



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MAYARA VASCONCELOS SANTOS

**CONTRIBUIÇÃO A UM PROJETO, CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM
ABRASÔMETRO RODA DE BORRACHA – CONFIGURAÇÃO
VERTICAL/HORIZONTAL**

Recife

2018

MAYARA VASCONCELOS SANTOS

**CONTRIBUIÇÃO A UM PROJETO, CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM
ABRASÔMETRO RODA DE BORRACHA – CONFIGURAÇÃO
VERTICAL/HORIZONTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Flávio José da Silva

Recife
2018

Catálogo na fonte:

Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

S237c Santos, Mayara Vasconcelos.
Contribuição a um projeto, construção e validação de um abrasômetro roda de borracha – configuração vertical/horizontal / Mayara Vasconcelos Santos - 2018.
51folhas, Il. e Tab.

Orientador: Prof. Dr. Flávio José da Silva.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Curso de Engenharia Mecânica, 2018.
Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Desgaste abrasivo. 3. Abrasômetro.
4. Roda de borracha. 5. Teste de desgaste. I. Silva, Flávio José da.(Orientador)
II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.) BCTG/2018-364

MAYARA VASCONCELOS SANTOS

**CONTRIBUIÇÃO AO PROJETO, CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM
ABRASÔMETRO RODA DE BORRACHA – CONFIGURAÇÃO
VERTICAL/HORIZONTAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenheiro Mecânico.

Aprovada em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Flávio José da Silva (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Oscar Olimpio de Araújo Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Me. Laertty Moraes Cavalcante (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Jorge Antonio Palma Carrasco (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

À Petrobras pelo financiamento deste trabalho por meio do programa de formação de recursos humanos em tecnologia de equipamentos para atuação no setor de petróleo, gás e biocombustíveis – PRH-PB203.

Ao meu orientador Flávio José da Silva pela dedicada orientação e oportunidade de compartilhar dos seus conhecimentos.

Aos técnicos Janaína e Ivaldo do laboratório de metalografia do departamento de engenharia mecânica da UFPE pela colaboração e boa vontade na realização dos experimentos.

Aos técnicos Ivanilda e Rubens do departamento de engenharia mecânica da UFPE pela colaboração e boa vontade na realização dos experimentos de dureza.

Ao mestrando João José de Figueiredo Neto pelo projeto do equipamento e orientação nos procedimentos de ensaio.

Ao professor Pedro Luiz Guzzo pela a análise granulométrica da areia abrasiva.

A empresa MECOL em nome de Odilon Filho pelo apoio nas etapas de fabricação e montagem do equipamento.

Aos professores do curso de graduação em Engenharia Mecânica da UFPE por contribuírem coma minha formação.

RESUMO

Este trabalho apresenta a contribuição a um projeto de construção e a metodologia de validação de um abrasômetro roda de borracha com duas configurações: vertical e horizontal. Para isso, foi tomando como base a norma ASTM G65-00 para a configuração vertical e o modelo proposto por Hutchings e Stevenson (1996) para a configuração horizontal. A metodologia seguiu as seguintes etapas: planejamento do projeto, testes de validação e análise dos mecanismos de desgaste por abrasão. O planejamento do projeto seguiu o proposto por Figueiredo Neto (2017), que fez a união entre os dois modelos supracitados. Para validação do equipamento foram ensaiadas amostras dos aços AISI H-13 e AISI D-2 com parâmetros de teste e procedimento também especificados pela norma ASTM G65-00. Algumas dessas amostras tiveram as marcas de desgaste avaliadas em microscópio eletrônico de varredura para entender como o material é removido no processo de desgaste abrasivo. Os resultados da taxa de desgaste abrasivo do aço AISI H-13 obtidos no equipamento em sua configuração vertical se mostraram satisfatórios em comparação com a norma e com resultados obtidos em outros equipamentos existentes, o que confirma a validação do equipamento. Além disso, a variação dos parâmetros de teste mostrou que o aço AISI D-2 é mais sensível à variação da dureza, que a variação de carga afetou o aço AISI H-13 de maneira inesperada e que a variação na vazão da areia abrasiva causou pouco efeito na taxa de desgaste abrasivo dos dois tipos de materiais. Por fim, as análises das marcas de desgaste mostraram que os mecanismos de desgaste abrasivo que ocorrem nos ensaios utilizando o abrasômetro roda de borracha transitam de microindentações para o microcorte/microsulcamento.

Palavras-chave: Desgaste abrasivo. Abrasômetro. Roda de borracha. Teste de desgaste.

ABSTRACT

This work shows the contribution to a construction project and the validation methodology of a rubber wheel abrasion test equipment with two configurations: vertical and horizontal. It was based on the ASTM G65-00 standard for the vertical configuration and in the model proposed by Hutchings and Stevenson (1996) for the horizontal configuration. The methodology followed this phases: project planning, validation tests and analysis of mechanisms of abrasion wear. The project planning followed the one proposed by Figueiredo Neto (2017) who did the union between both configuration above mentioned. For the equipment validation specimen of the AISI H-13 and AISI D-2 steel were tested with test parameters and procedures also specified by the ASTM G65-00 standard. Some of this specimen had the wear scar evaluated by a scanning electron microscopy to know how the material is removed in the abrasion wear processes. The steel AISI H-13 abrasive wear rates obtained with the equipment in it vertical configuration were satisfactory in comparison with the standard and with results obtained in others equipment, which confirms the validation of the equipment. Besides that, the test parameters variation showed that the AISI D-2 steel is more sensitive to the material hardness variation; the load variation affected the AISI H-13 steel unexpectedly and the abrasive sand flow variation caused little effect in the abrasive wear rate in both materials type. Finally, the wear scars analysis showed that the abrasion wear mechanisms which occur in tests using this kind of rubber wheel abrasion test equipment transits of indentation to micro-cuttings/plowing.

Keywords: Abrasion wear. Abrasometer. Rubber wheel. Wear test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Principais processos de desgaste	16
Figura 2 –	Desgaste abrasivo a dois corpos	18
Figura 3 –	Desgaste abrasivo a três corpos	18
Figura 4 –	Mecanismos de desgaste abrasivo. (a) Microsulcamento; (b) Microcorte; (c) Microtrincamento	19
Figura 5 –	Abrasômetro roda de borracha configuração vertical	22
Figura 6 –	Abrasômetro roda de borracha configuração horizontal	23
Fluxograma 1 –	Planejamento do projeto	24
Figura 7 –	Esquema da marca de desgaste	28
Figura 8 –	Base e bancada	29
Figura 9 –	Conjunto motor/redutor	30
Figura 10 –	Roda de borracha	31
Figura 11 –	Bicos para alimentação da areia abrasiva. (a) Configuração vertical; (b) Configuração horizontal	32
Figura 12 –	Porta amostra. (a) Configuração vertical; (b) Configuração horizontal	33
Figura 13 –	Abrasômetro roda de borracha configuração vertical/horizontal	33
Figura 14 –	Resultado do alinhamento. (a) Vertical; (b) Horizontal	35
Figura 15 –	Alinhamento da marca de desgaste	35
Figura 16 –	Areia abrasiva. (a) NBR-7214 N° 100; (b) AFS 50/70	36
Gráfico 1 –	Caracterização da areia do IPT, NBR-7214 N° 100	37
Figura 17 –	Areia abrasiva. (a) Lote 1; (b) Lote 2	37
Gráfico 2 –	Caracterização da areia do IPT, NBR-7214 N° 100. (a) Lote 1; (b) Lote 2	38
Gráfico 3 –	Durezas das amostras	39
Gráfico 4 –	Variação da dureza das amostras para carga de 130 N ...	42
Gráfico 5 –	Variação da dureza das amostras para carga de 168 N ...	43
Gráfico 6 –	Variação da carga aplicada	44
Gráfico 7 –	Variação na vazão da areia abrasiva	44
Figura 18 –	Aço AISI D-2. (a) Centro da marca; (b) Saída da marca ...	46
Figura 19 –	Aço AISI H-13. (a) Centro da marca; (b) Saída da marca .	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Parâmetros de teste	25
Tabela 2 –	Composição dos aços	27
Tabela 3 –	Resultados dos ensaios com carga de 168N nas amostras Tipo 3	40
Tabela 4 –	Resultados dos ensaios com carga de 130N nas amostras Tipo 1	40
Tabela 5 –	Resultados dos ensaios com carga de 168N nas amostras Tipo 2	41
Tabela 6 –	Desvio padrão dos resultados	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1	TRIBOLOGIA	15
3.2	DESGASTE	15
3.3	PROCESSOS DE DESGASTE	15
3.3.1	Desgaste por adesão	16
3.3.2	Desgaste por fadiga superficial	17
3.3.3	Desgaste triboquímico	17
3.3.4	Desgaste abrasivo	17
3.4	MECANISMOS DE DESGASTE POR ABRASÃO	18
3.5	VARIÁVEIS QUE INFLUÊNCIAM NA TAXA DE DESGASTE ABRASIVO	19
3.5.1	Dureza dos materiais em contato	19
3.5.2	Geometria das partículas abrasivas	20
3.5.3	Intensidade do carregamento	20
3.5.4	Distância do trajeto de desgaste e velocidade de deslizamento ..	21
3.6	ENSAIOS DE DESGASTE ABRASIVO	21
4	MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1	PLANEJAMENTO DO PROJETO	24
4.2	TESTES DE VALIDAÇÃO	25
4.2.1	Caracterização dos materiais de teste	26
4.2.1.1	Areia abrasiva	26
4.2.1.2	Amostras	26
4.2.2	Procedimento de ensaio	27
4.3	ESTUDO DOS MECANISMOS DE DESGASTE POR ABRASÃO	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1	PROJETO DO EQUIPAMENTO	29

5.1.1	Estrutura	29
5.1.2	Acionamento	30
5.1.3	Roda de borracha	30
5.1.4	Bico para alimentação da areia abrasiva	31
5.1.5	Carga aplicada	32
5.1.6	Porta amostra	32
5.1.7	Equipamento finalizado	33
5.1.8	Alinhamento dos eixos	34
5.2	CARACTERIZAÇÃO DA AREIA ABRASIVA	35
5.3	DUREZA DAS AMOSTRAS	38
5.4	VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO NA CONFIGURAÇÃO VERTICAL	39
5.5	VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS	42
5.6	ANÁLISES DOS MECANISMOS DE DESGASTE POR ABRASÃO	45
6	CONCLUSÕES	47
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento industrial, o desgaste é uma grande preocupação, pois causa gastos no reparo e na substituição de peças que trabalham em contato e movimento relativo. Vários tipos de setores industriais podem ser afetados, entre eles: indústrias mineradoras, indústrias petrolíferas, indústrias de equipamentos e máquinas agrícolas e indústrias de peças de automóveis. Dessa forma, a busca de materiais e revestimentos que suportem esse tipo de solicitação é essencial. Para controlar as perdas com desgaste é preciso investir em pesquisa na área de tribologia para aprimorar o conhecimento e aplicá-lo na indústria. (TOZETTI, 2013). Segundo Hutchings (1992, p. 1), “tribologia é definida como a ciência e a tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo e inclui o estudo do atrito, desgaste e lubrificação”.

Dentre os diferentes tipos de desgaste, a abrasão é o mais significativo, sendo este definido como sendo a “remoção de material da superfície devido a partículas duras, ou às vezes por protuberâncias duras na contra face que são forçadas e deslizam ao longo da superfície”. (HUTCHINGS, 1992, p. 133). Como exemplos, “na mineração são estimados valores consideráveis de volume de metal perdido nas ferramentas de extração de minério do solo. No transporte, milhões de pneus de veículos precisam ser trocados todo ano por causa da abrasão com a pavimentação”. (BUDINSKI, 2011, p. 1258).

No estudo de fenômenos de atrito, desgaste e lubrificação, equipamentos denominados de tribômetros são utilizados para simular em laboratório certas características encontradas de situações reais. No caso específico do desgaste abrasivo, estes equipamentos são chamados de abrasômetros e possuem várias configurações. “O abrasômetro do tipo roda de borracha, que de maneira generalizada pode ser descrito como um equipamento onde uma amostra de material é desgastada por abrasivo que passa entre a interface da amostra e da roda de borracha”. (DALLMANN, 2012, p. 17). A norma americana ASTM G65 (Standard Test Method For Measuring Abrasion Using The Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus) descreve tanto o equipamento, em sua configuração vertical, quanto o procedimento laboratorial para determinar a resistência à abrasão de materiais sob condições específicas. “Uma característica importante desse equipamento é a não

quantificação da vazão mássica de areia que passa na interface entre o corpo de prova e a roda de borracha”. (AMARAL; PAIVA, 2006 p. 11).

