PÉRISON PAVEI UGGIONI

INSTRUMENTAÇÃO, CONTROLE E SUPERVISÃO DE UM ABRASÔMETRO TIPO RODA DE BORRACHA

FLORIANÓPOLIS, 2017

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE SANTA CATARINA
CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM MECATRÔNICA

PÉRISON PAVEI UGGIONI

INSTRUMENTAÇÃO, CONTROLE E SUPERVISÃO DE UM ABRASÔMETRO TIPO RODA DE BORRACHA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Mecatrônica.

Orientador: Prof. André Roberto de Sousa, Dr. Eng.

CDD 621.92
U26i

Uggioni, Périson Pavei
Instrumentação, controle e supervisão de um abrasômetro tipo roda de borracha [DIS] / Périson Pavei Uggioni; orientação de André Roberto de Sousa – Florianópolis, 2017.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Mecatrônica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Desgaste abrasivo. 2. Tribologia. 3. Máquinas de ensaio. I. Sousa, André Roberto de. II. Título.

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC
Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis
Catalogado por: Ana Paula F. Rodrigues Pacheco – CRB 14/1117

INSTRUMENTAÇÃO, CONTROLE E SUPERVISÃO DE UM ABRASÔMETRO TIPO RODA DE BORRACHA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Mecatrônica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Florianópolis, 06 de oututbro de 2017.

Banca Examinadora:

Prof. André Roberto de Sousa, Dr. Eng.
Orientador - Instituto Federal de Santa Catarina, campus Florianópolis.

Prof. Henrique Cezar Pavanati, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina, campus Florianópolis.

Prof. Milton Pereira, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Rafael Rivelino da Silva Bravo, Dr. Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina, campus Criciúma.

A todos os meus familiares, em especial a minha esposa Elaine e meus filhos Vinícius e Laura.

AGRADECIMENTOS

À DEUS, por permitir finalizar este trabalho com sabedoria e paciência.

À família, em especial a minha esposa Elaine C. B. Uggioni e meus filhos Vinícius Borges Uggioni e Laura Borges Uggioni, por compreender os momentos de ausência em função deste trabalho.

Aos colegas do curso de mestrado, em especial Douglas, Valter e Ramon, pelo apoio e companheirismo nesta jornada.

Aos professores do programa de mestrado, por seu trabalho e dedicação.

Ao meu orientador, professor André Roberto de Sousa, por acreditar e contribuir para a finalização deste projeto.

A Faculdade SATC, por permitir que este projeto fosse realizado em suas dependências. Em especial ao professor Anderson Daleffe e os alunos Gilson e Elimã.

Aos colegas do Instituto Federal de Santa Catarina, campus Criciúma, em especial ao professor Rafael Bravo, Giovani Batista de Sousa e Guilherme Schmidt pelas contribuições técnicas e sugestões.

A empresa Rijeza Metalurgia por permitir a realização de testes em seu Abrasômetro.

Ao Sr. Marcos Ara, pela recepção e por permitir a utilização do Abrasômetro do Laboratório de Fenômenos da Superfície LFS-USP.

RESUMO

O conhecimento das características tribológicas dos materiais sujeitos ao desgaste por abrasão é fundamental para a otimização e definição dos elementos de máquinas, e é fator determinante na quantificação da vida útil dos dispositivos mecânicos. Desta forma, é oportuno que laboratórios de Tribologia de universidades ou empresas do setor metal-mecânico possam dispor de máquinas de ensaio que possibilitem reproduzir as condições em que ocorre o desgaste, permitindo classificar materiais e orientar projetistas de máquinas quanto à seleção de materiais adequados para determinada aplicação. Estas máquinas são denominadas "Tribômetros", com características distintas em função do método de ensaio (mecanismo de desgaste) geralmente normalizado que se deseje simular. Através desse conceito, este trabalho teve por objetivo aprimorar o desempenho por meio da instrumentação, controle e supervisão de um tribômetro conhecido por "Abrasômetro tipo roda de borracha". Os procedimentos de ensaio deste equipamento são padronizados pela norma *ASTM G65-16*, e novas funcionalidades foram agregadas, tornando-o compatível com outros modelos mais avançados disponíveis comercialmente. Avanços, como o ajuste e monitoramento em tempo real de algumas variáveis inerentes ao ensaio, operação automatizada, aumento da segurança, confiabilidade e registro dos dados gerados são alguns dos objetivos alcançados ao final deste projeto.

Palavras-Chave: Tribologia; Tribômetro; Desgaste abrasivo; Instrumentação; Máquinas de ensaio.

ABSTRACT

The knowledge about the tribological characteristics of materials subject ed to wear by abrasion is fundamental for the optimization and definition of machine components. This is a determining factor for the quantification of the time life of mechanical devices. In this way, it is important that Tribology laboratories from universities or companies in the metal-mechanic sector can have test machines that allow to reproduce the conditions in which the wear occurs, allowing them to classify materials and to guide the machine designers as well as the selection of suitable materials for a certain application. These machines are called "Tribometers", with different characteristics depending on the generally standardized test method (wear mechanism) to be simulated. Through this concept, this project aims to contribute to the growth of the Tribology area through the instrumentation, control and supervision of a tribometer known as "Dry sand/rubber wheel apparatus". The testing procedures for this equipment are standardized by ASTM G65-16, but some functionality has been added to make it compatible with other commercial models. Real-time adjustment and monitoring of some variables inherent in the test, automated operation, increased security, reliability and data logging are some of the objectives achieved at the end of this project.

Keywords: Tribology. Tribometer. Abrasive wear. Instrumentation. Testing machines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Máquinas de ensaio do LDS Faculdade SATC 17
Figura 2 – Ensaio de desgaste segundo *ASTM G65-16* 18
Figura 3 – Fatores relevantes para o comportamento ao atrito e desgaste 23
Figura 4 – Causas das falhas em peças 24
Figura 5 – Tipos de desgaste abrasivo.....25
Figura 6 – Desgaste abrasivo a dois corpos em caçamba para transporte de minérios 26
Figura 7 – Desgaste abrasivo a três corpos em eixo e mancal.....26
Figura 8 – Partícula idealizada deslizando sobre a superfície de um material dúctil 27
Figura 9 – Aplicação de placas resistentes ao desgaste abrasivo 28
Figura 10 – Caracterização de atrito 30
Figura 11 – Método pino contra lixa 31
Figura 12 – Método pino sobre disco 31
Figura 13 – Método bloco-disco 32
Figura 14 – Método ensaio de abrasão em lama 32
Figura 15 – Método de teste roda de borracha em solução 33
Figura 16 – Ensaio de micro abrasão.....34
Figura 17 – Modelos de abrasômetros.....35
Figura 18 – Estrutura do abrasômetro.....35
Figura 19 – Aspecto de corpo de prova.....37
Figura 20 – Abrasômetros mecanizados disponíveis no mercado 38
Figura 21 – Abrasômetros instrumentados disponíveis no mercado 39
Figura 22 – Abrasômetro instrumentado 40
Figura 23 – Abrasômetro mecanizado e instrumentado do LFS-USP 41
Figura 24 – Abrasômetro mecanizado do LDS Faculdade SATC.....42
Figura 25 – Metodologia adotada neste trabalho 44
Figura 26 – Nova concepção do abrasômetro.....45
Figura 27 – Mecanismo adaptado ao projeto original.....47
Figura 28 – Tecnologia para acionamento da mesa.....49
Figura 29 – Sensores selecionados para a mesa 50
Figura 30 – Tecnologia utilizada para a roda de borracha.....52
Figura 31 – Peças comerciais adquiridas para construção da mesa 52

Figura 32 – Etapas da montagem da mesa....53
Figura 33 – Mesa horizontal fixada à estrutura do abrasômetro 54
Figura 34 – Alterações na roda de borracha 57
Figura 35 – Tecnologia escolhida para o sistema de controle 59
Figura 36 – Instalação célula de carga com amplificador....61
Figura 37 – Tratamento dos sinais do encoder para o CLP 62
Figura 38 – Quadro de controle do abrasômetro....62
Figura 39 – Fluxo de dados no abrasômetro....63
Figura 40 – Tela de edição do software ISPSoft® 65
Figura 41 – Tela do supervisório do abrasômetro 67
Figura 42 – Abrasômetro finalizado e IHM 68
Figura 43 – Etapas de preparação dos corpos de prova....70
Figura 44 – Preparação dos corpos de prova 70
Figura 45 – Areia ANB adotada nos ensaios....71
Figura 46 – Sistema de forças que atuam no braço....72
Figura 47 – Procedimento para calibração do abrasômetro mecanizado 73
Figura 48 – Procedimento de calibração para força Tangencial....75
Figura 49 – Erro sistemático originado em função da distância 75
Figura 50 – Procedimento de calibração da força Normal 76
Figura 51 – Abrasômetro mecanizado do LFS, detalhe da execução de um ensaio.77
Figura 52 – Abrasômetro da empresa Rijeza Metalurgia 79
Figura 53 – Procedimentos adotados antes dos ensaios na Faculdade SATC 80
Figura 54 – Etapas para execução de ensaio mecanizado 81
Figura 55 – Abrasômetro mecanizado e detalhe da execução de um ensaio 81
Figura 56 – Etapas para execução de ensaio instrumentado....82
Figura 57 – PC com sistema supervisório e detalhe da execução de um ensaio....82
Figura 58 – Corpos de prova após ensaio 89
Figura 59 – Dados de ensaio de desgaste com areia ANB 50 90
Figura 60 – Dados de ensaio de desgaste com areia ANB 100 91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos construtivos da norma *ASTM G65-16* 36
Tabela 2 – Requisitos de ensaio da norma *ASTM G65-16*.....37
Tabela 3 – Resultados de ensaios com materiais de referência.....38
Tabela 4 – Comparativo entre abrasômetros instrumentados 39
Tabela 5 – Comparativo entre sistema mecanizado e instrumentado 45
Tabela 6 – Comparativo entre tecnologias 46
Tabela 7 – Características do acionamento da mesa horizontal 49
Tabela 8 – Descrição do acionamento da roda de borracha 50
Tabela 9 – Descrição das peças da mesa.....53
Tabela 10 – Entradas para sistema de controle 58
Tabela 11 – Saídas para sistema de controle.....58
Tabela 12 – Comparativo entre sistemas de controle.....59
Tabela 13 – Comparativo entre sistemas de supervisão 65
Tabela 14 – Condições de ensaio no LFS.....78
Tabela 15 – Condições de ensaio na Rijeza.....79
Tabela 16 – Condições de ensaio no abrasômetro mecanizado 81
Tabela 17 – Condições de ensaio no abrasômetro instrumentado.....83
Tabela 18 – Resultados dos ensaios pelo método mecanizado LFS e LDS 85
Tabela 19 – Resultados dos ensaios pelo método instrumentado RIJEZA e LDS.....86
Tabela 20 – Resultados dos ensaios pelo método instrumentado e mecanizado no LDS 87
Tabela 21 – Resultados dos ensaios no abrasômetro do LDS em dias diferentes....88
Tabela 22 – Resultados dos ensaios método instrumentado no LDS com areia ANB 50 e ANB 100 89
Tabela 23 – Força normal, força tangencial, coeficiente de atrito e frequência rotacional médios 90
Tabela 24 – Investimento feito no abrasômetro do LDS Faculdade SATC.....93
Tabela 25 – Comparação de custos entre abrasômetros 93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABM	------	Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração
ABNT	------	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFS	------	*American Foundry Society*
AISI	------	*American Iron and Steel Institute*
ANB	------	Areia Normal Brasileira
ASM	------	*American Society for Metals*
ASTM	------	*American Society for Testing and Materials*
CFW	------	Conversor de Frequência WEG
CLP	------	Controlador Lógico Programável
DIN	------	*Deutsches Institut für Normung*
HRC	------	*Hardness Rockwell C*
IFSC	------	Instituto Federal de Santa Catarina
IPT	------	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IHM	------	Interface Humano Máquina
LDS	------	Laboratório de Desgaste de Superfície
LFS	------	Laboratório de Fenômenos de Superfície
NA	------	Normalmente Aberto
NPN	------	Sinal Elétrico Negativo (Tensão)
NBR	------	Norma Brasileira
PID	------	Função Proporcional-Integral-Derivativo
PNB	------	Produto Nacional Bruto
PNP	------	Sinal Elétrico Positivo (Tensão)
rpm	------	Rotações por Minuto
SAE	------	*Society Automotive of Engineers*
SATC	------	Sociedade de Assistência aos Trabalhadores do Carvão
SCADA	------	*Supervisory Control and Data Acquisition*
USB	------	*Universal Serial Bus*
USP	------	Universidade de São Paulo
R$	------	Reais
£	------	Libras
€	------	Euro

N_p	[---]	Número e partículas
Q	[mm^3/m]	Taxa de Desgaste
W	[N]	Carga Normal
H	[Nm^{-2}]	Dureza do material
K	[---]	Coeficiente de desgaste
F_A	[N]	Força de atrito
F_a	[kgf]	Força Axial
F_N	[N]	Força normal
F_T	[N]	Força tangencial
VP	[mm^3]	Volume perdido
m_i	[g]	Massa inicial
m_f	[g]	Massa final
m_T	[kg]	Massa Total
d	[g/cm^3]	Densidade
T	[N]	Torque
i	[---]	Redução
f	[Hz]	Frequência
D_r	[mm]	Diâmetro Interno
L	[mm]	Distância entre Mancais da Mesa
C_S	[---]	Fator que depende do Tipo de Mancalização
n_M	[rpm]	Rotação Máxima Permitida Fuso de Esferas
n_T	[rpm]	Rotação de Trabalho do Fuso de Esferas
S_S	[---]	Fator de Segurança
S_O	[---]	Fator de Operação
C_a	[kgf]	Carga Dinâmica
V_h	[h]	Vida Útil Média Fuso de Esferas
μ	[---]	Coeficiente de atrito
μ_G	[---]	Coeficiente de Atrito da Superfície da Guia Linear
η	[---]	Rendimento

p	[mm]	Passo do Fuso
I_T	[N]	Indicação Força Tangencial
I_{FN}	[N]	Indicação Força Normal
C	[N]	Correção
s	[mm^3]	Desvio Padrão
$\bar{x}$	[mm^3]	Média Aritmética Simples
CV	[%]	Coeficiente de Variação
Re	[mm^3]	Repetitividade
t	[---]	Coeficiente de Student
u	[---]	Incerteza Padrão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
1.1 Objetivos 19
1.1.1 Objetivo geral 19
1.1.2 Objetivos específicos 19
1.2 Estrutura da dissertação 20
2 REVISÃO DA LITERATURA E PESQUISA DO ESTADO DA ARTE 22
2.1 Histórico e definições conceituais da Tribologia 22
2.2 Atrito e desgaste 23
2.2.1 Desgaste abrasivo 24
2.2.2 Atrito 28
2.3 Métodos para ensaios de desgaste por abrasão 30
2.3.1 Método Pino contra Lixa - norma *ASTM G132* 30
2.3.2 Método Pino sobre Disco - norma *ASTM G99* 31
2.3.3 Método Bloco-disco - norma *ASTM G77* 32
2.3.4 Método Ensaio de Abrasão em Lama - norma *ASTM G75* 32
2.3.5 Método Roda de Borracha em Solução - norma *ASTM G105* 33
2.3.6 Ensaio de micro abrasão 33
2.4 Norma *ASTM G65-16*… 34
2.5 Abrasômetros disponíveis no mercado… 38
3 CONCEITO DO PROJETO DE AUTOMAÇÃO DE UM ABRASÔMETRO 42
3.1 Descrição do sistema de ensaio original… 42
3.2 Descrição do sitema de ensaio proposto… 43
3.3 Avaliação e seleção da tecnologia de carregamento… 46
4 DESENVOLVIMENTO E INTEGRAÇÃO MECATRÔNICA DO SISTEMA 48
4.1 Definição dos sensores e atuadores… 48
4.1.1 Mesa horizontal 48
4.1.2 Roda de borracha 50
4.2 Estrutura mecânica… 52
4.2.1 Mesa horizontal 52
4.2.2 Roda de borracha 56
4.3 Sistema eletroeletrônico… 57
4.3.1 Seleção do controlador 57

4.3.2 Instalação elétrica.....60
4.3.3 Sistema supervisório.....65
5 VALIDAÇÃO OPERACIONAL E CALIBRAÇÃO DO ABRASÔMETRO.....69
5.1 Testes preliminares… 69
5.2 Preparação para execução dos ensaios… 69
5.2.1 Corpos de prova.....69
5.2.2 Areia abrasiva.....71
5.3 Calibração do abrasômetro… 71
5.3.1 Calibração do abrasômetro mecanizado.....72
5.3.2 Calibração do abrasômetro instrumentado.....74
5.4 Ensaios executados… 76
5.4.1 Ensaio no laboratório LFS-USP 77
5.4.2 Ensaio no laboratório da empresa Rijeza Metalurgia 78
5.4.3 Ensaios no laboratório LDS Faculdade SATC.....80
6 RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ABRASÔMETRO.....84
6.1 Resultado com o abrasômetro mecanizado.....84
6.2 Resultados com o abrasômetro instrumentado 85
7 CONCLUSÃO 92
8 PERPECTIVAS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 95
REFERÊNCIAS.....96
APÊNDICE A – Exemplo de relatório gerado após ensaio no Abrasômetro 100
APÊNDICE B – Planilha utilizada para preenchimento de dados do ensaio 102
ANEXO A – Fator que depende do tipo de mancalização Cs.....103
ANEXO B – Vida útil média Vh 104
ANEXO C – Fator de operação So.....105

1 INTRODUÇÃO

O desgaste de peças não pode ser evitado na prática, mas seu controle é necessário na maioria das aplicações. Com o aumento da frequência de manutenção decorrente do desgaste prematuro, proporcionalmente tem-se o aumento da indisponibilidade da máquina ou equipamento. Em consequência é necessária uma maior quantidade de recursos para substituição ou manutenção da peça desgastada, põe-se em risco a preservação de bens, e há um impacto significativo na segurança dos envolvidos.

Segundo a norma DIN 50320 (1979 *apud* SIEGEL, 1997) desgaste significa "a perda progressiva de matéria da superfície de um corpo sólido, devido à interação mecânica, contato ou movimento relativo com contra corpo sólido, líquido ou gasoso". A ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012), através Norma Brasileira NBR 12042 também define desgaste como "desagregação superficial e remoção de partículas de um determinado material submetido à força de atrito". O estudo do desgaste faz parte de uma área da ciência denominada Tribologia, descrita por Hutchings (1992) como "o estudo do atrito, desgaste e lubrificação". Stoeterau (2004 *apud* OLIVEIRA; SILVA, 2015) cita que "as pesquisas sobre os problemas tribológicos de atrito e os desgastes resultantes são perfeitamente justificáveis, na medida em que esses fenômenos afetam quase todos os aspectos da vida humana, não sendo restritos apenas a problemas mecânicos de máquinas e seus mancais [...]".

Algumas estimativas já foram realizadas buscando dimensionar as perdas financeiras provocadas pelo desgaste, principalmente nos processos industriais. Uma pesquisa nacional em 1997 indicou que o custo total do desgaste para a indústria do Reino Unido era da ordem de £650 milhões por ano, e para as empresas, os custos eram tipicamente cerca de 0,25% do seu volume de negócios (GEE; GANT; HUTCHINGS, 2002). Segundo Chattopadhyay (2014), o "atrito e desgaste de materiais provocam uma perda econômica de 5 a 8% do PNB - Produto Nacional Bruto, a cada ano na Alemanha". Sinatora (2005), em seu estado da arte sobre Tribologia, afirma que "no Brasil as economias nacionais possíveis (reduções de custos produtivos) apenas com a aplicação de conhecimentos existentes sobre desgaste, seriam de R$3,4 a 20 bilhões por ano". Para a *ASM - American Society for Metals* (1992), "um dos grandes desafios na resolução dos problemas de desgaste é

antecipar a forma e a intensidade com a qual ele irá ocorrer em um dado componente". De fato, não é possível reproduzir todas as condições reais a que um determinado material estará exposto (tribosistema), mas é oportuno que nas etapas de projeto de peças ou máquinas, possam ser feitos ensaios e testes laboratoriais que permitam simular e analisar o desgaste, permitindo selecionar os materiais adequados para cada aplicação, estimar sua vida útil, etc.

Atualmente, empresas, associações, órgãos governamentais, instituições de ensino e pesquisa vem contribuindo para o desenvolvimento da Tribologia brasileira. Cita-se a ABM - Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, e na academia, cita-se o Laboratório de Tribologia e Materiais da Universidade Federal de Uberlândia (fundado em 1984), o Laboratório de Fenômenos de Superfície da Universidade de São Paulo (fundado em 1996), entre outros. A Faculdade SATC - Sociedade de Assistência aos Trabalhadores do Carvão de Criciúma-SC, com intuito de promover ensino e pesquisa também na área de Tribologia, fundou em 2015, através dos professores Richard de Medeiros Castro e Fernando Michelon Marques, seu laboratório denominado LDS - Laboratório de Desgaste de Superfície. Seus usuários são alunos dos cursos de graduação (principalmente Engenharia Mecânica e Tecnologia em Manutenção Industrial) e, recentemente, do programa de mestrado profissional em Engenharia Metalúrgica. A figura 1 apresenta algumas máquinas de ensaio presentes neste laboratório.

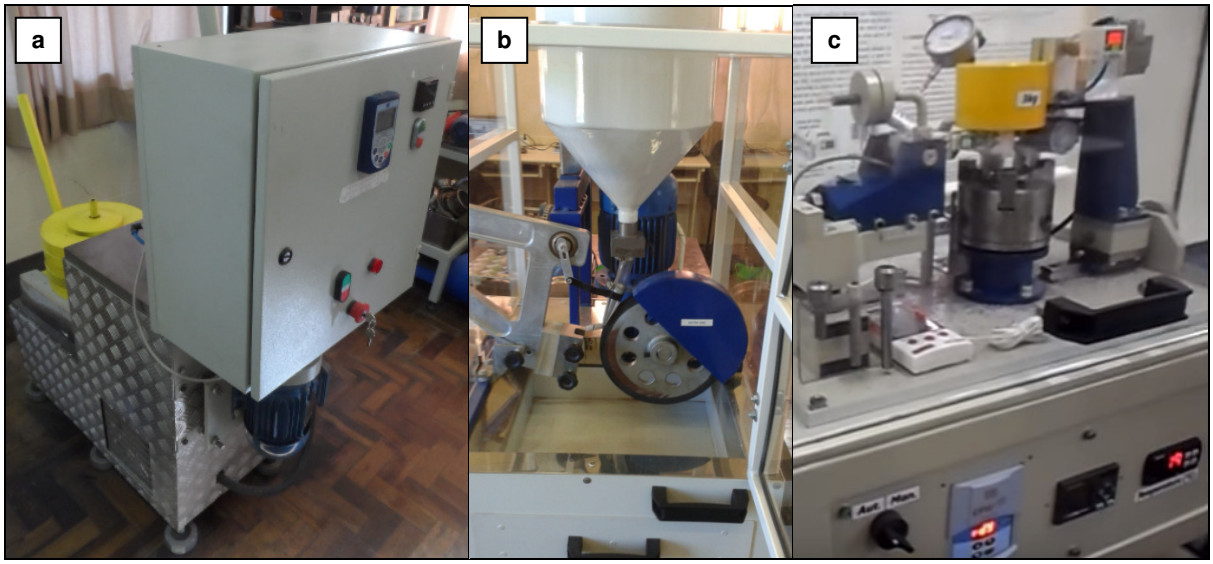


FIGURA 1 - Máquinas de ensaio do LDS Faculdade SATC.
a) Fadiga de contato; b) desgaste por abrasão; c) pino sobre disco.

Castro (2015) cita que um dos objetivos de construir o Tribômetro “Pino Sobre Disco” para o LDS Faculdade SATC foi “[...] desenvolver a tecnologia de fabricação para a medição nas áreas de Tribologia, atendendo os interesses de pesquisa da instituição [...]”, completando ainda “[...] será possível firmar parcerias com as indústrias metal mecânicas da região do sul de Santa Catarina para o desenvolvimento de pesquisas relacionadas aos fenômenos das superfícies em contato”.

Outra máquina pertencente ao LDS Faculdade SATC é conhecida por “Abrasômetro tipo roda de borracha”, no qual é possível desenvolver um ensaio para analisar e classificar materiais quanto à resistência ao desgaste por abrasão. É constituído de uma roda de aço envolvida por um anel de borracha de dureza especificada, que gira em contato com um corpo de prova, com abrasivo (areia) na interface, provocando a perda de massa. A força normal com que o corpo de prova é pressionado contra a roda de borracha se dá por um braço de alavanca, carregado com um peso morto (carga inercial) especificado. Este método de ensaio é padronizado pela *ASTM - American Society for Testing and Materials*, através da norma *ASTM G65 - Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus* (2016). A figura 2 apresenta um ensaio de desgaste em um Abrasômetro.

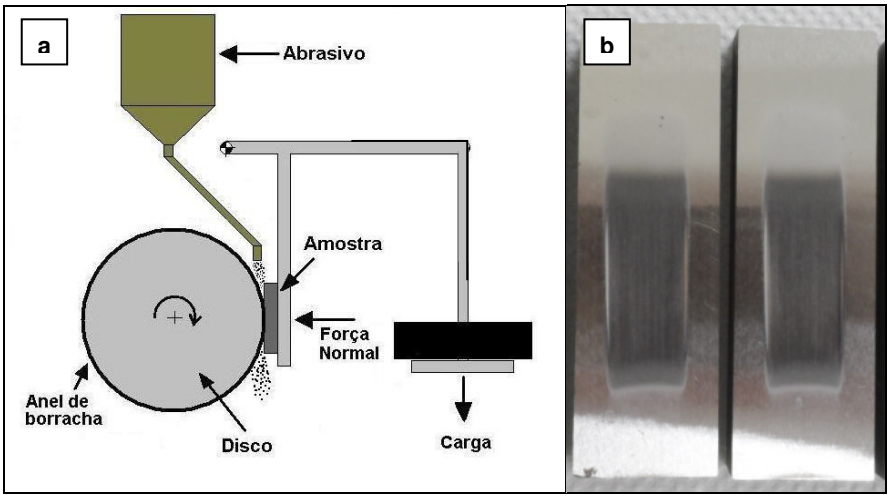


FIGURA 2 - Ensaio de desgaste segundo *ASTM G65-16*.
a) Abrasômetro (CASTRO, 2010); b) corpos de prova após ensaio.

Embora funcional, percebeu-se que o abrasômetro do laboratório apresenta algumas limitações, o que prejudica a confiabilidade dos resultados obtidos. Não era

possível o ajuste de algumas variáveis inerentes ao ensaio, além de não permitir o acompanhamento em tempo real e registro destes resultados. Desta forma, esta dissertação de mestrado apresenta as ações realizadas com o objetivo de automatizar (instrumentar, supervisionar e controlar) o abrasômetro do LDS Faculdade SATC. A pesquisa das funcionalidades de outras máquinas com mesma função, a concepção eletromecânica, o resultado dos testes iniciais, e um estudo comparativo de ensaios entre diferentes laboratórios são abordados no decorrer dos capítulos seguintes. Ao final do trabalho são apresentados sugestões de melhoria na máquina modificada e trabalhos futuros.

1.1 Objetivos

Estão relacionados com a reestruturação de uma máquina de ensaio, onde, ao final, espera-se principalmente garantir a confiabilidade metrológica dos resultados obtidos.

1.1.1 Objetivo geral

Aprimorar o funcionamento de um abrasômetro tipo roda de borracha através de uma nova concepção eletromecânica, permitindo controlar, monitorar e registrar algumas variáveis inerentes ao ensaio de desgaste por abrasão normalizado pela *ASTM G65-16.*

1.1.2 Objetivos específicos

Para atender o objetivo geral, pretende-se:

- Atender os requisitos de ensaio estipulados pela norma *ASTM G65-16* a fim de garantir que sejam satisfeitos pela nova configuração da máquina;
- Pesquisar as características de máquinas semelhantes à solução pretendida seja para fins comerciais ou desenvolvidas em nível de academia;
- Implementar as mudanças estruturais e de funcionamento, após seleção dos materiais e equipamentos necessários, ponderando critérios técnicos, de segurança e econômicos;

- Realizar testes para verificar funcionamento e características operacionais implementadas;
- Comparar os resultados dos ensaios realizados com os valores de referência da norma técnica e de máquinas pertencentes a outros laboratórios, a fim de determinar a confiabilidade metrológica do novo abrasômetro.

1.2 Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada conforme a estrutura que segue:

No **Capítulo 1 (Introdução)** é feito uma breve descrição da motivação deste trabalho e dos objetivos que se espera alcançar;

No **Capítulo 2 (Revisão da Literatura e Pesquisa do Estado da Arte)** são apresentados conceitos fundamentais como Tribologia, desgaste e atrito. Os métodos de ensaio padronizados para simular desgaste por abrasão e os requisitos da norma *ASTM G65-16,* base deste trabalho, também são abordados. Por fim, alguns modelos de abrasômetros também são apresentados.

No **Capítulo 3 (Conceito do Projeto de Automação de um Abrasômetro)** são apresentados as características da máquina de ensaio atual e suas deficiências, sendo proposto uma nova concepção no *layout* e, por consequência, no seu funcionamento, resultando em uma nova configuração de projeto que se pretende realizar.

No **Capítulo 4 (Desenvolvimento e Integração Mecatrônica do Sistema)** são abordados os critérios adotados para seleção dos componentes e equipamentos eletromecânicos, de controle e instrumentação. Na sequência, são apresentadas as etapas definidas para alteração da estrutura mecânica, montagem do quadro elétrico de comando, desenvolvimento do sistema de supervisão e, por fim, sua integração.

No **Capítulo 5 (Validação Operacional e Calibração do Abrasômetro)** são descritos os procedimentos adotados para os ensaios, ajustes no abrasômetro e calibração dos sistemas de medição e aplicação de forças no modo mecanizado e

instrumentado, além de descrever a execução dos ensaios em diferentes laboratórios.

No **Capítulo 6 (Resultados dos Ensaios no Abrasômetro)** são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos no abrasômetro do LDS Faculdade SATC, no modo mecanizado e instrumentado. Um comparativo é feito com os requisitos da norma *ASTM G65-16* e com outros abrasômetros, permitindo determinar sua confiabilidade metrológica.

No **Capítulo 7 (Conclusão)** são relatadas as características da nova concepção do abrasômetro instrumentado e os resultados obtidos, tanto no aspecto operacional quanto no metrológico. Um comparativo do investimento feito para automatizar o funcionamento do Abrasômetro com outras máquinas de ensaio de desgaste por abrasão semelhantes também é apresentado. Também é relatada a importância deste projeto para o autor, para a instituição de ensino e para as indústrias da região.

No **Capítulo 8 (Perspectivas e Sugestões para Trabalhos Futuros)** são sugeridos pelo autor modificações no funcionamento da máquina ou na execução dos ensaios, visando melhorar o desempenho operacional e metrológico do abrasômetro e instigar a continuidade da pesquisa na área de Tribologia.

2 REVISÃO DA LITERATURA E PESQUISA DO ESTADO DA ARTE

Este capítulo apresenta o estudo realizado para introduzir os conceitos e técnicas associados à área da Tribologia, métodos de ensaios normalizados, apresentar as orientações e requisitos da norma *ASTM G65-16*, base deste trabalho. Alguns modelos de abrasômetros pesquisados e suas características também serão abordados.

