

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

CARLOS FELIPE FERREIRA GALVÃO

INSTRUMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO PINO SOBRE O DISCO

ILHA SOLTEIRA

2019

CARLOS FELIPE FERREIRA GALVÃO

INSTRUMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO PINO SOBRE O DISCO

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos.

Orientador: Prof. Dr. Aparecido Carlos Gonçalves

ILHA SOLTEIRA

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

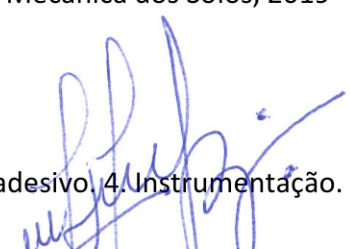
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

G182i Galvão, Carlos Felipe Ferreira.
Instrumentação e validação de um equipamento pino sobre o disco / Carlos Felipe Ferreira Galvão. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2019
119 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Solos, 2019

Orientador: Aparecido Carlos Gonçalves
Inclui bibliografia

1. Tribologia. 2. Pino sobre o disco. 3. Desgaste adesivo. 4. Instrumentação. 5. Arduino.



João Josué Barbosa

Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretor Técnico
CRB 8-5642



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Instrumentação e validação de um equipamento pino sobreo disco

AUTOR: CARLOS FELIPE FERREIRA GALVÃO

ORIENTADOR: APARECIDO CARLOS GONCALVES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: Mecânica dos Sólidos pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. APARECIDO CARLOS GONCALVES

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. GILBERTO PECHOTO DE MELO

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. WASHINGTON MARTINS DA SILVA JUNIOR

Engenharia Mecânica / Universidade Federal de Uberlândia

Ilha Solteira, 19 de dezembro de 2019

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela vida e pelas oportunidades que me trouxeram até aqui.

À minha família que sempre me apoiou, mesmo nas maiores dificuldades, em especial a minha mãe Felipa, de todo o coração, pelos seus conselhos, apoio e incentivo. Afinal, o que seria de mim, sem a sua paciência, carinho e afeto? Ao meu pai Carlos por conselho e compreensão.

Meu agradecimento ao meu amor Nathamy, por seu companheirismo, mesmo nas adversidades, e por vencer junto comigo esta caminhada de aprendizado e conhecimento. Ao Professor Doutor Aparecido Carlos Gonçalves, pela orientação, apoio e confiança ao longo desses anos de vida acadêmica. Agradeço aos integrantes do GMSINT, em especial ao meu amigo Lucas Zanovello, que por diversas vezes me ajudou quando precisei, ao Professor Doutor João Antonio Pereira pelas sugestões dadas e ensinamentos. Aos meus amigos Guido e Emerson, no qual compartilhamos o mesmo ambiente de trabalho ao longo desses anos de estudo e dedicação. Um agradecimento especial também ao meu amigo Pedro Lucas(Tim).

Aos Professores Doutores, membros da banca. Agradeço também aos técnicos de laboratório Carlos Santana e Diego pelo grande auxílio durante a realização desta pesquisa. Agradeço, por fim, a todos que participaram de forma direta ou indireta, na elaboração deste trabalho.

Quem pensa pouco, erra muito (Leonardo da Vinci)

Resumo

Os métodos de análise tribológica realizados em laboratório são feitos em um equipamento denominado tribômetro, utilizado para avaliar com precisão o comportamento do desgaste por deslizamento de pares de materiais. Os tribômetros comercializados atualmente apresentam um alto valor, pois precisam de um sistema de automação com controle e aquisição de dados utilizados para facilitar o procedimento experimental. Além disso, é necessário que estes equipamentos tenham um maior controle sobre os parâmetros de teste (carga, velocidade de deslizamento, distância ou tempo do ensaio), além de realizar a aquisição de dados de forma automática. Com base nesta motivação, este trabalho apresenta um estudo detalhado sobre o desenvolvimento da instrumentação para controle e aquisição de dados de um tribômetro pino sobre o disco, seguindo as recomendações da norma ASTM G99, utilizando hardware de baixo custo e plataforma com código aberto (Arduino) com integração de hardware que são controlados por esta plataforma através da interface I2C. Foram utilizados sensores de medição de temperatura na superfície de contato entre o pino e o disco, temperatura e umidade ambiente, célula de carga para determinar a carga normal aplicada, célula de carga para se obter o coeficiente de atrito, um acelerômetro para aquisição de dados de vibração, sensor reflexivo para contagem de ciclos do motor e um módulo relé para controle da rotação do motor através do inversor de frequência. Além disso, foram realizados experimentos com pares tribológicos, para teste do sistema implementado, e realizado a quantificação de desgaste para deformação plástica com a equação de Archard (1953) e feito uma correlação dos dados comparando com os dados apresentados em Archard (1957). Os resultados demonstraram que a instrumentação desenvolvida se mostrou eficiente, pois, após o ensaio e a análise de diferentes combinações para o par de ensaio pino e disco, foi possível determinar os diferentes coeficientes de atrito, e o cálculo da taxa de desgaste para condições não lubrificadas. Comparando os valores obtidos com os presentes na literatura, percebe-se que os resultados obtidos foram satisfatórios.

Palavras-chave: Tribologia. Pino sobre o disco. Desgaste adesivo. Instrumentação. Arduino.

Abstract

Tribological analysis methods performed in a laboratory are made in a device called tribometer used to accurately evaluate the slip wear behavior of material pairs. Currently, marketed tribometers have a high value because they need an automation system with control and data acquisition used to facilitate the experimental procedure. Besides, it is necessary that these devices have greater control over the test parameters (load, sliding speed, distance or trial time), and perform data acquisition automatically. Based on this motivation, this paper presents a detailed study on the development of instrumentation for control and data acquisition of a pin-on-disk tribometer, following the recommendations of ASTM G99 standard, using low-cost hardware and open-source platform (Arduino) with hardware integration that is controlled by this platform through the I2C interface. Temperature sensors at the contact surface between the pin and the disk, ambient temperature, and humidity, load cell to determine the normal applied load, load cell to obtain the coefficient of friction, an accelerometer for vibration data acquisition were used, a reflective sensor for engine cycle counting, and a relay module for engine speed control through a frequency inverter. In addition, experiments were performed with tribological pairs to test the implemented system, and the quantification of wear for plastic deformation with the Archard equation (1953) and a correlation of the data compared with the data presented in Archard (1957). The results showed that the developed instrumentation proved to be efficient because, after the test and the analysis of different combinations for the pin and disk test pair, it was possible to determine the different friction coefficients and the calculation of the wear rate for unlubricated conditions. Comparing the values obtained with those present in the literature, it is clear that the results obtained were satisfactory.

Keywords: Tribology. Pin on disc. Adhesive wear. Instrumentation. Arduino

Lista de Símbolos

a	-	Área da partícula
A_r	-	Área real de contato do par tribológico
A_ω	-	Área desgastada
CLA	-	Média da rugosidade
D	-	Diâmetro do disco
d	-	Diâmetro do pino ou da esfera
dt	-	Variação de tempo
Fat	-	Força de atrito
F_n	-	Carga aplicada
H	-	Menor dureza do componente no par tribológico
L	-	Distância de deslizamento
k	-	Coefficiente de desgaste
N	-	Força normal
P_{mp}	-	Perda de massa do pino
P_{md}	-	Perda de massa do disco
R	-	Raio da faixa de desgaste
R_a	-	Média da rugosidade
Rmax	-	Valor médio da altura máxima do pico de asperezas
RMS	-	Raiz quadrada média dos quadrados para variação dos picos de amplitude
Rtm	-	Valor médio da altura máxima do pico de asperezas
δFn	-	Carga máxima normal
δL	-	Distância deslizante

$\delta \mathbf{F} \omega$	-	Partícula gasta de volume
μ	-	Coefficiente de atrito
$\mathbf{V}_{\omega}$	-	Taxa de material removido por unidade de distância de deslizamento
$\mathbf{V}_{\mathbf{p}}$	-	Volume total da zona plasticamente deformada sob a superfície de uma área gasta
$\mathbf{V}_{\mathbf{tp}}$	-	Variação de temperatura
ψ	-	Taxa de desgaste
$\mathbf{W}$	-	Velocidade de rotação do disco
ω	-	Volume do material desgastado por unidade de distância de deslizamento

Lista de Figuras

1	Registro de 1900 a.C. aplicação da tribologia para redução do atrito	23
2	Esboços do caderno de da Vinci no ano de 1480 demonstrando experimentos com atrito	24
3	Movimentos de interface por rolamento e deslizamento	27
4	Coefficiente de atrito	27
5	Representação esquemática de irregularidades da superfície	29
6	Parâmetros para aferição de rugosidade	30
7	Área aparente e área real de contato	31
8	Descrição geral de entrada e saída de um tribossistema	33
9	Exemplos de tribossistemas em várias áreas tecnológicas	34
10	Classificação de diferentes tipos de testes tribológicos	35
11	Exemplo dos níveis de tribossistemas em um motor de ciclo diesel	37
12	Mecanismo de desgaste adesivo	40
13	Esquema de uma partícula de desgaste hemisférica por deslizamento	41
14	Mecanismo de desgaste abrasivo	45
15	Formação e propagação de trincas na fadiga superficial	46
16	Mecanismo de desgaste por reações triboquímicas	48
17	Configuração para ensaios tribológicos.	51
18	Variações no coeficiente de atrito μ durante o deslizamento para dois ma- teriais diferentes	53
19	Coefficiente de atrito em função da distância de deslizamento (a) em uma curva típica em forma de S mostrando o período de amaciamento, e (b) quatro casos hipotéticos	55

20	Esquema do sistema de teste de desgaste pino sobre o disco	57
21	Equipamento pino sobre o disco base para o projeto	59
22	Desenho esquemático do tribômetro pino sobre o disco	60
23	Desenho esquemático do equipamento tribômetro pino sobre o disco com vista explodida	61
24	Equipamento pino sobre o disco	63
25	Hardware utilizados na instrumentação	64
26	Contagem de ciclos	65
27	Desenho esquemático de ligações do sistema de controle.	66
28	Hardware fixados no tribômetro pino sobre o disco.	67
29	Suporte e sensor de temperatura.	67
30	Linha de tendência e equação da reta	70
31	Desenho esquemático de ligação, célula de carga, sensor de temperatura, umidade e microcontrolador arduino uno	71
32	Desenho esquemático de ligação do acelerômetro	72
33	Materiais utilizados para preparação dos discos	75
34	Balança analítica	76
35	Durômetro de bancada Rockwell	76
36	Sensor de temperatura, fixação do pino e disco	77
37	Fluxograma que ilustra as variáveis analisadas nesse estudo	80
38	Carga normal aplicada 10N e velocidade 0,0879 m/s	82
39	Carga normal aplicada 10N e velocidade 0,0879 m/s	83
40	Carga normal aplicada 20N e velocidade 0,0879 m/s	85
41	Carga normal aplicada 20N e velocidade 0,0879 m/s	86
42	Carga normal aplicada 10N e velocidade 0,2199 m/s	88
43	Carga normal aplicada 20N e velocidade 0,2199 m/s	90
44	Carga normal aplicada 10N e velocidade 0,0879 m/s	95

45	Carga normal aplicada 20N e velocidade 0,0879 m/s	97
46	Carga normal aplicada 20N e velocidade 0,0879 m/s	97
47	Carga normal aplicada 10N e velocidade 0,2199 m/s	99
48	Carga normal aplicada 20N e velocidade 0,2199 m/s	101
49	Carregamento e descarregamento	113
50	Verificação célula de carga 20(kgf) força normal	114
51	Suporte para aferir a célula de carga HBM (20kgf) usada para medir a força de atrito	115
52	Primeira verificação da célula de carga HBM (20kgf) força de atrito	116
53	Segunda verificação da célula de carga HBM (20kgf) força de atrito	117
54	Terceira verificação da célula de carga HBM (20kgf) força de atrito	118
55	Sistema de controle com 60 [rpm]	119
56	Sistema de controle com 150 [rpm]	120
57	Sistema de controle com 240 [rpm]	120
58	Sistema de controle com 330 [rpm]	121
59	Sistema de controle com 420 [rpm]	121
60	Sistema de controle com 510 [rpm]	122
61	Sistema de controle com 600 [rpm]	122
62	Aquisição de dados com acelerômetro	123
63	Parâmetros utilizados para velocidade de deslizamento em 0,0879 m/s . . .	123
64	Parâmetros utilizados para velocidade de deslizamento em 0,2199 m/s . . .	124

Lista de Tabelas

1	Descrição dos componentes fixos na estrutura	62
2	Nomenclatura das amostras dos materiais estudados	74
3	Resultados obtidos para 10N e 0,0879 m/s	83
4	Coeficiente e taxa de desgaste do pino para 10N e 0,0879 m/s	84
5	Coeficiente e taxa de desgaste do disco para 10N e 0,0879 m/s	84
6	Resultados obtidos para 20N e 0,0879 m/s	86
7	Coeficiente e taxa de desgaste do pino para 20N e 0,0879 m/s	87
8	Coeficiente e taxa de desgaste do disco para 20N e 0,0879 m/s	87
9	Resultados obtidos para 10N e 0,2199 m/s	88
10	Coeficiente e taxa de desgaste do pino para 10N e 0,2199 m/s	89
11	Coeficiente e taxa de desgaste do disco para 10N e 0,2199 m/s	89
12	Resultados obtidos para 20N e 0,2199 m/s	90
13	Coeficiente e taxa de desgaste do pino para 20N e 0,2199 m/s	91
14	Coeficiente e taxa de desgaste do disco para 20N e 0,2199 m/s	91
15	Coeficiente de atrito	91
16	Taxa de desgaste para alguns materiais	93
17	Resultados obtidos para 10N e 0,0879 m/s	95
18	Coeficiente e taxa de desgaste do disco para 10N e 0,0879 m/s	96
19	Resultados obtidos para 20N e 0,0879 m/s	98
20	Coeficiente e taxa de desgaste do pino para 20N e 0,0879 m/s	98
21	Resultados obtidos para 10N e 0,2199 m/s	100
22	Coeficiente e taxa de desgaste para o pino para 10N e 0,2199 m/s	100

23	Resultados obtidos para 20N e 0,2199 m/s	101
24	Coeficiente e taxa de desgaste para o pino 20N e 0,2199 m/s	102

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Contribuições	21
1.2	Objetivos	21
1.3	Organização do trabalho	22
2	Revisão da Tribologia	23
2.1	Desenvolvimento da tribologia	23
2.2	Conceitos tribológicos	26
2.2.1	<i>Contato entre superfícies sólidas</i>	28
2.2.2	<i>Sistema tribológico</i>	32
2.2.3	<i>Mecanismos de desgaste</i>	38
2.2.4	<i>Ensaaios tribológicos</i>	49
3	Instrumentação do tribômetro pino sobre o disco	57
3.1	Método de Teste Padrão com um Equipamento Pino sobre o Disco	57
3.1.1	<i>Estrutura do tribômetro pino sobre o disco</i>	58
3.2	Desenvolvimento da instrumentação do tribômetro pino sobre o disco	63
3.2.1	<i>Desenvolvimento do sistema de controle</i>	64
3.2.2	<i>Desenvolvimento do sistema de aquisição</i>	66
4	Metodologia experimental	73
4.1	Sequência de operações para metodologia experimental	74
4.1.1	<i>Preparação das amostras</i>	74

4.1.2	<i>Parâmetros de teste</i>	77
4.1.3	<i>Procedimento experimental</i>	78
4.1.4	<i>Aquisição e processamento de sinais</i>	79
4.1.5	<i>Quantificação do desgaste</i>	79
4.1.6	<i>Sequência de ensaios realizados</i>	79
5	Resultados e discussões	81
6	Considerações finais	104
6.1	Conclusões	104
6.2	Sugestões de trabalhos futuros	106
	Referências	107
	Apêndice A - Procedimento de calibração	112
	Apêndice B - Demonstração do sistema	119

1 Introdução

Com a constante evolução industrial e o desejo por novas tecnologias que satisfaçam as necessidades da sociedade moderna faz com que o estudo e desenvolvimento de novos materiais e processos com diferentes aplicabilidades ocorram de forma intermitente. Em inúmeras aplicações de engenharia, tem-se o movimento relativo entre corpos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013; BLAU, 2016). A tribologia é uma área da ciência e tecnologia que pesquisa e desenvolve soluções sobre as interações que acontecem durante o movimento relativo (BHUSHAN, 2013; BLAU, 2016).

O termo tribologia vem do grego "tribos" que significa esfregar, esta é uma ciência multidisciplinar que inclui engenharia mecânica, em especial, elementos de máquina como mancais de escorregamento, rolamento e engrenagens. Ciência de materiais, com pesquisa de resistência ao desgaste, revestimentos de superfície e a química com desenvolvimento de lubrificantes e aditivos. Outras áreas recentes neste campo incluem a biotecnologia que desenvolve pesquisas para aplicações tribológicas em organismos vivos e a nanotribologia, que estuda o atrito e desgaste em micro e nanoescalas (KHONSARI; BOOSER, 2008; MANG; BOBZIN; BARTELS, 2011; POPOV, 2017).

A tribologia atual tem como principais interesses a formulação de lubrificantes, operações industriais, equipamentos aeroespaciais e de transporte, modelagem e usinagem de materiais, computadores e dispositivos eletrônicos, energia, bioengenharia e quase todas as fases da vida onde o movimento relativo é encontrado. (KHONSARI; BOOSER, 2008; MANG; BOBZIN; BARTELS, 2011; POPOV, 2017).

Para desenvolvimento de novos materiais ou processos para aplicações tribológicas faz-se necessário diversos testes para entender como estes materiais ou processos se comportam com relação aos aspectos tribológicos. Por isso têm-se a necessidade de várias repetições experimentais afim de se obter o maior êxito na definição dos novos materiais ou processos utilizados nestas aplicações.

Grande parte dos sistemas encontrados na atualidade para pesquisa tribológica são

complexos, a construção de protótipos destes sistemas com finalidade de pesquisa tornaria os ensaios experimentais mais demorados e com custo muito elevado, em alguns casos inviáveis no aspecto financeiro, e outros impraticáveis na etapa experimental, como por exemplo pesquisas tribológicas realizadas para aplicações humanas.

Por isso pesquisas tribológicas para entender os mecanismos de desgaste e as interações que acontecem nos tribosistemas complexos são simulados em laboratório com uso de um equipamento simplificado, com menores custos e tempo de ensaio. Os testes laboratoriais realizados nestes equipamentos simplificados permitem que o pesquisador tenha uma alta reprodutibilidade dos ensaios e maior controle sobre as variações dos parâmetros de teste, com custos e tempo reduzidos.

Os ensaios tribológicos são comumente realizados em equipamentos denominados tribômetros. Ramos *et al.* (2014) demonstraram que o tribômetro modelo pino/esfera sobre disco, tem sido referenciado como um dos que melhor representa o estudo do atrito e desgaste de materiais e que apresenta melhor reprodutibilidade dos resultados em procedimentos laboratoriais. Este método de teste abrange um procedimento de laboratório para determinar o desgaste de materiais durante o deslizamento de um pino sobre um disco. Os materiais são testados em pares sob condições nominalmente não abrasivas.

Nos últimos anos o tribômetro pino sobre o disco têm sido utilizado em várias pesquisas científicas para diversas aplicações. Bragdon *et al.* (2001) realizaram teste com pino sobre o disco para simular o desgaste do polietileno na liga de cromo-cobalto na artroplastia total de quadril, postulando que o movimento multidirecional era necessário para gerar taxas de desgaste realistas nos experimentos realizados.

Kawakubo *et al.* (2005) utilizaram o equipamento pino sobre o disco para pesquisas tribológicas sobre o comportamento de leitura e gravação de um disco "head-disk" e analisaram o comportamento com revestimento de carbono, variação de lubrificantes e rugosidade do disco.

Truhan, Menon e Blau (2005) testaram diferentes revestimentos em aço utilizando o equipamento pino sobre o disco, para aplicação em brocas que envolvem exposição à erosão de lama, em áreas como mineração e exploração de petróleo.

Souza *et al.* (2019) investigou a viabilidade do uso de óleos vegetais à base de *Jatropha* e *Tung* como bio-lubrificantes para o uso na formulação e desenvolvimento de fluidos de usinagem ambientalmente corretos.

Pauly *et al.* (2019) observaram o comportamento estrutural das ligas Incoloy 800HT

e Inconel 617 para aplicação no conceito de reator a gás de alta temperatura.

Recentemente, Hamilton e Muñoz-Escalona (2019) estudaram a melhoria do desgaste de dois compósitos poliméricos com a incorporação de fibras de carbono e fibras de vidro na matriz polimérica. Qiu *et al.* (2019) investigaram o desgaste do pino de liga Ti-45AL-7Nb-0.3W com disco de zircônia à temperatura ambiente em diferentes ambientes, como argônio, hidrogênio e uma mistura de nitrogênio, ar e oxigênio. Haghighat-Shishavan *et al.* (2019) observaram o desgaste de um revestimento de alumina na liga de alumínio AA7075 contra um disco de aço SAE 52100.

De acordo com Ludema (1996) embora a geometria do tribômetro pino sobre o disco não seja a mais adequada para simulação de dispositivos práticos, é a configuração mais usada em laboratórios acadêmicos e industriais. Segundo Bhushan (2000), provavelmente devido à sua simplicidade e flexibilidade em termos de condições de teste e formato da amostra, as configurações de tribômetro assimétrica do tipo pino sobre o disco tem sido um modelo mais popular de teste entre pesquisadores para avaliar o desgaste devido ao atrito por deslizamento.

Em linhas gerais, os componentes de hardware utilizados para aquisição de dados e instrumentação de equipamentos tem um custo elevado. Neste trabalho foram usados componentes de baixo custo com plataforma de código aberto (Arduino). Segundo Harnett (2011) o termo "código aberto" originalmente se aplicava a projetos de software com código-fonte disponível publicamente para que outros possam modificar, aprimorar e compilar. Esses dispositivos tem ganhado cada vez mais espaço em pesquisas acadêmicas.

Ribeiro (2018) utilizou hardware controlados por um Microcontrolador Arduino e por um Microprocessador Raspberry para instrumentação de um mecanismo para ensaio de desgaste superficial protético articular de quadril. Juang e Lurr (2013) utilizaram dispositivos de hardware controlados por Microcontrolador Arduino para a construção e o controle de um robô de auto-equilíbrio de duas rodas. Hernández, Trejo e Ordoñez (2015) utilizaram dispositivo com interface I2C no desenvolvimento de um robô de baixo custo. David *et al.* (2015) usaram o Microcontrolador Arduino com integração de dispositivos de Hardware para em um projeto de sistema para automação residencial. Castro *et al.* (2015) utilizaram o Microcontrolador Arduino no sistema de aquisição e supervisão de dados para um tribômetro rotativo do tipo pino sobre disco. Recentemente Nguyen *et al.* (2019) desenvolveram um sistema de controle de um robô recepcionista com integração de dispositivos I2C e microcontrolador Arduino. Harnett (2011) destaca que a medida que os microcontroladores se tornaram melhores, obteve-se um rápido crescimento e a base

de código fonte se expandiu, neste sentido os dispositivos de hardware de código aberto começaram a rivalizar com a instrumentação cara.

1.1 Contribuições

Este trabalho busca contribuir com os tópicos:

- Mostrar os procedimentos utilizados para instrumentação de um equipamento pino sobre o disco seguindo as recomendações da norma ASTM G99 (2017), com uso de componentes com baixo custo e plataforma de código aberto (Arduino).
- Apresentar os métodos utilizados para verificação da instrumentação, bem como os ensaios com pares tribológicos aço contra aço e aço contra alumínio e comparação dos valores de coeficiente de atrito obtidos com valores da literatura.
- Quantificação do desgaste com uso da equação de Archard para o mecanismo de desgaste adesivo com deformação plástica e correlacionar os valores buscando identificar a similaridade das interações tribológicas com os dados apresentação em Archard (1957).
- Ao final, é apresentado o coeficiente de atrito ao longo da distância de deslizamento e métricas para melhor análise do regime dinâmico do atrito ao longo da distância de deslizamento

1.2 Objetivos

A meta deste trabalho é realizar um estudo experimental técnico científico de desenvolvimento, controle, instrumentação e processamento de dados de um tribômetro tipo pino sobre o disco, seguindo as recomendações da norma ASTM G99 (2017), com implementação de rotinas computacionais e montagem do circuito para controle e aquisição de dados do equipamento com hardware de baixo custo, e realizar testes experimentais no equipamento para determinar o coeficiente de atrito e quantificar o desgaste dos pares tribológicos com a equação de Archard para mecanismo de desgaste adesivo com deformações plásticas.

1.3 Organização do trabalho

O trabalho está organizado nos capítulos:

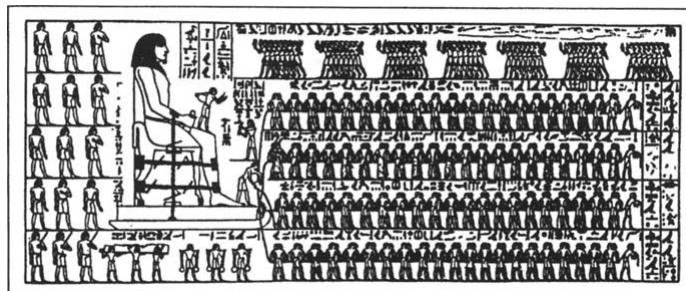
- **Capítulo 1 - Introdução:** Breve introdução sobre, sistemas tribológicos e pesquisas para caracterização tribológica, bem como a introdução ao tribômetro pino sobre o disco.
- **Capítulo 2 - Revisão da tribologia:** Primeiramente é descrito o desenvolvimento da ciência trilógica e posteriormente apresentado os conceitos tribológicos.
- **Capítulo 3 - Instrumentação do tribômetro pino sobre o disco:** Procedimentos utilizados para instrumentação do tribômetro pino sobre o disco, sendo descritos separadamente o sistema de controle do equipamento e sistema de aquisição de sinais, bem como o desenho esquemático da montagem do circuito elétrico para cada conjunto de hardware.
- **Capítulo 4 - Metodologia Experimental:** Os materiais e equipamentos utilizados para confecção, preparação das superfícies dos pares tribológicos e ensaio da dureza superficial. Métrica desenvolvida para análise do comportamento da força e coeficiente de atrito pela distância de deslizamento, e os procedimentos seguidos para ensaios laboratoriais são descritos nesta etapa.
- **Capítulo 5 - Resultados e Discussões:** Análise dos resultados obtidos na etapa experimental, demonstração dos gráficos da força e coeficiente de atrito pela distância de deslizamento e comparação do comportamento dos mesmos e valor do (μ) com dados da literatura. Também é demonstrado os gráficos da variação da temperatura pela distância de deslizamento, e calculo da taxa de desgaste para deformações plásticas e correlação entre os resultados que foram obtidos nos testes no tribômetro com os dados de Archard (1957).
- **Capítulo 6 - Considerações Finais:** Algumas conclusões acerca do estudo desenvolvido, dificuldades encontradas e sugestões de trabalhos futuros. As referências citadas e consultadas durante todo o desenvolvimento do trabalho são citadas ao final. No Apêndice são descrições complementares de alguns procedimentos desenvolvidos.

2 Revisão da Tribologia

2.1 Desenvolvimento da tribologia

Embora o termo tribologia seja desconhecido por muitos, a interação da humanidade com esta ciência vem desde milhares de anos A.C. O fogo considerado a maior conquista do ser humano na pré-história foi obtido a partir do atrito de madeira contra madeira. Entre os séculos XV e XXIV A.C, diversos avanços foram registrados no campo da tribologia, incluindo lubrificantes para reduzir o atrito e diferentes materiais de superfície para minimizar o desgaste . Possíveis lubrificantes utilizados foram água, lama e gordura processada de ovinos, bovinos e azeite misturado com pó de cal. A Figura (1) ilustra um dos mais antigos registros do século XX A.C com tentativa de redução do atrito e retrata trabalhadores arrastando um trenó com uma estátua e um dos trabalhadores despejando um fluido lubrificante para melhorar o deslizamento (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; SEIREG, 1998; BIRESAW; MITTAL, 2014; POPOV, 2017).

Figura 1: Registro de 1900 a.C. aplicação da tribologia para redução do atrito



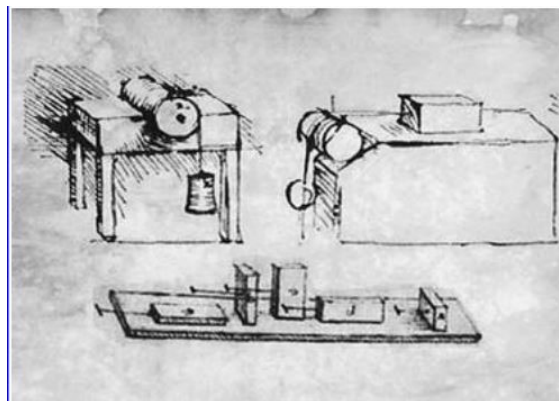
Fonte: Biresaw e Mittal (2014)

A ciência do atrito começou a ser pesquisada por Leonardo da Vinci entre os anos de 1452 a 1519, que fez contribuições inestimáveis para a ciência da tribologia atual, embora ele certamente não estivesse ciente disso. Seu trabalho sobre o atrito originou-se em estudos da resistência mecânica rotacional de eixos e parafusos. Ele se concentrou em todos

os tipos de atrito e fez uma distinção entre deslizamento e rolamento, postulando que a força do atrito entre duas superfícies sólidas que deslizam uma contra a outra é independente da área de contato entre estas superfícies e que o atrito depende da natureza dos materiais (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; SEIREG, 1998; LUDEMA, 1996; LANSDOWN, 2004; BIRESAW; MITTAL, 2014; POPOV, 2017; LUDEMA; AJAYI, 2018).

Os registros do caderno de Leonardo da Vinci em 1508 demonstraram que ele foi o primeiro a introduzir o termo "coeficiente de atrito", que é dado pela razão entre a força de atrito e a carga normal, ou seja é proporcional a carga exercida por uma superfície sobre a outra. A figura (2) demonstra esboços do caderno de Da Vinci com alguns de seus notáveis experimentos de atrito (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; SEIREG, 1998; LUDEMA, 1996; LANSDOWN, 2004; KHONSARI; BOOSER, 2008; BIRESAW; MITTAL, 2014; POPOV, 2017; LUDEMA; AJAYI, 2018).

Figura 2: Esboços do caderno de da Vinci no ano de 1480 demonstrando experimentos com atrito



Fonte: Biresaw e Mittal (2014)

John T. Desaguliers (1683-1744) tornou-se a primeira pessoa a propor o conceito de aderência do atrito. Ele afirmou que o atrito é fundamentalmente causado pela força necessária para superar as forças adesivas. Robert Hooke (1635-1703) investigou os processos que ocorreram durante o atrito de rolamento que estavam relacionados, por exemplo, à dureza das rodas e à deformação da superfície, bem como à aderência entre a roda e o solo (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; MANG; BOBZIN; BARTELS, 2011; POPOV, 2017).

Como tantas vezes acontece na história da ciência, os resultados de Leonardo da Vinci foram esquecidos e cerca de 200 anos depois redescobertos de forma independente por Guillaume Amontons (1663-1705), em um artigo publicado na Academia Real Francesa de Ciências. Consequentemente, definiu a primeira e a segunda lei do atrito de Amon-

tons (KRAGELSKII; BOBYCHIN; KOMBALOV, 1982; KARL-HEINZ; GAHR, 1987; LUDEMA, 1996; SEIREG, 1998; KHONSARI; BOOSER, 2008; BIRESAW; MITTAL, 2014; POPOV, 2017; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017; LUDEMA; AJAYI, 2018).

- Primeira lei de Amontons: A força de atrito é diretamente proporcional à carga aplicada.
- Segunda lei de Amontons: A força de atrito é independente do contato da área aparente.

O fato da força de atrito ser proporcional à carga normal foi aceita prontamente pela academia, mas a independência de atrito na área de contato foi recebida com ceticismo. O acadêmico sênior De La Hire passou a verificar a segunda lei de Amontons e confirmou sua validade. Mas, desde que Leonardo da Vinci havia relatado essencialmente as mesmas descobertas mais de 200 anos antes, seria mais sensato enunciar as leis do atrito de Da Vinci, e mencionar Amontons apenas brevemente (SEIREG, 1998; MANG; BOBZIN; BARTELS, 2011; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

O físico francês Charles Augustin de Coulomb em 1785 distinguiu ainda mais entre o atrito estático e cinético, que era independente da velocidade. Em uma de suas pesquisas sobre o atrito, Coulomb combinou análises experimentais quantitativas com matemáticas de uma maneira que era altamente incomum na época. Seu trabalho foi de relevância imediata para a prática de engenharia e sua análise tornou-se, por mais de um século, o ponto de partida para todos os estudos sérios de atrito (KHONSARI; BOOSER, 2008; BIRESAW; MITTAL, 2014; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

- Terceira lei, Coulomb: o atrito cinético é independente da velocidade de deslizamento.

A Revolução Industrial entre 1750 a 1850 foi significativa para os avanços na tribologia. Na indústria têxtil, por exemplo, a mecanização influenciou no uso de rolamentos e lubrificantes. Avanços semelhantes se deram com engenheiro mecânico James Watt, que desenvolveu o motor a vapor sendo fundamental na agricultura e ferrovia. Petrov em (1883) desenvolveu pesquisas em mancais de rolamento, demonstrando que a viscosidade é à propriedade mais importante do fluido na lubrificação. Richard Stribeck em (1902) desenvolveu pesquisas em medições de atrito com mancais. Reynolds em (1875) realizou estudos de atrito por rolamento (SEIREG, 1998; KHONSARI; BOOSER, 2008; MANG; BOBZIN; BARTELS, 2011; POPOV, 2017).

Claude Navier e George Gabriel Stokes foram outros cientistas que promoveram teorias sobre atrito, desgaste e hidrodinâmica, posteriormente, as equações desenvolvidas ficaram conhecidas como as equações de Navier-Stokes. Tower e Reynolds em (1865) desenvolveram a teoria da hidrodinâmica. Sommerfeld em (1904) realizou a solução analítica da equação de Reynold. Engler, Saybolt e Redwood entre 1884 e 1886 realizaram o desenvolvimento de viscosímetros. Heinrich Hertz em (1881) realizou análise do contato entre materiais elásticos(KARL-HEINZ; GAHR, 1987; SEIREG, 1998; KHONSARI; BOOSER, 2008; MANG; BOBZIN; BARTELS, 2011; POPOV, 2017).

