

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO RODA DE  
BORRACHA HORIZONTAL NO TESTE DE  
DESGASTE ABRASIVO COM AREIA SECA**

**GUSTAVO HENRIQUE BARRETO AMARAL  
THOMAZ SILVA ARAUJO BARRETO DE PAIVA**

**VITÓRIA  
2006**

**GUSTAVO HENRIQUE BARRETO AMARAL  
THOMAZ SILVA ARAUJO BARRETO DE PAIVA**

**VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO RODA DE  
BORRACHA HORIZONTAL NO TESTE DE  
DESGASTE ABRASIVO COM AREIA SECA**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal do Espírito  
Santo, como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheiro  
Mecânico. Orientador: Prof. Flávio  
José da Silva**

**VITÓRIA  
2006**

**GUSTAVO HENRIQUE BARRETO AMARAL**

**THOMAZ SILVA ARAUJO BARRETO DE PAIVA**

**VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO RODA DE  
BORRACHA HORIZONTAL NO TESTE DE  
DESGASTE ABRASIVO COM AREIA SECA**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.**

**Aprovado em \_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2006.**

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

**Profº. MSc. Flávio José da Silva**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Orientador**

---

**Profº Drº. Cherlio Scandian**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

---

**Eng. Giovani Stelzer Entringer**  
**Flexibrás Tubos Flexíveis S.A**

**RESUMO**

No teste de desgaste abrasivo Roda de Borracha / Areia Seca modificado foram estudados a influencia da carga normal aplicada, da velocidade de deslizamento e da vazão de abrasivo sobre a taxa de desgaste do aço 1020. Também foram feitas análises topográficas das superfícies desgastadas. O efeito da carga e da velocidade de deslizamento na taxa de desgaste foi linear. A diminuição do fluxo abrasivo na calha resultou no aumento da taxa de desgaste decorrente do acréscimo do fator de empacotamento (densidade de partículas) na região de contato entre o corpo de prova e a borda de borracha. Observa-se uma tendência de queda do fator de empacotamento com o aumento da velocidade de deslizamento. O mecanismo de desgaste sugerido foi o microcorte e/ou microsulcamento, caracterizando o deslizamento das partículas abrasivas. Os resultados obtidos corroboram com os da literatura

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1	Importância do desgaste abrasivo.....	1
Figura 2	<b>(a)</b> Representação esquemática do teste de desgaste abrasivo dois corpos; <b>(b)</b> Representação esquemática do teste de desgaste abrasivo três corpos.....	4
Figura 3	<b>(a)</b> aspecto característico do mecanismo de desgaste microcorte e microsulcamento em condições de deslizamento das partículas e <b>(b)</b> aspecto característico de indentações múltiplas em condições de rolamento das partículas abrasivas, (Trezona, Allsopp e Hutchings, 1999).....	5
Figura 4	Representação esquemática de testes de desgaste abrasivo: <b>(a)</b> Pino sobre mesa; <b>(b)</b> Pino sobre tambor; <b>(c)</b> Pino sobre disco (Hutchings, 1992).....	8
Figura 5	Diagrama esquemático do aparelho de teste (Hutchings e Stevenson, 1996).....	9
Figura 6	Desenho esquemático do equipamento roda de borracha/areia seca modificado por Hutchings e Stevenson (1996).....	10
Figura 7	<b>(a)</b> Equipamento usado na retífica dos corpos de prova; <b>(b)</b> Corpo de prova antes da retifica; <b>(c)</b> Corpo de prova depois da retifica.....	13
Figura 8	Rugosímetro Taylor Hobson - medição dos parâmetros topográficos.....	13
Figura 9	Equipamento Roda de Borracha / Areia Seca do laboratório de materiais da UFES.....	14
Figura 10	Gráfico de Relação do motor: Freqüência versus Velocidade linear.....	16
Figura 11	<b>(a)</b> Aparelho de ultra-som Thornton; <b>(b)</b> Balança de alta resolução marca Sartorius.....	18

Figura 12	Região central do corpo de prova onde a área foi analisada.....	19
Figura 13	Gráfico da variação da perda de massa com o tempo. Carga de 50,1 N, velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha (Wc) de 1,12 g/min.....	21
Figura 14	Gráfico da variação da perda de massa com o tempo. Carga de 74,2 N, velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha (Wc) de 1,12 g/min.....	21
Figura 15	Gráfico da variação da perda de massa com o tempo. Carga de 100,6 N, velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha (Wc) de 1,12 g/min.....	22
Figura 16	Gráfico da variação da perda de massa com o tempo. Carga de 125,5 N, velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha (Wc) de 1,12 g/min.....	22
Figura 17	Taxa de desgaste média, carga de 74,2 N, velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha (Wc) de 1,12 g/min.....	23
Figura 18	Taxa de desgaste média, carga de 125,5 N, velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha (Wc) de 1,12 g/min.....	23
Figura 19	Perda de massa acumulada com o tempo, carga de 74,2 N, velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha (Wc) de 1,12 g/min.....	24
Figura 20	Gráfico da taxa de desgaste com a carga normal aplicada. Velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha (Wc) de 1,12 g/min.....	25
Figura 21	Marcas de desgaste em diferentes cargas aplicadas, velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha (Wc) de 1,12 g/min.....	26

Figura 22	Perfil típico de amostras submetidas ao desgaste abrasivo no teste roda de borracha, carga 50,07 N, velocidade de 0,6 m/s, taxa de alimentação de areia de 1,12 g/s, tempo de 10 minutos, distância deslizada de 359 m.....	26
Figura 23	Perfil típico de amostras submetidas ao desgaste abrasivo no teste roda de borracha, carga 125,51 N, velocidade de 0,6 m/s, taxa de alimentação de abrasivo de 1,12 g/s, tempo de 10 minutos, distância deslizada de 359 m.....	27
Figura 24	Aspecto topográfico típico de amostras submetidas ao desgaste abrasivo no teste roda de borracha, carga 50 N, velocidade de 0,6m/s, taxa de alimentação de areia de 1,12 g/s, tempo de 10 minutos, distância deslizada de 359m.....	27
Figura 25	Aspecto topográfico típico de amostras submetidas ao desgaste abrasivo no teste roda de borracha, carga 125.51 N, velocidade de 0,6m/s, taxa de alimentação de areia de 1.12g/s, tempo de 10 minutos, distância deslizada de 359m.....	28
Figura 26	Parâmetros de rugosidade da região desgastada para as cargas de de 50,1 N e 125,5 N, respectivamente.....	29
Figura 27	Gráfico da variação da perda de massa com o tempo para velocidade de deslizamento de 0,3 m/s.....	30
Figura 28	Gráfico da variação da perda de massa com o tempo para velocidade de deslizamento de 0,6 m/s.....	30
Figura 29	Gráfico da variação da perda de massa com o tempo para velocidade de deslizamento de 0,9 m/s.....	31
Figura 30	Gráfico da variação da perda de massa com o tempo para velocidade de deslizamento de 1,2 m/s.....	31
Figura 31	Gráfico das amostras carregadas com 100,5 N, ensaiadas com uma velocidade de deslizamento de 0,3 m/s.....	32

Figura 32	Gráfico das amostras carregadas com 100,5 N, ensaiadas com uma velocidade de deslizamento de 1,2 m/s.....	32
Figura 33	Gráfico da perda de massa acumulada com o tempo para uma carga de 100,5 N e velocidade de deslizamento de 1,2 m/s.....	33
Figura 34	Gráfico da velocidade de deslizamento pela taxa de desgaste: relação de linearidade encontrada na variação de velocidade.....	33
Figura 35	Marcas de desgaste com carga fixa de 100,5 N e variando a velocidade de deslizamento: (a) 0,3 m/s; (b) 0,6 m/s; (c) 0,9 m/s; (d) 1,2 m/s.....	34
Figura 36	Efeito da velocidade de deslizamento no fator de empacotamento para diferentes vazões da calha. As linhas teóricas e as vazões da calha de 0,91 e 1,67 g/s foram obtidas por Hutchings e Stevenson (1996).....	36
Figura 37	Gráfico da relação da taxa de desgaste com a vazão de abrasivo consumido.....	37
Figura 38	Gráfico da relação da taxa de desgaste com a velocidade de deslizamento para carga de 100,5 N.....	37
Figura 39	Gráfico da relação da vazão de abrasivo consumido com a velocidade de deslizamento para uma carga de 100,5 N.....	38
Figura 40	Gráfico da relação da vazão de abrasivo consumido com a variação da carga para uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s.....	39
Figura 41	Gráfico da relação da vazão de abrasivo consumido com a variação da carga para uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s.....	39
Figura 42	Marca de desgaste com velocidade fixa, fluxo de areia em 12 rpm, variando a carga: (a) 0,6 m/s; 100,56 N; (b) 0,6 m/s; 125,51 N; (c) 0,9 m/s; 125,51 N.....	40



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Parâmetros de teste utilizados.....	15
Tabela 2	Tabela de variação de velocidade de deslizamento.....	16
Tabela 3	Taxa de fluxo de massa líquida de abrasivo em função da rotação do tambor [g/s].....	17
Tabela 4	Tabela de Peso.....	18
Tabela 5	Valores de rugosidade das superfícies das amostras antes dos ensaios.....	20

## LISTA DE SÍMBOLOS

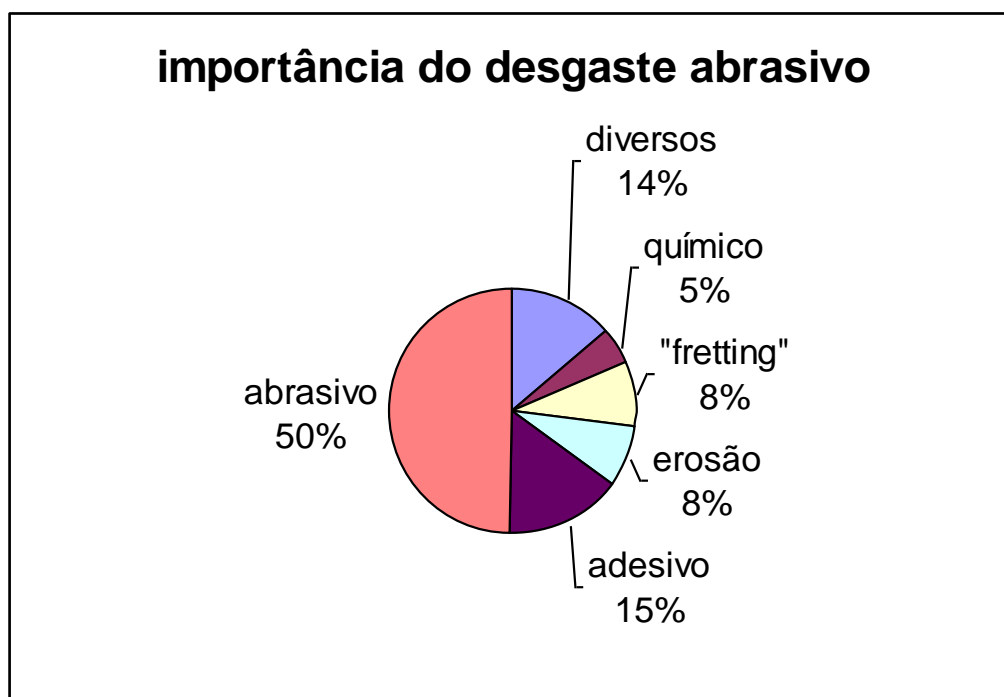
$W_c$	Vazão de abrasivo da calha
$W_a$	Vazão de abrasivo consumido
$W_{lim}$	Vazão máxima de abrasivo consumido
$v$	Velocidade de deslizamento
$b$	Espessura da borda de borracha
$\rho$	Densidade do material da partícula
$D$	Diâmetro da roda
$n$	Rotação da roda
$f$	Fator de empacotamento
$Q$	Taxa de desgaste por deslizamento;
$K$	Coefficiente de desgaste adimensional
$W$	Carga normal aplicada
$H$	Dureza

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1 Desgaste Abrasivo.....	3
2.1.1 Definição.....	3
2.1.2 Mecanismo de Desgaste.....	4
2.1.3 Variáveis.....	5
<b>3 TESTE DE DESGASTE.....</b>	<b>8</b>
3.1 Teste Roda de Borracha / Areia Seca (Norma ASTM G65).....	9
3.2 Teste Roda de Borracha / Areia Seca (MODIFICADO).....	10
<b>4 MATERIAIS E METODOS.....</b>	<b>12</b>
4.1 Preparação das Amostras.....	12
4.2 Teste de Desgaste – Roda de Borracha / Areia Seca.....	13
4.2.1 Equipamento.....	13
4.2.2 Parâmetros de Testes .....	15
4.2.3 Determinação Topográfica.....	19
<b>5 RESULTADOS e DISCUSSÕES .....</b>	<b>19</b>
5.1 Acabamento Superficial.....	19
5.2 Efeito da Carga.....	20
5.3 Topografia.....	27
5.4 Efeito da Velocidade.....	29
5.5 Determinação do Fator de Empacotamento.....	35
5.6 Efeito da Variação da vazão na calha na taxa de desgaste.....	36
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>41</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>42</b>
<b>8 BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>43</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em meados dos anos 80 houve um aumento significativo no estudo sobre desgaste (França e colaboradores, 2004). Nos Estados Unidos, por exemplo, estima-se que o custo com o desgaste seja de 6 a 7 % do produto nacional total, a partir do momento que se notou a importância do desenvolvimento de materiais com maiores resistências ao desgaste, começaram a ser feitas várias pesquisas na área de desgaste em geral (Catai e colaboradores, 2004). Dentre os vários tipos de desgaste existente daremos ênfase ao desgaste abrasivo, que é um dos mais importantes dentro dos processos tribológicos (Catai e colaboradores, 2004), pois correspondem a aproximadamente 50 % dentre todos os tipos de desgastes (**figura 1**). O desgaste abrasivo tem uma importância considerável para o setor industrial, como por exemplo: escavações, nas movimentações de terras, minerações e processamentos de minerais, ferramentas da agricultura, chutes e funis das plantas de processamento de minério, processamento de materiais e diversos equipamentos. O desgaste de peças, os custos com o reparo e com a substituição destas peças significam elevadíssimos gastos para as empresas (Catai e colaboradores, 2004).



**Figura 1** – Importância do desgaste abrasivo (Albertin, 2003).

Existem diversos testes de desgaste que tentam reproduzir os mecanismos envolvidos nos sistemas com situações práticas, e têm como objetivo orientar a seleção e o desenvolvimento de materiais resistentes ao desgaste.

Os testes de desgaste abrasivo podem ser de dois ou três corpos. No teste a dois corpos as partículas abrasivas deslizam sobre a superfície, ocorrendo um desgaste geralmente severo e produzindo mecanismos de desgaste do tipo microcorte e microsulcamento. Nos testes de desgaste abrasivo a três corpos as partículas abrasivas deslizam e/ou rolam sobre a superfície do corpo-contra corpo produzindo mecanismos de microsulcamento e microindentação.

Poucos testes de desgaste são padronizados, dentre os quais, o descrito na norma ASTM G65 consiste em colocar em um plano vertical um corpo de prova com formato retangular e carregá-lo contra uma roda com borda de borracha com dureza específica. Areia é alimentada entre a interface da roda e do corpo de prova, caracterizando, assim, um teste de desgaste abrasivo do tipo três corpos. Este teste é bastante utilizado em muitos trabalhos de pesquisa para a seleção de materiais em aplicações tais como: calhas e alimentadores de minério, moinhos, britadores, equipamentos agrícolas, dentre outros. Em geral com a finalidade de seleção de materiais onde se prioriza elevadas durezas e presença de partículas duras (não há necessidade de compromisso com a tenacidade).

Uma característica importante do equipamento roda de borracha é a não quantificação da vazão mássica de areia que passa na interface entre o corpo de prova e a roda de borracha. Além disso, devido a características construtivas de projeto, vibrações podem surgir no braço de alavanca durante a execução de ensaios. Estes fatores podem influir na determinação quantitativa da taxa de desgaste.

Hutchings e Stevenson (1996), propuseram um novo teste roda de borracha/areia seca que difere significativamente do teste padrão por dispor o corpo de prova em um plano horizontal. Isto permite uma maior rigidez do sistema, atenuando as vibrações, bem como a quantificação exata da vazão de abrasivo consumido e, conseqüentemente, o número de partículas na zona de contato. No equipamento

proposto uma célula de carga é utilizada para medir a força de fricção dinâmica sobre a amostra.

Um equipamento do tipo roda de borracha/areia seca modificado, semelhante ao de Hutchings e Stevenson (1996), foi projetado e construído por Tottola (2003) e Stelzer (2005), na Universidade Federal do Espírito Santo. Uma validação deste equipamento com base nos mecanismos e taxas de desgastes obtidos por Hutchings e Stevenson (1996) deverá ser realizada.

Assim, este trabalho tem como objetivo verificar o efeito da carga aplicada, da velocidade de deslizamento e da concentração de areia no desgaste abrasivo do aço 1020 e comparar os resultados com os da literatura. Os testes serão realizados no equipamento roda de borracha/areia seca modificado.

