipo C para instrumentos de ensaios ou tribômetros. As normas mais relevantes para o presente trabalho são apresentadas na lista abaixo, bem como seu título e tipo.

- NBRISO12100 - SEGURANÇA DE MÁQUINAS — PRINCÍPIOS GERAIS DE PROJETO — APRECIÇÃO E REDUÇÃO DE RISCOS - Tipo A
- NBR 14153 - SEGURANÇA DE MÁQUINAS — PARTES DE SISTEMAS DE COMANDO RELACIONADOS À SEGURANÇA — PRINCÍPIOS GERAIS PARA PROJETO - Tipo B1
- NBR 14154 - SEGURANÇA DE MÁQUINAS - PREVENÇÃO DE PARTIDA INESPERADA - Tipo B1
- NBR 13759 - SEGURANÇA DE MÁQUINAS - EQUIPAMENTOS DE PARADA DE EMERGÊNCIA - ASPECTOS FUNCIONAIS - PRINCÍPIOS PARA PROJETO - Tipo B2
- NBR NM 273 - SEGURANÇA DE MÁQUINAS - DISPOSITIVOS DE INTERTRAVAMENTO ASSOCIADOS A PROTEÇÕES - PRINCÍPIOS PARA PROJETO E SELEÇÃO - Tipo B2
- NBR NM 272 - SEGURANÇA DE MÁQUINAS - PROTEÇÕES - REQUISITOS

## GERAIS PARA O PROJETO E CONSTRUÇÃO DE PROTEÇÕES FIXAS E MÓVEIS - Tipo B2

As informações necessárias para apreciação de risco já foram expostas nos capítulos anteriores deste trabalho, sendo assim, o próximo passo é a apreciação de riscos.

### 3.3.8.1 Apreciação de riscos

A [NBR 12100, 2013] descreve o método para redução de risco durante o projeto. A primeira etapa é a apreciação de riscos com base nos limites e uso devido do equipamento. O tribômetro não requer uma instalação especial, o único requisito é uma bancada firme que suporte seus 25 kg, que exigem sua movimentação por no mínimo duas pessoas. Gera baixa vibração mecânica, não sendo necessário uma bancada separada de outros instrumentos. Seu consumo é baixo, em torno de 40 W, não sendo necessário instalações especiais, e o uso de aterramento atendendo a norma [NBR 5410, 2008]. A lubrificação das partes móveis é realizada na montagem, dentro da empresa fabricante, e dura a vida útil do equipamento. Para operação do tribômetro é necessário a leitura do manual de instruções e um rápido treinamento por um usuário experiente.

No uso normal do tribômetro, o usuário fará duas operações que o expõem a perigo. A primeira é a troca da amostra por meio do sistema de garfo, Figura 3.14. Caso haja uma partida da máquina, as mãos do usuário podem sofrer aperto contra alguma parte fixa da máquina. O segundo caso é no momento da regulagem do curso do tribômetro, Figura 3.18, onde há uma exposição ao perigo dos dedos serem prensados entre a correia e a polia, novamente no caso de uma partida acidental. Em ambos os casos, temos como fonte de potência para o movimento do carro e polia um motor de passo com menos de 15 W. Claro que esse dado precisa ser cruzado com a redução do movimento, que gera a força de esmagamento, porém no movimento do carro porta-amostra temos uma força que varia com a posição do sistema da biela. O atenuante é que a força sobe vertiginosamente junto com a queda, também vertiginosa, do curso. Assim, só temos força em pequenos deslocamentos, tornando um dano grave impossível. Já o esmagamento entre a correia e polia são sujeitos a um baixo torque. Nominalmente o motor de passo possui um torque de 0,52 Nm, facilmente vencido pela força de uma mão.

Considerando os perigos razoavelmente previsíveis, situações perigosas e eventos perigosos, identifica-se dois perigos no tribômetro durante todo seu ciclo de vida e cada

Probabilidade de Ocorrência do Dano	0,033
Frequência de Exposição ao Perigo/Risco	4
Gravidade da Possível Lesão	0,5
Número de Pessoas Expostas	1

Tabela 3.2 – Estimativa de risco na troca da amostra, HRN de 0,066.

Probabilidade de Ocorrência do Dano	0,033
Frequência de Exposição ao Perigo/Risco	2,5
Gravidade da Possível Lesão	0,5
Número de Pessoas Expostas	1

Tabela 3.3 – Estimativa de risco na regulagem do curso, HRN de 0,04125.

um deles precisa ser avaliado separadamente em relação à estimativa de risco. Usando o método HRN [Steel, 1990], temos uma probabilidade de ocorrência do dano nos dois perigos diferentes. Nas Tabelas 3.2 e 3.3 são mostrados os valores da análise de risco dos dois perigos, e como resultado final tem-se dois valores de HRN que são aceitáveis e a segurança foi atingida.

### 3.3.9 Sistema elétrico/eletrônico

Foi desenvolvido todo o sistema eletrônico do tribômetro. Nos próximos tópicos será detalhado o funcionamento de cada parte e por fim um diagrama esquemático do todo é apresentado.

#### 3.3.9.1 Parte do sistema de comando relacionado à segurança

No anexo B da norma [NBR 14153, 2013], é apresentado um método simplificado para seleção da categoria da parte de segurança que será implementada no tribômetro. A referida categoria é o desempenho em relação à ocorrência de defeitos da parte do sistema de comando relacionado à segurança, sendo esta dividida em: B, 1, 2, 3, 4 e 5 [NBR 14153, 2013]. Seguindo o método simplificado, o primeiro parâmetro que se deve escolher é a severidade do ferimento, dividido em S1 e S2, ferimentos leves e sérios, respectivamente. No nosso caso é S1, leve ou normalmente reversível. O próximo parâmetro é a frequência e/ou tempo de exposição ao perigo, podendo ser F1 para exposição de tempos em tempos e F2 frequentemente ou continuamente. Para esta máquina foi selecionado F1. Por

fim, é selecionado o parâmetro da possibilidade de evitar o perigo, P1 para possível sob condições específicas e P2 quase nunca possível, no tribômetro é P2. Com estes parâmetros selecionados é atingida à categoria B ou preferencialmente categoria 1. Foi selecionada a categoria 1, sendo assim, a parte do sistema de comando relacionado à segurança precisa atender no mínimo aos seguintes requisitos: resistir ao ambiente e uso, utilizar princípios comprovados e componentes de segurança, porém a ocorrência de um defeito pode causar a perda da função de segurança. Abaixo segue a lista dos principais requisitos que devem ser atendidos em termos de segurança, exceto ao relacionado à carenagem, que já foi abordado:

- Aterramento no sistema elétrico (gaveta) e carcaça [NR12, 2015];
- Impossibilidade de um vazamento de fluido da amostra atingir o sistema elétrico [NR12, 2015] e [EN 602041, 2006];
- Acesso ao sistema elétrico impedido por parafusos e aviso de perigo [NBR NM 272, 2002] e [NR12, 2015];
- Identificação dos circuitos [NR12, 2015] e [EN 602041, 2006];
- Proteção contra sobrecorrente [NR12, 2015] e [EN 602041, 2006], implementado por meio de fusível;
- Não pode entrar em funcionamento pela simples energização [NR12, 2015] [NBR 12100, 2013], requisito atendido pelo programa da placa de controle;
- Operar em tensões de até 25 VCA ou 60 VCC, sendo a tensão da rede separada da baixa tensão por pelo menos um transformador de isolamento de segurança, e cabos de alta e baixa tensão devem estar separados [NR12, 2015] e [EN 602041, 2006];
- Motores elétricos acionados por duas contatoras em série e monitoradas [NR12, 2015];
- Não pode ser burlado [NR12, 2015] [NBR 12100, 2013], principalmente atendido pelo uso de uma chave de segurança na tampa de proteção;
- Não gerar perturbações eletromagnéticas que interfiram no seu funcionamento, e ser capaz de suportar perturbações eletromagnéticas do ambiente de trabalho [EN 602041, 2006], atendido pelo uso de fonte de corrente contínua de baixo nível de emissão eletromagnética, cabos blindados e carenagem aterrada;
- Manter o estado seguro mesmo com flutuações da tensão da rede superiores aos limites do projeto [NR12, 2015] [NBR 12100, 2013], requisito alcançado pelo uso de fonte

de corrente contínua que atende este requisito;

- Operar somente com a tampa fechada, e o seu fechamento, por si só, não dá início ao funcionamento [NR12, 2015];

- Diagrama esquemático do sistema de segurança visível [NR12, 2015];

- O dispositivo de parada de emergência deve: estar acima hierarquicamente de todos os comandos, ser monitorado pelo sistema de segurança, não pode prejudicar o sistema de segurança e ser de retenção [NR12, 2015] e [NBR 12100, 2013];

- O acionamento dos sensores da tampa e botões de emergência devem ter operação positiva de abertura [NR12, 2015] e [NBR NM 273, 2002];

- Iluminação interna [NBR 12100, 2013];

- Possuir selo de identificação e manual [NR12, 2015] e [NBR 12100, 2013];

- Botões de comando bem localizados, fáceis de acionar e identificados [NBR 12100, 2013];

- Do estado parado ao movimento de um mecanismo deve ser devido a passagem do estado lógico de 0 para 1, como exemplo, deve haver movimento quando energizado o mecanismo [NBR 12100, 2013];

- Interrupção ou variações na fonte de energia não podem levar a uma situação de perigo [NBR 12100, 2013], dentro de parâmetro expostos pela norma [EN 602041, 2006];

- *Hardware* deve ter seu desempenho de segurança assegurado por meio: do seu esquemático/projeto, componentes apropriados e medidas técnicas auxiliares [NBR 12100, 2013];

- O *firmware* não pode ser regravável pelo usuário [NBR 12100, 2013];

- Usar a redundância para melhorar a confiabilidade com tecnologias que falhem em circunstâncias diferentes evitando uma falha em sistemas redundantes [EN 602041, 2006], e monitorar sua falha, caso não seja possível, deve ser visível a falha em uma inspeção [NBR 12100, 2013];

- Cores de botões de acordo com a norma [EN 602041, 2006];

- Função parada deve colocar a máquina em condição segura tão rápido quanto necessário, e estar acima hierarquicamente sobre outros tipos de paradas [NBR 14153, 2013];

- Após uma parada, é exigido o acionamento do rearme manual, porém só pode ser executado se a condição de segurança for atingida e não pode iniciar o movimento por

si só, sendo necessário o acionamento de um comando de partida separado [NBR 14153, 2013];

- Operar corretamente em temperaturas de 5 °C até 40 °C [EN 602041, 2006];

Como medida adicional, levando em consideração a categoria pretendida, foi adicionado mais um requisito:

- O sistema deve realizar monitoramento como objetivo de garantir que funções de segurança não sejam realizadas, caso um componente venha a falhar, devendo interromper a atividade perigosa e impedir o reinício depois da primeira parada após a falha, ou soar um alarme [NBR 12100, 2013].

### **3.3.9.2 Placa da Célula de Carga**

Um dos principais circuitos do tribômetro é a placa da célula de carga, que nada mais é que dois circuitos, uma ponte de Wheatstone que lê as variações de resistência dos extensômetros da célula de carga, e o circuito que transforma essas medidas analógicas em digitais, enviando para placa de comando como um dado bruto de 24 bits.

### **3.3.9.3 *Software* de aquisição e controle**

O primeiro modelo da placa de comando não contava com conexão USB, e os dados eram diretamente gravados em um cartão SD. Esta funcionalidade evitava a necessidade de ter-se um computador conectado à máquina.

Com o decorrer do tempo viu-se a necessidade de um *software* de controle e aquisição, sem a necessidade de transferir para o computador através de um cartão SD, além disso, poderia-se colocar o pós processamento diretamente no software, evitando de sobrecarregar o microcontrolador. Até a presente data o software não foi totalmente concluído.

### **3.3.9.4 Diagrama do sistema elétrico/eletrônico**

Na figura 3.32 pode ser visto como ficou o sistema elétrico/eletrônico.