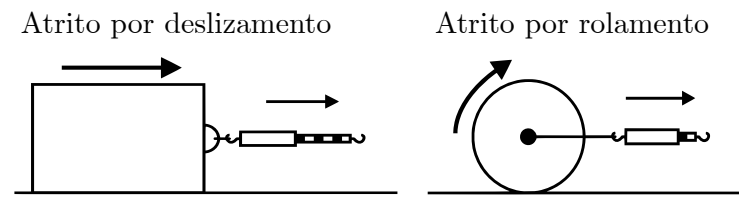
O modelo para o atrito de deslizamento com metais deriva do importante trabalho de Bowden e Tabor entre as décadas de 1930 e 1970. E determinaram que a verdadeira área de atrito é uma porcentagem muito pequena da área de contato aparente, a verdadeira área de atrito é formada pela rugosidade do material, ou seja, à medida que a força normal aumenta, mais asperezas entram em contato e a área de atrito média aumenta. Archard em (1957), concluiu que a área de contato entre as superfícies elásticas ásperas é aproximadamente proporcional à força normal (KRAGELSKII; BOBYCHIN; KOMBALOV, 1982; LUDEMA, 1996; POPOV, 2017; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

A tribologia foi formalmente identificada como um campo técnico importante no relatório publicado pelo comitê do Ministério Britânico de Educação e Ciência, presidido por Peter Jost em (1966). A Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME) adotou o termo para sua Divisão de Tribologia em (1983). A Sociedade Americana de Engenheiros de Lubrificação revisou seu nome para a Sociedade de Tribologistas e Engenheiros de Lubrificação em (1985). Muitos tribologistas famosos acreditavam que a tribologia se tornaria ou seria substituída pela engenharia de superfície (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; KHONSARI; BOOSER, 2008; KUO, 2011; POPOV, 2017).

2.2 Conceitos tribológicos

O atrito é provocado através do movimento entre interfaces, que é a força mecânica de resistência ao movimento para o atrito cinético, ou que impede o movimento para o atrito estático. Sendo o deslizamento e rolamento um dos principais tipos de movimento relativo na maioria das aplicação em engenharia. Os atritos provocados por movimento são mencionados como atrito externo, que são os pontos de contato microscópicos existentes entre duas superfícies, que causam aderência entre elas, deformação do material e ranhuras. A energia que é perdida através do atrito é devido ao calor e vibração mecânica (MANG; DRESEL, 2007). A Figura (3) ilustra dois movimentos de interface.

Figura 3: Movimentos de interface por rolamento e deslizamento

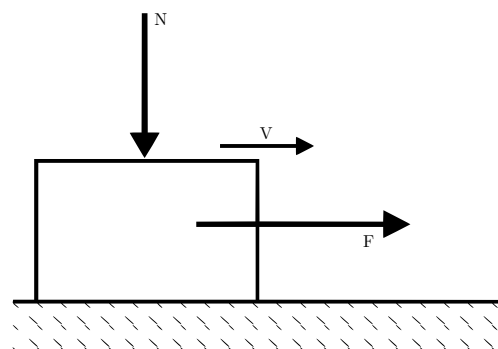


Fonte: Adaptado de Mang e Dresel (2007)

Nas clássicas contribuições de Bowden e Tabor (1939), Bowden e Tabor (1954) para atrito de deslizamento, definiram que a força de atrito pode ser obtida de duas formas, uma de adesão desenvolvida nas áreas de contato real entre as superfícies e outra através da força necessária para que ocorra a deformação das asperezas na superfície de contato, sempre na superfície de menor dureza.

Na norma D1984 (2014), define o atrito como resistência ao movimento relativo entre dois corpos em contato. E continua a definir o coeficiente de atrito como sendo a razão da força necessária para mover uma superfície sobre outra e a força normal aplicada nessas superfícies. Sendo que, onde já tenha movimento relativo é o coeficiente de atrito cinético e no instante que o movimento se inicia tem-se o coeficiente de atrito estático. A Figura 4 define o coeficiente de atrito como a razão adimensional da força de atrito e da força normal N .

Figura 4: Coeficiente de atrito



Fonte: Adaptado de Mang, Bobzin e Bartels (2011)

De acordo com a norma ASTM G40 (2017) a força de atrito é a força de resistência tangencial à interface entre dois corpos quando, sob a ação de uma força externa, um

corpo se move ou tende a se mover em relação ao outro:

$$\mathbf{F}_{at} = \mu \cdot N \quad (1)$$

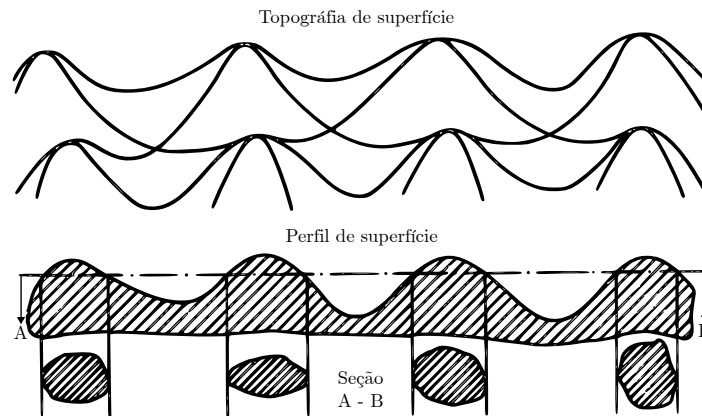
Através da Eq.(1) obtêm-se a proporcionalidade entre a força normal e força de atrito, denominado coeficiente de atrito, que geralmente é obtida à seco, ou seja, em condições não lubrificadas. O coeficiente de atrito não é uma propriedade material, mas sim uma característica do sistema. Não pode ser deduzido por cálculos, mas determinado por medições empíricas (MANG; BOBZIN; BARTELS, 2011) .

2.2.1 *Contato entre superfícies sólidas*

As superfícies de engenharia por melhor que sejam o acabamento em seu processo de fabricação, apresentam rugosidades em maior ou menor escala, como asperidades de forma complexas, sendo microscópicas ou nanoscópicas locais, que exercem uma forte influência sobre atrito e desgaste. As imperfeições e características de uma superfície real em escala atômica influenciam nas reações químicas do lubrificante com a superfície desgastada. A rugosidade superficial limita o contato entre as superfícies a uma fração muito pequena da área aparente, controlando a mecânica de contato entre os pares tribológicos e em seu desgaste resultante (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

A Figura 5 demonstra uma representação esquemática da topografia de superfície. Os perfis superficiais podem ser obtidos por seções verticais através da superfície. Já as horizontais podem ser obtidas pela topografia superficial. O contato entre dois corpos sólidos é geralmente discreto, devido à rugosidade da superfície, ou seja, ocorre em áreas de contatos em pontos individuais e está embasado na teoria molecular mecânica do atrito e desgaste a seco (KRAGELSKII; BOBYCHIN; KOMBALOV, 1982; KARL-HEINZ; GAHR, 1987).

Figura 5: Representação esquemática de irregularidades da superfície



Fonte: Adaptado de Karl-Heinz e Gahr (1987)

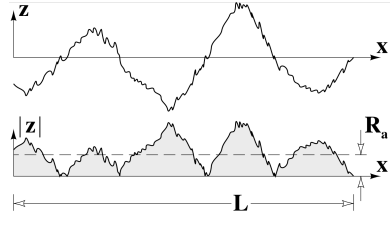
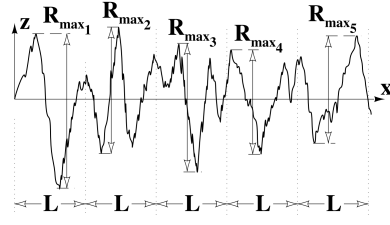
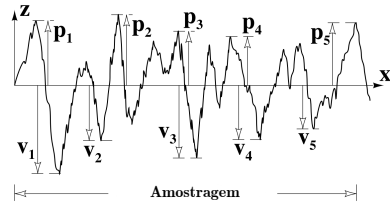
Para descrever a topografia de superfície, faz-se necessários pelo menos dois parâmetros, um que descreve a variação da amplitude das asperezas e outro como estas rugosidades variam no plano da superfície. Presume-se que o desvio superficial do plano seja um processo aleatório que pode ser descrito usando vários parâmetros estatísticos. Na Figura 6, vemos que estas características da amplitude das asperezas são parâmetros comumente descritos como a média da rugosidade (CLA ou R_a), sendo esta média aritmética para os picos de asperezas no perfil de rugosidade na linha média com relação ao eixo das ordenadas (Z), para uma aferição dentro da amostragem de dimensão (L). Por R_a representar a média da rugosidade, esta forma de aferição oculta picos de maior amplitude das asperezas, desta forma pode-se apresentar valores iguais de R_a para topografias de superfície diferentes (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

Da mesma forma outro parâmetro utilizado para rugosidade é o quadrado médio da raiz (R_{ms} ou R_q), que representa a raiz quadrada da média dos quadrados para a variação dos picos de amplitude com relação à linha média ao eixo das ordenadas (Z), dentro da aferição com amostragem de dimensão (L). Fazendo uma analogia com R_a , os problemas da média podem ser corrigidos com uso de (RMS), visto que é ponderado pelo quadrado dos picos de maior amplitude, sendo mais sensível que (R_a) a desvios da linha média (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

Do mesmo modo tem-se o valor médio da altura máxima do pico de asperezas (R_{tm} ou R_{max}), que representa o maior pico das rugosidades parciais na ordenada (Z) dentro da aferição de dimensão (l). O outro parâmetro é a média aritmética de dez valores, sendo cinco no ponto médio superior e cinco no ponto médio inferior com relação a ordenada (Z) dentro da aferição da amostragem de dimensão (L). Graficamente representa a altura

máxima e mínima do perfil de rugosidade. Do ponto de vista prático em engenharia, a aferição mais utilizada é a média da rugosidade R_a (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

Figura 6: Parâmetros para aferição de rugosidade

Rugosidade média da linha central (CLA ou R_a)	$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L z dx$	
Rugosidade quadrática média da raiz (RMS ou R_q)	$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2 dx}$	
Altura máxima de pico (R_t)	Maior amplitude de cinco picos dentro da dimensão de amostragem $R_t = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{\max_i}$	
Altura de dez pontos (R_z)	Separação média de cinco picos na parte superior e cinco na parte inferior na linha média dentro da dimensão de amostragem $R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 p_i + \sum_{i=1}^5 v_i }{5}$	

Fonte: Adaptado de Stachowiak e Batchelor (2013)

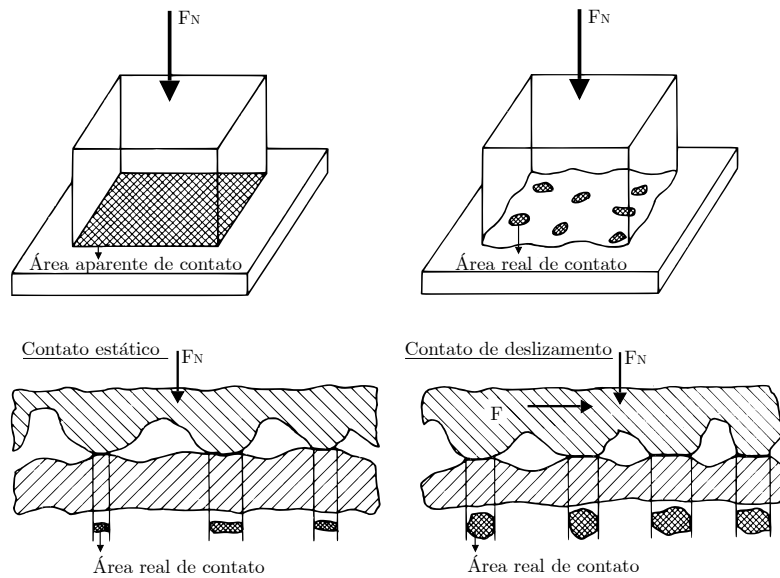
Os perfis de superfície tem variações de picos no plano horizontal e vertical, sendo de maiores ampliações no sentido vertical, devido essas variações nos planos, a superfície aparente de contato não representa as irregularidades reais da área superficial. Vale ressaltar que em avaliação de modelos para desgaste é muito importante entender que a rugosidade limita o contato entre corpos sólidos a uma porção muito pequena da área de contato aparente (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

Stachowiak e Batchelor (2013) descreve que o contato sobre a maior parte da área aparente só é encontrado sobre tensões extremamente altas que ocorrem entre rochas a profundidades consideráveis da superfície terrestre e também entre ferramentas de usinagem com a peça de trabalho. Ou seja, o contato entre corpos sólidos sobre condições

normais de operação é limitado a pequenas áreas representados pelos picos de maiores amplitudes para qualquer superfície.

Os principais processos envolvidos no atrito da superfície, isto é, formação dos novos pontos de contato, são resultantes da penetração em ambos os corpos sólidos, ocasionando na formação de micro-soldas, que ocorrem sempre sob altas pressões locais, mesmo que a carga aplicada seja baixa, pois a área total dos pontos de contato é pequena. Desta forma, a verdadeira área de contato é distribuída entre várias áreas de micro-contato. Portanto, com o aumento da carga aplicada, aumenta-se o número de pontos, em vez do tamanho "médio" da área de contato, ou seja, o aumento na área de contato real ocorre principalmente devido ao aumento de vários pontos de contato e não do seu tamanho (KRAGELSKII; BOBYCHIN; KOMBALOV, 1982; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013). Uma representação entre sólidos é mostrada figura (7)

Figura 7: Área aparente e área real de contato



Fonte: Adaptado de Karl-Heinz e Gahr (1987)

Bowden e Tabor (1939) mostraram que uma grande variação pode existir entre as área de contato aparente e real entre duas superfícies sólidas planas sendo pressionadas uma sobre a outra. Kragelskii, Bobychin e Kombalov (1982) demonstra que o atrito da superfície ocorre em pontos de contatos individuais com dimensões que podem variar de 0,1 a 30 μm dependendo das asperezas formadas durante o deslizamento. Os pontos de contato surgem como resultado da deformação das asperidades podendo ser por penetração ou esmagamento, sendo em deformação elástica ou plástica.

Bowden e Tabor (1954) apresentaram uma teoria inicial que a área verdadeira de contato surge através da deformação plástica das asperezas. Whitehouse e Archard (1970) verificaram que uma grande proporção do contato entre as asperidades é totalmente elástica. Esta relação entre a verdadeira área de contato e a carga aplicada é extremamente importante, visto que afeta o atrito e desgaste.

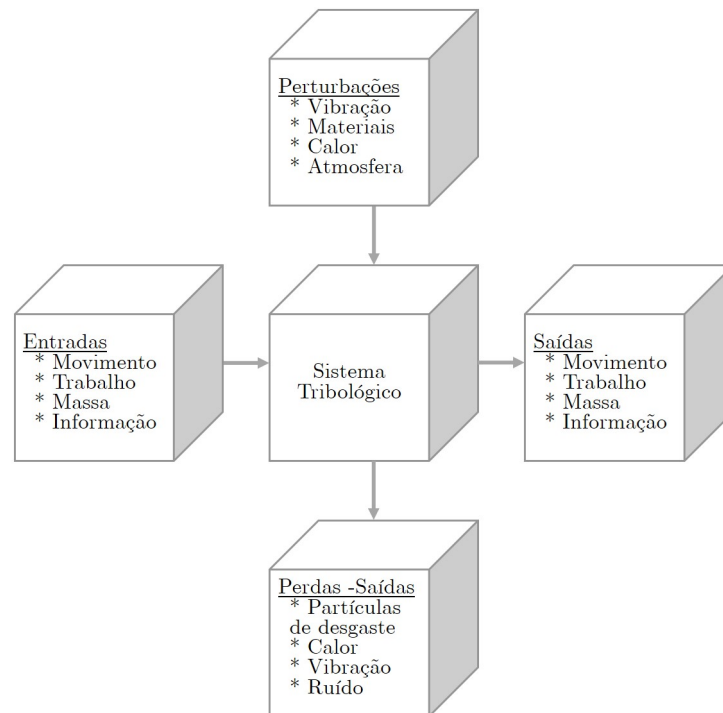
2.2.2 *Sistema tribológico*

Para melhor entender os problemas dos sistemas tribológicos quanto ao atrito, desgaste e lubrificação, os pesquisadores procuram compreender e diagnosticar os tipos de mecanismos envolvidos, desenvolver ou usar um teste para selecionar materiais ou lubrificantes alternativos, identificar a causa-raiz que poderia prolongar a vida útil, design aprimorado e maior confiabilidade dos componentes (BLAU, 2016). A norma ASTM G40 (2017) define um tribossistema como qualquer sistema que contenha um ou mais triboelementos, incluindo todos os fatores mecânicos, químicos e ambientais relevantes para o comportamento tribológico. De acordo com outras definições da norma:

- triboelemento; Consiste em um, dois ou mais corpos sólidos que compreendem um contato por deslizamento, rolamento ou abrasivo, ou um corpo sujeito a impacto ou cavitação (cada triboelemento contém uma ou mais tribosuperfícies).
- tribosuperfícies; é descrita como qualquer superfície de corpo sólido que esteja em contato móvel com outra superfície ou encontra-se sujeita a impacto ou cavitação.

Karl-Heinz e Gahr (1987) elaborou um modelo de entrada e saídas para facilitar a visualização da interação de diferentes mecanismos em um sistema tribológico, a relação entre uma entrada útil e uma saída útil pode ser considerada como a função técnica de movimento, trabalho (mecânico, hidráulico, pneumático, químico, elétrico ou térmico), materiais ou massa e informações. Na Figura 8 pode ser observado o esquemático de entrada e saída de um tribossistema.

Figura 8: Descrição geral de entrada e saída de um tribossistema



Fonte: Adaptado de Karl-Heinz e Gahr (1987)

No esquemático da figura 8 como exemplo para os quatro principais grupos de entradas e saídas, tem-se os rolamentos e articulações humanas (movimento), engrenagens e embreagens (trabalho), bombas centrífugas e trituradores (materiais) os mecanismos de came são amplamente utilizados em eixos de comandos de válvulas em motores de combustão interna (informações). Como exemplo de entradas indesejáveis tem-se vibração, calor, material (por exemplo, sujeira) e umidade (ou, em geral, uma atmosfera quimicamente reativa). O atrito e o desgaste resultam em saídas indesejáveis como, partículas de desgaste, calor, vibração e ruído (KARL-HEINZ; GAHR, 1987).

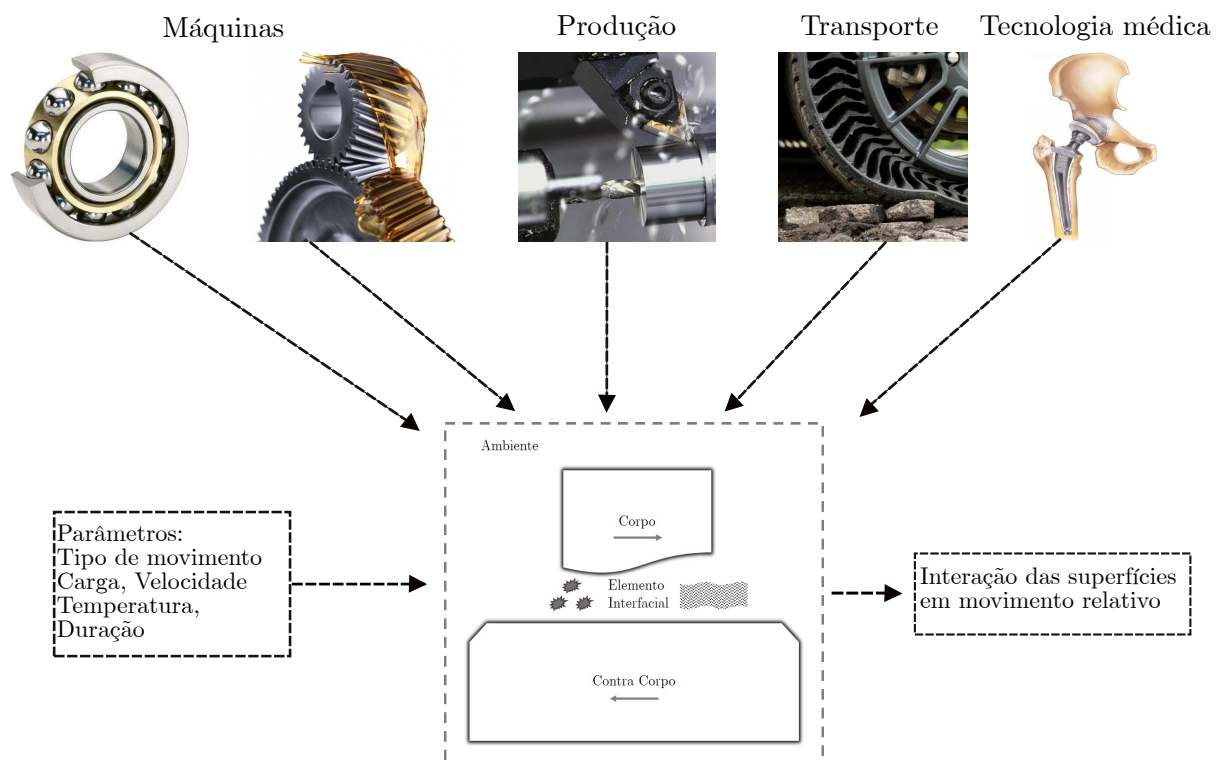
Para encontrar soluções em sistemas tribológicos faz-se necessário a identificação exata do problema, o sistema deve ter a descrição detalhada das variáveis que envolvem cada componente mecânico, análise das estruturas internas, seus elementos, suas propriedades e interações que se encontram, de modo geral, é alterada com o tempo através da ação de atrito e desgaste, podendo resultar em uma mudança no comportamento funcional do sistema, seja desejado em funcionamento ou indesejado com dano (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; BLAU, 2016).

As variáveis são o tipo de movimento, as forças envolvidas, temperatura, velocidade e a duração. Parâmetros tribométricos, como dados de atrito, desgaste e temperatura,

podem ser coletados da área aparente de contato. O desgaste tribológico é o resultado de vários critérios como geometria de superfície e contato, carga superficial ou espessura do lubrificante (MANG; DRESEL, 2007).

A Figura 9 mostra de forma simplificada um tribossistema geral de acordo com a DIN 50320 (1979), bem como exemplos de tribossistemas em várias áreas tecnológicas (TOTTEN, 2017). A estrutura do sistema é determinada pelos elementos, suas propriedades e as interações entre eles. De modo sucinto, esta análise sistêmica busca identificar parâmetros tribológicos, que podem conter diferentes mecanismos de desgaste (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; BLAU, 2016).

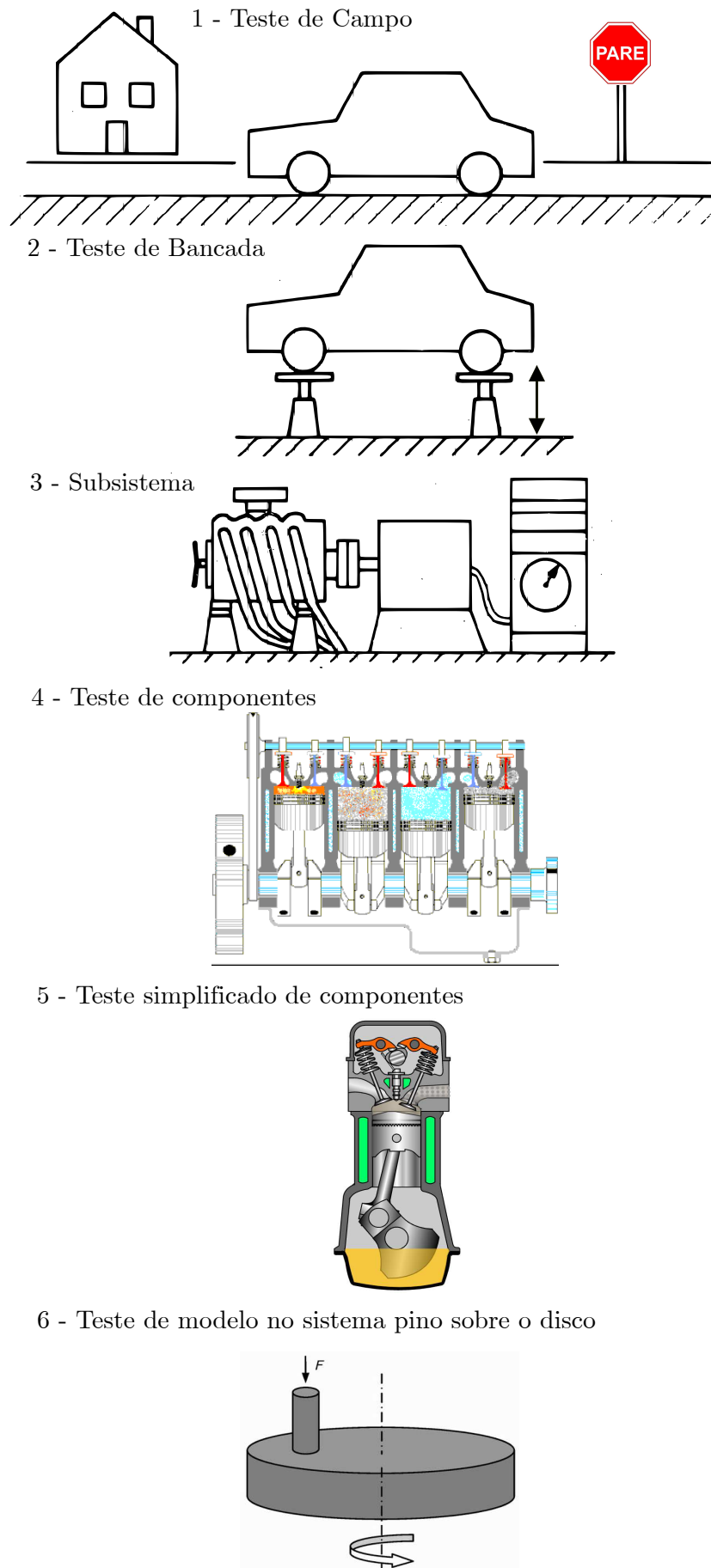
Figura 9: Exemplos de tribossistemas em várias áreas tecnológicas



Fonte: Adaptado de Totten (2017)

O teste tribológico envolve o estudo do atrito, lubrificação e desgaste. É usada uma variedade muito grande de equipamentos de teste e houve poucas tentativas de padronização ou correlação entre diferentes equipamentos de teste. De acordo com DIN 50322 (1986), podem ser distinguidas seis categorias diferentes de tribo-testes, conforme é apresentado na Figura 10.

Figura 10: Classificação de diferentes tipos de testes tribológicos



A extensão em que os dados tribológicos podem ser extrapolados para o serviço diminui do teste de campo para o teste de modelo muito simplificado. Os testes de campo são realizados por longos períodos e sob condições muito semelhantes às praticadas. Os testes de bancada são executados em condições de laboratório que resultam em algumas simplificações do ambiente ou variáveis operacionais (KARL-HEINZ; GAHR, 1987).

No triboteste em subsistema reduzido, variáveis como vibrações, temperatura e ambiente são substancialmente diferentes das condições na bancada ou no teste de campo. Os testes de componentes representam uma simplificação adicional. A extensão da simplificação pode variar em diferentes etapas. Na Figura 10 o sistema, ou seja, um carro dirigido, foi reduzido a um teste de motor, a um teste de 4 cilindros, a um teste apenas de 1 cilindro e, finalmente, ao teste no tribômetro modelo de pino sobre o disco. O teste do modelo pode ser projetado para simular a interação tribológica entre anéis de seguimento, êmbolo e camisa (KARL-HEINZ; GAHR, 1987).

O teste do modelo é realizado em curtos períodos e sob cargas ou velocidades aumentadas para testar o comportamento tribológico de materiais ou lubrificantes sob condições extremas. O tempo de teste é frequentemente reduzido aumentando a verdadeira área de contato entre os tribo-elementos em interação. Isto pode ser feito através do aumento da pressão superficial ou da lubrificação reduzida. A redução dos tempos de teste pelo aumento do carregamento em um teste de modelo pode tornar a transferência dos dados para o serviço real incerta (KARL-HEINZ; GAHR, 1987).

No teste do modelo, não apenas as taxas de desgaste diferentes podem ocorrer, mas também os diferentes mecanismos de desgaste o que pode ser um grande problema. A transferibilidade dos resultados tribológicos do teste de modelo para o serviço só pode ser esperada se nos dois sistemas tribológicos (modelo e serviço) tiverem as mesmas condições de carregamento, a mesma estrutura do sistema tribos e o mesmo mecanismo de desgaste predominarem (KARL-HEINZ; GAHR, 1987).

A estrutura de um sistema tribos consiste nos quatro elementos mostrados na Figura 9, ou seja, corpo sólido, contra-corpo, elemento interfacial e ambiente. O melhor equipamento de teste são os testes de campo de alto custo, longos períodos de teste e dificuldades no controle das condições operacionais ou na alteração dos parâmetros de teste (KARL-HEINZ; GAHR, 1987).

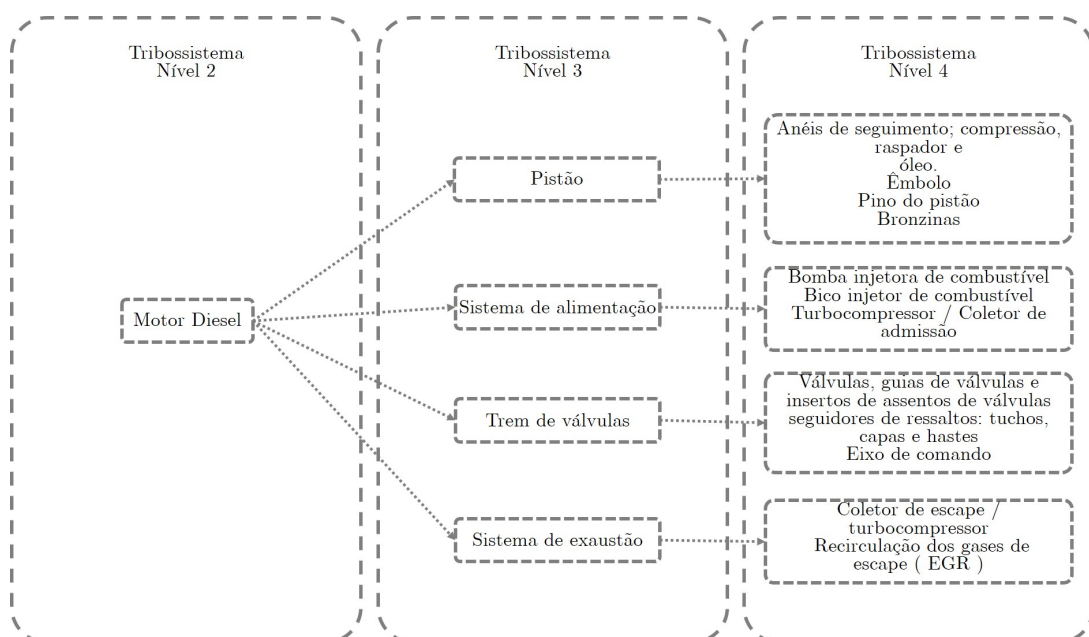
Os testes de modelo são vantajosos para investigações científicas devido à alta reprodutibilidade dos parâmetros de teste e, portanto, dos resultados dos testes. Em um teste modelo, as condições experimentais são facilmente alteradas e o custo do teste é relativa-

mente pequeno. A transferibilidade dos resultados dos testes de modelo para a prática deve ser verificada cuidadosamente para cada sistema de tribos (KARL-HEINZ; GAHR, 1987).

Um tribossistema complexo que contém subconjuntos tribológicos pode ser exemplificado por um sistema de transmissão automática automotiva, que consiste em um conversor de torque, um conjunto de engrenagens planetárias, embreagens, faixas, e fluido lubrificante, que inclui uma bomba e o corpo de válvula. Qualquer montagem de engrenagens individuais (triboelements) podem ser consideradas um sistema tribos, assim como uma embreagem e conjunto de rolamentos que operam dentro dessa transmissão (BLAU, 2016; MANG; DRESEL, 2007).

A Figura 11 exemplifica como um conjunto mecânico de sistema tribológico complexo, pode ser particionado em níveis de tribossistemas menores para melhor entendimento da interação de cada triboelemento, com seus próprios requisitos funcionais, ambiente, condições operacionais e materiais. Neste caso, o nível 1 não demonstrado na figura seria o veículo inteiro. O nível 2 demonstra apenas o subtribossistemas do motor de combustão interna ciclo diesel. Podendo ter outros subtribossistemas como frenagem, dirigibilidade, transmissão, componentes externos do motor como alternador, ar condicionado e outros periféricos (BLAU, 2016).

Figura 11: Exemplo dos níveis de tribossistemas em um motor de ciclo diesel



Fonte: Adaptado de Blau (2016)

Devido ao grande número de interfaces em atrito envolvidos, vários tipos de mecanismos de desgastes podem ocorrer dentro do sistema tribológico. Por exemplo, anéis de seguimento no nível 4, esta submetido à micro-soldagem, impacto, balanço, deslizamento circunferencial e atrito. A condução do processo e análise do sistema tribológico não se limita apenas a descobrir o principal mecanismo de desgaste ou dano superficial, mais sobretudo, todos os fatores de influência relevante a qual o componente ou conjunto mecânico será submetido (BLAU, 2016).

A descrição do atrito como causa de desgaste e perdas de energia sempre apresentou problemas significativos devido à complexidade dos sistemas tribológicos. Também não há nomenclatura reconhecida internacionalmente. O atrito comumente é descrito pela relação da combinação do par de materiais e condições de lubrificação (MANG; DRESEL, 2007).

Blau (2016) distingue os tribossistemas em categorias abertas e fechadas, onde em sistemas abertos têm o potencial de introduzir contaminantes ou espécies químicas no sistema durante a operação. Os britadores de rochas recebem um fluxo contínuo de material, podendo conter corpo sólido inesperado como porcas e parafusos por exemplo. Bomba de fluido da transmissão que opera com recirculação do óleo em regime permanente em um sistema totalmente vedado é considerado um tribossistema fechado.

Sistemas podem conter características abertas e fechadas, um motor de combustão interna, que contem sistema de admissão, refrigeração, bomba de óleo, é mais sucessível a contaminação por partículas sólidas, quer seja pelo filtro de ar ou linha de combustível, provocando desgaste excessivo e reduzindo a vida útil dos componentes mecânicos. Ambos os sistemas abertos, fechados e híbridos são sucessíveis a contaminação por partículas indesejáveis.

Em pesquisas de laboratório em bancada experimental, a definição de um sistema tribológico consiste no aparato de teste denominado tribômetro, materiais, lubrificantes e o ambiente atmosférico que o mesmo se encontra. A simulação de cada triboelemente é realizada em um tribômetro propriamente dito, afim de determinar o material ou lubrificante para a aplicação prática em projeto de engenharia (BLAU, 2016).