“Stevenson e Hutchings (1996) propuseram um novo teste roda de borracha/areia seca que difere significativamente do teste padrão por dispor o corpo de prova num plano horizontal. Isso permite uma maior rigidez do sistema, atenuando vibrações”. (AMARAL; PAIVA, 2006, p. 11).

Diante do que foi exposto acima, como construir um equipamento capaz de unir a configuração vertical e horizontal de um abrasômetro roda de borracha e que simule as situações práticas de desgaste abrasivo a partir de testes padronizados?

1.1 JUSTIFICATIVA

Como visto anteriormente, torna-se importante a avaliação e entendimento dos fenômenos envolvidos no desgaste abrasivo para o desenvolvimento de materiais e equipamentos. O estudo de novos materiais ou revestimentos que possibilitem ao material suportar maiores solicitações tribológicas é constante, o que permite o espaçamento dos períodos de troca dos componentes e a redução dos custos e tempos de parada.

Como por exemplo, os dutos de extração de petróleo são feitos de aços caros e com o interior revestido para garantir a integridade do duto, mesmo sendo observado o desgaste rápido deste revestimento. Esses desgastes causados nos revestimentos não podem ser evitados, mas podem ser reduzidos. (SANTOS; GOMES; NOGUEIRA, 2012).

Segundo Hawk (1999, p. 1), “o desgaste abrasivo é um dos maiores problemas em escavações, movimentação de terras, minerações e processamento de minerais nas indústrias, ocorrendo em grande variedade de equipamentos.” Oliveira e Silva (2015) mostram estudos que comprovam que o investimento na redução de desgaste apresentou retorno significativo em vários países. No Brasil, com base no produto interno bruto (PIB) de 2004, obtêm-se estimativas de perdas por desgaste entre 17 a 104 bilhões de reais por ano. As economias nacionais possíveis, apenas com a aplicação do conhecimento existente sobre desgaste, seriam de 3,4 a 20 bilhões de reais anuais.

No equipamento proposto, o motivo da introdução da configuração horizontal está no fato desta ser mais estável e possibilitar a quantificação do abrasivo que

passa na interface amostra/borracha. (STEVENSON; HUTCHINGS, 1996), o que economiza no uso da areia abrasiva, além de um maior controle deste importante parâmetro de teste. A fase de validação do equipamento permite a garantia da repetibilidade do ensaio nas duas configurações.

A compreensão dos sistemas tribológicos que acontecem em situações práticas em diversas áreas industriais é facilitada com o uso de equipamentos e procedimentos padronizados. O equipamento proposto permite a simulação de situações de desgaste abrasivo para diversos materiais, o que ajuda na seleção de materiais apropriados para cada determinada aplicação.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho objetiva apresentar o projeto de construção e a metodologia de validação de um equipamento de abrasão com a união de dois modelos existentes de abrasômetro, o proposto pela norma ASTM G65-00 e o proposto por Stevenson e Hutchings.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral é necessário seguir as seguintes etapas:

- Conhecer e entender os fenômenos envolvidos no desgaste abrasivo;
- Estudar o modelo de abrasômetro proposto pela norma americana ASTM G65 e o modelo proposto por Stevenson e Hutchings;
- Acompanhar a fabricação e montagem do equipamento;
- Caracterizar os materiais de validação do equipamento (areia abrasiva e amostras de aço AISI H13 e AISI D2)
- Realizar testes na configuração vertical do abrasômetro para validação conforme americana ASTM G65;
- Realizar pré-testes e validar a configuração horizontal do abrasômetro.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 TRIBOLOGIA

O movimento de uma superfície sólida sobre outra é de fundamental importância para o funcionamento de muitos tipos de mecanismos, ambos artificiais e naturais. “A palavra tribologia é definida como ‘a ciência e a tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo’, e abrange o estudo da fricção, desgaste e lubrificação.” (HUTCHINGS, 1992, p. 1).

Esta ciência tem seu significado etimológico vindo do grego, designando o ramo do conhecimento que estuda o atrito (lógos – ramo do conhecimento; tribé – atrito). A tribologia, como ciência teve a sua primeira conferência em 1964 – Institution Mechanical Engineering, onde foram discutidos a divulgação e ensino relativamente ao desgaste, atrito e lubrificação. (MACHADO, 2008).

3.2 DESGASTE

De um modo geral, o desgaste pode ser definido como a perda progressiva de substâncias da superfície de um corpo sólido, causada por ação mecânica, isto é, por contato e movimento relativo de um corpo e um contra-corpo sólido, líquido ou gasoso. (CORRÊA, 2005).

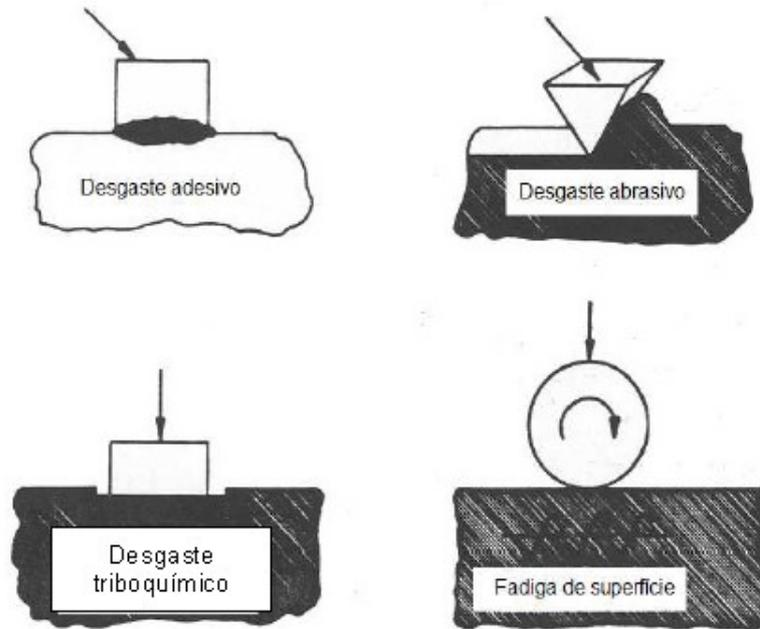
Atrito e desgaste são fatores importantes de dissipação de energia e perda de material. Em um componente, o desgaste é raramente catastrófico, mas leva a perda de eficiência devido ao desalinhamento e vibração. Em casos extremos, algumas trincas podem levar a fratura e os fragmentos podem danificar o equipamento. (DALLMANN, 2012).

3.3 PROCESSOS DE DESGASTE

Segundo Zum Gahr (1987, apud DALLMANN, 2012) os processos de desgaste principais são quatro e estão mostrados na Figura 1. O desgaste adesivo é quando ocorre a formação e quebra das ligações interfaciais adesivas, desgaste abrasivo é caracterizado pela remoção do material devido a ranhura, desgaste triboquímico se refere à interação química entre os elementos que resulta em reação

química e fadiga de superfície é quando ocorre a fadiga e formação de trincas devido a ciclos de tensões.

Figura 1: Principais processos de desgaste



Fonte: Zum Gahr, 1987

3.3.1 Desgaste por adesão

Em uma escala microscópica, superfícies de metal de deslizamento nunca são lisas. Embora a topografia ou a rugosidade da superfície possa ser só de alguns centésimos de milímetro, picos, chamados de “asperezas”, e vales são inevitáveis. Quando a pressão de contato e o aquecimento devido ao atrito são concentrados em locais com pequenas áreas de contato, as temperaturas locais e pressões são extremamente altas, e as condições são favoráveis para a união por soldagem nesses pontos. Se ocorrer a soldagem, ou a solda ou um dos dois metais perto da solda tem que falhar por cisalhamento para permitir o movimento relativo das superfícies, resultando o que é chamado de desgaste por adesão. (DALLMANN, 2012).

3.3.2 Desgaste por fadiga superficial

Segundo Zum Gahr (1987, apud DALLMANN, 2012, p. 24), “o desgaste por fadiga superficial pode ser caracterizado pela formação de trincas e pelo lascamento do material, causado por carregamento alternado repetitivo de superfícies sólidas. Este carregamento cíclico pode ser causado por contato de rolamento ou deslizamento e impacto de sólidos ou líquidos”.

3.3.3 Desgaste triboquímico

“Desgaste triboquímico ocorre devido à interação da superfície de deslizamento com o ambiente que a envolve, fazendo com que o produto dessa reação seja removido da superfície, geralmente por efeito tribológico. Durante o deslizamento a geração de calor favorece, principalmente, a oxidação da superfície.” (DALLMANN, 2012, p. 26).

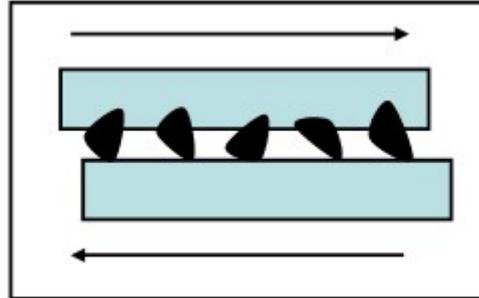
3.3.4 Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo é definido como o deslocamento de material causado por partículas ou protuberâncias de elevada dureza, que são forçadas contra e ao longo de uma superfície sólida. (HUTCHINGS, 1992). “O desgaste abrasivo é uma das formas mais severas de desgaste, geralmente provocando maior dano ou perda de material da superfície.” (DALLMANN, 2012, p. 28). Segundo Hank (1999), o desgaste abrasivo tem sido tipicamente dividido em dois regimes: alta tensão ou baixa tensão. Alta tensão ocorre quando as partículas abrasivas são comprimidas entre duas superfícies sólidas. A alta pressão de contato produz endentações e riscos na superfície desgastada, fratura e pulverização das partículas abrasivas. Baixa tensão ocorre quando partículas abrasivas levemente carregadas interferem e se movem sobre a superfície, produzindo cortes e ranhuras numa escala microscópica.

Segundo Hutchings (1992), uma distinção frequentemente é feita entre desgaste abrasivo a dois corpos e a três corpos. O desgaste abrasivo é denominado de dois corpos, Figura 2, quando uma superfície dura e rugosa, ou uma superfície macia contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície de menor dureza,

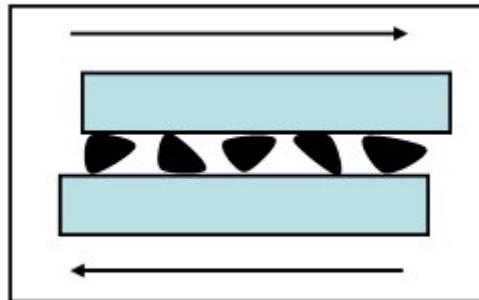
produzindo nela diversas ranhuras. Já abrasão a três corpos, Figura 3, ocorre quando as partículas duras são livres para rolar e deslizar entre as duas superfícies. (DALLMANN, 2012).

Figura 2: Desgaste abrasivo a dois corpos



Fonte: Amaral e Paiva, 2006

Figura 3: Desgaste abrasivo a três corpos

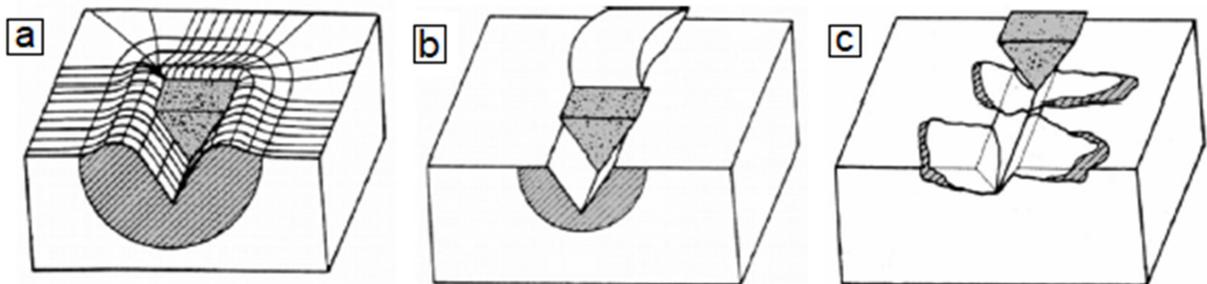


Fonte: Amaral e Paiva, 2006

3.4 MECANISMOS DE DESGASTE POR ABRASÃO

“Os mecanismos de desgaste abrasivo podem envolver tanto deformação plástica como fratura frágil.” (HUTCHINGS, 1992, p. 141). Basicamente existem dois modos distintos de abrasão por deformação plástica: microsulcamento e microcorte. No desgaste abrasivo por fratura frágil, pode ocorrer o microtrincamento. (COSEGLIO, 2009). Todos esses mecanismos estão ilustrados na Figura 4.