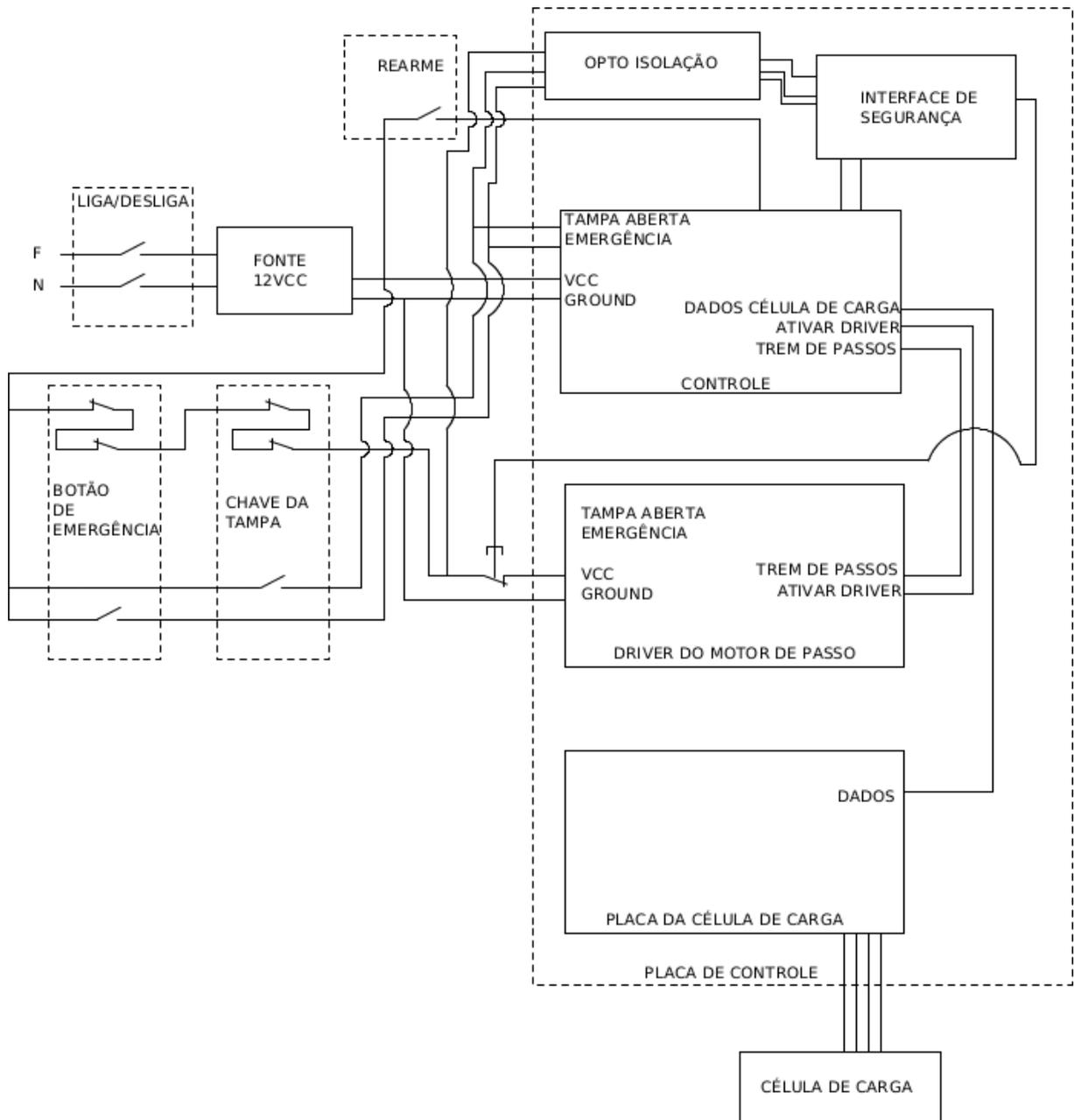


Figura 3.32 – Diagrama esquemático do sistema elétrico/eletrônico.

Quatro sistemas que fazem parte da comando, que dividem a mesma placa de circuito impresso, porém suas ligações são limitadas ao mostrado na Figura 3.32.

O primeiro é a interface de segurança, que realiza o monitoramento do botão de emergência e da chave de segurança da tampa. Durante todo o processo verifica a comutação entre os contatos normalmente fechados e normalmente abertos de cada chave por meio da detecção do corte da chave de alimentação do *driver*. Caso ocorra uma falha, mandará um sinal para o controle avisando e cortará a alimentação do *driver* do motor

de passo. Também é responsável por realizar, após um certo número de inicializações da máquina, o teste da chave da tampa e emergência. Esse teste é realizado com o auxílio do usuário que fará o acionamento de cada chave em resposta às ordens dadas pela máquina, a interface avisa o controle quando esse teste deve ser realizado. Para alimentar o *driver* de acionamento do motor de passo é necessário: que os dois contatos normalmente fechados de ruptura positiva do botão de emergência e a chave da tampa estejam fechados, trem de pulsos e *enable* do controle estejam acionados e contato normalmente aberto da contatora da interface de segurança esteja fechado, dando ao sistema redundância e confiabilidade acima da categoria pretendida.

A placa da célula de carga e software já foram abordados, faltando só a conexão com o computador que é realizada pelo controle através de uma porta USB.

## 4 CALIBRAÇÃO E DADOS

### 4.1 Calibração

A norma [ASTM G133-05, 2016] abrange os procedimentos básicos para calibração de tribômetros lineares. Nela são citados três sistemas que necessitam de calibração: o sistema que imprime a força normal, a frequência do sistema de movimentação da amostra e o sensor de força. No sistema que imprime a força normal é requerida a checagem periódica e que os erros, na condição estática, não ultrapassem 0,5 N para uma força de 25 N (2%), porém no tribômetro desenvolvido foi usado um sistema com uma massa que gera a força normal. Estas massas foram medidas com uma balança, com precisão de  $\pm 0,1$  g, que equivale a uma variação de força normal de  $\pm 0,0009798$  N, considerando a aceleração da gravidade de  $9,798 \text{ m/s}^2$  (no Instituto de Física da UFRGS), muito preciso e sem variações ao longo do tempo, característica deste tipo de solução [Pradeep L. Menezes, 2013]. Um detalhe é que a localização dos pesos (Figura 4.1) não fica concêntrica com a caneta, deve-se dividir por 1,6 a força normal gerada pelos pesos para determinar a força normal na caneta,

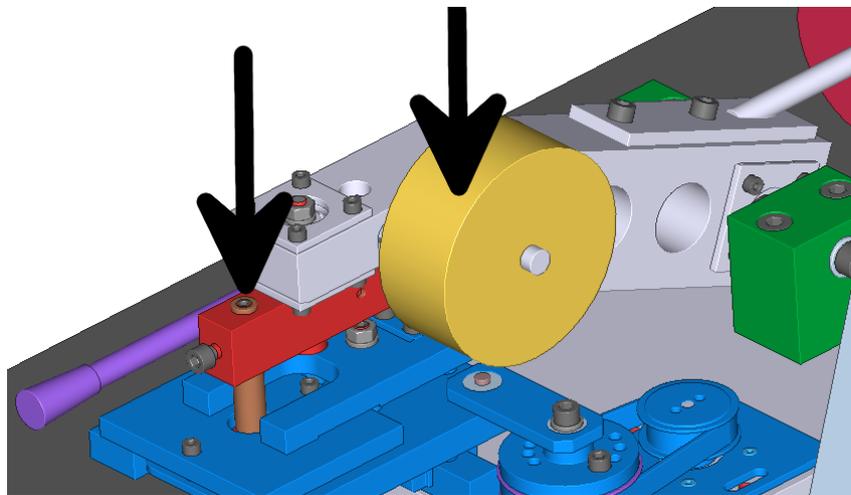


Figura 4.1 – Distância entre o centro das massas, mancal e caneta.

Na frequência de oscilação da amostra, é tomada como referência à oscilação do cristal do *chip* de comando, que possui variação de 0,003% por grau Celsius. Para conferir o curso que a máquina está executando, é usado um relógio comparador fixado paralelamente ao movimento do carro, e a precisão da regulagem do curso devido ao erro da posição dos parafusos está abaixo de  $\pm 0,05$  mm, porém depois de fixado os parafusos

a variação entre movimentos não foi possível de ser verificada com um relógio comparador centesimal. O sistema que mede a força de atrito foi calibrado seguindo a norma [NBR 8197, 2012], que aborda os procedimentos práticos para executar as medições. O dispositivo da Figura 4.2 foi construído para calibração.

Nele é possível transferir a força dos pesos da vertical para a horizontal através de roldanas e um cabo.

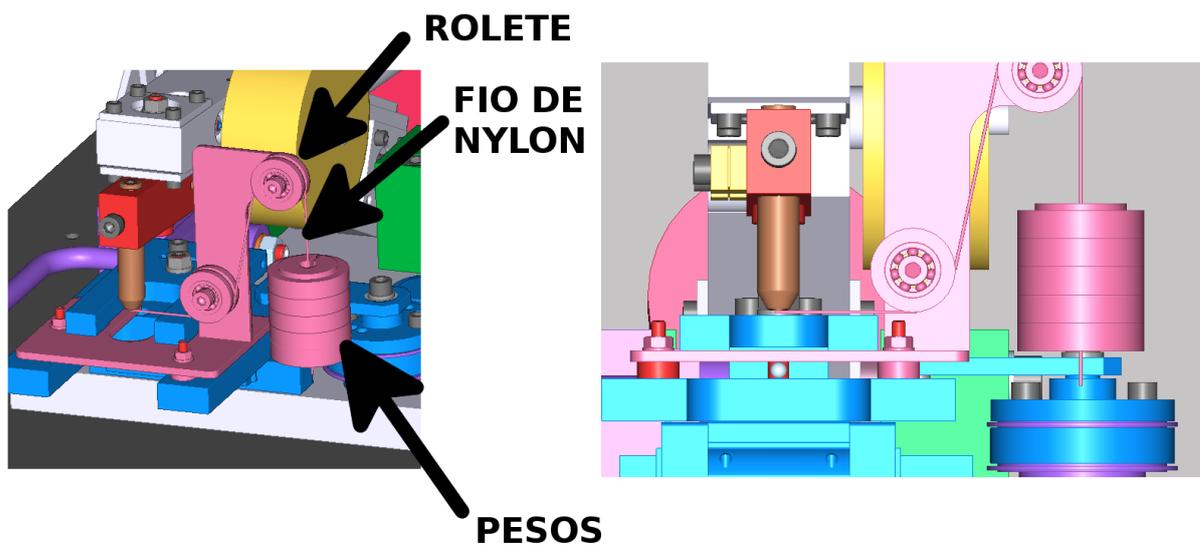


Figura 4.2 – Dispositivo para calibração do sensor de força.

Foram executadas 10 medidas crescentes para cada um dos 10 pesos diferentes distribuídos dentro da faixa de interesse, que é de 70 gf até 700 gf, a norma [NBR 8197, 2012] exige no mínimo 6 pontos com 3 séries cada. Após compiladas são mostradas nos gráficos (Figura 4.3) do LSB/g (*Least Significant Bit/gram* ou bit menos significativo/grama) versus a faixa de calibração, com a força sendo aplicada na direção esquerda e direita em relação à vista frontal da máquina.

Para obter os valores de força que darão origem ao coeficiente de atrito, é necessário dividir o valor digital fornecido pelo tribômetro pelo LSB/g que dividido pela força normal gerada pelo peso morto resulta no coeficiente de atrito. É possível usar duas abordagens diferentes no LSB/g, a primeira é usar um valor médio do LSB/g e ter uma incerteza maior na medição, ou fazer uma linearização da célula de carga por meio do cruzamento dos dados dos gráficos (Figura 4.3) com a leitura da célula. Esta linearização foi feita dividindo o domínio dos gráficos do LSB/g versus a faixa de calibração em segmentos

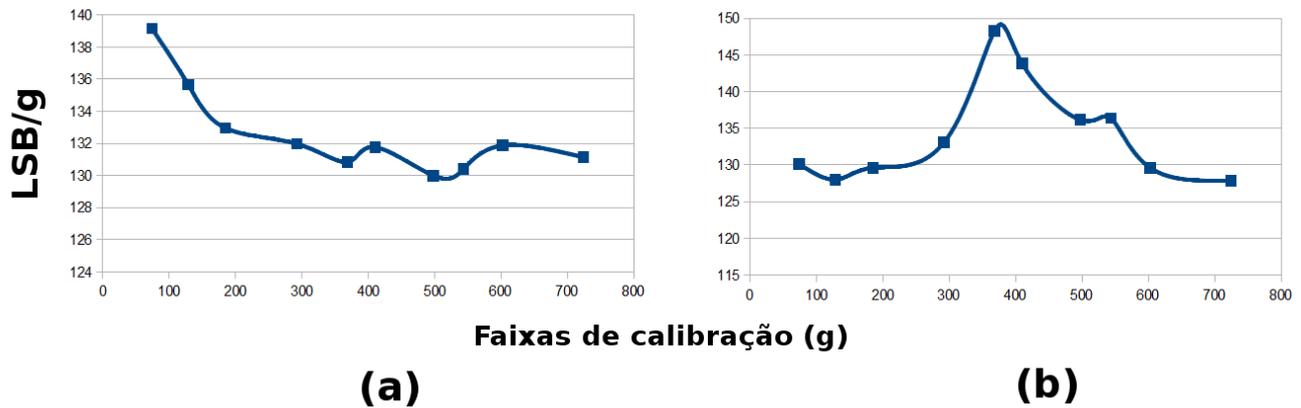


Figura 4.3 – Gráfico (a) força sendo aplicada para esquerda e o (b) a força aplicada para o lado contrário.

de reta, que serão usados para calcular a força na célula de carga em cada faixa de força. Como exemplo, se for obtido uma leitura digital de 9100, com força da direita para esquerda, deve-se dividir pela primeira faixa do Gráfico 4.3 que dará 130 LSB/g resultando em 70 gf.

## 4.2 Dados

Os dados brutos gerados pelo tribômetro possuem dois valores por linha, o primeiro é o tempo, em segundos, que foi realizada a medida, e o segundo é o valor digital fornecido pela placa da célula de carga. Abaixo, exemplo de algumas linhas de um arquivo gerado pelo tribômetro.

```
0,4292276474
0.1,4292276556
0.2,4292276540
0.3,4292276530
```

Para obtenção do coeficiente de atrito é necessário primeiro descartar erros de leituras decorrentes de falhas, geralmente de comunicação, que ficam abaixo de 0,003% dos dados lidos. Esse descarte é feito desconsiderando qualquer valor acima de 4300000000 que é próximo do valor máximo em decimal da faixa de leitura do conversor analógico digital, comportamento esperado para o circuito desenvolvido.

