



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO JOSÉ DE FIGUEIREDO NETO

**PROJETO, FABRICAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM ABRASÔMETRO RODA DE
BORRACHA NA CONFIGURAÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL**

RECIFE

2017

JOÃO JOSÉ DE FIGUEIREDO NETO

PROJETO, FABRICAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM ABRASÔMETRO RODA DE BORRACHA NA CONFIGURAÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Engenharia Mecânica – Projetos.

Orientador: Prof. Dr. Flávio José da Silva

RECIFE

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

- C475p Figueiredo Neto, João José de.
Projeto, fabricação e validação de um abrasômetro roda de borracha na configuração horizontal e vertical / João José de Figueiredo Neto. - 2017.
90 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Flávio José da Silva.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.
Inclui Referências.
1. Engenharia Mecânica. 2. Abrasômetro. 3. Roda de borracha.
4. Desgaste abrasivo. 5. Norma ASTM G-65. I. Silva, Flávio José da.
(Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-321

10 de março de 2017

“PROJETO, FABRICAÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM ABRASÔMETRO RODA DE BORRACHA NA CONFIGURAÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL”

JOÃO JOSÉ DE FIGUEIREDO NETO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. FLÁVIO JOSÉ DA SILVA
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. FLÁVIO JOSÉ DA SILVA (DEMEC/UFPE)

Prof. Dr. JORGE ANTONIO PALMA CARRASCO (PRH-PB203/DEMEC/UFPE)

Prof. Dr. JOSÉ MARIA ANDRADE BARBOSA (DEMEC/UFPE)

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus pela vida, saúde e todas as outras coisas boas que colocou em meu caminho;

A minha mãe, Edneuzza Maia de Barros, ao meu pai, Severino José de Figueiredo responsáveis pela formação do meu caráter, ajudando a superar momentos de dificuldade e por ter me dado oportunidade de estudar e conseguir um curso superior e uma pós-graduação em engenharia;

A minha vó, Palmira Maia de Barros, que veio a falecer recentemente, por todo carinho e apoio dados durante toda minha vida;

Aos meus irmãos e irmãs, Juliana de Barros Figueiredo, Joyce de Barros Figueiredo e Bruno Leandro Figueiredo, por acreditarem e por me apoiarem durante toda a minha jornada acadêmica;

A minha namorada, Elouize Santana de Barros, pelo carinho e apoio;

A toda a minha família, por tudo que eles representam para mim e por sempre torcerem para eu alcançar meus objetivos;

Ao Prof. Dr. Flávio José, meu orientador, amigo e exemplo profissional, por não ter permitido que eu interrompesse o processo e pela confiança e espero que ainda nos encontremos muito por essa nossa jornada. Obrigado, professor, e que venham os novos desafios;

Aos professores, funcionários e colegas do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica;

Ao apoio tecnológico dos laboratórios: Laboratório de Fenômenos de Superfície – LFS/USP, Laboratório de Tribologia e Materiais – LTM/UFU, Laboratório de Tecnologia de Atrito e Desgaste – LTAD/UFU, Laboratório de Soldagem – LAPROSOLDA/UFU, e Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais – TRICORRMAT/UFES;

Ao professor Amilton Sinatora, professor Washington Martins, professor Sinésio Franco, e professor Cherlio Scadian pelo apoio a realização do trabalho, por disponibilizar recursos materiais, apoio técnico, respeito e comprometimento. Obrigado!;

Ao Sr. Marcos Henrique Ara, pela atenção, paciência, comprometimento e ensinamentos nos primeiros ensaios com o Roda de Borracha;

Aos professores José Maria Barbosa e Jorge Palma Carrasco, que aceitaram compor a banca do seminário, e também pelas sugestões e análises significativas às quais tentei atender nesta versão definitiva do texto;

Ao PRH PB203 pelo apoio financeiro;

Quero agradecer a todos aqueles que sempre confiaram em mim, desde sempre.

Com vocês, queridos, divido a alegria desta experiência.

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos”.

(Isaac Newton)

RESUMO

Neste trabalho são apresentados o projeto, a construção e a validação de um Abrasômetro Roda de Borracha, tomando-se como referência os equipamentos da norma ASTM G-65 (configuração Vertical) e um proposto por Hutchings e Stevenson (configuração Horizontal). O projeto do equipamento apresentado propõe agregar em uma só máquina as duas configurações de teste Vertical e Horizontal, com um sistema de separação de abrasivos para quantificação da vazão mássica de areia que passa efetivamente na interface entre o corpo de prova e a roda de borracha. A metodologia deste trabalho foi dividida nas seguintes etapas: Projeto do Abrasômetro Roda de Borracha nas configurações Vertical e Horizontal, especificações de componentes, definição das condições de testes para calibração e metodologia de validação do equipamento. Os detalhes construtivos e operacionais do abrasômetro foram discutidos com base em um estudo interlaboratorial realizado, que possibilitou agregar ao projeto da máquina características que evitem possíveis erros experimentais, bem como observar divergências entre os procedimentos da norma ASTM G-65 e os praticados no Brasil. Para avaliar a reprodutibilidade e calibração do equipamento foram utilizadas amostras de aço AISI H13 e AISI D2, parâmetros dimensionais e especificações de teste conforme sugerido pela norma ASTM G-65. No estudo Interlaboratorial foram identificadas algumas características diferentes da norma em decorrência de características construtivas de equipamento e condições regionais de cada laboratório, como por exemplo, fornecedores de matéria prima padrão da norma. Após validação, os resultados mostraram que o equipamento construído opera em condições satisfatórias a norma ASTM G-65 com valores de perdas volumétricas de material das amostras conforme o esperado pela literatura e com os obtidos em equipamentos já existentes em outros laboratórios. A infraestrutura disponibilizada para a UFPE será capaz de avaliar resistência ao desgaste abrasivo de materiais e possibilitar desenvolvimento de pesquisas em Tribologia.

Palavras-chave: Abrasômetro. Roda de borracha. Desgaste abrasivo. Norma ASTM G-65.

ABSTRACT

In this work the design, construction and validation of a Rubber Wheel Abrasion Test are presented, taking as reference the equipments from the ASTM G-65 Standard (Vertical configuration) and from one proposed by Hutchings and Stevenson (Horizontal configuration). The design of the equipment presented proposes to add in a single machine the two Vertical and Horizontal test configurations with an abrasive separation system to quantify the mass flow rate of sand that effectively passes at the interface between the specimen and the rubber wheel. The methodology of this work was divided into the following steps: Design of the Rubber Wheel Abrasion Test in the Vertical and Horizontal configurations, component specifications, calibration test conditions definition and equipment validation methodology. The constructive and operational details of the abrasion test were discussed based on an interlaboratory study carried out for the present work, which allowed to add to the design of the machine characteristics that avoid possible experimental errors, as well as to observe differences between the procedures of the ASTM G-65 Standard and those practiced in Brazil. To evaluate the reproducibility and calibration of the equipment, AISI H13 and AISI D2 steel samples, dimensional parameters and test specifications were used as suggested by the standard ASTM G-65. In the interlaboratory study, some characteristics different from Standard were identified as a result of the constructive characteristics of the equipment and the regional conditions of each laboratory, such as suppliers of standard raw material from the Standard. After validation, the results showed that the built equipment operates under conditions satisfactory to the ASTM G-65 Standard with values of volumetric losses of material of the samples as expected in the literature and with those registered in the interlaboratory study. The infrastructure made available to the UFPE will be able to evaluate resistance to abrasive wear of materials and enable the development of research in Tribology.

Keywords: Abrasion Test. Rubber wheel. Abrasive wear. Standard ASTM G-65.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura		Página
1	Representação esquemática do equipamento roda de borracha/areia vertical.....	14
2	Representação esquemática do equipamento roda de borracha/areia horizontal conforme o proposto por Hutchings e Stevenson.....	14
3	Egípcios movimentando um monumento das pedreiras em El Bersheh: detalhe de um escravo derramando um líquido na areia.....	16
4	Definição de sistema tribológico.....	18
5	Processos de desgaste em função do tipo de movimento das interfaces e de presença de elemento interfacial.....	19
6	Classificação percentual da importância do desgaste abrasivo.....	20
7	Ilustração de partículas duras em movimento relativo causando abrasão (a) asperidades duras em uma das superfícies, (b) partículas abrasivas fixas/engastadas e (c) partículas abrasivas livres.....	21
8	Superfícies características de um material que sofreu desgaste abrasivo (a) por deslizamento a dois corpos ou três corpos e (b) por rolamento a três corpos....	22
9	Representação esquemática dos mecanismos de desgaste abrasivo.....	23
10	Variáveis do desgaste abrasivo.....	24
11	Distribuição de frequência de ângulos de corte para sílica com ângulo crítico de 90°	25
12	Velocidade de Desgaste relativo em função da razão entre Dureza do Abrasivo e Dureza do Metal.....	25
13	Diferentes níveis de testes Tribológicos.....	27
14	Desenho esquemático de quatro métodos para determinar as taxas de desgaste abrasivo: (a) Pino sobre disco, (b) Pino sobre placa, (c) pino sobre tambor e (d) roda de borracha.....	28
15	Equipamento roda de borracha para testes de abrasão areia seca desenho esquemático.....	31
16	Roda de Borracha.....	32
17	25X AFS 50/70 Teste de Areia Ottawa Sílica Co.....	32
18	(a) Areia Bico e (b) Posição do bocal Areia.....	33
19	(a) Fluxo de areia simplificada e (b) Fluxo de areia turbulenta.....	34
20	Marcas típicas de desgaste (Marcas desiguais indicam alinhamento impróprio ou desgaste da roda de borracha)	35
21	Fluxograma do planejamento na fase de projeto e construção.....	38
22	Cronograma de desenvolvimento e fabricação do protótipo.....	39
23	Esboço do projeto no SolidWorks.....	40
24	Dados geométricos do Perfil L.....	40
25	Base: (a) estrutura montada em CAD (b) estrutura no processo final de montagem.....	41
26	Bancada no processo final de montagem.....	42
27	Silo em 2D.....	42
28	Silo em 3D.....	43
29	Sistema de Amortecimento Estrutural em 3D.....	44
30	Compartimento de Armazenagem em 3D.....	44
31	Dimensões do Conjunto Motor/Redutor em 2D.....	45
32	Dimensões do eixo de saída.....	45
33	Inversor de Frequência WEG CFW500.....	46
34	Acoplamento Flexível.....	46

35	Mancal F208.....	47
36	Projeto eixo 3D.....	48
37	Tacômetro Digital.....	48
38	Roda de Borracha 2D.....	49
39	Bico Dosador Vertical 2D.....	51
40	Bico Dosador Horizontal.....	51
41	Sistema de alavanca 2D.....	52
42	Sistema de alavanca.....	52
43	Sistema de carga na Horizontal 2D.....	53
44	Sistema de carga na Horizontal.....	53
45	Célula de Carga.....	54
46	Calibração da carga nominal (a) Célula de Carga durante o ensaio na configuração vertical (b)	54
47	Porta Amostra: (a) Horizontal e (b) Vertical.....	55
48	Sistema de Separação de Abrasivo Laboratório E.....	56
49	Sistema de separação de abrasivo vertical.....	56
50	Sistema de separação de abrasivo horizontal.....	57
51	Coleta do abrasivo.....	59
52	a) Areia NBR 7412 N° 100 e b) AFS 50/70.....	60
53	Fluxograma das etapas para realização do ensaio.....	62
54	Desmagnetizador.....	63
55	Ultrassom.....	64
56	Balança de Precisão.....	65
57	Modelo 3D do Abrasômetro Roda de Borracha Vertical/Horizontal: a) posição para ensaios no modo “vertical” e b) posição para ensaios no modo “horizontal”	66
58	Durômetro.....	66
59	Resultado do Ensaio Interlaboratorial.....	69
60	Resultado do Ensaio no Laboratorial A.....	71
61	Resultado do Ensaio no Laboratório C.....	74
62	Resultado do Ensaio no Laboratório D.....	77
63	Amostra ensaiadas (Laboratório D)	78
64	Resultado do Ensaio no Laboratório E.....	79
65	Roda de Borracha Horizontal e Vertical UFPE.....	81
66	Resultados amostras fabricadas na UFPE.....	82
67	Resultados do ensaio para amostras de D2 fabricadas na UFPE.....	83
68	Resultados do ensaio para amostras de H13 fabricadas na UFPE.....	83
69	Resultados amostras fabricadas na UFPE e Laboratório A.....	84
70	Resultado do Ensaio Interlaboratorial e ensaio na UFPE.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1 Fórmula para borracha de Clorobutil.....	31
2 AFS 50/70 Teste de Areia é controlada com a seguinte faixa de tamanho usando US peneiras (Especificação E11)	32
3 Parâmetros de ensaio.....	34
4 Materiais e métodos para validação do Abrasômetro.....	36
5 Especificações da Roda de Borracha.....	49
6 Dados Técnicos do Abrasivo.....	61
7 Granulometria.....	61
8 Resultado do ensaio para o Aço AISI H13 (Laboratório A)	70
9 Resultado do ensaio para o Aço AISI D2 (Laboratório A)	70
10 Média do ensaio e Desvio Padrão para o Aço AISI H13.....	71
11 Média do ensaio e Desvio Padrão para o Aço AISI D2.....	71
12 Comparação entre dureza real e dureza requerida pela norma ASTM G-65.....	72
13 Resultado do ensaio para o Aço AISI H13 (Laboratório C)	73
14 Resultado do ensaio para o Aço AISI D2 (Laboratório C)	73
15 Média do ensaio e Desvio Padrão para o Aço AISI H13 (Laboratório C)	74
16 Média do ensaio e Desvio Padrão para o Aço AISI D2 (Laboratório C)	74
17 Durezas medidas na Roda de Borracha.....	75
18 Resultado do ensaio para o Aço AISI H13 (Laboratório D)	76
19 Resultado do ensaio para o Aço AISI D2 (Laboratório D)	76
20 Média do ensaio e Desvio Padrão para o Aço AISI H13 (Laboratório D)	77
21 Média do ensaio e Desvio Padrão para o Aço AISI D2 (Laboratório D)	77
22 Resultado do ensaio para o Aço AISI H13 (Laboratório E)	79
23 Resultado do ensaio para o Aço AISI D2 (Laboratório E)	79
24 Média do ensaio e Desvio Padrão para o Aço AISI H13 (Laboratório E)	80
25 Média do ensaio e Desvio Padrão para o Aço AISI D2 (Laboratório E)	80
26 Valores de dureza das amostras fabricadas na UFPE.....	82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivo.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	Tribologia.....	16
2.2	Desgaste e Tribossistema.....	18
2.3	Desgaste abrasivo.....	20
2.3.1	CLASSIFICAÇÕES DO DESGASTE ABRASIVO.....	21
2.4	Parâmetros que influenciam no abrasivo.....	24
2.5	Ensaio de desgaste abrasivo.....	26
2.6	Teste Roda de Borracha.....	28
2.7	Norma ASTM G65-04 (Reaprovada 2010)	29
3	PLANEJAMENTO DO PROJETO.....	37
3.1	Definição do problema.....	37
3.2	Principais equipamentos.....	37
3.3	Projeto Abrasômetro Roda de Borracha Vertical e Horizontal.....	38
3.4	Cronograma.....	39
3.5	Projeto detalhado.....	39
3.5.1	ESTRUTURA.....	40
3.5.1.1	Base.....	40
3.5.1.2	Bancada para ensaio.....	41
3.5.1.3	Silo.....	42
3.5.1.4	Sistema de Amortecimento Estrutural	43
3.5.1.5	Compartimentos.....	44
3.5.2	ACIONAMENTO.....	45
3.5.2.1	Motor e redutor.....	45
3.5.2.2	Inversor de Frequência.....	46
3.5.2.3	Acoplamento flexível.....	46
3.5.2.4	Eixo e mancal.....	47
3.5.2.5	Contador de giro.....	48
3.5.3	RODA DE BORRACHA.....	49
3.5.4	BICO DOSADOR.....	49
3.5.4.1	Vertical.....	50
3.5.4.2	Horizontal.....	50
3.5.5	APLICAÇÃO DA CARGA NORMAL.....	52
3.5.5.1	Vertical.....	52
3.5.5.2	Horizontal.....	53
3.5.6	CÉLULA DE CARGA.....	54
3.5.7	PORTA AMOSTRAS.....	54
3.5.8	SISTEMA DE SEPARAÇÃO DE ABRASIVO.....	55
3.5.8.1	Vertical.....	56
3.5.8.2	Horizontal.....	57
4	O ENSAIO.....	58
4.1	Ajuste do equipamento.....	58
4.1.1	AJUSTE DA CARGA PARA O ENSAIO.....	58
4.1.2	AJUSTE DA VAZÃO DO ABRASIVO.....	58
4.1.3	AJUSTE DO DINAMÔMETRO.....	59

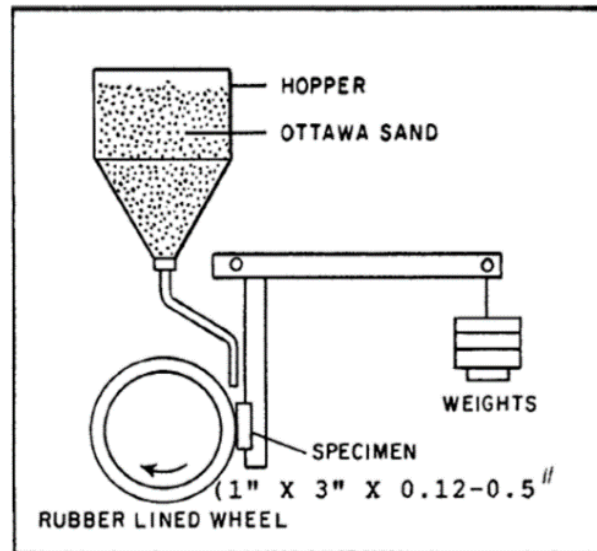
4.1.4	AJUSTE DA ROTAÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	60
4.2	Norma ASTM G-65 versus práticas laboratoriais.....	60
4.2.1	ABRASIVO.....	60
4.2.2	BORRACHA.....	61
4.3	Etapas do ensaio.....	62
4.3.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	63
4.3.2	ESCOLHA DA CONFIGURAÇÃO PARA O ENSAIO.....	65
4.3.3	VERIFICAÇÃO DA RODA DE BORRACHA.....	66
4.3.4	AJUSTE DA AMOSTRA NO EQUIPAMENTO.....	67
4.3.5	INÍCIO DA ROTAÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	67
4.3.6	LIBERAÇÃO DO ABRASIVO.....	67
4.3.7	TANGENCIAMENTO DA AMOSTRA NA RODA DE BORRACHA.....	67
4.3.8	FIM DO ENSAIO.....	68
4.3.9	MEDIÇÃO DOS RESULTADOS.....	68
4.4	Validação do equipamento.....	68
5	RESULTADOS.....	69
5.1.	Estudo Interlaboratorial.....	69
5.1.1	LABORATÓRIO A.....	70
5.1.2	LABORATÓRIO C.....	73
5.1.3	LABORATÓRIO D.....	76
5.1.4	LABORATÓRIO E.....	78
5.2	Resultado Roda de Borracha UFPE.....	81
5.2.1	VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	82
5.2.2	COMPARAÇÃO DA AMOSTRA DA UFPE VERSUS LABORATÓRIO A.....	84
5.2.3	COMPARAÇÃO DE TODOS OS RESULTADOS.....	84
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	87
	REFERÊNCIAS.....	88

1 INTRODUÇÃO

A crescente necessidade do desenvolvimento de novos materiais em aplicações tribológicas levou a um significativo aumento no estudo na área do desgaste. Especificamente, o desgaste abrasivo tem uma importância considerável em diferentes setores industriais da mineração, construção civil e petróleo. Na condução de petróleo em águas profundas são utilizadas linhas de dutos flexíveis, que pelo fato de estarem inseridas em um ambiente corrosivo, tem seus elementos metálicos protegidos por materiais poliméricos. No entanto, devido à ação abrasiva encontrada no ambiente marinho, estes revestimentos acabam sendo gradativamente desgastados. Também observamos desgaste abrasivo em outros componentes da indústria do petróleo, como por exemplo podem ser observados em mancais de máquinas rotativas como turbo-máquinas, componentes rotativos de bombas multifásicas, conectores de tubulações e demais componentes que possam estar em contato com partículas duras “areia”.

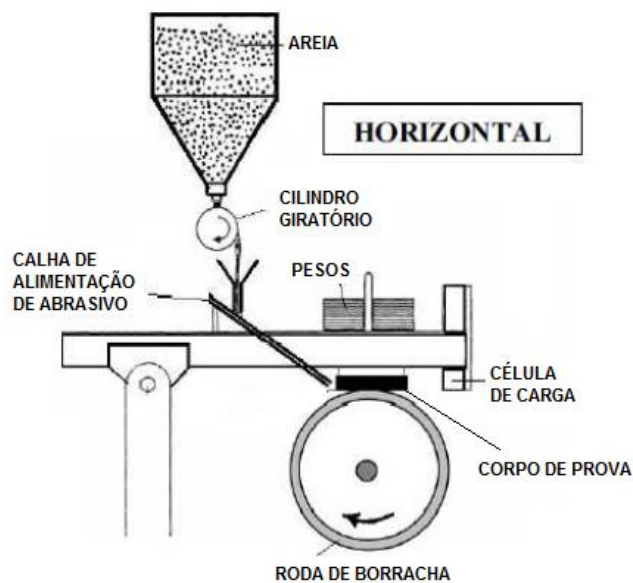
Dentre os diferentes métodos de se medir a resistência ao desgaste abrasivo dos materiais em laboratório, o teste Roda de Borracha, segundo a norma ASTM G-65 (2010), é um dos tipos mais comuns e utilizados internacionalmente (Figura 1). O teste consiste em colocar em um plano vertical um corpo de prova com formato retangular e carregá-lo contra uma roda que gira a uma rotação constante e com uma borda de borracha com dureza específica. O abrasivo do tipo areia é alimentado entre a interface da roda e do corpo de prova, caracterizando, assim, um teste de desgaste abrasivo do tipo três corpos segundo Hutchings (1992). Uma característica importante deste do equipamento é a não quantificação da vazão mássica de areia que passa na interface entre o corpo de prova e a roda de borracha, uma importante variável na taxa de desgaste. Hutchings e Stevenson (1996) propuseram um novo teste roda de borracha/areia horizontal que difere significativamente do teste padrão por dispor o corpo de prova em um plano horizontal e a carga exerce uma força vertical aplicada diretamente sobre a amostra (Figura 2). Isto permite uma maior rigidez do sistema, atenuando as vibrações, bem como a quantificação exata da vazão de abrasivo consumido e, conseqüentemente, o número de partículas na zona de contato.

Figura 1: Representação esquemática do equipamento roda de borracha/areia vertical



Fonte: ASTM G-65 (2010)

Figura 2: Representação esquemática do equipamento roda de borracha/areia horizontal



Fonte: Hutchings e Stevenson (1996)

O projeto proposto neste trabalho visa agregar os conceitos de Abrasômetro roda de borracha vertical e horizontal num só equipamento de ensaios. Estes arranjos permitem medir a real vazão de abrasivos que efetivamente passam entre a amostra e a borracha, bem como, garantir uma maior eficiência e estabilidade dos componentes do equipamento durante os ensaios.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um projeto de um Abrasômetro roda de borracha em configuração horizontal e vertical da amostra em relação à roda de borracha e propor uma metodologia de validação do equipamento construído.

O equipamento projetado e construído deve permitir medir a real vazão de abrasivos que efetivamente passam entre a amostra e a borracha, bem como, garantir uma maior estabilidade mecânica do sistema. A avaliação deste equipamento consistirá na definição das condições de operação e do desenvolvimento de uma metodologia padrão para operação deste equipamento.

Na calibração, serão utilizadas amostras de aço AISI H13 e AISI D2, confeccionadas de acordo a norma ASTM G-65 (2010). Os resultados da validação realizados serão comparados inicialmente ao valor de referência da norma. E por fim, a comparação com os resultados realizados através do estudo Interlaboratorial. Com todos esses resultados, será realizada uma discussão sobre as condições de testes realizadas no Brasil.