2.2.3 *Mecanismos de desgaste*

O desgaste é comumente descrito como a remoção progressiva do material superficial em movimento relativo. Mang e Dresel (2007) demonstraram através de pesquisa científica

que 0,4% do produto interno bruto poderia ser economizado em termos de energia nos países industrializados ocidentais se os conhecimentos tribológicos atuais, ou seja, a ciência do atrito, desgaste e lubrificação, fossem aplicados na redução do atrito e desgaste.

Se as superfícies sólidas que estão em movimento relativo, não forem separadas de alguma forma, irá ocorrer desgaste excessivo comprometendo o componente mecânico. Os lubrificantes são utilizados para separar as superfícies de contato em movimento relativo reduzindo o atrito e consecutivamente o desgaste. Apesar de muito importante, a tribologia dos lubrificantes não será discutida neste trabalho, mais sim o desgaste resultante através do contato direto entre superfícies.

Conforme mencionado na subseção do contato entre superfícies sólidas, os fenômenos de desgaste são fortemente influenciados pelo fato de que a maioria das superfícies de engenharia contém asperezas, e, portanto, a interação superficial real é muito menor que a área aparente de contato. Além disso, o comportamento do desgaste também é influenciado pelo tribossistema que os triboelementos estão envolvidos. Muitos mecanismos de desgaste foram identificados, de acordo com a DIN 50320 (1979) e quatro mecanismos básicos de desgaste e qualquer combinação deles, estão envolvidos nos processos de desgaste, estes mecanismos são:

Adesão: Formação e quebra de ligações adesivas interfaciais, por exemplo, junções soldadas a frio.

Abrasão: Remoção de material devido a arrancamento.

Fadiga superficial: Fadiga e formação de trincas nas regiões superficiais devido a ciclos tribológicos com tensões cíclicas, resultando em separação de material.

Reação triboquímica: Formação de produtos de reação química como resultado de interações químicas entre elementos do tribossistema iniciado por ação tribológica.

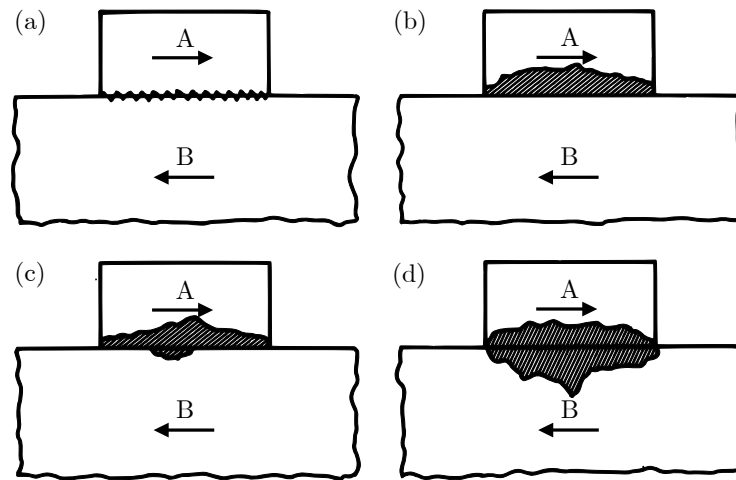
A seguir será discorrido com maiores detalhes o conceito referente a estes mecanismos.

Desgaste adesivo

O desgaste adesivo ocorre quando dois corpos sólidos estão em contato através do movimento relativo, em condições lubrificadas ou não. A adesão ocorre nos picos de contato das asperezas, que sofrem altas pressões resultando em deformação plástica, ocasionando em transferência do material de uma superfície para a outra, processo que é frequentemente mencionado como solda a frio.(KARL-HEINZ; GAHR, 1987; MANG; DRESEL, 2007; BHUSHAN, 2013; POPOV, 2017). A Figura 12 ilustra o mecanismo de desgaste

adesivo.

Figura 12: Mecanismo de desgaste adesivo



Fonte: Adaptado de Karl-Heinz e Gahr (1987)

Na figura (12) tem-se (a) ruptura das asperezas na tribo superfície, (b) a interface do material inferior B aderindo ao material de menor dureza A, (c) Maior adesão do material de menor dureza A mais também do contra corpo B, (d) adesão de dois materiais de igual dureza.

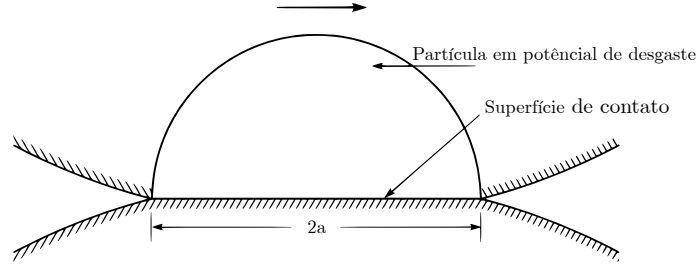
À medida que o deslizamento continua um fragmento da superfície que foi aderido no outro material, pode ser transferido novamente para superfície original. Simultaneamente, esse atrito provoca altas temperaturas, que juntamente com as forças normais e tangenciais, permitem a ligação atômica entre os dois corpos, que passam a ter uma adesão de maior resistência (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; MANG; BOBZIN; BARTELS, 2011; BHUSHAN, 2013; POPOV, 2017).

Por isso, a nova transferência de material por esse mecanismo de desgaste, não acontece na mesma interface inicial, mais sim, abaixo da superfície do material de menor dureza, que leva a formação de fragmentos de desgaste. A resistência dos materiais e estrutura cristalina, tem forte influência sobre a adesão nas superfícies de contato, bem como a carga aplicada, contaminação e rugosidade superficial (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; MANG; BOBZIN; BARTELS, 2011; BHUSHAN, 2013; POPOV, 2017).

Archard (1953) derivou uma expressão teórica para a taxa de desgaste adesivo. Considere duas superfícies em contato por deslizamento sob carga aplicada F_n . Suponha que durante uma interação de aspereza, as asperidades se deformam plasticamente sob a carga aplicada e que, em cada evento de unidade, exista uma probabilidade definida

de que uma partícula de desgaste será produzida. Além disso, considere asperidades de forma hemisférica e um raio médio de acordo com a Figura 13.

Figura 13: Esquema de uma partícula de desgaste hemisférica por deslizamento



Fonte: Adaptado de Bhushan (2013)

Agora assumimos que esse contato de asperidade resulta em uma partícula gasta de volume δV_w . A dimensão desta partícula gasta será diretamente proporcional ao tamanho do contato. O exame físico das partículas de desgaste mostram que as partículas geralmente têm comprimentos aproximadamente iguais em três dimensões. Assim, espera-se que δV_w seja proporcional a a^3 . Se uma partícula é considerada de forma hemisférica com raio igual ao raio de contato, então:

$$\delta V_w = \frac{2}{3}\pi a^3 \quad (2)$$

Além disso, assumindo que a carga máxima normal δF_n suportada pela aspereza deformando plasticamente é dada por;

$$\delta F_n = \pi a^2 H \quad (3)$$

sendo, H é a menor dureza do componente no par tribológico. Por fim, supõe-se que o contato permaneça existente por uma distância deslizante δL igual $2a$, após a qual ele é quebrado e a carga é absorvida por um novo contato:

$$\delta L = 2a \quad (4)$$

A quantidade de material desgastado em um sistema tribológico é dada em relação à duração e extensão do contato. Especificamente, uma medida comum de desgaste é o volume de material removido por distância de deslizamento. Considerando um sistema tribológico em que um volume v do componente de menor dureza do par tribológico é

removido através do mecanismo de desgaste adesivo no tempo para uma distância de deslizamento igual a L . O volume de material desgastado por unidade de distância de deslizamento é descrito como:

$$\omega = \frac{v}{L} \quad (5)$$

no qual, o volume é descrito como:

$$v = \frac{m}{\rho} \quad (6)$$

Sendo, a taxa expressa possui unidade de área da qual é comparada com os valores obtidos na taxa de desgaste da área real de contato do par tribológico A_r , para deformações plásticas é dada por:

$$A_r = \frac{F_n}{H} \quad (7)$$

no qual F_n é a carga aplicada e H é a menor dureza do componente no par em atrito. Portanto, a proporção do desgaste pela relação do volume de material removido por unidade de distância de deslizamento e área real de contato, é denominada de constante de proporcionalidade adimensional. Totten (2006) define a constante como coeficiente de desgaste k , apresentada como:

$$k = \frac{v/L}{F_n/H} = \frac{\omega}{A_r} = \left[\frac{m^3/m}{N/(N/m^2)} \right] \quad (8)$$

Ou,

$$k = \frac{v \cdot H}{F_n \cdot L} \quad (9)$$

Algumas interpretações físicas podem ser dadas ao coeficiente K . Primeiro, uma vez que K é a razão de duas áreas, a área desgastada A_w e a área real de contato A_r . Pode-se assim interpretar K como a fração da área real de contato A_r removida pelo desgaste. Considere um sistema tribológico que consiste em uma superfície plana de maior dureza e outra superfície áspera de um material mais macio com asperidades idênticas. Supondo que as superfícies entrem em contato entre as asperezas. Portanto, o coeficiente de desgaste representa o número n dessas asperidades das quais o material é removido formando

detritos de desgaste:

$$k = \frac{A_\omega}{A_r} \quad (10)$$

De acordo com a literatura os valores geralmente obtidos para o coeficiente de desgaste k são baixos, indica que, embora todos os contatos de aspereza contribuam para o atrito, apenas uma fração muito pequena de contatos resulta em desgaste. Portanto, o atrito é determinador através das interações superficiais, já o desgaste é determinado pela chance dos contatos entre as asperidades resultar em ruptura. Observe também que $(F_n / H) L$ tem dimensões de volume. Isso representa o volume total da zona plasticamente deformada sob a superfície de uma área gasta, V_p após deslizar por uma distância L :

$$k = \frac{V_\omega}{V_p} \quad (11)$$

Somente uma pequena fração das interações de contato resulta em partículas desgastadas, portanto, K representa a proporção do volume deformado plasticamente que é removido pelo processo de desgaste:

Através das equações (2) (3) e (4) obtêm-se o volume de material removido por unidade de distância de deslizamento que é dado por:

$$V_\omega = \frac{\delta V_\omega L}{\delta L} = \frac{1}{3} \frac{F_n L}{H} \quad (12)$$

De acordo com Archard (1953) apenas uma fração de $k = k/3$ em todos os encontros das asperidades produzem partículas de desgaste. Um modelo aplicado ao mecanismo adesivo pressupõe que o desgaste é o resultado da adesão entre asperidades seguida de fratura. Um primeiro modelo simples de desgaste adesivo afirma que o volume de material desgastado removido de V_ω como resultado de uma interação tribológica é diretamente proporcional ao carregamento F_n e também à distância total de deslizamento L . No entanto, como menos desgaste é observado quando a dureza do membro de menor dureza do par tribológico aumenta, V_ω também pode ser considerado inversamente proporcional à dureza H do material que está sendo desgastado (ARCHARD, 1953; ARCHARD; HIRST, 1956; ARCHARD, 1986). Portanto, o volume de material removido por distância

de deslizamento denominado taxa de desgaste V_ω é descrito em $[m^3]$ ou $[mm^3]$ como:

$$V_\omega = k \frac{\mathbf{F}_n \cdot \mathbf{L}}{\mathbf{H}} = k \left[\frac{N \cdot m}{\left(\frac{N}{m^2}\right)} \right] \quad (13)$$

Ludema e Ajayi (2018) e Rahnejat (2010) demonstram a equação para taxa de desgaste proposta por Archard (1953) de uma forma bastante conveniente dada em função da velocidade de deslizamento e tempo $[m/s]$ podendo ser em $[m^3/s]$ ou $[mm^3/s]$ representada por ψ que é a soma de todas as interações superficiais, enquanto a carga total é a soma de todas as cargas suportadas por asperidades individuais:

$$\psi = k \frac{\mathbf{F}_n \cdot \mathbf{V}_t}{\mathbf{H}} = k \left[\frac{N \cdot \left(\frac{m}{s}\right)}{\left(\frac{N}{m^2}\right)} \right] \quad (14)$$

As principais conclusões apresentadas em Archard (1953) que são derivadas da teoria para o desgaste adesivo de deformação plástica são:

- A taxa de desgaste é proporcional à carga.
- A taxa de desgaste é independente da área aparente de contato.
- Desde que K e p_m permaneçam constantes, a taxa de desgaste é independente da velocidade do deslizamento.
- O valor teórico da taxa de desgaste é independente do modelo usado para representar as superfícies.

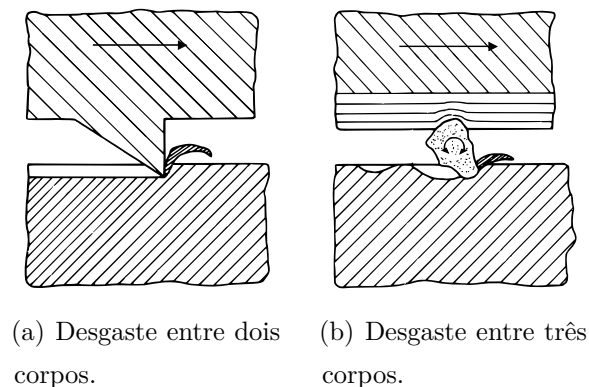
Archard (1953) afirma que a primeira e segunda lei para taxa de desgaste são verdadeiras e podem ser encontradas facilmente na prática. Porém, para terceira o autor relata que não obteve evidências experimentais para uma melhor discussão e afirmação da teoria. Para desgaste adesivo com deformação elástica, as equações foram desenvolvidas por Archard (1957) e reescritas em Bhushan (1996) e não são abordadas neste trabalho.

Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo é a remoção do material de uma superfície por outra de maior dureza que colide ou se move ao longo da superfície sob carga. Uma partícula de maior dureza pode ser o produto do processamento, fragmento de desgaste endurecido pelo

trabalho, ou surgir da entrada accidental de partículas duras, como impurezas, da parte externa do sistema tribológico. Picos de asperezas em superfícies usinadas normalmente podem atuar como partículas duras se a superfície for de maior dureza que a contra-superfície. A Figura 14 ilustra o mecanismo de desgaste abrasivo entre dois e três corpos (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; MANG; DRESEL, 2007).

Figura 14: Mecanismo de desgaste abrasivo



Fonte: Adaptado de Karl-Heinz e Gahr (1987)

O desgaste abrasivo pode ser classificado como abrasão de dois ou três corpos, de acordo com a Figura 14. Na abrasão de dois corpos, as partículas abrasivas se movem livremente sobre a face do material, como a areia deslizando sobre uma calha. Na abrasão de três corpos, as partículas abrasivas atuam como elementos interfaciais entre o corpo sólido e o contra corpo (KARL-HEINZ; GAHR, 1987).

Os experimentos realizado em Rabinowicz, Dunn e Russell (1961) demonstraram que as taxas de desgaste abrasivo para abrasão de três corpos são cerca de dez vezes menores com relação a abrasão de dois corpos, provavelmente porque as partículas ficam 90% do seu tempo girando e 10% realizando abrasão.

Enquanto em Karl-Heinz e Gahr (1987) propõe que o desgaste é cerca de uma a duas ordens de magnitude menor na abrasão de três corpos com relação à abrasão de dois corpos. Pois, apenas uma pequena proporção das partículas interfaciais provocam desgaste, devido as variações nos ângulos de contato. Bhushan (2013) propõe que o coeficiente de atrito durante a abrasão de três corpos é geralmente menor que em dois corpos, em um fator de até dois.

Um exemplo comum desse problema é o desgaste em componentes de colhedoras no setor sucroalcooleiro. A extensão do desgaste abrasivo é muito maior do que se pode

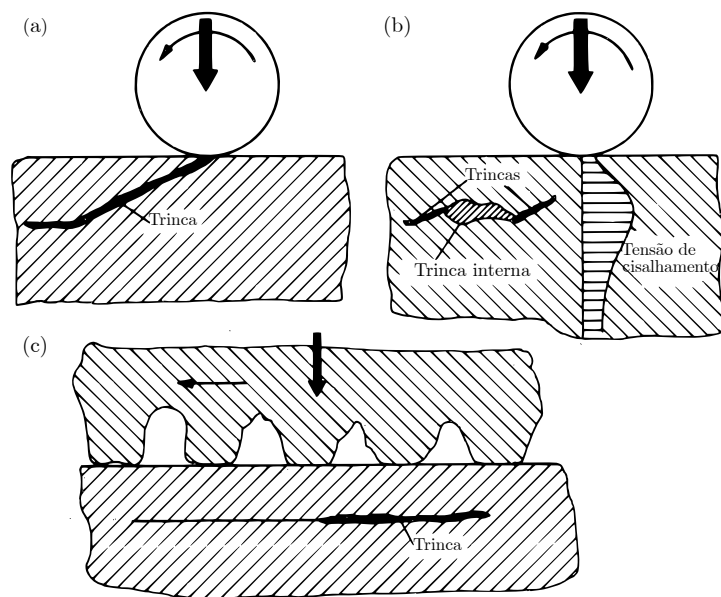
perceber. Qualquer material, mesmo que a maior parte seja macia, pode causar desgaste abrasivo se houver partículas duras. Por exemplo, um material orgânico, como a cana-de-açúcar, está associado ao desgaste abrasivo no corte de base, facão picador, pás do extrator primário e secundário, devido à pequena fração de sílica presente nas fibras das plantas (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013).

As equações para este mecanismo de desgaste foram desenvolvidas por Rabinowicz, Dunn e Russell (1961) que apresentou boa reprodutibilidade para ambos mecanismos de dois ou três corpos. No entanto, as taxas de desgaste são menores em cerca de uma ordem de magnitude para abrasão de três corpos.

Fadiga de superfície

Em contatos bem lubrificados, a adesão entre as duas superfícies é insignificante, mas ainda há uma taxa significativa de desgaste. O contato entre as asperezas acompanhadas por tensões locais muito altas são repetidos várias vezes durante o atrito por deslizamento e rolamento, provocando surgimento de trincas internas na microestrutura e sua subsequente propagação por fadiga devido cargas cíclicas (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; MANG; DRESEL, 2007; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2013). A Figura 15 ilustra o mecanismo de desgaste por fadiga.

Figura 15: Formação e propagação de trincas na fadiga superficial



Fonte: Adaptado de Karl-Heinz e Gahr (1987)

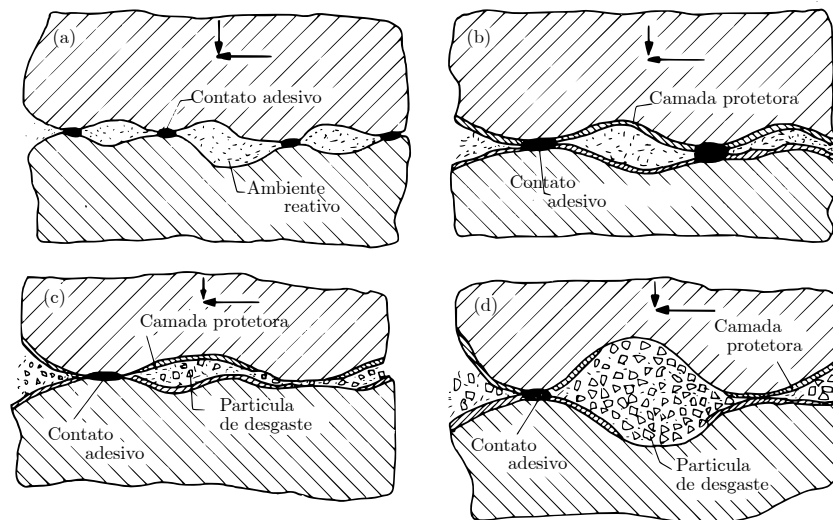
Esse mecanismo de desgaste pode ser caracterizado pela formação de trincas e descação do material provocado pela carga alternada repetida nas superfícies sólidas. Embora as tensões críticas por fadiga estejam em sua maioria na microestrutura interna, é possível iniciar deformação superficial através da interação mecânica e química pelo movimento relativo, em conexão com os mecanismos de adesão e abrasão (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; MANG; BOBZIN; BARTELS, 2011).

Com o deslizamento ou rolamento repetido em vários ciclos as asperidades de maior durezas podem provocar trincas superficiais e sua subsequente propagação, podendo também ser provocada pelo elemento interfacial, como lubrificante ou partículas solidas. Muito antes da formação de trincas, a fadiga do material já se torna aparente na microestrutura, tendo como o pré-requisito à deformação plástica do material, quando a carga aplicada excede o limite elástico, e a estrutura cristalina passa a sofrer deformação plástica (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; MANG; BOBZIN; BARTELS, 2011). As equações para esse mecanismo de desgaste são demonstradas em (BHUSHAN, 2013).

Reações tribo químicas

As reações químicas que ocorrem em condições tribológicas são chamadas de tribo químicas, este mecanismo de desgaste pode ser caracterizado pelo atrito entre as asperezas de duas superfícies sólidas que reagem com o meio ambiente, que pode ser gasoso ou líquido. O processo de desgaste acontece por remoção e formação contínua de camadas reativas com a superfície de contato. Na presença de oxigênio atmosférico, os detritos de desgaste consistem basicamente de óxidos que foram formados na superfície e removidos por atrito (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; MANG; DRESEL, 2007). A Figura 16 ilustra o mecanismo de desgaste devido há reações tribo químicas.

Figura 16: Mecanismo de desgaste por reações triboquímicas



Fonte: Adaptado de Karl-Heinz e Gahr (1987)

De acordo com Karl-Heinz e Gahr (1987) o desgaste tribo químico resulta na remoção de produtos metálicos e de reação química das superfícies em contato, conforme demonstrado na figura (16), os mecanismos de desgaste para reações tribo químicas podem ser divididos em quatro categorias:

- (a) O contato metálico entre asperezas superficiais, levam a remoção de material devido à adesão, pequenas partículas desses desgastes podem ser oxidadas.
- (b) A reação química dos metais com o meio ambiente resulta em camadas de proteção da superfície que reduzem o contato metálico.
- (c) Ruptura das camadas de proteção superficial são ocasionados devido à alta pressão local nos micro contatos ou micro fadiga que resultam em partículas não metálicas.
- (d) As partículas providas de desgastes metálicos e não metálicos podem atuar como mecanismo de desgaste abrasivo e torna as superfícies mais ásperas. A nova formação de camadas protetoras da superfície pode suavizar as superfícies novamente.

As reações tribo químicas provocam alterações nas tribo superfícies. Em contraste com a adesão, neste caso, ocorre uma reação química na superfície com o meio ambiente e ou com o meio intermediário, e não com a outra superfície em contato. Do mesmo modo difere da corrosão, pois as reações tribo químicas ocorrem somente na superfície

de contato, durante o movimento relativo simultâneo. Ao mesmo tempo, as camadas de reação ocorrem naturalmente nas superfícies do material e são removidas através da carga aplicada, tal que, a superfície que é submetida a maior tensão superficial fica exposta a reações tribo químicas como tribo oxidação (MANG; DRESEL, 2007; MANG; BOBZIN; BARTELS, 2011).

2.2.4 *Ensaaios tribológicos*

Ensaaios tribológicos dependem de vários fatores, como o tipo de movimento relativo e seus mecanismos de desgaste que descrevem as interações superficiais entre os materiais. Para cada tipo de processo de desgaste, técnicas diferentes de ensaios devem ser aplicadas. A razão para uma grande variedade de parâmetros de ensaio em testes experimentais é justamente a grande variedade de mecanismo de desgaste que ocorrem na prática (KARL-HEINZ; GAHR, 1987).

A seleção de um tribo-teste depende não apenas do mecanismo que está sendo investigado, mas também do objetivo do teste. O tipo de teste é importante para a caracterização de materiais e lubrificantes ou para a seleção de materiais para uma aplicação específica. Quanto à classificação do melhor aparato de teste para ensaio tribológico, depende inicialmente do tipo de atrito envolvido no tribosistema (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; BHUSHAN, 2000).

O atrito por rolamento e deslizamento são os mais comuns e é de grande interesse devido a sua ocorrência comum em diversos elementos de máquina, contudo, o atrito em si não determina os mecanismos de desgaste envolvidos no tribosistema, porém, refere-se aos tipos de contato entre as superfícies em movimento relativo. Deste modo, vários mecanismos de desgaste podem existir durante a interação interfacial (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; BHUSHAN, 2000).

Devido à grande variedade de interações superficiais e tipos de danos superficiais que podem ocorrer em contatos por deslizamento, alterações aparentemente pequenas nas condições de teste podem levar a mudanças radicais e nítidas nos mecanismos dominantes de desgaste e nos valores associados de atrito e desgaste (LUDEMA, 1996; BHUSHAN, 2000).

A interpretação de resultados dos testes de desgaste por deslizamento é geralmente muito mais difícil do que por abrasão ou erosão. O contato por deslizamento tem uma variedade de fenômenos que muda conforme o teste prossegue. Consequentemente, a taxa

de desgaste geralmente não é proporcional à distância de deslizamento e as correlações com quaisquer propriedades do material, como dureza tenacidade, etc., geralmente não devem ser consideradas (LUDEMA, 1996; BHUSHAN, 2000).

Técnicas similares em laboratórios diferentes, podem, na melhor das hipóteses, serem comparadas de maneira qualitativa. Isso se deve a grande variação de condições dos testes entre laboratórios, como geometria da peça, propriedades do material, acabamento superficial, área de contato, condições de carregamento, pressões de contato, velocidades de deslizamento, vibrações, duração do ensaio, temperatura ambiente, atmosfera, em condições ou não lubrificadas, são todos parâmetros fundamentais em desgaste por deslizamento e rolamento. Por isso, o processo de seleção do teste mais apropriado para um objetivo específico é fundamental para fazer interpretações mais significativas (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; BHUSHAN, 2000; LUDEMA; AJAYI, 2018).

Na prática deve ser analisado cuidadosamente para cada triboelemento. A identificação dos parâmetros tribológicos nos testes da simulação para a aplicação prática, que pode sofrer grandes variações por falta de conhecimento quanto aos mecanismos básicos de desgaste e métodos para equivalência do ensaio no tribômetro e sua aplicação em escala real (KARL-HEINZ; GAHR, 1987).

É conveniente classificar os métodos de teste tribológico de acordo com seu grau de realismo, isto é, que as condições de ensaio sejam as mais próximas da condição real de aplicação, os triboelementos que se deseja simular devem ser do mesmo material e característica para qual se deseja a aplicação, e o restante do tribossistema é simulado (LUDEMA, 1996; BHUSHAN, 2000).

Análise do desgaste superficial e partículas de desgaste podem apresentar dados significativos para validação de uma simulação do comportamento de um tribossistema para uma aplicação prática. Se a análise superficial e de partículas do sistema simulado não condizerem com os obtidos em escala real, os resultados não poderão ser transferidos para condições de aplicação (KARL-HEINZ; GAHR, 1987).

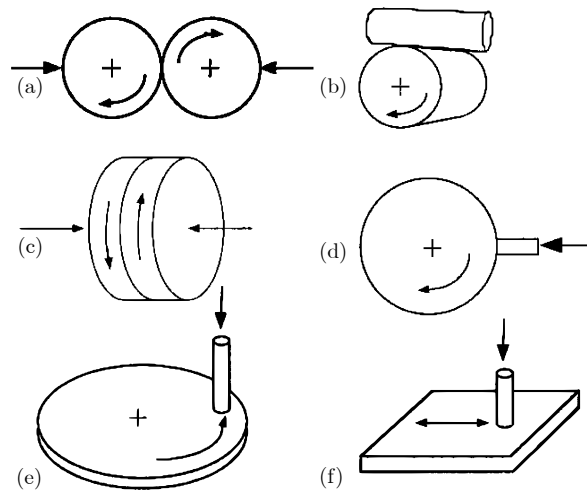
Com o desenvolvimento tecnológico para ensaios tribológicos, tornou-se possível medir o coeficiente de atrito com alta precisão em condições dinâmicas. Com dispositivos para medição de força que variam de um simples dinamômetro de mola à sistemas de instrumentação que produzem um sinal elétrico proporcional a uma força aplicada. A deformação de um componente mecânico com forças aplicadas pode ser medida por extensômetros, sensores de capacitância, sensores de indutância, materiais piezoelétricos, interferência óptica, padrão moiré, deflexão da luz e vários outros métodos (BHUSHAN,

2000; LUDEMA; AJAYI, 2018).

Embora tenha diferentes métodos para medição desta grandeza física o mais utilizado, devido à sua simplicidade, confiabilidade e facilidade de calibração, é o extensômetro. Os demais apresentam maior sensibilidade e podem ser utilizado em transdutores de maior rigidez. Atualmente existem comercialmente uma variedade de dispositivos e sistemas precisos de medição de atrito. Juntamente com os avançados recursos de aquisição e análise de dados, é possível realizar detalhes das medições de força com altas taxas de amostragem, que podem ser realizados com uma grande variedade de configurações geométricas (BHUSHAN, 2000; LUDEMA; AJAYI, 2018).

Bayer (2004.), demonstra que os experimentos de tribologia são realizados em um tribômetro, que é um equipamento utilizado para avaliar com precisão o comportamento do desgaste por deslizamento de pares de materiais. A Figura 17 ilustra algumas configurações de equipamento para ensaio de desgaste por deslizamento e rolamento.

Figura 17: Configuração para ensaios tribológicos.



Fonte: Adaptado de Bhushan (2000)

É prático distinguir entre ensaios em que os corpos de teste estão dispostos simetricamente ou assimetricamente. As Figuras 17a e c ilustram versões simétricas para as quais os materiais devem idealmente apresentar resultados idênticos. Arranjos simétricos geralmente não são muito utilizados para testes, um exemplo, no entanto, são anéis dispostos como na Figura 17c, usados para simulação do contato simétrico das vedações axiais.

As configurações assimétricas, são os mais comuns, devido à não continuidade do contato, produzem resultados diferentes, dependendo do posicionamento da amostra de teste.

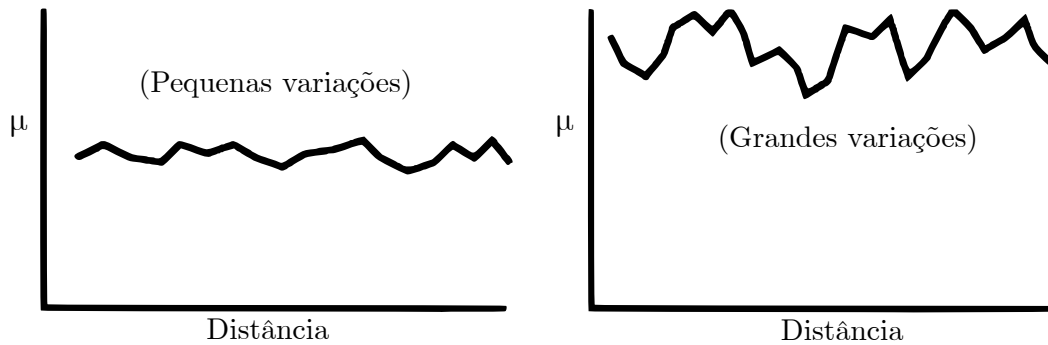
Ilustrados na figura 17d do modelo bloco e anel (block-on-ring) da norma ASTM G77 (2017), pino/esfera sobre o disco (pin-on-disk) Figura 17e norma ASTM G99 (2017), deslizamento esfera/pino em plano alternado linearmente (reciprocating) Figura 17f norma ASTM G133 (2016), são os principais padrões americanos de ensaios para atrito por deslizamento.

A medição do coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento tem sido objeto de muitos estudos para determinar a influência de diversos parâmetros tribológicos. A maioria das experiências relatadas utilizou o tribômetro tipo pino sobre o disco, e foram utilizados diversos tipos de transdutores para medir a força do atrito de forma direta ou indireta (SEIREG, 1998).

De acordo com Bhushan (2000) o contato pode inicialmente ser do tipo ponto, e depois crescer continuamente à medida que o desgaste avança, ou o contato pode ter início sobre a área aparente e permanecer constante durante o teste. Em equipamentos de modelo pino sobre o disco, o método para aplicação e carga, controle de velocidade, parâmetros de teste varia de acordo com cada projeto de equipamento. Em suma, a maioria dos equipamentos disponíveis comercialmente dispõem de sistema de controle com processamento e alta capacidade de amostragem de dados. A alta resolução da célula de carga e o controle de velocidade no tribômetro permitem o estudo de variáveis do atrito na superfícies em deslizamento (LUDEMA; AJAYI, 2018).

A aquisição do sinal instável obtido através do transdutor de força aparece nas máquinas de modelo de teste como vibração, que pode variar de pequenas a grandes amplitudes, a última por sinal pode até danificar o equipamento. No ensaio tribológico o atrito pode iniciar e manter a vibração durante o deslizamento, a força de atrito é variável e resulta em uma força contrária sobre a célula de carga. A variação de amplitude de oscilação de μ é ilustrada na Figura 18, que contém várias frequências que podem ser separadas após a aquisição dos dados pela análise de Fourier (BHUSHAN, 2000; LUDEMA; AJAYI, 2018).

Figura 18: Variações no coeficiente de atrito μ durante o deslizamento para dois materiais diferentes



Fonte: Adaptado de Ludema e Ajayi (2018)

Vibrações e ruídos provocados por atrito são controlados pela dependência funcional do atrito cinético, da velocidade do movimento relativo entre as superfícies em contato. Essa relação deve ser determinada experimentalmente, visto que, é uma função do par tribológico em contato, rugosidade da superfície e se em condições lubrificadas ou não (SEIREG, 1998; BHUSHAN, 2000; LUDEMA; AJAYI, 2018).

Esses fenômenos têm o efeito de fornecer impulsos na pressão de contato e na velocidade de deslizamento que varia em intervalos menores que o período transitório do atrito, que podem ter efeitos sobre o coeficiente de atrito. Assim, na aquisição do sinal com uso do transdutor de força é essencial determinar a variação temporal do mesmo com o tempo ou distância de deslizamento (SEIREG, 1998; LUDEMA; AJAYI, 2018).

O processamento e análise de sinais após a aquisição de dados em uma célula de carga para medição de atrito geralmente não são fáceis de interpretar. Para alguns pares tribológicos, pode-se obter uma linha da força de atrito com menores oscilações, mas na maioria das medições a oscilação da força de atrito apresentam grandes flutuações no sinal (LUDEMA, 1996).

Ludema (1996) demonstra que em testes no equipamento pino sobre o disco, por exemplo, tem-se variações superiores entre 10 a 20% com relação a linha média. De acordo com Bhushan (2000) normalmente essas variações estão na ordem de $\pm 5\%$ para combinações de pares tribológicos de durezas similares e com comportamento conhecido e mais de 35% para deslizamento a seco com materiais de menor dureza.