O gráfico com os valores obtidos depois do descarte é apresentado na Figura 4.4. É composto por valores positivos decorrentes da transformação direta de valores binários

em decimais, sendo que a faixa de variação representa o movimento de troca de direções do sistema de oscilação do tribômetro.

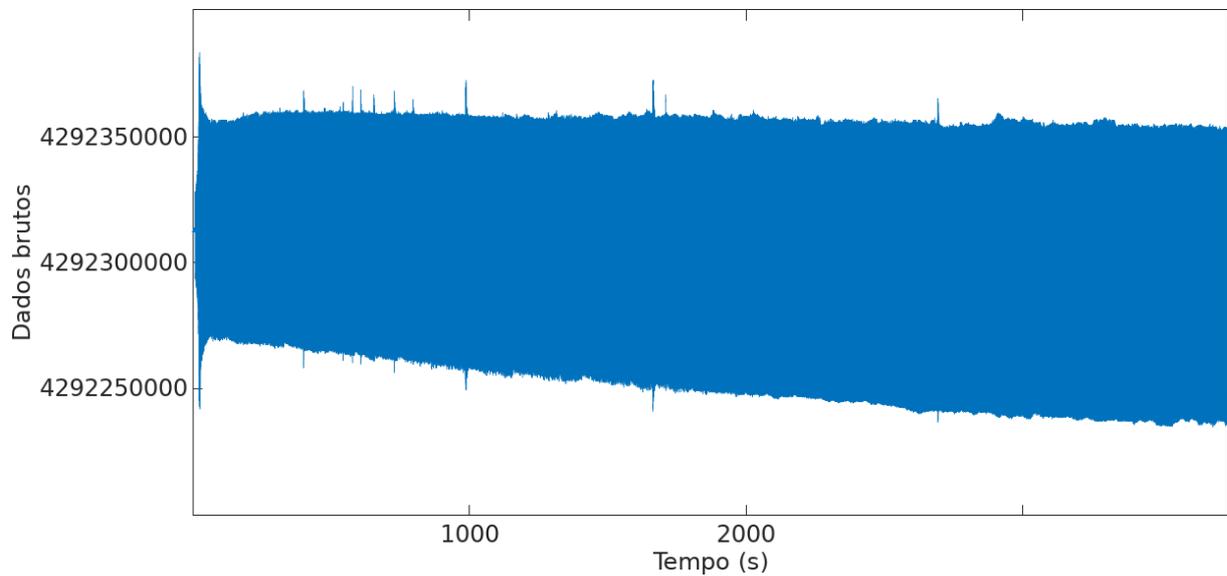


Figura 4.4 – Gráfico dos dados brutos.

O próximo passo é centrar os dados no eixo das abscissas, gerando um gráfico que possui valores positivos e negativos em decorrência das duas direções de leituras da célula de carga (Figura 4.5), tornando necessário aplicar o módulo em todos os valores (Figura 4.6). Aproveitando o mesmo laço do programa, foi feita a divisão pela força normal para gerar o coeficiente de atrito (Figura 4.7).

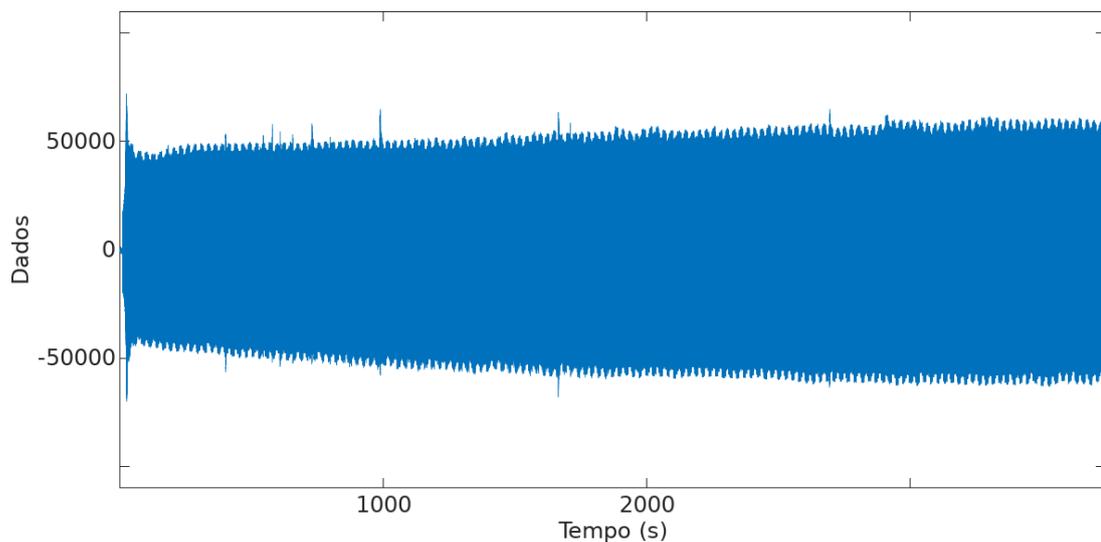


Figura 4.5 – Gráfico com os dados centrados no eixo das abscissas.

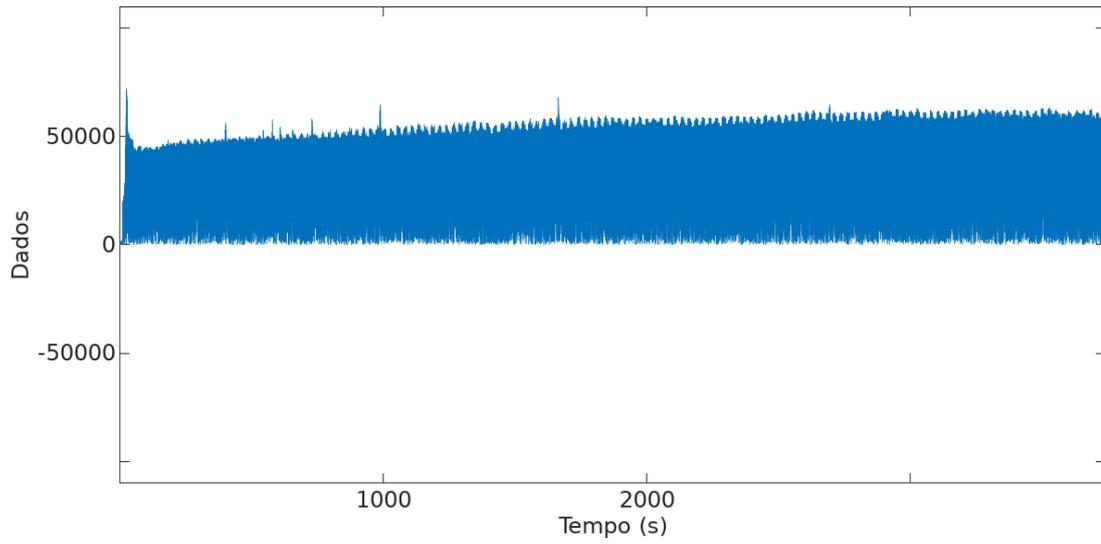


Figura 4.6 – Módulo do gráfico da Figura 4.5.

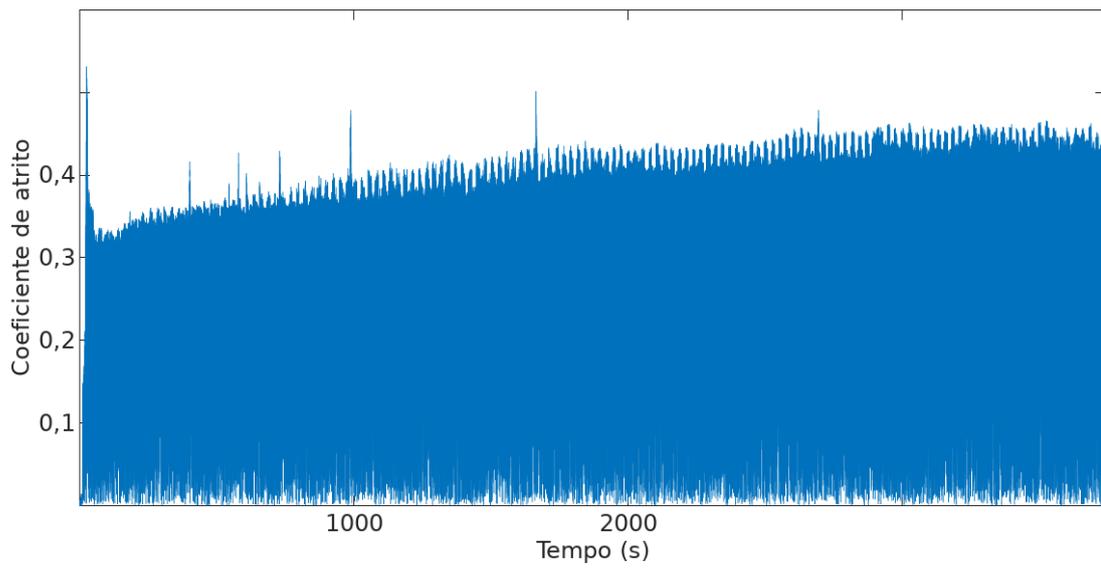


Figura 4.7 – Gráfico do coeficiente de atrito.

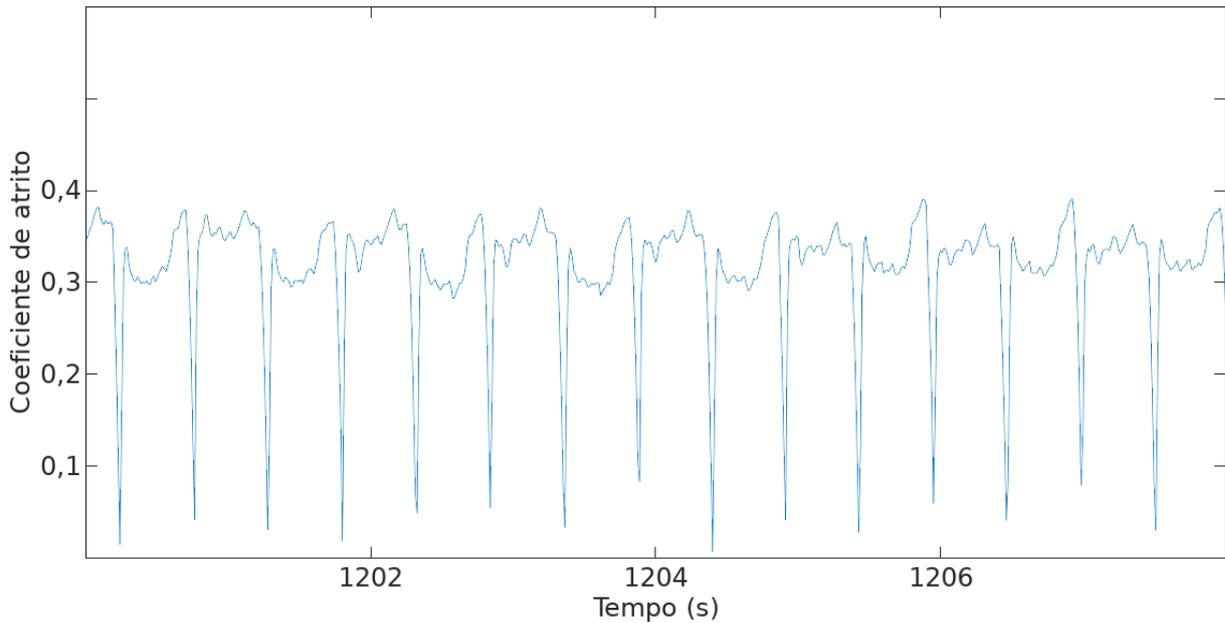


Figura 4.8 – Parte do gráfico da Figura 4.7.

Analisando um pequeno trecho do gráfico do coeficiente de atrito (Figura 4.8), que representa o percurso de uma extremidade a outra da trilha, consegue-se enxergar a variação do coeficiente de atrito dentro de cada ciclo, comportamento coerente com dados encontrados no livro de Pradeep [Pradeep L. Menezes, 2013] e no trabalho de Radi et al. [Radi, 2007]. Nestes ciclos pode-se observar 2 comportamentos diferentes. O tipo 1 (Figura 4.9), retirado do gráfico da Figura 4.7, é caracterizado por possuir um comportamento bem condizente com o esperado, onde no começo e fim do movimento é observado um incremento no coeficiente de atrito decorrente do atrito estático, enquanto que entre esses dois extremos tem-se um atrito dinâmico em velocidade variável. No tipo 2 (Figura 4.10) tem-se um dos extremos, ou ambos, com coeficiente de atrito próximo ao atrito dinâmico, isso se deve à formação de *debris* (detritos) em um dos extremos que age com um terceiro corpo, alterando o comportamento do par em ensaio.