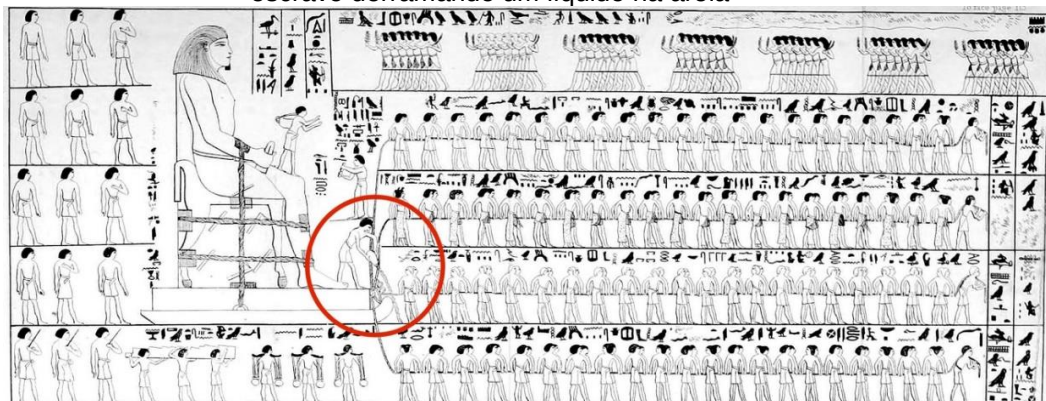
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo de revisão de literatura serão abordados temas referentes à tribologia e desgaste abrasivo apresentando as definições, classificações, mecanismos e parâmetros que influenciam na abrasão, bem como os testes para avaliar a resistência abrasiva dos materiais, em específico o teste Roda de Borracha segundo a norma ASTM G-65 (2010).

2.1 Tribologia

O desgaste e o atrito são fenômenos que ocorrem especificamente em superfícies sob contato e movimento relativo, tendo como efeitos principais vibração, ruído, aquecimento e mudanças dimensionais (Zum Gahr, 1987). Desde a Pré-História, o homem busca desenvolver técnicas e ferramentas para controlar estes fenômenos, seja para minimizar seus efeitos ou para utilizá-los com alguma finalidade específica, tais como a produção do fogo pelo atrito, o desenvolvimento da roda e a utilização de lubrificantes de origem animal para facilitar o movimento. Na figura 3, mostra a utilização de rolos e pranchas, bem como a aplicação de um líquido como lubrificante para o deslocamento e o transporte de grandes monumentos das pedreiras em El Bersheh pelos Egípcios (Layard, A.G., 1853). O conhecimento rudimentar do atrito na Idade Antiga evoluiu até a sua formalização no ocidente com o estudo pioneiro de Leonardo da Vinci (1493), incorporando seu conhecimento empírico do atrito em modelos aplicados para vários sistemas mecânicos (Hutchings, 2016) e a formulação das leis de atrito dois séculos depois por Guillaume Amontons (Singer, 1999), as quais foram experimentalmente comprovadas por Charles-Augustin de Coulomb em 1781 (Popov, 2010).

Figura 3: Egípcios movimentando um monumento das pedreiras em El Bersheh: detalhe de um escravo derramando um líquido na areia



Fonte: Layard, A.G. (1853)

A Revolução Industrial do século XVIII e XIX levou a grandes transformações na sociedade, como consequência das rápidas mudanças tecnológicas e do desenvolvimento econômico. A mecanização industrial, acompanhada da redução da mão-de-obra humana nas etapas de processos produtivos, resultou em maior agilidade nas atividades e melhoria da eficiência de sistemas. O conhecimento do atrito e do desgaste teve papel importante neste cenário permitindo o uso eficiente de rolamentos e de diferentes tipos de lubrificantes em indústrias têxteis e na utilização de máquinas a vapor para geração de energia. No entanto, com o aumento da competitividade entre empresas em meados do século XX, o uso eficiente dos recursos naturais e energéticos, passou a exigir uma maior preocupação com problemas envolvendo desgaste de componentes, desperdício de energia pelo atrito, quebra de máquinas, parada de produção, acidentes, etc. Um comitê do Departamento de Educação e Ciência inglês liderado por Peter Jost (1966) produziu um documento técnico que utilizou pela primeira vez o termo Tribologia, com significado etimológico que provem do Grego, designando o ramo do conhecimento que estuda o atrito (do grego τριβω 'tribo' significando 'esfregar, atritar, friccionar', e λόγος 'logos' significando 'estudo'). Deste então, o termo tem se difundido na comunidade de engenharia como sendo o estudo e a aplicação dos princípios de atrito, lubrificação e desgaste. Segundo Jost (1990), Tribologia é a ciência e a tecnologia que se preocupa com a interação das superfícies com movimento relativo, incluindo o atrito, o desgaste e a lubrificação e tem como objetivo estudar formas de minimizar ou controlar os efeitos desses fenômenos.

A ação direta e indireta do desgaste pode resultar em gastos de 1 a 5% do PIB em países desenvolvidos (CZICHOS, 1992). Estes números justificam a importância do investimento em pesquisa e desenvolvimento, principalmente pela parceria entre a indústria e vários centros acadêmicos e de pesquisa, essenciais para a inovações e desenvolvimento de aplicações em Tribologia, tais como materiais com diferentes comportamentos em relação ao atrito e ao desgaste.

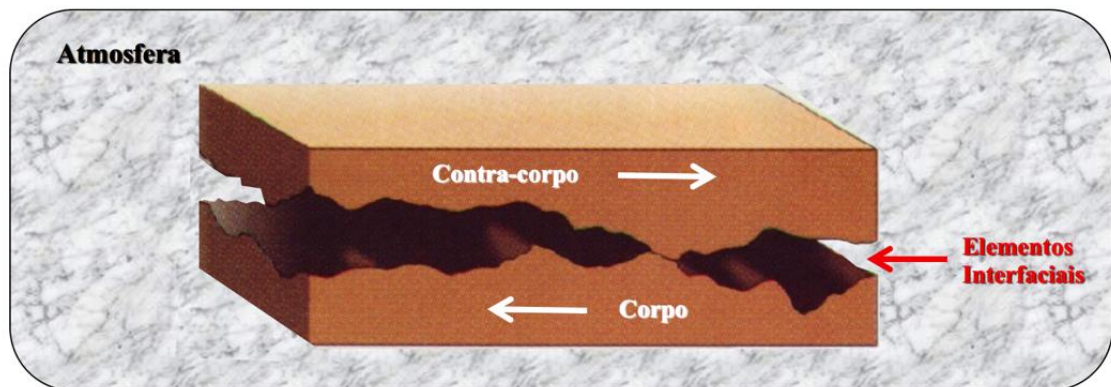
Atualmente existem vários centros de pesquisas em Tribologia pelo mundo sendo os principais no Reino Unido, Estados Unidos e Alemanha. O conhecimento multidisciplinar envolvido na Tribologia agrega as Engenharias Mecânica e de Materiais, a química, a física, a metrologia, a área de projetos, dentre outras.

2.2 Desgaste e Tribossistema

O desgaste é definido como sendo a perda progressiva de matéria da superfície de um corpo como consequência do movimento relativo de um segundo corpo sobre o primeiro (Hutchings, 1992). O desgaste não é uma propriedade intrínseca do material pois depende de um conjunto de fatores ou características de contato definidas como tribossistema. Este pode ser identificado por quatro elementos básicos: Corpo sólido, Contra-corpo, Interface e Ambiente (Figura 4).

Nos problemas envolvendo desgaste e atrito é importante levantar informações do tribossistema, tais como: condições topográficas das superfícies, presença de partículas, óxidos ou contaminações, lubrificantes, temperatura, umidade do ambiente e dos corpos em contato, dentre outras condições que refletirão no comportamento tribológico dos materiais.

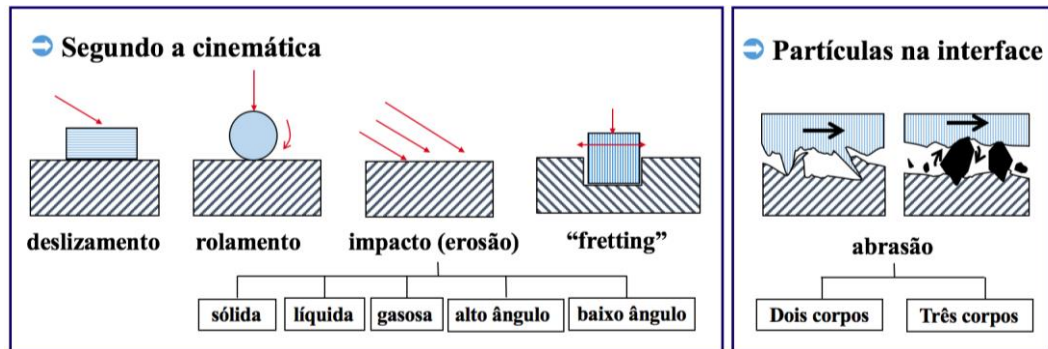
Figura 4: Definição de sistema tribológico



Fonte: Flavio J. S. (2017)

Existe uma série de classificações diferentes para o desgaste. Segundo Ludema (1996), podem ser encontrados até 34 diferentes termos para discutir a nomenclatura sobre desgaste. Algumas classificações levam em consideração alguma característica do tribossistema, como por exemplo à cinemática “movimento das interfaces” ou a presença de partículas na interface (Figura 5).

Figura 5: Processos de desgaste em função do tipo de movimento das interfaces e de presença de elemento interfacial



Fonte: Flavio J. S. (2017)

O rolamento de superfícies é associado ao desgaste por fadiga de contato. No caso da oscilação, esta pode ser também considerada como um deslizamento de superfícies de baixa amplitude e alta frequência, denominada de fretting. O desgaste por erosão é a perda progressiva do material original de uma superfície devido à interação mecânica por impacto de um fluido, um fluido multicomponente ou o impingimento de líquidos ou sólidos. Subclassificações da erosão podem levar em consideração também o estado físico do contra-corpo, sólido ou líquido, ou pelo ângulo de ação, alto ou baixo (Figura 5). A abrasão, também chamada de desgaste por partículas duras pode ser classificada pelo elemento interfacial.

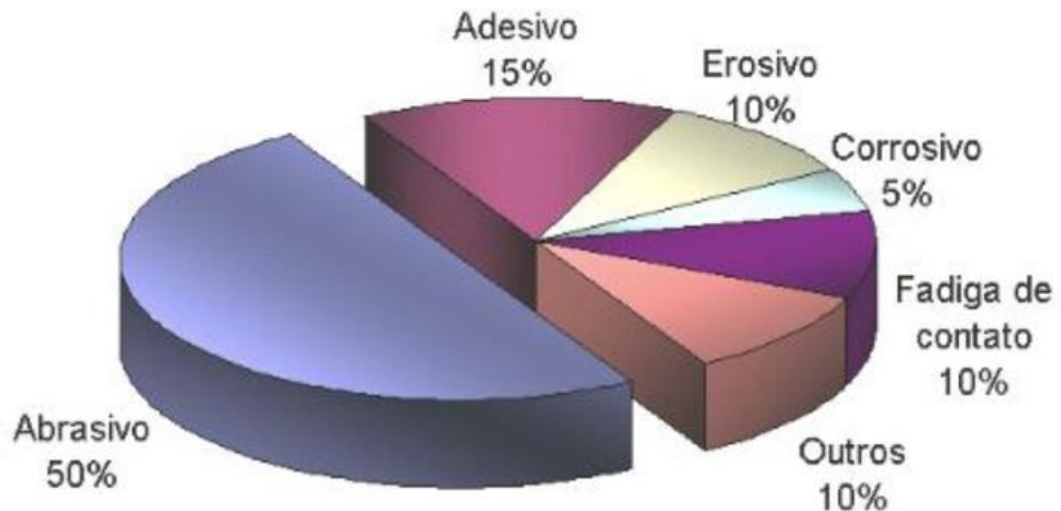
A abrasão pode ser de dois corpos, quando o desgaste está relacionado ao contato de duas superfícies. Ou três corpos, quando o desgaste está relacionado à ação de partículas sólidas pressionadas entre duas superfícies.

Uma classificação que leva em consideração os mecanismos de perda de material é comumente encontrada na literatura. Ela é dividida em 05 (cinco) tipos principais:

- Desgaste por deslizamento ou adesivo;
- Desgaste por abrasão ou abrasivo;
- Desgaste por erosão ou erosivo;
- Desgaste por fadiga de contato;
- Desgaste por reação tribo-química.

Dentre estes, o desgaste por abrasão ou abrasivo é considerado o mais frequente em ambientes industriais causando a degradação de equipamentos e componentes. A Figura 6 apresenta uma classificação percentual da importância do desgaste abrasivo (EYRE, 1978). Considerando as perdas causadas por este tipo de desgaste é de grande importância o estudo da abrasão em materiais.

Figura 6: Classificação percentual da importância do desgaste abrasivo



Fonte: EYRE (1978)

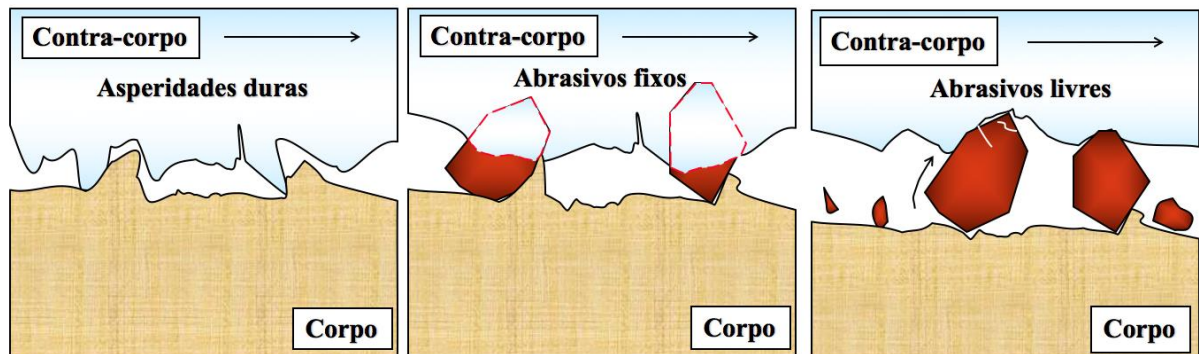
Neste trabalho será abordada apenas o tema desgaste por partícula dura com foco no Desgaste Abrasivo e o teste de abrasão Roda de Borracha.

2.3 Desgaste abrasivo

ZUM GAHR (1987) define o desgaste abrasivo de uma forma genérica como sendo a remoção de material de uma superfície causada por partículas duras. Em uma definição mais abrangente de abrasão por Hutchings (1992), considera a abrasão como sendo a perda ou deslocamento de material devido ao movimento relativo de duas superfícies e decorrente da ação de (Figura 7):

- Asperidades (protuberâncias) duras em uma das superfícies;
- Partículas abrasivas fixas/engastadas em uma das superfícies;
- Partículas abrasivas livres entre as duas superfícies.

Figura 7: Ilustração de partículas duras em movimento relativo causando abrasão (a) asperidades duras em uma das superfícies, (b) partículas abrasivas fixas/engastadas e (c) partículas abrasivas livres.



Fonte: Flavio J. S. (2017)

Em qualquer uma destas situações a remoção de material entre a superfície e a partícula só ocorre quando:

- Partículas são duras forçadas contra a superfície;
- Existe uma relação de dureza superior da partícula dura em relação à superfície;
- Existe movimento relativo;
- Geometria da partícula favorável ao desgaste (A forma aguda e tamanho podem intensificar o desgaste).

2.3.1 CLASSIFICAÇÕES DO DESGASTE ABRASIVO

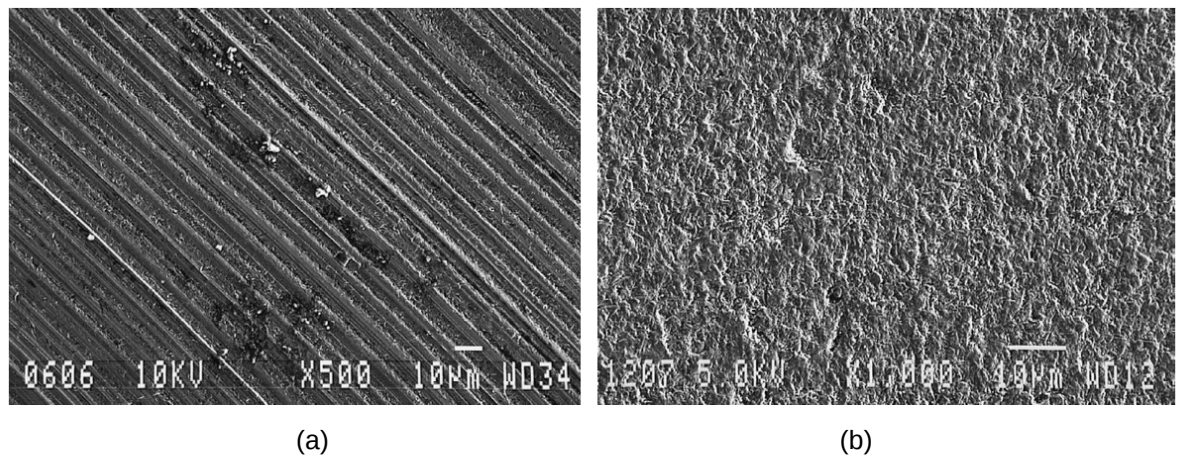
Existem diferentes classificações para o desgaste abrasivo na literatura que levam em consideração aspectos tais como: tensões de contato, a quantidade de corpos envolvidos, a severidade do desgaste e a mobilidade das partículas e os mecanismos envolvidos.

A abrasão de alta tensão é considerada quando as partículas abrasivas são fragmentadas no processo. Quando as tensões não são suficientes para tanto, ou seja, as partículas permanecem inteiras, diz-se que a abrasão é de baixa tensão.

Até a década de 90 uma outra classificação muito utilizada para o desgaste abrasivo é com relação a quantidade de corpos envolvidos. Abrasão dois corpos,

caracterizada quando uma superfície dura e rugosa, ou uma superfície contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície de menor dureza, gerando nela o desgaste abrasivo, e abrasão três corpos, quando partículas abrasivas agem como elementos interfaciais entre duas superfícies em movimento relativo (Hutchings 1992). Visualmente, o aspecto das superfícies submetidas aos dois modos de desgaste abrasivo é bem distinto, quando observada ao microscópio. Na abrasão dois corpos, a superfície desgastada apresenta riscos devido o deslizamento das partículas. Na abrasão três corpos, as partículas livres entre as superfícies, geram deformação plástica nas superfícies de contato, causando um constituído de múltiplas indentações (Figura 8). Segundo ZUM GAHR (1998), 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.

Figura 8: Superfícies características de um material que sofreu desgaste abrasivo (a) por deslizamento a dois corpos ou três corpos e (b) por rolamento a três corpos

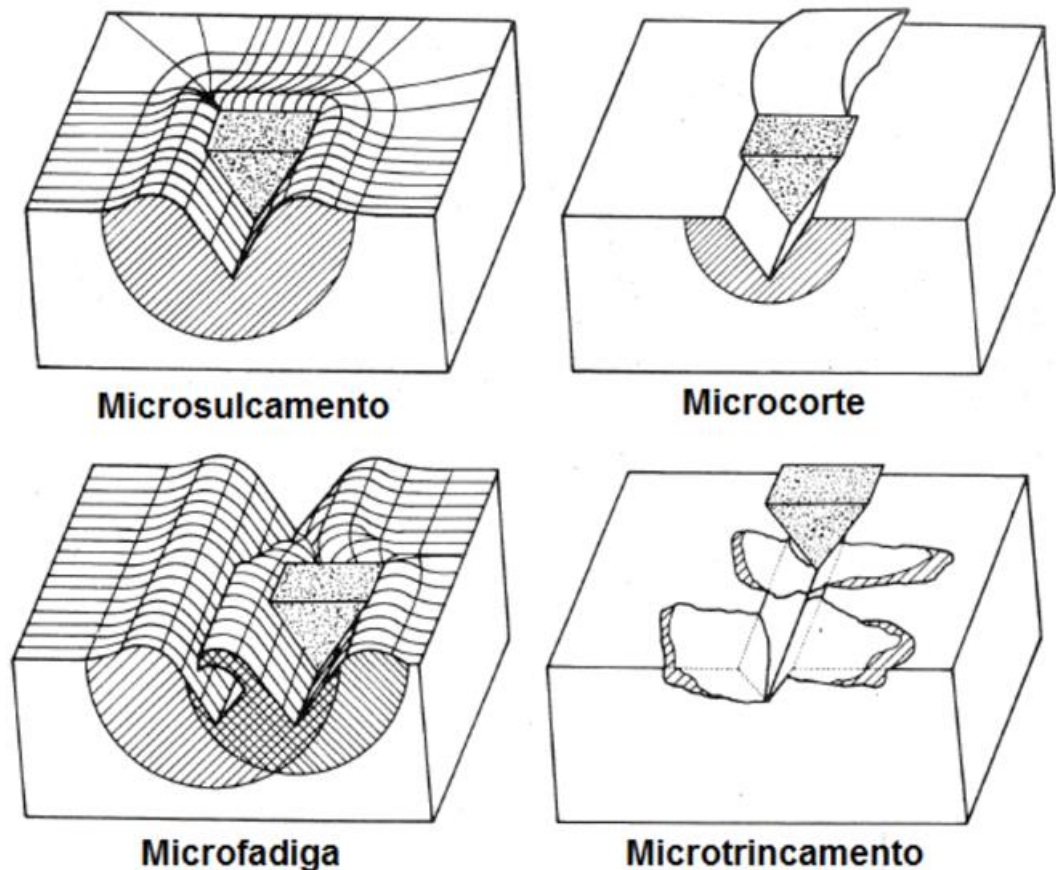


Fonte: TREZONA, ALLSOP e HUTCHINGS (1999)

Uma situação que confunde às vezes é que na abrasão três corpos, o mecanismo de desgaste pode ser semelhante ao de dois corpos, ou seja, ao invés de marcas de indentação, pode acontecer riscamento. Isso acontece em pressões de contato maior, seja por uma maior carga ou por baixa concentração de abrasivos, impedem o rolamento das partículas e resultando no riscamento das superfícies. Esse fato, levou a uma classificação atual do desgaste abrasivo com relação ao movimento das partículas na interface, ou seja, rolamento ou deslizamento, resultando em marcas de indentação ou riscamento, respectivamente, na superfície

desgastada. Partículas soltas podem rolar ou deslizar resultando em diferentes mecanismos de desgaste. Partículas abrasivas engastadas ou fixas geralmente só causam riscamento. ZUM GAHR (1987) propôs quatro diferentes tipos de micromecanismos de desgaste no deslizamento de partículas (2 corpos ou 3 corpos). A Figura 9 ilustra, esquematicamente os micromecanismos.

Figura 9: Representação esquemática dos mecanismos de desgaste abrasivo



Fonte: ZUM GAHR (1987)

Os mecanismos de desgaste abrasivo podem envolver deformação plástica e fratura frágil. O microtrincamento ocorre em materiais comportamento frágil, o microsulcamento em materiais dúcteis, causando basicamente riscos por deformação plástica sem perda de massa, e o microcorte e a microfadiga com perda de material.

Na condição de abrasão por deslizamento de partículas em materiais comportamento dúctil, existe um modelo analítico simples para calcular a perda de material, volume total de desgaste por unidade de deslizamento, dado por:

$$Q = \frac{K * W}{H} \quad (1)$$

W : carga normal total aplicada (kgf);

H : Dureza em (kgf/mm²);

Q : Volume de material por distancia de deslizamento (mm³/mm);

K : Coeficiente adimensional de desgaste.

Para a abrasão a dois corpos (riscamento de partículas), K costuma variar entre 5×10^{-3} e 5×10^{-2} . Na abrasão a três corpos (rolamento de partículas) K é menor, em geral, entre 5×10^{-4} e 5×10^{-3} . No modelo de abrasão as principais variáveis são, carga aplicada e dureza do material, todavia, outros parâmetros podem influenciar nos mecanismos e conseqüentemente no desgaste. A seguir alguns destes parâmetros serão discutidos.

2.4 Parâmetros influenciam no abrasivo

A Figura 10, adaptada de ZUM GAHR (1987), apresenta os principais parâmetros que influenciam na perda de massa dos materiais em abrasão.

Figura 10: Variáveis do desgaste abrasivo



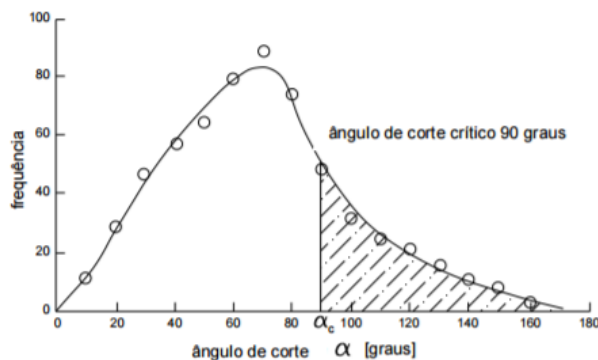
Fonte: adaptado de ZUM GAHR (1987)

- Características do abrasivo

Tamanho - Não existe uma relação entre o desgaste abrasivo e o tamanho da partícula. O que pode ser verificado nos ensaios é que o volume do material retirado da superfície é maior com o tamanho da partícula.