2.1 Histórico e definições conceituais da Tribologia

A palavra “Tribologia” é originária do grego, “tribos” que significa roçar-esfregar, e “logos”, estudo. Conforme Sinatora (2005), “a Tribologia se dedica ao estudo do desgaste, do atrito e, por conseguinte, da lubrificação, como forma tradicional de minimizar seus efeitos negativos, apoiando-se na mecânica, física, química e ainda nas ciências dos materiais [...]”. Em 1966, o termo “Tribologia” foi utilizado oficialmente, pela primeira vez, em um relatório feito pelo professor H. Peter Jost para o comitê do departamento inglês de educação, para definir “a ciência e tecnologia da interação entre superfícies em contato em movimento relativo e das práticas com elas relacionadas” (OLIVEIRA; SILVA, 2015).

Porém, o estudo da Tribologia remonta o século XV, quando Leonardo da Vinci formulou leis de atrito (HUTCHINGS, 1992).

> Após a Renascença, Leonardo Da Vinci (1452 - 1519) deu importantes contribuições no entendimento dos fenômenos de atrito e desgaste. Da Vinci mediu forças de atrito em planos horizontais e inclinados. Ele mostrou que as forças de atrito eram dependentes da força normal ao deslizamento de corpos e independentes da área de contato aparente. Propôs uma distinção entre atrito de escorregamento e de rolamento, além de investigar a influência do lubrificante na redução do atrito. Além disso, introduziu o coeficiente de atrito como sendo proporcional a força normal. Da Vinci estudou particularmente o atrito em mancais, sugerindo a utilização de uma liga com 30% de cobre e 70% de estanho para mancais planos, com a intenção de reduzir o efeito do atrito (Zum Gahr, 1987).

O controle do atrito também é considerado um fator de grande importância. Muitas vezes, o objetivo é reduzir o atrito tanto quanto possível para aumentar a eficiência

da máquina. Além disso, as reduções do atrito geralmente estão ligadas a reduções no desgaste, de modo que, à medida que o atrito é reduzido, o desgaste também diminui (GEE; GANT; HUTCHINGS, 2002). Durante as últimas décadas houve um crescimento exponencial no desenvolvimento de novos produtos, fazendo com que os estudos acerca do atrito e dos mecanismos de desgaste acompanhassem essa evolução. Quanto maior for o entendimento de como os materiais respondem ao desgaste e ao atrito, mais fácil será para aprimorá-los (STACHOWIAK, 2005).

Desta forma, percebe-se a importância da Tribologia como uma área da ciência responsável por minimizar os efeitos do atrito e desgaste.

2.2 Atrito e desgaste

Para Maio (2012 *apud* CASTRO, 2015), "diversos são os fatores que influenciam no atrito e desgaste de um componente mecânico. Entre eles, as condições do sistema tribológico e as propriedades dos materiais". Na figura 3 são apresentados alguns destes fatores.

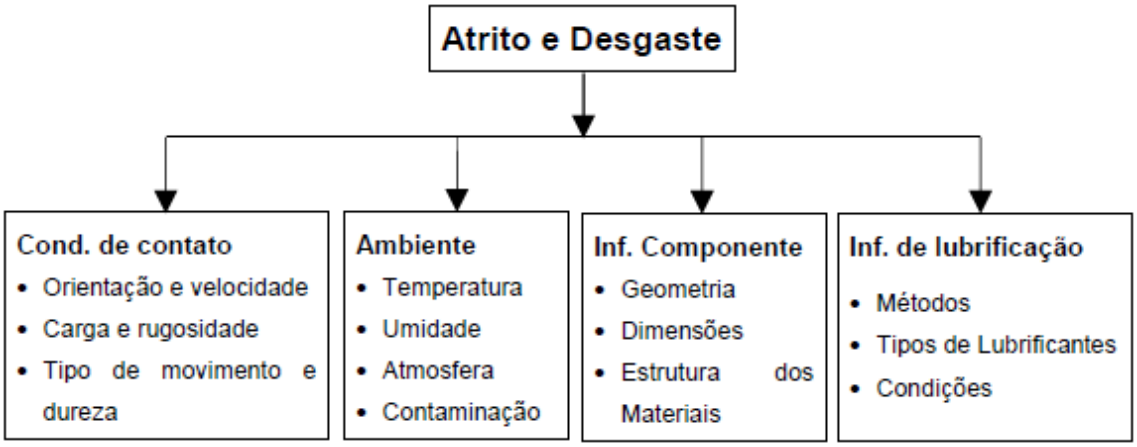


FIGURA 3 - Fatores relevantes para o comportamento ao atrito e desgaste (MAIO 2012 *apud* CASTRO, 2015).

Para Norton (2013) "existem apenas três maneiras segundo as quais peças e sistemas podem 'falhar': obsolescência, quebra ou desgaste acentuado". Este autor ainda acrescenta que "desgaste é um termo amplo que engloba vários tipos de falhas, todas envolvendo alterações na superfície da peça". A figura 4 apresenta as causas de falhas em peças.

Percebe-se que o desgaste é o principal causador de falhas em peças ou máquinas, e segundo Gregolin (1990 *apud* LEITE; MARQUES, 2009) “ele influi nos custos diretos de produção devido às necessidades de reposição ou recuperação de peças desgastadas, e também nos custos indiretos de produção pela necessidade de superdimensionamento de componentes e pelas limitações na produção devido a equipamentos deteriorados, além de interrupções muitas vezes imprevistas nas linhas de produção”.

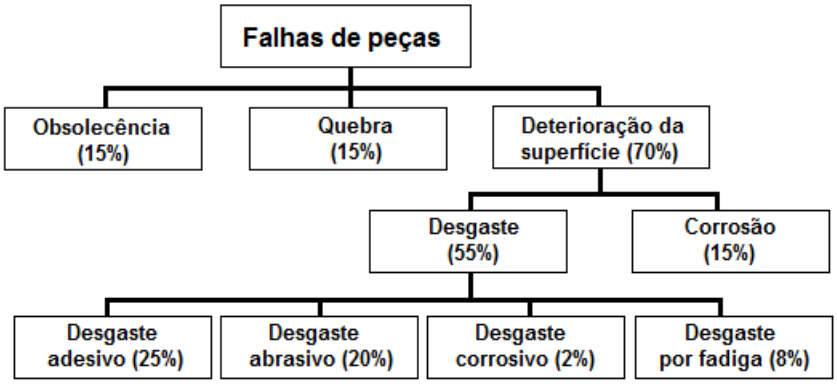


FIGURA 4 - Causas das falhas em peças (adaptado de LEITE, 2008).

Na figura 4, são indicados quatro mecanismos de desgaste: adesivo, abrasivo, corrosivo e por fadiga superficial, identificadas por Zum Gahr (1987) e Rabinowicz (2013). Cada processo de desgaste obedece suas próprias leis, e em muitas ocasiões, um dos modos/mecanismos de desgaste atua de tal modo que influencia nos outros. Desta forma, na análise de uma situação complexa, é crucial encontrar a causa primária do desgaste. Assim, o estudo dos mecanismos de desgaste e da resistência ao desgaste em um sistema tribológico é fundamental para uma correta seleção de materiais e para a previsão da durabilidade do sistema. Em função dos objetivos deste trabalho, será abordado somente o desgaste do tipo abrasivo.

2.2.1 Desgaste abrasivo

Segundo a norma *ASTM G40 - Standard Terminology Relating to Wear and Erosion* (2015), o desgaste abrasivo é definido como “a perda de massa resultante

da interação entre partículas ou asperezas duras que são forçadas contra uma superfície, ao longo da qual se movem".

Tradicionalmente, o contato entre as partículas abrasivas e a superfície que sofre desgaste tem sido classificado em dois modos: desgaste abrasivo a dois corpos e desgaste abrasivo a três corpos (Hutchings, 1992). Trezona *et al*. (1999 *apud* COZZA, 2006) afirmam que "na língua inglesa, os termos 'desgaste abrasivo a dois corpos' e 'desgaste abrasivo a três corpos' são encontrados, cada um, sob duas denominações: *'grooving abrasion'* ou *'two-body abrasive wear'*, e *'rolling abrasion'* ou *'three-body abrasive wear'*, respectivamente". Complementa ainda Trezona *et al*. que "na língua portuguesa, os termos 'desgaste abrasivo a dois corpos' e 'desgaste abrasivo a três corpos' podem ser substituídos por 'desgaste abrasivo por riscamento' *(grooving abrasion)* e 'desgaste abrasivo por rolamento' *(rolling abrasion)*, respectivamente". A figura 5 ilustra os tipos de desgaste abrasivo.

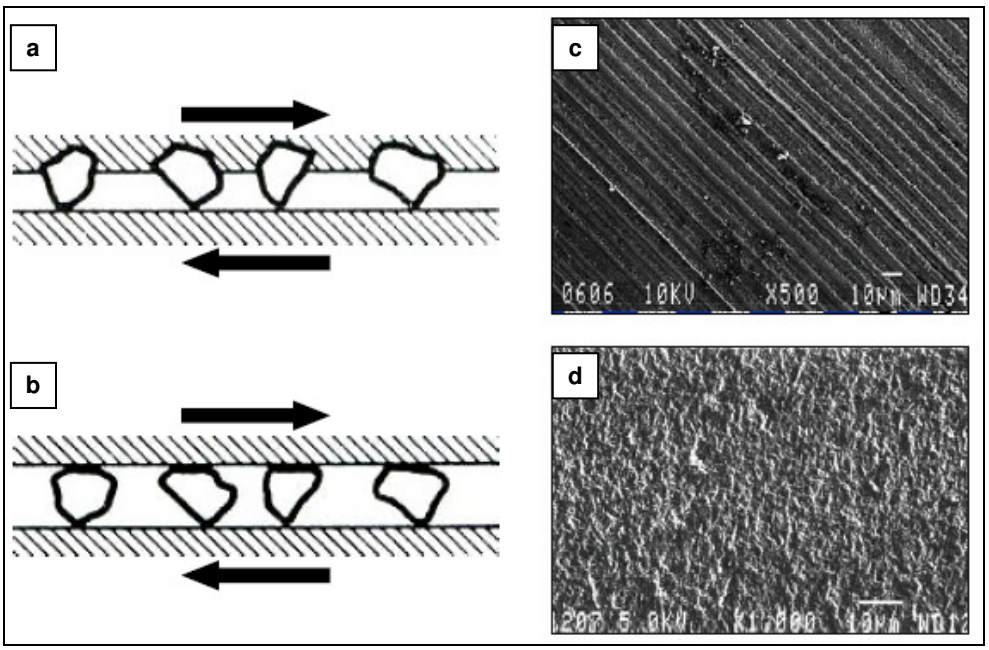


FIGURA 5 - Tipos de desgaste abrasivo. a) A dois corpos; b) a três corpos. Superfície de material após desgaste abrasivo por c) riscamento; d) rolamento; (adaptado de HUTCHINGS, 1992).

Conforme Zum Gahr (1998 *apud* DALLMANN, 2012) o "desgaste abrasivo é denominado de dois corpos quando uma superfície dura e rugosa, ou uma superfície macia contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície de menor dureza, produzindo nela diversas ranhuras, que pode ser causadas por protuberâncias duras pertencentes ou engastadas em uma das superfícies. Já abrasão a três corpos

ocorre quando as partículas duras são livres para rolar e deslizar entre as duas superfícies. A taxa de desgaste no caso de três corpos é geralmente menor, pois as partículas abrasivas soltas passam 90% do tempo rolando, e apenas 10% do tempo em contato com a superfície".

Cabe ressaltar que, embora na maioria das aplicações o desgaste possa assumir destaque negativo, em outras, se for controlado, deseja-se o oposto. Um exemplo seria uma ferramenta que "desgasta" um material em um processo de usinagem (abrasão a dois corpos) ou processos de lapidação (abrasão a três corpos). As figuras 6 e 7 mostram aplicações onde ocorre desgaste por abrasão não controlado a dois e três corpos, respectivamente.

FIGURA 6 - Desgaste abrasivo a dois corpos em caçamba para transporte de minérios. (http://www.imgrum.org/tag/abrasao)

FIGURA 7 - Desgaste abrasivo a três corpos em eixo e mancal. (http://www.rijeza.com.br)

Alguns autores não utilizam a classificação de desgaste abrasivo por dois ou três corpos, preferindo classificar por desgaste abrasivo moderado, severo e extremo. As variáveis que definiriam esta classificação referem-se às condições da

partícula abrasiva (tamanho, angulosidade e restrição ao movimento) e aos níveis de pressão aplicada (baixa pressão ou alta pressão). Diferentes combinações de valores destas variáveis definiriam diferentes níveis de severidade do sistema, e consequentemente de material removido.

A equação de Archard é largamente utilizada por permitir quantificar a severidade do desgaste em diferentes sistemas. A figura 8 apresenta uma partícula cônica deslizando sobre uma superfície plana de material dúctil e sob a ação de uma carga normal **W**.

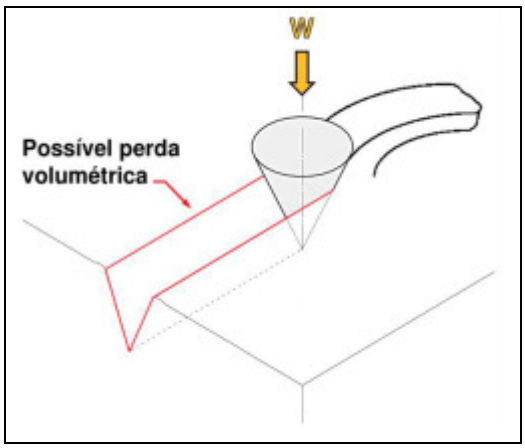


FIGURA 8 - Partícula idealizada deslizando sobre a superfície de um material dúctil. (www.abmbrasil.com.br/cim/download/eduardo_albertin.pps)

A taxa de desgaste gerada pelas N_p partículas abrasivas atuantes no sistema pode ser definida pela equação de Achard para o desgaste abrasivo (Hutchings, 1992), conforme equação 1.

$$Q = K\frac{W}{H} \qquad [1]$$

Onde ***Q*** é a taxa de desgaste, interpretada como o volume de material removido por unidade de distância de deslizamento (mm^3/m), ***W*** é a carga Normal aplicada (N) e ***H*** a dureza do material desgastado (Nm^{-2}). O fator ***K*** é o coeficiente de desgaste e é uma propriedade adimensional e menor que 1, que depende dos materiais utilizados e das condições de lubrificação.

A equação 1 permite verificar que a taxa de desgaste é diretamente proporcional à força no contato, mas diminui à medida que aumentam a dureza das

superfícies em contato, ou seja, a resistência ao desgaste aumenta com a dureza ou o volume de material removido diminui com o aumento da dureza (Rabinowicz, 2013).

Segundo Hutchings (1992) o fator ***K*** para desgaste abrasivo de metais está situado entre $5x10^{-4}$ a $5x10^{-3}$ (três corpos) e entre $5x10^{-3}$ a $5x10^{-2}$ (dois corpos). Portanto, a equação de desgaste de Archard fornece valiosos parâmetros que descrevem o rigor do desgaste através do coeficiente ***K***, mas a sua validade não pode ser usada para afirmar a existência ou não de um determinado mecanismo de remoção de material. É necessário o uso do microscópio ótico ou eletrônico para identificar os principais mecanismos de desgaste atuantes.

Um método de combate a este fenômeno, tecnicamente chamado de revestimento, consiste na deposição de uma liga especial na superfície sujeita a esta deterioração. Isto pode ser obtido pela aplicação de cordões de solda na superfície, ou pela aplicação de placas metálicas protetoras, revestidas com componentes resistentes ao desgaste (revestimentos duros). A figura 9 apresenta a utilização de revestimento em equipamento industrial.

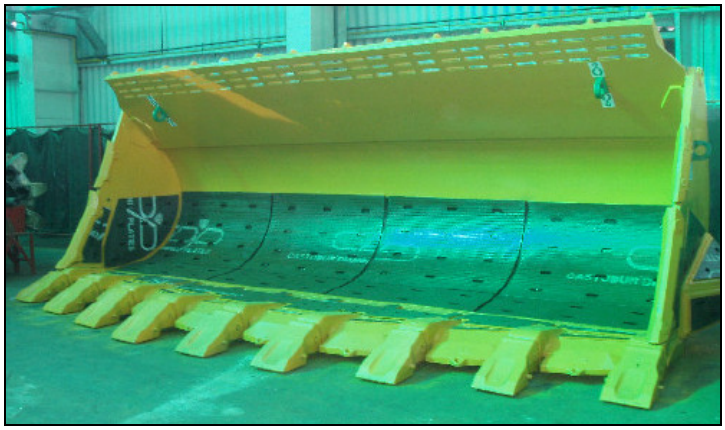


FIGURA 9 - Aplicação de placas resistentes ao desgaste abrasivo (LEITE, 2008).

2.2.2 Atrito

A necessidade de controlar o atrito e o desgaste em terra, mar e sistemas de propulsão aeroespacial foi claramente o impulso histórico para investir nas pesquisas que correlacionam o coeficiente de atrito ao desgaste (BLAU, 1997). As primeiras pesquisas sobre o atrito e desgaste ocorreram entre 1940 e 1950, realizadas por engenheiros mecânicos e metalurgistas com o objetivo de obter

dados para ajudar na construção de motores, freios, rolamentos, e outros tipos de sistemas com movimentos mecânicos (PANTALEÓN; TANAKA; BERNARDES, 2012). Segundo a *ASM* (1992), o "atrito tem grande interesse teórico e prático e envolve a física fundamental, uma vez que é o suporte da maioria dos movimentos".

> Em máquinas com movimento, o atrito é responsável pela dissipação e perda de muita energia. Estimou-se, por exemplo, que 10% do consumo de petróleo nos Estados Unidos são usados simplesmente para superar o atrito. A energia perdida para o atrito é uma entrada de energia que deve ser fornecida continuamente a fim de manter o movimento de deslizamento. Esta energia é dissipada no sistema, principalmente na forma de calor, que pode ter de ser removido por refrigeração, para evitar danos e limitar as condições sob as quais a máquina pode ser operada (CASTRO, 2015).

O conceito de atrito diz respeito à impossibilidade (atrito estático) ou à restrição (atrito cinético) ao movimento relativo entre as superfícies de corpos em contato, quando sujeitos a uma força externa. A força de atrito é gerada pela deformação na superfície de contato entre os materiais, e pela adesão entre os átomos e moléculas das superfícies opostas. Age tangencialmente à superfície e seu módulo independe da área de contato aparente entre os corpos, porém é função direta do valor da força normal.

Desta forma, define-se coeficiente de atrito $\boldsymbol{\mu}$, como a relação entre a força de Atrito $\boldsymbol{F_A}$ e a força Normal $\boldsymbol{F_N}$, que, por este fato, é uma grandeza adimensional, conforme demonstrado na equação 2.

$$\mu = \frac{F_A}{F_N} \qquad [2]$$

Diferentemente das propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade e tenacidade, o coeficiente de atrito não é uma propriedade do material, e assim pode ter diferentes valores em função do par tribológico, da configuração de contato e do ambiente e regime de lubrificação (GOMES, 2015). A figura 10 demonstra que mesmo em peças polidas e aparentemente lisas, o atrito pode ocorrer pelas irregularidades superficiais.

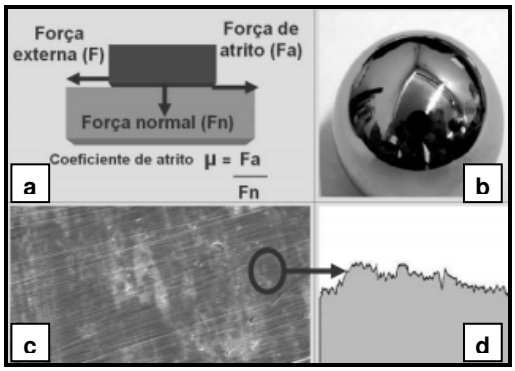


FIGURA 10 - Caracterização de atrito.
a) Representação de forças em um tribosistema; b) esfera polida;
c) superfície da esfera em análise microscópica; d) representação da rugosidade.
(GOMES, 2015)

2.3 Métodos para ensaios de desgaste por abrasão

Conforme Zum Gahr (1987 *apud* SANTOS *et al*, 2015) a "resistência ao desgaste abrasivo de um material pode ser medida por uma grande quantidade de ensaios de laboratório e o valor obtido depende não somente das propriedades intrínsecas do material como também do método de ensaio empregado". Para Norton (2013) os ensaios são "[...] úteis para fazer estimativas de taxas de desgaste em situações nas quais o ensaio do projeto real não é possível". Gee, Gant e Hutchings (2002) destacam que "existe uma forte necessidade de métodos robustos para o estudo laboratorial de desgastes abrasivos, sobre vários propósitos: *i)* investigar mecanismos fundamentais de desgaste; *ii)* para avaliar e comparar as taxas de desgaste de materiais diferentes; *iii)* simular e aprimorar processos de fabricação; e *iv)* como testes de garantia de qualidade para superfícies projetadas".

Na sequência deste trabalho serão apresentados os principais ensaios de desgaste por abrasão e um breve comentário sobre as normas que os sustentam. O ensaio baseado na norma *ASTM G65-16* será abordado em tópico separado, por ser a base deste trabalho.

2.3.1 Método Pino contra Lixa - norma *ASTM G132*

Este método de ensaio abrange um procedimento de laboratório para determinar a resistência ao desgaste de um material quando o movimento relativo é provocado entre um pano, lixa, papel ou película de plástico abrasivo e um pino de contato do material de teste. A pista de desgaste do pino descreve um percurso

contínuo. O corpo de prova (pino) é pressionado contra a superfície abrasiva com uma carga especificada por meio de peso morto ou outro sistema de carga apropriada. As variáveis do ensaio são a carga, velocidade translacional e rotacional, comprimento da trilha. A figura 11 mostra um tribômetro baseado nesta norma.

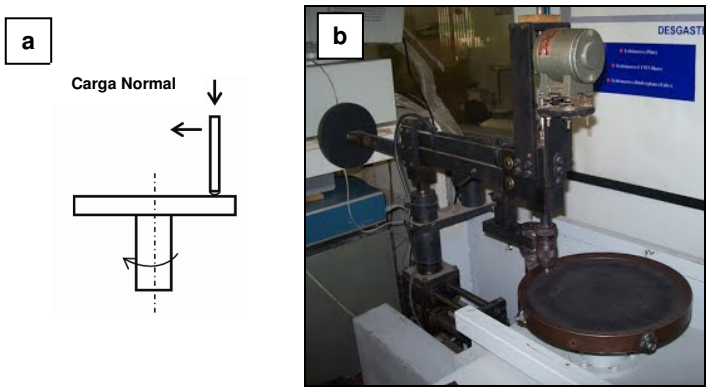


FIGURA 11 - Método pino contra lixa.
a) Representação; b) máquina de ensaio.
(https://sites.google.com/site/ufultm/home-ltm-port/equipamentos)

2.3.2 Método Pino sobre Disco - norma *ASTM G99*

A figura 12 mostra um tribômetro baseado nesta norma, em que a máquina ou dispositivo de teste consiste em rotacionar o disco ou fazer movimentos circulares com o pino ou esfera para que haja um movimento discordante entre o pino e o disco. Este ensaio permite determinar o desgaste e o coeficiente de atrito, e o resultado do ensaio é um risco (trilha) circular no disco. Pode-se também substituir o pino por uma esfera. Variáveis do ensaio: carga, velocidade de deslizamento e distância percorrida.

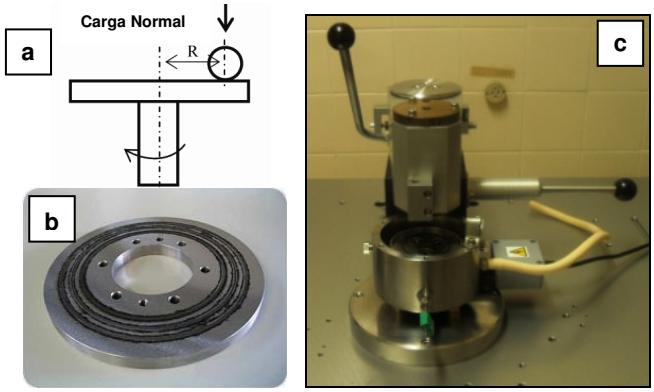


FIGURA 12 - Método pino sobre disco.
a) Representação; b) corpo de prova; c) máquina de ensaio.
(http://www.tricorrmat.ufes.br/equipamentos-0)

2.3.3 Método Bloco-disco - norma *ASTM G77*

Este método de ensaio permite determinar a resistência do material ao desgaste por deslizamento. No ensaio, um bloco é carregado contra um anel (disco) de teste que gira a uma dada velocidade, por um determinado número de revoluções. Após os ensaios, a perda de volume é calculada através da trilha deixada no bloco. Variáveis do ensaio: carga e velocidade rotacional. A figura 13 mostra um tribômetro baseado nesta norma.

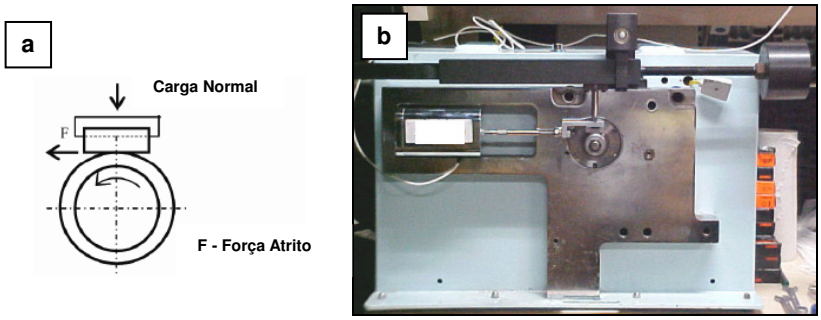


FIGURA 13 - Método bloco-disco.
a) Representação; b) máquina de ensaio.
(PROIETE; COZZA; SINATORA, 2006)

2.3.4 Método Ensaio de Abrasão em Lama - norma *ASTM G75*

Método de teste para determinar a abrasividade (número Miller) de uma pasta (solução abrasiva) em relação a um material padrão (liga de aço e cromo). Serve também para analisar o desgaste por abrasão do material em teste em relação a uma pasta padrão (número SAR). Consiste em movimentar (avanço e retorno contínuo) o corpo de prova (até quatro simultaneamente) em uma solução de areia abrasiva e água (lodo), por um período de tempo. A figura 14 mostra um exemplo tribômetro baseado nesta norma.

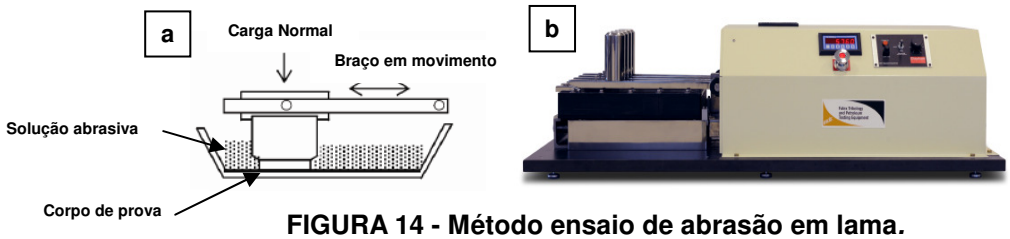


FIGURA 14 - Método ensaio de abrasão em lama.
a) Representação; b) máquina de ensaio.
(http://www.falex.com/wp-content/uploads/2016/12/FalexMillerNumber.pdf)

2.3.5 Método Roda de Borracha em Solução - norma *ASTM G105*

Neste ensaio de desgaste por abrasão, um corpo de prova é pressionado contra uma roda de aço revestida com um anel de borracha. A força normal aplicada é transferida por um braço de alavanca e pesos na sua extremidade. A roda gira em contato com uma solução (alumina e água), transportando a solução abrasiva até o corpo de prova, produzindo desgaste. Os parâmetros de teste são: carga normal de 222 N, duração do ensaio de 5000 revoluções da roda, diâmetro da roda de 178 mm e frequência rotacional de 245 rpm. A figura 15 mostra um exemplo de tribômetro baseado nesta norma.

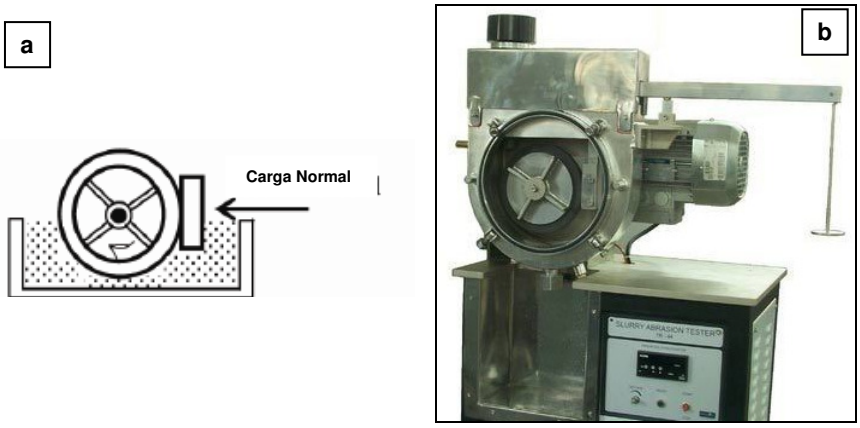


FIGURA 15 - Método de teste roda de borracha em solução.
a) Representação; b) máquina de ensaio.
(https://www.indiamart.com/nanotechsystems/abrasion-tester.html)

2.3.6 Ensaio de micro abrasão

Consiste em uma esfera de metal que gira livre sobre um corpo de prova, tendo em sua interface uma pasta abrasiva ou não. A força normal aplicada depende do próprio peso da esfera, além da inclinação do corpo de prova e sua inclinação em relação ao eixo do motor. O resultado desse contato é uma região desgastada em forma de calota esférica, que mantém relações geométricas com a esfera que a gerou. Assim, ao medir o diâmetro da calota pode-se relacioná-lo com a quantidade de material removido da amostra. A figura 16 apresenta uma máquina de ensaio de micro abrasão.

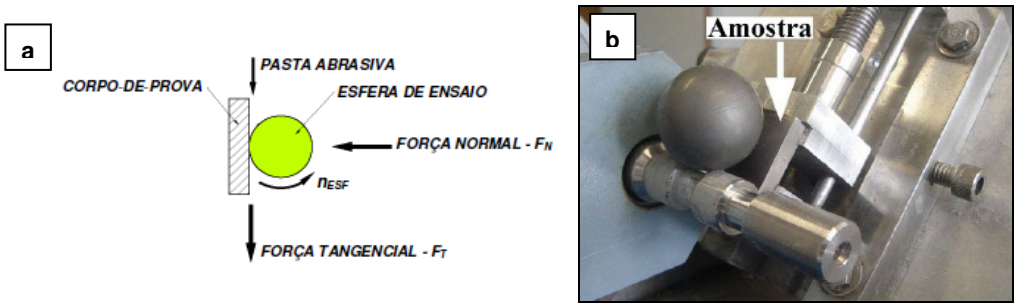


FIGURA 16 - Ensaio de micro abrasão.
a) Representação (COZZA, 2006); b) máquina de ensaio (OLIVEIRA, 2006).