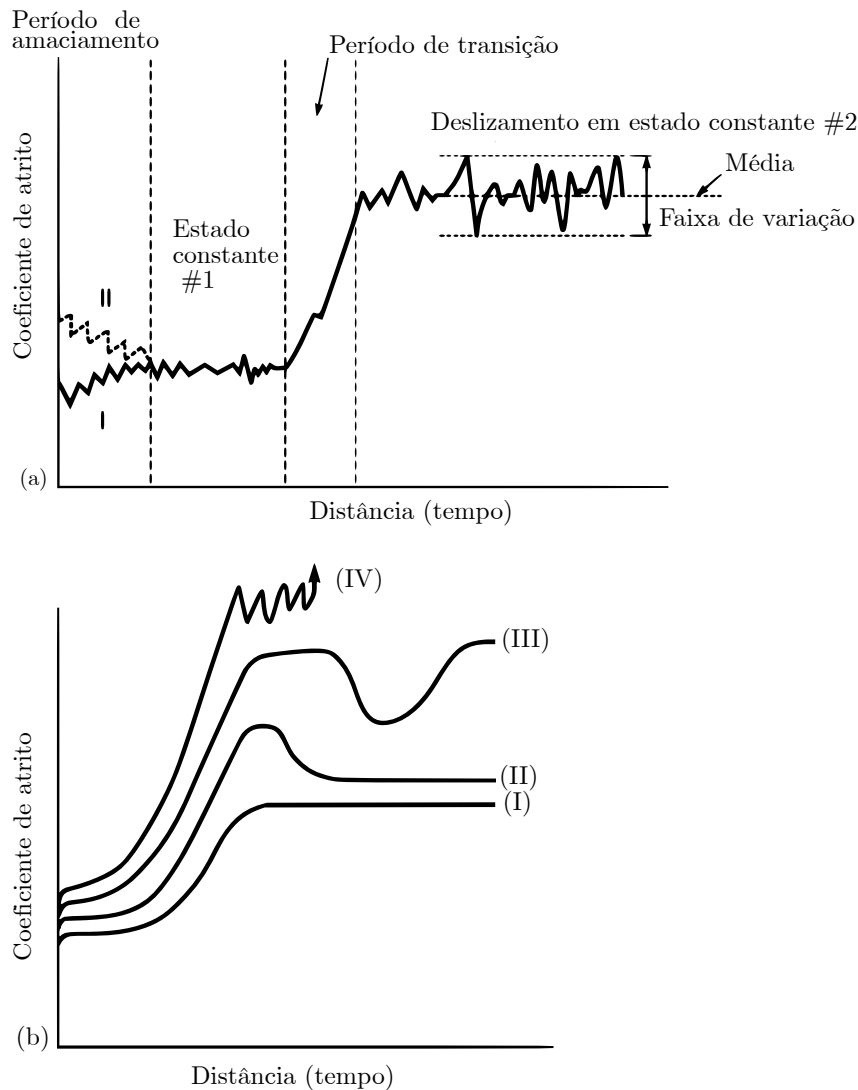
Para considerar a linha média com o coeficiente de atrito segundo Ludema (1996) as amplitudes de oscilações não devem ser superiores a 20%, em alguns casos pode-se considerar mais com cautela. De toda forma é interessante diminuir ao máximo a vibração

da máquina para minimizar a interferência na medição do coeficiente de atrito.

Através de sistemas de aquisição e processamento de dados com softwares em alguns casos pode se obter dados interessantes para análise. Caso tenha interferência significativa de vibração, uma maneira de minimizar esse problema é alterar as condições de teste como carga aplicada ou a velocidade de deslizamento. Outra forma para diminuir a vibração da máquina seria aumentando a rigidez do equipamento pino sobre o disco ou aplicando amortecimento em locais apropriados no equipamento, tais como, vibra-stop e coxim. Também pode-se utilizar filtros no pré processamento dos dados para suavizar e melhorar a análise dos resultados (LUDEMA, 1996; BHUSHAN, 2000).

Durante o período de deslizamento, ocorrem variações nas condições superficiais que afetam o atrito e desgaste. Após o início do ensaio ocorre o período de amaciamento ou desgaste, a força de atrito geralmente se estabiliza, chamado de estado constante de deslizamento. Normalmente, após um tempo de ensaio, o atrito aumente novamente onde ocorre o período de transição para outro estado constante (BHUSHAN, 2013). Conforme demonstra a curva em forma de S na Figura 19;

Figura 19: Coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento (a) em uma curva típica em forma de S mostrando o período de amaciamento, e (b) quatro casos hipotéticos



Fonte: Adaptado de Bhushan (2013)

Conforme demonstrado na figura 19b, o atrito pode aumentar com padrões diferentes, como: (I) o atrito pode permanecer em seu estado inicial por algum tempo e depois ter um período de transição lentamente para o estado constante, (II) tem o período de início, depois aumenta e decai para o estado constante superior ao valor inicial, (III) têm o período inicial, ocorre um aumento para um valor alto, entra no estado constante, ocorre uma falha inesperada entre as interfaces, o μ entra em transição para um valor menor, depois retorna para um valor maior. (IV) pode ter um comportamento com variações aleatórias (BHUSHAN, 2013). Em todos os casos, o coeficiente de atrito atinge um valor alto em algum período de deslizamento. Quatro casos são demonstrados na Figura 19b, em metais iguais tem o comportamento igual ao caso (I), no caso (II) quando o coeficiente

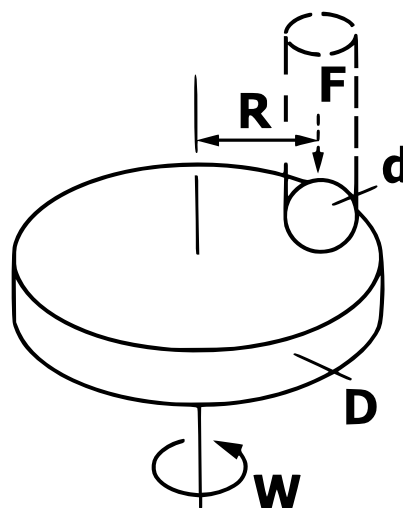
diminui está associado a suavização da superfícies duras que sofrem deformação plástica, a queda de atrito para o caso (III) têm associação com ejeção de partículas de desgaste, e o aumento é devido a formação de novas partículas entre as interfaces. No caso (IV) é um par tribológico ruim, quanto a sua estrutura mecânica e sofre alterações por diversos fatores (BHUSHAN, 2013).

3 Instrumentação do tribômetro pino sobre o disco

3.1 Método de Teste Padrão com um Equipamento Pino sobre o Disco

Este método de teste é um procedimento de laboratório de tribologia para determinar o desgaste de materiais durante o deslizamento usando um aparelho de pino no disco. Os materiais são testados em pares sob condições nominalmente não abrasivas. A Figura. 20 mostra um desenho esquemático deste tribômetro. O equipamento consiste em um motor acoplado a um eixo acionando o disco, um dispositivo de braço de alavanca com sistema de carregamento e fixação do pino para permitir que a amostra do pino seja forçada contra a amostra do disco em rotação. A faixa de desgaste no disco é em círculo, envolvendo várias passagens de desgaste na mesma trilha.

Figura 20: Esquema do sistema de teste de desgaste pino sobre o disco



Fonte: Astm G99 (2017)

F é a força normal no pino, d é o diâmetro do pino ou da esfera, D é o diâmetro

do disco, R é o raio da faixa de desgaste e W é a velocidade de rotação do disco. Os parâmetros de ensaio que devem ser controlados são: carga normal (N), velocidade de deslizamento (m/s), distância (m), temperatura do pino e ou do disco ($^{\circ}\text{C}$) e atmosfera (temperatura do laboratório, umidade relativa, lubrificante).

De acordo com a norma G99 (2017) o motor deve ter velocidade de rotação variável, que está tipicamente na faixa de 60 a 600 (rpm). O equipamento deve ser equipado com um contador de giros ou equivalente que irá gravar o número de rotações do disco, e preferencialmente ter a capacidade de desligar a máquina após um certo número pré-selecionado de revoluções.

O sistema também deve ser capaz de medir a força de atrito (por exemplo, através de uma célula de carga) para determinar o coeficiente de atrito. Assim, através deste método de teste, é possível determinar e estudar o comportamento do atrito e desgaste nos materiais, com variação de tempo ou distância, pressão de contato, velocidade, temperatura, umidade e lubrificação.

3.1.1 *Estrutura do tribômetro pino sobre o disco*

Na Figura 21 observa-se a estrutura inicial utilizada como base para o desenvolvimento deste trabalho, a máquina teve a estrutura fabricada em aço com união por processo de soldagem para a parte estática da estrutura.

Figura 21: Equipamento pino sobre o disco base para o projeto

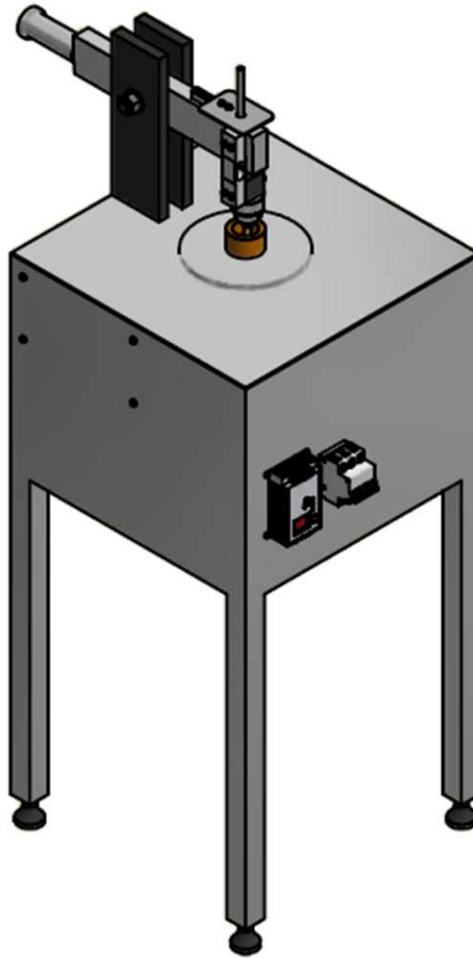


Fonte: Próprio Autor

Modificações estruturais

A priori foi realizado um desenho esquemático conforme Figura 22 do equipamento e oportunidades de melhorias do pino sobre o disco mostradas detalhadamente nas Figuras 23a e 23b.

Figura 22: Desenho esquemático do tribômetro pino sobre o disco

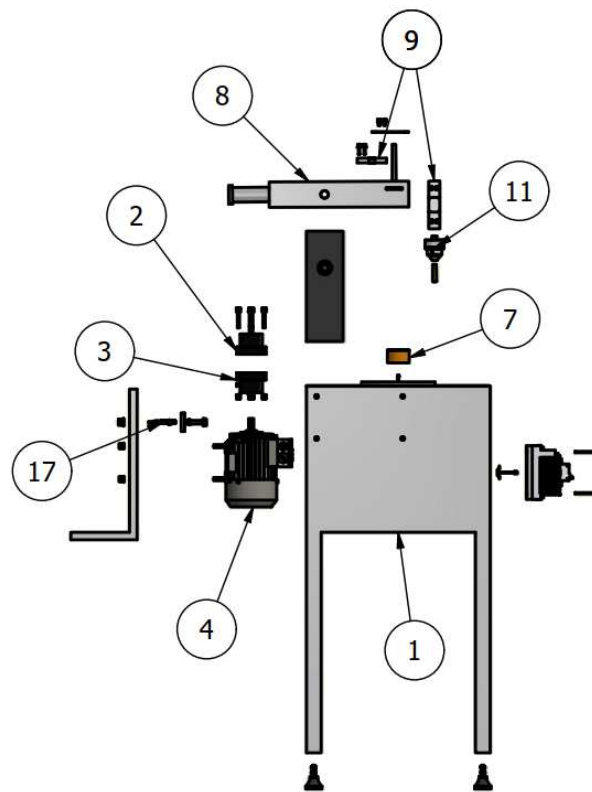


Fonte: Próprio Autor

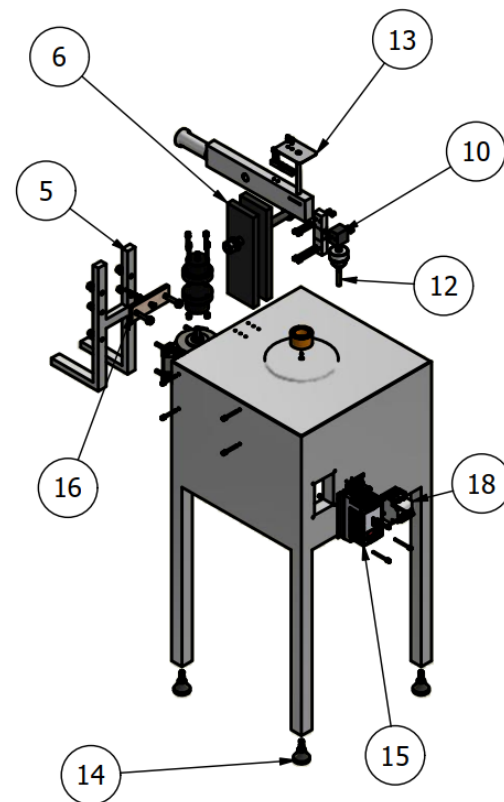
Na parte estrutural foi adicionado um mandril para fixação do pino conforme Figura 23a item 11. Para compensação de altura do sistema de carregamento após a fixação do mandril foi confeccionado outro suporte de aço com dimensões de 14 x 100 x 300mm conforme item 6 na Figura 23b. Após a perfuração do suporte para fixação na estrutura e no cantilever item 8 Figura 23a , o mesmo foi usinado em uma plaina na parte interna para melhor ajuste com o cantilever.

Foi adicionado pés na estrutura, para eliminar a necessidade de uma bancada de acordo com a Figura 21, e adicionado um absorvedor de vibração na extremidade de cada pé, ilustrado no item 14 da Figura 23b. O absorvedor tende a diminuir os efeitos da vibração durante os experimentos, atuando como um amortecedor de vibração, reduzindo a excitação na base.

Figura 23: Desenho esquemático do equipamento tribômetro pino sobre o disco com vista explodida



(a) Vista lateral.



(b) Vista isométrica.

Fonte: Próprio Autor

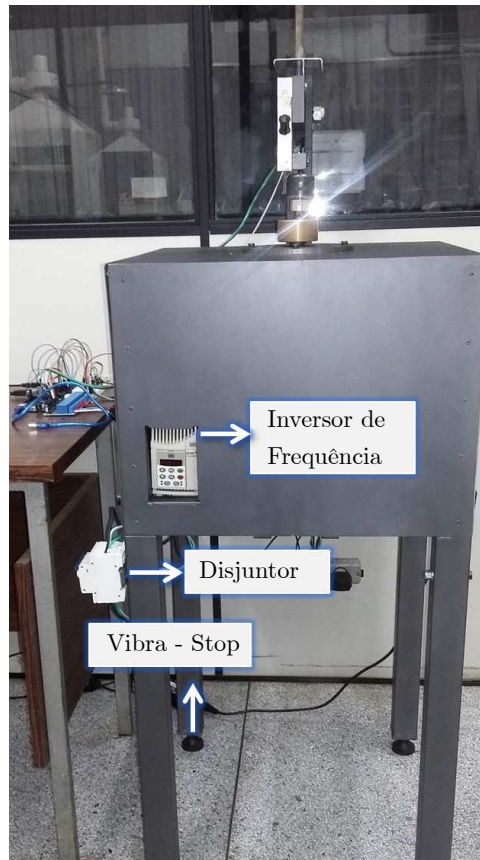
A descrição dos componentes da vista explodida da Figura 23 são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Descrição dos componentes fixos na estrutura

Item	Quantidade	Descrição
1	1	Estrutura da máquina
2	1	Acoplamento da transmissão de torque do disco
3	1	Acoplamento da transmissão de torque do motor
4	1	Motor elétrico 1/2 cv
5	1	Suporte do motor
6	1	Suporte do cantilever
7	1	Disco
8	1	Cantilever
9	2	Célula de carga
10	1	Suporte do mandril
11	1	Mandril
12	1	Pino
13	1	Suporte para fixação dos pesos
14	4	Amortecedor de vibração
15	1	Inversor de frequência
16	1	Suporte para o sensor de proximidade
17	1	Sensor de proximidade
18	1	Disjuntor tripolar

A figura 24 apresenta o equipamento após as modificações estruturais mencionadas, bem como, os instrumentos elétricos e hardware utilizados que são descritos a seguir.

Figura 24: Equipamento pino sobre o disco

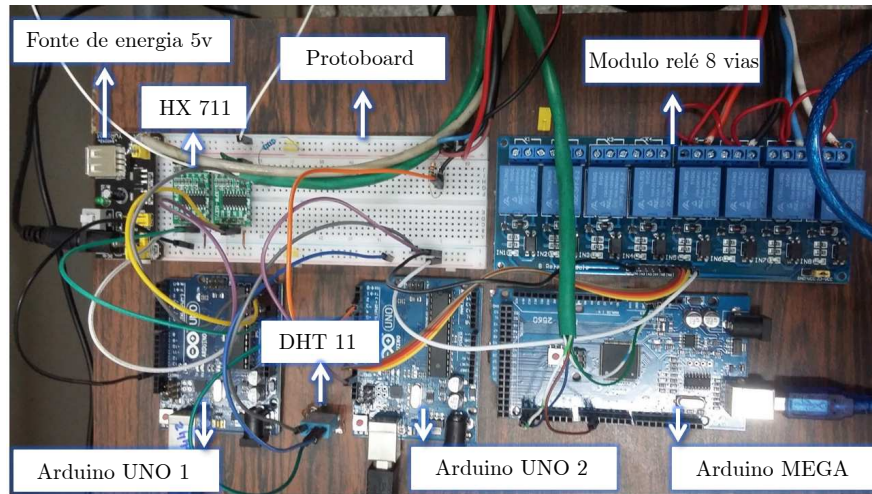


Fonte: Próprio Autor

3.2 Desenvolvimento da instrumentação do tribômetro pino sobre o disco

A instrumentação utilizada neste trabalho é de baixo custo, controlada através de uma plataforma com código aberto (Arduino). A experiência em seu desenvolvimento abrange concepção de sistemas mecânicos, elétricos e eletrônicos, programação e comunicação por microcontroladores. A Figura 25 apresenta os componentes de hardware utilizados para instrumentação do tribômetro pino sobre o disco.

Figura 25: Hardware utilizados na instrumentação



Fonte: Próprio Autor

Para melhor entendimento dos procedimentos utilizados, será descrito separadamente o desenvolvimento do sistema de controle e o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados do equipamento.

3.2.1 *Desenvolvimento do sistema de controle*

Nesta etapa foi utilizado um microcontrolador arduino uno, um módulo relé 8 vias, um sensor infravermelho reflexivo (E18-d80nk), um inversor de frequência (CFW 08) e um disjuntor.

Inversor de Frequência tem a função de acionar o motor elétrico através das variações de frequência da tensão fornecida ao motor para controlar sua rotação. Foi definida a variação de rotação dentro dos parâmetros da norma ASTM G99 (2017). Neste caso, são usadas sete frequências diferentes, correspondentes a cada rotação no inversor CFW 08, variando de 60 a 600 [rpm] com um intervalo progressivo de 90 [rpm] entre as rotações.

Arduino uno e módulo relé: O microcontrolador aciona o módulo relé, que através de rotinas computacionais define-se uma combinação binária correspondente a cada rotação setada no inversor de frequência.

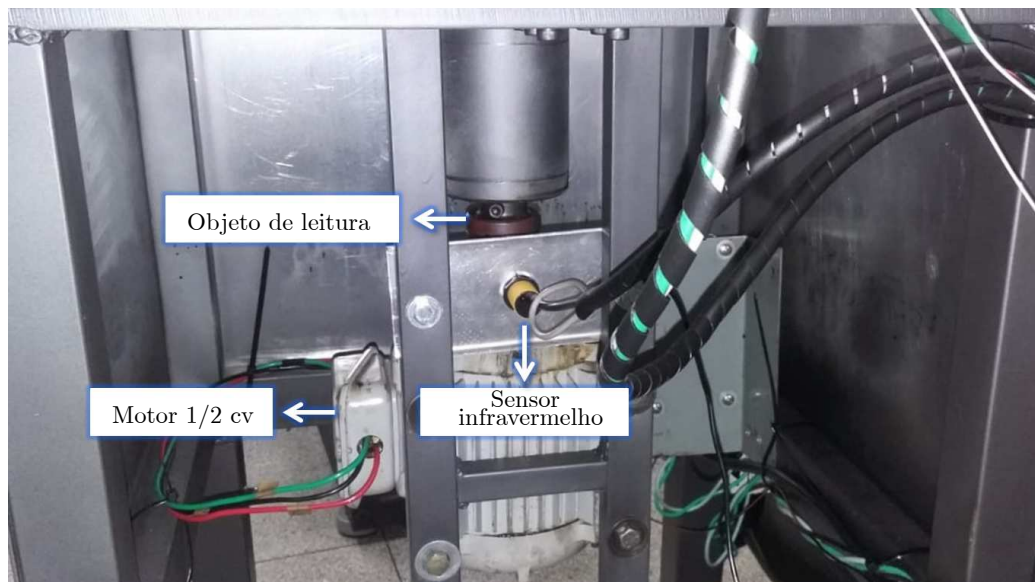
Disjuntor: Dispositivo eletromecânico, funciona como um interruptor automático, destinado a proteger a instalação elétrica contra possíveis danos causados por curto-circuitos e sobrecargas elétricas.

Sistema de contagem de ciclos

Para contagem dos ciclos que é referente a cada rotação do motor, foi utilizado um sensor reflexivo infravermelho, que contém um receptor (IR) que é o responsável pela detecção de um objeto com uma variação de distância de leitura entre 3 à 80 [cm], que deve ser ajustada no potenciômetro do mesmo. Neste caso foi utilizado a distância mínima.

Foram implementadas rotinas computacionais no microcontrolador Arduino Uno, onde o sensor reflexivo infravermelho (E18-d80nk) é usado para leitura do objeto fixado no acoplamento do eixo do motor conforme Figura 26. O conjunto Arduino mais sensor reflexivo realiza a leitura do objeto em cada rotação do motor em milisegundos, que é correspondente a cada volta do disco.

Figura 26: Contagem de ciclos



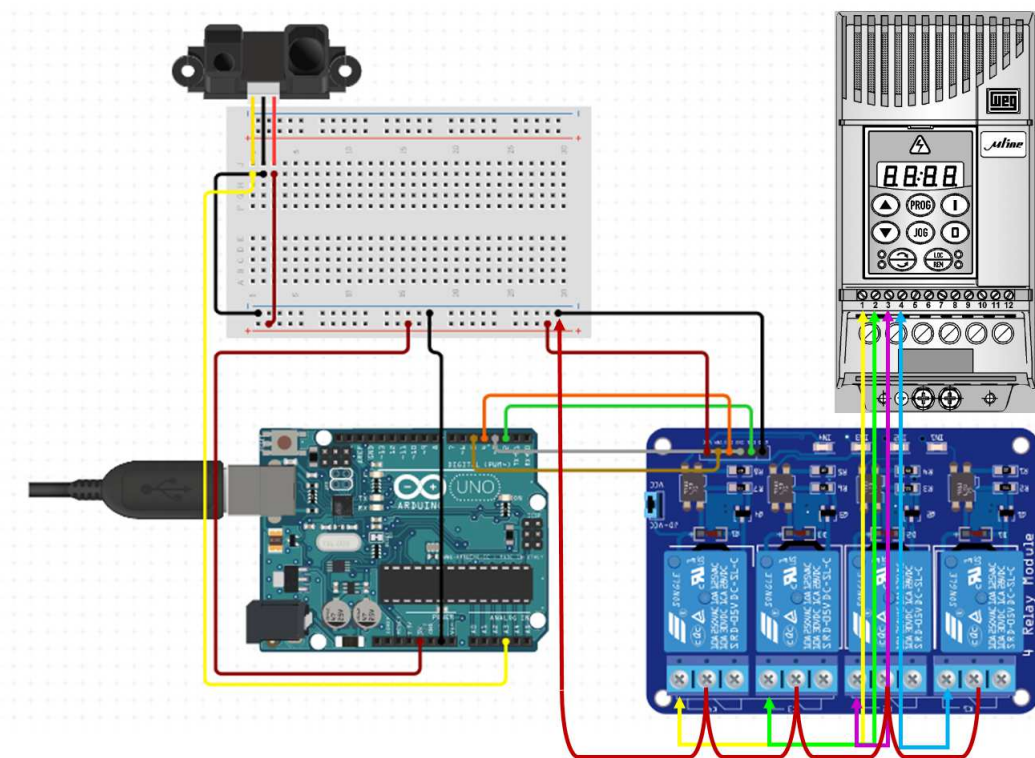
Fonte: Próprio Autor

No início do experimento o usuário deve fornecer R que é o raio da faixa de desgaste e a distância total de deslizamento desejada. A rotina computacional implementada faz a relação da circunferência da trilha de desgaste do disco pela distância de deslizamento, e determina o número de ciclos para o ensaio, o equipamento para quando o número de ciclos pré estabelecido é concluído. Esse procedimento é demonstrado no Apêndice A.

Outro hardware foi testado anteriormente para esta finalidade. O sensor de proximidade indutivo, a leitura do objeto com este hardware se dá a partir de um campo eletromagnético variável que é gerado pelo oscilador em conjunto com a bobina na extre-

midade do dispositivo. Neste caso a corrente elétrica do motor tem interferência direta na saída analógica do sinal se qualquer parte do sensor estiver em contato com a máquina, por isso foi substituído pelo sensor infravermelho reflexivo. Nesta aplicação foi necessário apenas 4 vias do módulo relé para acionar as sete velocidades diferentes no inversor de frequência. Os fios de cores vermelhas são alimentados com (5v), de cor preta é o aterramento elétrico. O sensor reflexivo é controlado através da porta analógica, e o módulo relé que aciona o inversor de frequência nas portas de saída digital. A Figura 27 ilustra o esquema de ligação para o controle do equipamento pino sobre o disco.

Figura 27: Desenho esquemático de ligações do sistema de controle.



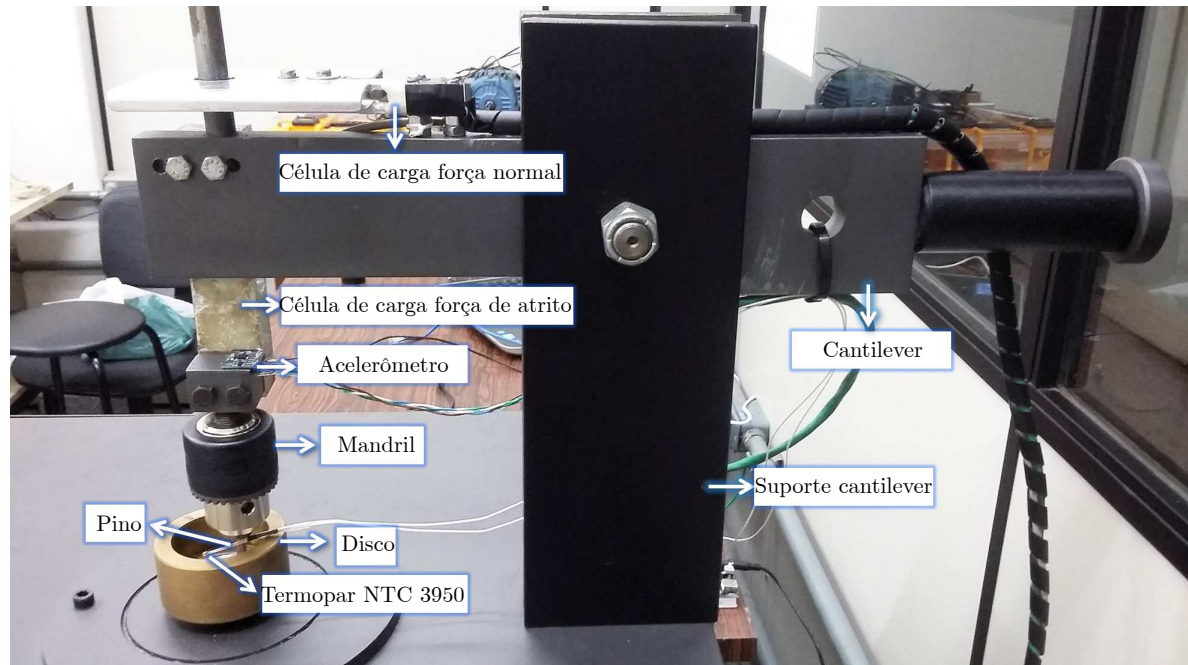
Fonte: Próprio Autor

3.2.2 Desenvolvimento do sistema de aquisição

O sistema de aquisição é composto por um microcontrolador Arduino Uno, um microcontrolador Arduino Mega, um sensor de temperatura e umidade (DHT11), e dois módulos amplificador e conversor (HX711) mostrados na Figura 25, duas células de carga, e um acelerômetro (MPU6050) conforme Figura 28, e um sensor infravermelho de temperatura (MLX90614) conforme figura 29. Primeiro é apresentado os hardware controlados através do microcontrolador Arduino (Uno), depois, o hardware controlado pelo microcontrolador

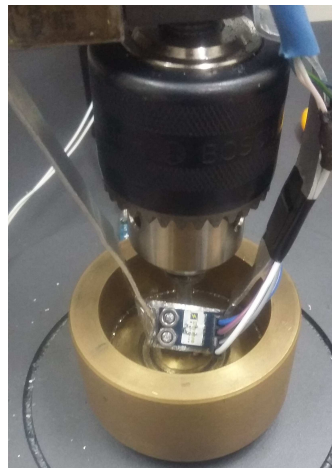
Arduino (Mega).

Figura 28: Hardware fixados no tribômetro pino sobre o disco.



Fonte: Próprio Autor

Figura 29: Suporte e sensor de temperatura.



Fonte: Próprio Autor

Aquisição de dados com microcontrolador Arduino Uno e sensores de temperatura, umidade e células de carga

O microcontrolador Arduino Uno é usado para aquisição de dados dos sensores de temperatura e umidade ambiente DHT11, da temperatura na superfície de contato entre o pino e disco com o sensor infravermelho [MLX9061], da força de atrito com a célula de carga [HBM] de 20[kgf], e da força normal com uma célula de carga de 20[kgf]. Os mesmos são descritos detalhadamente a seguir, bem como o procedimento de calibração das células de carga.

Temperatura e umidade ambiente

Para aquisição de dados de temperatura e umidade ambiente foi utilizado um sensor DHT11 calibrado de fábrica.

Temperatura do pino e disco

Um termopar (NTC 3950) foi usado para medir a temperatura do pino. Após ser calibrado, apresentou boa reprodutibilidade para medir a temperatura do pino. Entretanto, devido a dificuldade de fixação não é prático para esta aplicação e foi substituído por um sensor infravermelho [MLX9061] calibrado de fábrica, que permite medir a temperatura à 15[mm] de distância do contato entre o pino e disco.

Força de atrito e força normal

A Célula de Carga é um transdutor de força, que transforma uma grandeza física (força) em um sinal elétrico. Este tipo de sensor baseia-se na variação da resistência ôhmica de um extensômetro. As células de carga comumente possuem quatro extensômetros ligados entre si.

Quando uma pressão é aplicada em uma célula de carga, a resistência elétrica do extensômetro muda em resposta a essa pressão aplicada. O sinal da célula de carga muda em um intervalo baixo de milivolts de sinal por volt de excitação(mV/V), e essas alterações provocadas precisam ser amplificadas com um circuito de alto ganho para que possam ser lidas por um Arduino.

O módulo amplificador e conversor HX711 de 24 bits, é utilizado para amplificar o sinal de dispositivos como células de carga. Ele lê as informações da célula de carga, amplifica os sinais e envia ao Arduino para processamento. As células de carga utilizadas possuem quatro fios para conectar ao HX711 e são usados cinco fios para ligar o módulo conversor a um microcontrolador como o Arduino, Vermelho (VCC), Preto (GND), Dados (DAT),

Relógio (CLK), Positivo (VDD). Foi utilizada uma biblioteca do Arduino para comunicar com o HX711, que fornece um recurso de calibração e tara (redefinição) para determinar o valor da carga aplicada.

Para calibrar as células de carga foi usada uma balança analítica com resolução de 0.01 grama (Marca: Marte, Modelo: UX4200H), para pesagem das massas que foram utilizadas no processo de carregamento e descarregamento. O procedimento de calibração é realizado em planilha de Excel. Primeiro é lido o valor de cada célula de carga individualmente sem nenhuma carga aplicada com Arduino e o módulo conversor HX711, e esses valores são armazenados na planilha, depois é realizado o procedimento de carregamento em cada célula de carga, colocando massas com pesos conhecidos que foram pesados anteriormente na balança de precisão.

Como propriamente dito, quando se aplica um peso ou força em uma célula de carga o valor lido se altera. Este novo valor é salvo na planilha de Excel referente ao valor da nova carga aplicada. Esse procedimento se repete no carregamento e descarregamento. Na calibração de ambas as células de carga, foram realizados cinco carregamentos e descarregamentos para cada célula individualmente, com aquisição de mil pontos em cada carregamento e descarregamento.

Após inserir os dados na planilha Excel dos valores lidos de cada célula de carga através do módulo conversor HX711 e microcontrolador Arduino Uno. Foi realizada uma relação entre o valor lido e o peso correspondente deste valor para cada peso que foi adicionado no carregamento, e cada peso que foi retirado no descarregamento. Com isso, uma linha de tendência é obtida apresentada na figura (30)a para célula de carga utilizada para medir a força de atrito e na figura (30)b para célula de carga utilizada para medir a força normal. O Eixo (x) é referente aos valores lidos no Arduino e o eixo (y) é o valor correspondente a massa (g). Após se obter a linha de tendência, a equação desta reta é determinada e utilizada na implementação das rotinas para aquisição dos dados para as duas células de carga.