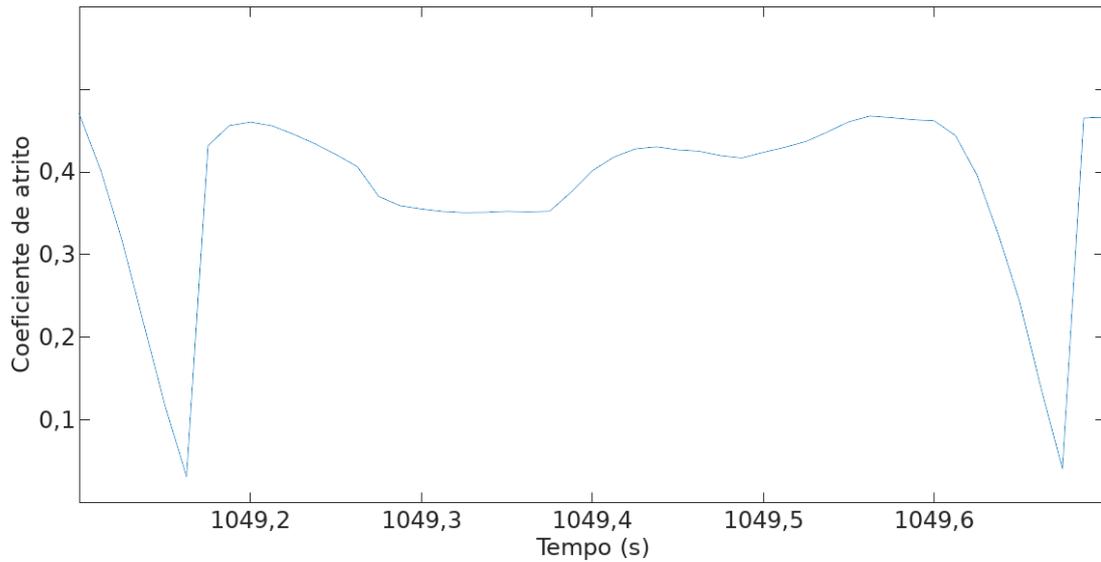


Figura 4.9 – Gráfico do comportamento tipo 1, retirado do gráfico da Figura 4.7.

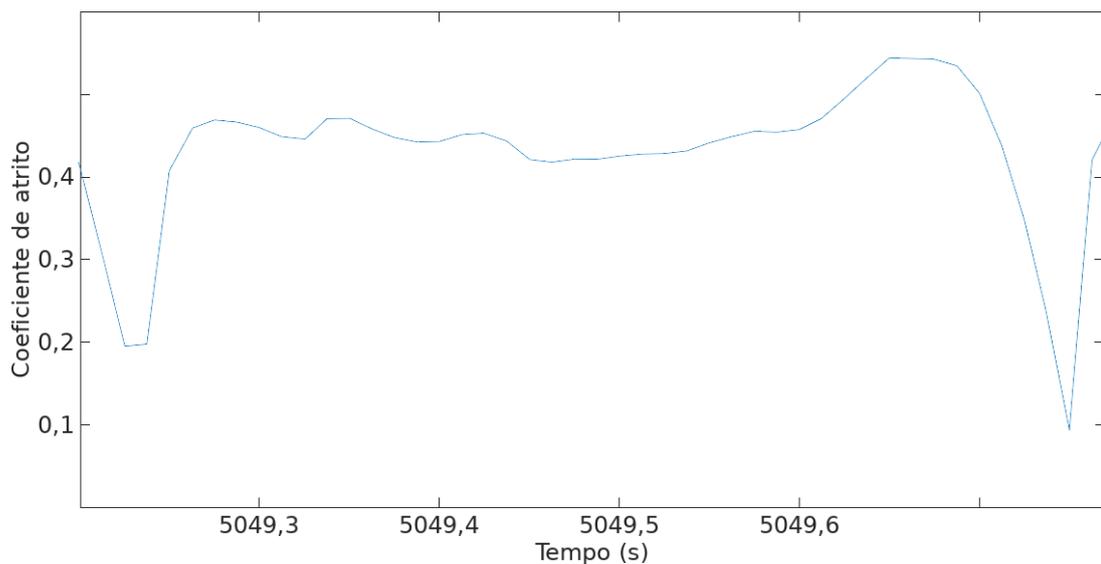


Figura 4.10 – Gráfico do comportamento tipo 2, retirado do gráfico da Figura 4.7.

Como resultado final do ensaio pode-se escolher analisar o atrito dinâmico ou estático. Para isso temos três algoritmos, um identifica o primeiro pico de atrito estático, depois o segundo identifica a região de atrito dinâmico e calcula uma média, por fim, o terceiro algoritmo encontra o segundo pico de atrito estático. No gráfico da Figura 4.11, observam-se os algoritmos identificando os pontos de interesse, na linha amarela o primeiro atrito estático, na linha roxa o atrito dinâmico e em vermelho o segundo estático.

Juntando o gráfico dos dois atritos estáticos em uma curva é obtido o gráfico da

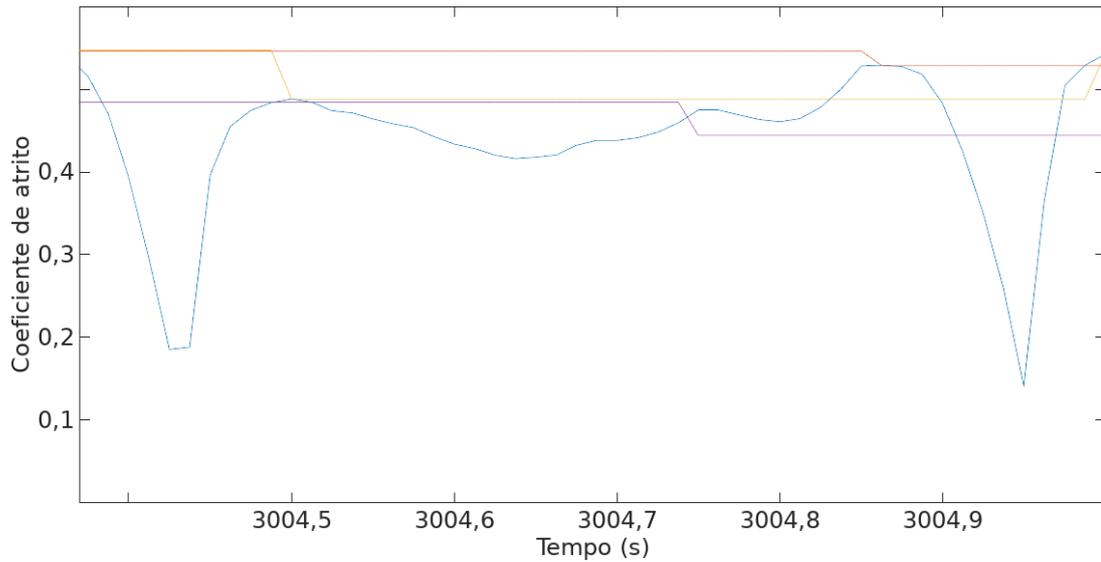


Figura 4.11 – Gráfico da identificação das diferentes regiões em um meio ciclo do ensaio.

figura 4.12 que mostra, em verde, o atrito dinâmico e, em azul, o atrito estático.

Neste ponto é feito o cálculo do desvio padrão e média do atrito dinâmico ou estático, pode-se desconsiderar ou não a primeira parte do gráfico onde ocorre o assentamento da esfera na amostra. Para melhorar a clareza na visualização dos gráfico é feito uma suavização dos dados por meio do cálculo médio do atrito para cada 6 ciclos (valor arbitrário que pode ser alterado pelo usuário). Na Figura 4.13 são mostrados os valores do atrito estático e dinâmico após a suavização.

O código desenvolvido para realizar todo o processamento apresentado está disponível no ANEXO I.

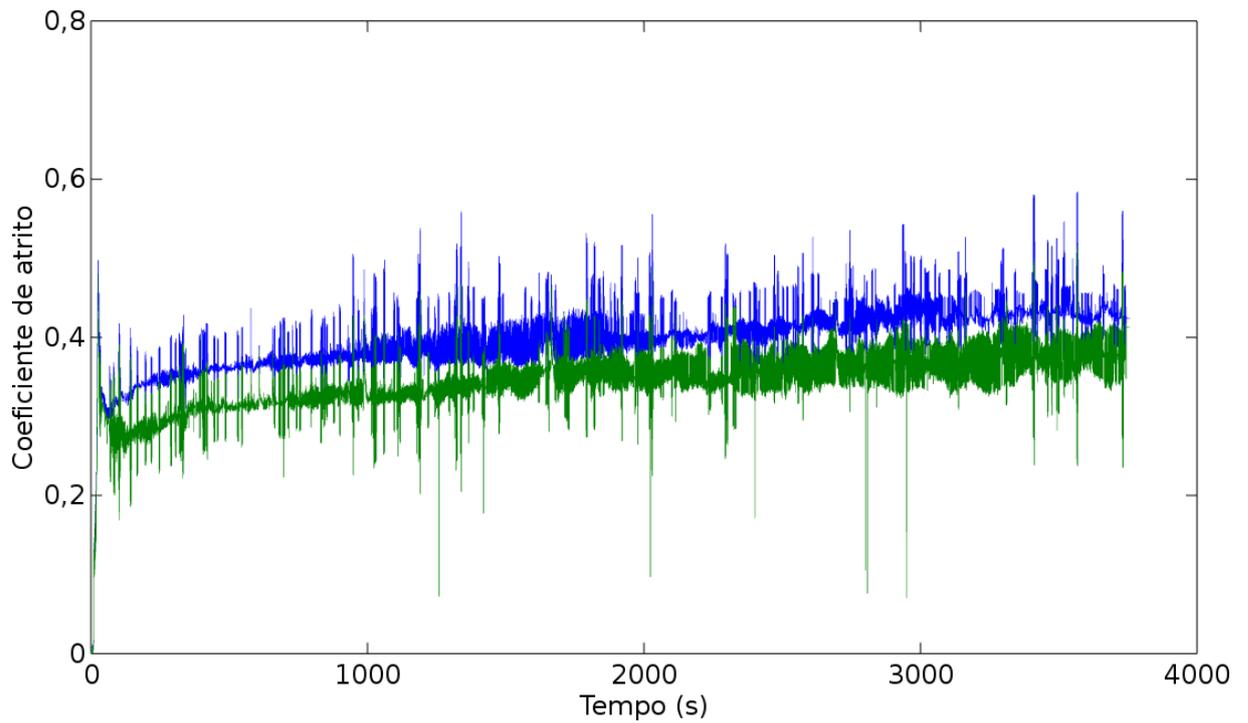


Figura 4.12 – Gráfico do atrito dinâmico (linha verde) e estático (linha azul).

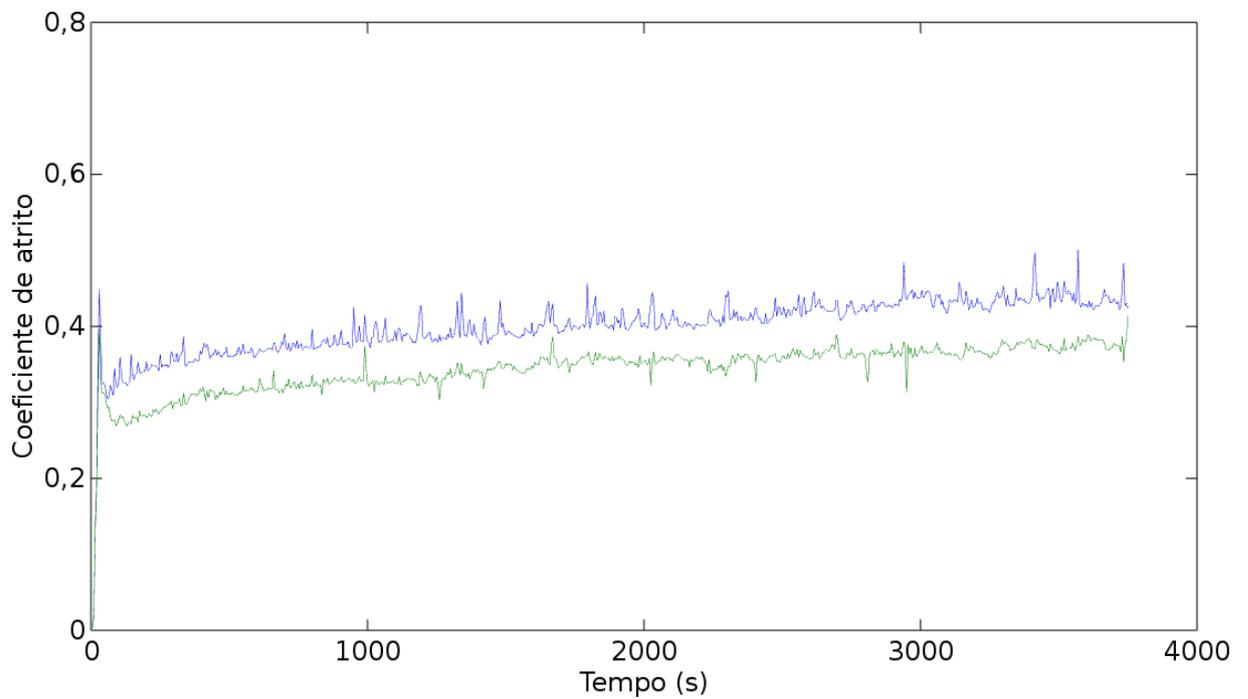


Figura 4.13 – Gráfico do atrito dinâmico (linha azul) e estático (linha verde) suavizados.

## 5 VALIDAÇÃO

Para verificar a repetitividade e reprodutibilidade do microtribômetro, a norma [ASTM G133-05, 2016] indica dois procedimentos, um a seco e outro com lubrificante, porém esse teste não é realizável no tribômetro desenvolvido no presente trabalho por dois motivos. Primeiro, os parâmetros de teste deveriam ser: força normal de 25 N, comprimento da trilha de 10 mm e frequência do movimento de 5 Hz. Segundo, o material de teste deve ser nitreto de silício, tanto a esfera quanto a amostra, fabricado por uma empresa específica localizada nos EUA. Exceto pela frequência, teríamos que realizar alterações no equipamento para atender a este procedimento da norma, e em relação ao material do teste não tivemos recursos, nem tempo suficientes para importação de tal amostra.

