DEDICATÓRIA

Dedicamos inteiramente este projeto a Deus, que nos deu saúde e serenidade para encarar os desafios e barreiras encontradas durante a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Para a realização deste projeto, não podemos deixar de agradecer a algumas pessoas que sempre nos deram grande apoio.

Aos nossos pais, familiares e amigos, que não mediram esforços para ajudarnos no percorrer dessa jornada.

À fundação CAPES, pelo financiamento das peças em acrílico utilizadas nas melhorias do projeto.

Aos professores da UFES, que nos deram grande incentivo para a concretização do projeto: professor Cherlio Scandian (por ter cedido algumas amostras para realização dos primeiros testes no equipamento), professor Márcio Coelho de Mattos (por ajudar-nos a fazer algumas verificações na célula de carga) e nosso orientador (professor Flávio José da Silva), que nos deu total apoio e incentivo durante o projeto.

Aos engenheiros mecânicos: Ricardo Tottola e Giovane Stelzer pelo projeto e construção; Gustavo Amaral e Thomaz de Paiva pela validação e Felipe Martins e Márcio dos Santos pelas melhorias e últimos testes no abrasômetro roda de borracha horizontal do Laboratório de Tribologia e Corrosão dos Materiais da UFES.

Também não podemos deixar de mencionar o professor Rogério Bolzan do CEFETES, por ter sido gentil, em realizar as retificações em todas as amostras utilizadas nos testes.

RESUMO

Este trabalho se divide basicamente em duas partes.

Na primeira parte são apresentadas as melhorias feitas no abrasômetro roda de borracha horizontal do Laboratório de Tribologia e Corrosão dos Materiais da Universidade Federal do Espírito Santo, e a verificação da estabilidade operacional do equipamento.

A segunda parte consiste na análise do comportamento do coeficiente de atrito variando-se a carga e a velocidade de deslizamento, feita em amostras de aço AISI 1020.

Foi feita também, uma análise do fluxo de abrasivo que passa na interface da amostra, bem como dos efeitos que este causou no coeficiente de atrito. Constatou-se, que estatisticamente não houve uma variação do coeficiente de atrito com a carga. No entanto, o coeficiente de atrito se mostrou bem mais sensível à variação da velocidade de deslizamento. O fluxo de abrasivo também mostrou maior variabilidade com a velocidade de deslizamento. As melhorias realizadas no equipamento garantiram uma maior estabilidade operacional durante os testes de abrasão, havendo um fluxo de abrasivo (que passa na interface da amostra) maior e mais estável.

Palavras chaves: abrasômetro roda de borracha, atrito.

LISTA DE FIGURAS

| Figura 1 - Configurações mecânicas do processo abrasivo: (a) abrasão por |
|---|
| deslizamento e (b) abrasão por rolamento. Adaptado da referência [5]16 |
| Figura 2 - Representação esquemática dos micromecanismos de desgaste |
| propostos por ZUM GAHR [4]17 |
| Figura 3 - (a) Dureza do abrasivo 20% maior que da superfície. (b) Dureza da |
| superfície 20% maior que do abrasivo [5]18 |
| Figura 4 - Desgaste abrasivo em função da relação "dureza da partícula |
| abrasiva/dureza do material desgastado" [4]19 |
| Figura 5 - Efeito da carga normal sobre a perda de massa de materiais |
| ensaiados no abrasômetro roda de borracha [7]21 |
| Figura 6 - Perda da asperidade da partícula abrasiva em percentagem - (a) sob |
| altas cargas; (b) sob baixas cargas [7]22 |
| Figura 7 - (a) Grão antes dos testes; (b) Grão desgastado após uma carga de |
| 25 N; (c) Grão desgastado após uma carga de 150 N. Velocidade de |
| deslizamento = 4 m/s [8]23 |
| Figura 8 - Efeito da velocidade de deslizamento na perda de massa, de ligas |
| ensaiadas no abrasômetro roda de borracha. Adaptado da referência [7]24 |
| Figura 9 - Perda da asperidade da partícula abrasiva em percentagem - (a) sob |
| baixas velocidades; (b) sob altas velocidades. Adaptado da referência [7]25 |
| Figura 10 - Influência do tamanho da partícula abrasiva na perda de massa do |
| alumínio, bronze, cobre e aço. Carga de 2 kg e velocidade de 0,5 m/s [9]27 |
| Figura 11 - Taxa de desgaste em função do tamanho da partícula abrasiva |
| (SiC) para amostras de cobre sobre erosão, abrasão a dois corpos e abrasão a |
| três corpos |
| [10]28 |
| Figura 12 - Efeito da orientação, tamanho, módulo de elasticidade, dureza e |
| fragilidade da segunda fase no desgaste abrasivo [13]29 |
| Figura 13 - Desgaste abrasivo de um ferro fundido branco com 7, 24 e 45% de |
| carbonetos. Taxa de desgaste em função das relações "dureza do |
| abrasivo/dureza do carboneto" e "dureza do abrasivo/dureza do material". |
| Adaptado da referência [4]30 |

| Figura 14 - Representação esquemática dos eventos que resultam no |
|---|
| microtrincamento dos carbonetos [6]31 |
| Figura 15 - Esquema do equipamento descrito pela ASTM G65 [2]33 |
| Figura 16 - Abrasômetro roda de borracha horizontal idealizado por Hutchings e |
| Stevenson. Adaptado da referência [3]34 |
| Figura 17 - Equipamento Roda de Borracha / Areia Seca Modificado do |
| Laboratório de Ciências e Tecnologia dos Materiais da UFES [15]35 |
| Figura 18 - Gráfico de Relação do motor: Freqüência versus Velocidade linear |
| [15]37 |
| Figura 19 - Um dispositivo para medir atrito estático ou inicial. [16]39 |
| Figura 20 - O método do plano inclinado para medir o coeficiente de atrito |
| estático [16]40 |
| Figura 21 - Oito tipos mais comuns de geometrias de teste de atrito. A maioria |
| delas é comercialmente útil. Adaptado da referência [17]41 |
| Figura 22 - Teste pino-lixa com transdutor de força de atrito articulado. |
| Adaptado da referência [16]42 |
| Figura 23 - Abrasômetro tipo roda de borracha, mostrando o sistema de |
| transmissão: A - polia; B - correia; C - eixo; D - conta giro; E - redutor; F - motor |
| [18]43 |
| Figura 24 - Abrasômetro tipo roda de borracha, mostrando na foto o sistema |
| mecânico e instrumentado: A - disco de borracha; B e C - células de carga |
| normal e tangencial; D e E: portas-amostra dos sistemas mecânico e |
| instrumentado; F - Braço para ensaios mecânicos; G - termopar; H - bico |
| alimentador do abrasivo e I - exaustor de poeira [18]43 |
| Figura 25 - Coeficiente de atrito em função da carga aplicada. Tempo de ensaio |
| de 10 min, abrasivos ANB 100 e ANB 50 e aços AISI 1004 e AISI D2 [18]44 |
| Figura 26 - Extensômetro ou Strain-Gage [19]47 |
| Figura 27 - Ponte de Wheatstone [19]48 |
| Figura 28 - Gráfico de deformação x carga, mostrando histerese, repetibilidade |
| e não linearidade [19]48 |
| Figura 29 - Gráfico de deformação x tempo mostrando a fluência ou creep |
| [19]48 |
| Figura 30 - Esquema de montagem da célula para calibração50 |
| Figura 31 - Leitura da célula de carga para um peso de 0,2 kgf ou 2 N51 |

| Figura 32 - Disposição da célula de carga: (a) funcionamento do indicador |
|---|
| digital no modo tração e (b) célula de carga invertida para trabalhar no modo |
| tração51 |
| Figura 33 - Indicador digital da marca Kratos utilizado nos testes52 |
| Figura 34 - Amostra de aço AISI 1020 com dimensões 75 x 25 x 10 mm, |
| devidamente retificada, utilizada nos testes de atrito52 |
| Figura 35 - Alguns dos problemas encontrados antes dos testes: (a) vazamento |
| de areia no tambor rotativo de alimentação de abrasivo e (b) fonte de |
| alimentação do tambor rotativo totalmente aberta55 |
| Figura 36 - Melhorias: (a) silo de armazenamento de abrasivo sem vazamento |
| depois de vedado internamente com durepox; (b) fonte de alimentação do |
| tambor rotativo fixa na mesa, com proteção e abertura para o potenciômetro de |
| controle de rotação; (c) anilhas numeradas (1 a 10) de forma decrescente de |
| acordo com suas respectivas massas e (d) tambor rotativo de alimentação sem |
| vazamentos após vedação com plástico56 |
| Figura 37 - Croquis das peças feitas em acrílico: (a) proteção; (b) caixa; (c) |
| calha e (d) rampa57 |
| Figura 38 - Disposição final das peças em acrílico: (a) calha de alimentação de |
| abrasivo e (b) conjunto (proteção e caixa removíveis, e rampa)57 |
| Figura 39 - Diagrama de forças atuantes no braço e na célula de carga na |
| condição estática, sendo "a" a distância da célula de carga ao centro de massa |
| do braço e "x" a distância da célula de carga em relação à reação normal |
| "N" |
| Figura 40 - Diagrama de forças atuantes no braço e na célula de carga na |
| condição dinâmica59 |
| Figura 41 - Gráfico leitura da célula de carga X peso das anilhas (plotado |
| através da tabela 5) |
| Figura 42 - Taxa de desgaste das três amostras testadas para velocidade de |
| deslizamento de 0,6 m/s, carga normal de 100,56 N e fluxo de abrasivo da |
| calha de 1,6 a 1,8 g/s61 |
| Figura 43 - Comparação da condição de desgaste atual com projetos |
| anteriores62 |

| Figura 44 - Comportamento do coeficiente de atrito com o tempo para uma |
|--|
| carga normal de 5,176 kgf e uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s, |
| durante 10 minutos de teste63 |
| Figura 45 - Resultados do coeficiente de atrito para uma carga normal de 5,176 |
| kgf e velocidade de deslizamento de 0,6 m/s64 |
| Figura 46 - Resultados do coeficiente de atrito para uma carga normal de 6,558 |
| kgf e velocidade de deslizamento de 0,6 m/s65 |
| Figura 47 - Resultados do coeficiente de atrito para uma carga normal de 8,634 |
| kgf e velocidade de deslizamento de 0,6 m/s65 |
| Figura 48 - Resultados do coeficiente de atrito para uma carga normal de |
| 12,095 kgf e velocidade de deslizamento de 0,6 m/s66 |
| Figura 49 - Comportamento do coeficiente de atrito com a variação da carga |
| normal para uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s67 |
| Figura 50 - Comportamento do fluxo de abrasivo médio que passa na interface |
| amostra / roda de borracha com a variação da carga normal para uma |
| velocidade de deslizamento de 0,6 m/s68 |
| Figura 51 - Comportamento do coeficiente de atrito com o fluxo de abrasivo |
| médio que passa na interface amostra / roda de borracha com a variação da |
| carga normal para uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s69 |
| Figura 52 - Comportamento do coeficiente de atrito com o tempo para uma |
| carga normal de 10,056 kgf e uma velocidade de deslizamento de 0,3 m/s, |
| durante 5 minutos de teste70 |
| Figura 53 - Resultados do coeficiente de atrito para uma carga normal de |
| 10,056 kgf e velocidade de deslizamento de 0,3 m/s71 |
| Figura 54 - Resultados do coeficiente de atrito para uma carga normal de |
| 10,056 kgf e velocidade de deslizamento de 0,6 m/s72 |
| Figura 55 - Resultados do coeficiente de atrito para uma carga normal de |
| 10,056 kgf e velocidade de deslizamento de 0,9 m/s72 |
| Figura 56 - Resultados do coeficiente de atrito para uma carga normal de |
| 10,056 kgf e velocidade de deslizamento de 1,2 m/s73 |
| Figura 57 - Comportamento do coeficiente de atrito com a variação da |
| velocidade de deslizamento para uma carga normal de 10,056 kgf74 |

| Figura 58 - Comportamento do fluxo de abrasivo médio que passa na interface |
|--|
| amostra / roda de borracha com a variação da velocidade de deslizamento para |
| uma carga normal de 10,056 kgf75 |
| Figura 59 - Comportamento do coeficiente de atrito com o fluxo de abrasivo |
| médio que passa na interface amostra / roda de borracha com a variação da |
| velocidade de deslizamento para uma carga normal de 10,056 kgf76 |
| Figura 60 - Marcas de desgaste nas amostras após os testes de atrito com a |
| variação da carga normal77 |
| Figura 61 - Marcas de desgaste nas amostras após os testes de atrito com a |
| variação da velocidade de deslizamento78 |

LISTA DE TABELAS

| Tabela 1 - Composição dos materiais ensaiados [/] | 20 |
|--|----|
| Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos materiais [7]2 | 20 |
| Tabela 3 - Massa das anilhas3 | 37 |
| Tabela 4 - Comparação de resultados de coeficiente de atrito de Hutchings e | |
| Stevenson [3] com Villabón e Sinatora [18]2 | 15 |
| Tabela 5 - Valores aferidos, com seus respectivos erros, variando-se o númer | 0 |
| de anilhas colocadas sobre a célula de carga: ao se acrescentar e ao se retira | ır |
| as anilhas. O erro foi considerado a diferença entre a leitura da célula e o pes | 0 |
| das anilhas dividido pela leitura da célula6 | 60 |

LISTA DE SÍMBOLOS

- Ha dureza da partícula abrasiva
- H_s dureza da superfície
- f fator de esfericidade
- A área da projeção bidimensional da partícula
- p perímetro da projeção bidimensional da partícula
- T tamanho dos carbonetos
- D distância livre média entre carbonetos
- V velocidade de deslizamento
- d diâmetro da roda de borracha
- n rotação da roda de borracha
- μ coeficiente de atrito
- F força para deslizar
- W força pressionando dois corpos sólidos juntos
- N força normal segurando duas superfícies juntas
- P carga aplicada
- μ_s coeficiente de atrito estático
- μ_k coeficiente de atrito cinético
- P_s, F_s carga estática aplicada
- P_k, F_k carga final aplicada
- α ângulo de inclinação do plano
- F₁ reação normal na célula de carga
- F₂ reação tangencial na célula de carga
- N₁ reação normal na roda de borracha
- W₁ carga normal aplicada no braço
- a distância da célula de carga ao centro de massa do braço
- x distância da célula de carga em relação à reação normal N₁
- F_{at} força de atrito entre a amostra e a roda de borracha