Figura 4: Mecanismos de desgaste abrasivo. (a) Microsulcamento; (b) Microcorte; (c) Microtrincamento



Fonte: Coseglio, 2009

O microsulcamento resulta da ação de partículas abrasivas deformando plasticamente a superfície de um material dúctil, formando um sulco em seu trajeto. O microcorte consiste na formação de pequenos cavacos, quando as tensões de cisalhamento impostas pelas partículas abrasivas sobre a superfície são suficientemente elevadas para a ruptura do material dúctil. O microtrincamento é um processo de fragmentação da superfície frágil, pela formação e crescimento de trincas devido à ação da partícula abrasiva. (RIBEIRO, 2004).

3.5 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA TAXA DE DESGASTE ABRASIVO

“O desgaste abrasivo é proporcional a dureza dos materiais em contato, a geometria das partículas abrasivas, a intensidade do carregamento e a distância do trajeto de desgaste.” (MARTINS; SANTOS, 2006, p. 14).

3.5.1 Dureza dos materiais em contato

O desgaste abrasivo depende do coeficiente de dureza definido como a razão entre a dureza da partícula e a dureza da superfície desgastada (H_a/H_m). Essa relação indica que para valores entre 0,7 e 1,1 o desgaste é pequeno; para valores entre 1,3 e 1,7 o desgaste é elevado, havendo indício que independe da dureza do abrasivo. (RIBEIRO, 2004).

A microestrutura é muito importante no comportamento do material submetido à abrasão e principalmente quanto aos produtos da decomposição da austenita enriquecida em carbono, ou seja, os carbonetos e partículas de segunda fase, e da

forma como estes se apresentam na estrutura. Portanto, nota-se que à medida que se aumenta a quantidade das partículas duras, bem como o seu tamanho, há um melhor comportamento da resistência ao desgaste por abrasão. (RIBEIRO, 2004).

Adicionalmente, quando a dureza da superfície desgastada atinge valores semelhantes à dureza do abrasivo, ocorre a redução do poder de corte das arestas do abrasivo. Usualmente a literatura utiliza a razão H_a/H_m para a previsão dos regimes de desgaste apenas para as situações nas quais são verificados mecanismos controlados por deformação plástica. (PINTAÚDE, 2002, p. 20).

3.5.2 Geometria da partícula abrasiva

“Com relação ao tamanho, o que se observa em geral é que o volume de material removido cresce com o tamanho da partícula.” (RIBEIRO, 2004, p. 30). “A taxa de desgaste aumenta rapidamente até um tamanho crítico de partícula e a partir deste, permanece praticamente constante.” (CORRÊA, 2005, p. 16).

“A taxa de desgaste também depende bastante da forma das partículas. As angulares (facetadas) causam desgaste mais severo que as arredondadas.” (HUTCHINGS, 1992, p. 140). “O efeito deteriorante maior dos abrasivos angulares é particularmente importante nas ligas contendo carbonetos visto que a abrasão preferencial da matriz pode levar a uma diminuição do suporte dos carbonetos.” (CORRÊA, 2005, p. 18).

3.5.3 Intensidade do carregamento

“A perda de material por abrasão é diretamente proporcional ao esforço de compressão entre o abrasivo e a superfície metálica. Isso é válido até certo valor crítico de força, que é determinada pela deformação excessiva da superfície metálica, ou então pela instabilidade das partículas abrasivas que passam a fraturar.” (RIBEIRO, 2004, p. 31). Esse aumento de desgaste é devido à maior profundidade de penetração das partículas abrasivas na superfície desgastada.

Estudos mostraram que incrementos de força aplicada para o aço AISI D2 ocasionaram aumentos sucessivamente menores do desgaste abrasivo. Atribuiu-se este comportamento às mudanças de forma da partícula abrasiva que se tornaram mais homogêneas e arredondas (VILLABÓN; SINATORA, 2006).

3.5.4 Distância do trajeto de desgaste e velocidade de deslizamento

“O volume do material removido por abrasão aumenta ligeiramente com a velocidade de deslizamento só até 2,5 m/s.” (RIBEIRO, 2004, p. 31). Isso pode ser explicado pela variação das propriedades da borracha devido à taxa de tensão e devido à temperatura. Quando se atinge altas velocidades, a temperatura do corpo de prova aumenta juntamente com a da borracha, deixando-a mais macia e diminuindo o volume de material removido (STEVENSON; HUTCHINGS, 1996).

“Outros estudos mostram que o fator de empacotamento, densidade da camada de abrasivo na interface do corpo de prova, diminui com o aumento da velocidade de deslizamento.” (SILVA; SCANDIAN, 2007, p. 6). O aumento do fator de empacotamento provoca uma diminuição na taxa de desgaste abrasivo já que as partículas abrasivas passam a se desgastarem entre si.

3.6 ENSAIOS DE DESGASTE ABRASIVO

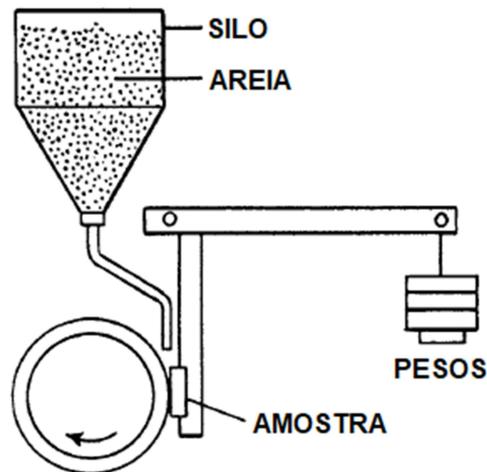
Existe uma grande dificuldade em comparar resultados de desgaste obtidos por diversos investigadores devido à variação dos métodos de ensaio e ao baixo controle de certos aspectos do ensaio. A complexidade do fenômeno do desgaste abrasivo ainda não permitiu a determinação de um ensaio universal e, conseqüentemente, os testes são feitos sob medida para refletir as condições únicas que uma determinada liga encontrará em serviço (CORRÊA, 2005).

O teste de abrasão com roda de borracha é o mais largamente usado para classificar materiais que estão sujeitos à abrasão e à baixa tensão em serviço. Há uma boa correlação entre os resultados destes testes e experiências de campo (CORRÊA, 2005).

A norma americana ASTM G65-00 descreve tanto o equipamento quanto o procedimento laboratorial para determinar a resistência à abrasão de materiais sob condições específicas. A resistência a abrasão é calculada pelo volume de material perdido em milímetros, assim, um material de maior resistência terá um menor volume perdido. Devido à diferença existente entre os materiais, a norma especifica cinco procedimentos recomendados de ensaio para materiais de baixa resistência ao desgaste abrasivo, alta resistência ao desgaste abrasivo ou quando se deseja avaliar a resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos.

O procedimento laboratorial consiste em introduzir o abrasivo entre a interface do corpo de prova e da roda giratória com uma borda de borracha de clorobutil de dureza específica. O corpo de prova, que está na posição vertical, é pressionado contra a roda giratória com uma força específica por um braço de carga, enquanto o fluxo controlado de areia atrita a superfície da amostra (MARTINS; SANTOS, 2006). O modelo do equipamento está ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Abrasômetro roda de borracha configuração vertical



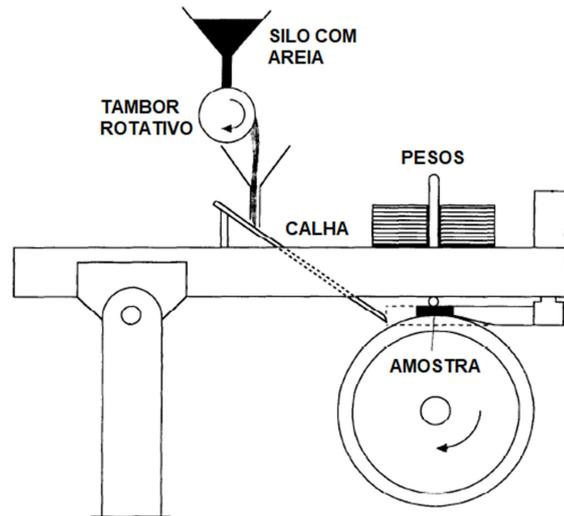
Fonte: ASTM G65-00, 2010

As principais vantagens de usar os métodos de testes de desgaste padrão da ASTM são: os métodos de teste têm sido rigorosamente avaliados e os procedimentos cuidadosamente documentados; a repetibilidade e reprodutibilidade dos resultados tendem a ser melhores documentados e entendidos; em vários casos, existe uma grande quantidade de dados anteriores e isso é conveniente para se comparar com dados novos; e a documentação e os requisitos dos relatórios têm sido estabelecidos de modo que todas as principais variáveis e resultados dos trabalhos possam ser apresentados de forma completa e organizada (BLAU; BUDINSKI, 1999).

Stevenson e Hutchings projetaram e construíram um equipamento roda de borracha/areia seca modificado. O corpo de prova é disposto horizontalmente e uma célula de carga é colocada para medir a força de fricção dinâmica sobre o corpo de prova. A amostra é colocada num aparato fixado no braço de carga, e a carga normal é aplicada sobre ele pelo contato com uma esfera fixa que pressiona de

encontro a sua superfície superior (MARTINS; SANTOS, 2006). O modelo está ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Abrasômetro roda de borracha configuração horizontal



Fonte: Stevenson e Hutchings, 1996

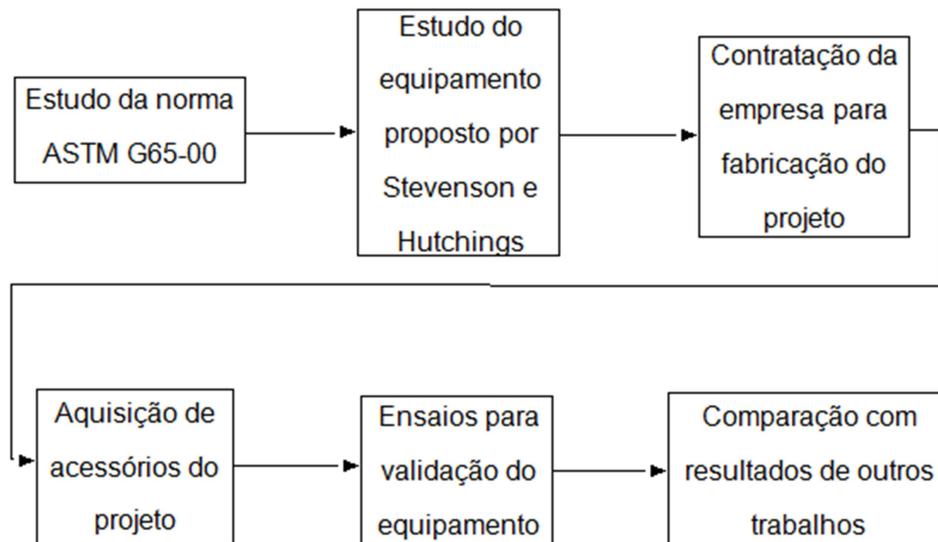
“Inevitavelmente, alguns abrasivos são perdidos na borda da roda, mas este pode ser quantificado coletando-os separadamente da areia que passa através do contato com o corpo de prova. Desta maneira pode ser determinada a quantidade de abrasivo que passa realmente pelo corpo de prova.” (MARTINS; SANTOS, 2006, p. 19).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PLANEJAMENTO DO PROJETO

O equipamento objetiva a união de dois modelos existentes de abrasômetro, o proposto pela norma ASTM G65-00 e o proposto por Stevenson e Hutchings. A base de projeto seguiu o proposto pela norma, que define as dimensões e características dos materiais da roda de borracha, areia abrasiva, bico para alimentação da areia abrasiva, porta amostra, amostras, além de características técnicas do motor. Partes como a cabine do equipamento e o silo para a areia abrasiva não são especificados por norma, ficando de livre escolha de projeto. A Fluxograma 1 mostra o planejamento do projeto.

Fluxograma 1: Planejamento do projeto



Fonte: Autoria própria

A diferença entre esses dois modelos possíveis para o equipamento é que na norma ASTM G65-00 a amostra é ensaiada verticalmente e a carga é aplicada por meio de um braço de alavanca, que também tem suas dimensões especificadas. No modelo de Stevenson e Hutchings a amostra é ensaiada na posição horizontal e a carga é aplicada diretamente sobre a amostra. O bico para a alimentação da areia abrasiva para esta configuração não tem dimensões nem conceito específicos, sendo exigida apenas a mesma vazão especificada na norma.

Além do equipamento em si é necessária também a aquisição de equipamentos para a calibração do mesmo, que são: célula de carga, tacômetro e durômetro shore. Esses equipamentos são de suma importância para garantir a adequação à norma e a garantia dos resultados de ensaio. Todo o projeto do equipamento seguiu o projeto de Figueiredo Neto (2017).