Geometria - Partículas que apresentam arestas mais cortantes, causam mais desgastes nas superfícies. Para abrasivos angulosos, a distribuição é similar à mostrada na Figura 11. No eixo das abscissas estão representados os ângulos de corte e as ordenadas indicam suas frequências de ocorrência. A região destacada, correspondente a ângulos maiores do que o assumido como crítico representa remoção de material da superfície pelo mecanismo de microcorte.

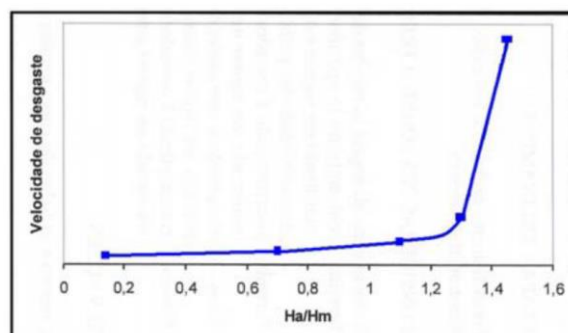
Figura 11: Distribuição de frequência de ângulos de corte para sílica com ângulo crítico de 90°



Fonte: Adaptado de MOORE e SWANSON (1983)

Dureza - A dureza das partículas tem uma influência direta na taxa de desgaste. Para partículas bastante duras, em comparação com a superfície, o valor exato da dureza não interessa tanto. A taxa de desgaste torna-se mais sensível à relação entre a dureza da partícula abrasiva e a da superfície (H_a/H_s) para valores desta razão menores que a unidade (Figura 12).

Figura 12: Velocidade de Desgaste relativo em função da razão entre Dureza do Abrasivo e Dureza do Metal



Fonte: Wainer et al. (1992)

Experimentalmente, observa-se que partículas abrasivas, em geral, causam riscamento em superfícies a partir da relação $H_a/H_s > 1,2$. Este caso é chamado de abrasão severa, contrastando com a abrasão suave ($H_a/H_s < 1,2$). A Figura 12 mostra o crescimento da velocidade de desgaste em relação do crescimento da razão de dureza. Para a razão de dureza entre 0,2 a 1.1, que o crescimento da velocidade de desgaste é mínimo. Diferente para razão de dureza entre 1.1 a 1.5 (Wainer et al., 1992).

A Sílica, também conhecida como Quartzo, constitui cerca de 60% da crosta terrestre, tendo uma dureza próxima de 800 HV (800 kgf/mm^2). Mesmo os aços com estrutura martensítica apresentarão durezas menores que $800 > 1,2H_s$, o que nos permite concluir que os aços e metais não-ferrosos são vulneráveis ao desgaste abrasivo e erosivo por partículas de Sílica.

- Condições de operação - Fatores Externos

A perda de material por abrasão é diretamente proporcional à força de compressão entre o abrasivo e a superfície. Isso é válido até um certo valor crítico da força, que é determinada pela deformação excessiva da superfície metálica, ou então pela instabilidade das partículas abrasivas que passam a fraturar.

2.5 Ensaios de desgaste abrasivo

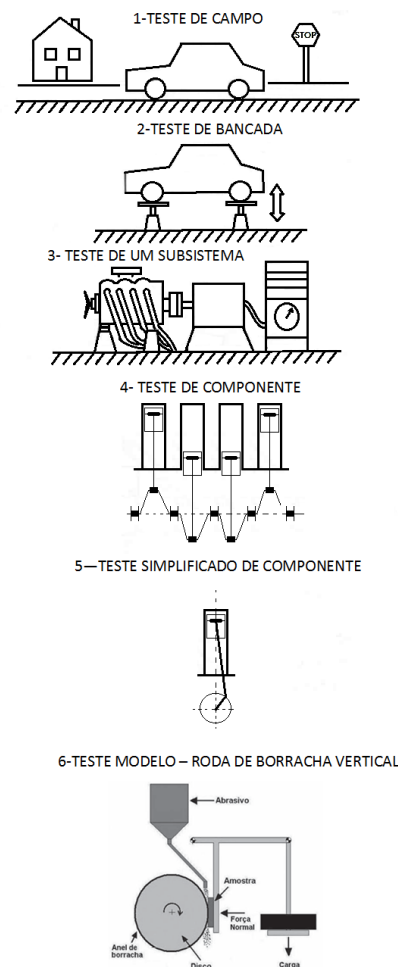
A Figura 13 apresenta 6 níveis de testes que podem ser utilizados em estudos em Tribológicos. Até a década de 70 a prática mais comum para a caracterização de materiais resistentes ao desgaste era a realização de testes de campo, geralmente demorados, caros e sem um controle efetivo das diferentes variáveis que podem influenciar nos resultados. Os testes laboratoriais utilizando equipamentos (tribômetros) surgem como alternativa para suprir estas dificuldades, todavia, nem sempre conseguem reproduzir fielmente os mecanismos de desgaste observados em campo, dificultando a transposição dos resultados para a prática.

Especificamente para os testes de abrasão vários tipos de arranjos experimentais podem ser utilizados (abrasômetros). As investigações têm por objetivo tanto o entendimento dos mecanismos envolvidos como a simulação de situações reais.

Os ensaios realizados tornam-se padrões de valores das taxas de desgaste e coeficientes de atrito. O controle e a medição de todas as variáveis com influência no desgaste são importantes; tais variáveis incluem: velocidade, carga, tipo de contato, tipo de carregamento, ambiente e temperatura de ensaio, dissipação de calor nos corpos em contato entre outros (HUTCHINGS, 1992).

A Figura 14 apresenta os métodos mais comuns utilizados para ensaios de desgaste abrasivos. Nas Figura 14 (a), (b) e (c) mostram as variações de um método no qual um pino desliza contra uma superfície, plana ou não, na qual os abrasivos estão fixos. Neste caso, ocorre o desgaste abrasivo por deslizamento ou a dois corpos. É fixado uma lixa sobre a superfície na qual o pino irá se movimentar. O tamanho do abrasivo pode ser facilmente alterado através da troca da lixa com granulometria diferente. A superfície ou o pino tem que se movimentar para garantir que o pino sempre deslize numa superfície não ensaiada.

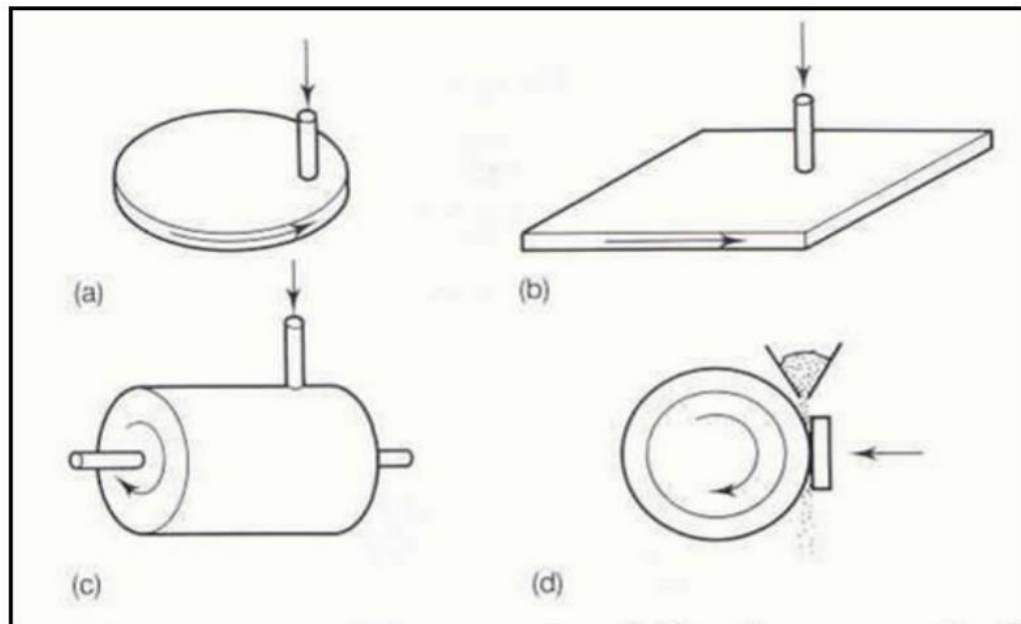
Figura 13: Diferentes níveis de testes Tribológicos



Fonte: adaptado de ZUM GAHR (1987)

A Figura 14 (d) apresenta o ensaio de desgaste abrasivo mais comumente utilizado. Neste a amostra do ensaio possui uma superfície plana, que é pressionado com uma carga constante contra a superfície de um disco recoberto de borracha, será depositado um abrasivo entre a amostra e a roda de borracha. O teste é do tipo três corpos, mas o resultado geralmente é de riscamento de partículas, ou seja, tipicamente 2 corpos. Este ensaio é normalizado pela norma Americana: *American Standards of Testing Materials, ASTM*, (ASTM G65 – *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*).

Figura 14: Desenho esquemático de quatro métodos para determinar as taxas de desgaste abrasivo: (a) Pino sobre disco, (b) Pino sobre placa, (c) pino sobre tambor e (d) roda de borracha



Fonte: HUTCHINGS (1992)

2.6 Teste roda de borracha

Este equipamento foi apresentado pela primeira vez por Haworth (1948) e consiste em 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. Este equipamento permite realizar ensaios a seco ou a úmido, com alta confiabilidade de resultados, usa-se para classificar materiais quanto a sua resistência ao desgaste (VILLABÓN e SINATORA, 2006). O seu princípio de funcionamento, consiste em esmerilhar um corpo de prova padronizado com uma areia de granulometria controlada. O abrasivo é introduzido entre o corpo de prova e um anel de borracha de dureza especificada, provocando o riscamento.

Existem pelo menos duas configurações proposta para este equipamento. Um com a configuração vertical, normatizado pela ASTM G65, onde se caracteriza pela amostra sendo disposta num plano vertical (Figura 1). E o outro na configuração horizontal, equipamento proposto por Hutchings e Stevenson (1996) (Figura 2), que diferentemente ao equipamento anterior, a amostra é disposta num plano horizontal.

Na sequencias serão detalhados alguns aspectos da norma ASTM G65 que será a base na construção do equipamento deste trabalho.

2.7 Norma ASTM G65-04 (Reaprovada 2010)

Este método de ensaio abrange procedimentos laboratoriais para determinar a resistência de um material metálico a desgaste abrasivo por meio do teste do tipo roda de borracha com abrasivo seco. É a intenção deste método de ensaio é produzir dados para classificar materiais em sua a resistência ao desgaste abrasivo sob um determinado conjunto de condições.

Os resultados dos testes de abrasão são relatados como perda de volume em milímetros cúbicos para o procedimento de teste especificado. O material de maior resistência à abrasão terá uma perda de volume inferior. A intenção deste método é atingir a uniformidade entre os laboratórios. Nesta norma, existem 05 (cinco) procedimentos recomendados, que são apropriados para graus específicos de resistência ao desgaste ou espessuras de material para ensaio:

- Procedimento A - Este é um teste relativamente severo, que irá classificar materiais metálicos em uma escala perda de volume grande de baixa a resistência à abrasão extrema. É particularmente útil na classificação de materiais de forma a resistência à abrasão;

- Procedimento B - Uma variação em curto prazo do Processo A. Pode ser usado para materiais resistentes altamente abrasivas, mas é particularmente útil na classificação de materiais de médio e (baixa resistência abrasiva). O procedimento B deve ser usado quando os valores de perda de volume desenvolvidas pelo processo exceder 100 milímetros³;

- Procedimento C - Uma variação em curto prazo do Procedimento A para uso em revestimentos finos;
- Procedimento D - Esta é uma variação de carga mais leve de Procedimento A, que é particularmente útil em materiais de baixa resistência à abrasão;
- Procedimento E- A variação de curto prazo de Processo B que é útil no ranking de materiais com resistência média ou baixa abrasão.

Método de Teste

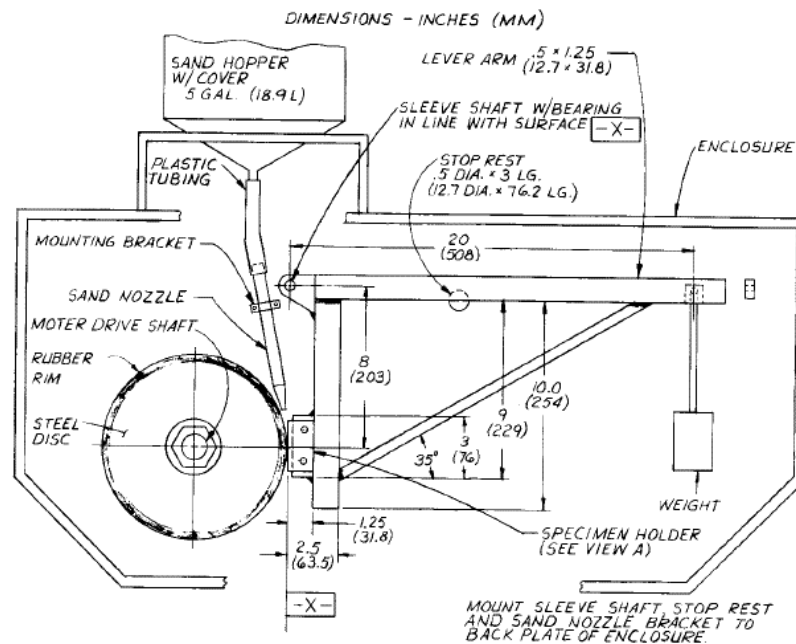
O teste de roda de borracha com areia seca, envolve a abrasão de uma amostra em um teste padrão, com um grão de tamanho e composição controlada. O abrasivo é introduzido entre a amostra de teste e uma roda de borracha, com um revestimento de borracha de 'clorobutilo' com dureza especificada. Para este ensaio a amostra é pressionado contra a roda de borracha por uma força especificada por meio de um braço de alavanca, enquanto um fluxo controlado de grão abrasivo passa na superfície de teste (Figura 15).

A rotação da roda tem sentido igual à direção do fluxo do abrasivo e a face de contato. Note-se que o eixo de articulação do braço de alavanca encontra-se dentro de um plano que é aproximadamente tangente à superfície da roda de borracha, e normal ao diâmetro horizontal ao longo da qual a carga é aplicada. A duração do teste e força aplicada pelo braço de alavanca é variado conforme observado em Procedimento A à E. As amostras são pesadas antes e depois do teste e a perda de massa registrado. É necessário converter a perda de massa à perda de volume em milímetros cúbicos, devido às grandes diferenças na densidade dos materiais. A abrasão é reportada como perda de volume no procedimento especificado para o ensaio.

Equipamento e Materiais

A Figura 15 mostra uma concepção típica do equipamento. Vários elementos são de importância fundamental para assegurar a uniformidade nos resultados dos testes entre laboratórios. Estes são: o tipo de borracha utilizada na roda; O tipo de posicionamento de abrasivo; A forma e tamanho da abertura do bico de areia; E o um sistema do braço de alavanca adequado para aplicar a força necessária.

Figura 15: Equipamento roda de borracha para testes de abrasão areia seca desenho esquemático



Fonte: adaptado da Norma ASTM

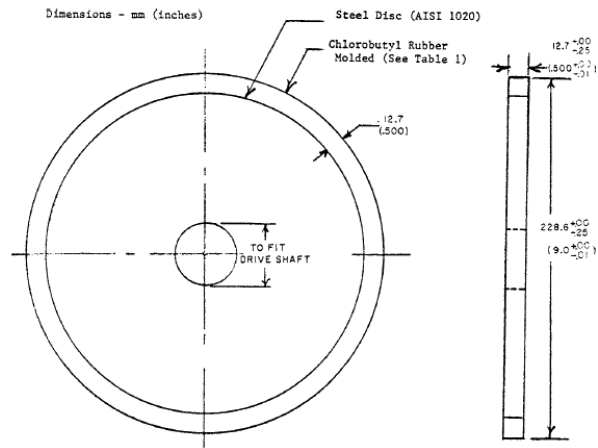
A roda de borracha mostrada na Figura 16 é composta por um disco de aço com uma camada externa de borracha 'clorobutílica' moldado na sua periferia. A borracha deve ser ligada ao disco totalmente no molde de aço. A dureza da borracha deve ser ligada ao disco totalmente no molde de aço. A dureza da borracha deve ser de A60. Uma variação de 62 a A58 é aceitável. Pelo menos quatro leituras devem ser tomadas na a borracha com cerca de 90° entre as medições utilizando um durômetro Shore A. As leituras do medidor serão tomadas depois de um tempo de espera de 5 s. A composição recomendado da borracha e uma fonte de moldagem qualificado é referido na Tabela 1.

TABELA 1 - Fórmula para borracha de Clorobutil (ASTM G-65).

Materiais	Proporções por peso
Clorobutil No. HT 10-66 (Preparo Químico)	100
Agerite Staylite S	1
HAF preto	60
Óleo Circolight	5
O ácido esteárico	1
O óxido de zinco	5
Ledate	2

Fonte: ASTM G-65 (2010)

Figura 16: Roda de Borracha



Fonte: ASTM G-65 (2010)

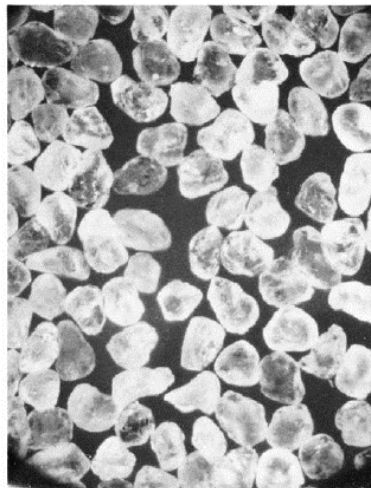
O tipo de abrasivo deve ser uma areia de quartzo grão arredondado (Figura 17) como tipificado pelo AFS 50/70 (Tabela 2). O teor de umidade não deve exceder 0,5% em peso. Areia que foi submetido a umidade ou a continuação da elevada umidade relativa do ar pode levar a umidade, o que afetará os resultados do teste.

TABELA 2: AFS 50/70 Teste de Areia é controlada com a seguinte faixa de tamanho usando US peneiras (Especificação E11)

U.S. Sieve Size	Sieve Opening	% Retained on Sieve
40	425 μm	none
50	300 μm	5 max
70	212 μm	95 min
100	150 μm	None passing

Fonte: ASTM G-65 (2010)

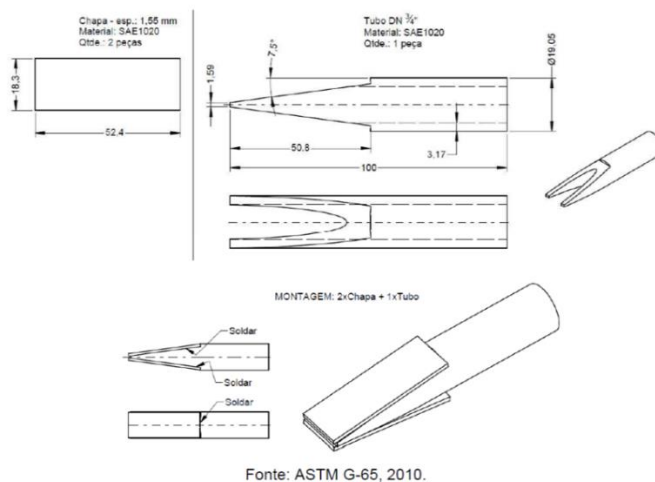
Figura 17: 25X AFS 50/70 Teste de Areia Ottawa Sílica Co



Fonte: ASTM G-65 (2010)

O Bico de Areia (Figura 18 (a)) deve ser projetado para produzir uma cortina de areia precisa e de boa forma durante todo o procedimento de teste. O bocal pode ter qualquer comprimento que seja conveniente, que vai permitir a ligação entre o bico de areia o recipiente do abrasivo usando tubos de plástico. O bico de areia deverá ter um orifício de abertura para desenvolver uma velocidade de fluxo de areia de 300 a 400 g/min. Durante a utilização, a abertura do bocal deve ser posicionada tão perto da junção da amostra de ensaio e a roda de borracha como o desenho irá permitir. (Figura 18 (b)). Qualquer material pode ser utilizado para a fabricação do bico. Normalmente é conveniente utilização de materiais com disponibilidade de soldagem ou tubos sem costura para a fabricação. O aço inoxidável é preferido devido à sua resistência à corrosão e facilidade de soldadura. De cobre e de aço também são utilizados com sucesso.

Figura 18: (a) Areia Bico e (b) Posição do bocal Areia



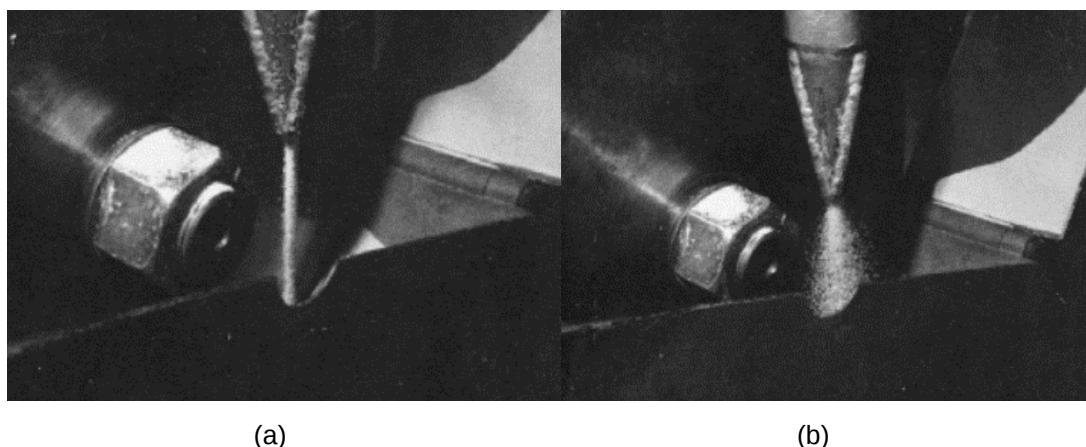
(a)

(b)

Fonte: ASTM G-65 (2010)

Areia em fluxo. O bocal deve apresentar uma taxa de fluxo de areia de 300 a 400 g/min (0,66-0,88 lb/min). A Figura 19 (a) mostra a cortina de areia com o fluxo alinhado adequado e da forma estreita da cortina de areia à medida que sai do bico de areia. Um fluxo turbulento areia, como representado na Figura 19 (b) tenderá a produzir resultados baixos e inconsistentes. A areia deve fluir de forma passe totalmente entre a amostra e a roda de borracha.

Figura 19: (a) Areia Fluxo-simplificada e (b) - Fluxo de areia-Turbulência



Fonte: ASTM G-65 (2010)

O Motor que aciona a roda de borracha deve ter uma potência nominal de 0,7 kW (1 cv). O motor deverá acionar uma caixa de redução de 10/1. A taxa de revolução (200 +ou- 10 rpm) deve permanecer constante sob carga. A máquina deve ser equipada com um contador de rotações que irá monitorar o número de rotações durante o ensaio, conforme especificado no procedimento. Recomenda-se que o contador incremental tenha a capacidade de desligar a máquina depois de um número pré-selecionado de rotações das rodas ou incrementos até 12000 rotações é atingida.

O sistema de aplicação de carga da amostra é composto por: Porta Amostra; Braço de Alavanca; e Peso. Os pesos utilizados e as dimensões do braço de alavanca deveram ser projetados para atender o procedimento (Tabela 3) de carga da norma. O sistema de medição utilizado para medir a perda de massa das amostras deve ter uma sensibilidade de 0,001 g. Procedimento C exige uma sensibilidade de 0,0001 g.

TABELA 3: Parâmetros de ensaio

Procedimento	Carga (N)	Revoluções (ciclo)	Abrasão Linear (m)
A	130	6000	4309
B	130	2000	1436
C	130	100	71,8
D	45	6000	4309
E	130	1000	718

Fonte: ASTM G-65 (2010)

Preparação de amostras e Amostragem

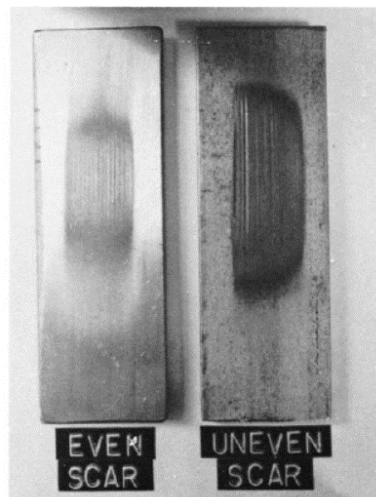
É a intenção deste método de ensaio permitir o teste de abrasão de qualquer material, incluindo metais forjados, fundidos, sobreposições de solda elétrica, depósitos de pulverização de plasma, metais em pó, metalização, galvanização, cimentos, cerâmica e assim por diante.