SUMÁRIO

| DE | EDICATO | ORIA | | | 1 |
|-----|---------|--------------|-----------|---|----|
| AC | RADEC | CIMENTO | os | | 2 |
| RE | SUMO. | | | | 3 |
| LIS | STA DE | FIGURA | \S | | 4 |
| LIS | STA DE | TABEL | AS | | 9 |
| LIS | STA DE | SÍMBOL | _os | | 10 |
| SL | JMÁRIO | | | | 11 |
| 1 | INTRO | DUÇÃO | | | 13 |
| 2 | OBJE1 | ΓΙVΟ | | | 14 |
| 3 | REVIS | ÃO BIBI | _IOGRÁF | FICA | 15 |
| | 3.1 | DESG | ASTE AE | BRASIVO | 15 |
| | | 3.1.1 | Definiç | ão | 15 |
| | | 3.1.2 | Mecani | smos de desgaste | 16 |
| | | 3.1.3 | Regime | e de desgaste abrasivo | 18 |
| | | 3.1.4 | Variáve | eis que podem influenciar na taxa de desgaste | 20 |
| | | | 3.1.4.1 | Efeito da carga | 20 |
| | | | 3.1.4.2 | Efeito da velocidade | 24 |
| | | | 3.1.4.3 | Efeito da forma e do tamanho do abrasivo | 26 |
| | | | 3.1.4.4 | Efeito da microestrutura sobre o desgaste | |
| | | | | abrasivo | 28 |
| | 3.2 | | | O RODA DE BORRACHA | |
| | 3.3 | ATRIT | O | | 38 |
| | | 3.3.1 | | ção | |
| | | | | o do atrito | |
| | 3.4 | CÉLUI | | CARGA | |
| | | 3.4.1 | Introdu | ção | 46 |
| | | 3.4.2 | • | ios de funcionamento | |
| 4 | | | | | 49 |
| | 4.1 | | | DA ESTABILIDADE OPERACIONAL DO | |
| | | EQUIP | AMENTO |) | 49 |

| | 4.2 | AVALI | AÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DO COEFICIENTI | E DE |
|---|-------|---------|---|----------|
| | | ATRITO | D | 50 |
| | | 4.2.1 | Análise das forças atuantes no equipamento | 50 |
| | | 4.2.2 | Calibração da célula de carga | 50 |
| | 4.3 | PROCE | EDIMENTO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DO | |
| | | ATRITO | D | 52 |
| 5 | RESUL | TADOS | E DISCUSSÕES | 54 |
| | 5.1 | MELHO | DRIAS REALIZADAS NO ABRASÔMETRO RODA DE | : |
| | | BORRA | ACHA HORIZONTAL DA UFES | 54 |
| | | 5.1.1 | Principais problemas constatados | 54 |
| | | 5.1.2 | Resultados após as melhorias | 55 |
| | 5.2 | AVALI | AÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ATRITO | 58 |
| | | 5.2.1 | Diagrama de forças atuantes no braço do abrasômetro | ro e |
| | | | na célula de carga | 58 |
| | | 5.2.2 | Avaliação da calibração da célula de carga | 60 |
| | 5.3 | VERIF | CAÇÃO DA ESTABILIDADE OPERACIONAL DO | |
| | | EQUIP/ | AMENTO | 61 |
| | 5.4 | ANÁLI | SE DO COEFICIENTE DE ATRITO COM A VARIAÇÃ | O DA |
| | | CARGA | NORMAL | 63 |
| | 5.5 | ANÁLI | SE DO COEFICIENTE DE ATRITO COM A VARIAÇÃ | O DA |
| | | VELOC | CIDADE DE DESLIZAMENTO | 70 |
| | 5.6 | MARC | AS DE DESGASTE NAS AMOSTRAS TESTADAS | 77 |
| 6 | CONC | LUSÕES | 3 | 79 |
| 7 | SUGES | STÕES F | PARA TRABALHOS FUTUROS | 80 |
| 8 | REFER | RÊNCIAS | BIBLIOGRÁFICAS | 81 |

1 INTRODUÇÃO

O desgaste de materiais é um dos graves problemas enfrentados pela indústria em quase todos os seus setores. O processo de desgaste, de maneira geral, pode ser subdividido em diversas categorias, dentre elas: abrasivo, erosivo, corrosivo, fadiga de contato, adesivo, etc. Dentre essas, a que se destaca como sendo a mais importante é o desgaste abrasivo, pois possui maior poder de destruição e também por ser o de ocorrência mais freqüente. Estudos revelam que esse mecanismo é responsável por 50% das falhas por desgaste, seguido do desgaste adesivo 15% e do erosivo 8% [1].

Devido a isso, as indústrias perceberam que era necessário investir parte do orçamento em estudos e pesquisas sobre o desgaste abrasivo, assim poderiam selecionar o material mais adequado a resistir a determinado tipo de desgaste, economizando vultosas quantias.

Para se realizar essa pesquisa, e esses estudos, houve a necessidade de se normatizar alguns testes, em especial, o objeto de estudo deste trabalho o abrasômetro roda de borracha, que é regulamentado pela norma ASTM G 65 [2].

O abrasômetro roda de borracha horizontal proposto por Hutchings e Stevenson [3], permite quantificar a quantidade de areia que passa pela amostra, o que facilita na caracterização do fluxo de abrasivo. A análise do coeficiente de atrito é outro fator importante para caracterização do sistema tribológico. Este equipamento nos permite quantificar a força de atrito, que nos fornecerá o coeficiente de atrito. A análise de todas as variáveis que possam influenciar no coeficiente de atrito dinâmico, é de considerável importância para uma melhor caracterização do sistema. Este projeto fará a análise do efeito da carga normal e da velocidade deslizamento.

Neste trabalho será abordada, no capítulo 3, uma revisão bibliográfica sobre desgaste abrasivo, atrito e equipamentos utilizados para testes de desgaste e atrito. Depois, falaremos de todos os procedimentos realizados, incluindo melhorias no equipamento e testes. Finalmente no capitulo 5 discutiremos todos os resultados encontrados.

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo: avaliar a influência da carga normal e da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito para o aço AISI 1020 em testes no abrasômetro roda de borracha horizontal do Laboratório de Tribologia e Corrosão dos Materiais da Universidade Federal do Espírito Santo, bem como realizar melhorias no equipamento a fim de garantir a sua estabilidade operacional para futuros testes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este trabalho faz uma revisão bibliográfica extensa sobre o desgaste abrasivo, apesar de não ser o foco de estudo deste projeto. No entanto, devido a sua importância, foi necessário um maior aprofundamento sobre o assunto para entender, também, o comportamento do atrito nos testes realizados.

3.1 DESGASTE ABRASIVO

3.1.1 Definição

A Tribologia é a ciência e tecnologia que estuda os fenômenos que ocorrem na interface de superfícies em movimento relativo, sendo responsável pelo estudo do desgaste, do atrito e da lubrificação.

Segundo o comitê da O.E.C.D, ("Organization for Economic Cooperation and Development of C.E.E - Zum Gahr) [4], o desgaste abrasivo é definido como sendo "a perda de matéria devido ao movimento relativo de duas superfícies decorrente de: asperidades duras em uma das superfícies ou partículas abrasivas livres entre as duas superfícies ou então partículas abrasivas engastadas em uma das superfícies".

O óxido de silício, (SiO₂), sendo formado por um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre o silício (Si), é um dos principais agentes causadores desse tipo de desgaste e tem uma dureza muito superior que a maioria dos aços, o que se torna um grave problema. Exceto em aplicações como a usinagem, o desgaste abrasivo é sempre evitado.

Esse tipo de desgaste pode ser tanto por corte, por deformação plástica (por formação de sulcos), quanto por fratura frágil (por formação de trincas e lascamento).

3.1.2 Mecanismos de desgaste

Devido à complexidade do fenômeno, há muitas controvérsias acerca da classificação dos mecanismos de desgaste abrasivo. A classificação adotada neste trabalho sugerida por Hutchings [5], refere-se à ocorrência de desgaste devido a dois princípios básicos: abrasão por rolamento e abrasão por deslizamento das partículas (figura1).

O desgaste abrasivo por deslizamento é produzido quando ocorre movimento relativo de partículas fixas embebidas no contra-corpo ou asperidades duras entre as superfícies (figura 1 - a). A abrasão por rolamento caracteriza-se pela ocorrência de movimento relativo de abrasivos livres entre o corpo e o contra-corpo (figura 1 - b). Normalmente, o desgaste abrasivo por rolamento é cerca de uma a duas ordens de grandeza menor que o desgaste por deslizamento.

No desgaste abrasivo por rolamento, somente uma porção dos abrasivos tomam parte do processo do desgaste efetivo, já que há uma mudança constante do ângulo de ataque e as partículas livres e de tamanho reduzido pouco participam do processo.

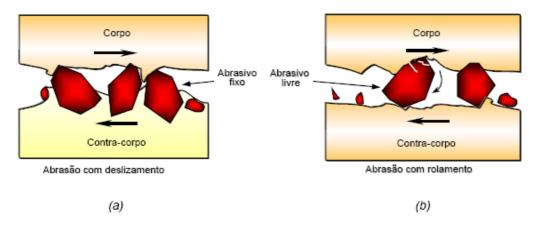


Figura 1 - Configurações mecânicas do processo abrasivo: (a) abrasão por deslizamento e (b) abrasão por rolamento. Adaptado da referência [5].

Zum Gahr [4] definiu que durante a movimentação das partículas abrasivas ocorrem tensões junto à região de contato que provocam deformações no material que podem resultar nos seguintes micromecanismos (figura 2):

Microsulcamento: O material é afastado da superfície se deformando plasticamente, sem que ocorra a perda de material gerando sulcos com acúmulos laterais, é característico em materiais dúcteis.

Microcorte: Ocorre perda de material em forma de debris (microcavacos), quando se há uma perda total de material de volume igual ao sulco formado pela passagem da partícula ocorre um microcorte perfeito.

Microlascamento: Surge quando as tensões impostas à superfície do material superam as tensões críticas para a formação de trincas e a propagação das mesmas, ocorrem maiores perdas de materiais. Esse tipo de mecanismo é restrito a materiais frágeis.

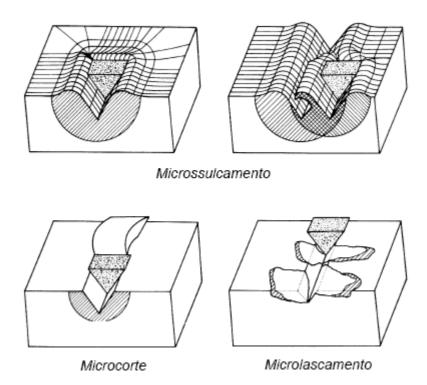


Figura 2 - Representação esquemática dos micromecanismos de desgaste propostos por ZUM GAHR [4].

3.1.3 Regime de desgaste abrasivo

Uma maneira usual de definir o regime de desgaste é através da relação H_a/H_s , onde H_a é a dureza do abrasivo e H_s é a dureza do material. Uma partícula esférica, pressionada contra uma superfície plana, causará uma deformação plástica se a dureza da superfície H_s for aproximadamente 0,8 H_a [5]. A figura 3 (a) mostra o caso quando a partícula causa a deformação, e a figura 3 (b) quando é deformada. Foi definido experimentalmente que um desgaste moderado ocorre quando o abrasivo tende a se deformar, ou seja, $H_a/H_s < 1$. Quando $H_a/H_s > 1,2$ a superfície se deforma e o desgaste é considerado severo. A transição entre desgaste suave e severo é considerado quando $1,0 > H_a/H_s > 1,2$ [4]. A figura 4 ilustra graficamente esta transição.

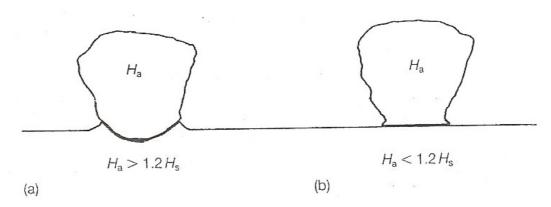


Figura 3 - (a) Dureza do abrasivo 20% maior que da superfície. (b) Dureza da superfície 20% maior que do abrasivo [5].

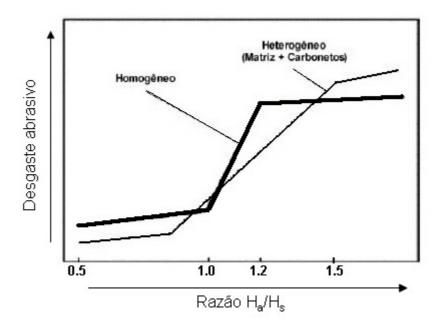


Figura 4 - Desgaste abrasivo em função da relação "dureza da partícula abrasiva/dureza do material desgastado" [4].

Pintaúde et al. [6] afirmaram que a severidade do sistema não depende somente da relação H_a/H_s, mas é função de um conjunto de parâmetros, tais como a angularidade e o tamanho das partículas abrasivas. Segundo estes autores, altos valores para a relação H_a/H_s são necessários, mas não são suficientes para garantir corte e conseqüentemente altas taxas de desgaste. É preciso haver junção entre a ocorrência de altos valores de H_a/H_s e a evidência de corte na superfície desgastada para caracterizar o sistema como severo. Para baixos valores de H_a/H_s as taxas de desgastes são baixas mesmo com a presença de microtrincas. Deste modo, apesar da importância da definição de um valor para a relação H_a/H_s para determinação da severidade do desgaste, só este valor não basta, é preciso analisar também o mecanismo de desgaste que operou na superfície.

3.1.4 Variáveis que podem influenciar na taxa de desgaste

3.1.4.1 Efeito da carga

Elalem e Li [7] analisaram o efeito da carga na taxa de desgaste em diferentes materiais com propriedades distintas. Para esta análise realizada em; cobre (Cu 110), liga de alumínio (Al 6061), liga de aço inox (17-4 Ph), e em aço ferramenta (D2). A composição e as propriedades mecânicas desses materiais são fornecidas pela tabela 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 - Composição dos materiais ensaiados [7].

| Material | Composição |
|----------|-----------------------------------|
| A1 6061 | 0.3%Cu-0.6%Si-0.7%Fe-0.15%Mn-1.0% |
| | Mg-0.25%Zn-0.2%Cr-0.15%Ti-A1 |
| Cu 110 | 99.9%Cu + 0.04%O + impurity |
| 17-4Ph | 16%Cr-4.1%Ni-3.4%Cu-0.25Nb-Fe |
| D2 | 12%Cr-1%Mo-1%V-1.5%C-Fe |

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos materiais [7].

| E (GPa) | σ _y (MPa) | σ _T (MPa) | ε _f (%) | Dureza (HRC) |
|------------|----------------------------------|---|--|--|
| 66 | 300 | 349 | 15 | 21 |
| 107 | 340 | 379 | 17 | - |
| 201 | 1273 | 1375 | 14 | 46 |
| 211 | 1772 | 1976 | 3.5 | 56 |
| 73 | 110 | - | _ | 62 |
| | (GPa) 66 107 201 211 | (GPa) (MPa) 66 300 107 340 201 1273 211 1772 | (GPa) (MPa) (MPa) 66 300 349 107 340 379 201 1273 1375 211 1772 1976 | (GPa) (MPa) (MPa) (%) 66 300 349 15 107 340 379 17 201 1273 1375 14 211 1772 1976 3.5 |

A figura 5 ilustra os resultados feitos no abrasômetro roda de borracha com areia (SiO₂). Graficamente é mostrado que a liga de alumínio (Al 6061) tem menor resistência a abrasão, seguida pelo cobre (Cu 110), aço inox (17-4 Ph), e o aço ferramenta (D2) com a maior resistência. Nestes resultados é demonstrado que a perda de volume aumenta com a carga aplicada. No entanto, essa situação muda quando o material tem uma alta dureza, como no caso, do aço ferramenta (D2), em que é possível perceber pela figura 5, que inicialmente ocorre o aumento da perda de volume com a carga e posteriormente essa situação se inverte havendo uma decrescente perda de volume com o aumento da carga.