Dessa forma, optou-se por realizar uma validação por meio da comparação dos resultados obtidos com o microtribômetro desenvolvido e um microtribômetro calibrado. Este tipo de validação indireta foi usada por Neis [Neis, 2008] na calibração de um tribômetro para ensaio de materiais de fricção veiculares, mostrando a viabilidade dessa abordagem.

### 5.1 Materiais e Métodos

Após a calibração do equipamento, respeitando os requisitos da norma [ASTM G133-05, 2016], foram feitos três ensaios comparativos com outro tribômetro. Este método de comparação indireta foi usado na construção de um tribômetro para testes veiculares por Neis [Neis, 2008]. No final foi feito um ensaio em uma junta soldada. As amostras de todos os testes foram retiradas do trabalho de Fich [Fich, 2016] que analisou a tribocorrosão dos aços Hardox 500<sup>®</sup>, SAE 1010 em juntas similares e dissimilares com a utilização de um microtribômetro.

#### 5.1.1 Materiais utilizados

No trabalho de Fich [Fich, 2016] foram testadas 7 amostras, das quais 4 foram ensaiadas neste trabalho. Abaixo a descrição juntamente com o processo de preparação realizado:

- Hardox 500 com revestimento;

- Hardox 500 sem revestimento;
- SAE 1010;

- Junta soldada de Hardox 500 com Hardox 500, e análise feita na ZAC de menor dureza. Foram soldadas por arco submerso chapas de Hardox 500 com 200 mm de comprimento, 100 mm de largura e 6 mm de espessura. Os parâmetros de soldagem foram: arame AWS EL-12 de 2,38 mm de diâmetro, velocidade de soldagem de 10,83 mm/s, corrente contínua de 380 A, tensão 22 V e as chapas foram encostadas lateralmente na dimensão de 200 mm.

Todas as amostras foram preparadas para o ensaio de tribocorrosão por meio do corte e lixamento (sequência de lixas com granulometria de 100, 220, 320, 400, 600 e 1200). Também foram atacadas com nital 10% (solução de ácido nítrico em álcool) durante seis segundos para análise da macrografia. Posteriormente foram ensaiadas no Laboratório de Pesquisa em Corrosão da Universidade Federal do Rio Grande do Sul utilizando um tribômetro UMT (*Universal Micro Tribometer* da marca CETR - *Test Equipment Tribology*). Os parâmetros do ensaio foram:

- Esfera de Alumina de diâmetro 4,762 mm;
- O meio corrosivo foi NaCl 0,05 mol;
- Área de exposição ao fluido de 177 mm<sup>2</sup>;
- As amostras ficaram 30 minutos em solução corrosiva, 3 horas em ensaio e mais 1 hora em meio corrosivo;
- O coeficiente de atrito foi medido durante as 3 horas do ensaio e o potencial de circuito aberto foi medido durante todo o tempo que a amostra sofreu corrosão (4 horas e 30 minutos);
- Força normal de 2 N;
- Comprimento da trilha de 2 mm;
- Frequência de oscilação de 1 Hz.

Para os primeiros testes, as amostras mais significativas são as que não passaram pelo processo de soldagem, isso porque essas amostras possuem grandes diferenças nas suas microestruturas, decorrentes das curvas de aquecimento e resfriamento ao qual foram submetidas. Essas diferenças seriam facilmente verificadas pelo tribômetro quando fosse variada a localização da análise. Sendo assim, as melhores amostras para validação são: Hardox 500 sem revestimento e SAE 1010. A amostra de Hardox 500 com revestimento

foi testada, mas com ressalvas por não ser possível preparar a superfície da amostra nas mesmas condições do teste feito por Fich. No ensaio de junta soldada foi escolhido a solda de similares Hardox 500.

### 5.1.2 Procedimento experimental

A preparação das amostras para o teste no novo tribômetro foi realizada por meio de um novo lixamento para retirada do óxido, deixando as duas amostras nas mesmas condições do teste do trabalho do Fich [Fich, 2016], exceto a amostra de Hardox 500 com revestimento que não pôde ser lixada. Como foi demonstrado por Sedlacek [Sedlacek, 2008], o acabamento superficial tem grande influência sobre o ensaio. O tribômetro foi configurado com as mesmas configurações do trabalho citado, com exceção da medição do potencial de circuito aberto que ainda não foi implementado no microtribômetro.

No ensaio de junta soldada foram alteradas as configurações do tribômetro para uma estabilização do resultado mais rápida. Seguem os parâmetros:

- Esfera de Alumina de diâmetro 4,762 mm;
- Sem meio úmido (a seco);
- Tempo do ensaio de 30 minutos;
- Força normal de 10 N (fator que acelerou o ensaio);
- Comprimento da trilha de 2 mm;
- Frequência de oscilação de 1 Hz.

### 5.1.3 Resultados

Nas Figuras abaixo (5.1, 5.2 e 5.3), pode ser visto o gráfico do tempo versus coeficiente de atrito dos primeiros materiais ensaiados. Todos os gráficos apresentam um comportamento similar, começando com um coeficiente de atrito menor que depois sobe e estabiliza [Cassar, 2010]. É observado duas partes nos gráficos gerados por tribômetros: primeiro uma fase de assentamento onde ocorrem variações abruptas do coeficiente de atrito, seguido por uma fase com o coeficiente de atrito mais estável [Pradeep L. Menezes, 2013]. Além disso, no início do ensaio, tem-se a camada de óxido formada no tempo em que a amostra ficou exposta ao ambiente antes do começo do ensaio, que lubrifica o deslizamento. Com o decorrer do teste esta camada é rompida aumentando o coeficiente de atrito. No Hardox 500 com revestimento, tem-se a segunda parte do gráfico com um

patamar que em torno de 800s vai para um terceiro patamar mais baixo, provavelmente neste ponto foi rompido o revestimento que neste caso é mais rugoso, e no fim estabilizou em torno de 0,5. Por outro lado, nas amostras de Hardox sem revestimento o coeficiente de atrito ficou variando em torno de 0,4 e terminou ficando com 0,42 na média. O SAE 1010 estabilizou em torno de 0,38. Comparando com os resultados encontrados pelo Fich, o Hardox 500 com revestimento e sem revestimento ficaram muito próximos, com diferenças inferiores a 0,02 no coeficiente de atrito. No caso do SAE 1010 tivemos diferenças na ordem de 0,01 no coeficiente de atrito. Segue o coeficiente de atrito médio encontrado nos ensaios realizados:

- Hardox 500 com revestimento coeficiente de atrito médio 0,48.
- Hardox 500 sem revestimento coeficiente de atrito médio 0,42;
- SAE 1010 coeficiente de atrito médio 0,40;

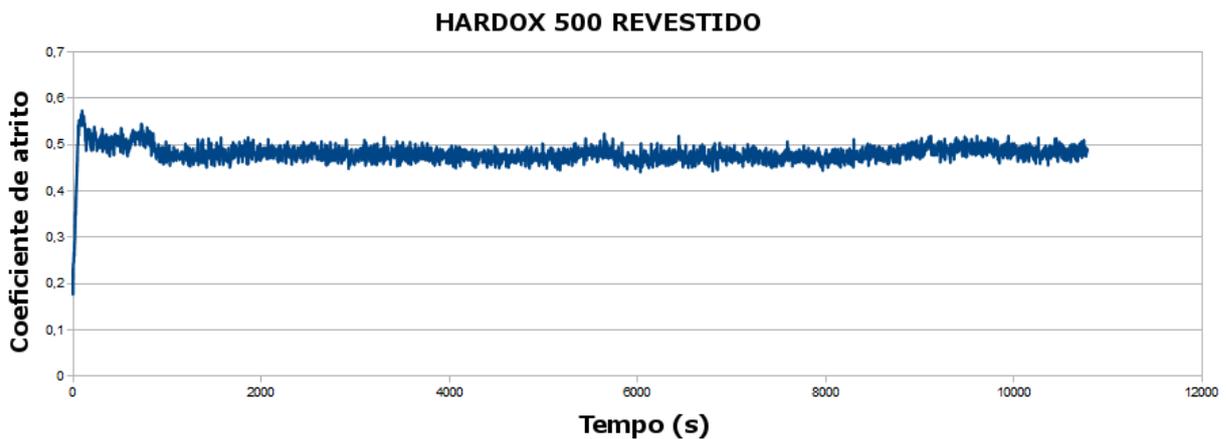


Figura 5.1 – Gráfico coeficiente de atrito no tempo do Hardox 500 revestido.

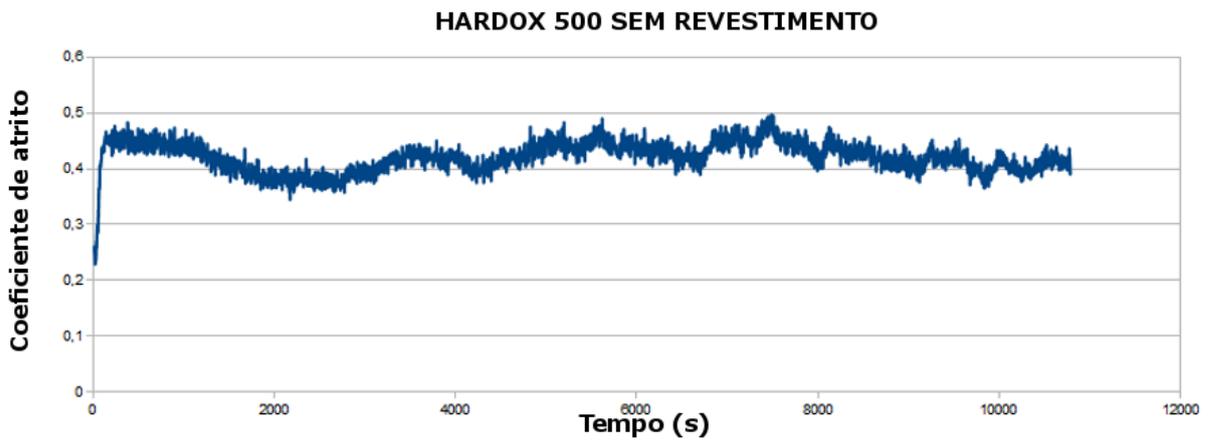


Figura 5.2 – Gráfico do coeficiente de atrito no tempo do Hardox 500.

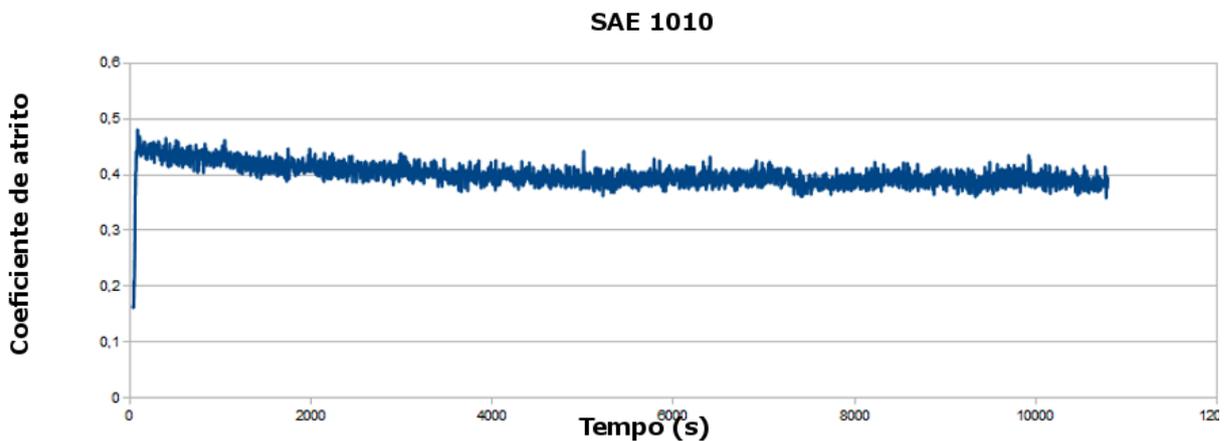


Figura 5.3 – Gráfico do coeficiente de atrito no tempo do SAE 1010.

No gráfico da Figura 5.4 pode ser visto os resultados do ensaio da junta soldada no metal de solda e ZAC. As diferenças tribológicas se revelam neste gráfico, mostrando claramente que os mecanismos de desgaste agem de forma diferente em cada ensaio, e o comportamento dos mecanismos varia com o tempo.

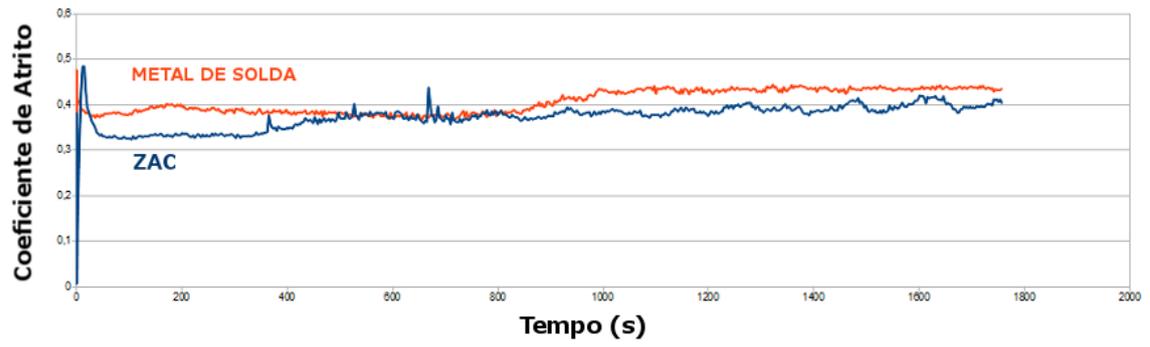


Figura 5.4 – Gráfico do atrito no tempo da junta soldada de Hardox com Hardox.