A amostra terá uma forma retangular de 25 por 76 mm (1,0 por 3,0 pol.). E entre 3,2 e 12,7 mm (0,12 e 0,50 pol.) de espessura. O tamanho pode variar de acordo com a necessidade de forma que o comprimento e a largura sejam suficientes para demonstrar a extensão do desgaste. A superfície do ensaio deve ser plana dentro de 0,125 milímetros (0,005 pol.).

As amostras para o teste devem ser lisas, planas e livres de desníveis. Os defeitos de superfície, tais como porosidade e rugosidade podem alterar os resultados dos testes, e tais defeitos devem ser evitados, a menos que a própria superfície possa ser o objeto de investigação. O acabamento de superfície deve ser cerca de 0,8 μm (32 μin) ou menos é aceitável. O tipo de superfície ou a preparação de superfície deve ser indicado na ficha de dados.

A marca de desgaste obtida no teste deve ser conforme Figura 20. O desgaste não uniforme não uniforme indica alinhamento impróprio do disco de borracha com relação a amostra de ensaio ou uma roda de borracha usado de forma irregular. Esta condição pode reduzir a precisão do teste.

Figura 20: Marcas típicas de desgaste – Marcas desiguais indicam alinhamento impróprio ou desgaste da roda de borracha



Fonte: ASTM G-65 (2010)

Materiais de referência

A norma especifica 03 (três) materiais de referência. Podem ser utilizados para a monitorização periódica do equipamento de ensaio e procedimentos em laboratórios específicos. Qualquer um dos quatro procedimentos de teste (Tabela 4) podem ser utilizadas em materiais de referência. É recomendado que Procedimento A seja utilizado para os materiais mais resistentes à abrasão, tais como AISI D-2 aço de ferramenta. Quando os valores de perda de volume Exceder 100 mm³ em materiais tais como o aço recozido baixo teor de carbono, uma maior precisão na classificação do material pode ser obtida usando os procedimentos B ou D.

Tabela 4: Materiais e métodos para validação do Abrasômetro.

Material	Dureza [HRC]	Força Aplicada [N] *	Nr. de Revoluções	Volume perdido [mm³]
AISI D2 Temperado e Revenido	58,5 a 60,5	130	6000	36 ±5
AISI H13 Temperado	47 a 48	130	2000	56 ±4
AISI 4340	31 a 33	130	1000	49 ±3
		45	6000	91 ±5
Aços com alto teor de Cromo	**	130	100	1,3 ±0,3 ***

Fonte: ASTM G-65 (2010)

3 PLANEJAMENTO DE PROJETO

3.1 Definição do problema

O projeto proposto neste trabalho visa agregar os conceitos de Abrasômetro roda de borracha vertical e horizontal num só equipamento de ensaios. Inicialmente a norma ASTM G-65 (2010) foi utilizada para projetar o equipamento na configuração vertical. E para projetar o equipamento na configuração horizontal, foi utilizado o modelo de equipamento proposto de Hutchings e Stevenson (1996).

Tendo em comum nas duas configurações é a amostra sendo forçada num plano tangencial ao disco de borracha que gira a uma rotação constante, ao mesmo tempo em que um abrasivo é direcionado para passar entre as superfícies da amostra e do disco de borracha, causando assim o desgaste do corpo de prova.

As duas configurações diferenciam de duas formas:

- No plano da amostra, sendo um plano vertical e o outro horizontal.
- Na forma em que o abrasivo é direcionado para passar entre as superfícies da amostra e a roda de borracha. Visto que as duas configurações o plano da amostra se diferencia pela configuração do equipamento.

3.2 Principais equipamentos

Foi realizado um estudo Interlaboratorial envolvendo laboratórios que já possuem o Roda de Borracha com o objetivo de agregar conhecimentos teóricos e práticos ao projeto. Os laboratórios foram:

- Laboratório A – 2 equipamentos Roda de Borracha vertical;
- Laboratório B – Roda de Borracha Vertical;
- Laboratório C – Roda de Borracha Vertical;
- Laboratório D – Roda de Borracha Horizontal;
- Laboratório E – Roda de Borracha Horizontal;

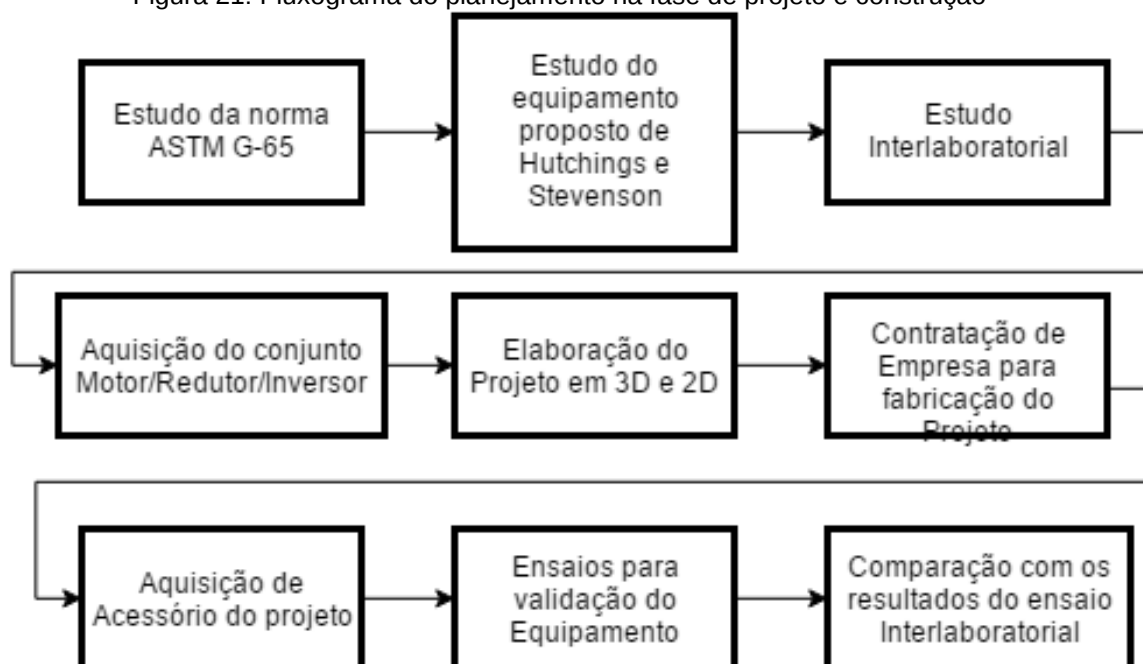
No estudo Interlaboratorial, os equipamentos dos Laboratórios A, B, C e D não possuíam dispositivos para mensurar o volume do abrasivo ensaiado. No Laboratório E, observamos um dispositivo de coletar do abrasivo para este fim.

3.3 Projeto Abrasômetro Roda de Borracha Vertical e Horizontal

Observado as necessidades dos outros laboratórios, foi desenvolvido um equipamento que uniu os conceitos do Abrasômetro horizontal e vertical descritos anteriormente numa só máquina para ensaios. Esta configuração permite escolher entre ensaio vertical ou horizontal e selecionar a configuração mais interessante para cada ensaio.

Sendo um equipamento ‘dois em um’, ele proporciona menor uso de espaço físico e menor custo de aquisição e manutenção, quando comparado a dois equipamentos distintos. O planejamento da fase de projeto e construção do Abrasômetro está demonstrado no fluxograma da Figura 21.

Figura 21: Fluxograma do planejamento na fase de projeto e construção



Fonte: O próprio autor

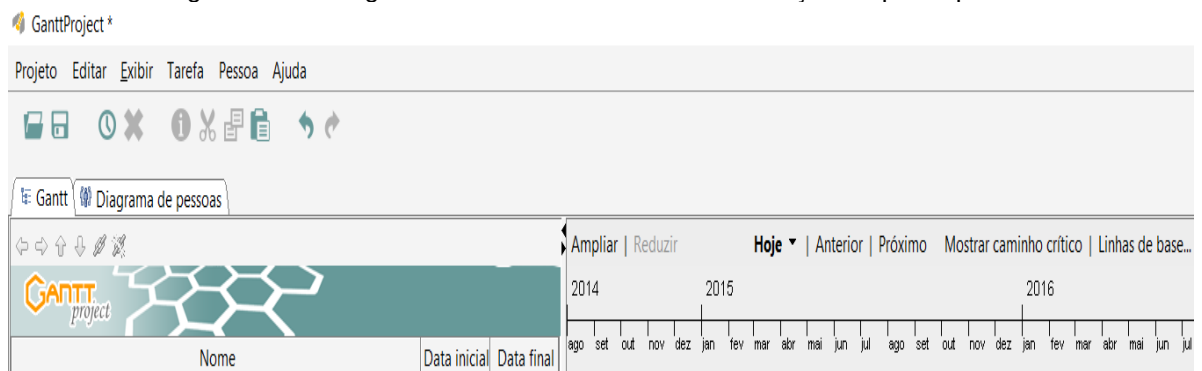
O custo deste protótipo Roda de Borracha na configuração horizontal e vertical, está estimado em aproximadamente US\$ 6.500,00.

3.4 Cronogramas

Foi elaborado o cronograma de desenvolvimento e fabricação do equipamento e o cronograma estimado de produção do Roda de Borracha.

No cronograma de desenvolvimento e fabricação do equipamento, conforme a Figura 22, é apresentado as etapas do estudo do projeto e o Estudo Interlaboratorial, as cotações, aquisições e contratações para a fabricação, e a validação do equipamento e análise dos resultados. O tempo total estimado para elaboração e execução destas etapas foi de aproximadamente 2 anos e meio.

Figura 22: Cronograma de desenvolvimento e fabricação do protótipo



Fonte: O próprio autor

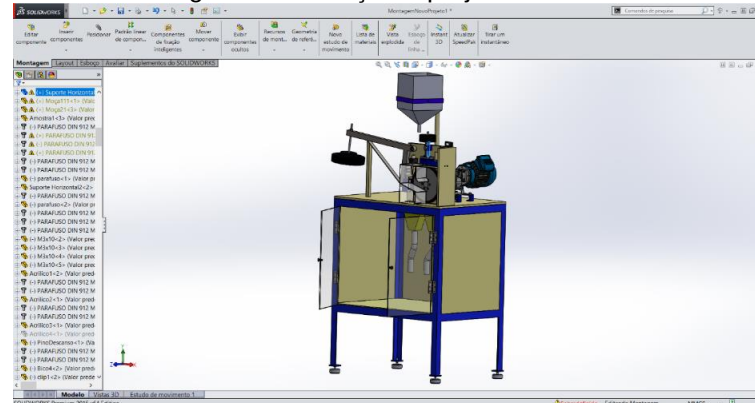
3.5 Projeto detalhado

O Projeto mecânico foi realizada com o auxílio de um programa CAD (*Computer Aided Design* ou Projeto Auxiliado por Computador) da empresa francesa *Dassault Systemes* chamado SolidWorks, no qual é possível desenvolver o projeto primeiramente em 3D. Segundo Black (1998), existem cinco razões de se usar uma ferramenta CAD para dar suporte à função do projeto de engenharia:

- Aumentar a produtividade do projeto;
- Aprimorar a qualidade do projeto;
- Melhorar a documentação do projeto;
- Criar um banco de dados de manufatura;
- Reduzir o tempo e esforço necessário para modificar e atualizar o projeto.

Assim, não é necessário gastar com a concepção de protótipos que posteriormente serão modificados para melhoria do mesmo. Com isso, o custo do projeto e o tempo de desenvolvimento são reduzidos consideravelmente. A figura 23 traz um esboço do projeto e a interface do SolidWorks.

Figura 23: Esboço do projeto no SolidWorks



Fonte: O próprio autor

3.5.1 ESTRUTURA

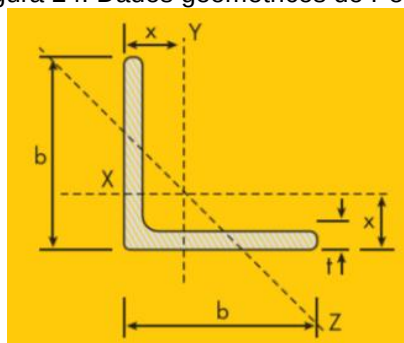
A estrutura do equipamento do equipamento foi dividida em: Base; Bancada para Ensaio; Silo; e Acessórios (Vibra Stop/ Compartimentos).

3.5.1.1 Base

A base foi construída com cantoneira de abas iguais “L” (Figura 24), de dimensões 38,1x38,1x6,35 mm, de um aço SAE 1020. As partes da base unidas mediante solda e finalizada com uma pintura anticorrosiva.

Este aço é indicado para parafusos, trefilados duros, chassis, discos de roda, peças em geral para máquinas e veículos submetidos a esforços pequenos e médios.

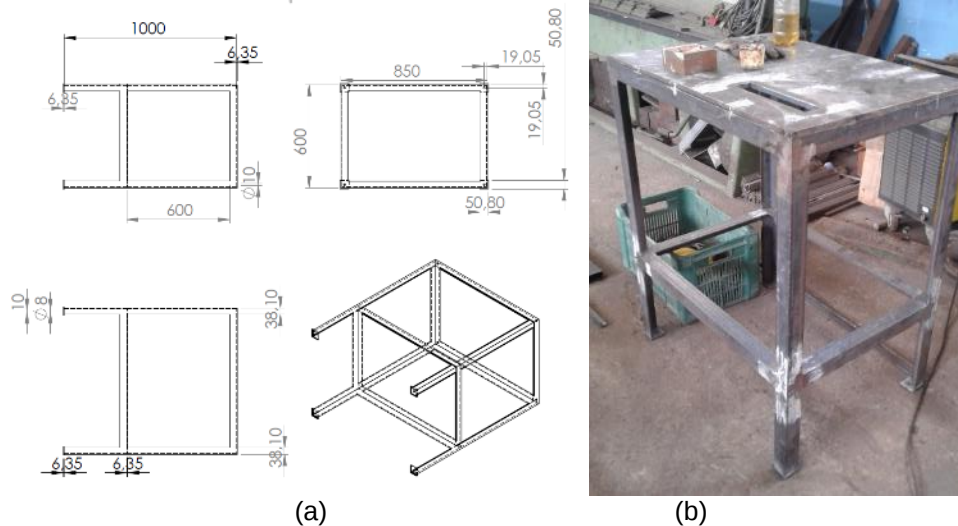
Figura 24: Dados geométricos do Perfil L



Fonte: O próprio autor

Foram utilizados 9,8 metros desse perfil para confeccionar a base da estrutura do equipamento, resultando numa massa total de 34,1 kg. Elas foram cortadas nas dimensões requeridas no projeto e unidas através de soldagem (Figura 25).

Figura 25: Base: (a) estrutura montada em CAD (b) estrutura no processo final de montagem



Fonte: O próprio autor

3.5.1.2 Bancada para ensaio

A Bancada para Ensaio tem importância fundamental ao equipamento, todos os principais componentes do Roda Borracha serão montados nessa estrutura. Visto isso, a mesma foi construída com chapa de aço SAE 1045 com espessura de 12,7 mm. As partes da bancada foram unidas mediante solda e finalizadas com uma pintura anticorrosiva.

Este tipo de aço é indicado para transmissão de média solicitação, parafusos, cabos, eixos para vagões ferroviários. É um aço de médio teor de carbono que se presta muito bem para ser endurecido ou beneficiado por tratamento térmico. Devido a isso, este aço encontra grande aplicação em partes estruturais de máquinas e eixos em geral.

Foram utilizados 0,69 metros² de chapas desse aço para confeccionar a base da estrutura do equipamento, resultando numa massa total de 53,8 kg. Elas foram cortadas nas dimensões requeridas no projeto e unidas através de soldagem (Figura 26).

Figura 26: Bancada no processo final de montagem

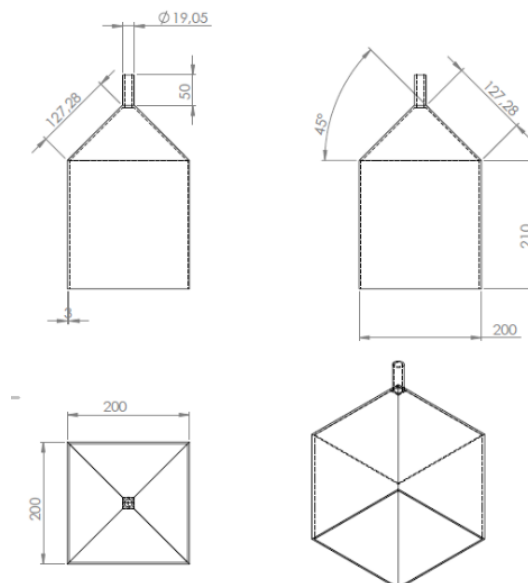


Fonte: O próprio autor

3.5.1.3 Silo

O silo para armazenar o abrasivo foi confeccionado em chapa de aço galvanizada e possui capacidade volumétrica para 9,6 litros, suficiente para armazenar 24 kg de areia ($\rho \approx 2,5 \text{ g/cm}^3$). Levando em conta uma vazão máxima de 400 g/min de abrasivo, esta quantidade é suficiente para realizar dois ensaios completos do procedimento A (30 min) sem reabastecimento do silo (Figura 27).

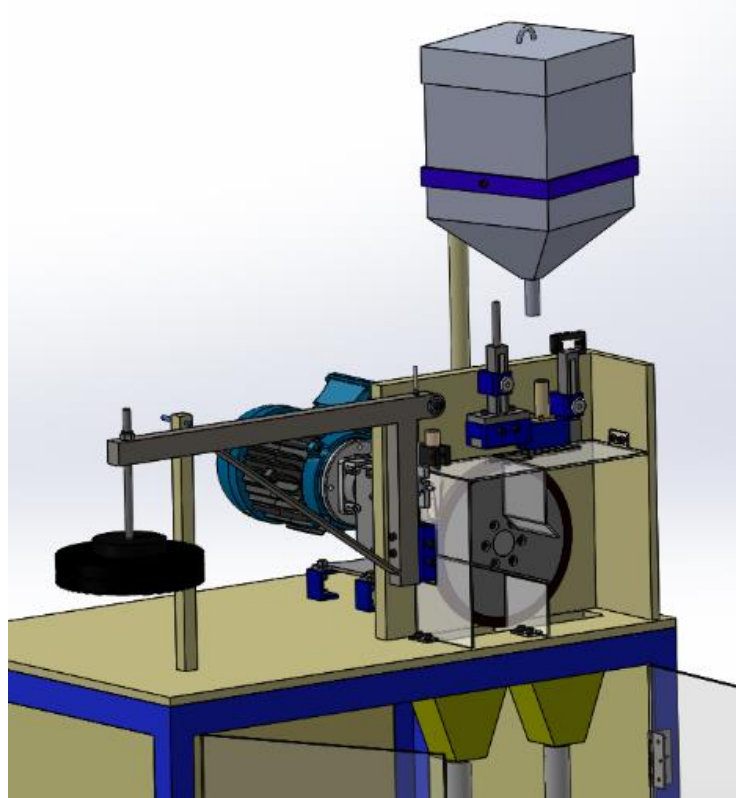
Figura 27: Silo em 2D



Fonte: O próprio autor

O Silo terá a função de atender individualmente o os sistemas horizontal e vertical com apenas a relocação do tubo flexível e reposicionamento da estrutura com um breve giro (Figura 28).

Figura 28 – Silo em 3D



Fonte: O próprio autor

3.5.1.4 Sistema de Amortecimento Estrutural

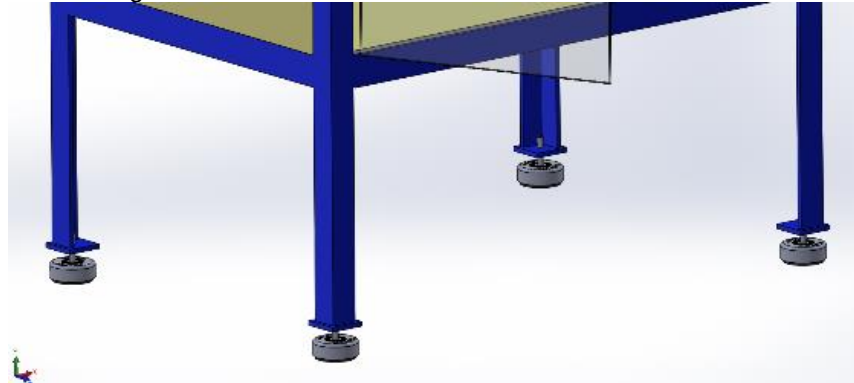
Em todos os processos, dos mais variados ramos da indústria, existem vibrações mecânicas oriundas de máquinas e equipamentos operantes. Estas vibrações, por sua vez, podem trazer problemas tanto nos processos de fabricação relacionados à máquina (comprometimento na precisão das aferições e depreciação do equipamento), como de caráter humano (descumprimento de legislações, doenças do trabalho e reclamações de empresas e/ou residências vizinhas).

Os amortecedores de vibração e impacto Sistema de Amortecimento Estrutural são desenvolvidos de forma a reduzir as vibrações à níveis muito baixos ou até mesmo nulos, reduzindo as despesas de instalação, quando comparado ao problemático processo de chumbagem direta ao piso e economizando tempo, considerando a repetição do processo de chumbagem no caso de mudança de layout da fábrica.

Sistema de Amortecimento Estrutural são sapatas amortecedoras de choque, servem para nivelar máquinas e evitar possíveis deslocamentos.

No projeto dimensionamos a utilização de quatro Sistema de Amortecimento Estrutural com carga nominal individual máxima de 100 kg (Figura 29).

Figura 29: Sistema de Amortecimento Estrutural em 3D

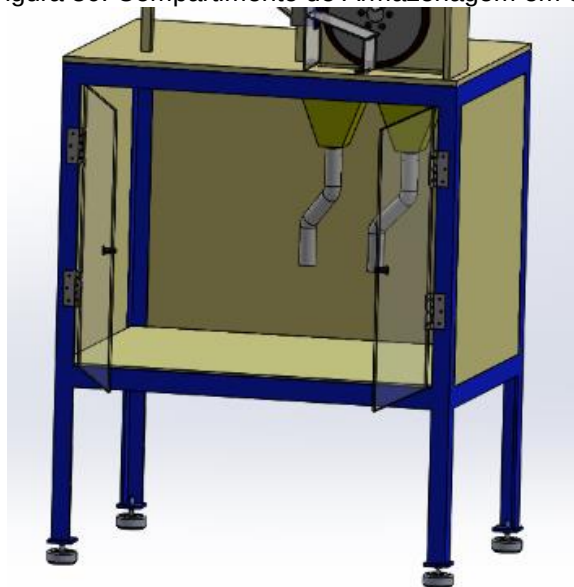


Fonte: O próprio autor

3.5.1.5 Compartimentos

Foi projetado ao equipamento um compartimento que tem como principal objetivo o armazenamento do abrasivo ensaiado e do não ensaiado a partir da separação sistema coletor de abrasivo (Figura 30). Esse compartimento também será utilizado para armazenagem de ferramentas de operação e manutenção do Roda de Borracha.

Figura 30: Compartimento de Armazenagem em 3D



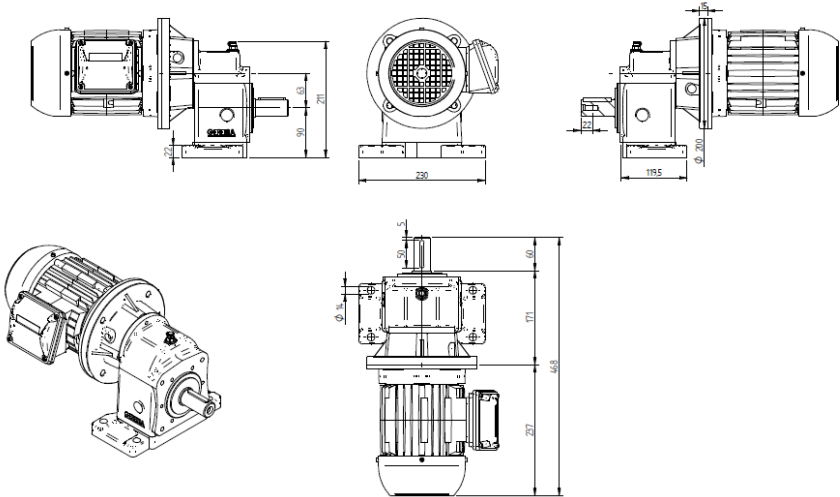
Fonte: O próprio autor

3.5.2 ACIONAMENTO

3.5.2.1 Motor e redutor

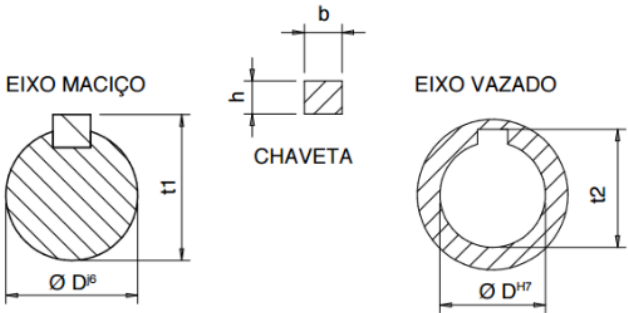
Em atendimento a norma ASTM G-65, o conjunto motriz é composto por um motor elétrico de 0,75 kW (1,0 cv) e uma relação de transmissão a fim de produzir uma rotação de saída de 200 RPM $\pm$ 10 RPM no disco de borracha. O conjunto motor/redutor escolhido para o projeto foi o modelo GA71 da empresa GEREMIA. Conjunto formado por: Motor de 1 cv, 4 polos, frequência de 60 Hz, e rotação 1750 RPM. E redutor tem relação de 1x9 e eixo de saída maciça. Segue abaixo as dimensões do conjunto Motor/Redutor (Figura 31 e 32).