2.4 Norma *ASTM G65-16*

Esta norma descreve um método de ensaio que pode ser utilizado para caracterizar e hierarquizar materiais em função da sua resistência ao desgaste por abrasão. Seu método é muito semelhante ao método recomendado pela norma *ASTM G105*, porém utiliza como meio abrasivo areia (sílica) seca.

Além dos requisitos e procedimentos para realização dos ensaios, esta norma também propõe um modelo de máquina (*layout*, características construtivas, etc.) a ser utilizado, sendo denominada "*Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*". Na literatura nacional o termo "Abrasômetro" é utilizado geralmente para descrever a máquina que permite reproduzir o método de ensaio sugerido pela norma *ASTM G65.*

Segundo Lima (2008):

> "o abrasômetro tipo roda de borracha é um dos dispositivos mais antigos para avaliação de desgaste abrasivo em laboratório. Ele foi responsável pela maioria dos dados de desgaste disponíveis na literatura até a década de 70. Este equipamento foi apresentado pela primeira vez por Haworth, em 1948, e constitui-se de um disco de aço, envolvido com um anel de borracha, que gira em contato com a superfície do corpo de prova, com abrasivo na interface. Permite realizar ensaios a seco ou a úmido, com alta confiabilidade de resultados, sendo empregado tradicionalmente na indústria de mineração; usa-se para classificar materiais quanto à sua resistência ao desgaste".

Neste trabalho foi adotado como referência a norma *ASTM G65* na sua última versão, publicada no ano de 2016. Na figura 17 temos representado duas

configurações de abrasômetro, sendo o primeiro originalmente sugerido pela norma, e o segundo sugerido por Hutchings e Stevenson (1996).

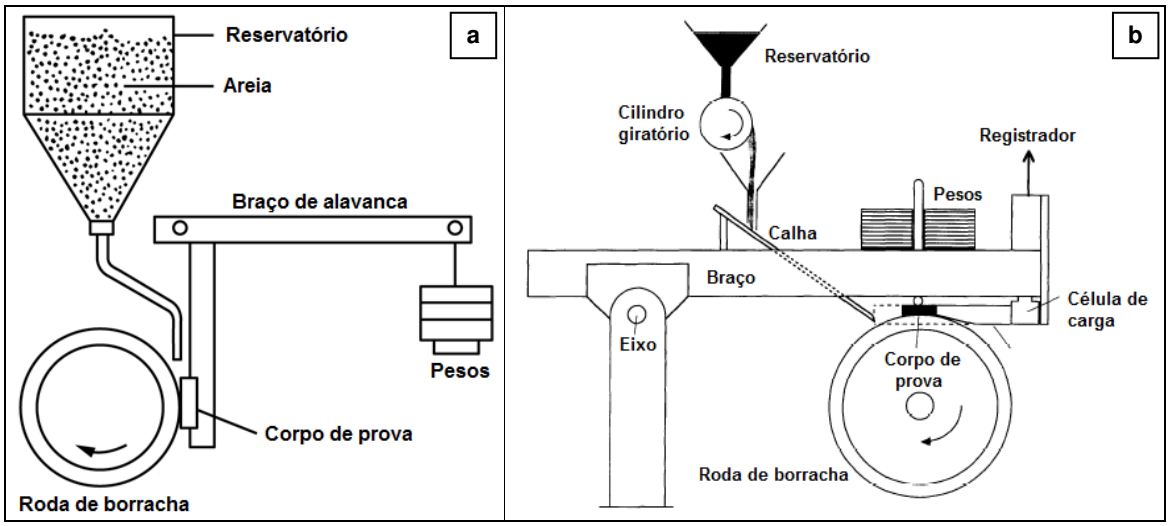


FIGURA 17 - Modelos de abrasômetros.
a) Vertical (*ASTM G65*, adaptado pelo autor);
b) horizontal (HUTCHINGS; STEVENSON, 1996, adaptado pelo autor).

Ainda com relação aos parâmetros construtivos do abrasômetro, encontram-se na norma as dimensões das várias peças: roda de aço revestido por anel de borracha (Neoprene ou Clorobutil), braço de alavanca e bico dosador de areia abrasiva, conforme figura 18.

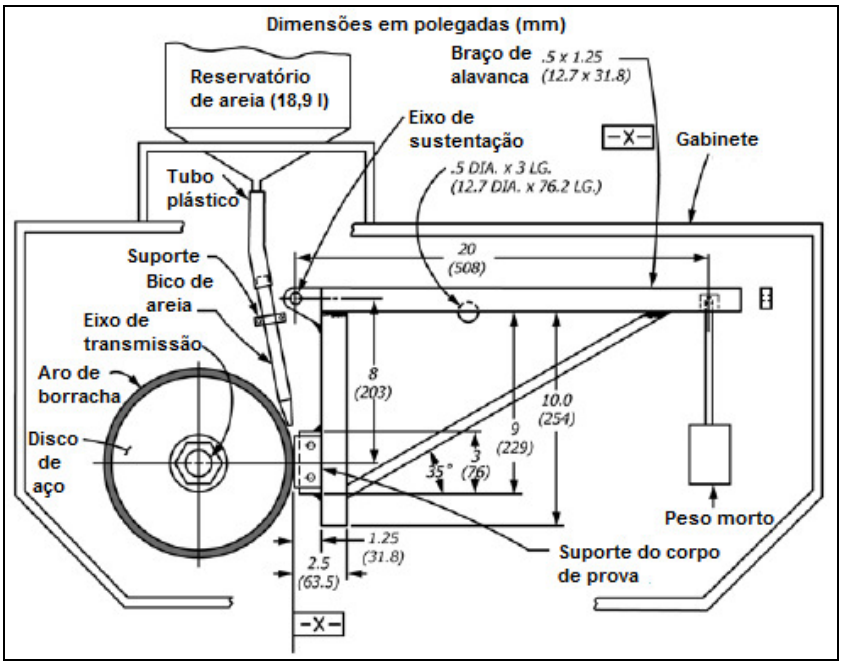


FIGURA 18 - Estrutura do abrasômetro.
(*ASTM G65-16,* adaptado pelo autor)

A tabela 1 apresenta os principais requisitos construtivos que devem ser seguidos para o abrasômetro, de acordo com a norma.

TABELA 1 - requisitos construtivos da norma *ASTM G65-16*

Requisito	***Valor a ser adotado***
Potência do motor (W)	*750*
Frequência Rotacional da roda de borracha (rpm)	*200 ± 10*
Revoluções por ensaio	*100 à 6000*
Carga aplicada corpo de prova (N)	*45 ± 3% ou 130 ± 3%*
Dimensões do corpo de prova (mm)	*25 x 76 x 12,7 (L_1 x L_2 x E)*
Diâmetro externo do disco (mm)	*228,6*
Dureza da borracha (Shore A)	*60 ± 2*
Vazão da areia (g/min)	*300 a 400*

A norma sugere cinco procedimentos (testes distintos) em função do tipo de material (maior ou menor resistência ao desgaste) que se queira ensaiar:

- *Procedimento A*: este é um ensaio relativamente severo, o qual ordena os materiais metálicos ao longo de uma extensa escala de perda de volume. É particularmente útil na classificação de materiais de média a elevada resistência a abrasão;
- *Procedimento B*: tem poucas variações das condições do procedimento A. Este procedimento pode ser usado para materiais de alta resistência a abrasão, mas é particularmente útil para baixa e média resistência;
- *Procedimento C*: usa-se para materiais muito duros e para finas camadas de materiais;
- *Procedimento D*: é particularmente útil para a classificação de materiais de baixa resistência ao desgaste abrasivo;
- *Procedimento E*: útil no ranking de materiais com baixa ou média resistência à abrasão.

Recomenda ainda que o período de ensaio deva ser dado em função do deslocamento linear (através do número de revoluções da roda) e não pelo tempo de ensaio, conforme tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - requisitos de ensaio da norma *ASTM G65-16*

Procedimento	*Força aplicada no corpo de prova (N)*	*Revoluções da roda (rpm)*	*Abrasão linear (m)*
A	*130*	*6000*	*4309*
B	*130*	*2000*	*1436*
C	*130*	*100*	*71,8*
D	*45*	*6000*	*4309*
E	*130*	*1000*	*718*

Em relação à areia abrasiva, é recomendada a utilização do tipo Ottawa AFS 50/70 (granulometria 212 µm a 300 µm).

O corpo de prova deve ter sua superfície retificada, sendo aceito um valor de rugosidade máxima de R_Z 0,8 µm. Deve ter sua massa verificada em balança analítica com resolução de 1 mg, antes e após o ensaio. A figura 19 apresenta corpos de prova antes e após um ensaio.

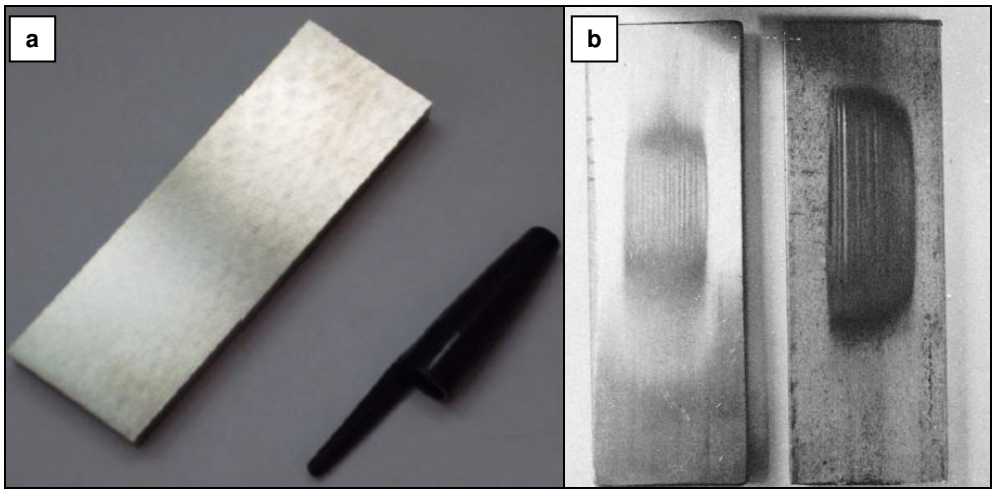


FIGURA 19 - Aspecto de corpo de prova.
a) Antes de ensaio (TOZETTI, 2013); b) após ensaio *(ASTM G65-16).*

Na figura 19b percebe-se uma marca regular no corpo de prova esquerdo (recomendado pela norma) ao contrário de uma marca irregular no corpo de prova direito. Após o ensaio, a perda de volume de material será calculada, conforme equação 3.

$$VP = \frac{m_i - m_f}{d} \times 1000 \qquad [3]$$

VP representa o volume perdido (mm^3), m_i e m_f a massa inicial e final do corpo de prova (g), e ***d*** a densidade do material (g/cm^3). Como referência, os resultados de ensaios realizados com materiais diferentes são reportados pela norma, conforme tabela 3.

TABELA 3 - resultados de ensaios com materiais de referencia

Material	*Dureza (HRC)*	*Procedimento*	*Volume perdido (mm^3)*
Aço ferramenta AISI D2	*59 - 60*	*A*	*35,6 ± 5,2*
Aço ferramenta AISI H13	*47 - 48*	*B*	*55,6 ± 4,2*
Aço AISI 4340	*31 - 33*	*D*	*91,1 ± 5,4*

2.5 Abrasômetros disponíveis no mercado

Durante a execução deste trabalho, diversos modelos de abrasômetros foram pesquisados. Alguns fabricantes dispõem de máquinas totalmente mecanizadas regulamentadas pela norma *ASTM G65-16*, mas que com adaptações podem atender a outros padrões de ensaio. Foram encontrados também modelos instrumentados, com certo nível de automação embarcada, para aquisição e registro de dados dos ensaios. A figura 20 apresenta modelos de abrasômetros mecanizados disponíveis no mercado.

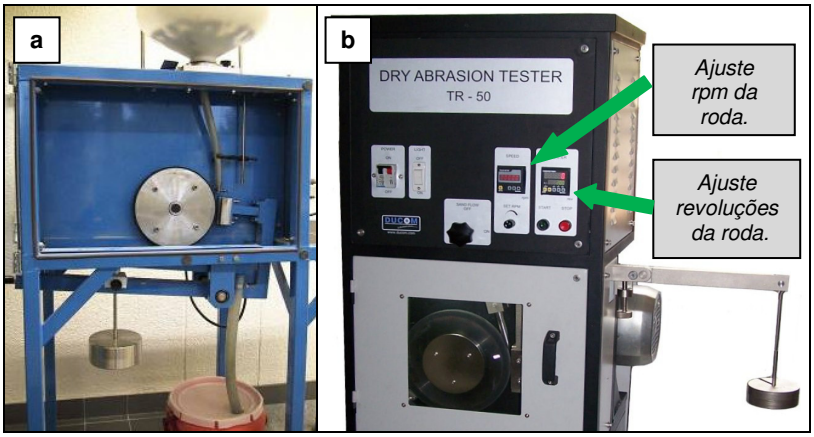


FIGURA 20 - Abrasômetros mecanizados disponíveis no mercado.
a) Fabricante NOVASWISS (www.novaswiss.com);
b) fabricante DUCOM (www.ducom.com).

Nas máquinas da figura 20, a força normal aplicada sobre o corpo de prova é ajustada em função das massas fixadas ao braço de alavanca (20 N à 250 N). No

modelo da figura 20a a duração do ensaio deve ser cronometrada (10 minutos para procedimento B da norma). No modelo da figura 20b é permitido o ajuste do número de revoluções (período de ensaio) e também o valor da frequência rotacional da roda. A figura 21 ilustra modelos comerciais instrumentados.

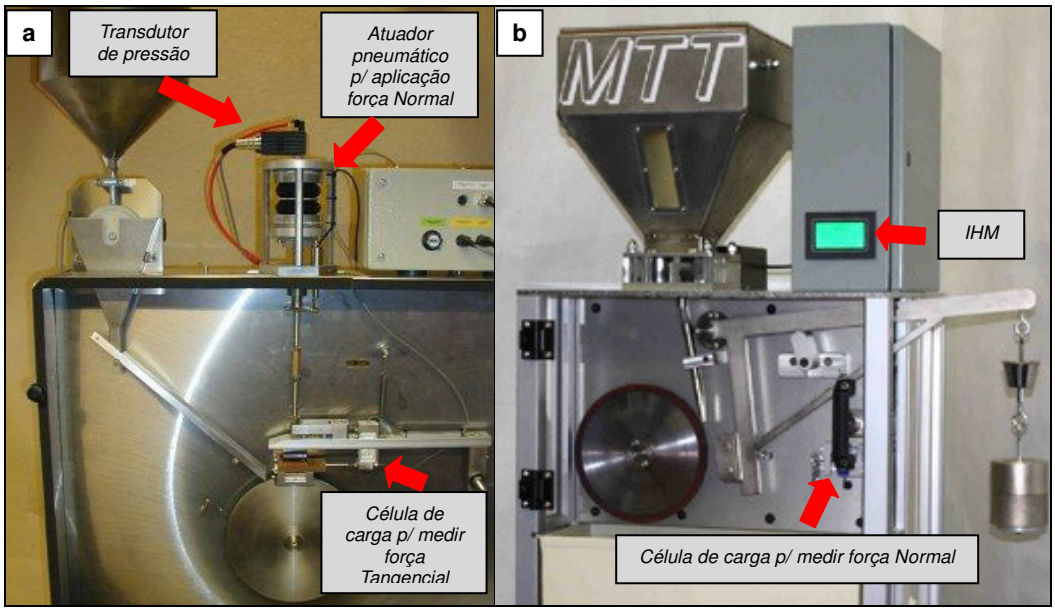


FIGURA 21 - Abrasômetros instrumentados disponíveis no mercado.
a) Fabricante Phoenix Tribology (www.phoenix-tribology.com);
b) fabricante MTT (www.mttusa.net).

A tabela 4 apresenta um comparativo de parâmetros de dois modelos de abrasômetros mostrados na figura 21.

TABELA 4 - comparativo entre abrasômetros instrumentados

Parâmetros	***Abrasômetro Phoenix***	***Abrasômetro MTT***
Força normal	*Ajuste via software (atuador pneumático e transdutor de força), entre 20 à 250 N.*	*Ajuste através de massas no braço de alavanca, entre 40 e 135 N.*
Força tangencial e coeficiente de atrito	*Leitura e registro através de software.*	*Não faz leitura.*
Roda de borracha	*Ajuste de frequência rotacional e número de revoluções via software (inversor de frequência incorporado).*	*Ajuste de frequência rotacional e número de revoluções via IHM (inversor de frequência incorporado).*
Norma atendida	*ASTM G65, ASTM G105*	*ASTM G65*
Ajuste parâmetros e supervisão.	*PC com sistema supervisório COMPEND 2000.*	*Interface Homem Máquina*

Destaca-se que alguns laboratórios de empresas que atuam em áreas ligadas à Tribologia desenvolvem seus próprios abrasômetros. Isso ocorre também em laboratórios de Tribologia ligados às universidades. Dallmann (2012) relata em sua dissertação de mestrado, o projeto e construção de um abrasômetro instrumentado, para o laboratório de Tribologia do departamento de Engenharia Mecânica da UDESC, campus Joinville. Neste trabalho, a força normal aplicada ao corpo de prova origina de um atuador pneumático, porém com ajuste manual. Uma célula de carga instalada na máquina permite a visualização desta força em um mostrador digital. A figura 22 mostra detalhes da máquina desenvolvida por Dallmann.

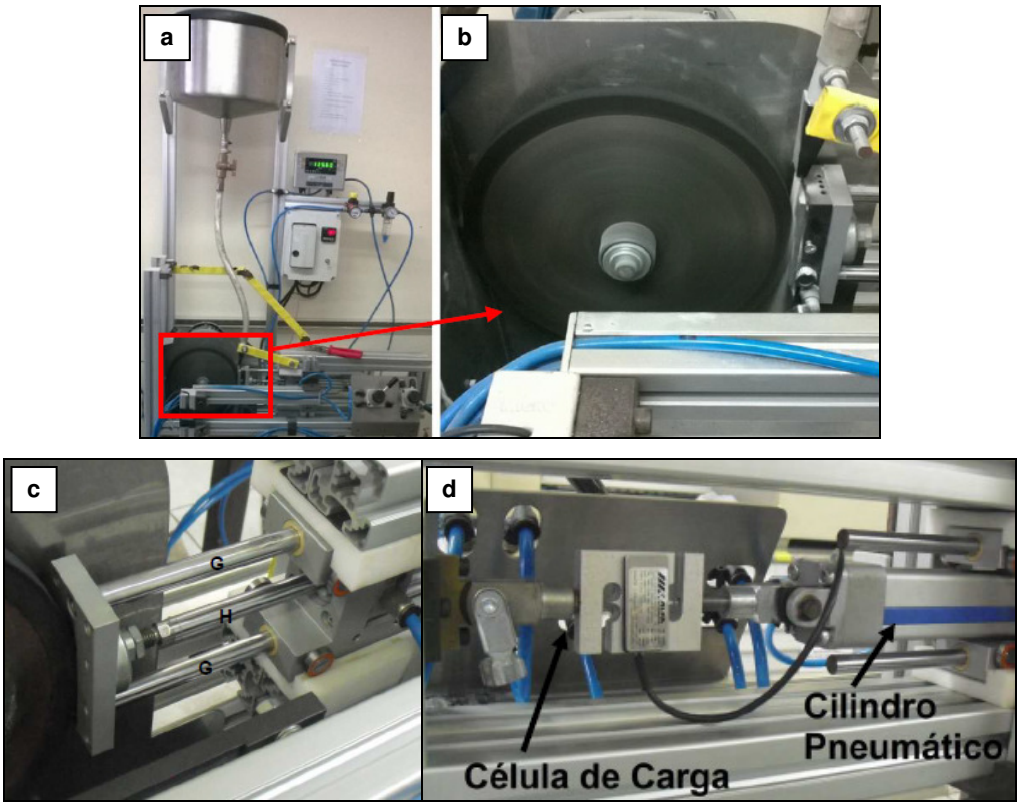


FIGURA 22 - Abrasômetro instrumentado.
a) Vista geral; b) ensaio em andamento;
c) suporte corpo de prova; d) instalação cilindro e célula de carga.
(DALMANN, 2012)

Outro projeto de abrasômetro instrumentado foi desenvolvido por Villabón (2006), no LFS - Laboratório de Fenômenos de Superfície, departamento de Engenharia Mecânica da USP - Universidade de São Paulo. Conforme relata Villabón em sua dissertação de mestrado, o objetivo era “construir um dispositivo instrumentado capaz de controlar a carga normal e monitorar as cargas normal e tangencial, velocidade de rotação da roda e temperatura da amostra”. O projeto

apresentado permitia que o ensaio fosse realizado na forma mecanizada ou instrumentada. Na figura 23 temos o abrasômetro desenvolvido no LFS.

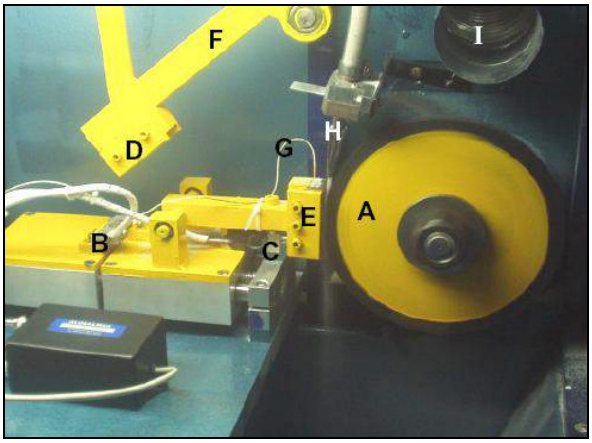


FIGURA 23 - Abrasômetro mecanizado e instrumentado do LFS-USP (VILLABÓN, 2006).

As letras A, B, C, etc., indicadas na Figura 23, representam: roda de borracha (A), células de carga normal (B) e tangencial (C), porta amostras do sistema mecanizado (D) e instrumentado (E), braço de alavanca (F), termopar (G), bico alimentador (H) e exaustor de poeira (I). Complementa ainda o autor:

> [...] sobre a estrutura anteriormente descrita e sem realizar modificação alguma foi acoplado o sistema instrumentado, o qual foi equipado com um sistema para variação das rotações da roda de borracha mediante o uso de um inversor de frequência comandado por uma unidade de controle, computador e dispositivos periféricos; um sistema de conta giros equipado com pinhão coleta os valores de velocidade rotacional. Para a aplicação, controle e coleta de dados de cargas e temperatura foram usadas duas células de carga, um termopar e uma unidade de aquisição e controle, que funciona com linguagem de programação para Windows 98. Paralelamente, foi desenvolvido um sistema de extração de poeira e insuflamento de ar que proporciona conforto e segurança à saúde devido à presença do pó gerado durante o processo de desgaste.

Neste projeto, a força normal sobre o corpo de prova se dá mediante o deslocamento de uma mesa sobre guias com perfil redondo, acoplada a um fuso de esferas acionado por servo motor.

3 CONCEITO DO PROJETO DE AUTOMAÇÃO DE UM ABRASÔMETRO

O abrasômetro original pertencente ao LDS Faculdade SATC foi projetado e construído por alunos do curso de Tecnologia em Manutenção Industrial da Faculdade SATC, Evaldo José Biz e Ivan Damiani, com a proposta de ser um trabalho de conclusão de curso, com orientação dos professores Fernando Michelon Marques e Rodrigo Costa. Os recursos para financiamento do projeto partiram da própria instituição, com apoio da empresa AMD Máquinas e Equipamentos, sendo finalizado em fevereiro de 2016, com valor estimado de R$ 5.869,00 (BIZ, 2016).

3.1 Descrição do sistema de ensaio original

Na figura 24 é apresentado o abrasômetro construído segundo as orientações da norma *ASTM G65-00*.

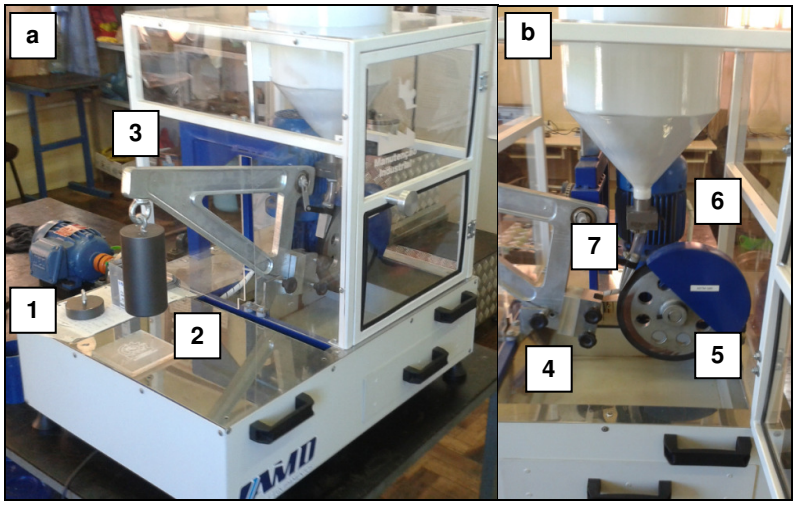


FIGURA 24 - Abrasômetro mecanizado do LDS Faculdade SATC.
a) Vista geral; b) vista lateral.

Toda a estrutura da máquina, de 810 mm x 650 mm x 950 mm, foi construída com aço *SAE* 1020, recebendo pintura eletrostática. O eixo de articulação do braço de alavanca (3), o eixo da roda de borracha (5) e o bico de alimentação (7), foram confeccionados utilizando aço *SAE* 1045. Foram utilizadas, chapas de acrílico transparente de espessura 5 mm para enclausurar a parte móvel da máquina (por questões de segurança) e conter a poeira (por ser insalubre) durante os ensaios. Para que a força normal aplicada ao corpo de prova colocado no suporte (4) atenda

aos requisitos da norma de referência, foram confeccionados dois blocos padrão para serem fixados ao braço de alavanca. O bloco n° 1 (1) de massa 0,76 kg objetiva aplicar uma força ao corpo de prova de 45 N (procedimento D) e o bloco n° 2 (2) de massa 5 kg por sua vez, objetiva aplicar uma força de 130 N (procedimentos A, B, C, E). A roda de borracha é acionada através do conjunto motor elétrico trifásico e redutor mecânico (6). Para que a rotação da roda de borracha seja de acordo com o valor especificado na norma, o motor elétrico é comandado por um inversor de frequência. Esta máquina de ensaio, embora funcional, apresenta algumas limitações:

- o ajuste da força normal com valores diferentes de 45 N ou 130 N exige blocos de massa de valores diversos;
- a duração do ensaio é cronometrada, ao contrário do que recomenda a norma, que deve ser em função do número de revoluções da roda;
- o acesso é livre à parte girante da máquina quando em funcionamento, podendo causar acidentes;
- a instalação elétrica é precária, falta de botão para parada em situação de emergência ou bloqueio durante *setup* da máquina;
- o sistema não apresenta instrumentação, impossibilitando a medição de variáveis, como força tangencial e coeficiente de atrito;
- não há software de controle e supervisão, portanto os dados dos ensaios não são registrados, etc.

Todos estes fatores limitam a operação da máquina e trazem fontes de incerteza, colocando em dúvida a confiabilidade dos resultados dos ensaios realizados. Desta forma, o objetivo da dissertação é o de realizar a automação da máquina e aquisição de dados durante a experimentação, como também permitir às empresas da região (polo metalúrgico e mecânico) uma nova alternativa de ensaio.

3.2 Descrição do sistema de ensaio proposto

Castro (2015), ao desenvolver o tribômetro ‘Pino Sobre Disco’ para o LDS Faculdade SATC, utilizou uma metodologia de desenvolvimento de produtos

mecatrônicos, que também foi seguida no decorrer deste trabalho. A metodologia é apresentada na figura 25.

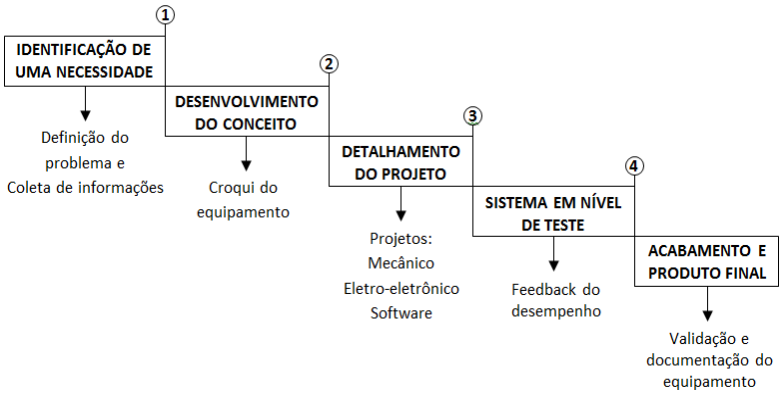


FIGURA 25 - Metodologia adotada neste trabalho (CASTRO, 2015).

No início do projeto, uma vez caracterizada a necessidade, foi realizada uma pesquisa por máquinas de ensaio de desgaste por abrasão, suas características e funcionalidades, conforme abordado no item 2.5. Cabe ressaltar que nas pesquisas não foi encontrado nenhum fabricante nacional de abrasômetros, somente equipamentos importados, fator que contribui para elevar o custo final do equipamento. Com as limitações do sistema atual, foi desenvolvido um novo conceito para o abrasômetro (estrutural e de funcionamento). Na etapa de projeto foi realizado o dimensionamento de componentes (critérios técnicos, de segurança, operacionais) e a montagem eletromecânica. Testes de funcionamento se seguiram (validação operacional e metrológica).

Após análises técnicas e de custo-benefício das soluções avaliadas, chegou-se a uma nova concepção para o abrasômetro, conforme apresentado esquematicamente pela figura 26. Percebe-se, pela descrição funcional desta concepção, que o abrasômetro terá dois modos de funcionamento: mecanizado e instrumentado, selecionados pelo usuário. Considerou-se importante manter o sistema de ensaio mecanizado, possibilitando que resultados obtidos por métodos diferentes sejam comparados. No modo mecanizado, a operação da máquina não irá mudar em relação ao sistema original (totalmente manual e sem sistema supervisório), necessitando somente a fixação do braço de alavanca a estrutura da máquina. No modo de funcionamento instrumentado, a força normal aplicada ao corpo de prova é obtida através de um mecanismo (eletromecânico), com intensidade ajustada através do sistema supervisório. Sensores fazem a leitura de

algumas variáveis inerentes ao ensaio, como a força tangencial, permitindo que seja então calculado o valor do coeficiente de atrito. Também será possível a operação manual no modo instrumentado, além do registro de dados.