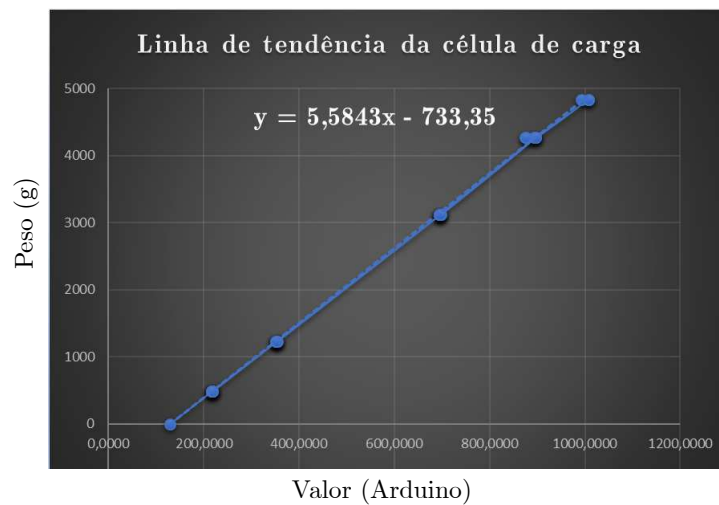
Note que na Figura 30a a célula de carga apresentou uma linha de tendência com linearidade, enquanto a Figura 30b para valores de carga maiores a mesma teve divergência entre os valores lidos para o carregamento e descarregamento referentes a mesma carga. Esse efeito é devido a qualidade inferior na liga da matéria-prima da célula de carga que provoca um efeito denominado histerese decorrente de trocas térmicas com o ambiente da energia elástica gerada pela deformação, o que acarreta que as medições de cargas sucessivas não coincidam com as descargas respectivas. Porém, após uma série

de carregamento e descarregamentos, foi observado que este efeito só acontece em cargas superiores a 4(Kgf).

Figura 30: Linha de tendência e equação da reta



(a) Célula de carga HBM 20 kgf para força de atrito



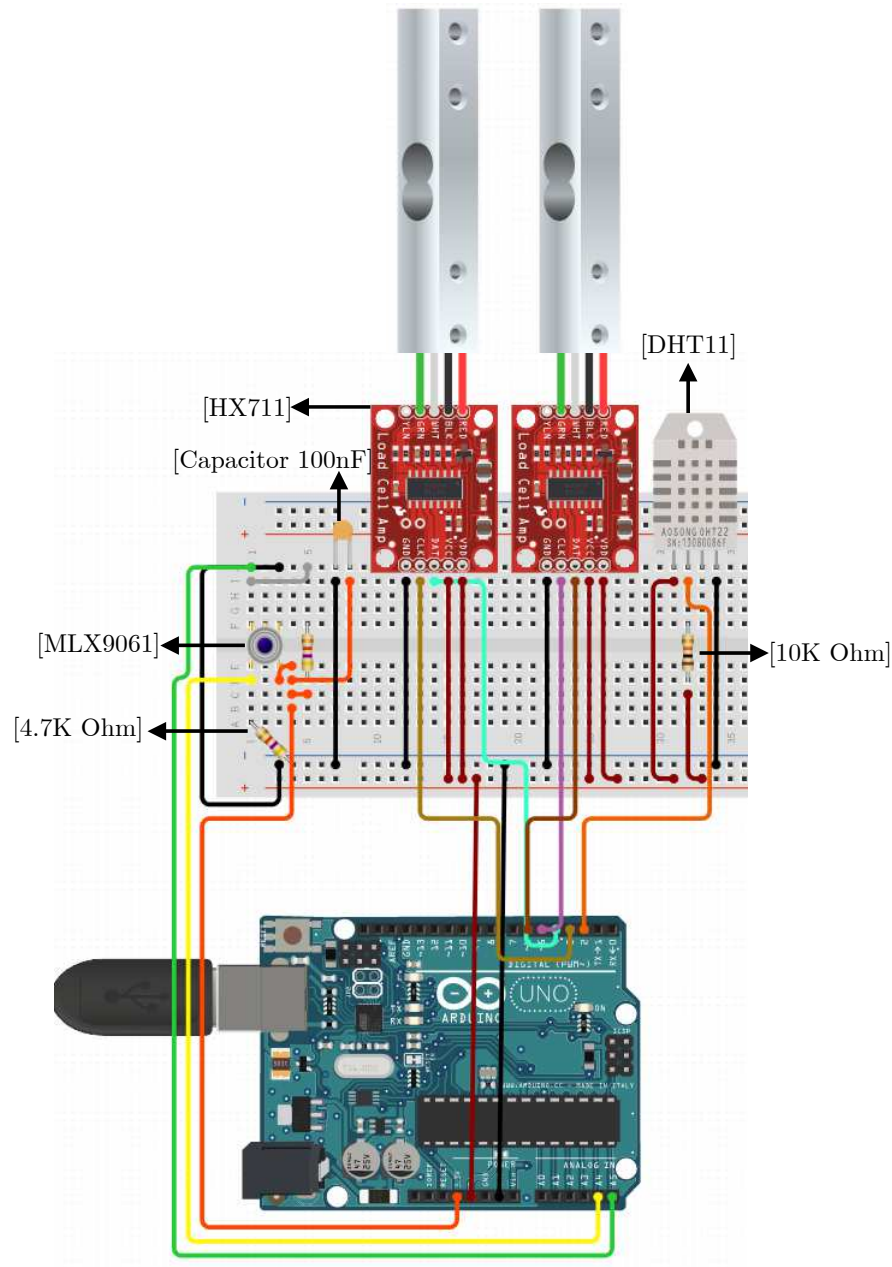
(b) Célula de carga 20 kgf para força normal

Fonte: Próprio Autor

A taxa de amostragem para aquisição dos dados é variável de acordo com a velocidade do ensaio, ou seja, o tempo entre cada sinal (dt) é o mesmo valor lido no sensor infravermelho reflexivo utilizado na contagem de ciclos, desta forma, cada sinal representa uma volta do disco. Essa variação tem um sentido lógico para os dados obtidos na célula de carga usada para medir a força de atrito, pois, se cada valor lido representa um ciclo, e esse tem um valor R que é o raio da faixa de desgaste, com um valor de circunferência

que representa uma distância de comprimento (l), o comportamento do coeficiente de atrito ao longo da distância de deslizamento pode ser determinado. A Figura 31 mostra o esquemático de ligação entre o microcontrolador Arduino Uno e os hardware.

Figura 31: Desenho esquemático de ligação, célula de carga, sensor de temperatura, umidade e microcontrolador arduino uno



Fonte: Próprio Autor

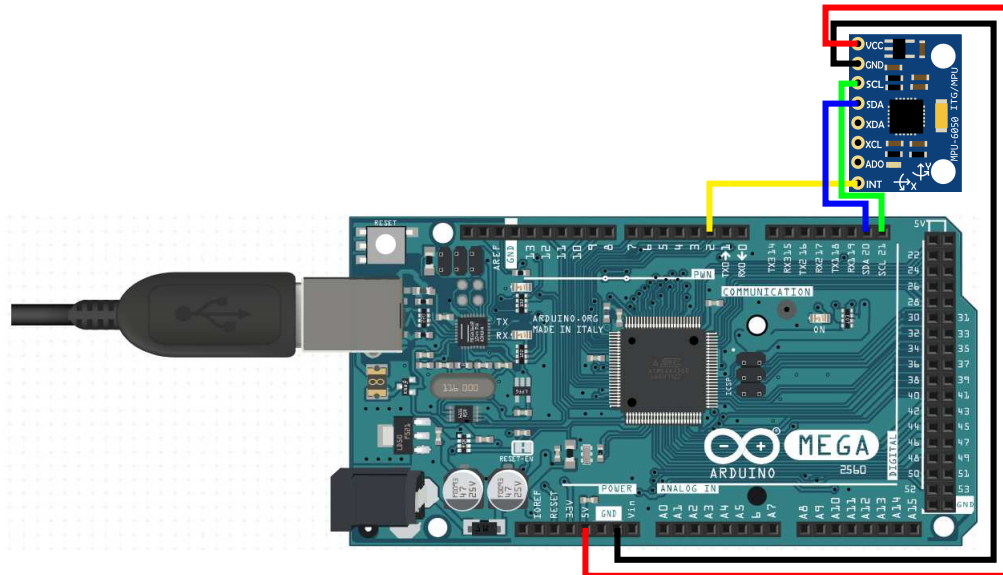
O procedimento de carregamento e descarregamento, bem como a verificação das células de carga é demonstrado no Apêndice A.

Sinais de vibração

O dispositivo desenvolvido para a aquisição e retorno de informações ao usuário consiste em microcontrolador Arduino Mega e um acelerômetro de 3 eixos e giroscópio de 3 eixos integrados em um único chip [MPU6050].

A conexão entre o acelerômetro giroscópio triaxial [MPU6050] com o Arduino Mega, é feita por dois terminais de dados (SCL) e (SDA) conexão de protocolo (I2C) para comunicação com Arduino, dois terminais de alimentação, e um terminal de interrupção. O esquema mostrando as conexões feitas é ilustrado na Figura 32.

Figura 32: Desenho esquemático de ligação do acelerômetro



Fonte: Próprio Autor

A biblioteca utilizada para este dispositivo de aquisição com interface I2Cdev foi desenvolvida por Rowberg (2013). Foi desenvolvido uma rotina computacional para leitura da porta serial dos dados através do software Octave, onde já é realizada a aquisição e processamento.

4 Metodologia experimental

Neste capítulo são apresentados testes no equipamento pino sobre o disco com materiais de comportamento previamente conhecidos na literatura, como uma forma de validação da instrumentação realizada.

De acordo a norma ASTM G99 (2017) este método de teste pode ser aplicado a uma grande variedade de materiais. O único requisito é que amostras com as dimensões especificadas possam ser preparadas e resistir às tensões impostas durante o teste sem falha ou flexão excessiva. Os materiais que estão sendo testados devem ser descritos por dimensões, acabamento superficial, tipo de material, forma, composição, microestrutura, tratamentos de processamento e dureza de indentação (se apropriado). A amostra do pino tem forma cilíndrica ou esférica, os diâmetros são entre 2 a 10 [mm]. Para o disco os diâmetros podem variar de 30 a 100[mm] com uma espessura na faixa de 2 a 10[mm]. As amostras devem ter um bom acabamento de superfície, é recomendado uma rugosidade de $0,8 \mu m$ na média aritmética ou inferior (R_a).

Neste trabalho as amostras dos pinos utilizadas são de forma cilíndrica com diâmetro de 8[mm] para os pinos de aço e 6[mm] para os pinos de alumínio. Para os discos o diâmetro utilizado é de 40[mm] com espessura de 6[mm].

Materiais estudados:

- No primeiro caso é utilizado o aço SAE [1035] para os pinos e o aço SAE [1040] para os discos, cuja densidade é de $7,87 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. A nomenclatura das amostras utilizadas para o pares tribológico aço sobre aço são demonstradas na Tabela 2.
- Para o segundo caso é utilizado o alumínio de liga 6351 para os pinos, cuja densidade é de $2,75 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ e o aço SAE [1040] para os discos. A nomenclatura das amostras utilizadas para o pares tribológico alumínio sobre aço são demonstradas na Tabela 2.

Tabela 2: Nomenclatura das amostras dos materiais estudados

Par tribológico aço sobre aço		Par tribológico alumínio sobre aço	
Amostra do pino	Amostra do disco	Amostra do pino	Amostra do disco
A1	A1	A1	L1
B1	B1	B1	M1
C1	C1	C1	N1
D1	D1	D1	O1
E1	E1	E1	A2
F1	F1	F1	B2
G1	G1	G1	C2
H1	H1	H1	D2
I1	I1	I1	E2
J1	J1		
K1	K1		

Fonte: Próprio Autor

Conforme apresentado na Tabela (2) as amostras dos pinos e discos foram identificadas em ordem alfabética. O sistema de fixação do tribômetro permite que as mesmas sejam utilizadas em ambos os lados, ou seja, em uma mesma amostra pode-se realizar dois diferentes experimentos seguindo as recomendações da norma (G99, 2017). Desta forma, o número de identificação após a letra representa à face da amostra, sendo o número 1 ou 2.

4.1 Sequência de operações para metodologia experimental

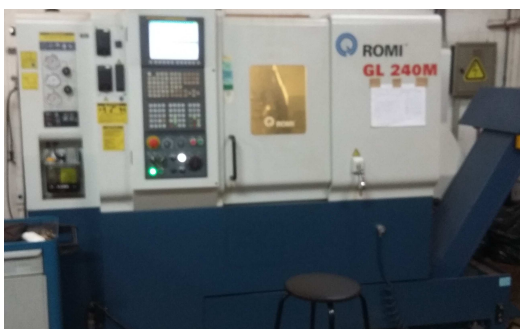
Primeiramente são descritos os materiais e procedimentos utilizados para confecção e preparação das amostras dos pares tribológicos, em seguida são apresentados os parâmetros de teste, posteriormente, os procedimentos experimentais utilizados, e finalmente são apresentados os métodos usados para o processamento e análise de sinais, bem como, a metodologia para à quantificação do desgaste.

4.1.1 *Preparação das amostras*

Os discos foram usinados em um torno cnc marca [Romi] modelo [G1 240M] ilustrado na Figura 33 a. Para melhorar à rugosidade superficial os mesmos foram retificados conforme Figura 33 b, e lixados com granulação de 80 à 1200 com uma lixadeira marca [Arotec] modelo [Apl-2] Figura 33 c. Para medir a rugosidade superficial foi utilizado um rugosímetro de marca [Mitutoyo] modelo [SJ-201P] Figura 33 d, este rugosímetro mede

apenas superfície plana, para os pinos foram medidos as rugosidades do perfil longitudinal dos mesmos e considerado o mesmo valor em sua extremidade visto que foram submetidos ao mesmo acabamento superficial. Os pinos foram usinados no torno mecânico e lixados com o mesmo procedimento.

Figura 33: Materiais utilizados para preparação dos discos



(a) Torno cnc.



(b) Retífica.



(c) Lixadeira.



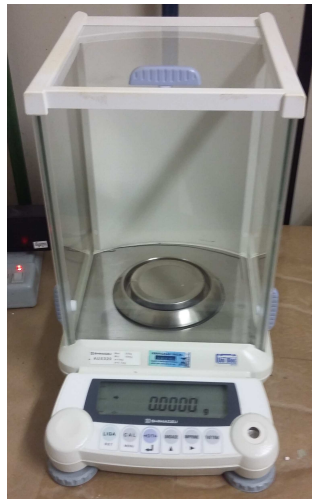
(d) Rugosímetro.

Fonte: Próprio Autor

Balança analítica

Para a pesagem das amostras, utilizou-se uma balança analítica de precisão, marca Shimadzu, mod. AUX 320 Figura 34, com capacidade de pesagem de até 320 g e precisão de 0,0001 g., do Lab. do GDAM - Dep. Física e Química da FEIS.

Figura 34: Balança analítica



Fonte: Próprio Autor

Ensaio de dureza

Para o ensaio de dureza superficial das amostras foi utilizado um durômetro de bancada Rockwell conforme Figura 35.

Figura 35: Durômetro de bancada Rockwell



Fonte: Próprio Autor

Neste método, a carga do ensaio é aplicada em etapas, ou seja, primeiro se aplica uma pré-carga, para garantir um contato firme entre o penetrador e o material ensaiado, e depois aplica-se a carga do ensaio. A leitura do grau de dureza é feita diretamente no

mostrador. Para o ensaio de dureza no aço foi utilizado a escala [HRA] com carga de 60[kgf] e penetrador cone 120° de diamante. No ensaio do alumínio utilizou-se a escala [HRB] com carga de 100[kgf] e penetrador esfera de 1/16.

4.1.2 *Parâmetros de teste*

Os experimentos foram conduzidos com as seguintes condições:

A. Carga - Valores da força normal aplicada com variações de 10 [N] e 20[N].

B. Velocidade - A velocidade relativa de deslizamento entre as superfícies de contato, com variação de 0,0879 [m/s] e 0,2199 [m/s].

C. A taxa de amostragem correspondente para aquisição de sinais da célula de carga, temperatura e umidade foram 1 e 2,5 [Hz] correspondentes a cada velocidade de deslizamento. Essa variação representa a mudança do delay em diferentes rotações, de tal modo que, em cada ciclo se realiza a aquisição de um sinal, desta forma obtêm-se o sincronismo entre aquisição de dados e controle do qual é pré determinado a distância total e deslizamento. Com isso pode-se obter o gráfico do coeficiente de atrito pela distância de deslizamento.

D. Distância - A distância deslizante acumulada de 1000[m].

E. Temperatura - A temperatura medida à 15[mm] das superfícies de contato entre o pino e disco conforme Figura 36.

Figura 36: Sensor de temperatura, fixação do pino e disco



(a) Sensor infravermelho mlx90614.

Fonte: Próprio Autor

F. 14[mm] para o raio da faixa de desgaste.

G. Rugosidade (R_a) do pino e disco variando entre 0.03 e 1.93 μm , que são apresentadas em tabela junto ao gráfico de cada conjunto de ensaio sobre mesma condição de carga e velocidade.

H. Atmosfera - A atmosfera do laboratório teve variação de umidade relativa entre 32 a 35% , temperatura ambiente entre 23 [°C] á 25[°C], deslizamento em condições não lubrificadas.

4.1.3 *Procedimento experimental*

A. Antes do início da pesagem e do teste, foi realizada uma limpeza dos pares tribológicos com álcool etílico e secados posteriormente, não deixando nenhuma impureza como partículas sólidas, e agentes que poderiam formar um filme lubrificante.

B. As amostras pino e disco foram pesadas separadamente na balança ilustrada na Figura 34 antes e após cada ensaio.

C. A amostra do disco foi fixado por dois parafusos no copo, perpendicularmente com ($\pm 1^\circ$) ao eixo de resolução.

D. A amostra do pino foi fixada no mandril, com ajuste perpendicularmente com ($\pm 1^\circ$) à superfície do disco em contato.

E. Para cada experimento o carregamento no cantilever foi realizado com pesos de 10[N], sendo adicionado de 10 em 10[N] para cada variação de carga. Para iniciar o teste, deve fornecer como entrada no programa o raio do pino em relação ao centro do disco [mm], a distância de deslizamento [m] e a rotação desejada [rpm]. Em seguida, o algoritmo calcula o número de ciclos entre a circunferência e a distância deslizante, e o monitor serial imprime o número de cada ciclo, o tempo de cada ciclo em [milissegundos] e a rotação [rpm].

G. O ensaio se inicia com as amostras sob carga. O ensaio termina quando atingir o número de rotações pré-estabelecidas. Os testes só terminam quando o ciclo é concluído, ou seja, não são interrompidos ou reiniciados.

H. Os experimentos foram repetidos inicialmente de 4 á 5 vezes em cada variação de carga e velocidade de deslizamento.

4.1.4 *Aquisição e processamento de sinais*

A. Através dos sensores instalados no tribômetro pino sobre o disco são realizados as aquisições dos dados de vibração com uso do software Octave, temperatura entre os pares tribológicos em deslizamento, temperatura e umidade ambiente, força de atrito e normal com uso do software Arduido versão 1.8.9.

B. A metodologia utilizada para melhor visualização dos dados da força e coeficiente de atrito e temperatura foi o nível de raiz quadrada média (RMS) usado para processar os sinais obtidos neste trabalho é dado de acordo com a equação 15.

$$F(\text{RMS}), i = \sqrt{\frac{1}{N_L} \sum_{j=1}^{N_L} |F_j|^2}, 1, \dots, L \quad (15)$$

no qual L é o número de janelas usadas, N_L é o número de pontos em cada janela, sempre menor que N ($N_L < N$), do número total de pontos no sinal.

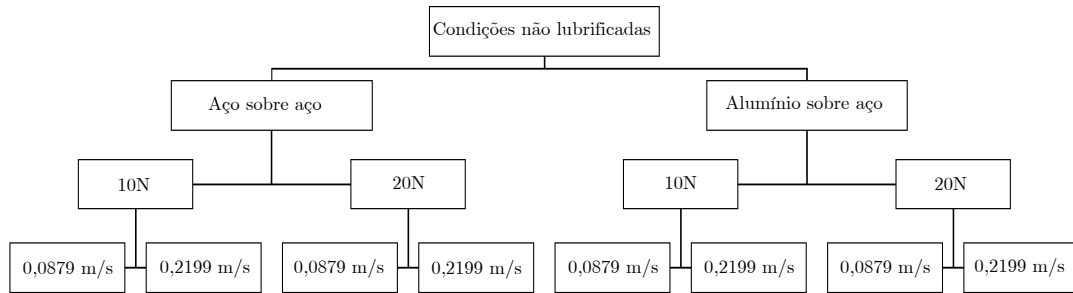
4.1.5 *Quantificação do desgaste*

A quantificação do desgaste é feita através das equações de Archard (1953) sendo calculado o coeficiente de desgaste k dado pela equação (8), o volume de material removido por distância de deslizamento conforme a equação (13) e a taxa de desgaste em função da velocidade e tempo proposto por Ludema e Ajayi (2018) de acordo com a equação (14).

4.1.6 *Sequência de ensaios realizados*

Utilizando os dados obtidos ao longo dos ensaios, curvas do coeficiente de atrito em função da distância de deslizamento foram traçadas com o objetivo de comparação com os valores presentes na literatura para validação do sistema desenvolvido. De acordo com os parâmetros de teste, procedimento experimental, aquisição e processamento de sinais e quantificação de desgaste descritos anteriormente. A Figura 37 ilustra um fluxograma dos experimentos realizados no equipamento pino sobre o disco.

Figura 37: Fluxograma que ilustra as variáveis analisadas nesse estudo



Fonte: Próprio Autor

Experimentos são realizados em condições não lubrificadas, com dois pares tribológicos diferentes, duas variações de carga e rotação para cada sequência experimental. Tais condições tribológicas foram representadas por 34 ensaios tribológicos, sendo 17 para cada par tribológico, nos quais 5 foram realizados para força normal aplicada de 10[N] e velocidade de deslizamento em 0,0879[m/s] para cada par e 4 experimentos para as outras condições. Todos os resultados que serão exibidos e analisados estão dentro dos valores sugeridos na literatura por diferentes autores.

5 Resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios no equipamento pino sobre o disco, os resultados do coeficiente de atrito, temperatura da superfície de contato pela distância de deslizamento, e a quantificação do desgaste são apresentados de forma detalhada separadamente. Sendo primeiro demonstrada e discutida a análise de sinais e a quantificação de desgaste para o par tribológico pino de aço sobre o disco de aço, em seguida pino de alumínio sobre o disco de aço.

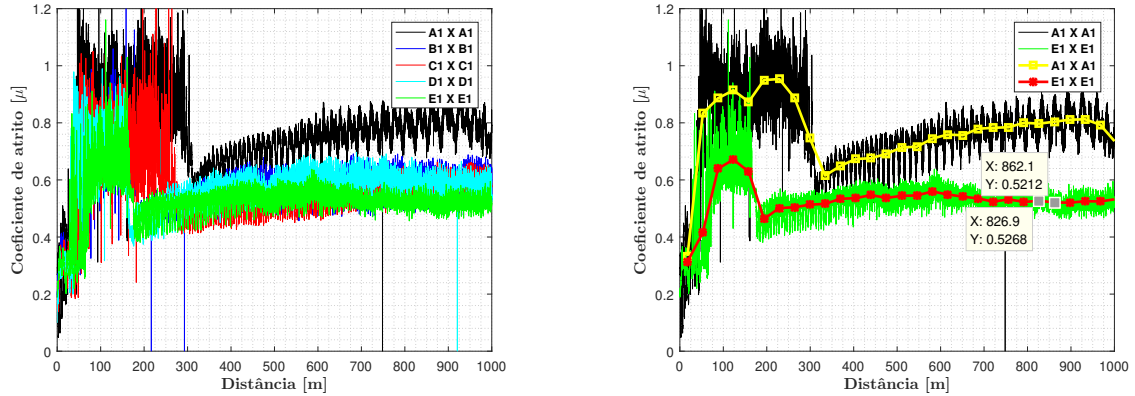
Através do ensaio de dureza superficial das amostras com o uso do durômetro de bancada Rockwell foi obtido a dureza para cada material separadamente. Em cada amostra foram realizados dois ensaios e obtido a média entre todos os valores. Para o aço SAE [1040] utilizado para o disco obteve a dureza 57 [HRA], para o aço SAE [1035] do pino 51 [HRA], no pino de alumínio liga 6351 56[HRB]. Para aplicar a dureza na equação de Archard (1953) para mecanismo de desgaste adesivo com deformações plásticas, faz-se necessário realizar a conversão para à dureza Brinell [HB] que tem unidade dimensional, por via da tabela na norma ASTM E140 (2019). Os experimentos realizados são do tipo ponto, e crescem continuamente à medida que o desgaste avança (BHUSHAN, 2000).

Par tribológico aço sobre aço com variação de carga normal em 10 e 20N e velocidade de deslizamento em 0,0879, e 0,2199 m/s.

Por meio do sistema de aquisição com resposta ao usuário no Arduino e utilizando o software Matlab[®] para processamento de sinal, foi obtido o coeficiente de atrito pela distância de deslizamento conforme a Figura 38(a), por sua vez, a imagem 38(b) apresenta o mesmo gráfico, com apenas duas amostras para melhor visualização da linha média entre as flutuações do sinal, que é a raiz do valor quadrático médio (RMS) do sinal original. Para fazer isso, o número total de pontos N foi dividido em janelas menores, de modo que cada ponto na Figura 38(b) representa uma dessas janelas, conforme equação 15. O sinal em cor preta e verde refere-se aos dados obtidos no sistema de aquisição e as linhas amarela e vermelha são o valor (RMS) deste sinal, pode-se observar que cada janela representa

uma distância de deslizamento neste caso 30,2 [m].

Figura 38: Carga normal aplicada 10N e velocidade 0,0879 m/s



(a) Coeficiente de atrito determinadas nos ensaios. (b) Coeficiente de atrito e o nível da raiz quadrada média (RMS).

Fonte: Próprio Autor

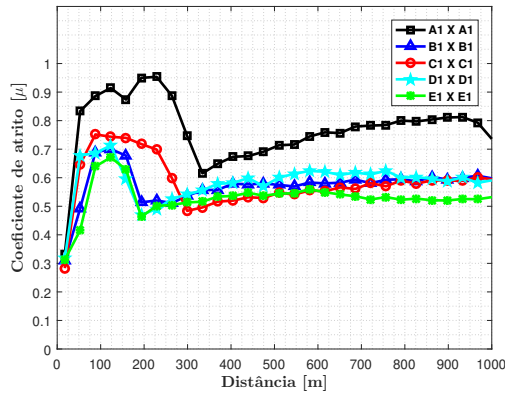
Ludema (1996) preconiza que a linha média deve ser obtida para variações inferiores a 20%, pode-se observar que durante o primeiro período de transição do sinal ocorrem as maiores flutuações próximas as mencionadas pelo autor e após o período de amaciamento conforme demonstrado por Bhushan (2000) o atrito apresenta menores oscilações de amplitude por volta de 13% na faixa de variação, isso também demonstra que as modificações realizadas no equipamento como o acoplamento do amortecedor de vibração na base contribuíram para menor amplitude de oscilação no sinal adquirido, não interferindo nos experimentos realizados.

A Figura 39 (a) mostra o valor quadrático médio (RMS) de todos os sinais. Note que as amostras com uma ressalva para o par A1, tem um comportamento similar ao caso (II) da curva em forma de S demonstrado em Bhushan (2013), onde tem o período de início, depois aumenta e decai para o estado constante superior ao valor inicial. Quando o coeficiente de atrito diminui está associado a suavização das superfícies duras que sofrem deformação plástica.

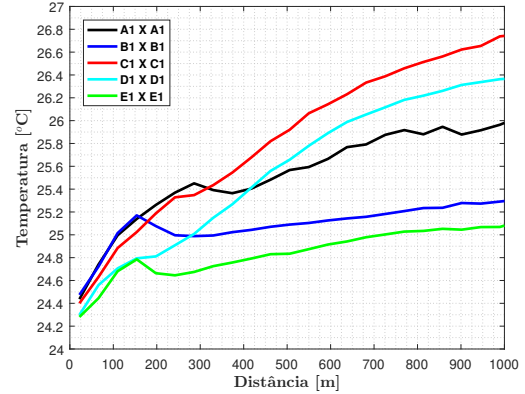
A Figura 39 (b) apresenta a variação da temperatura ao longo da distância de deslizamento entre o pino e o disco. Observa-se que a variação de amplitude do coeficiente de atrito se correlaciona com o comportamento da variação de temperatura, por outro lado a diferença entre o valor inicial e final da temperatura demonstrado como $V_{tp}(^{\circ}\text{C})$ apresenta valores diferentes mesmo para coeficientes de atrito com valores similares como

pode-se observar as amostras dos pares tribológicos C1 e D1 apresentados na tabela 3.

Figura 39: Carga normal aplicada 10N e velocidade 0,0879 m/s



(a) Coeficiente de atrito.



(b) Temperatura na superfície de contato.

Fonte: Próprio Autor

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para o primeiro experimento para força normal de 10[N] e velocidade de deslizamento 0.0879 [m/s].

Tabela 3: Resultados obtidos para 10N e 0,0879 m/s

Par tribológico	R_a	P_{mp}	P_{md}	V_{tp} (°C)	μ
A1 x A1	0,05	0,0326	0,0843	1,49	0,7798
B1 x B1	0,06	0,0189	0,0197	0,85	0,5946
C1 x C1	0,08	0,0183	0,0522	2,34	0,5840
D1 x D1	0,04	0,0142	0,0191	2,06	0,6029
E1 x E1	0,05	0,0684	0,1917	0,79	0,5284

Fonte: Próprio Autor

no qual, R_a é a rugosidade do disco, P_{mp} refere-se a perda de massa do pino, P_{md} a perda de massa do disco, V_{tp} a variação de temperatura dada pela relação entre a final e inicial durante cada ensaio e μ o coeficiente de atrito.

Para se obter o valor do μ foi considerado apenas o deslizamento em estado constante, ou seja, são 11.368 ciclos para completar o ensaio conforme demonstrado no Apêndice B, como em cada ciclo se realiza a aquisição de dados, cada 100[m] é representado por

1.136,8 pontos considerando neste gráfico o estado constante após os 400 [m] o valor do coeficiente de atrito é o RMS do intervalo entre os dados 4.547,2 e 11.368. A Tabela 4 apresenta à quantificação do desgaste para o pino.

Tabela 4: Coeficiente e taxa de desgaste do pino para 10N e 0,0879 m/s

Pino	K_p	$\psi(\text{m}^3/\text{s})$	$V_\omega(\text{ms})$
A1	$2,3103 \times 10^{-04}$	$3,6438 \times 10^{-13}$	$4,1423 \times 10^{-09}$
B1	$1,3394 \times 10^{-04}$	$2,1125 \times 10^{-13}$	$2,4015 \times 10^{-09}$
C1	$1,2969 \times 10^{-04}$	$2,0455 \times 10^{-13}$	$2,3253 \times 10^{-09}$
D1	$1,0063 \times 10^{-04}$	$1,5872 \times 10^{-13}$	$1,8043 \times 10^{-09}$
E1	$8,8474 \times 10^{-04}$	$7,6453 \times 10^{-13}$	$8,6912 \times 10^{-09}$

Fonte: Próprio Autor

no qual, K_p é o coeficiente de desgaste do pino, ψ refere-se a taxa de desgaste por unidade de tempo, V_ω a taxa de material removido por distância de deslizamento. A Tabela 5 apresenta à quantificação do desgaste para o disco.

Tabela 5: Coeficiente e taxa de desgaste do disco para 10N e 0,0879 m/s

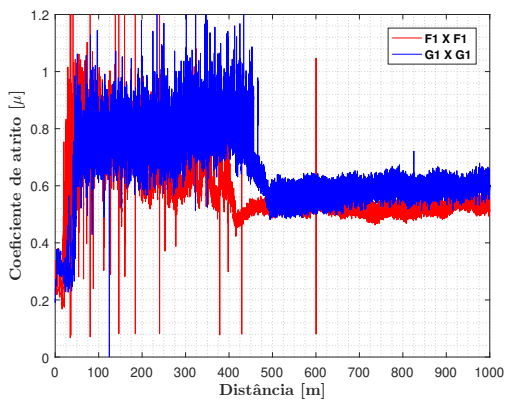
Pino	K_d	$\psi(\text{m}^3/\text{s})$	$V_\omega(\text{ms})$
A1	$7,5624 \times 10^{-04}$	$9,4226 \times 10^{-13}$	$1,0712 \times 10^{-08}$
B1	$1,7672 \times 10^{-04}$	$2,2019 \times 10^{-13}$	$2,5032 \times 10^{-09}$
C1	$4,6827 \times 10^{-04}$	$5,8346 \times 10^{-13}$	$2,3253 \times 10^{-09}$
D1	$1,1841 \times 10^{-04}$	$1,4754 \times 10^{-13}$	$1,6773 \times 10^{-09}$
E1	$1,7197 \times 10^{-03}$	$2,1427 \times 10^{-12}$	$2,4358 \times 10^{-08}$

Fonte: Próprio Autor

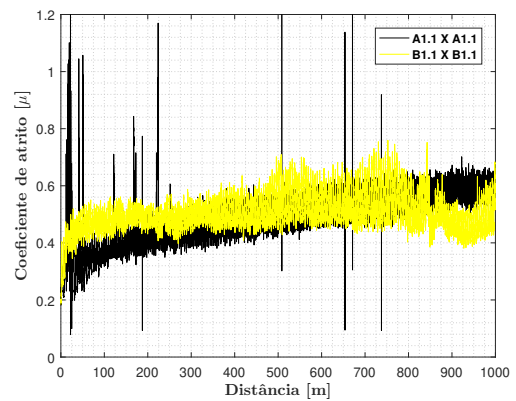
Uma análise interessante é obtida entre as duas taxas de desgaste calculadas, uma é dada em função da velocidade de deslizamento e tempo [m/s] a outra em função da distância de deslizamento, realizado a multiplicação dos valores obtidos em ψ pelo número de ciclos para completar o experimento 11.368 multiplicado pelo tempo de cada ciclo, nesta caso 1[s] se obtêm o mesmo valor da taxa de desgaste calculado em função da distância V_ω .

Foram realizados dois experimentos sobre os discos utilizados no primeiro ensaio com o intuito de analisar o comportamento do material com outra topografia de superfície e maior rugosidade devido ao atrito e desgaste, neste caso são os pares A1 e B1, que são representados pelo acréscimo de .1, ou seja, o par A1 é representado por A1.1 e assim sucessivamente. Conforme observado na Figura 40 (a) com as condições próximas aos utilizados no primeiro experimento obteve-se um comportamento similar com maiores amplitudes de oscilação no início do ensaio durante o período de amaciamento e transição, atingindo o estado de deslizamento constante próximo aos 450 [m]. Por outro lado o ensaio realizado sobre a trilha de desgaste aplicado no primeiro experimento não apresentou um período de transição inicial, tendo menores amplitudes de oscilação no início e um estado mais linear e constante. Conforme observado na Figura 40 (b).