Figura 31: Dimensões do Conjunto Motor/Redutor em 2D



Fonte: Geremia (2016)

Figura 32: Dimensões do eixo de saída



EIXO MACIÇO DE ENTRADA					
REDUTOR	ØD⁶	CHAVETA		RASGO	
		b	h	11	12
GA56	16	5	5	18	18.3
GA71	19	6	6	21.5	21.8
GA90	24	8	7	27	27.3
GA112	28	8	7	31	31.3
GA132	42	12	8	45	45.3
GA160	42	12	8	45	45.3
GA180	55	16	10	59	59.3

Fonte: Geremia (2016)

3.5.2.2 Inversor de frequência

Inverso de Frequência são destinados ao controle e variação de velocidade de motores elétricos de indução trifásicos e podem ser utilizados nos mais diversos segmentos industriais (Figura 33).

No projeto foi selecionado o inversor Weg modelo CFW500, com alimentação monofásica de 220 V e corrente de 4,3 A. Esse inverso é dimensionado para o motor de 1 cv, 4 polos, frequência de 60 Hz, e rotação 1750 RPM que é utilizado no projeto.

Figura 33: Inversor de Frequência WEG CFW500



Fonte: WEG (2017)

3.5.2.3 Acoplamento Flexível

No projeto foi selecionado um acoplamento elástico com garras. Esse acoplamento constitui-se de dois cubos simétricos de ferro fundido cinzento e um elemento elástico de borracha sintética com elevada resistência à abrasão alojado entre eles.

No projeto será utilizado um acoplamento flexível entre o eixo de saída do conjunto motor/redutor e o eixo de fixação da roda de borracha (Figura 34).

Figura 34: Acoplamento Flexível



Fonte: Acriflex (2017)

3.5.2.4 Eixo e mancal

Mancal

No projeto foi selecionado um mancal tipo flange modelo F208 com rolamento auto compensador. Este tipo de mancal é utilizado onde o eixo atravessa a estrutura da máquina em um ângulo reto, facilitando a montagem e fixação na face da máquina. A montagem é realizada com quatro parafusos e equipado com rolamento. E este modelo é pré-lubrificado e pronto para instalação imediata, um encaixe de graxa fornece a ré-lubrificação caso seja exigida.

Os mancais são elementos utilizados em máquinas e servem de apoio fixo aos constantes movimentos giratórios (eixo). É disponibilizado em ferro fundido, que por sua vez favorece excelente dissipação de calor. A função do mancal é posicionar um elemento de máquina que gira em relação a outro, ou seja, os mancais são destinados a assegurar movimentação rotativa entre duas superfícies, com baixo nível de atrito (Figura 35).

Figura 35: Mancal F208



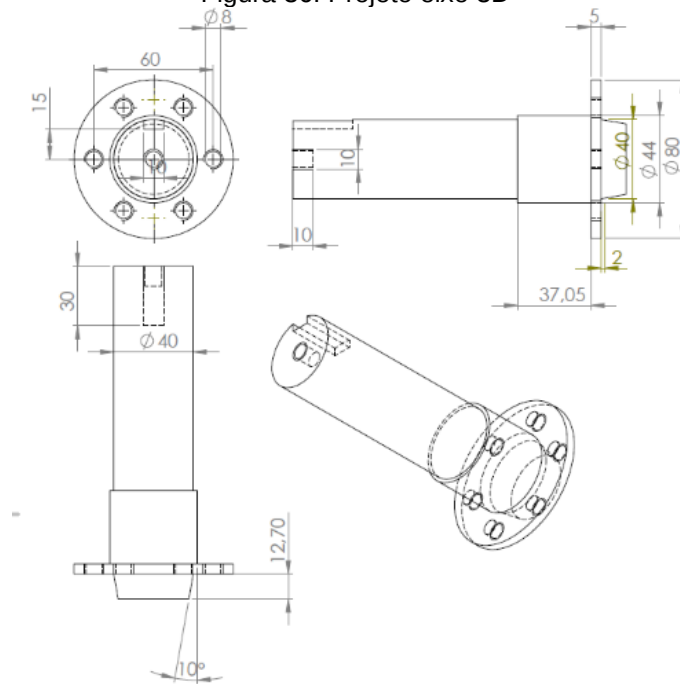
Fonte: Rolemak (2017)

Eixo

A interface entre a roda de borracha e o acoplamento flexível centrada no mancal do tipo flange conforme projeto. O eixo será fabricado do aço SAE 1020.

Em uma extremidade o eixo será fixado ao acoplamento flexível devida a utilização de chaveta e parafuso no centro do seu eixo. Na outra extremidade, o eixo terá acoplado a roda de borracha com a utilização de seis parafusos de 8 mm e um ressalto cônico para centralização da roda de borracha. Na Figura 36, podemos observar o projeto do eixo.

Figura 36: Projeto eixo 3D



Fonte: O próprio autor

3.5.2.5 Contador de giro

Para certificar a manutenção da rotação do equipamento durante o ensaio, instalamos um tacômetro digital. Que opera por contato possibilitando medir o número de rotações por minuto (RPM) e também a velocidade da superfície em m/min (metros por minuto).

Ele foi fixado na roda de borracha e na bancada de ensaio. E o visor foi fixado em uma bancada de ensaio numa posição de fácil visibilidade ao operador através de uma fita dupla face (Figura 37).

Figura 37: Tacômetro Digital



Fonte: Connectparts (2017)

3.5.3 RODA DE BORRACHA

A roda de borracha é composta por dois materiais distintos, um disco de aço SAE 1020, e sobre este, uma tira de borracha vulcanizada sem emendas, como mostrado na Figura 3.17. A roda é montada sobre o eixo que tem um ressalto cônico para centralização e seis parafusos de 8 mm, como mostrado na Figura 38.

Figura 38: Roda de Borracha 2D



Fonte: O próprio autor

Foram confeccionadas quatro rodas de borracha para garantir uma fácil substituição e vulcanização quando necessário. As especificações das rodas, fabricadas segundo a ASTM G-65, são mostradas na Tabela 5.

Tabela 5: Especificações da Roda de Borracha pela ASTM G-65

Especificação do disco SAE 1020		Especificação da tira de borracha			Diâmetro externo total
Ø Externo	Espessura	Largura	Espessura	Dureza	
203,2 mm	12,7 mm	12,7 mm	12,7 mm	60 Shore A	228,6 mm

Fonte: ASTM G-65 (2010)

3.5.4 BICO DOSADOR

O Bico dosador tem a finalidade de conduzir o material abrasivo ao contato da roda de borracha e a amostra que está sendo ensaiada. No equipamento projetado tem-se duas configurações para o ensaio, vertical e horizontal, e para isso foi utilizado sistema distintos.

3.5.4.1 Vertical

O projeto do bico dosador na configuração vertical foi realizado segundo projeto da normal ASTM G-65 (Figura 18 (a)). Qualquer material pode ser utilizado para a fabricação do bico. Será utilizado um aço inoxidável devido à sua resistência à corrosão e facilidade de união por solda.

3.5.4.2 Horizontal

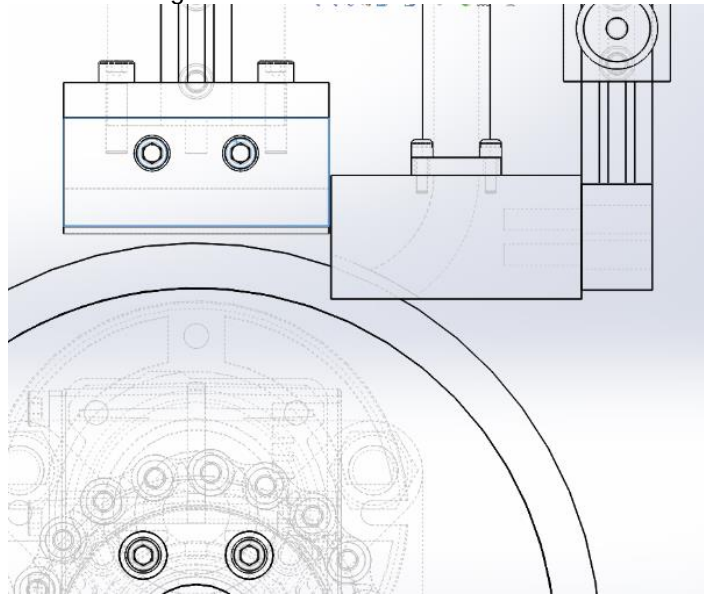
A principal função do Bico Dosador do abrasivo é conduzir o abrasivo para o contato entre a roda de borracha e a amostra que está sendo ensaiada e controlar o fluxo do abrasivo durante o ensaio. Na configuração de ensaio na vertical o Bico Dosador segue projeto a norma ASTM G-65 conforme vimos no item anterior. Porém na configuração de ensaio na horizontal, o equipamento proposto de Hutchings e Stevenson não há um projeto para esta componente. Havendo apenas a compreensão que o componente desenvolvido para configuração horizontal obtenhas os mesmos resultados na etapa de validação do equipamento.

Durante os ensaios Interlaboratorial, foram realizados ensaios em dois Roda de Borracha na configuração horizontal. Os dois equipamentos apresentavam projetos distintos para o sistema de dosagem do abrasivo, porém, tinham em comum a dificuldade de direcionar o abrasivo para tangenciar entre a roda de borracha e a amostra.

Visto a dificuldade observada no Roda de Borracha Horizontal durante o ensaio Interlaboratorial, foi desenvolvido um sistema de dosagem que deposita o abrasivo na roda de borracha, evitando a pulverização do abrasivo devido à falta de tangenciamento devido a posição da amostra em relação a roda de borracha.

O controle do fluxo do abrasivo será realizado com a regulagem a altura do sistema de dosagem. Quanto mais próximo da roda de borracha menor será o abrasivo depositado (Figura 39).

Figura 39: Bico Dosador Vertical 2D



Fonte: O próprio autor

Abaixo podemos observa uma foto do dosador fabricado a partir de um sistema bipartido (Figura 40).

Figura 40: Bico Dosador



Fonte: O próprio autor

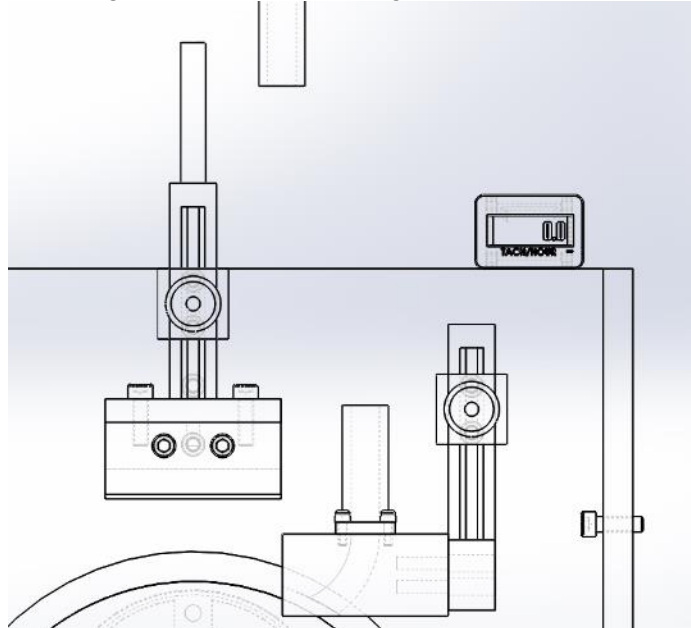
3.5.5 APLICAÇÃO DA CARGA NORMAL

A aplicação da força normal à amostra ensaiada, pela norma ASTM G-65 (2010) e pelo equipamento proposto por Hutchings e Stevenson, é feita por meio de pesos mortos, tendo o limite máximo fixado em 130 N.

3.5.5.2 Horizontal

Na configuração horizontal simplificamos o sistema de alavanca foi substituído por um sistema direto de aplicação de carga com movimentos verticais (Figura 43). Esse sistema devido a sua tolerância geométricas e minimização da atuação de força de atrito entre o pistão e o guia, foi confeccionado em aço inoxidável (Figura 44).

Figura 43: Sistema de carga na Horizontal 2D



Fonte: O próprio autor

Figura 44: Sistema de carga na Horizontal



Fonte: O próprio autor

3.5.6 CÉLULA DE CARGA

Foi selecionado um o dinamômetro digital (Célula de Carga) de tração e compressão de 25 kgf. Esse dinamômetro é equipado com uma célula de carga do tipo e display digital (Figura 45).

A Célula de Carga será utilizada em duas situações distintas:

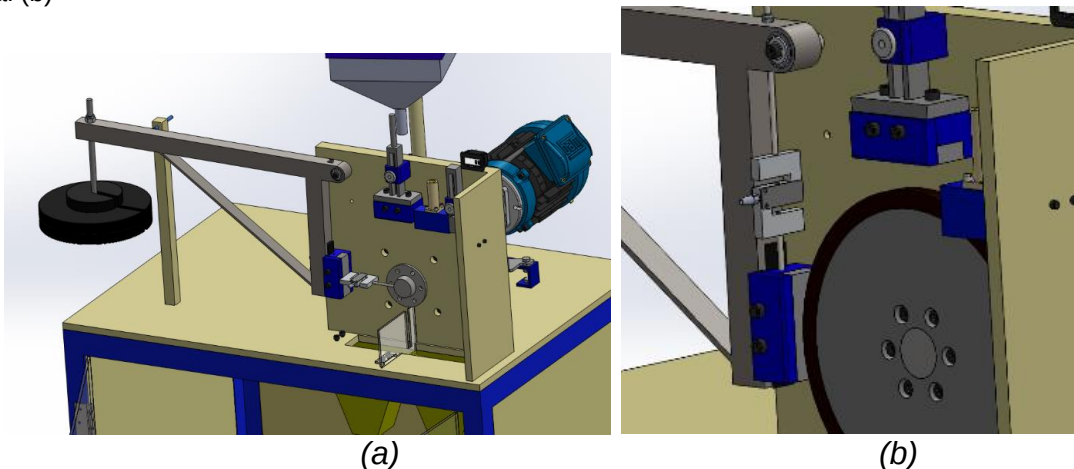
- Para calibrar a carga nominal da amostra nas duas configurações do ensaio, horizontal e vertical (Figura 46 (a)). OBS: Procedimento descrito na validação do equipamento;
- Para aferir a força de atrito durante o ensaio na configuração vertical (Figura 46 (b)).

Figura 45: Célula de Carga



Fonte: Célula de carga Crown DBC-25 – (Tecnoferramentas, 2017)

Figura 46: Calibração da carga nominal (a) e Célula de Carga durante o ensaio na configuração vertical (b)



(a)

(b)

Fonte: O próprio autor

3.5.7 PORTA AMOSTRAS

Para prender de forma segura o corpo de provas durante o ensaio, o porta amostras foi projetado para comportar amostras de dimensões 25 x 75 x 10 mm (L x A x Esp.). A amostra encaixada nele é fixada por um ressalto em um dos lados da porta amostra.

A única diferença entre o porta amostra da configuração vertical da horizontal (Figura 48 (a)) é a utilização da Célula de Carga durante o ensaio, e com isso o porta amostra da configuração vertical tem um sistema de deslocamento na direção vertical e um furo para fixação da Célula de Carga (Figura 47 (b)).

Figura 47: Porta Amostra: (a) Horizontal (b) Vertical



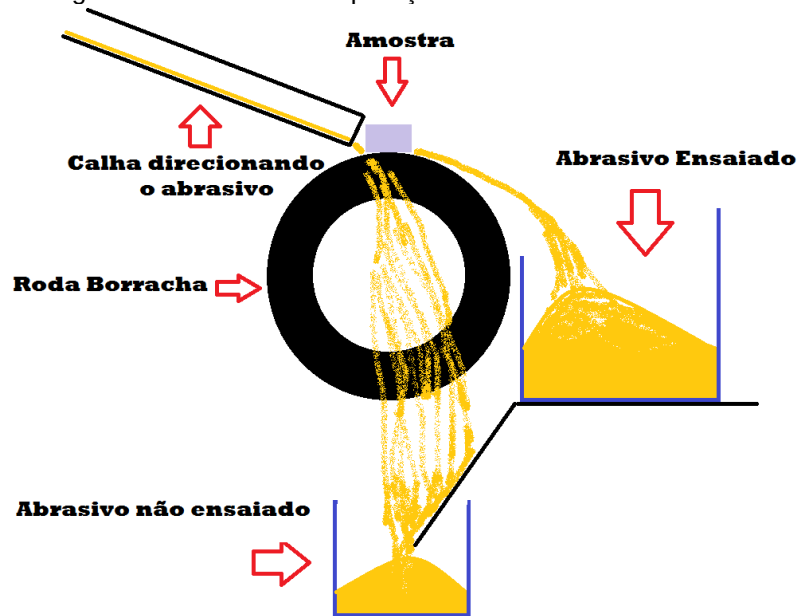
Fonte: O próprio autor

3.5.8 SISTEMA DE SEPARAÇÃO DE ABRASIVO

Nos ensaios Interlaboratorial, com um Roda de Borracha na configuração horizontal verificou-se a tentativa de separar o abrasivo do ensaiado no não ensaiado (Figura 48).

E a partir da observação do experimento realizado no equipamento de um dos laboratórios adotou-se no projeto a premissa de quantificar o abrasivo ensaiado. Esta possibilidade pode economizar devido a reutilização do abrasivo não ensaiado.

Figura 48: Sistema de Separação de Abrasivo Laboratório E

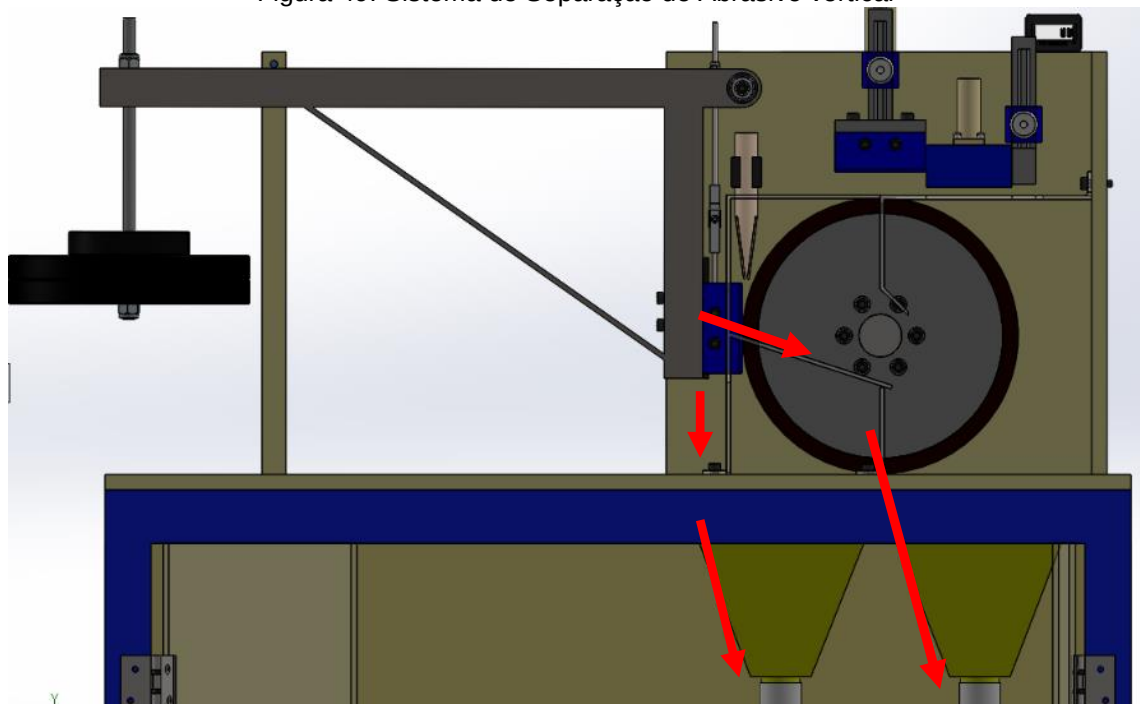


Fonte: Próprio autor

3.5.8.1 Vertical

Na configuração vertical foi projetado um sistema de calhas para separar o abrasivo a partir do ponto de início de tangenciamento da amostra e a roda de borracha conforme observado na Figura 49. Posteriormente, os abrasivos serão direcionados a silos específicos conforme projeto.

Figura 49: Sistema de Separação de Abrasivo vertical

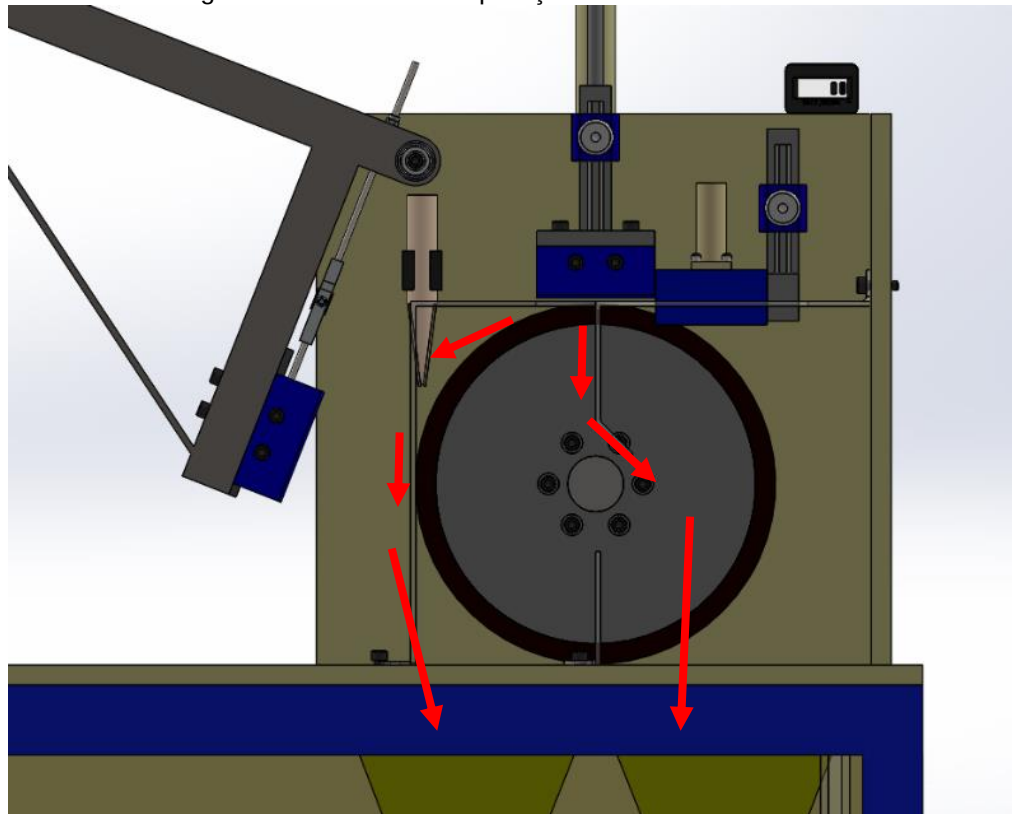


Fonte: O próprio autor

3.5.8.2 Horizontal

Na configuração horizontal, idem a configuração vertical, foi projetado um sistema de calhas que vai separar o abrasivo a partir do ponto de início de tangenciamento da amostra e a roda de borracha conforme podemos observar na Figura 50. Posteriormente, os abrasivos serão direcionados a silos específicos conforme projeto.

Figura 50: Sistema de Separação de Abrasivo horizontal



Fonte: O próprio autor

4 O ENSAIO

Nesse capítulo serão abordados todos os procedimentos operacionais do Roda de Borracha utilizando como padrão a norma ASTM G-65 (2010). Adicionalmente apresentados conhecimentos práticos adquiridos no estudo Interlaboratorial realizado em equipamentos do tipo Roda de Borracha.