4.2 TESTES DE VALIDAÇÃO

A norma ASTM G65-00 recomenda que o número mínimo de testes que precisam ser feitos inicialmente para estabelecer a precisão e as tendências do equipamento deve ser de cinco. Ela também especifica os procedimentos para se determinar a resistência ao desgaste abrasivo. O resultado do teste é relatado pelo volume de material perdido em milímetros cúbicos. Os testes realizados no abrasômetro em questão seguiram os procedimentos A e B, os parâmetros podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros de teste

Procedimentos específico	Força aplicada (N)	Revoluções da roda	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: Autoria própria

A norma afirma que o procedimento A é um teste relativamente severo e é útil para classificar materiais de média à extrema resistência à abrasão. O procedimento B é uma pequena variação do procedimento A e deve ser usado em materiais com alta resistência à abrasão. O procedimento B deve ser usado quando o volume de material perdido, quando feito o procedimento A, exceder 100 mm^3 . Estes testes devem ser feitos com os materiais de referência. A norma recomenda utilizar o aço ferramenta AISI D-2 para o procedimento A e o aço ferramenta AISI H-13 para o procedimento B.

4.2.1 Caracterização dos materiais de teste

4.2.1.1 Areia abrasiva

O abrasivo especificado na norma ASTM G65-00 é uma areia de grãos de quartzo arredondados, tipificada por AFS 50/70, com granulometria que varia de 212 μm a 300 μm . A areia recomendada pela norma não é comercializada no Brasil e os laboratórios que possuem equipamentos tipo roda de borracha utilizam a Areia Normal Brasileira do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) NBR-7214 Nº 100, que possui uma granulometria que varia de 150 μm a 300 μm . Para avaliar a diferença entre as areias abrasivas foram feitos ensaios na areia do IPT para verificar o tamanho e o formato das partículas abrasivas.

Para avaliar o tamanho das partículas, foi utilizado um granulometro a laser da marca Malver Mastersizer 2000. Esse tipo de equipamento mede a distribuição do tamanho das partículas por meio da variação angular na difração de um feixe de laser que interage com as partículas. Partículas grandes dispersam a luz em pequenos ângulos, partículas pequenas dispersam a luz em ângulos grandes. Para avaliar o formato foram feitas análises no microscópio eletrônico de varredura MIRA3 da TESCAN. O MEV opera utilizando um feixe de elétrons que varre a superfície do que se deseja observar. A superfície emite elétrons secundários que são captados por detectores que criam um sinal um sinal elétrico e projeta a imagem tridimensional da superfície.

4.2.1.2 Amostras

Os materiais utilizados nas amostras ensaiadas no abrasômetro são do aço ferramenta AISI D-2 e do aço ferramenta AISI H-13. O aço para trabalho a frio AISI D-2 é usado em ferramentas que exigem alta resistência a abrasão como matrizes para estampar e cunhar, centros para tornos e punções. O aço para trabalho a quente AISI H-13 é usado em matrizes e punções de forjamento em prensa e punções para extrusão de ligas não ferrosas.

Como se tinha disponíveis amostras de fornecedores diferentes foi realizado o ensaio de dureza HRC nas amostras para verificar se estavam com a dureza requerida por norma. O ensaio de dureza Rockwell C consiste em penetrar uma

superfície com um cone de diamante 120°, inicialmente com uma pré-carga de 10 Kgf e depois com uma carga de 140 Kgf. A profundidade de penetração é utilizada para calcular o valor da dureza.

A norma ASTM G65-00 recomenda que o aço AISI D-2 seja endurecido a uma temperatura de 1010°C por 25 minutos, resfriado em ar até a temperatura ambiente e temperado para atingir a dureza final de 58,5-60,5 HRC. Já para o aço AISI H-13, a norma recomenda que seja endurecido a uma temperatura de 1010/1024°C em banho neutro de sal por 25 minutos, resfriado em ar até temperatura ambiente e duplamente temperado a 593°C por 2 e 2 horas com resfriamento em ar entre as temperas até atingir dureza de 47-48 HRC. As composições desses aços estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Composição dos aços

Aço	C %	Mn %	Cr %	Ni %	Mo %	W %	V %	Outros %
AISI D-2	1,50	0,35	12,00	-	0,78	-	0,80	-
AISI H-13	0,40	0,35	5,20	-	1,30	-	0,90	Si=1,00

Fonte: Villares Metals, 2014

4.2.2 Procedimento de ensaio

Antes de iniciar os ensaios, independente da configuração, as seguintes variáveis do equipamento foram verificadas para garantir a validade dos resultados:

- Carga aplicada;
- Ajuste da vazão;
- Rotação da roda de borracha;
- Dureza da borracha.

A verificação da carga foi feita com uma célula de carga fixada entre o porta amostra e o eixo da roda de borracha, os pesos foram adicionados até atingir o valor de 130N. A verificação da vazão foi feita experimentalmente: a vazão da areia abrasiva foi liberada e coletada por 1 minuto, sendo está quantidade pesada posteriormente. A verificação da rotação da roda de borracha e da dureza da borracha foi feita por dispositivos específicos: tacômetro e durômetro shore, respectivamente.

O procedimento geral de ensaio segue as seguintes etapas:

- Prender a amostra no porta amostra;
- Adicionar a carga;
- Iniciar a rotação da roda de borracha;
- Liberar o fluxo abrasivo;
- Tangenciar a amostra na roda de borracha;
- Após o tempo do ensaio, levantar o porta amostra.

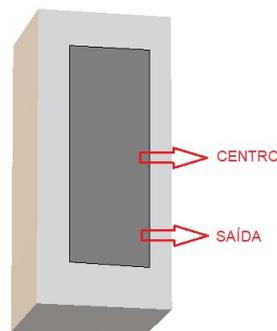
Como o resultado do ensaio é calculado a partir do peso das amostras, elas precisam ser muito bem limpas e pesadas antes e depois do ensaio. Seguem as etapas de preparação das amostras:

- Lavar com sabão neutro e escova macia, depois secar com ar quente;
- Lavar com álcool 99,5% e secar com ar quente (a partir desta etapa, manusear com pinça);
- Banho de ultrassom por 5 min e secar com ar quente;
- Pesar 5 vezes numa balança com precisão de 0,0001 g.

4.3 ESTUDO DOS MECANISMOS DE DESGASTE POR ABRASÃO

Para observar os mecanismos de desgaste abrasivo que ocorrem durante um ensaio no abrasômetro roda de borracha foi feita a análise da marca de desgaste produzida na amostra através do MEV. Foi avaliada a saída da marca, onde a areia abrasiva e a roda deixam de entrar em contato com a amostra, e o centro da marca de desgaste, as regiões estão mostradas no esquema da Figura 7.

Figura 7: Esquema da marca de desgaste



Fonte: Autoria própria

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PROJETO DO EQUIPAMENTO

5.1.1 Estrutura

A estrutura do equipamento consiste na base, bancada e silo. A base foi feita com cantoneiras de abas iguais do tipo “L” com dimensões 38,1x38,1x6,35 mm, de um aço SAE 1020. A bancada foi construída com uma chapa de aço SAE 1045 com espessura de 12,7 mm, nela todos os componentes do abrasômetro serão montados. Essas partes foram unidas por solda e recebeu pintura anticorrosiva, Figura 8.

Figura 8: Base e bancada em fase de montagem



Fonte: Autoria própria

O silo para a areia abrasiva foi feito em chapa de aço galvanizada com volume de 9,6 litros. Este silo atende individualmente a configuração vertical e horizontal de ensaio, bastando acoplar uma mangueira flexível no bico de alimentação da areia abrasiva do ensaio desejado. A base da estrutura recebeu quatro sistemas de amortecimento de vibração e impacto.

5.1.2 Acionamento

A norma ASTM G65-00 recomenda que a roda de borracha seja movida por um motor elétrico de 0,75 kW e uma relação de transmissão que produza uma rotação de saída de 200 ± 10 RPM. O conjunto motor/redutor escolhido para o equipamento e que atende a estes requisitos, Figura 9, foi o modelo GA71 da empresa Geremia.

Figura 9: Conjunto motor/redutor



Fonte: Autoria própria

Para completar o acionamento, também foi feita a aquisição de um inversor de freqüências para controle e variação de velocidade da WEG modelo CFW500, um acoplamento flexível entre o eixo de saída do conjunto motor/redutor e o eixo de fixação da roda de borracha, um mancal tipo flange modelo F208 com rolamento auto compensador e o eixo de fixação da roda de borracha fabricado do aço SAE 1020 onde será montado o acoplamento flexível numa extremidade e a roda de borracha na outra extremidade.

5.1.3 Roda de borracha

A roda de borracha consiste num disco de aço SAE 1020 com uma camada de borracha vulcanizada sem emendas, como mostra a Figura 10. O disco tem espessura de 12,7 mm. A camada de borracha tem largura e espessura de 12,7 mm

e dureza 60 shore A, a norma recomenda dureza entre 58 e 62 shore A. O diâmetro externo total é de 228,6 mm. Foram confeccionadas quatro rodas para facilitar a troca e garantir a realização de vários ensaios.

Figura 10: Roda de borracha



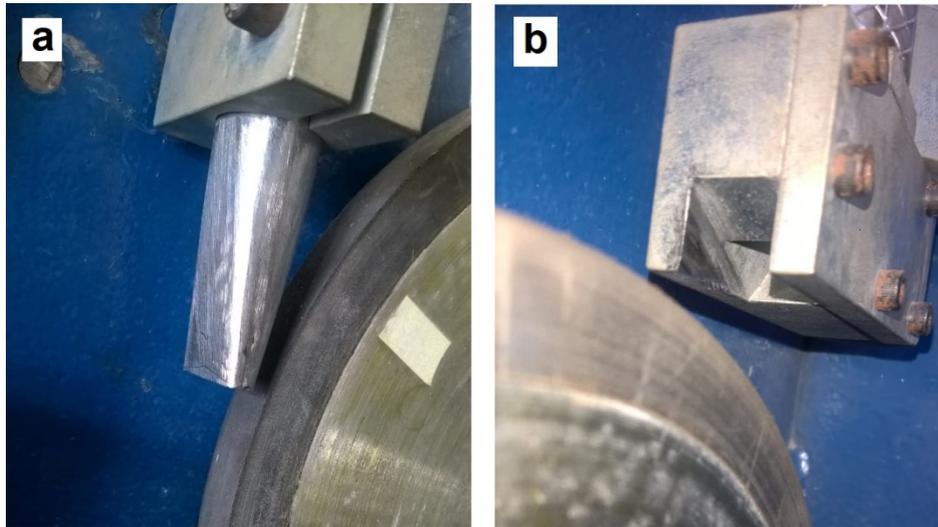
Fonte: Autoria própria

5.1.4 Bico para a alimentação da areia abrasiva

O bico serve para direcionar o fluxo da areia abrasiva para entre a roda e a amostra ensaiada, como também, para controlar esse fluxo. Cada configuração teve uma concepção de bico diferente. Para a configuração vertical, seguiu-se o recomendado pela norma ASTM G65-00, bico em aço inoxidável e que produza uma cortina de areia uniforme. A vazão requerida deve estar entre 300 e 400 g/min.

Para a configuração horizontal não há projeto específico para o bico no trabalho desenvolvido por Stevenson e Hutchings. A grande preocupação foi garantir que o fluxo da areia abrasiva fosse tangente entre a roda de borracha e a amostra ensaiada e que este fluxo pudesse ser regulado facilmente. O sistema desenvolvido utiliza um canal interno e o próprio movimento da roda de borracha para direcionar o fluxo. A vazão é ajustada pela regulagem da altura do bico em relação à roda de borracha. A Figura 11 mostra os bicos para cada configuração.