Figura 40: Carga normal aplicada 20N e velocidade 0,0879 m/s



(a) Coeficiente de atrito.

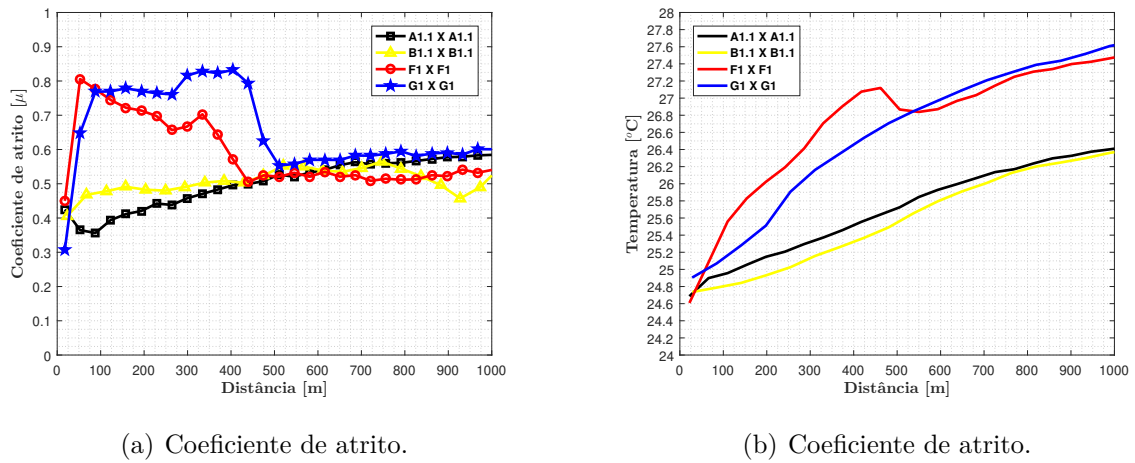


(b) Temperatura na superfície de contato.

Fonte: Próprio Autor

Da mesma forma a Figura 41 a apresenta os dois gráficos com o seu nível da raiz quadrada média, e a Figura 41 b a variação de temperatura durante o ensaio. Também é notável que o aumento da carga aplicada tem influência sobre o período de transição, que ocorre entre 400 e 500 [m] diferentemente do caso anterior que ficou entre 200 e 350[m].

Figura 41: Carga normal aplicada 20N e velocidade 0,0879 m/s



Fonte: Próprio Autor

A Tabela 6 mostra os resultados obtidos para o carga normal de 20[N] e velocidade de deslizamento em 0,0879 [m/s]. Fazendo um comparativo entre os resultados deste experimento com o anterior, observa-se que mesmo com a condição da topografia de superfície com maior rugosidade para o par tribológico A1.1 e B1.1 não teve efeito sobre as variações do coeficiente de atrito. Pode-se analisar que a média entre as variações foi de 1,55[°C] para o experimento anterior e de 2,22[°C] para este, do mesmo modo o coeficiente de atrito μ de 0,61 para o experimento anterior e μ de 0,55. A maior carga aplicada teve influência no menor coeficiente de atrito e maior variação de temperatura.

Tabela 6: Resultados obtidos para 20N e 0,0879 m/s

Par tribológico	R_a	P_{mp}	P_{md}	V_{tp} (°C)	μ
A1.1 x A1.1	0,12	0,0487	0,1444	1,66	0,5610
B1.1 x B1.1	0,18	0,0716	0,1782	1,69	0,5478
F1 x F1	0,06	0,1422	0,3254	2,85	0,5231
G1 x G1	0,04	0,0941	0,2580	2,71	0,5825

Fonte: Próprio Autor

O valor de (R_a) demonstrado na tabela refere-se ao do disco. Após o par tribológico ser submetido a um experimento, a única rugosidade que pode ser obtida após este ensaio é o (R_a) do disco, pois o rugosímetro utilizado mede topografia plana, para a obtenção

da rugosidade inicial do pino foi medido no perfil longitudinal do mesmo e considerado a mesma topografia para a sua extremidade visto que foram submetidos ao mesmo acabamento superficial. A Tabela 7 apresenta a quantificação de desgaste para o pino para força normal de 20N e velocidade de deslizamento 0,0879 m/s.

Tabela 7: Coeficiente e taxa de desgaste do pino para 20N e 0,0879 m/s

Pino	K_p	$\psi(\text{m}^3/\text{s})$	$V_\omega(\text{ms})$
A1.1	$1,7257 \times 10^{-04}$	$5,4431 \times 10^{-13}$	$6,1881 \times 10^{-09}$
B1.1	$2,5371 \times 10^{-04}$	$8,0030 \times 10^{-13}$	$9,0978 \times 10^{-09}$
F1	$5,0388 \times 10^{-04}$	$1,5894 \times 10^{-12}$	$1,8069 \times 10^{-08}$
G1	$3,3344 \times 10^{-04}$	$1,0518 \times 10^{-12}$	$1,1957 \times 10^{-08}$

Fonte: Próprio Autor

A Tabela 8 apresenta a quantificação do desgaste do disco para força normal de 20 [N] e velocidade de deslizamento 0,0879 [m/s].

Tabela 8: Coeficiente e taxa de desgaste do disco para 20N e 0,0879 m/s

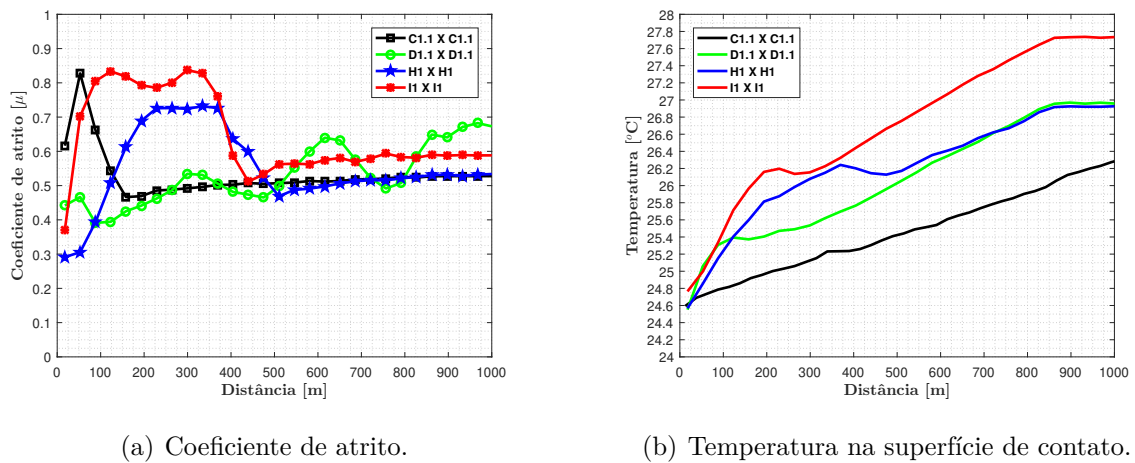
Pino	K_d	$\psi(\text{m}^3/\text{s})$	$V_\omega(\text{ms})$
A1.1	$6,4769 \times 10^{-04}$	$1,6140 \times 10^{-12}$	$1,8348 \times 10^{-08}$
B1.1	$7,9930 \times 10^{-04}$	$1,9918 \times 10^{-12}$	$2,2643 \times 10^{-08}$
F1	$1,4595 \times 10^{-04}$	$3,6371 \times 10^{-12}$	$4,1347 \times 10^{-08}$
G1	$1,1572 \times 10^{-04}$	$2,8838 \times 10^{-12}$	$3,2783 \times 10^{-08}$

Fonte: Próprio Autor

Neste caso, foram realizados quatro experimentos, sendo dois pares com rugosidades similares e dois com topografias de superfície diferentes, conforme apresentado na Tabela 9. A Figura 42 apresenta um comportamento diferente dos apresentados no gráfico anterior, no qual os pares tribológicos foram ensaiados sobre uma trilha de desgaste já existente. A linha preta representando o par tribológico C1.1 teve um rápido período de transição para um valor maior e diminuiu para um estado constante aos 150[m] de deslizamento, enquanto o par D1.1 representado em cor verde, teve um comportamento similar entre o (III) e (IV) apresentado por Bhushan (2013). O que demonstra a forte influência que a rugosidade

(R_a) tem sobre o comportamento do coeficiente de atrito durante o ensaio, lembrando que esse experimento é do tipo ponto onde a trilha aumenta durante o ensaio, além da rugosidade o aumento desta faixa tem efeito sobre o comportamento de μ . Também é notável que o aumento da velocidade tem influência sobre o período de transição, que ocorre no intervalo entre 450 e 550 [m].

Figura 42: Carga normal aplicada 10N e velocidade 0,2199 m/s



Fonte: Próprio Autor

A Tabela 9 mostra os resultados obtidos para força normal de 10[N] e velocidade de deslizamento em 0,2199 [m/s].

Tabela 9: Resultados obtidos para 10N e 0,2199 m/s

Par tribológico	R_a	P_{mp}	P_{md}	V_{tp} (°C)	μ
C1.1 x C1.1	0,17	0,0188	0,0389	1,7	0,5275
D1.1 x D1.1	0,22	0,0374	0,0655	2,4	0,6783
H1 x H1	0,05	0,0192	0,0449	3,17	0,5455
I1 x I1	0,03	0,0468	0,0847	2,4	0,5885

Fonte: Próprio Autor

Pode-se analisar que a média entre as variações foi de 2,41 [°C] do mesmo modo o coeficiente de atrito com média de μ de 0,58. A maior velocidade de deslizamento apresentou maior coeficiente de atrito mesmo com menor carga aplicada e teve influência

na maior variação de temperatura. A Tabela 10 apresenta à quantificação de desgaste para o pino com força normal de 10 [N] e velocidade de deslizamento em 0,2199 [m/s].

Tabela 10: Coeficiente e taxa de desgaste do pino para 10N e 0,2199 m/s

Pino	K_p	$\psi(\text{m}^3/\text{s})$	$V_\omega(\text{ms})$
C1.1	$1,3323 \times 10^{-04}$	$5,2534 \times 10^{-13}$	$2,3888 \times 10^{-09}$
D1.1	$2,6505 \times 10^{-04}$	$1,0451 \times 10^{-12}$	$4,7522 \times 10^{-09}$
H1	$1,3607 \times 10^{-04}$	$5,3652 \times 10^{-13}$	$2,4396 \times 10^{-09}$
G1	$3,3167 \times 10^{-04}$	$1,3078 \times 10^{-12}$	$5,9466 \times 10^{-09}$

Fonte: Próprio Autor

Assim como demonstrado para primeira velocidade de deslizamento, a multiplicação dos valores obtidos em ψ pelo número de ciclos para completar o experimento multiplicado pelo tempo de cada ciclo, obtêm-se o mesmo valor da taxa de desgaste calculado em função da distância V_ω . A Tabela 11 apresenta à quantificação de desgaste para o disco com força normal de 10 [N] e velocidade de deslizamento em 0,2199 [m/s].

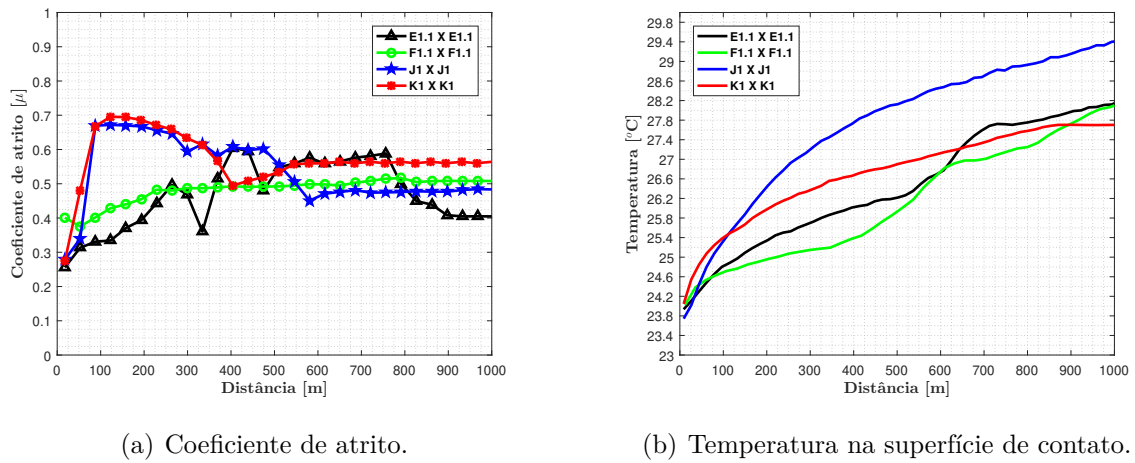
Tabela 11: Coeficiente e taxa de desgaste do disco para 10N e 0,2199 m/s

Pino	K_d	$\psi(\text{m}^3/\text{s})$	$V_\omega(\text{ms})$
C1.1	$3,4893 \times 10^{-04}$	$1,0870 \times 10^{-12}$	$4,9428 \times 10^{-09}$
D1.1	$5,8759 \times 10^{-04}$	$1,8303 \times 10^{-12}$	$8,3227 \times 10^{-09}$
H1	$4,0279 \times 10^{-04}$	$1,2547 \times 10^{-12}$	$5,7052 \times 10^{-09}$
G1	$7,5982 \times 10^{-04}$	$2,3668 \times 10^{-12}$	$1,0762 \times 10^{-08}$

Fonte: Próprio Autor

Neste caso, foram realizados quatro experimentos sendo dois pares com rugosidade similares e dois com topografias de superfície diferentes, conforme apresentado na Tabela 12. A Figura 43 apresenta os dois gráficos do coeficiente de atrito, e a Figura 12 b a variação de temperatura durante o ensaio. É notório que o aumento da carga aplicada assim como da velocidade tem influência sobre o período de transição para o estado constante de deslizamento, que ocorre entre 400 e 600 [m].

Figura 43: Carga normal aplicada 20N e velocidade 0,2199 m/s



Fonte: Próprio Autor

A Tabela 12 mostra os resultados obtidos para força normal de 20[N] e velocidade de deslizamento 0,2199 [m/s].

Tabela 12: Resultados obtidos para 20N e 0,2199 m/s

Par tribológico	R_a	P_{mp}	P_{md}	V_{tp} (°C)	μ
E1.1 x E1.1	0,78	0,1290	0,2422	4,07	0,5005
F1.1 x F1.1	0,62	0,1615	2,3737	4,07	0,5082
J1 x J1	0,04	0,0843	0,1429	3,65	0,4785
K1 x K1	0,06	0,0832	0,1458	5,66	0,5620

Fonte: Próprio Autor

Pode-se analisar que a média entre as variações foi de 4,36 [°C] do mesmo modo o coeficiente de atrito com média de μ de 0,51. Comparando com o resultado anterior para a mesma velocidade, a maior carga aplicada apresentou menor coeficiente de atrito e teve influência na maior variação de temperatura. A Tabela 13 apresenta à quantificação de desgaste para o pino com força normal de 20 [N] e velocidade de deslizamento em 0,2199 [m/s].

Tabela 13: Coeficiente e taxa de desgaste do pino para 20N e 0,2199 m/s

Pino	K_p	$\psi(\text{m}^3/\text{s})$	$V_\omega(\text{ms})$
E1.1	$4,5711 \times 10^{-04}$	$3,6047 \times 10^{-12}$	$1,6391 \times 10^{-08}$
F1.1	$5,7227 \times 10^{-04}$	$4,5129 \times 10^{-12}$	$2,0521 \times 10^{-08}$
J1	$2,9871 \times 10^{-04}$	$2,3556 \times 10^{-12}$	$1,0712 \times 10^{-08}$
K1	$2,9482 \times 10^{-04}$	$2,3249 \times 10^{-12}$	$1,0572 \times 10^{-08}$

Fonte: Próprio Autor

A Tabela 14 apresenta à quantificação de desgaste para o disco com força normal de 20 [N] e velocidade de deslizamento em 0,2199 [m/s].

Tabela 14: Coeficiente e taxa de desgaste do disco para 20N e 0,2199 m/s

Pino	K_d	$\psi(\text{m}^3/\text{s})$	$V_\omega(\text{ms})$
E1.1	$1,0864 \times 10^{-03}$	$6,7679 \times 10^{-12}$	$3,0775 \times 10^{-08}$
F1.1	$1,0647 \times 10^{-02}$	$6,6330 \times 10^{-11}$	$3,0161 \times 10^{-07}$
J1	$6,4096 \times 10^{-04}$	$3,9931 \times 10^{-12}$	$1,8158 \times 10^{-08}$
K1	$6,5397 \times 10^{-04}$	$4,0742 \times 10^{-12}$	$1,8526 \times 10^{-08}$

Fonte: Próprio Autor

Davis (1997) demonstra que o coeficiente de atrito apresenta um grande número de incerteza tendo como exemplo o aço de médio carbono SAE [1032] que tem uma grande variação, podendo apresentar valores de 0,23 á 0,54 para atrito cinético em deslizamento. Na Tabela 15 são apresentados os coeficientes de atrito usados como referência para este trabalho.

Tabela 15: Coeficiente de atrito

Material 1	Material 2	Estático	Cinético
Aço	Aço	0,74	0,57 - 0,62
Alumínio	Aço	0,61	0,47

Fonte: Adaptado de Berkeley (2019)

Os valores dos coeficientes de atrito obtidos estão próximos aos valores demonstrados na literatura. O atrito deslizante dos aços tem sido amplamente estudado, o μ varia de acordo com a composição e a microestrutura e também depende frequentemente da carga, para um aço carbono a 0,4%, mostra uma transição de um valor relativamente alto de μ em cargas baixas, e um valor mais baixo em cargas elevadas (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). O aço do par tribológico utilizado nos ensaios, são de médio carbono e contem entre $(0,2\% < C < 0,5\%)$ (CHIAVERINI, 1977).

O efeito do menor coeficiente de atrito para maiores cargas ocorreu especialmente para a carga normal aplicada de 20[N] e velocidade de deslizamento 0,2199 [m/s], considerando a média dos coeficientes com condições de parâmetros de rugosidade R_a menores que 0.08 μm tem-se μ igual a 0,61 para o primeiro caso, μ igual a 0,55 para o segundo caso, μ de 0,56 para o terceiro caso e μ igual a 0,52 para o último caso.

A reação química dos metais com o meio ambiente resulta em camadas de proteção da superfície que reduzem o contato metálico e tem enorme influência sobre o valor do coeficiente de atrito (KARL-HEINZ; GAHR, 1987; MANG; DRESEL, 2007; MANG; BOBZIN; BARTELS, 2011). Foi sugerido que a transição para um menor coeficiente de atrito resulta da estrutura estratificada dos óxidos presentes no aço. A camada superior é Fe_2O_3 , enquanto abaixo dela estão as camadas de Fe_3O_4 e finalmente FeO para o próprio metal. De acordo com este modelo, a transição resulta da penetração da camada de Fe_2O_3 nas cargas mais altas ou quebra do óxido e exposição do metal. Os efeitos de constituintes menores no comportamento de atrito das ligas podem ser marcados como resultado da segregação da superfície (BOWDEN; TABOR., 1964; ARCHARD, 1986; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Archard e Hirst (1956) demonstraram que na maioria dos experimentos de desgaste, as condições da superfície dependem da carga, com exceção de uma menor velocidade de deslizamento, haverá um aumento considerável da temperatura das superfícies em atrito que dependerá da carga normal aplicada. Pode ser observado no experimento que a variação de temperatura é dependente da carga e velocidade, tendo a média entre as variações para o primeiro caso de 10N e velocidade de 0,0879 [m/s] com o valor de 1,50 [°C], no segundo caso com força normal aplicada de 20N e velocidade de 0,0879 [m/s] com variação de temperatura em 2,22 [°C], para o terceiro caso com força normal aplicada de 10N e velocidade de deslizamento em 0,2199 [m/s] com variação de temperatura em 2,41 [°C] e quarto caso com força normal aplicada de 20N e velocidade de deslizamento em 0,2199 [m/s] com variação de temperatura em 4,36 [°C]. Para baixas temperaturas, o coeficiente de atrito entre metais é independente da temperatura e depende apenas da

combinação de materiais (POPOV, 2017; LUDEMA; AJAYI, 2018).

A seguir, na Tabela (16) são apresentados alguns dados experimentais de desgaste específicos obtidos usando um sistema de pino e disco com uma carga de 0,4 kgf e uma velocidade de 1,8 m/s.

Tabela 16: Taxa de desgaste para alguns materiais

Material A	Material B	$\psi(\text{mm}^3/\text{m})$	HB (kgf/mm ²)	μ	K
Aço	Aço	1.57×10^{-2}	186	0.62	7×10^{-3}
60-40 Latão	Aço ferramenta	2.40×10^{-3}	95	0.24	6×10^{-4}
Teflon	Aço ferramenta	2×10^{-4}	5	0.18	2.5×10^{-5}
Estelite grade 1	Aço ferramenta	32×10^{-6}	690	0.60	5.5×10^{-5}
Aço inoxidável	Aço ferramenta	27×10^{-6}	250	0.53	1.7×10^{-7}
Polietileno	Aço Ferramenta	3×10^{-6}	17	0.53	1.3×10^{-7}
WC	WC	0.3×10^{-6}	1300	0.35	1×10^{-6}

Fonte: Adaptado de Archard e Hirst (1956)

Para correlação entre os dados obtidos na etapa experimental com os apresentados na Tabela 16 para o par tribológico pino de aço sobre o disco de aço, foi recalculada a taxa de desgaste através da equação 14 no qual é necessária a velocidade de deslizamento, carga aplicada, coeficiente de desgaste do material e dureza. A taxa calculada em função da distância de deslizamento e tempo é $2.856 \times 10^{-11} [\text{m}^3/\text{s}]$ com o coeficiente de desgaste do par pino aço sobre o disco de aço descrito pelo autor de 7×10^{-3} . Archard e Hirst (1956) demonstraram que uma grande mudança das condições da superfície, como a remoção da película protetora, pode alterar o coeficiente de atrito no máximo por um fator de dois ou três, enquanto a taxa de desgaste pode mudar em uma ou duas ordens de magnitude. Portanto, pequenas alterações nas condições superficiais, que não produzem variações detectáveis no atrito podem levar uma mudança significativa na taxa de desgaste.

Como pode ser visto, para o par tribológico aço sobre aço das amostras A e B da Tabela 16 a variação entre à ordem de grandeza tanto para a taxa quanto para o coeficiente de desgaste, tem variação entre um e dois para ordem de magnitude comparado com os resultado obtidos para rugosidade (R_a) superior a 0,08 (μ)m.

Ludema e Ajayi (2018) afirmam que ninguém é capaz de prever a constante k para qualquer aplicação específica com uma ordem de precisão melhor que 10%. Tal impre-

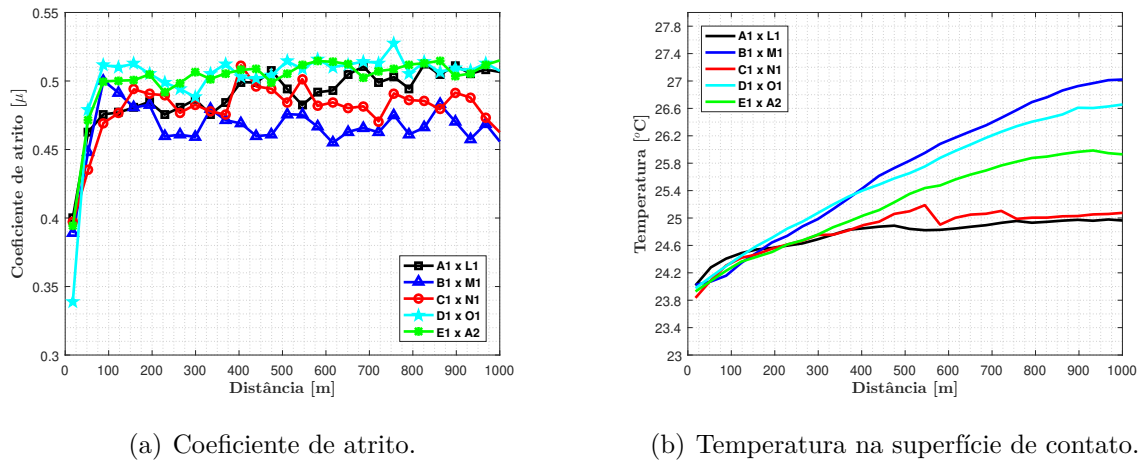
cisão pode ser vista na grande faixa para os valores do coeficiente de desgaste K , que apresenta variações de 10^{-4} a 10^{-9} . Archard (1986) afirmou que a comparação da teoria com as experiências deu valores deduzidos de K tipicamente na faixa 10^{-3} a 10^{-6} . Esse resultado mostrou que, em condições aceitáveis de desgaste, asperidades devem ser esfregadas muitas vezes antes do dano. Kragelskii, Bobychin e Kombalov (1982) propõe que k é a probabilidade de remover uma partícula de desgaste do ponto de contato e que apresenta uma variação na ordem de 10^{-2} a 10^{-7} . Bhushan (2013) afirmou que o valor de k varia entre 10^{-8} a 10^{-4} para desgaste leve e entre 10^{-4} a 10^{-2} para desgaste severo na maioria das combinações de pares tribológicos, dependendo das condições de operação. Neste trabalho, os valores obtidos para os coeficientes de desgaste k em diferentes condições de carga aplicada e velocidades de deslizamento, ficaram dentro da faixa de variação presente na literatura entre 10^{-4} a 10^{-2} para desgaste severo, o que era previsto, pois os experimentos foram realizados em condições não lubrificadas. Ludema e Ajayi (2018) demonstra que, não é incomum muitos autores tratarem erroneamente o k , como sendo uma propriedade do material, e que a equação para taxa de desgaste total apresentada por Archard (1953) é em certo ponto, inadequada, pois utiliza-se apenas três parâmetros dos mais de trinta possíveis. Por outro lado, é demonstrado que a maioria das equações em aplicações de engenharia, tem modelos aproximados de qualquer maneira, e que, são úteis até que algo melhor seja proposto.

Par tribológico alumínio x aço com variação de carga normal em 10 e 20N e velocidade de deslizamento em 0,0879 e 0,2199 m/s .

A Figura 44 a mostra o valor quadrático médio (RMS) de todos os sinais ao longo da distância de deslizamento. Pode observar que todas as amostras tem um comportamento próximo ao caso (I) da curva em forma de S demonstrado em Bhushan (2013), onde o atrito pode permanecer em seu estado inicial por algum tempo e depois ter um período de transição lentamente para o estado constante. Neste caso o coeficiente de atrito teve um curto período de amaciamento com transição para o estado constante após 100[m].

A Figura 44 b tem a variação da temperatura ao longo da distância de deslizamento entre o pino e o disco, neste observa-se que a variação de amplitude do coeficiente de atrito se correlaciona com o comportamento da variação de temperatura, por outro lado a diferença entre o valor inicial e final da temperatura demonstrado como $V_{tp}(^{\circ}\text{C})$ apresenta valores diferentes mesmo para coeficientes de atrito com valores similares como das amostras dos pares tribológicos C1xO1 e E1xA2 apresentados na tabela 17.

Figura 44: Carga normal aplicada 10N e velocidade 0,0879 m/s



Fonte: Próprio Autor

A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos para este caso.

Tabela 17: Resultados obtidos para 10N e 0,0879 m/s

Par tribológico	R_{ad}	R_{ap}	P_{mp}	P_{md}	V_{tp} (°C)	μ
A1 x L1	0,06	0,24	0,0101	0,0073	0,96	0,5011
B1 x M1	0,05	0,25	0,0110	0,0066	2,99	0,4670
C1 x N1	0,04	0,19	0,0106	0,0133	1,21	0,4849
D1 x O1	0,06	0,21	0,0093	0,0087	2,65	0,5124
E1 x A2	0,06	0,23	0,0083	0,0090	2,02	0,5103

Fonte: Próprio Autor

no qual R_{ad} é a rugosidade do disco, R_{ap} é a rugosidade do pino, P_{mp} refere-se a perda de massa do pino, P_{md} a perda de massa do disco, V_{tp} a variação de temperatura dada pela relação entre a final e inicial durante cada ensaio e μ o coeficiente de atrito.

Para se obter o valor do μ foi considerado apenas o de deslizamento em estado constante, para este caso após os 200 [m] de deslizamento, o valor do coeficiente de atrito é o (RMS) do intervalo entre os dados 2.273,6 e 11.368. A Tabela 18 mostra os valores obtidos para o coeficiente e taxa de desgaste.

Tabela 18: Coeficiente e taxa de desgaste do disco para 10N e 0,0879 m/s

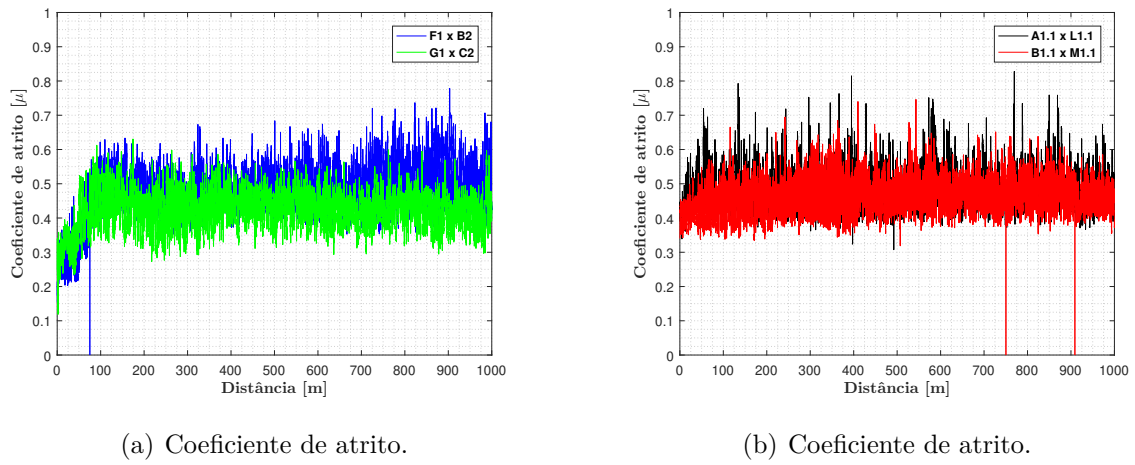
Pino	K_p	$\psi(\text{m}^3/\text{s})$	$V_\omega(\text{ms})$
A1	$1,2316 \times 10^{-04}$	$3,2308 \times 10^{-13}$	$3,6727 \times 10^{-09}$
B1	$1,3414 \times 10^{-04}$	$3,5186 \times 10^{-13}$	$4,0001 \times 10^{-09}$
C1	$1,2926 \times 10^{-04}$	$3,3907 \times 10^{-13}$	$3,8545 \times 10^{-09}$
D1	$1,1341 \times 10^{-04}$	$2,9749 \times 10^{-13}$	$3,3818 \times 10^{-09}$
E1	$1,0121 \times 10^{-04}$	$2,6550 \times 10^{-13}$	$3,0182 \times 10^{-09}$

Fonte: Próprio Autor

Archard (1986) propõe que (p_m) é a pressão média de contato, no qual é considerada a menor dureza entre os dois materiais em contato. Nesse sentido, para o par tribológico ensaiado a menor dureza é do alumínio, logo o coeficiente e taxa de desgaste foram calculadas apenas para os pinos, diferentemente do par tribológico da primeira sequência experimental aço do pino sobre aço do disco, onde as durezas superficiais obtidas foram próximas, portanto foi calculada a taxa para o pino e disco separadamente.

Foram realizados dois experimentos, sobre o disco utilizado no primeiro experimento com o intuito de analisar o comportamento do material sobre nova topografia de superfície. Na Figura 45 a com as condições próximas à utilizada no primeiro experimento teve o comportamento similar, com período de transição no início do teste para um estado constante superior ao valor inicial. A Figura 45 b foi realizado o teste sobre dois pares tribológicos utilizados no caso um, objetivando a análise quanto ao seu comportamento após o período de amaciamento, conforme demonstrado o ensaio tem um comportamento com deslizamento em estado constante desde o início do experimento.

Figura 45: Carga normal aplicada 20N e velocidade 0,0879 m/s



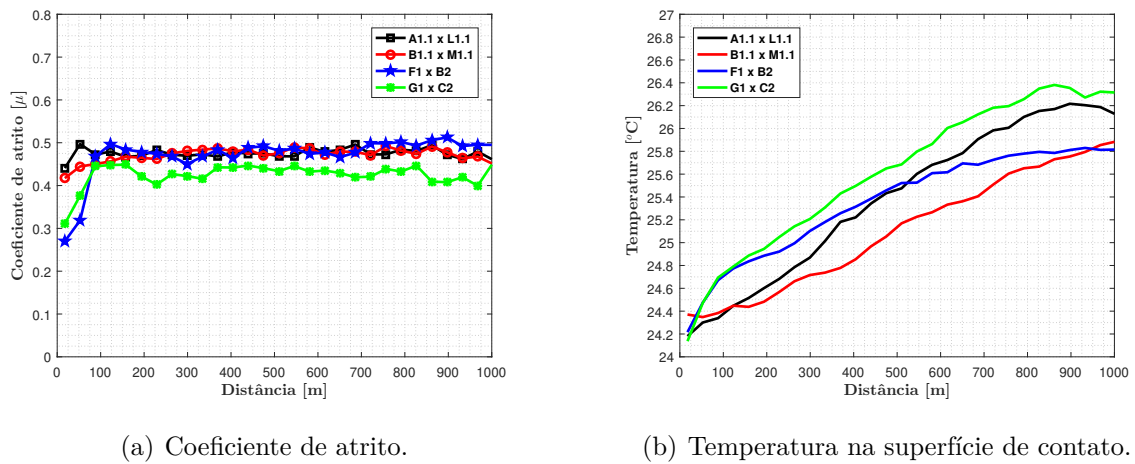
(a) Coeficiente de atrito.

(b) Coeficiente de atrito.

Fonte: Próprio Autor

Da mesma forma a Figura 46 apresenta os dois gráficos com o seu nível da raiz quadrada média (RMS), e a Figura 46 b variação de temperatura durante o ensaio.

Figura 46: Carga normal aplicada 20N e velocidade 0,0879 m/s



(a) Coeficiente de atrito.

(b) Temperatura na superfície de contato.