## 6 ANÁLISE DE UM JUNTA SOLDADA

O fechamento do desenvolvimento de um novo projeto sempre é dado por seu uso em condições nas quais o mesmo possa demonstrar suas capacidades. Como um dos enfoques de um teste tribológico é testar a resistência ao desgaste de um par de amostras, e microtribômetros são ótimas ferramentas para analisar pequenas regiões, foi selecionado uma junta soldada de Hardox 500, material especialmente desenvolvido para resistência ao desgaste, com o objetivo de revelar as diferenças tribológicas entre o material de base e de solda.

Segundo Bhushan [Bhushan, 2013] os principais fatores de um teste tribológico são: simulação, aceleração, preparação da amostra e medição do desgaste e coeficiente de atrito. A simulação e aceleração neste caso não são levadas em consideração, pois não se está realizando um ensaio tribológico para simular um caso real. Deve-se ter atenção a preparação da amostra e as medidas do desgaste, que dependem do usuário.

### 6.1 Materiais e Métodos

A junta soldada escolhida foi produzida com as seguintes características e retirada do trabalho de Mazzaferro [Mazzaferro, 2017]:

- Junta soldada de Hardox 500 pelo processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), com um passe em cada lado da junta, e velocidade de 5,5 m/min (primeiro passe) e 6,0 m/min (segundo passe) na alimentação do arame;
- Energia de soldagem, considerando eficiência de 80%, 0,8 kJ/mm (primeiro passe) e 1,0 kJ/mm (segundo passe);
- Gás de proteção argônio com 25%  $CO_2$ ;
- Tensão de 23 V;
- Pré-aquecimento de 22 °C e 200 °C (primeiro e segundo passe respectivamente);
- Chapa de 12 mm de espessura, soldada em topo com chanfro tipo K;
- Eletrodo AWS ER80S-G diâmetro 1,2 mm;
- Dureza do metal de base 551 HV e de solda 234 HV (média de três medidas e microdureza Vickers com carga de 300 gf e tempo de permanência da carga de 10 segundos).

Para o ensaio foi selecionado uma frequência de 1 Hz, força normal de 10 N,

comprimento da trilha de 2 mm, esfera de diâmetro 4,762 mm e 1 hora de teste. Os procedimentos descritos no capítulo VALIDAÇÃO foram usados para preparar a superfície da amostra. Três ensaios foram realizados em cada uma das duas regiões de estudo (metal de base e solda). A umidade relativa do ar variou dentro do intervalo de 60% e 70%, fator que influencia o coeficiente de atrito [Cassar, 2010] e desgaste [Bhushan, 2013].

Após o ensaio foram registradas imagens das trilhas e esferas usadas, com ampliações de 50X, 100X e 200X, também foi obtido o perfil topográfico usando um interferômetro (Interferômetro Bruker - Contour GT).

Em um ensaio com um tribômetro, são geradas duas informações, o gráfico do coeficiente de atrito no tempo e o desgaste dos dois corpos. Para medir o desgaste é necessário usar outras ferramentas. No cálculo do volume desgastado da esfera, foi usado o procedimento descrito na norma [ASTM G133-05, 2016], no qual é calculado o volume da calota esférica desgastada. Para ajudar no reconhecimento da área desgastada, foi feito um pós-processamento na imagem (Figuras 6.1 e 6.2), selecionando-se um tom limite abaixo do qual todos os *pixels* (menor ponto de uma imagem ao qual pode-se atribuir uma cor) ficam pretos e acima brancos, com a ajuda do editor é facilmente identificável, por meio do histograma linear de cores, o limite de tons que fazem parte da calota.

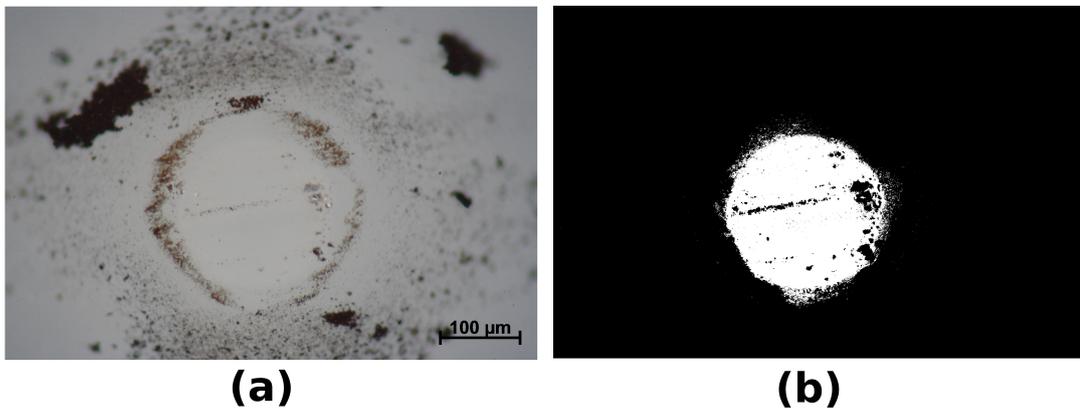


Figura 6.1 – Imagem da ponta da esfera desgastada com aumento de 200X, após ensaio no metal de base ((a) imagem original e (b) pós-processada).

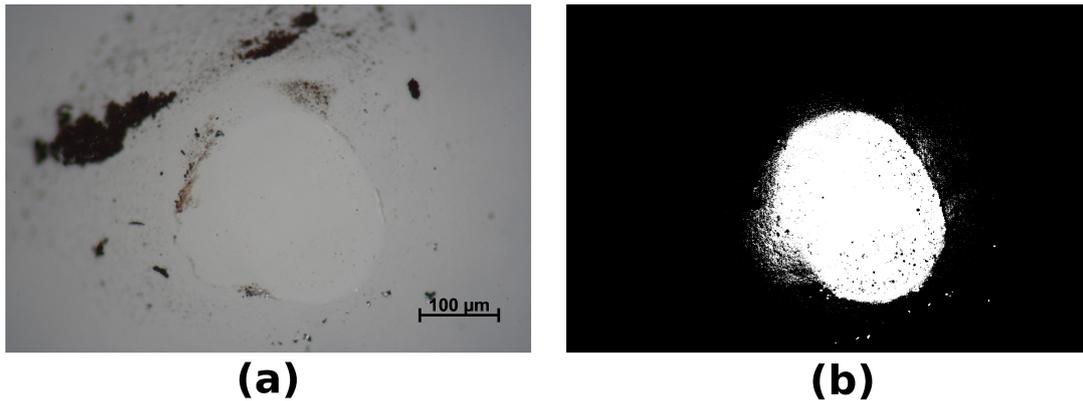


Figura 6.2 – Imagem da ponta da esfera desgastada com aumento de 200X, após ensaio no metal de solda ((a) imagem original e (b) pós-processada).

A obtenção do desgaste da amostra foi feita com o procedimento desenvolvido por Giarollo [Giarollo, 2017], que utilizando a superfície gerada pelo interferômetro (Figura 6.3), traçou retas ao redor da trilha, em uma área não desgastada, obtendo um valor de altura médio, que é usado como referência para calcular a área transversal de 10 seções perpendiculares à trilha. As extremidades que contêm erros geométricos são desconsideradas.

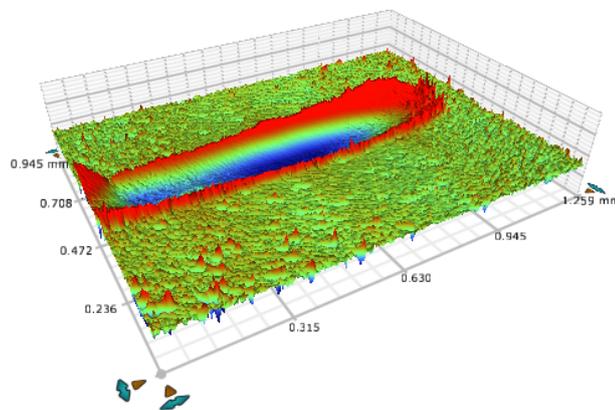


Figura 6.3 – Superfície gerada pelo interferômetro do metal de solda.

## 6.2 Resultados

A Tabela 6.1 mostra o volume desgastado médio, dos três testes em cada zona, na trilha e na esfera. Observa-se que o metal de solda, mais dúctil, sofre 5 vezes mais desgaste que o metal de base, porém a dureza não é o único fator a influenciar a resistência ao desgaste, como mostrou o estudo de Mazzaferro [Mazzaferro, 2017], que observou a

	Volume desgastado médio na trilha em $\text{mm}^3 \times 10^{-5}$	Volume desgastado médio da esfera em $\text{mm}^3 \times 10^{-5}$
MB	1,96	0,155
MS	9,99	0,199

Tabela 6.1 – Volume desgastado médio na trilha e na esfera.

influência da microestrutura e tamanho de grão no desgaste. Na esfera ocorre um desgaste de aproximadamente 30% maior no metal de solda. Outro aspecto é que a forma da área aparentemente desgastada da esfera mostrou-se diferente para o material de base e solda. No material de solda ela apresenta uma forma elíptica, com uma razão média entre os raios de 1,32, enquanto que no material de base essa razão média é de 1,02, quase um círculo. O raio maior da elipse ficou localizado paralelamente ao movimento do carro do tribômetro.

Os coeficientes de atrito, dinâmico e estático, no material de solda (Figura 6.4) foram maiores do que no material de base (Figura 6.5), alguns fatores podem ser atribuídos a essa diferença. Primeiro a área real de contato é maior no metal de base devido à sua maior ductilidade, observado também na maior área de contato com a esfera representada por sua maior área desgastada e a trilha com maior profundidade e paredes laterais deformadas. Outro fator seria o mecanismo de adesão, mais presente em materiais mais dúcteis, gerando um coeficiente de atrito maior e variações mais fortes ao longo do tempo. Por ter maior desgaste, a presença de um terceiro corpo é mais frequente aumentando ainda mais variações do coeficiente de atrito, como verificado no trabalho de Cassar et al. [Cassar, 2010] que atribuiu as quedas no coeficiente de atrito principalmente aos debrís (fragmentos desgastados que soltam-se dos corpos durante o ensaio) que ficam entre a esfera e a amostra. Por outro lado, o metal de base tem uma área real de contato menor e efeito do mecanismo de adesão, possuindo um coeficiente de atrito médio menor e com menores variações ao longo do tempo. Na Tabela 6.2 é mostrado os dados de atrito médio de cada ensaio, negligenciando os primeiros 5 minutos que representam, de maneira mais marcante, o assentamento da esfera na trilha.

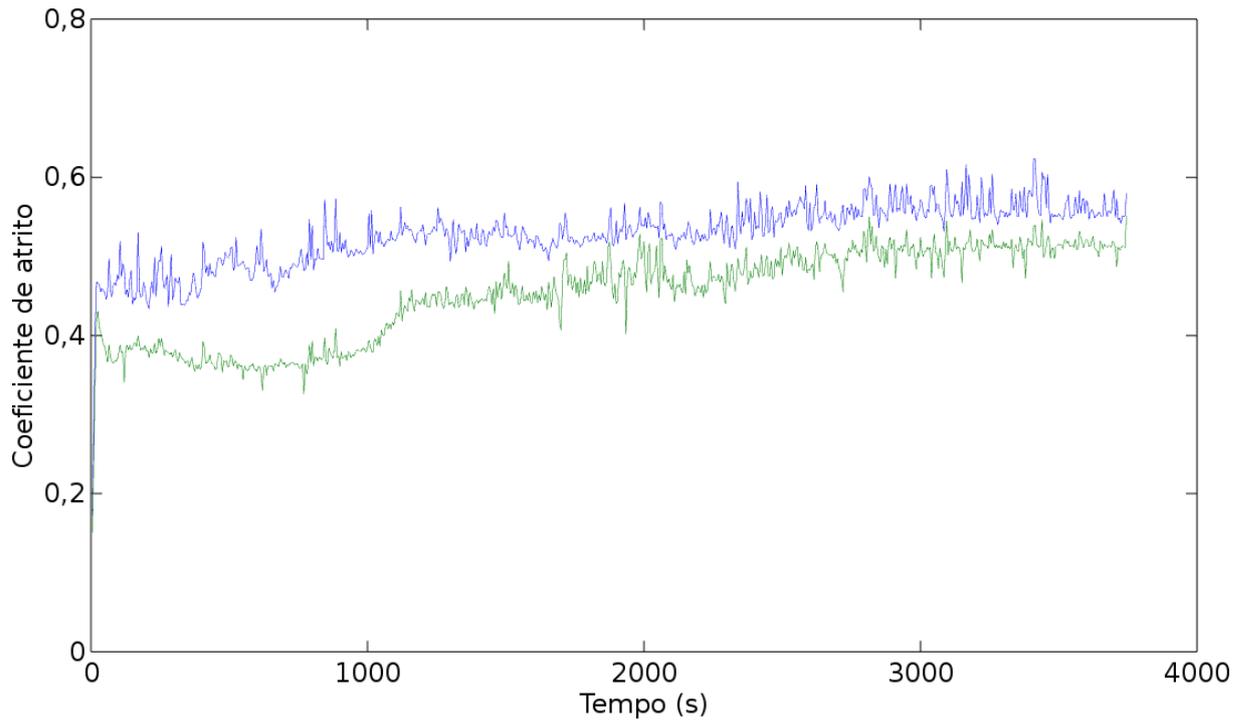


Figura 6.4 – Gráfico do coeficiente de atrito estático (linha azul) e dinâmico (linha verde) em função do tempo para o material de solda.