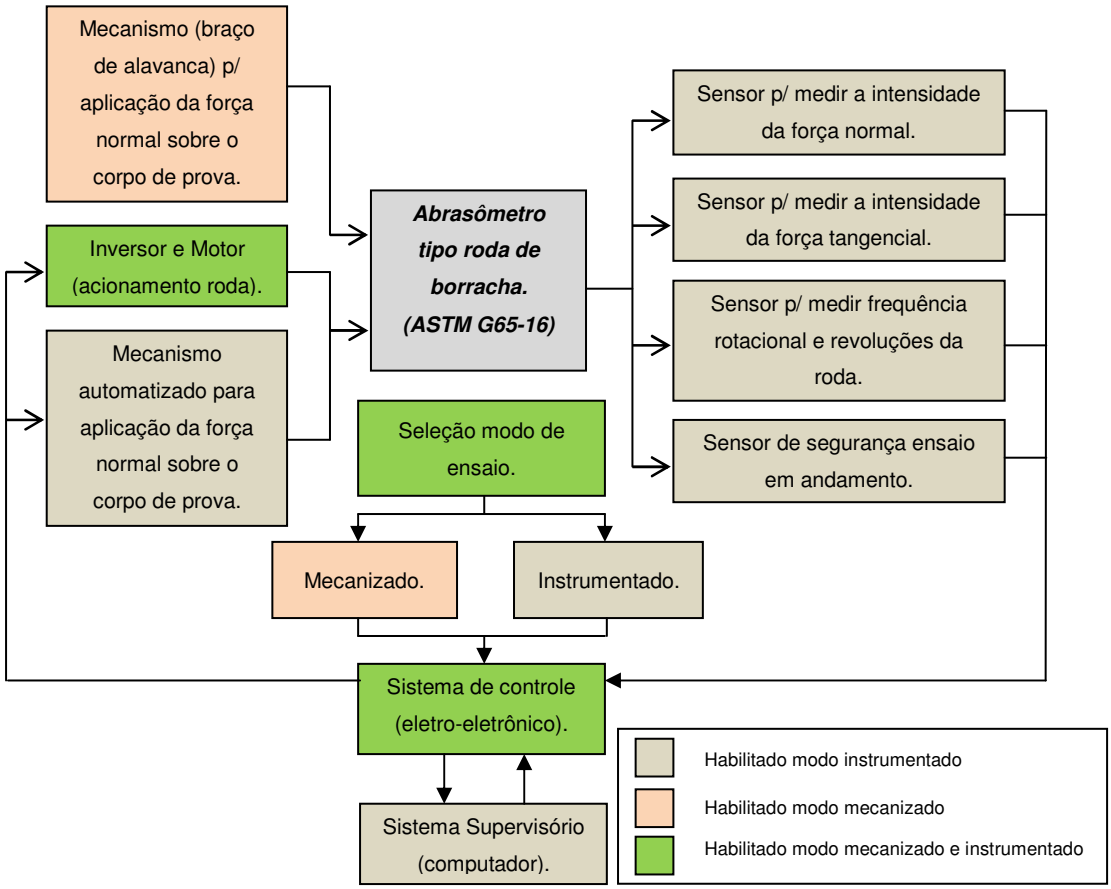


FIGURA 26 - Nova concepção do abrasômetro (desenvolvido pelo autor, 2016).

A tabela 5 faz um comparativo entre as características do sistema mecanizado e instrumentado.

TABELA 5 - comparativo entre sistema mecanizado e instrumentado

Parâmetros	***Abrasômetro mecanizado***	***Abrasômetro instrumentado***
Força normal	*Ajuste via seleção de blocos de massa no braço de alavanca, 45 ou 130 N.*	*Ajuste através de dispositivo eletromecânico, entre 20 e 200 N.*
Força tangencial e coeficiente de atrito	*Não faz leitura.*	*Leitura e registro através de supervisório.*
Roda de borracha	*Ajuste de frequência rotacional na IHM do inversor. Ensaio cronometrado.*	*Ajuste de frequência rotacional e revoluções no supervisório. Ensaio por deslocamento.*
Norma atendida	*ASTM G65-16*	*ASTM G65-16 com possibilidade de mudança de variáveis de ensaio.*
Ajuste parâmetros e supervisão	*Não é possível.*	*PC com sistema supervisório.*

3.3 Avaliação e seleção da tecnologia de carregamento

Neste item, serão relatados os critérios adotados para seleção da tecnologia (mecanismo) responsável em aplicar a força normal ao corpo de prova. Esta seleção é importante e feita primeiramente, pois todas as outras partes do projeto (elétrico, controle, supervisão, sensores) dependem da solução adotada nesta etapa.

O problema de controle de força é significativamente mais difícil do que o problema de controle de posição, tornando complicada sua implementação na prática (Pérez, 2012). Martins (2013), ao desenvolver um tribômetro, pesquisou diferentes tecnologias para sua máquina, conforme tabela 6.

TABELA 6 - comparativo entre tecnologias (MARTINS, 2013)

Meios de acionamento	***Relevâncias***	***Limitações***
Pneumático	*Robustez dos componentes; boa confiabilidade; fluido de trabalho não poluente; fácil manutenção.*	*Baixa precisão; dificuldade de manter velocidades uniformes e constantes; dificuldade de trabalhar com velocidades baixas; necessita de uma instalação de ar comprimido no laboratório.*
Óleo-hidráulico	*Força de trabalho elevada; robustez dos componentes; boa fiabilidade; boa precisão; estabilidade (velocidades uniformes e baixas); permite operações suaves.*	*Custo médio/ alto de implementação; fluido de trabalho poluente; fluido de trabalho inflamável; manutenção cara; necessidade de mais espaço para a sua implementação.*
Fuso e um motor de passo	*Custo médio de implementação; boa/excelente precisão; estabilidade (velocidades uniformes e baixas); permite operações suaves; sistema compacto.*	*Força de trabalho baixa e sistema sujeito a maiores folgas mecânicas devido ao sistema de fusos.*
Implementação por pesos de forma direta ou indireta	*Baixo custo e simplicidade do sistema.*	*Falta de precisão; necessita de interação do utilizador (a implementação dos pesos é manual, elevando o risco de erro humano).*

Baseado nos critérios da tabela 6, nas pesquisas por abrasômetros descritas no item 2.5, e nas condições atuais do abrasômetro do LDS Faculdade SATC, optou-se por adotar uma solução semelhante à apresentada por Villabón em 2006, porém com algumas modificações.

A força normal será aplicada por uma mesa horizontal (movida) que se desloca livre sobre guias lineares. Uma segunda mesa (motora) está conectada a um fuso de esferas que gira em função do acionamento de um motor elétrico. Entre as mesas movida e motora, será instalada uma célula de carga para medir a força

normal aplicada. A força tangencial será medida pela célula de carga que deve estar posicionada embaixo do suporte de fixação do corpo de prova.

Para que seja possível executar a medição e o controle do número de revoluções da roda de borracha, decidiu-se utilizar um encoder incremental conectado ao eixo da mesma.

Após esta primeira decisão, iniciou-se a fase de estudos sobre a adaptação de novos acessórios no abrasômetro, porém para que se pudesse adaptar da melhor forma os novos acessórios, porém sem interferir no sistema mecanizado. A figura 27 apresenta o princípio de solução ilustra as soluções idealizadas.

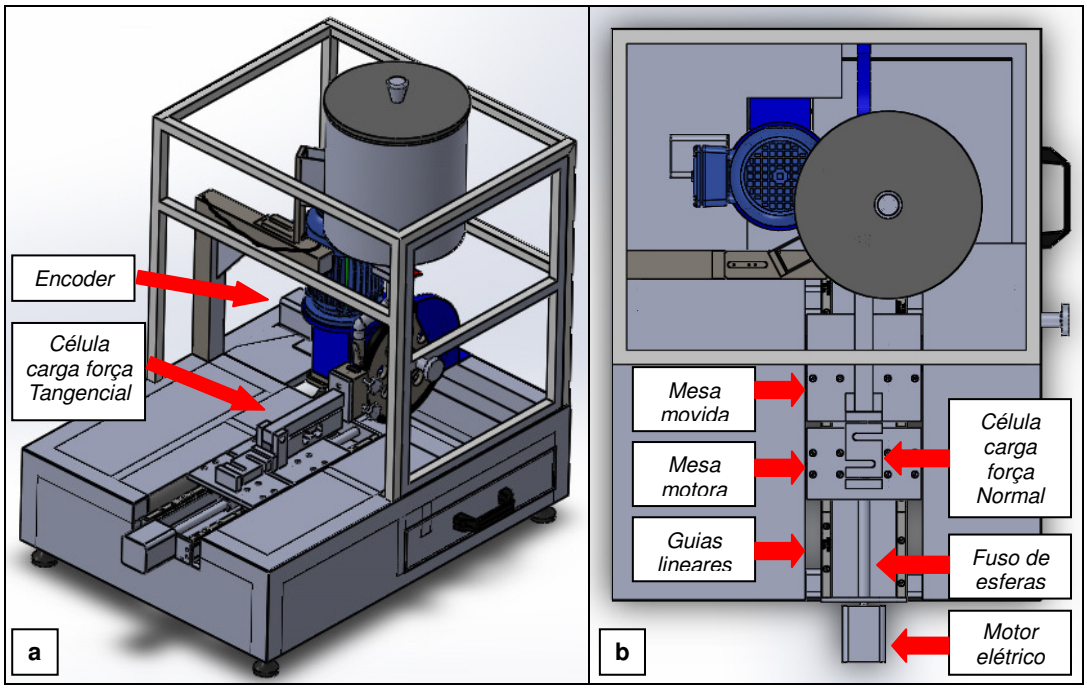


FIGURA 27 - Mecanismo adaptado ao projeto original (desenvolvido pelo autor, 2016). a) vista lateral direita; b) vista superior.

4 DESENVOLVIMENTO E INTEGRAÇÃO MECATRÔNICA DO SISTEMA

Uma vez definidas as concepções de projeto do abrasômetro foram estipuladas diversas etapas: seleção de equipamentos, projeto e construção de peças, montagens elétricas e mecânicas, adaptações à estrutura original, desenvolvimento de software, programação de *drivers*, etc., que serão descritos neste capítulo. As modificações foram divididas em duas partes: *i)* mesa horizontal e *ii)* roda de borracha.

4.1 Definição dos sensores e atuadores

Neste tópico, são definidos os principais critérios de seleção dos sensores e atuadores, ou seja, suas dimensões, forma de fixação na estrutura, características elétricas, etc.

4.1.1 Mesa horizontal

O acionamento da mesa, conforme descrito no item 3.2, será feito por motor elétrico, sendo consideradas duas alternativas: motor de passo ou servomotor. Estes motores têm algumas semelhanças: ambos possuem rotor com imã permanente e estator com bobinas e não apresentam escovas ou comutadores, fato que permite uma longa vida útil. As desvantagens do motor de passo em relação ao servomotor é o fato deste não apresentar sensor de realimentação (resolver ou encoder) e o torque tende a diminuir à medida que a velocidade aumenta. Apresenta, em contrapartida, como vantagem um custo menor (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2014).

Nesta aplicação, mais importante que a velocidade é o torque desenvolvido pelo motor, visto que a velocidade de avanço (início de ensaio) e retorno da mesa (final de ensaio) é feita lentamente, e durante o ensaio a velocidade é muito baixa. Após comparação entre as duas opções, optou-se por motor de passo, trabalhando em conjunto com um *driver* com alta capacidade de corrente de saída (8 A), suficiente para atingir o torque necessário para aplicar a força normal máxima de 200 N, estipulada para o abrasômetro. Também foi adquirida uma fonte eletrônica

com tensão contínua de 75 V para alimentar o *driver*, e deste modo aumentar sua eficiência. A figura 28 apresenta o motor de passo e driver selecionados.

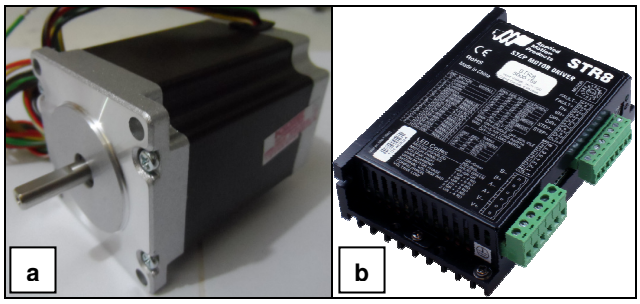


FIGURA 28 - Tecnologia para acionamento da mesa.
a) Motor de passo; b) *driver* STR8.
(www.kalatec.com.br)

As características técnicas do motor de passo e *driver* para acionamento da mesa são mostrados na tabela 7.

TABELA 7 - características do acionamento da mesa horizontal

Item	***Descrição***
Motor passo	*Modelo KTC-HT23-400 - 1,86 Nm - 8 fios* *1,8 ° - 2 A/PH*
Driver	*Modelo STR8 - 24~75 V - 8 A saída* *Ajuste de 200 à 20000 passos*

Para medir a força normal e tangencial, os sensores utilizados são células de carga do tipo resistiva (extensométrica). Em função da posição de cada uma, para a força normal optou-se pelo modelo tipo "S" com capacidade máxima de 50 kgf, do fabricante BTS. Para a força tangencial, selecionou-se o modelo tipo "*single point",* com capacidade máxima de 30 kgf, do fabricante HBM. Para ambos os modelos a sensibilidade é de 2,0 ± 0,2 mV/V.

Considerando um ajuste de força normal F_N máximo de 200 N e um coeficiente de atrito μ estimado de 0,6, pela aplicação da equação [4] determina-se a força tangencial aplicada à roda de borracha:

$$F_T = \mu \times F_N = 0{,}6 \times 200 = 120N \quad [4]$$

onde F_T é a força tangencial à roda de borracha. Logo, as células de carga irão trabalhar em uma faixa bem inferior ao seu limite máximo. Como estes sensores

apresentam uma resposta linear em toda sua faixa de atuação (FRANCHI, 2015), este critério foi adotado para garantir a integridade dos sensores. Para a mesa, também foram especificados sensores de fim de curso para as posições “atrás” e “frente”. Com a estrutura da mesa é de metal, optou-se por sensores do tipo indutivo, fabricados pela WEG, 24 V, saída tipo PNP/NA, com capacidade de detecção de 8 mm. A figura 29 apresenta os sensores selecionados para a mesa.

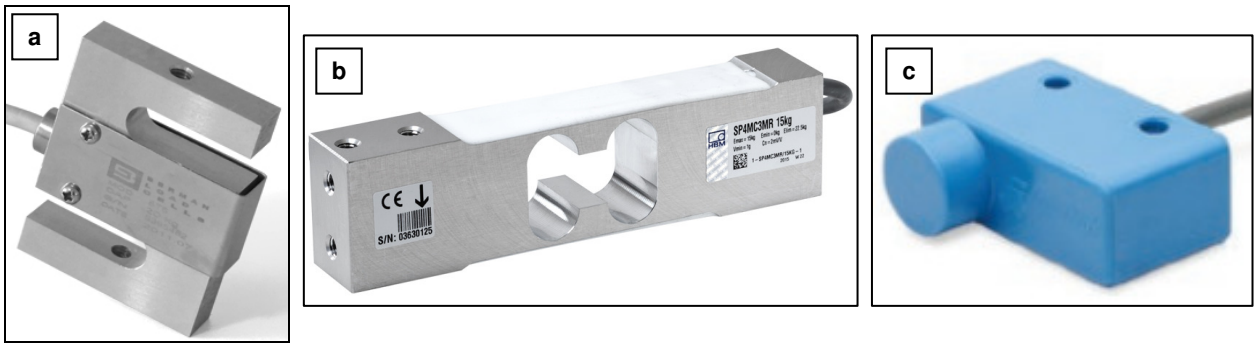


FIGURA 29 - Sensores selecionados para a mesa.
a) Célula tipo S de 50 kg (http://www.weightech.com.br);
b) célula tipo *single point* 30 kg (www.hbm.com/pt); c) sensor indutivo PNP (www.weg.net).

4.1.2 Roda de borracha

O abrasômetro original (mecanizado) foi projetado para operar com força normal máxima de 130 N. Com a instrumentação, esta força normal poderá ser ajustada para até 200 N. Desta forma, fez-se necessário um estudo para verificar se o motor elétrico e redutor instalados na máquina atendem às novas condições de operação. As características técnicas deste conjunto são mostradas na tabela 8.

TABELA 8 - descrição do acionamento da roda de borracha

Item	***Descrição***
Motor elétrico	*Trifásico - 3/4 cv - 220/380 V - 2,9/1,7 A* *1680 rpm - 60 Hz - 0,32 kgf.m*
Redutor	*Coroa e rosca sem fim - i: 10 - η: 85 %* *1,25 cv - 5,56 kgf.m - 1720 rpm*

O roteiro de cálculo apresentado na sequência teve como referência o Guia de Aplicação de Inversores de Frequência (WEG, 2005).

O torque T_{roda} necessário para girar a roda nestas condições é calculado pela equação 5:

$$T_{roda} = F_T \times r = 120N \times 0{,}114m = 13{,}68Nm \quad [5]$$

Como este torque da roda é o torque de saída do redutor, pode-se calcular o torque de entrada do redutor, pela equação 6:

$$T_{entrada.redutor} = \frac{T_{RODA}}{(i \times \eta)} = \frac{13{,}68Nm}{(10 \times 0{,}85)} = 1{,}6Nm \quad [6]$$

Este será o torque exigido do motor. Como o motor está sendo acionado por conversor de frequência, para que se tenha 200 rpm na roda, o motor deve ter sua rotação aumentada para 2000 rpm, ou seja, deve operar com uma frequência f_{ajuste} que pode ser calculada pela equação 7:

$$f_{ajuste} = \frac{rpm_{desejado} \times f_{no\,\min al}}{rpm_{no\,\min al}} = \frac{2000 \times 60Hz}{1680} = 71{,}4Hz \quad [7]$$

Como a frequência de trabalho do motor é maior que 60 Hz (região de enfraquecimento de campo), o torque máximo que poderá ser desenvolvido pelo motor $T_{motor.maximo}$ será menor que o informado pelo fabricante $T_{nominal}$, e pode ser calculado pela equação 8:

$$T_{motor.\max imo} = T_{no\,\min al} \times \frac{f_{no\,\min al}}{f_{ajuste}} = 3{,}13Nm \times \frac{60Hz}{71{,}4Hz} = 2{,}63Nm \quad [8]$$

Com isso, $T_{entrada.redutor} < T_{motor.maximo}$, e assim o conjunto motor e redutor já instalados na máquina atendem às novas condições de operação.

Em relação ao inversor de frequência utilizado, modelo CFW701 do fabricante WEG, optou-se por substituir este inversor pelo modelo CFW700, tensão de alimentação alternada de 220 V, e frequência de 0 a 300 Hz, com corrente de saída máxima de 7 A, compatível com o motor utilizado. Esta troca é justificada em função deste conversor apresentar na sua configuração de hardware entradas digitais para receber sinais de um encoder incremental, sendo este o sensor escolhido para ser utilizado acoplado à roda de borracha. Após consulta ao manual técnico do

conversor, foi especificado um encoder incremental de 1024 pulsos por revolução, canais A, A/, B, B/, O, O/, saída tipo NPN de 5 V, frequência máxima de 130 kHz, do fabricante Hohner. A figura 30 apresenta o encoder adquirido e o inversor utilizado.

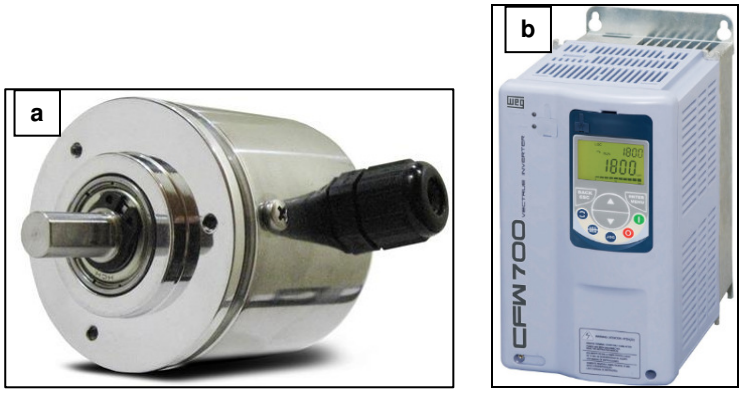


FIGURA 30 - Tecnologia utilizada para a roda de borracha.
a) Encoder incremental (www.hohner.com.br); b) conversor de frequência (www.weg.net).

4.2 Estrutura mecânica

Finalizada a etapa de dimensionamento e seleção dos sensores e atuadores, deu-se início as modificações na estrutura mecânica, descritos neste tópico. Para seleção de peças, componentes, material, espessura de chapas, etc., foi adotado como critério principal a disponibilidade comercial (material padronizado), consequentemente com menor custo.

4.2.1 Mesa horizontal

Para o acionamento da mesa foi especificado um fuso de esferas e, como mancal, foi especificada uma guia linear com patins. Estes componentes estão representados na figura 31, e a tabela 9 traz a relação dos mesmos.

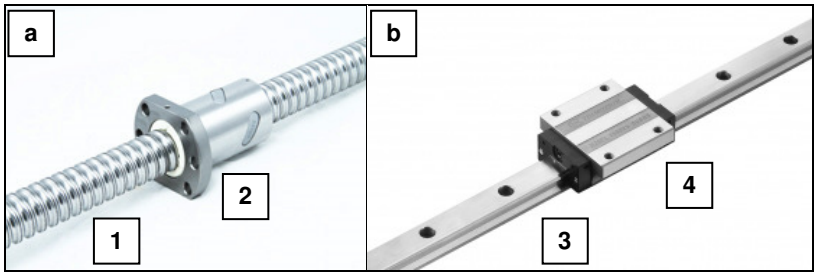


FIGURA 31 - Peças comerciais adquiridas para construção da mesa.
a) Fuso e castanha; b) guia linear e patim (www.kalatec.com.br).

TABELA 9 - descrição das peças da mesa

Item	*Descrição*
1	*Fuso de esferas laminado, diâmetro externo 16 mm, passo 5 mm, classe precisão C7 (1 x 500 mm) Kalatec*
2	*Castanha de esferas recirculantes modelo SFUR1605 (1 unidade) Kalatec*
3	*Guia linear modelo TRH15 (2 x 500 mm) Kalatec*
4	*Patim com aba modelo TRH15FL (4 unidades) Kalatec*

A escolha do fuso de esferas (1) é justificada por este ser um atuador linear mecânico com baixo atrito e alta capacidade de redução do movimento (CUNHA, 2013). O fuso desloca a castanha (2) com função de porca, onde será fixada a mesa motora. As mesas motora e movida serão apoiadas em dois patins (4) cada, deslizando sobre as guias lineares (3), que “[...] proporcionam movimentação suave, com baixo atrito e alta rigidez” (ALMEIDA, 2014).

As demais partes do sistema mecânico foram fabricadas para se acoplar aos componentes adquiridos. Para apoiar o fuso de esferas, em cada extremidade foram confeccionados mancais de alumínio, utilizando-se rolamentos do modelo SKF6000. A figura 32 apresenta algumas etapas de montagem da mesa.

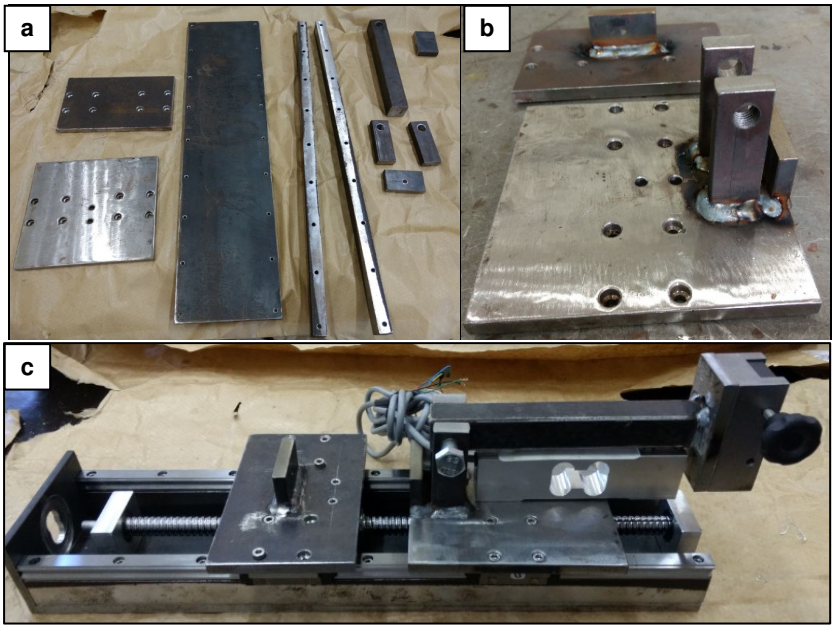


FIGURA 32 - Etapas da montagem da mesa.
a) Peças fabricadas; b) união de peças; c) mesa pré-montada.

Na sequência, a estrutura da máquina foi cortada, para que a mesa fosse adaptada. Foram soldados tubos de perfil quadrado de 40 x 40 mm, para apoio da

mesa, com fixação através de parafusos. Foram instalados todos os sensores, células de carga e motor de passo. Entre o motor e o fuso, foi utilizado um acoplamento para compensar possíveis desalinhamentos e reduzir a transmissão de vibrações mecânicas. A figura 33 apresenta a adaptação da mesa à estrutura do abrasômetro.

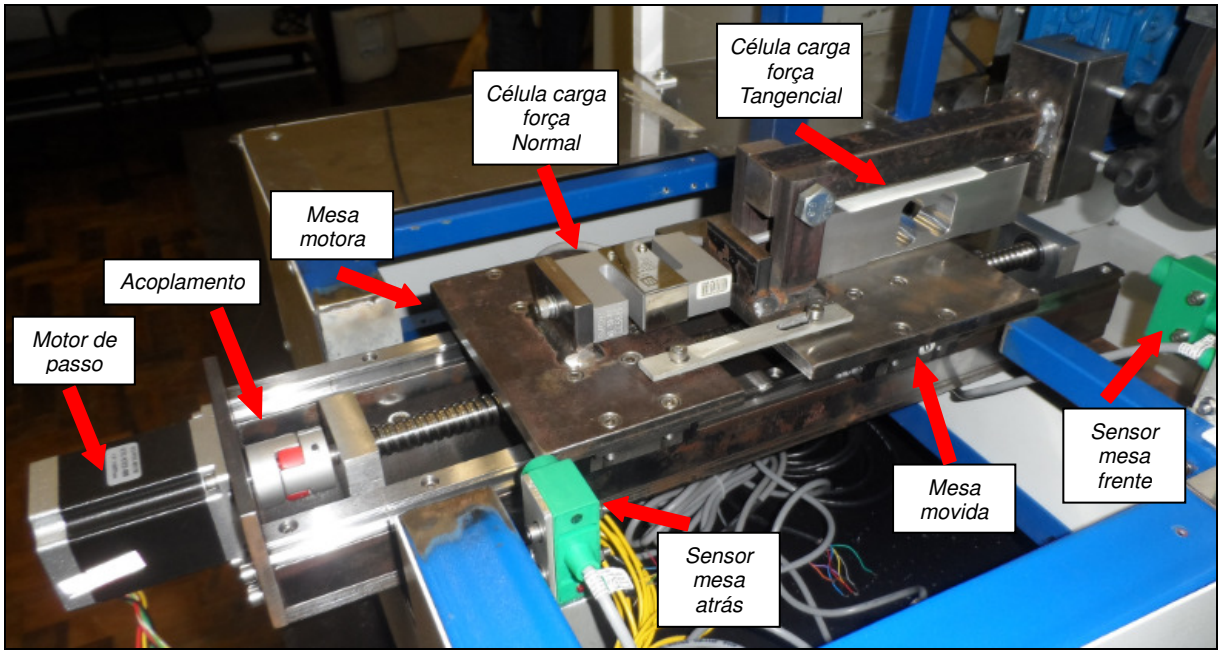


FIGURA 33 - Mesa horizontal fixada à estrutura do abrasômetro.

O roteiro de cálculo utilizado para selecionar os componentes é apresentado a seguir e teve como referência manuais técnicos de fabricantes OBR e THOMSONLINEAR.

1 °condição: cálculo do diâmetro interno D_r mínimo para o fuso de esferas:

$$D_r = \frac{(n_T \times L^2)}{Cs} \times 10^{-8} = \frac{[30rpm \times (428{,}4mm)^2]}{1} \times 10^{-8} = 0{,}055mm \quad [9]$$

onde:

n_T - rotação de trabalho do fuso (durante o avanço e retorno da mesa);
C_S - fator que depende do tipo de mancalização (anexo A);
L - distância entre mancais.

Como o fuso adquirido tem diâmetro interno de 13,5 mm, esta condição está atendida.

2 °condição: cálculo da rotação máxima n_M permitida para o fuso de esferas:

$$n_M = C_S \times S_S \times 10^8 \times \frac{D_r}{L^2} = 1 \times 0{,}8 \times 10^8 \times \frac{13{,}5mm}{(428{,}4mm)^2} = 5884rpm \quad [10]$$

onde:

S_S - fator de segurança (0,8 máximo);
L - distância entre mancais.

Como neste projeto o fuso trabalha com rotação máxima de 30 rpm (etapa de avanço e retorno da mesa), esta condição está atendida.

3 °condição: cálculo da carga dinâmica C_a que atua sobre a castanha:

$$C_a = (60 \times n_T \times V_h)^{\frac{1}{3}} \times F_a \times S_O \times 10^{-2}$$
$$C_a = (60 \times 30rpm \times 15000h)^{\frac{1}{3}} \times 21{,}1kgf \times 1{,}2 \times 10^{-2} = 76kgf \quad [11]$$

onde:

V_h - vida útil média (anexo B);
F_a - força axial;
S_O - fator de operação (anexo C).

Como a carga dinâmica suportada pela castanha é de 1380 kgf, esta condição está atendida. A força axial F_a pode ser calculada através da equação 12:

$$F_a = F_N + (\mu_G \times m_T \times g) = 200N + (0{,}1 \times 7{,}13kg \times 9{,}81m/s^2) = 207N = 21{,}1kgf \quad [12]$$

onde:

F_N - força normal máxima no modo instrumentado;
μ_G - coeficiente de atrito superfície da guia linear (dado de fabricante);
m_T - massa total (mesa motora + mesa movida + massa dos patins);
g – aceleração da gravidade.

4 °condição: cálculo do torque do motor (T_{motor}):

$$T_{motor} = \frac{F_a \times p}{2000 \times \pi \times \eta} = \frac{207N \times 5mm}{2000 \times \pi \times 0{,}9} = 0{,}18Nm \quad [13]$$

onde:

p - passo do fuso;
η - rendimento do fuso de esferas.

Como o motor de passo utilizado tem um torque nominal de 1,86 Nm esta condição está atendida.

4.2.2 Roda de borracha

Embora o conjunto motor-redutor não seja alterado, algumas modificações foram realizadas nesta parte da máquina. Para a utilização do encoder, um suporte foi fabricado, além de ser necessário desenhar e fabricar um novo eixo de aço *SAE* 1045 para a roda de borracha. Entre o eixo da roda e o eixo do encoder, foi utilizado um acoplamento elástico.

Também foram fabricadas duas rodas de aço *SAE* 1020 com revestimento de borracha (Neoprene) para os testes do abrasômetro, conforme requisitos da norma *ASTM G65-16*. A figura 34 apresenta as modificações feitas na roda de borracha.