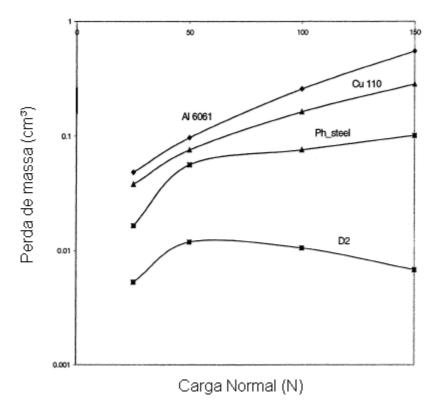


Figura 5 - Efeito da carga normal sobre a perda de massa de materiais ensaiados no abrasômetro roda de borracha [7].

Segundo Elalem e Li [7], esse comportamento do aço ferramenta (D2), pode ser explicado pela análise do abrasivo (SiO₂), antes e depois da realização dos testes. A figura 6 fornece o percentual de partículas avariadas, em que o dano é analisado pela perda de angulosidade da partícula, em condição de alta e baixa carga. Fica demonstrado que, quanto maior a dureza do material, maior será a avaria da partícula, ou seja, ela se torna mais "polida" e perde seu poder abrasivo.

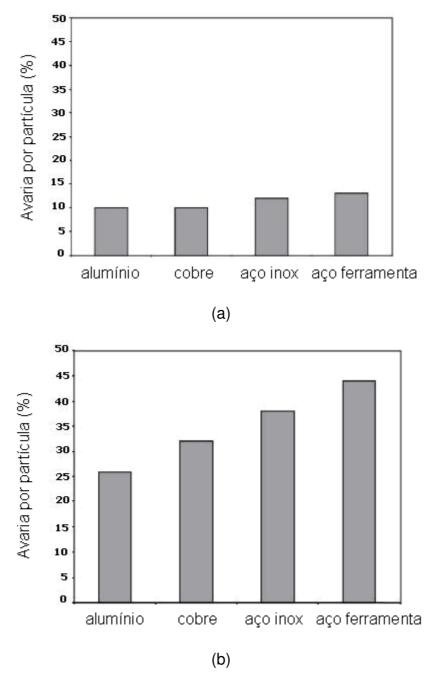


Figura 6 - Perda da angulosidade da partícula abrasiva em percentagem - (a) sob baixas cargas; (b) sob altas cargas [7].

Assim, como ocorreu com o aço ferramenta (D2), sob altas cargas o dano sobre a partícula de areia foi suficiente para que ela perdesse seu poder abrasivo. Através da análise da superfície no MEV (figura 7) fica evidenciada essa avaria na partícula.

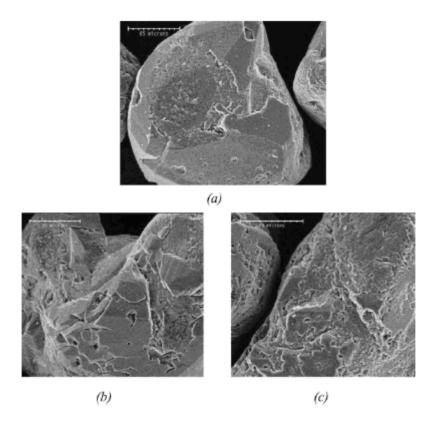


Figura 7 - (a) Grão antes dos testes; (b) Grão desgastado após uma carga de 25 N; (c) Grão desgastado após uma carga de 150 N. Velocidade de deslizamento = 4 m/s [8].

Para materiais com a dureza próxima a da areia (SiO₂), como o aço ferramenta, sob a aplicação de altas cargas, ocorre uma severa degradação na superfície da partícula quebrando as asperidades da mesma, e conseqüentemente tornando-a menos abrasiva. Em materiais com menor dureza como o cobre (Cu 110), e o alumínio (Al 6061), os danos causados na partícula são bem menores. Esse decréscimo da perda de material ocorre devido à perda de angularidade da partícula.

3.1.4.2 Efeito da velocidade

Os efeitos da velocidade também foram estudados por Elalem e Li [7] para essas mesmas ligas, o cobre (Cu 110), uma liga de alumínio (Al 6061), uma liga de aço inox (17-4 Ph), e um aço ferramenta (D2). Todas as variáveis foram mantidas constantes e só variou-se apenas a velocidade.

Nesse experimento não foram notadas mudanças significativas da taxa de desgaste com a velocidade nas ligas de alumínio, cobre e aço inox. No entanto, a liga de aço ferramenta apresentou um decrescimento na perda de massa com a velocidade. A velocidade de deslizamento foi variada de 1 a 5 m/s, sob uma carga constante de 100 N, esses efeitos do teste podem ser observados graficamente na figura 8.

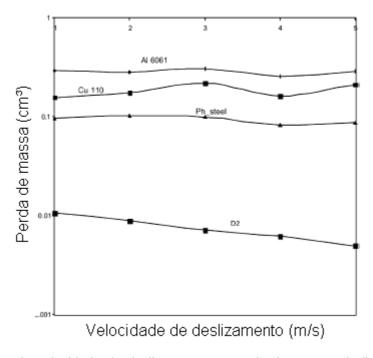


Figura 8 - Efeito da velocidade de deslizamento na perda de massa, de ligas ensaiadas no abrasômetro roda de borracha. Adaptado da referência [7].

Foram também analisadas, as avarias causadas nas partículas abrasivas, como a perda da sua angulosidade, assim como foi feito no efeito da carga. Na figura 9, podem ser vistos esse efeitos. Sob altas velocidades, observa-se uma maior avaria no grão abrasivo ocorrida no ensaio do aço ferramenta (D2), isso ocorre porque o grão de SiO₂, que é frágil, não suporta o impacto a altas

velocidades contra a superfície dura do aço, o mesmo não ocorre com as outras ligas. Então, o abrasivo acaba se tornando menos "agressivo", contra a superfície e ocorre uma diminuição da perda de massa.

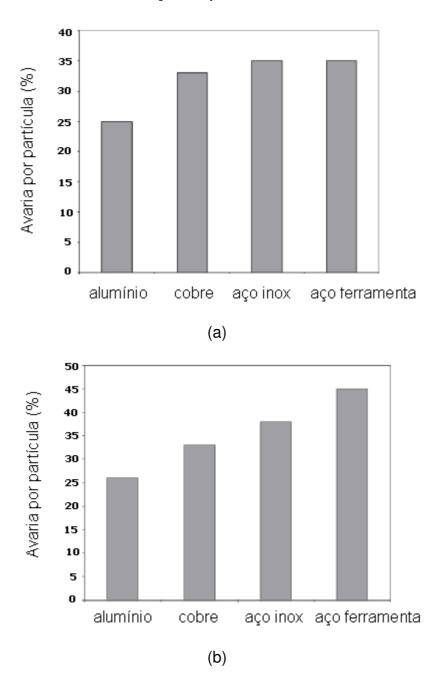


Figura 9 - Perda da asperidade da partícula abrasiva em percentagem - (a) sob baixas velocidades; (b) sob altas velocidades. Adaptado da referência [7].

3.1.4.3 Efeito da forma e do tamanho do abrasivo

As partículas abrasivas apresentam variações na sua angulosidade dependendo da sua origem mineralógica. As razões de desgaste dependem fortemente da forma da partícula, uma partícula mais angulosa causará um desgaste maior do que partículas arredondadas.

É difícil de definir a angulosidade, as partículas podem se apresentar de uma forma mais arredondada ou mais angulosa, com mais pontas e asperezas. Essas diferenças de formas podem provocar resultados diferentes na taxa de desgaste que podem chegar a um fator até maior que 10. Uma forma simples de se mensurar essa forma é através da relação entre área e perímetro, da projeção bidimensional da partícula. Essa relação nos fornece o fator de "esfericidade" f [5].

$$f = \frac{4 \pi A}{p^2}$$

Onde A é a área e p é o perímetro da projeção bidimensional da partícula.

Quanto mais próximo de um, o fator, mais arredondada será essa partícula.

Nos testes de abrasão feitos no abrasômetro tipo roda de borracha essa areia é normatizada pela norma ASTM – G65 [2].

O tamanho do abrasivo é outro fator que pode influenciar bastante no desgaste. Ramos e outros [9] realizaram ensaios abrasivos a dois a corpos em quatro materiais com partículas abrasivas variando entre 35 e 710 μm. Conforme apresentado na figura 10, o tamanho da partícula abrasiva tem grande influência no volume de desgaste quando menor que 100 μm, acima deste tamanho o volume de desgaste passa a ser praticamente constante. Este resultado foi observado para o bronze, o cobre e o aço. Para o aço a afirmação desta tendência a estabilização acima de um tamanho critico de granulometria abrasiva é duvidosa, pois há somente um ponto abaixo de 100 μm e este apresenta um volume de desgaste muito próxima ao primeiro ponto acima de 100 μm. Como o ponto para o desgaste zero "não existe" porque é um ponto

"sem desgaste" e "sem granulometria do abrasivo", a parte da curva entre zero e o primeiro ponto não deve ser considerada para afirmar essa tendência.

Misra e Finnie [10] confirmaram os resultados apresentados por Ramos e outros [9] para o cobre, conforme apresentado na figura 11. Misra e Finnie [10] verificaram que a tendência ao desgaste atingir uma taxa de desgaste praticamente constante é valida também para ensaios de abrasão a três corpos e erosão.

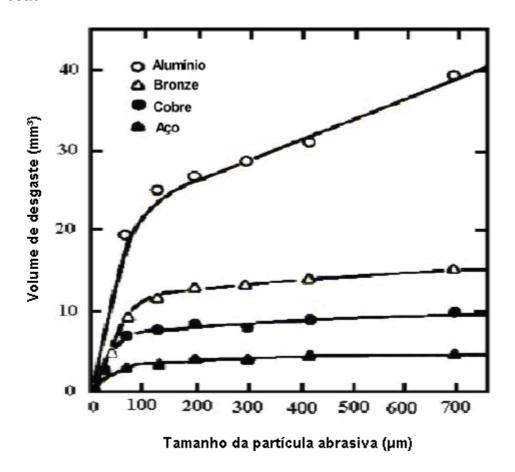


Figura 10 - Influência do tamanho da partícula abrasiva na perda de massa do alumínio, bronze, cobre e aço. Carga de 2 kg e velocidade de 0,5 m/s [9].

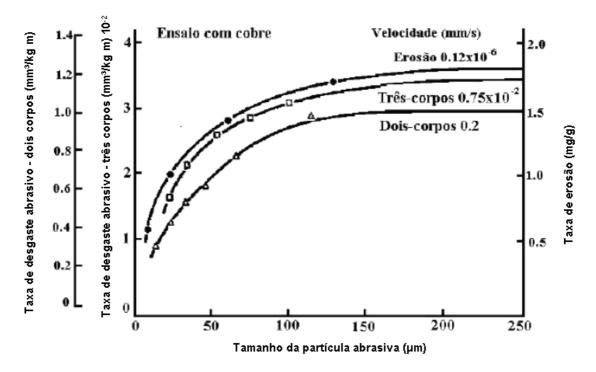


Figura 11 - Taxa de desgaste em função do tamanho da partícula abrasiva (SiC) para amostras de cobre sobre erosão, abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos [10].

3.1.4.4 Efeito da microestrutura sobre o desgaste abrasivo

Os parâmetros metalúrgicos mais importantes para aços sujeitos a desgaste abrasivo são os parâmetros microestruturais, como o tipo de matriz e fases dispersas a dureza a temperatura de trabalho e a quantidade de elementos intersticiais (%C e/ou %N) presentes [11].

Zum Gahr [4] apresenta um modelo simplificado de como atuam a orientação, tamanho, módulo de elasticidade, dureza e fragilidade de partículas de reforço em metais e polímeros em relação à perda de massa durante o desgaste abrasivo, (figura 12). Tylczak [12] apresenta o modelo de Zum Gahr [4] como o efeito de uma segunda fase qualquer presente numa metálica.

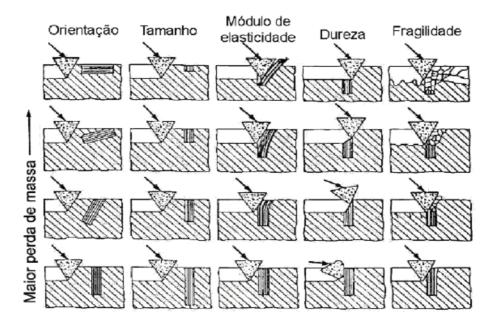


Figura 12 - Efeito da orientação, tamanho, módulo de elasticidade, dureza e fragilidade da segunda fase no desgaste abrasivo [13].

Do modelo apresentado na figura 12, verifica-se que se o carboneto estiver paralelo a superfície será mais facilmente removido do que se estiver perpendicular a ela. Além disso, se o carboneto for menor que a profundidade atingida pela partícula abrasiva ele não trará benefícios para a resistência ao desgaste do material. Como os carbonetos têm módulo de elasticidade alto, uma matriz com baixo módulo de elasticidade tenderá quebrar a ligação na interface matriz/carboneto e assim o carboneto será arrancado. Se a dureza do carboneto for maior que a dureza da matriz, o carboneto pode proteger a matriz contra o desgaste. E por fim, se o carboneto for muito frágil ele tende a trincar e formar cavacos, os quais podem atuar como partículas abrasivas.

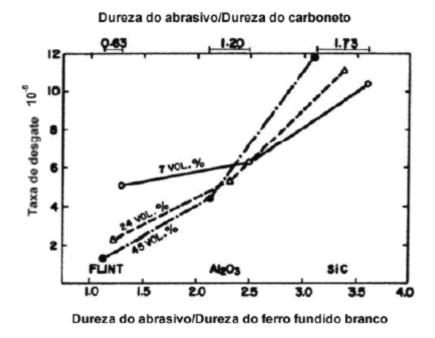


Figura 13 - Desgaste abrasivo de um ferro fundido branco com 7, 24 e 45% de carbonetos. Taxa de desgaste em função das relações "dureza do abrasivo/dureza do carboneto" e "dureza do abrasivo/dureza do material". Adaptado da referência [4].