Fonte: Próprio Autor

A Tabela 19 mostra os resultados obtidos para força normal aplicada de 20[N] e velocidade de deslizamento em 0,0879 [m/s]. Realizando um comparativo entre os resultados deste experimento com o anterior, observa-se que mesmo com a condição da topografia de superfície com maior rugosidade para o pino A.1.1 sobre o disco L.1.1 com rugosidade (R_a) de 0,52 μm e para o pino B1.1 sobre o disco M1.1 com rugosidade (R_a) de 0,37 μm ,

que foram realizados sobre uma trilha existente, o maior valor da rugosidade não teve efeito sobre as variações do coeficiente de atrito e temperatura. Pode-se analisar que a média entre as variações foi de $1,96[^\circ\text{C}]$ para o experimento anterior e de $1,86[^\circ\text{C}]$ para este, do mesmo modo o coeficiente de atrito μ de 0,49 para o experimento anterior e μ de 0,46. A maior carga aplicada teve influência no menor coeficiente de atrito e menor temperatura.

Tabela 19: Resultados obtidos para 20N e 0,0879 m/s

Par tribológico	R_{ad}	R_{ap}	P_{mp}	P_{md}	V_{tp} ($^\circ\text{C}$)	μ
A1.1 x L1.1	0,52	-	0,0134	0,0105	2,00	0,4794
B1.1 x M1.1	0,37	-	0,0145	0,0166	1,48	0,4793
F1 x B2	0,05	0,18	0,0109	0,0092	1,61	0,4838
G1 x C2	0,07	0,20	0,0158	0,0110	2,21	0,4275

Fonte: Próprio Autor

A Tabela 20 apresenta os valores para o coeficiente e taxa de desgaste. No qual (k_p) foi menor com o aumento da carga aplicada, enquanto ψ e $V\omega$ teve a mesma ordem de magnitude exponencial.

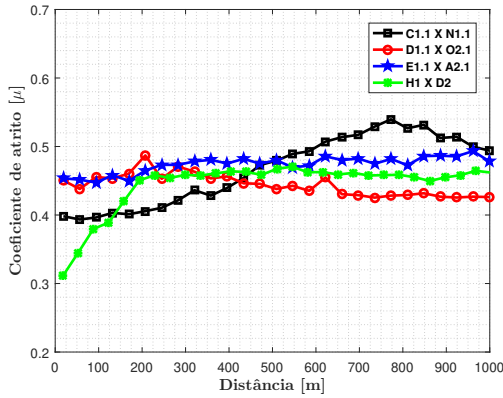
Tabela 20: Coeficiente e taxa de desgaste do pino para 20N e 0,0879 m/s

Pino	K_d	$\psi(\text{m}^3/\text{s})$	$V_\omega(\text{ms})$
A1.1	$8,1703 \times 10^{-05}$	$4,2364 \times 10^{-13}$	$4,8727 \times 10^{-09}$
B1.1	$8,8410 \times 10^{-05}$	$4,6382 \times 10^{-13}$	$5,2727 \times 10^{-09}$
F1	$6,6460 \times 10^{-05}$	$3,4867 \times 10^{-13}$	$3,9636 \times 10^{-09}$
G1	$9,6337 \times 10^{-05}$	$5,0541 \times 10^{-13}$	$5,7455 \times 10^{-09}$

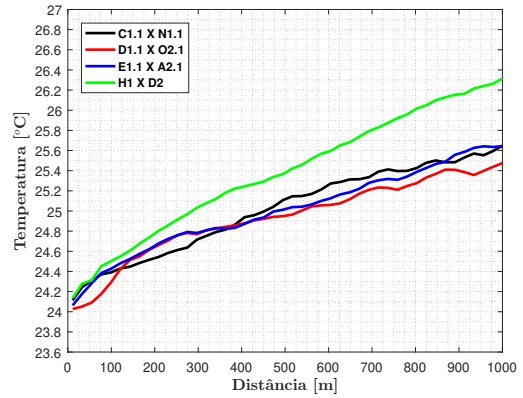
Fonte: Próprio Autor

A Figura 47 (a) apresenta o seu nível da raiz quadrada média (RMS) dos valores obtidos para os coeficientes de atrito pela distância de deslizamento, e a Figura 47 b a variação de temperatura durante o ensaio.

Figura 47: Carga normal aplicada 10N e velocidade 0,2199 m/s



(a) Coeficiente de atrito.



(b) Temperatura na superfície de contato.

Fonte: Próprio Autor

Neste caso, foram realizados quatro experimentos com topografias de superfície diferentes, conforme apresentado na Tabela 21. A variação da rugosidade (R_a) teve efeito sobre o comportamento entre os coeficientes dos pares submetidos ao ensaio sobre uma trilha de desgaste existente, o par tribológico C1.1 x N1.1 com uma rugosidade intermediária $0,38 \mu m$ teve uma mudança significativa no comportamento entre os demais pares tribológicos. Como o ensaio é do tipo ponto, e depois aumenta continuamente à medida que o desgaste avança, o aumento desta faixa de desgaste bem como a rugosidade demonstraram ter influência sobre o comportamento no período de transição e estado constante ao longo da distância de deslizamento. Por outro lado, o par tribológico com rugosidade de $0,05 \mu m$ para o disco e $0,22 \mu m$ para o pino, teve um comportamento próximo ao caso (I) da curva S demonstrados por (BHUSHAN, 2013). Também é notável que o aumento da velocidade tem influência sobre o período de transição, que ocorre após os 200 $[m]$, diferentemente do caso anterior 100 $[m]$.

Tabela 21: Resultados obtidos para 10N e 0,2199 m/s

Par tribológico	R_{ad}	R_{ap}	P_{mp}	P_{md}	V_{tp} (°C)	μ
C1.1 x N1.1	0,38	-	0,0208	0,0024	1,51	0,4750
D1.1 x O2.1	0,57	-	0,0221	0,0018	1,43	0,4244
E1.1 x A2.1	0,86	-	0,0091	0,0024	1,58	0,4943
H1 x D2	0,05	0,22	0,0041	0,0030	2,13	0,4576

Fonte: Próprio Autor

A tabela 22 apresenta os valores para o coeficiente e taxa de desgaste. No qual (k_p) para a mostra H1 x D2 apresentou ordem de grandeza exponencial igual ao caso anterior, enquanto ψ teve variação da ordem de magnitude exponencial em dois pares e $V\omega$ teve a mesma ordem de grandeza exponencial.

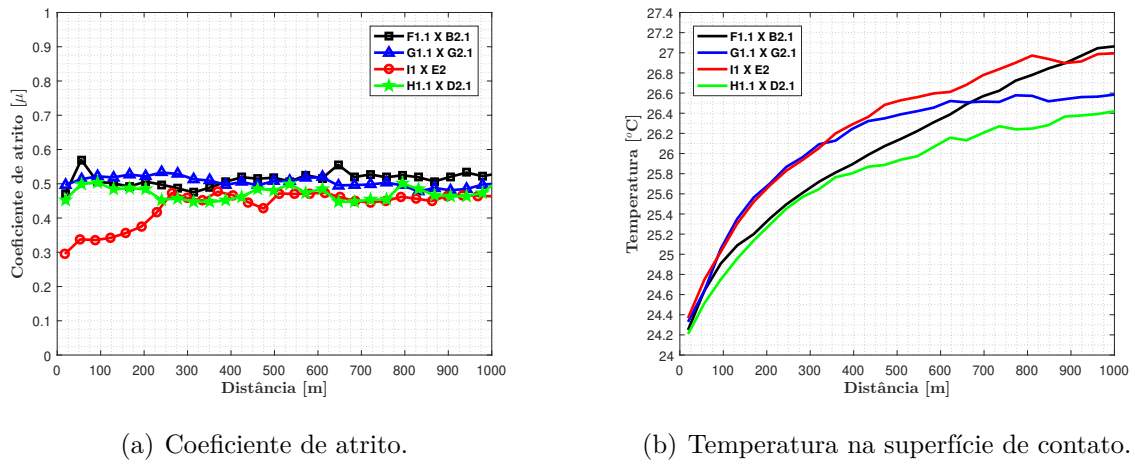
Tabela 22: Coeficiente e taxa de desgaste para o pino para 10N e 0,2199 m/s

Pino	K_p	$\psi(\text{m}^3/\text{s})$	$V_\omega(\text{ms})$
C1.1	$2,5365 \times 10^{-04}$	$1,6634 \times 10^{-12}$	$7,5636 \times 10^{-09}$
D1.1	$2,6950 \times 10^{-04}$	$1,7673 \times 10^{-12}$	$8,0364 \times 10^{-09}$
E1.1	$1,1097 \times 10^{-04}$	$7,2772 \times 10^{-13}$	$3,3091 \times 10^{-09}$
H1	$4,9998 \times 10^{-05}$	$3,2787 \times 10^{-13}$	$1,4909 \times 10^{-09}$

Fonte: Próprio Autor

Da mesma forma, novamente quatro experimentos com topografias de superfície diferentes foram ensaiados mostrados na Figura 48, conforme apresentado na Tabela 23. Os coeficientes apresentaram um comportamento em deslizamento constante. Nesse sentido, o par tribológico com rugosidade de $0,04\mu\text{m}$ para o disco e $0,24\mu\text{m}$ para o pino, teve um comportamento igual ao caso (I) da curva típica em forma de S demonstrado por (BHUSHAN, 2013). É notório que o aumento da carga aplicada e velocidade tem efeito sobre o período de transição para o deslizamento em estado constante, que ocorre após os 300 [m], diferentemente do caso anterior que foi em 200[m].

Figura 48: Carga normal aplicada 20N e velocidade 0,2199 m/s



Fonte: Próprio Autor

Tabela 23: Resultados obtidos para 20N e 0,2199 m/s

Par tribológico	R_{ad}	R_{ap}	P_{mp}	P_{md}	V_{tp} (°C)	μ
F1.1 x B2.1	1,93	-	0,0286	0,0077	2,81	0,5229
G1.1 x C2.1	1,35	-	0,0260	0,0097	2,25	0,5022
H1.1 x D2.1	0,78	-	0,0133	0,0104	2,62	0,4594
I1 x E2	0,04	0,24	0,0079	0,0083	2,21	0,4812

Fonte: Próprio Autor

A Tabela 24 apresenta os valores para o coeficiente e taxa de desgaste. No qual (k_p) foi menor para as menores rugosidades, enquanto ψ o par I1 x E2 teve a mesma grandeza exponencial de todos os experimentos, e $V\omega$ com exceção para o par F1.1 X B2.1 obteve a mesma magnitude de todos os demais experimentos.

Tabela 24: Coeficiente e taxa de desgaste para o pino 20N e 0,2199 m/s

Pino	K_p	$\psi(\text{m}^3/\text{s})$	$V_\omega(\text{ms})$
F1.1	$1,7438 \times 10^{-04}$	$2,2871 \times 10^{-12}$	$1,0400 \times 10^{-08}$
G1.1	$1,5853 \times 10^{-04}$	$2,0792 \times 10^{-12}$	$9,4545 \times 10^{-09}$
H1	$8,1094 \times 10^{-05}$	$1,0636 \times 10^{-12}$	$4,8364 \times 10^{-09}$
I1	$4,8168 \times 10^{-05}$	$6,3170 \times 10^{-13}$	$2,8727 \times 10^{-09}$

Fonte: Próprio Autor

Considerando a média entre os coeficientes de atrito obtidos, para o primeiro experimentos o μ foi de 0,51, para o segundo caso o μ foi de 0,47. No terceiro caso o μ foi de 0,46 e para o quarto caso o μ foi de 0,49, todos os valores estão condizentes com o valor presente na literatura é 0,47 (BERKELEY, 2019).

Ludema e Ajayi (2018) propõe que no deslizamento de repetição com a forma de amostra de pino no disco, a perda de desgaste do pino é maior para combinações de metal, a menos que o disco seja muito mais macio que o pino. Como pode-se observar para este experimento foi demonstrado a maior perda de massa do pino para valores de rugosidade superiores a $0.08 \mu\text{m}$. Diferentemente do par tribológico aço sobre o aço, no qual o desgaste foi maior para o disco. Os valores obtidos para o coeficiente de desgaste do par tribológico pino de alumínio sobre o disco de aço ficaram tipicamente entre 10^{-4} a 10^{-5} dentro dos valores presentes na literatura.

A oxidação da superfície, produz uma camada de óxido de alumínio que promove uma redução no atrito, no qual pode ser observado nos experimentos um menor valor para o par tribológico alumínio e aço em comparação com o par aço e aço. Os efeitos da segregação da superfície são complexos, mas podem fornecer uma maneira de alterar as propriedades de atrito de uma liga através de modificações relativamente pequenas em sua composição (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Conforme discutido nessa seção, é possível perceber que através da instrumentação desenvolvida, garantiu-se uniformidade nos parâmetros de ensaio entre as amostras, quanto a distância de deslizamento e velocidade, bem como aquisição dos dados em sincronismo para as duas rotações. Os resultados obtidos a partir do método experimental demonstraram a viabilidade da aplicação deste equipamento para análise tribológica seguindo os procedimentos recomendados pela norma ASTM G99 (2017). Pois, os resultados obtidos

ficaram dentro dos valores sugeridos na literatura, tanto para o valor do coeficiente de atrito e o seu comportamento ao longo da distância de deslizamento para os dois diferentes pares de materiais. Nesse mesmo sentido, o valor do coeficiente e taxa de desgaste apresentaram ordem de grandeza exponencial dentro da faixa de variação sugerida por diferentes autores na literatura.

6 Considerações finais

Este capítulo destina-se às considerações finais acerca deste trabalho, bem como sugestões de trabalhos futuros com o intuito de explorar novas conclusões sobre o assunto.

6.1 Conclusões

De acordo com a análise dos resultados, sintetizam-se as seguintes conclusões. Através dos ensaios tribológicos, utilizando um tribômetro pino sobre disco com a instrumentação desenvolvida, foi possível ensaiar dois pares tribológicos em duas rotações. A instrumentação e modificações estruturais no tribômetro pino sobre o disco apresentaram resultados satisfatórios.

Com relação ao sistema de aquisição implementado e os ensaios tribológicos realizados, concluiu-se que:

- A instrumentação demonstrou-se eficiente, os resultados obtidos estão dentro dos valores sugeridos na literatura, portanto é recomendado o uso deste equipamento para experimentos de aplicações tribológicas, tais como: simulações do tribocontato em uma máquina específica; avaliar materiais candidatos para uma aplicação crítica ao atrito; avaliar lubrificantes para uma aplicação específica; qualificar lubrificantes para uso com base em critérios estabelecidos; monitorar a contaminação da superfície em um produto; adquirir dados de atrito (genéricos) não específicos ao sistema como forma de comparar e desenvolver novos materiais, revestimentos ou lubrificantes; investigar a natureza fundamental do atrito de sólidos ou sólidos lubrificados.
- O controle da máquina juntamente com o sincronismo na aquisição de dados, se mostrou eficiente, pois após analisar duas combinações diferentes para o par de testes de pinos e discos, foi possível determinar dois coeficientes de atrito diferentes com variação de rotação e força normal apresentando valores sugeridos na literatura, entre $0,57$ e $0,62\mu$ para o par tribológico de aço médio carbono, e $0,47\mu$ para o par

tribológico alumínio e aço.

- O aumento da força normal de 10 [N] para 20 [N] diminui o coeficiente de atrito para o par aço SAE 1035 e 1040 para as duas diferentes velocidades de deslizamento.
- O aumento da força normal de 10 [N] para 20 [N] assim como a variação da velocidade de deslizamento de 0,0872 [m/s] para 0,2199[m/s] tem influência no comportamento do coeficiente de atrito pela distância de deslizamento, e efeito sobre o período de amaciamento e transição para o estado de deslizamento constante.
- Da mesma forma, é perceptível que a curva típica em forma de S para a variação do comportamento do coeficiente de atrito depende do material do par tribológico.
- Com análise dos resultados de variação da temperatura, pode-se concluir que à mesma não tem influência sobre o valor do coeficiente de atrito, e que este valor obtido depende do par tribológico.
- Também é possível perceber que para o par de material aço SAE 1035 para o pino e aço SAE 1040 para o disco, a variação de temperatura é linear e dependente da força normal e da velocidade. Enquanto, para o par pino da liga de alumínio 6351 e disco de aço SAE 1040 a maior variação da temperatura ocorreu na maior velocidade de deslizamento e força normal.

Com relação a quantificação do desgaste, concluiu-se que:

- O valor do coeficiente de desgaste k para o par tribológico aço SAE 1035 para o pino e aço SAE 1040 para o disco na mesma condição de acabamento superficial com rugosidade igual ou inferior a $0,08 \mu\text{m}$, esta tipicamente entre 10^{-3} e 10^{-4} , considerado desgaste severo conforme sugerido na literatura entre 10^{-2} e 10^{-4} , o que era esperado visto que os experimentos realizados foram em condições não lubrificadas.
- Enquanto, para o par pino da liga de alumínio 6351 com rugosidade entre $0,18$ e $0,24 \mu\text{m}$ e disco de aço SAE 1040 com rugosidade igual ou inferior a $0,08 \mu\text{m}$. O coeficiente de desgaste k do material de menor dureza, neste caso o alumínio esta tipicamente entre 10^{-4} e 10^{-5} . Considerando um desgaste moderado entre o severo e leve conforme sugerido na literatura esta entre 10^{-4} e 10^{-8} .

Entre as grandes dificuldades ao executar este trabalho, destacam-se a necessidade de conhecimento em instrumentação, processamento e análise de sinais e tribologia, em especial mecanismos de desgaste adesivo para deformações plásticas.

6.2 Sugestões de trabalhos futuros

A seguir, tem-se algumas sugestões de trabalhos que complementariam este estudo de maneira interessante.

- Utilizar os dados de vibração obtidos neste trabalho, para todos os experimentos realizados nos dois pares tribológicos e aplicar técnicas de aprendizagem de máquina (Machine Learning) com modelagem computacional de monitoramento da saúde estrutural (SHM), para identificar padrões no comportamento do coeficiente de atrito através da análise de vibração no domínio da frequência. Nesse sentido, pode-se novamente realizar os ensaios com o mesmo material dos pares tribológicos utilizados neste trabalho, porém em condições lubrificadas. O tribômetro pino sobre o disco é uma máquina rotativa, ao desenvolver uma modelagem computacional para este tipo de sistema, tendo os novos dados obtidos como padrão para treinamento do algoritmo e os dados do presente trabalho como condição não saudável, pode-se prever o comportamento do equipamento quando o mesmo apresentar deficit de lubrificação, essa modelagem poderia ser testada e validada em outra maquina rotativa.
- Pode-se modificar e implementar novas instrumentações no equipamento deste trabalho, como por exemplo modificação do sistema de carregamento com uso de motores de passo, para um com maior controle de parâmetros na força normal aplicada, podendo esta ser dinâmica durante o experimento, e ajuste automático para o raio da faixa de desgaste R, conseguindo assim realizar mais experimentos com o uso no mesmo disco variando a posição da trilha de desgaste.
- Investigar qual a influência das propriedades físicas relativas dos metais e seus óxidos no comportamento sobre tensões de atrito, e qual a influência da camada superficial promovida através das reações tribo químicas tem sobre o comportamento do coeficiente de atrito e desgaste, e qual a relevância dessas informações dada pela relação entre a distância de deslizamento e força normal aplicada.

Referências Bibliográficas

ARCHARD, J. Contact and rubbing of flat surfaces. **Journal of Applied Physics**, Melville, v. 24, n. 8, p. 981–988, 1953.

ARCHARD, J. Elastic deformation and the laws of friction. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, London, v. 243, n. 1233, p. 190–205, 1957.

ARCHARD, J. Friction between metal surfaces. **Wear: an international on the science and technology of friction, lubrication and wear**, Amsterdam, v. 113, n. 1, p. 3–16, 1986.

ARCHARD, J. F.; HIRST, W. The wear of metals under unlubricated conditions. **Proceedings of the Royal Society of London Series A**, London, v. 236, p. 397–410, 1956. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1956RSPSA.236..397A>. Acesso em: 15 dez 2019.

BAYER, R. G. **Mechanical Wear Fundamentals and Testing, revised and expanded (Mechanical Engineering, 172)**. [New York]: CRC Press, 2004.

BERKELEY. **Coefficient of Friction**. 2019. Disponível em: http://www-eng.lbl.gov/~ajdemell/coefficients_of_friction.html. Acesso em: 15 out. 2019.

BHUSHAN, B. **Tribology and mechanics of magnetic storage devices**. Boca Raton: Springer, 1996.

BHUSHAN, B. **Modern tribology handbook**. Boca Raton: CRC Press, 2000.

BHUSHAN, B. **Introduction to tribology**. Boca Raton: Wiley, 2013.

BIRESAW, G.; MITTAL, K. **Surfactants in tribology**. Boca Raton: CRC Press, 2014.

BLAU, P. J. **Tribosystem analysis: a practical approach to the diagnosis of wear problems**. [New York]: CRC Press, 2016.

BOWDEN, F. P.; TABOR, D. The area of contact between stationary and moving surfaces. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, The Royal Society London, v. 169, n. 938, p. 391–413, 1939.

BOWDEN, F. P.; TABOR, D. **The friction and lubrication of solids**. Oxford: Clarendon press, 1954.

BOWDEN, F. P.; TABOR, D. **The friction and lubrication of solids**. Oxford: Oxford University Press, 1964.

BRAGDON, C. R.; OCONNOR, D. O.; LOWENSTEIN, J. D.; JASTY, M.; BIGGS, S. A.; HARRIS, W. H. A new pin-on-disk wear testing method for simulating wear of polyethylene on cobalt-chrome alloy in total hip arthroplasty. **The Journal of Arthroplasty**, Philadelphia, v. 16, n. 5, p. 658–665, aug 2001.

CASTRO, R.; PEREIRA, M.; FURMANSKI, M.; NETO, J. M.; IZIDORO, C. L. Desenvolvimento do sistema de aquisição e supervisão de dados para um tribômetro rotativo do tipo pino sobre disco. **Revista Ciência e Tecnologia**, Campinas, v. 18, n. 32, 2015.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: ABM, 1977.

D1984, A. Standard test method for static and kinetic coefficients of friction of plastic film and sheeting. **Annual Book of ASTM Standards**, West Conshohocken, PA, v. 08, n. 01, 2014.

DAVID, N.; CHIMA, A.; UGOCHUKWU, A.; OBINNA, E. Design of a home automation system using arduino. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, Effurun, v. 6, n. 6, p. 795–801, 2015.

DAVIS, J. R. **Concise metals engineering data book**. Ohio: ASM International The Materials Information Society, 1997.

DIN 50320. análise sistemática dos processos de desgaste. **Metalurgia e Materiais**, Ouro Preto, v. 53, p. 619–622, 1979.

DIN 50322. classification of categories in wear testing. **Wear: an international journal on the science and technology of friction, lubrication and wear**, Amsterdam, v. 53, p. 619–622, 1986.

E140, A. Standard hardness conversion tables for metals relationship among brinell hardness, vickers hardness, rockwell hardness, superficial hardness, knoop hardness, scleroscope hardness, and leeb hardness. **Annual Book of ASTM Standards**, West Conshohocken, PA, v. 03, n. 01, 2019.

G133, A. Standard test method for linearly reciprocating ball-on-flat sliding wear. **Annual Book of ASTM Standards**, West Conshohocken, PA, v. 03, n. 02, 2016.

G40, A. Standard terminology relating to wear and erosion. **Annual Book of ASTM Standards**, West Conshohocken, PA, v. 03, n. 02, 2017.

G77, A. Standard test method for ranking resistance of materials to sliding wear using block-on-ring wear test. **Annual Book of ASTM Standards**, West Conshohocken, PA, v. 03, n. 02, 2017.

G99, A. Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus. **Annual Book of ASTM Standards**, West Conshohocken, PA, v. 03, n. 02, 2017.

HAGHIGHAT-SHISHAVAN, B.; AZARI-KHOSROSHAHI, R.; HAGHIGHAT-SHISHAVAN, S.; NAZARIAN-SAMANI, M.; PARVINI-AHMADI, N. Improving wear and corrosion properties of alumina coating on aa7075 aluminum by plasma electrolytic oxidation: Effects of graphite absorption. **Applied Surface Science**, Amsterdam, v. 481, p. 108–119, 2019.

HAMILTON, S.; MUÑOZ-ESCALONA, P. Enhancement of wear properties of a polyether ether ketone polymer by incorporation of carbon and glass fibers. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, v. 136, n. 22, p. 47587, 2019.

HARNETT, C. Open source hardware for instrumentation and measurement. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, Piscataway, v. 14, n. 3, p. 34–38, 2011.

HERNÁNDEZ, D.; TREJO, H.; ORDOÑEZ, E. Development of an exploration land robot using low-cost and open source platforms for educational purposes. **Journal of Physics: Conference Series**, Bristol, v. 582, n. 1, p. 012007, 2015.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Boston: Butterworth-Heinemann, 2017.

JUANG, H.-S.; LURRR, K.-Y. Design and control of a two-wheel self-balancing robot using the arduino microcontroller board. IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA), Hangzhou: IEEE, p. 634–639, 2013.

KARL-HEINZ; GAHR, Z. **Microstructure and Wear of Materials**. Hoboken: Elsevier Science, 1987. Tribology Series.

KAWAKUBO, Y.; MIYAZAWA, S.; KOBAYASHI, K.; KOBATAKE, S.; NAKAZAWA, S. Disk burnishing for head-wear reduction studied by pin-on-disk tests. **IEEE Transactions on Magnetics**, Piscataway, v. 41, n. 2, p. 802–807, feb 2005.

KHONSARI, M. M.; BOOSER, E. R. **Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication**. Hoboken:: Wiley, 2008.

KRAGELSKII, I. V.; BOBYCHIN, M. N.; KOMBALOV, V. S. **Friction and wear: calculation methods**. New York: Pergamon Press, 1982.

KUO, C.-H. **Tribology: Lubricants and Lubrication**. BoDBooks on Demand: InTechOpen, 2011.

LANSDOWN, A. R. **Lubrication and Lubricant Selection: a practical guide**. New York: John Wiley & Sons, Tribology in Practice Series, 2004. Tribology in Practice Series.

LUDEMA, K. C. **Friction Wear Lubrication: a textbook in tribology**. London: CRC-Press, 1996.

LUDEMA, K. C.; AJAYI, L. **Friction, Wear, Lubrication: a textbook in tribology, 2.ed.** London: CRC Press, 2018.

MANG, T.; BOBZIN, K.; BARTELS, T. **Industrial Tribology: tribosystems, friction, wear and surface engineering, lubrication**. New York: Wiley-VCH, 2011.

MANG, T.; DRESEL, W. **Lubricants and Lubrication**. New York: Wiley-VCH, 2007.

NGUYEN, D. N.; NGO, H. T.; LE, H. L.; LE, H. N. Development of a receptionist robot: Mechanical and control system design. **Journal of science and technology**, Chelmsford, v. 17, n. 6, 2019.

PAULY, V.; TESCH, C.; KERN, J.; CLARK, M.; GRIERSON, D.; SINGH, D.; AJAYI, O.; SRIDHARAN, K. High-temperature tribological behavior of structural materials after conditioning in impure-helium environments for high-temperature gas-cooled reactor applications. **Journal of Nuclear Materials**, Amsterdam, v. 522, p. 311–323, 2019.

POPOV, V. L. **Contact Mechanics and Friction: physical principles and applications**. New York: Springer, 2017.

QIU, J.; FU, Z.; LIU, B.; LIU, Y.; YAN, J.; PAN, D.; ZHANG, W. Wear behavior of p/m high nb containing γ -tial alloy in different environments. **Metals and Materials International**, Seoul, p. 1–10, 2019.

RABINOWICZ, E.; DUNN, L.; RUSSELL, P. A study of abrasive wear under three-body conditions. **Wear: an international journal on the science and technology of friction, lubrication and wear**, Amsterdam, v. 4, n. 5, p. 345–355, 1961.

RAHNEJAT, H. **Tribology and dynamics of engine and powertrain: fundamentals, applications and future trends**. New York: Elsevier, 2010.

RAMOS, D. T. L.; PALLONE, E. M. J. A.; PURQUERIO, B. M.; FORTULAN, C. A. Projeto de um banco de ensaio de desgaste do tipo "pin-on-disc". **Cerâmica**, São Paulo, v. 60, n. 355, p. 443–448, 2014.

RIBEIRO, R. **Planejamento e construção de mecanismo para ensaio de desgaste superficial e análise de falhas em tribossistema protético articular de quadril**, 2018. 211f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2018. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1956RSPSA.236..397A>. Acesso em: 16 jun 2019.

ROWBERG, J. **I2Cdevlib. MPU-6050 6-axis accelerometer/gyroscope**. S.L: Accessed, 2013.

SEIREG, A. A. **Friction and lubrication in mechanical design**. : CRC Press, 1998. Mechanical Engineering.

SOUZA, M. C. de; GONÇALVES, J. F. de S.; LUTIF, S. Y. S.; GOMES, J. de O. Tribological evaluation of the jatropa and tung-based oils as bio-lubricants on al-7050-t7451 alloy. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Heidelberg, v. 41, n. 6, p. 243, 2019.

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. **Engineering Tribology**. Boston: Butterworth-Heinemann, 2013.

TOTTEN, G. E. **Handbook of Lubrication and Tribology**. New York: CRC Press, 2006.

TOTTEN, G. E. Introduction to tribology and tribological parameters. In: **Friction, lubrication, and wear technology**. Washington: ASM International, 2017. p. 3–15.

TRUHAN, J. J.; MENON, R.; BLAU, P. J. The evaluation of various cladding materials for down-hole drilling applications using the pin-on-disk test. **Wear: an international journal on the science and technology of friction, lubrication an wear**, Amstersam, v. 259, n. 7-12, p. 1308–1313, 2005.

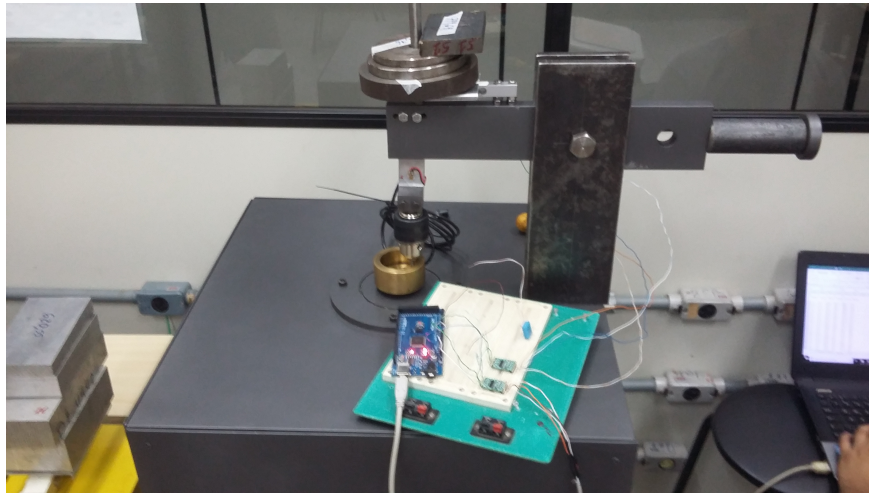
WHITEHOUSE, D. J.; ARCHARD, J. The properties of random surfaces of significance in their contact. **Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences**, London, v. 316, n. 1524, p. 97–121, 1970.

Apêndice A - Procedimento de calibração

O Procedimento utilizado para calibrar a célula de carga para medir a força normal é apresentado na Figura 49 a, foram utilizados cinco pesos diferentes para o carregamento e descarregamento. Sobre o equipamento pino sobre o disco estão os componentes de hardware utilizados que são a protoboard, um Arduino Mega, dois módulo conversor (HX711) e os fios utilizados para ligação entre o módulo e as células de carga . Da mesma forma, foram utilizado cinco pesos para carregamento e descarregamento na calibração da célula de carga HBM de 20 (kgf) que é utilizada para medir força de atrito demonstrado na Figura 49b.

Nesta etapa de calibração é importante realizar ao menos cinco carregamentos e descarregamentos para verificar possíveis efeitos de não linearidade, e de repetibilidade, onde se obtêm a indicação da mesma deformação decorrente da aplicação da mesma carga sucessivamente. Após realizar este procedimento de aquisição e inserção na planilha e caracterizar possíveis efeitos de não linearidades na linha de tendência (curva de calibração), foi feita a média das médias entre todos os dados lidos correspondentes a um peso conhecido, ou seja, média dos mil pontos de aquisição do Arduino correspondentes ao primeiro peso adicionado, média das médias de dez aquisições referentes ao peso um onde cinco são do carregamento e cinco do descarregamento. Este método se repete para o segundo peso, onde se obteve os valores lidos no Arduino referentes a somatória do primeiro e segundo peso, e assim sucessivamente.

Figura 49: Carregamento e descarregamento



(a) Célula de carga 20 (kgf)



(b) Célula de carga HBM 20 (kgf)

Fonte: Próprio Autor

A verificação da reprodutibilidade dos dados obtidos no sistema de aquisição entre a célula de carga utilizada para medir a força normal e o microcontrolador Arduino Uno com o módulo (HX711) é demonstrado na Figura 50, na imagem (a), tem o valor da massa sendo pesado na balança de precisão de duas casas decimais, na imagem (b) tem o mesmo peso sendo adicionado na célula de carga, a imagem (c) são os valores obtidos no sistema de aquisição.