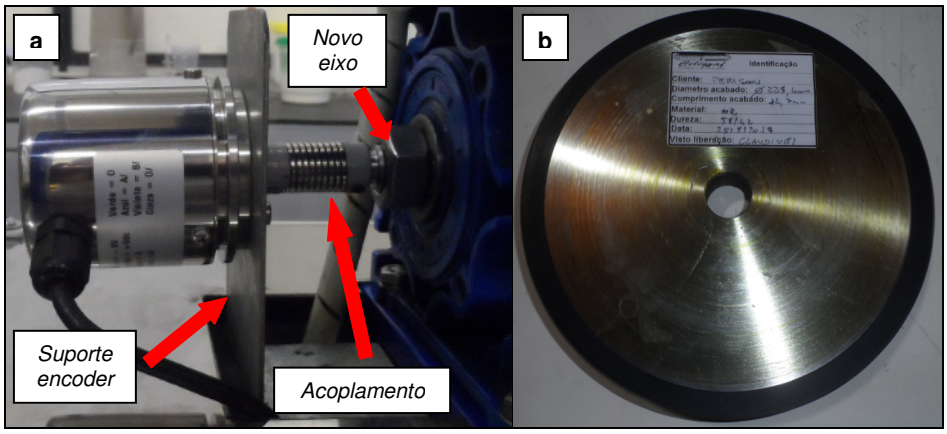


FIGURA 34 - Alterações na roda de borracha.
a) Fixação do encoder a estrutura; b) nova roda de borracha.

4.3 Sistema eletroeletrônico

Neste tópico, será apresentada a tecnologia utilizada para controlar o funcionamento do abrasômetro, a instalação elétrica, os problemas detectados e como foram resolvidos. As soluções adotadas foram baseadas em critérios como: confiabilidade, segurança, custo, disponibilidade do equipamento, características técnicas e modo de programação.

4.3.1 Seleção do controlador

Para que a automação de uma máquina ou processo seja realizada, uma unidade de controle deve receber através de suas entradas (digitais ou analógicas) as informações (geralmente um sinal elétrico) de diversos sensores. Estas informações serão processadas conforme um código (programa) que está na memória deste controlador. O resultado deste processamento será repassado através das saídas (digitais ou analógicas) do controlador aos atuadores (GROOVER, 2011). Este sistema de controle em malha fechada foi utilizado neste projeto quando o abrasômetro está no modo de funcionamento instrumentado, por proporcionar maior precisão no funcionamento da máquina, apresentar menor dependência do operador, maior repetitividade, etc.

Com base no funcionamento pretendido para o abrasômetro, e análise das características elétricas dos *drivers*, sensores, etc., foi elaborado uma relação das entradas e saídas necessárias ao sistema de controle, representados nas tabelas 10 e 11.

TABELA 10 - entradas para sistema de controle

Entradas		
Sensor/função	***Tipo***	***Nível de tensão do sinal***
Célula de carga força normal	*Analógica*	*0 à 20 mV*
Célula de carga força tangencial	*Analógica*	*0 à 20 mV*
Encoder (frequência rotacional da roda via inversor)	*Analógica*	*0 à 10 V*
Botão seleção abrasômetro mecanizado/instrumentado	*Digital - PNP - NA*	*0 ou 24 V*
Fim curso mesa atrás	*Digital - PNP - NA*	*0 ou 24 V*
Fim de curso mesa frente	*Digital - PNP - NA*	*0 ou 24 V*
Fim curso porta fechada	*Digital - PNP - NA*	*0 ou 24 V*
Encoder (contagem revoluções da roda)	*Digital - PNP - NA*	*0 ou 24 V*
Inversor em falha	*Digital - PNP - NF*	*0 ou 24 V*
Driver motor de passo em falha	*Digital - PNP - NF*	*0 ou 24 V*

TABELA 11 - saídas para sistema de controle

Saídas		
Função	***Tipo***	***Nível de tensão do sinal***
Pulsos clock (STEP) para driver motor de passo	*Digital - NPN - NA*	*0 ou 24 V*
Seleção avanço/retorno (DIR) para driver motor de passo	*Digital - NPN - NA*	*0 V - avanço mesa* *24 V - retorno da mesa*
Liga/desliga roda de borracha (inversor)	*Digital - NPN - NA*	*0 V - liga roda* *24 V - desliga roda*
Referência de velocidade para roda de borracha (inversor)	*Analógica*	*0 à 10 V*

A seleção da tecnologia do controlador depende de alguns critérios técnicos: números de pontos de entrada/saída digitais, número de pontos de entradas/saída analógicos e sua resolução, capacidade de memória, portas de comunicação e protocolos permitidos, linguagem de programação utilizada, compatibilidade elétrica com periféricos, etc (FRANCHI, 2011). Durante o desenvolvimento deste projeto,

algumas alternativas para o sistema de controle do abrasômetro foram pesquisadas, sendo suas características apresentadas pela tabela 12.

TABELA 12 - comparativo entre sistemas de controle

Tecnologia	*Relevâncias*	*Limitações*
CLP – controlador lógico programável (Delta)	*Custo médio, software de programação gratuito, compatibilidade elétrica com sensores e drivers industriais, protocolos de comunicação.*	*Necessidade de placas de expansão, tecnologia fechada.*
Controlador tipo "Arduíno"	*Custo baixo, software de programação gratuito, plataforma open-source.*	*Nível de tensão de E/S baixo (5 V), necessidade de placas para interface com drivers industriais.*
Placa de aquisição de dados e PC (National Instruments)	*Confiabilidade, programação em linguagem de blocos, software único para supervisão e controle.*	*Custo alto, necessidade de aquisição software de programação, nível de tensão de E/S baixo (5 V).*

Optou-se por utilizar um CLP do fabricante Delta, principalmente pelo critério da compatibilidade elétrica (níveis de tensão) com os sensores e *drivers* e apresentar porta de comunicação e protocolo compatíveis com o sistema de supervisão. A figura 35 apresenta o CLP escolhido.

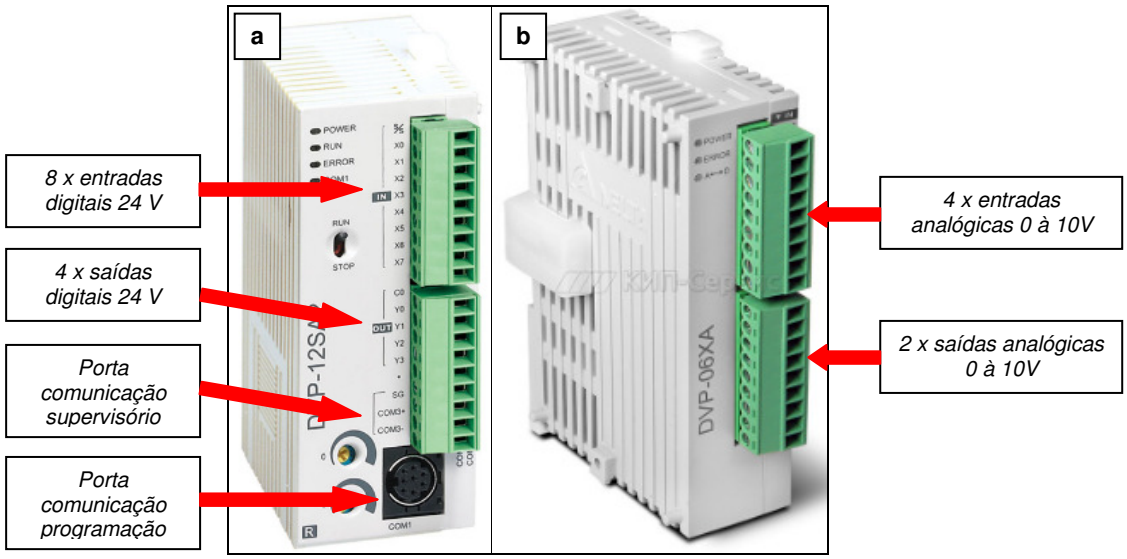


FIGURA 35 - Tecnologia escolhida para o sistema de controle.
a) CLP; b) expansão analógica (https://delta-ia-tips.com/).

Este CLP, modelo DVP-12SA2, atende à relação e às características das entradas e saídas apresentadas nas tabelas 10 e 11. Como este modelo é modular,

também foi adquirido um bloco de expansão de entradas e saídas analógicos DVP-06XA e uma fonte 220 V/24 V - 2 A, para alimentar os sensores da máquina.

Cabe ressaltar que com o modelo de CLP adquirido, ficarão disponíveis uma entrada digital e uma saída digital, além de uma entrada analógica e uma saída analógica, que poderão ser utilizadas para futuras modificações no funcionamento do abrasômetro.

4.3.2 Instalação elétrica

Para a montagem do quadro de comando do abrasômetro, inicialmente foi elaborado um diagrama elétrico representando toda interligação e conexão entre os diversos dispositivos (sensores, controle, atuadores, *drivers*, etc.). Foi determinada a seção dos condutores e os dispositivos de seccionamento e proteção, tendo como base os requisitos da norma ABNT NBR5410 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão. O quadro adquirido tem dimensões de 500 mm x 600 mm x 250 mm. Os cabos de força e alimentação dos *drivers* foram organizados em canaletas elétricas distintas dos cabos de sinal, para evitar a possibilidade de interferência eletromagnética.

Como relatado nos tópicos anteriores, a seleção dos diversos equipamentos elétricos foi baseada principalmente na compatibilidade elétrica (nível de tensão), facilitando o projeto e a instalação elétrica do quadro de comando. Porém, alguns problemas foram encontrados, sendo a solução descrita na sequência deste trabalho.

I. *Células de carga*: para que o sinal das células de carga (0 à 20 mV) fosse disponibilizado para as entradas analógicas do CLP (0 à 10 V), foram adquiridos dois conversores de sinal (amplificadores) modelo TCA500 do fabricante Tecnatron. Cada entrada analógica do CLP apresenta um conversor A/D que irá converter o sinal elétrico analógico para uma informação digitalizada que assume valores de 0 a 2000. Assim, a resolução de cada entrada será de 10V/2000 = 5 mV, que equivale a uma variação de força tangencial de 0,147 N (15 g) e de força normal de 0,245 N (25 g). A figura 36 representa a instalação das células de carga e do conversor utilizado.

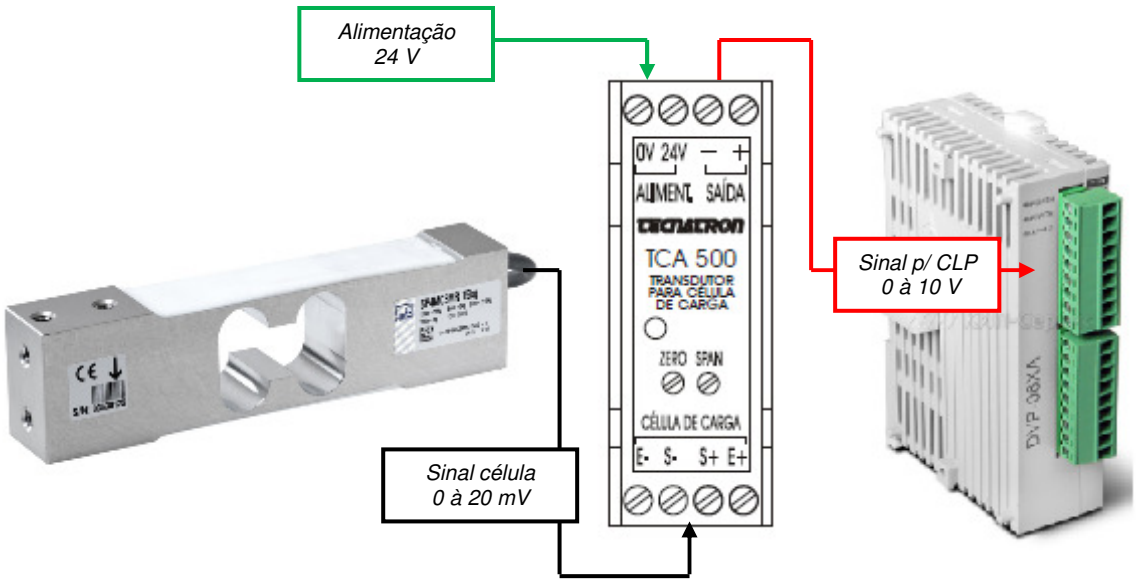


FIGURA 36 - Instalação célula de carga com amplificador (adaptado pelo autor, 2017).

II. *Encoder*: como descrito anteriormente, o encoder instalado junto à roda de borracha tem função dupla: permitir a contagem do número de revoluções da roda e determinar a frequência rotacional da mesma. O conversor CFW700 apresenta entrada para encoder incremental, sendo que a alimentação deste sensor é feito pelo próprio conversor com uma tensão de 5 V. Assim, optou-se por:

a) canal “0” do encoder - para cada volta completa da roda um pulso é gerado, porém com tensão de 5 V. Foi então confeccionada uma placa eletrônica baseado em opto acoplador para converter o nível de tensão do sinal para 24 V e assim disponibilizar a informação para uma entrada digital de contagem rápida do CLP.

b) Canal “A/B” do encoder - conectados a entrada do conversor, que, através de uma função nativa, converte os pulsos elétricos em um valor de rpm. Através da configuração de parâmetros, esta informação é enviada para uma saída analógica 0 à 10 V do conversor que está conectado diretamente a uma entrada analógica do CLP.

A figura 37 apresenta a configuração utilizada para disponibilizar os sinais do encoder para o CLP.

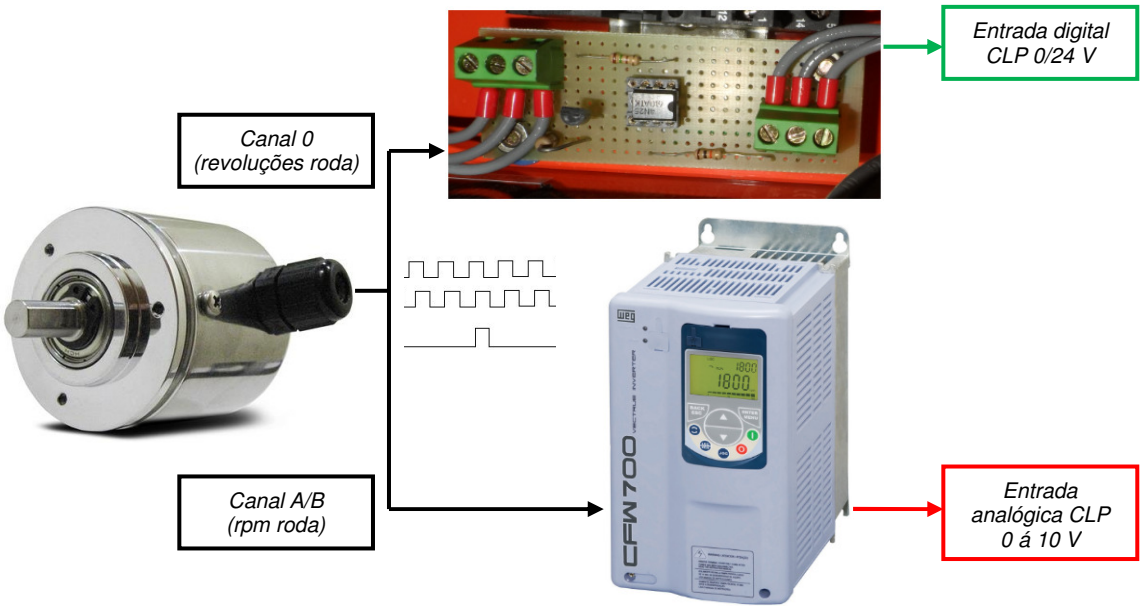


FIGURA 37 - Tratamento dos sinais do encoder para o CLP (adaptado pelo autor, 2017).

Com as soluções descritas acima, deu-se início à montagem do quadro de comando elétrico do abrasômetro. Este quadro foi montado em separado, para posterior integração com a máquina de ensaio. A figura 38 apresenta o quadro de comando.

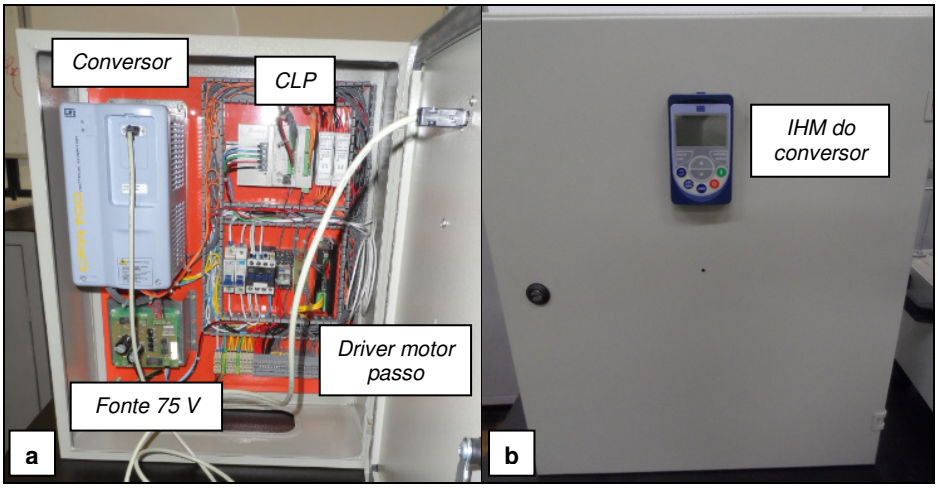


FIGURA 38 - Quadro de controle do abrasômetro.
a) Vista interna; b) vista externa.

Finalizada a montagem, foi iniciada a configuração (ajuste de parâmetros) do inversor de frequência: determinar as funções de entradas e saídas, dados do motor acionado, função dos botões da IHM, etc. Também foi configurado o *driver* do motor de passo, através da seleção de posição de chaves tipo *dip switch:* tipo de motor acionado, número de passos desejado para o motor (ajuste em 2000), corrente de

sobrecarga do motor, etc. A figura 39 apresenta a interligação eletroeletrônica dos componentes e dispositivos do abrasômetro.

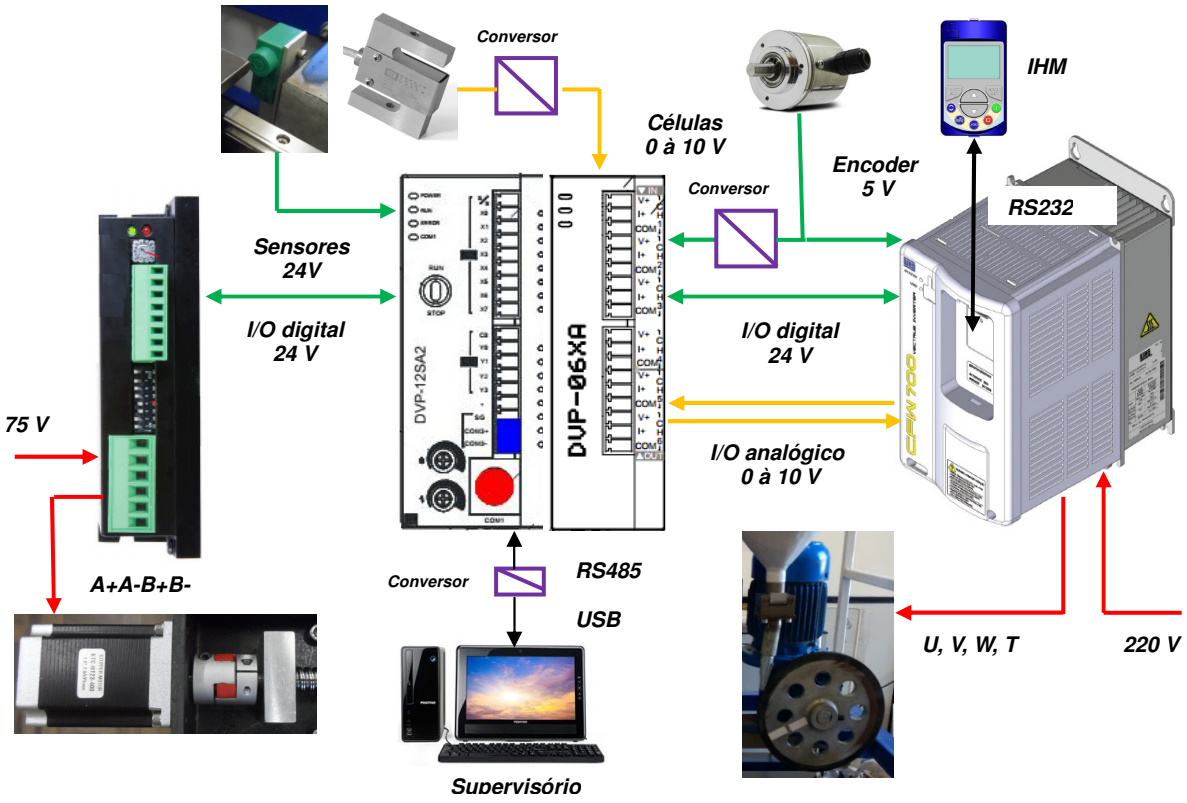


FIGURA 39 - Fluxo de dados no abrasômetro (adaptado pelo autor, 2017).

Após a montagem do quadro de comando, foi feita sua fixação em uma bancada de metal de 1200 mm x 1500 mm x 900 mm, desenvolvida para acomodar também o abrasômetro e um computador onde será instalado o sistema supervisório.

Realizadas as conexões elétricas com a máquina e alimentação do quadro, foi possível transferir o programa *ladder* desenvolvido. Este foi dividido em sete partes (subprogramas), sendo cada subprograma atribuído a uma função ou setor da máquina. Na sequência será feito uma descrição breve dos mesmos.

I. <u>*Modbus*</u>: nesta parte do programa foram configurados os parâmetros de configuração da porta de comunicação serial RS485 utilizada para comunicação com o computador onde foi instalado o sistema supervisório.

II. Flags ES digitais: parte do programa onde foi atribuído para cada entrada e saída digital um bit de memória do CLP, facilitando o desenvolvimento dos subprogramas de controle da máquina e troca de informações com o sistema supervisório.

III. ES analógicas: configuração das entradas e saídas analógicas do bloco de expansão DVP06XA do CLP. Para cada entrada ou saída foi atribuído um registrador de 16 bits, com faixa de trabalho de 0 à 2000 (tipo inteiro). Como foi necessária a realização de diversos cálculos internos (dados recebidos ou disponibilizados ao supervisório), estes valores tiveram que ser convertidos para trabalhar com ponto flutuante (tipo *float*).

IV. Seleção Man Aut: conforme seleção do operador através de um botão na IHM (abrasômetro mecanizado ou instrumentado), o funcionamento da máquina é alterado, sendo esta parte do programa responsável por habilitar ou bloquear o funcionamento da mesa horizontal e roda de borracha através do sistema supervisório.

V. Inversor roda: parte do programa responsável por controlar (ligar/desligar, contagem de revoluções, etc.) o funcionamento da roda de borracha tanto no modo mecanizado ou instrumentado.

VI. MP mesa: parte do programa responsável por controlar (avanço/retorno) o funcionamento da mesa horizontal no modo instrumentado (automático ou manual). Neste bloco foram utilizados e configurados os diversos parâmetros da função PID que controla a mesa (força normal sobre o corpo de prova) durante a execução do ensaio no modo automático.

VII. Alarmes supervisório: para cada condição de funcionamento da máquina ou alarmes ativos, foi atribuído um bit de memória do CLP, para que estas informações fossem disponibilizadas na tela do sistema supervisório.

Para o desenvolvimento do programa foi utilizado o software de programação do fabricante, ISPSoft® versão 3.02, com sua tela de edição principal representado pela figura 40.

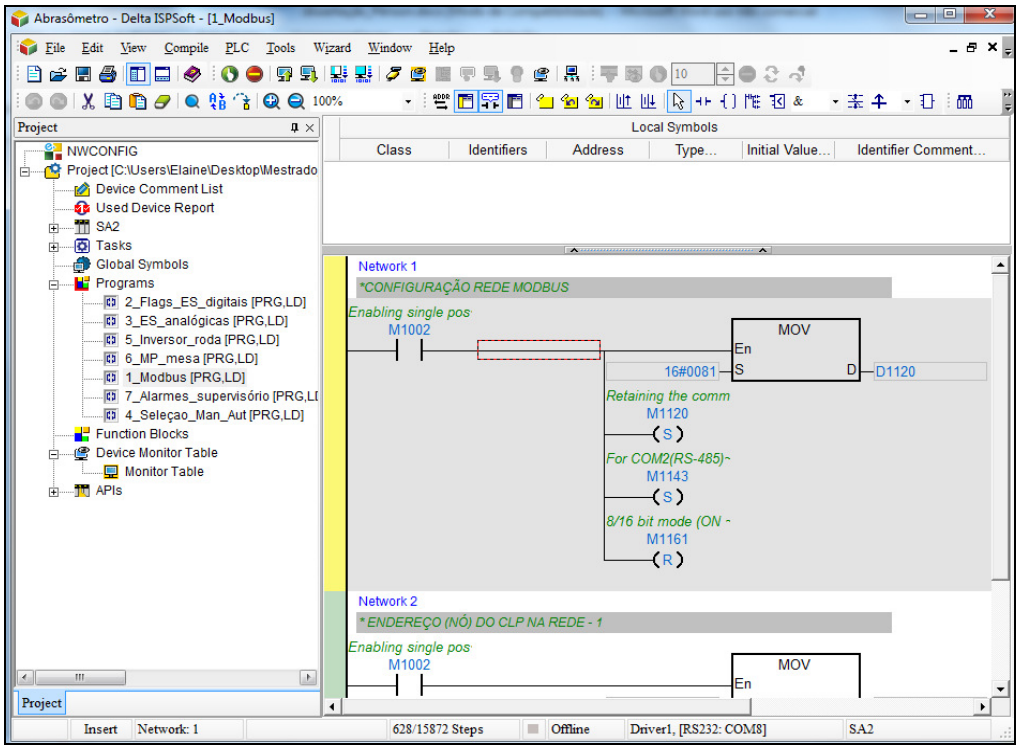


FIGURA 40 - Tela de edição do software ISPSoft®.

4.3.3 Sistema supervisório

É oportuno que toda máquina ou processo automático apresente uma interface que possa permitir ao operador configurar as condições desejadas de funcionamento, visualizar valores de diversas variáveis, verificar estado de sensores e atuadores, registros de eventos, etc. (SANTOS, 2014). Para o desenvolvimento do abrasômetro, foram consideradas algumas possibilidades, conforme tabela 13.

TABELA 13 - comparativo entre sistemas de supervisão

Tecnologia	***Características***
IHM – interface humano máquina (Delta).	*Facilidade de programação (desenvolvimento de tela), software gratuito, custo médio (textual-monocromática) ou alto (gráficas).*
LabVIEW® (National Instruments)	*Facilidade de programação (desenvolvimento de telas), necessidade de aquisição do software, custo alto, disponibilidade de PC.*
ScadaBR	*Poucos recursos para desenvolvimento de telas, software gratuito, disponibilidade de PC.*

Com o objetivo de reduzir custos na montagem do abrasômetro, e por ter disponível um computador para esta máquina, resolvemos adotar o sistema ScadaBR, “[...] software livre e de código aberto do tipo *SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)*, desenvolvido através de projeto de pesquisa da Fundação Certi”(SCADABR, 2016). Outra característica desejável deste sistema é permitir a comunicação com CLP através de protocolo Modbus serial, compatível com o CLP Delta do projeto. Na sequência são descritos os passos seguidos para a elaboração do sistema supervisório.

I. Instalação: o desenvolvimento do sistema de supervisão iniciou com a instalação do software de edição ScadaBR versão 1.0 CE no computador, permitindo alguns testes iniciais de aprendizagem, já que que não tínhamos experiência com este sistema. Para a comunicação com o CLP, fez-se necessário a aquisição de um conversor USB/RS485 do fabricante Novus, sendo configurado no ScadaBR os mesmos parâmetros do CLP (endereço na rede, bits de dados, paridade, velocidade, etc.). O período de atualização foi configurado em 1 s, assim o sistema de supervisão irá receber do sistema de controle em média 600 dados para cada variável de ensaio monitorada (*online*), e posterior elaboração do relatório final do ensaio.

II. Configuração de tags: na sequência, foram configuradas todas as *tags* do sistema (registradores do tipo *bit* e do tipo *word*). As *tags* são áreas de memória do CLP com endereçamento único (hexadecimal), onde os dados trocados entre CLP e sistema supervisório podem ser lidos ou escritos.

III. Tela de supervisão: o ScadaBR apresenta uma biblioteca limitada de símbolos que podem ser utilizados para edição de telas de supervisão. Assim, um plano de fundo foi editado no Microsoft Paint® para ser utilizado no supervisório, e os botões presentes na tela foram desenvolvidos através de código *Java Script,* e posteriormente adicionados. A figura 41 apresenta a tela do sistema supervisório que foi desenvolvida para o abrasômetro.

Na área (1) desta tela, foi representado o abrasômetro, sendo possível fazer a leitura em tempo real da força normal, da força tangencial, do coeficiente de atrito, da rotação e do número de revoluções da roda, e led’s indicam se os motores estão

acionados. Na área (2) é sinalizado através de led's o estado da máquina selecionado pelo operador, ensaio mecanizado ou instrumentado. Na área (3), é possível ajustar os dados (configuração) do ensaio a ser realizado: valor desejado para força normal, total de voltas (duração do ensaio), frequência rotacional desejado para a roda, e valor de correção para as forças normal e tangencial. Na área (4) serão representados através de led's os alarmes ativos da máquina. Estes alarmes são habilitados somente no modo instrumentado da máquina, impossibilitando o início ou interrompendo um ensaio caso um evento ocorra. Após a ocorrência de um evento, o ensaio só poderá continuar ou ser cancelado após o operador reconhecer o mesmo através de botão específico. Na área (5) da tela, pode-se ligar/desligar os motores de forma manual, através dos botões: liga/desliga roda e avanço/retorno da mesa horizontal. Na área (6) através dos botões pode-se iniciar, pausar ou cancelar um ensaio. Através dos gráficos (7) pode-se acompanhar o comportamento da força normal, tangencial e coeficiente de atrito ao longo do período de ensaio.

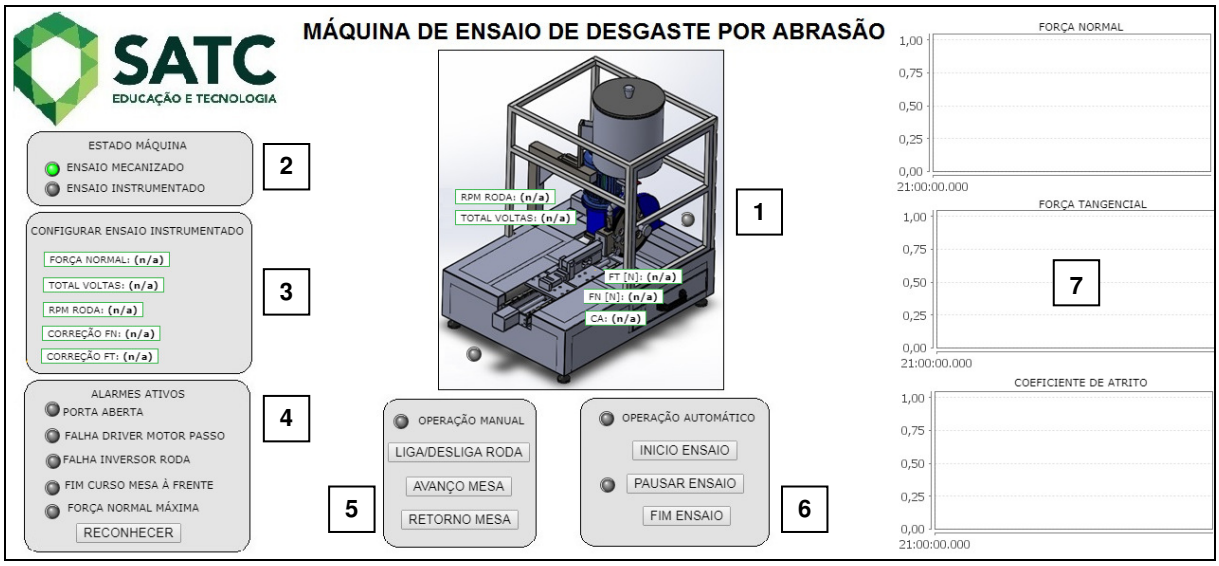


FIGURA 41 - Tela do supervisório do abrasômetro.