Figura 11: Bicos para alimentação da areia abrasiva. (a) Configuração vertical; (b) Configuração horizontal



Fonte: Autoria própria

5.1.5 Carga aplicada

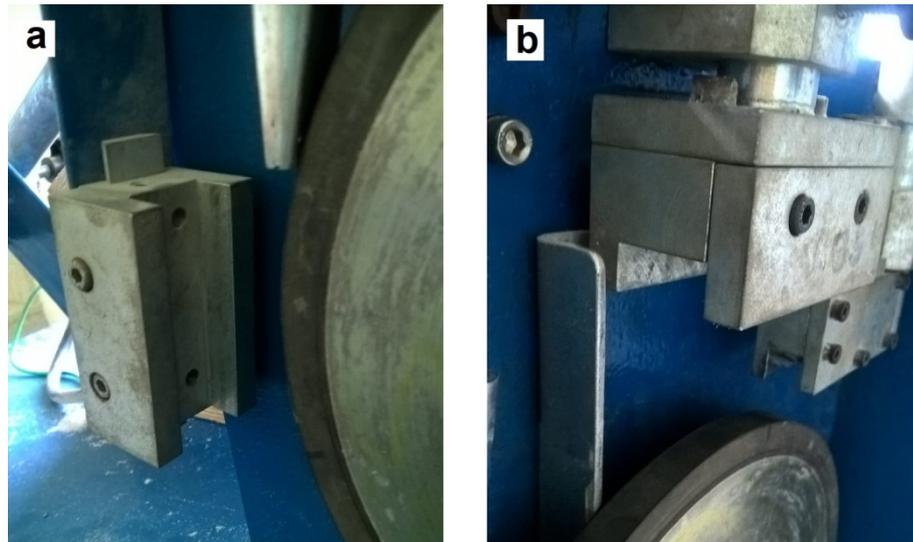
Dentre os procedimentos que a norma ASTM G65-00 apresenta, os parâmetros de teste indicados são a carga aplicada e o tempo de ensaio, dado em rotações da roda. O máximo de carga aplicada é de 130N. Na configuração vertical a carga é aplicada por meio de um braço de alavanca que tem suas dimensões especificadas. No modelo de Stevenson e Hutchings a carga é aplicada diretamente sobre a amostra.

A aferição dessa carga aplicada é feita com uma célula de carga. Esta célula de carga foi fixada entre o eixo da roda de borracha e o porta amostra, depois, foi-se adicionando os pesos até chegar à carga desejada.

5.1.6 Porta amostra

A norma ASTM G65-00 recomenda amostras com o formato retangular de 25 x 76 mm e espessura entre 3,2 e 12,7 mm. Portanto, o porta amostra foi projetado para conter amostras de dimensões 25 x 75 x 10 mm. A amostra é encaixada e fixada pelos ressaltos laterais por meio de parafusos. Cada configuração tem o seu próprio porta amostra, Figura 12.

Figura 12: Porta amostra. (a) Configuração vertical; (b) Configuração horizontal

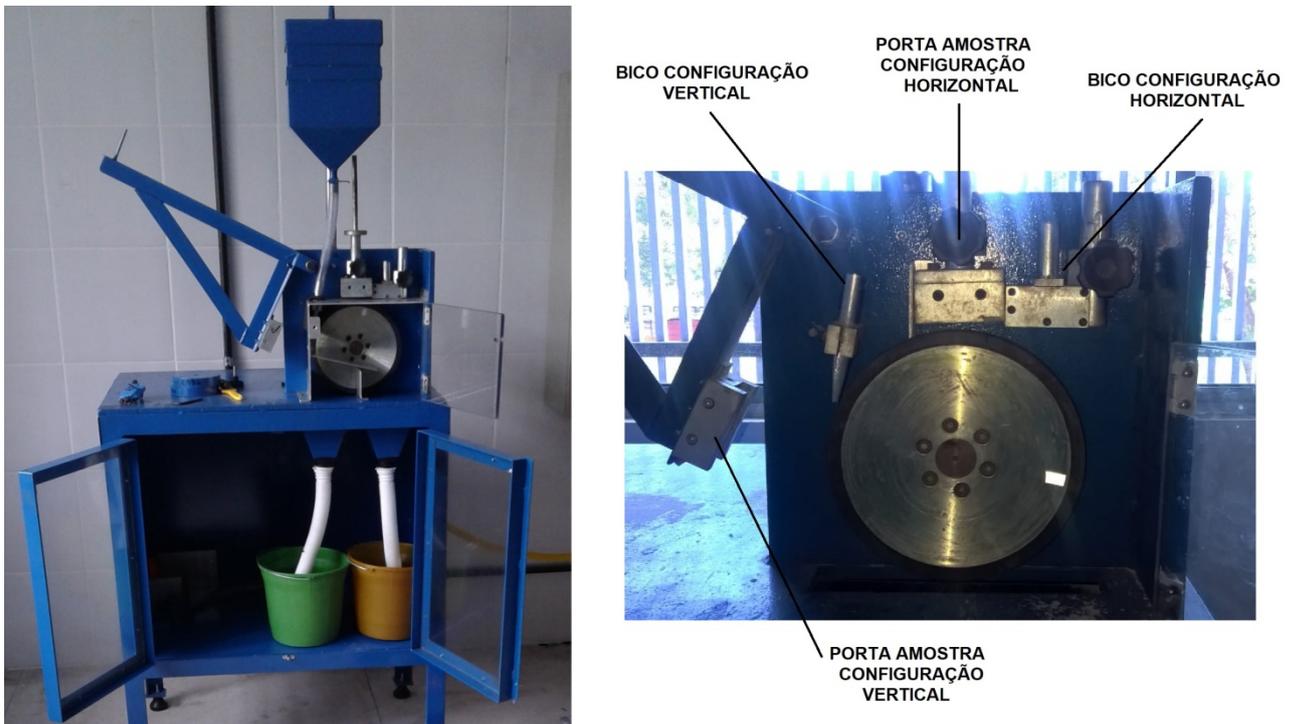


Fonte: Autoria própria

5.1.7 Equipamento finalizado

A Figura 13 mostra o abrasômetro roda de borracha configuração vertical/horizontal finalizado.

Figura 13: Abrasômetro roda de borracha configuração vertical/horizontal



Fonte: Autoria própria

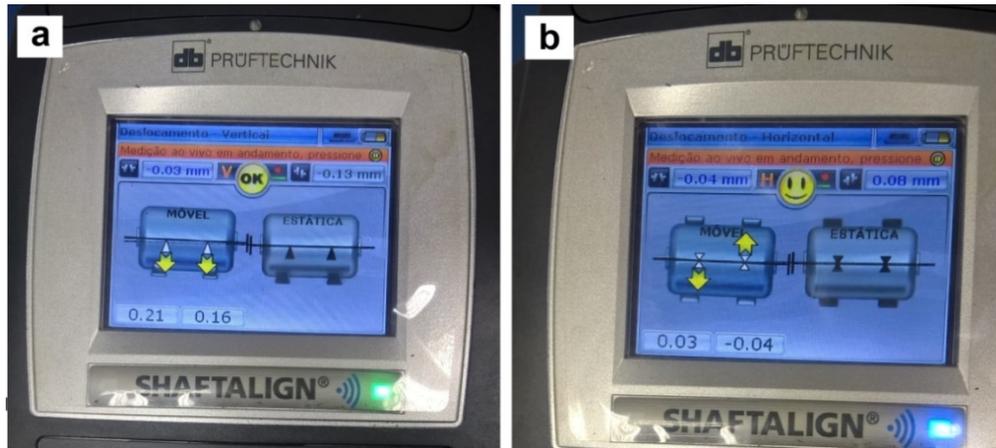
5.1.8 Alinhamento dos eixos

Como parte da calibração do equipamento foi feita a verificação do alinhamento entre o eixo de saída do conjunto motor/redutor e o eixo de fixação da roda de borracha. Isso é essencial para obtenção de dados válidos já que o não alinhamento pode resultar em vibrações na roda de borracha o que pode levar a um desgaste irregular da borracha da roda e também a formação de uma marca de desgaste não uniforme, além do desgaste excessivo dos mancais, dos elementos de vedação e acoplamentos.

O método de alinhamento que pode ser empregado depende da precisão exigida para o equipamento e do tipo de desalinhamento, dentre os métodos mais comuns estão: alinhamento com relógio comparador; alinhamento com régua e calibrador de folga e alinhamento a laser.

Para o abrasômetro foi usado o alinhamento a laser, por ser um procedimento rápido e confiável. No alinhamento a laser duas unidades são fixadas, uma no eixo da máquina móvel e outra no eixo da parte movida. Uma dessas unidades emite e a outra recebe o feixe de laser e um processador faz os cálculos e fornece os deslocamentos necessários para o alinhamento. O equipamento utilizado foi o SHAFTALIGN da PRUFTECHNIK, que fornece uma avaliação automática da condição de alinhamento com o uso de uma simbologia específica. A Figura 14 mostra os resultados desse alinhamento. Para a avaliação na vertical, os deslocamentos estão na ordem de décimos de milímetro, já a avaliação na horizontal, os deslocamentos estão na ordem de centésimos de milímetro. No geral, os eixos estão bem alinhados para as duas condições.

Figura 14: Resultado do alinhamento. (a) Vertical; (b) Horizontal



Fonte: Autoria própria

A Figura 15 mostra a marca de desgaste numa amostra ensaiada. A marca está uniforme e alinhada, indicando o bom alinhamento do equipamento.

Figura 15: Alinhamento da marca de desgaste



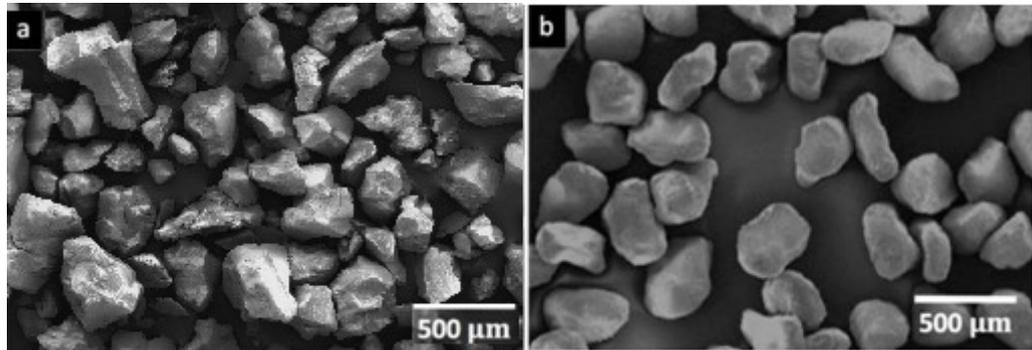
Fonte: Autoria própria

5.2 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA ABRASIVA

Inicialmente, foi feita a caracterização da areia abrasiva utilizada nos ensaios. Como a utilização da areia especificada pela norma ASTM G65-00 não é viável, os laboratórios no Brasil utilizam a areia do IPT NBR-7214 N° 100 e essa substituição poderia interferir nos resultados de desgaste abrasivo.

A Figura 16 mostra as diferenças morfológicas para estes dois tipos de areia. Observa-se que a areia do IPT é um pouco menor e mais angulosa.

Figura 16: Areia abrasiva. (a) NBR-7214 N° 100; (b) AFS 50/70

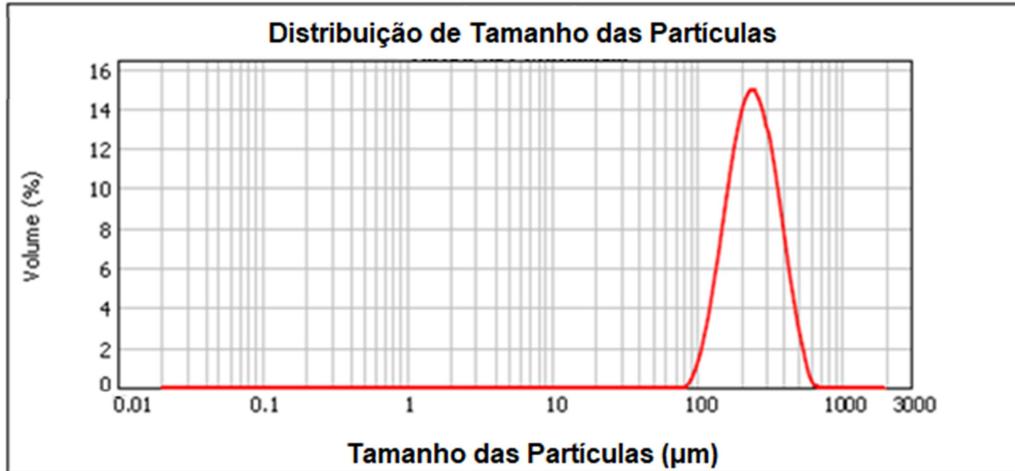


Fonte: a) Autoria própria; b) Neville, et al., 2006

Na areia do IPT, não foi encontrada diferença no tamanho dos grãos especificado pelo fornecedor em comparação com o resultado do ensaio granulométrico. O tamanho médio das partículas (valor do tamanho de partícula abaixo do qual se situam 50% da amostra) foi de 240,661 μm , o que está dentro da faixa especificada pelo fornecedor que é de 150 μm a 300 μm . A distribuição pode ser vista no Gráfico 1.

O tamanho médio das partículas da areia do IPT é um pouco menor que a areia especificada pela norma ASTM G65-00, todavia, este efeito nos resultados de desgaste pode ser compensado pela maior angulosidade dessas partículas. A substituição da areia abrasiva se mostrou equivalente, não apresentando alteração nos resultados da taxa de desgaste abrasivo.