No capítulo 3 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o assunto. No capítulo 4 são descritos os testes de desgaste abrasivo. No capítulo 5 são descritos os procedimentos experimentais e equipamentos utilizados neste trabalho. No capítulo 6 são apresentados os resultados e discussões e, finalmente, no capítulo 7 as conclusões.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Desgaste Abrasivo**

#### **2.1.1 Definição**

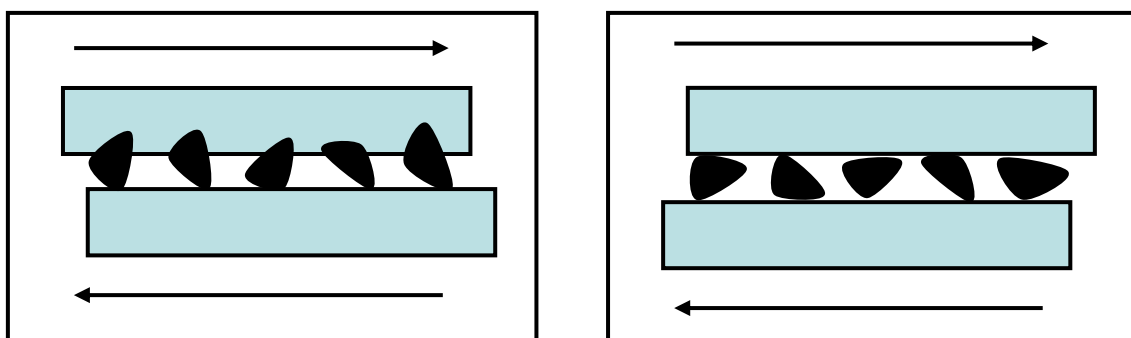
O termo desgaste pode ser definido com a “remoção do material de uma superfície pela ação mecânica de partículas duras em contato com esta superfície” (Rabinowicz, 1966). O desgaste abrasivo é causado pela interação mecânica de saliências grosseiras ou partículas não metálicas contra as superfícies de trabalho, provocando perda de massa por corte ou por arrancamento. Estas partículas podem ser, por exemplo, um mineral como a sílica ou um fragmento de desgaste de material de alta dureza. Protuberâncias, como a rugosidade superficial, podem agir como partículas de alta dureza caso esta superfície apresente maior dureza que a

contra-peça (Suzuki, 2004). Já a norma DIN 50320 (1979) define o desgaste abrasivo como: Remoção de material devido a arrancamento. Outros termos usados para descrever o desgaste abrasivo são: abrasão “high stress”, onde as partículas abrasivas são quebradas durante o processo de desgaste devido à força de esmagamento ser excedida, e abrasão “low stress” que ao contrario suas partículas não se quebram.

### 2.1.2 Mecanismo de desgaste

Existem dois tipos de teste para a avaliação do desgaste abrasivo, sendo um denominado de teste 2 corpos e outro de teste 3 corpos. No teste de desgaste abrasivo a dois corpos, as partículas abrasivas deslizam sobre a superfície de desgaste como mostrado na **figura 2a**. Nesse tipo de desgaste a interação entre as partículas abrasivas e a superfície pode ocasionar os mecanismos de desgaste tais como: microcorte e microsulcamento, os quais resultam em uma menor taxa de desgaste em materiais de elevada dureza. No teste de desgaste abrasivo a três corpos (**figura 2b**) as partículas rolam e/ou deslizam sobre a interface corpo-contra corpo. No caso de rolamento das partículas, estas irão indentar a superfície e conseqüentemente promover os mecanismos de microtrincamento, para materiais frágeis, e/ou microsulcamento para materiais dúcteis. No caso de deslizamento os mecanismos serão semelhantes ao do teste de desgaste a dois corpos.

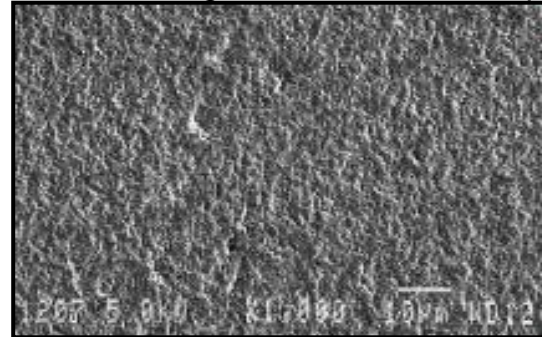
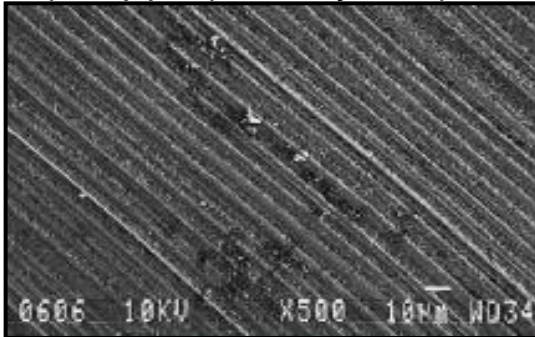
Em geral o teste de desgaste abrasivo a dois corpos é considerado como severo, por isso, geralmente a taxa de desgaste é maior do que aquela causada pelo teste de desgaste a três corpos. As figuras 3a e 3b mostram os mecanismos característicos em condições de deslizamento e rolamento das partículas abrasivas respectivamente.



(a)

(b)

**Figura 2 - (a)** Representação esquemática do teste de desgaste abrasivo dois corpos; **(b)** Representação esquemática do teste de desgaste abrasivo três corpos.



(a)

(b)

**Figura 3 - (a)** aspecto característico do mecanismo de desgaste microcorte e microsulcamento em condições de deslizamento das partículas e **(b)** aspecto característico de indentações múltiplas em condições de rolamento das partículas abrasivas, (Trezona, Allsopp e Hutchings, 1999).

### 2.1.3 Variáveis que influenciam na taxa de desgaste abrasivo

Os principais parâmetros que influenciam no desgaste abrasivo são: a dureza dos materiais em contato, a geometria das partículas abrasivas, a intensidade do carregamento e a distância de deslizamento de desgaste.

De acordo com França e colaboradores (2004), uma grande variedade de parâmetros também influencia nos mecanismos de desgaste, tais como:

- parâmetros de material: composição, tamanho do grão, módulo de elasticidade, condutividade térmica, dureza, etc.
- parâmetros de projetos: forma, carregamento, tipo de movimento, aspereza, vibração, número de ciclos, etc.
- parâmetros de meio ambiente: temperatura, contaminação, umidade, atmosfera, etc.
- parâmetros de lubrificação: tipo de lubrificante, estabilidade de lubrificante, tipo de fluido, lubrificação, etc.

A seguir será apresentado de forma resumida o efeito de alguns destes parâmetros.



### **(a) Influência do Tamanho de Grão**

O tamanho de grão influencia diretamente nos mecanismos de desgaste. Existe uma relação,  $w/r$ , onde  $w$  é a espessura da marca de desgaste e  $r$  o raio esférico da partícula (grão) e dependendo desta relação, a partícula de grão abrasivo irá deformar plasticamente ou cortar a superfície (França e colaboradores, 2004).

Para ambos os tipos de teste de desgaste abrasivo (dois ou três corpos), um tamanho crítico da partícula abrasiva pode ser observado. O desgaste volumétrico aumenta com o aumento do tamanho do grão abrasivo para esta dimensão crítica. Sobre este valor crítico a taxa de desgaste é amplamente independente do tamanho do grão abrasivo (França e colaboradores, 2004).

A forte diferença entre a dureza das partículas abrasivas e do material a ser desgastado influencia esta dimensão crítica do grão. Um estudo de desgaste abrasivo de três corpos afirma que o mecanismo de desgaste foi similar ao relatado para um desgaste abrasivo de 2 corpos. Neste caso, segundo França e colaboradores (2004), a taxa de desgaste poderia ser descrita de acordo com a teoria de desgaste de Archard. Ele ainda afirma que no teste de desgaste abrasivo a três corpos a taxa de desgaste é menor do que no desgaste abrasivo de dois corpos.

### **(b) Influência da Carga Aplicada**

A carga aplicada sobre os corpos durante o processo de desgaste abrasivo também é um dos fatores que influenciam fortemente nas taxas de desgaste dos materiais (França e colaboradores, 2004).

O efeito da carga na taxa de desgaste obtida tanto para os materiais compostos como para as ligas é bem mais severo que o efeito do tamanho dos grãos abrasivos. Sendo que em relação aos materiais por estes testados (ligas e compósitos), o efeito

da carga e do tamanho do abrasivo na taxa de desgaste é relativamente maior no caso dos materiais compostos do que nas ligas. (França e colaboradores, 2004).

França e colaboradores (2004), também afirmam que a extensão da região deformada plasticamente na sub-superfície depende não só do tamanho do grão abrasivo, mas também da carga aplicada.

### **(c) Influência da Dureza**

A influência dos carbonetos na resistência ao desgaste depende de sua dureza em relação à dureza da matriz. Para materiais caracterizados de carbeto, dispersos em uma matriz macia, uma diminuição no caminho livre médio pela redução do tamanho do carboneto resulta em melhores resistências ao desgaste. Uma redução no tamanho do grão aumenta a dureza e também conduz ao aumento da resistência ao desgaste (Catai e colaboradores, 2004).

Hutchings (1992), definiu que a dureza do grão abrasivo deve ser de 1,2 vezes maior que a da superfície desgastada abrasivo para o risco da superfície aconteça. No estudo de Catai e colaboradores (2004), também é comentado que a dureza do material determina a profundidade da indentação das partículas abrasivas, influenciando a profundidade relativa penetrada. Quanto maior a profundidade de indentação crítica para fratura, maior a taxa de desgaste é alta.

Ainda em relação à influência da dureza no desgaste abrasivo, experimentos comprovaram que há uma correlação direta entre a dureza dos materiais e a taxa de desgaste abrasivo. Pesquisas provam claramente a influência da dureza do material na perda volumétrica do corpo de prova, mostrando que quanto maior a dureza do material utilizado, menor o desgaste abrasivo do corpo de prova em atrito.(Catai e colaboradores, 2004).

### **(d) Influência da Velocidade de Deslizamento**

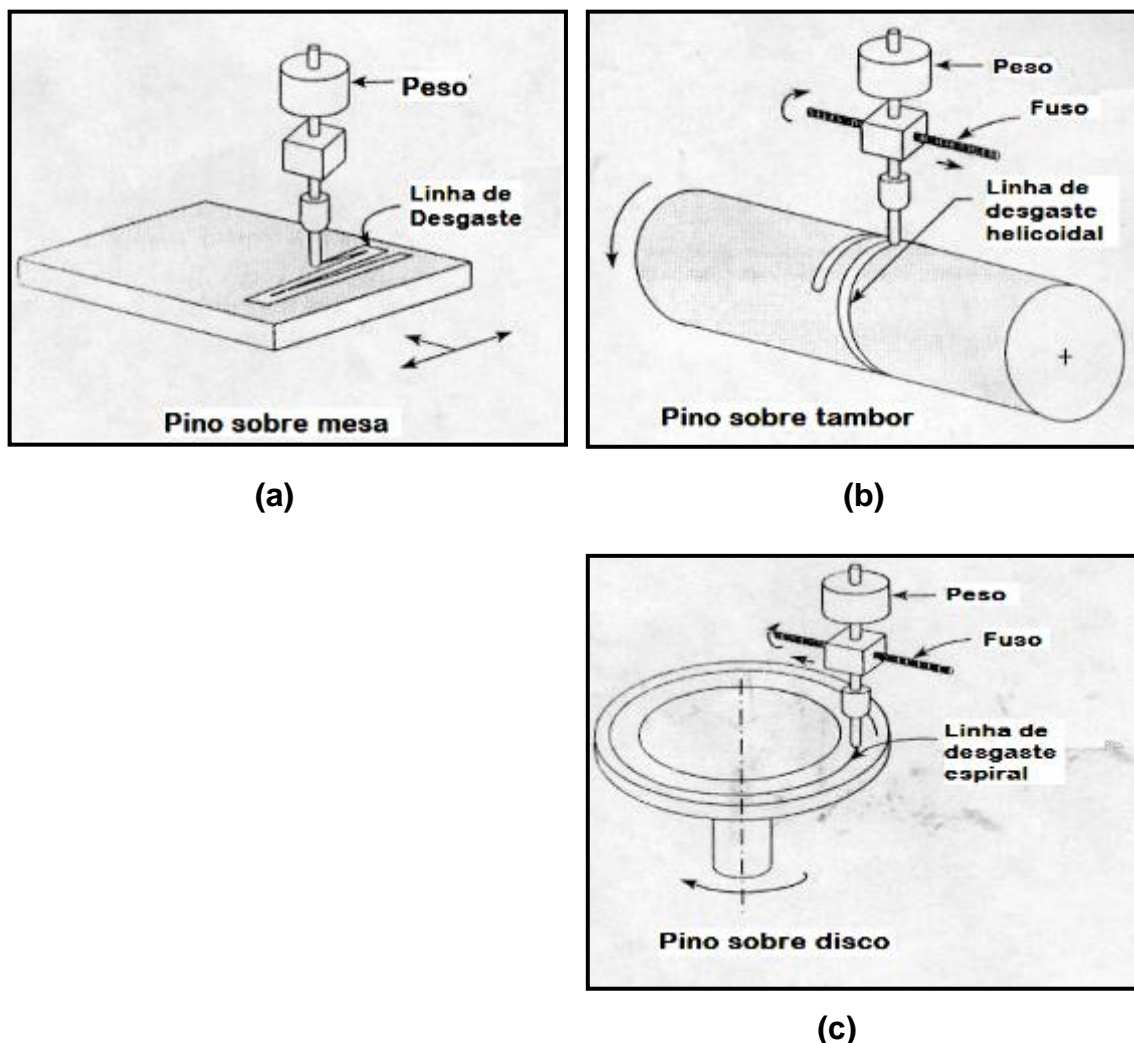
A influencia da velocidade de deslizamento na taxa de desgaste é notada observando o crescimento desta taxa para um valor máximo e o seu decréscimo em

alta velocidade, mesmo quando mantida a dureza da roda, a taxa de alimentação abrasiva e a carga aplicada (Hutchings e Stevenson,1996).

Uma serie de teste foi realizado com corpo de prova de aço macio sobre a roda de polyurethano com uma dureza de 61 IRHD em diferentes velocidades. A taxa de alimentação de areia foi mantida em aproximadamente 1,1g/s e a carga aplicada foi mantida constante a 98,1N. A taxa de desgaste é aumentada com a velocidade de deslizamento para um valor máximo, e então, há um decréscimo em alta velocidade (Hutchings e Stevenson,1996).

### **3 TESTES DE DESGASTE**

Os testes em laboratórios mais comumente usados para desgaste abrasivo empregam um corpo de prova em forma de pino deslizando contra um abrasivo fixo (**figura 4**), ou uma roda giratória deslizando contra um corpo de prova plano com perda de partículas abrasivas que são alimentadas continuamente entre os dois (**figura 5**).

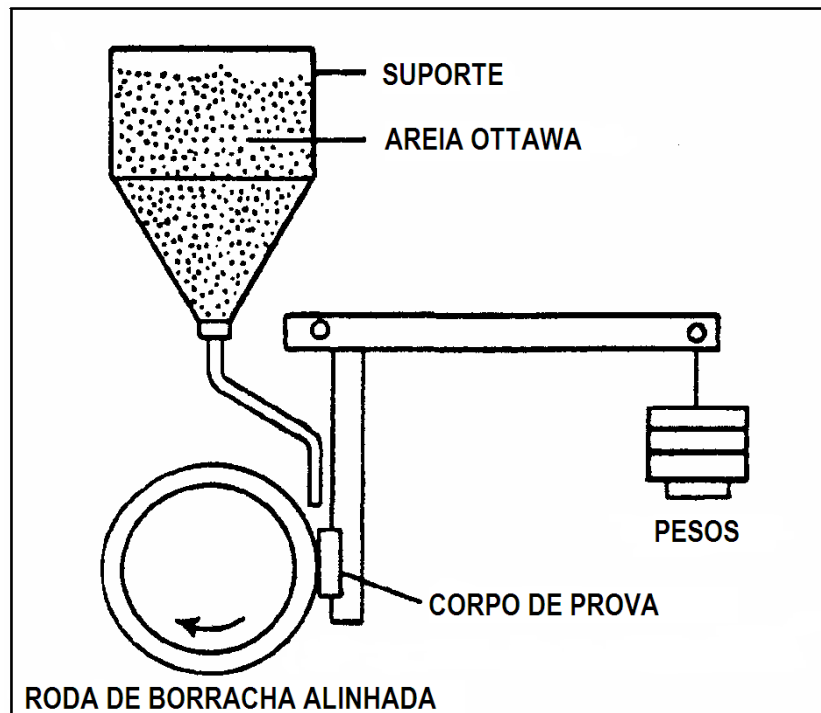


**Figura 4** - Representação esquemática de testes de desgaste abrasivo: **(a)** Pino sobre mesa; **(b)** Pino sobre tambor; **(c)** Pino sobre disco (Hutchings, 1992). O teste da figura 5 é do tipo 3 corpos onde o abrasivo é introduzido entre um corpo de prova e uma roda com borda de borracha com determinada dureza atritando a superfície. A seguir o teste roda de borracha /areia seca será detalhado.

### 3.1 Teste Roda de Borracha / Areia Seca (Norma ASTM G65)

O teste de roda de borracha/areia seca envolve a abrasão do corpo de prova com areia de tamanho e composição controlada. O abrasivo é introduzido entre a interface do corpo de prova e da roda giratória com uma borda de borracha de chlorobutil de dureza específica, o corpo de prova é pressionado contra a roda giratória com uma força específica por um braço de carga enquanto que 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 se apóia dentro de um plano o qual é

aproximadamente tangente à superfície da roda de borracha, e normal ao longo do diâmetro horizontal no qual a carga é aplicada. A duração do teste e a força aplicada pelo braço são variáveis conforme procedimento especificado (Hutchings e Stevenson, 1996). Os corpos de provas são pesados antes e depois dos testes e a perda de massa é registrada.