A literatura tem mostrado que, independentemente da liga considerada, para abrasivos com dureza superior à da matriz e inferior a dos carbonetos, o aumento da fração volumétrica dos carbonetos promove um aumento da resistência ao desgaste [4], como observado na figura 13. Além disso, é possível observar que o aumento da relação T/D (T é o tamanho do carboneto e D é a distância livre média entre carbonetos) também promove aumento da resistência ao desgaste abrasivo.

A contribuição de partículas de segunda fase dura e frágeis para aumentar a resistência à abrasão depende também da deformação plástica da matriz. Para situações, onde a dureza do abrasivo é maior que a dureza da matriz e ao mesmo tempo a ductilidade da matriz é limitada, o mecanismo de corte é favorecido. Assim, surge a possibilidade de uma seqüência de eventos que conduzem ao microtrincamento dos carbonetos, devido à falta de suporte mecânico da matriz [6]. A figura 14 apresenta uma ilustração esquemática desta seqüência de eventos que resultam no microtrincamento dos carbonetos.

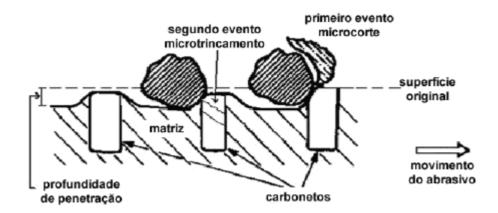


Figura 14 - Representação esquemática dos eventos que resultam no microtrincamento dos carbonetos [6].

3.2 ABRASÔMETRO RODA DE BORRACHA

O abrasômetro tipo roda de borracha, que é um equipamento para a realização de testes de abrasão, é normatizado pela norma ASTM G 65 [2] (ilustrado na figura 15) para testes de desgaste abrasivo. O teste de roda de borracha/areia seca envolve a abrasão do corpo de prova com areia de tamanho e composição controlada. De acordo com a norma ASTM G 65 [2], a areia adotada é a de Ottawa, no entanto, há outros tipos de areia que são aceitos pela norma, por terem características mineralógicas semelhantes. O abrasivo é introduzido entre a interface do corpo de prova e da roda giratória com um fluxo total que pode variar de 300 a 400 g/min. Essa roda é revestida com uma borda de borracha de clorobutil, cujo valor ótimo para a dureza da borracha deve ser de 60 Shore A, porém uma faixa entre A58 e A62 é aceitável. O corpo de prova é pressionado contra a roda giratória com uma força específica por um braço de carga, enquanto um fluxo controlado de areia atrita a superfície da amostra. A face de contato da roda gira na direção do fluxo de areia. O pivô axial do braço apóia se dentro de um plano o qual é aproximadamente tangente à superfície da roda de borracha e normal ao longo do diâmetro vertical no qual a carga é aplicada. A duração do teste e a força aplicada pelo braço são variáveis conforme procedimento especificado [2]. Os corpos de provas são pesados antes e depois dos testes e a perda de massa é registrada.

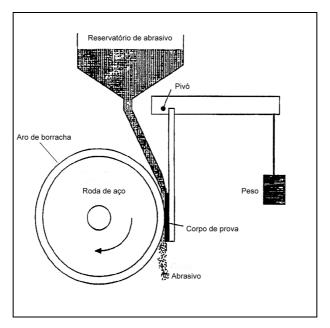


Figura 15 – Esquema do equipamento descrito pela ASTM G65 [2].

Hutchings e Stevenson [3] implementaram algumas modificações nesse aparelho (figura 16). Por exemplo, o corpo de prova é disposto horizontalmente e uma célula de carga é colocada para medir a força de atrito dinâmica sobre o corpo de prova. Essa força de atrito em particular será estudada mais detalhadamente neste trabalho. A amostra é colocada em um aparato fixado no braço de carga, e a carga normal é aplicada sobre ele pelo contato com uma esfera fixa que pressiona de encontro com a sua superfície superior. A principal vantagem sobre o equipamento original é que se pode quantificar a quantidade de abrasivo que realmente passa entre o corpo de prova e a roda de borracha.

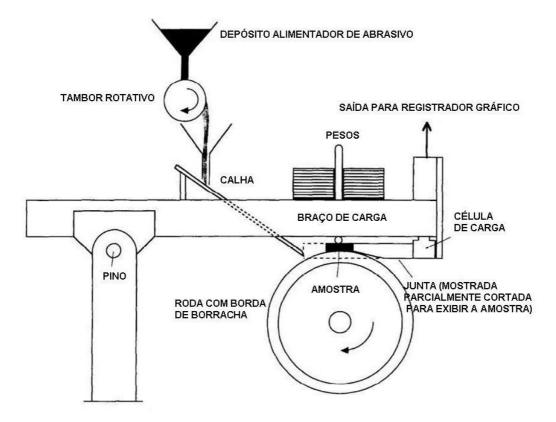


Figura 16. Abrasômetro roda de borracha horizontal idealizado por Hutchings e Stevenson. Adaptado da referência [3].

Tottola [13] iniciou o projeto de um equipamento semelhante ao desenvolvido por Hutchings e Stevenson [3], mais tarde Stelzer [1] concluiu o projeto do abrasômetro, e a avaliação e validação do aparelho foram realizadas por Amaral e de Paiva [15] no Laboratório de Tribologia e Corrosão dos Materiais da Universidade Federal do Espírito Santo.

Na figura 17 é mostrado o abrasômetro que foi construído por Tottola [13] e Stelzer [1].

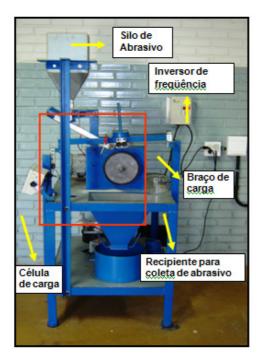




Figura 17 - Equipamento Roda de Borracha / Areia Seca Modificado do Laboratório de Tribologia e Corrosão dos Materiais da UFES [15].

O equipamento é composto pelos seguintes itens:

- Um motor com relação de 10/1, equipado com um controlador de frequência Weg CFW 07;
- Um cilindro de alimentação de abrasivo é controlado por um motor variável de velocidade com rotação máxima de 23 RPM;
- Uma rampa de alimentação de abrasivo;
- Um silo de abrasivos;
- Uma roda de aço com borda de borracha de clorobutil de dureza 60 ± 2
 Shore A, diâmetro de 228,22 mm, espessura de 12,7 mm e perímetro de 717 mm.

Amaral e de Paiva [15] analisaram o efeito da carga e da velocidade para o desgaste abrasivo no equipamento construído, a seguir tem a forma como foi determinada a velocidade de deslizamento. As velocidades (0,3; 0,6; 0,9 e 1,2 m/s) foram utilizadas no projeto de Amaral e de Paiva [15] e serão utilizadas neste trabalho para verificação do comportamento do coeficiente de atrito.

Determinação da velocidade de deslizamento

A variação da rotação da roda foi obtida com a variação da frequência ajustada no inversor de frequência. O cálculo da velocidade de deslizamento foi feita pela equação 1.

$$V = \underline{\pi \cdot d. \, n},$$
 (1)

Onde, V é a velocidade [m/s], d é o diâmetro da roda [mm] e n é a rotação da roda [RPM].

Variando a freqüência de 10 a 50 Hz, com incrementos de 10 Hz obteve-se uma relação linear entre a freqüência e a velocidade de deslizamento. O gráfico da figura 18 apresenta esta relação e a equação utilizada para o cálculo da obtenção das velocidades de 0,3; 0,6; 0,9 e 1.2 m/s com as freqüências de 8,5; 16,7; 25,5 e 33,3 Hz respectivamente [15].

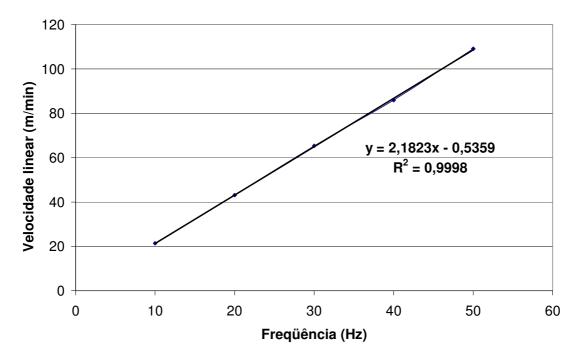


Figura 18 - Gráfico de Relação do motor: Freqüência versus Velocidade linear [15].

Variação da carga normal

A variação da carga normal é feita pelas anilhas que são colocadas no braço articulado.

Na tabela 3, são apresentadas as anilhas enumeradas com suas respectivas massas.

Número da Anilha Massa (kg) 1 4,737 2 2,024 3 1,962 4 1,499 1,157 5 6 0,919 0,775 7 0,607 9 0,471 10 0,305

4,4

Braço Articulado

Tabela 3 - Massa das anilhas.

3.3 ATRITO

3.3.1 Introdução

Atrito é a resistência ao deslizamento de um corpo sólido sobre ou ao longo de outro, assim como corpos sólidos são geralmente entendidos no mundo macroscópico. Um alto atrito é desejável entre pneus e estradas (o coeficiente, nesse caso, varia de 0,5 e 1,2 aproximadamente), entre partes mecânicas aparafusadas e em incontáveis outros exemplos. Já um baixo atrito é desejável entre partes deslizantes, em sistemas de disco rígido de um computador, em motores, em fechos de portas e muitos outros dispositivos mecânicos.

A magnitude ou "nível" de atrito é muitas vezes expresso em termos de um coeficiente de atrito, μ , que é a força tangencial, F, para deslizar, dividida pela força ou carga, W, pressionando os dois corpos sólidos juntos, μ = F/W.

Expressar o atrito em termos de um "coeficiente" é uma prática que nos dá uma idéia errada, sugerindo possivelmente que o "coeficiente" é uma propriedade intrínseca dos materiais, e que a força de atrito é sempre proporcional a carga aplicada. Isso pode ser verdade para uma estreita faixa de cargas aplicadas, mas geralmente não é verdade.

Os valores mais publicados de coeficientes de atrito foram medidos em laboratórios de pesquisa, comumente com dispositivos simples (ainda que às vezes controlados por um computador), e raramente em velocidades de deslizamento e condições de contato práticas. Os dados nesses testes são geralmente confiáveis e altamente reproduzíveis, mas se aplicam somente para as condições específicas de cada teste. [16]

3.3.2 Medição do atrito

A medição do coeficiente de atrito envolve medir duas quantidades: F, a força necessária para iniciar e/ou sustentar o deslizamento, e N, a força normal segurando duas superfícies juntas. Uma das mais antigas formas de se medir o coeficiente de atrito pode ser feita através do arranjo de polias e pesos mostrados na figura 19. Um aumento na carga P é aplicado até o deslizamento começar, e assim é obtido o coeficiente de atrito estático $\mu_s = P_s/N = F_s/W$. Se for desejado conhecer o coeficiente de atrito cinético, μ_k , um peso é aplicado à corda e o corpo deslizante é movido manualmente e solto. Se o deslizamento cessa, mais peso é aplicado à corda até que seja observado um deslizamento com velocidade uniforme. Nesse caso, a carga final P_k é usada para obter $\mu_k = P_k/N = F_k/W$.

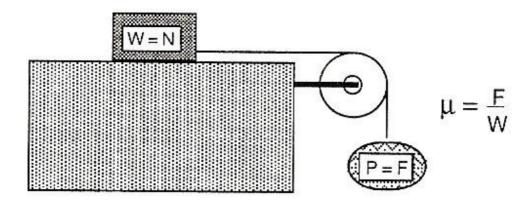


Figura 19 - Um dispositivo para medir atrito estático ou inicial. [16]

Uma segunda maneira conveniente de se medir atrito é através de um plano inclinado (figura 20). A medição do coeficiente de atrito estático consiste simplesmente em aumentar o ângulo de inclinação, α, de um plano até o objeto começar a deslizar para baixo no plano inclinado: a tangente do ângulo de inclinação, tan α, é o coeficiente de atrito estático. Se for desejado conhecer o coeficiente de atrito cinético, o plano é inclinado até um ângulo escolhido e o corpo deslizante é avançado manualmente: se o objeto para de deslizar, o ângulo de inclinação exato ainda não foi definido. Quando o ângulo de

inclinação é encontrado em um deslizamento sustentado com velocidade uniforme, a tangente desse ângulo é o coeficiente de atrito cinético. Os dados irão variar de acordo com o julgamento da uniformidade da velocidade de deslizamento.

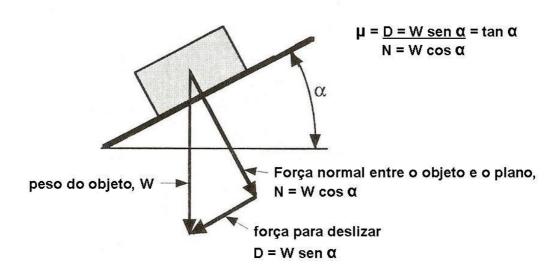


Figura 20 - O método do plano inclinado para medir o coeficiente de atrito estático [16].

Outros dispositivos de medir força de atrito variam desde uma mola de escala simples até transdutores que produzem um sinal elétrico proporcional a uma carga aplicada. A deflexão de um suporte que segura o corpo deslizante pode ser medida por sensores de capacitância, sensores de indutância, materiais piezelétricos, interferência óptica, deflexão de feixes luminosos, e diversos outros métodos. Os esforços no suporte que segura a amostra podem ser medidos através de *strain gages* (extensômetros elétricos), emissão acústica, etc. O mais amplamente utilizado, por causa da sua simplicidade e confiabilidade é o sistema de *strain gage*.

Tal como existem muitos sistemas de sensores disponíveis, existem também muitos projetos de máquinas para medição do atrito: estas podem ser classificadas em termos da variação de carga, variação de velocidade, ambiente em que elas funcionam, movimento alternante versus movimento contínuo, movimento rotativo versus movimento linear, formas das partes deslizantes (esféricas, cilíndricas ou planas), etc. Muitas configurações de

máquinas estão disponíveis, mas todas elas variam em relação à produção do movimento básico e dos componentes de medição de força [16]. Algumas delas são mostradas na figura 21.

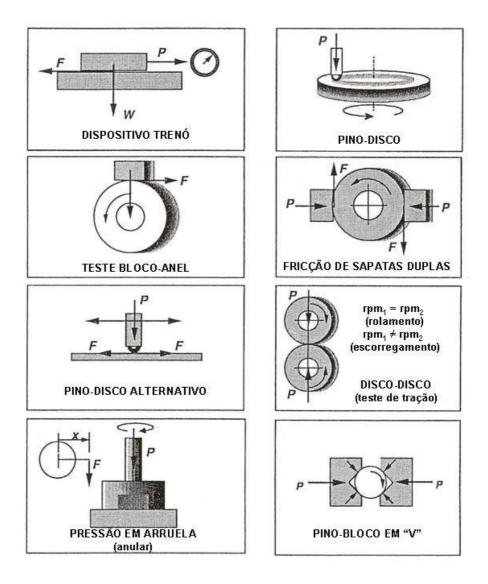


Figura 21 - Oito tipos mais comuns de geometrias de teste de atrito. A maioria delas é comercialmente útil. Adaptado da referência [17].