Os botões utilizados na tela do supervisório são do tipo pulso. O ScadaBR apresenta ainda a possibilidade do operador poder registrar os dados do ensaio executado, gerando uma planilha (arquivo pode ser aberto no Microsoft Excel®). Também é possível a elaboração de um relatório, onde pode-se selecionar as variáveis (dados) que se deseja imprimir ou enviar para um e-mail pré registrado no

sistema. O apêndice A mostra um exemplo de relatório gerado após ensaio no abrasômetro.

A figura 42 ilustra o abrasômetro pré-finalizado, pronto para realização dos testes preliminares, porém faltando realizar o acabamento de pintura e proteção de acrílico para mesa horizontal. Também foi verificada a possibilidade de ser instalado um sistema de aspiração de poeira para reduzir a contaminação do ambiente de teste.

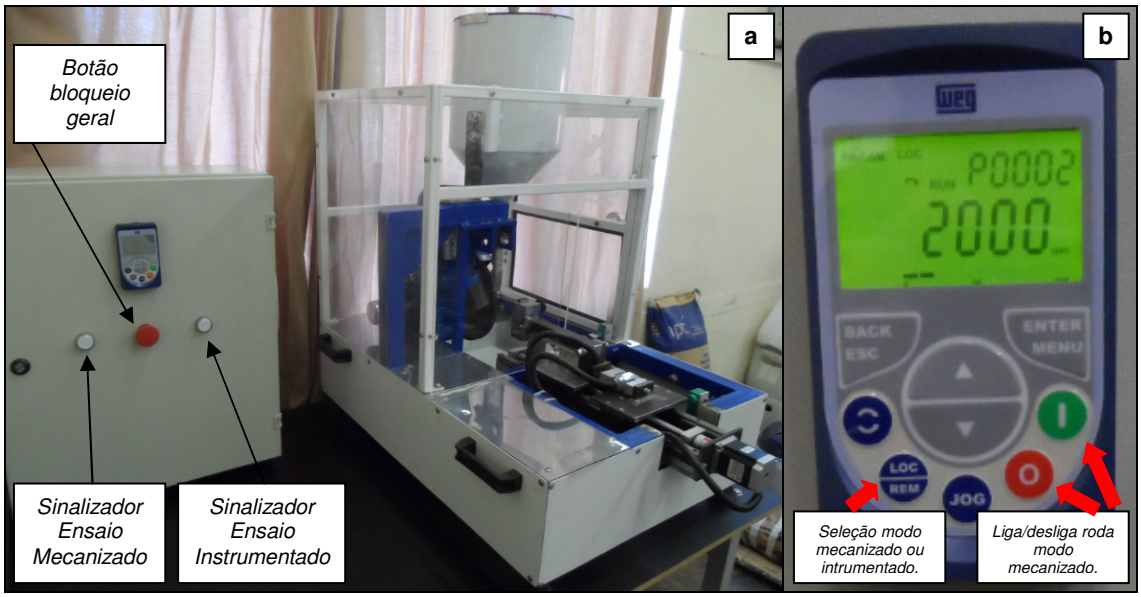


FIGURA 42 - a) Abrasômetro finalizado; b) IHM.

5 VALIDAÇÃO OPERACIONAL E CALIBRAÇÃO DO ABRASÔMETRO

Conforme a metodologia adotada para este trabalho, as etapas finais serão dedicadas para os testes de funcionamento e validação dos resultados apresentados pelo abrasômetro. Assim, neste capítulo serão abordados os procedimentos adotados para os ensaios: preparação dos corpos de prova e areia utilizada, ajustes no abrasômetro, calibração dos sistemas de medição e aplicação de forças no modo mecanizado e instrumentado, além de descrever a execução dos ensaios em diferentes laboratórios.

5.1 Testes preliminares

Nesta etapa, foram executados alguns testes para verificação de funcionamento, tanto de partes da máquina, como todo o equipamento já montado. Foram realizadas alterações no programa *ladder*, adequações do sistema supervisório, ajuste de parâmetros do inversor de frequência, etc. Como a força normal aplicada ao corpo de prova é realizado pelo avanço/retorno da mesa horizontal no modo automático através de controle em malha fechada, foram realizados diversos ajustes nos ganhos proporcional, integral e derivativo da função PID, até que se obtivesse uma resposta satisfatória com a força entre 130 N ± 3%.

Na estrutura mecânica houve mudança na articulação do braço onde é fixado o corpo de prova (mudança de parafuso para pino com bucha). Isto permitiu reduzir a folga radial, melhorando a marca de desgaste, conforme relatado no item 2.4.

5.2 Preparação para execução dos ensaios

5.2.1 Corpos de prova

Para a execução dos ensaios, foi adotado como material para os corpos de prova o aço ferramenta *AISI* H13. Para manter a similaridade no ensaio, foi adquirido um único bloco de aço com dimensões suficientes para preparar 15 corpos de prova, segundo as dimensões da norma (total de 30 ensaios, aproveitando duas faces). A

figura 43 apresenta as etapas que se seguiram para preparação das amostras, que foram submetidas aos mesmos processos até ficarem prontas.

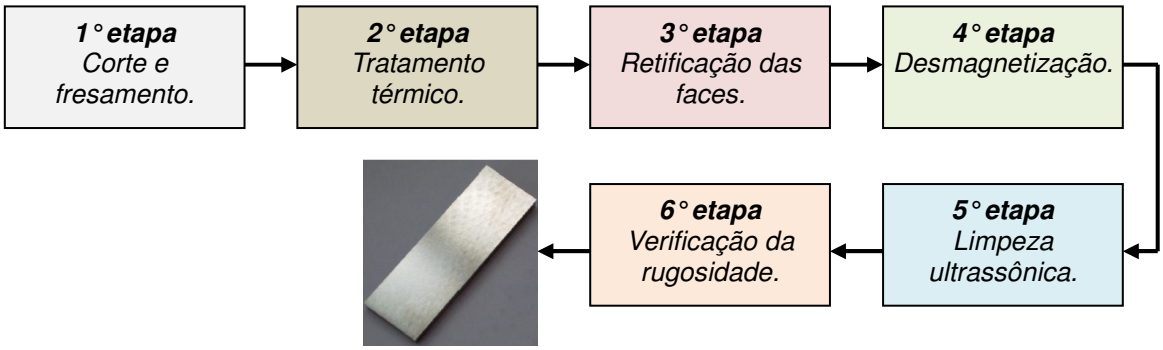


FIGURA 43 - Etapas de preparação dos corpos de prova (desenvolvido pelo autor, 2017).

Após a primeira etapa, as peças foram enviadas para a empresa Grefortec de São Leopoldo-RS para que fosse realizado tratamento térmico segundo as recomendações da norma: têmpera de 1010 ℃ por 1 hora (resfriamento a ar), duplo revenimento a 593 ℃ de 2 h (resfriamento a ar). A dureza especificada deve estar entre 47 e 48 HRC. A terceira etapa foi realizada na Faculdade SATC, com a finalidade de diminuir a rugosidade das faces. Porém, como a retífica utiliza mesa magnética, foi necessário desmagnetizar os corpos de prova utilizando equipamento desmagnetizador. Para eliminar a sujeira (óleo, gordura, etc.) antes de cada ensaio, os corpos de prova foram limpos com detergente neutro em água corrente e após levados à cuba ultrassônica, com banho de álcool etílico 99,5% por 10 minutos. Após secagem, com o instrumento Rugosímetro de modelo TR100 foi verificada a rugosidade da superfície, devendo esta ser abaixo de R_Z 0,8 µm. As etapas 4,5 e 6 são mostradas pela figura 44.

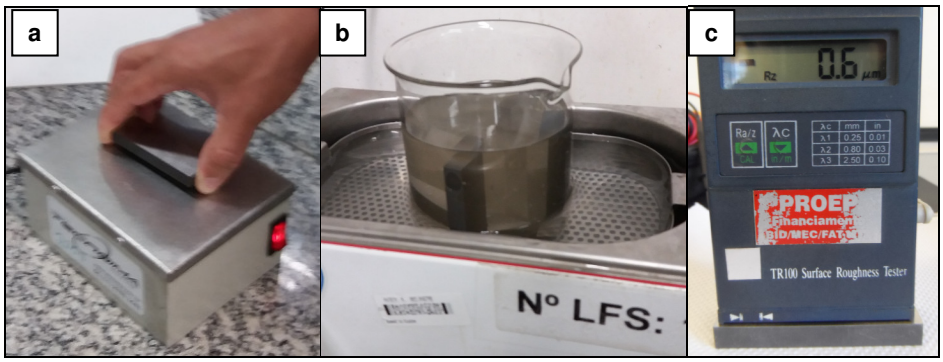


FIGURA 44 - Preparação dos corpos de prova.
a) Desmagnetização; b) limpeza ultrassônica; c) verificação da rugosidade.

5.2.2 Areia abrasiva

Para realização dos ensaios fez-se uma pesquisa para verificar o tipo de areia utilizado por laboratórios de empresas e universidades em seus abrasômetros. Laboratórios de referência na área de Tribologia como o LFS da USP utilizam a areia fornecida pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo, denominada ANB - Areia Normal Brasileira, definida como material quartzoso extraído do Rio Tiete. Desta forma, foi decidido adotar esta areia como padrão para o abrasômetro da Faculdade SATC. Foram adquiridos então quatro sacos de areia de 25 kg n° 50 (95% de material retido entre peneiras com abertura de malha 0,6 mm à 0,3 mm). Cabe salientar novamente que a areia descrita na norma *ASTM G65-16* deve ter granulometria 50/70 (95% de material retido entre peneiras com abertura de malha 0,3 mm à 0,212 mm). Também foi adquirido um saco de areia de 25 kg n° 100 (0,3 mm à 0,15 mm), para ser utilizado nos ensaios. A figura 45 apresenta a areia padronizada para o LDS Faculdade SATC.

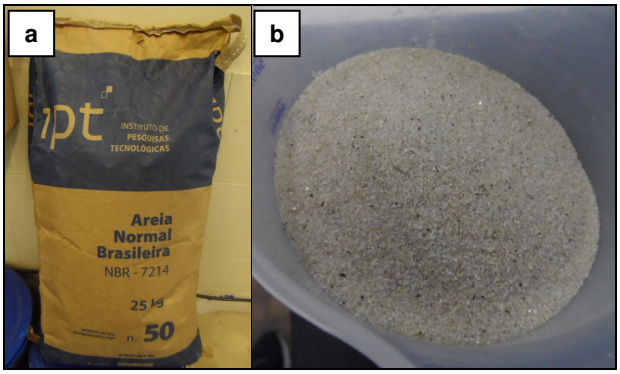


FIGURA 45 - Areia ANB adotada nos ensaios.
a) Embalagem de 25 kg; b) aspecto de uma amostra.

5.3 Calibração do abrasômetro

Albertazzi e Sousa (2008), definem que “calibração é um procedimento experimental através do qual são estabelecidas, sob condições específicas, as relações entre os valores indicados por um instrumento ou sistema de medição. Esses valores são representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas são estabelecidos por padrões”. Bhushan (2001 *apud* CASTRO, 2015), cita que “a garantia de uma boa medição é de fato, a relação que se obtém com o processo de calibração dos

instrumentos e devem ser feitos antes dos experimentos". Assim, a seguir é descrito como foi feita a calibração do sistema de medição do abrasômetro. Cabe ressaltar que o quadro elétrico permaneceu energizado por 24 h antes da calibração, a fim de obter estabilidade térmica e elétrica nos circuitos eletroeletrônicos, permanecendo neste estado durante todo o período de execução dos ensaios, de 48 h de duração.

5.3.1 Calibração do abrasômetro mecanizado

Para realizar um ensaio mecanizado no abrasômetro, faz-se necessária a fixação do braço de alavanca juntamente com o bloco (massa), conforme a força normal de ensaio desejada. Assim, esta força resultante $\boldsymbol{F_N}$ depende: *i)* da massa do bloco e da sua distância (eixo x) em relação ao pino de sustentação - força ***P***; *ii)* da massa do próprio braço e distância (eixo x) do seu centro de massa em relação ao pino de sustentação - força ***E;*** *iii)* da distância (eixo y) entre o ponto de contato corpo de prova/roda e o pino de sustentação; conforme representado pela figura 46.

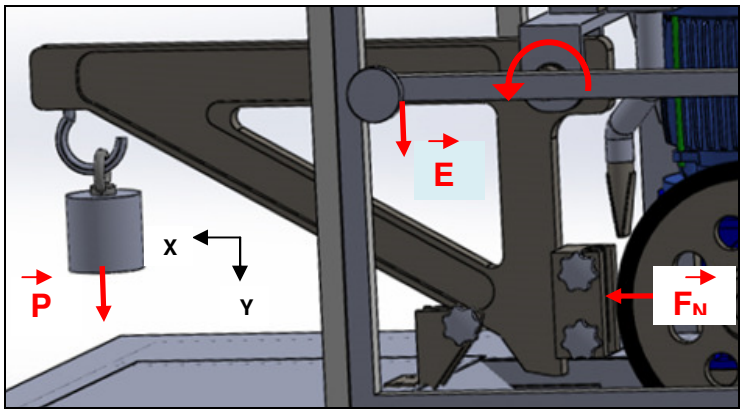


FIGURA 46 - Sistema de forças que atuam no braço (desenvolvido pelo autor, 2017).

Através do software SOLIDWORKS®, obtivemos as distâncias em que as forças atuam, e através da verificação da massa das peças em uma balança, pode-se calcular a força normal a ser aplicada ao corpo de prova, usando da equação 14.

$$\sum M = 0 \Rightarrow \vec{P} \times d + \vec{E} \times d - \vec{F}_N \times d = 0 \quad [14]$$

$$\sum M = 0 \Rightarrow 5kg \times 9{,}81m/s^2 \times 0{,}405m + 4{,}6kg \times 9{,}81m/s^2 \times 0{,}182m - \vec{F}_N \times 0{,}205m = 0$$

$$\sum M = 0 \Rightarrow \vec{F}_N = 136{,}9N$$

Como o resultado encontrado foi superior ao estipulado pela norma *ASTM G65-16*, resolvemos adotar o procedimento apresentado pela figura 47, para confirmar os valores calculados.

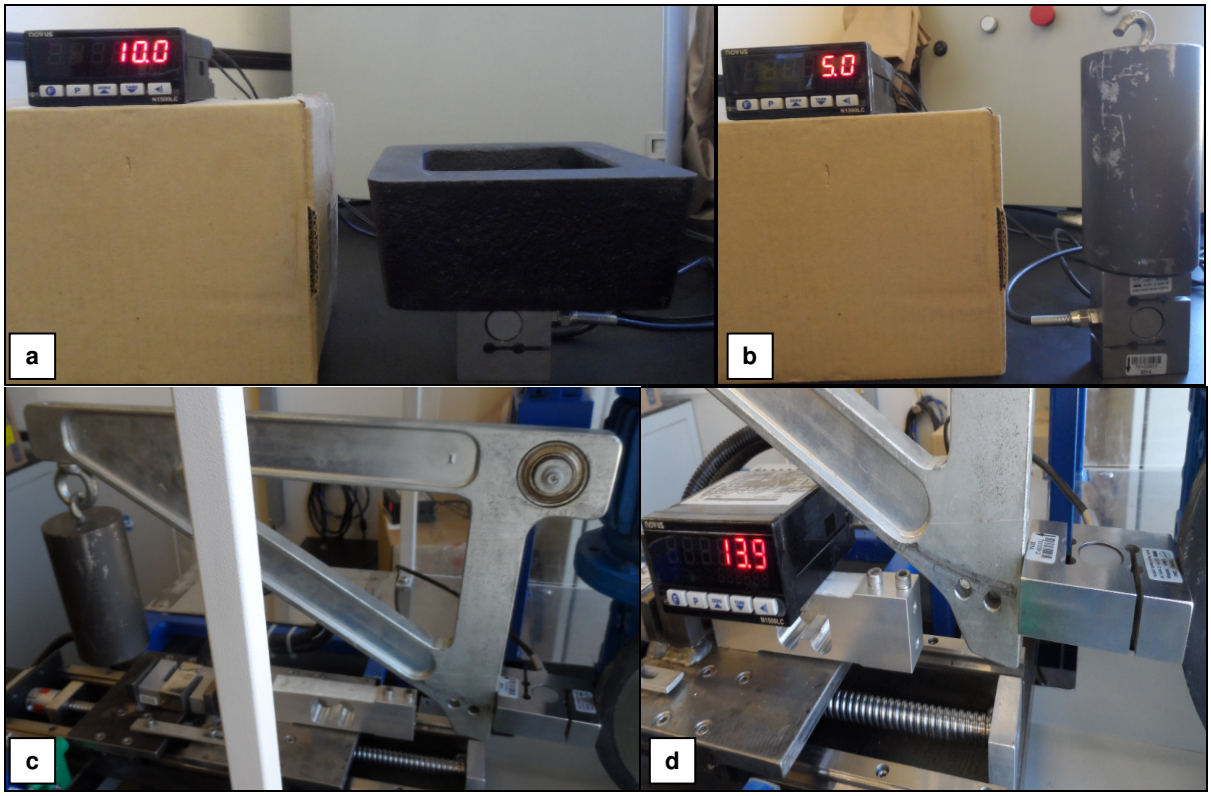


FIGURA 47 - Procedimento para calibração do abrasômetro mecanizado.
a) Verificação do indicador; b) verificação do bloco usado no ensaio;
c) célula de carga posicionada; d) indicação do valor da força normal.

Neste procedimento, utilizamos um indicador universal do fabricante Novus modelo N1500LC, uma célula de carga tipo “S” de capacidade 50 kgf e uma massa padrão de 10000,0 ± 0,2g. Inicialmente (47a), para verificar se o indicador apresentava um valor correto em seu mostrador digital, a massa padrão foi posicionada sobre a célula de carga. Na sequência (47b), sabendo que o sistema de medição apresentava indicaçoes corretas, foi verificada a massa do bloco n° 2 a ser utilizado no ensaio, resultando em 5 kg. A figura 47c representa o braço de alavanca montado no abrasômetro, com a célula de carga posicionada para medir a força normal, sendo o resultado indicado de 13,9 kg, ou seja, ≈136,4 N, valor próximo ao calculado pela equação 14. Como o valor máximo a ser registrado deveria ser de 133,9 N foi adotado como solução a retirada de parte da massa do bloco n° 2 através de usinagem no torno, ou seja, 0,36 kg.

5.3.2 Calibração do abrasômetro instrumentado

Para calibração do sistema de medição das forças normal e tangencial no modo instrumentado, foram utilizadas massas padrão de 5000,0 ± 0,2g e 10000,0 ± 0,2g. O procedimento adotado é relatado na sequência deste trabalho.

I. Força Tangencial:

a) inicialmente, sem carga alguma, foi ajustado o *trimpot* de "zero" do conversor TCA500, de modo que na tela do supervisório fosse indicado o valor de 0 N.

b) na sequência, o bloco de 5 kg foi posicionado sobre a célula de carga que faz a medição desta força, sendo registrado o valor indicado no supervisório. Este procedimento foi realizado cinco vezes, sendo calculada a média aritmética das indicações, 49,1 N.

c) Na sequência, o suporte que sustenta o corpo de prova foi posicionado sobre a célula de carga, sendo indicados 19,1 N, em função da sua massa própria, gerando uma tendência no sistema de medição. Desta forma, através do campo de correção apropriado no supervisório, é possível o operador digitar um valor para corrigir esta tendência do valor da indicação. A rotina deste cálculo foi elaborada através do uso de blocos matemáticos no programa *ladder*, representado pela equação 15.

$$I_T = Valorlidocélula + (C) \qquad [15]$$
$$I_T = Valorlidocélula + (valordigitado \times 0{,}0735)$$
$$I_T = 19{,}1N + (-260 \times 0{,}0735)$$
$$I_T = 0N$$

onde:

I_T - indicação da força tangencial pelo supervisório;
C - correção para o valor indicado.

Assim, é eliminada uma parcela do erro sistemático do sistema de medição da força Tangencial.

d) repete-se o passo b, porém agora com a massa de 5 kg sendo posicionada sobre o corpo de prova, sendo obtida a média das indicações de 70,23 N. A figura 48 apresenta o procedimento adotado.

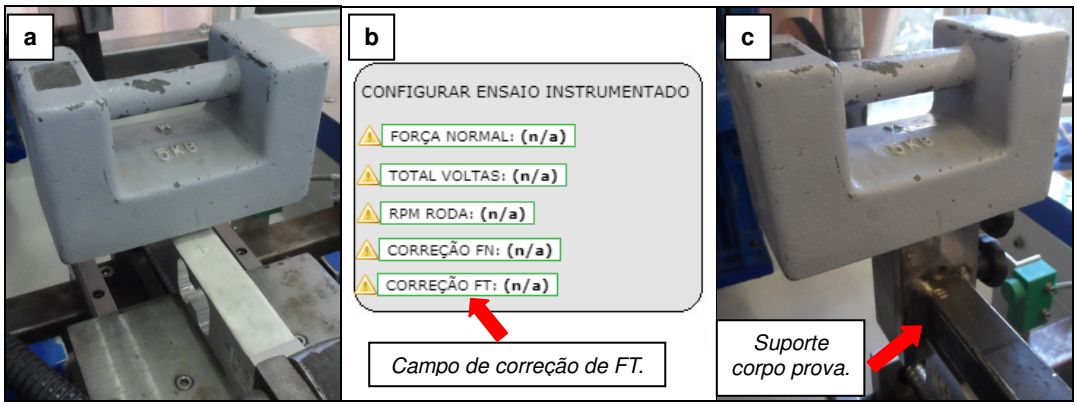


FIGURA 48 - Procedimento de calibração para força tangencial.
a) Bloco sobre célula; b) campo de correção supervisório; c) bloco sobre corpo de prova.

Percebe-se, então, a diferença significativa do valor de força tangencial em função da distância que o corpo de prova é posicionado em relação ao ponto de contato da célula de carga com o suporte, ou seja, outra parcela do erro sistemático deste sistema de medição que deve ser corrigido, conforme apresenta figura 49.

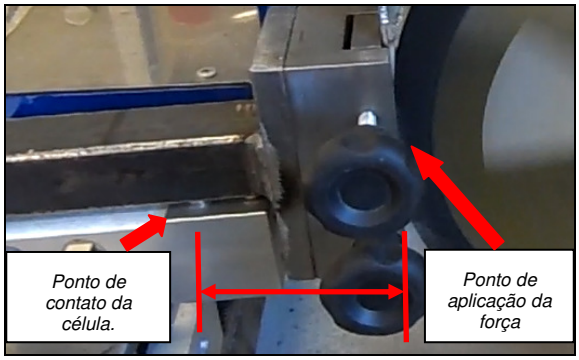


FIGURA 49 - Erro sistemático originado em função da distância.

Assim, um fator de correção é aplicado a equação [15], conforme equação [16]:

$$I_T = \frac{Valor lido célula + (C)}{1{,}43} \quad [16]$$

II. Força Normal:

a) inicialmente sem carga alguma foi ajustado o *trimpot* de "zero" do conversor TCA500, de modo que na tela do supervisório fosse indicado o valor de 0 N.

b) na sequência, o bloco de 10 kg foi posicionado sobre a célula de carga que faz a medição desta força, sendo registrado o valor indicado no supervisório. Este procedimento foi realizado cinco vezes, sendo calculada a média aritmética das indicações, 98,87 N. Cabe salientar que este sistema de medição da força normal foi calibrado com a célula na posição vertical, e não horizontal, que é a posição de trabalho, acarretando um erro sistemático de 0,77 N, que desaparece quando a célula volta à posição original. Desta forma não é aplicado correção alguma, conforme equação 17.

$$I_{FN} = Valorlidocélula + (C) \quad [17]$$

$$I_{FN} = Valorlidocélula + (valordigitado \times 0{,}1226)$$

$$I_{FN} = 0N + (0 \times 0{,}1226)$$

$$I_{FN} = 0N$$

A figura 50 ilustra o procedimento adotado.

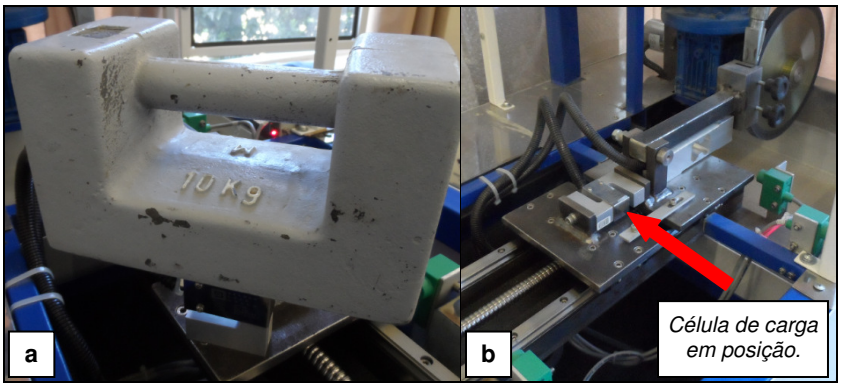


FIGURA 50 - Procedimento de calibração da força normal.
a) Bloco sobre célula; b) célula de carga na posição de trabalho.

5.4 Ensaios executados

Para comparar e validar os resultados (perda de volume) a serem com o abrasômetro da Faculdade SATC, é oportuno a realização de ensaios em outras

máquinas com função e condições semelhantes (mesmo material do corpo de prova e tratamento térmico, tipo e granulometria da areia abrasiva, duração do ensaio, força normal aplicada, etc.). A comparação dos resultados obtidos (perda de volume) com o valor de referência da norma *ASTM G65-16* para o aço *AISI* H13 perde o efeito, pois o tipo de areia utilizado não está disponível no Brasil, e sua importação é inviável. Porém, a norma recomenda (através de análise estatística) que o coeficiente de variação dos resultados das amostras seja inferior a 7,5%, parâmetro que será adotado neste trabalho e que servirá para também validar os resultados obtidos.

Assim, buscou-se junto a Laboratórios de Tribologia de universidades e empresas particulares a possibilidade de execução de alguns ensaios de desgaste por abrasão. Gentilmente fomos atendidos em nosso pedido pelo LFS-USP e pela empresa Rijeza Metalurgia-RS. Na sequência serão apresentados alguns detalhes dos ensaios executados nestes laboratórios, sendo os resultados abordados no capítulo seguinte.

5.4.1 Ensaio no laboratório LFS-USP

O Laboratório de Fenômenos de Superfície é vinculado ao departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP, com fundação em 1995, tendo como função “contribuir significativamente na área de Tribologia com ensaio, avanço científico e implementação tecnológica” (USP, 2017). Como já relatado neste trabalho, Villabón (2006) desenvolveu um abrasômetro instrumentado no LFS, mas esta máquina não se encontra mais disponível. Assim, os ensaios de desgaste por abrasão foram realizados em uma máquina mecanizada, conforme figura 51.

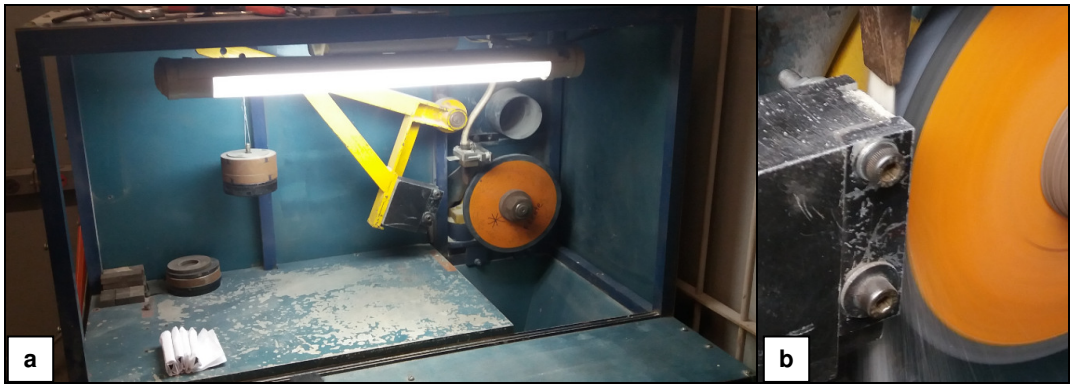


FIGURA 51 - a) Abrasômetro mecanizado do LFS; b) detalhe da execução de um ensaio.

Antes da execução dos ensaios, cada corpo de prova teve sua massa verificada em balança analítica, com resolução de 1 mg. A massa inicial atribuída para cada corpo de prova será, então, a média aritmética de cinco medições consecutivas. Após os ensaios, os corpos de prova foram lavados em água corrente com sabão neutro, dez minutos de banho em cuba ultrassônica com álcool etílico 99,5%, secagem e verificação da massa final (mesmo procedimento anterior). Também foi verificada a vazão da areia, com amostras coletadas para verificação da massa. As condições destes ensaios são representadas na tabela 14.

TABELA 14 - condições de ensaio no LFS

Parâmetros	***Valor atribuído***	***Observações***
Quantidade de amostras	*4*	*****
Força normal	*130 N*	*Ajuste via seleção de blocos de massa no braço de alavanca. Não calibrado.*
Força tangencial e coeficiente de atrito	*Sem leitura.*	*****
Roda de borracha	*200 rpm*	*Ajuste de frequência rotacional pela IHM. Não calibrado.*
Tipo e vazão da areia	*IPT ANB 50* *424 g/min*	*Superior à norma, porém não foi permitido alterar configuração da máquina. Não reaproveitada.*
Duração ensaio	*10 minutos*	*Cronometrado pelo operador.*
Ajuste parâmetros e supervisão.	*Não é possível.*	*****

Os resultados destes ensaios serão apresentados no capítulo seguinte.

5.4.2 Ensaio no Laboratório da empresa Rijeza Metalurgia

Fundada em 2002 na cidade de São Leopoldo-RS, a Rijeza é especializada no desenvolvimento e aplicação de revestimentos contra desgastes em máquinas e equipamentos nos diferentes segmentos da indústria como alimentação, energia eólica, hidrelétrica e termelétrica, mineração, papel e celulose, petróleo e gás, petroquímica e siderurgia (Rijeza, 2017).

Esta empresa desenvolveu um abrasômetro automatizado para seu laboratório de pesquisa, com sistema de controle baseado em CLP, roda de

borracha acionada por inversor de frequência (malha fechada através de resolver), interface para ajuste de parâmetros e visualização de variáveis através de IHM, porém com aplicação de força normal através de braço de alavanca. A figura 52 apresenta o abrasômetro desta empresa.