**Figura 5** - Diagrama esquemático do aparelho de teste (Hutchings e Stevenson, 1996).

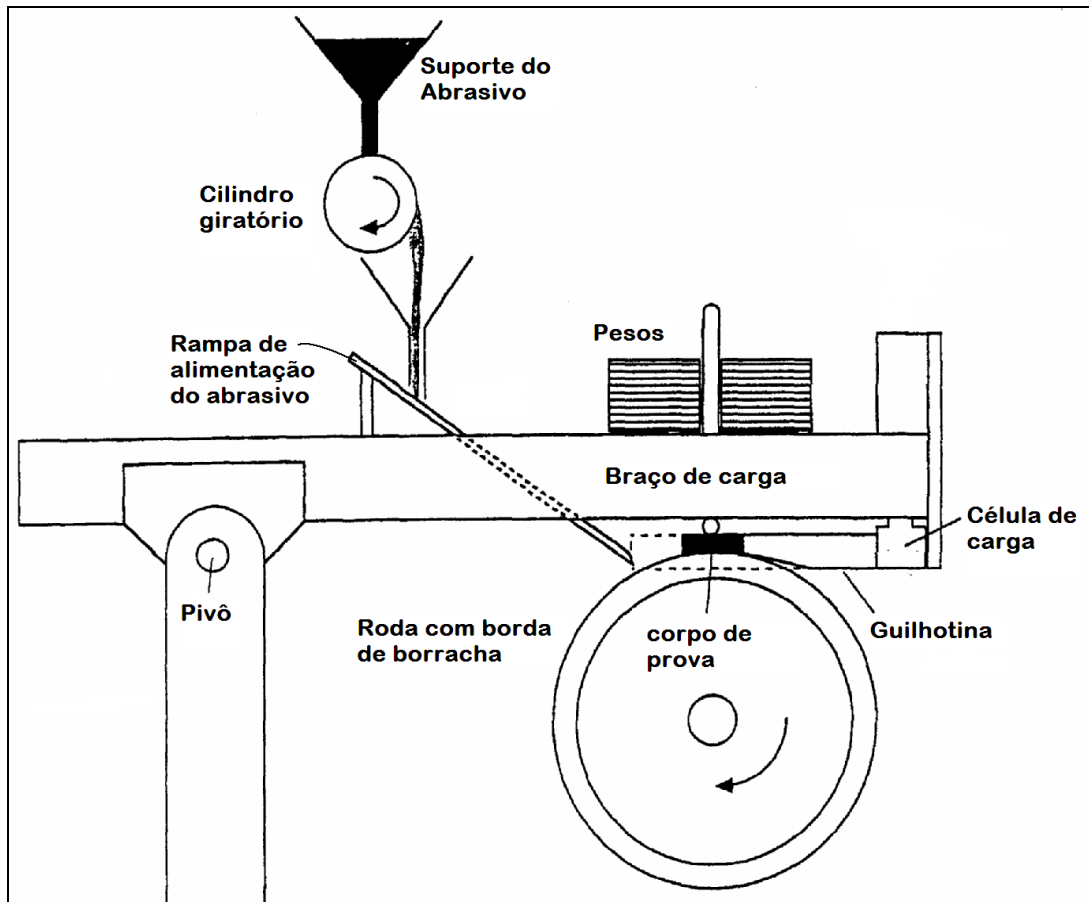
### **3.2 Teste Roda de Borracha / Areia Seca (MODIFICADO)**

Hutchings e Stevenson (1996) projetaram e construíram um equipamento roda de borracha/areia seca modificado. Esse equipamento está esquematicamente representado na **figura 6**. O equipamento difere significativamente do método padrão. O corpo de prova é disposto horizontalmente, e uma célula de carga é colocada para medir a força de fricção dinâmica sobre o corpo de prova. A amostra é colocada num aparato fixado no braço de carga, e a carga normal é aplicada sobre ele pelo contato com uma esfera fixa que pressiona de encontro a sua superfície superior.

O sistema de alimentação mostrado na **figura 6** foi projetado para dar uma taxa constante de alimentação e produzir uma camada uniforme das partículas sobre a

roda. A taxa de alimentação de areia é controlada pelo cilindro de rotação com sulcos rasos em sua superfície, dirigida por um motor variável de velocidade.

Inevitavelmente, alguns abrasivos são perdidos na borda da roda, mas este pode ser quantificado coletando-os separadamente da areia que passa através do contato com o corpo de prova. Desta maneira pode ser determinada a quantidade de abrasivo que passa realmente pelo corpo de prova, o que não é possível com o projeto padrão do ASTM.



**Figura 6** - Desenho esquemático do equipamento roda de borracha/areia seca modificado por Hutchings e Stevenson (1996).

Hutchings e Stevenson (1996), fizeram experimentos avaliando a influencia de alguns parâmetros, tais como:

- A influencia da carga aplicada versus a taxa de desgaste;
- A velocidade de deslizamento versus a taxa de desgaste;
- A dureza da borracha

Foram avaliados também o contato entre o corpo de prova e o abrasivo, a força de atrito, o comportamento da temperatura do corpo de prova durante o teste e a variação da dureza da borracha com a temperatura.

Os resultados encontrados por estes pesquisadores serão discutidos junto com os resultados obtidos neste trabalho.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

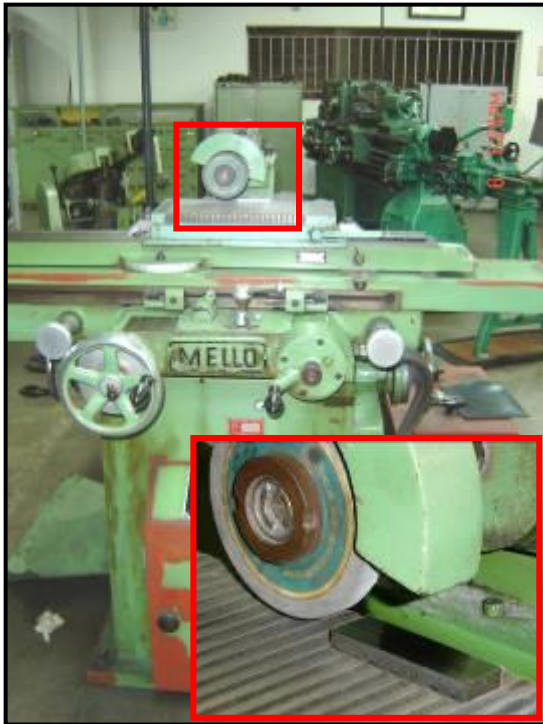
### 4.1 Preparação das Amostras

Neste trabalho foram utilizadas amostras do AISI 1020, usinadas em dimensões de 25x75x10 mm de acordo com o padrão ASTM G65. Foi confeccionado um total de 39 corpos de prova.

As amostras foram retificadas no laboratório do CEFET-ES (**figura 7**) com o objetivo de obter um padrão de acabamento superficial dentro do especificado pela norma ASTM G65, isto é, rugosidade abaixo 0,8  $\mu\text{m}$ , bem como garantir que todos os corpos de prova tivessem o mesmo acabamento.

A medição dos parâmetros de rugosidade foi feita no laboratório de metrologia da UFES com um rugosímetro da marca Taylor Hobson (**figura 8**). A medição foi realizada em 5 corpos de prova, selecionados por lotes de retifica, em dois pontos transversais a direção da retifica, na face e contra face das amostras e com um comprimento de varredura de 2,5 mm.





(a)



(b)



(c)

**Figura 7 - (a)** Equipamento usado na retífica dos corpos de prova; **(b)** Corpo de prova antes da retífica; **(c)** Corpo de prova depois da retífica.

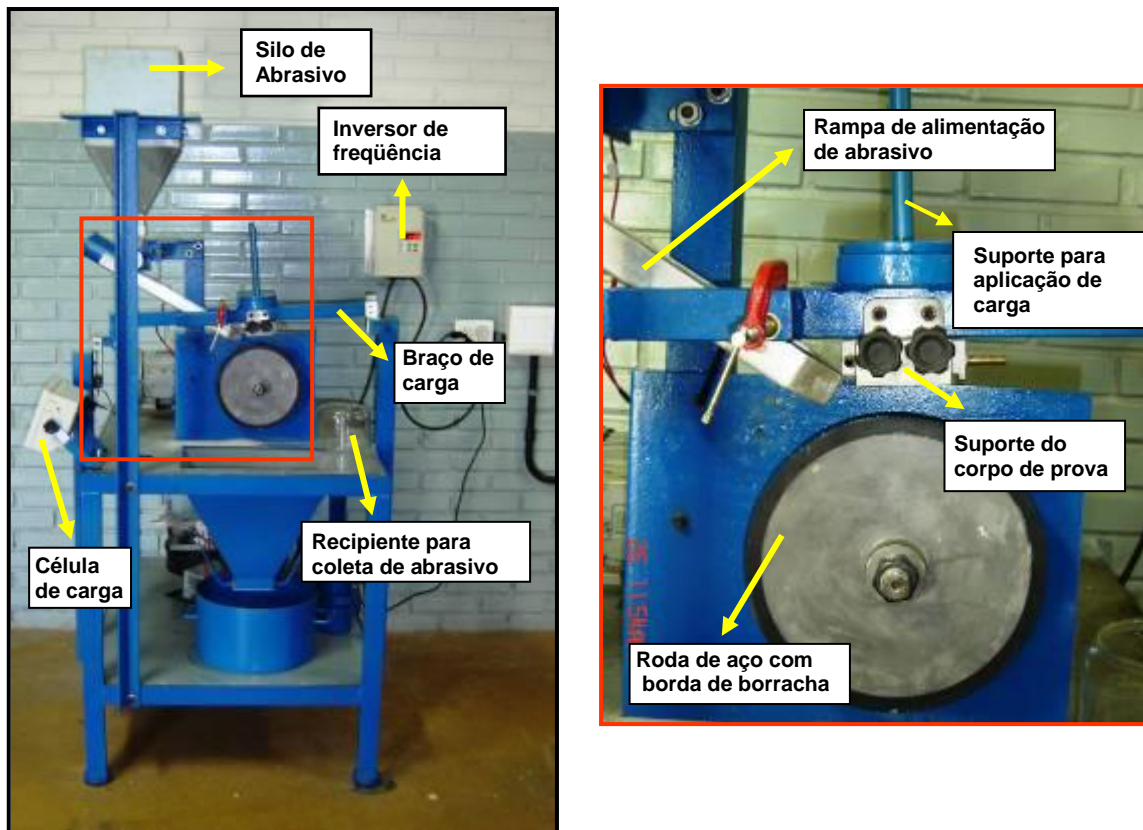


**Figura 8 - Rugosímetro Taylor Hobson - medição dos parâmetros topográficos**

## 4.2 Teste de desgaste - Roda de Borracha/ Areia Seca.

### 4.2.1 Equipamento

O equipamento Roda de Borracha/Areia Seca modificado utilizado neste trabalho é apresentado na **figura 9**.



**Figura 9** - Equipamento Roda de Borracha / Areia Seca do laboratório de materiais da UFES.

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 chlorobutyl com dureza 60 IRHD, com diâmetro de 114,11 mm, espessura de 12,7 mm e perímetro de 717 mm.

#### 4.2.2 Parâmetros de teste

Em todos os testes utilizou-se como abrasivo a Areia Normal Brasileira do IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica), NBR-7214 de fração média fina com tamanho médio de 0,3-0,6 mm (50 Mesh,) e densidade de aproximadamente 2,6 g/cm<sup>2</sup>. Variaram-se a velocidade de deslizamento, o fluxo de areia na calha e a carga normal aplicada sobre o corpo de prova segundo a **tabela 1**.

**Tabela 1** - Parâmetros de teste utilizados

Parâmetros	Valores
Velocidade Linear (m/s)	0,3; 0,6; 0,9 e 1,2
Fluxo de abrasivo (g/s)	1,12 e 0,6
Carga (N)	50,1; 74,2; 100,6 e 125,5

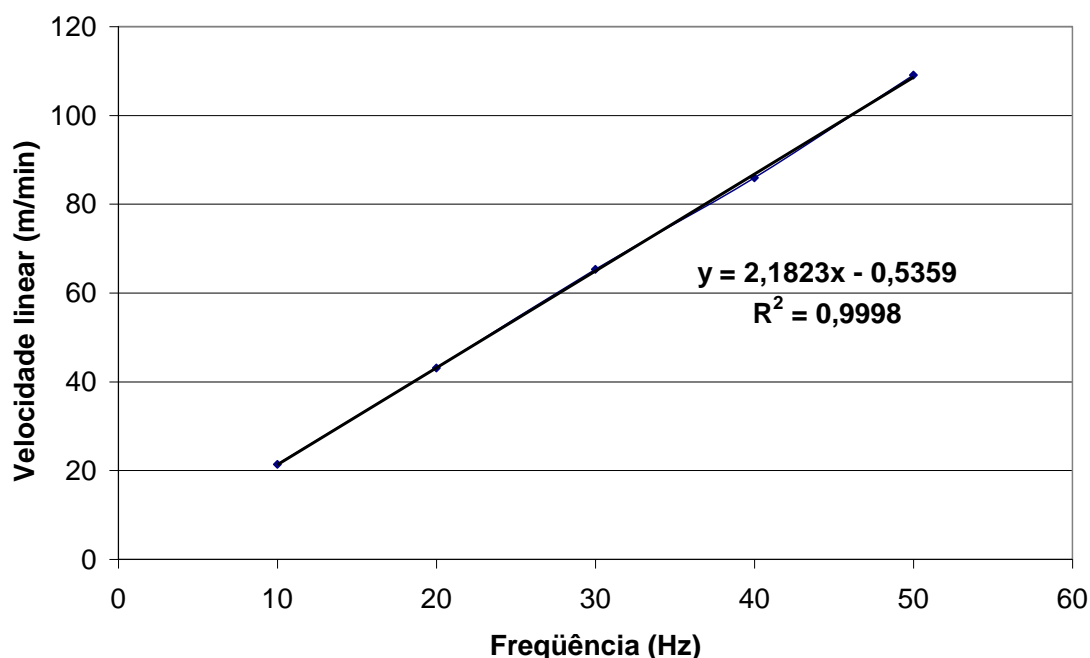
##### (a) Determinação da velocidade de deslizamento

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

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (1)$$

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

Variando a frequência de 10 a 50 Hz, com incrementos de 10 Hz obteve-se uma relação linear entre a frequência e a velocidade de deslizamento. O gráfico da **figura 10** 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 frequências de 8,5; 16,7; 25,0 e 27,7 Hz respectivamente.



**Figura 10** – Gráfico de Relação do motor: Freqüência versus Velocidade linear

Os testes foram realizados com incrementos de 71,8 m na distância de deslizamento para se determinar o regime permanente. O tempo de teste para cada incremento nas diferentes velocidades de deslizamento esta especificado na **tabela 2**. O tempo mínimo de cada incremento para a maior velocidade de deslizamento foi de 1,2 minutos e para a menor velocidade de 4 minutos. O numero mínimo de incrementos estabelecido foi de 4 vezes resultado em um comprimento de deslizamento mínimo de 287,2 metros. Hutchings e Stevenson (1996) estabeleceram que a distância mínima de teste deve corresponder a uma marca de desgaste na amostra de 22 mm.

**Tabela 2** – Tabela de variação de velocidade de deslizamento

Velocidade Linear (m/s)	Freqüência (Hz)	Tempo de deslizamento (min)
0,30	8,5	4,0
0,60	16,7	2,0
0,90	25,0	1,3
1,20	27,7	1,2

## (b) Determinação do fluxo de abrasivo

Para diferenciar o fluxo de abrasivo que cai na calha e o fluxo que passa na interface amostra/roda de borracha serão adotadas as seguintes nomenclaturas:

$W_c$  = Vazão de abrasivo da calha (g/s);

$W_a$  = Vazão de abrasivo consumido (g/s).

A vazão de abrasivo da calha ( $W_c$ ) foi determinada pela coleta da areia que cai pela rampa de alimentação durante o tempo de 2 minutos. Após a coleta a areia foi pesada e assim calculada a vazão em gramas/segundo. Este procedimento foi realizado no mínimo 4 vezes.

Foram variados dois níveis de vazão, sendo um de 1,12 g/s e outro de 0,6 g/s. A vazão de 1,12 g/s foi obtida com a máxima rotação do cilindro de alimentação, isto é, 23 RPM, e a vazão de 0,6 g/s com uma rotação de 12 RPM (**tabela 3**), as quais foram medidas pela contagem de rotação por minuto do tambor de alimentação.

**Tabela 3** - Taxa de fluxo de massa líquida de abrasivo em função da rotação do tambor [g/s]:

Rotação (RPM)	Fluxo (g/s)
23	1,12
12	0,60

A vazão de abrasivo consumido  $W_a$  foi determinada pela coleta dos abrasivos que passaram pela interface corpo de prova-roda de borracha, a cada teste (incremento). Considerando que em cada condição de teste foram ensaiadas três amostras, com 4 incrementos cada, a vazão média foi calculada com um mínimo 4 e um máximo de 12 coletas.

## (c) Determinação da carga

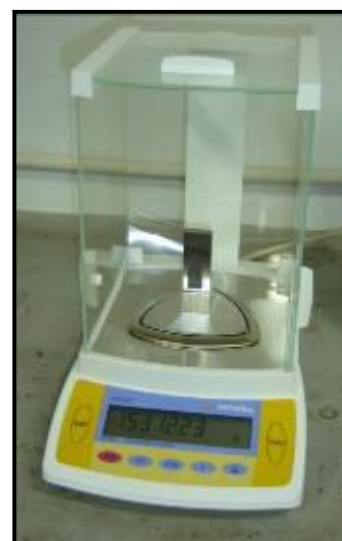
A carga aplicada sobre as amostras leva em consideração o peso do braço articulado de (44 N) e o incremento é feito por contrapesos (anilhas). A **tabela 4** apresenta os pesos das anilhas.