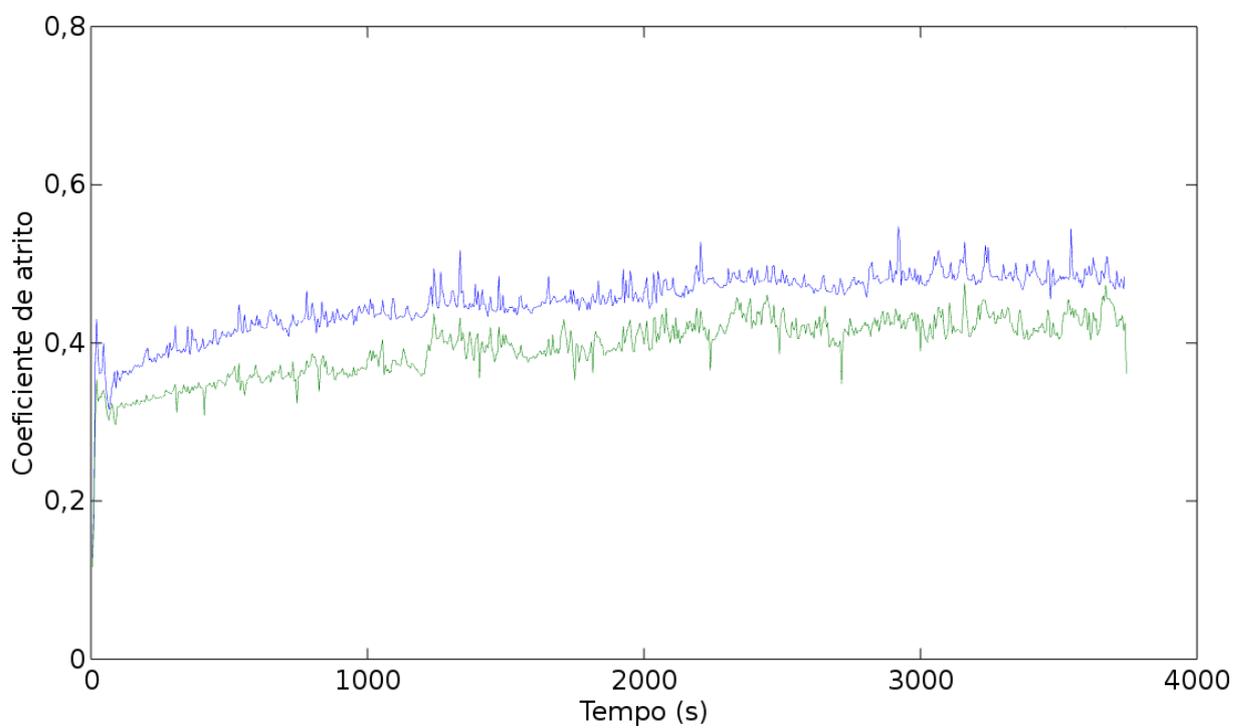


Figura 6.5 – Gráfico do coeficiente de atrito estático (linha azul) e dinâmico (linha verde) em função do tempo para o material de base.

	Coefficiente de atrito dinâmico	Coefficiente de atrito estático
Metal solda ensaio 1	0,430	0,522
Metal solda ensaio 2	0,488	0,546
Metal solda ensaio 3	0,449	0,548
Metal base ensaio 1	0,360	0,420
Metal base ensaio 2	0,415	0,473
Metal base ensaio 3	0,380	0,468

Tabela 6.2 – Coeficiente de atrito estático e dinâmico nos 6 ensaios realizados (metal base e solda). Os gráficos de todos os ensaios podem ser encontrados no ANEXO II.

## 7 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho, construir um microtribômetro, foi atingido. Além disso, está apto a ser produzido em série e comercializado, concretizando todo o ciclo de desenvolvimento de um equipamento científico, que contou com a integração da Universidade e Empresa. Da etapa de um protótipo funcional a um produto comercializável, existe uma grande barreira que nem todos os protótipos conseguiram vencer, é necessário atender a uma série grande de requisitos, desde ser possível a fabricação econômica em séries compatíveis com o mercado, a normas técnicas e requisitos de durabilidade.

Nos testes de validação o equipamento conseguiu reproduzir os resultados obtidos com outro tribômetro, por meio da comparação indireta. Também foi capaz de revelar, com nitidez, os diferentes comportamentos apresentados pelo metal de solda, metal base e ZAC, tanto nos ensaios de validação quanto nos ensaios de uma junta soldada. Isto só foi possível por meio da escolha certa de princípios de funcionamento e correta escolha de materiais e formas.

### 7.1 Sugestões para Trabalho Futuros

Depois de todas as experiências e tecnologias desenvolvidas neste trabalho, não continuar o desenvolvimento de novas funcionalidades e novos modelos de equipamentos para tribologia, seria um desperdício de recursos e tempo. Abaixo são citados os novos acessórios e modelos que se pretende desenvolver em um futuro breve:

- Modelos com força normal e frequência de oscilação maiores para atender uma gama maior de experimentos;
- Sistemas que controlem a umidade relativa e temperatura (umidade relativa constante ou variável ao longo do tempo) para analisar o comportamento tribológico em diversas situações;
- Aparato para realizar ensaios rotativos;
- Ampliação da gama de movimentos tornando uma ferramenta para ensaios universais, tanto tribológicos quanto mecânicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM G133-05. Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear, **ASTM International**, 2016.

Athayde J. N., S. C. J. **Suporte para Esfera de 6 mm para Utilização em Ensaios de Desgaste e na Análise em Microscopia Óptica e Microscopia Óptica Eletrônica de Varredura**, 2017.

Bhushan, B. **Introduction to Tribology 2**. Wiley, second edition, 2013.

Bruker. **Catálogo UMT TriboLab Mechanical Tester and Tribometer**, 2015.

Cassar, G. e. a. A study of the reciprocating-sliding wear performance of plasma surface treated titanium alloy, **Wear**, pages 60–70, 2010.

EN 602041. Safety of machinery - Electrical equipment of machines, **British Standard**, 2006.

Ferreira N. F., N. P. D. **Tribômetro Multifuncional com Controle de Temperatura do Disco a partir de Módulo de Indução Eletromagnética.**, 2015.

Fich, A. M. **Influência da soldagem na tribocorrosão em juntas de materiais similares e dissimilares utilizando o aço Hardox 500**. TCC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

Giarollo, D. F. Estudo do Desgaste Abrasivo a Dois e a Três Corpos de um Aço Estrutural: Comparação do Comportamento do Metal de Solda com o Metal Base, **XLIII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem**, 2017.

Hutchings, I. and Shipway, P. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Butterworth-Heinemann, second edition, 2017.

Mazzaferro, C. C. P. Efeito da Microestrutura na Dureza e na Resistência ao Desgaste de um Aço de Alta Resistência Soldado pelo Processo MAG, **XLIII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem**, 2017.

N., A. J. **Equipamento para Adaptação em Tribômetro para Execução de Ensaios de Desgaste em Biomateriais Utilizados em Próteses Ortopédicas de Joelho**, 2013.

N. Marjanovic, B. Tadic, B. I. S. M. Design of Modern Concept Tribometer with Circular and Reciprocating Movement, **Tribology in industry**, vol. 28, 2006.

Nanovea. **Catálogo T50 and T2000 Tribometer**, 2015.

NBR 12100. Segurança de máquinas — Princípios gerais de projeto — Apreciação e redução de riscos, **ABNT**, 2013.

NBR 14153. Segurança de máquinas - Partes de sistemas de comando relacionados à segurança - Princípios gerais para projeto, **ABNT**, 2013.

NBR 5410. Instalações elétricas de baixa tensão, **ABNT**, 2008.

NBR 8197. Materiais Metálicos - Calibração de instrumentos de medição de força de uso geral, **ABNT**, 2012.

NBR NM 272. Segurança de máquinas - Proteções - Requisitos gerais para o projeto e construção de proteções fixas e móveis, **ABNT**, 2002.

NBR NM 273. Segurança de máquinas - Dispositivos de intertravamento associados a proteções - Princípios para projeto e seleção, **ABNT**, 2002.

Neis, P. D. **Projeto e construção de um tribômetro para estudos relacionados a materiais de fricção veiculares**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

NR12. Norma Regulamentadora N° 12 - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos, **Ministério do Trabalho**, 2015.

Nussenzvig, H. M. **Física Básica**. Blucher, 4° edition, 2002.

Pahl, G. and Beitz, W. **Engineering Design**. Springer, third edition edition, 2007.

Pradeep L. Menezes, Sudeep P. Ingole, M. N. S. V. K. **Tribology for Scientists and Engineers**. Springer, 2013.

Radi, P. A. e. a. Tribologia, Conceitos e Aplicações, **Anais do 13 Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XIII ENCITA**, 2007.

Richard Castro, Milton Pereira, M. F. J. M. N. e. C. L. I. Desenvolvimento do sistema de aquisição e supervisão de dados para um tribômetro rotativo do tipo pino sobre disco, **Revista Ciência e Tecnologia**, vol. 18(32), 2015.

Rtec. "<https://www.rtec-instruments.com/universal-tribometer.htm>", 2018.

Sedlacek, M. Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear, **Elsevier**, 2008.

Sinatora, A.; Tanaka, D. K. **As leis de atrito: da Vinci, Amatons ou Coulomb?** In *Revista ABCM Engenharia*, pages 31–34, 2007.

Soares M. R., Ferreira N. F., N. P. D. **Equipamento Tribômetro com Controle de Temperatura e Processo de Produção.**, 2012.

Steel, C. Risk Estimation Techniques, **The Safety e Health Practitioner**, 1990.

Thorp, J. A novel tri-pin-on-disc tribometer designed to retain lubricants, **TRIBOLOGY**, 1981.

## ANEXO I – Código para Tratamento de Dados

A seguir é exposto o código usado para tratar os dados do capítulo CALIBRAÇÃO E DADOS.

---

```

clear all
file = csvread ('nome_do_arquivo ');
f_sample=80;
y = file (:, 2);
%y = file (:);
for i = 1:size(y)-1
    if (y(i)>=4.3e9)
        y(i)=y(i+1);
    endif
endfor
for i = 1:size(y)-1
    if (y(i)<=4.1e9)
        y(i)=y(i+1);
    endif
endfor

desvio_ alternativo = 137*800*.2;

fator_seguinto=5;
seguinto=f_sample*fator_seguinto;
final=round(length(y)/seguinto)-1;
for i = 1: final*seguinto-seguinto
    if i==((seguinto*(i-1))/seguinto+1)
        media_filt=mean(y(i:(i+seguinto)));
    endif
y(i)=y(i)-media_filt;
endfor

for i = 1:size(y)
    y(i)=abs((y(i)/137)/990.82275);
endfor

for i = 1: length(y)-3
    if y(i)>=1
        y(i)=y(i+3);
    endif
endfor

atrito_estatico_1=0;
atrito_estatico_2=0;
atrito_dinamico_anterior=0;
atrito_maximo_anterior=0;
valor_maximo=0.6;
sentinela_1=0;
sentinela_2=0;
sentinela_3=0;
sentinela_4=0;
sentinela_5=0;
somatorio_dinamico=0;
contador_dinamico=0;
contador_estatico=0;

for i = 2:size(y)
    if sentinela_1==1||y(i)<=(valor_maximo/3);
        sentinela_1=1;
        sentinela_5=1;
        if y(i)>=y(i-1)&& y(i)>=y(i+1)
            atrito_estatico_1=y(i);
            sentinela_1=0;
        endif
    endif
endfor

if sentinela_2==1||y(i)<=(valor_maximo/3);
    sentinela_2=1;
    if y(i)>=y(i-1)&& y(i)>=y(i+1)
        sentinela_3=1;
        atrito_gatilho=y(i);
    endif
endfor