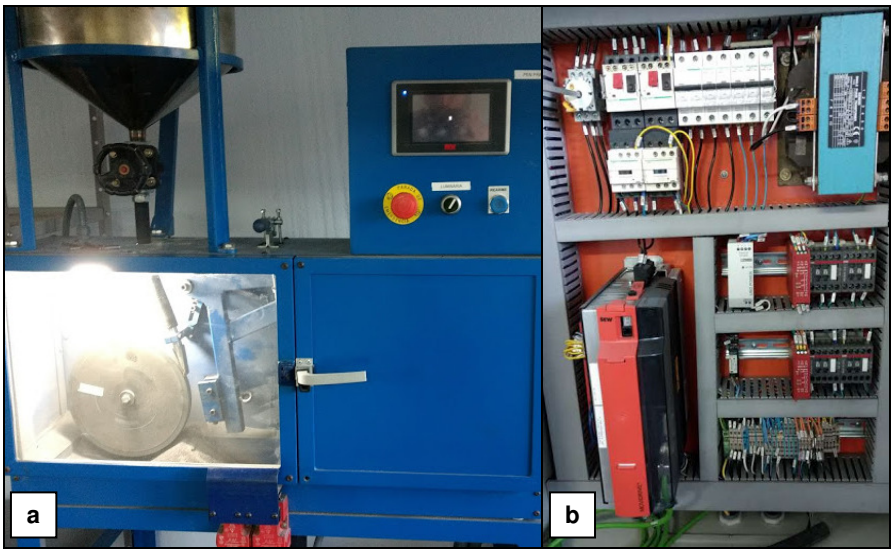


FIGURA 52 - Abrasômetro da empresa Rijeza Metalurgia.
a) Vista frontal; b) quadro de comando elétrico.

Antes e após a execução dos ensaios, foram adotados os mesmos procedimentos descritos no tópico anterior. As condições destes ensaios são representadas na tabela 15.

TABELA 15 - condições de ensaio na Rijeza

Parâmetros	***Valor atribuído***	***Observações***
Quantidade de amostras	*4*	*****
Força normal	*130 N*	*Ajuste via seleção de blocos de massa no braço de alavanca. Não calibrado.*
Força tangencial e coeficiente de atrito	*Sem leitura*	*****
Roda de borracha	*200 rpm*	*Ajuste de frequência rotacional pela IHM. Não calibrado.*
Tipo e vazão da areia	*IPT ANB 50* *300 g/min*	*Não reaproveitada.*
Duração ensaio	*2000 revoluções da roda*	*Ajuste pela IHM da máquina.*
Ajuste parâmetros e supervisão.	*Sim*	*Tempo de ensaio decorrido, corrente do motor, visualização de alarmes, seleção de receitas.*

Os resultados destes ensaios serão apresentados no capítulo seguinte.

5.4.3 Ensaios realizados no LDS Faculdade SATC

Durante esta etapa, algumas precauções foram adotadas para diminuir os efeitos de possíveis fontes de incerteza: ensaios realizados por um único operador; para cada bateria de corpos de prova ensaiados era utilizado areia abrasiva de uma única embalagem, sendo todos adquiridos do mesmo lote de fabricação; máquina permaneceu energizada após calibração e execução dos ensaios; entre os ensaios amostras de areia abrasiva eram coletados para verificar possíveis alterações significativas na vazão; verificação da temperatura ambiente; verificação da dureza e diâmetro da roda de borracha antes de cada bateria de ensaios; balança analítica ligada 24 h antes dos ensaios, permanecendo neste estado durante todo período; verificação da rotação da roda de borracha através de Tacômetro, etc. A figura 53 apresenta alguns destes procedimentos adotados.

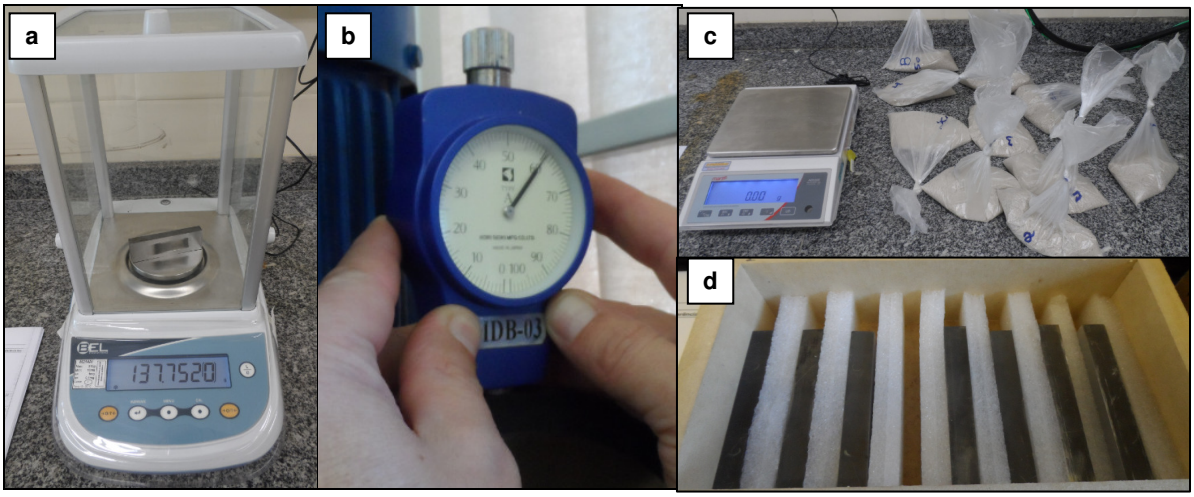


FIGURA 53 - Procedimentos adotados antes dos ensaios na Faculdade SATC.
a) Balança analítica utilizada; b) verificação da dureza da borracha;
c) amostras de areia para verificação da massa; d) corpos de prova utilizados.

I. Ensaio mecanizado: para este modo de operação, foi necessário fixar à estrutura do abrasômetro o braço de alavanca. A operação da máquina foi realizada somente pelas teclas da IHM do inversor posicionado na parte frontal do quadro elétrico, não sendo necessária a utilização do sistema supervisório. As etapas seguidas para execução deste modo de ensaio estão apresentadas pela figura 54.

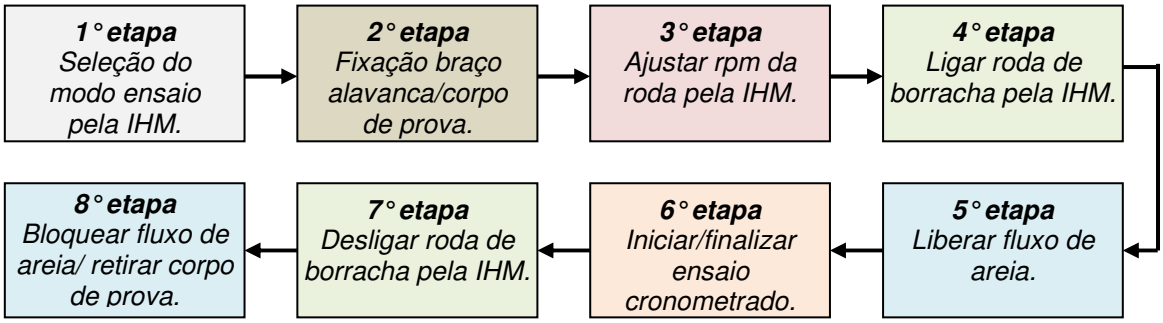


FIGURA 54 - Etapas para execução de ensaio mecanizado (desenvolvido pelo autor, 2017).

A figura 55 apresenta a execução de um ensaio no modo mecanizado.

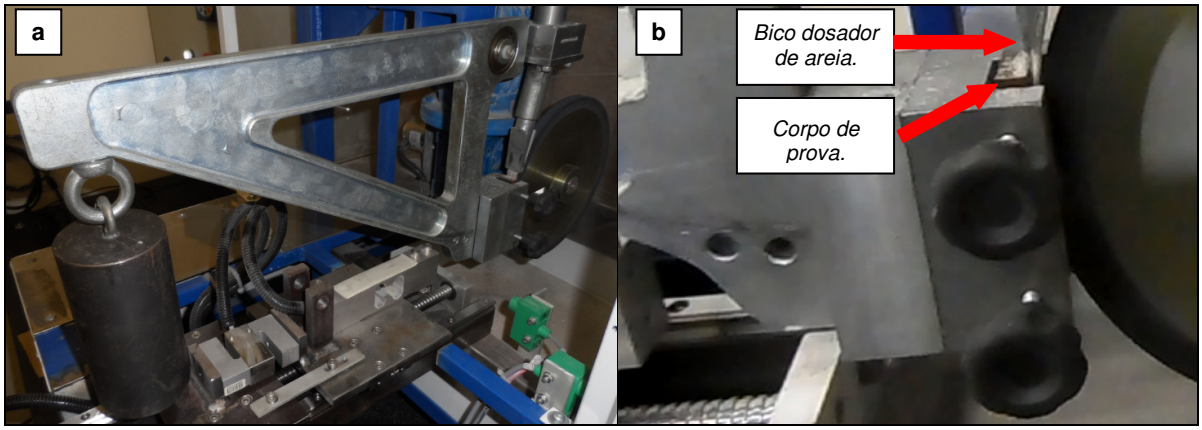


FIGURA 55 - a) Abrasômetro mecanizado; b) detalhe da execução de um ensaio.

As condições destes ensaios são representadas na tabela 16.

TABELA 16 - condições de ensaio no abrasômetro mecanizado

Parâmetros	*Valor atribuído*	*Observações*
Quantidade de amostras	*3*	*****
Força normal	*130 N*	*Ajuste via seleção de blocos de massa no braço de alavanca. Calibrado.*
Força tangencial e coeficiente de atrito	*Sem leitura.*	*****
Roda de borracha	*200 rpm*	*Ajuste de frequênciarotacional pela IHM da máquina. Valor real: 200 ± 2 rpm.*
Tipo e vazão da areia	*IPT ANB 50 300 g/min*	*Não reaproveitada.*
Duração ensaio	*10 minutos.*	*Cronometrado pelo operador*
Ajuste parâmetros e supervisão.	*Não é possível.*	*****

II. Ensaio instrumentado: através da IHM no quadro elétrico, seleciona-se o modo de funcionamento instrumentado do abrasômetro, não sendo mais possível ligar/desligar a roda de borracha através dos botões da IHM. Toda operação agora é feita pelos botões (acionamento manual da roda/mesa ou controle do ensaio) presentes na tela do sistema supervisório e ajuste/visualização de variáveis. As etapas seguidas para execução deste modo de ensaio estão apresentados pela figura 56.

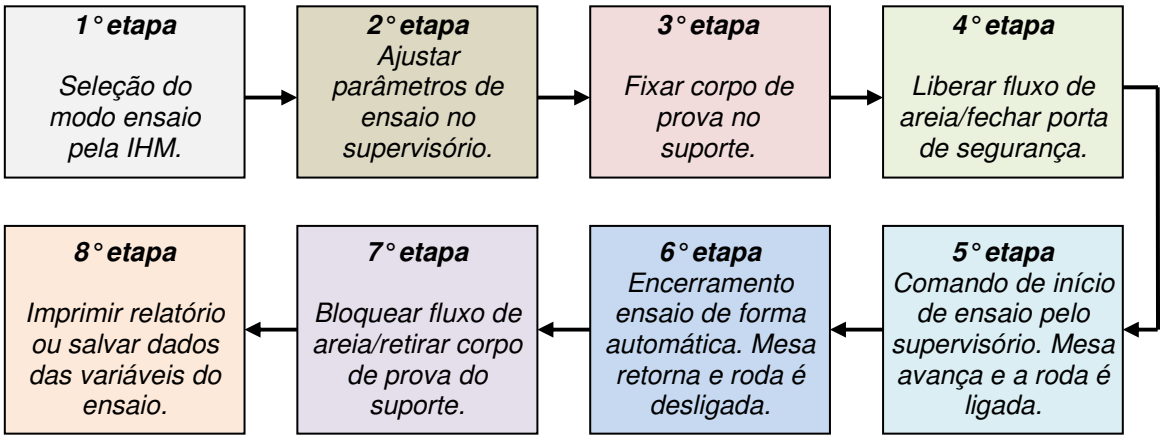


FIGURA 56 - Etapas para execução de ensaio instrumentado (desenvolvido pelo autor, 2017).

A figura 57 apresenta a execução de um ensaio no modo instrumentado.

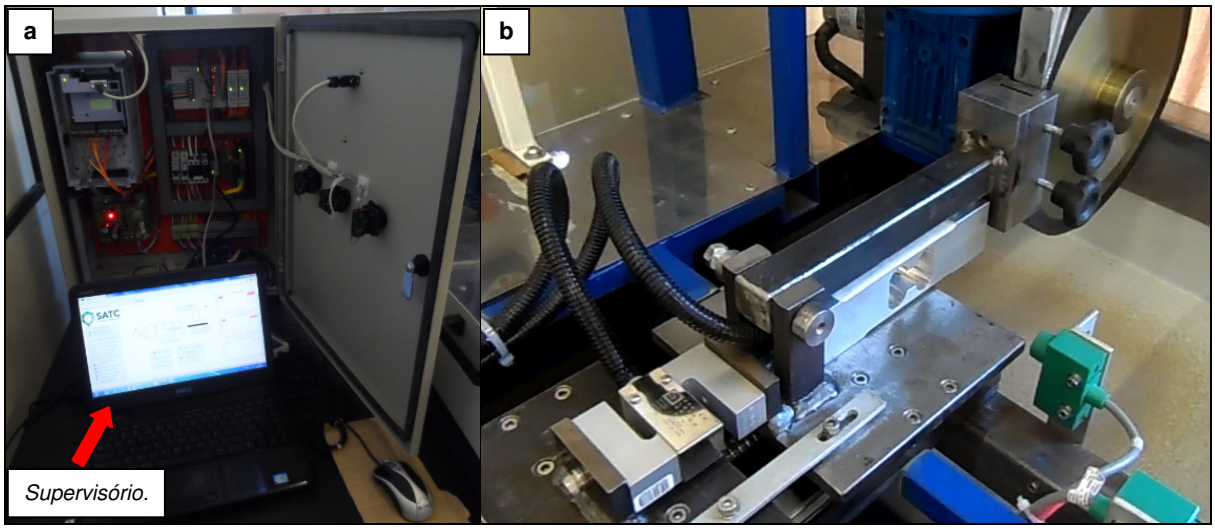


FIGURA 57 - a) PC com sistema supervisório; b) detalhe da execução de um ensaio.

As condições destes ensaios são representadas na tabela 17.

TABELA 17 - condições de ensaio no abrasômetro instrumentado

Parâmetros	***Valor atribuído bateria 1***	***Valor atribuído bateria 2***	***Observações***
Quantidade de amostras	*8*	*3*	*****
Força normal	*130 N*	*130 N*	*Ajuste pelo supervisório. Calibrado.*
Força tangencial e coeficiente de atrito	*Sim*	*Sim*	*Leitura através do supervisório.*
Frequência rotacional da roda de borracha	*200 rpm*	*200 rpm*	*Ajuste pelo supervisório. Calibrado.*
Tipo e vazão da areia	*IPT ANB 50 300 g/min*	*IPT ANB 100 300 g/min*	*Não reaproveitada.*
Duração ensaio	*2000 revoluções da roda*	*2000 revoluções da roda*	*Ajuste pelo supervisório.*
Ajuste parâmetros e supervisão.	*Sim*	*Sim*	*Força normal, valor de Correção, visualização de alarmes, número de revoluções da roda, etc.*

Conforme tabela 17, no modo instrumentado foram feitos ensaios com areia ANB 50 (bateria 1) e ANB 100 (bateria 2) para posterior verificação e comparação dos resultados de desgaste, força tangencial e coeficiente de atrito, permitindo afirmar se a nova máquina tem condições de determinar também a influência do tamanho da areia abrasiva nos resultados.

Os resultados destes ensaios serão apresentados no capítulo seguinte.

6 RESULTADOS DOS ENSAIOS NO ABRASÔMETRO

Este capítulo irá apresentar os resultados dos ensaios de desgaste realizados no abrasômetro da Faculdade SATC, nos modos instrumentado e mecanizado. Também será feito um comparativo com os resultados dos ensaios realizados nos abrasômetros do LFS-USP e da empresa Rijeza Metalurgia. Os dados de cada ensaio (laboratório executante, características da máquina, característica do material, características do ambiente, resultados de desgaste, etc.) foram reportados em uma planilha que foi elaborada tendo como modelo a apresentada no próprio corpo da norma (apêndice B).

A análise estatística dos dados obtidos foi realizada adotando como referência o roteiro sugerido pela norma *ASTM G65-16*, fato verificado em outros trabalhos semelhantes ou adotado pelos fabricantes. Assim, o valor do desvio padrão ***s*** (mm^3) foi calculado conforme equação [18].

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{q}\left(VP - \bar{x}\right)^2}{q-1}} \qquad [18]$$

onde:

VP - volume de massa perdido da amostra (mm^3);

$\bar{x}$ - média aritmética simples do volume de massa perdido das amostras (mm^3);

q - número de amostras do ensaio.

O valor do coeficiente de variação ***CV*** (%) foi calculado conforme equação [19].

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \qquad [19]$$

6.1 Resultado com o abrasômetro mecanizado

A tabela 18 apresenta os resultados dos ensaios realizados no LFS-USP e LDS Faculdade SATC, ambos realizados utilizando o equipamento mecanizado.

TABELA 18 - resultados dos ensaios pelo método mecanizado LFS e LDS

Laboratório	***LFS-USP***				***LDS-SATC***		
Amostra n°	1	2	3	4	1	2	3
Massa inicial (g)	139,512	139,652	140,078	197,779	138,637	138,417	144,362
Massa final (g)	138,542	138,751	139,190	196,858	137,740	137,524	143,552
Perda massa (g)	0,970	0,901	0,888	0,921	0,897	0,893	0,81
Densidade (g/cm³)	7,85	7,85	7,85	7,85	7,85	7,85	7,85
Volume perdido (mm³)	123,567	114,777	113,121	117,325	114,268	113,758	103,185
Média volume perdido - $\bar{x}$ (mm³)	117,197				110,403		
Desvio padrão - s (mm³)	4,585				6,257		
Resultado do ensaio (mm³)	**117,2 ± 4,6**				**110,4 ± 6,2**		
Coeficiente de variação - CV (%)	**3,9**				**5,6**		

A média de volume perdido no abrasômetro do LDS Faculdade SATC é 5,8% menor em relação ao abrasômetro do LFS-USP, sendo que os resultados deste laboratório apresentam uma dispersão menor em torno da média, logo com menor coeficiente de variação.

Cabe destacar que o tipo de areia utilizada no LFS-USP e LDS Faculdade SATC é do mesmo tipo e fornecedor, porém de lotes diferentes, e que a vazão de areia abrasiva do primeiro abrasômetro era 6% superior ao limite estipulado pela norma, o que pode ter contribuído para um resultado maior de desgaste.

Pode-se afirmar que os resultados apresentados por ambas às máquinas de ensaio podem ser considerados satisfatórios, já que o coeficiente de variação é inferior ao máximo estipulado pela norma, que é 7,5%.

6.2 Resultados com o abrasômetro instrumentado

Os resultados do abrasômetro instrumentado do LDS Faculdade SATC serão comparados em primeiro momento neste trabalho aos resultados do abrasômetro do laboratório da empresa Rijeza Metalurgia. Como relatado na seção 3.2, esta máquina apresenta controle automatizado e sistema de supervisão através de IHM, porém a força normal aplicada ao corpo de prova se dá por braço de alavanca e seleção de blocos de massa. A tabela 19 apresenta os resultados dos ensaios, ambos pelo método instrumentado.

TABELA 19 - resultados dos ensaios pelo método instrumentado: RIJEZA e LDS

Laboratório	***RIJEZA***				***LDS-SATC***			
Amostra n°	1	2	3	4	1	2	3	4
Massa inicial (g)	139,549	138,165	145,673	139,935	137,061	138,366	141,854	139,807
Massa final (g)	138,413	137,003	144,356	138,626	136,287	137,585	141,098	138,992
Perda massa (g)	1,136	1,162	1,317	1,309	0,774	0,781	0,756	0,815
Densidade (g/cm³)	7,850	7,850	7,850	7,850	7,850	7,850	7,850	7,850
Volume perdido (mm³)	144,713	148,025	167,771	166,752	98,599	99,490	96,306	103,822
Média volume perdido - $\bar{x}$ (mm³)	156,815				99,554			
Desvio padrão - s (mm³)	12,145				3,145			
Resultado do ensaio (mm³)	**156,8 ± 12,1**				**99,5 ± 3,1**			
Coeficiente de variação - CV (%)	**7,7**				**3,1**			

Os resultados de desgaste abrasivo para os ensaios do primeiro laboratório apresentam uma grande amplitude, porém, observa-se coerência de valores entre os ensaios 1 e 2, e 3 e 4. Esta diferença de resultados pode ter como causa um entupimento do bico dosador de areia abrasiva (por um pedaço de parafuso). Assim, com menor vazão, o desgaste foi menor nas duas primeiras amostras. Este fato acarretou grande dispersão de valores em torno do valor central, acarretando em um coeficiente de variação superior ao estipulado pela norma.

Ainda assim, é evidente o acentuado desgaste provocado nos corpos de prova do primeiro laboratório em relação aos do segundo. Cabe destacar que a areia utilizada no abrasômetro da empresa Rijeza e LDS Faculdade SATC eram do mesmo tipo e fornecedor, com igual vazão e de mesmo lote. Como hipótese para explicar esta diferença de resultados, citam-se algumas fontes de incerteza deste ensaio: *i)* o valor da força normal aplicado pode ter sido superior a 130 N; *ii)* a borracha que reveste a roda ou sua dureza não condizem com os parâmetros da norma; *iii)* abrasão linear superior ao ajustado na máquina.

Na impossibilidade de novos testes no primeiro laboratório, buscou-se na literatura valores de referência para validar os resultados do abrasômetro instrumentado do LDS Faculdade SATC. Para os abrasômetros pesquisados e apresentados, de acordo com Villabón (2006) o abrasômetro instrumentado em seu trabalho relata resultados com um coeficiente de variação de 4,3%. O abrasômetro MTT em ensaio reportado pelo fabricante apresentou coeficiente de variação de

2,1% e o abrasômetro desenvolvido por Dallmann (2012), um coeficiente de 4,3%. Desta forma, também pode-se considerar satisfatório os resultados obtidos com o abrasômetro no modo instrumentado, que apresentaram um coeficiente de variação de 3,1%.

A tabela 20 apresenta os resultados dos ensaios realizados no LDS Faculdade SATC pelo método instrumentado e mecanizado.

TABELA 20 - resultados dos ensaios pelo método instrumentado e mecanizado no LDS

Laboratório	***LDS-SATC INSTRUMENTADO***				***LDS-SATC MECANIZADO***		
Amostra n°	1	2	3	4	1	2	3
Massa inicial (g)	137,061	138,366	141,854	139,807	138,637	138,417	144,362
Massa final (g)	136,287	137,585	141,098	138,992	137,740	137,524	143,552
Perda massa (g)	0,774	0,781	0,756	0,815	0,897	0,893	0,81
Densidade (g/cm³)	7,850	7,850	7,850	7,850	7,850	7,850	7,850
Volume perdido (mm³)	98,599	99,490	96,306	103,822	114,268	113,758	103,185
Média volume perdido - $\bar{x}$ (mm³)	99,554				110,403		
Desvio padrão - s (mm³)	3,145				6,257		
Resultado do ensaio (mm³)	**99,5 ± 3,1**				**110,4 ± 6,2**		
Coeficiente de variação - CV (%)	**3,1**				**5,6**		

De acordo com a tabela 20, os dois modos de funcionamento descritos apresentaram resultados condizentes aos especificados na norma *ASTM G65-16.* No modo instrumentado, a média de volume perdido foi 9,9% inferior ao modo mecanizado, apresentando melhor repetitividade dos resultados. Pode-se verificar um aumento na confiabilidade dos resultados apresentados pela nova concepção da máquina, já que a redução significativa do coeficiente de variação também pode ser traduzida como uma redução do erro aleatório inerente à máquina/sistema de medição.

Os ensaios reportados foram realizados em um mesmo dia, pelo mesmo operador, com temperatura no laboratório de 20 ± 2℃. Para se obter outra estimativa da repetitividade dos resultados do abrasômetro instrumentado, foi realizado em dia seguinte uma nova bateria de ensaios, porém com temperatura de laboratório de 22 ± 2℃. Os corpos de prova utilizados foram os mesmos do dia anterior, porém aproveitando a outra face disponível (face B). Foram mantidas a

mesma sequência e condições de ensaio, e também o operador. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 21.

TABELA 21 - resultados dos ensaios no abrasômetro do LDS em dias diferentes

Laboratório	***LDS - INSTRUMENTADO DIA 1***				***LDS - INSTRUMENTADO DIA 2***			
Amostra n° (face)	1(A)	2(A)	3(A)	4(A)	1(B)	2(B)	3(B)	4(B)
Perda massa (g)	0,774	0,781	0,756	0,815	0,762	0,777	0,744	0,805
Volume perdido (mm³)	98,599	99,490	96,306	103,822	97,070	98,980	94,777	102,547
Média volume perdido - $\bar{x}$ (mm³)	99,554				98,343			
Desvio padrão - s (mm³)	3,145				3,287			
Resultado do ensaio (mm³)	**99,5 ± 3,1**				**98,3 ± 3,3**			
Coeficiente de variação - CV (%)	**3,1**				**3,3**			

Percebe-se um pequeno aumento no coeficiente de variação, para os ensaios realizados no segundo dia, para as mesmas condições, porém dentro da incerteza dos resultados. O resultado esperado, para uma probabilidade 95,45%, pode ser calculado pela equação [20].

$$\mathrm{Re} = \pm t \times u = \pm 3{,}307 \times 3{,}1 = \pm 10{,}2 \qquad [20]$$

onde:

Re - repetitividade;

t - coeficiente t de *Student* para 95,45%de probabilidade e $n-1$ graus de liberdade;

u - incerteza padrão obtida a partir da amostra com $n-1$ graus de liberdade.

A faixa definida por ± 10,2 mm^3 corresponde ao intervalo dentro do qual o erro aleatório do abrasômetro é esperado. Percebe-se que a diferença entre os dois últimos resultados está dentro dessa faixa. Segundo Albertazzi e Sousa (2008) “a incerteza padrão e a repetitividade são parâmetros com os quais é possível, de alguma forma, quantificar a intensidade do erro aleatório de um sistema de medição. São informações importantes e que permitem uma expressão confiável para o resultado da medição”. Na sequência, uma nova bateria de ensaios foi realizada,

porém modificando a granulometria da areia abrasiva utilizada. A tabela 22 apresenta os resultados dos ensaios realizados pelo método instrumentado utilizando areia ANB 50 e ANB 100.

TABELA 22 - resultados dos ensaios método instrumentado no LDS com areia ANB 50 e 100

Laboratório	***LDS-SATC areia ANB 50***				***LDS-SATC areia ANB 100***		
Amostra n°	1	2	3	4	1	2	3
Massa inicial (g)	137,061	138,366	141,854	139,807	138,572	138,784	139,218
Massa final (g)	136,287	137,585	141,098	138,992	138,166	138,400	138,835
Perda massa (g)	0,774	0,781	0,756	0,815	0,406	0,384	0,383
Densidade (g/cm³)	7,850	7,850	7,850	7,850	7,850	7,850	7,850
Volume perdido (mm³)	98,599	99,490	96,306	103,822	51,720	48,917	48,790
Média volume perdido - $\bar{x}$ (mm³)	99,554				49,809		
Desvio padrão - s (mm³)	3,145				1,656		
Resultado do ensaio (mm³)	**99,5 ± 3,1**				**49,8 ± 1,6**		
Coeficiente de variação - CV (%)	**3,1**				**3,2**		

Através da análise dos dados da tabela 22, percebe-se que o volume de material retirado das amostras é menor (redução de 49,9%) quando se utiliza areia ANB 100, ou seja, há uma redução no desgaste em função da redução do tamanho do grão da areia abrasiva, conforme divulgado na literatura e também de acordo com os resultados obtidos por Villabón (2006). Para tamanhos menores de partícula abrasiva em seu estado inicial, o ângulo de ataque será menor, e consequentemente, diminuindo a capacidade de remoção de material. A figura 58 apresenta a área de desgaste de alguns corpos de prova após ensaio. Percebe-se uma marca de desgaste uniforme conforme recomenda a norma *ASTM G65-16*.

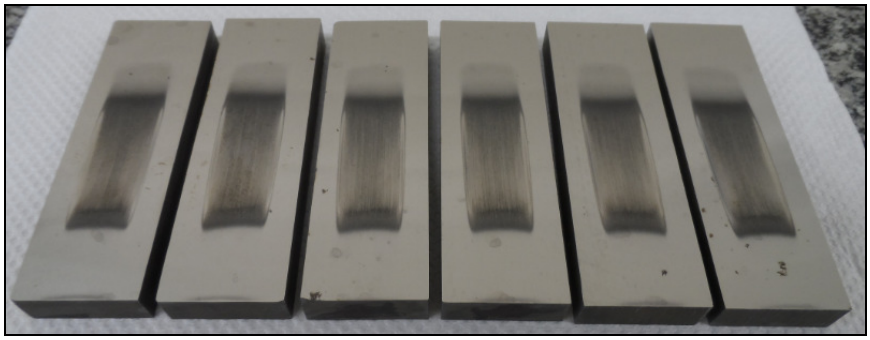


FIGURA 58 - Corpos de prova após ensaio.

A tabela 23 apresenta a média dos dados de algumas variáveis obtidas pelo sistema de supervisão durante a execução dos ensaios reportados na tabela anterior.

Tabela 23 - força normal, força tangencial, coeficiente de atrito e frequência rotacional médios

Prova n°(tipo areia)	*Média F_N*	*Média F_T*	*Coeficiente atrito μ*	*Média frequência rotacional da roda*
1 (ANB 50)	129,32	42,57	0,32	201,66
2 (ANB 50)	129,51	42,38	0,32	201,61
3 (ANB 50)	129,33	41,62	0,31	201,69
4 (ANB 50)	129,04	42,27	0,32	201,68
Média da média - $\bar{x}$	***129,3***	***42,21***	***0,32***	***201,66***
Desvio padrão - s	***0,19***	***0,41***	***0***	***0,04***
1 (ANB 100)	129,37	58,25	0,44	200,42
2 (ANB 100)	129,34	57,72	0,44	200,61
3 (ANB 100)	129,47	58,06	0,44	200,63
Média da média- $\bar{x}$	***129,4***	***58,01***	***0,44***	***200,56***
Desvio padrão - s	***0,07***	***0,27***	***0***	***0,11***

As figuras 59 e 60 apresentam as amplitudes assumidas por estas variáveis (eixo das ordenadas) durante o período de um ensaio (minutos - eixo das abscissas) utilizando areia ANB 50 e 100, respectivamente.