4.1 Ajustes do equipamento

Nesta etapa são apresentadas as variáveis de ajuste do equipamento para a validação de acordo a norma ASTM G-65 (2010). Essas variáveis deverão ser avaliadas periodicamente para manutenção dos parâmetros na norma.

4.1.1 AJUSTE DA CARGA PARA O ENSAIO

Segundo a norma ASTM G-65 (2010), existem cinco procedimentos (Tabela 3) possíveis para realização do ensaio, nesses procedimentos a carga resultante entre o ponto de contato da amostra e a roda de borracha pode variar de 130 N ou 45 N.

O equipamento projetado tem duas configurações possíveis para o ensaio vertical ou horizontal, e independente da configuração a ser utilizada, a carga resultante entre o ponto de contato da amostra e a roda de borracha deverá seguir o procedimento de acordo ao material ensaiado.

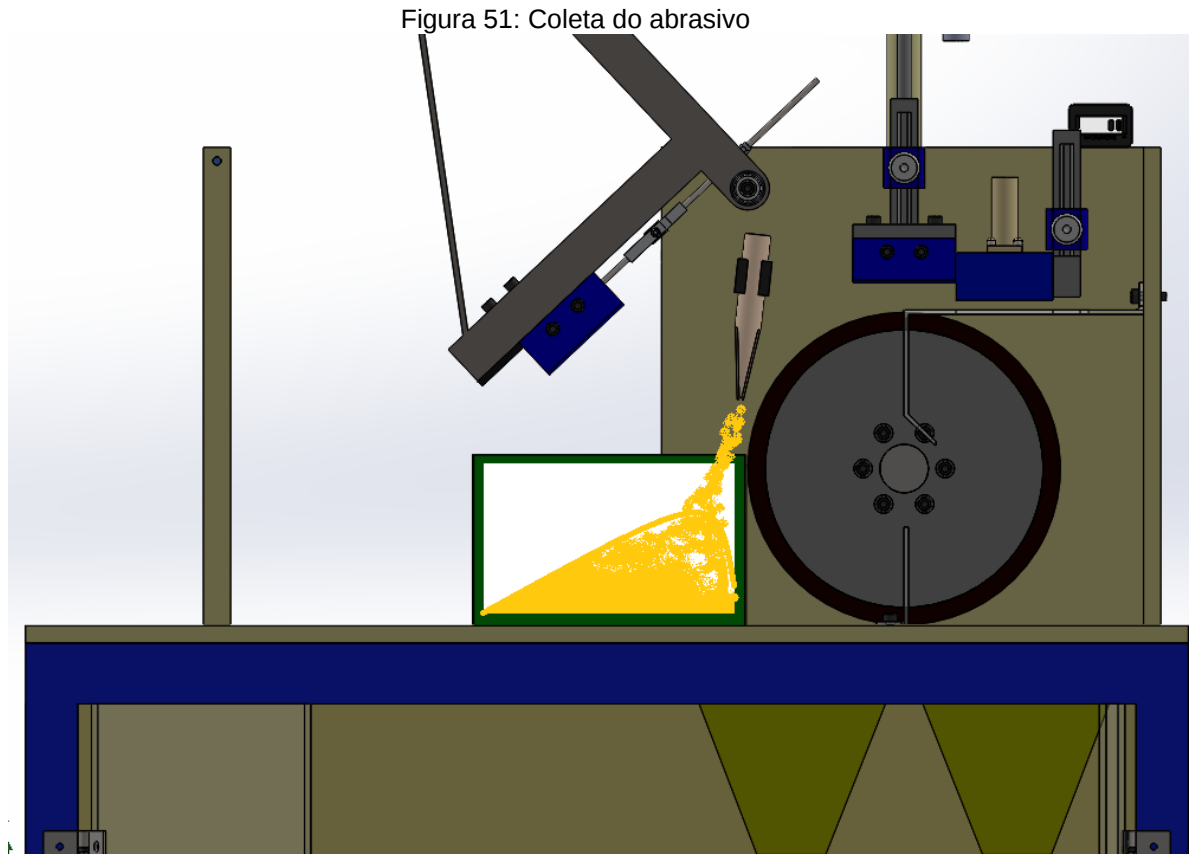
Para realizar essa calibração a roda de borracha deve ser retirada e substituída por um Dinamômetro digital de capacidade 250N (Figura 46). Posteriormente deve-se aplicar anilhas com pesos específicos para atingir a carga requerida pelo procedimento. O procedimento de calibração do Roda de Borracha do Laboratório A é ilustrado na Figura 47 (a). Vale salientar que independente da configuração a ser utilizada nos ensaios, o procedimento utilizado para calibração da carga é o mesmo para ambas configurações.

4.1.2 AJUSTE DA VAZÃO DO ABRASIVO

Configuração vertical

Segundo a norma ASTM G-65 (2010), o fluxo do abrasivo deverá apresentar uma taxa de 300 a 400 g/min. Esta medição é realizada experimentalmente. Com ajuda de um cronometro, o abrasivo é liberado para coleta e, após um minuto do

experimento, o fluxo interrompido para finalmente realizada pesagem da quantidade coletada (Figura 51). Ocorrendo não conformidade na taxa do fluxo ou na turbulência no fluxo do abrasivo gerado pelo bico dosador, deverá ser realizado ajustes na geometria da área de saída do bico dosador.



Fonte: O próprio autor

Configuração horizontal

Nesta configuração, equipamento proposto de Hutchings e Stevenson (1996), não há uma recomendação para calibração da taxa do fluxo do abrasivo. Porém, a taxa que deverá ser utilizada tem que reproduzir os mesmos resultados de desgaste utilizados nos materiais para validação do equipamento.

4.1.3 AJUSTE DO DINAMÔMETRO

Na configuração vertical, o Roda de Borracha foi equipado com um dinamômetro, que tem objetivo de acompanhar as variações de força de atrito. Este dinamômetro será utilizado em trabalhos futuros sobre o estudo do comportamento do atrito durante os ensaios do Roda de Borracha (Figura 47 (b)).

4.1.4 AJUSTE DA ROTAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Segundo a norma ASTM G-65, a taxa de rotação da roda de borracha deverá ser 200 RPM (com tolerância de ± 10 RPM). O sistema motriz utilizado em no projeto atende a recomendação da norma. Mesmo o projeto atendendo a rotação da norma, será utilizado um equipamento para medir a rotação em todos os estágios do ensaio.

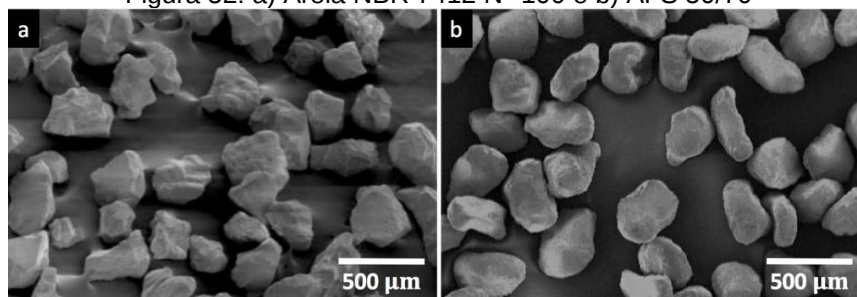
4.2 Norma ASTM G-65 (2010) versus práticas laboratoriais

4.2.1 ABRASIVO

Segundo a norma ASTM G-65, o abrasivo que dever ser utilizado é fabricado de uma areia de quartzo com o grão arredondado e classificado na faixa AFS 50/70. Esse abrasivo tem 5% no máximo de retenção na peneira 50, que tem uma malha de 300 μm , e uma retenção de 95% na peneira 70, que tem uma malha de 212 μm . Como isso, tem-se um abrasivo recomendado pela na variando sua granulometria ente 212 μm a 300 μm .

Porém, esse abrasivo recomendado pela norma não é comercializado no Brasil. Através do estudo Interlaboratorial, foi apresentado o abrasivo fornecido para o IPT, um instituto vinculado à Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Ciência, Tecnologia e Inovação do Estado de São Paulo. O abrasivo selecionado para realização dos testes de abrasão foi a Areia Normal Brasileira NBR 7412 – N° 100 ou 0,15 mm pela semelhança de tamanho com a areia recomendada pela norma ASTM G65. A granulometria da areia IPT 100 varia entre 150 μm a 300 μm , essa foi a faixa de granulometria é a que mais se aproxima da recomendada pela norma ASTM G-65 (212 μm à 300 μm). Observa-se que a areia AFS 50/70 possui uma morfologia mais arredonda que a areia do IPT. Abrasivos mais angulosos podem causar maior abrasividade nos materiais (Figura 52).

Figura 52: a) Areia NBR 7412 N° 100 e b) AFS 50/70



Fonte: adaptado de Neville, A., et al., (2006)

No quesito umidade, abrasivo do instituto IPT ao requisito de controle que deve ser menor ou igual a 0,2% (Tabela 6).

Tabela 6 – Dados Técnicos do Abrasivo (IPT, 2016)

Determinação	Resultados	Requisito
Teor de sílica - ABNT NBR 14656:2001	96,7	≥ 95%, em massa
Granulometria ABNT NBR NM 248:2003	Tabela 2	
Umidade - ABNT NBR 7214:2015	0,0	≤ 0,2%, em massa
Matéria orgânica - ABNT NBR NM 49:2001	< 100 ppm	≤ 100 ppm

Fonte: ITP (2016)

Tabela 7 – Granulometria (IPT, 2016)

Fração	Material retido entre as peneiras de abertura nominal	Porcentagem em massa %	
		Resultados	Requisito
16	2,4 mm e 2,0 mm	8	≤ 10
	2,0 mm e 1,2 mm	90	≥ 90
30	1,2 mm e 0,6 mm	98	≥ 95
50	0,6 mm e 0,3 mm	97	≥ 95
100	0,3 mm e 0,15 mm	97	≥ 95

Fonte: ITP (2016)

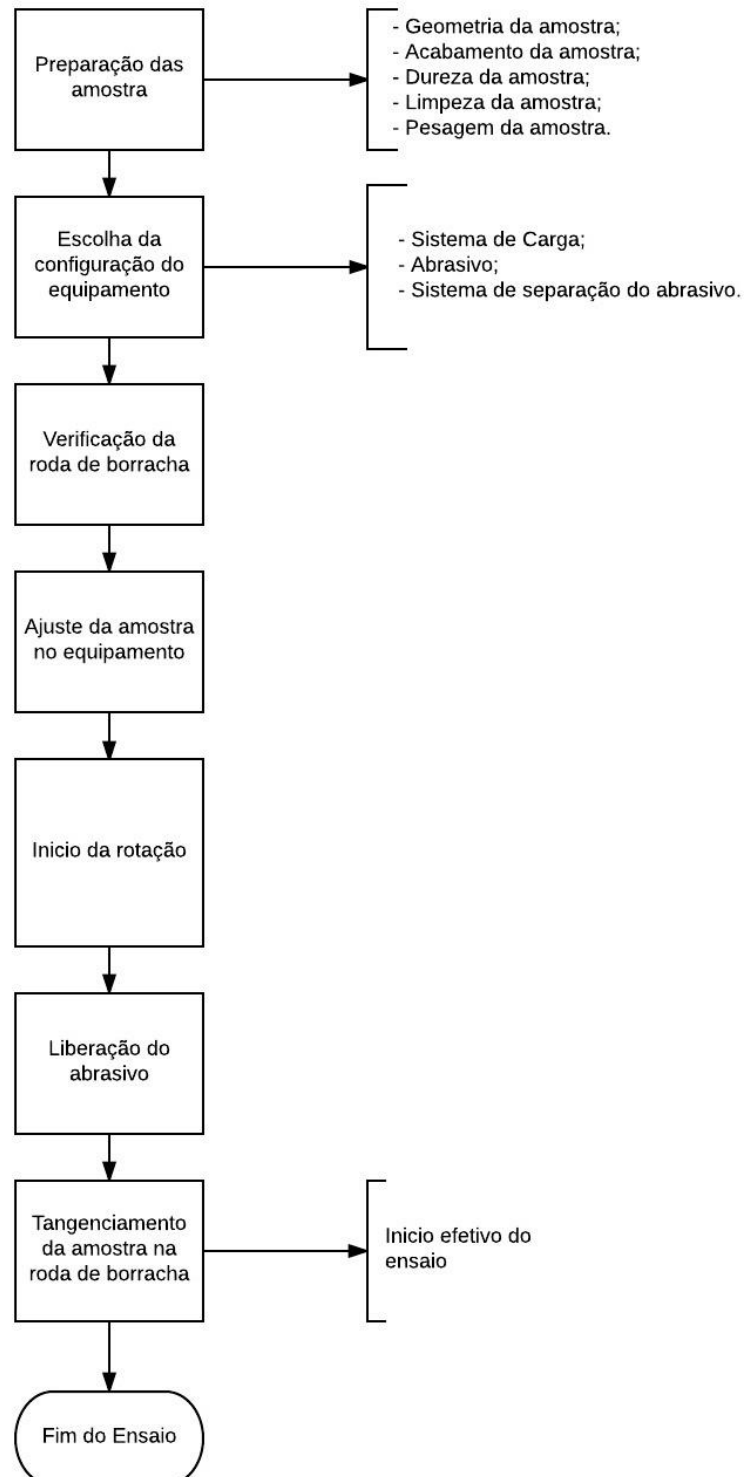
4.2.2 BORRACHA

Segundo a norma ASTM G-65 (2010), o composto que deve ser utilizado no revestimento do disco do disco de aço é uma borracha de Clorobutílica, de composição indicada na Tabela 5. A dureza da borracha deve ser de 60 Shore A (A-60), sendo aceitável uma variação de 58 a 62 Shore A. Porém, não conseguimos encontrar nenhuma empresa que trabalhasse com o polímero recomendado pela norma na Região Nordeste. Através do estudo Interlaboratorial, foi verificado que os laboratórios tinham extrema dificuldade com a qualidade do polímero que eles tinham disponível no mercado. Dois problemas foram identificados na utilização da borracha nesses laboratórios: Um está relacionado a manutenção da dureza durante os ensaios; E o outro seria o elevado desgaste da borracha gerando uma perda do diâmetro durante os ensaios. A borracha utilizada pelo Laboratório A, apresentou melhor controle nos parâmetros de dureza e nível desgaste. Por este motivo, o fornecedor escolhido para vulcanizar a roda de borracha do projeto da UFPE foi o mesmo do laboratório A.

4.3 Etapas do ensaio

Nesta etapa iremos detalhar o passo a passo para realização dos ensaios no equipamento independente do procedimento a ser utilizado. Abaixo na figura 53 o fluxograma das etapas para realização do ensaio.

Figura 53: Fluxograma das etapas para realização do ensaio



Fonte: Próprio autor

4.3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Geometria das amostras

Segundo a norma ASTM G-65 (201), as amostras deverão ser confeccionadas com formato retangular de 25x76 mm e sua espessura está entre 12,7 a 3,2 mm. A medida da espessura varia pelo proposito de poder reutilizar as amostras após os ensaios realizando usinagem e retifica da superfície utilizada no ensaio.

Acabamento das amostras

Segundo a norma ASTM G-65 (2010), a superfície da amostra deve ser lisa, plana e livre de escala. Defeitos como rugosidade e porosidade podem distorcer os resultados. Tais defeitos devem ser evitados ao menos que a própria superfície esteja sobre analise. O acabamento superficial recomendado é de cerca de 0,8 mm ou menos.

Dureza das amostras

Na etapa de validação do equipamento, a norma ASTM G-65 exige a utilização de amostras feitas com material de referência. Esses materiais de referência utilizados na validação do equipamento têm dureza normatizada pela ASTM G-65 (2010).

Limpeza das amostras

Segundo a norma ASTM G-65 (2010), a amostra deve ser limpar com um solvente de liquido ou seco. Alguns tipos de aço têm magnetismo residual e devem ser desmagnetizados. Abaixo um exemplo de desmagnetizador utilizado nos ensaios Interlaboratorial do Laboratório E (Figura 54).

Figura 54: Desmagnetizador



Fonte: KMD-F – (Kanetec/2017)

O procedimento de limpeza recomendado pela norma ASTM G-65 (2010) foi aprimorado com a experiência obtida nos laboratórios do estudo Interlaboratorial. A seguir a recomendação sugerida:

- As amostras devem ser lavadas com sabão neutro e escova (macia);
- As amostras devem ser secadas com ar comprimido;
- As amostras devem ser lavadas com Álcool 99,5%;
- As amostras devem ser secadas com ar quente.

Observação: A partir desse passo uma pinça deve ser utilizada para não ter contaminação de suor com contato direto da amostra com a pele.

- As amostras deveram ficar submersas em álcool por 15 minutos no ultrassom;
- As amostras deveram ser desmagnetizadas (Figura 55).

Figura 55: Ultrassom



Fonte: Ultrasonic table-top unit – (Elma/2017)

Pesagem das amostras

Segundo a norma ASTM G-65, a pesagem das amostras deve ser realizada com balança de precisão de 0,001 g (0,0001 g para o Procedimento C). O procedimento de pesagem recomendado pela norma ASTM G-65 (2010) foi otimizado recomendando-se a utilização de balança com resolução de 0,0001 gramas e realizando cinco medições para cada amostra (Figura 56).

Figura 56: Balança de Precisão



Fonte: JB – Ind. e Com. Maquinas e Balanças LTDA (2017)

4.3.2 ESCOLHA DA CONFIGURAÇÃO PARA O ENSAIO

Antes de efetivamente realizar o ensaio, deverá ser escolhida a configuração a ser utilizada. A partir da escolhida o equipamento deve ser ajustado conforme os passos abaixo:

Sistema de carga e injeção do abrasivo

Desativar o sistema de carga e injeção do abrasivo na configuração que não será utilizada (Figura 58).

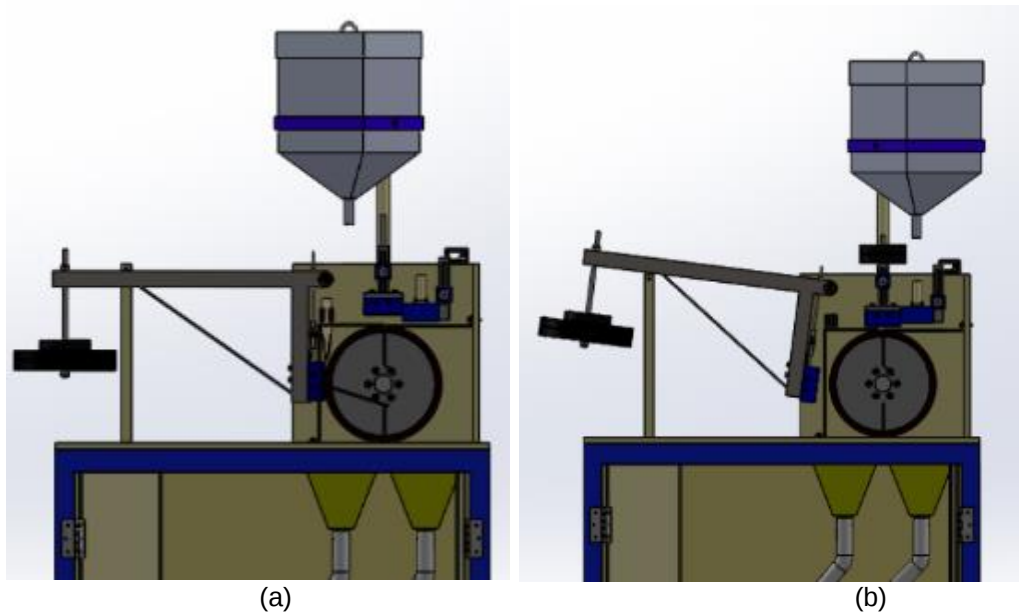
Abrasivo

Posicionar o silo próximo ao sistema de injeção do abrasivo e realizar a conexão do silo com sistema dosador por um tubo flexível (Figura 58).

Sistema de separação do abrasivo

Após a escolha da configuração que será utilizada no ensaio, devemos instalar a respectivo sistema de calhas para a separação do abrasivo para sua respectiva configuração (Figura 57).

Figura 57: Modelo 3D do Abrasômetro Roda de Borracha Vertical/Horizontal: a) posição para ensaios no modo “vertical”, b) posição para ensaios no modo “horizontal”.



Fonte: Próprio autor

4.3.3 VERIFICAÇÃO DA RODA DE BORRACHA

Segundo a norma ASTM G-65, pelo menos quatro leituras de dureza devem ser realizadas na roda de borracha durante os ensaios. As quatro leituras deveram ser tomadas com um intervalo de 5 segundos e com distância de 90° entre si. Deve-se usar um durômetro Shore A (Figura 58).

Figura 58: Durômetro



Fonte: Próprio autor

A norma ASTM G-65 (2010), recomenda que seja medido o diâmetro da roda de borracha para que seja ajustado o resultado do ensaio a partir da variação do diâmetro inicia recomendado (228,6mm) com o diâmetro efetivo que realizou o ensaio. Quando for necessário, será realizado retifica da roda de borracha no próprio equipamento para corrigir problemas de balanceamento e desgaste localizados.

4.3.4 AJUSTE DA AMOSTRA NO EQUIPAMENTO

Ainda sem ter contato direto com a amostra a deve ser posicionada na máquina com os passos abaixo:

- Colocar a amostra no porta amostra;
- Fixar a amostra no porta amostra;
- Aproximar até o encontro da amostra a roda de borracha;
- Liberar a fixação da amostra para que ela possa alinhar seu plano de ensaio com o plano tangente da roda de borracha;
- Realizar a fixação final da amostra no porta amostra;
- Afastar a amostra da roda de borracha.

4.3.5 INÍCIO DA ROTAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Nessa etapa, o conjunto motriz do equipamento deve ser ligado aguardando a estabilização da rotação. O contador de giro auxiliará nesta etapa do ensaio.

4.3.6 LIBERAÇÃO DO ABRASIVO

Nesta etapa deve ser abastecido o silo do abrasivo até seu limite máximo para garantir que independente no procedimento da norma ASTM G-65 (2010) a ser utilizado ensaio seja contínuo sem problemas de abastecimento de abrasivo. Após o abastecimento é liberado a saída do abrasivo.

4.3.7 TANGENCIAMENTO DA AMOSTRA NA RODA DE BORRACHA

Para iniciar o ensaio é realizado um sutil tangenciamento da amostra com a roda de borracha. E inicia-se a cronometragem do ensaio. Pontos que devem ser observados durante o ensaio:

- Nível do abrasivo;
- Vibração do sistema de carga;
- A eficácia do fluxo do abrasivo entre a amostra a roda de borracha;

- Aparecimento de desgaste anormais da roda de borracha.

4.3.8 Fim do ensaio

Após o fim tempo para realização do ensaio de acordo ao procedimento requerido deve ser realizado:

- Afastar a amostra da roda de borracha;
- Interromper o fluxo do abrasivo;
- Desligar o conjunto motriz;
- Esperar 10 minutos para resfriamento da amostra;
- Retirar a amostra do porta amostra.

4.3.9 MEDIÇÃO DOS RESULTADOS

Para finalizar o ensaio os passos Limpeza e Pesagem da Amostra deveram ser repetidos para coleta dos dados. A norma ASTM G-65 (201) recomenda um ajuste do resultado a partir do diâmetro da roda de borracha. A norma ASTM G-65 (2010) recomenda que os resultados finais deverão ser convertidos para mm³.

4.4 Validação do equipamento

Segundo a norma ASTM G-65 (2010), a etapa de validação do equipamento deverá ter no mínimo cinco ensaios para avaliar o funcionamento. Posteriormente, após a validação deverá ser realizado no mínimo três ensaios para monitorar periodicamente sua precisão. Estes testes deverão utilizar um dos três materiais de referência da norma ASTM G-65 (2010).

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios de desgaste realizados na UFPE e no estudo Interlaboratorial. Serão mostrados e discutidos os resultados de todos os experimentos realizados. Nos resultados finais utilizamos materiais de referência (aço AISI D2 e AISI H13) e procedimento recomendados pela norma ASTM G-65 (2010). Os resultados da validação foram comparados aos realizados no estudo Interlaboratorial e os resultados da norma ASTM G-65 (2010).