**Tabela 4** - Tabela de peso

Número da Anilha	Massa (g)	Peso (N)
1	4,737	47,37
2	2,024	20,24
3	1,962	19,62
4	1,499	14,99
5	1,157	11,57
6	0,919	9,19
7	0,775	7,75
8	0,607	6,07
9	0,471	4,71
10	0,305	3,05
Braço Articulado	4,400	44,00

**(d) Determinação da taxa de desgaste**

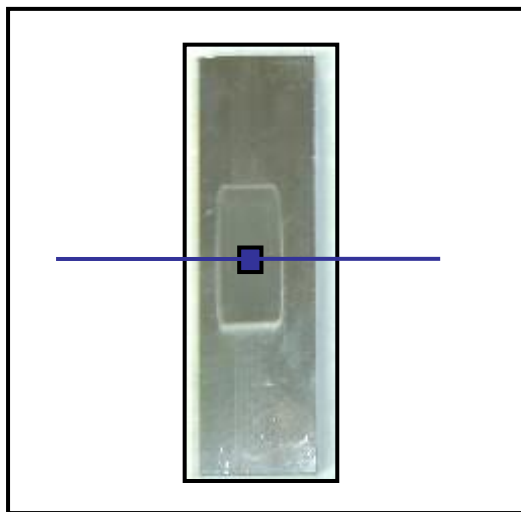
A limpeza dos corpos de prova foi realizada com álcool em um aparelho ultra-som Thornton (**figura 11a**) durante 10 minutos. Separadamente cada corpo de prova foi secado durante 2 minutos e pesado em uma balança. Após cada teste de desgaste as amostras foram novamente submetidas à limpeza, secagem e pesagem conforme procedimento descrito anteriormente. A perda de massa foi determinada pelo método gravimétrico em uma balança marca Sartorius (**figura 11b**) com resolução de 5 casas decimais. A taxa de desgaste foi calculada em função da perda de massa pela distancia deslizada. Para cada condição de teste foram realizadas três repetições (3 amostras).



**Figura 11** - (a) Aparelho de ultra-som Thornton; (b) Balança de alta resolução marca Sartorius.

### 4.2.3 Determinação Topográfica

A determinação das características topográficas das amostras após o desgaste foi feita em um interferômetro laser da marca UBM, modelo Expert IV, com precisão de  $0,5 \mu\text{m}$  no deslocamento horizontal. Foram analisadas duas condições de teste, sendo uma com menor carga normal ( $50,1 \text{ N}$ ) e outra com maior carga normal ( $125,5 \text{ N}$ ). Analisou-se uma área de  $1 \text{ mm}^2$ , com uma densidade 100.000 pontos na região central do desgaste (**figura 12**).



**Figura 12** - Região central do corpo de prova onde a área foi analisada

Foram feitos perfis de topografia na direção transversal e central à marca de desgaste com um comprimento total de  $16 \text{ mm}$  e densidade de 1000 pontos por  $\text{mm}$  para verificar a uniformidade do desgaste. Os parâmetros de rugosidade foram calculados e as imagens de perfil e área das superfícies foram geradas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Acabamento superficial

A **tabela 5** apresenta os valores dos parâmetros de rugosidade das superfícies das amostras antes dos ensaios. Os valores de  $R_a$  obtidos após a retifica estão abaixo do especificado pela norma ASTM, isto é,  $0,8 \mu\text{m}$ . Os valores apresentaram uma baixa dispersão indicando que as amostras apresentam um acabamento superficial muito semelhante.



**Tabela 5** – Parâmetros de rugosidade das superfícies das amostras antes dos ensaios:

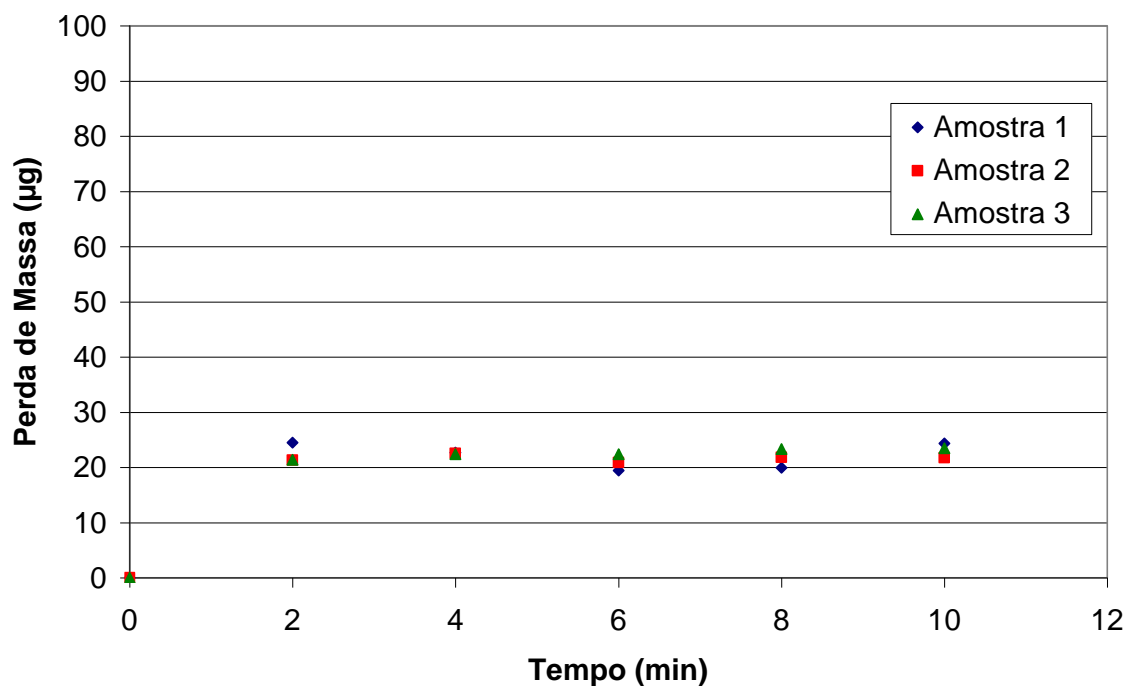
PARÂMETROS	VALORES	
	MEDIA	DESVIO P
Ra	0,4053	0,0286
Rq	0,5335	0,0641
Rz	2,9513	0,4170
Ry	5,5750	1,0758

## 5.2 Efeito da Carga

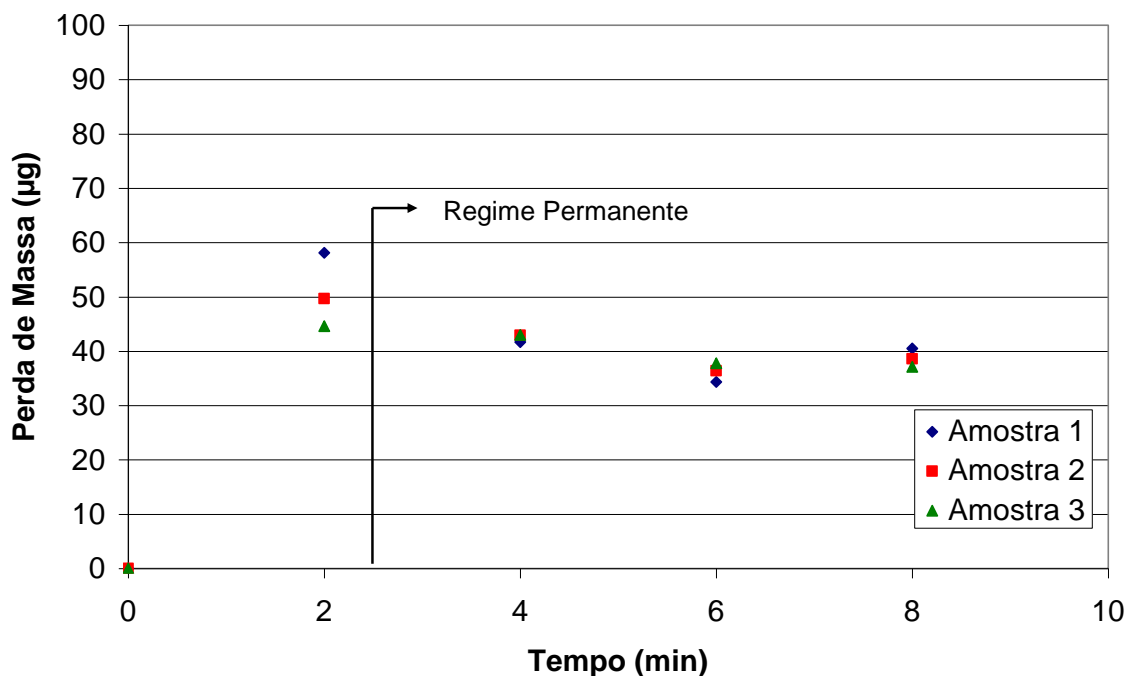
A seguir são apresentados os efeitos da carga na taxa de desgaste. Nestes testes a velocidade foi fixada em 0,6 m/s e a vazão de areia da calha ( $W_c$ ) em 1,12 g/min. Foram variadas 4 cargas: 50,1; 74,2; 100,6 e 125,5 N com incrementos de 71,8 m (2 minutos).

Os gráficos das **figuras 13 a 16** representam a perda de massa instantânea pelo tempo em 3 amostras com suas respectivas cargas. Para os testes realizados com cargas de 50,1 N e 125,5 N o regime permanente foi atingido nos dois primeiros minutos (78,1 m.de deslizamento). Nas cargas de 74,2 N e 100,6 N o regime permanente foi atingido após 4 minutos de teste, isto é, uma distancia de deslizamento de 143,6 metros.

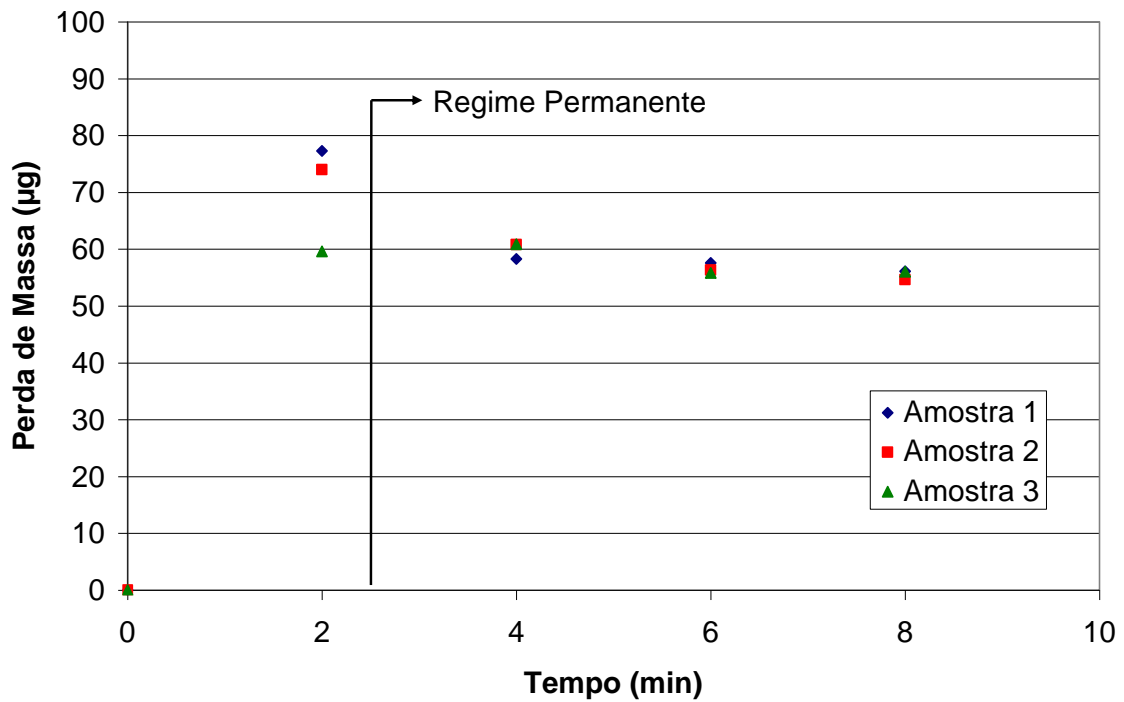




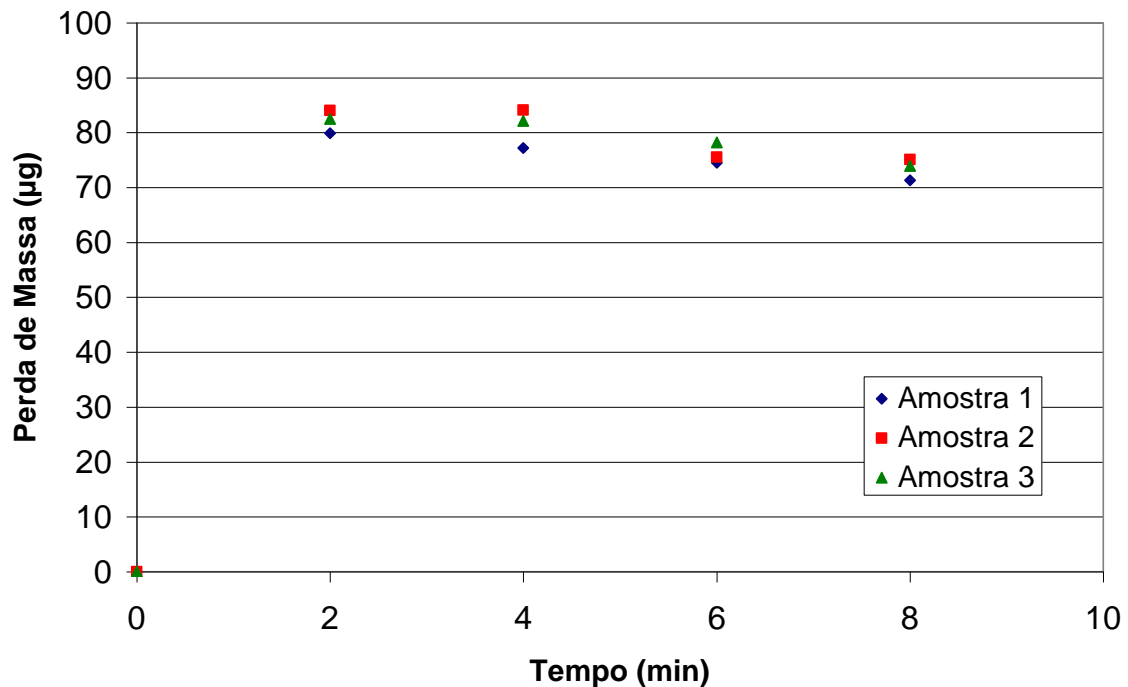
**Figura 13** - Gráfico da variação da perda de massa com o tempo. Carga de 50,1 N, velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha ( $W_c$ ) de 1,12 g/min.



**Figura 14** - Gráfico da variação da perda de massa com o tempo. Carga de 74,2 N, velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha ( $W_c$ ) de 1,12 g/min.



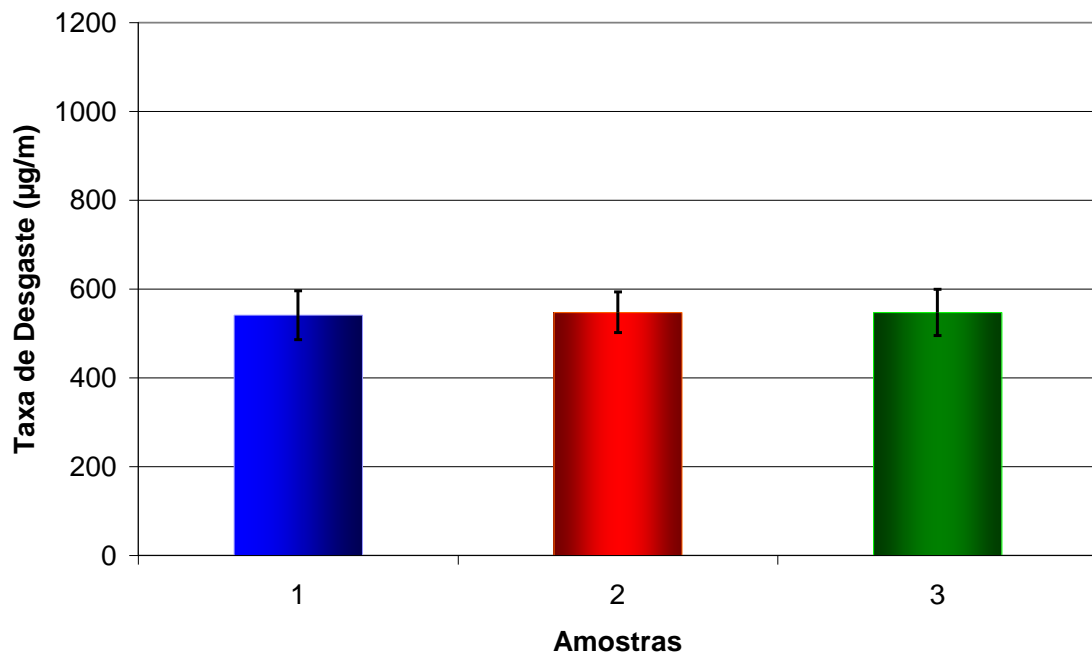
**Figura 15** - Gráfico da variação da perda de massa com o tempo. Carga de 100,6 N, velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha ( $W_c$ ) de 1,12 g/min.