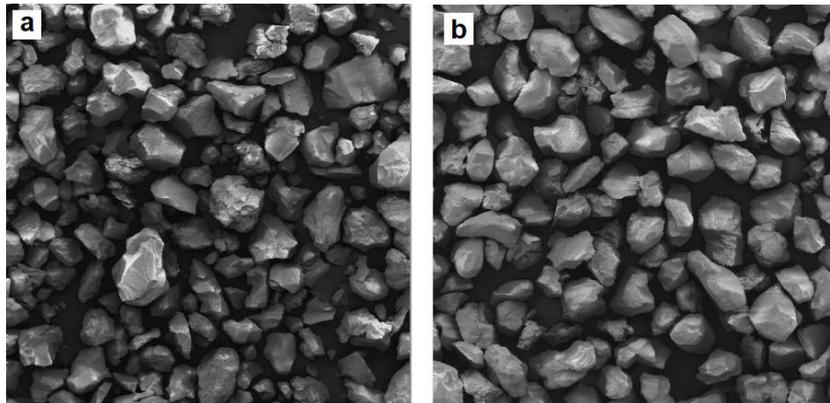
Gráfico 1: Caracterização da areia do IPT, NBR-7214 N° 100



Fonte: Autoria própria

A Figura 17 e o Gráfico 2 mostram o resultado, respectivamente, da microscopia da areia abrasiva e da análise granulométrica de outros lotes de areia IPT NBR-7214 N° 100 utilizada em outros laboratórios que também possuem um abrasômetro roda de borracha. Não foram encontradas diferenças na morfologia das partículas dos outros lotes em comparação com o lote utilizado nos ensaios.

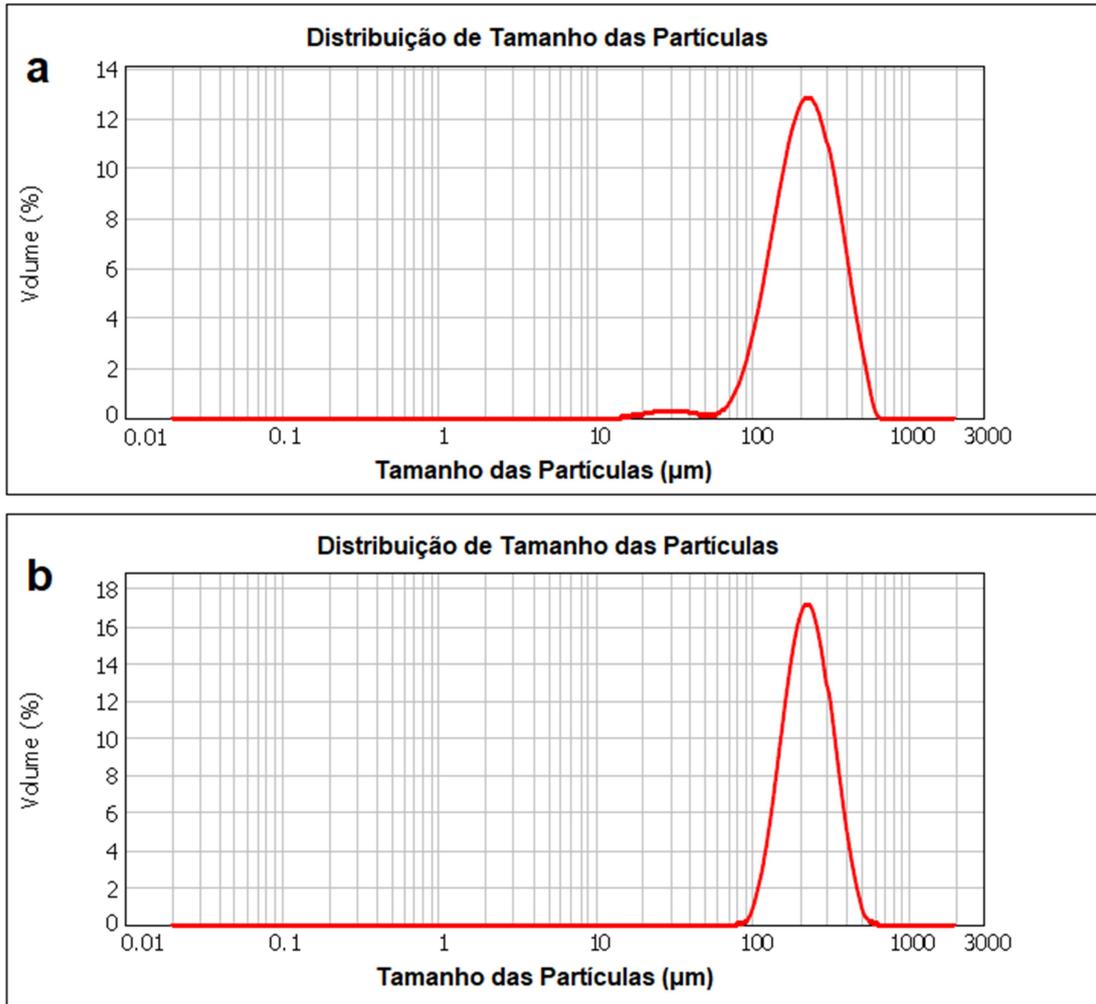
Figura 17: Areia abrasiva. (a) Lote 1; (b) Lote 2



Fonte: Autoria própria

O tamanho médio das partículas para o Lote 1 foi de 221,694 μm e para o Lote 2 foi de 227,309 μm , o que também está dentro da faixa especificada pelo fornecedor que é de 150 μm a 300 μm .

Gráfico 2: Caracterização da areia do IPT, NBR-7214 N° 100. (a) Lote 1; (b) Lote 2

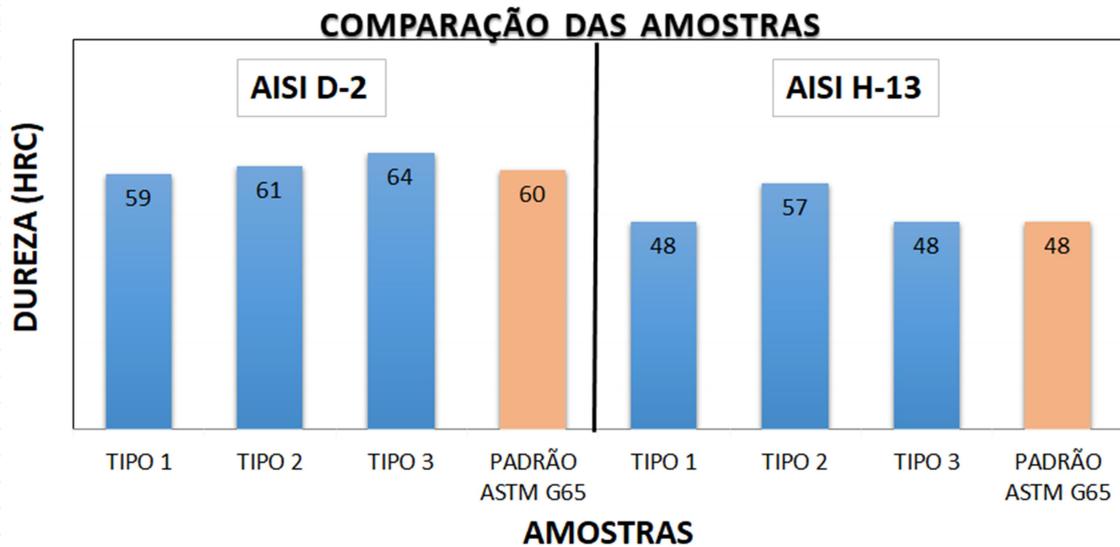


Fonte: Autoria própria

5.3 DUREZAS DAS AMOSTRAS

Como dito anteriormente, tinham-se disponíveis amostras de aços de diferentes fornecedores. Foi feita a medição da dureza dessas amostras e foi possível a classificação destas em três tipos, levando em consideração esses fornecedores. O Gráfico 3 mostra os valores dessas durezas em comparação com a dureza requerida por norma.

Gráfico 3: Durezas das amostras



Fonte: Autoria própria

As amostras do aço AISI D2 apresentaram valores de dureza média diferentes para cada fornecedor, nenhum deles igual ao requerido pela norma ASTM G65-00. Já as amostras do aço AISI H13 apresentaram valores de dureza média exatos com o valor padrão da norma, com exceção das amostras Tipo 2 que apresentaram dureza bem mais elevada. Mesmo algumas amostras não apresentando o valor de dureza recomendado pela norma, todos os tipos foram ensaiados. Isso permitiu avaliar como a dureza da amostra afeta na taxa de desgaste abrasivo.

5.4 VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO NA CONFIGURAÇÃO VERTICAL

Os resultados da taxa de desgaste dos testes de desgaste abrasivo na configuração vertical que serão apresentados aqui são de um equipamento (denominado equipamento 1) que seguiu o mesmo projeto proposto por Figueiredo Neto (2017) para o equipamento da UFPE. Os resultados obtidos serão comparados aos obtidos no equipamento da UFPE e em testes realizados em outro laboratório com um equipamento roda de borracha vertical (denominado equipamento 2).

No equipamento 1, as amostras de diferentes durezas dos aços AISI D-2 e AISI H-13 foram ensaiadas para diferentes cargas: 130 N e 168 N. A vazão estava

dentro do requerido pela norma. A Tabela 3 mostra os resultados para o ensaio com carga de 168N com as amostras do Tipo 3.

Tabela 3: Resultados dos ensaios com carga de 168N nas amostras Tipo 3

AISI D-2 EQUIPAMENTO 1			AISI H-13 EQUIPAMENTO 1		
Amostra	Perda de massa (g)	Volume perdido (mm ³)	Amostra	Perda de massa (g)	Volume perdido (mm ³)
CP-M02	0,09464	36,63	CP-M02	0,44152	56,97
CP-M04	0,092	35,6	CP-M06	0,4087	52,73
CP-M01	0,0987	38,21	CP-M01a	0,41936	54,11
Densidade (g/cm ³)	7,75		Densidade (g/cm ³)	7,75	
Média	0,095	36,81	Média	0,423	54,6
Desvio Padrão	0,003393464	1,314	Desvio Padrão	0,016759749	2,163
Coefic. de variação	3,57%		Coefic. de variação	3,96%	

Fonte: Autoria própria

A Tabela 4 mostra os resultados para o ensaio com carga de 130N com as amostras do Tipo 1.

Tabela 4: Resultados dos ensaios com carga de 130N nas amostras Tipo 1

AISI D-2 EQUIPAMENTO 1			AISI H-13 EQUIPAMENTO 1		
Amostra	Perda de massa (g)	Volume perdido (mm ³)	Amostra	Perda de massa (g)	Volume perdido (mm ³)
CP-00	0,11284	43,68	CP-05	0,36736	47,4
CP-03	0,1421	55,01	CP-08	0,3966	51,18
CP-01	0,14242	55,13			
CP-02	0,13852	53,62			
Densidade (g/cm ³)	7,75		Densidade (g/cm ³)	7,75	
Média	0,134	51,86	Média	0,382	49,29
Desvio Padrão	0,01419717	5,496	Desvio Padrão	0,02070409	2,671
Coefic. de variação	10,60%		Coefic. de variação	5,42%	

Fonte: Autoria própria

Por fim, a Tabela 5 mostra os resultados para o ensaio com carga de 168N com as amostras do Tipo 2.

Tabela 5: Resultados dos ensaios com carga de 168N nas amostras Tipo 2

AISI D-2			EQUIPAMENTO 1			AISI H-13			EQUIPAMENTO 1		
Amostra	Perda de massa (g)	Volume perdido (mm ³)	Amostra	Perda de massa (g)	Volume perdido (mm ³)	Amostra	Perda de massa (g)	Volume perdido (mm ³)	Amostra	Perda de massa (g)	Volume perdido (mm ³)
CP-09	0,1461	56,54	CP-06	0,56548	72,97	CP-06	0,56548	72,97	CP-06	0,56548	72,97
CP-07	0,1434	55,51	CP-04	0,56228	72,55	CP-04	0,56228	72,55	CP-04	0,56228	72,55
media	0,14473	56,02	media	0,56388	72,76	media	0,56388	72,76	media	0,56388	72,76
Densidade (g/cm ³)	7,75		Densidade (g/cm ³)	7,75		Densidade (g/cm ³)	7,75		Densidade (g/cm ³)	7,75	
Média	0,145	56,02	Média	0,56388	73,24	Média	0,56388	73,24	Média	0,56388	73,24
Desvio Padrão	0,00133	0,515	Desvio Padrão	0,0016	0,206	Desvio Padrão	0,0016	0,206	Desvio Padrão	0,0016	0,206
Coefic. de variação	0,92%		Coefic. de variação	0,28%		Coefic. de variação	0,28%		Coefic. de variação	0,28%	

Fonte: Autoria própria

Os ensaios no aço AISI D-2 seguiram o procedimento A da norma ASTM G65-00. Este procedimento exige que o material seja ensaiado por 30 minutos. Considerando que o desgaste abrasivo apresenta um comportamento linear, ensaiou-se o material por 10 minutos e depois o resultado da massa perdida foi multiplicado por 3.