Entretanto, os dispositivos de teste de atrito possuem diversas características em comum, que proporcionam uma maneira de:

- (a) fixar ou sustentar os dois corpos dos quais é desejado se obter os valores de atrito;
- (b) mover os dois corpos relativamente entre si em um padrão controlado;
- (c) aplicar-se a força normal;

(d) medir ou deduzir a magnitude da força de atrito tangencial que se opõe ao movimento relativo. [17]

Uma maneira comum de medição de atrito é através do teste pino-lixa mostrada na figura 22.

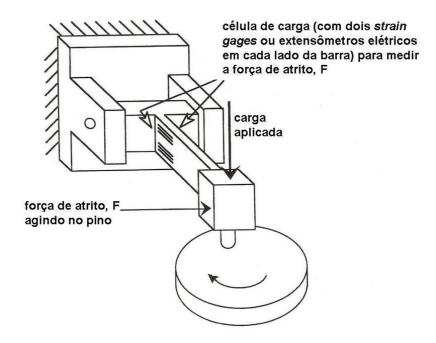


Figura 22 - Teste pino-lixa com transdutor de força de atrito articulado. Adaptado da referência [16].

Outro modelo de medição de atrito é através do teste de abrasão / areia seca (figura 16). Nesse caso há um braço articulado que transmite a força de atrito (que se opõe ao movimento da roda de borracha) para a célula de carga.

Villabón e Sinatora [18] fizeram estudos relacionados à força de atrito no abrasômetro roda de borracha. Apesar de utilizarem um equipamento diferente de Hutchings e Stevenson [3], eles fazem algumas comparações. Por terem construido uma instrumentação mais sofisticada, ele fizeram uma análise mais detalhada das variáveis que influenciam a força de atrito.

A seguir é descrito o sistema de instrumentação e a metodologia que eles utilizaram, bem como os resultados obtidos.

(a)

O sistema de transmissão e conta giro (figura 23). Uma parte do sistema instrumentado de aplicação da carga com controle de coleta de dados (figura 24).

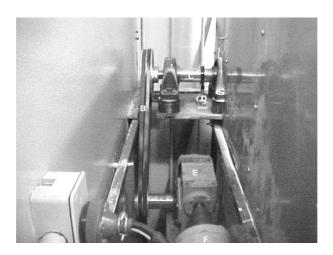


Figura 23 - Abrasômetro tipo roda de borracha, mostrando o sistema de transmissão: A - polia; B - correia; C - eixo; D - conta giro; E - redutor; F - motor [18].



Figura 24 - Abrasômetro tipo roda de borracha, mostrando na foto o sistema mecânico e instrumentado: A - disco de borracha; B e C - células de carga normal e tangencial; D e E: portas-amostra dos sistemas mecânico e instrumentado; F - Braço para ensaios mecânicos; G - termopar; H - bico alimentador do abrasivo e I - exaustor de poeira [18].

Para o procedimento de padronização dos sistemas mecânicos e instrumentados realizou-se o procedimento recomendado pela norma ASTM G-65, tendo como força normal aplicada sobre a amostra de 130 N, velocidade de rotação de 200 RPM, tempo total de ensaio de 30 min, aço AISI D2, e análise

de resultados mediante análises estatísticas do coeficiente de variação da perda de volume (inferior a 7 %). Após padronização do equipamento foram realizados ensaios com tempo constante de 10 minutos e cargas de 15, 30, 50 e 100 N empregando-se areias ANB 50 e 100 (300 µm e 150 µm).

(b)

Os resultados obtidos para o coeficiente de atrito em diferentes condições, utilizando diferentes materiais são apresentados na figura 25.

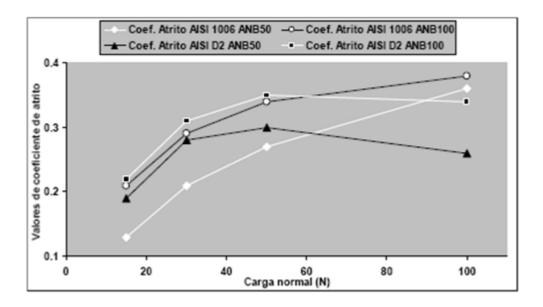


Figura 25 - Coeficiente de atrito em função da carga aplicada. Tempo de ensaio de 10 min, abrasivos ANB 100 e ANB 50 e aços AISI 1004 e AISI D2 [18].

Observa-se que, de modo geral, para ambos materiais, o coeficiente de atrito aumenta conforme aumenta a carga aplicada e há uma tendência à estabilização quando as cargas são muito altas. As únicas exceções são os coeficientes de atrito para o aço AISI D2 ensaiado com os dois tamanhos de abrasivo e cargas de 100 N. Para estas condições os valores são menores que os obtidos com cargas de 50 N. Esse comportamento foi atribuído ao arredondamento das partículas abrasivas.

Os resultados de coeficiente de atrito apresentados na figura 25 mostram claramente que o comportamento do coeficiente de atrito está influenciado pela força normal utilizada nos ensaios de desgaste, apresentando um

comportamento crescente à medida que a carga normal é aumentada. Estes resultados contrariam os apresentados por Hutchings e Stevenson [3], como se vê na tabela 4. Essa conclusão de Hutchings e Stevenson [3] pode estar relacionada à sensibilidade do abrasômetro instrumentado para medição da força tangencial.

Tabela 4 - Comparação de resultados de coeficiente de atrito de Hutchings e Stevenson [3] com Villabón e Sinatora [18].

| Carga (N) | Abrasi vo | Tamanho de abrasivo (µm) | Materi al AISI | Coeficiente de atrito | Referência | |
|-----------------|----------------|-----------------------------------|-------------------|---|------------------------|--|
| 24,5 a 122,6 | Areia Otawa | 90-150 | 1020 | 0,30 constante | Hutchings | |
| 100 | ANB 100 | 150 | 1004 | 0,38 varia de forma crescente com a carga | Villabón e Sinatora | |
| 24,5 a 122,6 | Arena Otawa | 90-150 | FFBAC | 0,30 constante | Hutchings | |
| 100 | ANB 100 | 150 | D2 | 0,34 varia com a carga e com o tamanho de grano | Villabón e Sinatora | |

3.4 CÉLULAS DE CARGA

3.4.1 Introdução

O uso de células de carga como transdutores de medição de força abrange hoje uma vasta gama de aplicações: desde nas balanças comerciais até na automatização e controle de processos industriais. A popularização do seu uso decorre do fato que a variável peso é interveniente em grande parte das transações comerciais e de medição das mais freqüentes dentre as grandezas físicas de processo.

3.4.2 Princípios de funcionamento

O princípio de funcionamento das células de carga baseia-se na variação da resistência ôhmica de um sensor denominado extensômetro ou *strain gage* (figura 26), quando submetido a uma deformação. Utiliza-se comumente em células de carga quatro extensômetros ligados entre si segundo a ponte de Wheatstone (figura 27) e o desbalanceamento da mesma, em virtude da deformação dos extensômetros, é proporcional à força que a provoca. É através da medição deste desbalanceamento que se obtém o valor da força aplicada.

Os extensômetros são colados a uma peça metálica (alumínio, aço ou liga cobre-berílio), denominada corpo da célula de carga e inteiramente solidários à sua deformação. A força atua, portanto, sobre o corpo da célula de carga e a sua deformação é transmitida aos extensômetros, que por sua vez medirão sua intensidade. Obviamente que a forma e as características do corpo da célula de carga devem ser objeto de um meticuloso cuidado, tanto no seu projeto quanto na sua execução, visando assegurar que a sua relação de proporcionalidade entre a intensidade da força atuante e a conseqüente deformação dos extensômetros seja preservada tanto no ciclo inicial de pesagem quanto nos ciclos subseqüentes, independentemente das condições ambientais. A forma geométrica, portanto, deve conduzir a uma "linearidade" dos resultados (figura 28).

Considerando-se que a temperatura gera deformações em corpos sólidos e que estas poderiam ser confundidas com a provocada pela ação da força a ser medida, há necessidade de se "compensar" os efeitos de temperatura através da introdução no circuito de Wheatstone de resistências especiais que variem calor de forma inversa dos extensômetros. com 0 а Um efeito normalmente presente ao ciclo de pesagem e que deve ser controlado com a escolha conveniente da liga da matéria-prima da célula de carga é o da "histerese" decorrente de trocas térmicas com o ambiente da energia elástica gerada pela deformação, o que acarreta que as medições de cargas sucessivas não coincidam com as descargas respectivas (figura 28). Outro efeito que também deve ser controlado é a "repetibilidade", ou seja, indicação da mesma deformação decorrente da aplicação da mesma carga sucessivamente, também deve ser verificada e controlada através do uso de materiais isotrópicos e da correta aplicação da força sobre a célula de carga (figura 28).

Finalmente, deve-se considerar o fenômeno da "fluência" ou *creep*, que consiste na variação da deformação ao longo do tempo após a aplicação da carga. Este efeito decorre de escorregamentos entre as faces da estrutura cristalina do material e apresentam-se como variações aparentes na intensidade da força sem que haja incrementos na mesma (figura 29) [19].

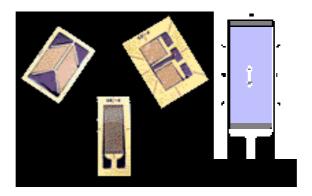


Figura 26 - Extensômetro ou Strain-Gage [19].

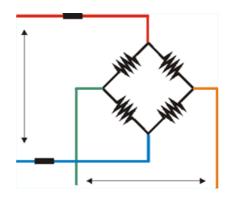


Figura 27 - Ponte de Wheatstone [19].

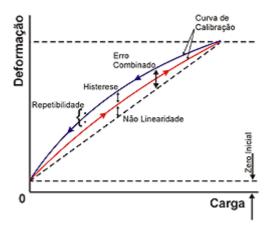


Figura 28 - Gráfico de deformação x carga, mostrando histerese, repetibilidade e não linearidade [19].

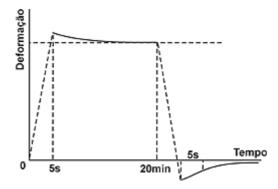


Figura 29 - Gráfico de deformação x tempo mostrando a fluência ou *creep* [19].

4 METODOLOGIA

4.1 VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE OPERACIONAL DO EQUIPAMENTO

Para verificação da operacionalidade do abrasômetro roda de borracha / areia seca da UFES (devido ao tempo em que ficou parado) foram feitas comparações com os dois últimos projetos de graduação: Amaral e de Paiva [15] e Martins e dos Santos [20].

Repetiu-se um ponto de ambos os projetos, utilizando os mesmos parâmetros de teste: três amostras de aço AISI 1020 retificadas (com dimensões 75 x 25 x 5 mm, seguindo a norma ASTM G65 [2]), uma carga normal de 105,6 N, uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s, um fluxo de abrasivo de 1,6 a 1,8 g/s, uma roda de borracha de dureza 60 Shore e Areia Normal Brasileira do IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica), NBR-7214 como abrasivo, de tamanho 0,30-0,60 mm (50 Mesh).

Os testes foram realizados com incrementos de 71,8 m na distância de deslizamento para se determinar o regime permanente. O número mínimo de incrementos estabelecido foi de 4 vezes resultando em um comprimento de deslizamento mínimo de 287,2 metros.

Após cada teste de desgaste, as amostras foram submetidas à limpeza, secagem e pesagem conforme procedimento descrito anteriormente nos projetos de graduação de Amaral e de Paiva [15] e Martins e dos Santos [20].

.

4.2 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO

4.2.1 Análise das forças atuantes no equipamento

Surgiram algumas duvidas com relação às forças atuantes no equipamento, o que poderia influenciar sensivelmente nos valores aferidos pela célula de carga devido à sua posição, que é diferente da sugerida por Hutchings e Stevenson [3]. A célula do abrasômetro da UFES se localiza na extremidade esquerda, onde se apóia a articulação do braço do equipamento em relação a roda de borracha. O braço é parafusado na célula (o que de certo modo, ocasionaria uma carga normal na célula). Como a célula foi projetada para leituras apenas em um sentido (no caso, uma força tangencial à ela), houveram duvidas de que, dependendo da magnitude da força normal, pudesse haver influência nos resultados aferidos.

4.2.2 Calibração da célula de carga

Para fazer a calibração da célula de carga teve-se que desmontá-la e, utilizando uma peça de alumínio, parafusou-se a célula nessa peça sobre a mesa (conforme figura 30). Posteriormente, foram colocadas anilhas (as mesmas utilizadas para fazer os testes de atrito e de desgaste) para avaliar a variação da leitura da célula de carga com a massa das anilhas.



Figura 30 - Esquema de montagem da célula para calibração.

Inicialmente, foi feita uma calibração com pesos menores (na faixa de 0,1 a 5 N, segundo figura 31), mas como a célula iria trabalhar com cargas superiores a 60 N, achou-se razoável utilizar uma faixa maior (de até 100 N) para garantir a aferição. Então foram colocadas as anilhas (enumeradas de 1 a 10 de ordem decrescente de peso) e, após colocá-las, foram retiradas uma a uma.



Figura 31 - Leitura da célula de carga para um peso de 0,2 kgf ou 2 N.

É importante salientar que a célula de carga tem dois sentidos de aplicação de força: o de tração e o de compressão, conforme figura 32 (a). No entanto, o modo compressão estava apresentando falha de contato nos conectores de saída, de modo que os valores só eram lidos no modo tração, sendo os valores calibrados apenas para tração. Devido a isso, foi preciso inverter a célula na máquina de modo que ficasse no modo tração, conforme figura 32 (b).

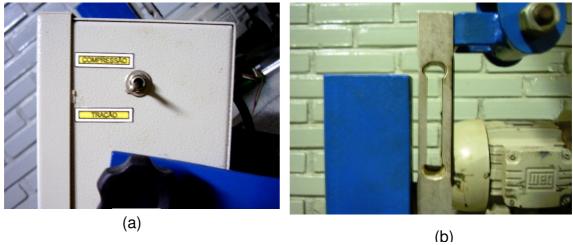


Figura 32 - Disposição da célula de carga: (a) funcionamento do indicador digital no modo tração e (b) célula de carga invertida para trabalhar no modo tração.

4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DO ATRITO

Devido às limitações do equipamento, houve a necessidade de se fazer as leituras da célula de carga de maneira manual. Para isso, estabeleceu-se um critério: como a carga aplicada era dinâmica, e ocorriam pequenas variações instantâneas em torno de um valor, fez-se a leitura da força de atrito (em kgf) a cada 10 segundos, e uma média foi feita durante cada minuto, sendo o tempo total para cada teste de 10 minutos. Adotou-se o tempo utilizado por Villabón e Sinatora [18] que também fizeram testes semelhantes, embora realizados em um abrasômetro do tipo vertical.