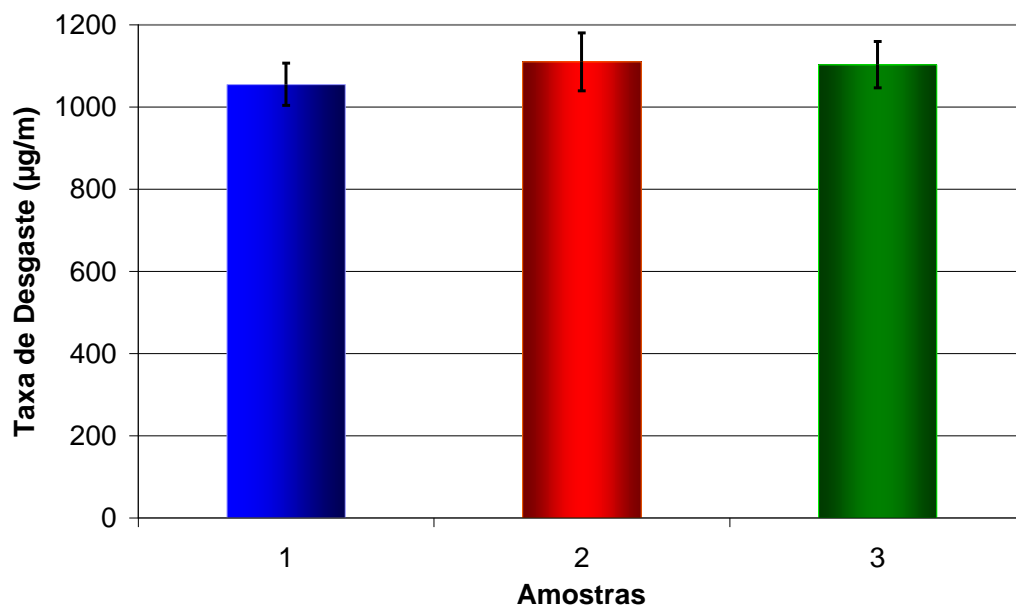
**Figura 16** - Gráfico da variação da perda de massa com o tempo. Carga de 125,5 N, velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha ( $W_c$ ) de 1,12 g/min.

Os gráficos das **figuras 17 e 18** mostram a taxa de desgaste média calculada no regime permanente para as três amostras testadas com cargas de 74,2 N e 125,5 N

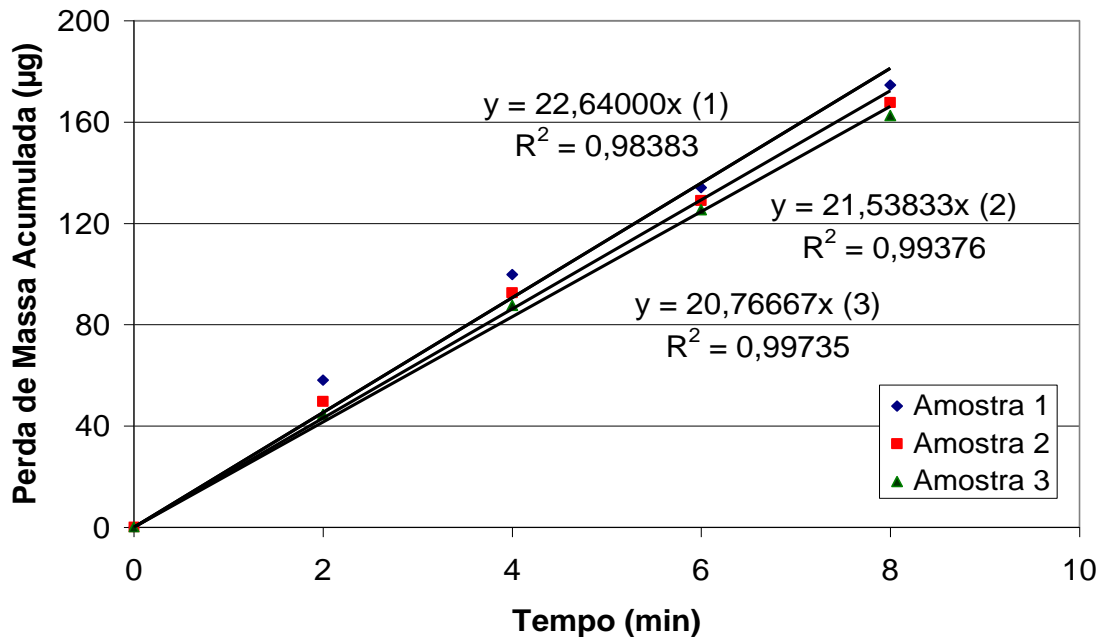
respectivamente. Estatisticamente, para cada condição de teste, a taxa de desgaste média é a mesma para as três amostras, indicando que existe uma repetibilidade nos ensaios. O mesmo pode ser concluído com o gráfico da perda de massa acumulada com o tempo (**figura 19**) que mostrou um comportamento linear. O mesmo foi observado em todas as outras condições de teste.



**Figura 17** – Taxa de desgaste média, carga de 74,2 N, velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha ( $W_c$ ) de 1,12 g/min.



**Figura 18** – Taxa de desgaste média, carga de 125,5 N, velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha ( $W_c$ ) de 1,12 g/min.



**Figura 19** – Perda de massa acumulada com o tempo, carga de 74,2 N, velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha ( $W_c$ ) de 1,12 g/min.

A **figura 20** apresenta o efeito da carga normal sobre a taxa de desgaste abrasivo obtidos neste trabalho. Neste gráfico também foram incluídos os resultados de Hutchings e Stevenson (1996). Os pontos da literatura foram obtidos pelo redesenho, em escala, dos gráficos em AutoCad e os valores de ordenadas e abscissa x e y determinados.

Observa-se que o aumento da carga resulta em um aumento na taxa de desgaste abrasivo de forma linear. Este resultado está de acordo com o modelo de Rabinowicz que estima a taxa de desgaste em função da carga e dureza do material desgastado (**equação 2**).

$$Q = K.W/H \quad (2)$$

Onde:

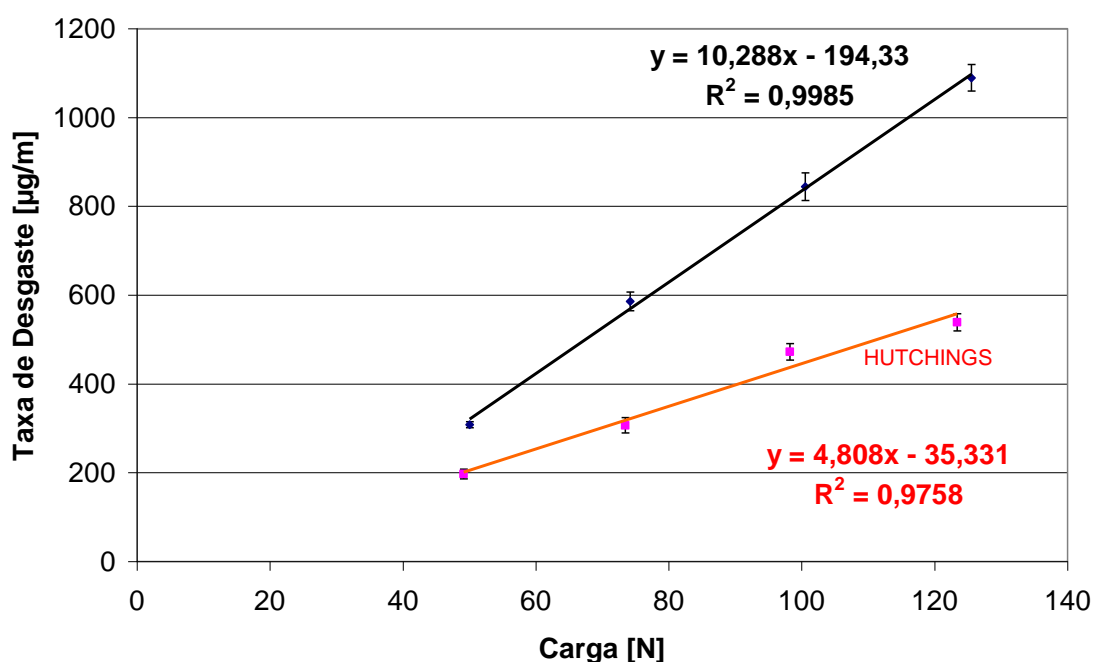
Q = Taxa de desgaste por deslizamento [ $\text{mm}^3/\text{m}$ ];

K = coeficiente de desgaste adimensional [ $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ];

W = carga normal [N];

H = dureza.

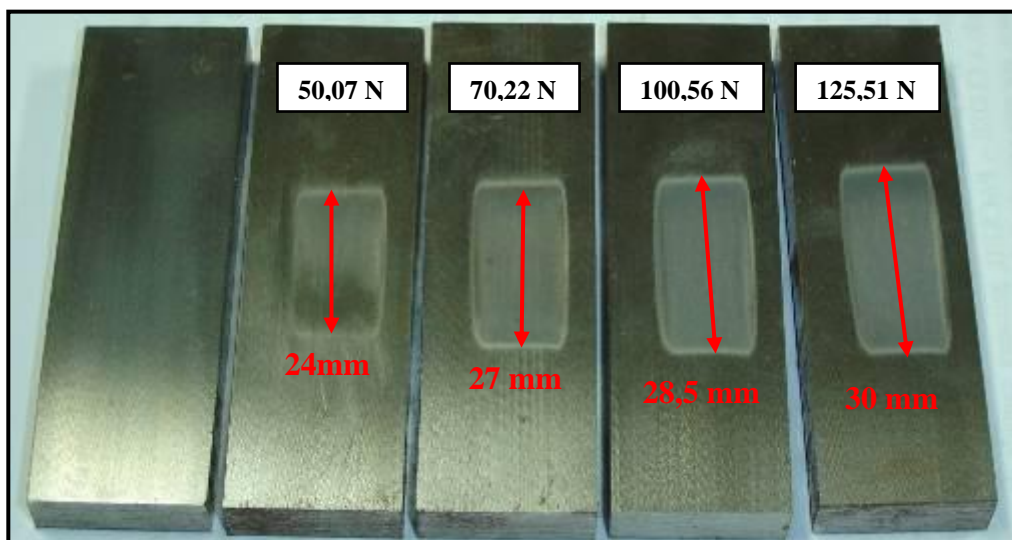
A relação de proporcionalidade linear entre a taxa de desgaste e a carga em testes similares de roda de borracha também foi registrada nos estudos de Ellis e Armstrong e Haworth citados por Hutchings e Stevenson (1996). Exceto para cargas muito altas, onde a taxa de desgaste aumenta mais intensamente com a carga (Avery citado por Hutchings e Stevenson, 1996).



**Figura 20** – Gráfico da taxa de desgaste com a carga normal aplicada. Velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha ( $W_c$ ) de 1,12 g/min.

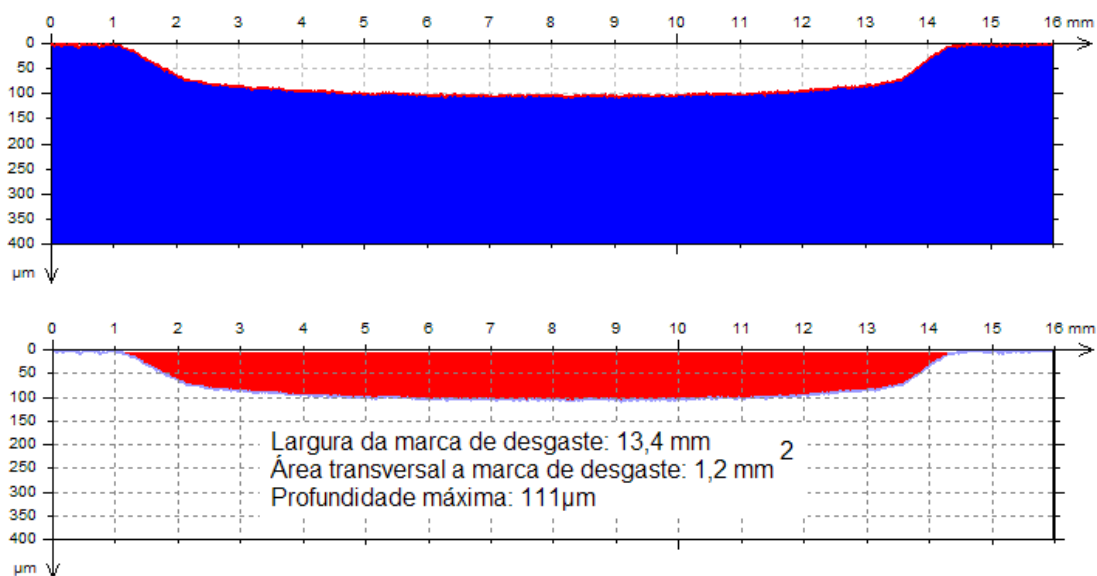
A diferença na grandeza da taxa de desgaste por carga aplicada deste trabalho com a literatura, observadas na **figura 20**, pode ser justificada pela diferença do tamanho de grãos dos abrasivos, onde o tamanho de grão utilizado neste trabalho foi de 0,3-0,6 mm (50 Mesh) e o utilizado pela literatura foi de 0,15-0,3 mm (100 Mesh).

A **figura 21** mostra as marcas de desgaste obtidas nos ensaios para as 4 amostras com suas respectivas cargas. Observa-se que à medida que a carga aumenta a marca de desgaste também aumenta. Isto se deve a uma maior pressão da borracha na superfície das amostras com o aumento da carga.

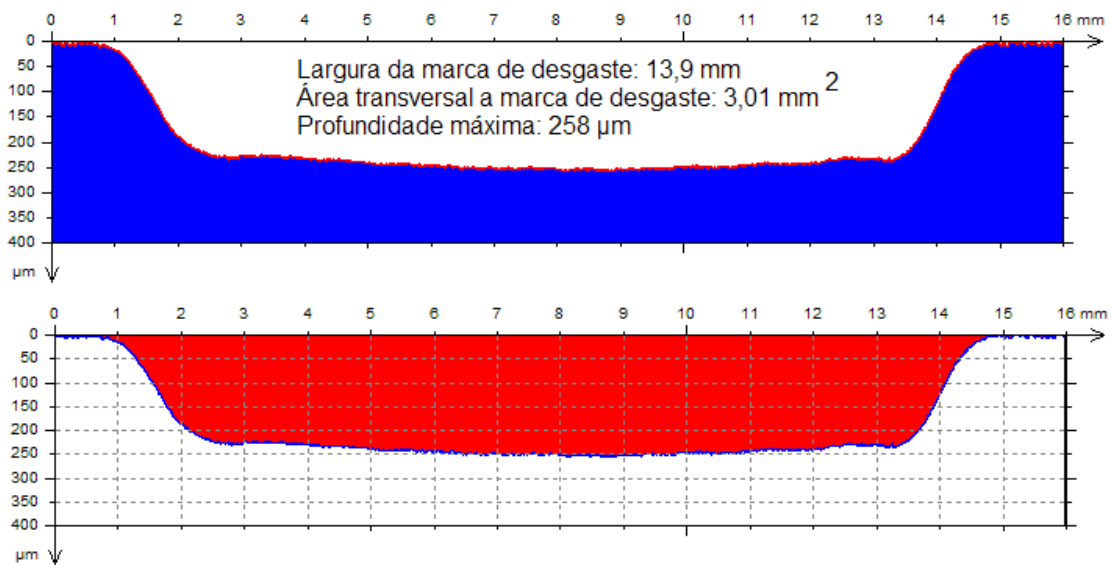


**Figura 21** - Marcas de desgaste em diferentes cargas aplicadas, velocidade de deslizamento 0,6 m/s e vazão de areia da calha (Wc) de 1,12 g/min.

As **figuras 22 e 23** mostram os perfis das marcas de desgaste para a maior carga (125,5 N) e para a menor carga (50,1 N) utilizada neste trabalho. Observa-se uma uniformidade na profundidade das marcas de desgaste decorrente do alinhamento adequado entre a roda de borracha e a amostra. Quanto maior a carga, maior a área da seção transversal da marca de desgaste e conseqüentemente, maior a taxa de desgaste.



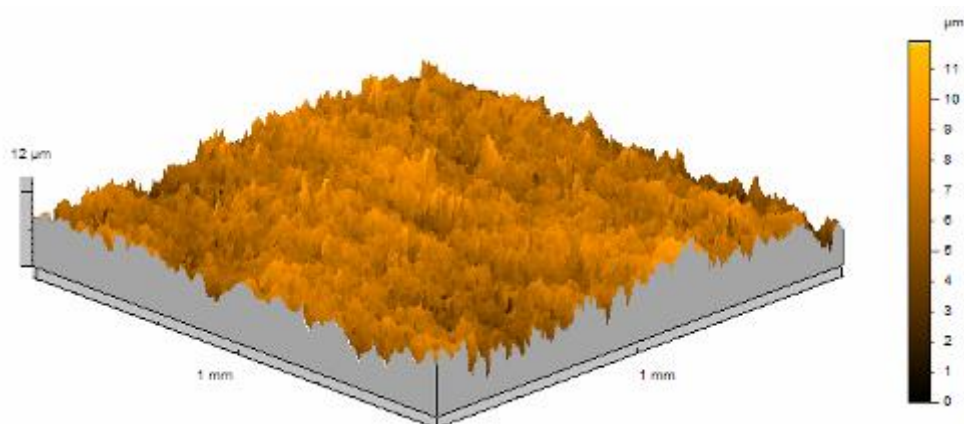
**Figura 22** - Perfil típico de amostras submetidas ao desgaste abrasivo no teste roda de borracha, carga 50,07 N, velocidade de 0,6 m/s, taxa de alimentação de areia de 1,12 g/s, tempo de 10 minutos, distância deslizada de 359 m.