A Tabela 6 mostra a média da taxa de desgaste e o desvio padrão para os ensaios. Logo ao lado estão os valores da taxa de desgaste e da tolerância exigida pela norma ASTM G65-00. Para os resultados com a carga de 130 N, podemos ver que nenhum dos materiais correspondeu ao requerido por norma, mesmo tendo a vazão e a dureza das amostras dentro do exigido por norma. O material que se saiu melhor foi o AISI H-13, tendo o valor da taxa de desgaste bem próximo do esperado.

Tabela 6: Desvio padrão dos resultados

		AISI H-13						
		Taxa desg.	Desvio padrão	G65-00	Tolerância	Variação		
Equip. 1	Amostras TIPO 2/168N	73,24	0,21	56,00	±4	17,24		
	Amostras TIPO 1/130N	49,29	2,67	56,00	±4	-6,71		
	Amostras TIPO 3/168N	54,60	2,16	56,00	±4	-1,40		
			AISI D-2					
			Taxa desg.	Desvio padrão	G65-00	Tolerância	Variação	
		Amostras TIPO 2/168N	56,02	0,51	36,00	±5	20,02	
	Amostras TIPO 1/130N	51,86	5,50	36,00	±5	15,86		
	Amostras TIPO 3/168N	36,81	1,31	36,00	±5	0,81		

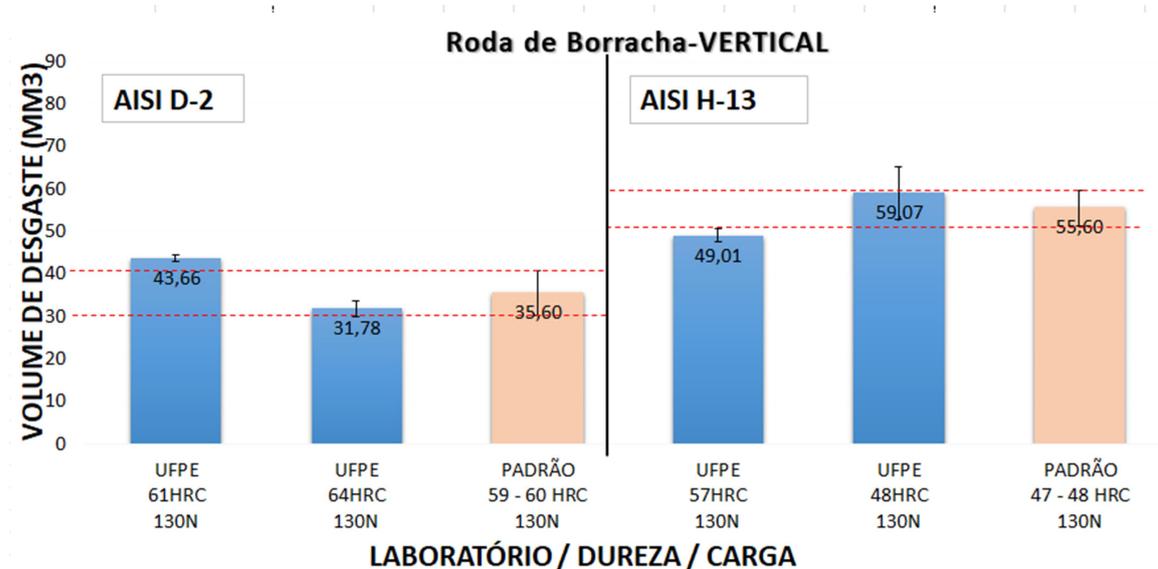
Fonte: Autoria própria

Os valores para a carga de 168 N foram usados para comparação com outros resultados. Será avaliado a seguir o efeito da variação da carga aplicada, dureza das amostras e vazão da areia abrasiva.

5.5 VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS

O Gráfico 4 mostra os resultados dos ensaios feitos no equipamento da UFPE, a carga aplicada foi de 130 N e foram ensaiadas amostras de diferentes durezas. Para os dois tipos de material, as amostras com maior dureza apresentaram menor taxa de desgaste.

Gráfico 4: Variação da dureza das amostras para carga de 130 N



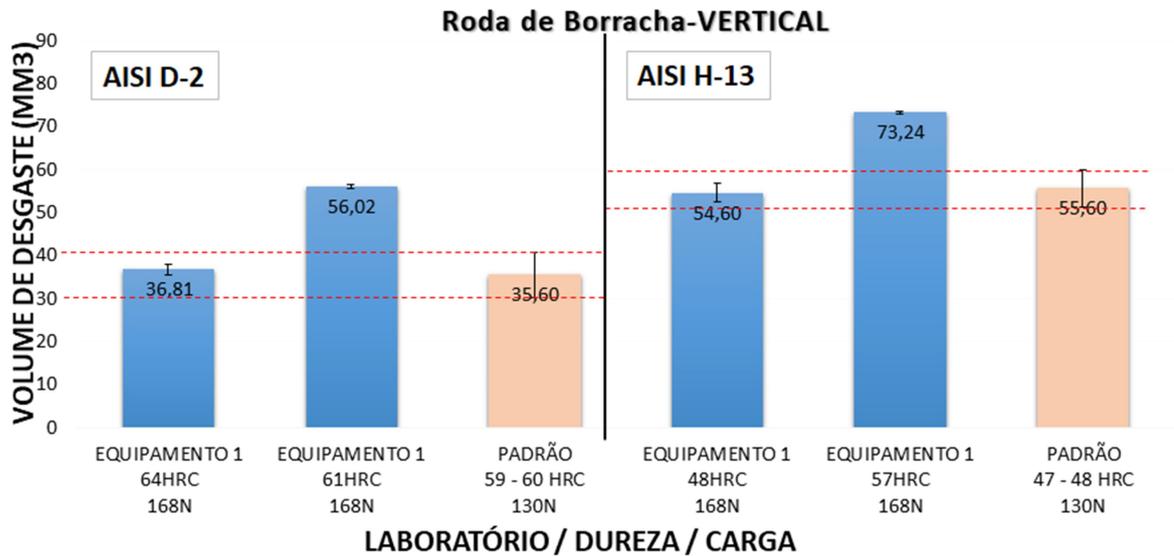
Fonte: Autoria própria

Percebe-se também que o aço AISI D-2 é mais sensível à variação da dureza, pois a variação de apenas 3 HRC na dureza das amostras provocou uma diferença de 11,88 mm³ na taxa de desgaste abrasivo, enquanto que no aço AISI H-13 uma variação de 9 HRC na dureza resultou numa diferença na taxa de desgaste de 10,06 mm³.

O Gráfico 5 mostra os resultados de ensaios feitos no equipamento 1 para carga de 168 N e também para amostras de diferentes durezas. Para o aço AISI D-2, as amostras de maior dureza também apresentaram menor taxa de desgaste. Já

para o aço AISI H-13, a taxa de desgaste para as amostras de maior dureza foi muito mais elevada que a taxa de desgaste para as amostras de menor dureza.

Gráfico 5: Variação da dureza das amostras para carga de 168 N

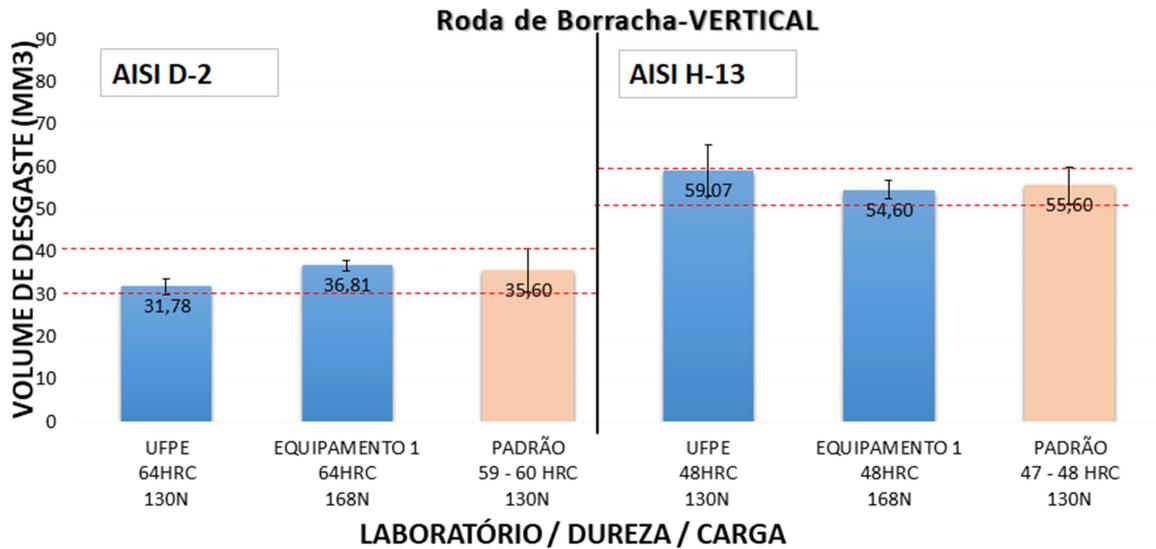


Fonte: Autoria própria

No geral, as amostras apresentaram um aumento na taxa de desgaste em relação à carga aplicada de 130 N, exceto as amostras do aço AISI H-13 com dureza de 48 HRC. Novamente, o aço AISI D-2 é mais sensível à variação da dureza, pois a variação de apenas 3 HRC na dureza das amostras provocou uma diferença de 19,21 mm³ na taxa de desgaste abrasivo, enquanto que no aço AISI H-13 uma variação de 9 HRC na dureza resultou numa diferença na taxa de desgaste de 18,64 mm³.

O Gráfico 6 mostra os resultados para amostras com mesmo valor de dureza e para diferentes valores da carga aplicada. O aço AISI D-2 apresentou um aumento na taxa de desgaste quando ensaiado com maior carga. No aço AISI H-13 a taxa de desgaste diminuiu com o aumento da carga. Podemos notar que o aço AISI H-13 se comportou de maneira inesperada com relação à variação da carga.

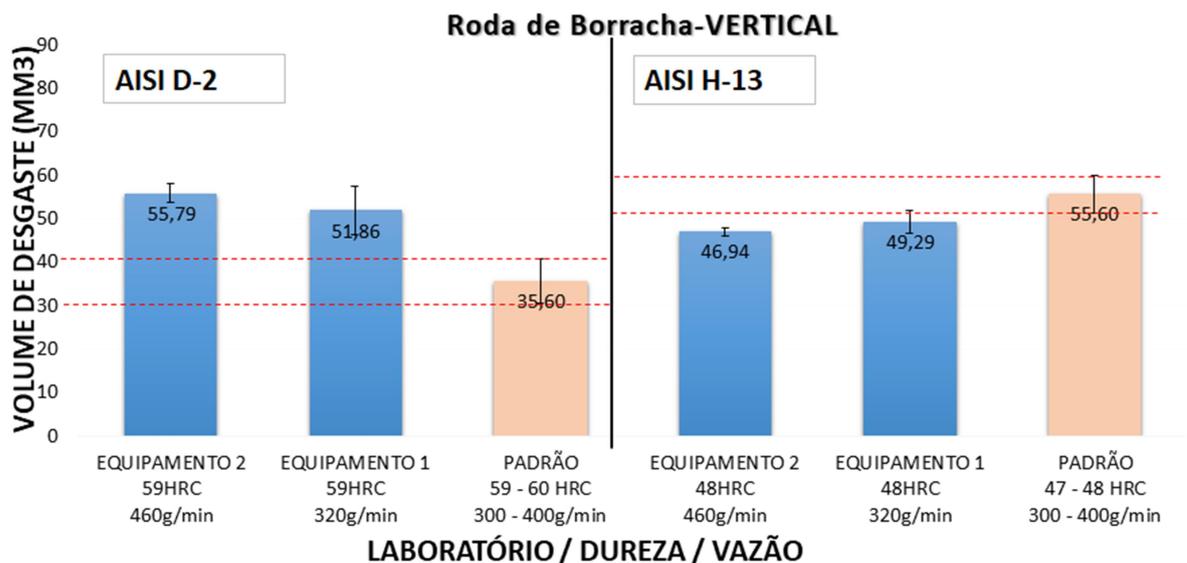
Gráfico 6: Variação da carga aplicada



Fonte: Autoria própria

O Gráfico 7 mostra os resultados para amostras com mesmo valor de dureza e para diferentes valores de vazão da areia abrasiva. O aço AISI D-2 apresentou um aumento na taxa de desgaste quando ensaiado com a vazão maior. No aço AISI H-13 a taxa de desgaste diminuiu com o aumento da vazão. Embora haja essa diferença de comportamento entre os tipos de materiais usados, a mudança da vazão causou pouca variação nos resultados da taxa de desgaste.