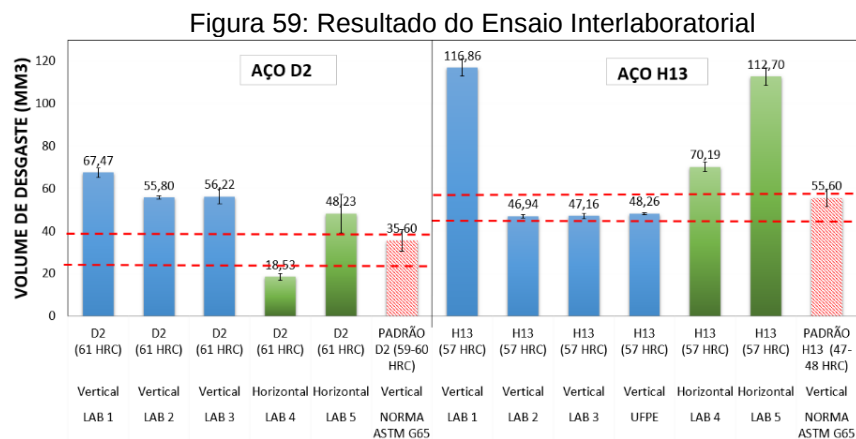
5.1 Estudo interlaboratorial

Foi realizado um estudo Interlaboratorial envolvendo laboratórios que já possuem o Roda de Borracha com o objetivo de agregar conhecimentos teóricos e práticos ao projeto. Os laboratórios foram:

- Laboratório A – Roda de Borracha Vertical 1 e Vertical 2;
- Laboratório B – Roda de Borracha Vertical 3;
- Laboratório C – Roda de Borracha Horizontal 1;
- Laboratório D – Roda de Borracha Horizontal 2;

Devemos salientar que o resultado para o aço AISI D2 utilizado o Procedimento B (30 min). Porém devido ao comportamento linear do desgaste abrasivo com o tempo, para simplificar o ensaio, foram realizados teste de 10 min e multiplicado o valor do ensaio em 3 vezes.

O procedimento utilizado foi padronizado de acordo a norma ASTM G-65 (2010) em todos os laboratórios com o objetivo de comparar os resultados. Este mesmo procedimento foi utilizado na validação do equipamento proposto no trabalho. A seguir os comentários dos resultados dos ensaios (Figura 59).



Fonte: Próprio autor

Observação 1 – Devemos salientar que o resultado para o aço AISI D2 e AISI H13 foi utilizado o procedimento B (30 min). Porém devido o comportamento linear do desgaste abrasivo com o tempo, para simplificar o ensaio, foram realizados testes de 10 minutos e multiplicado o valor do ensaio em 3 vezes.

5.1.1 LABORATÓRIO A

Neste laboratorial foram realizados os ensaios de desgaste abrasivo em dois equipamentos de Roda de Borracha Vertical (Vertical 1 e Vertical 2).

Foram cedidos pelo Laboratório seis amostras de H13 e D2 para o estudo Interlaboratorial. Essas mesmas amostras foram utilizadas nos equipamentos do tipo Vertical denominados de Vertical 1 e Vertical 2.

Na tabela 8 os resultados dos ensaios para o aço AISI H13 e na tabela 9 para o aço AISI D2:

TABELA 8: Resultado do ensaio para o Aço AISI H13 (Laboratório A)

	Vertical 1		Vertical 2	
Amostra	Perca de Massa (g)	Volume Perdido (mm ³)	Perca de Massa (g)	Volume Perdido (mm ³)
CP-03	0,3684	47,54	0,3542	45,70
CP-05	0,3556	45,88	0,374	48,26
CP-08	0,3674	47,41	0,3682	47,51
Densidade (g/cm ³)	7,75		7,75	
Média	0,3638	46,94	0,3655	47,16
Desvio Padrão	0,007118989	0,919	0,010179063	1,313
Coefic. De Variação	1,96%		2,79%	

Fonte: Próprio autor

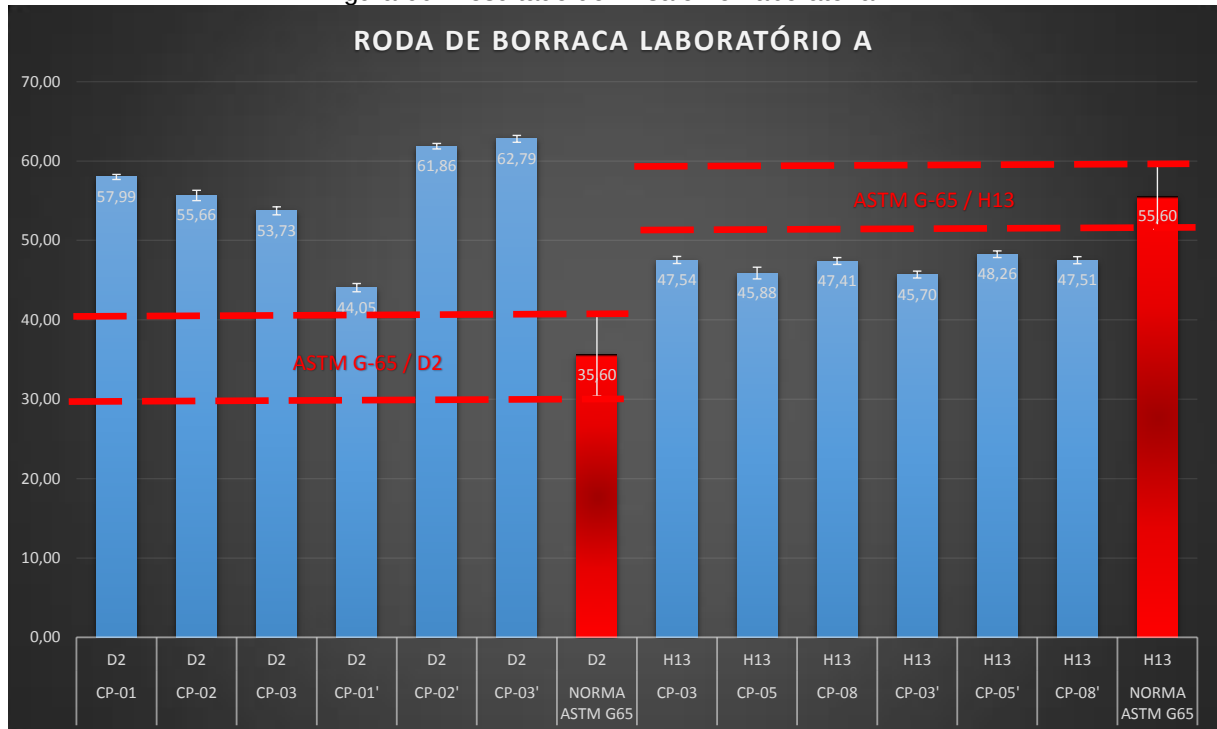
TABELA 9: Resultado do ensaio para o Aço AISI D2 (Laboratório A)

	Vertical 1		Vertical 2	
Amostra	Perca de Massa (g)	Volume Perdido (mm ³)	Perca de Massa (g)	Volume Perdido (mm ³)
CP-03	0,4494	57,99	0,3414	44,04
CP-05	0,4314	55,65	0,4794	61,86
CP-08	0,4164	53,73	0,4866	62,79
Densidade (g/cm ³)	7,75		7,75	
Média	0,144133333	55,8	0,1453	56,22
Desvio Padrão	0,005507571	0,711	0,027277341	3,520
Coefic. De Variação	3,82%		18,78%	

Fonte: Próprio autor

O resultado do ensaio do H13 ficou abaixo do valor de referência informado pela norma ASTM G-65 e o resultado do ensaio do aço D2 ficou acima do valor de referência informado pela norma ASTM G-65 (2010).

Figura 60: Resultado do Ensaio no Laboratório A



Fonte: Próprio autor

Desconsiderado o resultado da amostra CP-01'. Observa-se a boa padronização dos resultados considerando que foram realizados em dois equipamentos distintos. Essa informação pode ser verificada através do Desvio Padrão conforme a Tabela 10 para o aço AISI H13 e a Tabela 11 para o aço AISI D2.

TABELA 10: Média do ensaio e Desvio Padrão para o Aço AISI H13 (Laboratório A)

	H13				
	Ensaio	Variação	G65	Variação	Divergência
VERTICAL 1	46,94	0,919	56	±4	-9,06
VERTICAL 2	47,16	1,313	56	±4	-8,84

Fonte: Próprio autor

TABELA 11: Média do ensaio e Desvio Padrão para o Aço AISI D2 (Laboratório A)

	D2				
	Ensaio	Variação	G65	Variação	Divergência
VERTICAL 1	55,8	0,711	36	±5	19,8
VERTICAL 2	56,22	3,52	36	±5	20,22

Fonte: Próprio autor

A seguir as possíveis causas da divergência dos resultados do ensaio realizado com os valores padrão da norma ASTM G-65 (2010). Seguem abaixo:

- Dureza Roda de Borracha. Conforme a norma, a dureza da roda de borracha deveria estar entre a faixa de 58 a 62 Shore. Durante os ensaios não foram confirmados, ou medidos os valores de dureza da borracha.

- Desgaste da Roda de Borracha. Conforme a norma, deverá ser realizado um ajuste do volume de desgaste a partir da variação do diâmetro da roda de borracha. Essa correção não foi realizada nesse resultado.

- Dureza da Amostra. A norma padroniza o valor de dureza da amostra para realização do ensaio. Uma verificação da dureza real das amostras constatou divergências com os valores especificados pela norma ASTM G-65 (2010).

TABELA 12: Comparação entre dureza real e dureza requerida pela norma ASTM G-65

Material	N. Ref.	Result. 1	Result. 2	Result. 3	Media	G-65
H13	06	54,9	54,3	55,8	55,0	47-48
H13	02	55,5	55,3	55,3	55,4	47-48
H13	04	54,5	55	54,8	54,8	47-48
D2	09	60,7	61,1	61,6	61,1	58,5-60,5
D2	00	62,3	62,5	60,9	61,9	58,5-60,5
D2	07	61,3	61,8	61,5	61,5	58,5-60,5

Fonte: Próprio autor

- A vazão do abrasivo. Segundo a norma ASTM G-65, o fluxo do abrasivo deverá apresentar uma taxa de 300 a 400 g/min. No ensaio utilizamos uma vazão de 463 g/min, ou seja, acima do valor da norma. Isto também pode justificar os resultados. No caso do H13 com dureza acima do valor da norma, mesmo com maior vazão os valores médios de desgaste foram abaixo do esperado. No caso do D2, com dureza próxima ao da norma, uma maior vazão resultou em maior taxa de desgaste.

- Preparação da Amostra. Segundo a norma ASTM G-65 (2010), a amostra deve ser lisa, plana e livre de escala. Os defeitos de superfície, tais como porosidade e rugosidade pode enviesar os resultados dos testes. O acabamento da superfície da amostra deve ser cerca de 0,8 mm (32 µin.) ou menos é aceitável. Como a amostra foi apenas retificada para ensaio, não temos garantia de o acabamento da amostra ser suficiente para não alterar os resultados.

•Abrasivo. O tipo do abrasivo deve ser uma areia de quartzo de grão arredondado do tipo AFS 50/70, que tem a faixa de tamanho de 212 a 300 μm . No Brasil só temos disponível a areia da Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, que tem a areia mais próxima da requerida pela norma a IPT N. 100. A mesma tem a faixa de tamanho de 150 a 300 μm . A vazão de areia ajustada foi de 463 gramas

5.1.2 LABORATÓRIO C

Neste laboratorial os ensaios de desgaste abrasivo no Roda de Borracha Horizontal. Foram realizados em 3 amostras de H13 e 3 amostras de D2.

Também foram realizados ensaios de dureza HRC para confrontar os valores especificados na norma ASTM G-65 (201) conforme informado na Tabela 12.

Na tabela 13 são mostrados os resultados dos ensaios para o aço AISI H13 e na tabela 14 os resultados dos ensaios no aço AISI D2:

TABELA 13: Resultado do ensaio para o Aço AISI H13 (Laboratório C)

Horizontal 1		
<i>Amostra</i>	<i>Perca de Massa (g)</i>	<i>Volume Perdido (mm³)</i>
CP-06	0,5587	72,09
CP-02	0,52452	67,68
CP-04	0,53806	69,43
<i>Densidade (g/cm³)</i>	7,75	
Média	0,540426667	69,73
Desvio Padrão	0,017212464	2,221
Coefic. De Variação	3,18%	

Fonte: Próprio autor

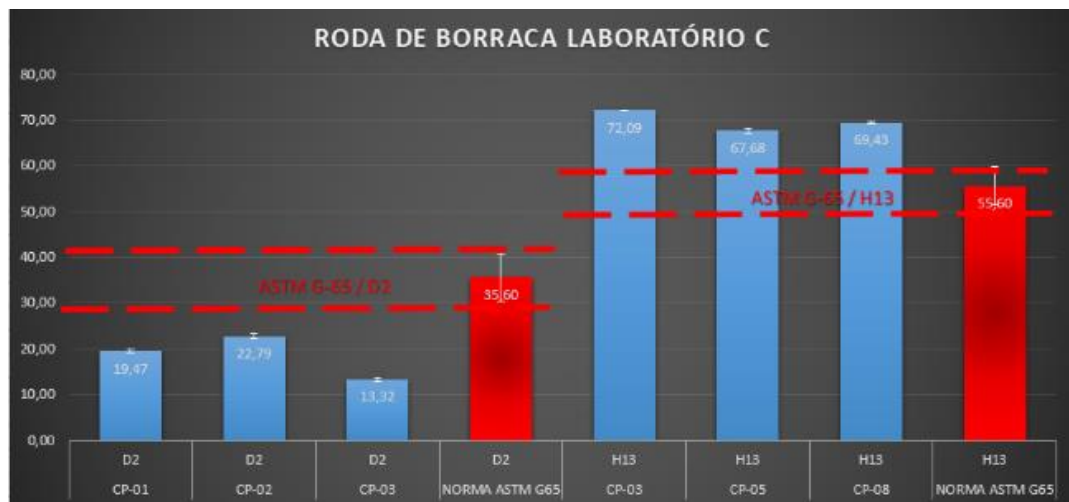
TABELA 14: Resultado do ensaio para o Aço AISI D2 (Laboratório C)

Horizontal 1		
<i>Amostra</i>	<i>Perca de Massa (g)</i>	<i>Volume Perdido (mm³)</i>
CP-09	0,0503	6,49
CP-00	0,05888	7,60
CP-07	0,03442	4,44
<i>Densidade (g/cm³)</i>	7,75	
Média	0,047866667	6,18
Desvio Padrão	0,012410227	1,601
Coefic. De Variação	25,93%	

Fonte: Próprio autor

Observamos que o resultado do ensaio do H13 ficou acima do valor de referência informado pela norma ASTM G-65 e o resultado do ensaio do aço D2 ficou abaixo do valor de referência informado pela norma ASTM G-65 (Conforme Figura 61).

Figura 61: Resultado do Ensaio no Laboratório C



Fonte: Próprio autor

Podemos observar uma falta de uniformidade dos resultados através do valor elevado para o Desvio Padrão conforme a Tabela 15 para o aço AISI H13 e a Tabela 16 para o aço AISI D2.

TABELA 15: Média do ensaio e Desvio Padrão para o Aço AISI H13 (Laboratório C)

	H13				
	Ensaio	Variação	G65	Variação	Variação
Horizontal 1	69,73	2,220963	56	±4	13,73

Fonte: Próprio autor

TABELA 16: Média do ensaio e Desvio Padrão para o Aço AISI D2 (Laboratório C)

	D2				
	Ensaio	Variação	G65	Variação	Variação
Horizontal 1	18,53	1,60132	36	±5	-17,471

Fonte: Próprio autor

Possíveis causas da divergência dos resultados do ensaio realizado com os valores padrão da norma ASTM G-65 (2010). Seguem abaixo:

• **Dureza Roda de Borracha.** Conforme a norma, a dureza da roda de borracha deveria estar entre a faixa de 58 a 62 Shore. Durante os ensaios foi aferido um valor acima de dureza no perímetro requerida pela norma (Tabela 17).

TABELA 17: Durezas medidas na Roda de Borracha

Amostra	Dureza Roda de Borracha			
	Dureza 1	Dureza 2	Dureza 3	Média
D2-09	67	65	69	67,00
H13-06	67	68	69	68,00
D2-00	71	68	70	69,66
H13-02	70	67	70	69,00
D2-07	71	66	69	68,66
H13-04	67	69	66	67,33

Fonte: Próprio autor

• **Dureza da Amostra.** A norma padroniza o valor de dureza da amostra para realização do ensaio. Uma verificação da dureza real das amostras constatou divergências com os valores especificados pela norma ASTM G-65 (2010).

• **Abrasivo.** O tipo do abrasivo deve ser uma areia de quartzo de grão arredondado do tipo AFS 50/70, que tem a faixa de tamanho de 212 a 300 μm . No Brasil só temos disponível a areia da Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, que tem a areia mais próxima da requerida pela norma a IPT N. 100. A mesma tem a faixa de tamanho de 150 a 300 μm .

• **Fluxo da Areia.** Não existe um padrão normatizado de fluxo de areia para o Roda de Borracha na Configuração de Horizontal. Foi observado neste equipamento um baixo fluxo de abrasivo durante os ensaios. E devido a inclinação do Bocal de Areia em relação a Roda de Borracha, o abrasivo pulverizava a entrar em contato com a Roda de Borracha. Com isso, o abrasivo não entra em contato com a Roda de Borracha e a amostra durante o ensaio.

• **A vazão do abrasivo.** Para o ensaio horizontal não há uma especificação de vazão. Porém no ensaio, utilizamos uma vazão abaixo da recomendação da norma ASTM G-65. Que explica assim que um material de maior dureza (H13) desgastar mais que um material de menor dureza (D2).

5.1.3 LABORATÓRIO B

Neste laboratorial foram realizados os ensaios de desgaste abrasivo no Roda de Borracha Vertical 3, e utilizamos 3 amostras de H13 e 3 amostras de D2.

Na tabela 18 podemos observar os resultados dos ensaios para o aço AISI H13 e na tabela 19 para o aço AISI D2.

TABELA 18: Resultado do ensaio para o Aço AISI H13 (Laboratório B)

Vertical 3		
<i>Amostra</i>	<i>Perca de Massa (g)</i>	<i>Volume Perdido (mm³)</i>
CP-06	0,87302	112,65
CP-04	0,90962	117,37
CP-02	0,93446	120,58
<i>Densidade (g/cm³)</i>	7,75	
Média	0,9057	116,86
Desvio Padrão	0,030907009	3,988
Coefic. De Variação	3,41%	

Fonte: Próprio autor

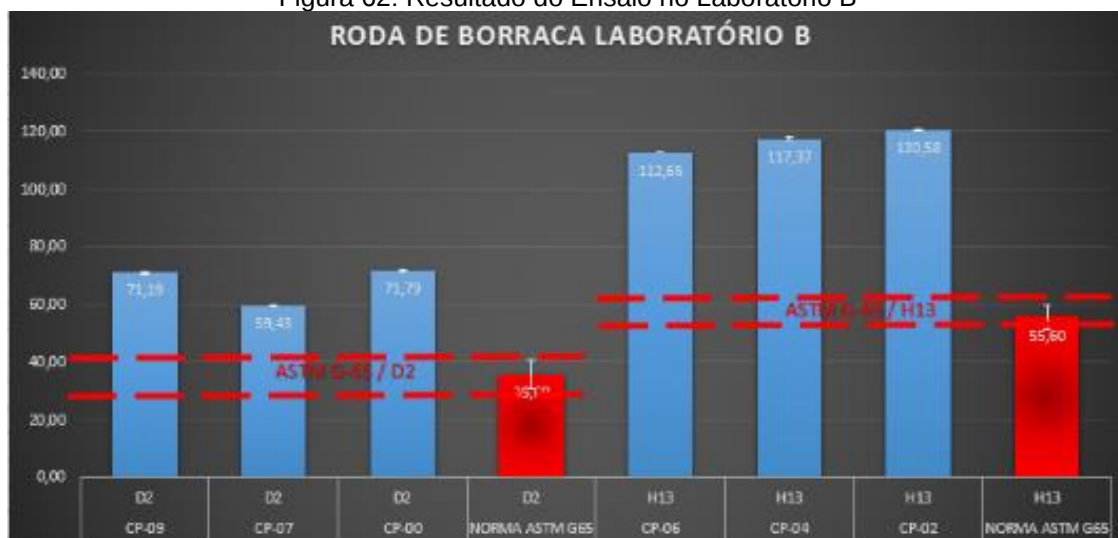
TABELA 19: Resultado do ensaio para o Aço AISI D2 (Laboratório B)

Vertical 3		
<i>Amostra</i>	<i>Perca de Massa (g)</i>	<i>Volume Perdido (mm³)</i>
CP-09	0,18392	23,73
CP-07	0,15354	19,81
CP-00	0,18546	23,93
<i>Densidade (g/cm³)</i>	7,75	
Média	0,174306667	22,49
Desvio Padrão	0,018000937	2,323
Coefic. De Variação	10,33%	

Fonte: Próprio autor

Observamos que o resultado do ensaio do H13 e D2 ficaram acima do valor de referência informado pela norma ASTM G-65 (Conforme Figura 62).

Figura 62: Resultado do Ensaio no Laboratório B



Fonte: Próprio autor

Podemos observar uma falta de uniformidade dos resultados através do valor elevado para o Desvio Padrão conforme a Tabela 20 para o aço AISI H13 e a Tabela 21 para o aço AISI D2.

TABELA 20: Média do ensaio e Desvio Padrão para o Aço AISI H13 (Laboratório B)

	H13				
	Ensaio	Variação	G65	Variação	Variação
Vertical 3	116,86	3,988001	56	±4	60,86452

Fonte: Próprio autor

TABELA 21: Média do ensaio e Desvio Padrão para o Aço AISI D2(Laboratório B)

	D2				
	Ensaio	Variação	G65	Variação	Variação
Vertical 3	67,47	2,322702	36	±5	31,47355

Fonte: Próprio autor

Possíveis causas da divergência dos resultados do ensaio realizado com os valores padrão da norma ASTM G-65 (2010). Seguem abaixo:

- Dureza da Amostra. A norma padroniza o valor de dureza da amostra para realização do ensaio. Uma verificação da dureza real das amostras constatamos divergências com os valores especificados pela norma ASTM G-65 (2010).

- Abrasivo. O tipo do abrasivo deve ser uma areia de quartzo de grão arredondado do tipo AFS 50/70, que tem a faixa de tamanho de 212 a 300 µm. No Brasil só temos disponível a areia da Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, que

tem a areia mais próxima da requerida pela norma a IPT N. 100. A mesma tem a faixa de tamanho de 150 a 300 μm .

- Deterioração do polímero da roda de borracha. Devemos considerar como principal causa diferença dos resultados ensaiados é a deterioração do polímero da roda de borracha. Foram observados o excesso de polímero no abrasivo utilizado durante o ensaio.

Também observamos conforme a Figura 63, a não uniformidade no padrão de desgaste abrasivo nas amostras ensaiadas. Essa variação está relacionada a deterioração do polímero do Roda de Borracha.

Figura 63: Amostra ensaiadas (Laboratório B)



Fonte: Próprio autor

5.1.4 LABORATÓRIO D

Foram realizados os ensaios de desgaste abrasivo no Roda de Borracha Horizontal 2 em 3 amostras de H13 e 3 amostras de D2 para o estudo Interlaboratorial.

Na tabela 22 podemos observar os resultados dos ensaios para o aço AISI H13 e na tabela 23 para o aço AISI D2.

TABELA 22: Resultado do ensaio para o Aço AISI H13 (Laboratório D)

Horizontal 2		
Amostra	Perca de Massa (g)	Volume Perdido (mm ³)
CP-05	0,88536	114,24
CP-08	0,83664	107,95
CP-03	0,89838	115,92
Densidade (g/cm ³)	7,75	
Média	0,87346	112,70
Desvio Padrão	0,032544806	4,199
Coefic. De Variação	3,73%	

Fonte: Próprio autor

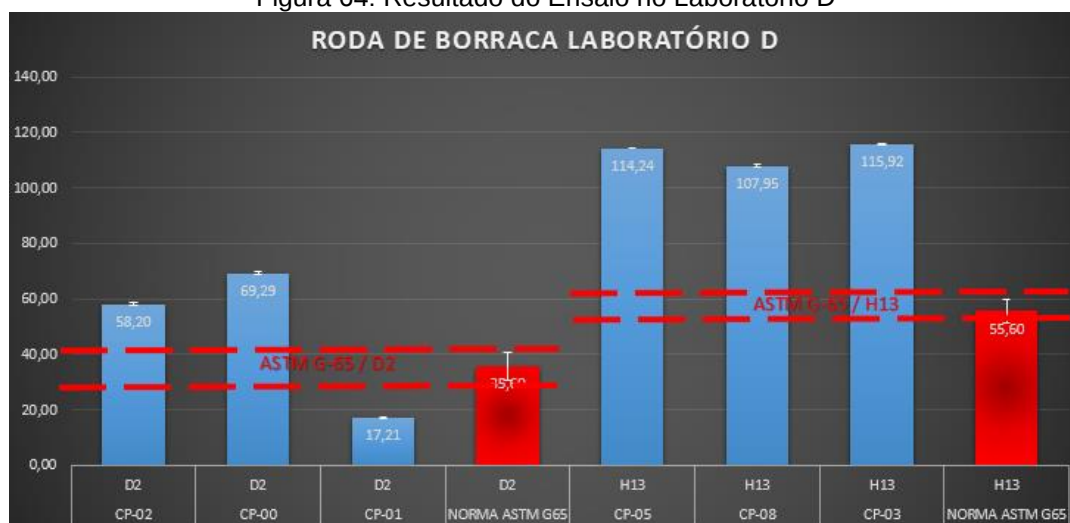
TABELA 23: Resultado do ensaio para o Aço AISI D2 (Laboratório D)

Horizontal 2		
Amostra	Perca de Massa (g)	Volume Perdido (mm ³)
CP-02	0,15036	19,40
CP-00	0,179	23,10
CP-01	0,04446	5,74
Densidade (g/cm ³)	7,75	
Média	0,124606667	16,08
Desvio Padrão	0,070870858	9,145
Coefic. De Variação	56,88%	

Fonte: Próprio autor

OS resultados (Figura 64) do ensaio do H13 e D2 ficaram com valores bem diferentes ao de referência informado pela norma ASTM G-65 (2010).