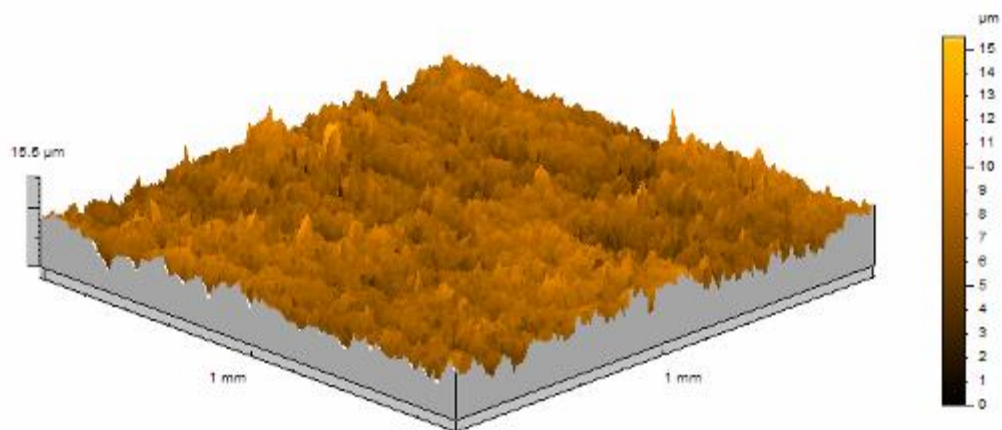
**Figura 23** - Perfil típico de amostras submetidas ao desgaste abrasivo no teste roda de borracha, carga 125,51 N, velocidade de 0,6 m/s, taxa de alimentação de abrasivo de 1,12 g/s, tempo de 10 minutos, distância deslizada de 359 m.

### 5.3 Topografia

A seguir apresenta-se a topografia da superfície desgastada com uma velocidade linear de 0,6 m/s e para as cargas de 50,1 N e 125,5 N. Nas **figuras 24 e 25** observam-se as marcas de desgaste deixadas pelas partículas abrasivas onde o mecanismo de desgaste sugerido é o microcorte e/ou microsulcamento da superfície.



**Figura 24** - Aspecto topográfico típico de amostras submetidas ao desgaste abrasivo no teste roda de borracha, carga 50 N, velocidade de 0,6m/s, taxa de alimentação de areia de 1,12 g/s, tempo de 10 minutos, distância deslizada de 359m.



**Figura 25** - Aspecto topográfico típico de amostras submetidas ao desgaste abrasivo no teste roda de borracha, carga 125,51 N, velocidade de 0,6m/s, taxa de alimentação de areia de 1.12g/s, tempo de 10 minutos, distância deslizada de 359m.

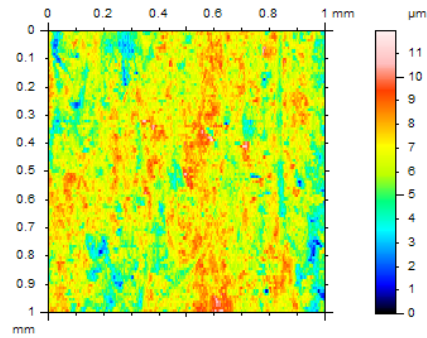
A **figura 26** apresenta os parâmetros de rugosidade da região desgastada para as cargas de 50,1 N e 125,5 N. Observa-se que o Ra e o Rq das superfícies desgastadas com carga aplicada de 50,1 N e 125,5 N são semelhantes. Entretanto a profundidade máxima dos riscos na região de desgaste foi maior na carga de 125,5 N, isto é, 14 μm contra 10,8 μm para a carga de 50,1 N. Os coeficientes de assimetria (Ssk) e de curtose (Sku) são usados para diferenciar os perfis. O primeiro indica a presença de picos altos e vales rasos ( $Ssk > 0$ ) ou picos baixos e vales profundos ( $Ssk < 0$ ). No caso de picos e vales com mesma magnitude o valor da assimetria é zero (Gadelmawla e colaboradores, 2002). Os valores encontrados neste trabalho indicam a presença de picos baixos e vales profundos, principalmente na menor carga aplicada. Para a maior carga o valor da assimetria mesmo negativo é próximo de zero. Os valores de curtose para as duas cargas foram semelhantes ( $Sku > 3$ ) e indicam uma centralização da distribuição da função de densidade probabilidade das alturas, isto é, isto é, o tamanho dos diversos picos ou vales apresenta valores próximos da média.



#### Amplitude Parameters

Sa = 0.999  $\mu\text{m}$   
Sq = 1.28  $\mu\text{m}$   
Sp = 5.49  $\mu\text{m}$   
Sv = 6.47  $\mu\text{m}$   
St = 12  $\mu\text{m}$   
Ssk = -0.449  
Sku = 3.69  
Sz = 10.8  $\mu\text{m}$

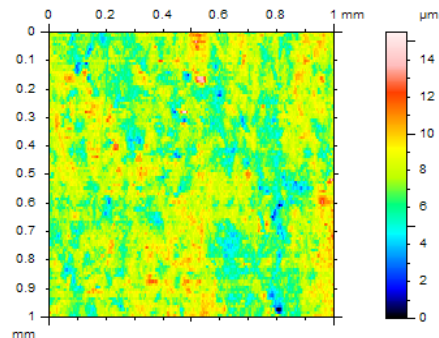
50.1 N



#### Amplitude Parameters

Sa = 1.07  $\mu\text{m}$   
Sq = 1.37  $\mu\text{m}$   
Sp = 8.06  $\mu\text{m}$   
Sv = 7.45  $\mu\text{m}$   
St = 15.5  $\mu\text{m}$   
Ssk = -0.0998  
Sku = 3.74  
Sz = 14  $\mu\text{m}$

125.5 N

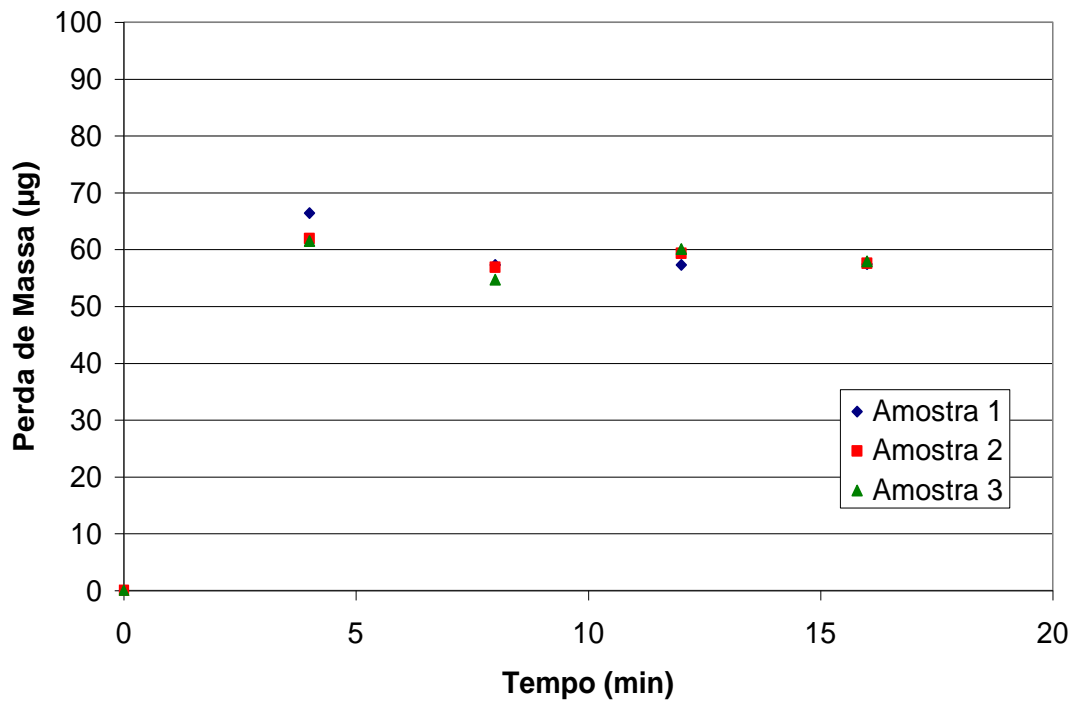


**Figura 26** - Parâmetros de rugosidade da região desgastada para as cargas de 50,1 N e 125,5 N, respectivamente.

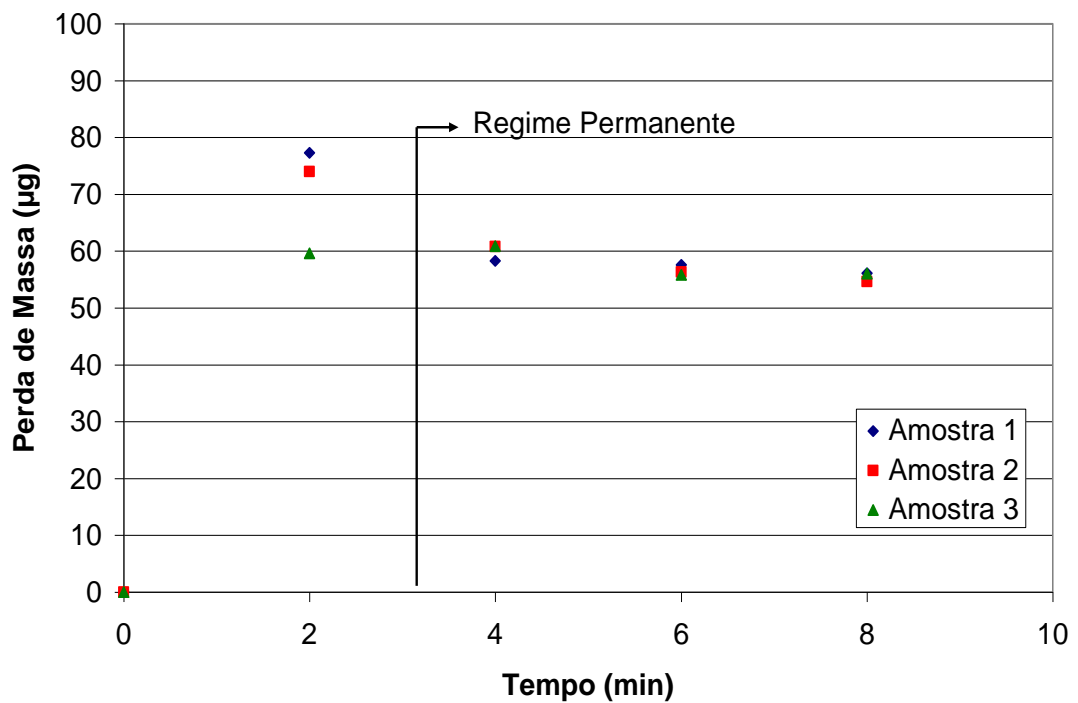
## 5.4 Efeito da Velocidade

Para verificar o efeito da velocidade de deslizamento com a taxa de desgaste fixou-se uma carga de 100,5 N e a vazão de areia na calha ( $W_c$ ) em 1,12 g/s. Variou-se a velocidade de deslizamento em 0,3; 0,6; 0,9 e 1,2 m/s ajustando o inversor de frequência na frequência relacionada, e os tempos relativos aos incrementos de 71,8 m foram variados de acordo com a velocidade de deslizamento.

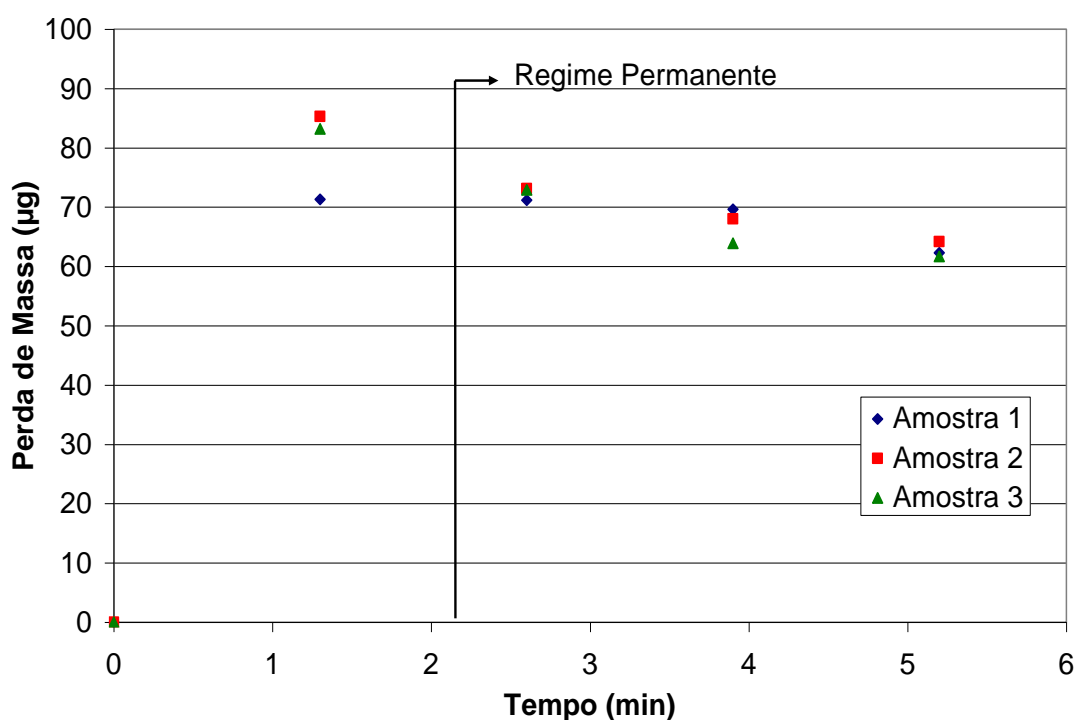
Os gráficos das **figuras 27 a 30** mostram a perda de massa instantânea pelo tempo em 3 amostras, onde a carga foi fixada em 100,5 N e a velocidade de deslizamento variada.



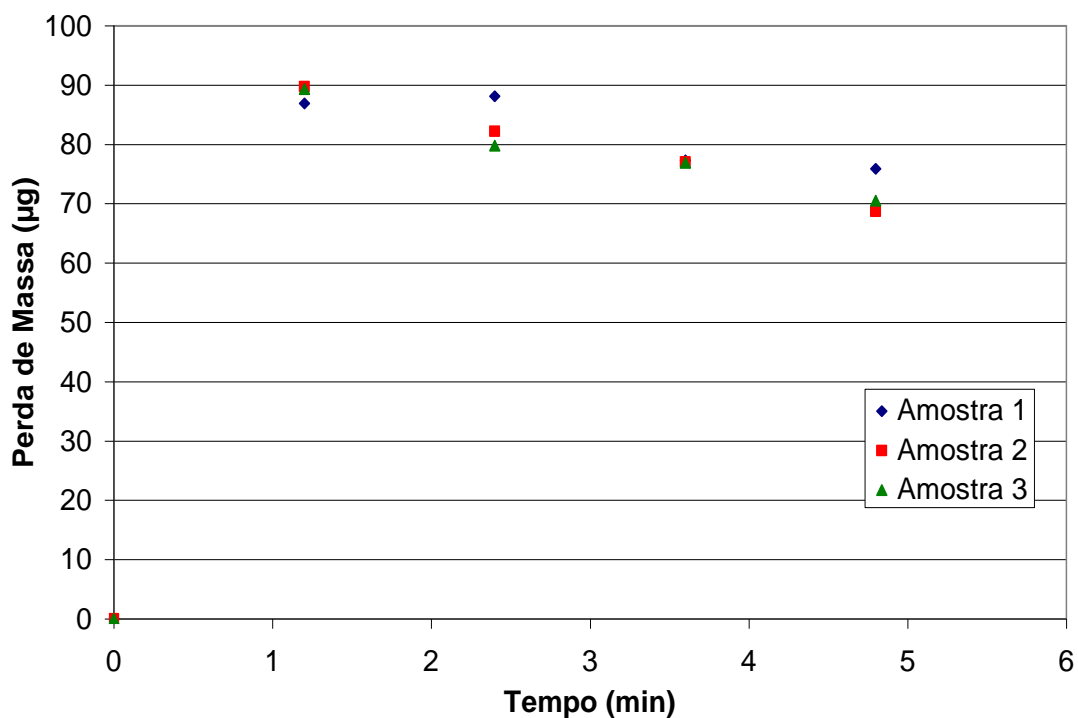
**Figura 27** - Gráfico da variação da perda de massa com o tempo para velocidade de deslizamento de 0,3 m/s.