Gráfico 7: Variação na vazão da areia abrasiva



Fonte: Autoria própria

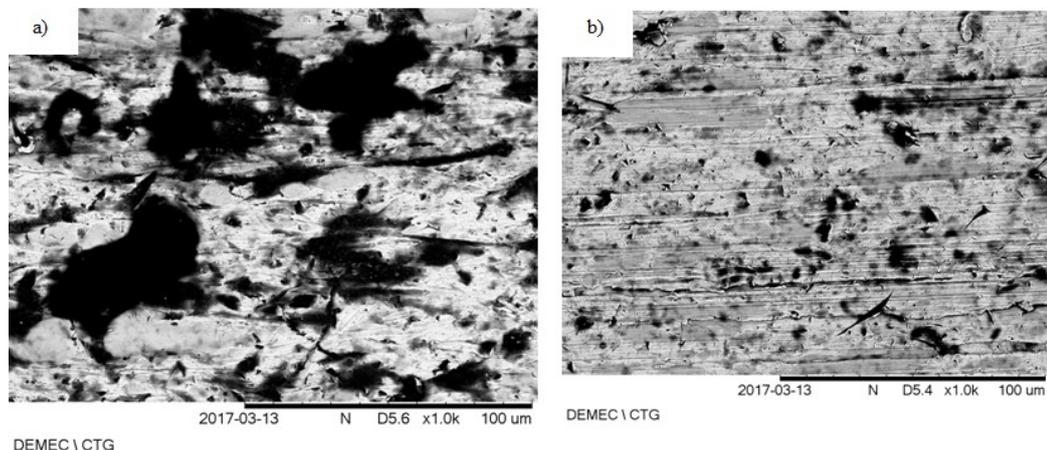
5.6 ANÁLISES DOS MECANISMOS DE DESGASTE POR ABRASÃO

Com o propósito de entender o mecanismo de desgaste abrasivo que ocorre durante o ensaio abrasivo roda de borracha, foram feitas análises microestruturais no MEV (microscópio eletrônico de varredura) da marca de desgaste produzida na amostra durante o ensaio. Foram analisadas as marcas de desgaste de uma amostra de cada material: uma do aço AISI D2 com dureza 61 HRC e a outra do aço AISI H13 com dureza 57 HRC.

Os mecanismos de desgaste abrasivo podem envolver tanto deformação plástica como fratura frágil. No caso da abrasão por deformação plástica, e quando há o deslizamento das partículas abrasivas, existem dois modos distintos: microsulcamento e microcorte. Quando ocorre o rolamento de partículas abrasivas, os mecanismos são o de microindentação e microfadiga. Nos dois materiais observou-se que os mecanismos de desgaste transitaram de microindentações para microsulcamentos (ou de corte).

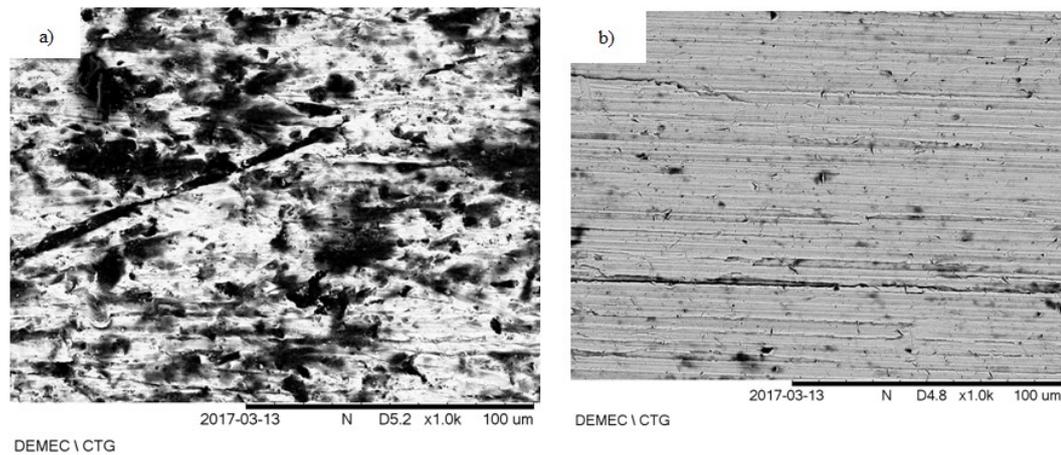
As Figuras 18 e 19 mostram as micrografias do aço AISI D-2 e do aço AISI H-13, respectivamente. No centro das marcas de desgaste o mecanismo predominante é o de microindentação, onde as partículas abrasivas livres realizam impressões na superfície e depois são removidas por outras partículas ou pela interação com a roda de borracha. As várias indentações levam a remoção do material. Na saída da marca de desgaste o mecanismo predominante é o de microcorte e microsulcamento, onde as partículas riscam a superfície.

Figura 18: Aço AISI D-2. (a) Centro da marca; (b) Saída da marca



Fonte: Autoria própria

Figura 19: Aço AISI H-13. (a) Centro da marca; (b) Saída da marca



Fonte: Autoria própria

Os mecanismos de desgaste abrasivo dependem do fluxo do abrasivo, da forma das partículas abrasivas e da carga aplicada. Como nos ensaios dessas amostras foi usada a mesma areia abrasiva e a mesma carga aplicada, não foram observadas grandes diferenças entre os mecanismos de desgaste nos dois tipos de materiais, não tendo tanta relevância a diferença de dureza entre esses materiais.

6 CONCLUSÕES

- Os conhecimentos adquiridos durante o curso de graduação, No estudo da tribologia e no estudo dos modelos de abrasômetros proposto pela norma americana ASTM G65 e por Hutchings e Stevenson foram essências para atingir os objetivos deste trabalho;

- Foi possível acompanhar e participar diretamente de todas as etapas de projeto, fabricação, montagem e de validação de um equipamento de roda de borracha configuração vertical/horizontal;

- A substituição da areia abrasiva AFS 50/70 pela NBR-7214 N° 100 se mostrou equivalente. As análises morfológicas mostraram diferenças entre elas, mas a substituição não causou influência na taxa de desgaste abrasivo;

- A Dureza das amostras é um fator importante para a calibração de um equipamento como este. As amostras do aço AISI H-13 que estavam com o valor de dureza dentro do requerido pela norma, 48 HRC, apresentaram o resultado da taxa de desgaste abrasivo esperado. Já as amostras do aço AISI D-2 só apresentaram o resultado da taxa de desgaste abrasivo dentro da norma para as amostras de maior dureza, no caso, 64 HRC;

- Os resultados da taxa de desgaste abrasivo obtidos no equipamento, na sua configuração vertical, se mostraram satisfatórios em comparação com a norma e com resultados obtidos em outros equipamentos;

- Para a carga aplicada de 130 N, as amostras do aço AISI D-2 e AISI H-13 de maior dureza apresentaram uma menor taxa de desgaste abrasivo que as amostras de menor dureza, como já mostrado pela literatura, sendo que o aço AISI D-2 é mais sensível à variação da dureza;

- Nos ensaios com carga aplicada de 168 N, o aço AISI D-2 também apresentou uma menor taxa de desgaste abrasivo para as amostras de maior dureza. Já no aço AISI H-13, ocorreu o contrário: as amostras de maior dureza se desgastaram mais que as de dureza menor. Como a marca de desgaste dessas amostras não foram analisadas microestruturalmente só podemos inferir que é possível que essas amostras do aço AISI H-13 tenham sofrido um processo de fadiga mais rapidamente devido à dureza elevada, 57 HRC, e a carga elevada, resultando num maior desgaste abrasivo;

- A variação da carga aplicada de 130 N para 168 N resultou no aço AISI D-2 num aumento na taxa de desgaste. No aço AISI H-13 a taxa de desgaste diminuiu com o aumento da carga;

- A variação da vazão da areia abrasiva nos ensaios causou pouca mudança na taxa de desgaste abrasivo. Porém, houve uma diferença no comportamento entre os dois tipos de materiais ensaiados: o aço AISI D-2 apresentou um aumento na taxa de desgaste quando ensaiado com a vazão maior, no aço AISI H-13 a taxa de desgaste diminuiu com o aumento da vazão;

- As análises microestruturais da marca de desgaste deixada nas amostras após o ensaio com carga de 130 N mostraram que o mecanismo de desgaste abrasivo transita de microindentações para o microcorte ou microsulcamento nos dois tipos de aço, já que as amostras foram ensaiadas com a mesma areia abrasiva e a mesma carga aplicada.

REFERÊNCIAS

AMARAL, G. H.; PAIVA, T. S. A. B. **Validação do Equipamento Roda de Borracha no Teste de Desgaste Abrasivo/Areia Seca**. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica-Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2006.

ASTM G65-00. **Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus**. Philadelphia, 2010.

BLAU, P. J.; BUDINSKI, K. G. Development and Use of ASTM Standards for Wear Testing. **Wear**, Oak Ridge, n. 225-229, p.1159-1170, 1999.

BUDINSKI, K. G. Adhesive Transfer to Abrasive Particles in Abrasion Testing. **Wear**, New York, n. 271, p. 1258-1263, 2011.

CORRÊA, E. O. **Avaliação da Resistência ao Desgaste de Ligas Desenvolvidas para Solda de Revestimento Duro para Uso sob Condições Altamente Abrasivas**. 2005. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais)-Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

COSEGLIO, M. S. D. R. **Caracterização de Partículas Abrasivas Segundo Diferentes Modelos de Medição de Fator de Forma**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica-Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009

DALLMANN, J. **Projeto, Construção e Validação de um Abrasômetro Roda de Borracha**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia dos Materiais)-Universidade do Estado de Santa Catarina, Santa Catarina, 2012.

FIGUEIREDO NETO, J. J. de. **Projeto, Fabricação e Validação de um Abrasômetro Roda de Borracha na Configuração Horizontal e Vertical**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

HAWK, J. A.; WILSON, R. D.; TYLCZAK, J. H.; DOGAN, Ö. N. Laboratory Abrasive Wear Tests: Investigation of Test Methods and Alloy Correlation. **Wear**, Albany, n. 225-229, p.1031-1042, 1999.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. London: Arnold, 1992.

MACHADO, J. M. O. **Análise de Falhas em Martelos Oscilantes dos Desfibriladores da Indústria Sucroalcooleira da Região Norte-Nordeste**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

MARTINS, F. S.; SANTOS, M. **Influência do Tamanho do Abrasivo, Dureza da Borracha e Resfriamento do Corpo de Prova no Teste Roda de Borracha Areia Seca Modificado**. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica-Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

OLIVEIRA, C. G.; SILVA, I. P. P. Os Estudos Tribológicos no Ensino de Engenharia Mecânica. **Revista de Ensino de Engenharia**, Minas Gerais, v. 34, n. 2, p. 3-10, 2015.

PINTAÚDE, G. **Análise dos Regimes Moderado e Severo de Desgaste Abrasivo Utilizando Ensaio Instrumentado de Dureza**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

RIBEIRO, R. **Avaliação da Resistência ao Desgaste Abrasivo de Revestimentos Soldados do Tipo Fe-C-Cr Utilizados na Indústria Sucroalcooleira**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

SANTOS, L. A. M.; GOMES, R. E. S.; NOGUEIRA, S. G. S. Tecnologia dos Dutos de Extração de Petróleo. **Bolsista de Valor**, Campos dos Goytacazes, n. 2, p. 239-243, 2012.

SILVA, F. J.; SCANDIAN, C. **Projeto, Construção e Avaliação Operacional de Infraestrutura para o Estudo do Desgaste Abrasivo de um Abrasômetro Roda de Borracha Horizontal**. 2007. Trabalho apresentado ao 62º Congresso Anual da ABM, Vitória, 2007.

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

TOZETTI, K. D. **Efeito da Carga e do Tamanho do Grão Abrasivo no Desgaste do Ferro Fundido Branco 19,9% Cromo e 2,9% Carbono**. 2013. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

VILLABÓN, A.; SINATORA, A. Construção e Instrumentação de Abrasômetro do Tipo Roda-de-Borracha para o Estudo do Comportamento Tribológico de Aços. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões**, São Paulo, n. 13, p. 1-11, 2006.