Figura 64: Resultado do Ensaio no Laboratório D



Fonte: Próprio autor

Foram observados uma falta de uniformidade dos resultados através do valor elevado para o Desvio Padrão conforme a Tabela 24 para o aço AISI H13 e a Tabela 25 para o aço AISI D2.

TABELA 24: Média do ensaio e Desvio Padrão para o Aço AISI H13 (Laboratório D)

H13					
	Ensaio	Variação	G65	Variação	Variação
Horizontal 2	112,70	4,19933	56	±4	56,70452

Fonte: Próprio autor

TABELA 25: Média do ensaio e Desvio Padrão para o Aço AISI D2 (Laboratório D)

D2					
	Ensaio	Variação	G65	Variação	Variação
Horizontal 2	48,23484	9,144627	36	±5	12,23484

Fonte: Próprio autor

Possíveis causas de divergências dos resultados do ensaio realizado e norma ASTM G-65. Seguem abaixo:

- Dureza da Amostra. A norma padroniza o valor de dureza da amostra para realização do ensaio. Após o ensaio, realizamos uma verificação da dureza real da amostra e encontramos divergências com a norma ASTM G-65 (2010).

- Abrasivo. O tipo do abrasivo deve ser uma areia de quartzo de grão arredondado do tipo AFS 50/70, que tem a faixa de tamanho de 212 a 300 µm. No Brasil só temos disponível a areia da Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, que tem a areia mais próxima da requerida pela norma a IPT N. 100. A mesma tem a faixa de tamanho de 150 a 300 µm.

- Fluxo da Areia. Não existe um padrão normatizado de fluxo de areia para o Roda de Borracha na Configuração de Horizontal. Embora atingido uma boa faixa na taxa de fluxo, a calha transportadora do abrasivo apresentava um caminho sinuoso podendo afetar o formato do fluxo no bocal da calha.

- O Sistema automatizado de dosagem do abrasivo apresenta atrito entre o Silo e disco de dosagem do abrasivo. Esse atrito pode causar variações na concentração do abrasivo.

5.2 Resultado roda de borracha UFPE

Inicialmente foram realizados os ensaios de desgaste abrasivo no Roda de Borracha Vertical em 3 amostras de H13 e em 3 amostras de D2 para a validação e comparação do estudo Interlaboratorial. Na Figura 65 o equipamento Roda de Borracha Horizontal e Vertical da UFPE é mostrado.

Figura 65: Roda de Borracha Horizontal e Vertical UFPE

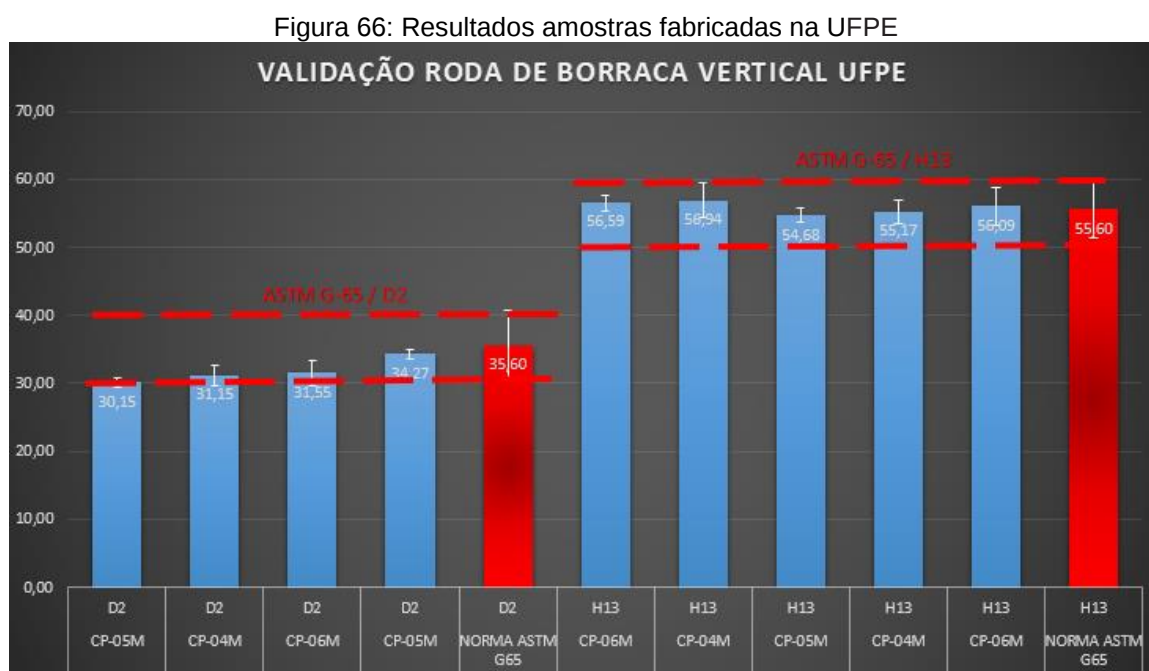


Fonte: Próprio autor

5.2.1 VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO UFPE

A etapa de validação do equipamento seguiu o procedimento utilizado no Estudo Interlaboratorial. Nesta etapa foram produzidas amostras padrões de aço AISI H13 e AISI D2 por um fornecedor local que realizou tratamentos térmicos para aproximar os valores de dureza requeridos pela norma ASTM G-65 (2010). A vazão do abrasivo utilizada no ensaio foi de 340 g/min, ou seja, dentro da faixa recomendada pela norma ASTM G-65.

Conforme observado na Figura 66, verifica-se um bom nível de padronização nos primeiros ensaios realizados no equipamento. No ensaio do aço AISI H13 foram obtidos valores bem próximos aos especificados na norma. Para o aço AISI D2, valores um pouco abaixo do requerido pela norma devido ao maior valor de dureza nas amostras ensaiadas em relação aos valores da norma (Tabela 26)



Fonte: Próprio autor

TABELA 26: Valores de dureza das amostras fabricadas na UFPE

Dureza (HRC)	AMOSTRA	Material	ASTM G-65 (HRC)
63,5	CP-05M	D2	58,5-60,5
64	CP-04M	D2	58,5-60,5
64	CP-06M	D2	58,5-60,5
46,5	CP-06M	H13	47-48
48	CP-04M	H13	47-48
48	CP-05M	H13	47-48

Fonte: Próprio autor

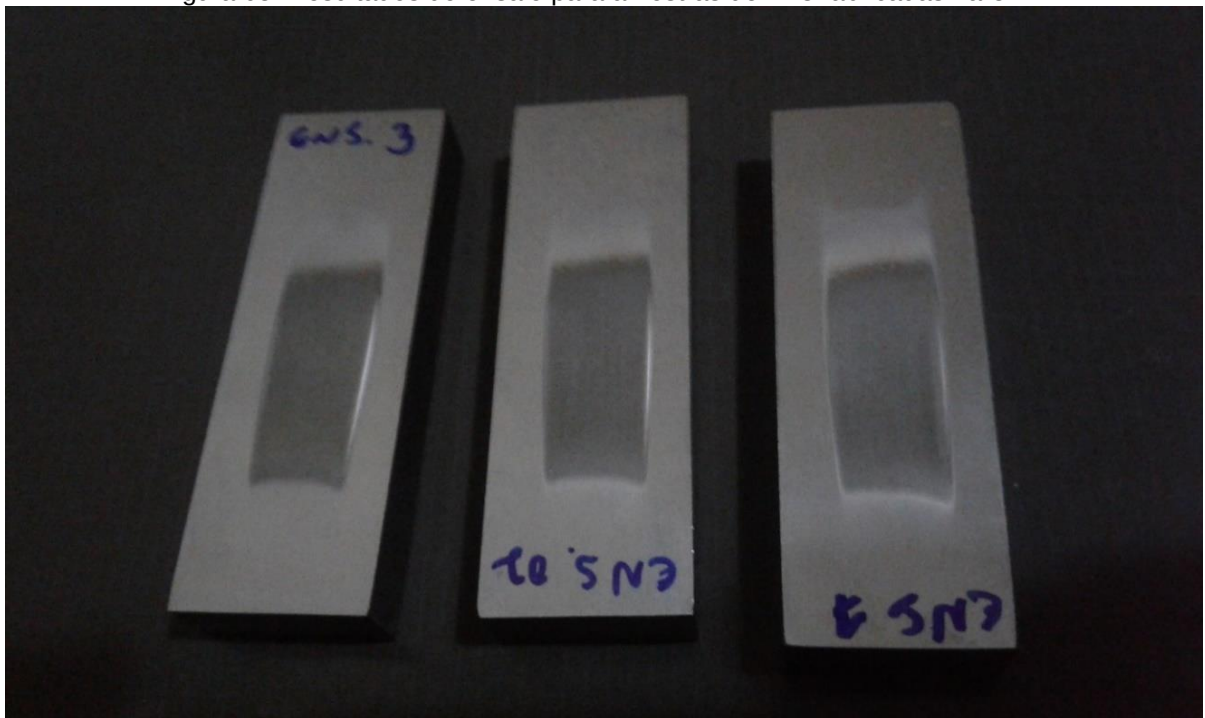
Nota-se a uniformidade dos desgastes nas amostras ensaiadas conforme a Figura 67 para o aço AISI D2 e na Figura 68 para o aço AISI H13.

Figura 67: Resultados do ensaio para amostras de D2 fabricadas na UFPE



Fonte: Próprio autor

Figura 68: Resultados do ensaio para amostras de H13 fabricadas na UFPE



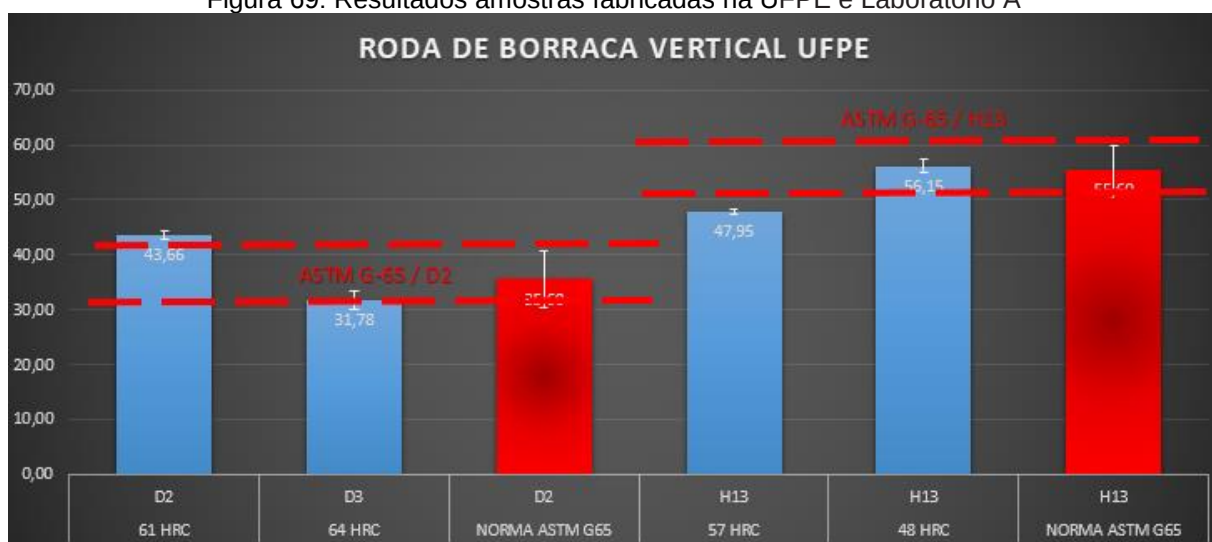
Fonte: Próprio autor

5.2.2 COMPARAÇÃO AMOSTRAS DA UFPE VERSUS LABORATÓRIO A

Nesta etapa foram comparados os resultados de amostras com diferentes valores (produzidas pelo laboratório A e pela UFPE).

Conforme figura 69, os resultados obtidos com as amostras da Laboratório A obtiveram repetibilidade. Porém, devido a variação de dureza das amostras os resultados entre os dois fornecedores das amostras obtiveram resultados diferentes. A produção de amostras com valores de dureza conforme o especificado em norma é fundamental para resultados de desgaste dos padrões. A composição e tratamentos térmicos devem ser criteriosamente observados.

Figura 69: Resultados amostras fabricadas na UFPE e Laboratório A

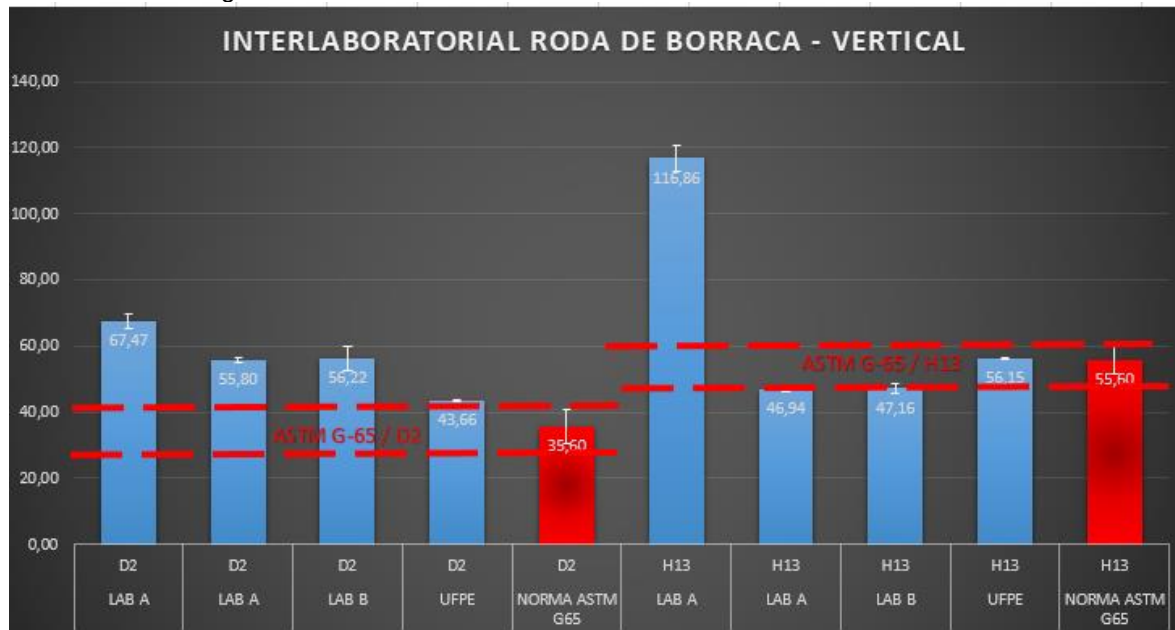


Fonte: Próprio autor

5.2.3 COMPARAÇÃO DE TODOS OS RESULTADOS

Conforme figura 70, os resultados que obtiveram maior proximidade com os valores padronizados pela norma ASTM G-65 foram o do equipamento da UFPE utilizando amostra fabricadas na UFPE. Como foi visto anteriormente essa aproximação dos resultados do equipamento da UFPE está relacionado a dureza das amostras, qualidade da borracha utilizada na roda de borracha e a vazão de abrasivos recomendadas pela norma ASTM G-65 (2010). Características construtivas dos equipamentos também podem influenciar nestes resultados.

Figura 70: Resultado do Ensaio Interlaboratorial e ensaio na UFPE



Fonte: Próprio autor

Com isso, podemos afirmar que as principais causas de divergências com a norma ASTM G-65 dos Rodas Borracha avaliados durante esse trabalho são os seguintes:

- Dureza da Amostra. A norma padroniza o valor de dureza da amostra para a validação do equipamento. Porém observamos a dificuldade de seguir as recomendações da norma para preparação das amostras;

- Abrasivo. O tipo do abrasivo deve ser uma areia de quartzo de grão arredondado do tipo AFS 50/70, que tem a faixa de tamanho de 212 a 300 μm . No Brasil só temos disponível a areia da Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, que tem a areia mais próxima da requerida pela norma a IPT N. 100. A mesma tem a faixa de tamanho de 150 a 300 μm ;

- Fluxo da Areia no Roda de Borracha Horizontal. Não existe um padrão normatizado de fluxo de areia para o Roda de Borracha na Configuração de Horizontal. Os equipamentos na versão horizontal avaliados no Estudo Interlaboratorial apresentavam dificuldades para direcionar o abrasivo e quantificar o fluxo do abrasivo para padronizar os ensaios;

- Qualidade do Polímero da Roda de Borracha. Alguns equipamentos apresentaram problemas para controle de dureza e desgaste do polímero utilizado na roda de borracha.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 Conclusões

Com base nos resultados coletados durante os ensaios, conclui-se que:

- O equipamento quando utilizado na configuração VERTICAL, apresentou boa repetibilidade de resultados na fase inicial de ensaios com o aço AISI H13 e D2, apresentando uma confiabilidade de 95%, e uma variação dos dados coletados condizentes com a literatura;
- A repetibilidade dos ensaios e a confiabilidade do equipamento foram comprovadas nos ensaios com o aço AISI H13, apresentando valores de desgaste condizentes com a norma ASTM G-65 e um baixo coeficiente de variação;
- As marcas de desgaste deixadas nas amostras são condizentes com as apresentadas pela literatura, mostrando um bom alinhamento entre a face da amostra e a superfície da roda de borracha;
- A correta seleção dos parâmetros de norma (tipo e tamanho de abrasivos, qualidade da borracha, amostras padronizadas, carga e rotação) contribuem para a obtenção de resultados de desgaste mais próximos dos especificados por norma e consequentemente calibração dos diferentes equipamentos.
- Foi disponibilizada uma infraestrutura para realização de testes de desgaste abrasivos para a UFPE

6.2 Recomendações de trabalhos futuros

- Ajustar a configuração horizontal com objetivo de validar o resultado com norma ASTM G-65 (2010);
- Melhorar a cabine para impedir a contaminação do ambiente com o abrasivo;
- Realizar o alinhamento efetivo do sistema motriz do equipamento;
- Implementar no equipamento uma célula de carga com temporizador para automatizar os tempos para realizações dos ensaios;
- Automatizar o sistema de aplicação de carga nominal.
- Criar um padrão brasileira para ensaios de tipo Roda de Borracha com os insumos disponíveis no Brasil.

REFERÊNCIAS

ARCHARD, J.F. **"Contact and Rubbing of Flat Surface"**. J. Appl. Phys. **24** (8): 981–988. 1953.

ASTM G40-02: **Standard Terminology Relating to Wear and Erosion**.

ASTM G65-04, 2010. **Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus**. Annual Book of ASTM Standards Volume 03.02, ASTM, Philadelphia, PA, pp. 247-259.

BLACK, J. Temple. **O projeto da fábrica com futuro**. Porto Alegre: Bookman, 1998. 288 p. ISBN 85-7307-349-7.

CATALOGO GERDAU. **Catalogo de barras e perfis**. 2009.

CATALOGO WEG. **Inversor de Frequência**. 2015.

CZICHOS, Horst. **Tribology: A systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear**. Elsevier Scientific Publishing Company. 1978.

EYRE, T. S. - **Friction and wear mechanism**. In: - ABM II Seminário sobre Materiais Resistente ao Desgaste. Uberlândia. MG. dez. 1991. 263-306p.

EYRES, T. S., **"The mechanisms of wear"**, Tribology international, Vol. 11, p. 91-96.1978.

FUJIMURA, H; KAMITO, Y.; NOTOM, A; KINOSIDTA, M. - **Development of Hard Overlay Welding for High Wear Resistance**, Mitsubishi Heavy Industries Ltda. 1988.

GREGOLIN, J.A.R - **Desenvolvimento de Ligas Fe-C-Cr-(Nb) Resistentes ao Desgaste**. PPG - Eng. Mecânica. UNICAMP.1990.

GWIDON, W. Stachowiak; ANDREW, W. Batchelor. **Engineering Tribology**, Butterworth-Heinemann, 2001.

HERNÁNDEZ, Sarria O. J. - **Otimização do Consumível na Solda de Revestimento Aplicada na Indústria Sucroalcooleira**. Dissertação de Mestrado. UFSCar - DEMA. PPG. São Carlos - SP. 102p. 1997.

HOLM, R. **Electrical Contacts**. Stockholm: H. Gerber. 1946.

HUTCHINGS, I.M. **Tribology: Friction and Wear of engineering materials**, Butterworth-Heinemann, 1992.

HUTCHINGS, I. M., **Leonardo da Vinci's studies of friction**, *Wear*, Vol. 360–361, 2016, p. 51–66.

HUTCHINGS, I. M.; STEVENSON, A. N. J. **Development of the Dry Sand/Rubbers Wheel Abrasion Test**. *Wear* 195, p. 232-240, 1996.

VIEGA, Jose Carlos. **Fundamentos da Tribologia**. 1998.

JOST, H. P., **“Tribology-origin and future”**, *Wear*, v.136, pp.1-17. 1990.

LAYARD, A.G. **Discoveries in the Ruins of Nineveh and Babylon, I and II**, John Murray, Albemarle Street, London, 1853.

LUDEMA, K. C., **“Friction, wear, lubrication”- A Textbook in Tribology**, CRC Press, Boca Raton FL, 257p, 1996.

MANG, T., BOBZIN, K.; BARTELS, T. **“Industrial tribology: Tribosystems, friction, wear and surface engineering, Lubrication”**, John Wiley & Sons, 2011.

MARTINS, F. A. - **Soldagem de Revestimentos com Arame tubular**.

MOORE, M.A. and SWANSON. P.A. **The effect of particle shape on abrasive wear: a comparison of theory and experiment**. Proceedings of Wear of Materials Conference – 1983, American Society of Mechanical Engineers, NY, 1-11.

NEVILLE, A., et al. **“Assessing metal matrix composites for corrosion and erosion-corrosion applications in the oil sands industry”**, *Corrosion*, Vol. 62.8. 2006, p. 657-675.

NOBLE, D.N. - **Factors Which Affect Abrasive Wear Resistance of Hardfacing Weld Deposits - A Review of the Literature**. The Welding Institute, 26 p. Out.1984.

Peterson, M.B., **“Classification of wear processes”**, *Wear Control Handbook*.

Peterson, M.B. and Winer, W.O. **ASME**, New York, pp. 9-15. 1980.

PEREIRA, R. L., **“efeitos da adição de nióbio no desempenho de ferros fundidos brancos de alto cromo utilizados no bombeamento de polpa na mineração.”** 2012, 80f. 2012. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

POPOV, L. V., **“Contact mechanics and friction: physical principles and applications”**, Heidelberg New York: Springer, 2010. Print.

KATO, K.; ADACHI, K. **“Wear Mechanisms”**, **MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK**,

SINGER, I.L. **”Amontons’ Rules of Friction Formulated 300 Years Ago”**, MRS Bulletin, vol. 24(12), 1999, p. 52.

TREZONA, R. I.; ALLSOPP, D. N., HUTCHINGS, I. M., **Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test**, Wear 225 – 229, 1999. 205–214

VILLABÓN. L.R.; SINATORA, A. **Construção e instrumentação de abrasômetro do tipo roda-de-borracha para o estudo do comportamento tribológico de aços.** APAET - Mecânica Experimental. 2006, Vol 13, Pg 1-11.

VITAL, A. **Mecanismo de Desgaste.** 2011. Disponível em: <<https://cadvital.wordpress.com/2011/07/12/mecanismos-de-desgaste/>>.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. - **Soldagem, processo e metalurgia.** In: - **Revestimento duro por soldagem.** Ed. Edgard. SP. - Brasil. 1992. 335 ± 354p.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. - **Soldagem, processo e metalurgia.** In: - **Revestimento duro por soldagem.** Ed. Edgard. SP. - Brasil. 1992. 335 ± 354p

ZUM Garh, K.H., **Microstructure and wear of materials.** Amsterdam: Elsevier, 1987.

ZUM Garh, K. H., **Wear by hard harticles**, Tribology International Vol. 31, No. 10, pp. 587–596, 1999.