Figura 50: Verificação célula de carga 20(kgf) força normal



(a)



(b)

```
// Grande
// Hx711.DOUT - pin #A1      1
// Hx711.SCK - pin #A0      1
////////////////////////////////////
//Pequena
//dout 2      pin a9
//sck2      pin a8
#include "hx711.h"
float max1 = 0.000;
float max2 = 0.000;
Hx711 um(A1, A0);
Hx711 dois(A9, A8);
void setup() {

    Serial.begin(9600);

}

void loop() {
    float cg = um.getGram();
    float cp = dois.getGram();

    float curvag = 3.0401 * cg - 34291; //FAT

    float curvap = 5.5843 * cp - 733.35; //Normal
```

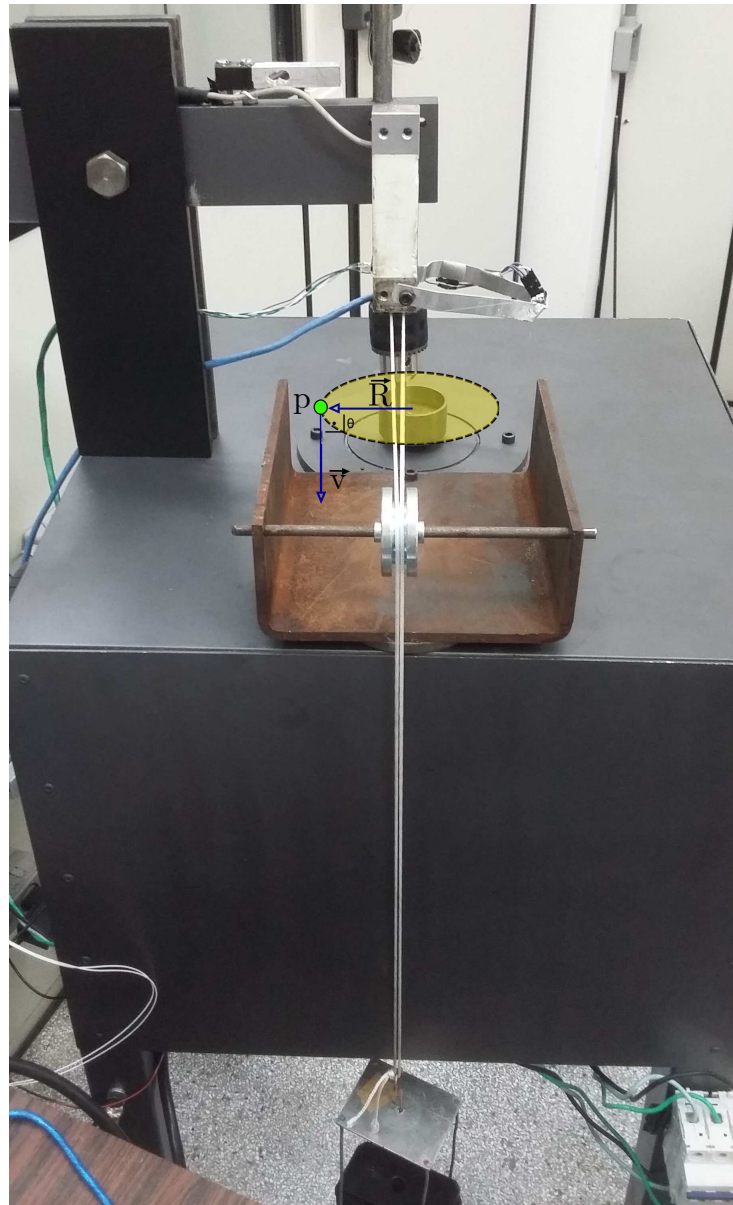
COM6	
201.7	0.2
202.0	-0.2
200.5	-1.7
197.6	0.3
198.5	1.1
201.8	4.5
198.5	3.3
199.9	0.5
201.7	-0.2
202.1	5.8
205.6	7.1
200.7	3.0
203.7	4.4
201.8	2.8
203.1	1.8

(c)

Fonte: Próprio Autor

Para verificar a curva de calibração e o sistema de aquisição usado para medir a força de atrito. Fez-se necessário o uso de um suporte com uma roldana e balança mostrada na Figura 51, onde as massas com pesos conhecidos foram colocados na balança perpendicular a 90° do suporte. Desta forma, têm-se uma simulação de aferir o comportamento da célula de carga em medir no mesmo sentido que será utilizada para obter a força de atrito, que é a força contrária a rotação do disco. R é o raio da faixa de desgaste, p o pino e v o vetor velocidade. Também pode-se observar que o ângulo (Θ) entre os vetores R e v é de 90° , logo, não há necessidade de correção do sinal após aquisição.

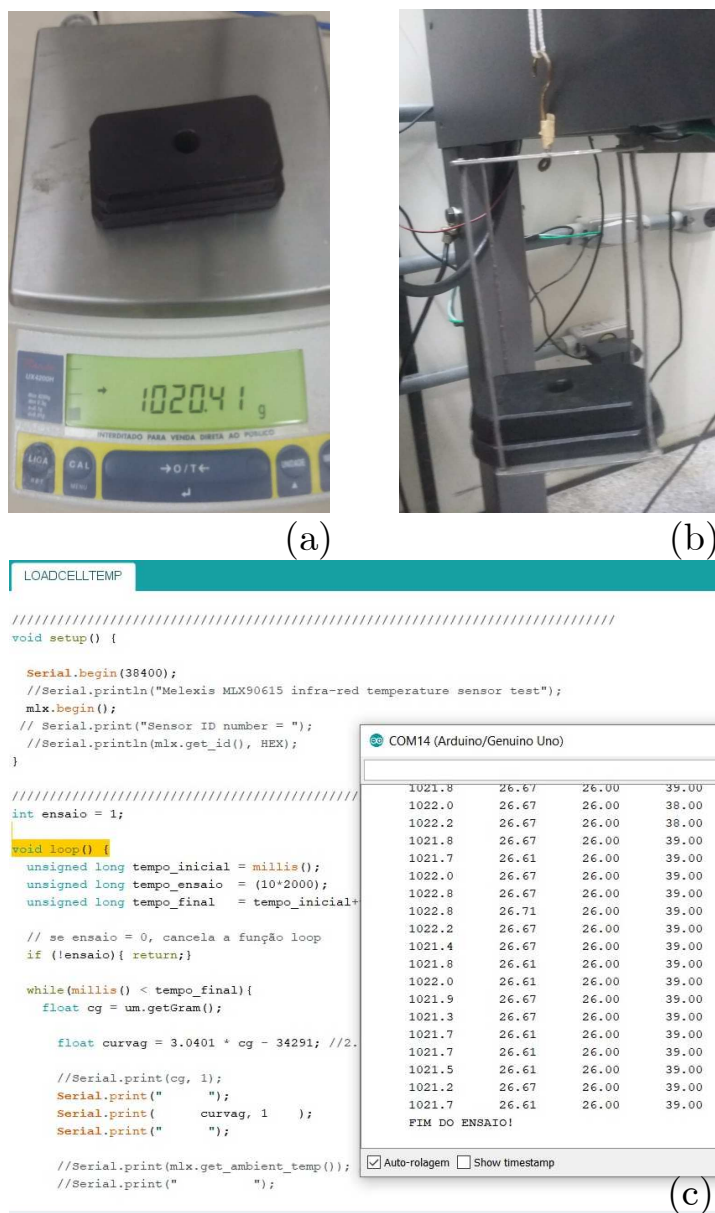
Figura 51: Suporte para aferir a célula de carga HBM (20kgf) usada para medir a força de atrito



Fonte: Próprio Autor

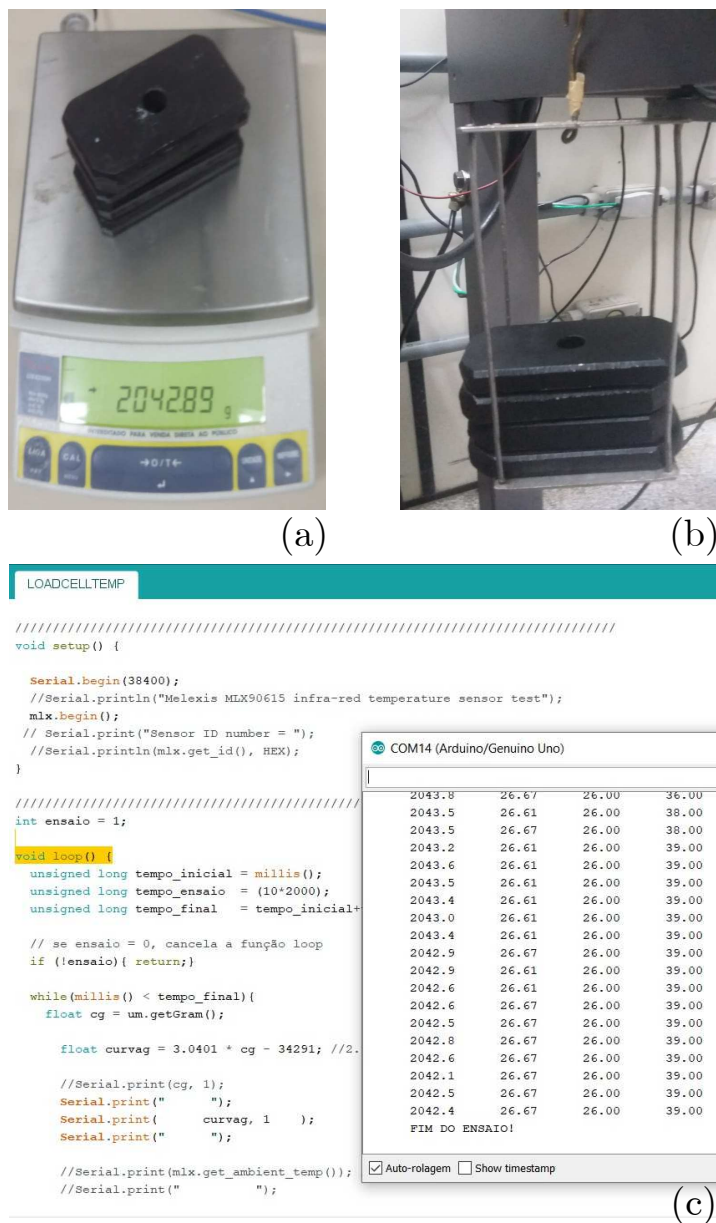
As Figuras 52, 53 e 54 demonstra a leitura do sistema de aquisição no monitor serial do Arduino, onde a primeira coluna é referente à célula de carga utilizada para medir a força de atrito, a segunda coluna é o sensor de temperatura utilizado para medir a superfície de contato entre o pino e o disco, a coluna três é a temperatura ambiente e a quatro é a umidade. Na verificação da célula de carga foi utilizado três pesos diferentes. Com massas correspondentes à 1020.41(g), 2048.89(g) e 3060.15 (g).

Figura 52: Primeira verificação da célula de carga HBM (20kgf) força de atrito



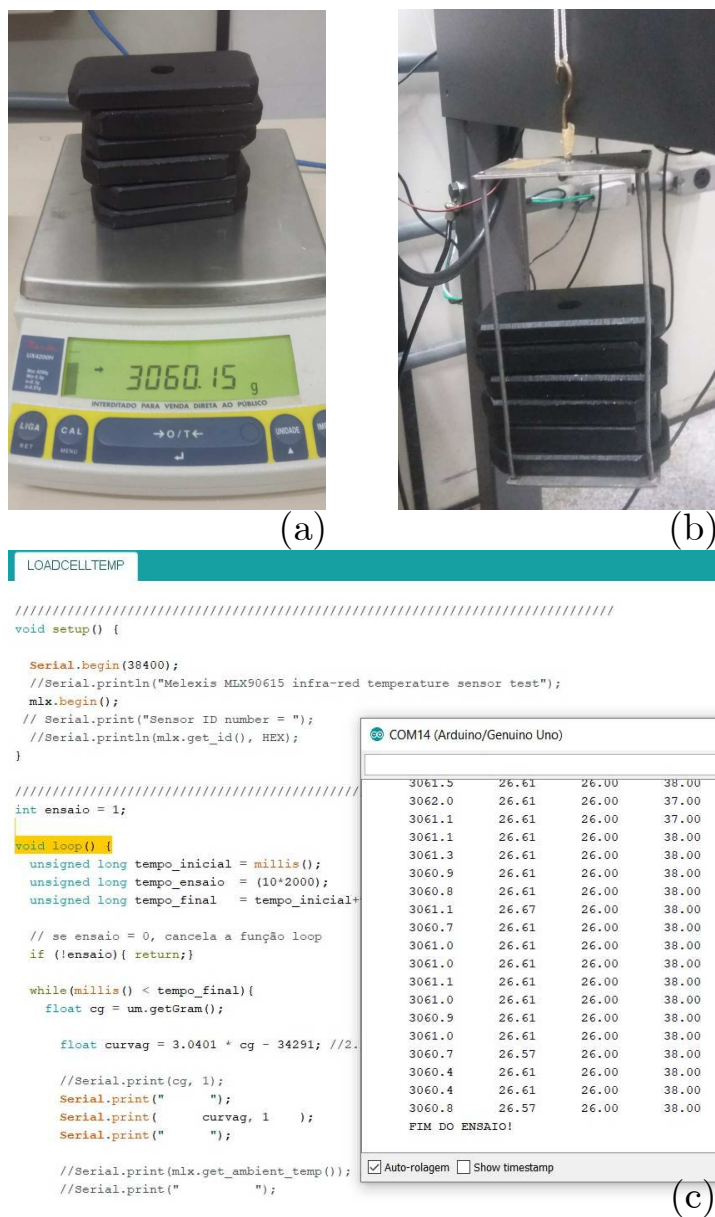
Fonte: Próprio Autor

Figura 53: Segunda verificação da célula de carga HBM (20kgf) força de atrito



Fonte: Próprio Autor

Figura 54: Terceira verificação da célula de carga HBM (20kgf) força de atrito



Fonte: Próprio Autor

Apêndice B - Demonstração do sistema

A seguir é apresentado o sistema de controle desenvolvido com retorno ao usuário, no qual deve-se inserir o raio do pino, a distância total e a rotação desejada, o programa faz a calculo do número de ciclos e o equipamento para quando o mesmo é concluído. A primeira coluna apresenta o ciclo de cada volta, a segunda coluna o tempo de cada volta (Delay) e a terceira coluna a rotação conforme apresentado na figura 55. O sistema é sempre iniciado com uma rampa de aceleração, incrementando gradativamente o sinal PWM. Após a estabilização da rampa o sistema entra na velocidade desejada. O tempo total do experimento pode ser obtido através do tempo total subtraído do tempo de ciclo número 0.

Figura 55: Sistema de controle com 60 [rpm]

```

CONTROL | Arduino 1.8.8
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

CONTROL

/*
resistor de pull up
*/
unsigned long nvolts;
unsigned long numerodevolts;
float circun;
float rpm;
unsigned long t = 0;
unsigned long tempo = 0;
unsigned long dt2 = 0;
int dt = 0;
int vel = 0, dis = 0, rai = 0;
int dado = 0;
String velocidade;

//////////////////////////////////////
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

O sketch usa 7530 bytes (23%) de espaço de armazenamento para o firmware do microcontrolador.
Variáveis globais usam 574 bytes (28%) de memória dinâmica, incluindo variáveis locais e variáveis globais.
O espaço livre para variáveis locais é de 1024 bytes.

COM9 (Arduino/Genuino Uno)

insira o valor do raio do pino no disco em mm 15.00
insira o valor da distancia 2

circunferencia 0.09424778
numero de voltas 21
insira o valor velocidade (60 150 240 330 420 510 600)60
ciclo numero :0 tempo da volta (n-1): 16309 rpm: 3.68
ciclo numero :1 tempo da volta (n-1): 1000 rpm: 60.00
ciclo numero :2 tempo da volta (n-1): 998 rpm: 60.12
ciclo numero :3 tempo da volta (n-1): 997 rpm: 60.18
ciclo numero :4 tempo da volta (n-1): 996 rpm: 60.24
ciclo numero :5 tempo da volta (n-1): 997 rpm: 60.18
ciclo numero :6 tempo da volta (n-1): 997 rpm: 60.18
ciclo numero :7 tempo da volta (n-1): 996 rpm: 60.24
ciclo numero :8 tempo da volta (n-1): 996 rpm: 60.24
ciclo numero :9 tempo da volta (n-1): 997 rpm: 60.18
ciclo numero :10 tempo da volta (n-1): 996 rpm: 60.24
ciclo numero :11 tempo da volta (n-1): 998 rpm: 60.12
ciclo numero :12 tempo da volta (n-1): 995 rpm: 60.30
ciclo numero :13 tempo da volta (n-1): 996 rpm: 60.24
ciclo numero :14 tempo da volta (n-1): 997 rpm: 60.18
ciclo numero :15 tempo da volta (n-1): 996 rpm: 60.24
ciclo numero :16 tempo da volta (n-1): 997 rpm: 60.18
ciclo numero :17 tempo da volta (n-1): 996 rpm: 60.24
ciclo numero :18 tempo da volta (n-1): 998 rpm: 60.12
ciclo numero :19 tempo da volta (n-1): 997 rpm: 60.18
ciclo numero :20 tempo da volta (n-1): 998 rpm: 60.12
ciclo numero :21 tempo da volta (n-1): 996 rpm: 60.24
tempo total do teste 37243

Auto-rolagem Show timestamp Nova-I

```

Fonte: Próprio Autor

Figura 56: Sistema de controle com 150 [rpm]

The screenshot shows the Arduino IDE with the 'CONTROL' sketch loaded. The serial monitor (COM9) displays the following output:

```

insira o valor do raio do pino no disco em mm 15.00
insira o valor da distancia 2

circunferencia 0.09424778
numero de voltas 21
insira o valor velocidade (60 150 240 330 420 510 600)150
ciclo numero :0 tempo da volta (n-1): 9614 rpm: 6.24
ciclo numero :1 tempo da volta (n-1): 401 rpm: 149.63
ciclo numero :2 tempo da volta (n-1): 402 rpm: 149.25
ciclo numero :3 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :4 tempo da volta (n-1): 401 rpm: 149.63
ciclo numero :5 tempo da volta (n-1): 401 rpm: 149.63
ciclo numero :6 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :7 tempo da volta (n-1): 402 rpm: 149.25
ciclo numero :8 tempo da volta (n-1): 399 rpm: 150.38
ciclo numero :9 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :10 tempo da volta (n-1): 402 rpm: 149.25
ciclo numero :11 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :12 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :13 tempo da volta (n-1): 401 rpm: 149.63
ciclo numero :14 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :15 tempo da volta (n-1): 401 rpm: 149.63
ciclo numero :16 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :17 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :18 tempo da volta (n-1): 401 rpm: 149.63
ciclo numero :19 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :20 tempo da volta (n-1): 401 rpm: 149.63
ciclo numero :21 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
tempo total do teste 18026
  
```

Fonte: Próprio Autor

Figura 57: Sistema de controle com 240 [rpm]

The screenshot shows the Arduino IDE with the 'CONTROL' sketch loaded. The serial monitor (COM9) displays the following output:

```

insira o valor do raio do pino no disco em mm 15.00
insira o valor da distancia 2

circunferencia 0.09424778
numero de voltas 21
insira o valor velocidade (60 150 240 330 420 510 600)240
ciclo numero :0 tempo da volta (n-1): 18076 rpm: 3.32
ciclo numero :1 tempo da volta (n-1): 346 rpm: 173.41
ciclo numero :2 tempo da volta (n-1): 257 rpm: 233.46
ciclo numero :3 tempo da volta (n-1): 251 rpm: 239.04
ciclo numero :4 tempo da volta (n-1): 250 rpm: 240.00
ciclo numero :5 tempo da volta (n-1): 251 rpm: 239.04
ciclo numero :6 tempo da volta (n-1): 251 rpm: 239.04
ciclo numero :7 tempo da volta (n-1): 251 rpm: 239.04
ciclo numero :8 tempo da volta (n-1): 251 rpm: 239.04
ciclo numero :9 tempo da volta (n-1): 250 rpm: 240.00
ciclo numero :10 tempo da volta (n-1): 251 rpm: 239.04
ciclo numero :11 tempo da volta (n-1): 251 rpm: 239.04
ciclo numero :12 tempo da volta (n-1): 251 rpm: 239.04
ciclo numero :13 tempo da volta (n-1): 251 rpm: 239.04
ciclo numero :14 tempo da volta (n-1): 251 rpm: 239.04
ciclo numero :15 tempo da volta (n-1): 250 rpm: 240.00
ciclo numero :16 tempo da volta (n-1): 251 rpm: 239.04
ciclo numero :17 tempo da volta (n-1): 250 rpm: 240.00
ciclo numero :18 tempo da volta (n-1): 251 rpm: 239.04
ciclo numero :19 tempo da volta (n-1): 251 rpm: 239.04
ciclo numero :20 tempo da volta (n-1): 251 rpm: 239.04
ciclo numero :21 tempo da volta (n-1): 251 rpm: 239.04
tempo total do teste 23444
  
```

Fonte: Próprio Autor

Figura 58: Sistema de controle com 330 [rpm]

The screenshot shows the Arduino IDE with the 'CONTROL' sketch loaded. The sketch includes variables for speed, time, and distance, and a setup function that initializes the serial port. The serial monitor displays the following output:

```

insira o valor do raio do pino no disco em mm 15.00
insira o valor da distancia 2

circunferencia 0.09424778
numero de voltas 21
insira o valor velocidade (60 150 240 330 420 510 600)330
ciclo numero :0 tempo da volta (n-1): 24579 rpm: 2.44
ciclo numero :1 tempo da volta (n-1): 374 rpm: 160.43
ciclo numero :2 tempo da volta (n-1): 253 rpm: 237.15
ciclo numero :3 tempo da volta (n-1): 206 rpm: 291.26
ciclo numero :4 tempo da volta (n-1): 183 rpm: 327.87
ciclo numero :5 tempo da volta (n-1): 184 rpm: 326.09
ciclo numero :6 tempo da volta (n-1): 182 rpm: 329.67
ciclo numero :7 tempo da volta (n-1): 181 rpm: 331.49
ciclo numero :8 tempo da volta (n-1): 182 rpm: 329.67
ciclo numero :9 tempo da volta (n-1): 184 rpm: 326.09
ciclo numero :10 tempo da volta (n-1): 182 rpm: 329.67
ciclo numero :11 tempo da volta (n-1): 182 rpm: 329.67
ciclo numero :12 tempo da volta (n-1): 183 rpm: 327.87
ciclo numero :13 tempo da volta (n-1): 183 rpm: 327.87
ciclo numero :14 tempo da volta (n-1): 181 rpm: 331.49
ciclo numero :15 tempo da volta (n-1): 182 rpm: 329.67
ciclo numero :16 tempo da volta (n-1): 183 rpm: 327.87
ciclo numero :17 tempo da volta (n-1): 182 rpm: 329.67
ciclo numero :18 tempo da volta (n-1): 182 rpm: 329.67
ciclo numero :19 tempo da volta (n-1): 184 rpm: 326.09
ciclo numero :20 tempo da volta (n-1): 181 rpm: 331.49
ciclo numero :21 tempo da volta (n-1): 182 rpm: 329.67
tempo total do teste 28695
  
```

Fonte: Próprio Autor

Figura 59: Sistema de controle com 420 [rpm]

The screenshot shows the Arduino IDE with the 'CONTROL' sketch loaded. The sketch includes variables for speed, time, and distance, and a setup function that initializes the serial port. The serial monitor displays the following output:

```

insira o valor velocidade (60 150 240 330 420 510 600)420
ciclo numero :0 tempo da volta (n-1): 12113 rpm: 4.95
ciclo numero :1 tempo da volta (n-1): 310 rpm: 193.55
ciclo numero :2 tempo da volta (n-1): 232 rpm: 258.62
ciclo numero :3 tempo da volta (n-1): 194 rpm: 309.28
ciclo numero :4 tempo da volta (n-1): 169 rpm: 355.03
ciclo numero :5 tempo da volta (n-1): 152 rpm: 394.74
ciclo numero :6 tempo da volta (n-1): 144 rpm: 416.67
ciclo numero :7 tempo da volta (n-1): 143 rpm: 419.58
ciclo numero :8 tempo da volta (n-1): 143 rpm: 419.58
ciclo numero :9 tempo da volta (n-1): 144 rpm: 416.67
ciclo numero :10 tempo da volta (n-1): 143 rpm: 419.58
ciclo numero :11 tempo da volta (n-1): 143 rpm: 419.58
ciclo numero :12 tempo da volta (n-1): 143 rpm: 419.58
ciclo numero :13 tempo da volta (n-1): 142 rpm: 422.54
ciclo numero :14 tempo da volta (n-1): 143 rpm: 419.58
ciclo numero :15 tempo da volta (n-1): 144 rpm: 416.67
ciclo numero :16 tempo da volta (n-1): 143 rpm: 419.58
ciclo numero :17 tempo da volta (n-1): 143 rpm: 419.58
ciclo numero :18 tempo da volta (n-1): 144 rpm: 416.67
ciclo numero :19 tempo da volta (n-1): 143 rpm: 419.58
ciclo numero :20 tempo da volta (n-1): 144 rpm: 416.67
ciclo numero :21 tempo da volta (n-1): 142 rpm: 422.54
tempo total do teste 15461
deseja refazer o teste? (digite 1 para sim e 2 para nao)
  
```

Fonte: Próprio Autor

Figura 60: Sistema de controle com 510 [rpm]

The screenshot shows the Arduino IDE interface with the 'CONTROL' sketch loaded. The serial monitor displays the following output:

```

insira o valor do raio do pino no disco em mm 15.00
insira o valor da distancia 2

circunferencia 0.09424778
numero de voltas 21
insira o valor velocidade (60 150 240 330 420 510 600)510
ciclo numero :0 tempo da volta (n-1): 12359 rpm: 4.85
ciclo numero :1 tempo da volta (n-1): 338 rpm: 177.51
ciclo numero :2 tempo da volta (n-1): 243 rpm: 246.91
ciclo numero :3 tempo da volta (n-1): 199 rpm: 301.51
ciclo numero :4 tempo da volta (n-1): 174 rpm: 344.83
ciclo numero :5 tempo da volta (n-1): 155 rpm: 387.10
ciclo numero :6 tempo da volta (n-1): 143 rpm: 419.58
ciclo numero :7 tempo da volta (n-1): 132 rpm: 454.55
ciclo numero :8 tempo da volta (n-1): 122 rpm: 491.80
ciclo numero :9 tempo da volta (n-1): 119 rpm: 504.20
ciclo numero :10 tempo da volta (n-1): 118 rpm: 508.47
ciclo numero :11 tempo da volta (n-1): 119 rpm: 504.20
ciclo numero :12 tempo da volta (n-1): 118 rpm: 508.47
ciclo numero :13 tempo da volta (n-1): 118 rpm: 508.47
ciclo numero :14 tempo da volta (n-1): 119 rpm: 504.20
ciclo numero :15 tempo da volta (n-1): 118 rpm: 508.47
ciclo numero :16 tempo da volta (n-1): 119 rpm: 504.20
ciclo numero :17 tempo da volta (n-1): 117 rpm: 512.82
ciclo numero :18 tempo da volta (n-1): 119 rpm: 504.20
ciclo numero :19 tempo da volta (n-1): 118 rpm: 508.47
ciclo numero :20 tempo da volta (n-1): 119 rpm: 504.20
ciclo numero :21 tempo da volta (n-1): 118 rpm: 508.47
tempo total do teste 15404
  
```

Fonte: Próprio Autor

Figura 61: Sistema de controle com 600 [rpm]

The screenshot shows the Arduino IDE interface with the 'CONTROL' sketch loaded. The serial monitor displays the following output:

```

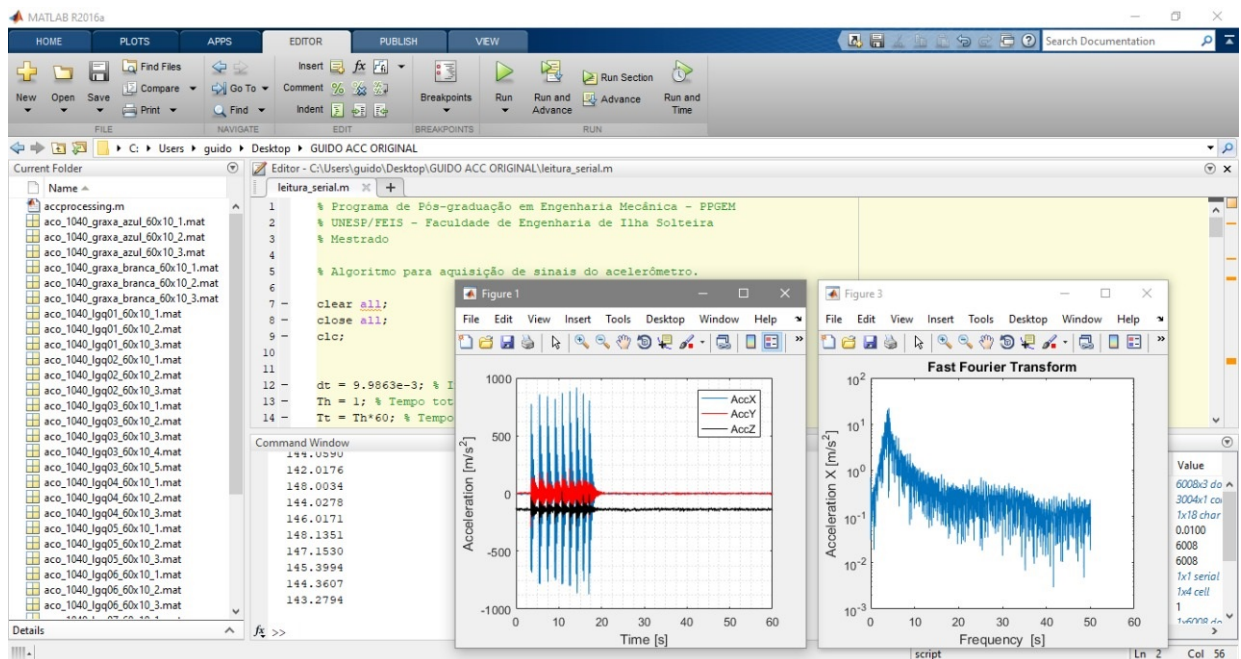
insira o valor do raio do pino no disco em mm 15.00
insira o valor da distancia 2

circunferencia 0.09424778
numero de voltas 21
insira o valor velocidade (60 150 240 330 420 510 600)600
ciclo numero :0 tempo da volta (n-1): 11745 rpm: 5.11
ciclo numero :1 tempo da volta (n-1): 399 rpm: 150.38
ciclo numero :2 tempo da volta (n-1): 260 rpm: 230.77
ciclo numero :3 tempo da volta (n-1): 209 rpm: 287.08
ciclo numero :4 tempo da volta (n-1): 180 rpm: 333.33
ciclo numero :5 tempo da volta (n-1): 160 rpm: 375.00
ciclo numero :6 tempo da volta (n-1): 146 rpm: 410.96
ciclo numero :7 tempo da volta (n-1): 134 rpm: 447.76
ciclo numero :8 tempo da volta (n-1): 127 rpm: 472.44
ciclo numero :9 tempo da volta (n-1): 118 rpm: 508.47
ciclo numero :10 tempo da volta (n-1): 112 rpm: 535.71
ciclo numero :11 tempo da volta (n-1): 108 rpm: 555.56
ciclo numero :12 tempo da volta (n-1): 101 rpm: 594.06
ciclo numero :13 tempo da volta (n-1): 101 rpm: 594.06
ciclo numero :14 tempo da volta (n-1): 101 rpm: 594.06
ciclo numero :15 tempo da volta (n-1): 99 rpm: 606.06
ciclo numero :16 tempo da volta (n-1): 100 rpm: 600.00
ciclo numero :17 tempo da volta (n-1): 100 rpm: 600.00
ciclo numero :18 tempo da volta (n-1): 100 rpm: 600.00
ciclo numero :19 tempo da volta (n-1): 101 rpm: 594.06
ciclo numero :20 tempo da volta (n-1): 100 rpm: 600.00
ciclo numero :21 tempo da volta (n-1): 100 rpm: 600.00
tempo total do teste 14701
  
```

Fonte: Próprio Autor

A Figura 62 apresenta o sistema de aquisição de aceleração desenvolvido com retorno ao usuário. Observa-se que a aquisição dos dados é feita diretamente no software Matlab, onde é determinada a frequência de amostragem e tempo de aquisição, para esta demonstração foi realizado 9 impulsos, a resposta pode ser vista nos gráficos plotados no qual é apresentado a resposta no domínio do tempo e frequência.

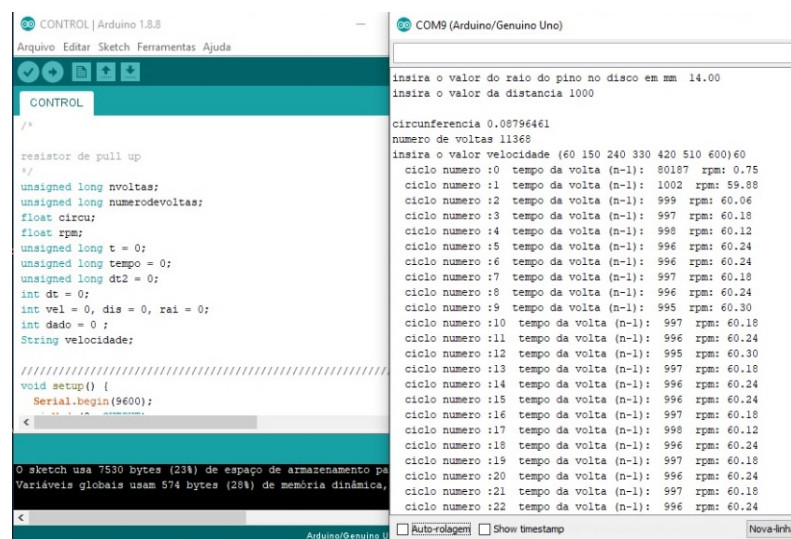
Figura 62: Aquisição de dados com acelerômetro



Fonte: Próprio Autor

A Figura 63 demonstra os parâmetros utilizados nos ensaios para a velocidade de deslizamento de 0,0879 m/s.

Figura 63: Parâmetros utilizados para velocidade de deslizamento em 0,0879 m/s



Fonte: Próprio Autor

A Figura 64 demonstra os parâmetros utilizados nos ensaios para a velocidade de deslizamento de 0,2199 m/s.

Figura 64: Parâmetros utilizados para velocidade de deslizamento em 0,2199 m/s

The screenshot displays the Arduino IDE interface. The left pane shows the 'CONTROL' sketch for an Arduino 1.8.8. The right pane shows the 'COMS (Arduino/Genuino Uno)' serial monitor with the following output:

```

insira o valor do raio do pino no disco em mm 14.00
insira o valor da distancia 1000

circunferencia 0.08796461
numero de voltas 11368
insira o valor velocidade (60 150 240 330 420 510 600)150
ciclo numero :0 tempo da volta (n-1): 18717 rpm: 3.21
ciclo numero :1 tempo da volta (n-1): 424 rpm: 141.51
ciclo numero :2 tempo da volta (n-1): 401 rpm: 149.63
ciclo numero :3 tempo da volta (n-1): 402 rpm: 149.25
ciclo numero :4 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :5 tempo da volta (n-1): 401 rpm: 149.63
ciclo numero :6 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :7 tempo da volta (n-1): 402 rpm: 149.25
ciclo numero :8 tempo da volta (n-1): 395 rpm: 150.38
ciclo numero :9 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :10 tempo da volta (n-1): 401 rpm: 149.63
ciclo numero :11 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :12 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :13 tempo da volta (n-1): 401 rpm: 149.63
ciclo numero :14 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :15 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :16 tempo da volta (n-1): 401 rpm: 149.63
ciclo numero :17 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :18 tempo da volta (n-1): 401 rpm: 149.63
ciclo numero :19 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :20 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :21 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
ciclo numero :22 tempo da volta (n-1): 400 rpm: 150.00
  
```

The sketch code in the left pane includes comments and variable declarations for a pull-up resistor, number of turns, distance, velocity, and cycle number. It also shows the setup function where the serial port is initialized at 9600 baud.

Fonte: Próprio Autor