```

```

endif
if sentinela_3==1&&sentinela_2==1
    if y(i)>=atrito_gatilho&&sentinela_4==1
        atrito_dinamico(:,i)=somatorio_dinamico/contador_dinamico;
        atrito_dinamico_anterior=atrito_dinamico(i);
        somatorio_dinamico=0;
        contador_dinamico=0;
        sentinela_3=0;
        sentinela_2=0;
        sentinela_4=0;
    endif
    if y(i)<atrito_gatilho
        somatorio_dinamico=somatorio_dinamico+y(i);
        contador_dinamico=contador_dinamico+1;
        sentinela_4=1;
    endif
endif
atrito_dinamico(i)=atrito_dinamico_anterior;

if sentinela_5==1
    contador_estatico=1+contador_estatico;
    if contador_estatico>=30&&y(i)>=y(i-1)&&y(i)>=y(i+1)
        atrito_estatico_2=y(i);
        sentinela_5=0;
        contador_estatico=0;
    endif
endif

if atrito_estatico_1>=atrito_estatico_2
    atrito_estatico(:,i)=atrito_estatico_1;
endif
if atrito_estatico_2>=atrito_estatico_1
    atrito_estatico(:,i)=atrito_estatico_2;
endif

endfor

fator_seguinto_2=3;
seguinto_2=f_sample*fator_seguinto_2;
final_2=final*(fator_seguinto_2/fator_seguinto_2);
for i=1:final_2
    atrito_dinamico_filt(i)=mean(atrito_dinamico((i*seguinto_2-seguinto_2+1):(i*seguinto_2)));
endfor
for i=1:final_2
    atrito_estatico_filt(i)=mean(atrito_estatico((i*seguinto_2-seguinto_2+1):(i*seguinto_2)));
endfor
for i = 1:size(y)
    tempo1(i) = i*(1/f_sample);
endfor

constante_tempo=(seguinto_2)/f_sample;
for i = 1:length(atrito_dinamico_filt)
    tempo(i) = i*constante_tempo;
endfor

tamanho=length(atrito_estatico_filt)-60;
media_atritoestatico=mean(atrito_estatico_filt(300:tamanho));
media_atritodinamico=mean(atrito_dinamico_filt(300:tamanho));

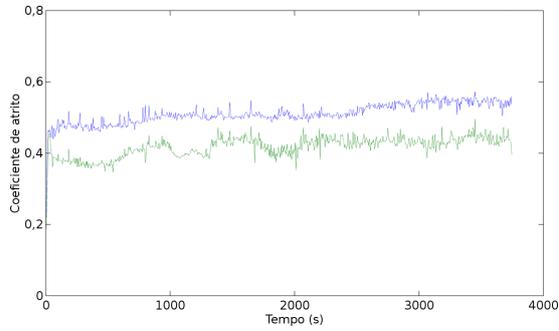
plot(tempo, atrito_estatico_filt ,tempo, atrito_dinamico_filt );
set(gca, "linewidth", 1, "FontSize", 24)
ylabel('Coeficiente de atrito');
xlabel('Tempo (s)');
ylim([0,0.8]);

```

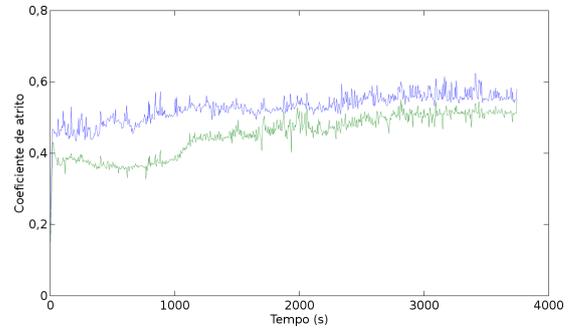
---

## ANEXO II – Gráficos dos Ensaios

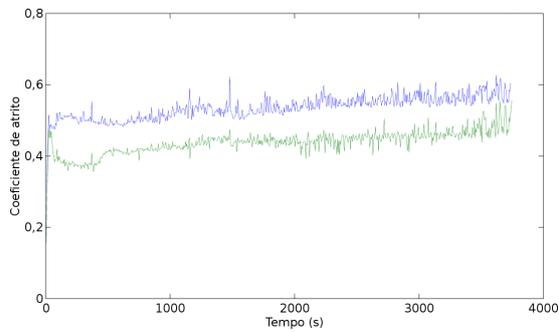
A seguir são expostos todos os gráficos gerados nos ensaios do capítulo ANÁLISE DE UMA JUNTA SOLDADA.



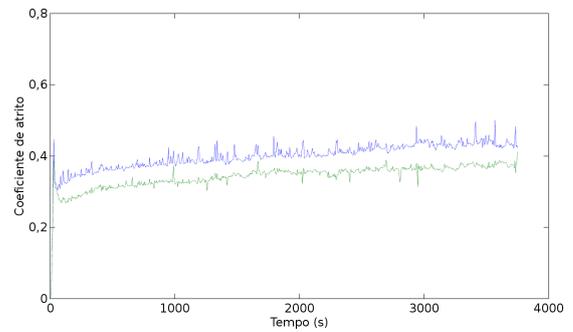
(a) Primeiro ensaio no metal de solda.



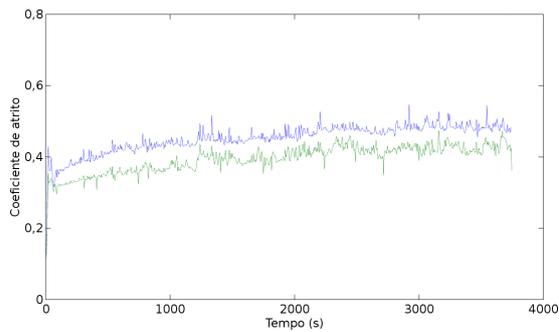
(b) Segundo ensaio no metal de solda.



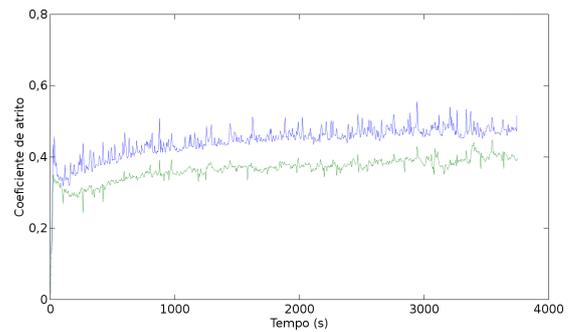
(c) Terceiro ensaio no metal de solda.



(d) Primeiro ensaio no metal de base.



(e) Segundo ensaio no metal de base.



(f) Terceiro ensaio no metal de base.

Figura II.1 – Gráfico dos ensaios do capítulo ANÁLISE DE UMA JUNTA SOLDADA.

## ANEXO III – Vistas do tribômetro

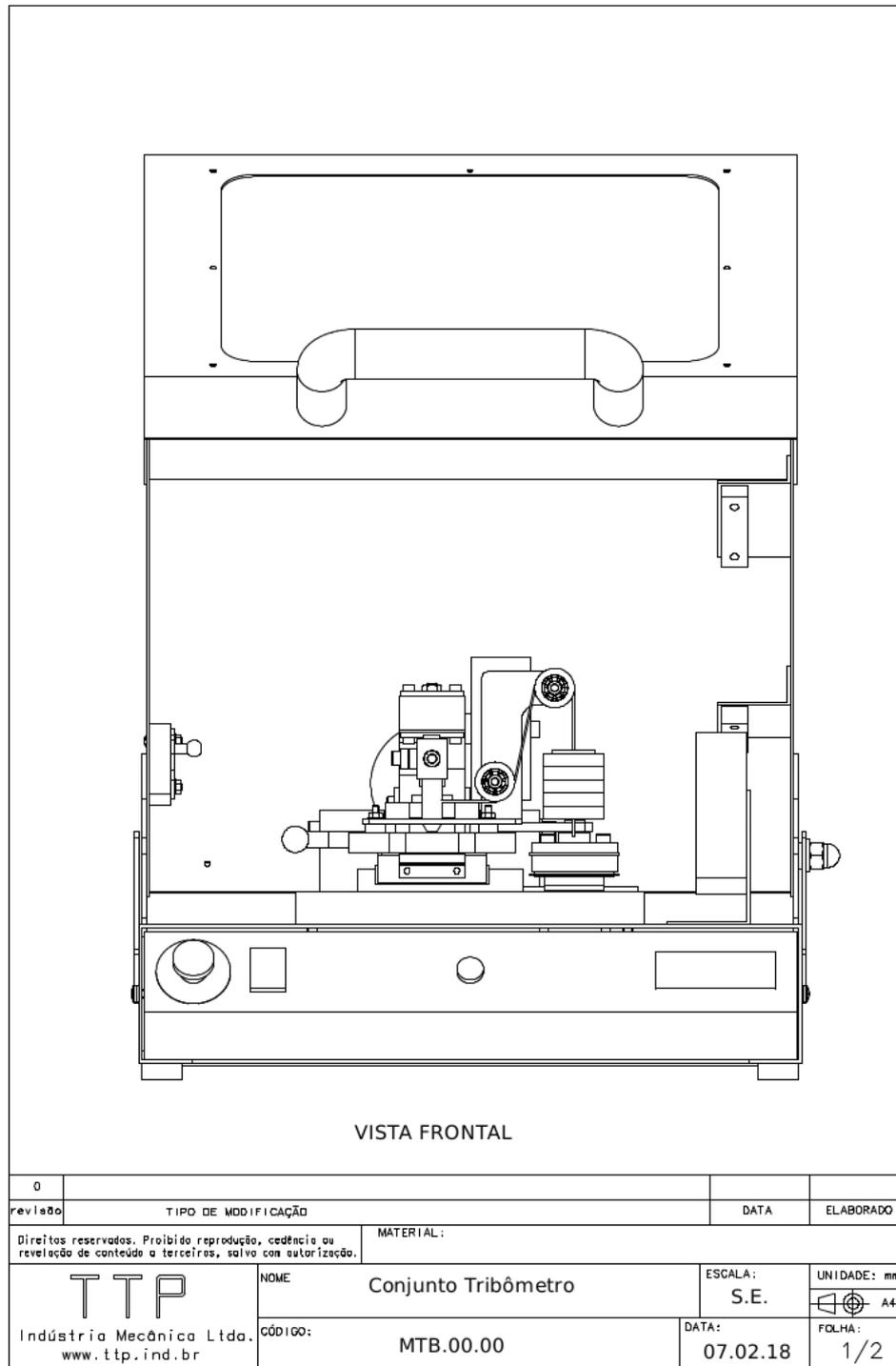


Figura III.1 – Vista frontal do tribômetro.

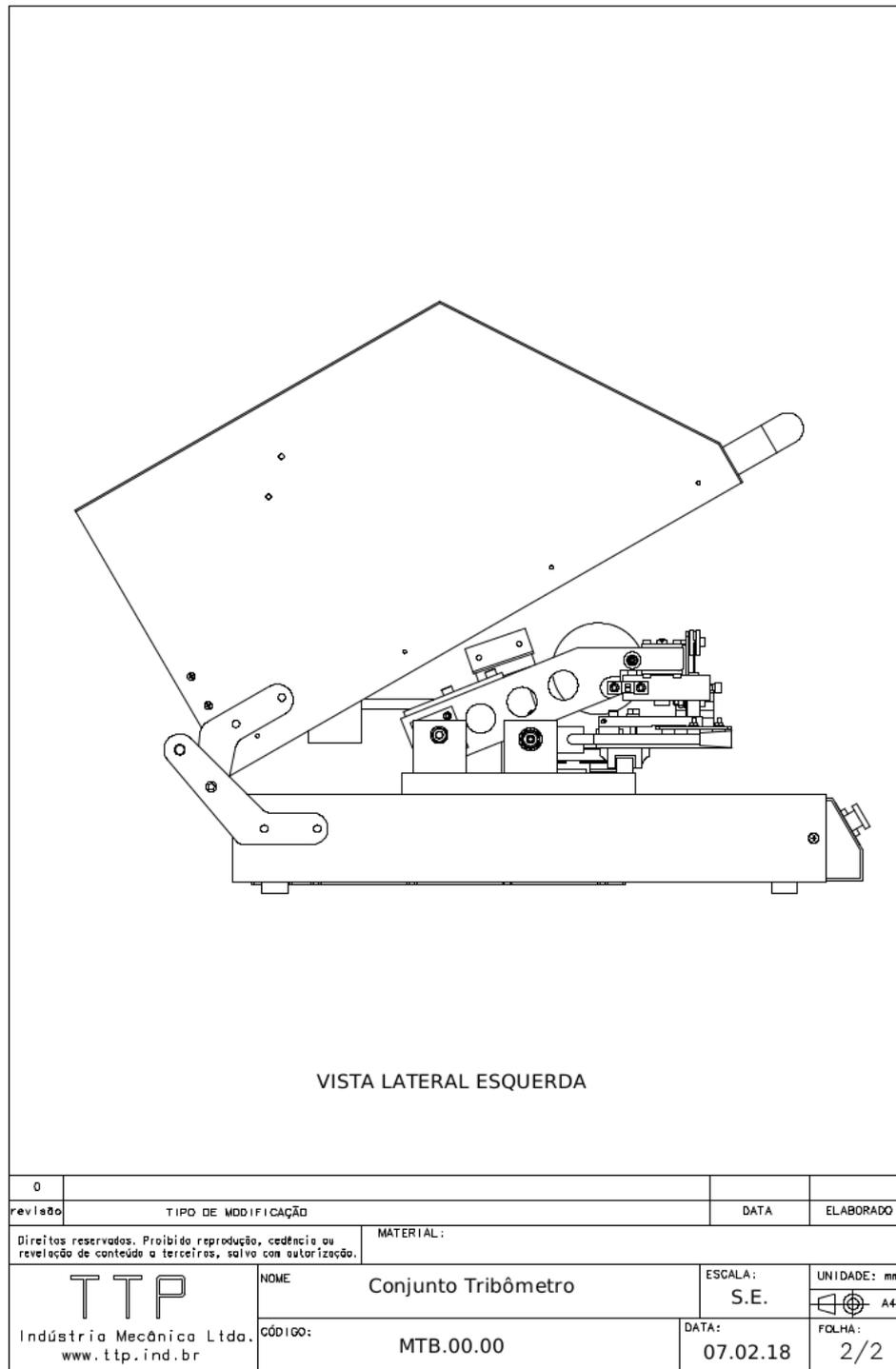


Figura III.2 – Vista lateral esquerda do tribômetro.