A célula de carga da marca Kratos utilizada possui capacidade mínima de 0,1 kgf e máxima de 30 kgf, e o indicador digital é mostrado na figura 33.



Figura 33 - Indicador digital da marca Kratos utilizado nos testes

Foram utilizadas, no total, 30 amostras de aço AISI 1020, com dimensões de 75 x 25 x 10 mm, devidamente retificadas, seguindo o padrão da norma ASTM G65 [2]. Uma delas pode ser vista na figura 34.



Figura 34 - Amostra de aço AISI 1020 com dimensões 75 x 25 x 10 mm, devidamente retificada, utilizada nos testes de atrito.

Os testes foram divididos em duas etapas:

- Etapa 1 Fixando-se a velocidade de deslizamento em 0,6 m/s e variando-se a carga normal (5,176; 6,558; 8,634 e 12,095 kgf).
- Etapa 2 Fixando-se a carga normal em 10,056 kgf e variando-se a velocidade de deslizamento (0,3; 0,6; 0,9 e 1,2 m/s).

Foram feitas três medições (durante dois minutos cada) na massa de abrasivo que sai da calha na máxima rotação do tambor de alimentação. Os valores encontrados para o fluxo na máxima rotação foram entre 1,6 e 1,8 g/s. O fluxo de abrasivo na calha nas etapas 1 e 2 foi mantido entre 1,6 e 1,8 g/s, o que nos forneceu um fluxo médio de saída na interface da amostra entre 0,91 e 1,12 g/s para velocidades de deslizamento de 0,6 m/s (bem próximo do fluxo adotado por Hutchings e Stevenson [3]).

O coeficiente de atrito (µ) foi obtido dividindo-se a força de atrito média durante os 10 minutos de teste pela carga normal aplicada à amostra.

Para cada ponto do projeto foram testadas três amostras diferentes sob os mesmos parâmetros, e tiradas a média e o desvio padrão para construção dos gráficos de variação do coeficiente de atrito: com a carga e com a velocidade de deslizamento. Os testes foram feitos com refrigeração da amostra.

O fluxo de abrasivo que passa na interface da amostra com a roda de borracha também foi quantificado em cada teste.

Na etapa 2, foi utilizado um tempo de teste de 5 min, já que, durante os testes da etapa 1, não constatamos grandes variações da força de atrito com o tempo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 MELHORIAS REALIZADAS NO ABRASÔMETRO RODA DE BORRACHA HORIZONTAL DA UFES

Antes que os primeiros testes fossem realizados, houve a necessidade de se fazer melhorias no abrasômetro roda de borracha modificado da UFES, a fim de garantir a estabilidade operacional do equipamento e a conservação do mesmo para futuros testes, assim como colocar em funcionamento a célula de carga (usada para quantificar a força de atrito entre a roda de borracha e a amostra).

5.1.1 Principais problemas constatados

Durante as primeiras inspeções no abrasômetro foram constatados os seguintes problemas:

- Vazamento de areia no silo de armazenamento de abrasivo, devido à má vedação do mesmo;
- Vazamento de areia no tambor rotativo de alimentação de abrasivo (figura 35 (a));
- Calha em alumínio com avarias e problemas com a sua fixação no braço de carga (impedindo o fluxo adequado de abrasivo);
- Acúmulo de areia em todas as partes da mesa durante os testes, havendo risco de contaminação no motor, redutor, fonte e mancais pela presença de partículas abrasivas;
- Fonte de alimentação do tambor rotativo totalmente aberta (figura 35 (b)), com risco de contaminação dos componentes eletrônicos (expostos ao ar livre e em ambiente abrasivo);
- Falta de uma caixa para armazenar a quantidade de areia que passa na interface da amostra com a roda de borracha;
- Numeração das anilhas não coincidindo com suas respectivas massas reais mostradas nas tabelas de projetos anteriores;

 Célula de carga da marca Kratos sem manual de instruções e com dificuldades na leitura da força tangencial. Sendo que a empresa fabricante da célula e do indicador digital tinha fechado, havendo dificuldades no contato para a operação adequada dos mesmos e na aquisição de novo manual.

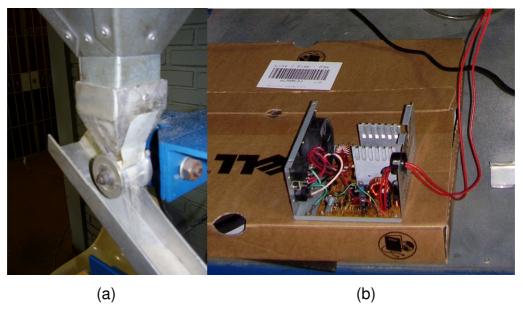


Figura 35 - Alguns dos problemas encontrados antes dos testes: (a) vazamento de areia no tambor rotativo de alimentação de abrasivo e (b) fonte de alimentação do tambor rotativo totalmente aberta.

5.1.2 Resultados após as melhorias

Posteriormente foram feitas em acrílico: uma proteção (para evitar o acúmulo de areia na mesa), uma nova calha de alimentação de abrasivo, uma rampa (para fazer escoar e permitir novo uso das partículas abrasivas que não passaram na interface da amostra com a roda de borracha) e uma caixa para armazenamento da areia que passa na interface. Também foi providenciada a vedação correta do tambor rotativo, da fonte que o alimenta e do silo, assim como a numeração das anilhas, depois de pesadas, de acordo com suas respectivas massas (figura 36).

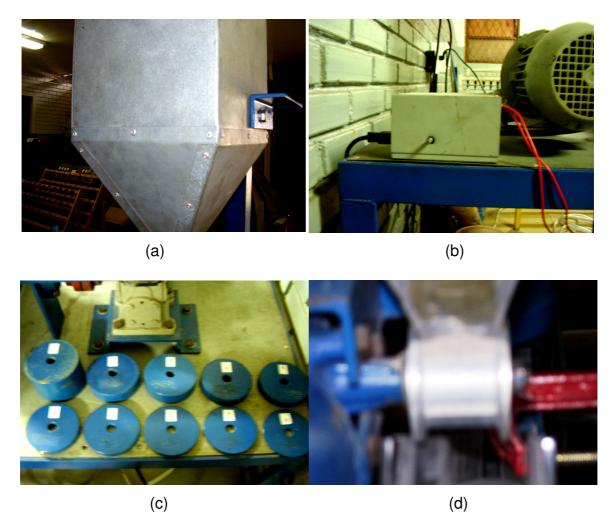


Figura 36 - Melhorias: (a) silo de armazenamento de abrasivo sem vazamento depois de vedado internamente com durepox; (b) fonte de alimentação do tambor rotativo fixa na mesa, com proteção e abertura para o potenciômetro de controle de rotação; (c) anilhas numeradas (1 a 10) de forma decrescente de acordo com suas respectivas massas e (d) tambor rotativo de alimentação sem vazamentos após vedação com plástico.

Os croquis em 3D feitos no AutoCAD e a disposição final das peças em acrílico são mostrados nas figuras 37 e 38, respectivamente.

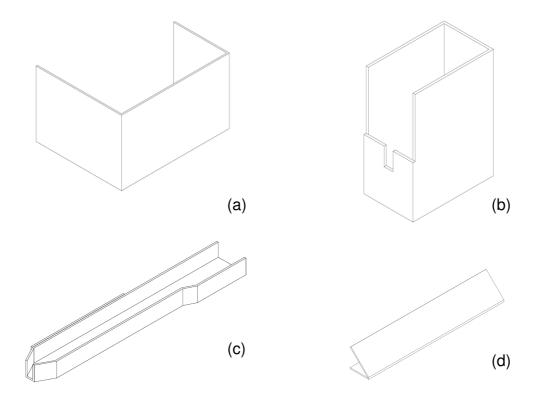


Figura 37 - Croquis das peças feitas em acrílico: (a) proteção; (b) caixa; (c) calha e (d) rampa.



Figura 38 - Disposição final das peças em acrílico: (a) calha de alimentação de abrasivo e (b) conjunto (proteção e caixa removíveis, e rampa).

A dureza Shore da borracha foi previamente medida na empresa Vedaflex, verificando-se que a mesma se manteve constante, apesar do tempo passado desde a sua fabricação. A medição também foi feita em todas as rodas de borracha existentes no Laboratório de Tribologia e Corrosão dos Materiais da UFES e também não houve variação na dureza das mesmas. O erro admitido nos testes foi de ± 5 Shore.

5.2 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ATRITO

5.2.1 Diagrama de forças atuantes no braço do abrasômetro e na célula de carga

Devido à disposição da célula de carga no braço do abrasômetro (parafusada na estrutura do equipamento), surgiram dúvidas de que houvesse reações normais na célula, impedindo a leitura adequada da força de atrito (já que a célula foi projetada para leitura de força apenas na direção tangencial).

Para certificar-se de que a força aferida pela célula de carga fosse apenas a força tangencial (que é a de atrito), foram feitas análises das forças atuantes no braço e na célula na condição estática e dinâmica conforme figuras 39 e 40, respectivamente.

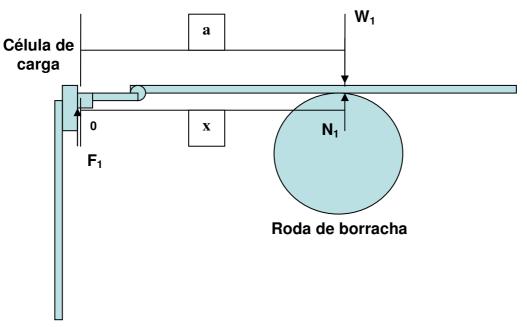


Figura 39 - Diagrama de forças atuantes no braço e na célula de carga na condição estática, sendo "a" a distância da célula de carga ao centro de massa do braço e "x" a distância da célula de carga em relação à reação normal "N₁".

$$\Sigma M_0 = 0 : \qquad N_1.x - W_1.a = 0$$

$$N_1 = W_1.a/x$$

$$\Sigma F_y = 0 : \qquad F_1 + N_1 = W_1$$

$$F_1 = W_1 - W_1.a/x$$

Sendo "a" próximo de "x", F₁ ficará bem próximo de zero.

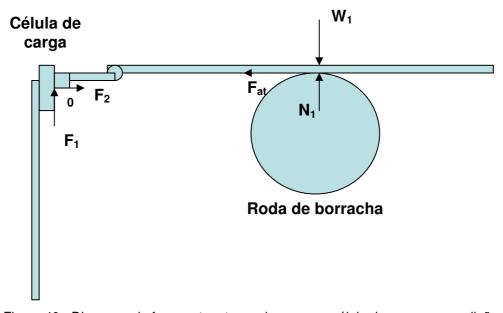


Figura 40 - Diagrama de forças atuantes no braço e na célula de carga na condição dinâmica.

$$\Sigma M_0 = 0 \colon \qquad N_1.x - W_1.a = 0$$

$$N_1 = W_1.a/x$$

$$\Sigma F_y = 0 \colon \qquad F_1 + N_1 = W_1$$

$$F_1 = W_1 - W_1.a/x$$

$$F_2 = F_{at}$$

Com isso, conclui-se que há influência desprezível de F_1 na força de atrito.

5.2.2 Avaliação da calibração da célula de carga

Foi realizada uma calibração da célula de carga, e na situação estática ela se comportou bem, com erro não muito superior a 2%, com isso, foi considerado que a célula estava preparada para a realização dos testes. Na tabela 5 e na figura 41 são mostrados os resultados da calibração.

Tabela 5 - Valores aferidos, com seus respectivos erros, variando-se o número de anilhas colocadas sobre a célula de carga: ao se acrescentar e ao se retirar as anilhas. O erro foi considerado a diferença entre a leitura da célula e o peso das anilhas dividido pela leitura da célula.

| CALIBRAÇÃO - CÉLULA DE CARGA | | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------------|-----------------------|-------|--|--|--|
| Etapa | Numeração das anilhas | Peso das anilhas (kgf) | Leitura da célula de carga (kgf) | | | | | |
| Σιαρα | | r coo dao ariirido (Ngr) | Acréscimo de anilhas | Decréscimo de anilhas | Erro | | | |
| 1 | 10 | 0,305 | 0,3 | 0,3 | 1,64% | | | |
| 2 | 10 e 9 | 0,776 | 0,76 | 0,76 | 2,06% | | | |
| 3 | 10, 9 e 8 | 1,383 | 1,36 | 1,35 | 1,66% | | | |
| 4 | 10, 9, 8 e 7 | 2,158 | 2,11 | 2,11 | 2,22% | | | |
| 5 | 10, 9, 8, 7 e 6 | 3,077 | 3,01 | 3,01 | 2,18% | | | |
| 6 | 10, 9, 8, 7, 6 e 5 | 4,234 | 4,14 | 4,14 | 2,22% | | | |
| 7 | 10, 9, 8, 7, 6, 5 e 4 | 5,733 | 5,61 | 5,6 | 2,15% | | | |
| 8 | 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4 e 3 | 7,695 | 7,53 | 7,52 | 2,14% | | | |
| 9 | 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3 e 2 | 9,719 | 9,5 | 9,5 | 2,25% | | | |

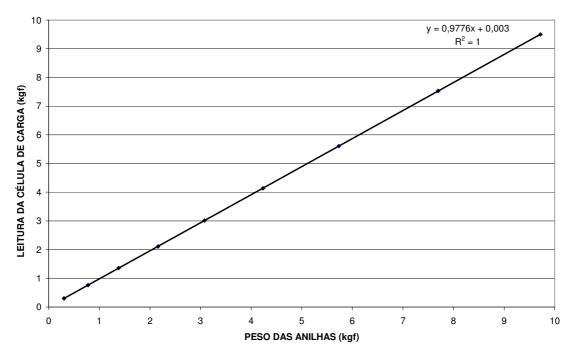


Figura 41 - Gráfico leitura da célula de carga X peso das anilhas (plotado através da tabela 5).

5.3 VERIFICAÇÃO DA ESTABILIDADE OPERACIONAL DO EQUIPAMENTO

Os primeiros testes realizados foram para verificação da estabilidade operacional do equipamento devido ao tempo em que ficou parado. Foi feita uma comparação com projetos de Amaral e Paiva [15], Martins e dos Santos [20] e Hutchings e Stevenson [3] como mencionado anteriormente.

Os resultados obtidos e a comparação entre as taxas de desgaste são mostrados nas figuras 42 e 43, respectivamente.