**Figura 28** - Gráfico da variação da perda de massa com o tempo para velocidade de deslizamento de 0,6 m/s.

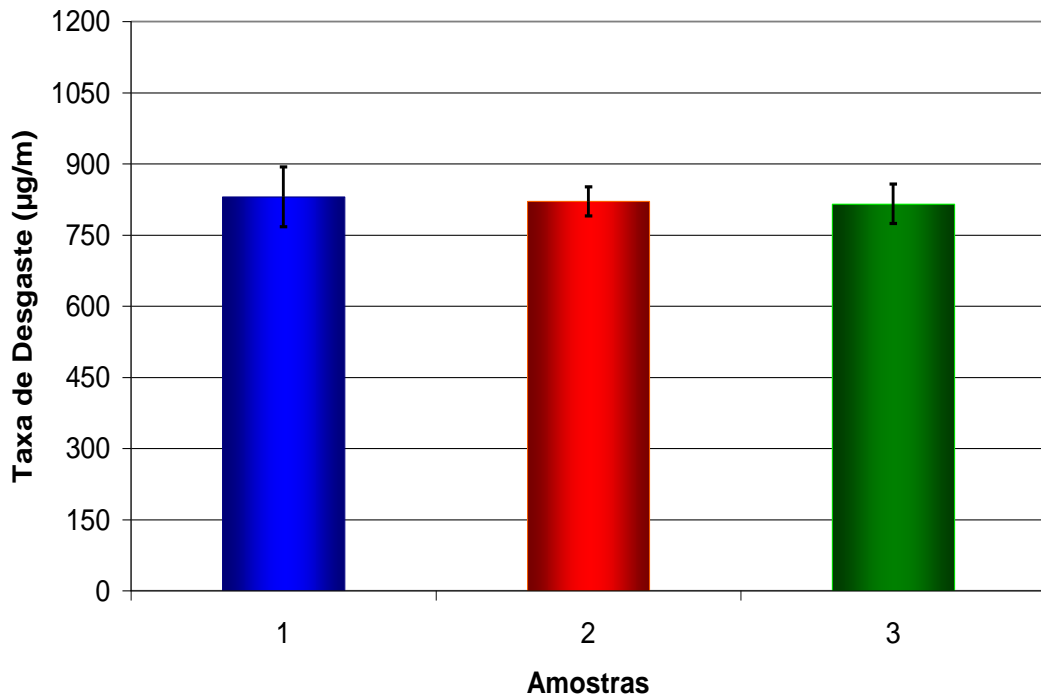


**Figura 29** - Gráfico da variação da perda de massa com o tempo para velocidade de deslizamento de 0,9 m/s.

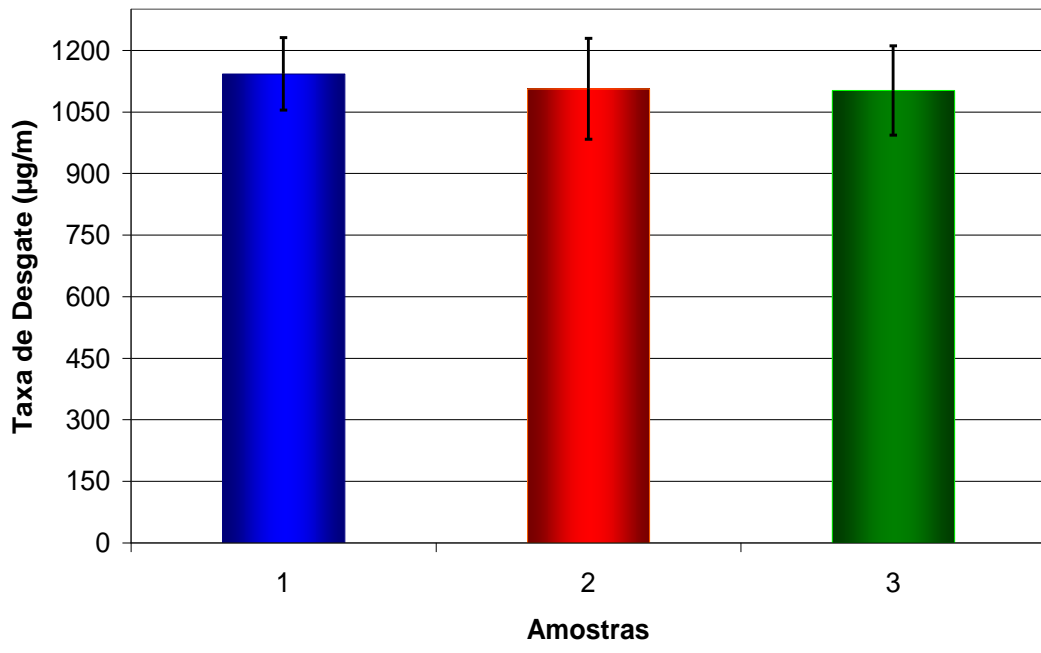


**Figura 30** - Gráfico da variação da perda de massa com o tempo para velocidade de deslizamento de 1,2 m/s.

Os gráficos das **figuras 31 e 32** mostram a taxa de desgaste das amostras ensaiadas com velocidade de deslizamento de 0,3 m/s e 1,2 m/s respectivamente. Para diferentes amostras observa-se a baixa variação na taxa de desgaste.

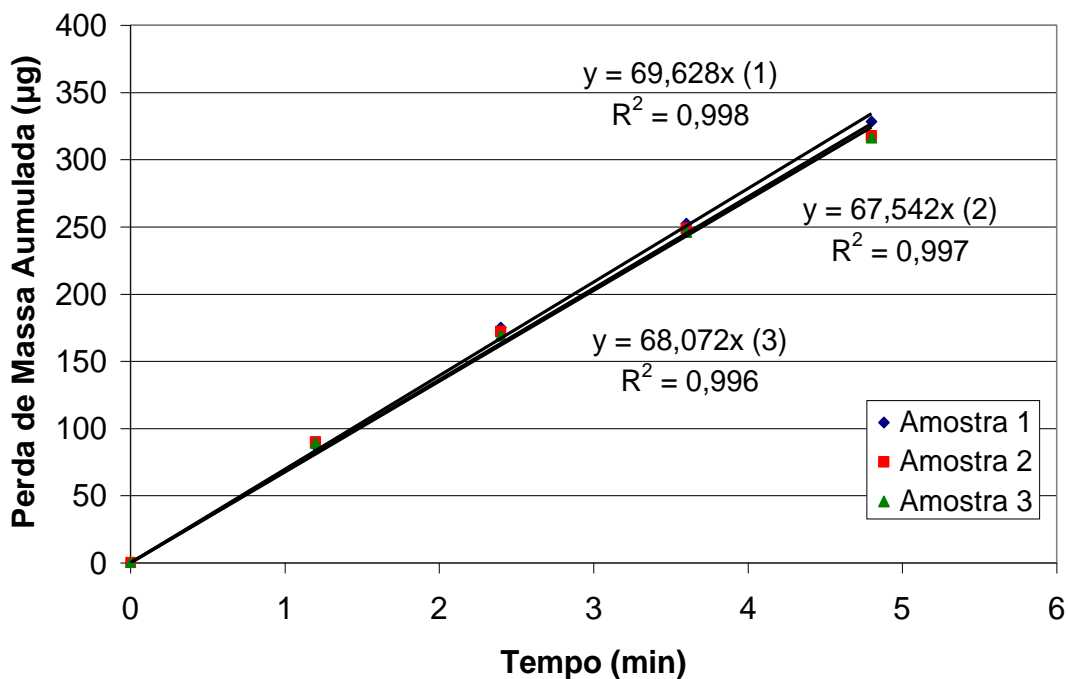


**Figura 31** - Gráfico das amostras carregadas com 100,5 N, ensaiadas com uma velocidade de deslizamento de 0,3 m/s.



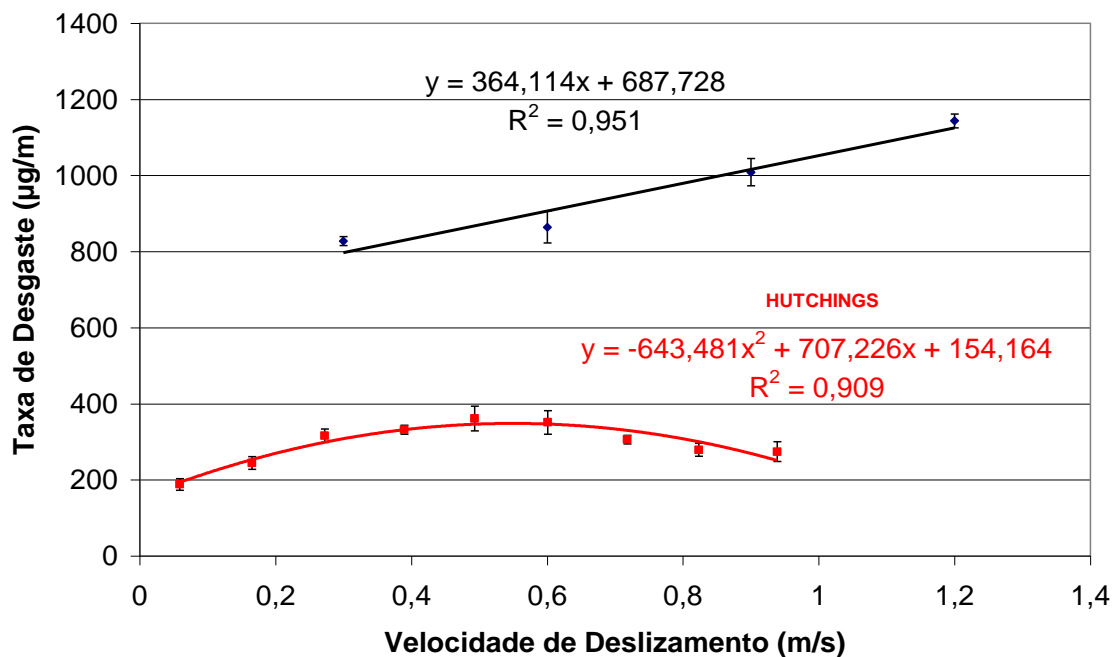
**Figura 32** - Gráfico das amostras carregadas com 100,5 N, ensaiadas com uma velocidade de deslizamento de 1,2 m/s.

Na **figura 33** observa-se uma linearidade da perda de massa acumulada com o tempo para as três amostras.



**Figura 33** - Gráfico da perda de massa acumulada com o tempo para uma carga de 100,5 N e velocidade de deslizamento de 1,2 m/s.

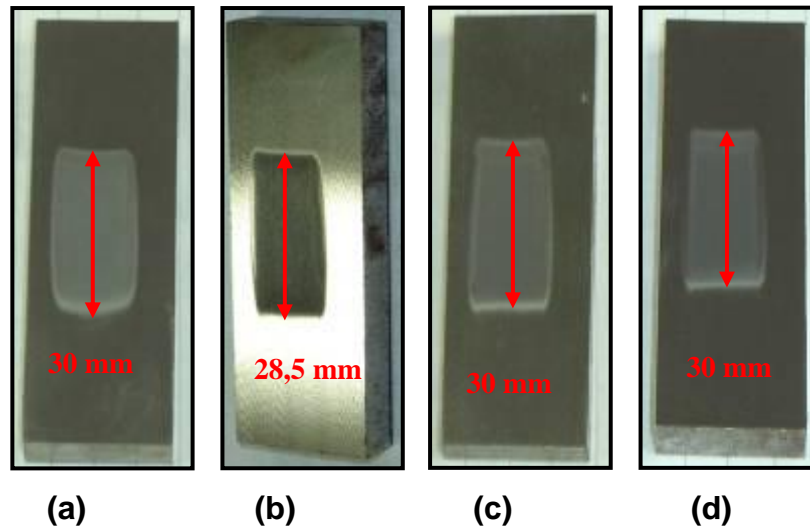
O gráfico da **figura 34** mostra-se uma comparação do resultado dos ensaios deste trabalho com o dos experimentos de Hutchings e Stevenson (1996).



**Figura 34** – Gráfico da velocidade de deslizamento pela taxa de desgaste: relação de linearidade encontrada na variação de velocidade.

A dependência da taxa de desgaste sobre a velocidade de deslizamento pode ser explicada pela variação da propriedade da borracha com a taxa de tensão e temperatura, pois quando se atinge altas velocidades a temperatura do corpo de prova aumenta juntamente com a da borracha deixando-a mais macia (Hutchings e Stevenson,1996). Portanto a taxa da tensão associada com a indentação dos abrasivos na roda será menor em altas velocidades, assim podemos observar que a diferença nos resultados dos dois experimentos teve influência significativa devido à variação de seus parâmetros. No experimento de Hutchings e Stevenson (1996), foi usado um corpo de prova com dimensões de 25,4x28x10, que significa uma diminuição de aproximadamente 2,6 vezes em volume sobre a amostra utilizada nesse trabalho. Isso adicionado com a diferença granulométrica do abrasivo dos dois trabalhos e a reutilização da roda de borracha após os ensaios feitos por Stelzer (2005), provavelmente pode ter influenciado na taxa de desgaste.

Observamos também na **figura 35** que a marca de desgaste não foi alterada com a variação da velocidade de deslizamento com carga fixa de 100,5 N, aonde se pode concluir que apenas a variação da carga normal tem influência no comprimento da marca de desgaste.



**Figura 35** - Marcas de desgaste com carga fixa de 100,5 N e variando a velocidade de deslizamento: (a) 0,3 m/s; (b) 0,6 m/s; (c) 0,9 m/s; (d) 1,2 m/s.

### 5.5 Determinação do Fator de Empacotamento (f)

O fator de empacotamento (f) é a densidade da camada de abrasivo na interface do corpo de prova com a borda de borracha, e é determinada pela **equação 3** (Hutchings e Stevenson, 1996):

$$f = \frac{Wc}{v.D.b.\rho} \quad (3)$$

onde,

$Wc$  = Vazão de abrasivo da calha [g/s];

$v$  = velocidade de deslizamento [m/s];

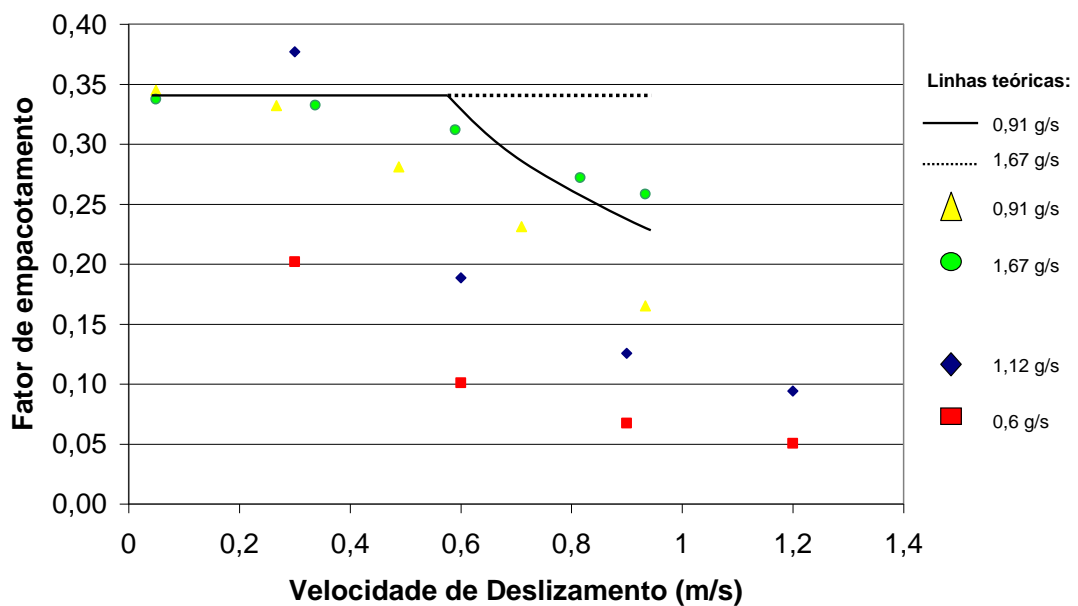
$D$  = diâmetro da partícula [mm];

$b$  = espessura da borda de borracha [mm];

$\rho$  = densidade do material da partícula [g/cm<sup>2</sup>].

O gráfico da **figura 36** mostra o fator de empacotamento diminuindo com o aumento da velocidade de deslizamento, os pontos estão ilustrados em azul e vermelho e

apresentam vazão de calha de 1,12 e 0,6 g/s respectivamente. Os resultados obtidos por Hutchings e Stevenson (1996), estão representados pelos pontos amarelo e verde e apresentam vazão da calha de 0,91 e 1,67 g/s respectivamente, mostra também suas linhas teóricas. Esses pontos foram ilustrados pela projeção do gráfico da literatura usando o programa AutoCad. Observa-se uma mesma tendência de queda do fator de empacotamento com o aumento da velocidade de deslizamento.



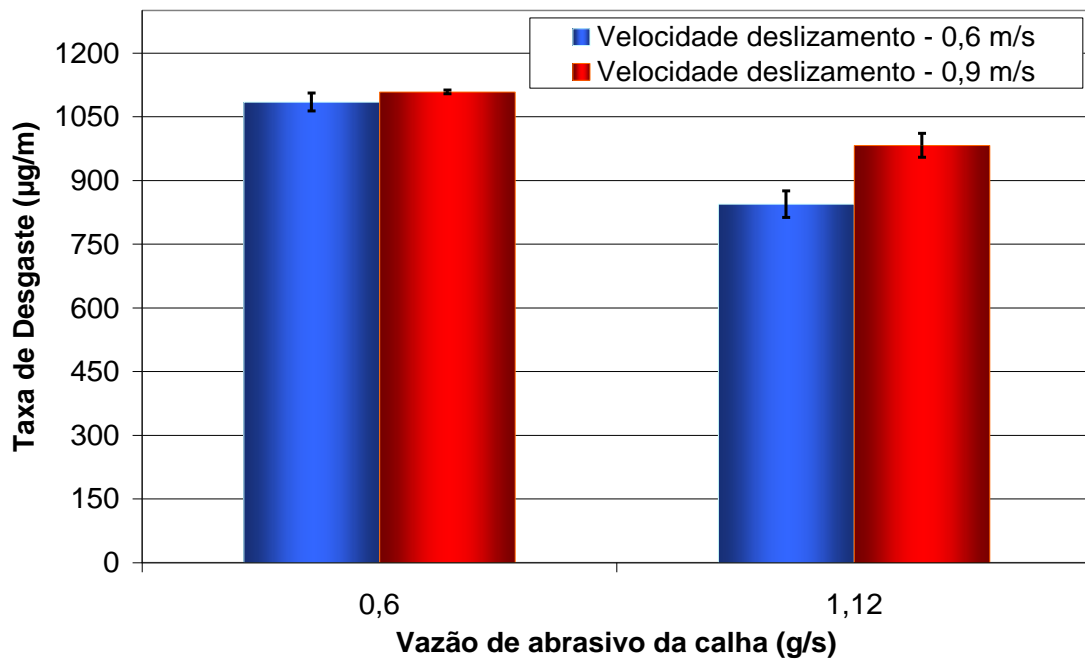
**Figura 36** - Efeito da velocidade de deslizamento no fator de empacotamento para diferentes vazões da calha. As linhas teóricas e as vazões da calha de 0,91 e 1,67 g/s foram obtidas por Hutchings e Stevenson (1996).