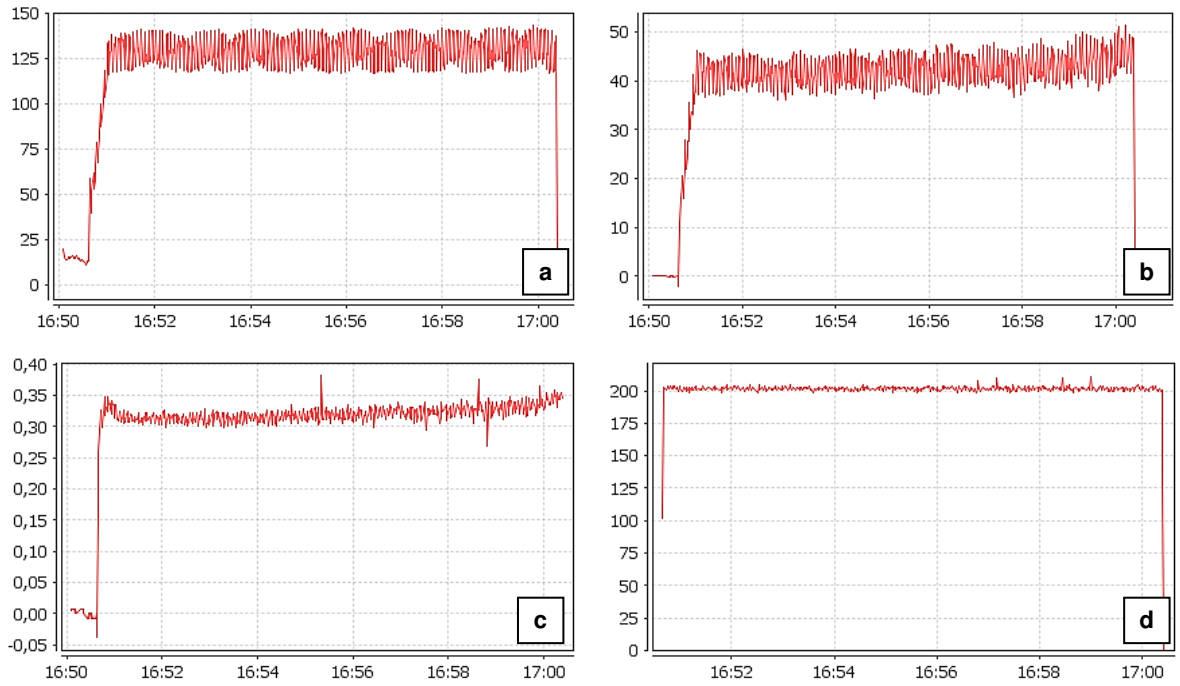


FIGURA 59 - Dados de ensaio de desgaste com areia ANB 50.
a) Força Normal; b) força Tangencial; c) coeficiente de atrito; d) frequência rotacional da roda.

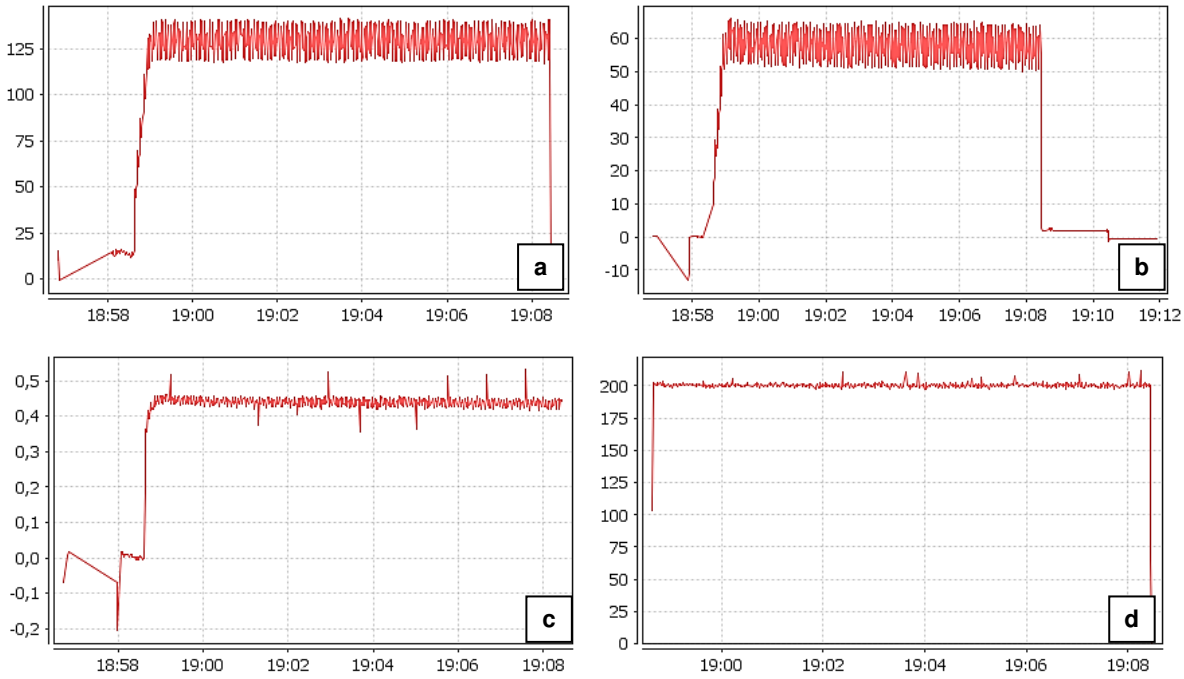


FIGURA 60 - Dados de ensaio de desgaste com areia ANB 100.
a) Força Normal; b) força Tangencial; c) coeficiente de atrito; d) frequência rotacional da roda.

Para os valores adquiridos para a força normal e força tangencial, percebe-se uma oscilação em torno do *set point* (130 N). Esta oscilação pode estar associada a um somatório de diversos fatores: *i)* perturbações devido à mudança contínua no contato/choque dos grãos de areia com a roda de borracha e corpo de prova; *ii)* dinâmica do sistema mecânico da mesa horizontal; *iii)* tipo de controle empregado (PID) e tempo de resposta do sistema eletroeletrônico.

Com a utilização de areia abrasiva com granulometria menor, há um aumento (≈ 37,5%) no valor da força tangencial e consequentemente do coeficiente de atrito, condizente com os resultados de Villabón (2006), mas que contrariam os resultados apresentados por Stevenson e Hutchings (1996), em que o coeficiente de atrito obtido não muda com o tamanho do abrasivo (esta conclusão pode estar relacionada à sensibilidade do abrasômetro instrumentado para medição da força tangencial).

Analisando os gráficos da frequência rotacional da roda de borracha, observa-se que a oscilação das amplitudes é pequena em comparação ao *set point* (200 rpm) ajustado no sistema supervisório. Porém, através da tabela 23 observa-se que o valor médio da frequência rotacional da roda de borracha sofre uma pequena queda (≈ 0,54%) em função do aumento do coeficiente de atrito devido a troca da granulometria da areia.

7 CONCLUSÃO

Para a realização deste trabalho diversas etapas se seguiram, iniciando com uma fundamentação científica e tecnológica através das disciplinas do programa de mestrado, seguido de uma pesquisa/projeto de dissertação com estimativa de cronograma e investimentos necessários, alteração do funcionamento e testes de uma máquina de ensaio e posteriormente a elaboração da documentação.

Durante a etapa de pesquisa para dissertação procurou-se entender os requisitos da norma *ASTM G65-16*, verificar o “estado da arte” para máquinas de desgaste por abrasão e assim propor mudanças no abrasômetro original, através de sua automação (instrumentação, controle e supervisão).

No desenvolvimento do trabalho, as instalações elétricas foram executadas seguindo as recomendações técnicas e de segurança. Elementos mecânicos foram selecionados baseados nas exigências e esforços a que estão submetidos, e a montagem da estrutura mecânica foi realizada cuidadosamente em função do nível de precisão que uma máquina de ensaio deve apresentar. A utilização de motor de passo como tecnologia adotada para o acionamento da mesa horizontal mostrou-se eficaz e econômica, se comparado ao acionamento por servomotor ou atuador pneumático. Os dispositivos adquiridos para o sistema de controle e instrumentação apresentam padrão industrial, justificando-se em função de uma maior confiabilidade (robusto, precisão) para a nova concepção do abrasômetro.

Para o sistema de supervisão optou-se pela utilização de software livre, que apresentou algumas restrições, mas ao final suas funcionalidades atenderam as exigências da máquina. Com o sistema de supervisão implementado, é possível alterar alguns parâmetros, verificar em tempo real o andamento e ter os registros de dados do ensaio de desgaste por abrasão. Através de comandos e alarmes disponíveis na interface do supervisório a operação da máquina é facilitada para o operador.

Analisando os aspectos operacionais e metrológicos, os resultados dos ensaios de desgaste realizados com a concepção instrumentada do abrasômetro se comparados a concepção mecanizada apresentaram uma menor dispersão, assim pode-se afirmar que as modificações propostas e realizadas tiveram êxito. Quando os resultados dos ensaios são comparados aos resultados de outras máquinas, estes também se apresentam coerentes, dado que as diferenças encontradas estão

dentro das incertezas dos sistemas. A máquina instrumentada também apresenta bom desempenho quando teve seus próprios resultados confrontados. Embora seja impossível anular todos os erros de um sistema de medição, pode-se concluir que com este trabalho houve uma redução de suas causas, acarretando em aumento da confiabilidade metrológica do abrasômetro do LDS Faculdade SATC.

Analisando o aspecto econômico da solução desenvolvida, a tabela 24 apresenta uma estimativa do investimento feito para automatizar o funcionamento do abrasômetro original.

Tabela 24 - investimento feito no abrasômetro do LDS Faculdade SATC

Item	***Descrição***	***Valor (R$)***
1	Materiais e equipamentos para instalação elétrica	1.165,00
2	Instrumentação e controle	7.850,00
3	Materiais e peças para estrutura mecânica	3.000,00
4	Transporte/frete de equipamentos	350,00
5	Serviços de terceiros	600,00
6	Fabricação de peças, energia elétrica	2.500,00
Subtotal montagem eletromecânica e automação		**15.465,00**
7	Projeto eletromecânico e de automação	4.000,00
8	Valor investido na máquina original	5.869,00
Total		**25.334,00**

A tabela 25 traz um comparativo, em dólares norte americano, do valor investido no abrasômetro do LDS Faculdade SATC com o custo de outras máquinas de ensaio apresentadas neste trabalho.

Tabela 25 - comparação de custos entre abrasômetros

Fabricante	***Modelo***	***Valor (US $)***	***URL/Site***
LDS-Faculdade SATC	-----	8,070	www.satc.edu.br
Rijeza Metalurgia	-----	20,700	www.rijeza.com.br
Phoenix Tribology (Inglaterra)	TE65AL	181,688	www.panambra.com
MTT Co. (EUA)	ASTM.G0065.10	16,925	www.mttusa.com

Pode-se observar que, mesmo com um aumento considerável em relação ao valor inicial previsto, o abrasômetro do LDS se apresenta competitivo em relação ao valor de outras máquinas.

Para a instituição SATC, financiadora do projeto, há como resultado uma máquina de ensaio disponível no Laboratório de Desgaste de Superfície que permitirá a continuidade de desenvolvimento de projetos na área de Tribologia, seja em nível de ensino (Tecnólogo em Manutenção Industrial e Engenharia Mecânica) como também em nível de pesquisa (Mestrado Profissional em Metalurgia).

Para o parque industrial metal-mecânico da região é oportuno que instituições de ensino e pesquisa apresentem laboratórios com máquinas de ensaio que possibilitem simular condições a que seus produtos ou peças estarão expostos, abrindo caminho para novas parcerias e aproximando a comunidade científica do setor produtivo. Nesse sentido o projeto viabilizou uma importante melhoria de infraestrutura laboratorial na SATC que abre novas possibilidades de desenvolvimento tecnológico para as empresas.

8 PERSPECTIVAS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como desdobramentos deste trabalho para projetos futuros segue-se algumas sugestões em relação ao funcionamento do abrasômetro e procedimentos de ensaio:

- Dotar a máquina de um sistema de aspiração de poeira, que é acentuada durante os ensaios, reduzindo a condição insalubre ao operador e provocando menos danos aos elementos mecânicos;
- Adaptar ao bico dosador de areia abrasiva uma válvula com acionamento elétrico para que sua abertura e fechamento sejam realizados automaticamente pelo sistema de controle antes e após os ensaios;
- Prover a atualização do software ScadaBR para nova versão, já que a primeira versão apresenta algumas limitações e instabilidades de comunicação na rede Modbus;
- Aprofundar e estudo da dinâmica da mesa horizontal e sua relação com a força normal aplicada, procurando reduzir as oscilações durante a execução dos ensaios;
- Aprofundar o estudo da malha de controle da força normal, e em caso necessário, alterar parâmetros do sistema buscando uma melhor sintonia e reduzindo as oscilações durante a execução dos ensaios;
- Executar uma maior quantidade de ensaios, para que se obtenha um histórico da repetitividade da máquina, seja no modo instrumentado ou no modo mecanizado;
- Realizar outros ensaios modificando o tipo de material do corpo de prova e o carregamento da força normal e sua relação com os valores obtidos da força tangencial, coeficiente de atrito e taxa de desgaste;
    - Utilizar um perfilômetro na avaliação dos resultados, pois a cratera de desgaste pode ser maior que a dada pela variação de massa durante o ensaio, podendo influenciar na dispersão dos resultados.

REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial.** 1ª ed.; Barueri, Manole, 2008. 408p.

ALBERTIN, E. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Laboratório de Processos Metalúrgicos. Disponível em: http://tricorrmat.ufes.br/sites/tricorrmat.ufes.br/files/field/anexo/Eduardo%20Albertin%20%28IPT%29.pdf. Acesso em 10 de março de 2017.

ALMEIDA, P. S. **Manutenção Mecânica Industrial.** 1ª ed., São Paulo, Érica, 2014. 255p.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Friction, Lubrication and Wear Technology. Metals Handbook.** 2ª ed., Metals Park, Ohio, 1992. 942p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM G40-15. Standard Terminology Relating to Wear and Erosion.** West Conshohocken, PA, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM G65-16. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.** West Conshohocken, PA, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12042. **Materiais Inorgânicos - Determinação do Desgaste por Abrasão.** Rio de Janeiro, 2012.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas.** 2ª ed. V.1, Rio de Janeiro, LTC, 2014. 385p.

BIZ, E. J. **Qualificação da Máquina de Ensaio de Desgaste por Abrasão.** Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade SATC, Criciúma, Jul., 2016. 17p.

BLAU, P. J. **Fifty year of research on the wear of metal.** Tribology International, V.30, N.5, p.328-331, 1997.

CASTRO, C. A. F. **Resistência ao Desgaste Abrasivo das Sapatas de Trator de Esteira após Processo de Recuperação.** Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010. 92p.

CASTRO, R. M. **Desenvolvimento de um Tribômetro Rotativo com Sistema Automatizado de Medição e Monitoramento dos Dados.** Dissertação de Mestrado, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Agosto, 2015. 146p.

COZZA, R. C. **Estudo do Comportamento do Coeficiente de Desgaste e dos Modos de Desgaste Abrasivo em Ensaios de Desgaste Micro Abrasivo.** Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. 192p.

CHATTOPADHYAY, R. **Green Tribology, Green Surface Engineering, and Global Warming.** ASM International, 2014. 336p.

CUNHA, L. B. **Elementos de Máquinas.** 1ª ed., Rio de Janeiro, LTC, 2013. 319p.

DALMANN, J. **Projeto, Construção e Validação de um Abrasômetro Tipo Roda de Borracha.** Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, Agosto, 2012. 78p.

FRANCHI, C. M. **Controle de Processos Industriais.** 1ª ed., São Paulo, Érica, 2011. 255p.

FRANCHI, C. M. **Instrumentação de Processos Industriais.** 1ª ed., São Paulo, Érica, 2015. 355p.

GEE, M. G.; GANT, A.; HUTCHINGS, I. M. **Measurement Good Practice Guide: Rotating Wheel Abrasive Wear Testing.** Teddington, National Physical Laboratory, N.55, Março, 2002. 44p.

GOMES, L. S. M. **Biomateriais em Artroplastia de Quadril: Propriedades, Estrutura e Composição.** Disponível em: http://drmarcelino.com.br/uploads-publicacoes/7147522.pdf. Acesso em 10 de novembro de 2016.

GROOVER, M. P. Automação Industrial e Sistemas de Manufatura. 3ª ed., São Paulo, Pearson, 2011. 582p.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 1ª ed., Londres, Edward Arnold, 1992. 273p.

HUTCHINGS, I. M.; STEVENSON, A. N. J. **Development of the Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Test.** Wear, Elsevier, Nova York, V. 195, p.232-240, Julho, 1996.

LEITE, R. V. M. **Estudo Comparativo entre Ligas Resistentes ao Desgaste Abrasivo, Aplicadas por Soldagem, em Chapas Metálicas para Fabricação de Placas Antidesgastes**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Agosto, 2008. 95p.

LEITE, R. V. M.; MARQUES, P. V. **Estudo Comparativo da Resistência ao Desgaste Abrasivo do Revestimento de Três Ligas Metálicas Utilizadas na Indústria, Aplicadas por Soldagem com Arames Tubulares.** Soldagem & Inspeção, São Paulo, V.14, N.4, p. 329-335, Out/Dez, 2009.

LIMA, A. C. **Estudo da Aplicação de Revestimento Duro por Soldagem com Arames Tubulares quanto à Resistência ao Desgaste de Facas Picadoras de Cana de Açúcar.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008. 262p.

MARTINS, J. P. L. **Estudo, Concepção, Desenvolvimento e Construção de um Tribômetro Linear para Ensaios em Superfícies Flexíveis**. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, Novembro, 2013. 112p.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada.** 4ª ed., Porto Alegre, Bookman, 2013. 1028p.

OBR EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA. **Manual de seleção e dimensionamento de fusos de esferas.** Disponível em: http://www.obr.com.br/catalogos/OBR_fusos.pdf. Acesso em 10 de janeiro de 2017.

OLIVEIRA, C. G.; SILVA, I. P. P. **Os Estudos Tribológicos no Ensino de Engenharia Mecânica.** Revista de Ensino de Engenharia, Brasília, V.34, N.2, p.3-10, 2015.

OLIVEIRA, C. K. N. **Avaliação de Camadas de Carbonetos e de Boretos produzidas nos Aços AISI H13 e D2 por meio de Tratamentos Termo-reativos.** Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. 116p.

PANTALEÓN, E. M.; TANAKA, D. K.; BERNARDES, F. G. **Análise das Variações do Coeficiente de Atrito e as Correlações com os Mecanismos de Desgaste.** Revista Holos/Instituto Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Ano 28, V.1, 2012.

PÉREZ, J. A. L. **Controle Robusto de Força em Atuadores Hidráulicos Aplicando a Teoria de Realimentação Quantitativa.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Outubro, 2012. 205 p.

PROIETE, R. C.; COZZA, R. C.; SINATORA, A. **Modificações Estruturais de Máquina para Ensaios de Desgaste por Deslizamento.** VII Encontro de Iniciação Científica LFS/EPUSP, São Paulo, 2006.

RABINOWICZ, E. **Friction and Wear of Materials.** 2ª ed., Nova Jersey, John Wiley & Sons, 2013. 336p.

RIJEZA METALURGIA. Disponível em: http://www.rijeza.com.br. Acesso em 5 de novembro de 2016.

SANTOS, M. M. D. **Supervisão de Sistemas: Funcionalidades e Aplicações.** 1 ª ed., São Paulo, Érica, 2014. 118p.

SANTOS, W. C. et al. **Desenvolvimento de Dispositivo e Estudo do Comportamento ao Microdesgaste Abrasivo do Aço AISI 420 Temperado e Revenido.** Revista Matéria, V.20, N.2, p.304-315, 2015.

SCADABR. Disponível em: http://www.scadabr.com.br. Acesso em 5 de setembro de 2016.

SIEGEL, M. **Análise Sistemática dos Processos de Desgaste. Classificação dos Fenômenos de Desgaste.** Metalurgia & Materiais, São Paulo, V.53, N.470, p.619-622, Out, 1997.

SINATORA, A. **Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte.** São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005. Disponível em: <http:// pt.scribd.com/document/289654528/Tribologia-Um-resgate-historico-e-o-estado-da-arte>. Acesso em 19 de setembro de 2016.

STACHOWIAK, G. W. **Wear: Materials, Mechanisms and Practice.** 1ª ed., Nova Jersey, John Wiley & Sons, 2005. 480p.

THOMSONLINEAR. **Manual de seleção e dimensionamento de fusos de esferas.** Disponível em: thomsonlinear.com/downloads/screws/LeadScrews_BallScrews_BallSplines_ctpt.pdf. Acesso em 10 de janeiro de 2017.

TOZETTI, K. D. **Efeito da Carga e do Tamanho do Grão Abrasivo no Desgaste do Ferro Fundido Branco 19,9% Cromo e 2,9% Carbono.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espirito Santo, Vitória, Abril, 2013. 102p.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Laboratório de Fenômenos da Superfície. Disponível em: http://www.lfs.usp.br. Acesso em 10 de fevereiro de 2017.

VILLABÓN, L. **Construção e Instrumentação de Abrasômetro do Tipo Roda de Borracha para o Estudo do Comportamento Tribológico dos Aços**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. 82p.

VILLABÓN, L.; SINATORA, A. **Construção e Instrumentação de Abrasômetro do Tipo Roda de Borracha para o Estudo do Comportamento Tribológico dos Aços.** Mecânica Experimental, Lisboa, V.13, p.1-11, 2006.

WEG AUTOMAÇÃO. **Guia de Aplicação de Inversores de Frequência.** 3ª ed., Jaraguá do Sul, 2005. 265p.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and Wear of Materials.** 1ª ed., Nova York, Elsevier, 1987. 559p.

APÊNDICE A – Exemplo de relatório gerado após ensaio no Abrasômetro.

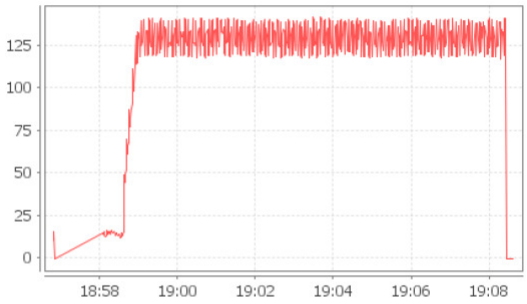
ENSAIO DESGASTE POR ABRASÃO - NORMA ASTM G65

Início da execução 2017/06/28 21:48
Duração da execução 3.40s
Faixa de datas 2017/06/23 18:56 para 2017/06/23 19:12
Registros 2342

Estatísticas

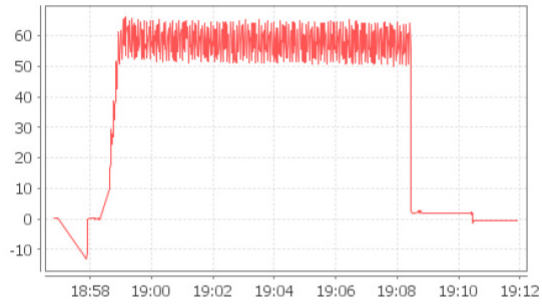
CLP_Delta - Leitura_Força_Normal

Tipo de dados Numérico
Início -0,74
Mínimo -0,74 @ 2017/06/23 18:56
Máximo 141,24 @ 2017/06/23 19:03
Média 78,7
Soma 73702,46
Contagem 610



CLP_Delta - Leitura_Força_Tangencial

Tipo de dados Numérico
Início 0
Mínimo -13,16 @ 2017/06/23 18:57
Máximo 66 @ 2017/06/23 18:59
Média 35,4
Soma 32908,6
Contagem 653



CLP_Delta - Leitura_Coeficiente_Atrito

Tipo de dados Numérico
Início 0,44
Mínimo -0,21 @ 2017/06/23 18:57
Máximo 0,53 @ 2017/06/23 19:07
Média 0,39
Soma 257,36
Contagem 624

CLP_Delta - Leitura_RPM_Roda

Tipo de dados Numérico
Início 0
Mínimo 0 @ 2017/06/23 18:56
Máximo 212,1 @ 2017/06/23 19:08
Média 123,1
Soma 90872,3
Contagem 455

CLP_Delta - D40_Ajuste_RPM

Tipo de dados Numérico
Início 200 [0...210 rpm]
Mínimo 200 [0...210 rpm] @ 2017/06/23 18:56
Máximo 200 [0...210 rpm] @ 2017/06/23 18:56
Média 200 [0...210 rpm]
Soma 0 [0...210 rpm]
Contagem 0

CLP_Delta - D32_Ajuste_total_voltas

Tipo de dados Numérico
Início 2000 [0...10.000]
Mínimo 2000 [0...10.000] @ 2017/06/23 18:56
Máximo 2000 [0...10.000] @ 2017/06/23 18:56
Média 2000 [0...10.000]
Soma 0 [0...10.000]
Contagem 0

16/08/2017 ScadaBR (powered by Mango)

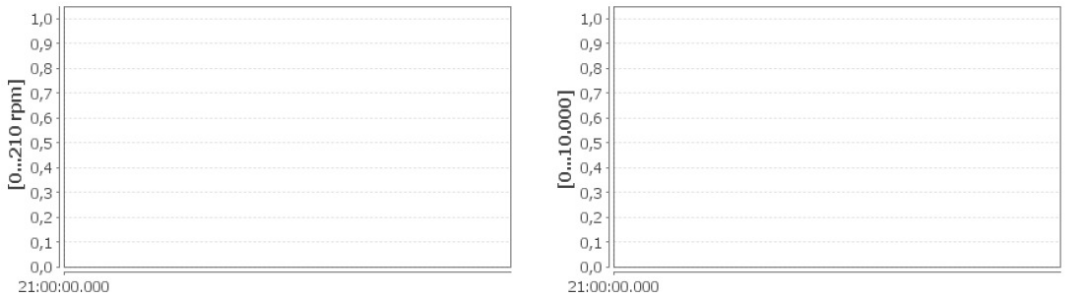
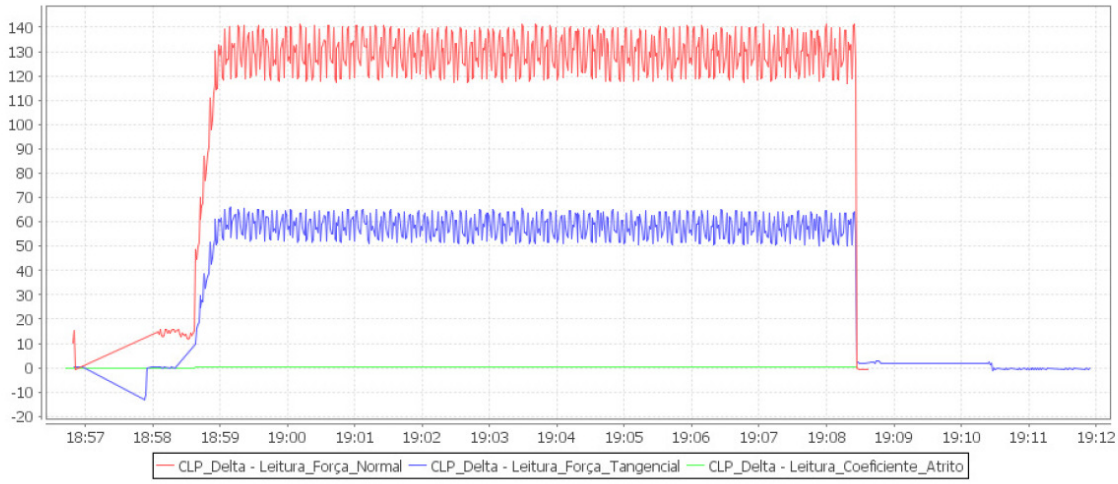


Gráfico consolidado



Comentários do data point

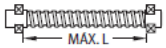
Sem comentário de data point para relacionar

©2006-2011 Serotonin Software Technologies Inc., Todos os direitos reservados.

APÊNDICE B – Planilha utilizada para preenchimento de dados dos ensaios.

<table>
<tr><th colspan="5">TESTE RODA DE BORRACHA/AREIA SECA - ASTM G65-16</th></tr>
<tr><td colspan="4">1. Dados Gerais</td><td>Referência Norma</td></tr>
<tr><td colspan="4">Local:</td><td rowspan="8"></td></tr>
<tr><td colspan="4">Laboratório:</td></tr>
<tr><td colspan="3">Responsável:</td><td>E-mail:</td></tr>
<tr><td>Data:</td><td>Hora:</td><td colspan="2">Temperatura ambiente (°C):</td></tr>
<tr><td colspan="4">Executante do ensaio:</td></tr>
<tr><td colspan="4">Abrasômetro: ( ) mecanizado ( ) instrumentado</td></tr>
<tr><td colspan="4">2. Dados Corpo de Prova</td></tr>
<tr><td colspan="3">Tipo de Material:</td><td>Amostra n°:</td></tr>
<tr><td colspan="4">Densidade (g/cm³):</td></tr>
<tr><td colspan="4">Dimensões (mm):</td><td>25 x 76 x 3,2 - 12,7</td></tr>
<tr><td colspan="4">Tratamento Térmico/Dureza (HRC):</td><td>47 - 48</td></tr>
<tr><td colspan="4">Preparação superfície/Rugosidade (µm):</td><td>0,8 máx.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Massa Inicial (g):</td><td>Massa Final (g):</td><td>Resolução 0,001 g</td></tr>
<tr><td colspan="3">Perda de Massa (g)</td><td>Perda de volume (mm³):</td><td rowspan="4"></td></tr>
<tr><td colspan="3">Temperatura Inicial (°C):</td><td>Temperatura Final (°C):</td></tr>
<tr><td colspan="4">3. Dados Teste</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Areia</td><td colspan="2">Tipo:</td><td>Fornecedor:</td></tr>
<tr><td colspan="2">Granulometria:</td><td>Teor de Humidade (%):</td></tr>
<tr><td colspan="2">Vazão Inicial (g/min):</td><td>Vazão Final (g/min):</td><td>300 à 400</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Roda de Borracha</td><td>Fornecedor:</td><td colspan="2">Composição Básica:</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="3">Dureza (Shore A): 0° 90° 180° 270°</td><td>58 à 62</td></tr>
<tr><td colspan="2">Diâmetro Inicial (mm):</td><td>Diâmetro Final (mm):</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Rotação sem carga (rpm):</td><td>Rotação com carga (rpm):</td><td>200 ± 10</td></tr>
<tr><td colspan="3">Carga (kg):</td><td>Força Normal (N):</td><td>± 3%</td></tr>
<tr><td colspan="3">Tempo (min):</td><td>Distância (m):</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="5">Obs:</td></tr>
</table>

ANEXO A – Fator que depende do tipo de mancalização (C_s).

Fator de engastamento de extremidade - Velocidade crítica do parafuso			
Suportes de extremidade			C_S
A		Uma extremidade fixa, outra livre	0,36
B		Ambas as extremidades suportadas	1,00
C		Uma extremidade fixa, outra suportada	1,47
D		Ambas as extremidades fixas	2,23

Fonte: Thonsonlinear (2017).

ANEXO B – Vida útil média (V_h).

Centros de Usinagem	20.000h
Máquinas de Produção	10.000h

Máquinas de Controle Automáticas	15.000h
Dispositivos e outros Equipamentos	5.000h

Fonte: OBR (2017).

ANEXO C – Fator de operação (S_O).

Vibração e Impacto	Velocidade	So
Leve	V < 15 (m/min)	1,0 ~ 1,2
Média	15 < V < 60 (m/min)	1,2 ~1,5
Alta	V > 60 (m/min)	1,5 ~3,0

Fonte: OBR (2017).