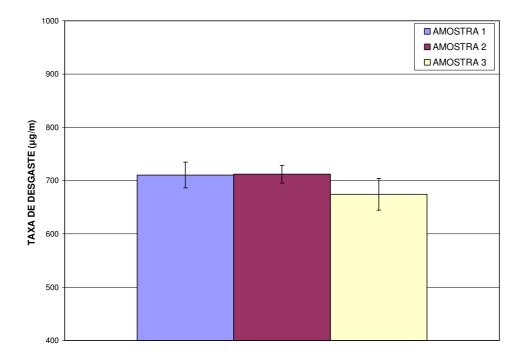


Figura 42 - Taxa de desgaste das três amostras testadas para velocidade de deslizamento de 0,6 m/s, carga normal de 100,56 N e fluxo de abrasivo da calha de 1,6 a 1,8 g/s.

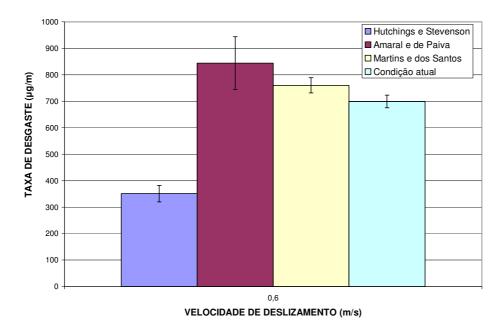


Figura 43 - Comparação da condição de desgaste atual com projetos anteriores.

Percebe-se que a taxa de desgaste se alterou pouco em relação às taxas obtidas por Amaral e Paiva [15] e Martins e dos Santos [20] sob as mesmas condições, constatando-se a estabilidade do abrasômetro.

No entanto, as taxas de desgaste dos testes feitos no abrasômetro horizontal do Laboratório de Tribologia e Corrosão dos Materiais da UFES, continuam distantes dos resultados obtidos por Hutchings e Stevenson [3]. Isso se deve a vários fatores, dentre eles pode-se citar: tipo, tamanho e forma da partícula abrasiva, ângulo de chute do fluxo de abrasivo, tipo de borracha usada para revestimento da roda, temperatura ambiente e umidade relativa do ar, diferentes das condições observadas nos testes de Hutchings e Stevenson [3].

O somatório desses fatores, além do próprio caráter sistêmico do desgaste, pode ter influenciado o distanciamento dos resultados obtidos no abrasômetro da UFES em relação ao de Hutchings e Stevenson [3].

5.4 ANÁLISE DO COEFICIENTE DE ATRITO COM A VARIAÇÃO DA CARGA NORMAL

Durante os testes percebemos que, com as rotações da roda, ocorreu uma pequena variação (não mais que 5%) cíclica na força de atrito com relação ao tempo, devido à vários fatores (dentre eles a diferença de textura da borracha que reveste a roda, no percorrer de um ciclo de ensaio).

Na figura 44, é mostrado o comportamento do coeficiente de atrito com o tempo, durante 10 minutos, para uma carga normal de 5,176 kgf e uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s.

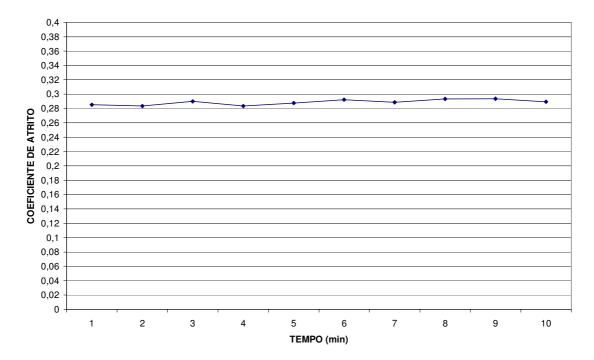


Figura 44 - Comportamento do coeficiente de atrito com o tempo para uma carga normal de 5,176 kgf e uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s, durante 10 minutos de teste.

A seguir, nas figuras 45, 46, 47 e 48, são mostrados os resultados do coeficiente de atrito para cada carga normal aplicada sobre a amostra. Nas figuras 49 e 50 são mostrados os resultados do coeficiente de atrito e do fluxo de abrasivo que passa na interface amostra / roda de borracha com a variação da carga normal.

Na figura 45, é mostrado o coeficiente de atrito médio, para cada amostra testada. Nessa condição, onde a carga é de 5,176 kgf, o coeficiente de atrito ficou entre 0,23 e 0,28.

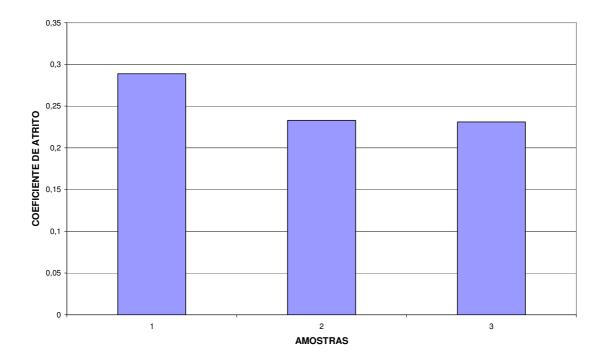


Figura 45 - Resultados do coeficiente de atrito para uma carga normal de 5,176 kgf e velocidade de deslizamento de 0,6 m/s.

Na figura 46, é mostrado o coeficiente de atrito médio, para cada amostra testada. Nessa condição, onde a carga é de 6,558 kgf o coeficiente de atrito ficou entre 0,25 e 0,32.

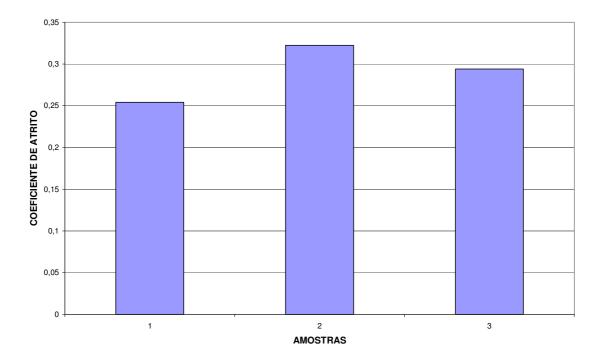


Figura 46 - Resultados do coeficiente de atrito para uma carga normal de 6,558 kgf e velocidade de deslizamento de 0,6 m/s.

Na figura 47, é mostrado o coeficiente de atrito médio, para cada amostra testada. Nessa condição, onde a carga é de 8,634 kgf o coeficiente de atrito ficou entre 0,29 e 0,32.

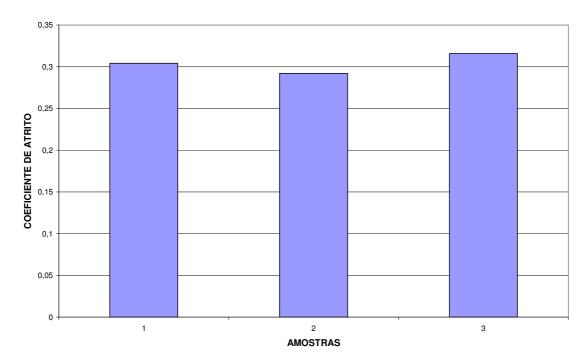


Figura 47 - Resultados do coeficiente de atrito para uma carga normal de 8,634 kgf e velocidade de deslizamento de 0,6 m/s.

Na figura 48, é mostrado o coeficiente de atrito médio, para cada amostra testada. Nessa condição, onde a carga é de 12,095 kgf o coeficiente de atrito, apresentou uma maior variação entre as amostras, oscilando de 0,21 a 0,31.

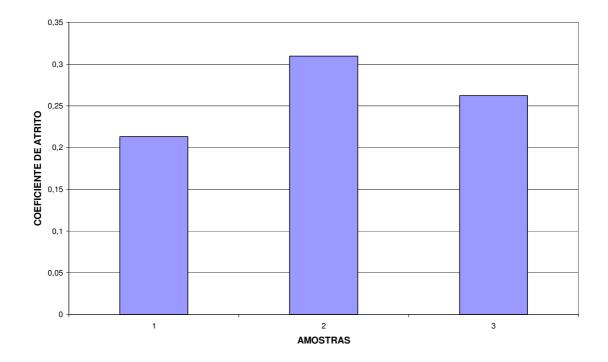


Figura 48 - Resultados do coeficiente de atrito para uma carga normal de 12,095 kgf e velocidade de deslizamento de 0,6 m/s.

Na figura 49, é mostrado o comportamento do coeficiente de atrito com a variação da carga normal.

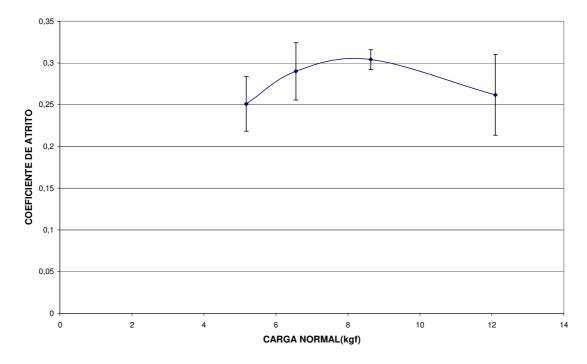


Figura 49 - Comportamento do coeficiente de atrito com a variação da carga normal para uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s.

Devido ao grande desvio mostrado, principalmente no último ponto, não se pode afirmar que ele varie com a carga normal, como afirmam Villabón e Sinatora [18] em seu trabalho. Porém analisando os coeficientes de atrito médios, há certa tendência de aproximação com relação ao gráfico mostrado na figura 25 para os aços AISI D2. Logo, o que podemos afirmar é que os coeficientes de atrito aparente oscilaram em uma faixa de 0,21 a 0,32, inferior aos encontrados por Hutchings e Stevenson [3] (0,3 a 0,4).

Na figura 50, é mostrado o comportamento do fluxo médio de abrasivo, que passa na interface da amostra, com a variação da carga normal. Foram notadas pequenas variações no fluxo e uma leve tendência de aumento com a carga normal.

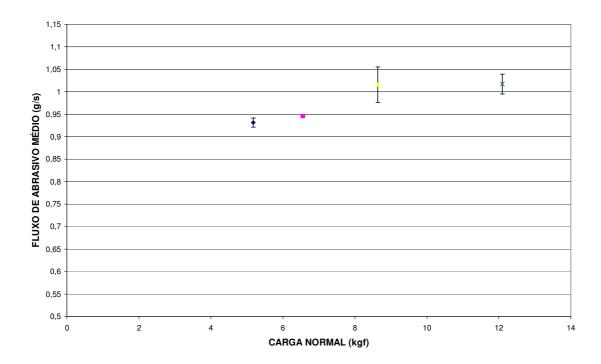


Figura 50 - Comportamento do fluxo de abrasivo médio que passa na interface amostra / roda de borracha com a variação da carga normal para uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s.

Na figura 51, é feita uma análise do comportamento do coeficiente de atrito com o fluxo de abrasivo que passa na interface da amostra.

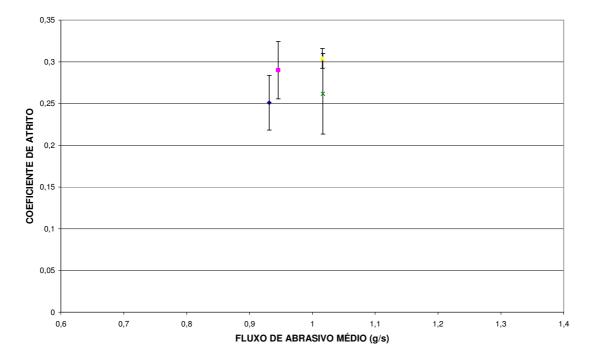


Figura 51 - Comportamento do coeficiente de atrito com o fluxo de abrasivo médio que passa na interface amostra / roda de borracha com a variação da carga normal para uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s.

Como o fluxo de abrasivo médio não variou muito, o coeficiente de atrito médio também não variou, oscilando numa faixa de 0,25 a 0,3.

5.5 ANÁLISE DO COEFICIENTE DE ATRITO COM A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE DESLIZAMENTO

Durante os testes variando a velocidade de deslizamento, também percebemos que, com as rotações da roda, ocorreu uma pequena variação (não mais que 5%) cíclica na força de atrito com relação ao tempo.

Na figura 52, é mostrado o comportamento do coeficiente de atrito com o tempo, durante 5 minutos, para uma carga normal de 10,056 kgf e uma velocidade de deslizamento de 0,3 m/s.

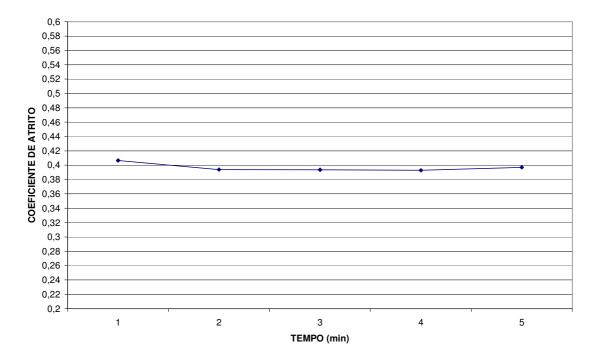


Figura 52 - Comportamento do coeficiente de atrito com o tempo para uma carga normal de 10,056 kgf e uma velocidade de deslizamento de 0,3 m/s, durante 5 minutos de teste.

A seguir, nas figuras 53, 54, 55 e 56, são mostrados os resultados do coeficiente de atrito para cada velocidade de deslizamento. Nas figuras 57 e 58 são mostrados os resultados do coeficiente de atrito e do fluxo de abrasivo que passa na interface amostra / roda de borracha com a variação da velocidade de deslizamento.

Na figura 53, é mostrado o coeficiente de atrito médio para uma carga normal de 10,056 kgf e uma velocidade de deslizamento de 0,3 m/s. Essa condição foi a que apresentou maiores valores de coeficiente de atrito, oscilando em uma faixa de 0,37 a 0,41.

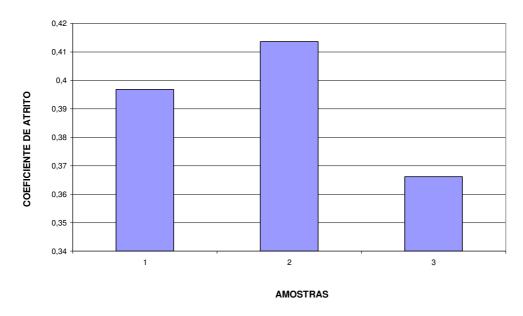


Figura 53 - Resultados do coeficiente de atrito para uma carga normal de 10,056 kgf e velocidade de deslizamento de 0,3 m/s.

Na figura 54, é mostrado o coeficiente de atrito médio para uma carga normal de 10,056 kgf e uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s. O coeficiente de atrito oscilou em uma faixa de 0,23 a 0,28.