### 5.6 Efeito da Variação da Vazão da Calha na Taxa de Desgaste

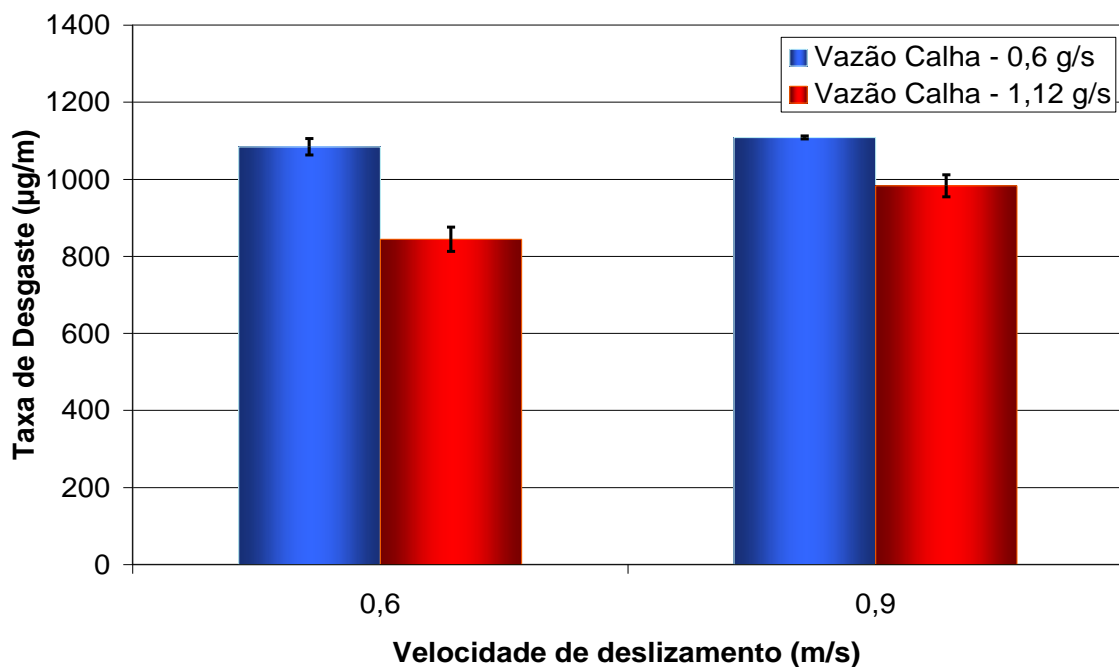
Como forma de dados experimentais, variou-se a vazão de abrasivo na calha mantendo a carga em 100,5 N e variando a velocidade de deslizamento em 0,6 e 0,9 m/s. No gráfico da **figura 37** observa-se que a variação da taxa de desgaste com a vazão de abrasivo da calha para uma carga de 100,5 N. Para a vazão da calha de 0,6 g/s houve uma pequena variação na taxa de desgaste relacionada às velocidades de deslizamento de 0,6 e 0,9 m/s. Já para a vazão da calha de 1,12 g/s essa variação foi maior. Isso pode ser explicado analisando o gráfico (**figura 38**), onde a taxa de desgaste foi praticamente constante com uma mesma vazão da



calha de 0,6 g/s para velocidade de deslizamento de 0,6 e 0,9 m/s, o que não acontece para vazão da calha de 1,12 g/s.



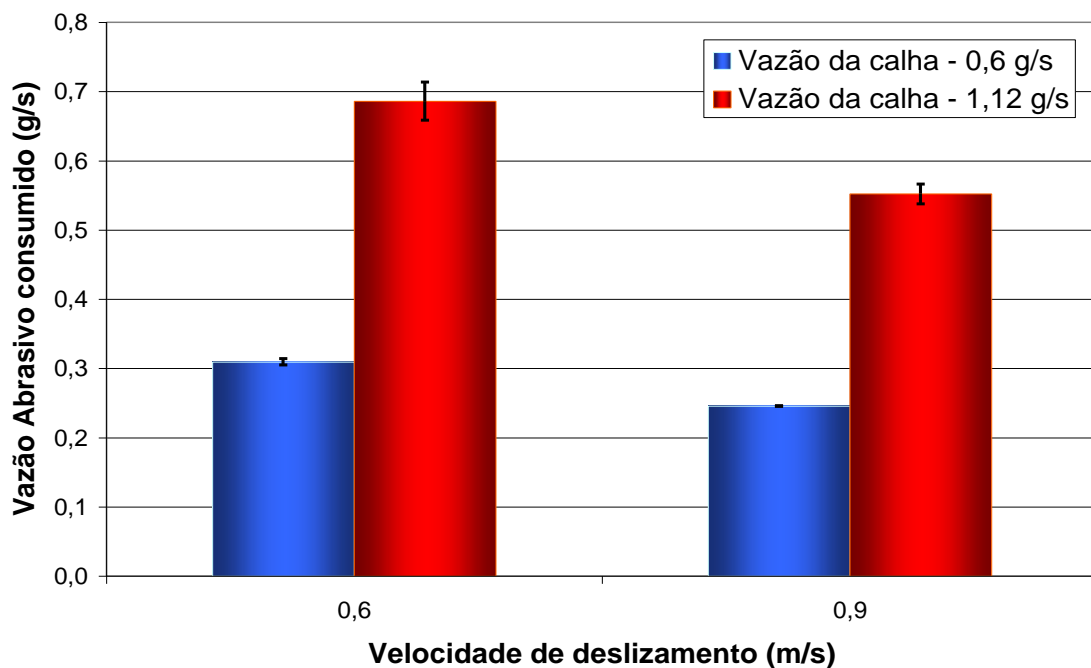
**Figura 37** – Gráfico da relação da taxa de desgaste com a vazão de abrasivo consumido.



**Figura 38** - Gráfico da relação da taxa de desgaste com a velocidade de deslizamento para carga de 100,5 N.

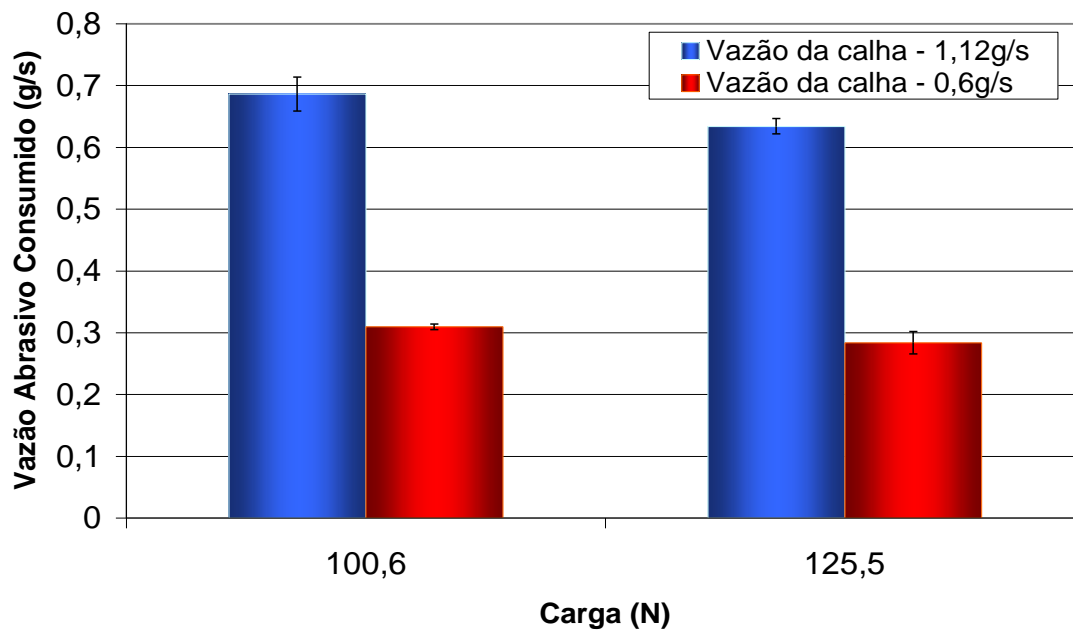
Observando-se o gráfico da **figura 39** pode-se explicar a queda da taxa de desgaste observada no gráfico da **figura 38** onde houve uma menor taxa de desgaste para

uma maior vazão de abrasivo da calha. Isso pode ter ocorrido devido ao aumento do fator de empacotamento. Pois para vazão da calha de 1,12 g/s houve um grande aumento da vazão de abrasivo consumido em relação à vazão da calha de 0,6 g/s, como se pode observar, e conseqüentemente um aumento da densidade das partículas na interface do corpo de prova e da borracha, com isso as partículas abrasivas desgastam entre si diminuindo a taxa de desgaste.

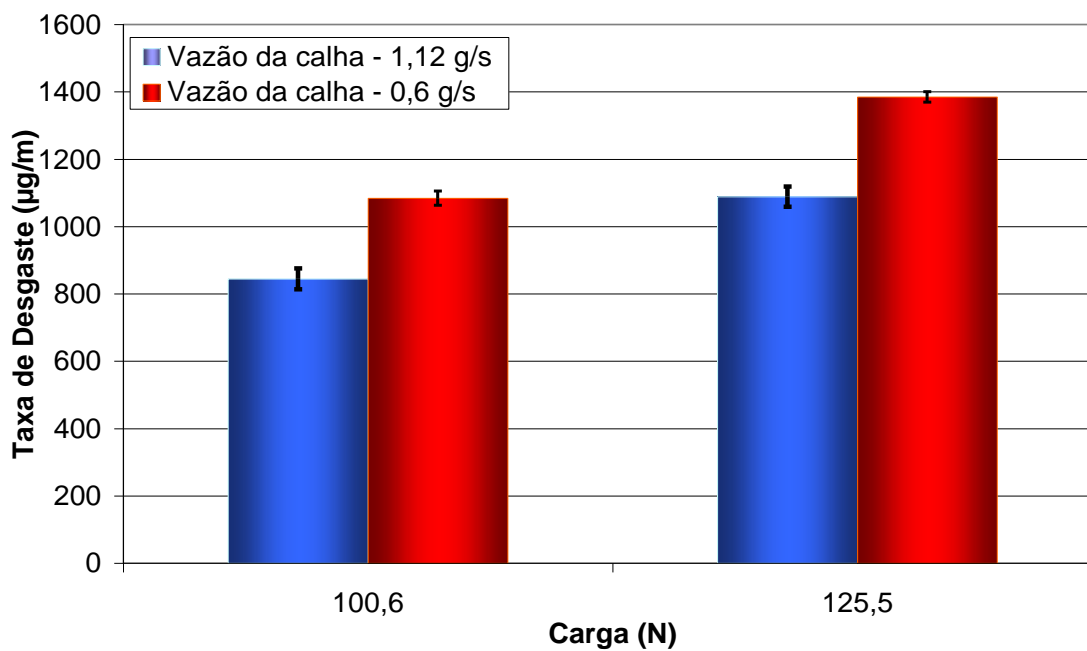


**Figura 39** - Gráfico da relação da vazão de abrasivo consumido com a velocidade de deslizamento para uma carga de 100,5 N.

Os gráficos das **figuras 40 e 41** mostram a relação da carga com a vazão de abrasivo consumido e com a taxa de desgaste respectivamente para uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s. Observa-se na **figura 40** que quando a carga foi aumentada diminuiu-se a vazão de abrasivo consumido e na **figura 41** quando se aumenta a carga aumenta-se a taxa de desgaste.

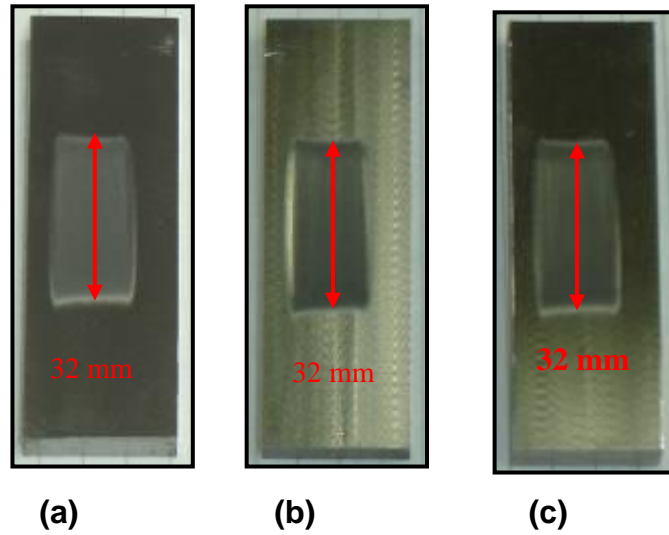


**Figura 40** - Gráfico da relação da vazão de abrasivo consumido com a variação da carga para uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s.



**Figura 41** - Gráfico da relação da vazão de abrasivo consumido com a variação da carga para uma velocidade de deslizamento de 0,6 m/s.

As figuras **42a**, **42b** e **42c** mostram as marcas de desgaste para uma vazão de abrasivo da calha de 0,6 g/s variando a velocidade de deslizamento e a carga.



**Figura 42** - Marca de desgaste com velocidade fixa, fluxo de areia em 12 rpm, variando a carga: (a) 0,6 m/s; 100,56 N; (b) 0,6 m/s; 125,51 N; (c) 0,9 m/s; 125,51 N.

## 6 CONCLUSÕES

- A taxa de desgaste abrasivo apresentou um comportamento linear com a variação da carga e da velocidade. Esta tendência confere com a observada na literatura.
- A literatura sugere que a propriedade mecânica da borracha pode ser alterada pelo aquecimento durante os testes afetando a linearidade do efeito da velocidade de deslizamento na taxa de desgaste. O maior volume das amostras deste trabalho em relação as amostras da literatura e a diferença do tamanho de grão do abrasivo utilizado neste trabalho com o utilizado pela literatura podem justificar a diferença nos resultados.
- As diferenças entre os valores da taxa de desgaste deste trabalho e a literatura podem ser explicadas pela diferentes condições de teste, tais como: vazão de abrasivos da calha, tipo e tamanho de abrasivos e dimensões do corpo de prova.
- Não foi possível determinar a máxima vazão de abrasivo consumido ( $W_{lim}$ ) devido a limitação do equipamento.
- Observa-se uma tendência de queda do fator de empacotamento com o aumento da velocidade de deslizamento.
- Um menor fluxo de abrasivo da calha resulta no aumento da taxa de desgaste decorrente do acréscimo do fator de empacotamento (densidade de partículas) na região de contato entre o corpo de prova e a borda de borracha.

## **7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Variação da dureza da borracha;
- Aumento da vazão de abrasivo na calha, aumentando a potencia de rotação do motor.
- Aumento da largura da calha modificando o braço de carga, adequando a célula de carga no funcionamento do equipamento.

## 8 BIBLIOGRAFIA

- Albertin, E., "58° Congresso Nacional Anual" RJ, 2003;
- ASTM G-65/94, "Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand / Rubber Wheel Apparatus. American Standard for Testing Materials", 1994.
- Catai, R. E., França, T.V., Füsse, R.Y., Bianchi, E.C., Aguiar, P.R., Silva, L.R., "A influência dos mecanismos de desgaste abrasivo no processo tribológico dos materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos", 2004.
- DIN 50320: Verschleiß - Begriffe, Analyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. Beuth Verlag, Berlin 1979.
- França, T. V., Catai, R. E., Füsse, R.Y., Bianchi, E.C., Aguiar, P.R., Silva, L.R., "A influência da carga aplicada e do tamanho do grão abrasivo no desgaste de materiais", 2004.
- Gadelmawla, E.S., Koura, M.M., Maksoud, T.M.A., Elewa, I.M., Soliman H.H., "Roughness Parameters", Wear, vol. 343-434p, 2002.
- Hutchings, I. M., Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, USA, 1992.
- Rabinowicz, E., "Surface energy effects em sliding phenomena". Surface Laboratory, Dept. of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1966.
- Stelzer, E. G., "Abrasômetro do Tipo Roda de Borracha Horizontal: Finalização da Construção e Primeiros Testes", 2005.
- Stevenson, A.N.J., Hutchings I.M., "Development of the dry sand/rubber wheel", 1996;
- Suski, A.C., "Estudo do efeito de tratamentos e revestimentos superficiais na vida de ferramentas de conformação mecânica a frio", 2004;
- Tottola, R. "Construção de uma Máquina de Ensaio de Desgaste Abrasivo: Abrasômetro do Tipo Roda de Borracha", 2003.
- Trezona, R.I., Allsopp, D. N., Hutchings, I.M., "Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test", 1999.