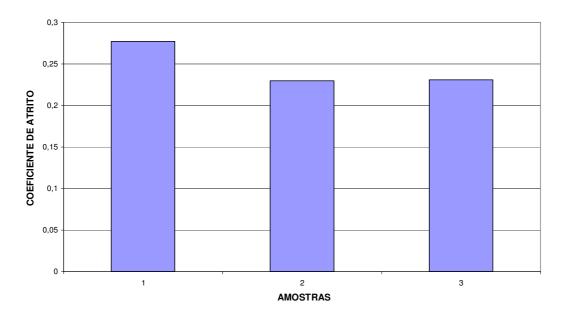


Figura 54 - Resultados do coeficiente de atrito para uma carga normal de 10,056 kgf e velocidade de deslizamento de 0,6 m/s.

Na figura 55, é mostrado o coeficiente de atrito médio para uma carga normal de 10,056 kgf e uma velocidade de deslizamento de 0,9 m/s. O coeficiente de atrito oscilou em uma faixa de 0,2 a 0,25.

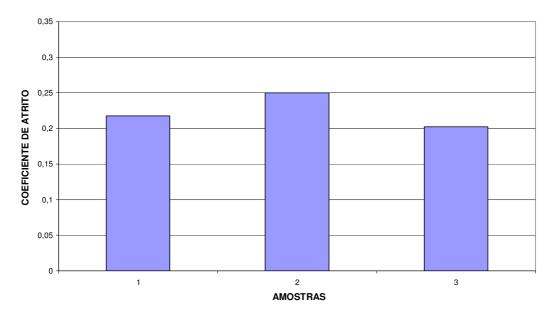


Figura 55 - Resultados do coeficiente de atrito para uma carga normal de 10,056 kgf e velocidade de deslizamento de 0,9 m/s.

A figura 56 apresenta uma variação maior do coeficiente de atrito para a velocidade de 1,2 m/s e o coeficiente de atrito oscilou numa faixa de 0,25 a 0,38.

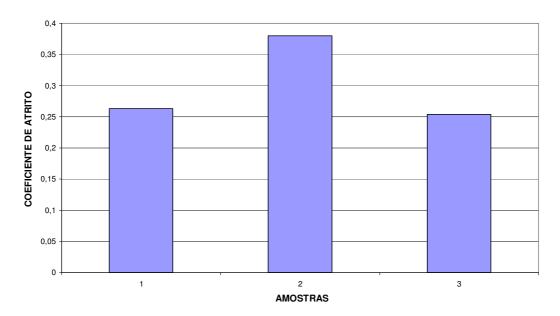


Figura 56 - Resultados do coeficiente de atrito para uma carga normal de 10,056 kgf e velocidade de deslizamento de 1,2 m/s.

Na figura 57, é mostrada a variação do coeficiente de atrito com a velocidade de deslizamento. Podem-se notar valores maiores para uma velocidade menor e uma alta variação quando se tem uma alta velocidade de deslizamento.

Essa alta variação do coeficiente de atrito, provavelmente é ocasionada pela maior perda do fluxo abrasivo quando ele vai de encontro à roda de borracha (em alta velocidade), e acaba não passando pelo corpo de prova, isso é mostrado na figura 58, em que o fluxo abrasivo que passa pelo corpo de prova tende a ser menor com o aumento da velocidade (após a velocidade 0,6 m/s).

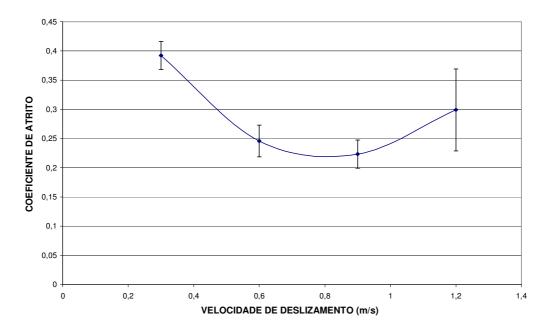


Figura 57 - Comportamento do coeficiente de atrito com a variação da velocidade de deslizamento para uma carga normal de 10,056 kgf.

Na figura 58, é mostrado o comportamento do fluxo de abrasivo médio (que passa na interface da amostra com a roda de borracha) com a velocidade de deslizamento. Ao contrário do que acontece quando variamos apenas a carga normal (figura 50), a velocidade de deslizamento influencia sensivelmente no fluxo de abrasivo, chegando a um máximo na velocidade de 0,6 m/s, e diminuindo quase que em 50 % na velocidade de 1,2 m/s.

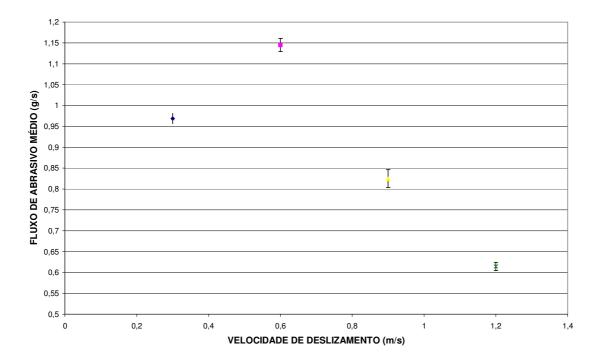


Figura 58 - Comportamento do fluxo de abrasivo médio que passa na interface amostra / roda de borracha com a variação da velocidade de deslizamento para uma carga normal de 10,056 kgf.

Na figura 59, é feita uma análise do comportamento do coeficiente de atrito com o fluxo de abrasivo que passa na interface da amostra.

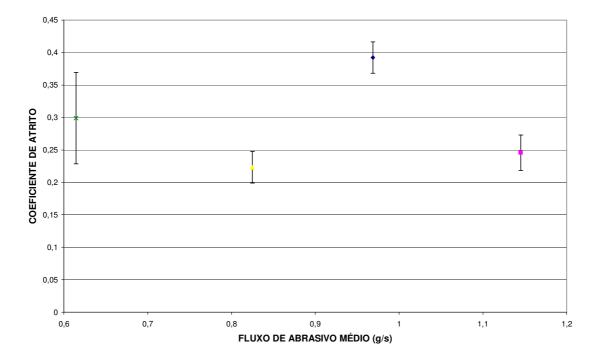


Figura 59 - Comportamento do coeficiente de atrito com o fluxo de abrasivo médio que passa na interface amostra / roda de borracha com a variação da velocidade de deslizamento para uma carga normal de 10,056 kgf.

Como o fluxo de abrasivo médio variou muito, o coeficiente de atrito médio também variou, oscilando numa faixa de 0,2 a 0,4. Isso acontece pois ocorre uma diminuição do fluxo de abrasivo (que passa na interface da amostra com a roda de borracha) para altas rotações (velocidade de deslizamento de 1,2 m/s). Com isso, menos partículas de abrasivo passam na interface da amostra com a roda de borracha, gerando um coeficiente de atrito médio alto e com alto desvio padrão. Para baixas rotações (velocidade de deslizamento de 0,3 m/s), ocorre um alto coeficiente de atrito, provavelmente devido a uma menor perda da angulosidade das partículas.

5.6 MARCAS DE DESGASTE NAS AMOSTRAS TESTADAS

Nas figuras 60 e 61, são mostradas as marcas de desgaste e seus respectivos comprimentos nas amostras após os testes de atrito.

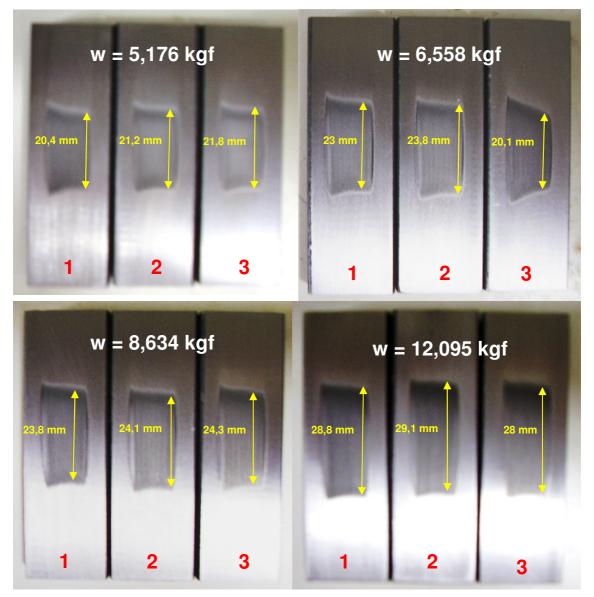


Figura 60 - Marcas de desgaste nas amostras após os testes de atrito com a variação da carga normal.

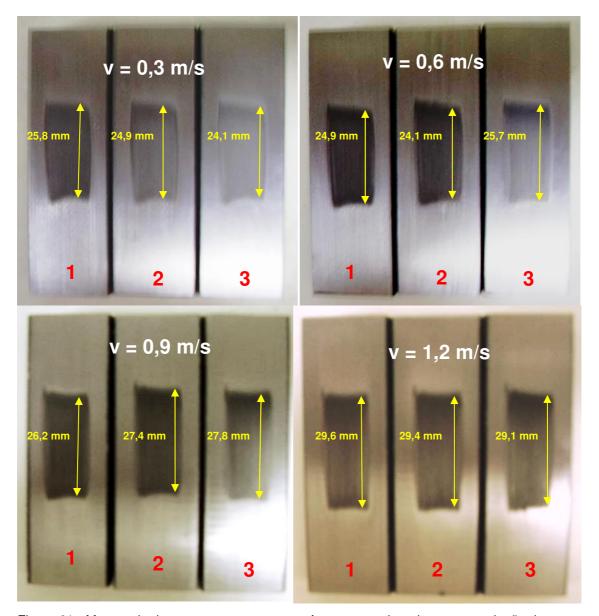


Figura 61 - Marcas de desgaste nas amostras após os testes de atrito com a variação da velocidade de deslizamento.

Houve uma tendência de aumento nos comprimentos das marcas de desgaste com a variação da carga normal, descartando-se a amostra 3, sob uma carga normal de 6,558 kgf, que não obteve uma marca de desgaste retangular devido a um desbalanceamento do braço de carga durante os testes.

Com a variação da velocidade de deslizamento, o comprimento da marca de desgaste também aumentou com a velocidade, apesar de aparentemente mostrar-se constante nas velocidades de 0,3 e 0,6 m/s.

6 CONCLUSÕES

- Foi possível notar que, com a mudança da calha de alumínio para uma de acrílico, tornou-se possível um fluxo maior e com menores variações.
- O fluxo do abrasivo que passa na interface também aumentou e se aproximou bastante de Hutchings e Stevenson [3].
- O ponto deste trabalho se aproximou bastante dos resultados obtidos por Amaral e Paiva [15] e Martins e dos Santos [20] comparando-se a taxa de desgaste sob as mesmas condições.
- Os valores do coeficiente de atrito (μ) ficaram de uma forma geral, entre 0,2 e 0,4.
- O fluxo de abrasivo que passa na interface da amostra mostrou considerável variação com a velocidade de deslizamento, o que indiretamente pode ter influenciado no coeficiente de atrito.
- O coeficiente de atrito médio, estatisticamente, não variou com a carga normal, provavelmente porque não se obteve grandes variações no fluxo de abrasivo sob essas condições.
- O coeficiente de atrito médio variou com a velocidade de deslizamento.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar e sanar os problemas eletrônicos existentes no indicador digital da célula de carga.
- Fazer uma análise da variação do coeficiente de atrito com o fluxo de abrasivo (variando-se o fluxo e analisando como o coeficiente de atrito se comporta).
- Analisar o comportamento do coeficiente de atrito para metais com diferentes propriedades e diferentes durezas.
- Fazer um paralelo entre a taxa de desgaste e o coeficiente de atrito para diferentes materiais.
- Avaliar em MEV: os mecanismos de desgaste presentes nas amostras e a degradação da areia após os testes.
- Usar rugosímetro 3D para avaliar as marcas de desgaste e a rugosidade das amostras após os testes e compará-las com amostras novas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] STELZER, G. E. "Abrasômetro do tipo roda de borracha horizontal: finalização da construção e primeiros testes". Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, 2005.
- [2] ASTM G-65/94, "Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand / Rubber Wheel Apparatus. American Standard for Testing Materials", 1994.
- [3] STEVENSON, A. N. J., HUTCHINGS I. M., "Development of the dry sand/rubber wheel", 1996.
- [4] ZUM GAHR, K. "Microstructure and wear of materials", Tribology series 10, Elsevier Science Publishers, 1987.
- [5] HUTCHINGS, I. M. "Tribology Friction and Wear of Engineering Materials", Arnold, London, p.273, 1992.
- [6] PINTAÚDE, G.; ALBERTIN, E. e SINATORA, A. "A review on abrasive wear mechanisms of metallic materials". Anais do abrasion 2005, São Paulo Brasil, 2005.
- [7] ELALEM, K.; LI, D.Y. "Variations in wear loss with respect to load and sliding speed under dry sand/rubber-wheel abrasion condition: a modeling study", Wear, 250 (2001) 59–65.
- [8] MA, X.; LIU, R.; LI, D.Y. Wear 241 (2000) 79-85.
- [9] RAMOS, L. V. "Construção e instrumentação de abrasômetro do tipo roda de borracha para o estudo do comportamento tribológico dos aços". 2005. 82 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- [10] MISRA, A.; FINNIE, I. "On the size effect in abrasive and erosive wear". Wear, v. 65, n. 3, p. 359-373, 1981.
- [11] SPUZIC, S.; STRAFFORD, K.N.; SUBRAMANIAN, C. e SAVAGE, G. "Wear of hot rolling mill: an overview". Wear, Switzerland, v. 176, n. 2, p. 261-271, 1994.
- [12] TYLCZAK, J. M.; OREGON, A. "Abrasive Wear". Em: ASM Handbook, v.18, Metals Park, ASM, 1988.

- [13] HORNBOGEN, E., "Description and wear of materials with heterogeneous and anisotropic microstructure", Wear, v. 111, p. 391- 402, 1986.
- [14] TOTTOLA, R. "Construção de uma Máquina de Ensaio de Desgaste Abrasivo: Abrasômetro do Tipo Roda de Borracha", Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, 2003.
- [15] AMARAL, G. H. B.; DE PAIVA, T. S. A. B., "Validação do equipamento roda de borracha horizontal no teste de desgaste abrasivo com areia seca". Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, 2006.
- [16] BHUSHAN, B. "Modern Tribology Handbook". Editor-in-Chief. Department of Mechanical Engineering, The Ohio State University, Columbus, Ohio.
- [18] VILLÁBON L.; SINATORA A. "Construção e instrumentação de abrasômetro do tipo roda de borracha para o estudo do comportamento tribológico de aços", Laboratório de Fenômenos de Superfície. Universidade de São Paulo, São Paulo Brasil, 2006.
- [19] PORTAL CÉLULA DE CARGA. Célula de carga. Disponível em: http://www.celuladecarga.com.br/>. Acesso em: 30 de outubro de 2008.
- [20] MARTINS, F. S.; DOS SANTOS, M. "Influência do tamanho do abrasivo, dureza da borracha e resfriamento do corpo de prova no teste roda de borracha areia seca modificado". Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, 2006.